

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie des Procédés Industriels

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — مكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Thème

*Contribution à l'étude, par  
classe granulométrique, des  
aérosols particulaires et des  
métaux lourds qui leurs sont  
associés à Alger.*



Proposé par  
Pr. R. KERBACHI

Réalisé par  
N. HATEM

Dirigé par  
Pr. R. KERBACHI  
M<sup>lle</sup> N. OUCHER

Jury :

S. BOUCHTAOUI  
Pr. R. KERBACHI  
N. OUCHER  
Y. D-ZOUGHLACHE  
- A. DJENET  
- Y. KERCHICHE

ENP  
ENP  
ENP  
ENP  
EMP  
ECFERAL

Présidente  
Promoteur  
Co-promotrice  
Examinatrice  
Invité  
Invité

## Résumé

Cette étude porte sur l'évaluation de la pollution de l'air par les différentes classes granulométriques de l'aérosol particulaire, ainsi que sur les métaux lourds qui leur sont associés.

L'étude montre que, Les teneurs moyennes des PM-10, PM-2,5 et PM-1 s'élèvent respectivement à 80,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 45,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 28,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La fraction respirable (PM-2,5) constitue 56% de la masse des PM-10. L'analyse des métaux lourds (Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd) effectuée sur les différentes classes granulométriques révèle que les métaux de la croûte terrestre (Fe, Mn) se retrouve le plus dans la classe de granulométrie 3 – 10 $\mu\text{m}$ . Les métaux lourds les plus toxiques (Pb, Cd, Co) sont, par contre, distribués majoritairement dans la fraction fine de diamètre inférieur à 3  $\mu\text{m}$ .

Mots clés : aérosol particulaire, classes granulométriques, métaux lourds.

## **Summary**

This study is about the assessment of the air pollution by different size ranges of particles aerosol, and about the heavy metals that are associated to them.

The survey shows that The middle contents of the PM-10, PM-2.5 and PM-1 rise respectively to 80.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 45.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and 28.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The breathable fraction (PM-2,5) constitute 56% of the mass of the PM-10. The heavy metal analysis (Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co and Cd), done on the different size fractions, reveals that the metals of the terrestrial crust (Fe, Mn) exist more in the range of 3–10 $\mu\text{m}$ . The most poisonous heavy metals (Pb, Cd, Co) are, on the other hand, distributed in the majority in the fine fraction with diameter lower than 3  $\mu\text{m}$ .

Keys words: particles aerosol, size ranges, heavy metals.

ملخص :

مضمون هذه الدراسة هو تقييم تلوث الهواء بمختلف فئات الجزيئات الدقيقة، بالإضافة إلى المعادن الثقيلة التي تحويها معدلات الجزيئات PM-10, PM-2,5, PM-1 هي على الترتيب : 80,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 45,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  و 28,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . الفئة PM-2,5 تمثل 65% من كتلة PM-10

معايرة المعادن الثقيلة (Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co, Cd) في مختلف الفئات أظهرت أن المعادن (Fe, Mn) تتواجد بكمية أكبر في فئة من 3 إلى 10  $\mu\text{m}$ . المعادن الثقيلة السامة (Pb, Co, Cd) هي على العكس أكثر توجد في الفئة الدقيقة ذات قطر أقل من 3  $\mu\text{m}$ ..

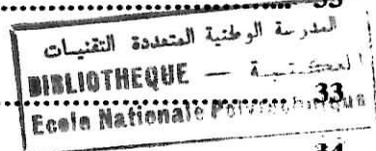
مفاتيح الكلمات : الجزيئات الدقيقة، صنف فئات، المعادن الثقيلة.

# SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE II : GENERALITE SUR LA POLLUTION INDUITE PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRE.....</b>	<b>3</b>
<b>II.1) Définitions.....</b>	<b>3</b>
<b>II.2) Formation des particules.....</b>	<b>5</b>
<b>II.3) Sources d'émission.....</b>	<b>6</b>
<b>II.3.1) Sources Naturelles.....</b>	<b>6</b>
<b>II.3.2) Sources artificielles.....</b>	<b>6</b>
<b>II.4) La fraction thoracique et la fraction alvéolaire.....</b>	<b>9</b>
<b>II.4.1) La fraction thoracique.....</b>	<b>9</b>
<b>II.4.2) La fraction alvéolaire.....</b>	<b>11</b>
<b>II.4.3) La fraction très fine.....</b>	<b>13</b>
<b>II.5) Morphologie et composition des particules.....</b>	<b>13</b>
<b>II.6) La dispersion des polluants.....</b>	<b>15</b>
<b>II.7) Les nuisances générées par les particules atmosphériques.....</b>	<b>16</b>
<b>II.7.1) Généralités.....</b>	<b>16</b>
<b>II.7.2) Effet des aérosols atmosphériques sur l'être humain.....</b>	<b>17</b>
<b>II.7.3) Effet sur les animaux.....</b>	<b>22</b>
<b>II.7.4) Effet sur la végétation.....</b>	<b>22</b>
<b>II.7.5) Effet sur les matériaux.....</b>	<b>23</b>
<b>II.7.6) Impact sur la visibilité.....</b>	<b>23</b>
<b>CHAPITRE III: POLLUTION DE L'AIR PAR LES METAUX LOURDS.....</b>	<b>24</b>
<b>III.1) Caractéristiques.....</b>	<b>25</b>
<b>III.2) Utilisation des métaux lourds.....</b>	<b>26</b>
<b>III.3) Les sources d'émission.....</b>	<b>29</b>
<b>III.4) La toxicité quelques métaux lourds.....</b>	<b>33</b>

**CHAPITRE IV : ASPECT SUR LES TECHNIQUES D'ECHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE DES PARTICULES..... 33**



**IV.1) Echantillonnage..... 33**

**IV.1.1) Prélèvement sans coupure granulométrique spécifique..... 34**

**IV.1.2) Prélèvement avec seuil de coupure granulométrique..... 35**

**IV.1.3) Prélèvement avec fractionnement granulométrique..... 36**

**IV.2) Filtres et membranes de rétention..... 37**

**IV.3) Analyse des particules en suspension..... 38**

**CHAPITRE V : METHODOLOGIE..... 39**

**V.1) Choix du site de prélèvement..... 39**

**V.2) Mode de prélèvement..... 39**

**V.3) Traitement et Analyse..... 43**

**CHAPITRE VI : LES RESULTATS ET INTERPRETATIONS..... 44**

**VI.1) Evaluation de la pollution des l'air par les aérosols particuliers..... 44**

**VI.1.1) Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en particules..... 44**

**VI.1.2) Relation entre PM-1, PM-2,5 et PM-10..... 53**

**VI.2) Comparaison des niveaux de pollutions atteintes avec les normes..... 57**

**VI.3) Etudes des métaux lourds associées aux PM-10..... 59**

**VI.4) Etudes des teneurs des métaux dans les classes granulométrique..... 62**

**CHAPITRE VII : CONCLUSION..... 70**

**BIBLIOGRAPHIE..... 72**

## I- INTRODUCTION

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

La pollution de l'air est un problème important du milieu où nous évoluons et de l'environnement global. Elle affecte aussi bien les pays développés que les pays en développement. Ce problème est devenu ces dernières années une préoccupation permanente pour les pouvoirs publics, les scientifiques et même la société civile. Des quantités croissantes de gaz et de particules potentiellement nuisibles sont émises dans l'atmosphère et entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement. A long terme, elles dégradent également les ressources naturelles et entravent le développement durable du pays. Parmi toutes les formes de pollution, la pollution par les particules en suspension requiert une attention particulière et ce en vertu de l'important rôle qu'elle joue dans la détérioration de la qualité de l'air.

Dans les études épidémiologiques, ainsi que dans celles d'évaluation de la pollution de l'air, ce sont essentiellement les particules PM-10 (particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10  $\mu\text{m}$ ) et les PM-2,5 (particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ ) qui sont retenues comme référence, car elles sont capables, lors de leur absorption dans un organisme, d'interactions avec les parois respiratoires. Un phénomène de diffusion dans la circulation sanguine ou de rétention dans les tissus respiratoires, est alors observé. Donc, du point de vue sanitaire, ces particules fines représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air [1].

La composition chimique de ces particules, due à leur mode de formation et aux substances adsorbées, représente un paramètre très important pour la détermination de leur toxicité. C'est pour cette raison qu'il est important de mieux connaître la distribution des composés chimiques en fonction de la taille des particules et donc, en fonction du degré de pénétration dans le tractus respiratoire.

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

L'utilisation de moteurs à combustion interne pour propulser les véhicules ainsi que la combustion de diesel, contribuent de façon marquée à la pollution de l'air par des particules très fines (PM-2,5). Les émissions dépendent surtout de la technologie des véhicules et des moteurs ainsi que des propriétés des carburants. La performance du dispositif de réduction des émissions d'un véhicule et d'un moteur peut être compromise si on n'utilise pas les carburants adéquats [2]. Il faut signaler qu'avec la diésélisation de plus en plus forte du parc automobile qu'on observe un peu partout dans le monde, y compris en Algérie, on se focalise de plus en plus sur l'observation et la mesure des PM-1 (particules très fines de diamètre inférieur à  $1\mu$ ). Cette classe de véhicules émet en effet majoritairement des particules très fines de faible granulométrie qui se déposent profondément dans les alvéoles du système respiratoire.

Plusieurs travaux ont étudié l'incidence des fines particules des aérosols atmosphériques sur la santé humaine, et il a été démontré que l'exposition à long terme à la pollution de l'air réduit la longévité et plus particulièrement, peut provoquer le développement de cancers du poumon et de maladies cardio-pulmonaires. Ces études prospectives approfondies ont démontré que, même à des différences relativement petites dans leurs concentrations, les taux de particules fines mesurés dans différents sites sont associés à des effets sur la santé[2].

En Algérie, le manque de données relatives à la qualité de l'air fait que l'impact des aérosols particulaires sur l'environnement est très mal connu. Les sources de pollution sont nombreuses et les nuisances sont déjà perçues, mais leur relation directe ou indirecte avec la dégradation de l'environnement n'est pas établie. A Alger par exemple, on estime le taux des asthmatiques à plus de 8% et certaines données de l'Institut National de la Santé Publique estiment à plus de 20% les consultations hospitalières ayant pour motif des problèmes d'insuffisances respiratoires. Des études récentes ont par ailleurs montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique [3,4,5]. Aussi et en continuité des travaux antérieurs effectués dans notre laboratoire sur les particules inhalables[6,7], nous nous proposons d'étudier dans ce travail, les particules fines et leur distribution granulométrique et d'évaluer les niveaux de pollution par les PM-10, PM-2,5 et PM-1 atteints à Alger en site influencé par le trafic routier. Nous, nous intéresserons par ailleurs à l'évaluation de certains métaux lourds associés à ces particules.

## **II) GENERALITES SUR LA POLLUTION INDUITE PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES :**

### **II.1) Définition :**

Les *particules* sont des entités solides ou liquides en suspension dans l'air, elles forment avec celui-ci un aérosol (gaz + particules en suspension). Elles peuvent avoir des compositions, densités, formes et dimensions très diverses selon leur mode de formation. Elles sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique, variant de 0.02  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  pour les particules dites atmosphériques (restant dans l'air). Ce diamètre est défini comme étant celui d'une hypothétique particule sphérique, de densité unitaire, qui aurait les mêmes caractéristiques aérodynamiques que la particule concernée [8].

Les particules fines en suspension dans l'atmosphère sont composées de sulfates, de nitrates, de sels d'ammonium, de composés organiques, de suie, de métaux ou de poussières du sol ou de toute combinaison de ces substances. Elles se manifestent sous forme de fumée, de vapeurs, de poussières, de cendres volantes (résultant de la combustion de poudre de charbon) ou de pollens. Les particules fines introduites dans l'atmosphère peuvent être transportées sur de longues distances par les vents. Les particules de 10 micromètres ou moins de diamètre (PM-10) pénètrent facilement dans les poumons. On appelle ces dernières «particules inhalables». Les particules de moins de 2,5 micromètres de diamètre (PM-2,5), certains auteurs parlent de particules de moins de 3 $\mu\text{m}$  (PM-3), peuvent pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire et sont appelées « particules respirables ou particules alvéolaires». Elles sont produites surtout par les moteurs à essence et diesel, les centrales électriques, les installations industrielles et les incinérateurs de déchets [1].

La construction, l'exploitation minière, la combustion de bois, la poussière des routes et du sol, constituent d'autres sources de particules respirables. Les réactions chimiques entre les polluants gazeux dans l'atmosphère constituent dans certains cas aussi une source de particules respirables[8].

Les sources des particules fines sont bien connues, mais pour arriver à formuler une stratégie de prévention, il est nécessaire de disposer de données précises sur les différentes sources émettrices et sur les processus par lesquels elles se forment dans l'atmosphère.

La variété des termes employés dans ce domaine traduit sa diversité : aérosol, fumées noires, poussières, brumes, suies, cendres volantes, particules, etc. Aussi, est il important de préciser la définition des termes utilisés dans l'étude des particules en suspension [8,9]:

- **Les aérosols** sont formés de particules solides ou liquides de dimension inférieure à 100 micromètres, les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms. C'est une suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable. Les aérosols correspondent donc aux plus fines particules,
- **Les "fumées noires"** (qualifiées comme telles d'après la méthode de prélèvement associée) sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5  $\mu\text{m}$ .
- **Les poussières** qui sont faites de particules solides inférieures à 75  $\mu\text{m}$ , les plus grosses retombant près de la source d'émission,
- Le terme de "**particules**" englobe en fait, l'ensemble des définitions précédentes, indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elle. C'est l'expression générique. Ce composant atmosphérique bien qu'éventuellement d'origine naturelle, reste pour le secteur d'étude le résultat principal d'une pollution d'origine anthropique.
- Les **suies** sont des particules de carbone et d'imbrûlés, que produisent les combustibles qui ne brûlent qu'incomplètement.
- **Les Brumes** : la brume est un terme appliqué à un ensemble de gouttelettes dans un gaz. Ces particules ont des dimensions supérieures à 1  $\mu\text{m}$ .
- Les **cendres volantes** : le mot «cendre» désigne le résidu solide subsistant après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes.

## **II.2) Formation des particules :**

Les particules atmosphériques recouvrent une large gamme de taille qu'on peut diviser en deux catégories [8,9]:

- **Les grosses particules** d'un diamètre supérieur à 10 micromètres. D'origine naturelle, elles sont principalement émises par des processus mécaniques et biologiques. Parmi les procédés mécaniques, citons la friction du vent sur des surfaces solides (érosion des sols) et les surfaces liquides (la formation d'embruns marins); parmi les biologiques, il y a notamment la dispersion des spores et des pollens. Ces particules sont arrêtées par les moyens de défense naturels de l'organisme.
- **Les PM-10** (particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 10 micromètres) peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et les procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore de réactions chimiques entre gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ions ammonium). De part leur finesse ces particules pénètrent dans l'appareil respiratoire. La catégorie des PM-10 est elle-même subdivisée en deux catégories selon que leur diamètre est supérieur ou inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$  :
  - La fraction thoracique englobant les particules de diamètre compris entre 2,5 et 10  $\mu\text{m}$ .
  - La fraction respirable ou alvéolaire de diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$  (PM-2,5).

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

La formation des particules fines s'opère en deux étapes, D'abord, par la formation de petits agrégats par réaction chimique ou par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules, ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde étape. Ainsi les grosses particules disparaissent dans l'atmosphère par sédimentation et les particules submicromiques s'agglomèrent pour donner des particules de diamètre supérieur. Il ne reste alors en suspension dans l'air que les particules de diamètre inférieur à environ 30  $\mu\text{m}$  [8].

La composition des particules est très variable. En effet, les grosses particules contiennent les éléments abondants de la couche terrestre tels que Al, Ca, Fe, K, Ti, Mn, Sr, Si et les sels marins, alors que les particules fines contiennent des sulfates, nitrates, ammonium résultant de la transformation dans l'air des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac, ainsi que du carbone, des composés organiques et des métaux, provenant entre autres des combustibles fossiles.

### **II. 3) Sources des particules :**

La majorité des particules provenant des activités humaines se classent dans la catégorie des particules en suspension totales (particules non sédimentables)

Les particules en suspension ont à la fois des sources *naturelles* et des sources *artificielles* :

#### **II.3.1) Sources naturelles [ 10,11]:**

Parmi les sources naturelles, on compte :

- La remise en suspension de la poussière du sol et des particules minérales emportées par le vent,
- L'activité volcanique,
- Les embruns marins et les matières biologiques, comme le pollen, les spores, les bactéries.
- La fumée des incendies de forêts.

#### **II.3.2) Sources artificielles :**

Les sources artificielles produisent à la fois des particules fines et des particules grossières. La poussière des champs agricoles, des routes et des chantiers de construction est essentiellement composée de particules grossières, tandis que les particules fines sont produites par la combustion de combustibles fossiles, le chauffage d'habitation, le trafic routier et d'autres sources.

Les sources artificielles (d'origine anthropogène) peuvent être *stationnaires* ou *mobiles*.

**a) Les sources stationnaires [12,13]:**

La plupart des activités industrielles sont génératrices de la matière particulaire dans l'air. Les industries responsables de l'émission particulaire sont principalement:

- L'industrie thermoénergétique.
- L'industrie sidérurgique.
- L'industrie des métaux non ferreux.
- L'industrie des matériaux de construction.
- L'industrie chimique.
- L'Incinération des déchets.

**b) Les sources mobiles : le transport routier**

Le parc automobile, dont le volume croît continuellement, constitue en milieu urbain la majeure source des particules [14].

En France, par exemple, la partie de la pollution particulaire due au trafic routier s'élève à 30% de l'ensemble des émissions particulaires [15]. On estime pour ce pays une teneur moyenne des particules de 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  imputable uniquement au trafic routier. [1]

La pollution issue de trafic routier comprend les émissions suivantes [16]:

- Les suies qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés issues d'une combustion incomplète. On les retrouve à des concentrations importantes dans l'échappement des véhicules diesel et à un degré moindre dans les véhicules à essence.
- Le carbone organique soluble constitué principalement d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont présents dans le carburant lui-même ou sont synthétisés par suite d'une combustion incomplète dans les moteurs à essence et diesel.
- Les métaux lourds, en particulier le plomb qui est issu du carburant lui-même.

La distribution des particules issues des véhicules montre un seul mode autour d'un diamètre moyen de 0,1-0,2  $\mu\text{m}$  [1], d'où l'importance de l'étude des PM-1 pour appréhender les émissions du trafic routier. C'est ainsi que dans les émissions diesel, la quasi-totalité du carbone élémentaire est contenu dans la fraction inférieure à 1  $\mu\text{m}$  [16, 17].

Les émissions des véhicules routiers dépendent de nombreux paramètres en rapport avec :

Les caractéristiques du véhicule : (voiture particulière, véhicule utilitaire léger, poids lourd, deux roues)

- . Le type de véhicule,
- . La motorisation et le carburant (essence, gazole, GPL-c, GNV),
- . Les équipements (pot catalytique, climatisation, type de réservoir, injection),
- . L'âge.

Les conditions d'utilisation :

- . Le parcours annuel,
- . La longueur moyenne d'un trajet,
- . Les réseaux empruntés (autoroute, route, urbain) qui conditionnent pour partie les vitesses de circulation,
- . Les conditions climatiques,
- . L'entretien du véhicule,
- . Le comportement de l'utilisateur (conduite sportive, charge du véhicule, etc.).

Les facteurs d'émission varient naturellement suivant le type du véhicule, le carburant et l'état du véhicule. Pour les véhicules catalysés et en bon état, les émissions s'élèvent à 0,1 g/véhicule/Km et 0,13 g/véhicule/Km respectivement pour les PM-2,5 et PM-10. Dans ces émissions à l'échappement les rapport PM-2,5 / PM-10 s'élève à 74%. Dans les PM-2,5, le carbone élémentaire et le carbone organique constitue 80% de la masse des particules [18].

En plus des particules émises à l'échappement, on trouve les particules routières, celle qui provient de :

- ✓ L'usure de la chaussée.
- ✓ L'usure des pneumatiques (noire de carbone, soufre, zinc).
- ✓ L'usure du moteur (fer, cuivre, nickel, chrome, etc.).

Ces résidus et débris sont constamment remis en suspension lors du passage des véhicules et par la turbulence induite.

Aux émissions du trafic routier, il faut naturellement ajouter les émissions de particules par les transports ferroviaires, aériens et maritimes qui souvent ne sont pas négligeables.

A l'ensemble de ces sources anthropiques d'émission des particules solides (sources stationnaires et mobiles), il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère, par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules. C'est surtout le cas des sulfates et nitrates issus respectivement du SO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub> [19].

Globalement, l'émission de particules d'origine anthropogénique s'élève à 269.10<sup>9</sup> kg/an, soit environ 12% du taux des particules naturelles. L'émission directe des particules anthropogéniques s'élève seulement à 1/3 du taux global, le reste résulte de la conversion gaz/particule [19]. Les particules peuvent être émises directement par une source ou se former dans l'atmosphère par transformations des émissions gazeuses. Leur composition varie selon l'endroit, la saison et les conditions météorologiques. Les particules atmosphériques ont selon la fraction granulométrique considérée des compositions chimiques différentes.

#### **II.4) La fraction thoracique et la fraction alvéolaire des particules fines :**

##### **II.4.1) La fraction thoracique ( 2.5µm<d<10µm) :**

Les particules de cette fraction sont d'origine naturelle (suspension de sable et de terre) et anthropique (particules issues de l'usure des pneus ou de pièces de métal, poussières de carrières ou de chantier, résidus de combustion, etc.). Les particules thoraciques sont des fragments d'autres plus importantes érodées par l'altération atmosphérique, les bris mécaniques ou la dissociation. Ces particules grossières, jouent un rôle dans la physicochimie de l'atmosphère par leur action catalytique et dans l'adsorption et l'absorption des polluants gazeux[20]. Elles restent peu nombreuses, mais leur masse est importante.

La fraction thoracique comprend généralement [21] :

a) **Les éléments chimiques** : On y retrouve principalement les composants suivants :

- Des matériaux terrigènes (oxydes d'aluminium, silice),
- Du carbone organique.
- Du carbone élémentaire.
- Des sulfates.
- Des nitrates et de l'ammonium.

Enfin, les particules thoraciques contiennent des éléments issus de l'érosion comme le fer, mais aussi des embruns marins.

#### **b) Les particules routières :**

Les particules routières sont constituées d'un mélange hétérogène issu de :

- L'usure de la chaussée (quartz, gypse...), particules arrachées par les pneus des véhicules, le sel et le sable utilisés dans certains pays en hiver.
- L'usure des pneumatiques (noir de carbone, calcium, soufre, zinc...) avec des tailles supérieures à 7  $\mu\text{m}$ . Ainsi, un pneu perd 10 % de sa masse au cours de sa durée de vie.
- Des garnitures de frein et d'embrayage qui contiennent une certaine quantité de fibres d'amiante.
- Des pots d'échappement (fer, plomb, carbone) avec aussi des oxydes métalliques comme les oxydes de calcium provenant des additifs des lubrifiants et l'oxyde d'aluminium provenant des supports des catalyseurs.

De plus, le trafic automobile émet surtout des halogénures, bromures et chlorures de plomb, volatils à la température du gaz à l'échappement, mais qui ensuite, par hydrolyse de ces sels, engendrent dans l'atmosphère des acides chlorhydriques (HCl) et bromhydriques (HBr) qui ne restent pas en général sous forme gazeuse mais se retrouvent adsorbés par les poussières atmosphériques. Ces rejets se présentent alors dans la gamme granulométrique des PM2.5.

#### **c) Les cendres volantes :**

Elles sont émises par la combustion du charbon (cendres volantes à surface lisse, silico-alumineuses) ou du fioul lourd (cendres volantes à aspect poreux ou spongieux, carbonées et soufrées, riches en vanadium). La concentration atmosphérique en cendres volantes est actuellement en Europe en très nette diminution.

#### **d) Les fibres d'amiante :**

L'amiante demeure présente partout dans l'atmosphère. Ainsi, différentes études ont montré que les concentrations en fibres d'amiante dans l'air des villes européennes n'étaient jamais nulles. Ceci à cause des opérations de flochage pour l'isolation des bâtiments très fréquentes jusque dans les années 70, qui ont engendré également des pollutions de l'air extérieur. Et aujourd'hui, ce sont les opérations de déflochage et de destruction de bâtiments qui peuvent être des sources de contamination. Parallèlement, l'usage d'amiante dans les freins d'automobile fut longtemps suspecté dans les immissions.

#### **II.4.2) La fraction des particules respirables ou alvéolaires ( $d < 2,5 \mu\text{m}$ ) [21] :**

##### **a) Présentation**

Ces particules jouent un rôle essentiel dans la physicochimie de l'atmosphère et elles ont toutes, directement ou indirectement, une origine commune qui peut être soit la nucléation homogène hétéromoléculaire, soit la condensation. C'est ainsi que, en nombre, la presque totalité des aérosols provenant de transformations gaz-particules, et notamment les sulfates, se trouve dans ce domaine de dimensions. Elles sont dites insédimentables car elles sont incapables de se déposer au sol sous l'effet de la gravitation (elles peuvent donc parcourir des distances plus importantes sous l'action des vents) et sont extrêmement nombreuses et difficiles à quantifier, d'autant plus qu'elles ont une masse relativement faible. Cette gamme granulométrique est essentiellement composée de suies et sont émises par le trafic routier. Une grande partie d'entre elles résulte des activités polluantes (moteurs diesel, suies, particules issues de la transformation chimique des gaz polluants en nitrates et sulfates, déchets de la combustion). En effet, le carbone est un sous-produit des gaz d'échappement et des fumées d'usine car tout foyer où la combustion reste incomplète, libère du carbone particulaire. Ainsi, les PM-2,5 proviennent des véhicules diesel (0,1 à 0,3  $\mu\text{m}$  médian), mais sont également constituées de composés organiques comme les HAP, substances mutagènes et cancérigènes.

##### **b) Les particules diesel**

Les moteurs diesel émettent des particules toxiques capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Ainsi, leur diamètre aérodynamique moyen est centré sur 0,1  $\mu\text{m}$  en sortie d'échappement. Le diesel dégage une pollution spécifique visible, des fumées noires et des suies constituées de particules de carbone et imprégnées de diverses substances, en particulier d'hydrocarbures. En effet, on observe au microscope électronique à transmission qu'elles sont constituées d'agglomérats de microsphères de carbone, sur lesquelles sont adsorbés les hydrocarbures et les autres espèces minérales. Ces agrégats peuvent être constitués de quelques éléments de grand diamètre à quelques milliers d'unités de petit diamètre.

Ainsi, les particules diesels sont principalement constituées :

- De résidus solides sous forme de suies,
- D'une partie insoluble constituée d'hydrocarbures imbrûlés issus de la combustion incomplète du gazole et de l'huile,
- D'une fraction soluble (sulfates et dérivés soufrés).

Ce sont en fait, des particules solides avec une structure fractale qui s'apparente à une éponge. Des mesures, faites en France en un site proche du trafic routier, révèlent que 75% du carbone suie se trouve dans la fraction granulométrique inférieure à 1  $\mu\text{m}$ , le reste étant associé à des particules plus grossières. Ce qui démontre bien l'importance et la spécificité de la pollution diesel [21].

### **c) Les particules de soufre**

Il existe des particules secondaires issues des transformations de polluants primaires, comme les sulfatés, les nitrates et l'acide sulfurique. Le  $\text{SO}_2$  est souvent associé à des particules en suspension notamment des sulfates  $\text{SO}_4^-$  sous forme de sels ou d'acides. Les particules reliées aux oxydes de soufre et d'azote sont extrêmement hygroscopiques c'est-à-dire qu'elles ont une affinité avec l'eau. Une des propriétés des plus dangereuses des poussières est de fixer des molécules gazeuses irritantes ou toxiques présentes dans l'atmosphère (acide sulfureux, goudrons, gaz nitreux), ce qui augmente considérablement leur nocivité. Les particules servent donc de noyaux de condensation pour la vapeur d'eau.

### **d) Les métaux lourds**

Les poussières contenant des métaux lourds sont capables de contaminer les chaînes alimentaires. Les effets de ces polluants sont divers et dépendent de l'état chimique sous lequel on les rencontre (métal, oxyde, sel, organométallique). On y trouve par exemple le plomb issu de la transformation des composés plombés utilisés comme additif des supercarburants. Les types de métaux lourds rencontrés sont fonction des sources d'émissions. Par exemple, l'automobile émet principalement, du plomb (de moins en moins vrai avec la généralisation de l'essence sans plomb), du fer et du cuivre. Les usines d'incinération : zinc et cadmium...etc.

### **II.4.3) La fraction très fine PM-1 ( $d < 1 \mu\text{m}$ ) :**

La fraction des PM-1 est de plus en plus prise en considération car elle caractérise autant que les PM-2,5, sinon mieux, les émissions diesel. La majorité des HAP, certains métaux lourds et les microsues appartiennent à cette classe granulométrique.

#### **Les micros suies :**

Leur granulométrie est très largement inframicronique (inférieur à 0,1 micromètres), et elles sont émises par la combustion du fioul léger (moteurs diesel, chauffage domestique), de l'essence, du kérosène et du gaz. Elles sont essentiellement carbonées, mais peuvent contenir du soufre si le combustible dont elles sont issues en contient (fioul léger, par exemple). Certains pensent que leur concentration atmosphérique serait en augmentation, en rapport avec le trafic automobile. Elles sont les probables responsables de la reprise du noircissement des façades. Elles sont les plus dangereuses pour la santé humaine car elles sont susceptibles de pénétrer dans les alvéoles pulmonaires. Par ailleurs, elles contaminent les plus hautes couches atmosphériques et sont donc responsables d'une pollution globale. Les plus fines particules peuvent s'agréger aux plus importantes sous l'action des forces d'adhésion, de capillarité et de tension superficielle. Nous retiendrons que [21]:

- Près de 80 % des particules contenant du plomb sont inférieures à 2  $\mu\text{m}$ , ce qui confirme l'origine automobile de cette granulométrie,
- Environ 82 % des particules contenant des HAP ou étant génotoxiques ont un diamètre inférieur à 2  $\mu\text{m}$ , or ces éléments sont préoccupants pour la santé,
- Enfin, les particules contenant du fer ou du Mn sont davantage grossières, 60% d'entre elles faisant plus de 3,3  $\mu\text{m}$ .

### **II.5) Morphologie et composition chimique des particules atmosphériques selon les fractions granulométriques :**

Par micrographe on peut avoir des informations sur les caractéristiques des particules: forme, granulométrie, surface, texture ainsi que d'autres propriétés telles que l'aggrégation, l'homogénéité...etc. Une distinction entre deux classes de particules à base de carbone peut avoir lieu. La première est liée aux émissions de véhicules diesels, de couleur noire avec aucun contenu minéral majeur. Cette classe est due principalement à la

combustion incomplète dans les moteurs diesels. La deuxième est d'origine biologique tel que le pollen ou les spores.

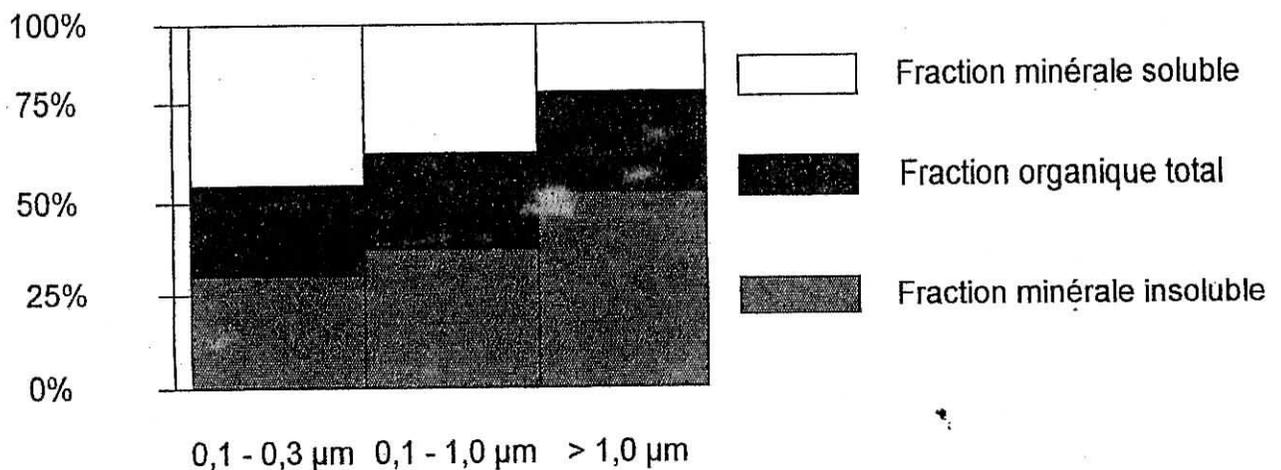
L'aérosol de particules est constitué de quatre fractions majeures :

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

La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules. Ainsi, la fraction insoluble augmente régulièrement quant la taille augmente. La fraction soluble diminue quand le diamètre augmente. L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante (Figure N° 1) [22].

La fraction *minérale* soluble contient principalement les aérosols secondaires, sulfates et nitrates provenant de la conversion du  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  ainsi que les ions chlorures et ammonium. La partie insoluble est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction *carbonée*, constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et des débris de matériaux organiques relargués par les activités humaines. Le carbone organique se retrouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbone [22]



**Figure1** : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille.

## **II.6) La dispersion des polluants [23]**

La dispersion des polluants émis dépend en priorité des conditions météorologiques. Cette dispersion s'effectue essentiellement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux. La concentration des particules, dans les basses couches de l'atmosphère, dépend avant tout de la turbulence atmosphérique mais aussi du vent et de la température.

### **II.6.1) La turbulence atmosphérique**

Ce sont les mouvements à petite échelle qui vont brasser la masse d'air et permettre la dilution des polluants. Les mouvements à plus grande échelle vont en assurer le transport. Plus la turbulence est importante, meilleure est la dispersion atmosphérique. Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc à de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution ( voir inversion thermique).

### **II.6.2) Le vent**

Il existe une relation évidente entre la vitesse du vent et les niveaux de concentrations de polluants. La dispersion des polluants augmente avec la vitesse et la turbulence du vent. Un vent faible favorise donc l'accumulation des polluants. A noter que la vitesse du vent augmente avec l'altitude.

### **II.6.3) La température**

Elle agit sur la chimie des polluants : le froid diminue la volatilité de certains gaz tandis que la chaleur estivale est favorable à la photochimie qu'on retrouve par exemple dans la conversion des SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> en sulfates et nitrates.

### **II.6.4) La stabilité et l'instabilité atmosphérique**

La stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère sont les facteurs principaux de la dispersion atmosphérique. Selon que l'atmosphère sera stable ou instable, la dilution des polluants sera faible ou importante. Une atmosphère est stable si une particule d'air, écartée de sa position d'équilibre, a tendance à y revenir ; instable dans le cas contraire. Si on élève une particule d'air d'une certaine altitude, elle va subir une chute de pression et donc une chute de

température. Si la particule d'air que l'on vient de soulever est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus lourde et donc redescendra à son niveau de départ, l'atmosphère est alors stable. L'atmosphère est instable lorsque la particule d'air subissant cette élévation est plus chaude et plus légère que le milieu environnant, elle a donc tendance à continuer son ascension. La stabilité va donc dépendre de la vitesse de croissance de la température avec l'altitude. Selon que l'air est saturé en vapeur d'eau ou non, les valeurs limites fixant la stabilité ou l'instabilité d'une atmosphère sont donc [23]:

- Air non saturé

Décroissance plus rapide que  $-1^{\circ}/100$  mètres = instabilité

Décroissance moins rapide que  $-1^{\circ}/100$  mètres = stabilité

- Air saturé

Décroissance plus rapide que  $-0.65^{\circ}/100$  mètres = instabilité

Décroissance moins rapide que  $-0.65^{\circ}/100$  mètres = stabilité.

## **II.7) Les nuisances générées par les particules atmosphériques :**

### **II.7.1) Généralités sur la pollution de l'air et la santé [24,25] :**

Chaque année, la pollution de l'air fait des milliers de victimes et elle est responsable d'affections graves : troubles respiratoires, asthme, affections pulmonaires obstructives chroniques, maladies cardio-vasculaires et cancer des poumons principalement. Selon les estimations de l'OMS: 3 millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5% des 55 millions de décès annuels dans le monde. Vu la marge d'incertitude des estimations, le nombre réel des décès annuels pourrait se situer entre 1,4 et 6 millions [24]. Au Canada, des études fédérales démontrent que plus de 5 000 décès prématurés par an peuvent être attribués à la pollution atmosphérique [25].

De nombreuses études mettent en évidence le lien direct qui existe entre les taux de mortalité et les concentrations journalières ambiantes de particules en suspension d'un diamètre inférieur à  $10 \mu\text{m}$ . Des concentrations élevées de particules peuvent faire diminuer sensiblement l'espérance de vie dans une communauté. L'exposition aux particules en suspension à l'intérieur des locaux augmente le risque d'infections respiratoires aiguës, l'une des causes principales de mortalité infantile et juvénile dans les pays en développement :

- Dans les pays d'Asie, entre un demi-million et un million de décès excédentaires sont dû chaque année à cette exposition.
- En Afrique sub-saharienne, le nombre de ces décès est estimé à 300-500 000 [24].

L'effet de la pollution de l'air dépend du niveau d'exposition et de la sensibilité de la population exposée. Les personnes qui souffrent de problèmes respiratoires tels que l'asthme, de même que les très jeunes enfants, les personnes âgées et les indigents, sont particulièrement menacés. La pollution atmosphérique affecte également la population active. Surtout à l'intérieur des locaux, la pollution peut entraîner jusqu'à 50 millions de cas d'affections respiratoires chroniques professionnelles chaque année, soit le tiers de toutes les maladies professionnelles. Ces maladies, qui sont répandues, affectent les gens pendant la période la plus active de leur vie sociale et économique. Elles sont largement évitables

## **II.7.2) Effets des aérosols atmosphériques sur l'être humain**

### **a) Cheminement des particules dans le système respiratoire [26]**

Les atteintes à la santé peuvent être dues à des particules ou molécules :

- Inhalées (voies respiratoire).
- Absorbées.(voies digestives).
- Contactées (peau, conjonctives, muqueuse).

L'**inhalation** cause ou aggrave des maladies de la sphère ORL (nez gorge oreilles), mais surtout broncho-pulmonaire ; par irritation des muqueuses des voies respiratoires.

L'**absorption** se fait par ingestion de toxiques contaminant l'eau et les aliments ; certaines pluies acides se sont trouvées chargées de métaux lourds ( p. ex. Pb, Mg, Al...etc.) qui avaient été libérés dans l'atmosphère par l'industrie et le trafic routier ; L'effet toxique potentiel de ces éléments porte sur la moelle osseuse, le système nerveux, les reins, la foie, le système endocrinien et cardio-vasculaire.

Le **contact** avec le revêtement cutané et muqueux conduit plus à des désagréments qu'à des maladies, si l'on s'en tient à la liste des polluants considérés ici.

Les particules en suspension les plus grosses, de diamètre aérodynamique moyen supérieur à 10  $\mu\text{m}$  sont retenues par filtration et impaction au niveau du nez et des voies aériennes supérieures ; elles en seront éliminées et éventuellement dégluties. Dans ce cas, elles seront susceptibles de contribuer, selon leur nature, à une absorption digestive non négligeable de facteurs toxiques et par conséquent, à des effets extra-pulmonaires. Les particules de diamètre aérodynamique moyen compris entre 2 et 10  $\mu\text{m}$  se déposent selon d'autres mécanismes (impaction et interception) au niveau de l'arbre trachéobronchique d'où

elles pourront, en général, être éliminées par clearance mucociliaire et la toux. Au niveau des voies aériennes terminales et des alvéoles, les particules les plus petites ( $< 3 \mu\text{m}$ ) se déposent en partie par sédimentation. Elles peuvent être phagocytées par les macrophages.

Le tableau N°1 résume le mode et le site de dépôt des particules dans le système respiratoire[27].

Taille des particules	Endroit de l'appareil respiratoire où le dépôt est le plus probable	Mode de dépôt
5-30 $\mu\text{m}$	Zone nasopharyngienne (nez et gorge)	Impaction
1-5 $\mu\text{m}$	Zone de trachée, des bronches et des bronchioles (voies aériennes grandes ramifications des poumons)	Sédimentation
1 $\mu\text{m}$ ou moins	Zone alvéolaire (petites ramifications et zone d'échange d'air)	Diffusion

**Tableau N°1:** Mode et site de dépôt des particules dans l'appareil respiratoires [27].

#### b) Effets à court et long terme des aérosols particulaires :

Dans un contexte épidémiologique, le défi d'identifier les effets de la pollution de l'air sur la santé a pu être relevé grâce à une approche du problème prenant en compte deux angles très différents : des études de séries chronologiques, dans lesquelles des changements de court terme dans le taux de décès quotidien (ou des admissions à l'hôpital) sont comparés avec des changements à court terme concernant la pollution de l'air ambiant. Des études montrent une fréquence accrue de maladies cardio-pulmonaires et de décès associés à des taux plus élevés de pollution de l'air, et spécialement les niveaux de particules fines; ces résultats ont amené les responsables de la santé publique à affirmer l'existence d'une relation de cause à effet[2].

On résume en tableau n° 2 et 3 respectivement les effets à court et à long terme des PM-10 et PM-2,5.

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

**Tableau N°2 :** Résumé selon l'OMS des effets sur la santé, causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2,5 [28].

Effets chroniques	Valeurs moyennes annuelles	Changement par $10\mu\text{g}/\text{m}^3$	Référence
Mortalité	18-47 $\mu\text{g PM-10}/\text{m}^3$	+9%	[29]
Mortalité Décès cœur / poumons Décès cancers Poumons	11-29.6 $\mu\text{g PM-2.5}/\text{m}^3$	+14% +20% +20%	[29]
Mortalité Décès par maladies Cœur / poumons	9-33 $\mu\text{g PM-2.5}/\text{m}^3$	+6,9% +12,6%	[29]
Capacité vitale forcée	10-34 $\mu\text{g PM-10}/\text{m}^3$	-3,1%	[30]
Dyspnée Dyspnée travail léger Rhume allergique	10-34 $\mu\text{g PM-10}/\text{m}^3$	+25% +21% +10%	[31]
Infections des voies Respiratoires 12 mois écoulés, enfants  Toux à répétition au cours des 12 mois écoulés, enfants	10-33 $\mu\text{g PM-10}/\text{m}^3$	+26%  +54%	[32]
Bronchites 12 mois écoulés  Toux chronique, enfants	20-25 $\mu\text{g PM-2.5}/\text{m}^3$	+37%  +67%	[33]

**Tableau N°3 :** Résultats des études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM-2,5.

Des études épidémiologiques menées dans des conditions ambiantes très diversifiées, dans de nombreuses villes montrent que les effets suivants sont liés à la présence de fines particules dans l'air ambiant [34] :

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

On a établi que les enfants et les personnes souffrant d'asthmes ainsi que les personnes âgées sont particulièrement sensibles à une exposition aux particules.

Les concentrations moyennes ayant un effet sont résumées en tableau N°4.

Effets sur la santé	Etendue des valeurs observées dans les diverses études quant à la teneur moyenne sur 24h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
Absentéisme scolaire	PM-10 :	40,9 – 50,9
Santé pulmonaire et fonction respiratoire	PM-2,5 :	0,5 – 11,0
Hospitalisations	PM-10 :	29,6 – 50,0
Mortalité	PM-2,5 :	11,0 – 29,6
	PM-10 :	18,2 – 47,9

**Tableau N°4** : Concentrations moyennes des particules et effets sur la santé [34]

Les hausses de mortalité observées pour chaque hausse de teneur de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont comprises entre 0,5% et 1,7% environ pour le PM-10 et sont de l'ordre de 1,5% pour le PM-2,5 et de 2,2% pour les sulfates [34]. Les hausses d'hospitalisation, pour chaque hausse de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans la teneur en particules vont de 0,7% à 0,8% pour les PM-2,5 et de 2% à 2,7% pour les sulfates. Ainsi les PM-2,5 et les sulfates semblent entraîner de plus fortes hausses de mortalité et de morbidité que les PM-10 [34].

### **II.7.3) Effets sur les animaux [35]:**

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

### **II.7.4) Impacts sur la végétation [26]**

De nombreux polluants de l'atmosphère ont des effets dommageables pour la végétation et les écosystèmes. Des niveaux critiques de pollution, c'est à dire des niveaux de concentration au-delà desquels de tels effets dommageables sont susceptibles de se manifester, ont été déterminés pour les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre. On notera que ces niveaux sont inférieurs à ceux qui sont supposés protéger la santé humaine. Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance. A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles c'est le cas des abricotiers. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières, de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racines des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes (bactéries de

l'azote). En tant qu'oligo-éléments, les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc, etc. mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement.

#### **II.7.5) Effets des particules atmosphériques sur les matériaux [36]:**

Les dégradations des matériaux dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène, se produit par les substances oxydantes et acides supportées par les particules solides. La dégradation de la propriété bâtie (bâtiments, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible qui se traduit par le noircissement des façades par les dépôts de suies et de poussières. Les peintures peuvent être assombries par les dépôts de particules solides noires. Car les surfaces fraîchement peintes sont généralement collantes et retiennent les particules.

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

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

#### **II.7.6) Impacts sur la visibilité [37]:**

La visibilité est la qualité de l'atmosphère qui permet de voir à une plus ou moins grande distance, mais aussi de voir plus ou moins bien des objets proches et d'en apprécier les détails de couleur ou de texture. La visibilité est considérée comme un élément de bien-être. La pollution atmosphérique réduit la visibilité, par absorption et par diffraction de la lumière. L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire, émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines, est fonction de la taille des particules; elle est donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique des particules et leur processus de formation.

### III) POLLUTION DE L'AIR PAR LES METAUX LOURDS

#### III.1) Caractéristiques [38] :

On appelle en général, métaux lourds, les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>. On retrouve dans certaines publications anciennes l'appellation de « métal pesant ». L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique. Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles. On dit que les métaux sont présents « en traces ». Ils sont aussi la *trace* du passé géologique et de l'activité de l'homme. La classification en métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement « lourds » (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic par exemple). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation métaux lourds, l'appellation « éléments en traces métalliques » ou par extension « éléments traces » [38]. La toxicité des métaux lourds a conduit les pouvoirs publics à réglementer les émissions en fixant des teneurs limites. Cette réglementation n'est cependant d'aucun secours pour déterminer sans ambiguïté une liste de métaux à surveiller car la liste varie selon les milieux considérés : émissions atmosphériques, rejets dans l'eau, règles sur l'épandage des boues ou la mise en décharge...

Parmi les métaux lourds, on distingue principalement trois d'entre eux : le mercure, le plomb et le cadmium, La distinction de ces trois métaux est due :

D'une part, à une raison historique : Les premiers biochimistes ont distingué ces trois métaux en raison de leur affinité avec le soufre qui permettait d'identifier les protéines qui précipitent lourdement ou donnent facilement des sels (sels de mercure, sels de plomb...).

D'autre part, les trois métaux ont quelques caractéristiques physico-chimiques communes :

- Ils ne se détruisent pas : Ils se transportent, changent de forme chimique, mais ne se détruisent pas.
- Ils ont une conductivité électrique élevée, ce qui explique leur utilisation dans de nombreuses industries.
- Mais surtout, ils présentent une certaine toxicité pour l'homme, entraînant notamment des lésions neurologiques plus ou moins graves.

Tandis que tous les autres ont une utilité dans le processus biologique -certains métaux (les oligo-éléments) sont même indispensables à la vie (le Fe, le cuivre, le nickel, le chrome...), les trois métaux cités sont des éléments uniquement toxiques.

### III.2) Utilisations des métaux lourds [38,39,40,41] :

Le **plomb** est issu d'un minerai, la galène. L'utilisation du plomb est directement liée à la métallurgie. Avec deux pics historiques notables. La métallurgie a connu son apogée sous l'empire romain, lorsque le plomb était utilisé pour la production de la monnaie, les canalisations, la vaisselle... Ce phénomène peut être parfaitement suivi par l'analyse des glaces polaires. La révolution industrielle a entraîné de nouvelles utilisations massives et une augmentation exponentielle depuis un siècle tout en se transformant radicalement. Pendant la première moitié du siècle, le plomb a été utilisé dans l'industrie, l'imprimerie et les peintures. Dans la seconde moitié du siècle, l'utilisation dominante était liée aux carburants automobiles, le plomb étant ajouté à l'essence comme antidétonant. Cette utilisation est aujourd'hui de plus en plus réduite.

La production mondiale du plomb s'élève à 6 millions de tonnes/an [38].

Le **cadmium** est un élément naturel, mais considéré comme le plus toxique des métaux, il est présent dans certains minerais (notamment le zinc) sous forme d'impuretés. Ce métal était inconnu jusqu'au XIXème siècle, jusqu'à ce que ses caractéristiques physico-chimiques soient mises en évidence et utilisées notamment dans les batteries. Le cadmium a été abondamment utilisé dans des utilisations diffuses pour protéger l'acier contre la corrosion (cadmiage), ou comme stabilisant pour les plastiques et les pigments, ou aussi dans les additifs à base de Zn dans les lubrifiants, où le Cd est une impureté combinée au Zn [39].

La production mondiale du cadmium s'élève à 20.000 tonnes/an dont 70% sont utilisés en batteries et accumulateurs[38].

Le **zinc** est moins dangereux que le Cadmium. Comme le Cd, il est utilisé dans les additifs à base de zinc dithiophosphate employé comme lubrifiant [40].

Le **manganèse** n'est pas considéré comme élément toxique en lui-même, et la concentration trouvée dans l'air ambiant est généralement due à l'érosion du sol, il est utilisé comme additif dans les antidétonants comme un remplaçant du Plomb, et sous forme de méthylcyclopentadiényl manganèse tricarbonyl (MMT) [41], qui était incorporé dans les carburants essence à raison de 0.03g/l, après il a été abandonné comme additif.

Le **mercure** est rare dans le milieu naturel, il se trouve cependant, en traces, dans les roches, parfois dans des concentrations justifiant une exploitation. Le mercure est notamment extrait du cinabre (sulfure de mercure). Le mercure, comme le plomb, est utilisé depuis l'Antiquité. Ses capacités à s'associer à d'autres métaux ont été mis à profit pour extraire l'or.

Le mercure a aussi été utilisé pour ses propriétés biologiques, y compris ses propriétés toxiques (comme biocide). Il a été utilisé en tannerie, en médecine, pour traiter la syphilis, par exemple. Comme le cadmium, le mercure est aujourd'hui utilisé pour ses propriétés physico-chimiques. Le mercure est extrêmement volatil, réagit à la chaleur, et est un excellent conducteur d'énergie électrique. Il est utilisé dans la production du chlore et quelques produits de consommation ou de mesure (piles, thermomètres...). Ces utilisations sont en déclin. La production annuelle mondiale de mercure est de l'ordre de 3.000 tonnes [38].

D'autres métaux trouvés dans l'atmosphère des grands centres urbains sont issus de la combustion du charbon (Al, Cr, Fe, As), des huiles (V, Ni) ou de différentes sources (Cu, Co, Ba) [42].

### **III.3) Les Sources d'émission des métaux lourds :**

#### **III.3.1) Les sources naturelles**

##### **a) Les gisements des métaux lourds toxiques :**

Si l'on s'intéresse aux effets sur la santé de quelque microgrammes de métal, les gisements des métaux lourds au sein de la biosphère se chiffrent par millions de tonnes. Les métaux lourds se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement. Selon les métaux, les réserves les plus importantes se trouvent dans les roches et/ou les sédiments océaniques. On estime le gisement de mercure à 300 milliards de tonnes dont 99 % se trouvent dans les sédiments océaniques. Les métaux lourds, comme tout minerai, sont présents dans les roches, et sont diffusés avec l'érosion. Les métaux lourds en surface ne viennent cependant pas tous de la roche, puisqu'il peut y avoir cumul entre ce qui vient du sous-sol et ce qui est apporté par l'air, qui peut provenir de très loin (plomb dans les glaces des pôles).

En règle générale, les métaux sont fixés dans les roches sous deux formes :

- Il y a d'une part, les oxydes et silicates, peu altérables en climat tempéré. Les oxydes sont libérés de la roche par érosion et transportés tels quels dans les sols et sédiments.
- Il y a d'autre part, les sulfures et carbonates, très altérables, qui seront attaqués chimiquement. Les métaux changeront de support. Une partie soluble sera évacuée avec l'eau, vers les sols, les sédiments ou la nappe phréatique. Une partie sera piégée dans les argiles et sédiments de ruisseau.

Ces métaux lourds sont répartis sur l'ensemble de la surface du globe.

**b) Le passage du minerai au contaminant :**

Ces gisements naturels, enfouis dans les roches, deviennent accessibles et contaminants potentiels à quatre occasions :

- ✓ L'exploitation (les mines) et l'utilisation,
- ✓ L'érosion qui transporte les métaux vers les sols, les eaux de surface et les sédiments,
- ✓ Les prélèvements d'eau. En puisant dans des nappes phréatiques de plus en plus profondes, on peut tomber sur une nappe contaminée par une roche très chargée en métaux lourds. Cette source de mobilisation des métaux lourds est la moins connue, mais aujourd'hui l'une des plus fréquentes,
- ✓ Les éruptions volcaniques terrestres ou sous-marines. Une éruption volcanique libère surtout de grosses quantités de gaz carbonique et de soufre, mais aussi des métaux lourds. On estime que les volcans libèrent en moyenne annuelle dans le monde, de 800 à 1.400 tonnes de cadmium, 18.800 à 27.000 tonnes de cuivre, 3.200 à 4.200 tonnes de plomb, et 1.000 tonnes de mercure dans l'atmosphère [38].

Il y a donc des sources de contamination naturelles. Une fois en circulation, les métaux se distribuent dans tous les compartiments de la biosphère : terre, air, océan. Les échanges sont permanents et se chiffrent par milliers ou centaines de milliers de tonnes. Les flux naturels sont complétés par les flux d'origine anthropique. Le cycle géochimique du plomb représente un flux annuel de 600.000 à 1.300.000 tonnes. Les seuls rejets atmosphériques de plomb représentent 300 à 400.000 tonnes dont 95 % d'origine anthropique. Les rejets atmosphériques de mercure représentent 5 à 6.000 tonnes, répartis pour moitié entre les émissions naturelles et les émissions anthropiques[38].

**III.3.2) Les sources anthropiques**

L'activité humaine n'a apporté aucun changement dans les volumes de métaux lourds. Il n'y a ni création, ni suppression. Elle a surtout changé la répartition des métaux, les formes chimiques et les concentrations par l'introduction de nouveaux modes de dispersion (fumées, égouts, voitures...). Si une partie des métaux lourds part directement dans le sol et les eaux, l'essentiel est d'abord émis dans l'atmosphère avant de rejoindre les deux autres éléments. Il faut distinguer les utilisations présentées ci-dessus et les émissions. Dans certains cas, l'utilisation et l'émission sont égales et concomitantes (le plomb dans l'essence, utilisé comme antidétonant et rejeté dans les gaz d'échappement). Dans d'autres cas, l'émission est inférieure à l'utilisation (le mercure est utilisé dans le processus industriel pour fabriquer du

Cl, mais la plus grande partie est recyclée en interne). Enfin, dans d'autres cas, l'émission est retardée par rapport à l'utilisation. C'est le cas du plomb et du cadmium, utilisés dans les piles, batteries et accumulateurs. Il n'y a aucun dégagement de métal pendant l'utilisation. Les rejets toxiques surviennent en fin d'usage, lorsque les batteries sont stockées dans des décharges ou lorsque les piles sont incinérées. Le même décalage se produit dans le cas du mercure utilisé dans certains produits courants (thermomètres, baromètres). Il n'y a aucune émission de mercure pendant usage. L'émission survient en cas de bris.

L'importance et les modalités des rejets sont très différentes selon les métaux.

- **Les rejets physiques** concernent essentiellement le plomb, et dans une moindre mesure, le cadmium. Ils sont dus à deux phénomènes : d'une part, l'activité métallurgique et minière, et d'autre part, les rejets sont liés au sort des produits en fin de vie, chargés en plomb. C'est le cas des batteries d'automobiles. Chaque année, 7,5 millions de batteries sont remplacées ou abandonnées, soit 75.000 tonnes de plomb[38].

Les rejets de mercure liquide sont beaucoup moins importants. Le mercure se retrouve toutefois dans les canalisations en sortie de sites d'utilisation (hôpitaux, cabinets dentaires).

- **Les rejets atmosphériques** concernent tous les métaux et représentent des masses importantes qui se chiffrent par dizaines (mercure, arsenic, cadmium), par centaines (chrome) ou par milliers de tonnes (plomb). Les opérations de raffinages des métaux non ferreux, la combustion et l'incinération des déchets libèrent la plus forte proportion de métaux lourds dans l'atmosphère.

Le tableau N°5 donne une indication des teneurs atmosphériques moyennes en métaux lourds rencontrées en milieu urbain et rural dans le monde.

Métal	ng/m <sup>3</sup>	
	Air Urbain	Air Rural
As	5 - 300	1~20
Cd	0,5 - 200	0,5 - 10
Ni	1 - 500	1~50
Pb	10 - 10000	5~500
V	10 - 100	3~50
Zn	200 - 2000	5~100
Co	0,2 - 20	0,1~5
Cr	2 - 200	1~20
Cu	10 - 1000	2~100
Fe	100 - 10000	100~10000

Tableau N°5: Teneurs des métaux lourds dans les particules atmosphériques [43].

### **III.4) La Toxicité des métaux lourds :**

#### **III.4.1) Le plomb :**

##### **a) Les voies d'exposition [38]**

Le **plomb** peut pénétrer dans l'organisme humain par trois voies :

- Par inhalation de vapeur de plomb ou de poussières (oxyde de plomb)
- Par ingestion, qu'il s'agisse du plomb d'abord inhalé et ingéré à la suite des processus d'épuration pulmonaire, ou du plomb ingéré directement avec les aliments ou avec les poussières se trouvant sur les mains ou les objets portés à la bouche notamment chez le jeune enfant.
- Par voie cutanée, plus rarement.

L'importance relative de ces différentes voies diffère selon qu'il s'agit d'un enfant ou d'un adulte. Un soudeur découpant au chalumeau des plaques métalliques respirera des fumées plombifères. L'inhalation sera donc une voie d'imprégnation importante pour les travailleurs. En revanche, un jeune enfant vivant dans un immeuble ancien, revêtu de peintures au plomb vétustes et dégradées, ingérera du plomb par l'intermédiaire des poussières et des écailles des vieilles peintures. Chez le jeune enfant, le tube digestif est la principale voie d'entrée du plomb dans l'organisme. L'absorption des dérivés inorganiques du plomb est d'autant plus élevée que le composé considéré est plus hydrosoluble et que les particules ingérées sont de plus petites tailles.

L'absorption digestive du plomb est augmentée par la vitamine D, les régimes riches en graisses ou carencés en calcium et en fer. Dans le cas particulier du fœtus, le plomb, au travers de la barrière placentaire, passe de la mère à l'enfant. Le plomb passe également après la naissance à l'enfant au travers du lait maternel.

##### **b) La distribution du plomb dans l'organisme humain [38]**

Le plomb absorbé par l'organisme par inhalation ou par ingestion est distribué par le sang à différents organes : le foie, les reins, la rate, la moelle osseuse et surtout les os. Le plomb sanguin ne représente que 1 à 2 % de la quantité totale de plomb présent dans l'organisme ; les tissus mous (reins, foie, rate...) en contiennent 5 à 10 % et plus de 90 % est fixée sur les os. Le plomb est principalement (75 %) éliminé dans les urines. 15 à 20 % du plomb sont éliminés dans les fèces. Le plomb est également excrété dans la salive, dans la sueur, dans les ongles, dans les cheveux...

### c) Les principaux effets toxiques du plomb pour l'homme [38]

De nombreux travaux ont démontré que l'augmentation du plomb dans le corps humain peut affecter la santé de l'homme. Cette affectation peut se faire au niveau du métabolisme ou au niveau des systèmes et organes humains, dont les principaux sont : le système nerveux, le rein et le sang.

- Effets sur le système nerveux : Le plomb est responsable d'atteintes neurologiques.
- Effets sur la moelle osseuse et le sang : Le plomb bloque plusieurs enzymes nécessaires à la synthèse de l'hémoglobine.
- Cancer : L'administration de fortes doses de plomb a induit des cancers du rein chez de petits rongeurs.

Le *saturnisme* désigne l'ensemble des manifestations de l'intoxication par le plomb, elle est la maladie professionnelle la plus connue, la première à être Officiellement reconnue en France en 1921[44]. Chez les jeunes enfants le risque d'intoxication saturnique est plus élevé, et plus particulièrement de 1 à 3 ans :

- L'absorption digestive des dérivés du plomb est plus importante que chez l'adulte : à exposition égale, l'organisme de l'enfant absorbe 50 % du plomb ingéré, tandis que la proportion chez l'adulte est seulement de 10 % [38,45].
- Les effets toxiques, à imprégnation égale, en particulier sur le système nerveux central en développement, sont plus importants et plus sévères.

Le système nerveux central des enfants est particulièrement sensible à l'action toxique du plomb. Une encéphalopathie aiguë convulsivante apparaît généralement lorsque la plombémie est de l'ordre de 1.000 µg/l. Elle n'a jamais été observée lorsque la concentration sanguine de plomb est inférieure à 700 µg/l [38].

De plus, plusieurs études des populations ont démontré qu'il existe une relation psychologique de l'enfant et le niveau de plombémie. Ainsi, Selon les estimations de l'Institut de surveillance de la population française l'INSERM, chez les enfants, dont la plombémie est comprise entre 500 et 700 µg/l, des troubles neurologiques moins sévères sont souvent observés : diminution de l'activité motrice, irritabilité, troubles du sommeil, modifications du comportement, stagnation du développement intellectuel. Une baisse du quotient intellectuel pouvant aller de 4 à 15 points !

Le Tableau N°6 résume des effets du plomb sur la santé selon le niveau de la plombémie mesurée.

Effets sur la santé	Plombémie ( $\mu\text{g/l}$ )	
	enfant	adulte
encéphalopathie	800	1000
effets neurophysiologiques	100-150	-
neurophathie périphérique	400	400
neurophathie aiguë	800	-
neurophathie chronique	-	600
altération du métabolisme de la vitamine D	<300	-
hypertension artérielle	-	300
anémie	800	1000
inhibition de l'acide D-aminolevulinique (ALA)	<100	<100

**Tableau N°6:** Résumé des effets du plomb sur la santé selon le niveau de la plombémie mesurée[46].

#### III.4.2) Le cadmium [38]:

Les divers composés du cadmium présentent des effets toxiques variables selon leur solubilité, et donc leur facilité d'assimilation par l'organisme. Ainsi, le chlorure de cadmium, soluble, apparaît plus toxique que le sulfure de cadmium très insoluble. Une exposition de courte durée à de fortes concentrations de poussières ou de fumées, de composés de cadmium, est irritante pour les cellules des systèmes respiratoires et gastro-intestinaux. La principale préoccupation vis-à-vis du cadmium correspond aux possibilités d'expositions prolongées et à de faibles doses. L'essentiel du cadmium ingéré provient de végétaux à feuillage vert, salades, choux, épinards et dans une moindre mesure des céréales. La principale voie d'élimination du cadmium est l'urine, mais cette élimination est très lente. L'accumulation du cadmium s'effectuant principalement dans les reins, cet organe est considérée, de ce fait, comme un organe « cible ». Les sels de cadmium, très peu volatils, sont présents dans l'air sous forme de très fines particules solides (fumées ou poussières). Lors d'expositions professionnelles, ces particules peuvent être inhalées et se déposer principalement dans les alvéoles pulmonaires. La taille de ces particules a donc une grande importance pour déterminer leur absorbabilité.

**a) Effets et voies d'exposition:**

Parmi les expositions au cadmium (sels), on peut noter

- Par voie digestive : l'absorption d'une faible quantité de ces substances est suivie de troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements, diarrhée). Ces troubles peuvent, dans les cas sévères, se compliquer d'une déshydratation grave de l'organisme ;
  
- Par voie respiratoire : l'inhalation de fumées ou de poussières respirables (d'un diamètre inférieur à 5 microns) à des concentrations supérieures à 200 microgrammes par m<sup>3</sup> et de façon plus ou moins prolongée peut provoquer rapidement un trouble pulmonaire grave[38].

#### **IV) APERÇU SUR LES TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE DES PARTICULES**

Historiquement, la mesure des teneurs des particules se limitait à la mesure des particules totales en suspension (TSP) sans classement granulométrique. L'approche de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) pour la mesure des TSP a évolué avec le temps. En 1987, le niveau fondamental pour TSP a été remplacé avec un niveau PM-10 qui inclut seulement les particules de diamètre aérodynamique de 10  $\mu\text{m}$  ou plus petit au lieu de 100 $\mu\text{m}$  fixé auparavant. Puis, en 1997, le niveau fondamental pour PM-10 a été remplacé par un niveau PM-2.5 [47].

La caractérisation des aérosols particulaires est très difficile à réaliser à cause de leur hétérogénéité, elle-même liée à la diversité des sources, à la composition chimique des effluents, à l'état physique et granulométrique des particules et à la dynamique d'évolution (conversion gaz particule). L'étude de pollution de l'air par les particules peut se faire par la détermination des caractéristiques physiques et chimiques des particules: la masse des particules en suspension, la classification granulométrique (taille, nombre et répartition), ainsi que la composition chimique, cela inclut l'étude des points suivants :

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

##### **IV.1) Echantillonnage [35]:**

L'échantillonnage des particules atmosphériques se fait généralement par filtration sur filtre ou membrane.. l'analyse porte alors deux aspects:

- L'analyse pondérale qui permet la détermination de la masse des particules par unité de volume d'air.
- L'analyse granulométrique en nombre ou en masse qui offre des informations relatives aux sources des particules et aux risques d'inhalation par les êtres humains.

Le rendement granulométrique d'un prélèvement des particules en suspension (diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$ ) 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[35]. Ainsi, la géométrie de la tête de prélèvement et le débit d'air échantillonné conditionnent à la fois le diamètre des particules recueillies sur le filtre et le degré d'influence du vent sur l'efficacité d'échantillonnage. Par ailleurs, les techniques de mesure peuvent déboucher sur des résultats de concentration notablement différents selon que le filtre est pesé par simple gravimétrie, examiné par réflectométrie ou analysé par méthode automatique (absorption par rayonnement bêta ou microbalance oscillante). Généralement, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu à trois catégories de prélèvement :

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

#### **IV.1.1) Prélèvements sans coupure granulométrique spécifique [26,48] :**

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 trois modes de prélèvement :

##### **a) Méthode des fumées noires (F.N) :**

Cette méthode concerne les particules de taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$  qui sont collectées avec une grande efficacité, mais avec débit d'échantillonnage relativement faible (environ 80 l/h). L'analyse ultérieure du filtre est effectuée par réflectométrie. Celle-ci consiste à mesurer le degré de noircissement du filtre collecteur par référence à une échelle de gris étalons. Une courbe de calibration fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt et la masse des particules déposées. Cette méthode est généralement utilisée pour les prélèvements de particules issues de la combustion de fuel et du charbon et pour les suies émises par le trafic routier diesel. La durée de prélèvement est généralement de 24 heures. L'indice de fumée noire est donné en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette technique longtemps utilisée en Europe, tend à être remplacée par celle des PM-10.

##### **b) Prélèvement à débit moyen sur filtre ouvert:**

Les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et rétention des particules sur un filtre ouvert de 47 mm de diamètre avec un débit d'aspiration de l'ordre de 1,5  $\text{m}^3/\text{h}$ , et une

durée d'échantillonnage de 24 heures ou plus. La méthode donne la teneur des particules totales en suspension (TSP) qui est, en général, supérieure à celle des fumées noires. Par cette méthode, les particules collectées sur filtre peuvent faire l'objet d'analyses ultérieures au laboratoire.

### **c) Prélèvement à très fort débit [35,49]:**

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

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

### **IV.1.2) Prélèvement avec seuil de coupure granulométrique :**

Il s'agit d'un équipement doté d'une tête, qui par sa conception, ne capte que les particules dont le diamètre est inférieur à une valeur fixe. En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur à 10µm. Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inhalables, c'est à dire, la fraction trachéobronchique et alvéolaire. L'appareil le plus connu de nos jours et qui est accepté comme référence, est le HVS (PM-10) de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules < 10 µm [47].

En principe, tout appareil destiné à la mesure des TSP peut également être utilisé pour les analyses des PM-10, si toute fois la tête de prélèvement TSP est remplacée par une tête certifiée PM-10. En plus de la technique HVS PM-10 qui demeure une méthode manuelle (changement manuel du filtre collecteur à intervalles de temps régulier), il existe deux autres méthodes automatisées qui de nos jours équipent la majorité des réseaux de surveillance. Il s'agit de la jauge bêta et de l'appareil TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance).

#### **- Méthode par radiométrie bêta: [50]**

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un rayonnement bêta constitué d'électrons d'énergie 0,01 à 0,1MeV ayant traversé un filtre chargé de particules (source radioactive C14). Le filtre, après prélèvement, est placé entre un émetteur de rayonnement bêta et un détecteur qui compte le nombre d'électrons qui ont traversé le filtre. La masse des

particules déposées sur le filtre est d'autant plus grande que le nombre d'électrons qui traversent le filtre est faible. La mesure consiste à calculer la variation d'absorption entre le filtre vierge et celui chargé du dépôt de particules. L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules déposées sur le filtre. Par cette méthode, les particules collectées ne peuvent pas faire l'objet d'analyse au laboratoire.

A la place d'une tête PM-10, on peut placer une tête PM-2,5.

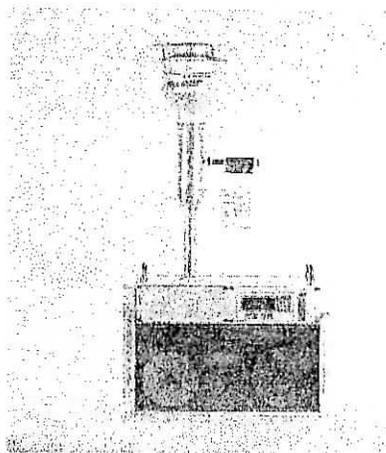


Figure n°2 : Jauge Bêta pour le prélèvement des PM-10.

#### - Méthode TEOM ou microbalance oscillante: [49]

La méthode TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) est basée sur le principe de la microbalance à quartz. Elle mesure l'accumulation, en masse, des particules sur un filtre fixé sur un quartz oscillant. La variation de fréquence du quartz est utilisée pour mesurer en continu et en direct la masse des particules accumulées. Selon la tête de prélèvement installée, cette méthode permet de mesurer les PM-10 et PM-2,5.

#### IV.2.3) 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 impacteur). Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen ( $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : La fraction alvéolaire ( $d < 2,5 \mu\text{m}$ ) et la fraction trachéobronchique ( $2,5 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$ ). Les Impacteurs à cascade sont équipés de 4 à 7 étages d'impaction et permettent d'avoir 4 à 7 fractions granulométriques (de 0 à  $1 \mu\text{m}$ , de 1 à  $2,5 \mu\text{m}$  ...etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort ( $30$  à  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

L'appareil le plus connu est le HVS-PM10 équipé d'un impacteur d'Andersen. L'appareil Andersen permet la mesure directe de la masse des particules à des concentrations de 0.005-20 mg/m<sup>3</sup>.

Nous résumons, dans le tableau N°7, les principales méthodologies de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension. [51]

**Tableau N°7 : Résumé des principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension [51].**

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

#### **IV.2) Les filtres et membranes de rétention [52] :**

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

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égale à 0,3 µm et plus.
- Une hygroscopicité faible.
- Un taux d'impuretés aussi faible que possible pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

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

#### **Les filtres à fibre de verre:**

Ils ont une efficacité de collection de 99.9% pour les particules de diamètres supérieur à 3µm. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate. L'hygroscopicité de ces filtres est faible. L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant

est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. Les filtres *Gelman* (type A) et *whatman* GF-A, par exemple, contiennent plus de  $50 \mu\text{g Zn/cm}^2$ .

#### **Les filtres membranes :**

Ce sont des filtres nitro-cellulose (Sartorius et Miliipore) ou acétate et ester de cellulose (*Gelman* GA-3), qui sont solubles dans les éthers et alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. L'étape de minéralisation est ainsi facilitée. Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité de l'ordre  $8 \mu\text{m}$ . Ces fibres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques. Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utiliser dans les HVS pour les prélèvements à fort débit. Avec les deux types de filtres (filtres en fibres de verre et filtres membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de  $0.1 \mu\text{m}$  de diamètre.

#### **IV.3) Analyse des particules en suspension : [8,20]**

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

- La composante acide est déterminée, généralement, par :
  - La chromatographie ionique.
  - La spectrométrie UV-visible.
- Les éléments métalliques sont déterminés par diverses méthodes classiques :
  - La spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A).
  - Emission par plasma.
  - Fluorescence x.
  - Méthodes nucléaires.

Pour les deux dernières méthodes, l'analyse peut se faire directement sur filtre.

- La composante organique, contenant les HAP, est déterminée généralement par des techniques chromatographiques telles:
  - La chromatographie liquide haute performance (C.L.H.P) équipé d'une détection par émission de fluorescence.
  - Chromatographie en phase gazeuse (C.P.G).

## **V. METHODOLOGIE**

### **V.1) Choix du site de prélèvements :**

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

Le site choisi se situe à l'Ecole Nationale Polytechnique à environ 10 Km à l'est d'Alger. En ce site, le poste de mesure est implanté sur la terrasse du département de génie chimique, à une altitude d'environ 4m par rapport au sol et pratiquement à 9 m du bord de la RN5. L'absence d'obstacles, comme des murs, constructions...etc., qui gêneraient la circulation libre de l'air, permet d'avoir un échantillonnage optimal. Ce site qui est presque quotidiennement balayé par la brise de mer, reçoit les émissions du trafic routier de la RN5, qui est fréquenté par environ 25 000 véhicules par jour pour les quatre voies dans les deux sens, avec un taux important de véhicules lourds (diesel) d'environ 15 %. À proximité de ce site, il n'existe pas d'entreprises industrielles émettrices de particules.

### **V.2) Mode de prélèvements :**

Pour pouvoir suivre l'évolution des teneurs atmosphériques des particules et leur classification granulométrique, les prélèvements ont été effectués par la méthode à fort débit avec seuil de coupure granulométrique de 10  $\mu\text{m}$ . L'appareil utilisé est le *HVS-PM-10* de la firme Graseby Andersen (fig. 3 et 4). Cet appareil a été déjà décrit en détail dans les travaux antérieurs [6,7]

Rappelons l'ensemble de l'échantillonneur est composé de trois parties :

- Le High Volume Simpler (HVS)
- La tête PM-10
- Le cascadeur d'Andersen a quatre étages.

Le HVS représente le corps de cet échantillonneur, il se compose principalement :

- D'une turbine d'aspiration d'air.
- D'une conduite d'aspiration.
- Des étages de sélection qui servent comme porte-filtre et permettent le tri, par impaction, des particules selon leurs tailles.
-

- Des étages de collection : c'est l'ensemble des filtres où sont piégées les particules sous l'effet de leur impaction sur la surface des filtres.
- D'un contrôleur électronique de débit le MFC (mass Flow Controller), qui permet de maintenir, durant le prélèvement, le flux d'air entrant à un débit constant. Il agit sur la puissance du moteur (turbine d'aspiration) par ajustage électronique du voltage. De cette façon, une éventuelle réduction du débit par colmatage du média filtrant est automatiquement corrigée.

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

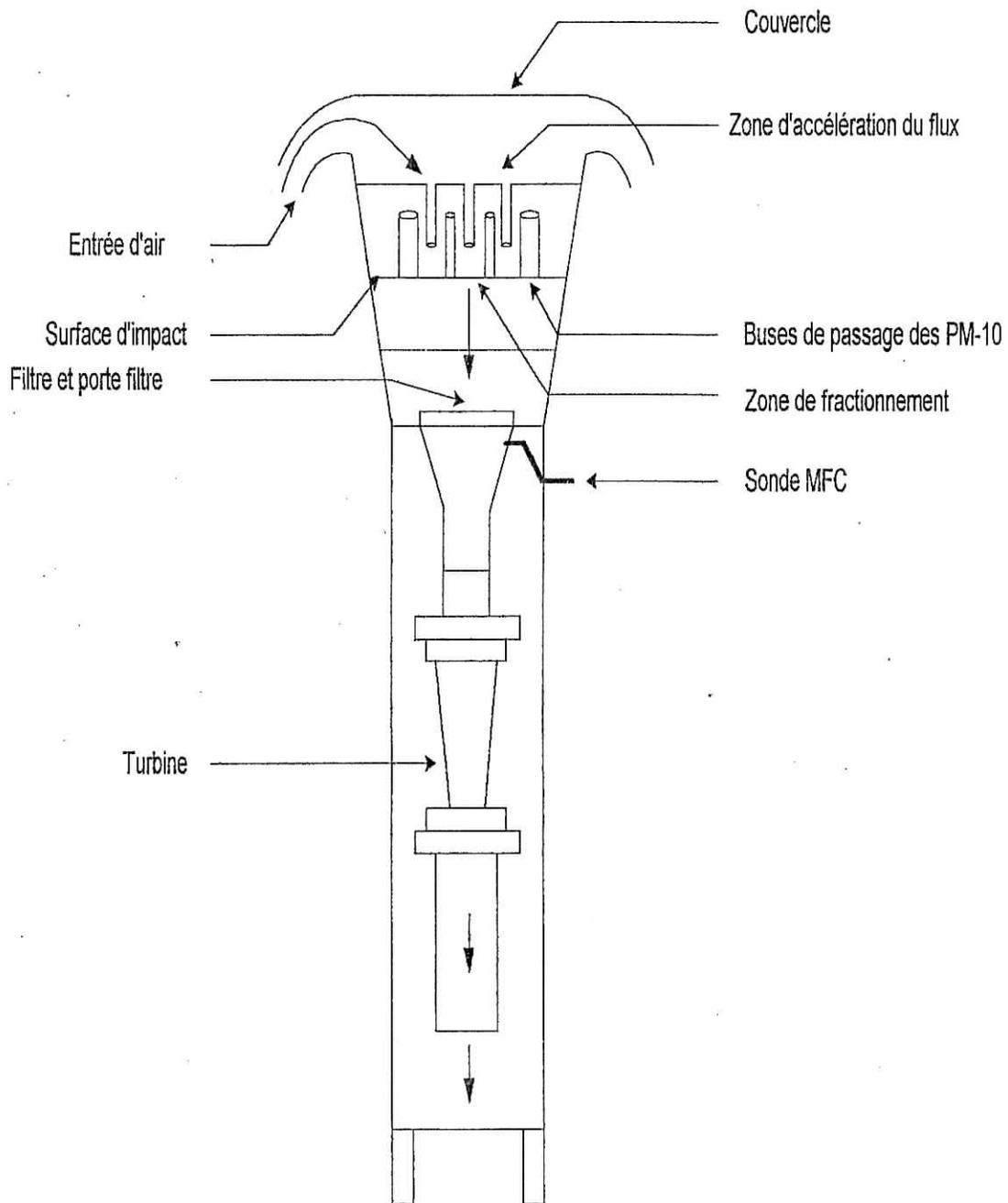
Le cascadeur d'Andersen qui est équipé de quatre étages permet d'accéder aux classes granulométrique données en Tableau N°8:

Etage	Classes granulométrique ( $\mu\text{m}$ )
1	7 - 10
2	3 - 7
3	1,5 - 3
4	1 - 1,5
étage final	< 1

**Tableau N°8** : Etages et classes granulométriques correspondantes.

Les *filtres* utilisés pour la rétention des particules sont en fibre de verre de type Whatman et de dimension  $20 \times 25$  cm pour le filtre final et  $10 \times 12$  cm pour les filtres du cascadeur.

Pour la détermination de la teneur en PM-10, chaque filtre est pesé avant et après collecte à 0,1 mg près. La teneur en PM-10 est alors exprimée en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figure N°3: L'échantillonneur HVS PM 10.**  
**(Schéma du principe de collecte des PM 10)**

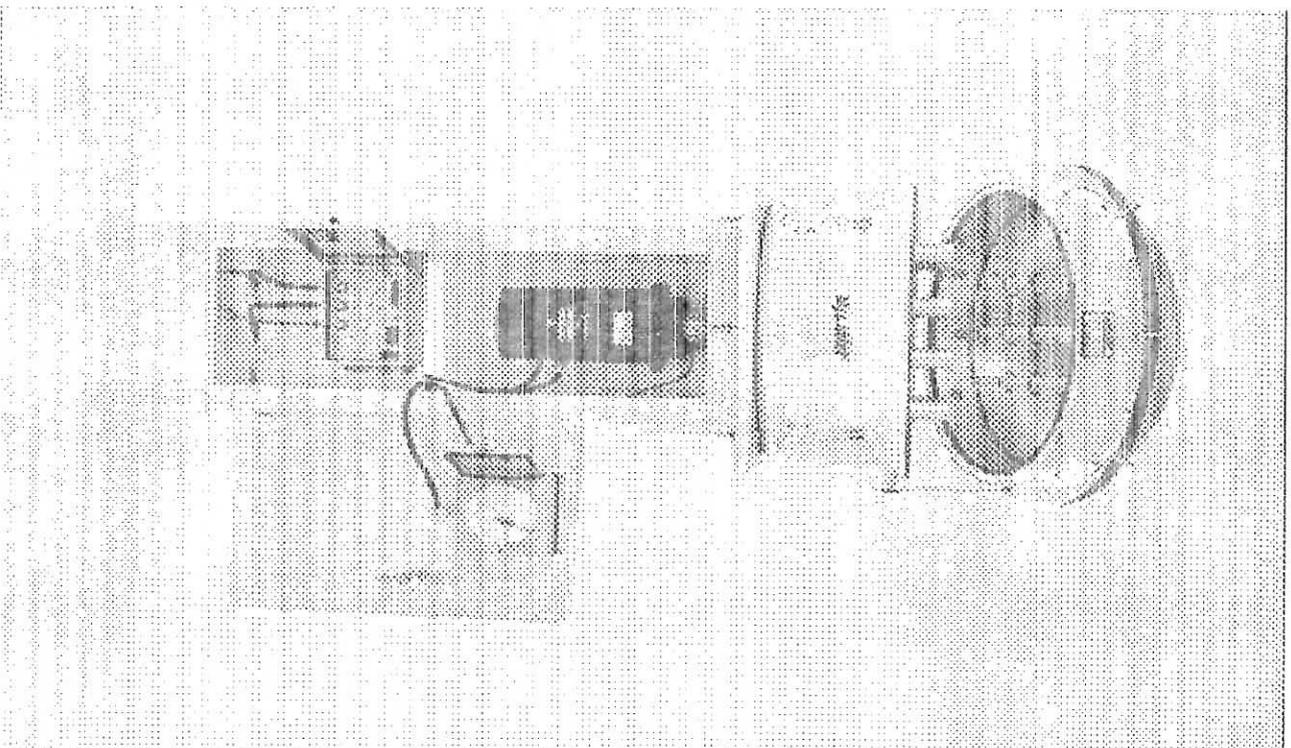


Figure N°4: L'échantillonneur TYS PM 10  
(Vu de face)

### **3) Traitement et analyse des PM10 :**

Afin d'analyser les métaux lourds qui sont véhiculées par les particules sur les différents étages de l'impacteur, on procède à une minéralisation des échantillons des différentes fractions. La minéralisation acide à lieu conformément a la norme ISO 9885 [53]. Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 ml contenant 60 ml d'acide nitrique (1/8) et quelques gouttes de  $\text{HClO}_4$ . La solution est alors portée à ébullition sous reflux pendant deux heurs. Après évaporation partielle une seconde minéralisation est effectuée dans les mêmes conditions. On évapore ensuite à sec et après refroidissement, le résidu est repris dans 20 ml d'eau distillée. Le minéralisât est ensuite filtré sur un filtre whatman pour retenir les impuretés insolubles (carbone noir, silicates, etc.). Le filtrat est transféré dans une fiole jaugé, puis ajusté avec de l'eau distillée à un volume de 50 ml. Un filtre vierge va subir la même procédure pour servir de blanc.

Les métaux lourds Pb, Cu, Ni, Cd, Co, Cd, et le Fe, qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, sont alors analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique sur un appareil PYE UNCAM SP9, avec une flamme air/acétylène.

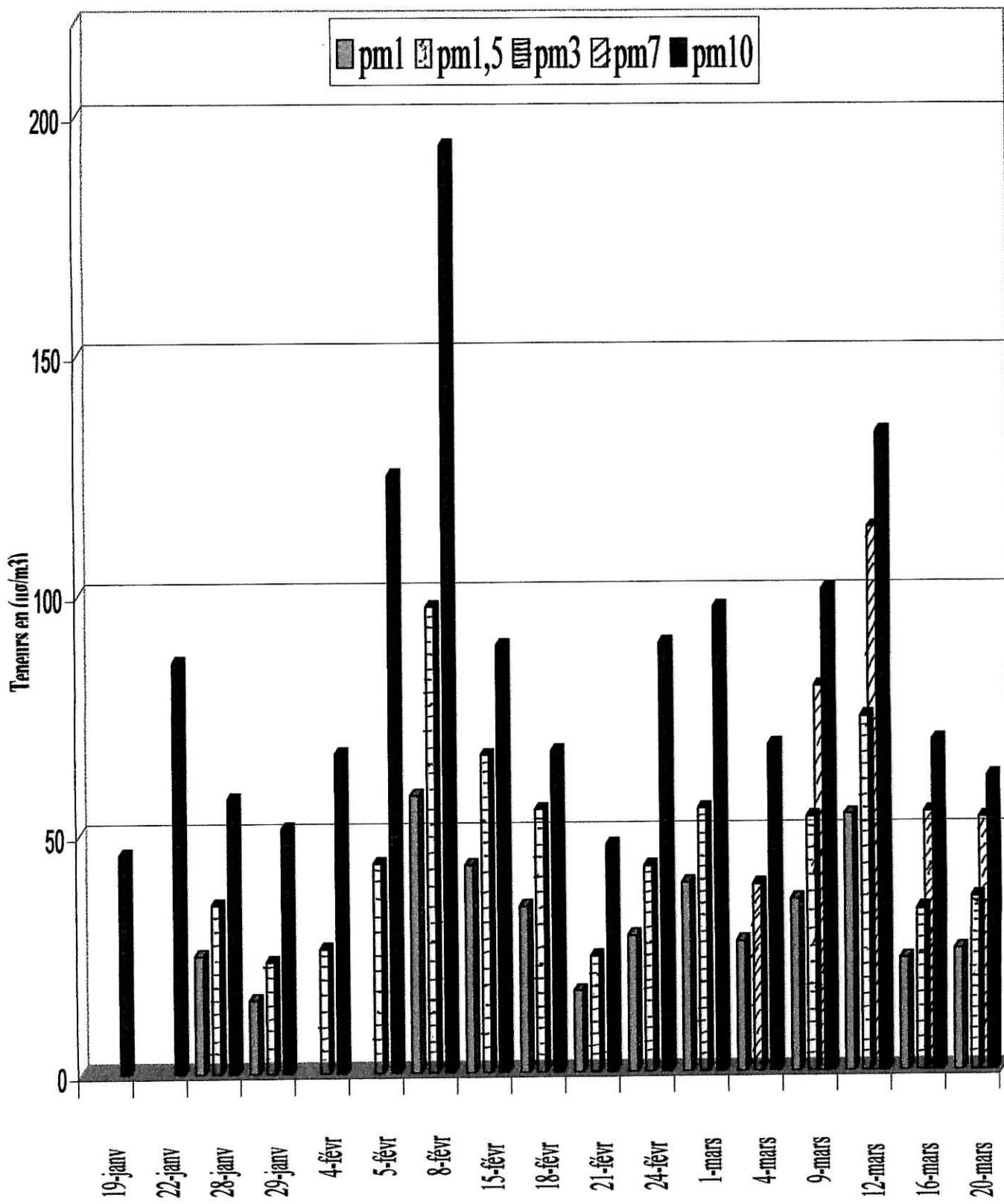
## **CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

### **VI.1) Evaluation de la pollution de l'air par les aérosols particuliers :**

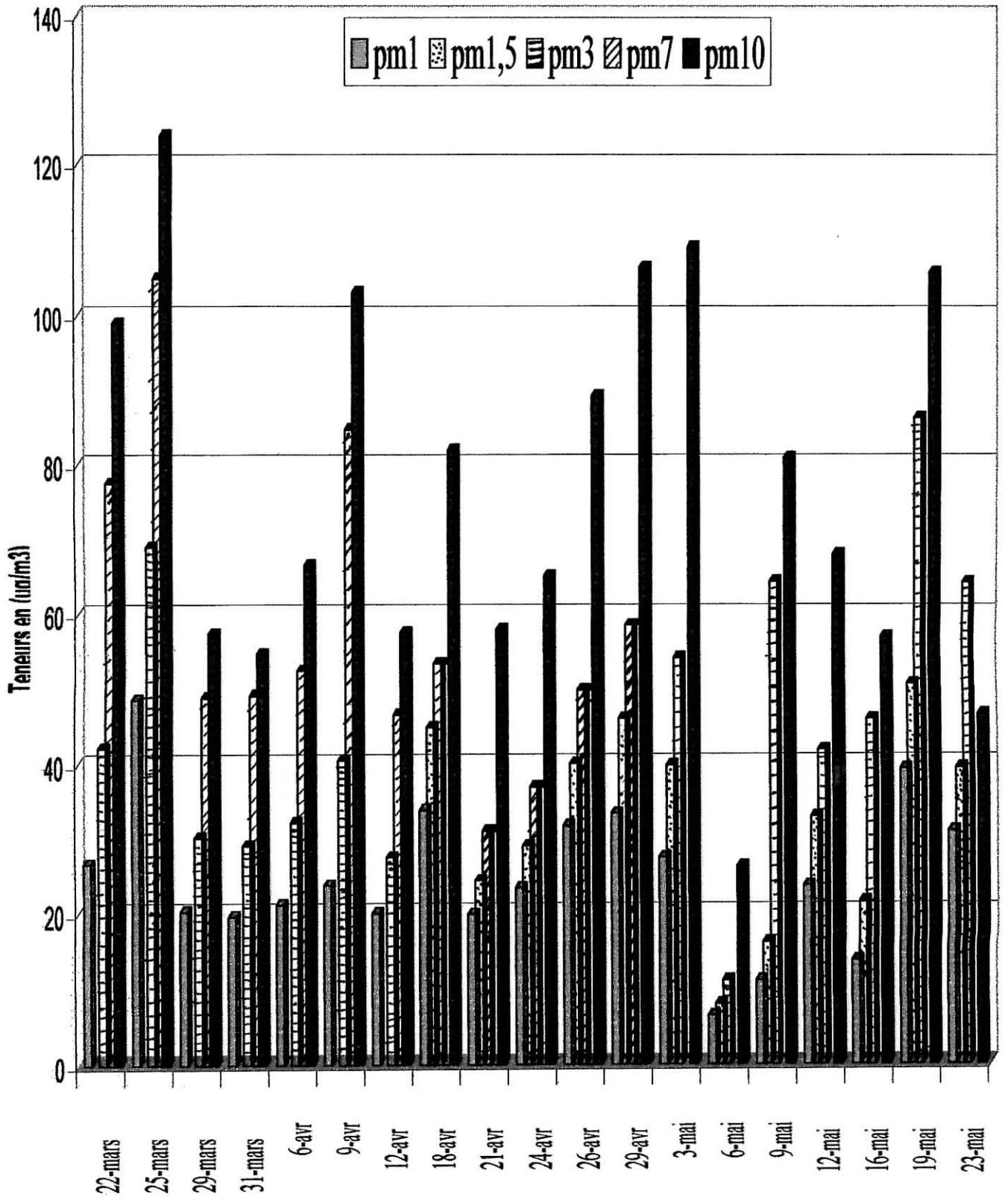
Le suivi des teneurs atmosphériques en PM-10 et des diverses classes granulométriques a été effectué au niveau de l'ENP, en bordure de la RN5. Les prélèvements ont été effectués durant la période du 19 janvier au 23 mai 2003. Chaque prélèvement journalier compte normalement 5 fractions de particules correspondantes aux 5 étages. Dans certains cas, et pour économiser la consommation du filtre, nous avons utilisé seulement 3 à 4 étages avec des seuils de coupure granulométrique alternés. Nous avons ainsi réalisé 36 prélèvements journaliers, ce qui nous a permis d'accéder à la collecte de 127 fractions granulométriques (fraction de 10 à 7 $\mu$ m, de 7 à 3 $\mu$ m, de 3 à 1,5 $\mu$ m, de 1,5 à 1 $\mu$ m et enfin la fraction terminale < 1 $\mu$ m).

#### **VI.1.1 ) Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en particules :**

L'évolution temporelle des teneurs en PM-10, PM-7, PM-3, PM-1,5 et PM-1 est illustrée en figures N°5 et N°6. On y relève une importante fluctuation temporelle pour toutes les fractions granulométriques. Pour les PM-10, la teneur minimale enregistrée est de 26,4 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, tandis que le maximum frôle les 194 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, la moyenne géométrique s'élève à 80,8 $\mu$ g/m<sup>3</sup>. Dans le cas des particules très fines, les PM-1, le maximum est de 58,2 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, le minimum de 6,5 $\mu$ g/m<sup>3</sup> et la teneur moyenne 28,3  $\mu$ g/m<sup>3</sup>.



**Figure N°5:** Evolution des teneurs atmosphériques en particules selon les classes granulométriques



**Figure N°6:** Evolution des teneurs atmosphériques en particules selon les classes granulométriques

Nous résumant en tableau N°9 les valeurs moyennes et extrêmes des particules étudiées.

Classe granulométrique	Maximum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Minimum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Moyenne ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
PM-1	58,2	6,5	28,3
PM-1,5	50,5	8,0	32,8
PM-3	97,3	11,1	46,4
PM-7	114,0	46,5	69,7
PM-10	193,8	26,4	80,8

**Tableau N°9** : Teneurs selon la taille des particules atmosphériques mesurées à l'ENP, Alger.

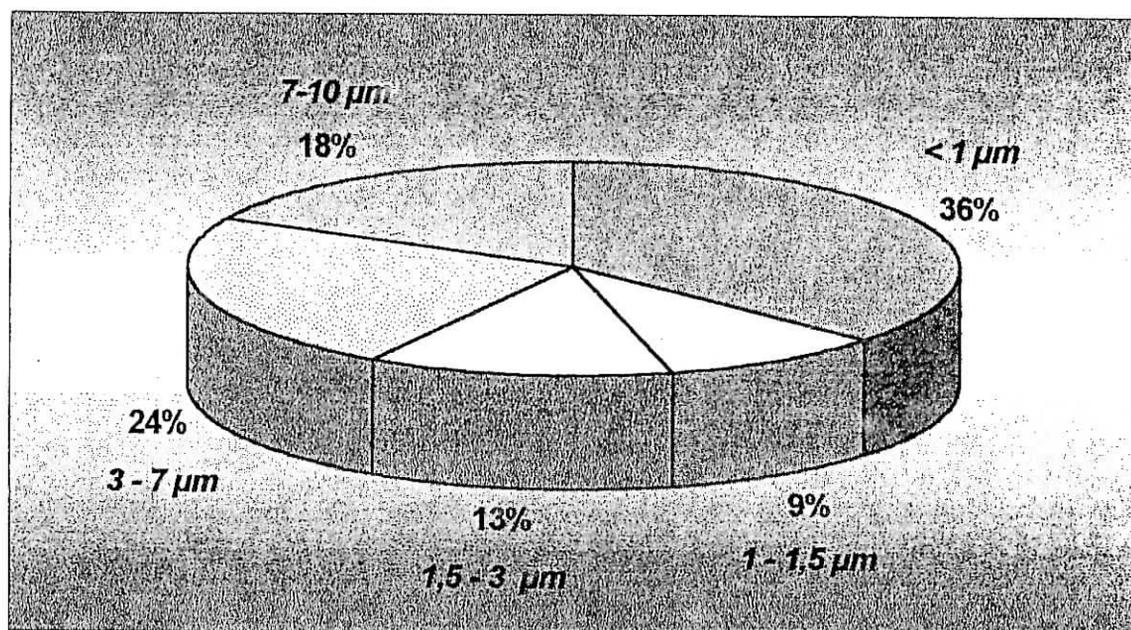
L'importance des fourchettes de variation des teneurs mesurées est certainement due aux variations dans l'intensité du trafic routier et à l'influence des facteurs météorologiques (précipitations, vitesse et direction des vents...) qui conditionnent la dispersion des particules.

En l'absence des données détaillées sur Les facteurs météorologiques, nous ne pouvons pas étudier leurs influences sur les niveaux de pollutions mesurées. On constate toutefois que les niveaux mesurés cette année sont relativement plus faibles que ceux enregistrés l'année dernière à la même période et au même site [7] (réduction de l'ordre de 5%). Ce résultat peut être du à l'influence de la pluie qui à été cette année plus abondante que l'année dernière. La pluie contribue à réduire les matières particulaires en suspension dans l'air, d'une part par le lavage de l'atmosphère ( lessivage), mais aussi en réduisant la remise en suspension des particules naturelles et anthropiques.

La figure N°7 illustre les fractions massiques des différentes classes granulométriques par rapport à l'ensemble des particules inhalables. Cette figure montre que c'est surtout la fraction des particules les plus fines PM-1 (36%) et à un degré moindre (24%) la fraction des particules moyennement grossières ( $3 < d < 7\mu\text{m}$ ), qui accusent les fractions massiques les plus élevées.

Ainsi, Les teneurs moyennes en PM-i et les contributions en fraction massique de chaque classe à la totalité des PM-10 sont illustrées en figure N°7.

Cette figure montre que plus de la moitié (58%) des PM-10 est constituée de particules fines, les PM-3, et que plus de d'un tiers appartient à la fraction des particules très fines, les PM-1.



**Figure N°7:** Fraction massique des particules recueillies sur chaque étage granulométrique.

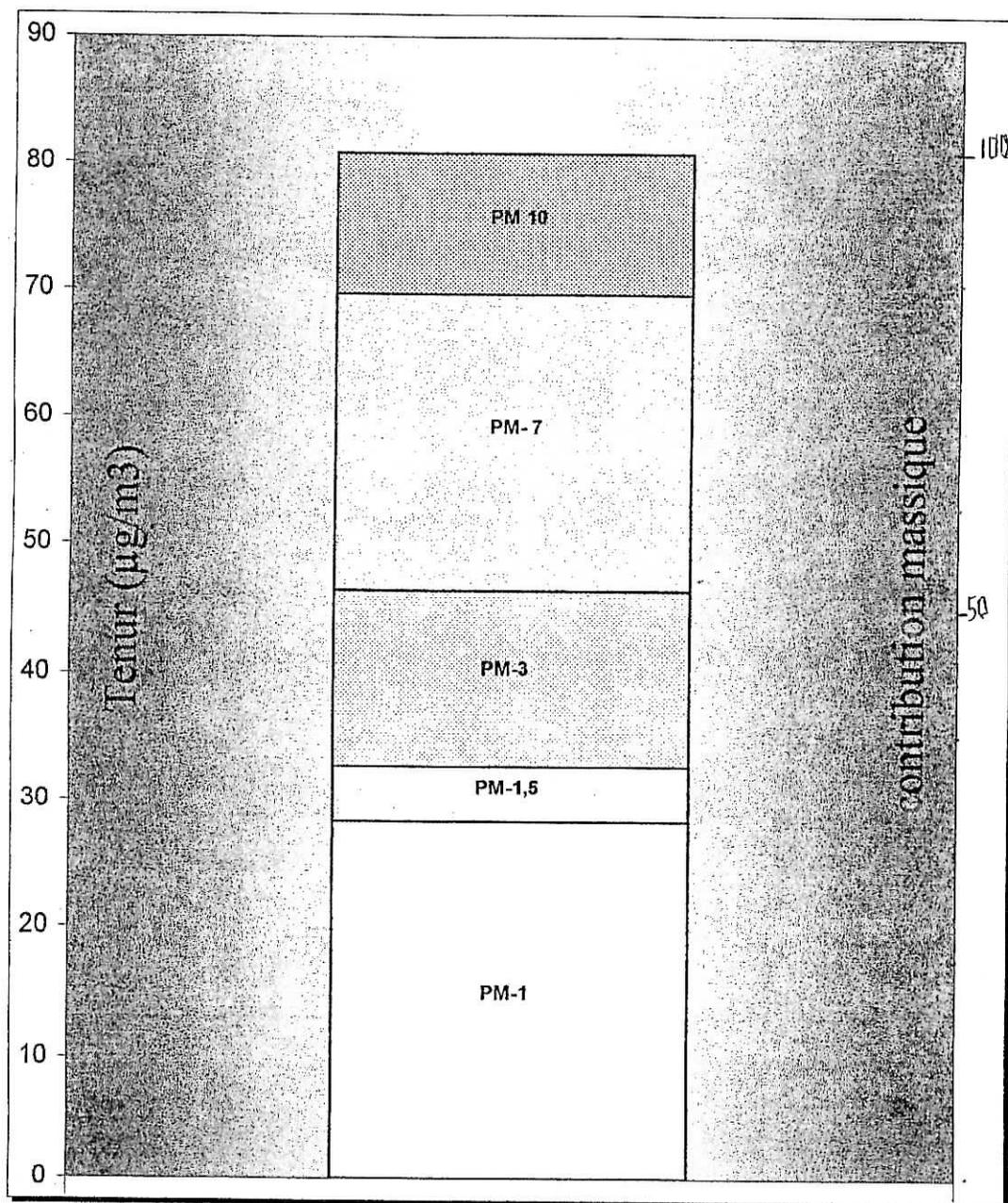


Figure N°8 : Teneurs moyennes des PM-i et contribution massique de chaque classe granulométrique à la totalité des PM-10.

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

- Le diamètre  $d_{50}$  de la masse médiane qui correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM-10. Ce paramètre est important dans la caractérisation des particules inhalables et permet parfois, par comparaison avec les données recueillies en divers sites, de retrouver le type de source émettrice de particules.
- La teneur atmosphérique en particules respirables, les PM-2,5. Dans le cas de notre échantillonneur, cette fraction n'est pas accessible directement par voie expérimentale, puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM-3 qui est naturellement très proche de la fraction PM-2,5. Cette fraction est importante à déterminer car elle permet d'effectuer des études comparatives et d'avoir exactement le niveau de la pollution qui atteint les zones alvéolaires du système respiratoire.

a) **Diamètre médian  $d_{50}$  :**

La détermination du diamètre  $d_{50}$  peut se faire graphiquement en portant sur un diagramme log-probabilité, le diamètre des particules (axe des ordonnées à échelle logarithmique) et de pourcentage de la masse cumulée des particules ayant un diamètre  $\leq d_i$  (axe des abscisses à échelle probabilité), Cette représentation résulte de l'interprétation mathématique du fractionnement des particules par dimension. On montre en effet que la densité de probabilités est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse [19].

Pour construire le graphe log-probabilité, nous résumons en tableau N°10, les données recueillies par fractionnement granulométrique.

Etage Enersen	masse collectée par étage (mg)	masse cumulée* (mg)	% massique cumulé	100 - % massique	diamètre de l'étage ( $\mu\text{m}$ )
1	19,09	19,1	14,4	85,6	7,00
2	35,7	54,8	41,4	58,6	3,00
3	25,1	79,9	60,4	39,6	1,50
4	13,2	93,1	70,4	29,6	1,00
5 (étage final)	39,1	132,2	100,0	0,0	0,02

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

Tableau N°10 : Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique

En représentant, sur un diagramme log-probabilité, les valeurs (100-masse cumulée en %) en fonction du diamètre de l'étage, on obtient la droite illustrée en figure N°9.

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

$$d_{50} = 2,1 \mu\text{m}$$

En d'autres termes 50% de la masse des particules PM-10 a un diamètre  $\leq 2,1 \mu\text{m}$ .

**b) Teneur atmosphérique en PM-2,5 :**

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

(100 – masse cumulée) = 56%.

D'où Masse cumulée = 44%.

Soit : 
$$\text{PM} - 2,5 = \frac{56 \times \text{PM} - 10}{100} = 45,3 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

$$\text{PM} - 2,5 = 45,3 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

Ainsi la teneur en PM-2,5 s'élève à environ 98% de la teneur en PM-3 mesurée expérimentalement. La mesure expérimentale des PM-3 constitue une bonne approximation des PM-2,5 et l'erreur commise en assimilant les PM-2,5 aux PM-3 est assez faible.

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

- Particules inhalables : PM-10 = 80,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Particules respirables : PM-2,5 = 45,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Particules très fines : PM-1 = 28,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

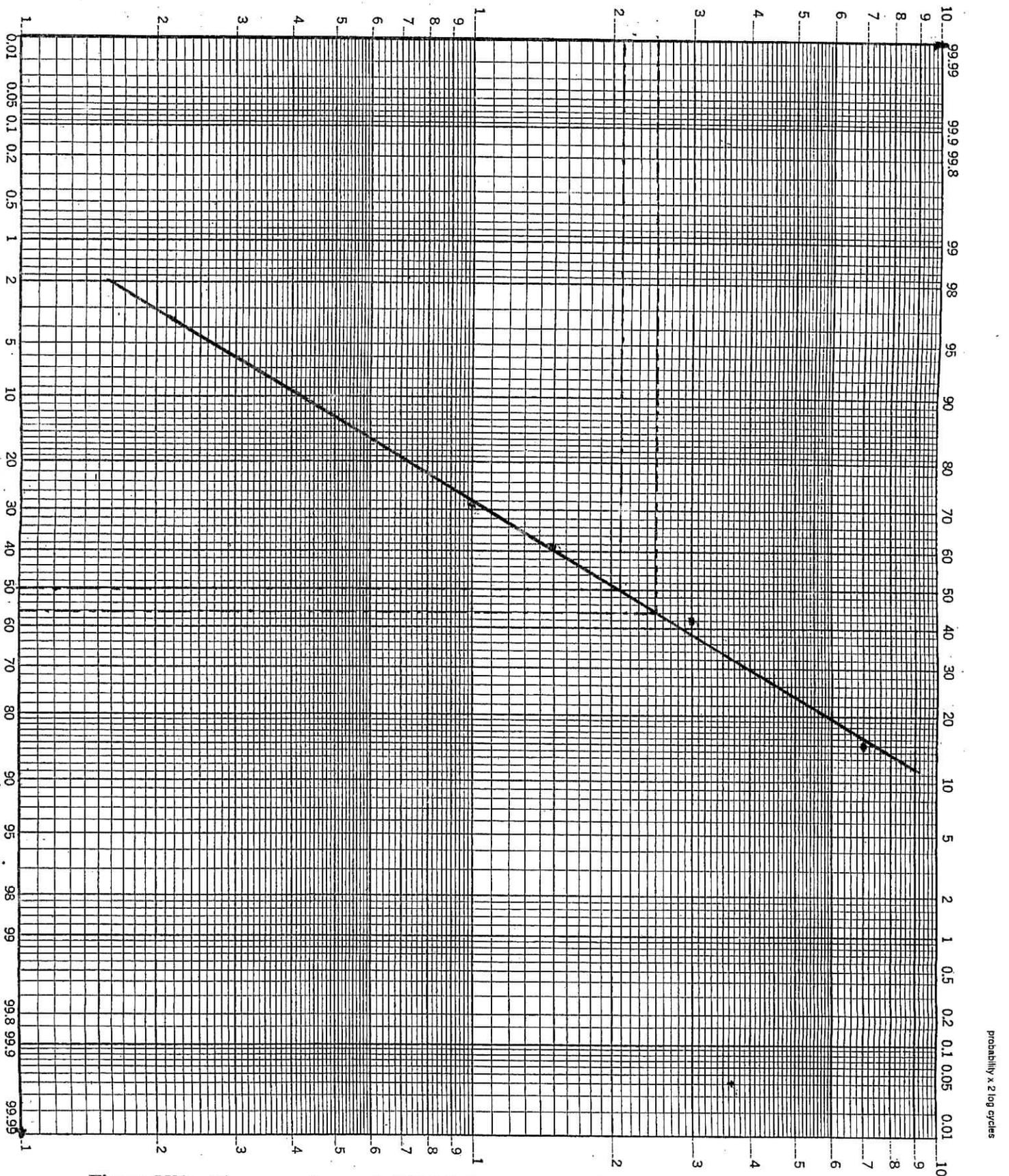
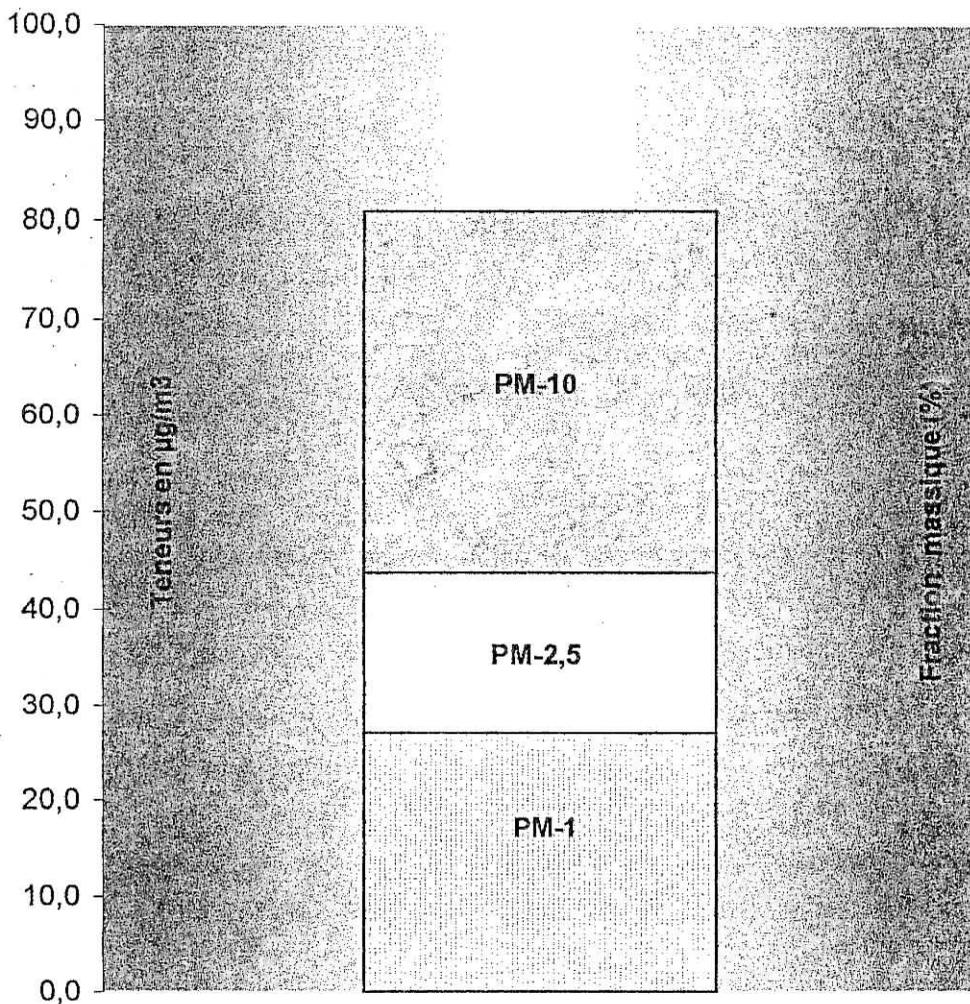


Figure N°9 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.

**VI.1.2) Relation entre les PM-1, PM-2.5, PM-10 :****a) Comparaison des fractions massiques des PM-1, PM-2.5 et PM-10:**

La figure N°12 illustre les teneurs moyennes et les fractions massiques des particules respirables PM-1 et PM-2.5 par rapport aux PM-10.



**Figure n°10:** Comparaison des fractions massiques des PM-1 et PM2,5 par rapport aux PM-10.

De part leur ampleur, ces niveaux de pollution sont inquiétants et ce d'autant plus que les fines particules constituent des fractions très importantes des PM-10, la fig. N°10 montre à cet effet que les particules alvéolaires (PM-2,5) constituent 56 % de la masse des particules inhalables, la fraction très fine (PM-1) qui se dépose d'une manière irréversible dans les alvéoles en constitue un peu plus du tiers (35%). De plus ce sont ces particules très fines qui véhiculent généralement les composés les plus toxiques tel que le Pb, Cd, etc.

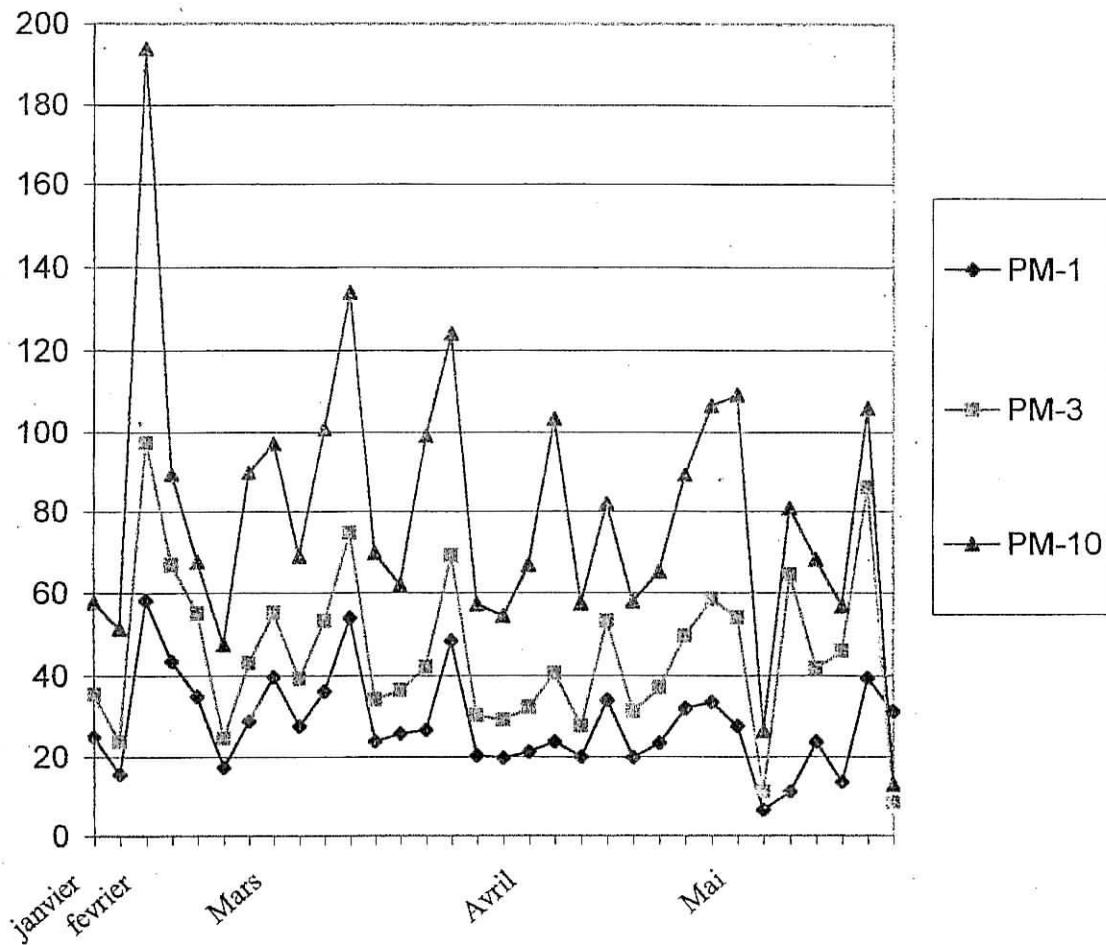
Les fractions massiques mesurées ici semblent être caractéristiques de la pollution urbaine. C'est ainsi qu'à Paris en site de proximité, les PM-2,5 constitue environ 55% des PM-10 [54]. A Arnheim en Hollande, dans les mesures faites à 1m de la chaussée, la fraction PM-2,5 s'élève à 58% des PM-10 [55].

Dans certaines villes canadiennes, ce taux est de l'ordre de 40% [3]. Au niveau des gaz d'émission des véhicules et avant dilution dans l'air ambiant, cette fraction s'élève à 70% [18].

#### **b) corrélation entre les classes PM-1, PM-3 et PM-10.**

En traçant l'évolution des teneurs journalières des PM-1, PM-3 et PM-10 (fig. N°11), on constate une évolution temporelle similaire. Les trois courbes varient dans le même sens, cette similitude dans l'évolution indique que ces particules ont en grande partie une la même origine, probablement le trafic routier.

L'étude des corrélations entre PM-1 et PM-10; PM-3 et PM-10 ; et PM-1 et PM-3, illustrées respectivement en fig. 12, 13 et 14, montre qu'il y'a d'assez bonnes corrélations entre les trois classes granulométriques. Théoriquement c'est la corrélation PM-1/PM-3 qui devait être la meilleur car les émissions de l'écorce terrestre n'influent pas beaucoup dans cet intervalle de diamètre inférieur à 3 $\mu$ m.



**Figure 11:** Evolution des teneurs en PM-1, PM-3 et PM-10.

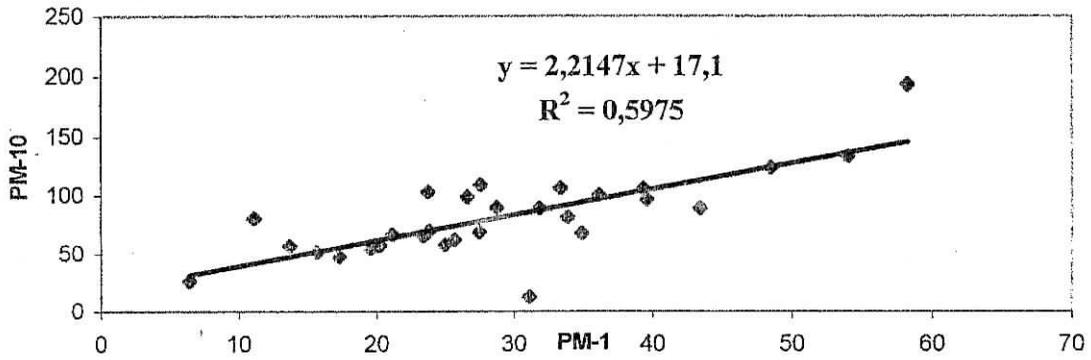


Figure N°12: corrélation entre les PM-10 et PM-1.

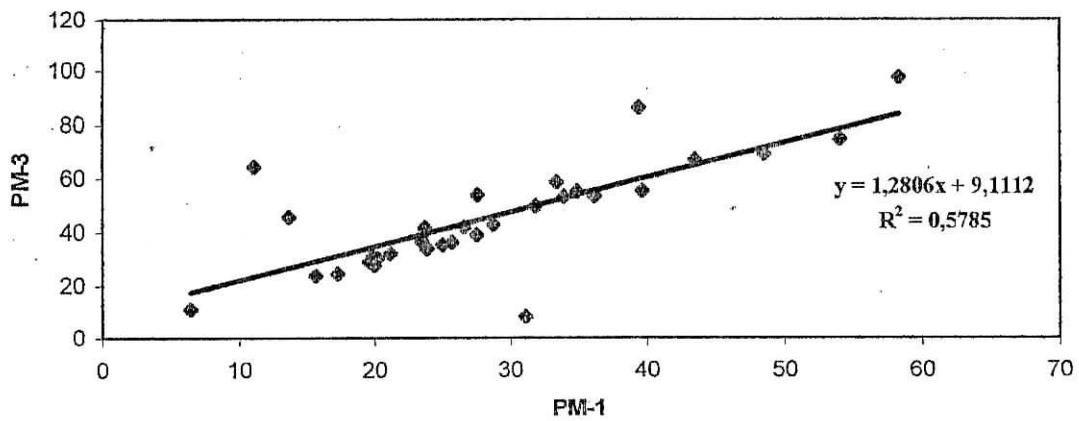


Figure N°13: corrélation entre les teneurs des PM-3 et PM-1

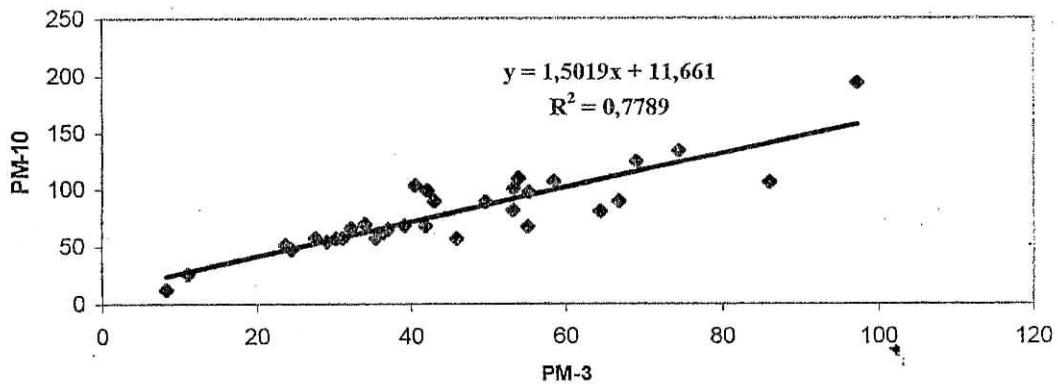


Figure N°14: corrélation entre les teneurs des PM-10 et PM-3

## VI.2) Comparaison des niveaux de pollution atteints avec les normes internationales:

Afin de déterminer la position qu'occupe Alger en terme de pollution, et d'estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les aérosols particuliers mesurés, une comparaison des niveaux observés avec les normes et valeurs guides internationales, ainsi qu'avec les taux mesurés dans d'autres villes du monde, peut être utile.

La réglementation sur les PM-10 et PM-2,5 qui remplace en fait celle relative aux TSP (particules totales en suspension) est très récente et varie selon les pays ; Dans certain pays elle est encore à l'état de projet. En ce qui concerne les PM-2,5 dont l'étude remonte seulement à quelques années, les seuils admissibles sont encore à l'étude et ne sont définitivement adoptés qu'aux USA par l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (EPA). Ces normes US fixent à  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  la moyenne sur 3 années et la valeur limite journalière respectivement [57]. Au Canada, le standard relatif aux PM-2,5 a été fixé récemment à  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [56].

Nous résumons en tableau N°11 les normes et valeurs guides des PM-10 en vigueur dans certains pays.

**Tableau N° 11: Valeurs guides pour les PM-10.**

Pays	Valeur Limite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Références
Etats-Unis	150 maximum journalier (P99 sur 3 ans)	[57]
	50 moyenne annuelle des teneurs journalières (mesurée sur 3 années)	
Japon	200 moyenne sur 1 heure	[58]
	100 moyenne annuelle	
Suède	100 P98 des moyennes sur 24 heures	[58]
Suisse	50 moyenne sur 24 heures (à ne pas dépasser plus d'une fois par an)	[59]
	20 moyenne annuelle	
Union Européenne	moyenne annuelle 2000 : $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , décroissant régulièrement 2005 : $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2010 : $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	[60]
	moyenne sur 24 heures 2000 : 35 dépassements de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum 2005 : 35 dépassements de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum 2010 : 7 dépassements de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum	
OMS	Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer une concentration en dessous de laquelle aucun effet n'est observé.	[28]

Par rapport à ces normes, on constate que Alger accuse, en ce site de proximité, une forte pollution par les particules inhalables PM-10 et les particules respirables PM-2,5.

Une comparaison avec les valeurs mesurées dans d'autres villes (tableau N°12) montre aussi que Alger fait face à une forte pollution particulaire, cette pollution est d'autant plus grave que la fraction alvéolaire, qui a un fort potentiel de nuisance, atteint des taux très élevés. On observe en effet de nombreux dépassements de l'intervalle plus ou moins acceptable 15 à 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Signalons aussi que les PM-10, mesurées dans ce travail, sont de même ordre de grandeur que celles relevées par le réseau de mesure SAMASAFIA à Bab-El-Oued et au 1<sup>er</sup> mai [61].

**Tableau 12 :** Teneurs atmosphériques en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes.

Villes	PM-10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM-2,5( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Année	Remarques	Références
Paris	22	-	2000	Site urbain	[62]
Strasbourg	20	-	2000	Site urbain	[62]
Lyon	23	-	2000	Site urbain	[62]
Bern (Suisse)	39,6	24,1	2001	Site de proximité	[63]
Jakarta (Indonésie)	119,7	-	94-95	Site urbain	[64]
Prague	105	-	1996	Site de proximité intersection (mesure sur 5 mois)	[65]
Edmonton (Canada)	25	9	1996	Site urbain	[66]
Montréal	28- 45	16-30	1996	Divers sites urbains	[66]
Mexico	-	96,4	1990	Teneur relative au PM 2,5. Site de proximité (mesure sur 2 mois)	[67]
Barcelone	49,8	-	1996	Site urbain	[68]
Marseille	29	-	1999	Site urbain	[69]
Rennes	24	-	1999	Teneur relative au PM-13 site de proximité	[69]
Arnheim	74,5	42,9		Site de proximité	[55]
Alger	80,8	45,3	2003	Site de proximité	Présente étude

Ainsi, les émissions du trafic routier, la mauvaise combustion du parc automobile qui est très âgé, ainsi que les émissions naturelles de l'érosion terrestre (nudité des sols, aridité du climat, poussière diverses) contribuent fortement à la pollution de l'air par les particules dans l'agglomération d'Alger.

### **3) Etude des métaux lourds associés aux PM-10 :**

Les particules atmosphériques véhiculent avec eux, à des teneurs variables, plusieurs composés dont les métaux lourds font partie. Comme ces métaux accentuent le pouvoir toxique des particules, il est important d'en déterminer l'ampleur. Il est aussi, par ailleurs important d'en déterminer leur distribution granulométrique, c'est à dire leur répartition sur les différentes fractions granulométriques.

L'étude des métaux lourds Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd, a porté sur 36 échantillons, soit plus d'une centaine de fractions granulométriques. Dans certaines fractions, les teneurs en Co et Cd se trouvent à un niveau inférieur au seuil de détection de l'appareil.

Les résultats obtenus sont illustrés graphiquement pour chaque métal lourd en figures N°15 à N°21, sur chaque graphe, nous reportons les teneurs mesurées dans les fractions PM-1, PM-1,5, PM-3, PM-7, et PM-10.

Le tableau N°13 et en Fig. N°22 résument les teneurs moyennes des métaux lourds en fonction de leur classe granulométrique.

La distribution des fractions massiques moyennes des éléments étudiés selon les classes granulométriques sont résumées en tableau N°14 et illustrées en fig. N°23

Teneurs en Fe ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

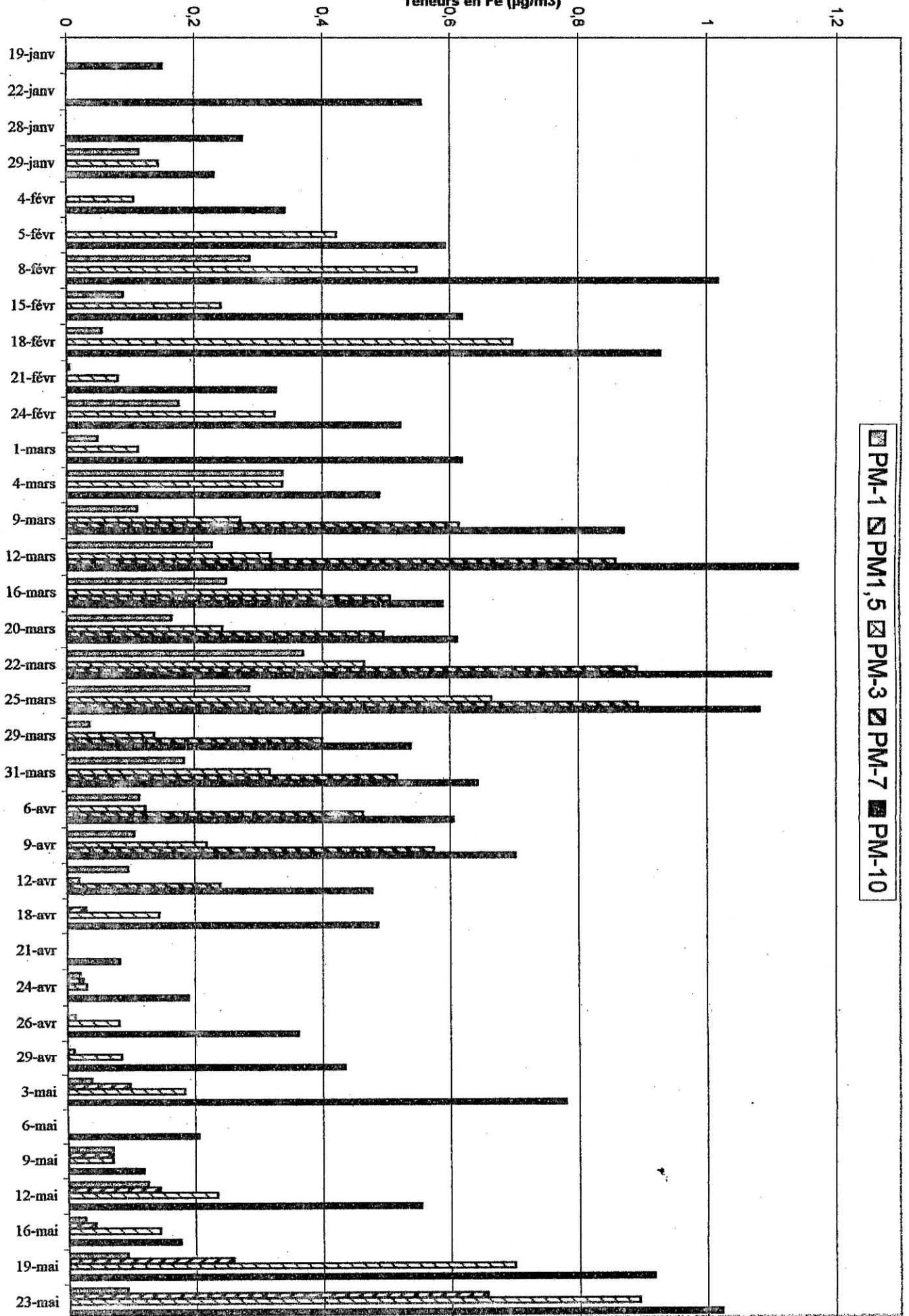


Figure N°15: Evolution des teneurs atmosphériques en fer dans les différents classes granulométriques

Teneurs en Pb ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

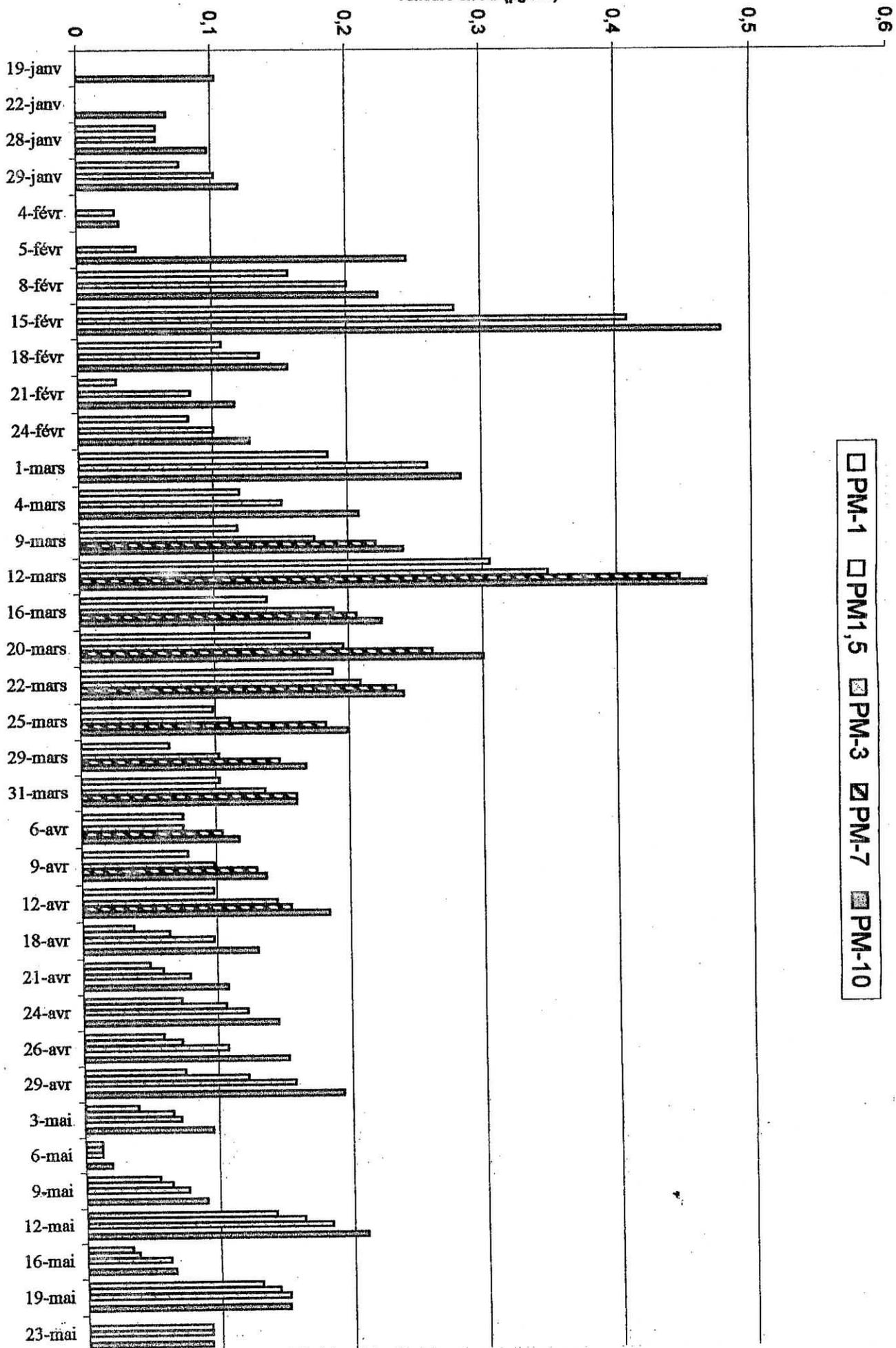


Figure N°18: Evolution des teneurs atmosphériques en plomb dans les différentes classes granulométriques

Teneurs en Cu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

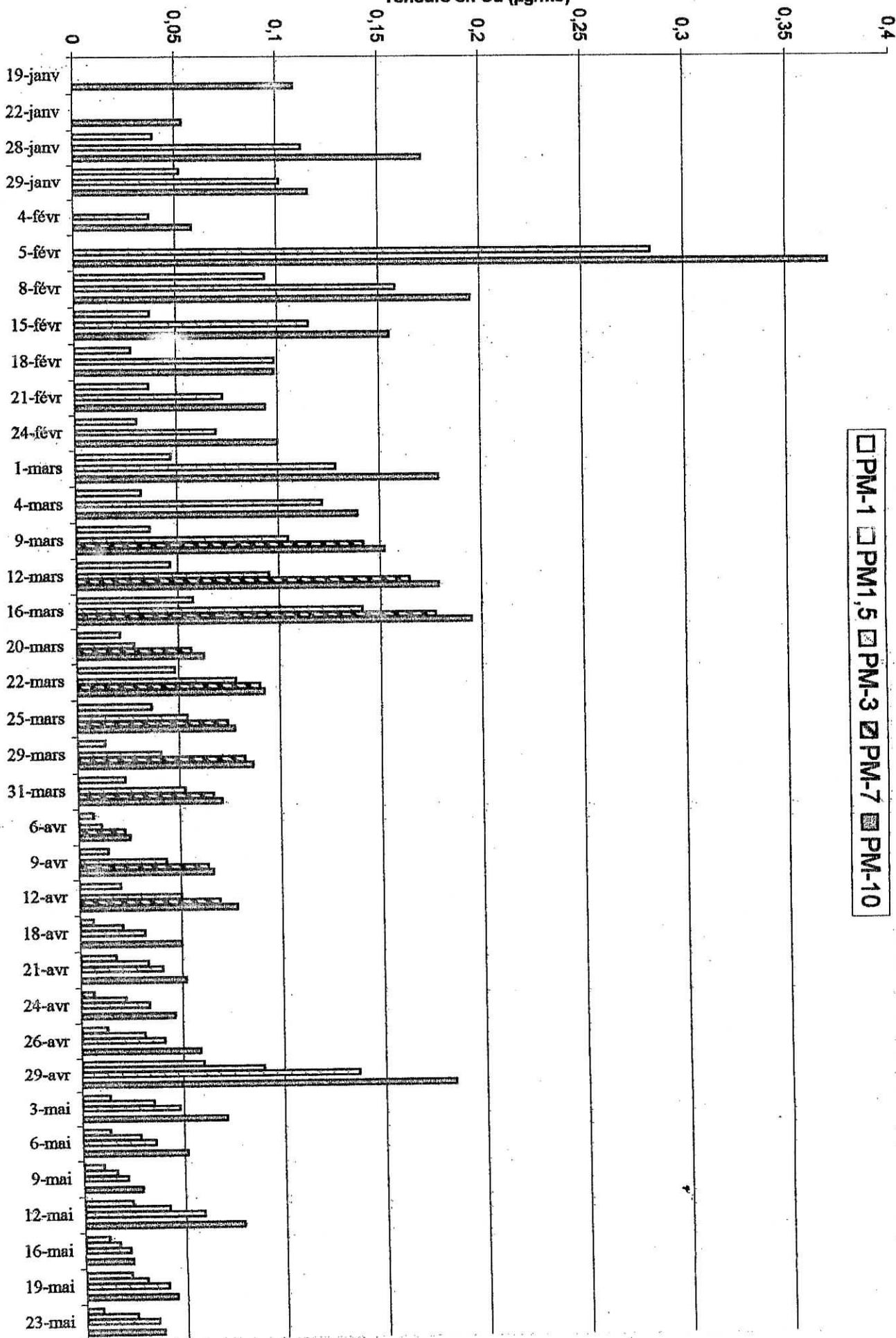


Figure N°17: Evolution des teneurs atmosphériques en cuivre dans les différents classes granulométriques

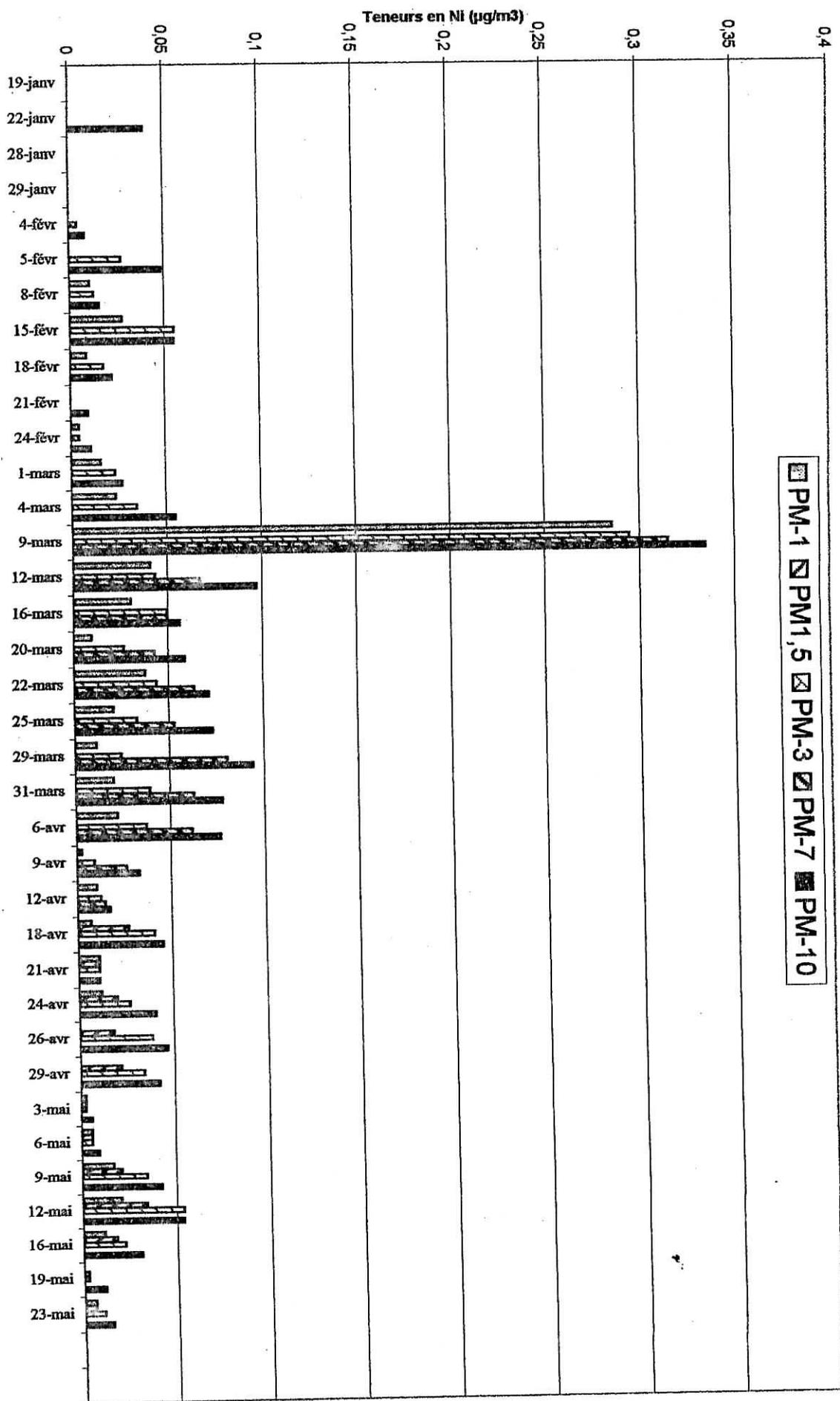


Figure n°18: Evolution des teneurs atmosphériques en nickel dans les différents classes granulométriques

Teneurs en Mn ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

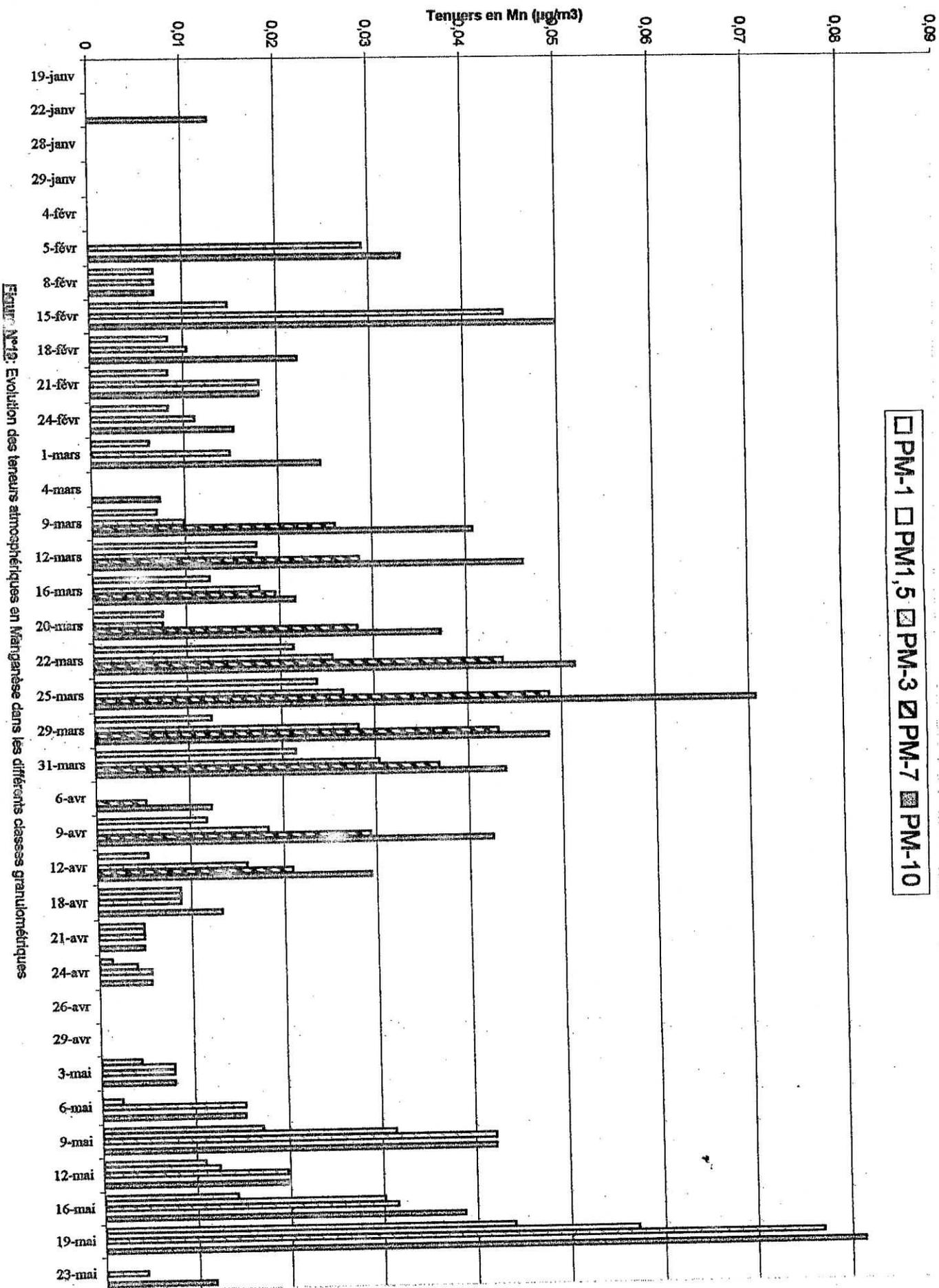


Figure N°12: Evolution des teneurs atmosphériques en Manganèse dans les différents classes granulométriques

Teneurs en CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

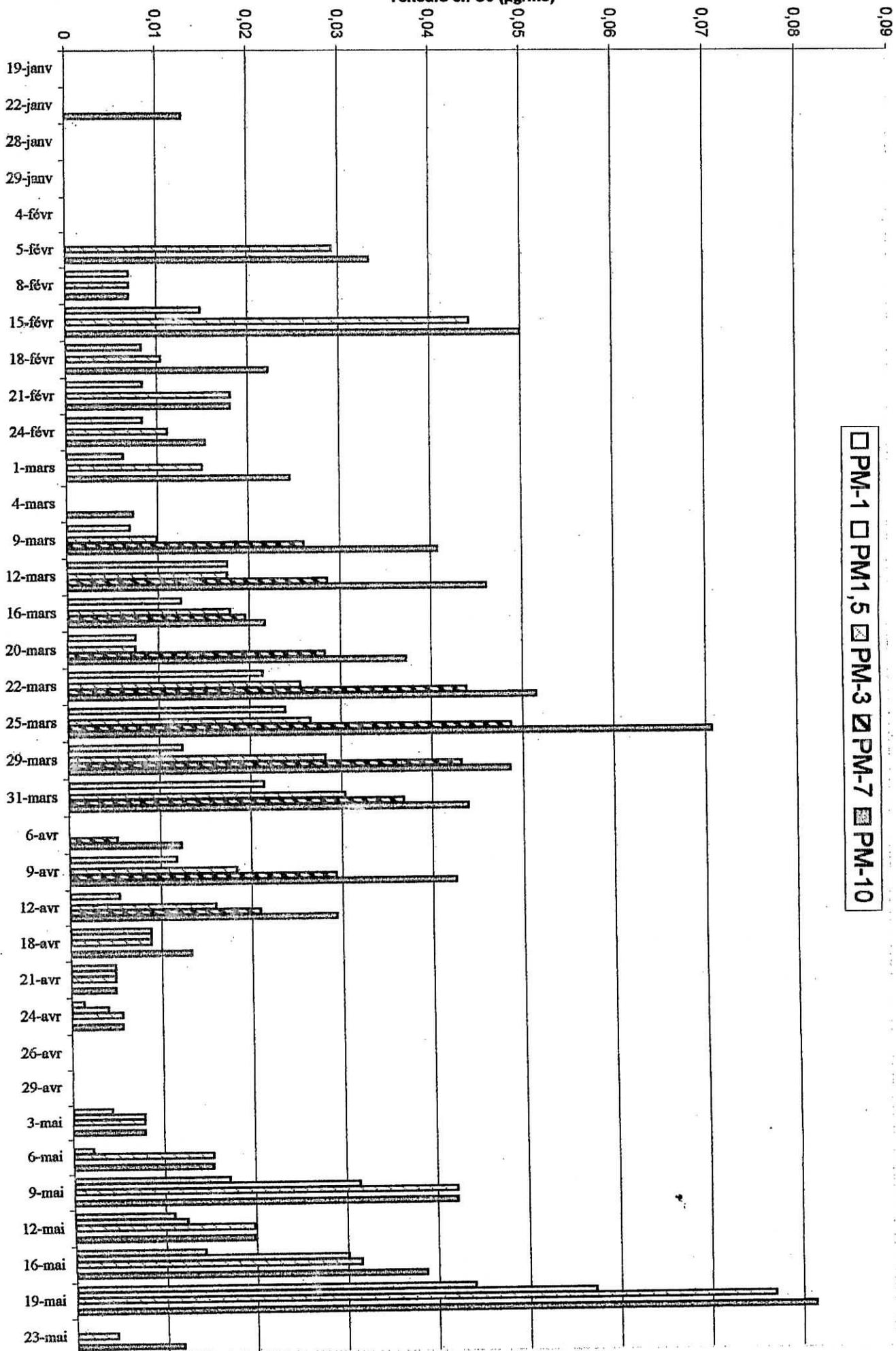


Figure N°20: Evolution des teneurs atmosphériques en cobalt dans les différents classes

□ PM-1 □ PM1,5 ▒ PM-3 ▒ PM-7 ▒ PM-10

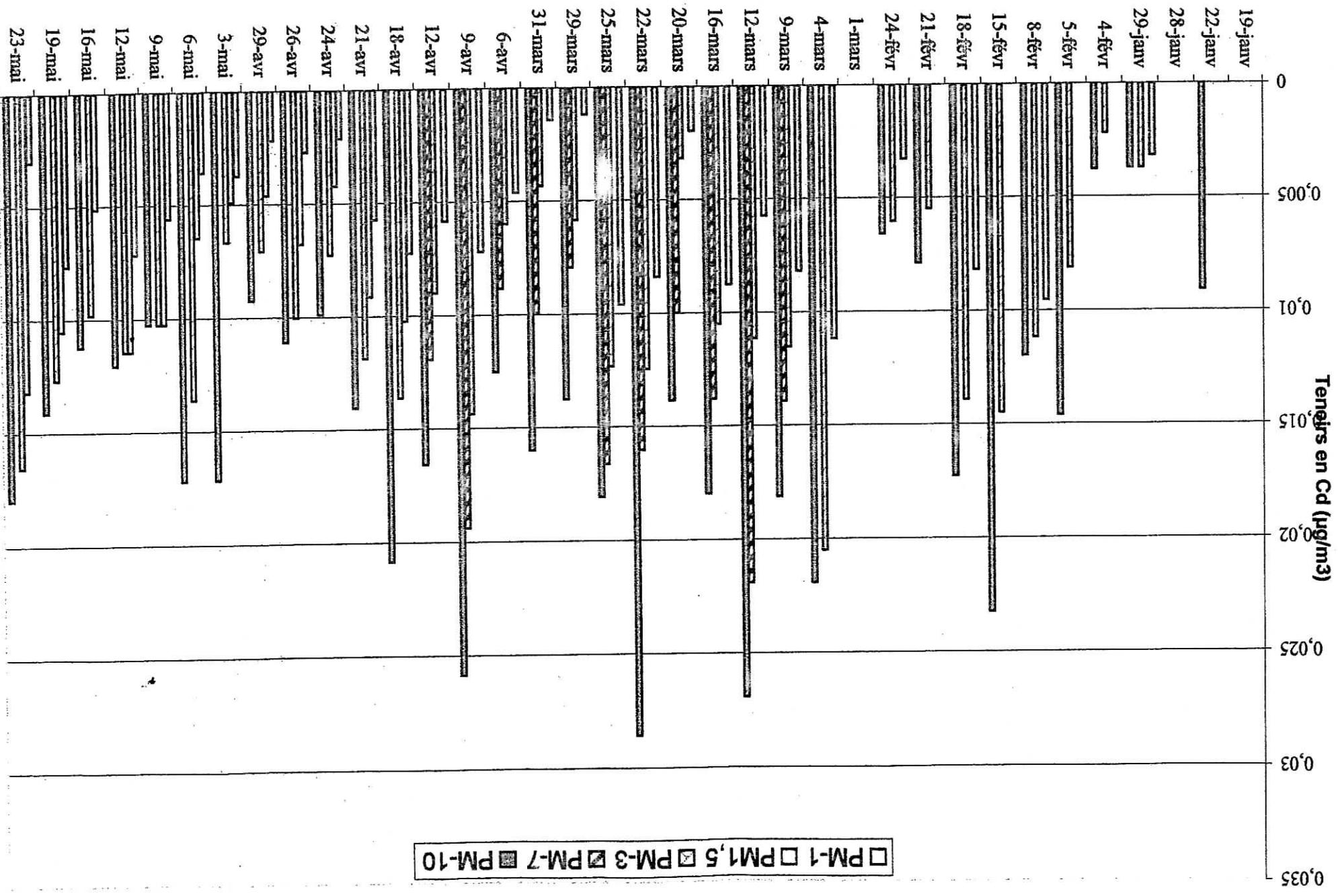
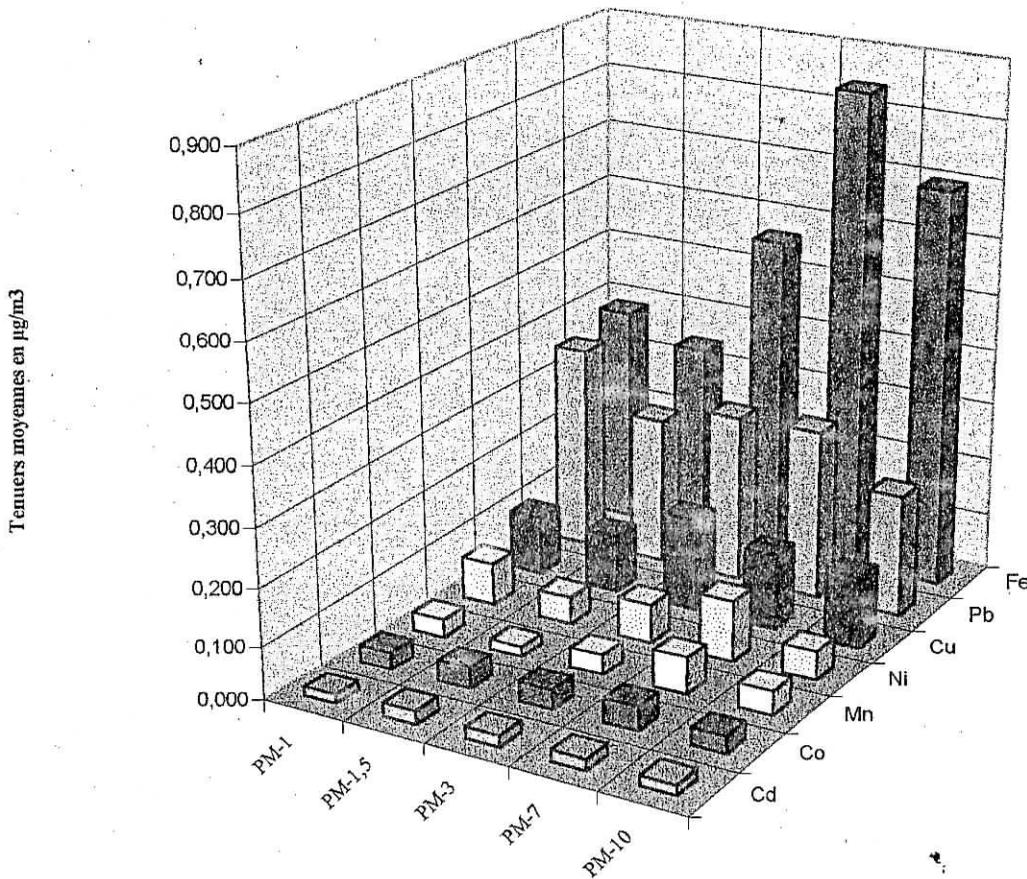


Figure No. 21: Evolution des teneurs atmosphériques en cadmium dans les différents classes

Fraction granulométrique	Teneurs moyennes en métaux lourds $\mu\text{g}/\text{m}^3$						
	Cd	Co	Mn	Ni	Cu	Pb	Fe
PM-1	0,005	0,009	0,009	0,021	0,029	0,101	0,109
PM-1,5	0,008	0,013	0,006	0,015	0,033	0,084	0,112
PM-3	0,009	0,016	0,018	0,031	0,075	0,134	0,262
PM-7	0,014	0,030	0,049	0,076	0,092	0,205	0,586
PM-10	0,014	0,024	0,035	0,045	0,101	0,171	0,565

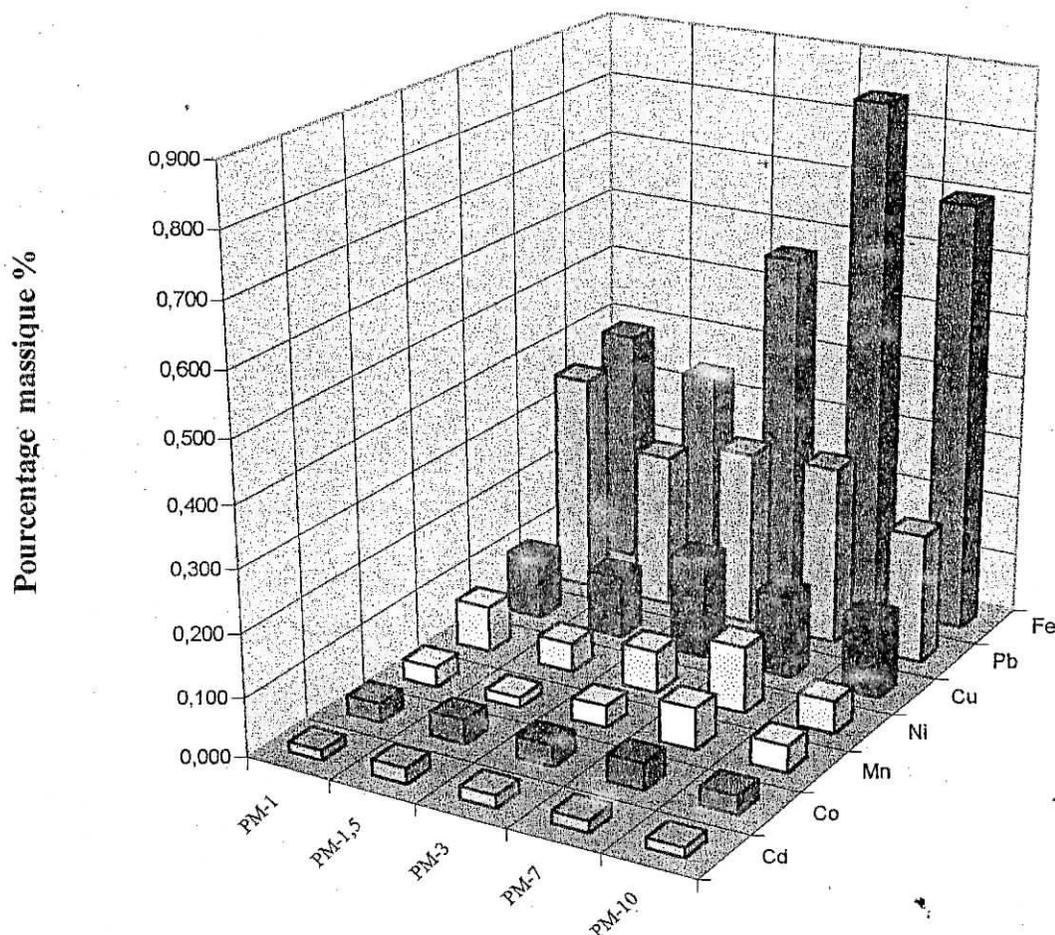
**Tableau N°13** : teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds mesurées dans les différentes fractions granulométriques.



**Figure N°22** : distribution des termes atmosphériques des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques.

Fraction granulométrique	Fractions massiques moyennes (%) des métaux lourds						
	Cd	Co	Mn	Ni	Cu	Pb	Fe
PM-1	0,016	0,033	0,032	0,074	0,102	0,358	0,386
PM-1,5	0,025	0,040	0,018	0,047	0,099	0,255	0,340
PM-3	0,020	0,035	0,039	0,068	0,161	0,290	0,564
PM-7	0,020	0,043	0,071	0,109	0,131	0,294	0,840
PM-10	0,017	0,030	0,044	0,056	0,125	0,211	0,699

**Tableau N°14** : distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique.



**Figure N° 23**: pourcentage (%) massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique

Comme dans le cas de l'étude des teneurs atmosphérique en particules et probablement pour les mêmes raisons, on relève pour l'ensemble des métaux lourds étudiés, une variation temporelle assez importante. Dans toutes les fractions, le fer est l'élément le plus abondant. Avec une teneur moyenne de l'ordre de  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , il représente environ 0,7% de la masse des particules PM-10. Ce résultat était attendu du fait de son abondance dans la croûte terrestre.

Le plomb, dans son abondance, suit le fer. Dans les PM-10 on enregistre une teneur moyenne  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondant une fraction massique de 0,21%. La teneur en plomb mesuré durant cette période est inférieur à celle relevée en 2000-2001 en même site. Nous ne pensons pas qu'il y'a diminution d'émission de plomb par le trafic routier. Cette diminution est due soit à la bonne pluviométrie de cette année, soit au nombre assez restreint de mesures effectuées. Ainsi d'après nos résultats, la pollution par le plomb reste assez préoccupante, certes les teneurs mesurées en ce site très aéré sont en général inférieurs aux normes de l'Union Européenne et de l'OMS (norme de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mais il faut s'attendre au centre ville et particulièrement dans les rues de type canyon où la circulation de l'air est très réduite, à des taux de pollution plus élevées.

Il est intéressant de noter que les métaux lourds se distribuent de manière inégale sur les différentes classes granulométriques (tableau N°14 et fig. N°23). Le fer qui est principalement issue de l'écorce terrestre se trouve majoritairement dans la fraction trachéobronchique, c'est à dire dans la classe granulométrique 3 à  $10 \mu\text{m}$ . le manganèse est aussi comme le fer plus abondant les particules grossières. Les autres métaux, particulièrement le plomb et le Cd sont par contre plus enrichis dans les particules respirables, les PM-3.

<i>Rapport</i>	<i>Métal lourd considéré</i>						
	Cd	Co	Mn	Ni	Cu	Pb	Fe
$\frac{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 1}}{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 10}}$	0,34	0,38	0,25	0,46	0,28	0,59	0,19
$\frac{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 1}}{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 3}}$	0,5	0,58	0,5	0,66	0,39	0,75	0,42
$\frac{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 3}}{[\text{métal lourd}] \text{ PM - 10}}$	0,68	0,67	0,51	0,69	0,74	0,79	0,46

**Tableau N°15 :** distribution granulométrique des métaux lourds.

L'examen des rapports  $\left( \frac{\text{concentration du métal dans la classe PM - i}}{\text{concentration du métal dans la classe PM - j}} \right)$  donnés en tableau

N°15, montre que par rapport au PM-10, 60% du plomb se trouve dans la fraction très fine des particules, les PM-1. dans la fraction PM-3, on relève que 75% du plomb accuse un diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .

Le cadmium, le Co, le Ni et le Cu sont aussi majoritairement distribués sur la fraction respirable (67 à 74 %). Le fer et le manganèse se caractérisent par une granulométrie plus élevée que 3  $\mu\text{m}$ . on constate en effet que seul 19% de fer et 25% de manganèse ont une granulométrie inférieure à 1  $\mu\text{m}$ .

Ce résultat relatif à la distribution des métaux lourds selon la granulométrie est similaire à celui trouvé dans des villes européennes et américaines [19, 63, 64].

## VII. CONCLUSION

Au cours de cette étude, qui constitue une série des travaux réalisés à l'ENP sur la pollution atmosphérique, nous avons mesuré les niveaux de pollution de l'air ambiant par les différentes classes granulométrique de l'aérosol particulaire, en particulier les PM-1, PM-3, et PM-10. Avec une moyenne de l'ordre de  $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Les teneurs atmosphériques en particulier les inhalables (PM-10) sont très élevées. Les particules respirables (PM-2,5) atteignent un niveau moyen de  $45,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette classe constitue en outre une fraction importante des PM-10, soit 56%. Les particules très fines (PM-1) constituent, avec une teneur moyenne de  $28,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , environ le tiers de la masse des PM-10. Ainsi à Alger, en site de proximité influencé par les émissions du trafic routier, la pollution par les aérosols particulaires est inquiétante de par son ampleur et de part sa faible granulométrie. On est ainsi en présence d'aérosols de particules qui pénètrent profondément dans les voies respiratoires.

Dans une deuxième partie de notre travail, nous avons étudié les métaux lourds (Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd,) qui sont véhiculés par les différentes fractions granulométriques des particules étudiées. Parmi ces métaux lourds, le plomb est, après le fer, l'élément le plus abondant. Comparés à d'autres pays, où une réglementation stricte a été appliquée, la pollution par le plomb reste élevée. La teneur moyenne de  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , reste toutefois inférieur à la valeur guide de l'OMS et aux normes de l'Union Européenne (seuil limite toléré  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La distribution granulométrique des métaux lourds montre que les composés de la croûte terrestre Fe et Mn se répartissent majoritairement sur la classe des particules grossières, c'est à dire, entre 3 et  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . les métaux lourds les plus toxiques, comme le Pb et le Cd, se retrouvent par contre le plus dans la fraction des respirable des particules (plus de 70% ont un diamètre inférieur à  $3 \mu\text{m}$ ). leur pouvoir toxique est ainsi plus accentué.

A la lumière de ces résultats, on peut affirmer que l'Algérie présente la particularité d'être un pays qui n'est pas fortement motorisé, mais qui présente une pollution particulaire plus importante que dans les pays développés, où le trafic routier est bien plus intense.

Cette pollution résulte, en partie, de la mauvaise combustion d'un parc automobile qui n'est pas fortement diésélisé, mais âgé, mal entretenu et dépourvu de système de d'épuration.

Aussi et afin d'améliorer la situation ou au moins éviter son aggravation, des mesures concrètes sont à prendre à courte et majeur terme :

- Mise en place d'une réglementation sur les émissions du parc automobile.
- Assurer un vaste contrôle technique et une meilleure maintenance des véhicules.
- Meilleur offre de l'essence sans plomb.
- Encourager plus la bicarburation Essence GPL ou GNC
- Améliorer de la gestion du transport.
- Accorder plus au couvert végétal pour réduire l'érosion des sols.

A l'échelle purement scientifique, il conviendrait de développer des travaux de recherche en toxicologie sur les polluants dont la toxicité aiguë ou chronique est importante et constitue de fait une priorité. La prédiction des effets sur le long terme, particulièrement importants dans le cas des pollutions par les particules fines ou des éléments métalliques tels que le plomb, le mercure ou l'arsenic, qui s'accumulent dans les sols et la chaîne alimentaire, Des approches analyses de cycle de vie de ces substances devraient être développées. Ainsi la caractérisation, la quantification et la modélisation des mécanismes de transfert des polluants, notamment des éléments métalliques, est une des voies importantes de recherche à développer. Des études sanitaires (études toxicologiques, études d'expositions basées sur les modes de vie des populations, enquêtes épidémiologiques, ...etc.), devraient être lancées pour apprécier les effets sanitaires de la pollution par les particules fines et les métaux lourds et l'éventuel besoin de suivi des populations exposées. Les zones de contaminations naturelles et/ou de pollutions anthropiques avérées pourraient servir d'aires pilotes.

Références bibliographiques :

- [1] Chiron M., Quenel P. et Zmivau D.: « *La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique* ». Poll. Atmosph., Janvier mars, p 41-52, 1997.
  - [2] Conférence des Gouverneurs de la Nouvelle-Angleterre et des Premiers Ministres de l'Est du Canada, *Compte rendu du symposium sur la pollution de l'air et la santé publique*, Montréal (Août 2002).
  - [3] Kerbachi R., M. Boughedaoui, N. Koutai et T. Lakki : « *La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger* ». Poll. Atm., Avril-Juin, pp 89-101, (1998).
  - [4] Kerbachi R., M. keddam, M. Boughedaoui, R.Joumard: « *Aromatic hydrocarbons in the ambient air of Algiers* ». Proc. Int.symp."Transport and Air pollution"Graz, Austria, 31 May -2 June (1999).
  - [5] Kerbachi R., M. Boughedaoui, Y. kerchich, et R. Joumard : *Evaluation de pollution de l'air par les PM-10 à Alger*, 9<sup>th</sup> colloque international « transport and air pollution », 5 -7 Juin 2000, Avignon (France)
  - [6] Kerchiche, Y.: « *Etude de la pollution de l'air par les particules fines(PM-10) et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger* ». Thèse de Magister, génie d'environnement, ENP, (2003).
  - [7] Bitouche, A. « *Etude de la pollution de l'air à Alger par les particules fines(pm10, pm2.5, pm1) et évaluation de l'aérosol acide* ». Projet de Fin d'Etude, génie d'environnement, ENP, (2002).
  - [8] Renoux A.: « *Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique* ». Poll. Atmo., Janvier-Mars, pp 10-16, 1990.
  - [9] Stern A. C., Boubel, R. W. "*Fundamentals of air pollution*", 2ème édition , Academic Press, London, (1984).
  - [10] Branca M., Ursu P., « *pollution de l'atmosphère et protection de l'écologie* », édition Eyrolles, Paris, (1974).
  - [11] Ramade F., *Elements d'ecologie, action de l'homme sur la biosphère*, MC Graw Hill, Paris (1982).
  - [12] Kerbachi R., Cours de 5ème Année « *pollution atmosphérique* », Génie de l'Env.,ENP, Alger 2003.
  - [13] Dang C., Fontelle T. P. et Leygonie R. : *les émissions de poussières et généralités sur leurs mesures à l'émission*, Poll. Atmosph., Janvier mars, 1990, pp. 38-46.
  - [14] Brochard D., « *Aérosol et santé, déposition et épuration des particules inhalées* », poll. Atm., Avril Juin, pp 178-182,1999.
-

- [15] Degorbert P., « *pollution atmosphérique, origine et réduction des émissions au niveau moteur* ». Technique de l'ingénieur, B2710, pp 1-6, 1994.
- [16] Kleeman J. A., J. P. Schauer et G.R. Cass, "size and composition of fine particulate matter emitted from motor vehicles", Env. Sc. Tech., VOL. 34, n°7, (2000).
- [17] l'Agence de l'Environnement et Maîtrise de l'Energie (ADEME), « *la qualité de l'air en France* ». (1998).
- [18] Gillies J. A., Gerfler A. W., Sagebiel J. C. et Dippel W. A., "on the road particulate matter (pm2.5 and pm10) emissions in the pulveda tunnel, Los Angles, California", Env. sc. Tech. Vol. 35, n°6, (2001).
- [19] Butler J. D., « *air pollution chemistry* », Academic press, London, 1979.
- [20] Renoux A. et Borland D., « *les Aérosols : physique et méthodologie* ». Technique et documentation, Paris 1998.
- [21] Magdaine C., *Les particules atmosphériques* , www.notre-planet info, 2001-2002.
- [22] Masclet P. et Cachier H., « *L'aérosol atmosphérique* », analysis magazine , 26, N°09 pp. 11-17,1998.
- [23] Colosio J., *définition et explication des phénomènes liés à la pollution atmosphérique*, www.ademe.fr, 2002.
- [24] Aide-Mémoire N°187, « *pollution de l'air* », www.who.int, 2000.
- [25] Gazette du Canada, Partie I, Vol. 135, N°7, pp. 452, février 2001.
- [26] Martin J., Maystre L. Y., "santé et pollution de l'air", Presses polytechniques romandes, pp. 46-59 : 145, 1988.
- [27] Klassen et al; « *Casrett and doll's toxicology, the basic science of poisons*, 3ème édition, pp343, 1986.
- [28] « *OMS: Update and revision of air quality guidellines for Europe* », WHO regional publications, European, Serien, Copenhegen, 1997.
- [29] Dockery D. W. et al.« *An association between pollution and mortality in six U.S. Cities* », N. Engl. J. Med, 329/24, , pp. 107-132, 1993.

- [30] Ackerman-Lieberich U. et al. « *Effects of long term exposure to air pollution on lung functions* », SAPALDIA Study. Am. J. Respir Crit Care Med; 149/4: A 663, 1994.
- [31] Zemp E. et al. « *Long term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms* », SAPALDIA Study. Am. J. Respir Crit Care Med; 149/4: A 662, 1994.
- [32] Braun C., Fahrland et al. « *Respiratory symptoms and exposure to long term air pollution and climate in Swiss schoolchildren* », Am. Y. Respir Crit Care Med; (accepté pour publication), 1996.
- [33] Docker D. W. y et al. « *Effects of inhaled particles on respiratory health of children* », Am. Rev. Respir Dis, pp. 138 : 587-594, 1999.
- [34] Environnement Canada, *Les particules de l'air ambiant - Vue d'ensemble*, Québec, février, 1998.
- [35] Petit-Courieux F., Person A., Le Moullec Y., « *Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques* », Pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp. 21-30, 1990.
- [36] Detrie J. P., « *La pollution atmosphérique* », Ed. Dunod, Paris, 1969.
- [37] Sisler J. F., « *The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States* », Atm. Env., Vol. 28, N° 5, p 851-862, 1994
- [38] Gérard MIQUEL, Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur « *Les effets des métaux lourds sur l'Environnement et la Santé* ». France, Session Ordinaire de 2000-2001.
- [39] Wadge A. et Hutton M., « *the Cadmium and lead content of suspended particulate matter from a UK refuse incinerator* », Sci. Tot. Env., 67, 91-95, 1987.
- [40] Degobert P., « *Automobiles and Pollution* », Ed. Technip, Paris, pp. 40-43 : 76-77, 1995.
- [41] Guilbert et B. Martin J-C., « *Carburant et moteurs* », Technip, Paris, pp.903 1984.
- [42] B. Juguet et al., « *Etude de la fraction minérale de l'aérosol urbain à paris* », bilan d'une surveillance prolongée, Poll. Atmosph., 3-12, 1984.
- [43] Harrison R. M., Laxen D. P. II.: « *Lead pollution, causes and control* », Chapman and hall, 1981.
- [44] Boudéne C. *Récentes acquisitions sur la toxicité en plomb*, Poll. Atm., N°85, p. 62-70, 1980.
- [45] O.C.D.E., *Transport et environnement*, publications O.C.D.E., Paris, 150p., 1988.
-

- [46] Rylander R. et I. Megevand, *Introduction à la médecine de l'environnement*, Ed. Frison-roche, Paris, 151p, 1993.
- [47] "Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air", Center for Environmental Research Information Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, OH 45268, June 1999.
- [48] Steenland K., Deddens J., et al., « Diesel exhaust and lung cancer in the trucking industry : exposure-response analyses and risk assessment », *Am J Ind Med* 34(3) : 220-8, 1998.
- [49] Gaëlle DELETRAZ – SET, Emmanuel PAUL – LAMA, « Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes », Contrat ADEME n° 97 93 022, Mars 1998.
- [50] Madelain G., « Métrologie des aérosols », *Pollution atmosphérique*, Janvier-Septembre, pp.277-283.
- [51] Schroeder D. W., Dobson M., Kane D. M., and Jonson n. d. « toxic trace elements associated with airborne particulate matter », a review. *JAPCA*, 37, 11, pp: 1267- 1285, 1987.
- [52] Ikawa K. O., « Trace analysis atmospheric », Edition John Wiley and Sons, London, 1997.
- [53] Norme ISO 9855, « Air ambient, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectées sur des filtres », France 1993.
- [54] Airpaif, Surveillance de la qualité de l'air de l'île de France, Actualité N°1, avril 1998.
- [55] Janssen N. A. H., D. F.M. Van Manston, K. Van Der Jagt, H. Harsema and G. Hoek: "Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations". *Atmosph. Env.*, vol. 31, N°9, p 1185-1193, 1997.
- [56] « L'Ontario et les standards pancanadiens relatifs aux particules et à l'ozone au sol », *En Bref*, décembre 1999.
- [57] US-EPA, « National ambient air quality standars (NAAQS) for particulate matter », *Federal register* vol. 62, N°138, 1997.
- [58] « Particules en suspension: Mesure et évaluation des effets sur la santé », *Cahier de l'environnement*, publication de l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage(OFEFEP) N°270, Berne-Suisse, 1996.
- [59] « Danger in the air », *Natural Elements: Air*, Safel-Environement Switzerland, , pp. 19-31, 2002.
- [60] *Journal officiel des communautés européennes*, L 163/41, Directive 1999/ 30/CE du 27 avril 1999, Bruxelles.
-

- [61] SAMASAFIA, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Communication personnel, Alger 2003.
- [62] Association de Surveillance de la qualité de l'air (ASQ), France2000.
- [63] Gehrig R., Hügli Ch., Hofer P., "Contributions of Road Traffic to Ambient PM-10 and PM-2.5 Concentrations", 1<sup>st</sup> Swiss Transport Research Conference, Monte Verità / Ascom, March 1.-3. 2001.
- [64] Linda Y. Zou, Martin A. Hooper: "size-resolved airborne particles and their morphology in central Jakarta". *Atmo. Env.* Vol: 51 n°8, pp.1167-1172. 1997.
- [65] Hovorka J. et Donkelaar M., « Elemental composition and stable lead isotope ratios of wintertime PM-10 aerosols in Prague-centre cross-roads », 8th international symposium transport and pollution, 31Mai-02 Juin, Graz, Autriche, 1999.
- [66] L. Cheng et al., « Characteristics of inhaled particulate in Alberta cities », *Atm. Env.* vol. 32, N°22, pp. 3835-3844,1998.
- [67] Vega E., Garcia I. et al., « Application of a chemical mass balance receptor model to breathable particulate matter in Mexico-cities », *J. A. W. M. A.*, vol. 47, pp. 524-529, 1997.
- [68] Rapport annuel de ajuntament de Barcelona, Direction des services de surveillance de l'air ambiant, «*La contaminatio atmosférica a Barcelona* », avril 1997.
- [69] Rapport du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (France), Bilan chiffré de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations, 1991-1999, Paris, 2000.
-