

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

P0004/05B

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
Département de Génie e l'environnement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du titre  
d'Ingénieur d'Etat en Génie de l'environnement

THEME :

**EVALUATION DE LA POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE PAR LES  
PARTICULES FINES EN SITE URBAIN  
À ALGER**

Présenté par :

Melle : **BADJ Sabrina**

Dirigé par :

Mr : **Pr. R. KERBACHI**

Mr : **A. BITOUCHE**

## Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents ;*

*A mes très chères sœurs : Mahdia ,Nessrine et Chahira ;*

*A mes très chers frères : Abdelkader, Mohamed, Sid Ahmed ;*

*A toute ma famille grands et petits ;*

*A mes meilleures amies : Lamia , Kahina , Nassima ;Mouna et Nedjma*

*A tous mes amis : Ali , Hicham, Oussama et Mahdi ;*

*Et toute personne chère à mon cœur ;*



## Remerciements

*Ce travail s'est effectué dans le laboratoire de génie de l'environnement sous la direction de Monsieur R.KERBACHI à l'Ecole Nationale Polytechnique. Je tiens à lui remercier particulièrement en lui exprimant ici toute ma reconnaissance et qu'il veuille accepter l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour son aide, son soutien, ses directives et conseils judicieux et son suivi régulier, ce qui a permis l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier également mon co-promoteur Monsieur, A.BITOCHE pour son aide et encouragement.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à toute*

*l'équipe du laboratoire de*

*génie de l'environnement à l'ENP.*

*Enfin, tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail. Je leurs suis très reconnaissante.*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\*

هذه الدراسة تقدم نسبة تلوث الهواء بال PM-10 بموقع مجاور لضاحية تقع شرق مدينة الجزائر العاصمة. التقاط الجزيئات تم ببواسطة جهاز أخذ العينات ذو تدفق قوي، HVS-PM-10. في هذا الموقع الكمية المتوسطة اليومية بال PM-10 ترتفع إلى  $72,4 \text{ م}^3$ . الحد الأقصى هو 158,8 ميكروغرام/  $\text{م}^3$  و 98% من مجموع العينات، الحد 139 ميكروغرام/  $\text{م}^3$  قد تم تجاوزه. نتج عن هذا تلوث كبير بالجزيئات القابلة للاستنشاق التي مصدرها الرئيسي هي حركات السيارات في الطرق من بين المعادن الثقيلة الملتصقة بالجزيئات PM-10 نجد الرصاص خاصة الذي يشكل قيم عالية نسبيا. قيست كمية متوسطة قيمتها 0,18 ميكروغرام/  $\text{م}^3$  و الموافقة لنسبة كتلية مقدارها 0,3%.

الكلمات - المفاتيح:

نوعية الهواء، PM-10، سواد الدخان، المعادن الثقيلة، حركات السيارات في الطرق، الجزائر.

### **Résumé :**

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les PM-10 en un site urbain dans l'est d'Alger (Bab Ezzouar). Le prélèvement des particules est effectué par un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10. En ce site la teneur journalière moyenne en PM-10 s'élève à  $72.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum atteint  $158.8\mu\text{g}/\text{m}^3$  et dans 98% de mesures sont inférieures à  $139\mu\text{g}/\text{m}^3$  est dépassée. Il en résulte une forte pollution par les particules inhalables issues principalement du trafic routier. Parmi les métaux lourds associés aux PM-10, c'est surtout le plomb qui accuse des valeurs relativement élevées. On y mesure une teneur moyenne de  $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondant à une fraction massique de l'ordre de 0.3%.

### **Mots- clefs :**

Qualité de l'air, PM-10, site urbain, suies, métaux lourds, trafic routier, Alger.

### **Summary :**

This study presents the level of air pollution by the PM-10 in urban site in the east of Alger (Bab Ezzouar). The taking away of the particules is carried out by a sampler with strong flow, HVS-PM-10. In this site the average daily content of PM-10 rises to  $72.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The maximum reaches  $158.8\mu\text{g}/\text{m}^3$  and in 95% of the cases, the value is under to  $139\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In results from it a strong pollution by the paricules inhalables resulting mainly from the road traffic. Among the heavy metals associated the PM-10, it is especially the lead which shows relatively high values. One measures there an average content of  $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondent with a mass fraction of about 0.3%.

### **Keys- words:**

Air quality, PM-10, soots, road traffic, Algiers.



## Sommaire :

<b>I- Introduction</b> .....	1
<b>II- Généralités sur la pollution de l'atmosphère par les particules</b>	
II- 1. Définition.....	4
II- 2. Les principales sources émettrices de particules.....	7
II- 2-1. Les particules d'origine naturelle.....	7
II-2-2. Les particules d'origine anthropogénique .....	9
II-2-2-1. La combustion.....	9
II-2-2-2. Les process industriels.....	10
II-2-2-3. Industrie des matériaux de construction.....	10
II-2-2-4. Incinération des déchets.....	10
II-2-2-5. Le trafic routier.....	11
<b>III- Propriétés des particules</b>	
III-1. Forme des particules .....	15
III-2. Dimensions et granulométrie des particules .....	15
III-2-1. dimensions des particules.....	15
III-2-2. Granulométrie des particules.....	16
III-2-2-1. Les grosses particules.....	16
III-2-2-2. Les particules fines .....	16
III-3. Formation des particules .....	18
III-3. composition chimique des particules .....	20
III-4. Dynamiques des particules .....	23
III-4-1. Les particules de diamètre supérieur à 1µm .....	25
III-4-2. Les particules fines de diamètre compris entre 0.1 et 1µm .....	26
III-4-3. Les particules submicroniques ( diamètre inférieur à 0.1µm ) .....	27
III-5. L'influence de la météorologie .....	28
<b>VI- Effets des particules en suspension</b>	
IV-1. Effets sur la santé humaine .....	30
IV-1-1. Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire .....	32
VI-1-2. Impact des PM-10 et PM- 2.5 sur la santé.....	34

IV-1-3. Effet toxique de certains métaux lourds supportés par les PM-10 .....	39
IV-1-3-1. Action toxique du plomb .....	39
IV-1-3-2. Action toxique du Cadmium.....	39
IV-1-3-3. Action du Vanadium.....	40
IV-1-3-4. Action toxique du Mercure.....	40
IV-2. Effets sur les animaux .....	42
IV-3. Effets sur les végétaux .....	42
IV-4. Effets des particules solides sur les matériaux .....	43
IV-5. Effet sur la visibilité .....	43

## **V- Les principales techniques et méthodes d'analyse des particules en suspension**

V-1. Echantillonnage de l'air .....	45
V-1-1. Les prélèvements sans coupure granulométrique.....	46
V-1-2. Prélèvement avec coupure granulométrique .....	48
-La jauge bêta .....	49
- La balance piézo- électrique ou « balance à quartz » : appareil de type TEOM.....	49
V-1-3. Les prélèvements avec fractionnement granulométrique .....	50
V-2. Les filtres et membranes de rétention.....	50
V-2-1. Les filtres en fibre de verre.....	51
V-2-2. Les filtres membranes .....	51
V-3. Analyse des particules en suspension.....	51

## **VI-Méthodologie**

VI- Choix du site de prélèvement .....	55
VI- Mode de prélèvement.....	55
VI-3 Traitement et analyse élémentaire des PM-10.....	60

## **VII-Résultats et interprétations**

VII-1. Etude des teneurs atmosphériques en particules inhalables ( PM-10).....	63
VII-2. Etude des métaux lourds associés aux PM-10.....	83

<b>VIII- Conclusion.....</b>	<b>88</b>
------------------------------	-----------

## I-INTRODUCTION :

Il y a un quart de siècle environ que l'intérêt porté à la pollution de l'air a pris de l'importance. Jusqu'à alors, ce problème ne dépassait pas les cercles scientifiques et ne préoccupait que quelques chercheurs et bureaux d'études des pays industrialisés, recherchant l'origine de certains effets nocifs ou la récupération de substances utilisables. Aujourd'hui la pollution de l'air préoccupe le monde entier, la société civile, les pouvoirs publics et les hautes instances et organismes internationaux tels que l'OMS, le PNUE, l'UNESCO....etc.

Les raisons qui déterminent la prise de conscience du problème de la pollution de l'air et la décision d'appliquer les mesures de protection sont en dernière instance d'ordre pratique et entraînent des dispositions de prévention vis-à-vis de certains polluants à effets nocifs pour l'humanité actuelle et future.

Au delà des problèmes de contamination de l'air à l'échelle locale et régionale, on est confronté à de nouveaux problèmes qui touchent la planète entière comme l'effet de serre et les changements climatiques qu'il risque d'engendrer.

Dans la lutte contre la pollution atmosphérique classique, plusieurs progrès ont été accomplis et des techniques de prévention de la pollution de l'air ont été mises en œuvre. Il existe toutefois certaines formes de pollution qui demeurent préoccupantes.

Parmi ces types de pollution on notera celle relative à la pollution de l'air par les poussières qui fera l'objet de notre travail.

La pollution de l'air par les particules en suspension en général et la fraction fine de ces particules en particulier, fait ces dernières années l'objet d'une attention particulière. De part leur finesse et les interactions qu'elles subissent, elles séjournent longtemps dans l'atmosphère et contribuent fortement à la dégradation de la qualité de l'air.

Plusieurs travaux effectués en Europe et aux USA ont montré que du point de vue sanitaire, les particules en suspension dans l'air représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air [1, 2, 3]. De nombreuses et cohérentes études leur attribuent une forte responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets biologiques et sanitaires [4,5]. Leur impact sur l'environnement et les nuisances qu'elles engendrent dépendent toutefois de leur granulométrie et de leur composition chimique, elle-même liée à leurs sources d'émission [6].

En vertu du cheminement des particules dans le système respiratoire et de leur rétention dans le corps humain, ce sont surtout les particules fines ou inhalables de diamètre inférieur à  $10\mu\text{m}$  ( les PM-10 ou fraction thoracique ) qui sont les plus incriminées et donc aussi les plus étudiées. Les particules PM-10 ne sont pas arrêtées par le système nasopharyngien et aboutissent dans les voies respiratoires terminales [6]. Comme par ailleurs, l'essentiel des effets associés aux particules est le fait de particules très fines qui se déposent dans les alvéoles du segment pulmonaire, la communauté scientifique accorde de plus en plus d'importances à l'étude de la fraction alvéolaire ou fraction respirable, les PM-2,5 (particules de diamètre inférieur à  $2,5\mu\text{m}$  ). L'importance et le rôle que jouent ces aérosols en tant que vecteurs essentiels de la pollution atmosphérique (maladies obstructives des voies aériennes, bronchites chroniques, aggravation des cas asthmatiques, mortalité cardio-vasculaire, allergie ..etc.) a fait que de nombreux pays ont récemment révisé les normes existantes ou proposé de nouvelles réglementations.

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

Une grande partie des particules très fines (PM-2,5) provient du trafic routier (émissions des véhicules à essence, mais surtout des véhicules diesel). On estime ainsi qu'en milieu urbain, le trafic routier y contribue à plus de 50%.

Dans ce contexte, il faut signaler qu'avec la diésélisation de plus en plus forte du parc automobile qu'on observe un peu partout en Europe, 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  $1\mu\text{m}$ ). Cette classe de véhicules émet en effet majoritairement des particules très fines de faible granulométrie.

La croissance du parc automobile induit par le développement socio-économique et la forte urbanisation a conduit à l'émergence chez la population citadine de maladies chroniques liés à la dégradation de la qualité de l'air. Dans ce contexte, on rappelle que l'IARC (Agence Internationale de la Recherche sur le Cancer ) et US-EPA (Agence Américaine de Protection de l'Environnement) ont classé les émissions diesel comme étant probablement cancérogènes

pour l'homme (classe 2A) et les émissions des véhicules à essence dans le groupe 2B c'est-à-dire potentiellement cancérigènes pour l'homme [1]. Toutes ces indications font que de nos jours, l'étude des fractions thoracique et alvéolaire des particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air.

En Algérie, le manque de données relatives à la qualité de l'air font que l'impact de cette forme de pollution sur l'environnement soit très mal connu. Les sources de pollution sont nombreuses et les nuisances sont déjà perçues, mais leur relation directe ou indirecte avec la dégradation de l'environnement n'est pas établie. A Alger par exemple, on estime le taux des asthmatiques à plus de 8% et certaines données de l'Institut National de la Santé Publique estime à plus de 20% les consultations hospitalières ayant pour motif des problèmes d'insuffisances respiratoires.

C'est dans ce contexte, et en continuité des travaux antérieurs effectués sur la pollution par les particules inhalables [7,8,9] au sein du laboratoire Sciences et Techniques de l'Environnement de l'ENP, que nous nous proposons dans ce travail d'étudier par classe granulométrique les niveaux de pollution de l'air par les particules fines atteints à Alger en un site urbain à forte densité de population et qui n'est pas exposé directement aux émissions du trafic routier. L'étude de certains métaux lourds associés à ces particules est également abordée.

## II- GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DE L'ATMOSPHÈRE PAR LES PARTICULES :

### 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. Les particules sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique, variant de  $0.02\mu\text{m}$  à  $100\mu\text{m}$  et correspondant à des particules de densité unitaire, qui aurait les mêmes caractéristiques aérodynamiques que la particule concernée [10].

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

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

Les particules sédimentables concernent les poussières de granulométrie élevée supérieure à  $30-40\mu\text{m}$  qui ont une grande vitesse de chute et qui se déposent rapidement, non loin de la source émettrice.

Les particules en suspension sont par contre, des particules plus ou moins fines (granulométrie  $<30\mu\text{m}$ ) qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et peuvent être emportées loin de la source émettrice par le vent. On les désigne par « particules totales en suspension » pour les différencier des (PM-10) qui eux sont les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à  $10\mu\text{m}$ . Ce seuil granulométrique correspond aux particules fines qui pénètrent profondément dans les poumons [11].

La terminologie pour les différentes sortes et fractions de particules en suspension est souvent confuse. Le tableau (1) livre un aperçu de quelques termes importants correspondants aux normes ISO [12].

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

- **L'aérosol :** ce mot désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Ce

qui, dans l'air et dans les conditions normales, correspond à des particules de dimensions inférieures à  $100\mu\text{m}$ , les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms [10].

- *Les fumées noires* : il s'agit de particules carbonées de diamètre inférieur à  $5\mu\text{m}$  [13].

Tableau n°1 : Termes importants concernant les particules en suspension (selon ISO 7708, 1995) [11].

Français	Anglais	Abré- viation	remarques
Total des particules contenues dans l'air	Suspended particulate matter, Total airborne particles	SPM	Toutes les particules contenues dans l'air dans un volume d'air donné.
Poussières en suspension(total)	Total suspended particulates	TSP	Concentration des particules en suspension, mesurée avec la méthode américaine conventionnelle HIVOL, en tant que valeur estimative pour les SPM. Malgré le mot « total », les TSP représentent une qualité moindre que les SPM
Inhalable	inhalable		Particules pénétrant dans le corps lors de la respiration (bouche, nez, ou plus profondément)
Thoracique	thoracic		Particules atteignant le larynx
Alvéolaire	respirable		Particules atteignant les alvéoles pulmonaires
Fraction thoracique	thoracic fraction		Particules inhalées en proportion de la masse qui passent par le larynx et contiennent
Convention thoracique	thoracic convention		Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique.
PM10	PM10	PM10	Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique (PM10= particulate matter <math>10\mu\text{m}</math>)

- *Les suies* : sont des particules de carbone et d'imbrûlés, que produisent les combustibles qui ne brûlent pas complètement [13].
- *Les poussières* : on appelle ainsi les particules solides de diamètre inférieur à  $75\mu\text{m}$ , Les plus grosses retombent près de la source d'émission.
- *Les brumes* : la brume est un terme appliqué à un ensemble de gouttelettes dans un gaz. Ces particules ont des dimensions supérieures à  $1\mu\text{m}$ .

- **Les cendres volantes** : le mot « cendre » désigne le résidu solide subsistant après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes [10].
- **Les particules** : ce terme englobe en fait l'ensemble des définitions précédentes indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles [13].

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

\***les particules totales en suspension (TSP)** qui désignent les particules dont le diamètre est inférieur à  $30\text{-}40\mu\text{m}$ . La majeure partie de ces particules est captée par le segment extra thoracique du système respiratoire [14].

\***les PM-10** (particulate matter  $<10\mu\text{m}$ ) : ces particules représentent les particules inhalables dont le diamètre est inférieur à  $10\mu\text{m}$ .

\***les PM-2.5** : ce sont les particules les plus fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur à  $2.5\mu\text{m}$ .

\***les PM-1** : sont des particules très fines de diamètre inférieur à  $1\mu\text{m}$  qui se forment par coagulation et agglomération des particules submicroniques.

## II-2. Les principales sources émettrices de particules :

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

- Les particules en suspension d'origine naturelle.
- Les particules d'origine anthropique.

### II-2-1. Les particules d'origine naturelle :

Les phénomènes naturels sont à l'origine d'une importante émission de particules dans l'atmosphère. Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ  $2\ 096.10^6$  tonnes [15].

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

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

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

Les phénomènes naturels qui y contribuent le plus souvent sont :

- L'érosion éolienne qui se produit et s'accroît surtout sur les sols désertiques à faible couvert végétal ou dans les zones à climat sec ou à longue saison sèche [16,17].
- Les éruptions volcaniques qui peuvent représenter une importante source de particules dans l'air, dont certaines résultent de la transformation de polluants gazeux en particules, c'est le cas par exemple, des particules de sulfates issues du gaz  $SO_2$  [18].
- Les embruns et les sels marins qui sous l'effet du vent et de la brise de mer sont dirigés vers les zones côtières. Ces aérosols donnent après évaporation de l'eau des particules salines essentiellement du NaCl.
- Les particules d'origine extra-terrestre qui représentent de petites particules provenant de la décomposition des météorites et qui pénètrent de façon constante dans l'atmosphère terrestre. Ces particules sont riches en alcalins, alcalino-terreux et certains métaux lourds.

Comme autres formes de pollution, on peut signaler :

- Les particules d'origine végétale comme les grains de pollens qui sont émis par une grande diversité de plantes et qui peuvent être de puissants allergènes.
- Les feux des forêts qui sont principalement causés par la foudre période de forte chaleur et qui émettent des quantités non négligeables de particules [16].

Le tableau n°2 résume les sources et quantités émises des particules d'origine naturelle.

Tableau n°2 : Production des particules d'origine naturelle [15].

Source d'émission	Quantité émise (Méga tonnes/an)	Pourcentage
Aérosol	908	43.32
Nitrate(issus de NO et NO <sub>2</sub> )	390	18.61
Ammonium	245	11.69
Sulfates	182	8.68
Terpènes biogéniques	182	8.68
Erosion éolienne	182	8.68
Eruption volcanique	4	0.20
Feux spontanés	3	0.14
<b>Total</b>	<b>2096</b>	<b>100</b>

### II-2-2. Les particules d'origine anthropogénique :

Les activités humaines sous toutes leurs formes sont productrices de poussières. Le développement industriel et socio-économique qu'a connu le monde ces dernières décennies est à l'origine de la création d'un grand nombre de sources émettrices de particules. Les activités qui y contribuent le plus sont les processus de combustion ou l'industrie thermoénergétique, la sidérurgie, les mines, les cimenteries et le transport routier.

En plus de ces émissions primaires, on note qu'une partie importante de la pollution particulaire résulte des réactions chimiques que subissent dans l'atmosphère les polluants gazeux tels que SO<sub>2</sub> et les NO<sub>x</sub>, ce sont des polluants secondaires [15].

#### II-2-2-1. La combustion :

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

On y retrouve particulièrement les particules d'imbrûlés riches en carbone organique et élémentaire, les métaux lourds et les composés organiques poly aromatiques fixés sur les particules carbonées [19].

### **II-2-2-2. Les process industriels :**

Les process industriels comme l'industrie sidérurgique, la pyro métallurgie ou fonderie des métaux ferreux et l'industrie des métaux non ferreux tels que le zinc, le cuivre, le plomb, émettent lors des diverses opérations de grillage, raffinage et fusion dans les fours, des particules métalliques qui peuvent s'oxyder et sublimer en fines particules métalliques sédimentables ou non. C'est le cas en Algérie de l'unité de Zinc de Ghazaouet de traitement et fabrication du Zinc qui contamine toute la région par le SO<sub>2</sub> et les particules.

### **II-2-2-3. Industrie des matériaux de construction :**

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

Les cimenteries sont les plus polluantes du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des matières utilisés pour sa production. Ainsi pour obtenir une tonne de ciment, il faut environ 1.6 tonnes de matières premières [20].

Ce sont surtout les installations dépourvues de système de dépoussiérage qui contribuent le plus à la pollution. En Algérie ce type d'industrie est fortement incriminé dans la pollution de l'air par les particules et ce particulièrement dans le cas des anciennes installations [21].

On remarque aussi de plus en plus la présence en pleine agglomération urbaines de petites entreprises de traitement de marbre qui engendrent l'émission d'importantes quantités de poussières dans le voisinage.

### **II-2-2-4. Incinération des déchets :**

En absence d'un tri sélectif et de récupération, d'importantes quantités de déchets ménagers, industriels et dangereux dont la composition chimique est très diversifiée finissent leur vie dans les décharges sous forme de déchets.

L'incinération de ces derniers engendre l'émission d'importantes quantités de particules. Ces particules contiennent entre autre des métaux lourds tels que : Fer, Zinc, Cadmium, ...etc. ainsi que divers oxydes métalliques dont l'importance toxicologique est considérable [22].

### **II-2-2-5. Le trafic routier :**

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

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

Cette situation est due à l'accroissement du parc automobile mondial, surtout dans les pays émergents, et à l'augmentation sans cesse du kilométrage parcouru.

Dans un grand nombre de pays le taux de motorisation est de l'ordre d'un véhicule pour deux personnes. Dans certains pays comme la Chine, la motorisation a connu des taux de croissance de plus de 10%.

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

- **Les suies :** qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés dénommées « fumées noires » qui sont dues à la combustion incomplète, et qui sont émis par les échappements des véhicules .
  
- **Les hydrocarbures aromatique polynucléaires (HAP):** qui sont présents dans le carburant lui même ou produits lors de la combustion. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (susceptibles d'être cancérogènes).
  
- **Les métaux lourds :** parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain. Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0.15g à 0.4g/l il est rejeté presque totalement dans l'atmosphère des villes [23]

On estime qu'environ 16% de la production globale du plomb est destinée à être utilisé comme additif dans l'essence. Une voiture utilisant une essence à 0.15 g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/Km de particules dont la masse en plomb peut dépasser les 25% [15].

Il y'a quelques années, les émissions de plomb issues du trafic routier sont estimées à  $248.10^6$  Kg/an [25].

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

Dans certaines grandes métropoles le taux de pollution particulaire issue du trafic routier s'élève à 20- 30%. En France, la moyenne nationale donne un taux de 50%, soit une teneur moyenne d'environ  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  imputable uniquement au trafic routier [26].

La pollution engendrée par le trafic routier provient aussi de l'usure des routes, des pneus, des plaquettes de frein et du moteur. Cette source de pollution n'est pas négligeable puisque l'inventaire effectué en France en 2000 montre qu'environ 42% des émissions des PM-10 sont du à l'usure des routes. Nous illustrons à titres d'exemple en figure N°1 l'ampleur et la répartition des émissions de PM-10 issus du trafic routier en France [27]

A toutes ces sources de pollution par les particules, il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère, par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules. L'émission des particules d'origine anthropogénique s'élève globalement à  $269.10^9$  Kg/an, soit environ 12% de la quantité de particules d'origine naturelle.

Comme le montre le tableau N°3, l'émission directe des particules anthropiques s'élève seulement au 1/3 du taux global, les 2/3 restant, résultent de la pollution secondaire, c'est-à-dire la conversion gaz/particules [15].

Tableau n° 3 : Taux d'émission de particules anthropiques[7].

Source d'émission	Quantités émises [Kg/an]
Emissions sous forme de particules	$84.10^9$
Particules formées des gaz polluants	
▪ Sulfates à partir de $\text{SO}_2$	$133.10^9$
▪ Nitrates à partir de $\text{NO}_x$	$27.10^9$
▪ Particules photochimiques issues des hydrocarbures	$25.10^9$
<b>Total</b>	<b><math>296.10^9</math></b>

Comme les particules véhiculent certains métaux lourds toxiques, le tableau N°4 présente l'ampleur des émissions de certains d'entre eux en fonction des sources émettrices [16].

Ce tableau montre que le chrome issu des émissions naturelles est plus élevé que le chrome anthropique. On remarque que par ailleurs, l'ampleur du Ni qui est le traceur de la combustion de fuel et l'importance du Pb dont la quasi totalité est imputable au trafic routier.

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

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



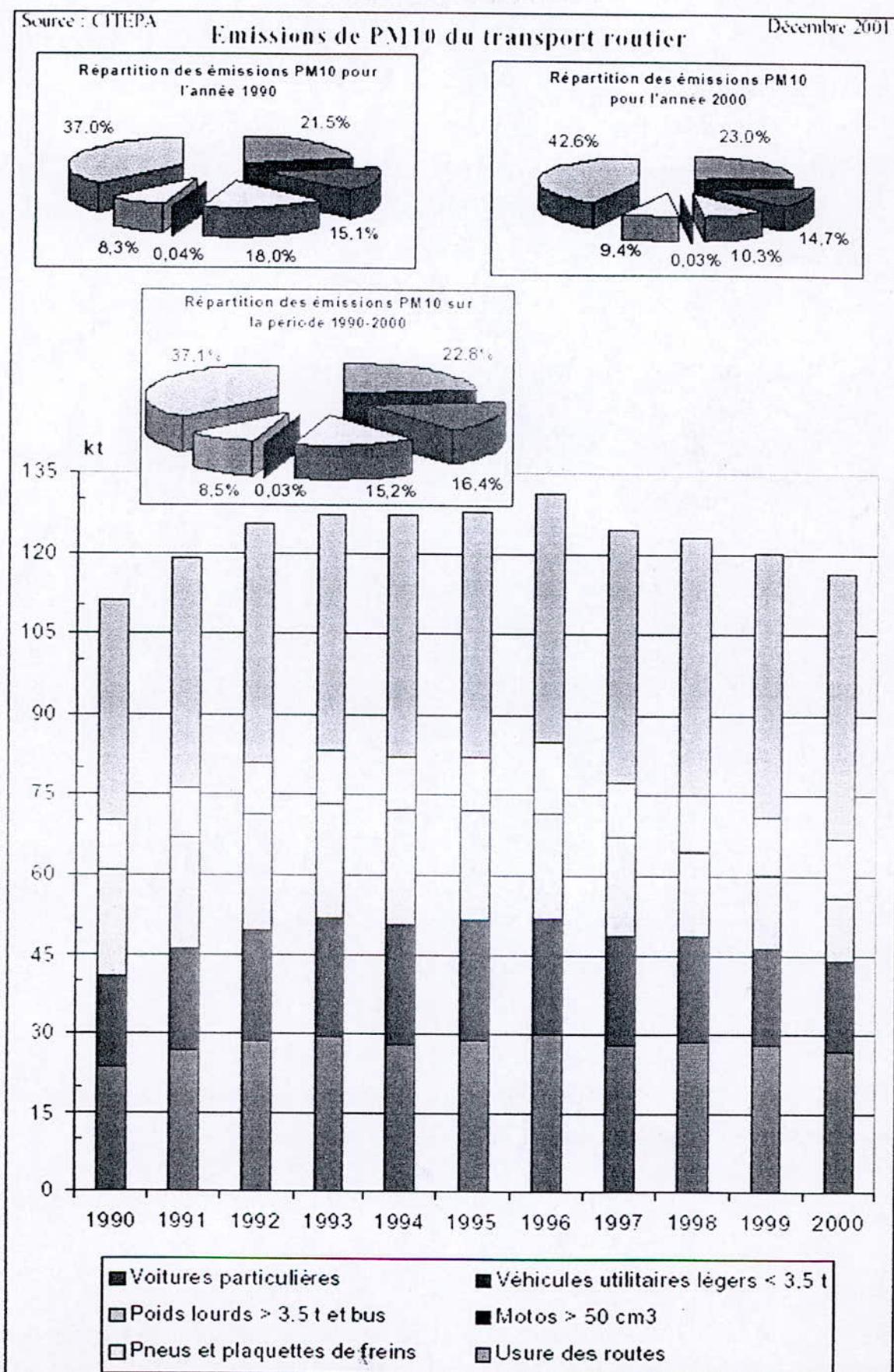


Figure n°1 : L'émission annuelle des PM-10 due au trafic routier en France [19].

### III- PROPRIÉTÉS DES PARTICULES :

#### III-1. Forme des particules :

Il y a une grande différence entre les formes des particules atmosphériques. Elles peuvent être divisées en : sphériques, irrégulières, cubiques, flocons, fibres, flocons condensés. La forme de particule dans un aérosol dépend de la source d'émission, les formes des particules de diamètres  $\phi > 0.1 \mu\text{m}$  sont étudiées avec le microscope électronique [26].

La figure N°2 représente les formes que peuvent prendre les particules atmosphériques [26].

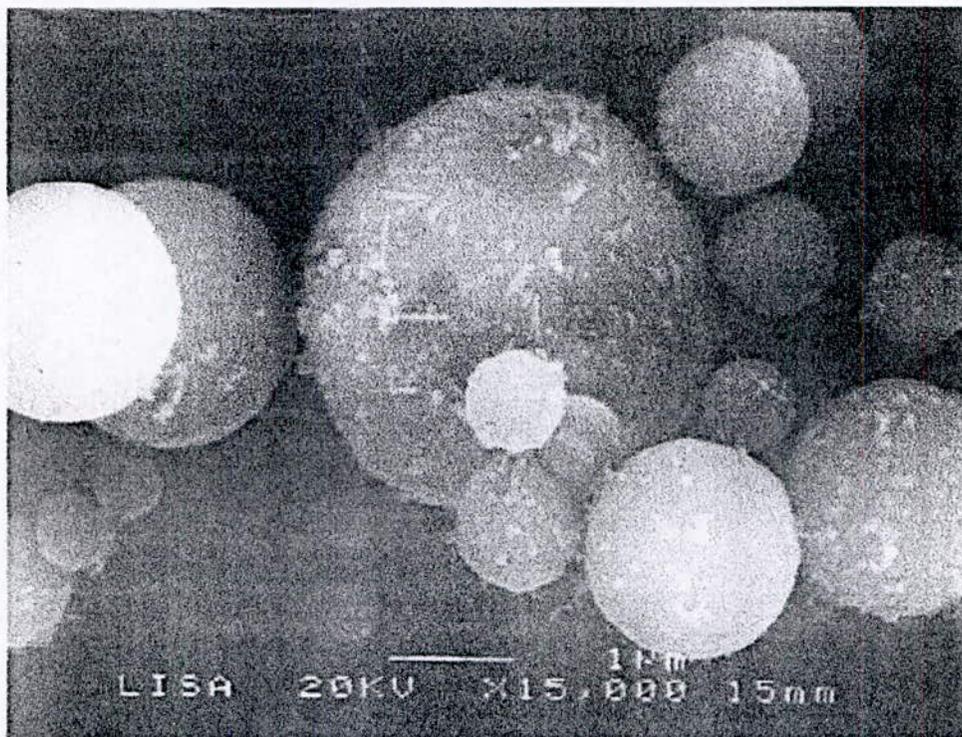


Figure N°2 : Forme des particules atmosphériques [26].

Les tableaux N°5 et 6 donnent respectivement les différentes formes des particules en suspension et leur pourcentage de la masse d'échantillon [28].

Tableau N°5 : Les principales formes de particules [19].

Tableau 2 : principales formes de particules

Forme	Apparence	Nature
sphérique		fumées pollens cendres
irrégulière cubique		minéraux
en plaques		minéraux épiderme
fibreuse		fibres végétales et minérales
en agrégats		noirs de charbon fumées

Tableau N°6 : Formes des particules et leur pourcentage pour un diamètre  $\phi > 0.1 \mu\text{m}$  [28]

Forme	Pourcentage de la masse d'échantillon	Particule
Sphérique	0-20	Pollen, cendres volantes, fumée
- irrégulière - cubique	10-90	-minéraux -cendres
Flocons	0-10	Minéraux
Fibreuse	3-35	Fibres de plantes
Flocons condensés	0-40	Fumée

Dimensions et granulométrie des particules :**III-2-1. Dimensions des particules :**

Comme la granulométrie d'une particule a une influence prépondérante sur son comportement, il est important de déterminer ses dimensions.

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

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

➤ *Le diamètre aérodynamique « D<sub>ae</sub> » :*

C'est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute qu'une particule de masse spécifique égale à 1g/cm<sup>3</sup>.

➤ *Le diamètre de Stokes « D<sub>s</sub> » :*

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

➤ *Le diamètre de volume équivalent « D<sub>ev</sub> » :*

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

Il est donné par :

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

Où m et ρ représentent respectivement la masse de la particule et la masse volumique du matériau [29].

En pollution atmosphérique c'est en général le diamètre aérodynamique qui est le plus souvent utilisé.

### **III-2-2. Granulométrie des particules :**

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

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

#### **III-2-2-1. Les grosses particules :**

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

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

La portion ayant un diamètre inférieur à  $10 \mu\text{m}$  séjourne le plus de temps que celle ayant un diamètre supérieur à  $10 \mu\text{m}$  [29].

#### **III-2-2-2. Les particules fines :**

Elles représentent les particules dont le diamètre varie entre  $2.5$  et  $0.1 \mu\text{m}$ , cette dernière dimension représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement brownien dont les forces de viscosité deviennent supérieures à celle de la gravitation [18].

Ces particules se rencontrent partout dans l'atmosphère, mais leur concentration décroît très vite au-delà de la troposphère. Elles sont issues essentiellement de la conversion à partir de la phase gazeuse ou d'effluents de combustion, ou de vapeurs organiques ou métalliques recondensées. Ces aérosols disparaissent de l'air, par les mécanismes de diffusion, lessivage et pluies [30].

La figure N°3 illustre le classement des particules selon leur granulométrie [28].

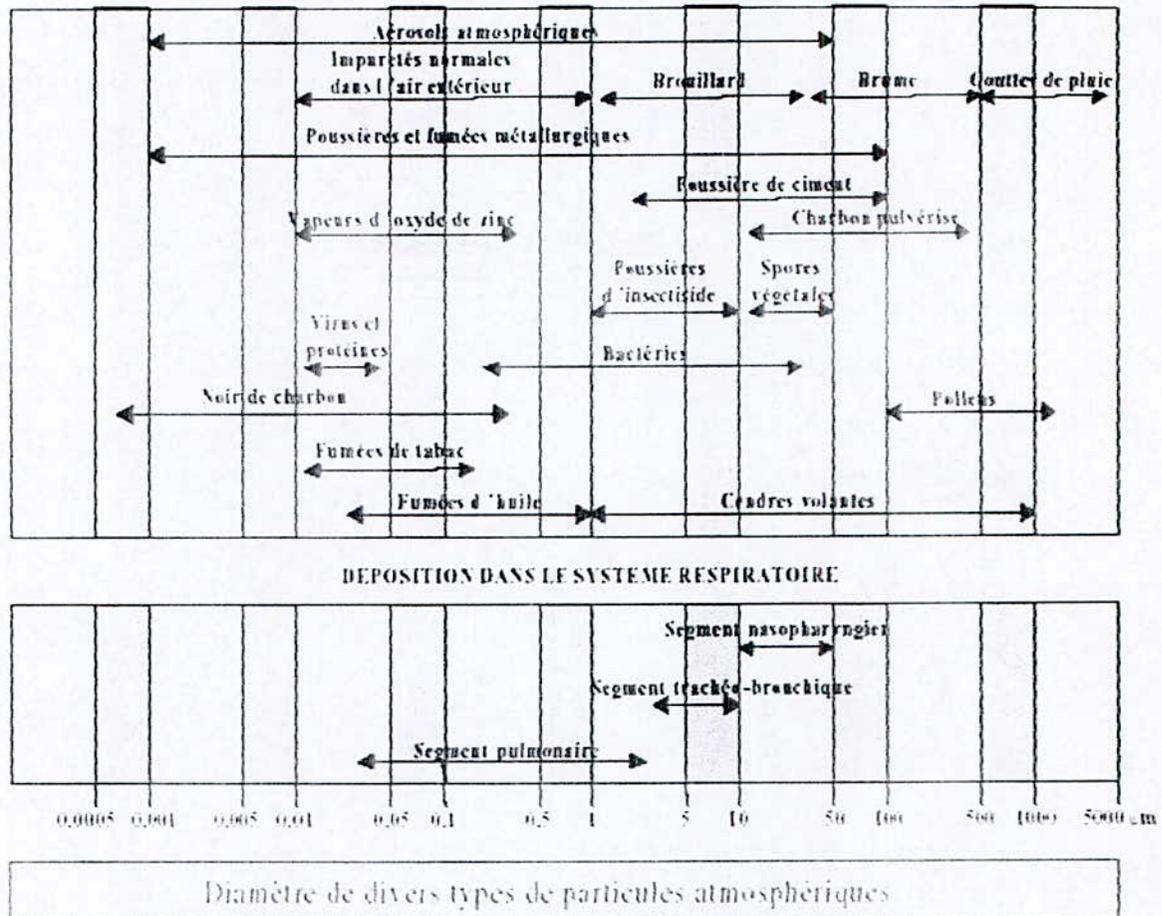


Figure N°3 : Le classement des particules selon leur granulométrie [28].

### III-3. Formation des particules :

Les particules atmosphériques recouvrent une large gamme de taille qu'on peut diviser en deux catégories [23, 11]:

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

- **Les PM-10** : peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et les procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore des réactions chimiques entre gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ammonium). De part de leur finesse, ces particules pénètrent dans l'appareil respiratoire. La catégorie 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 des nitrates).

La formation des particules fines s'opère en deux étapes. D'abord, par la formation de petits agrégats par réaction chimique ou par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules, ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde

étape. Ainsi les grosses particules disparaissent dans l'atmosphère par sédimentation et les particules submicroniques s'agglomèrent pour donner des particules de diamètre supérieur. Il ne reste alors en suspension dans l'air que les particules de diamètre inférieur à environ  $30 \mu\text{m}$ .

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

On distingue les particules primaires, qui ont été émises directement en tant que telles, et les particules secondaires, qui se sont formées dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux. Les particules primaires anthropiques se forment lors des combustions ; ce sont avant tous des particules ultrafines et fines d'un diamètre inférieur à environ  $0.3 \mu\text{m}$  (par exemple la suie). Les particules qui se forment par abrasion ou qui s'élèvent dans l'air du fait de tourbillons sont en général plus grandes que  $1$  à  $2 \mu\text{m}$ . Les sources naturelles possibles sont le pollen, les embruns, l'érosion éolienne, et les volcans. Les particules de grandeur moyenne (entre  $0.1$  et  $2.5 \mu\text{m}$ ) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par conversion gaz-particule à partir des précurseurs  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  et COV.

La figure N°4 présente le processus de formation des particules selon leurs tailles [30].

### III-3. Composition chimique des particules :

Les particules en suspension constituent un système physico-chimique complexe. Elles comportent aussi bien des composants primaires émis que des composants secondaires formés [27].

On peut distinguer les composants importants dans le tableau n°7 ci-dessous.

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

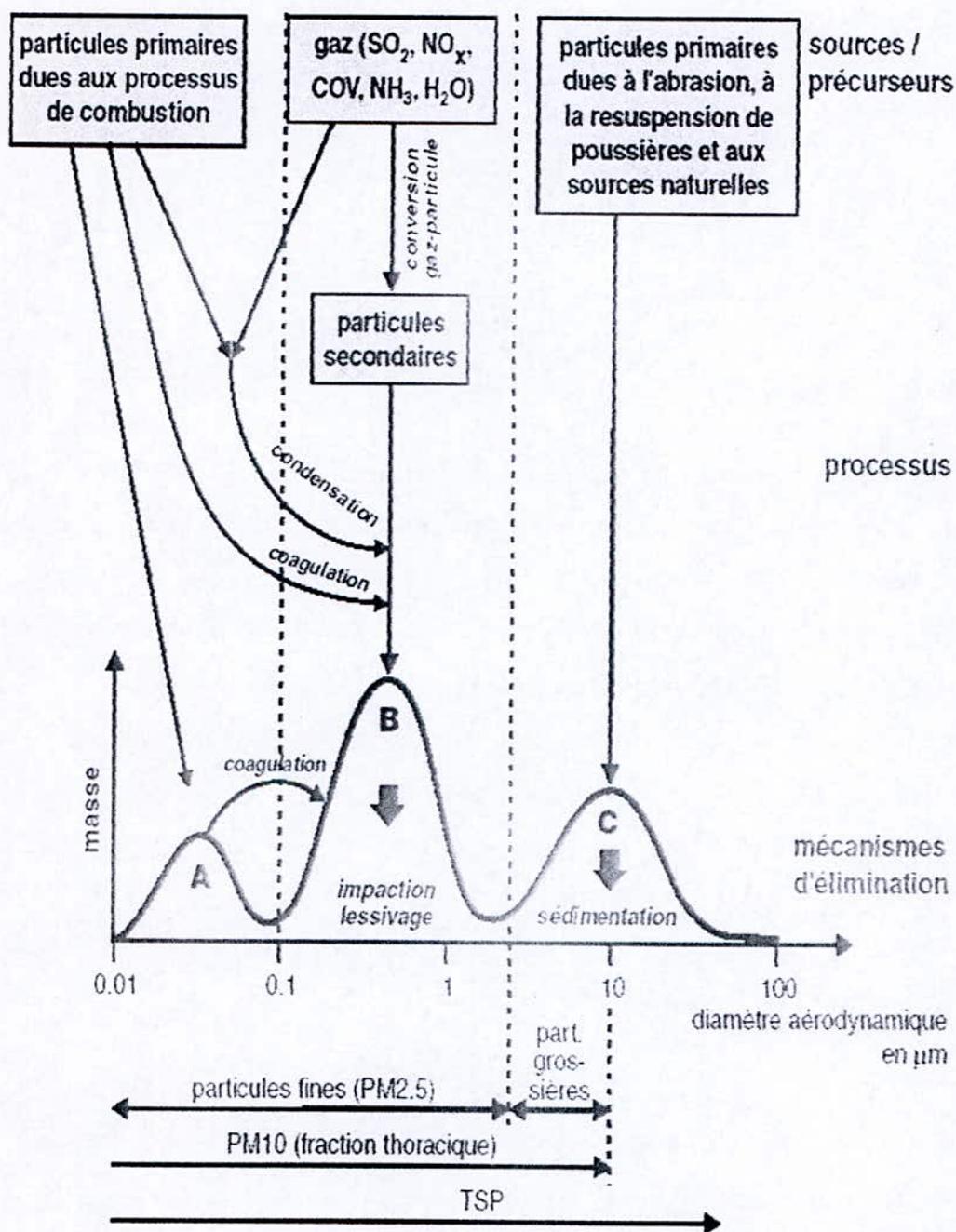
- Fraction minérale soluble dans l'eau.
- Fraction minérale insoluble.
- Fraction carbonée.
- Fraction organique.

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

Ainsi, la fraction insoluble augmente régulièrement quand la taille augmente. La fraction soluble diminue quand le diamètre augmente [32].

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 est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbone », 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.



**Figure 4:** Présentation simplifiée de la distribution de taille des particules d'un aérosol atmosphérique proche des sources et des processus les plus importants. A: particules ultrafines, B: mode d'accumulation, C: particules grossières. Loin des sources, c'est le mode d'accumulation B qui prédomine.

Tableau n°7: Composition et source des PM10 [27].

	<i>composant</i>	<i>Précurseur /cause</i>
<i>Particules primaires</i>	suie (CE et OC primaire)	processus de combustion
	matériel géologique	construction, trafic, vent
	métaux lourds	combustion, production
	particules formées par abrasion	effort mécanique
	matière biologique	spores de champignons, fragments de plantes
<i>Particules secondaires</i>	sulfates	dioxyde de soufre
	nitrate	oxyde d'azote
	ammonium	ammoniac
	carbone organique (OC)	COV

OC : carbone organique                      CE : carbone élémentaire

Le carbone organique se retrouve sous forme d'alcanes lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 4 à 30 atomes de carbones [32].

La figure N°5, présente un exemple des composés majeurs des PM-10 et leur proportion dans les particules fines mesurées en Angleterre en 1997 [24].

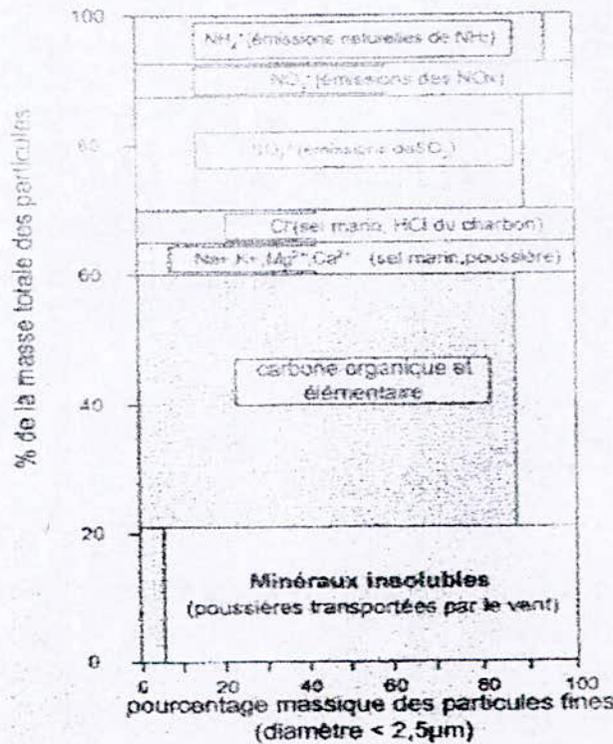


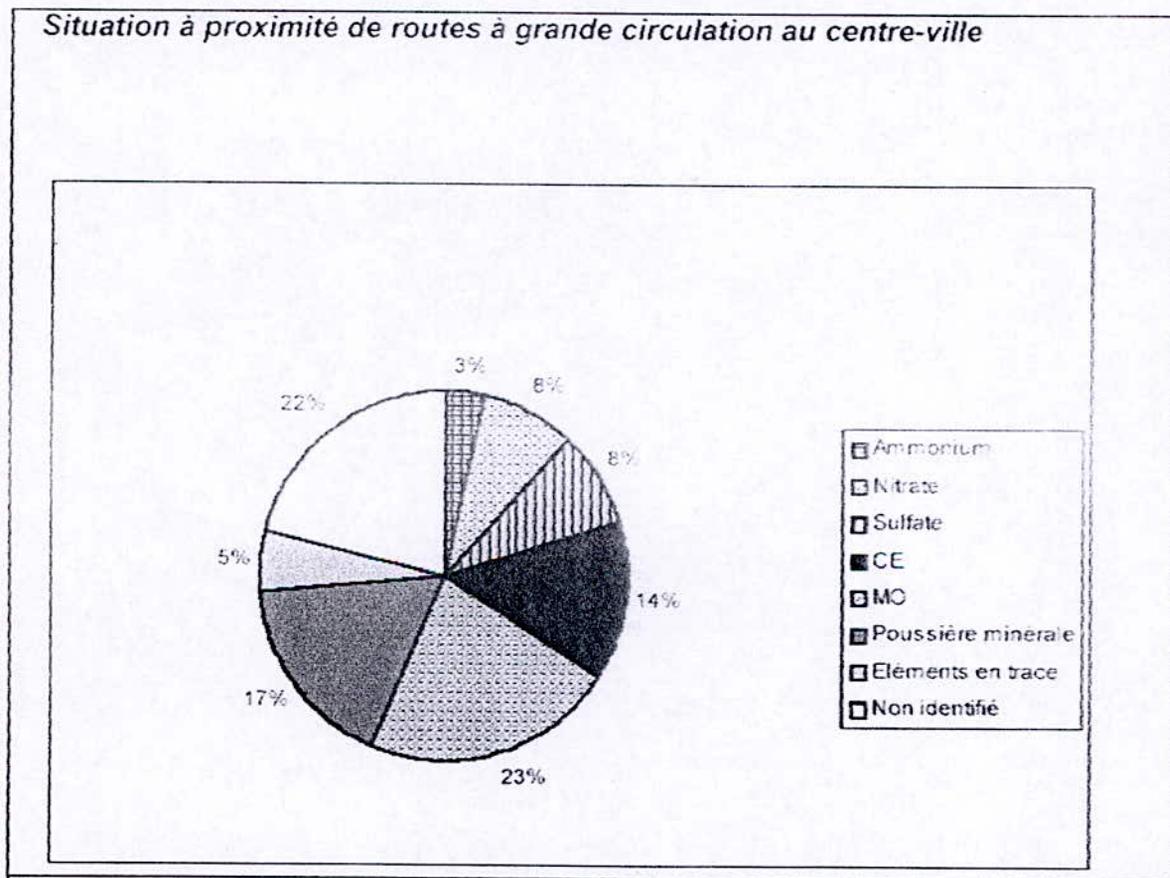
Figure n° 5 : Composés majeurs des PM-10 et leur proportion dans les particules fines mesurées en Angleterre [33].

On estime globalement que plus de 80% du carbone élémentaire et carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les PM-2.5. Les particules d'un diamètre compris entre 2.5 et 10  $\mu\text{m}$  contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles [33].

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

Cette multiplicité de sources conduit également à une multiplicité dans la composition chimique qui reste délicate et coûteuse à analyser [34].

A titre d'exemple nous présentons en figure N°6 la composition chimique des PM-10 mesurées en Suisse à proximité d'une route à grande circulation à Zurich [26]].



**Figure 6** Composition chimique des PM10 à proximité d'une route à grande circulation en ville

**III-4. Dynamique des particules :**

Une particule dans l'air est, en général, soumise aux forces de gravité et d'inertie, aux forces dues à la viscosité de l'air, aux forces dues aux mouvements browniens et à une série de forces électriques et thermiques.

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

D'autres parts la présence des mouvements de tourbillonnement (verticaux, horizontaux) dans l'atmosphère influence considérablement la vitesse de chute des particules, surtout pour les fines particules. On donne ci-dessous (tableau N°8)

quelques valeurs de la vitesse de la sédimentation pour les particules sphériques de masse volumique  $1\text{g} / \text{m}^3$  dans l'air à  $20^\circ\text{C}$ .

Tableau n°8 : Vitesse de sédimentation de quelques particules sphériques [35].

<i>Diamètre (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Vitesse de sédimentation (cm/s)</i>
200	120
100	30
50	7
10	0.3
5	0.07
1	0.007
0.5	0.0007

Ainsi les particules de diamètre inférieur à  $0.1\text{--}0.5\ \mu\text{m}$  se comportent comme des molécules gazeuses et migrent selon un mouvement brownien. Leur vitesse de chute n'est pas mesurable.

Les particules de plus de  $0.5\ \mu\text{m}$  ont une vitesse de chute calculable, mais celle-ci est si faible qu'elle est sans importance pratique, étant donné que les flux d'air ascendants empêchent la tendance à la sédimentation.

Les particules d'une grosseur de l'ordre de  $10\ \mu\text{m}$  tombent à une vitesse constante et calculable mais les flux d'air normaux les maintiennent généralement en suspension.

Enfin, au-delà d'un diamètre de  $10\ \mu\text{m}$ , les particules sédimentent plus ou moins rapidement.

Pour les particules fines, la sédimentation a lieu grâce au processus d'interception et d'impaction tandis que les particules moins fines se déposent par sédimentation gravitaire [29, 36].

C'est ainsi que l'étude de la dynamique des particules en suspension peut être réduite à trois cas.

**III-3-1. Les particules de diamètre supérieur à 1µm :**

Dans ce cas, on se trouve dans le régime de sédimentation où la particule atteint une vitesse limite de chute. Le déplacement de la particule est régit par la loi de Stocks [27].

$$\text{Force de gravité} - \text{Poussée d'Archimède} = \text{Force de viscosité}$$

Soit :

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{8} \cdot (\rho_{\text{particule}} - \rho_{\text{fluide}}) \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot V \cdot d \cdot \mu \dots\dots\dots(2)$$

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

Avec :

$$V_s = \frac{d^2}{18 \cdot \mu} \cdot \rho_p \cdot g \dots\dots\dots(3)$$

- $\rho_p$  : densité des particules.
- $\mu$  : viscosité de l'air.
- $d$  : diamètre des particules.

Cette vitesse n'est toutefois valable que pour les particules ayant un diamètre compris entre 30 et 2 µm.

Pour les particules se rapprochant du diamètre de 1 µm, on introduit dans la vitesse de chute le facteur de correction de Cunningham qui tient compte de l'influence grandissante de la viscosité, du nombre de Reynolds et de la valeur du libre parcours moyen des molécules.

L'expression de la chute devient [37] :

$$V=V_s \left[ 1 + A \cdot \frac{\lambda}{2} \right] \dots\dots\dots(4)$$

Avec :

$A$  : facteur correctif de l'ordre de 0.8 à 0.9.

$\lambda$  : espace libre moyen intermoléculaire.

En général, les vitesses de sédimentation des particules inférieures à 10 µm sont si faibles que la moindre convection les maintient en suspension.

Vers 0.5 µm l'amplitude du mouvement Brownien devient supérieure à la vitesse de sédimentation, assurant le maintien des particules en suspension permanente.

**III-3-2. Les particules fines de diamètre compris entre 0.1 et 1µm :**

Lorsque le diamètre des particules est inférieur à 1µm, le comportement de l'air n'est plus un milieu continu ; dans ce cas les particules subissent des collisions erratiques qui provoquent des déplacements aléatoires (mouvement brownien) et il résulte une diffusion. Cette diffusion est caractérisée par le coefficient  $D$  qui peut être calculé à partir de la théorie cinétique des gaz [29].

$$D = \frac{k \cdot T}{3 \pi \cdot \mu \cdot d} \dots\dots\dots(5)$$

Avec :

$k$  : constante de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-16}$  erg /°C ).

$\mu$  : viscosité de l'air (180 µP à 27°C).

$d$  : diamètre des particules (cm).

$T$  : température en °C.

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

$$D = 2.6 \frac{1}{d(\mu m)} \cdot 10^{-7} \text{ cm / s.} \dots\dots\dots(6)$$

Les particules qui diffusent ont alors un déplacement moyen  $X$  sur un temps  $T$ , donné par la loi d'Einstein [29].

$$X = \sqrt{2 \cdot D \cdot T} \dots\dots\dots(7)$$

Le tableau N°9 représente, les vitesses de sédimentation et les déplacements moyens selon le diamètre des particules.

Tableau N°9: Vitesse de chute et déplacement moyen des particules en suspension [29].

<i>Diamètre des particules (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Vitesse de chute (<math>\mu\text{m} / \text{s}</math>)</i>	<i>Déplacement moyen dans une direction (<math>\mu\text{m} / \text{s}</math>)</i>
10	$3 \cdot 10^3$	1.8
1	35	6
0.4	7	10
0.1	1	30

### III-3-3. Les particules submicroniques (diamètre inférieur à $0.1 \mu\text{m}$ ) [20, 21] :

Les phénomènes de diffusion de ces particules provoquent la collision de ces dernières, il en résulte une agglomération qui en réduit progressivement le nombre.

Le taux de diminution de ces particules par agglomération est donné, en fonction du temps, par la relation [29, 30]:

$$-\frac{dn}{dt} = k \cdot n^2 \dots\dots\dots (8)$$

soit :

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = k \cdot t \dots\dots\dots (9)$$

Avec :

$k$  : constante dépendant de la taille des particules, de leur diffusivité, de la température, de la pression, de la viscosité et de degré de turbulence de l'air.

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

En conclusion de cette étude sur la dynamique des particules, et comme déjà mentionné auparavant, on retiendra que les particules les plus fines condensent et coagulent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses disparaissent de l'atmosphère à des vitesses variables. Seul les particules d'un diamètre équivalent compris entre  $0.1$  et  $15$  à  $20 \mu\text{m}$  subsistent dans l'air.

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

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

On a très tôt reconnu que les particules fines proviennent surtout des réactions de combustion, elles sont essentiellement acides et nécessitent une attention particulière. De même, les particules les plus fines contiennent la majorité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) avec un diamètre aérodynamique médian de moins de 1  $\mu\text{m}$  [38].

### **III-5. L'influence des conditions météorologiques :**

La météorologie qui est un élément essentiel dans l'appréhension des phénomènes de dispersion des polluants exerce un rôle primordial dans les travaux de modélisation.

L'étude de l'impact des conditions météorologiques sur la pollution particulaire permet de :

- déterminer les types de temps favorables et/ou défavorables à la dispersion et aux transformations physico-chimiques des aérosols.
- Déterminer l'importance de la météorologie dans le comportement des particules dans l'air (la vitesse et la direction du vent, la température, la nubulosité, l'humidité, les pluies, ...).

Notons que les précipitations jouent aussi un rôle important (dépôt dû au lessivage) , en plaquant au sol des particules polluantes et en les emportant dans les eaux d'écoulement. Cela ne relève cependant pas de l'étude de la diffusion des polluants dans l'atmosphère. Elles doivent par contre être prises en compte dans le calcul des immissions de polluants (dépôts au sol).

Le vent, sa vitesse et sa direction, sont très importants. Un vent fort permet de disperser les polluants. De ce fait, de fortes concentrations sont peu probables dans ces conditions. La direction du vent joue un rôle important dans le déplacement des polluants. Son rôle s'explique plus dans sa relation avec la topographie du site.

En effet, la direction du vent influe directement le déplacement des polluants. Si le vent est stoppé par un obstacle, tel un versant de montagne, on peut assister à une stagnation des polluants sur ce flanc, ou une remontée de la pollution sur le versant.

La température influe de plusieurs façons. Tout d'abord, une faible température entraîne un changement de comportement des gens en favorisant une hausse de chauffage urbain et de l'utilisation des véhicules, ce qui augmente les émissions. Mais la température agit aussi dans la formation de polluants secondaires tels que l'ozone. La nébulosité est responsable de la formation d'un « couvercle » au-dessus d'une zone polluée. Elle réduit également l'apport radiatif du soleil, ce qui tend à diminuer les transformations physico-chimiques des polluants primaires.

L'humidité joue un rôle dans le « captage » des particules polluantes. Les gouttelettes d'eau en suspension retiennent les polluants, ce qui accroît leur stagnation.

Une forte pollution est en général favorisée par un vent faible et une forte stabilité thermique [39].

#### IV- EFFETS DES PARTICULES EN SUSPENSION :

##### IV-1. Effets sur la santé humaine :

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

Les travaux scientifiques les plus récents mettent en évidence une recrudescence de divers problèmes respiratoires tels que l'irritation des bronches ou l'asthme en réaction avec la pollution atmosphérique, qui légitiment les actions entreprises pour réduire les effets néfastes sur la santé. Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France a en particulier mis en exergue le rôle irritatif des particules en suspension et des oxydants (dioxyde d'azote et ozone).

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

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

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

Les particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2 et  $10 \mu\text{m}$  se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchique par impaction et interception. Dans cette zone, les particules peuvent être éliminées par clairance muco-ciliaire et la toux [40, 41].

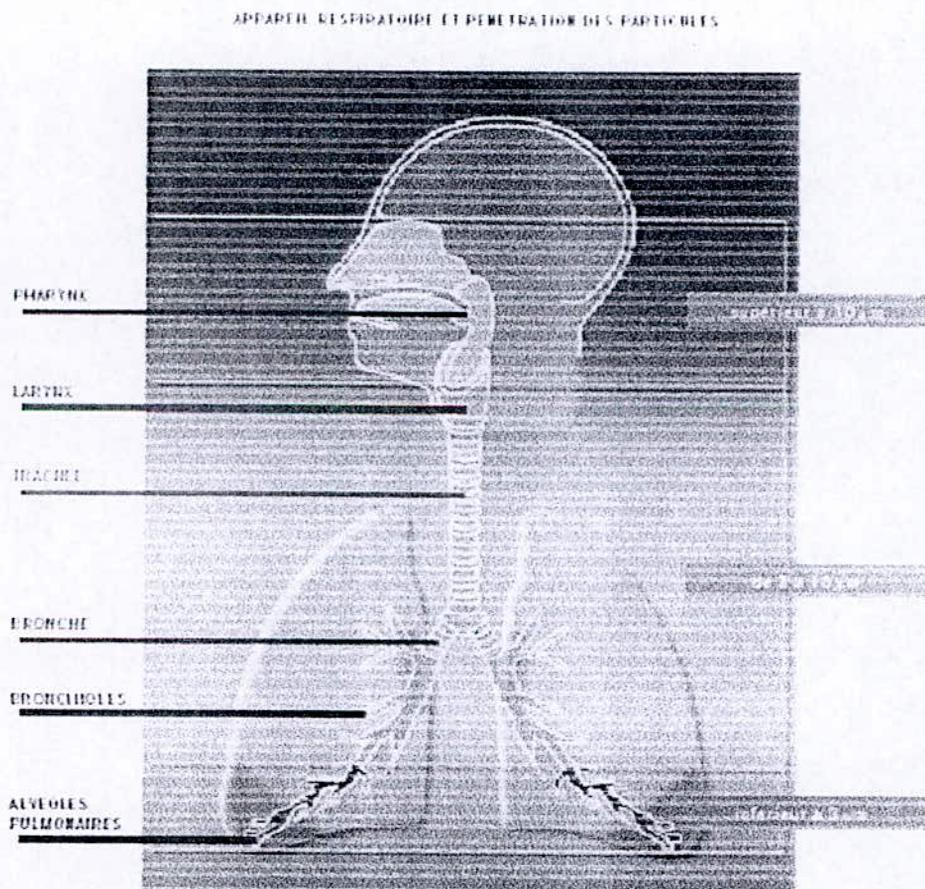
Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 2 -  $3 \mu\text{m}$  pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires [40].

Or, les dispositifs de défense sont moins efficaces dans les voies profondes (cellules ciliées et muqueuses plus rares, muqueuse plus épaisse).

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

Ces polluants provoquent des inflammations aiguës qui font le lit de l'infection, des inflammations chroniques qui peuvent conduire à la sclérose, des réactions immunologiques immédiates ou différées à médiation cellulaire qui sont susceptibles d'initier des attaques d'asthme ou de la fibrose, enfin la carcinogenèse.

La figure N°7 illustre le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne [39].



**Figure N°7 :** Devenir des particules dans la voie respiratoire selon leur granulométrie [39].

#### IV-1-1. Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire :

Chaque fois que nous respirons, des milliers de particules pénètrent dans nos poumons et se déposent, suivant leur taille, dans les voies respiratoires ou dans les alvéoles (lieu des échanges gazeux). La figure N°8 représente l'ensemble des voies respiratoires (nez, gorge, trachée, bronches, bronchioles, alvéoles) et décrit les mécanismes de dépôts des particules.

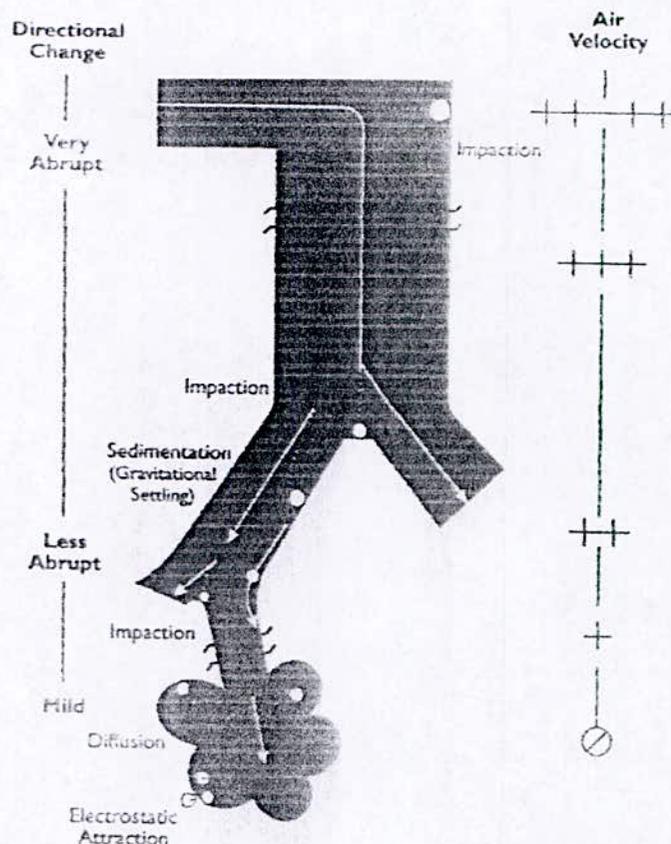


Figure N°8 : Représentation schématiques des voies respiratoires et des mécanismes de dépôt des particules dans celles-ci. Le flux inspiratoire est représenté par des flèches, la trajectoire des particules par des traits en pointillé [29].

Les particules de plus de  $10\ \mu\text{m}$  ne sont pas respirées. Les particules entre  $7$  et  $10\ \mu\text{m}$  sont principalement retenues dans le nez. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent en profondeur dans les poumons. Cependant, sous l'effet de l'humidité de l'air inspiré, les particules hygroscopiques peuvent grossir notablement.

Les particules de moins de  $7 \mu\text{m}$  sont éliminées après impaction ou sédimentation dans la gorge, la trachée et les bronches ou par diffusion dans les bronchioles et les alvéoles.

La figure N°9 montre que parmi les particules respirées, les plus grosses et les plus fines sont presque totalement déposées, alors que dans l'intervalle de  $0.2 - 0.3 \mu\text{m}$ , la probabilité de dépôt est la plus faible. La majorité de ces particules est à nouveau expirée. Les particules sont trop petites pour être déposées efficacement par impaction mais trop grosses pour progresser jusqu'aux parois alvéolaires.

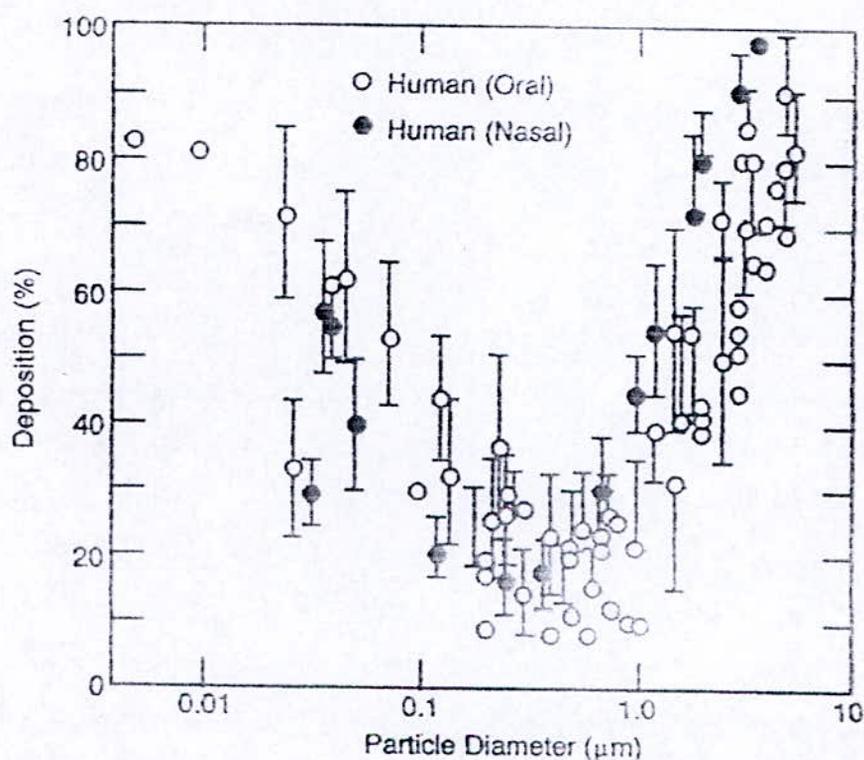


Figure N°9 : Répartition selon la taille des particules et selon leur dépôt dans les poumons en pour-cent de la masse totale respirée [29].

La trachée, les bronches et les bronchioles sont tapissées d'un épithélium cilié. Les pointes des cils font saillie dans la couche de mucus, fortement visqueuse et consistante, qui recouvre les cellules en surface, et dont l'épaisseur atteint  $8 - 12 \mu\text{m}$  dans la trachée alors qu'elle n'est plus que  $0.1 \mu\text{m}$  dans les bronchioles.

Un système d'interaction entre le film muqueux superficiel et les particules permet l'élimination des particules inspirées. Les fins cils transportent, grâce à un mouvement ondulant, le film muqueux et les particules qui y adhèrent en direction de la gorge, où le

mucus est continuellement soit avalé, soit expectoré (clearance muco-ciliaire). Dans les alvéoles, il n'y a plus de revêtement cilié ni de mucus. Les particules qui sont parvenues jusque dans les alvéoles sont ingérées par les macrophages (clearance alvéolaire). Les macrophages sont de grosses cellules dévoreuses qui ingèrent les particules, les bactéries ou les restes de cellules mortes. Lorsque les macrophages ont absorbé du matériel indigeste, ils progressent en direction de la gorge, en passant par les voies respiratoires, puis ils sont éliminés. Les expériences sur les animaux montrent qu'en cas de forte exposition, les macrophages engloutissent trop de particules et finissent par éclater, ce qui libère les particules. La question de savoir si ce mécanisme intervient également lors d'une « exposition normale » fait encore l'objet de recherches [29].

#### **VI-1-2. Impact des PM-10 et PM- 2.5 sur la santé :**

Dans l'évaluation des effets des particules sur la santé, toutes les études effectuées dans le but de faire apparaître une relation dose-réponse qu'elles se rapportent à des effets à court ou à long terme, ont trouvé un rapport linéaire entre les valeurs de PM-10 et les paramètres de santé. Au contraire des substances gazeuses nocives ou des poussières en suspension totales, il n'y a dans aucun cas de seuil identifiable au-dessous duquel plus aucun effet n'est perceptible. Ainsi une étude effectuée pendant une année à St-Louis (USA) a montré qu'en tenant compte des effets de divers polluants, de la température, de la saison, des jours les plus chauds et des jours les plus froids, que se sont les PM-10 qui sont le plus fortement en corrélation avec le nombre de décès enregistrés. Une augmentation des teneurs en PM-10 de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  deux jours auparavant est suivie d'une augmentation des cas de décès de 16% [45].

Une étude similaires de cohortes dans un immense collectif de 550.000 personnes provenant de 151 agglomérations des USA de 1982 à 1989 a montré que par tranche de 10  $\mu\text{g}$  de PM-2.5, le risque de décès total augmentait de 7%, et le risque de décès par maladie cardiaque ou pulmonaire d'environ 12% [44].

En Suisse, une étude portant sur les maladies respiratoires et les allergies chez les enfants en âge scolaire, montre une relation entre les TSP, les PM-10, le  $\text{NO}_2$  et le  $\text{SO}_2$  et la fréquence d'apparition des maladies de voies respiratoires. La relation la plus étroite est observée avec les valeurs de PM-10 [45].

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

▪ **Effets à court terme :**

Une étude américaine portant sur les effets à court terme des PM-10 trouve pour un accroissement des teneurs en PM-10 par tranche de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM-10, un accroissement de mortalité totale de 1%, de la mortalité par maladies respiratoires de 3.4%, et de la mortalités par maladies cardio-vasculaires de 1.4%. de plus, observe une augmentation de toutes les hospitalisations pour asthme de 1.9% ou une augmentation de toutes les hospitalisations pour affections pulmonaires de 0.8%. Les crises d'asthme chez les asthmatiques augmentent, d'après cette synthèse par tranche de  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  de PM-10, d'environ 3%, les résultats des fonctions pulmonaires chez les enfants diminuent d'environ 0.08%. Les symptômes des voies aériennes inférieures augmentent, pour une population moyenne, de 3%, ceux des voies aériennes supérieures d'environ 0.7% et la toux de 1.2% [43].

Le tableau N°10 résume les résultats de diverses études se rapportant aux effets à court terme. Les pourcentages indiquent les changements observés pour une augmentation des PM-10 par tranche de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Par exemple, lorsque la valeur moyenne journalière de la veille pesait de 30 à  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM-10, on relève un accroissement de 2% des urgences pour asthme chez les enfants [11].

Le tableau N°11 indique selon l'OMS de combien devraient changer les concentrations des substances délétères pour obtenir un changement déterminant dans les paramètres de santé étudiés.

Tableau N°10 : Effets à court terme par tranche de  $10 \mu\text{g}$  de PM-10 [11]

<b>Mortalité totale sans les accidents</b>	<b>+1.1 à 1.6%</b>
<b>Consultations en urgence pour asthme chez les enfants et les jeunes adultes</b>	<b>+2 à 3.5%</b>
<b>Hospitalisations de personnes de plus de 65 ans pour pneumonie</b>	<b>+1.2 à 1.7%</b>
<b>Pour bronchite chronique</b>	<b>+1.9 à 2.7%</b>
<b>Diminution de la fonction pulmonaire chez l'enfant</b>	<b>-0.1 à 0.25%</b>
<b>Symptôme des voies aériennes inférieures, enfant</b>	<b>+1.7 à 17%</b>

**▪ Effets chroniques :**

En raison de la méthodologie différente, les résultats des études effectuées sur les effets à long terme ne se prêtent pas toujours à des comparaisons quantitatives. Nous présentons toutefois en tableau N°12 les principaux résultats portant sur un accroissement de l'exposition à long terme de  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$ .

Sur la base des études qui sont consacrées à la mortalité à long terme, l'Organisation Mondiale de la santé estime que la mortalité totale est environ 10% plus élevée lorsque l'exposition à  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  en PM-2.5 supplémentaire et durable. Pour les PM-10, ce taux serait de 6% [45].

Le tableau N° 13 indique les fréquences en valeur absolue des maladies respiratoires en fonction des moyennes annuelles des PM-10 pour la Suisse [11].

Ainsi par exemple, 24% des enfants en âge scolaire souffrent d'une toux plus de 4 fois par année en moyenne pour une teneur annuelle moyenne de  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  en PM-10. Pour une teneur de  $30 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , ce sont déjà 42% des enfants qui sont touchés.

L'ensemble de ces études épidémiologiques aboutissent à une conclusion importante : il n'y a pas de seuil au-dessous duquel les effets commencent à être observés et au-dessous duquel les expositions sont jugées sécuritaires. On observe en effet dans de nombreuses études épidémiologiques l'absence de seuil sécuritaire apparent et ce même aux plus bas niveaux mesurés. Les personnes âgées, les enfants et les gens souffrant déjà de troubles respiratoires ou cardio-vasculaires, peuvent même à de très faibles concentrations de particules dans l'air ambiant, réagir négativement. Aux plus hauts niveaux d'exposition, les personnes en bonne santé risquent également de manifester des symptômes [45].

Tableau N°11 : Résumé selon l'OMS des effets sur la santé, causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2.5 [44].

Effet sur la santé	Evaluation de l'accroissement ou 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 :	29	50
Changement de 5%	55	100
Changement de 10%	110	200
Changement de 20%		
Hospitalisations pour maladies respiratoires :	10	25
Changement de 5%	20	50
Changement de 10%	40	100
Changement de 20%		
Consommations de médicaments chez les asthmatiques :		7
Changement de 5%		14
Changement de 10%		29
Changement de 20%		
Aggravation de la symptomatologie chez les asthmatiques :		10
Changement de 5%		20
Changement de 10%		40
Changement de 20%		
Changement de la fonction pulmonaire :		200
Changement de 5%		400
Changement de 10%		
Changement de 20%		

**Tableau n°12 :** Résultats d'études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM-2.5 [45].

Effets chroniques	Valeurs Moyennes annuelles	Changement par 10 µg	Références
Mortalité	18-47 µg PM-10/ m <sup>3</sup>	+9%	[46]
Mortalité	11- 29.6 µg PM-2.5/m <sup>3</sup>	+14%	[47]
Décès cœur/poumons		+20%	
Décès cancers Poumons		+20%	
Mortalité	9- 33.5 µg PM-2.5/ m <sup>3</sup>	+6.9%	[48]
Décès par maladies de cœur /poumons		+12.6%	
Capacité vitale forcée	10- 34 µg PM-10/ m <sup>3</sup>	-3.1%	[48]
Dyspnée	10- 34 µg PM-10/ m <sup>3</sup>	+25%	[49]
Dyspnée travail léger		+21%	
Rhume allergique		+10%	
Infections des voies respiratoires 12 mois écoulés, enfants	10- 33 µg PM-10/ m <sup>3</sup>	+26%	[50]
Toux à respiration au cours des 12 mois écoulés, enfants		+54%	
Bronchites 12 mois écoulés	20- 25 µg PM-2.5/ m <sup>3</sup>	+37%	[51]
Toux chronique, enfants		+67%	

**Tableau N°13:** Pourcentage de personnes avec des maladies respiratoires pour des valeurs moyennes annuelles de PM-10 différentes [11].

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

### IV-1-3. Effet toxique de certains métaux lourds supportés par les PM-10 :

#### **IV-1-3-1. Action toxique du plomb :**

Ce métal qui a des propriétés cumulatives importantes est toxique. Le plomb minéral est distribué à raison de 94% dans les os et de 6% dans les autres tissus, dont 4% dans le sang.

Le plomb organique se fixe préférentiellement dans le cerveau d'où des manifestations toxiques particulières (Encéphalopathie). L'action toxique essentielle du plomb minéral est la perturbation de la biosynthèse de l'hémoglobine, qui se traduit par une légère anémie hypochrome, parfois des hématies à granulations basophiles, dites « ponctuées » et une augmentation de la plombémie.

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

Plusieurs auteurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre le plomb dans l'air et le plomb dans le sang [46, 47].

La corrélation qui est la plus citée dans la littérature est :

$$[\text{Pb}]_{\text{sang}} = 1.216 [\text{Pb}]_{\text{air}} + 15.65 \dots \dots \dots (11)$$

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

Certains interrogations subsistent sur l'impact à long terme, en particulier sur certains sujets sensibles. Néanmoins, à l'image des connaissances concernant les infections virales et les pneumo-allergies, on peut redouter une augmentation de l'inflammation des bronches favorisant de ce fait les maladies respiratoires chroniques, surtout en cas d'expositions répétées au cours de l'année [48].

#### **IV-1-3-2. Action toxique du Cadmium [47] :**

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

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

**IV-1-3-3. Action du Vanadium [47]:**

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

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

Il perturbe d'autres métabolismes, diminue la résistance immunologique et la réactivité allergique et présente une certaine toxicité rénale. Il provoque en quelque sorte la bronchite chronique et la pneumonie.

**IV-1-3-4. Action toxique du Mercure [47] :**

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

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

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

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

A titre illustratif, nous présentons en figure N°10 les organes du corps qui peuvent être affectés par les divers métaux lourds [13].

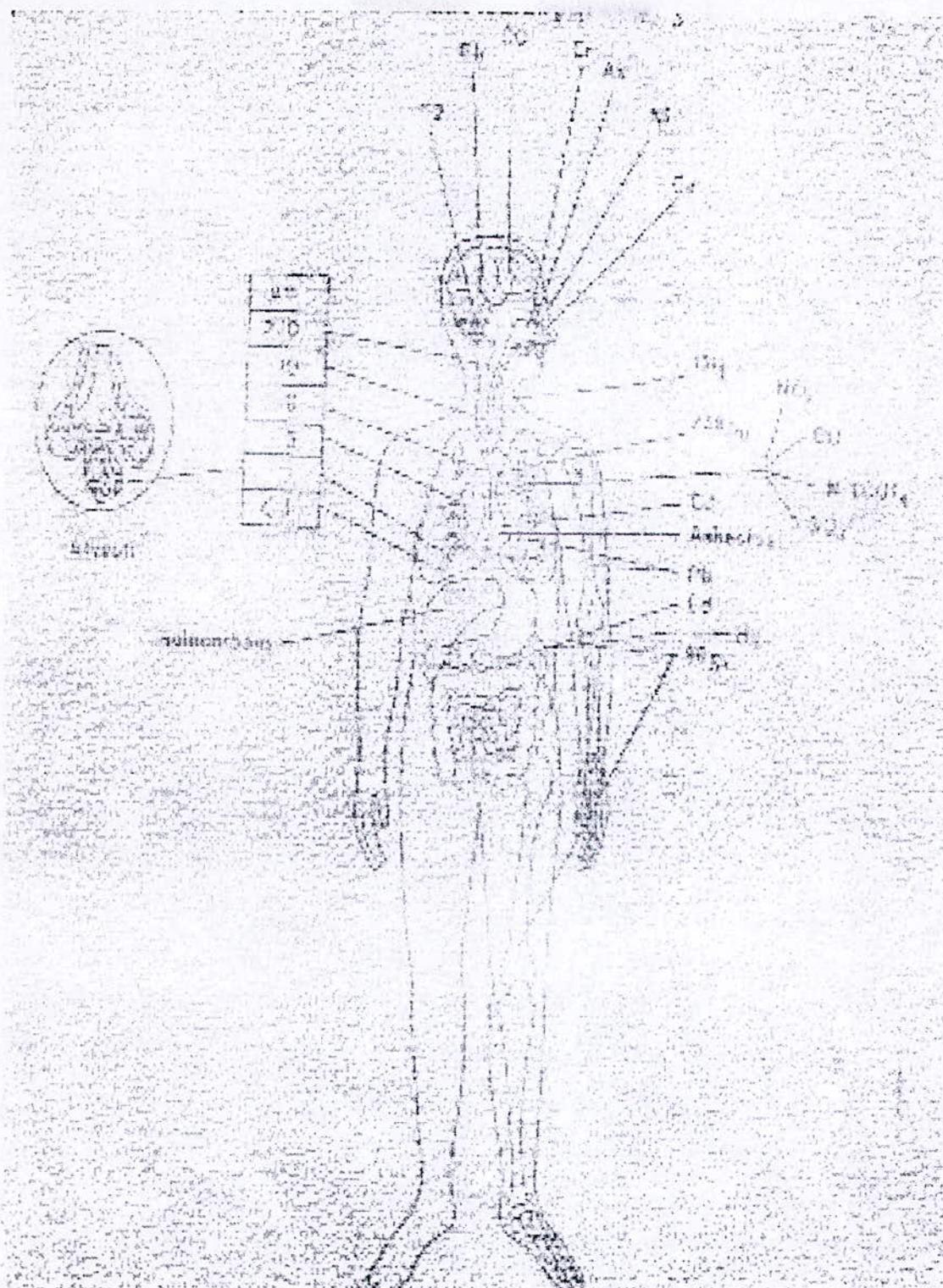


Figure N°10 : Différents organes et parties du corps humain pouvant être contaminé par certains aérocontaminants [16].

#### **IV-2. Effets sur les animaux :**

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

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

Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et modification du pH [38].

#### **IV-3. Effets sur les végétaux :**

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance. A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles ; c'est le cas par exemple des abricotiers. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux. La couche protectrice des feuilles et des aiguilles peut subir des lésions visibles, telles que fentes et augmentation de la taille des pores. L'eau de pluie ruisselant à l'intérieur des forêts présente un pH inférieur à celui des pluies en terrain découvert. La base du tronc est ainsi fortement atteinte.

L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes, comme les bactéries de l'azote par exemple. En tant qu'oligo-éléments, les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc, etc. mais une accumulation de ces métaux équivalent à un empoisonnement. L'obstruction des stomates par les particules fines contribue aussi au dépérissement [48].

#### **IV-4. Effets des particules solides sur les matériaux :**

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

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

A coté de la corrosion des matériaux, une autre forme d'impact de la pollution atmosphérique sur le cadre bâti et constituée par le phénomène de salissure de la surface des matériaux du fait du dépôt de particules. Les particules fines, et notamment les particules émises par les moteurs diesel, paraissent particulièrement efficaces et ils peuvent s'infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis, ...etc. Cette dégradation de la bâtie (bâtiment, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible.

Des relations mathématiques entre la diminution de la reflectance d'une peinture blanche et la teneur en particules suies ont été établies [17, 47].

#### **IV-5. Effet sur la visibilité :**

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

La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière. L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines (PM-2.5), est fonction de la taille des particules ; elle est donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique des particules et leur processus de formation [47].

Les sulfates et les nitrates, composantes importantes des particules PM-2.5 dispersent très efficacement la lumière et contribuent fortement à la réduction de la visibilité. L'effet de l'humidité est aussi important : plus elle augmente, plus la capacité des particules à disperser la lumière augmente [47].

## V-L-ES PRINCIPALES TECHNIQUES ET METHODES DE MESURE ET D'ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION :

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

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

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

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

Les techniques d'échantillonnage, de prélèvement et d'analyse des différentes fractions de particules ou être décrites en détail dans les travaux antérieurs menés dans notre laboratoire à l'ENP [60]. Nous reproduisons toutefois ci-dessous les principaux points y afférents.

### V-1. Echantillonnage de l'air :

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

- Selon les recommandations de la Commission of European Communities Environmental Institute, concernant la surveillance des émissions de particules fines, les prélèvements doivent tenir compte de certains critères qui varient selon le type de site à étudier (site urbain, trafic routier, site industriel, etc.) [41].

La représentativité des prélèvements est fonction de la qualité de gestion des contraintes liées à l'échantillonnage et au entraînement des particules dans l'appareil.

Quel que soit le mode d'échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n'est égal à 100% que pour les tailles approximativement inférieures à 3 $\mu$ 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.

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

Il n'existe pas d'instrument idéal capable de mesurer à la fois la masse, les dimensions et la nature des particules. Diverses méthodes permettent de mesurer une partie seulement de leurs caractéristiques.

Par ailleurs, les techniques de mesure peuvent déboucher sur des résultats de concentration notablement différents selon que le filtre est pesé par simple gravimétrie, examiné par réflectométrie ou analysé par méthodes automatique (absorption par rayonnement ou microbalance oscillante).

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

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

- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique : ce sont des méthodes dites intégrales qui collectent ou mesurent les aérosols sans dimension
- Les prélèvements avec coupure granulométrique.
- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique, ou méthodes discrètes qui collectent ou mesurent les aérosols sélectivement, en fonction de leur dimension [29, 41].

#### **V-1-1. Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique :**

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

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

**a)- Les Fumées Noires :**

Cette méthode est utilisée en principe, pour la collecte des particules fines de tailles inférieures à  $5\mu\text{m}$  qui sont collectées avec une grande efficacité.

L'échantillonnage est pratiqué à débit relativement faible (environ 80l/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 prélèvement des particules issues de la combustion du fuel et du charbon et pour les suies émises par le trafic routier diesel.

La durée de prélèvement est généralement de 2 heures. L'indice de fumée noire est donné en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les mesures de fumées noires bénéficient en Occident d'un historique important. De nos jours cette technique est de plus en plus remplacée par celle des PM-10 qui est plus représentative [39].

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

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

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

Les particules fixées sur le filtre peuvent servir d'échantillons pour d'autres analyses [39].

**c)- Méthode de prélèvement à très fort débit :**

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

Toutefois les appareils sont dotés d'une pompe d'aspiration d'un très fort débit de l'ordre de  $60$  à  $100\text{ m}^3/\text{h}$ . Ces appareils portent le nom de High Volume Sampler, HVS.

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

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

Les modes de prélèvement à débit moyen et par HVS sont largement utilisées de nos jours [50, 51].

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

#### Mesure des PM-10 :

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

En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ . Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inspirables, c'est-à-dire, la fraction trachéobronchique et alvéolaire.

L'appareil le plus connu de nos jours et qui est accepté comme référence, est le HVS-PM-10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules <10  $\mu\text{m}$  [41].

En principe, tout appareil destiné à l'étude des TSP peut également être utilisé pour l'analyse des PM-10, si toute fois la tête de prélèvement TSP est remplacée par une tête certifiée PM-10. Toute fois et pour permettre des études comparatives, les méthodes de prélèvement ont été perfectionnées et surtout standardisées.

En plus de la technique HVS-PM-10 qui demeure une méthode manuelle (Changement manuel du filtre collecteur à intervalles de temps réguliers), il existe deux autres méthodes automatisées qui de nos jours équipent la majorité des réseaux de surveillance. Il s'agit de la jauge bêta et de l'appareil TEOM [40, 41].

**- La jauge bêta :**

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un rayonnement bêta constitué d'électrons d'énergie 0.01 à 0.1 Mev ayant traversé un filtre chargé de particules (source radioactive C14). Les particules sont collectées par filtration ou impaction sur un filtre approprié.

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

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

La mesure consiste à calculer la variation d'absorption entre le filtre vierge et celui chargé du dépôt de particule [37].

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

Dans cette méthode, des erreurs peuvent se produire, si la taille des particules est importante, si le dépôt n'est pas homogène ou si l'aérosol est composé de particules de poids atomiques élevés [37].

**- La balance piézo-électrique ou « balance à quartz » : appareil de type TEOM**

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

C'est sur cette base que fonctionne l'appareil Taperd Element Oscillating Microbalance TEOM (microbalance à élément conique oscillant) qui consiste à mesurer les variations de fréquence de vibration d'un élément oscillant maintenu à

la température de 50 °C et sur lequel les particules prélevées se sont déposées. Dans ce dispositif on peut avoir les teneurs instantanées.

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

Le TEOM et la jauge bêta travaillent en continu et permettent de mettre en évidence d'éventuels pics de pollution [40].

### **V-1-3. Les prélèvements avec fractionnement granulométrique :**

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

La sélection des particules en classe granulométrique se fait par impaction d'où le nom d'impacteur.

Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen ( $1.7\text{m}^3/\text{h}$ ) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ( $d < 2.5\ \mu\text{m}$ ) et la fraction trachéobronchique ( $2.5 < d < 10\ \mu\text{m}$ ).

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

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

### **V-2. Les filtres et membranes de rétention :**

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

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

Les filtres les plus utilisés sont les filtres en fibre de verre et les filtres membranes à base de dérivés de cellulose (acétate et ester de cellulose) [19].

#### **V-2-1. Les filtres en fibre de verre :**

Ils ont une efficacité de collection de 99.9% pour les particules de diamètres supérieur à 0.3  $\mu\text{m}$ . Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate.

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

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, les éléments les plus gênants sont le zinc et le fer qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. La teneur des filtres *Gelman* type A et *Whatman* GF-A contient plus de 50  $\mu\text{g Zn/cm}^3$ .

#### **V-2-2. Les filtres membranes :**

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

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

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

Avec les deux types de filtres (filtres en fibre de verre et filtres membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0.1  $\mu\text{m}$  de diamètre [19].

#### **V-3. Analyse des particules en suspension :**

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'atmosphère rend difficile leur mise en évidence. Mais il existe des méthodes plus

au moins développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration, après une préparation préliminaire de l'échantillon [6].

- ❖ La composante acide c'est-à-dire les sulfates et les nitrates particulaires, 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.
  - Activation neutronique.
- ❖ La composante organique contenant les HAP est déterminée généralement par des techniques chromatographiques telles que :
  - La chromatographie liquide haute performance (C.L.H.P) équipé d'une détection par émission de fluorescence.
  - Chromatographie en phase gazeuse (C.P.G).

Le carbone élémentaire (carbone suie) et le carbone organique sont généralement analysés après combustions à différentes températures sous forme de  $\text{CO}_2$ .

## VI-METHODOLOGIE:

On présente dans cette partie la méthodologie adaptée pour le prélèvement et l'analyse de PM-10.

### VI-1. choix du site de prélèvement :

Le site retenu pour l'étude des PM-10 et de leurs différentes fractions granulométriques PM-7, PM-3, PM-1 ainsi que les métaux lourds qu'elles véhiculent est localisé à la cité universitaire des garçons de Bab Ezzouar « Cub 3 » à environ 14 Km à l'est d'Alger et à quelques 100m à l'est de la cité Rabia Tahar. Ce site qui n'est pas exposé directement aux émissions des grandes axes routiers et à proximité duquel il n'existe pas de sources industrielles émettrices de poussières, peut être considéré comme étant un site urbain à forte densité de population résidente ( La commune de Bab Ezzouar accuse une densité de population élevée qui est de l'ordre de 45000 hab/Km<sup>2</sup> ).

En ce site le poste de prélèvement est implanté sur la terrasse du pavillon F à environ 12m d'altitude du sol. Ce site qui se caractérise par l'absence d'obstacles et de sources potentiels des particules fines, fait l'objet de bonne ventilation naturelle. Les photos données en figure N°11 e 12 illustrent la localisation de mesure et son entourage.

### VI-2. Mode de prélèvement :

En vu de suivre l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques les particules fines, les prélèvements sont effectués à l'aide d'un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 (high volume sampler ) de marque « Andersen ». Cet appareil à seuil de coupure de 10µm est en plus doté d'un système de fractionnement granulométrique à plusieurs étages d'impaction.

Ce dispositif est composé essentiellement de trois parties essentielles (figure 13 ) :

- Le high volume sampler (HVS).
- La tête PM-10.
- Le cascadeur d'Andersen à quatre étages.

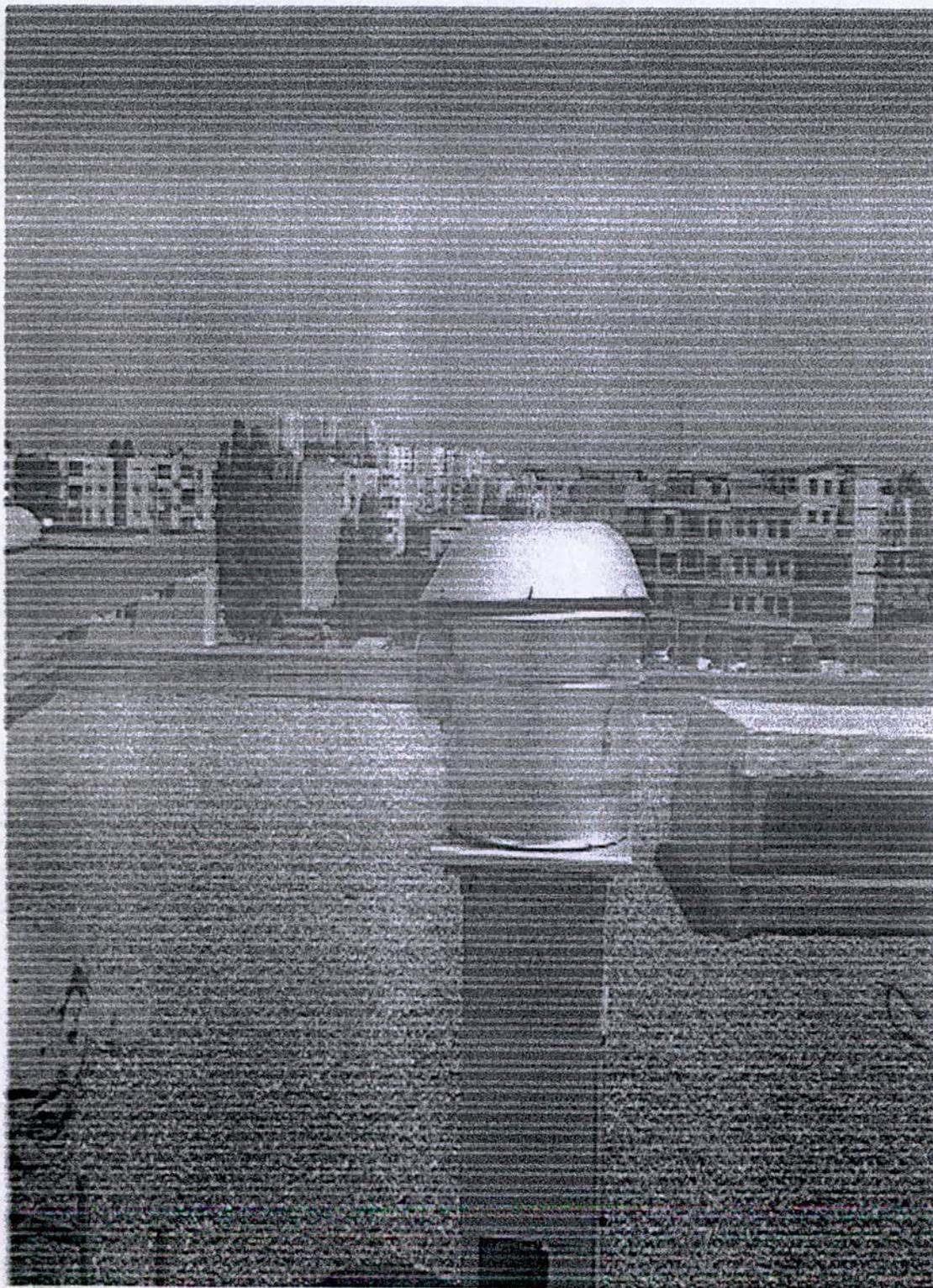
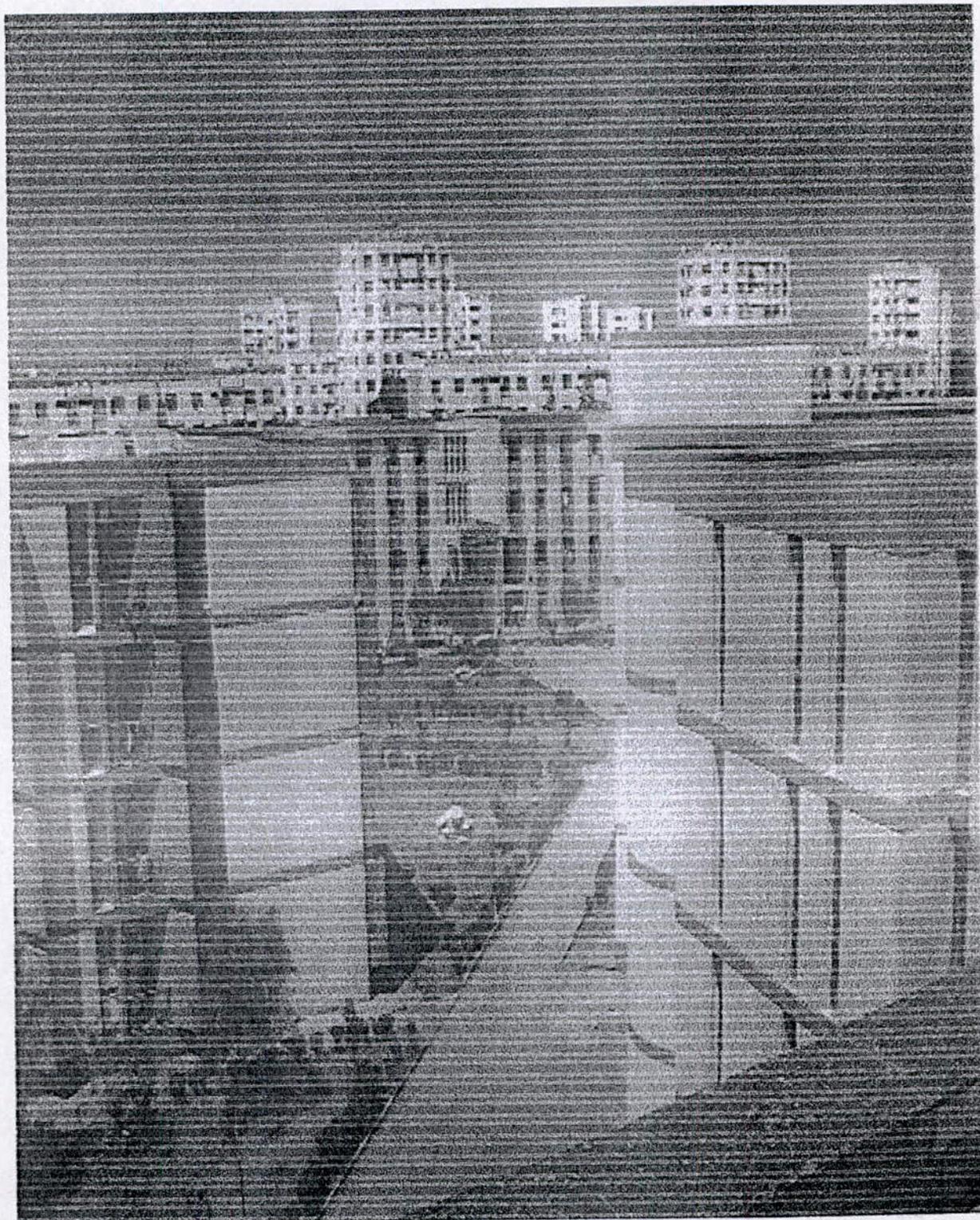


Figure n°11 : Photo illustrant l'entourage du poste de mesure.



**Figure N°12 :** Photo du site de prélèvement, (pavillons de la cité universitaire et les cités résidentielles).

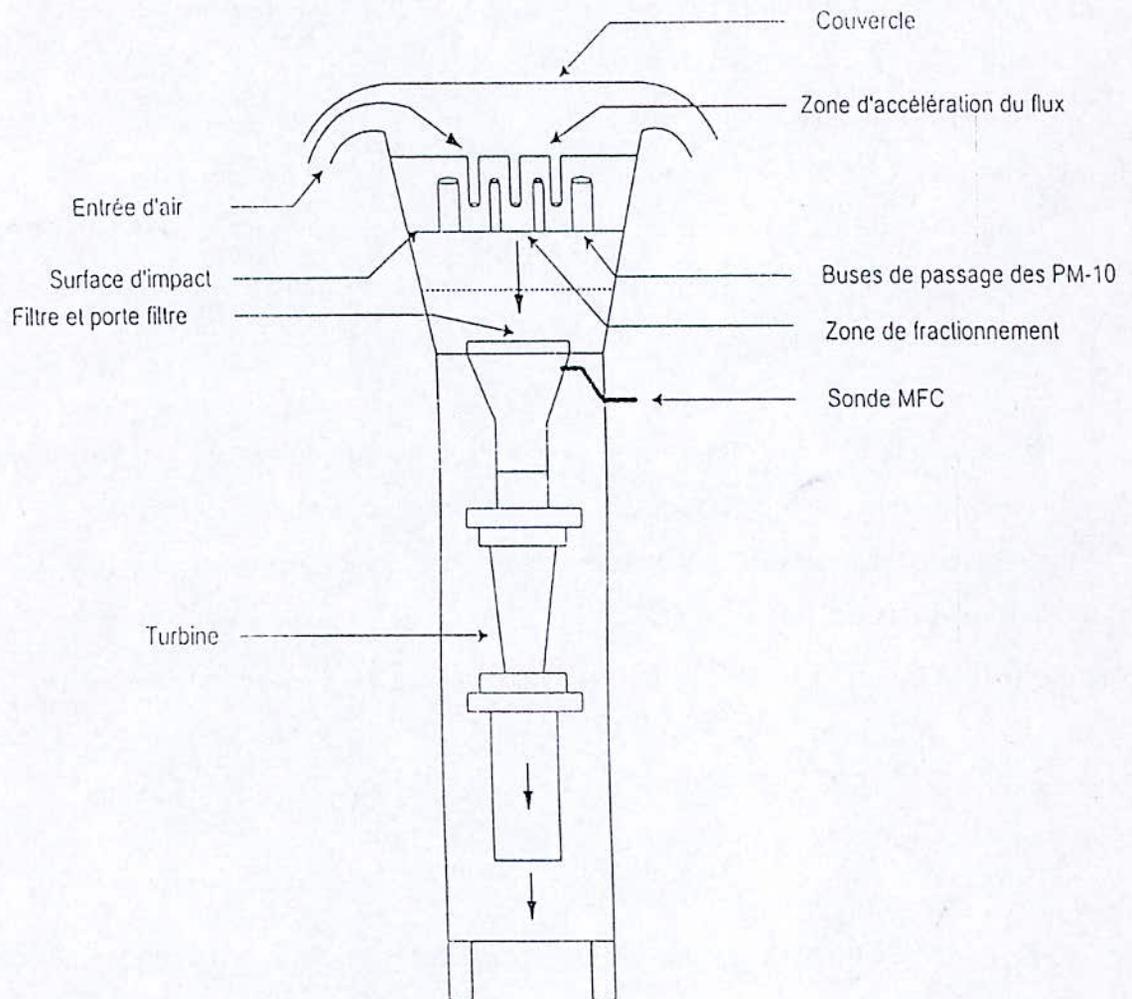


Figure n°13 : Schéma du principe de collecte des PM-10 par l'échantillonneur HVS PM-10.

Le IIVS représente le corps de cet échantillonneur, il contient principalement :

- Une turbine d'aspiration d'air .
- Un conduit d'aspiration .
- Des étages de sélection qui servent comme portes-filtres et qui permettent le tri, par impaction, des particules selon leur taille.
- 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.
- Un contrôleur électronique de débit le MFC ( Mass Flow Controller ) . ce qui permet de maintenir, durant le prélèvement, le flux d'air entrant à un débit constant. il agit sur la puissance de moteur ( turbine d'aspiration ) par ajustage électronique du voltage. De cette façon, une éventuelle réduction du débit de colmatage du média filtrant est automatiquement corrigée.

La tête sélective PM-10 comporte une zone où le fractionnement se fait par impaction directe. Cette impaction repose sur l'effet aérodynamique induit par la présence de 9 buses circulaires placés au-dessus d'une surface lisse d'impaction. Les particules inférieures au seuil de coupure de  $10\ \mu\text{m}$  sont entraînées par le flux de l'air dans les buses et sont collectés sur des filtres. Tandis que les particules les plus grosses s'écartent de flux et impactent sur la surface d'impaction en raison de leur inertie plus élevée. Afin d'éviter le réentraînement des particules grosses, la surface d'impaction est graissée ( huile de silicone ) et nettoyée régulièrement .

Le cascadeur d'Andersen est équipé de quatre étages et permet d'accéder aux classes granulométriques présentées dans le tableau N°14.

**Tableau n°14 : Etage et classe granulométrique correspondant.**

<i>Etage</i>	<i>Classe granulométrique</i>
1	>7
2	>3
3	>1.5
4	>1

Le débit d'aspiration est de  $1,1 \text{ m}^3/\text{mn}$ , la durée de prélèvement est de 24h. Les filtres utilisés pour la rétention de particules sont en fibres de verre de type Whatman. Les filtres utilisés pour le fractionnement sont de dimensions  $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ , le filtre de rétention final est de dimensions  $20\text{cm} \times 25\text{cm}$ . Pour déterminer les teneurs en particules fines, les filtres sont pesés avant et après collecte à  $0.1 \text{ mg}$  de près. Le résultat est ensuite exprimé en «  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ».

### **VI-3. Traitement et analyse élémentaire des PM-10 :**

Afin d'analyser les métaux lourds qui sont véhiculés par les PM-10, on procède à une minéralisation des échantillons des particules collectées.

La minéralisation acide a lieu conformément à la norme ISO 9885. Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 ml contenant 60ml d'acide nitrique (dilution 1:8).

La solution est alors portée à ébullition sous reflux pendant 2h. Après évaporation partielle, une seconde minéralisation est effectuée dans les mêmes conditions. On évapore ensuite à sec et après refroidissement, le résidu est repris dans 30 ml d'eau distillée. Le minéralisat est ensuite filtré sur filtre whatman pour retenir les impuretés insolubles ( carbone noir, silicates).

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

Un filtre vierge subit la même procédure pour servir de blanc.

Les métaux lourds Pb, Cu, Ni, Cr, et Cd, qui de point de vue sanitaire ont une incidence importante, sont alors analysés par spectrophotomètre d'absorption atomique sur appareil Thermo Elemental Solaar (Solaar AA Spectrometer) avec une flamme air / acétylène.

### VII– Résultats et interprétations:

Le suivi des teneurs atmosphériques en particules fines a été effectué durant la période de janvier à mai 2005 à raison de 7 à 8 prélèvements par mois. Cette campagne nous a permis de mesurer les teneurs de 38 jours, dont 34 avec fractionnement granulométrique, ce qui a donné un total de 129 échantillons répartis entre les différentes classes granulométriques.

Dans ce qui suit, nous présentons:

- Les évolutions temporelles des teneurs atmosphériques en particules inhalables, alvéolaires et très fines.
- Les corrélations entre les particules alvéolaires, les particules très fines et les PM-10.
- L'ampleur des teneurs enregistrées par rapport aux standards internationaux et aux résultats enregistrés dans d'autres études.
- Les métaux lourds associés à ces particules et leur répartition par classe granulométrique. Ceci nous permettra d'estimer les quantités susceptibles d'atteindre les zones sensibles du système respiratoire.
- L'évaluation de degré de pollution de l'air par les métaux lourds.

Qualitativement, on constate que les filtres chargés sont de couleur noire, ce qui montre qu'il s'agit d'une pollution de suies issue des phénomènes de combustion. Les deux photos données en figures N° 14 et 15 illustrent la charge et la couleur des filtres après échantillonnage.

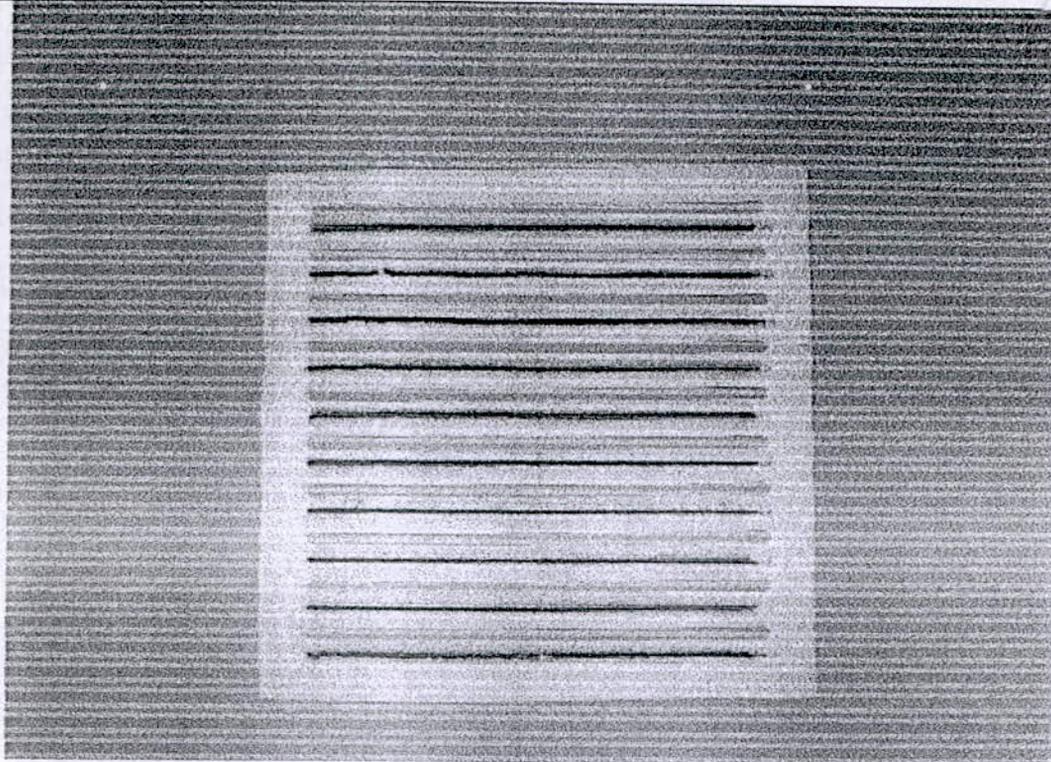


Figure N°14: Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.

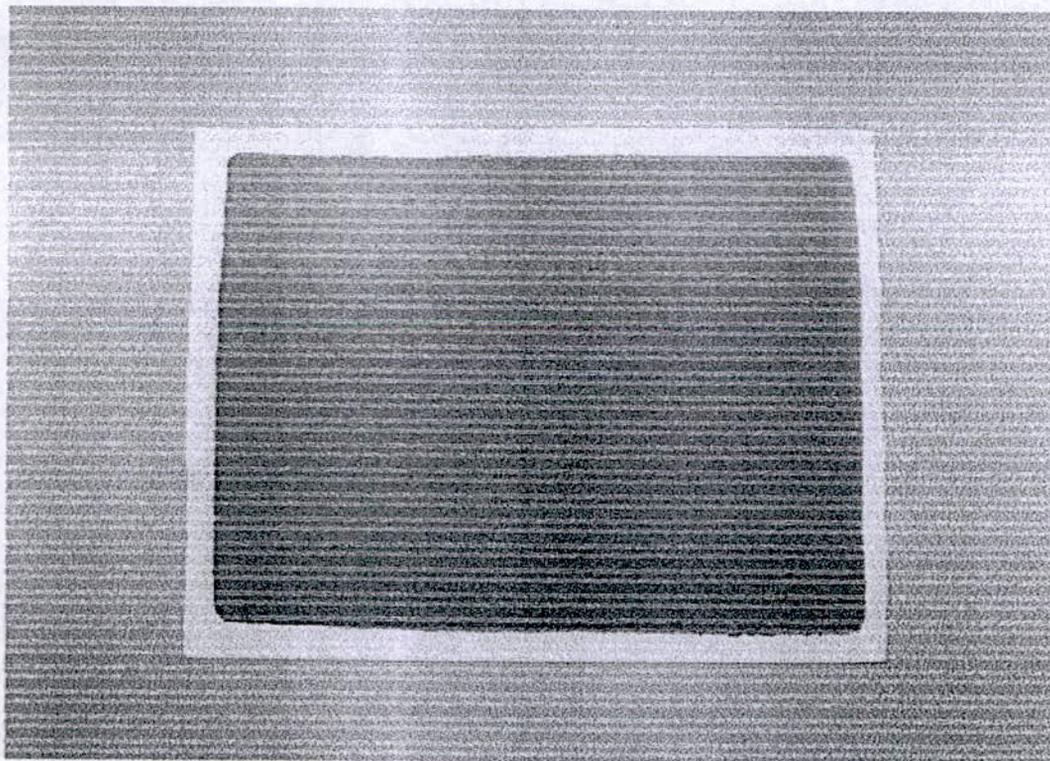


Figure N°15: Photo du grand filtre après prélèvement.

**VI-1-1. Etude des teneurs atmosphériques en particules inhalables :**

L'évolution temporelle des teneurs en PM-10 enregistrée le long de ce travail est illustrée graphiquement sur la figure 16 .

Cette évolution est caractérisée par les paramètres statistiques rapportés sur le tableau N°13.

**Tableau N°15 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-1**

Paramètres	Valeur
Nombre de prélèvement	38
Teneur maximale	158,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Teneur minimale	15,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Teneur moyenne	72,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ecart type	31,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Percentile 98 ( $P_{98}$ )	139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rapport (Ecart type/Teneur moyenne)	43%

Les teneurs journalières en PM-10 varient de 15,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à 158,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La teneur moyenne enregistrée était de 72,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette valeur excède aux teneurs limites annuelles des PM-10 pour la protection de la santé humaine (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour 2005 et 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour 2010) établies dans le cadre de la nouvelle directive Européenne pour l'évaluation et le management de la qualité de l'air ambiant [52].

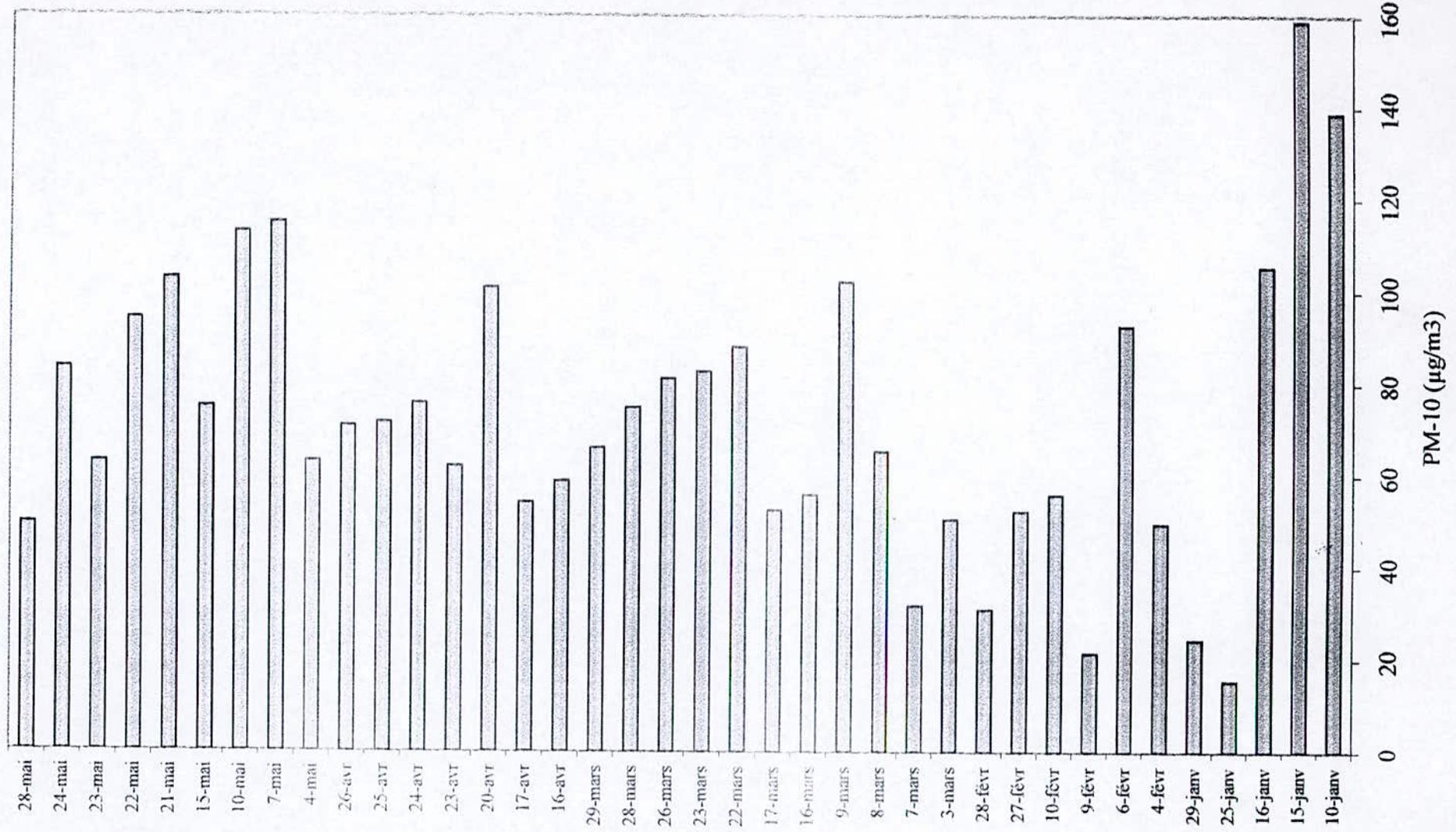


Figure N°13 : Evolution journalière des teneurs atmosphériques en particules inhalables PM-10.

En plus, 28 teneurs sur le 38 mesurées, dépassent la limite journalière ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) à ne pas dépasser plus de 25 fois par an, fixée par l'union européen [53].

Le domaine de dispersion des concentrations des PM-10 dans l'air, s'étale sur un rayon de  $31,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par rapport à la teneur moyenne de  $72,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le percentile permet de définir la vulnérabilité de la qualité de l'air. Il est relatif, il peut varier d'un pays à un autre. En suède par exemple, la valeur limite est le  $P_{98}$  des moyennes journalières et qui s'élève à  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [54], alors qu'aux états unis la valeur limite est le  $P_{99}$  des teneurs maximales journalières sur 3 ans, et qui est de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [53].

Dans notre cas, le percentile  $P_{98}$  s'élève à  $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui signifie que 98% des teneurs atmosphériques en PM-10 sont inférieures à  $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette valeur dépasse largement la valeur limite fixée en Suède.

L'illustration graphique portée sur la figure 14, montre que 79% des teneurs sont inférieure à la valeur limite fixée par la suède.

L'analyse visuelle (à l'œil nu) montre que les couches des particules collectées sur les filtres lors des prélèvements des PM-10 ont une couleur noire ce qui signifie que ces particules sont essentiellement constituées de suies et d'imbrûlés issus des émissions du trafic routier et en particulier des émissions diesel.

Les résultats montrent qu'il existe, comme c'est souvent le cas en pollution de l'air, une importante fluctuation temporelle.

Comparativement aux rapports (écart type/ teneur moyenne) calculés dans les autres études, le taux enregistré à Bab Ezzouar dans ce travail s'avère plus important. Cette différence est essentiellement due aux écarts enregistrés au cours du mois de janvier, alors que pour les autres mois, on relève des écarts qui sont relativement plus .

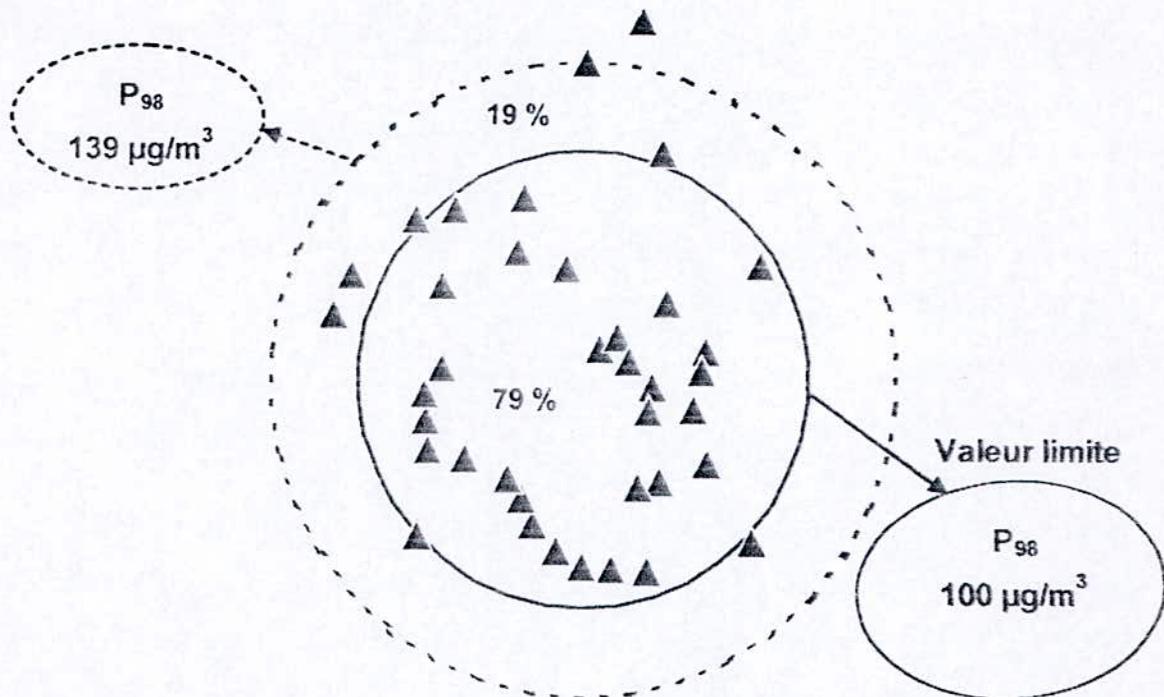


Figure N°14 : Distribution des teneurs journalières en PM-10 par rapport au P<sub>98</sub>

La comparaison des jours de fortes teneurs en PM-10 à ceux de faibles teneurs, permet de mettre à l'évidence l'influence des facteurs météorologiques (vitesse et direction du vent, précipitation, ...) et de l'activité humaine sur la concentration des particules dans l'air.

Pendant les jours du 10, 15 et 16 janvier, les teneurs en PM-10 ont atteint les valeurs les plus élevées. Ceci est du probablement à l'amélioration des conditions météorologiques et cet hiver qui a été très rigoureux (journées ensoleillées, climat stable, ...), et le calme atmosphérique (faible vitesse du vent) et l'absence de pluie conjugués à un trafic routier et à des activités humaines plus intenses ont alors engendrés un niveau élevé en PM-10.

Au cours des deux jours du 25 et du 29 janvier, les conditions climatiques (vent fort, pluies, froid, ...) étaient favorables à la réduction des teneurs des particules présentes dans l'air (par lessivage de l'atmosphère, entraînement des particules à de longues

distance (dilution)). Aussi, ces mêmes conditions ont probablement générées une certaine réduction des déplacements motorisés.

Si on compare la teneur moyenne en PM-10 enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2002 au niveau d'un site de proximité qui est exposé aux émissions du trafic routier (station trafic) [57], on relève une diminution de l'ordre de 11%. Ainsi en milieu urbain, en s'éloignant des axes routiers, les teneurs en PM-10 diminuent sensiblement.

#### VI-1-2. Etude de la répartition granulométrique des particules fines :

Afin de déterminer la distribution des particules en suspension selon leur dimension et d'évaluer la part de pollution imputable à la fraction alvéolaire (PM-2.5) et à la fraction très fine (PM-1), nous avons effectué des prélèvements avec fractionnement granulométrique.

Les fractions recueillies sur les quatre étages du cascadeur d'Andersen sont : 10 à 7  $\mu\text{m}$ , 7 à 3  $\mu\text{m}$ , 3 à 1  $\mu\text{m}$ , et enfin la fraction terminale du filtre absolu 1 à 0,01  $\mu\text{m}$ .

La figure 15 illustre l'évolution temporelle des différentes classes granulométriques.

Le tableau N°14 résume les teneurs moyennes et extrêmes des différentes fractions granulométriques ainsi que les rapport PM i / PM-10.

Tableau n°14: Caractérisation des différentes classes granulométriques.

Classe granulométrique	Maximum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Minimum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	moyenne ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Rapport PM-i / PM-10
PM-1	40,5	5,3	22,1	0.33
PM-3	62.7	9.1	32,9	0.49
PM-7	94.1	16.15	55,3	0.82
PM-10	158.8	15,5	67,8	1

Notons que les moyennes sont calculées pour le même nombre de prélèvement et que les PM-i est la valeur limite de diamètre des particules collectées. La teneur moyenne en PM-10 est ici plus faible que celle présentée en paragraphe III .1, car elle n'incluse que les prélèvements ou les fractions granulométriques sont effectuées simultanément.

Les figure 15 et 16 illustrent graphiquement l'évolution temporelle et les valeurs moyennes des teneurs en particules fines.

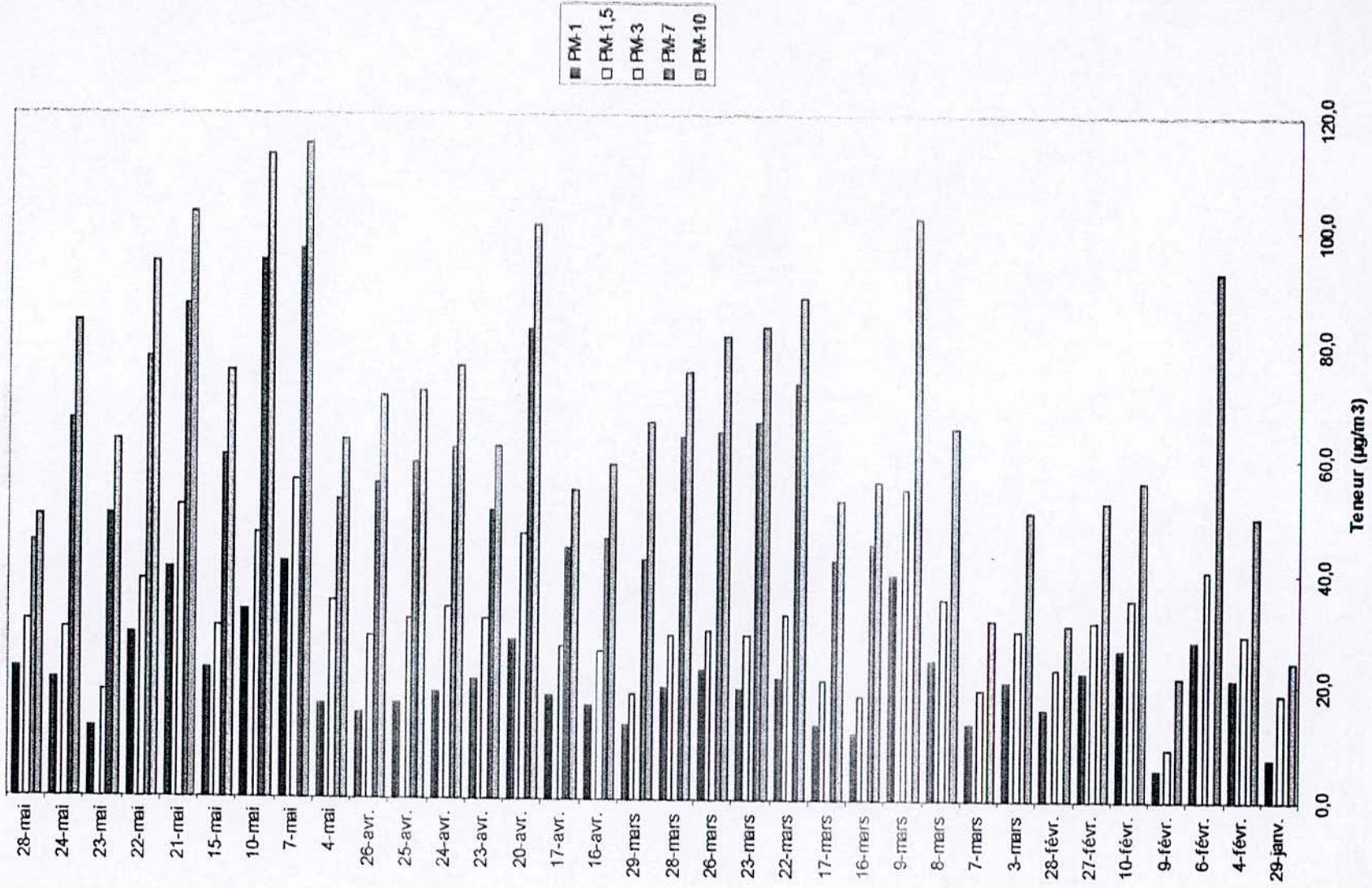


Figure N°15 : Evolution Répartition journalière de la pollution par les particules fines en fonction de leur classe granulométrique.

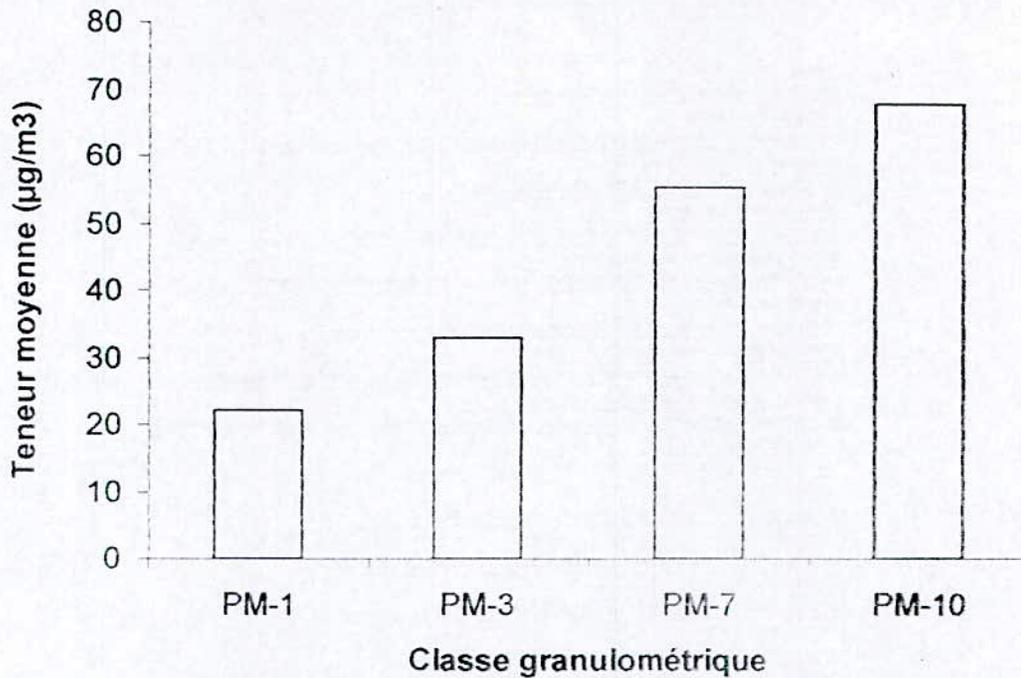


Figure N°16: Teneur moyenne des particules fines selon leur taille.

On relève par ailleurs que presque la moitié des PM-10 ont un diamètre inférieur à  $3\mu\text{m}$  (particules alvéolaires) et que le tiers des PM-10 sont des particules qui ont un diamètre inférieur à  $1\mu\text{m}$  (particules très fines).

a) Distribution des particules inhalables par fractions granulométriques :

La distribution des particules par classes granulométriques permet d'estimer la probabilité de présence d'une particule dans une fraction granulométrique donnée.

Tableau N°15: Distribution massique des particules par classes granulométriques

Fraction granulométrique ( $\mu\text{m}$ )	$M_i$ (mg)	Rapport ( $M_i / M_{\text{total}}$ ) (%)
0,01 – 1	34,9	32,6
1 – 3	17,1	15,9
3 – 7	35,4	33,1
7 - 10	19,7	18,4

\* Masse des particules collectées par classe granulométrique

Les données de tableau 15, sont illustrées graphiquement en figure 17 et 18.

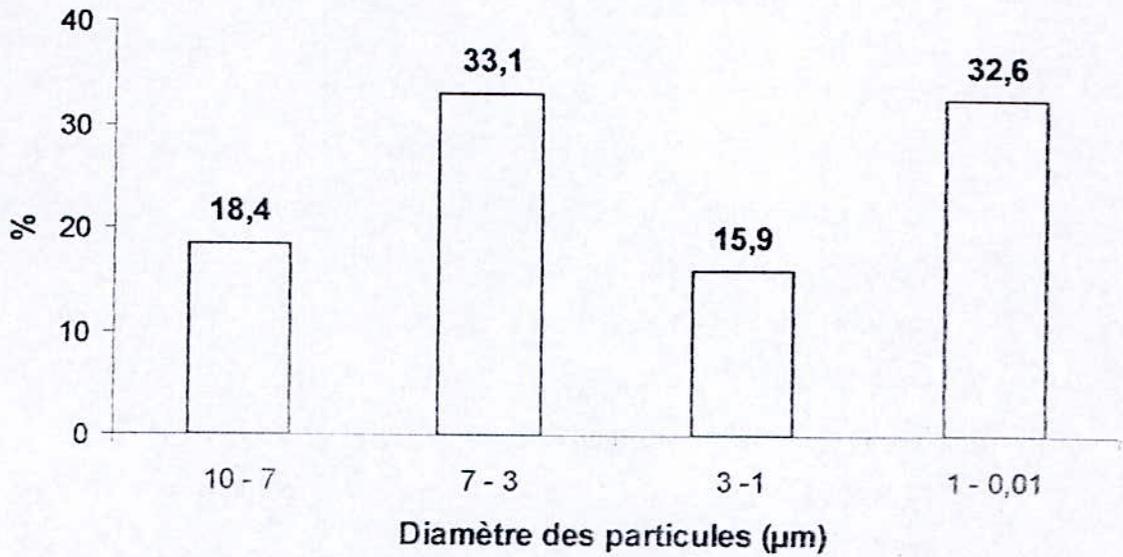


Figure N°17: Distribution granulométrique moyenne des particules, exprimée en fraction massique.

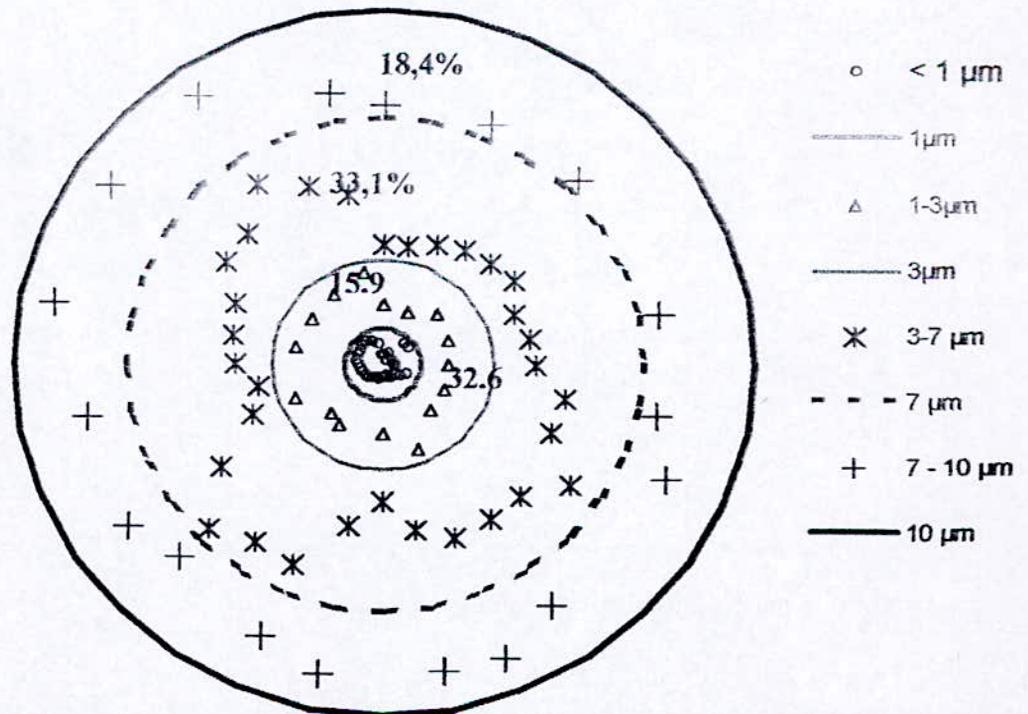


Figure N°18: Distribution des particules fines par fraction granulométrique.

Les figures 17 et 18, montrent que les particules grossières (3 – 7  $\mu\text{m}$ ) et les particules très fines (<1 $\mu\text{m}$ ) sont les prédominantes dans les PM-10.

De plus il est possible de déterminer :

- Le diamètre médian  $d_{50}$  de la masse médiane qui correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM-10. ce paramètre est important dans la caractérisation des particules inhalables et permet parfois par comparaison avec les données recueillies en divers sites de retrouver le type de source émettrice de particules.
- La teneur atmosphérique en particules respirables, les PM-2.5. Dans le cas de notre échantillonneur, cette fraction n'est pas accessible directement par voie expérimentale puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM-3 qui est naturellement très proche de la fraction PM-2.5. Cette fraction est importante à déterminer car elle permet d'effectuer des études comparatives et d'avoir exactement le niveau de la pollution qui atteint les sites alvéolaires du système respiratoire.

#### b)- Diamètre médian « $d_{50}$ » :

La détermination du diamètre  $d_{50}$  peut se faire graphiquement en portant sur un diagramme log-probabilité, le diamètre  $d_i$  des particules (axe des ordonnées à échelle logarithmique) et le 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 probabilité est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse [57].

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

En traçant 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 19.

Tableau n°16: Exploitation de données recueillies par fractionnement granulométrique.

Etage Andersen	Masse des particules collectées par étage (mg)	Masse(*) Cumulée en (mg)	Masse cumulée en %	100 – masse cumulée en %	Diamètre de l'étage
1	19,7	19,7	18.4	81.6	7
2	35,4	55,1	51.5	48.5	3
3	17,1	72,1	67.4	32,6	1
4 (étage terminal)	34,9	107	100	0	0.01

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

A partir de la figure 19, on tire le diamètre aérodynamique moyen  $d_{50}$  de la masse médian ( $M_i=50\%$ ) :

$$d_{50} = 3,1 \mu\text{m}$$

En d'autres termes 50% de la masse des particules PM-10 a un diamètre  $\leq 3,1 \mu\text{m}$ .

### c) teneur atmosphérique en PM-2,5 :

A partir du diagramme log-probabilité de la figure, on obtient pour le diamètre  $2.5 \mu\text{m}$  :

100-masse cumulée = 46.2 %

Masse cumulée = 53.8 %

$$\text{PM-2.5} = (46,2 \cdot \text{PM-10})/100 = 31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3.$$

$$\text{PM-2.5}/\text{PM-3} = 0,95$$

Ainsi la teneur en PM- 2.5 s'élève à environ 95 % de la teneur en PM-3 mesurée expérimentalement et donc il n'y a pas une grande différence entre les deux classes.

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

- Particule inhalables  $\text{PM-10} = 67,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Particules respirables  $\text{PM-2.5} = 31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Particules très fines  $\text{PM-1} = 22,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

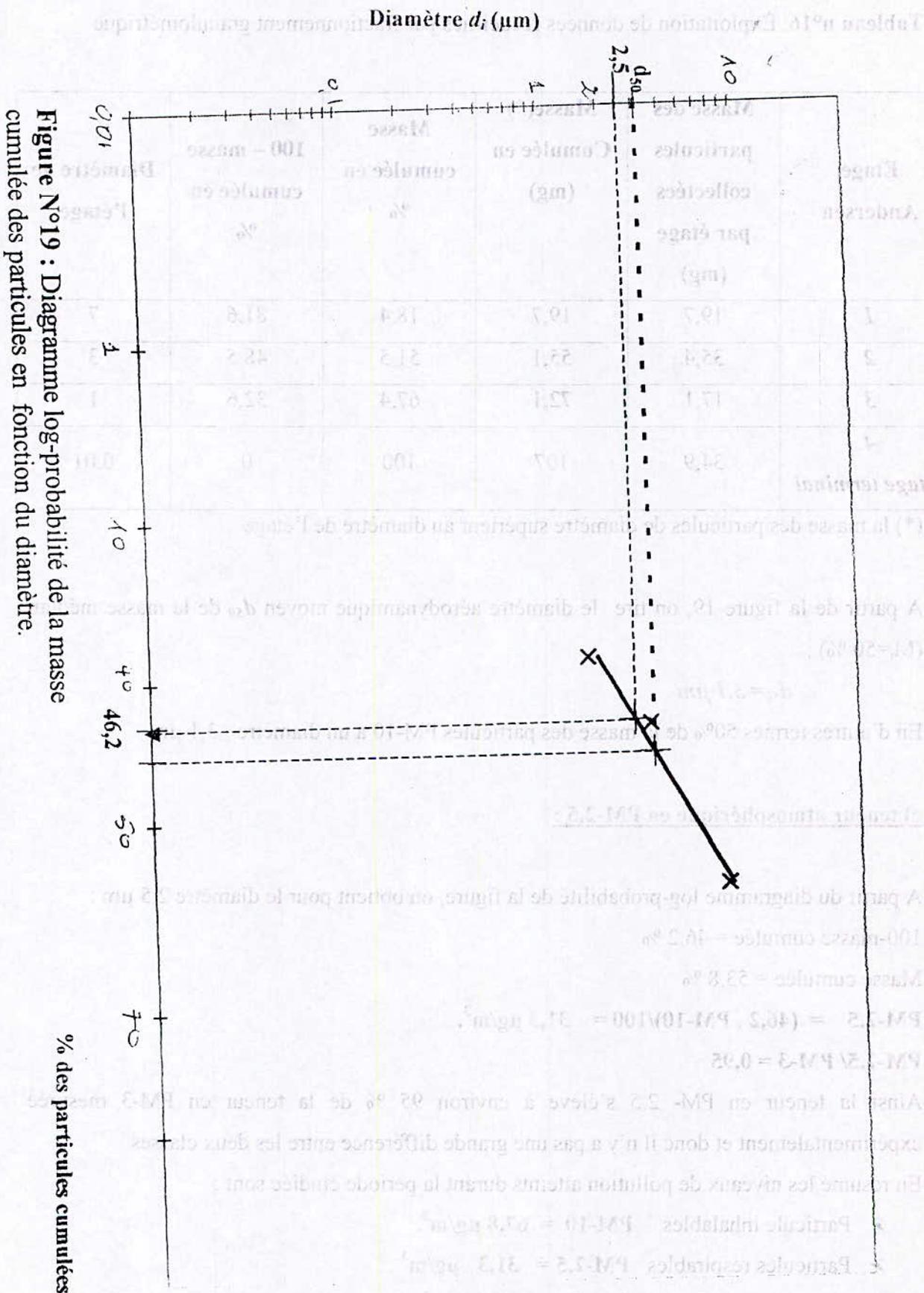


Figure N°19 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.

Comparativement aux teneurs enregistrés au niveau d'un site de proximité (RN5 Ecole Nationale Polytechnique, 2002) [57], ces valeurs présentent des réductions de pollution de l'ordre de 30 % pour les trois classes.

La teneur en PM-2,5 dépasse la limite d'exposition recommandée par AIRPARIF (réseau de surveillance en Ile de France) qui est de 15 à 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [53].

### VI-1-3. Etude des particules respirables et leur relation avec les PM-10 :

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

Les figures 19 et 20 illustrent les évolutions temporelles des particules alvéolaires PM-3 et les particules fines PM-1.

On résume en tableau 17 les paramètres statistiques caractérisants ces classes granulométriques.

Tableau N°17: Paramètres statistiques caractérisants les PM-1 et les PM-3.

Paramètre	PM-1	PM-3
Minimum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	5,3	9,1
Maximum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	50,7	54,6
Moyenne ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	21,1	32,9
Ecart type ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	8,6	11,2
Nombre de prélèvement	34	27
Rapport * (PM-i /PM-10) (%)	30,7	49

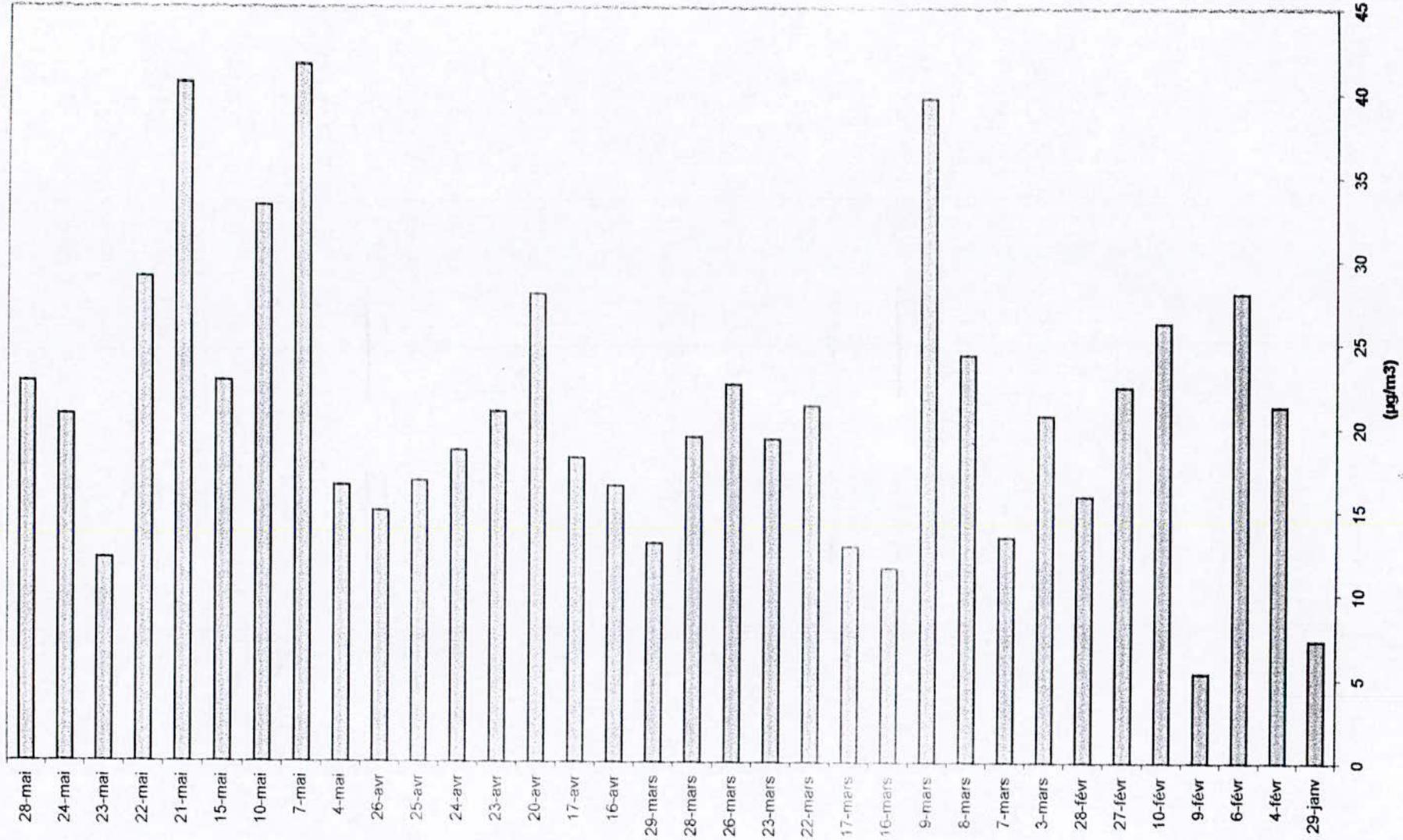


Figure N°19 : Evolution journalière des teneurs atmosphériques en particules très fines PM-1.

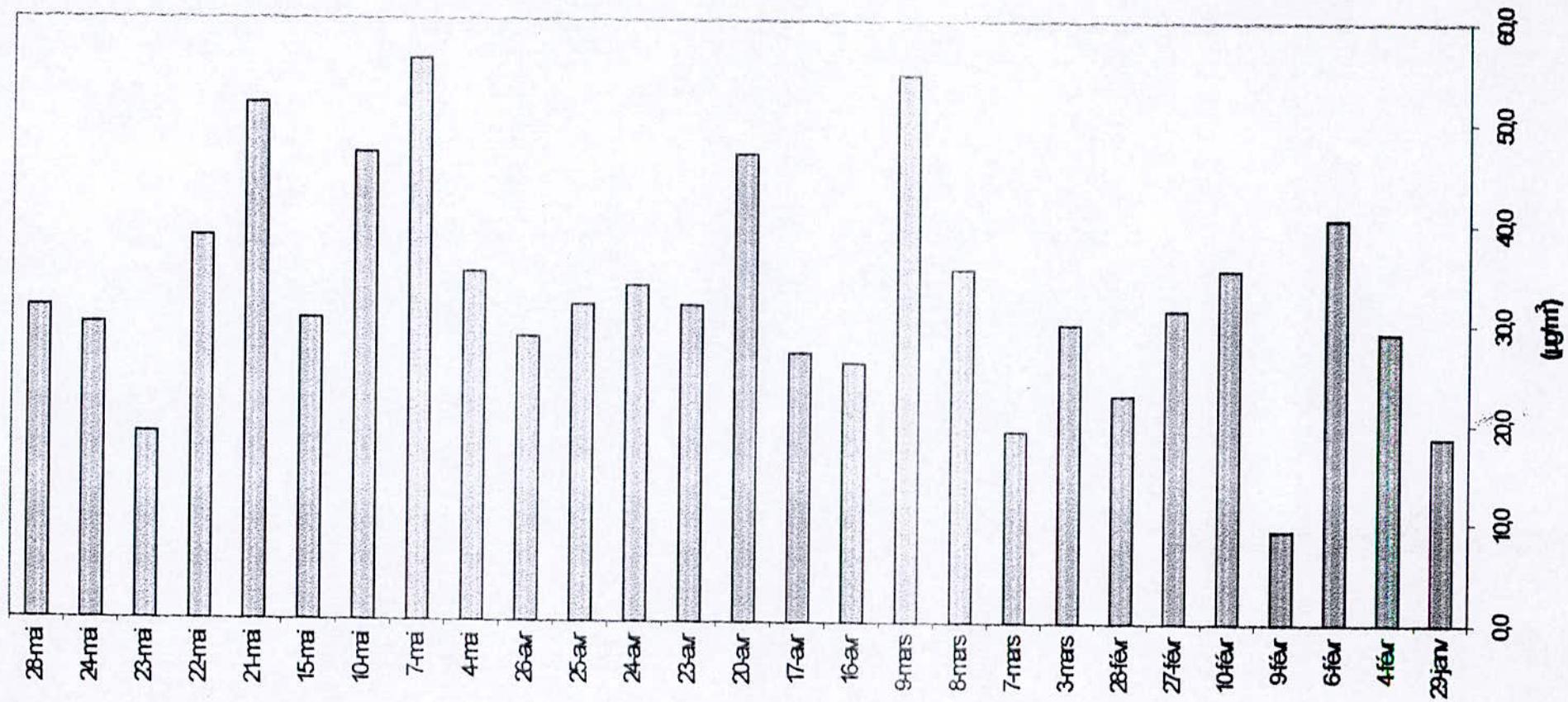


Figure N°20: Evolution journalière des teneurs atmosphériques en particules alvéolaires PM-3.

On constate que les fluctuations journalières des PM-1 et PM-3 sont moins prononcées que dans le cas des PM-10.

Le tableau 16 montre à cet effet qu'environ 50 % des particules inhalables peuvent atteindre les alvéoles, dont deux tiers se déposent et se fixent sur le tissu alvéolaire en provoquant l'apparition de plusieurs maladies respiratoires.

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

Une étude sur les particules PM-2,5 menée dans plusieurs villes d'Europe (juin 2000 à janvier 2001), a montré que les teneurs annuelles en PM-2,5 varient entre 3,7 et 44,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En hiver, cette moyenne s'élève jusqu'à 69,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [57].

#### VI-1-2. Corrélation entre PM-1, PM-3 et PM-10:

La figure 21 retrace l'allure d'évolution temporelle des trois classes granulométriques PM-10, PM-3 et PM-1.

On constate que les PM-10, PM-3 et PM-1 suivent une évolution similaire. C'est particulièrement le cas des PM-1 et PM-3 qui varient dans le même sens. Cette similitude dans l'évolution indique que ces particules ont en grande partie la même origine.

Dans l'étude des corrélations entre les PM-1 et les PM-10 ; PM-3 et PM-1 et PM-1 avec PM-3 (figures 22, 23 et 24), on constate que les PM-1 sont plus ou moins indépendants des PM-10 (une forte teneur en PM-10 n'induit pas automatiquement une forte teneur en PM-1).

Par contre les PM-1 et les PM-3 sont étroitement liés (meilleure corrélation qui est due probablement à la même origine des particules).

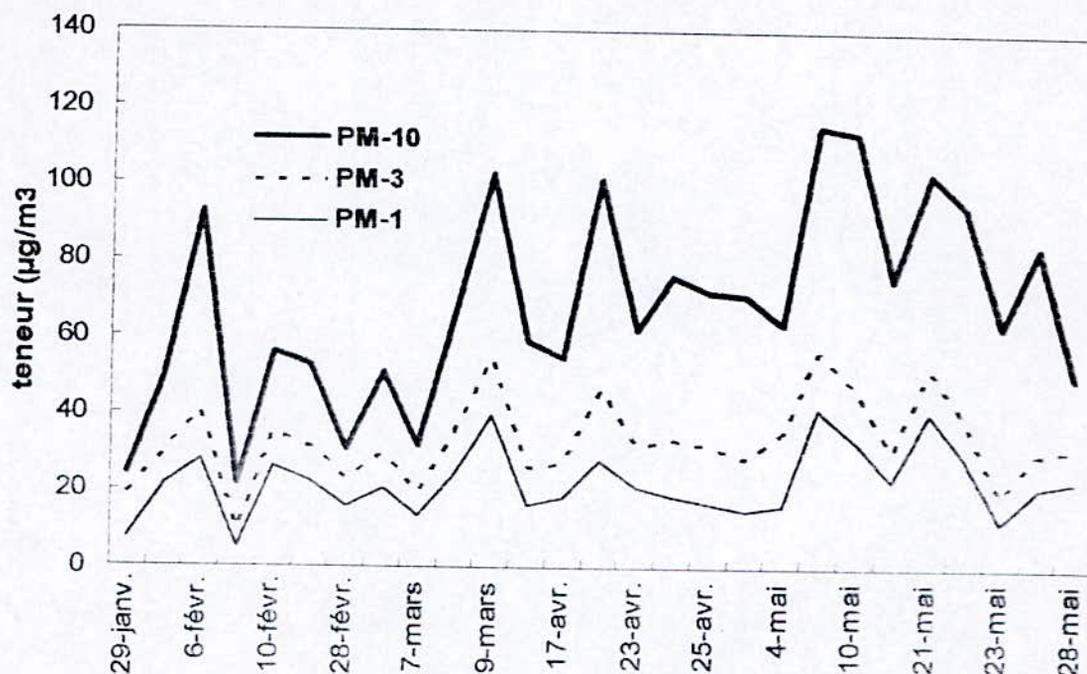


Figure N°21 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10, PM-3 et PM-1.

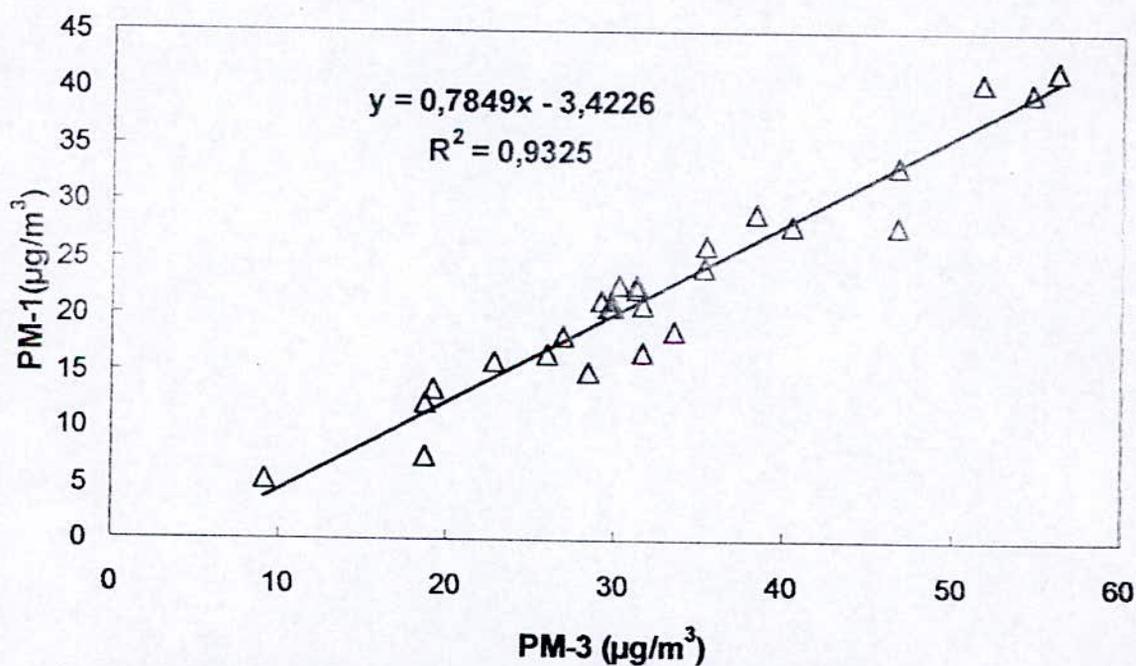


Figure N°22: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et en PM-3.

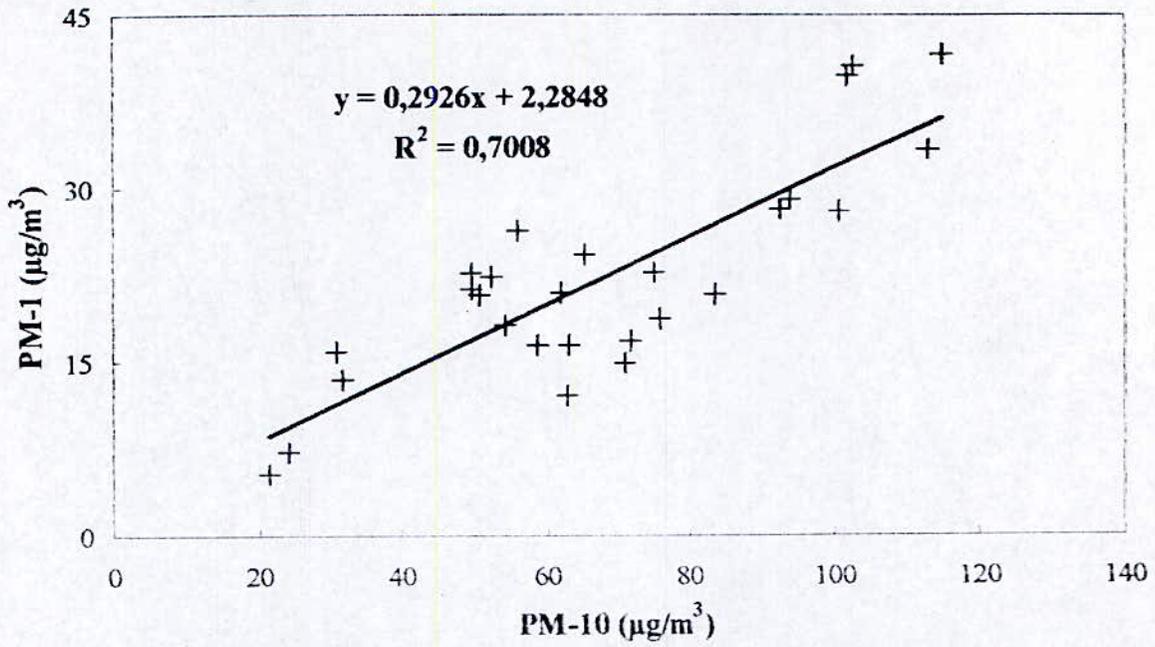


Figure N°23: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et en PM-10.

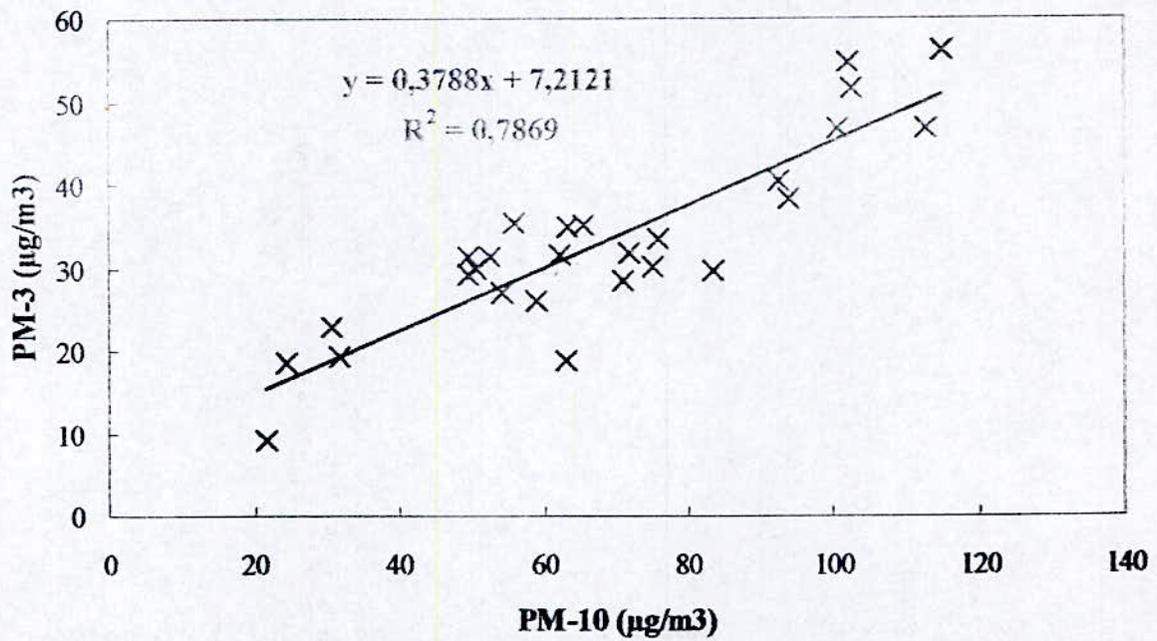


Figure N°24: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3 et en PM-10.

VI-1-3. Ampleur de pollution et étude comparative :

Il est utile de comparer les niveaux observés aux normes et valeurs guides internationaux pour estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurée à Alger.

Les normes américaines relatives aux PM-2.5 qui ont été adoptées en 1977 sont plus complexes et s'énoncent comme suit :

- $15\mu\text{g}/\text{m}^3$  : moyenne sur trois années des moyennes spatiales annuelles (c'est la moyenne des moyennes d'une zone à plusieurs stations de mesure).
- $65\mu\text{g}/\text{m}^3$  : valeur limite journalière [55].

Pour notre cas, on a dépassé plusieurs fois la limite de la moyenne annuelles, et de même pour la moyenne journalière car elle a été toujours supérieure à la valeur minimale mesurée  $15.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La comparaison entre les teneurs en PM-10 et PM-2.5 mesurées à Alger et celles relevées dans certaines villes, montre aussi qu'Alger accuse en site urbain un taux très élevé en particules inhalables (PM-10) et alvéolaires- (PM-2.5).

Les deux tableaux N°18 et 19 représentent respectivement les normes guides des PM-10 et quelques valeurs des PM-10 de certains pays.

Tableau n°18: Normes et valeurs guide régissant les PM-10.

Pays	Valeur limite en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Référence
Etats-Unis	150 maximum journalier (p99 sur 3 ans) 50 moyenne annuelle de teneurs journalières (sur 3 ans)	[53]
Union Européenne -jusqu'à 2005	50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 25 fois par an 30 moyenne annuelle	[54, 55]
-jusqu'à 2010	50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an 20 moyenne annuelle	
Suisse	50 moyenne sur 24 heures 20 moyenne annuelle	[56]
Suède	100 P98 de moyennes sur 24h	[56]
OMS	Pas de normes. Il n'y a pas de seuils admissibles	[ 45 ]

Tableau n°19 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurée dans certaine villes.

Villes	Teneur moy ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Teneur max ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Année	Remarques	Références
Santiago-chile	53	-	1997	Site indus	[58]
Hong-Kong	80	90	2003	Site urbain (PM-10)	[59]
Ispra (Italy)	-	40	2002	Site urbain PM-2,5	[60]
USA	45	-	2001	Site urbain	[61]
Monagrega (Espagne)	17	-	2002	600m d'altitude	[62]
Marketa Domasova (Czechestan)	78	110	2003	Saison d'été et hiver	[63]
Sofia (Bulraria)	54	92	2004	-	[64]
Eger (Hangary)	47	97	2004	-	[65]
Tirgu Mures (Romania)	68	105	2004	Région chaude	[66]
Zilina (Slovakia)	47	67	2004	-	[67]

La comparaison entre les teneurs en PM-10 mesurées à Bab Ezzouar et celles relevées dans certaines villes de plus ou moins grandes envergures présentée en tableau N°19, montre aussi que Bab Ezzouar ( site urbain ) accuse un taux très élevé en PM-10.

Si on prend par exemple le cas de Monagrega (Espagne), on trouve que malgré la similitude de cette ville avec la notre (climat, pluviométrie, ... etc) , les teneurs en PM-10 sont très élevés par rapport les autres.

## **II-2. Etude et ampleur des métaux lourds associés aux particules :**

Les particules fines peuvent véhiculer des métaux lourds présents à l'état de traces qui doivent être surveillés, car toxiques et pénétrants jusqu'aux alvéoles pulmonaires.

L'étude des métaux lourds Pb, Cd, Cu et Mn contenus dans les particules a porté sur une soixantaine d'échantillons pris dans diverses classes granulométriques. Une telle étude par classe granulométrique nous permet d'accéder à l'ampleur de la pollution et à son potentiel toxique qui s'accroît lorsque la granulométrie est la plus faible.

Dans certaines fractions les teneurs mesurées sont inférieures à la limite de détection de méthode analytique utilisée.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures N° 25 à 30 où nous représentons respectivement, l'évolution journalière des différents métaux, les teneurs moyennes, les compositions des classes PM-1, PM-3 et PM-10 et enfin les répartitions des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques.

Le tableau N° 20 résume les teneurs moyennes des métaux lourds dans les différentes classes de particules et les fractions massiques correspondantes.

Tabl. N° 20 Teneurs des métaux lourds mesurées dans les particules et les fractions massiques correspondantes

Classe de particules	Teneurs moyennes en métaux lourds et fractions massiques correspondantes en %			
	Pb	Cu	Mn	Cd
PM-1	89,7 ng/m <sup>3</sup> 0,64%	25,4 ng/m <sup>3</sup> 0,18 %	14,3 ng/m <sup>3</sup> 0,10	0,32 ng/m <sup>3</sup> 0,007
PM-3	144,6 ng/m <sup>3</sup> 0,55 %	54 ng/m <sup>3</sup> 0,21 %	24,3 ng/m <sup>3</sup> 0,11 %	0,85 ng/m <sup>3</sup> 0,004 %
PM-10	182,8 ng/m <sup>3</sup> 0,26 %	81,8 ng/m <sup>3</sup> 0,12 %	47,7 ng/m <sup>3</sup> 0,07 %	1,17 ng/m <sup>3</sup> 0,017 %

Les résultats montrent que dans toutes les classes de particules atmosphériques, le plomb constitue, parmi les éléments étudiés, le métal lourd le plus abondant. Avec une teneur moyenne de l'ordre de  $0,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et un maximum de  $0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , il représente en moyenne environ 0,26% de la masse des particules des PM-10. Le cuivre, dans son abondance, suit le plomb. Les teneurs en plomb mesurées en ce site urbain sont relativement élevées. Elles dépassent dans la moitié des jours mesurés légèrement la nouvelle norme européenne de  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mais restent en deçà de la norme OMS qui est de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [61]. Pour comparaison, signalons que dans l'étude menée en site de proximité (station trafic) à l'ENP, le plomb atteignait en moyenne des teneurs de l'ordre de  $0,3$  à  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondant à une fraction massique de l'ordre de 0,4 % [60]. Par rapport à ce site on constate qu'à Bab-Ezzouar, en site résidentiel peu influencé par le trafic routier, le plomb est réduit de l'ordre de 40 %. On voit ici clairement la diminution de l'impact du trafic routier lorsqu'on s'éloigne des axes routiers.

L'élément le moins abondant est le cadmium dont les teneurs ne dépassent pas en général quelques  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Globalement, à part le plomb, les autres métaux lourds n'atteignent pas des teneurs inquiétantes et sont caractéristiques d'un milieu urbain qui n'est pas exposé à des émissions industrielles.

L'examen des fractions massiques montre que les métaux lourds sont enrichis de manière inégale dans les différentes classes granulométriques (figure N° 29). Le Pb, Cu et Cd sont fortement enrichis dans les particules fines (On retrouve par exemple pour le plomb une fraction massique de 0,64 % dans les PM-1, alors qu'elle n'est que de 0,26 % dans les PM-10). Le manganèse qui est en partie issue de l'écorce terrestre, est répartie de manière sensiblement égale sur la fraction trachéobronchique (3 à  $10 \mu\text{m}$ ) et la fraction respirable (moins de  $3 \mu\text{m}$ ).

Il est par ailleurs intéressant de noter que les métaux lourds se distribuent différemment sur les différentes fractions granulométriques qui constituent les PM-10. Par rapport au PM-10, on note que 49% du plomb se trouve dans la fraction très fine des particules, les PM-1 et 79 % dans la fraction respirable.

Les métaux Cd et Cu sont aussi majoritairement distribués sur la fraction respirable. Le manganèse qui provient généralement de l'érosion du sol se caractérise par une granulométrie plus élevée que celle du Pb et du Cu. On constate en effet que seul 30% du manganèse ont une granulométrie inférieure à  $1\mu\text{m}$  (Fig. N° 30).

Une telle distribution des métaux lourds selon la granulométrie a été observée aussi dans des villes européennes et américaines [62, 63].

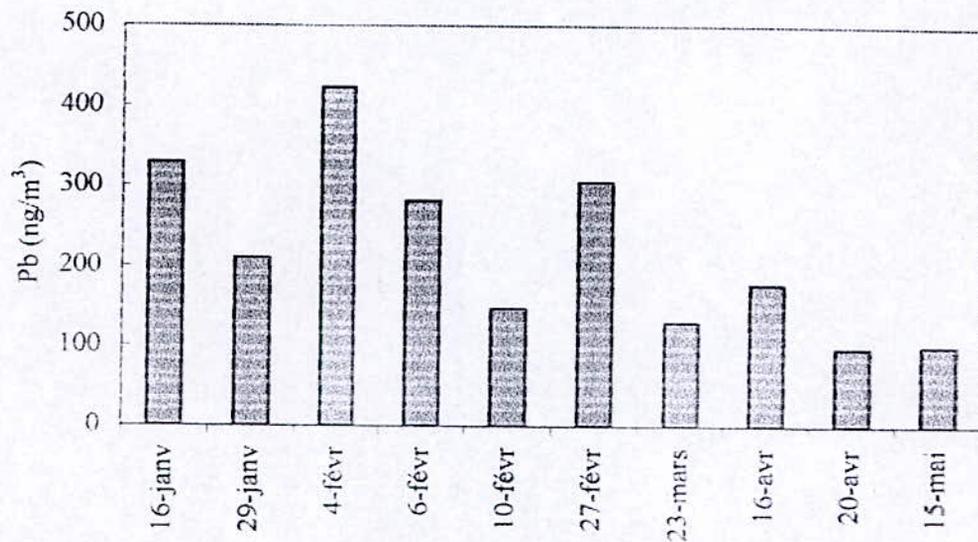


Fig. 25 - Evolution journalière des teneurs atmosphériques en Plomb dans les PM-10.

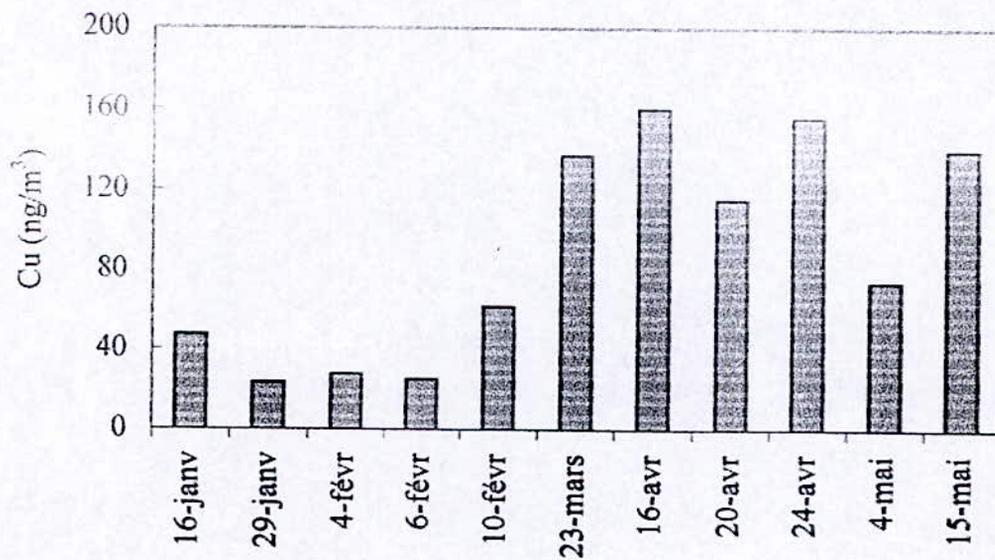


Fig. 26 - Evolution journalière des teneurs atmosphériques en Cuivre dans les PM-10.

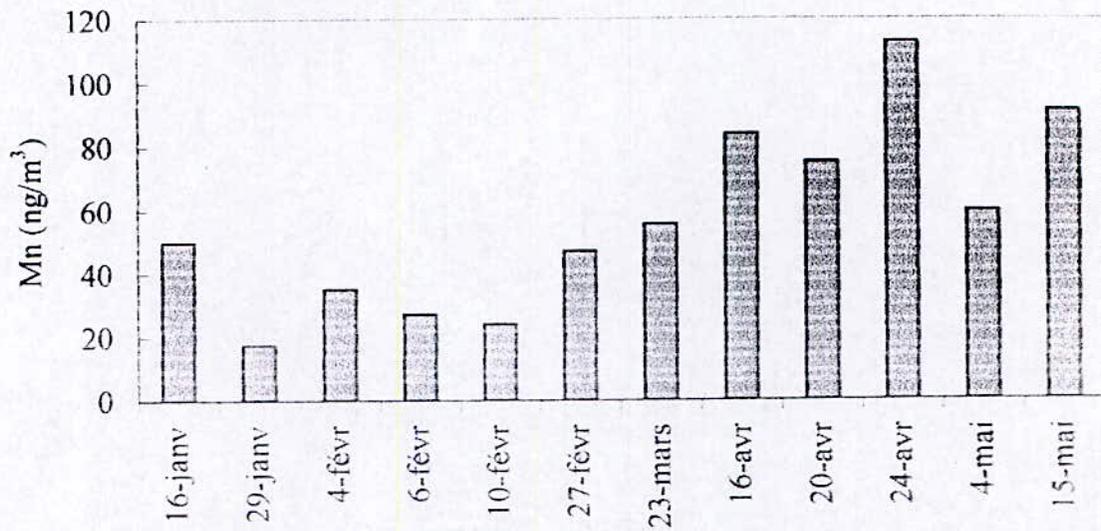


Fig. 27 - Evolution journalière des teneurs atmosphériques en Manganèse dans les PM-10.

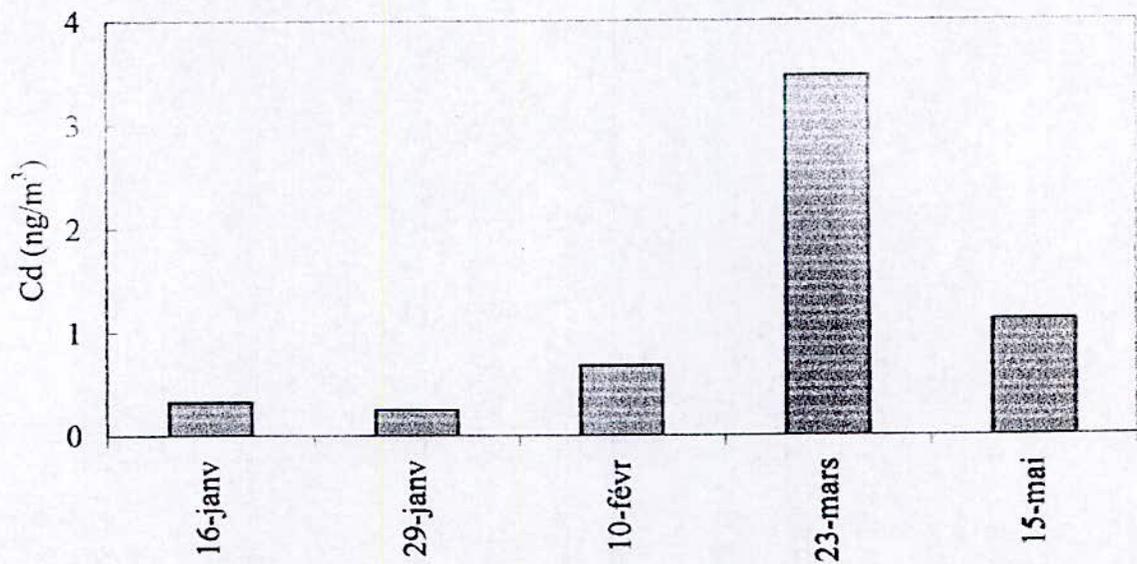


Fig. 28 - Evolution journalière des teneurs atmosphériques en Cadmium dans les PM-10.

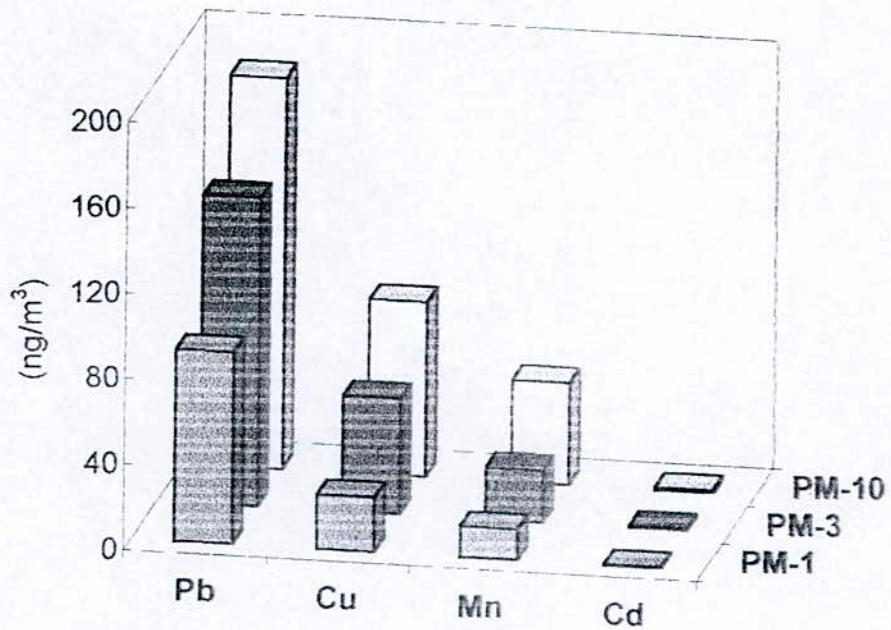


Fig. 28 - Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-1, les PM-3 et les PM-10.

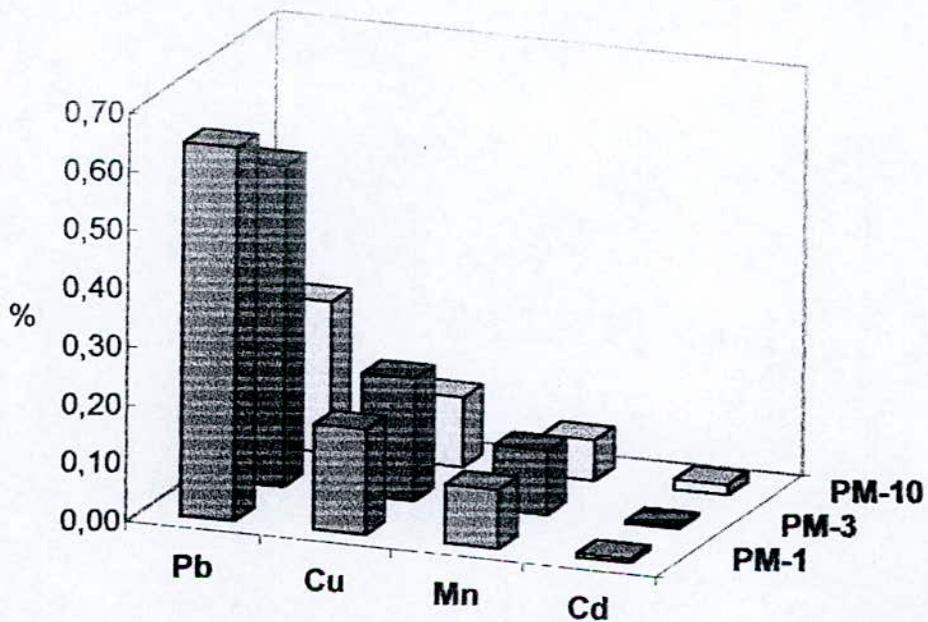
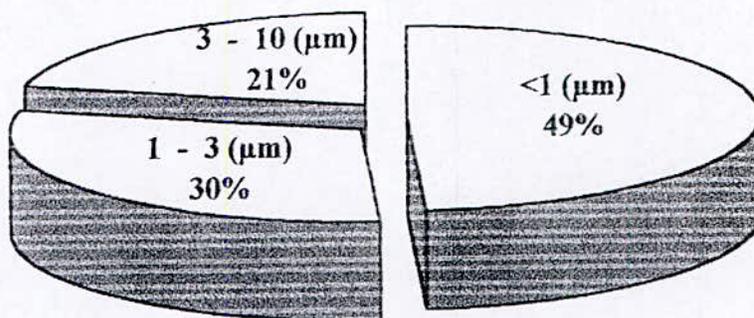
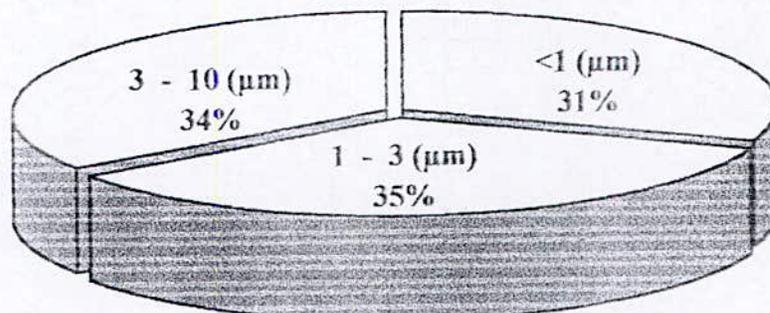


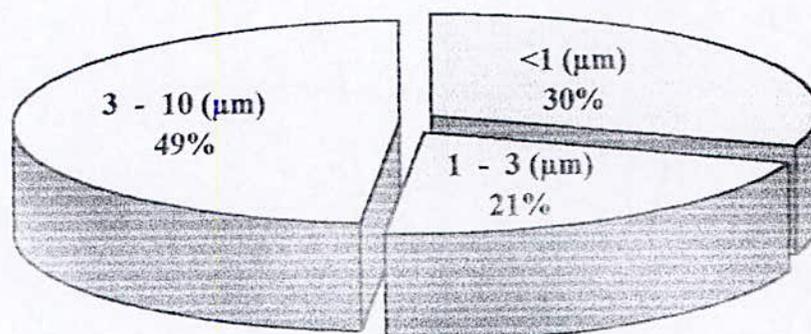
Fig. 29 - Fractions massiques des métaux lourds dans les PM-1, PM-3 et PM-10.



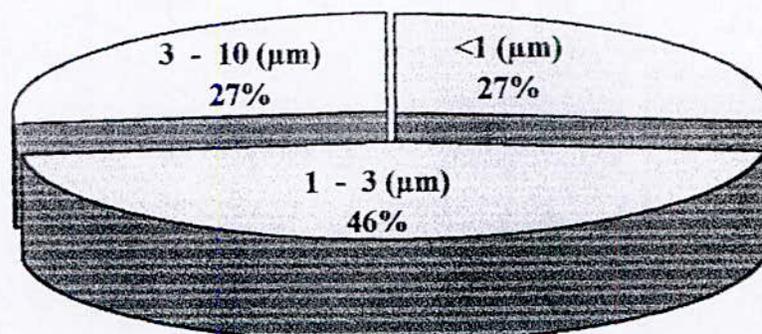
Plomb



Cuivre



Manganèse



Cadmium

Fig. 30 - Distribution des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques.

## VII- CONCLUSION:

L'étude que nous avons menée a permis d'évaluer les niveaux de pollution de l'air atteints par les différentes classes granulométriques des particules fines. Les résultats montrent qu'en site urbain résidentiel à forte densité de population, les teneurs atmosphériques en PM-10, PM-2,5 et PM-1, qui en moyenne s'élèvent respectivement à 67,8 , 31,3 et 21,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sont excessives et dépassent largement les normes en vigueur dans certains pays. Ces particules sont d'autant plus nocives qu'environ 50% des PM-10 sont des particules respirables qui se déposent dans les alvéoles pulmonaires. Le taux de pollution des PM-10 est sensiblement plus faible que celui mesuré en site de proximité à Alger et est du même ordre de grandeur que celui relevé par les stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air de SAMASAFIA.

L'étude des métaux lourds Pb, Cu, Mn et Cd qui sont véhiculés par les différentes fractions granulométriques des particules étudiées montre que parmi ces métaux, le plomb est l'élément le plus abondant. Avec des teneurs moyennes de 0,18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , il n'accuse pas des teneurs très excessives. Toutefois, comparée à d'autres pays, ou une réglementation stricte a été appliquée, cette pollution par le plomb reste élevée.

La distribution granulométrique des métaux lourds montre que les métaux lourds les plus toxiques, comme le Pb et le Cd, se retrouvent le plus dans la fraction respirable ( $< 3\mu\text{m}$ ) et sont très enrichis dans la fraction très fine des particules, les PM-1. Les métaux lourds ont ainsi une très faible granulométrie ; ils pénètrent profondément dans le système respiratoire et leur pouvoir toxique est ainsi plus accentué.

Les particules recueillies sur les filtres de prélèvement étant noires, on peut associer ces émissions surtout aux activités de combustion et à la resuspension des particules routières.

L'ampleur de cette pollution résulte donc sans doute de la mauvaise combustion d'un parc automobile qui se diésélise de plus en plus, qui est âgé, mal entretenu, dépourvu quasi totalement de pots catalytiques et roulant dans sa presque totalité à l'essence plombée. Il est aussi probable que l'aéroport qui n'est pas très éloigné du site de mesure y contribue aussi un peu.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Chiron M., P. Quenel et D. Zmirou : La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique. Pollution atmosphérique, Janvier-mars, pp 41-52, 1997.
- [2]: Janssen N. A. H., D. F. M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek: Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations. Atmospheric Environment, Vol. 31, N°8, pp 1185-1193, 1997.
- [3]: Schroeder W. H. et al. : Toxic trace elements associated with airborne particulate matter, a review. JAPAC, 37, 11, pp 1267-1285, 1987.
- [4]: Dockery D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, M.E. Ware, B.G. Fay, Jr. Ferris and F.E. Speizer (1993): An association between air pollution and mortality in six US cities. N. Eng. J. Med., 329, pp 1753-1759.
- [5]: Pope C.A., M.J. Thun, M. Namboodira, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.W. Speizer and Jr.C.w. Heath: Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S adults. Am. J. Respir. Crit. Care Med., vol. 151, N°3, pp 669-674, 1995.
- [6]: Bulter J. D., Air pollution Chemistry, Academic Press, London, 1979.
- [7]: Kerbachi R., M. Boughdaoui, 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.
- [8]: Kerbachi R., M. Keddou, M. Boughdaoui, et R. Journard : Aromatic hydrocarbons in the ambient air of Algiers. Proc. Int. Symp. " Transport and Air Pollution ", Graz, Austria, 31. May-2 June 1999.
- [9]: Kerbachi R., Boughdaoui M., Y. Kerchich et Journard R., Evaluation de la pollution, 5-7 Juin 2000, Avignon (France).
- [10]: Chovin.P, Rousel.A, Physicochimie et physiopathologie de polluants atmosphériques, Masson, Paris, 1973.
- [11]: OFEFP, Cahier de l'environnement « Particule en suspension mesures et évaluations des effets sur la santé », Berne, 1996.
- [12]: Renoux.A, « Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique » Poll atmo, Janvier-Mars, pp10-16, 1990.
- [13]: Boughdaoui.M, Kerbachi.R, « la pollution particulaire à Rais Hamidou, ampleur et dispersion » Ajour, volume10,sérieD, N°1,pp149-168,1994.

- [14] : Stern.A, Fundamentals of air pollution, 2<sup>ème</sup> édition, Academic Press, London, 1984.
- [15]: Kerbachi.R, Cours de pollution atmosphérique 5<sup>ème</sup> année, ENP, Alger, 2005.
- [16]: Detrie.J.P, La pollution atmosphérique, Dunod, Paris, 1990.
- [17] : Barnea.M, Ursu.P, pollution et protection de l'atmosphère, Eyrolles, Paris, 1974.
- [18] : Ramade.F, Eléments d'écologie, action de l'homme sur la biosphère, Mc Grawtill, Paris, 1982.
- [19] : Dang.C, Fontelle.T.P, Leygonie R, Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission, pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp38-46, 1990.
- [20] : Nessah.S, « Contribution à l'étude des TSP dans le grand Alger » :PFE, ENP, Alger, 1995.
- [21] : Brunner.P.H, « Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères ». Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, pp 301-308, 1988.
- [22] : Dogubert.P , « Pollution atmosphérique, origine et réduction de émissions au niveau du moteurs », Techniques de l'ingénieur, pp01-16, 1994.
- [23] : Leygonie.R, « Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures, effets ».Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre, pp63-74, 1993.
- [24] : Chirou.M, Quenel.P, Zmirou.D, « La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique ». Pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp41-52, 1997.
- [25] : <http://www.EPA.org>, « Questions et réponses sur la pollution par les particules fines ».
- [26]: Arthur.C, Stern, " Air pollution, air pollutants, their transformation and transport", Academic Press, Newyork,1976.
- [27]: Renoux.A, Borland.D, Le aérosols: physique et méthodologie, Technique et Documentation, Paris, 1998.
- [28] : Hinds.W.C, Aerosol technology, Wiley Interscience, London,1982.
- [29]: Zanneti.P, Air pollution modelling theories, computational methods and available software, computational mechanics publication, 1990.

- [30]: Masclet.P, Cachier.H, «L'aérosol atmosphérique », Analysis magazine , N°9, pp11-17, 1998.
- [31] : Colls.J, « Air pollution, an introduction », E et Fn spon, London, 1997.
- [32] : PNR 41, communiqué de presse : Les sources de poussière fines à la trace, Suisse,1998.
- [33] : Bicocchi.S, Les polluants et le techniques d'épuration des fumés, Lavoisier et Technique et documentation, Paris, 1998.
- [34] : Ronneau.J.C, « Les particules atmosphériques », Conférence donnée à l'ENP, Alger,1992.
- [35] : Reult. J.Y, « Pollution particulaire de l'air », Chaud froid plomberie (CFP), N°464 , pp155-163.
- [36] : Petit courieux.F, Person.A, Le moulléc.Y, « Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et défficultés météorologiques », Pollution atmosphérique, Janvier-Mars , pp21-30,1990.
- [37] : Ministère de l'aménagement de territoire et de l'environnement, « Inventaire des émissions de particules primaires », Centre interprofessionnel Technique d'études de la pollution atmosphérique, Paris, 2001.
- [38] : Brochard.D, Pairon.J.C, Bignon.J, « Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées », Pollution atmosphérique, Avril-Juin, pp178-182, 1999.
- [39] : Madelaine.G, « Métrologie des aérosols », Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, pp270-274, 1998.
- [40] : Dockery.D.W, Schwartz.J, Spengler.J.D, « Air pollution and daily mortality : Associations with particulates and acid aerosols », Environ Res59, pp362-373, 1992.
- [41]: Pop et Al, "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective of US-adlts", Respir crit care, pp669-674, 1995.
- [42]: Schwartz et Al, "Total suspended particulate matter and daily mortality in
- [43] : OMS, "Update and revision of air quality guidellins for Europe", WHO regional publications, European , Serian, Copenhagen, 1997.
- [44]: Dockery. D.W, Pope.C.A, Xiping.X, Spengler.J, ware.J, Fay.M, Feres.B et Speizer .F, "An association between pollution and mortality in six U.S. Cities", PP 107- 132, 1993.

- [45] Ackermann.U, Liebrich, Leuenberger, Schwartz.J, Perruchoud.AP, Braidli, Schindler et Spaldia-Team, "Effects of long term exposure to air pollution on lung functions", Spaldia study Am J Respir Crit Care Med, 1994.
- [46]: Zemp.E, Perrouchoud.AP, Elasser.S, Medici.TC, Douminighetti.G, Ackermann.U, Liebrich, Tchopp.JM et Spaldia –Team, "Long term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms", Spaldia study Am J Respir Crit Care Med, 1994.
- [47]: Braun. C, Fahlander, Grassner.M, Grize.L, Neuvaronier. C, Vuille.JC, Withrich.B, "respiratory health and long term exposure to air pollutants in suisse school children", Am J Respir Crit Care Med, 1997.
- [48]: Dockery. DW, Speizer.FE, Stram.DO, Ware.JJH, Spengler.JD, Ferris. BG Jr, "Effects of inhalable particles on respiratory health of children", Am. Rev. Respir Dis, 1989.
- [49]: Société française de santé publique, « La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique », collection santé et société n° 4, Paris, 1996.
- [50]: Martin.J et Mayster.L.Y, « Santé et pollution de l'air », Presse Polytechniques Romandes, Suisse, 1998.
- [51]: Sisler.J.F , "The relative importance of soluble aerosols to spacial and reasonal trends of impaired visibility in the United States", Atm.Env, PP 851-862, 1994.
- [52]: Deletraz.G.SET, Paul .Lama.E, "Etat de l'air pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes », Contrat ADEME, Mars, 1998.
- [53]: Shaw .W, « La pollution par les particules atmosphériques pour la science », Octobre, PP 22-31, 1987.

- [54]: Madelain.G, « Métrologie des aérosols », pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, PP 270-274.
- [55]: Schröder .W, Dobson .M, Kane.D.M et Johnson.N.D, «Toxic trace elements associated with airborne particulate matter», A.Review.J.Air Poll.Control Ass (JAPCA), PP 1267, 1987.
- [56]: Ikawa.K.O, "Trace analysis atmospheric", John Wiley et Sons, London, 1997.
- [57]: Techniques de l'ingénieur, "Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X ».
- [58]: Norme ISO 9855, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectés sur des filtres », France, 1993.
- [59]: Y.Kerchich, « Etude de la pollution de l'air par les particules fines (Les PM-10 ) et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger »,Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique , 2003 .
- [60]: WHO, Updating and revision of the air quality guideline of atmosphère classical" où polluants , EUR.
- [61]: ICP:EHAZ 94 05/ PBOI, Regional Office of Europe , Wold Heath Organisation, Copen Hagen 1995 .