

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
LABORATOIRE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT**



**PROJET DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE DE
L'ENVIRONNEMENT**

**POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES
FINES EN MILIEU URBAIN A ALGER**

Présenté par : Mr. Mencef ALLOUCHE

**Présidente : Dr J.ARRAR, Maitre de conférence, ENP
Directeur : Mr. R. KERBACHI, Professeur, ENP
Examineurs : Dr H.GRIB, Chargé de cours, ENP
Mr Y.KERCHICHE, Chargé de cours, U.Médéa**

PROMOTION 2009

**Année Universitaire 2008 - 2009
Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger.
Tel: 021 52 14 94 Fax: 021 52 29 73**

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

Toute ma famille

Tous mes amis

Tous mes collègues de travail et d'études

Tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail

Ce travail a été réalisé au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique; département du Génie de l'Environnement.

Tout d'abord je voudrai remercier Mr DRIF Seif de m'avoir soutenu et aidé pendant toute la période de notre projet d'étude.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé à améliorer au mieux mon travail et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à son aboutissement final, nous citons parmi eux :

- **Le Professeur KERBACHI Rabah pour ces précieux conseils, sa disponibilité et son aimable aide.**
- **Mlle. BELHOUTE Dalila de m'avoir encadré depuis le début de ce projet.**
- **Mlle. ARRAR Jazia, Chargée de cours à l'ENP pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.**
- **Mr. KERCHICHE Yacine et Mr. GHERIB Hocine d'avoir pris le temps de bien étudier et examiner mon mémoire.**

Merci à ma maman qui a contribué à ce travail à part égale avec moi.

MERCI à ma famille sans qui je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui et qui a toujours cru en moi (surtout mes grands parents ellah yerhamhoum).

Bien sûr, MERCI à tous mes collègues et amis du laboratoire qui m'ont soutenu dans la vie de tous les jours et Dieu sait que ce n'est pas toujours évident de me supporter.

Enfin un GRAND MERCI à mes amis qui m'ont soutenu et poussé vers l'avant, plus particulièrement ABDELLAH, RACHID, LAMINE, HILLAL, OUAHAB, AMAR et MEZIANE ...Quelle que soit la direction dans laquelle le vent me porte, une partie de vous restera toujours avec moi.

SOMMAIRE :

<u>INTRODUCTION GENERALE.....</u>	<u>1</u>
<u>I - Généralités sur la pollution par les particules</u>	<u>4</u>
I.1 - Définitions	4
I.2 - SOURCES DES PARTICULES FINES	7
I.2.1 Particules de sources naturelles	7
I.2.2 Les sources artificielles.....	9
<u>II - Propriétés des particules fines</u>	<u>16</u>
II.1 - Propriétés physiques	16
II.1.1 Forme des particules :	16
II.1.2 Structure des particules :	18
II.2 - Composition chimique	19
II.3 - Formation des particules	21
II.4 - Influence des facteurs météorologiques sur la diffusion des particules	22
<u>III - Effets des particules fines sur la santé et sur l'environnement.....</u>	<u>26</u>
III.1 - Généralités	26
III.2 - Répercussion sur la santé humaine	26
III.2.1 Cheminement des particules dans le système respiratoire :	27
III.2.2 Effets à court et long terme des aérosols particulaires :	29
III.2.3 - Effets toxiques de certains métaux lourds supportés par les PM-10	30
III.3 - Effets sur la faune	32
III.4 - Effets sur la flore.....	33
III.5 - Effets des particules solides sur les matériaux.....	33
III.6 - Effets sur le climat	34
<u>IV - Méthodes d'analyse et de mesure des particules fines</u>	<u>36</u>
IV.1 - La pollution particulaire atmosphérique en milieu urbain.....	36
IV.2 - Mesure des particules dans les réseaux de surveillance	37
IV.3 - L'échantillonnage des particules	38
IV.3.1 - Les prélèvements sans coupure granulométrique précise.....	38
IV.3.2 - Les prélèvements avec coupure granulométrique.....	39

IV.3.3 - Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	42
IV.4 - La mesure de la concentration massique particulaire en réseau	42
IV.4.1 La méthode gravimétrique (échantillonneur à grand débit).....	42
IV.4.2 La réflectométrie (indice de Fumées Noires).....	43
IV.4.3 La radiométrie (jauge bêta)	43
IV.4.4 La microbalance à variation de fréquence (TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance).....	43
IV.4.5 La mesure optique.....	44
IV.5 - Problème du choix de site de prélèvement	44
IV.6 - Les filtres et membranes de rétention	45
IV.7 - Analyse physique des particules	46
IV.7.1 Détermination de la masse des particules	46
IV.7.2 Détermination de la forme des particules	47
IV.7.3 Détermination du nombre de particules	47
IV.8 - Méthode d'analyse chimique	48
IV.8.1 Analyse de la matière organique.....	48
IV.8.2 Analyse des éléments inorganiques et des métaux	49
IV.8.3 Analyse des ions.....	50
<u>V- METHODOLOGIE.....</u>	<u>51</u>
IV.2 - Technique d'échantillonnage.....	53
V.3 - Minéralisation des échantillons et analyse des métaux lourds.....	57
<u>VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</u>	<u>58</u>
VI.1 - Etude de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines	58
VI.1.1 - Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 :	58
VI.1.2 - Etude de la répartition granulométrique des particules fines :	60
VI.1.3 - Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes de particules....	63
VI.2 - Ampleur de la pollution de l'air et étude comparative	66
VI.3 - Etude des métaux lourds associés aux particules fines.....	70
VI.3.1 - Niveau de pollution de l'air par les métaux lourds.....	70
VI.3.2 Comparaison inter-sites du niveau de pollution par les métaux lourds	76
V.3.3 - Corrélation entre les différents couples de métaux lourds et entre métaux et PM-i	77
<u>CONCLUSION.....</u>	<u>80</u>

Liste des tableaux :

Tableau N°I.1 : Termes importants concernant les particules en suspension (selon ISO 7708, 1995).....	6
Tableau N°I.2 : Taille, origine, composition et source des particules	7
Tableau N°I.3 : Production des particules d'origine naturelle	9
Tableau N°I.4 : Taux d'émission des particules d'origine anthropiques.....	10
Tableau N°I.5 : Taux d'émission des particules anthropiques	13
Tableau N°II.1 : Les principales formes de particules	17
Tableau N°II.2 : Forme des particules et leur pourcentage	17
Tableau N°III.1 : Résumé selon l'OMS des effets sur la santé, causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2.5.....	29
Tableau N°III.2 : Résultats d'études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM- 2.5.....	29
Tableau N°VI.1 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-10.....	58
Tableau N°VI.2 : Valeurs moyennes et extrêmes des différentes classes granulométriques .	61
Tableau N°VI.3 : Normes et recommandation pour les PM-10	67
Tableau N°VI.4 : Normes et recommandation pour les PM 2,5.....	67
Tableau N°VI.5 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurées dans certains pays et villes du monde	69
Tableau N°VI.6 : comparaison des teneurs en PM-i mesurées en différentes sites à Alger...	70
Tableau N°VI.7 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques correspondantes en métaux lourds	73
Tableau N°VI.8 : Comparaison inter-sites des teneurs des métaux lourds suivant la classe des PM-i.....	76

Liste des figures :

Figure N°II.1 : Constitution type d'une particule fine.....	18
Figure N°II.2 : Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources	19
Figure N°II.3 : Composition des particules suivant leur diamètre	20
Figure N°II.4 : Différents processus de formations des particules	22
Figure N°III.1 : Déposition des poussières fines dans le tractus respiratoire humain	28
Figure N°IV.1 : Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement	39
Figure N°IV.2 : Tête de prélèvement NF X 43-021	40
Figure N°IV.3 : Tête de prélèvement PM-10.....	41
Figure N°IV.4 : Tête de prélèvement PM-2.5.....	42
Figure N°IV.5 : Formes de particule.....	47
Figure N°V.1 : localisation du site de prélèvement.....	51
Figure N°V.2 : Vue sur le coté ouest de l'APC.....	52
Figure N°V.3 : Vue sur le coté sud de l'APC	52
Figure N°V.4 : Schéma du principe de collecte des PM – i par l'échantillonneur HVS PM-10.	53
Figure V.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade	55
Figure N°V.6 : Photos de l'appareil d'échantillonnage	56
Figure N°7 : Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.....	57
Figure N°8 : Photo d'un grand filtre après prélèvement	57
Figure N°VI.1 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10	59
Figure N°VI.2 : Evolution temporelle des teneurs journalières des PM-i	60

Figure N°VI.3 : Contribution massique des particules fines PM-3	62
Figure N°VI.4 : Contribution massique des particules très fines PM-1.....	62
Figure N°VI.5 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-1 .	63
Figure N°VI.6 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-3 .	64
Figure N°VI.7 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-1.....	64
Figure N°VI.8 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-3.....	65
Figure N°VI.9 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM3-10 et en PM-3.....	65
Figure N°VI.10 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM1-10 et en PM-1.....	66
Figure N°VI.11 : Evolution des teneurs atmosphériques du Cuivre	71
Figure N°VI.12 : Evolution des teneurs atmosphériques du Fer	72
Figure N°VI.13 : Evolution des teneurs atmosphériques du Plomb	72
Figure N°VI.14 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10	73
Figure N°V.15 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.....	74
Figure N°VI.16 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-1	74
Figure N°VI.17 : Vision globale sur les teneurs moyennes des métaux lourds présents dans les différentes classes des PM-i.....	75
Figure N°VI.18 : Pourcentages massiques par classe granulométrique, des différents métaux	76
Figure N°VI.19 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle des PM-10	77
Figure N°VI.20 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle du fer dans les PM-10.....	78
Figure N°VI.21 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle du fer dans les PM-3.....	78

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les particules en suspension dans l'air font partie de notre environnement, qu'elles soient d'origine naturelle (érosion des sols, incendie de forêt...) ou liées à l'activité humaine (depuis l'époque du feu jusqu'à nos jours). Déjà, au 12ème siècle, les fumées produites par la combustion du charbon et du bois étaient devenues insupportables dans la ville de Londres et Edward II ordonna de punir de torture la personne prise en train de souiller l'air avec des fumées de charbon [1]. Aujourd'hui, on est loin des niveaux de concentration de l'épisode de pollution qui a fait 4 000 morts à Londres en 1952 [2].

Londres était alors en pleine révolution industrielle, la combustion effrénée de charbon avait créé beaucoup de pollution et la ville était fréquemment envahie par le smog, un mélange de fumée de charbon (smoke) et de brouillard (fog). L'augmentation de la mortalité a surtout été observée chez les personnes de plus de 45 ans. Les nombres de décès pour bronchite et pneumonie ont été, respectivement, huit et trois fois plus fréquents au cours de l'épisode. A l'époque, les niveaux moyens de particules en suspension mesurés à Londres étaient de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et au moment de l'épisode du -Big Smoke- les concentrations ont atteint les 3 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [3]. Aujourd'hui, à Londres comme dans la plupart des grandes agglomérations dans les pays développés, les moyennes annuelles sont de l'ordre d'une dizaine de microgramme par mètre cube. Cet épisode, très souvent cité lorsqu'on évoque les effets de la pollution atmosphérique sur la santé rappelle, à celui qui l'aurait oublié, que la pollution atmosphérique peut tuer.

L'atmosphère est composée de gaz mais également de particules en suspension dans l'air, présentes sous forme liquide ou solide. Elles sont classées selon un critère de taille ou de composition chimique qui conditionne bien souvent l'intensité de leur impact sanitaire [4].

La pollution de l'air est liée directement aux effets néfastes qu'elle engendre. Sa perception évolue en fonction des progrès réalisés en recherche physico-chimique mais surtout en toxicologie et épidémiologie.

La notion de pollution atmosphérique a connu de profondes mutations, elle évolue et change d'échelle ; elle intègre des phénomènes complexes et interdépendants allant de l'échelle globale à l'échelle locale, du changement climatique planétaire aux modifications dans la biodiversité.

Les enjeux de la pollution atmosphérique sont devenus tels que les pouvoirs publics au plus haut niveau, les chercheurs et la société civile en font une de leurs principales préoccupations [5]. Des conventions internationales de réduction de la pollution et une réglementation de plus en plus sévère et restrictive sont le résultat de ces préoccupations.

Malgré toutes les mesures prises, la consommation croissante de ressources naturelles et surtout énergétiques a fait que la qualité de l'air ne cesse de se dégrader, et ce en particulier dans les pays peu développés.

Introduction

Les particules présentes dans l'air ambiant sont constituées d'une part de particules «primaires», c'est-à-dire de particules directement émises par des sources naturelles (volcanisme, embruns et aérosols marins, érosion éolienne, combustion naturelle de biomasse et feux de forêts, etc.) ou anthropiques (combustions, etc.), et d'autre part de particules dites «secondaires», c'est-à-dire de particules formées dans l'air par des processus chimiques complexes, à partir notamment de précurseurs gazeux tels que les oxydes de soufre et d'azote, l'ammoniac, et les composés organiques présents dans l'air.

En plus des composés gazeux, (SO_2 , NO_x , O_3 , etc...), la pollution de l'air véhicule donc des aérosols de particules, c'est à dire des particules plus au moins fines qui séjournent dans l'atmosphère assez longtemps et qui, sous l'effet des phénomènes météorologiques, se dispersent, se déposent ou se condensent.

Les aérosols de particules sont des constituants majeurs de l'atmosphère. Ils sont très diversifiés dans leurs formes, leur composition et dans leurs sources émettrices [6].

C'est ainsi que les particules macroscopiques et sub-microscopiques trouvent leurs origines dans les processus industriels, dans la combustion du fuel, gaz d'échappements automobile [7], travaux de construction, volcans, les feux de forêts, embruns marins...etc. ainsi que les conversions photochimiques des gaz en particules (principalement les nitrates et les sulfates) [8,9]. L'analyse de ces particules montre la présence d'une fraction minérale (métaux lourds,...), une fraction organique (HAP et autres composés organiques lourds) et une fraction carbonée (suies) issue des processus de combustion.

Parmi les particules en suspension dans l'air, c'est surtout la fraction fine (diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$) qui a le plus d'impact sur la santé humaine. Plusieurs travaux effectués ces dernières années ont montré que les plus fines particules sont les plus incriminées [10,11]. Des études très minutieuses ont corrélé la toxicité des particules fines à leurs tailles et à leurs compositions en métaux lourds [12]. D'autres études épidémiologiques ont pu constater la parfaite relation de l'exposition à la pollution par les particules fines à l'apparition de diverses maladies respiratoires [13].

Il est clair de nos jours que les particules fines ont une relation avec la présence des métaux toxiques dans l'air et affectent ainsi la santé humaine, particulièrement en milieu urbain et à proximité des zones industrielles [14].

On relève d'autre part que plus ces particules diminuent en granulométrie, plus leur pouvoir toxique augmente. C'est ainsi que les PM-1 (particules très fines de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$) sont plus nuisibles que les PM-2,5 qui elles le sont plus que les PM-10.

C'est incontestablement en milieu urbain que la pollution par les particules pose le plus de problèmes. En effet, dans les villes, on observe une forte exposition de la population aux aérocontaminants particuliers qui proviennent en majeure partie des activités du trafic routier.

Les véhicules diesel et, à un degré moindre, les véhicules à essence émettent des taux élevés de particules fines qui finissent par se déposer dans le système respiratoire des personnes exposées [9].

Toutes ces données font que l'étude des aérosols particuliers constitue, dans un grand nombre de pays, un volet important dans l'identification et l'estimation globale de la pollution de l'air.

Introduction

En Algérie, la croissance du parc automobile induite par le développement socio-économique et la forte urbanisation ont conduit à l'émergence chez la population citadine de maladies chroniques liées à la dégradation de la qualité de l'air.

Des études récentes ont montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique [12, 13 et 14]. La principale source d'émission est le trafic routier. Pour arriver à formuler une stratégie de prévention, il est toutefois nécessaire d'avoir des données sur les niveaux et types de pollution ainsi que les composés qu'elle véhicule.

Aussi et en continuité des travaux antérieurs effectués sur les particules inhalables [15], nous avons étudié la pollution de l'air par les aérosols particuliers par classe granulométrique et évalué les niveaux de pollution par les PM-10, PM-3 et PM-1 atteints à Alger en site urbain où l'exposition des populations est maximale. Certains métaux lourds associés à ces particules et leur contribution à la pollution globale ont été également étudiés.

CHAPITRE I

I - Généralités sur la pollution par les particules

I.1 - Définitions

Les aérosols particuliers se caractérisent par la suspension dans l'air de fines particules solides ou liquides, dont la dimension est de l'ordre de 10 μm au plus dans l'air au repos, et de quelques centaines de microns dans l'air en mouvement (tempête, orages, ...) [16].

L'aérosol de pollution se définit par sa nature chimique, sa forme, sa densité, sa granulométrie et sa concentration en nombre (particules par m^3 d'air) ou en poids (milligrammes ou microgrammes par m^3) [16].

La taille des particules est déterminante quant aux effets sur la santé car leur cheminement dans l'appareil respiratoire dépend de leur granulométrie [7,17,18,19].

Dans la littérature, et pour traduire la grande diversité des particules dans leur origine, leur composition et leur comportement aérodynamique, on utilise différents termes pour qualifier la pollution particulaire. Les termes les plus employés sont [20 et 21] :

❖ **Les aérosols** : L'atmosphère contient de toutes petites particules solides ou liquides en suspension, appelées aérosols. Leur taille varie de quelques nanomètres à presque 100 microns soit l'épaisseur d'un cheveu.

En moyenne globale, plusieurs millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque jour par une multiplicité de sources à la fois naturelles et humaines, ce qui induit une très grande diversité de leurs propriétés. Dans la stratosphère, les aérosols sont rares mais ils peuvent résider plusieurs années. Dans la basse troposphère, où ils sont en général beaucoup plus abondants, les aérosols séjournent quelques jours seulement, cette durée variant essentiellement selon les précipitations. Il en résulte que, contrairement aux gaz à effet de serre, la concentration des aérosols peut varier de plusieurs ordres de grandeur à des échelles régionales ou journalières.

❖ **Les fumées noires** : ce sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5 μm ;

❖ **Les suies** : Les particules de suie sont en majorité composées de carbone (environ 90%). On peut y trouver de l'hydrogène (environ 10%), de l'oxygène et de l'azote dans des proportions plus faibles. Les suies sont issues de la combustion incomplète des hydrocarbures et de la condensation d'espèces gazeuses.

La structure interne des suies est proche de celle du graphite excepté aux limites extérieures où les couches d'atomes de carbone suivent la courbure de la surface. A l'intérieur, on trouve des structures ordonnées même s'il existe de nombreux défauts. Par ailleurs, les distances entre les plans réticulaires sont généralement supérieures à celles du graphite.

Leur densité est donc plus faible que celle du graphite (2.25 g/cm^3) et comprise entre 1.8 et 2 g/cm^3 ; (Haynes, 1981)

❖ **Les poussières** : sont faites de particules solides inférieures à 75 μm , les plus grosses retombent près de la source d'émission ;

❖ **Les brumes** : sont des ensembles de gouttelettes dans un gaz. Les particules dans les brumes ont des dimensions supérieures à 1 μm . c'est le cas par exemple des brumes marines qui contiennent des particules de sels ;

Chapitre I - Généralités

❖ **Les cendres volantes** : les cendres désignent les résidus solides subsistants après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes ;

❖ **Les particules** : ce terme englobe l'ensemble des définitions précédentes, indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles. Cette diversité dans le type de particules étudiées a fait qu'il était difficile de comparer les niveaux de pollution mesurés d'une région à une autre et d'un pays à un autre.

Ces dernières années et suite à la standardisation des échantillonneurs de prélèvement et de collecte, aux recommandations des études épidémiologiques et à l'adoption dans plusieurs pays de seuil limites à ne pas dépasser, on assiste à une certaine uniformisation et homogénéisation dans l'étude des particules aéroportées. Les anciennes définitions sont de plus en plus délaissées au profit de nouveaux termes qui portent sur :

- **Les particules totales en suspension (TSP)** : ces particules de diamètre inférieur à 30-40 μm séjournent longtemps dans l'atmosphère et sont en général captées par le segment extra thoracique (elles sont arrêtées au niveau de la bouche et du nez).

- **Les particules inhalables appelées PM-10 (PM = particulates matters)** : de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10 μm , ces particules peuvent pénétrer dans le système respiratoire.

- **Les particules respirables ou alvéolaires, PM-2,5** : c'est la fraction de particules en suspension qui ont une granulométrie inférieure à 2,5 μm . Ces particules pénètrent profondément dans le système respiratoire pour atteindre les alvéoles.

- **Les particules très fines, PM-1** : ces particules se forment par coagulation et agglomération de particules submicroniques. Comme les PM-2,5, les PM-1 atteignent les alvéoles où elles se déposent de manière irréversible.

Nous représentons en tableau N°I.1 quelques termes importants qu'on retrouve dans la littérature sur la pollution par les particules.

Chapitre I - Généralités

Tableau N°I.1 : Termes importants concernant les particules en suspension
(selon ISO 7708, 1995) [22].

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 quantité 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 continuent.
Convention thoracique	Thoracic convention		Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique.
PM-10	PM-10	PM-10	Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique.

I.2 - SOURCES DES PARTICULES FINES

Les particules fines proviennent de certains procédés industriels, des gaz d'échappement des véhicules et du chauffage au bois. Les sources naturelles comme l'érosion éolienne des sols, les feux de forêts, les embruns océaniques et les éruptions volcaniques sont aussi des sources non négligeables. De plus, les particules les plus fines sont surtout des particules secondaires résultant de réactions chimiques de gaz et de particules déjà présentes dans l'atmosphère. L'atteinte de certains objectifs dans l'air ambiant pourrait exiger des programmes de contrôle très variés car les sources sont nombreuses autant naturelles qu'anthropiques.

Le tableau N°I.2 résume l'origine et la composition des particules [23].

Tableau N°I.2 : Taille, origine, composition et source des particules [23].

PARTICULES FINES diamètre : 2,5-10 µm	PARTICULES TRES FINES diamètre : < 2,5 µm
Origine Procédés mécaniques (broyage, meulage). Évaporation d'aérosol. Recirculation de poussières. Combustion incomplète.	Origine Condensation de vapeur et de gaz. Coagulation de très petites particules. Réactions chimiques diverses. Nucléation.
Composition chimique Cristaux de silice, de fer, de sel. Cendres volatiles, Pollens, Fibres. Débris végétaux et animaux.	Composition chimique Sulfates, Nitrates, Ammoniac. Hydrocarbures aromatiques polycycliques. ...
Source Transport, agriculture, mines, construction, démolition, combustion de charbon et huile, biotechnologie, océans.	Source Combustion (industries, transport). Transformation atmosphérique de précurseurs (NO _x , SO ₂). Procédés industriels à très haute température (métallurgie, incinération).

I.2.1 Particules de sources naturelles

Les particules naturelles comprennent les poussières du sol et les particules minérales soulevées par le vent, la poussière volcanique, les embruns salins et les matières biologiques comme le pollen, les spores, les bactéries et les débris provenant des feux de forêt. En général, les sources naturelles produisent des particules grossières mais, sous l'effet de températures très élevées (dans le cas de feux de forêt, par exemple) certaines d'entre elles produisent des particules fines [24].

Les quatre principales sources naturelles sont [25,26]:

A). La source terrigène

L'aérosol terrigène (ou crustal) est généré par l'érosion éolienne des sols. Ces émissions dépendent de la vitesse du vent.

Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques (fer, manganèse) et d'aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus.

B). La source marine

L'aérosol marin est produit par le 'spray océanique'. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosses tailles sont projetées dans l'atmosphère (phénomène de bubbling). Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du SO₂, qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques [26].

C). La source volcanique

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les deux précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du SO₂ gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol se retrouve principalement dans la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte. Les apports troposphériques sont faibles et on ne prendra pas en compte cette source [26].

D). La source biogénique

L'aérosol biogénique provient, d'une part de l'émission directe d'hydrocarbures lourds par les plantes et les arbres et d'autre part de l'oxydation atmosphérique d'hydrocarbures biogéniques plus légers comme l'isoprène. On trouve aussi des cires vasculaires (esters) à haut poids moléculaire. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium [26].

Le tableau N°I.3 présente une estimation des quantités de particules d'origine naturelle.

Tableau N°I.3 : Production des particules d'origine naturelle [27].

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

I.2.2 Les sources artificielles [17]

Les sources artificielles liées à toutes les activités humaines produisent à la fois :

- **des particules fines** issues des processus de combustion et de diverses activités industrielles.
- **des particules grossières** issues des champs agricoles, des routes, des chantiers de construction, ...

Une estimation des quantités émises annuellement est donnée en tableau N°I.4

Les sources artificielles peuvent être classées d'après plusieurs critères selon :

- qu'elles résultent de phénomènes de combustion ou de mécanismes plus spécifiques.
- qu'elles soient ponctuelles ou diffuses.
- qu'elles soient fixes ou mobiles.

De ce dernier classement, on présente alors les sources anthropiques d'émission de particules comme suit :

Tableau N°I.4 : Taux d'émission des particules d'origine anthropiques [28].

SOURCE D'EMISSION	QUANTITES EMISES [Kg/an]
Emissions sous forme de particules	84 .10 ⁹
Particules formées des gaz polluants	
- Sulfates à partir de SO ₂	13 .10 ⁹
- Nitrates à partir de NO _X	27 .10 ⁹
- Particules photochimiques issues des hydrocarbures	25 .10 ⁹
TOTAL	296. 10⁹

A). Les sources fixes :

Tous les processus de combustion et la plupart des branches industrielles sont génératrices de particules dans l'air.

- **L'industrie thermo énergétique [29] :** La combustion induit dans l'atmosphère plusieurs variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies), ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules tels que (les NO_x et le SO₂).

- **L'industrie sidérurgique [27] :** Les principaux polluants issus de ce domaine sont des poussières de composition chimique variable et de granulométrie entre 2 et 100 µm (SiO₂, AlO₃, CaO₂, K₂O, ZnO,...) et des particules fines entre autre les fumées d'oxyde de fer. Ces émissions sont le résultat de différents processus de production à savoir : l'agglomération et « frittage » des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport, etc.

- **L'industrie des matériaux non ferreux [27] :** Elle participe à l'émission d'importantes quantités de Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Hg,... Lors du raffinage de ces métaux au cours des opérations de fusion, des vapeurs métalliques se répandent dans l'air, s'oxydent et se subliment en fines particules, qui sont entraînées sur de longues distances par la circulation de l'air.

- **L'industrie des matériaux de construction [27] :** La production des matériaux de construction contribue fortement à la pollution particulaire à cause des procédés d'extraction, de transport, de broyage et de fusion des minerais. Les cimenteries sont des grandes émettrices de poussières, du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production.

- **L'industrie chimique [30] :** ne présente pas une importante source de poussière dans l'air, mais participe d'une manière indirecte dans la pollution par l'émission des gaz qui se transforment en particules. Certains métaux (Cd) et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques sont produits dans l'air par les raffineries de pétrole.

- **L'incinération des déchets [31]** : engendre l'émission de grandes quantités de particules. Ces particules peuvent contenir d'importantes quantités de métaux (Fe, Zn, Cd, Pb, Hg) et des oxydes métalliques divers dont la toxicité est considérable. En plus de ces particules, on trouve les gaz qui dans l'air se transforment en particules (SO₂).

B). Les sources mobiles :

Le parc automobile, dont le volume croit continuellement, constitue en milieu urbain la principale source d'émission de particules [30].

La pollution issue du trafic routier comprend les émissions suivantes :

- **Les particules routières [18]** :

Le trafic automobile émet surtout des halogénures (bromures et chlorures) de plomb, volatils à la température du gaz à l'échappement, mais qui ensuite, par hydrolyse de ces sels, engendrent dans l'atmosphère des acides chlorhydriques (HCl) et bromhydriques (HBr) qui ne restent pas en général sous forme gazeuse mais se retrouvent adsorbés par les poussières atmosphériques. Ces rejets se présentent alors dans la gamme granulométrique des PM-2,5.

- **Les particules diesel [32]** :

Les moteurs diesel émettent des particules toxiques capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Ainsi, leur diamètre aérodynamique moyen est centré sur 0,1 µm en sortie d'échappement. Le diesel dégage une pollution spécifique visible, des fumées noires et des suies constituées de particules de carbone et imprégnées de diverses substances, en particulier d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Ainsi, les particules diesel sont principalement constituées :

- de résidus solides sous forme de suies (carbone élémentaire et carbone organique) ;
- d'une partie soluble constituée d'hydrocarbures imbrûlés, principalement les HAP, issus de la combustion incomplète du carburant diesel ;
- d'une fraction insoluble (carbone non fonctionnalisé, etc.).

Ce sont en fait, des particules solides avec une structure fractale qui s'apparente à une éponge. Des mesures effectuées en site proche du trafic révèlent qu'environ 75% du carbone suie se trouve dans la fraction granulométrique inférieure à 1 µm, le reste étant à associer à des particules plus grossières. Ce qui démontre bien l'importance et la spécificité de la pollution diesel.

- **Les métaux lourds :**

Jusqu'à présent le terme métal lourd n'a été jamais défini par un quelconque organisme reconnu tel que l'IUPAC ou autres.

Au cours de ces dernières 60 années plusieurs auteurs ont essayé d'attribuer au mot « métal lourds » une définition qui s'inscrit toujours dans le contexte de leurs travaux. Les plus répandues de ces définitions sont :

Chapitre I - Généralités

- ✓ Tout métal ayant une densité supérieure à 5.
- ✓ Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium (Z=11).
- ✓ Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques.

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 [33].

On estime qu'environ 16% de la production globale du plomb était destinée à être utilisé comme additif dans l'essence. Une voiture utilisant une essence à 0.15 g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/Km de particules dont la masse en plomb peut dépasser les 25% [27].

Il y'a quelque années, les émissions de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10^6 Kg/an [34].

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

Les métaux lourds peuvent atteindre l'homme par passage à travers la peau, ingestion (diffusion par gradient de concentration jusqu'à la circulation sanguine. Le plomb et le cadmium peuvent prendre la place du calcium et de la vitamine D en cas de carence) ou par inhalation (les vapeurs peuvent se dissoudre dans les muqueuses du système respiratoire ou arriver dans la circulation sanguine par l'intermédiaire des alvéoles pulmonaires

Donc on peut résumer les effets des métaux lourds sur la santé humaine aux :

- ✓ Affection du foie et des reins.
- ✓ Troubles du système nerveux (mémoire, fonctions sensorielles de coordination).
- ✓ Maladies respiratoires, asthme, malformations congénitales, cancers.
- ✓ Cancers, troubles dermatologiques, anémie.

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines. Cette contamination a plusieurs origines telles que la combustion de fossiles, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle via les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc.

Le tableau N°I.5 présente les taux d'émission de certains métaux lourds en fonction de la source polluante à l'échelle de la planète.

Tableau N°I.5 : Taux d'émission des particules anthropiques (Tonnes/An) [35].

Nature des sources	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Combustion du charbon	11275	5005	13763	8158	11101
▪ Centrales électriques	4495	2015	5348	2713	4418
▪ Industries et chauffage domestique	6780	2990	8415	5445	6683
Combustion du fuel	1408	1959	27065	2419	2159
▪ Centrales électriques	334	1334	9170	986	727
▪ Industries et chauffage domestique	1074	625	17895	1433	1432
Production des métaux non ferreux		26783	8781	49085	71572
▪ Mines		480	800	2250	465
▪ Production de plomb		273	331	21420	332
▪ Production de cuivre et de nickel	-	25525	7065	1657	6375
▪ Production de Zinc et de Cadmium		460		8510	64400
Production secondaire des métaux non ferreux	-	110	-	765	855
Sidérurgie Fer et Acier	15620	1.491	3568	7633	19525
Incinération des déchets	1139	1575	464	2370	5900
▪ Municipales	539	1470	259	2100	5600
▪ boues	600	105	105	270	300
Industries des fertilisants	-	411	411	165	4110
Production de ciment	1335		490	7129	9790
Combustion du bois		900	1200	2100	3600
Sources mobiles (trafic routier)	-	-	-	248030	-
Divers	-	-	-	4000	3254
Total des émissions anthropiques	30777	38189	55642	331851	131866
Total des émissions naturelles	44000	28000	30000	12000	4000

Chapitre I - Généralités

- **Les micro-suies [32] :**

Leur granulométrie est très largement inframicronique (0,05 à 0,1 micromètres), et elles sont émises par la combustion du fioul léger (moteurs diesel), de l'essence, du kérosène et du gaz.

Elles sont essentiellement carbonées, mais peuvent contenir du soufre si le combustible dont elles sont issues en contient. Leur concentration atmosphérique serait en augmentation, en rapport avec le trafic automobile. Ces particules sont les plus dangereuses pour la santé humaine car elles sont susceptibles de pénétrer dans les alvéoles pulmonaires.

Par ailleurs, elles contaminent les plus hautes couches atmosphériques et sont donc responsables d'une pollution globale. Les plus fines particules peuvent s'agréger aux plus importantes sous l'action des forces d'adhésion, de capillarité et de tension superficielle.

La moitié des particules fines ont un diamètre inférieur à 2 μm sur une échelle allant jusqu'à 10 μm .

Globalement on constate que [32, 35 et 36] :

- ✓ Près de 80 % des particules contenant du plomb sont inférieures à 2 μm , ce qui confirme l'origine automobile de cette granulométrie.
- ✓ Dans les émissions diesel, la quasi totalité du carbone élémentaire est contenue dans la fraction inférieure à 1 μm , d'où l'importance de l'étude des PM-1 pour appréhender la pollution engendrée par le trafic routier.
- ✓ Environ 80 % des particules contenant des HAP ou étant génotoxiques ont un diamètre inférieur à 2 μm , or ces éléments sont préoccupants pour la santé.
- ✓ Enfin, les particules contenant du Fer ou du Manganèse sont davantage grossières, 60% d'entre elles faisant plus de 3,3 μm .

Outre la fraction qui sort des pots d'échappements, les particules routières sont constituées d'un mélange hétérogène issu de [18] :

L'usure de la chaussée (quartz, gypse...) arrachée par les pneus des véhicules, le sel et le sable utilisés l'hiver.

L'usure des pneumatiques (noir de carbone, calcium, soufre, zinc...) avec des tailles supérieures à 7 μm . Ainsi, un pneu perd 10 % de sa masse au cours de sa durée de vie.

Des garnitures de frein et d'embrayage qui contiennent parfois encore une certaine quantité de fibres d'amiante.

Des pots d'échappement (fer, plomb, carbone) avec aussi des oxydes métalliques comme les oxydes de calcium provenant des additifs des lubrifiants et l'oxyde d'aluminium provenant des supports des catalyseurs.

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

Dans certaines grandes métropoles, la pollution issue du trafic routier s'élève à 20-30% de l'ensemble des sources. A Londres (en 2001), le trafic routier contribuait à 80% aux émissions de particules [37]. En France, la moyenne nationale donne un taux de 30%, soit une teneur moyenne d'émission de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ imputable uniquement au trafic routier [38 et 39].

Chapitre I - Généralités

La part liée à l'usure des routes n'est pas négligeable puisque l'inventaire effectué en France en 2000 montre qu'environ 40% des émissions du trafic routier sont dues à l'usure des routes [40].

Une étude a montré qu'à l'échelle nationale en France (année 2002), la part imputable au trafic routier est de 9% des TSP, 15% des PM-10, 22% des PM-2,5 et 24% des PM-1. Ces données montrent qu'en milieu urbain le taux de pollution issue du trafic urbain est important et que ce taux augmente lorsque la granulométrie des particules diminue. En d'autres termes, le trafic routier se caractérise par des particules fines très nocives pour la santé [41].

CHAPITRE II

Chapitre II - Propriétés des particules

II - Propriétés des particules fines

II.1 - Propriétés physiques

II.1.1 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 en général de la source d'émission [42].

Les tableaux N°II.1 et II.2 donnent respectivement les différentes formes des particules en suspension et leur pourcentage de la masse d'échantillon [43].

Tableau N°II.1 : Les principales formes de particules [43].

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

Chapitre II - Propriétés des particules

Tableau N°II.2 : Forme des particules et leur pourcentage pour un diamètre $\varphi > 0.1 \mu\text{m}$ [43].

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

II.1.2 Structure des particules :

L'aérosol est généralement constitué :

- D'un cœur formé de carbone suie (carbone amorphe) et de métaux (ou oxydes métalliques). C'est cette partie qui donne aux particules la couleur noire.
- D'une couverture épaisse d'électrolytes hydrosolubles tels que les sulfates.
- De composés organiques déposés sur cette couche d'électrolytes. Ces composés proviennent des gaz adsorbés (COV) ayant ou non réagi photo-chimiquement. À l'heure actuelle on ne connaît pas l'épaisseur de cette couche et on ne sait pas si cette couche est continue ou non.
- De l'eau à l'extérieur de la particule ayant partiellement solubilisé l'électrolyte. Elle est attachée aux composés organiques par les fonctions hydrophiles de ces derniers.

Dans la figure II.1 on voit l'importance des composés à la surface de l'aérosol, tant du point de vue climatique que du point de vue sanitaire, puisque ces composés sont à l'interface. En raison de leur accessibilité et de leur éventuelle réactivité, ces composés réagissent avec les autres constituants de l'atmosphère lors de réactions hétérogènes.

Ils peuvent aussi facilement « passer » dans l'organisme humain. S'ils sont toxiques, ils sont dangereux même aux faibles concentrations.

Chapitre II - Propriétés des particules

La figure II.1 synthétise la vision actuelle de la constitution de l'aérosol de pollution. Notons que cette approche reste partiellement spéculative, en raison de l'absence de preuves définitives.

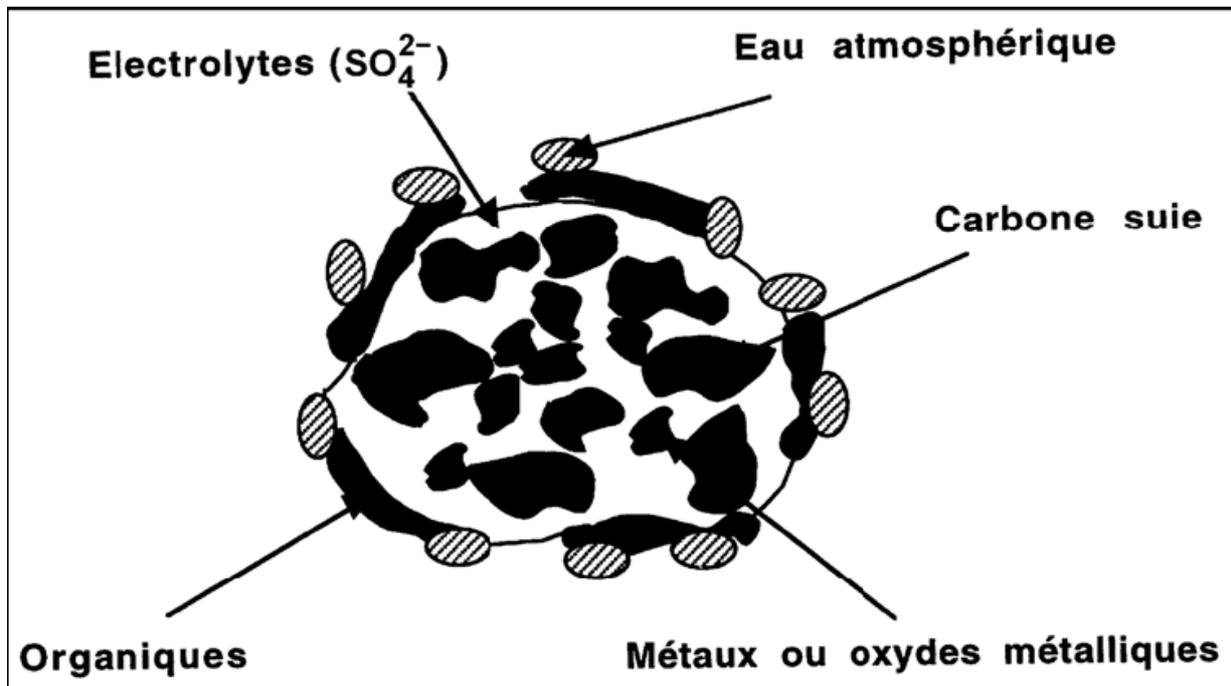


Figure N°II.1 : Constitution type d'une particule fine [6].

II.2 - Composition chimique

La poussière est un mélange physico-chimique complexe. Elle comporte aussi bien des composants primaires émis que des composants secondaires formés. La figure II.2 résume la composition de l'aérosol atmosphérique et ses précurseurs [44].

En réalité deux composantes se distinguent dans la composition des particules, une composante primaire et une composante secondaire [45]:

Chapitre II - Propriétés des particules

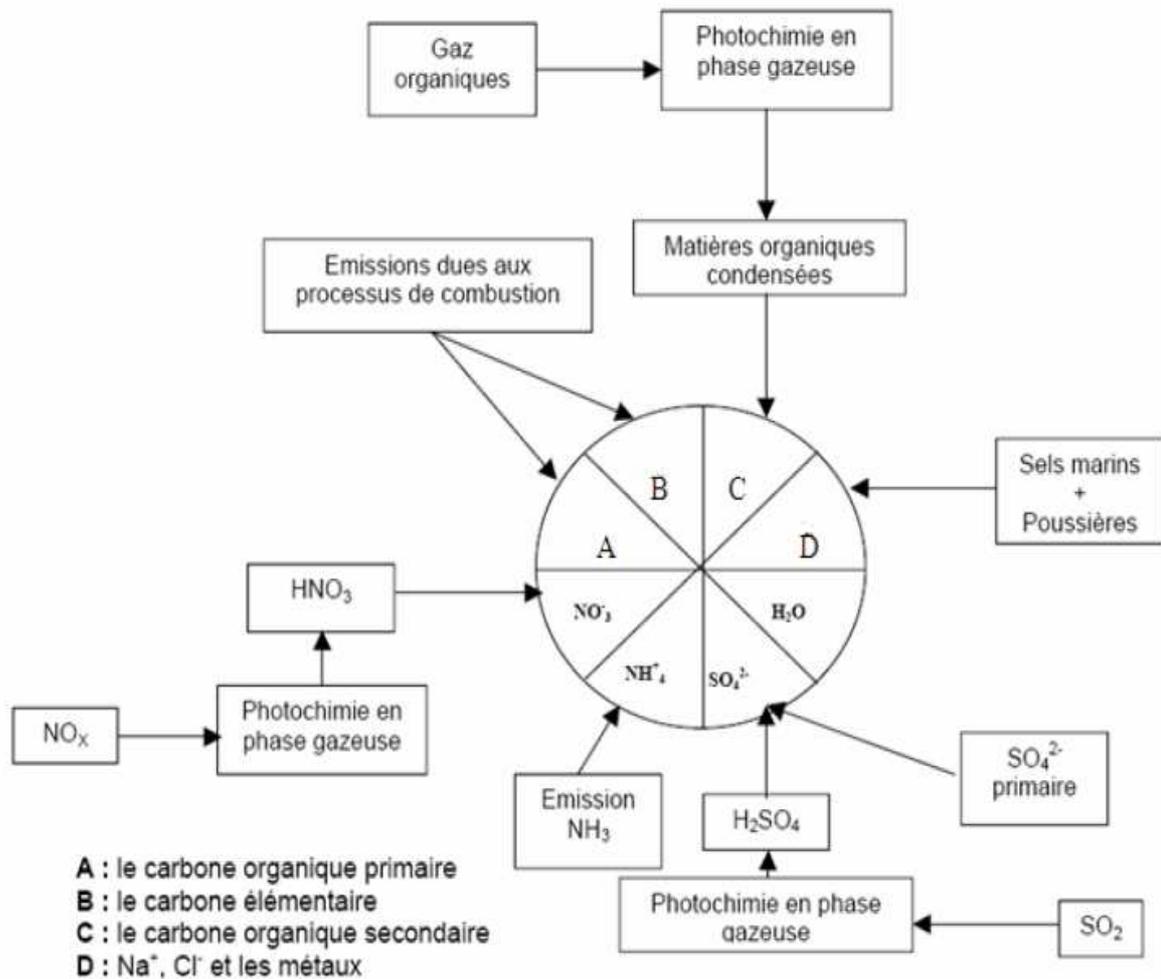


Figure N°II.2 : Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources [45]

A). Composante primaire

La composante primaire contient principalement :

- ✓ Les suies
- ✓ Les matières géologiques
- ✓ Les métaux lourds
- ✓ Les matières biologiques (virus, bactérie, pollen,...)
- ✓ Les particules formées par abrasion

Chapitre II - Propriétés des particules

B). Composante secondaire

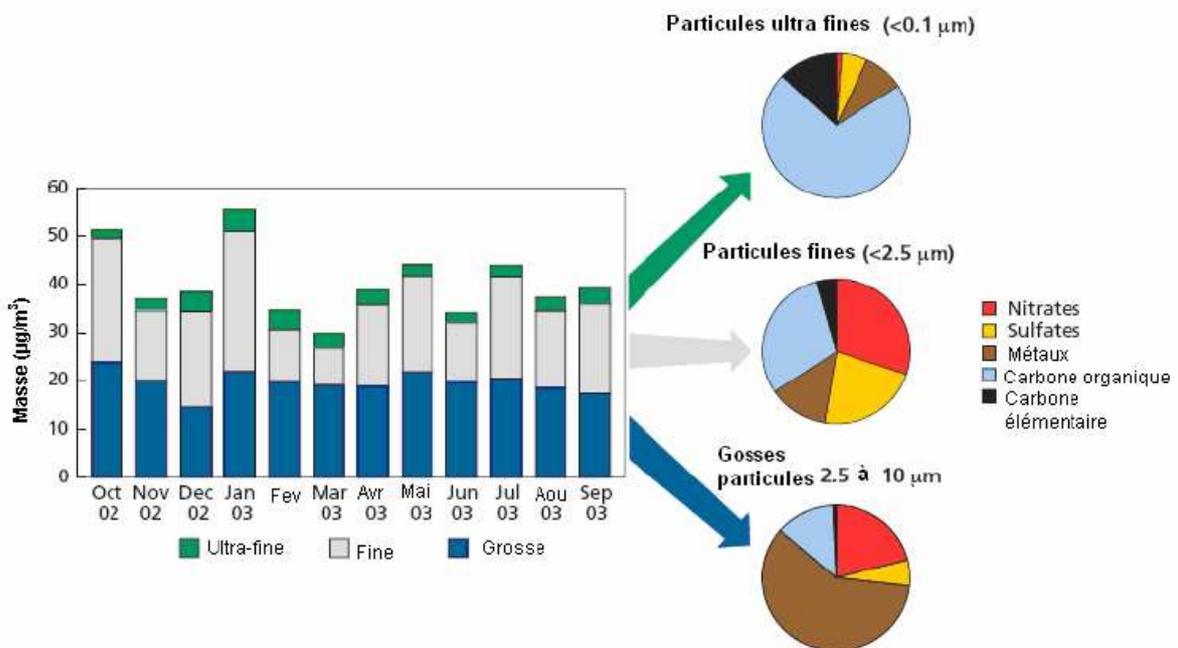
Elle véhicule entre autre :

- ✓ Les nitrates
- ✓ Les sulfates
- ✓ L'ammonium
- ✓ Le carbone organique

La composition des particules change suivant qu'elles sont fines, ultra fines ou grossières. Les PM-2,5 se composent d'environ 80 % de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon », de carbone organique (HAP et autres composés organiques lourds) et de métaux lourds en traces. Cette fraction englobe aussi la majeure partie des aérosols secondaires issus de la conversion gaz/particules (nitrates et sulfates provenant de la conversion dans l'atmosphère des polluants SO₂ et NO₂) [24].

Les fractions des particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 µm (fractions thoraciques) contiennent environ 50 % des composés qu'on trouve dans les PM-2,5 ainsi qu'un taux important de minéraux insolubles tels que les composés d'aluminium, de silicates, de fer et d'autres métaux lourds [24].

La fraction des PM-1 est généralement plus enrichie en suies, en HAP et en sulfates que celle des PM-2,5. La figure II.3 illustre la composition moyenne des particules aux USA en fonction de la classe granulométrique.



Chapitre II - Propriétés des particules

II.3 - Formation des particules

Les particules 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 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 μm [32].

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.

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 μm (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 μm .

Les sources naturelles possibles sont le pollen, les embruns, l'érosion éolienne, et les volcans. Les particules de grandeur moyenne (entre 0,1 et de 2,5 μm) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par conversion gaz particule à partir des précurseurs SO_2 , NO_x , NH_3 et COV (composés organiques volatiles).

La figure N°II.4 illustre les différents processus de formation des particules [47].

Chapitre II - Propriétés des particules

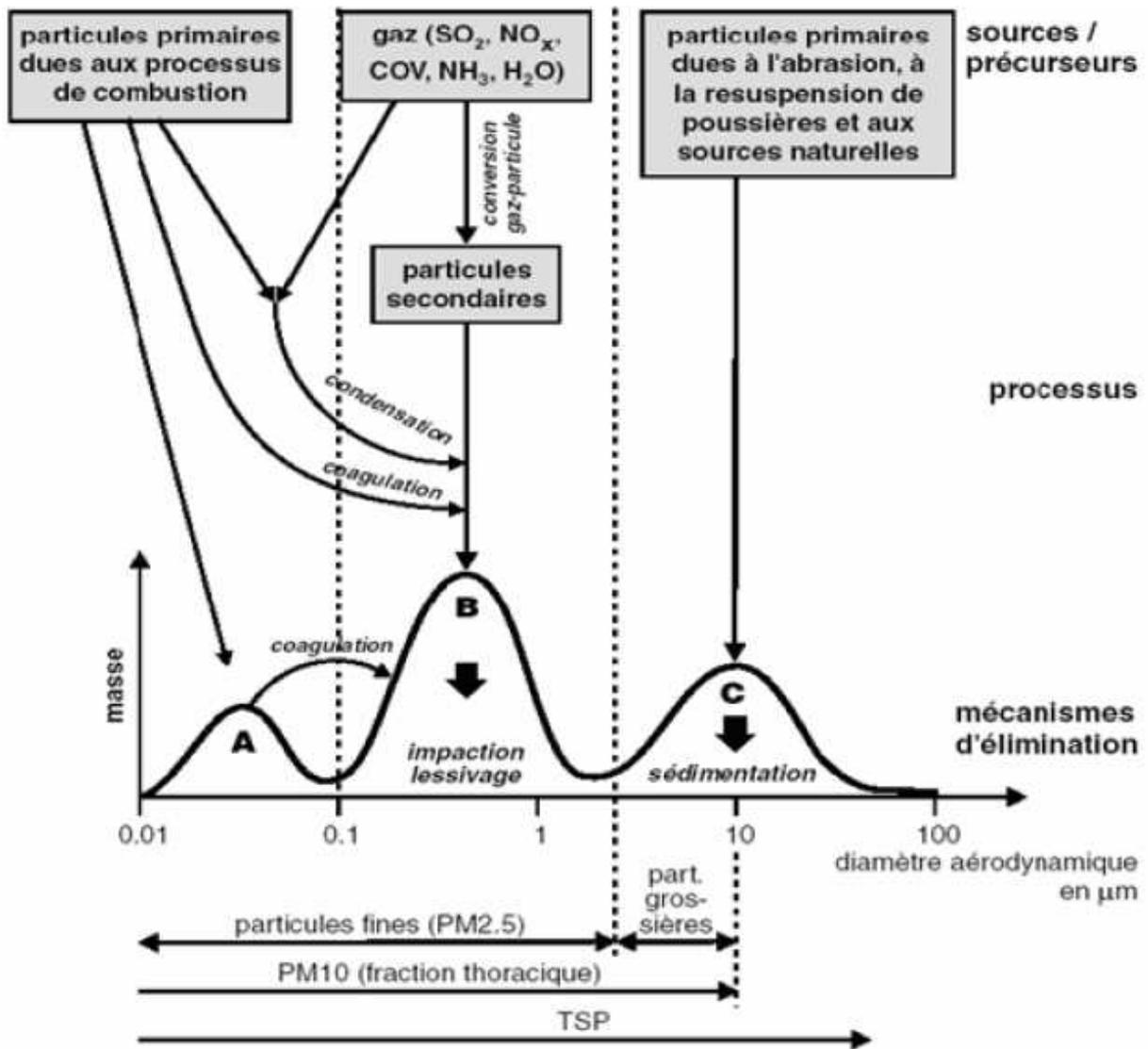


Figure N°II.4 : Différents processus de formations des particules [47].

II.4 - Influence des facteurs météorologiques sur la diffusion des particules

Les facteurs météorologiques influençant la dispersion ont pour origine les déplacements de l'air que l'on peut étudier :

Chapitre II - Propriétés des particules

- Soit à l'échelle « synoptique », échelle horizontale d'une centaine de kilomètres, relativement très faible en épaisseur, se présentant sous la forme d'une galette très aplatie dont le mouvement quasi-horizontale est décrit par l'étude du vent synoptique représenté sur les cartes météorologiques.

- Soit à l'échelle aérologique, échelle de quelques dizaines ou centaines de mètres au dessus du sol ou les courants ascendants thermiques et la turbulence due à la nature du sol et à son relief ont une grande importance pour la dispersion des panaches.

La turbulence atmosphérique dans les basses couches de l'atmosphère ou « mouvement tourbillonnaire » est le mécanisme qui réalise pratiquement la diffusion atmosphérique. Elle provoque un mélange intense des diverses couches d'air dans toutes les directions, ce qui entraîne la dilution de la parcelle d'air polluée et par conséquent la diminution de sa teneur en polluant.

La turbulence atmosphérique peut avoir une origine mécanique ou une origine thermique.

Dans le premier cas, elle est due principalement au passage du vent sur les aspérités du sol.

Dans le second, elle dépend essentiellement de la répartition des températures à partir du sol en fonction de l'altitude. Les facteurs mécaniques et thermiques peuvent intervenir simultanément, les uns prédominant sur les autres suivant les circonstances.

La diffusion est liée à l'étude du vent et des gradient verticales de température. Nous examinerons la structure physique de ces deux éléments, leur contribution à la turbulence atmosphérique et les divers facteurs qui peuvent modifier leur action.

D'autres facteurs météorologiques comme les précipitations peuvent avoir une action directe sur la diminution des concentrations de polluants par lavage ou simple entrainement.

A). Le vent :

L'origine de la circulation générale de l'atmosphère est due à la chaleur du soleil reçue par la terre, qui est très différente aux pôle et à l'équateur.

Le mouvement général de l'air a pour origine les mouvements de l'air chaud de l'équateur qui s'élève et qui est remplacé par un courant d'air froid venant du pôle [49].

- **Direction du vent :**

La direction du vent au sol peut être différente de celle du vent synoptique par suite des effets dus au frottement du sol, au gradient thermique ou au relief [49].

- **Vitesse du vent :**

La vitesse du vent est d'autant plus grande que les variations de pression sont grandes donc que les distances entre les isobares sont faibles. Elle augmente généralement en hiver, étant donné que, durant cette période, les gradients horizontaux et verticaux de température sont plus élevés [49].

Chapitre II - Propriétés des particules

B). La température de l'air :

A la base du mouvement de l'air est la température qui a des valeurs différentes à la surface du sol due à des caractéristiques thermiques différentes et à des variations d'emménagement de la chaleur solaire. Alors que les différences de température sur de grandes surfaces déterminent la production des vents, celles qui se produisent sur des surfaces restreintes provoquent de petits courants horizontaux ou seulement un déplacement vertical. Le plus important phénomène dû à la température est la convection sur la verticale, qui représente l'ascension de l'air d'une couche inférieure de l'atmosphère voisine du sol, à la suite de son échauffement par le soleil. Ce phénomène a lieu à cause du gradient thermique de l'air en continue baisse avec l'altitude (approximativement de 1° par 100 m). La convection ascendante représente un des phénomènes les plus importants de l'autopurification ; dans ce courant sont entraînées, en même temps que l'air, les impuretés évacuées par différentes sources de pollution. De cette manière, le volume d'air dans lequel se réalise la dilution augmente [48].

C). La turbulence de l'air :

L'agitation et le mélange des différentes portions des masses d'air ayant des caractères différents, sous forme de tourbillons qui s'interpénètrent, ont été nommés turbulence. Ce phénomène est le résultat de certains processus mécaniques complexes provoqués par des différences de température, mouvement et frottement. La diffusion et la dilution des polluants dans la masse d'air se réalisent sous son influence d'autant plus rapidement que la turbulence est proportionnelle à la vitesse du vent, compte tenu de l'existence de constructions au sol, des différences de relief et de la capacité d'emménagement de la chaleur. La turbulence minimum se rencontre au dessus des grandes surfaces lisses et homogènes : mers, massifs forestiers, etc. L'altitude jusqu'à la quelle est ressentie la turbulence varie entre 300 et 3000 m.

La turbulence s'exprime par un coefficient de diffusion turbulente K variable en un même point au cours de la journée et de l'année en fonction de la capacité d'échauffement. Ce coefficient est minimum en hiver et pendant les heures froides de la journée ; il est maximum l'été aux environs de midi.

En rapport avec l'intervention des facteurs thermiques et de relief, on distingue une turbulence dynamique et une turbulence thermique.

Le phénomène de diffusion turbulence maximum des impuretés se réalise au contact entre la masse de gaz évacuée par les cheminées et la masse d'air dans laquelle ceux-ci se déplacent. Les tourbillons de mélange sont d'autant plus grands que la vitesse du mouvement de l'air est plus grande [48].

D). Les précipitations :

La pluie, la neige et les autres formes de précipitations atmosphériques réalisent le lavage, l'absorbance et l'entraînement vers le sol des impuretés de l'air de façon d'autant plus marquée que la durée et l'intensité de ces précipitations sont plus grands. A cause de cela l'atmosphère peut être considérée comme pure après une période suffisamment longue de précipitations. D'après Willet [48], la pluie réalise le lavage de l'atmosphère, spécialement des gaz, et la neige, des impuretés solides. D'après Haagen-Smit les précipitations sont insuffisantes pour épurer l'atmosphère des particules plus petites que $2\mu\text{m}$ [48].

Chapitre II - Propriétés des particules

Grace au phénomène de lavage des impuretés, l'eau des précipitations (spécialement celle des commencements de ces précipitation) est utilisée pour déterminer le degré et la nature des polluants, les précipitations continuent à retenir les impuretés même d'après leur arrivée au sol par dissolution, absorption de (ou réaction avec) celles qui arrivent ultérieurement sur la surface humide du sol [48].

E). L'humidité :

La présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère est considéré comme in facteur météorologique défavorable au phénomène d'autopurification parce qu'elles empêchent la diffusion des impuretés et parce qu'elles réagissent avec celles-ci de telle sorte que peuvent en résulter des impuretés plus agressives.

Une humidité élevée favorise la formation du brouillard et la concentration des impuretés.

Les oscillations inégales de température des particules de l'air par rapport à celles du reste de la masse d'air donnent lieu à des condensations de vapeurs sur ces particules qui servant des noyaux de condensation.

Ceci favorise la formation du brouillard qui prend naissance même sans que soit atteint le niveau de saturation de l'humidité [48].

F). Les nuages :

L'existence d'un plafond compact et stagnant de nuages à une altitude peu élevée crée un espace fermé dans lequel la dilution des impuretés ne se produit plus dans des conditions satisfaisantes. Plus cela dure et plus cela se répète souvent au cours de l'année, plus la pollution est grande. Il existe des années et des périodes où les nuages se trouvent fréquemment à faible altitude empêchant le phénomène d'autopurification.

Ces sortes de zones se rencontrent surtout dans les régions nordiques et montagneuses pendant les périodes froides de l'année. En revanche, les nuages en mouvement qui ne couvrent que partiellement une région peuvent entraîner les impuretés, réalisant ainsi une autopurification [48].

G). Les phénomènes macrométéorologiques :

L'importance des masses d'air pour l'autopurification a été constatée par l'analyse des lieux environnants où se sont produits les accidents collectifs mentionnés dans la littérature.

Au début, on a constaté que ceux-ci ont coïncidé avec la superposition de phénomènes météorologiques défavorables : brouillard, inversion thermique et calme atmosphérique, durant plusieurs jours. Ultérieurement on a constaté que tous ces accidents ont eu lieu pendant certains phénomènes macrométéorologiques similaires : masse anticyclonique à pression atmosphérique élevée, absence de mouvement de l'air, conditions favorables pour la production de l'inversion thermique et brouillard. Sur le globe il existe des zones où la fréquence et la durée des masses anticyclonique sont particulièrement grandes.

En général, cette masse d'air persiste au-dessus d'un territoire pendant quatre jours, mais parfois cette durée peut être seulement de quelques heures et d'autres fois des dizaines de jours. La durée des masses anticycloniques se prolonge davantage en automne et en hiver et se trouve habituellement réduite au printemps et en été [48].

CHAPITRE III

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

III - Effets des particules fines sur la santé et sur l’environnement

III.1 - Généralités

De nombreuses études aux États-Unis et en Europe ont mis en évidence dans les dernières années une relation à court et à long terme entre la pollution atmosphérique particulaire et le niveau de mortalité totale, parfois de mortalité cardiovasculaire et/ou respiratoire.

Les études réalisées dans les pays en voie de développement sur les relations à court et à long terme entre la pollution atmosphérique particulaire et le niveau de mortalité sont encore peu nombreuses. Pourtant, les spécificités de ces pays en termes de pollution atmosphérique particulaire (composition chimique, taille et devenir des particules), ainsi que de conditions météorologiques, de pathologies locales, de pyramide des âges et de niveau socio-économique permettraient d’améliorer nos connaissances sur l’impact sanitaire de la pollution atmosphérique. Rappelons que les particules en suspension sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique: les PM-10 sont celles dont le diamètre est égal ou inférieur à 10 µm, les PM10-2.5 sont de diamètre compris entre 10 µm et 2,5 µm, et les PM-2,5 sont de diamètre égal ou inférieur à 2,5 µm. Les PM-2,5 sont composées de différents types d’éléments organiques et inorganiques incluant des sulfates, des nitrates, des carbones organiques et élémentaires [50].

Les plus grosses restent dans la partie extra thoracique (nez-gorge-larynx) alors que jusqu’à 50% des particules ultrafines se déposent dans les alvéoles pulmonaires. Ces dernières peuvent pénétrer dans le sang, se distribuer dans tout le corps et atteindre les organes essentiels (rein, foie, moelle osseuse, cerveau). Dans ce cas, l’inhalation des particules ultrafines véhiculant des métaux comme l’arsenic, le chrome ou le cadmium et des hydrocarbures cancérigènes est très préoccupante. Les effets sont plus sensibles chez les sujets fragiles (enfants, personnes porteuses d’affections cardio-respiratoires). Jusqu’à 2006, l’OMS estimait qu’il n’y avait pas de niveaux de concentration et de durée d’exposition en dessous desquels il n’existerait aucun risque pour la santé humaine. Il ressort de publications américaines qu’une augmentation de 10 µg/m³ de PM-10 était associée à un accroissement moyen de 3,4% de la mortalité respiratoire et de 1,4% de la mortalité cardiovasculaire.

Sur les végétaux, certaines particules peuvent réduire la photosynthèse et des composés chimiques sont susceptibles de contaminer la chaîne alimentaire. Sur les matériaux, les particules contribuent à la salissure des bâtiments et à la corrosion des matériaux [51].

III.2 - Répercussion sur la santé humaine

Les effets biologiques peuvent être classés schématiquement sous trois rubriques [52] :

1). Réactions inflammatoires non spécifiques :

Les particules respirées ont, in vitro et in vivo, une activité pro inflammatoire, avec libération de nombreuses cytokines, en partie liée à la génération de radicaux oxydants.

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

2). Effets génotoxiques et cancérigènes :

Le risque cancérigène lié à cet aérosol urbain est en particulier associé aux particules fines émises par les véhicules diesel. Une méta-analyse de 23 études épidémiologiques effectuées sur des populations professionnellement exposées aux aérosols d’échappement des véhicules diesel chiffre l’excès de risque de cancer bronchique à 33% (IC95% : 24-46%), résultats qui sont cohérents avec ceux des expérimentations chez le rat, il est vrai à des concentrations près de 100 fois supérieures.

3). Effets immunotoxiques et allergiques :

Les particules diesel ont également un pouvoir immunotoxique. Celui-ci s’exercerait de deux manières :

- par une modification du pouvoir antigénique de certains pollens ;
- en augmentant la production d’IgE par activation locale des lymphocytes T, ainsi que de certaines cytokines par les cellules épithéliales.

III.2.1 Cheminement des particules dans le système respiratoire :

Les particules fines sont donc une famille de polluants qui pourrait contribuer, avec d’autres facteurs plus au moins bien documentés (faiblesse de la stimulation antibactérienne aux jeunes âges, accroissement de la charge en acariens des environnements intérieurs, tabagisme maternel pendant la grossesse et les premiers mois de la vie...), à l’augmentation constatée de la prévalence de l’asthme chez le jeune enfant. Il ne s’agit en l’état actuel que d’hypothèses qui font l’objet de nombreuses recherches.

Dans l’ensemble de ces études à court ou à long terme, d’autres polluants que les particules sont présents dans l’air pollué. Il est donc difficile d’isoler leur rôle propre.

La taille des particules détermine leur site de déposition dans l’appareil respiratoire et l’on peut ainsi déterminer cinq régions de dépôt (figure N°III.1). Les régions nasopharyngée et trachéobronchiale où le mécanisme de clairance est mucociliaire et l’élimination des particules rapide (en 24 h environ), les régions bronchiques et la région alvéolaire où la clairance macrophagique est plus lente, la demi-vie des particules pouvant atteindre des mois. Il est admis que les grosses particules ($d > 5 \mu\text{m}$) s’arrêtent dans la région nasopharyngée, les particules de 3 à $5 \mu\text{m}$ dans la région trachéobronchiale, alors que les particules fines, inférieures à $1 \mu\text{m}$, peuvent atteindre les régions bronchiolaire et alvéolaire et y persister [53]. Ceci est conforté par des études récentes [54,55] fondées sur l’analyse au microscope électronique de biopsies provenant de poumons humains, à Mexico (forte pollution particulaire, PM-10 : $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Vancouver (faible pollution particulaire, PM-10 : $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces études montrent que les premières contiennent environ 10 fois plus de particules que les secondes, et qu’il s’agit à 96% de particules carbonées fines sans doute associées aux processus de combustion, dont le trafic automobile.

Cette étude prouve, pour la première fois chez l’homme, que l’exposition à des particules fines conduit à une rétention pulmonaire qui dépend de la concentration ambiante et que cette persistance peut conduire à un remodelage bronchique.

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l'environnement

Cependant, les particules ultrafines se comportent de façon particulière dans la mesure où leur dépôt se fait à la fois essentiellement dans les régions nasopharyngée et alvéolaire. De plus, dans le poumon profond, leur élimination par le processus de clairance alvéolaire est perturbée. En effet, il semble qu'elles soient plus difficilement phagocytées que les particules fines par les macrophages alvéolaires, ce qui conduit à une persistance accrue et une interaction avec les cellules épithéliales [56].

Par ailleurs, la déposition particulaire dans les poumons est sensiblement plus marquée chez des malades atteints de pathologies obstructives telles que l'asthme et la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), elle est hétérogène selon les zones du poumon et la variabilité interindividuelle est très forte [57].

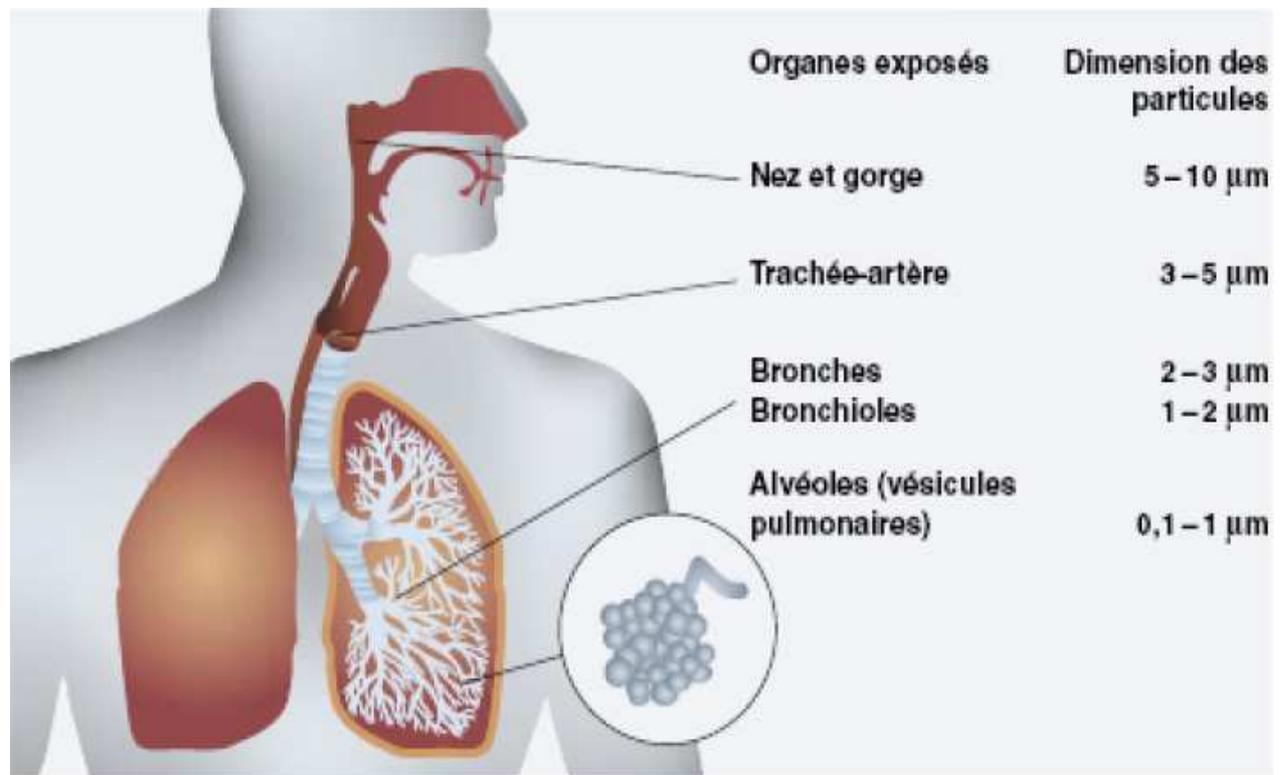


Figure N°III.1 : Déposition des poussières fines dans le tractus respiratoire humain [58]

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

III.2.2 Effets à court et long terme des aérosols particuliers :

Les résultats des principales études épidémiologiques convergent pour attribuer aux particules fines une part de responsabilité dans la survenue d’une vaste gamme d’effets sanitaires [59] :

Les tableaux III.1 et III.2 résument certains effets des PM-10 et des PM-2.5 sur la santé à court et à long terme.

Tableau N°III.1 : Résumé selon l’OMS des effets sur la santé, causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2.5 [60].

Effet sur la santé	Evaluation de l’accroissement de la valeur journalière moyenne correspondant à un changement dans les effets sur la santé, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	PM-2.5	PM-10
Nombre de décès par jour :		
Changement de 5%	29	50
Changement de 10%	55	100
Changement de 20%	110	200
Hospitalisations pour maladies respiratoires :		
Changement de 5%		
Changement de 10%	10	25
Changement de 20%	20	50
	40	100
Consommations de médicaments chez les asthmatiques :		
Changement de 5%	-	7
Changement de 10%	-	14
Changement de 20%	-	29
Aggravation de la symptomatologie chez les asthmatiques :		
Changement de 5%	-	10
Changement de 10%	-	20
Changement de 20%	-	40

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

Tableau N°III.2 : Résultats d’études sur les effets à long terme de l’exposition aux PM-10 et PM- 2.5 [61].

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

III.2.3 - Effets toxiques de certains métaux lourds supportés par les PM-10 :

A). Action toxique du plomb :

Ce métal qui a des propriétés cumulatives importantes est toxique. Le plomb minéral est distribué à raison de 94% dans les os et de 6% dans les autres tissus, dont 4% dans le sang [62].

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

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l'environnement

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 [62, 63].

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

$$[\text{Pb}]_{\text{sang}} = 1.216 [\text{Pb}]_{\text{air}} + 15.65$$

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

Certaines interrogations subsistent sur l'impact à long terme, en particulier sur certains sujets sensibles. Néanmoins, à l'image des connaissances concernant les infections virales et les pneumo-allergies, on peut redouter une augmentation de l'inflammation des bronches favorisant de ce fait les maladies respiratoires chroniques, surtout en cas d'expositions répétées au cours de l'année [64].

B). Action toxique du cadmium:

Le cadmium est un poison cumulatif, il s'accumule surtout au niveau du foie et des reins ; les autres organes privilégiés sont les poumons, le pancréas, les testicules, la thyroïde, les glandes salivaires, le 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 [63].

C). Action du vanadium :

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.

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

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

Il perturbe d’autres métabolismes, diminue la résistance immunologique et la réactivité allergique et présente une certaine toxicité rénale. Il provoque en quelque sorte la bronchite chronique et la pneumonie [63].

D). Action toxique du mercure:

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

L’intoxication chronique du mercure se manifeste par une symptomatologie non spécifique 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 organomercurels attaquent généralement le cerveau et c’est le syndrome neurologique qui prédomine [64].

III.3 - Effets sur la faune

Les études toxicologiques sont le plus souvent pratiquées sur des animaux ou sur des cultures cellulaires.

Dans de telles études, les conditions d’exposition et les autres facteurs de variance peuvent être contrôlés de façon relativement exacte à l’inverse des études épidémiologiques.

La transposition des résultats d’une étude, portant sur un nombre restreint d’animaux, à des groupes entiers de population est cependant très difficile.

Certaines familles d’animaux peuvent réagir de façon très différente à une exposition donnée. Une substance peut, par exemple, être hautement toxique pour les souris alors que les rats ne réagissent qu’à peine. L’homme est-il plutôt rat ou souris? Ou alors ce sont les femelles d’une certaine espèce de rat qui réagissent tout à fait différemment des mâles de la même espèce. En toxicologie, on utilise la plupart du temps des animaux parfaitement sains.

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l'environnement

Comment les animaux malades ou asthmatiques réagissent-ils? Le plus souvent, les expérimentations animales se font avec des doses élevées et les résultats sont interprétés à l'aide d'intervalles de confiance et d'extrapolations par rapport aux concentrations significatives pour l'environnement. Les expériences sur les animaux sont en outre généralement réalisées avec des souches homogènes du point de vue génétique; on sait toutefois que, chez l'homme, les réactions à certains polluants peuvent être différentes en fonction des prédispositions génétiques. Alors que les expérimentations animales ne sont pas d'un grand secours pour la détermination d'un risque encouru par l'ensemble d'une population, elles peuvent rendre de très bons services pour expliquer les mécanismes d'action [65, 66].

III.4 - Effets sur la flore

La flore est exposée de façon durable à la pollution atmosphérique, les végétaux sont donc :

- ❖ Utilisés comme « bio-indicateurs » (par exemple: lichens) dans certaines recherches.
- ❖ Ils peuvent être l'objet d'atteintes :
 - Aiguës : telles que des nécorces.
 - Chroniques : telles que des troubles de croissance.

A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles c'est le cas des abricotiers.

Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières, de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints : directement par le feuillage et indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes (bactéries de l'azote). Les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc etc. en tant qu'oligo-éléments mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement [67, 68].

III.5 - 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, ...etc) 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.

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l’environnement

A coté de la corrosion des matériaux, une autre forme d’impact de la pollution atmosphérique sur le cadre bâti est constituée par le phénomène de salissure de la surface des matériaux du fait des dépôts 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 provoquant la salissure des murs, plafonds, tapis, ...etc. Cette dégradation de la bâtie (bâtiment, monuments historiques,...) est l’effet le plus visible [48,69].

III.6 - Effets sur le climat

Deux paramètres sont à prendre en compte pour comprendre l’influence de l’aérosol sur le climat:

A). L’effet radiatif direct

L’effet direct de l’aérosol concerne le bilan radiatif planétaire. La lumière solaire est diffusée par les particules atmosphériques. Cette lumière, principalement constituée des longueurs d’onde visibles et proche des ultraviolettes, est déviée par les aérosols, en arrivant dans les différentes couches de l’atmosphère, avant d’atteindre le sol. Il y a perte de la lumière incidente. On peut considérer les aérosols comme des boules solides, inertes chimiquement, dont seule la taille intervient dans l’effet radiatif direct. La taille moyenne des aérosols est voisine du micron et du même ordre de grandeur que les longueurs d’onde des radiations lumineuses. L’influence du paramètre « taille » est primordiale et longtemps on n’a considéré que ce paramètre pour estimer l’impact climatique des aérosols [6].

B). L’effet radiatif secondaire

L’effet indirect climatique peut être décomposé en trois sous effets :

- ❖ L’effet indirect radiatif lié à la profondeur optique de l’aérosol.

Cet effet est de même nature que l’effet direct, mais il prend en compte la nature chimique de l’aérosol. La profondeur optique dépend principalement des espèces chimiques adsorbées à la surface de l’aérosol. La lumière solaire est différemment réfractée et absorbée suivant la nature et la concentration de ces composés chimiques. La quantité de lumière disponible pour les réactions photochimiques est modifiée par la présence de ces composés chimiques [6,70,71].

- ❖ L’effet indirect radiatif lié à l’albédo et à la présence des nuages.

Ce paramètre est lié à la taille de l’aérosol et à sa composition chimique. Les substances chimiques peuvent favoriser ou défavoriser la formation des nuages et modifier l’albédo de l’aérosol. Les particules submicroniques (0,05 à 1 μm) se comportent comme des noyaux de condensation de nuages (appelés souvent CCN : Cloud Condensation Nuclei). Si les composés présents en surface sont hydrophiles, la formation de gouttes d’eau autour de la particule atmosphérique est favorisée. S’ils sont hydrophobes la formation de gouttes d’eau est défavorisée. La couleur des composés intervient aussi sur l’albédo. Les composés noirs (souvent

Chapitre III – Effets sur la santé et sur l'environnement

d'origine anthropique) absorbent la lumière, tandis que les composés clairs (les argiles par exemple) la reflètent

❖ L'effet indirect impliquant l'ozone.

Les substances organiques – surtout si elles sont présentes à la surface – peuvent interagir avec les oxydants de l'atmosphère par réactions hétérogènes chimiques ou photochimiques, modifiant ainsi le bilan des photo-oxydants dont l'ozone. On sait que les réactions photochimiques, avec les radicaux OH° , sont fréquentes avec les composés organiques particuliers. Au même titre que les gaz, l'aérosol peut donc être un puits ou une source d'ozone.

Ce dernier aspect, non contesté, est pourtant particulièrement mal connu. Ces trois sous-effets indirects – tous liés à la présence de composés chimiques dans ou sur l'aérosol – ne sont pris en compte que depuis peu et leur connaissance reste encore très limitée. Sous cet aspect l'aérosol doit être considéré comme une entité réactive et non inerte [6,70,71].

CHAPITRE IV

IV - Méthodes d'analyse et de mesure des particules fines

IV.1 - La pollution particulaire atmosphérique en milieu urbain

L'étude de la pollution particulaire est très difficile compte tenu de son hétérogénéité, elle-même liée à la diversité des sources, à la composition chimique des effluents, à l'état physique et granulométrique des particules et à la dynamique d'évolution (conversion gaz-particules).

Le domaine de dimension des particules dans l'atmosphère s'étend de 1 nanomètre environ (agrégats moléculaires) jusqu'à 100 micromètres (poussières industrielles ou naturelles).

La distribution peut être modélisée par une loi log-normale où l'on distingue 3 modes [72] :

- ✓ Le mode de « nucléation », concerné par les particules ultra-fines (entre 5 nm et 0,1 μm). Il est issu des procédés de combustion (ex : moteurs diesel),
- ✓ Le mode d'« accumulation » (particules de diamètre entre 0,1 et 2 μm) relatif à la coagulation et à l'agglomération rapides des particules ultrafines,
- ✓ Le mode des « grosses particules », de diamètre supérieur à 2 μm , essentiellement issues d'activités mécaniques.

Citons par exemple les particules engendrées par l'érosion, l'usure des pneumatiques sur la chaussée. Pour un réseau de surveillance de la qualité de l'air, les particules en suspension désignent un type de particules pouvant être inhalées et se retrouver en fonction de leur diamètre et de leur taille à différents niveaux de l'appareil respiratoire humain [73].

S'agissant de la composition chimique, 4 composantes majoritaires sont distinguées :

- ✓ La matière géologique (oxydes d'aluminium, de silicium, de calcium, de titane et de fer),
- ✓ Le carbone (organique et élémentaire),
- ✓ Le soufre (généralement sous forme de sulfates),
- ✓ L'azote (sous forme de nitrates ou d'ammoniums).

Il convient de noter qu'une distribution en masse privilégiera les plus grosses particules alors qu'en nombre, les particules inférieures à 0,1 μm constituent plus de 90 % de l'aérosol atmosphérique [74].

S'agissant de l'aérosol Diesel, le diamètre médian des particules en sortie d'échappement avoisine 0,1 μm . Ces particules sont composées de particules de carbone (suies) sur lesquelles sont adsorbés des substances minérales (sulfates, dérivés soufrés) et des hydrocarbures, entre autres des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) tels que le benzo-a-pyrène, le fluoranthène, le phénanthrène...etc, dont les propriétés cancérigènes sont reconnues[75].

IV.2 - Mesure des particules dans les réseaux de surveillance

La surveillance de la qualité de l'air est basée sur la mesure de concentrations en polluants de l'atmosphère. Cette concentration s'exprime essentiellement en unité de masse par unité de volume d'air prélevé et le plus fréquemment en microgramme de polluant par mètre-cube d'air.

Contrairement à la métrologie des gaz, il est difficile de disposer de matériaux de référence, permettant entre autres d'effectuer des évaluations d'instruments de mesure. Les diverses techniques de mesure existantes varient selon le type de particules surveillées et débouchent sur des résultats notablement différents selon la technique utilisée.

D'un point de vue métrologique, les réseaux de mesure utilisent dans la plupart des cas un fractionnement granulométrique ciblé sur 10 μm , pour des raisons sanitaires dans la mesure où il est estimé que la fraction de particules inférieures à cette valeur peut être inhalée.

Deux aspects sont donc à considérer :

- ❖ Les principes et les dispositifs d'échantillonnage utilisés (présence ou non d'une tête de fractionnement granulométrique),
- ❖ Les systèmes de mesure de concentration massique particulaire en fonctionnement systématique en réseau.

Toutes les stations fixes ne sont pas identiques. Suivant leur emplacement, les polluants mesurés vont différer. Il existe 5 types de station [76]:

✓ **Les stations urbaines denses**

Elles mesurent la pollution moyenne sur une agglomération. Elles sont situées dans des quartiers densément peuplés (entre 3000 et 4000 habitants/km²). Elles ne doivent pas être exposées directement à une source de pollution et représentent ainsi l'air inhalé par la majorité des citoyens.

Ces stations mesurent les teneurs en particules en suspension, en oxydes d'azote (NO et NO₂), en ozone (O₃), et en dioxyde de soufre (SO₂).

✓ **Les stations périurbaines**

Elles sont situées en périphérie des grandes villes et ont pour rôle l'étude de l'évolution de polluants photochimiques comme l'ozone (O₃).

✓ **Les stations rurales**

Le but est de mesurer les teneurs de fond en ozone (O₃). Aussi, ce type de station est implanté dans des zones de population faible et éloignée de toute activité importante.

✓ **Les stations de proximité industrielle**

Elles doivent se trouver à proximité d'une source zone industrielle émettrice de polluants. Leur objectif est la mesure de l'impact d'une source ponctuelle sur la qualité de l'air.

✓ **Les stations de proximité automobile**

Elles doivent mesurer la pollution maximale respirée en ville; aussi, elles doivent être implantées à moins de 10 m d'une route à grand trafic routier dont la densité de circulation doit être supérieure à 10 000 véhicules par jour. Sur ces stations, il est nécessaire d'utiliser un comptage des véhicules.

Les polluants mesurés sont uniquement ceux d'origine automobile (le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO et NO₂), les particules en suspension).

Ainsi lors d'une campagne de mesure, il est important de caractériser le site de mesure et d'identifier le type de station étudiée.

IV.3 - L'échantillonnage des particules

Il est reconnu que l'efficacité de collecte des particules en suspension de diamètre inférieur à 100 µm n'approche 100 % que pour les tailles de particules approximativement inférieures à 3 µm. Au-delà de cette dimension, cette efficacité est fortement influencée par les conditions météorologiques (vitesse du vent) et de prélèvement (débit d'aspiration, position et conception du dispositif de captation). Pour des vitesses de vent constantes, l'efficacité de collecte décroît lorsque le diamètre des particules augmente. Le standard américain est souvent cité en exemple.

Jusqu'en 1982, la norme américaine visait la totalité des particules en suspension (Total Suspended Particulate : TSP) incluant les particules de diamètre inférieur à 100 µm. Puis l'étude des particules inférieures à 10 µm a été préconisée. Depuis quelques années, le concept PM-2.5 (diamètre inférieur à 2,5 µm) a fait son apparition. Certaines études spécifiques visent même les particules de taille inférieure à 1 µm (PM-1) [73].

En général, le dispositif de prélèvement est constitué d'une entrée d'air sommaire (entonnoir, filtre ouvert) ou plus sophistiquée (tête de prélèvement), d'un support de collecte (filtre ou plaque d'impaction), d'une pompe et d'un régulateur de débit. Dans les cas fréquents de surveillance de la qualité de l'air, deux catégories de prélèvement sont distinguées selon la précision de la coupure granulométrique :

IV.3.1 - Les prélèvements sans coupure granulométrique précise

Ils sont généralement effectués selon l'une des trois techniques suivantes :

- ❖ La méthode de mesure dite des « Fumées Noires » à faible débit d'aspiration (85 L.h⁻¹) privilégie la captation sur filtre des particules fines inférieures à environ 5 µm constituant des suies et imbrûlés émis par les unités de combustion fixes et mobiles[77].
- ❖ Les prélèvements sur filtre ouvert de 47 mm, généralement en nitrate de cellulose de porosité 0,8 µm, à un débit relativement élevé (de 1 à 1,5 m³.h⁻¹) où les particules de diamètre supérieur à 0,3 µm sont retenues quantitativement sur le filtre. Les caractéristiques du filtre sont importantes lors de son choix : risque de colmatage, stabilité chimique, aptitude au transport et à la manipulation, facilitation des analyses chimiques ultérieures.
- ❖ Les échantillonneurs HVS (High Volume Sampler) à grand débit (plus de 1 m³.min⁻¹) configurés en mode TSP dont l'efficacité de collecte des particules de grand diamètre est significative (de 25 à 40 % à 30 µm).

IV.3.2 - Les prélèvements avec coupure granulométrique

Ils sont effectués à l'aide de matériels séquentiels ou automatiques équipés d'une « tête » qui, par sa conception, ne capte en théorie que des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à une certaine valeur.

L'efficacité de collecte d'une particule varie suivant son diamètre aérodynamique comme l'indique la figure N°IV.1 Le seuil de coupure granulométrique d'une tête est la valeur du diamètre aérodynamique correspondant à une efficacité de 50 %.

Aucune tête de prélèvement n'est donc strictement sélective, c'est-à-dire laisse passer 100 % des particules inférieures à une valeur annoncée et exclut 100 % des particules plus grandes que cette valeur. Une tête d'un certain seuil de coupure prélèvera donc également des particules plus grandes que ce diamètre annoncé.

Le seuil de coupure est fonction du débit d'aspiration, du colmatage du filtre et des conditions de température et de pression ambiantes [78].

Les appareils de mesure de concentration en particules doivent donc maintenir le débit d'aspiration imposé (ex : $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) de façon à avoir un seuil de coupure constant au niveau de la tête.

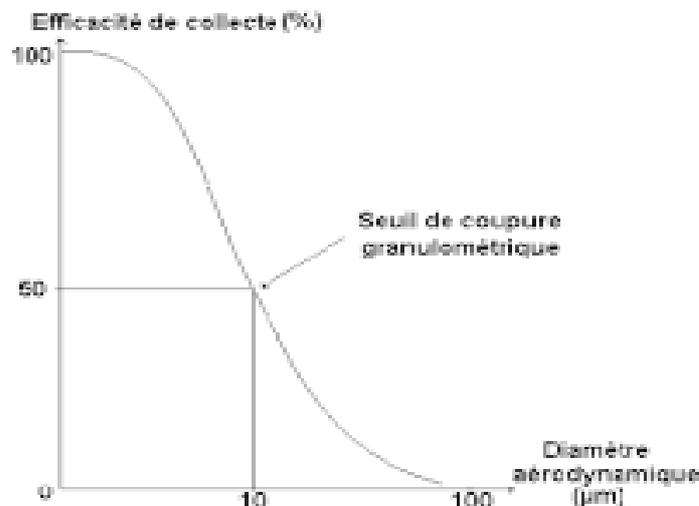


Figure N°IV.1 : Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement [78].

A). La tête de prélèvement française normalisée AFNOR NF X43-021

Cette tête, décrite sur la figure N°IV.2, équipait l'ensemble du parc d'appareils de type PPA60 et jauge bêta jusqu'en 1995.

Elle fonctionne avec un débit d'aspiration de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et la coupure granulométrique annoncée à $10 \mu\text{m}$ serait plutôt aux alentours de $13 \mu\text{m}$ d'après les essais réalisés en Grande-Bretagne par le Warren Spring Laboratory [80], de plus, elle est en fonction du vent. Ceci explique en partie pourquoi cette tête a été abandonnée au profit de la tête PM-10.

Toutefois, une part non négligeable des appareils actuels est encore équipée de cette tête [79].

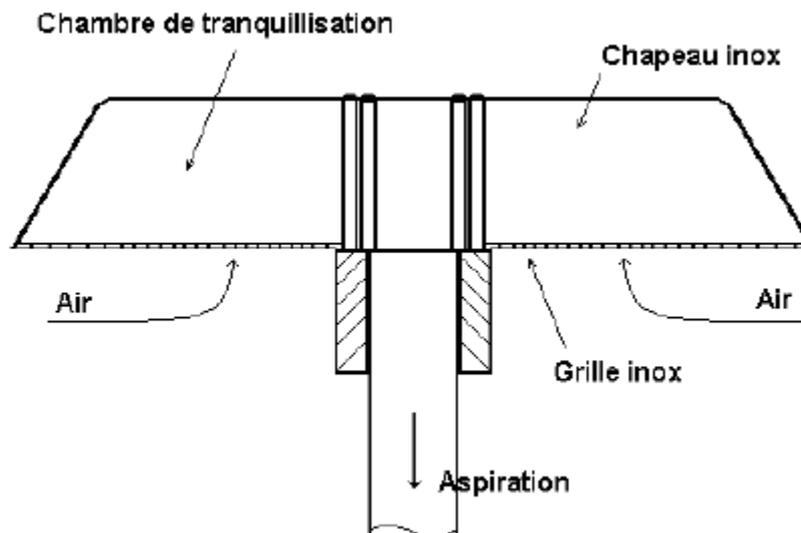


Figure N°IV.2 : Tête de prélèvement NF X 43-021 [79].

B). La tête type PM-10 d'origine américaine

Le principe de séparation de la tête PM-10, schématisée sur la figure N°IV.3, est l'impaction par effet aérodynamique induit par un système de chicanes, les particules plus grosses que le seuil de coupure percutent par inertie une surface d'impaction graissée pour éviter tout phénomène de ré-envol.

Le seuil de coupure granulométrique est annoncé à $10 \mu\text{m}$ pour un débit d'aspiration fixé à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les caractéristiques de la tête seraient peu influencées par la vitesse du vent selon des travaux menés aux États-Unis [81].

Un tube d'adduction chauffé sur toute sa longueur relie la tête au système d'accumulation ou de mesure également thermostaté à plus de 30 °C afin d'éviter toute condensation sur les parois. Cependant, il faut noter que l'augmentation de température de l'air prélevé peut entraîner une perte de masse des particules par volatilisation de certains composés organiques [82].

Cette tête équipe l'ensemble des appareils récemment implantés dans les réseaux (jauge bêta depuis 1995, microbalance à variation de fréquence).

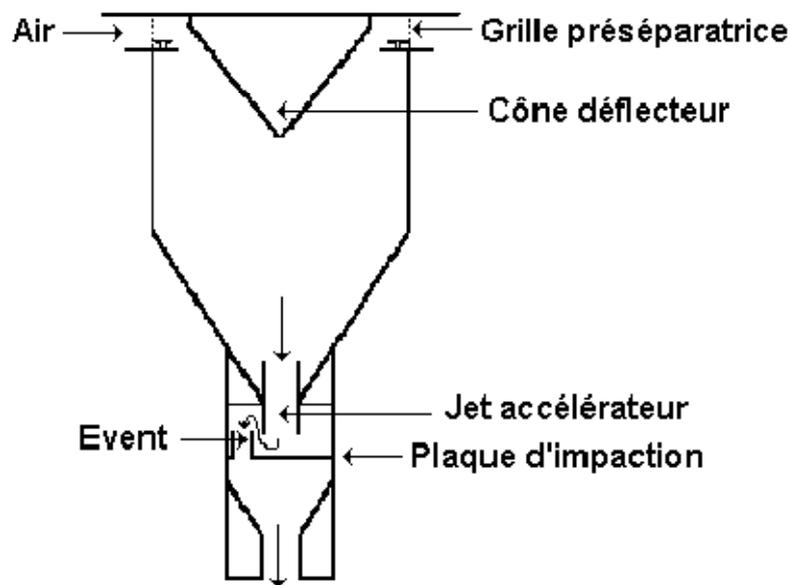


Figure N°IV.3 : Tête de prélèvement PM-10 [82].

C). La tête type PM-2.5 d'origine américaine

Cette tête représentée sur la figure N°IV.4 est proposée par les constructeurs sur des appareils tels que la microbalance à variation de fréquence.

La coupure granulométrique annoncée à 2,5 μm pour un débit d'aspiration fixé à 1 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ est obtenue par un système de type « cyclone », les particules de diamètre supérieur étant récupérées dans un réceptacle amovible.

Contrairement à la tête PM-10, ce dispositif n'est pas démontable en vue d'un éventuel nettoyage [82].

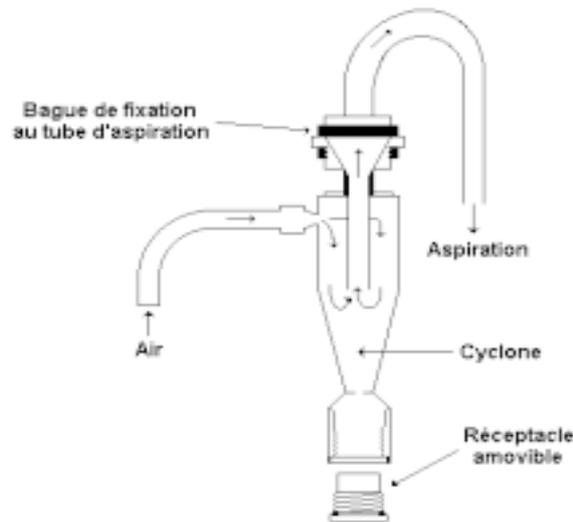


Figure N°IV.4 : Tête de prélèvement PM-2.5 [82].

IV.3.3 - Les prélèvements avec fractionnement granulométrique

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inhalables. 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 élevé (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.

IV.4 - La mesure de la concentration massique particulaire en réseau

L'appréciation de la charge globale en particules s'effectue en réseau par quatre méthodes : gravimétrie, radiométrie bêta, réflectométrie et variation de fréquence.

IV.4.1 La méthode gravimétrique (échantillonneur à grand débit)

Cette méthode simple consistant à peser des filtres avant et après prélèvement est cependant astreinte à des servitudes d'utilisation [83] : le relevé des filtres est manuel, les filtres

empoussiérés doivent être pesés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les filtres vierges, sans perte de matière lors des manipulations.

Eu égard aux concentrations atmosphériques urbaines (quelques dizaines de microgrammes par mètre cube d'air) la durée d'échantillonnage peut difficilement être inférieure à 24 heures. Cependant, le HVS de marque Andersen équipé d'une tête PM-10 est considéré au niveau européen comme une référence pour l'échantillonnage de la fraction PM-10 des particules en suspension [84].

Les filtres en fibre de verre sont bien adaptés à la mesure gravimétrique, ils ne se colmatent pas trop vite mais ils peuvent contenir des impuretés pouvant gêner des analyses chimiques ultérieures. A contrario, certaines membranes filtrantes adaptées aux analyses physico-chimiques le sont moins vis-à-vis de la gravimétrie : colmatage rapide, perte de charge trop importante, mauvaise tenue mécanique.

IV.4.2 La réflectométrie (indice de Fumées Noires)

L'air échantillonné passe au travers d'un papier filtre sur lequel se déposent les particules. L'analyse du filtre, effectuée ultérieurement par réflectométrie, consiste à éclairer le filtre par de la lumière visible et à mesurer les intensités incidente I_0 et réfléchie I . La réflectance I/I_0 qui varie de 100 à 0 % suivant le degré de noircissement du filtre est convertie par le biais d'une courbe d'étalonnage en concentration de fumées noires par unité de surface. La connaissance du débit permet de calculer un indice de fumées noires en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La courbe d'étalonnage est établie pour un type de papier filtre et un réflectomètre donnés.

Cette technique, bien que relativement ancienne, peut être considérée comme un bon traceur de la pollution par les véhicules diesel. Cependant, elle doit être utilisée avec discernement hors des zones strictement urbaines en raison du changement de couleur des particules.

L'appréciation du respect des nouvelles directives européennes à partir de ce type de mesure apparaît délicate [7].

IV.4.3 La radiométrie (jauge bêta)

Le principe est de mesurer la masse particulaire par atténuation d'un rayonnement bêta. La nature des particules n'a qu'une faible incidence. Cette technique est reconnue équivalente à une mesure pondérale [15].

La durée d'échantillonnage minimale varie entre 1 et 24 heures suivant le type d'environnement. En réseau, deux générations d'appareils sont implantées : la jauge MPSI 100 équipée de la tête de la norme NF X43-021 et la jauge MPS101 plus récente munie de la tête PM-10.

Il faut noter que ce type d'appareillage est soumis à de fortes contraintes administratives : nécessité d'une autorisation de détention de source radioactive, servitudes d'utilisation.

IV.4.4 La microbalance à variation de fréquence (TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance)

Cet appareil est un système de mesure en continu entièrement informatisé.

Il est constitué d'une tête de prélèvement, d'une microbalance à élément oscillant, d'une unité de contrôle et de commande et en option d'un accumulateur sur filtres destinés principalement à des analyses différées (système ACCU). La tête de prélèvement de type PM-10 fonctionne à

un débit d'aspiration de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $180 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ étant consacrés à la microbalance, l'excédent ($820 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) pouvant être utilisé par le système ACCU.

Un filtre est installé sur un élément oscillant à une fréquence donnée. Les particules déposées augmentent la masse du système produisant une décroissance de la fréquence de vibration. Cette variation de fréquence est enregistrée en permanence par l'unité de contrôle, elle est ensuite convertie en masse.

Des tests ont montré que l'appareil est peu sensible aux vibrations extérieures [13].

Les paramètres tels que le débit d'aspiration, la température du conduit d'adduction, la température de l'enceinte sont consignés et réglés par l'unité de contrôle.

Le débit est maintenu constant quelles que soient les pression et température ambiantes mesurées en continu. Il est à noter qu'à l'heure actuelle, dans les réseaux français, seul cet appareil effectue cet ajustage en continu.

Le pas de temps de mesure est modulable de 10 minutes à 24h comme pour un analyseur de gaz conventionnel.

Le circuit auxiliaire ACCU peut être utilisé pour prélever les poussières sur filtre, 8 filtres sont exposés séquentiellement (un filtre sur un pas de temps choisi) ou conditionnellement (exposition à partir d'une valeur seuil de concentration) ou encore pour un événement météo (microbalance équipée d'un anémomètre).

IV.4.5 La mesure optique

La mesure par diffusion lumineuse de la concentration en nombre de particules par un compteur optique est encore peu utilisée dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Bien que donnant des informations intéressantes, notamment sur la taille des particules, cette méthode nécessite des études complémentaires concernant:

- ❖ L'étalonnage et son contrôle par l'utilisateur.
- ❖ La possibilité de convertir une concentration en nombre en une concentration en masse.

L'utilisation d'appareils tels que les compteurs optiques de particules semble donc pour l'instant devoir se limiter à des mesures ponctuelles permettant par exemple de choisir un site avant l'implantation d'une station.

IV.5 - Problème du choix de site de prélèvement

Les différentes méthodes décrites précédemment sont adaptées à des prélèvements en réseau à poste fixe. Le choix d'un site de prélèvement est fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller. L'objet de la surveillance étant notamment d'apprécier le risque individuel d'exposition des êtres humains à des niveaux élevés de pollution, il est nécessaire de sélectionner des sites représentatifs de types de pollution et de niveaux d'exposition. On distingue essentiellement deux sortes de stations de mesure; de proximité et urbaine dense. Une station de proximité est installée sous l'influence directe d'une source locale spécifique (usine, circulation automobile...). En général, pour la surveillance de l'impact du trafic routier, le point de prélèvement est implanté sur le bord de l'axe de circulation. Ce type de site a pour objectif de mesurer les concentrations maximales auxquelles les citoyens risquent d'être exposés, même pour de courtes périodes de temps.

Une station urbaine dense doit rendre compte d'une exposition moyenne et de longue durée en zone urbanisée et fournir une représentation spatio-temporelle fiable du champ de pollution dans lequel évoluent les citoyens. Elle ne doit donc pas être influencée directement par des sources industrielles ou automobiles mais doit être installée de façon à être représentative du niveau ambiant général, pour une densité de population suffisante [85].

Les niveaux de pollution sont plus élevés dans les sites de proximité, notamment en ce qui concerne la pollution particulaire. Lors de l'implantation des stations de mesure permanentes ou ponctuelles, il est donc impératif de bien définir le type de pollution ciblée.

IV.6 - Les filtres et membranes de rétention

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

- ✓ Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égale à $0,3\mu\text{m}$ et plus ;
- ✓ Une hygroscopicité faible ;
- ✓ Un taux d'impureté aussi faible que possible afin d'éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

Les filtres les plus utilisés sont :

- **Les filtres à fibre de verre**

Ils ont une efficacité de collection de 99% pour les particules de diamètre supérieur à $3\mu\text{m}$. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosols du dioctyl-phalate. L'hygroscopicité de ces filtres est faible.

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à de teneurs élevées. Les filtres Gelman type A et Whatman GF-A contiennent par exemple plus de $50\mu\text{g Zn/m}^2$ [88].

- **Les filtres membranes**

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

Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité de l'ordre de $8\mu\text{m}$. Ces filtres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques.

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

Avec les deux types de filtres (en fibres de verre et membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de $0,1\mu\text{m}$ de diamètre [88].

IV.7 - Analyse physique des particules

IV.7.1 Détermination de la masse des particules

❖ Pesée

Après conditionnement du filtre, à température et à humidité constante, on pratique le plus souvent une pesée de façon à connaître la quantité de TSP déposée sur le filtre. Cette méthode est la moins coûteuse et la plus rapide, mais elle comporte beaucoup de risques.

Entre le conditionnement au laboratoire, l'échantillonnage sur le terrain et la pesée de retour au laboratoire, les pertes peuvent être importantes.

La principale difficulté réside dans la constance de l'humidité lors des pesées avant et après filtration.

❖ Mesure par rayonnement

On interpose le filtre, chargé de particules, sur le trajet d'un rayonnement β émis par une source radioactive (souvent du Krypton 85). Le rayonnement est atténué en traversant le filtre et cette atténuation est proportionnelle à la quantité de matière traversée, donc à la masse de particules:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot X)$$

Avec : X l'épaisseur traversée et μ un coefficient d'atténuation proportionnel à la densité des particules [89].

On mesure l'émission radioactive :

- En l'absence de filtre \rightarrow blanc donnant la valeur I_0
- Avec le filtre \rightarrow mesure donnant la valeur I.

La mesure exacte n'est possible que si le filtre est chargé uniformément et sans épaisseur exagérée.

L'appareil jauge β travaille selon ce principe.

IV.7.2 Détermination de la forme des particules

On détermine la forme des particules par microscopie électronique à balayage (MEB), pour des particules de taille comprise entre 0,001 et 1,0 μm (Figure N°IV.5). La couche sur le filtre doit être une quasi-mono couche. Ceci est donc possible si le filtre est peu chargé. En général on ne peut ensuite effectuer d'analyse chimique car le bombardement électronique produit des dégradations de matière organique et volatilise certains composés [90].



Figure N°IV.5 : Formes de particule [90].

IV.7.3 Détermination du nombre de particules

Le nombre de particules est déterminé par diffusion d'une lumière incidente sur les particules. Le coefficient de diffusion b_p est lié au nombre de particules de façon linéaire.

Pour mesurer ce coefficient on utilise un compteur à diffusion qui mesure la lumière sous tous les angles.

On détermine le nombre de particules si on connaît le coefficient total de diffusion b_{tot} et le coefficient b_g du aux gaz seuls (pour l'air filtré, b_g est égal à $2,8 \cdot 10^{-5} m^{-1}$, à 460 nm).

Par différence on détermine le coefficient de diffusion b_p lié aux particules, soit :

$$b_p = b_{tot} - b_g.$$

Certains paramètres peuvent affecter le coefficient de diffusion tels que la composition chimique et l'humidité relative si celle-ci est supérieure à 70% [91].

❖ Compteurs optiques

Les aérosols diffusent la lumière. La diffusion dépend de l'indice de réfraction et de la taille des particules. En admettant que les particules soient sphériques, on peut calculer - pour diverses longueurs d'onde et angles d'incidence - la lumière diffuse. Ceci est valable pour un indice de réfraction donné, donc pour un type de particules donné. Le calibrage nécessite l'emploi d'un aérosol de même indice de réfraction.

L'appareil couramment utilisé est le compteur dit GRIMM, du nom de son inventeur. Il permet de déterminer le nombre de particules par unité de volume d'air, pour 15 classes de particules de tailles comprises entre 0,3 et 20 μm .

❖ Compteurs de noyaux de condensation

Ces compteurs très voisins des compteurs précédents par leur principe, sont dédiés à la mesure des fines particules (de 0,001 à 0,05 μm).

Le principe: on injecte de très fines particules dans un air sursaturé de vapeur d'eau ou d'alcool (butanol ou propanol). Les vapeurs se condensent pour former des gouttelettes.

Par expansion adiabatique de la chambre de mesure, on crée un refroidissement brutal et donc une condensation. Les particules grossissent car elles sont enveloppées de liquide. Elles sont alors suffisamment grosses pour qu'une mesure soit possible.

IV.8 - Méthode d'analyse chimique

Il n'existe pas, comme pour les gaz, des méthodes générales bien adaptées à l'analyse des particules. Les méthodes sont presque toujours des méthodes différées dans le temps, par rapport à la collecte. A l'heure actuelle, Il n'existe aucune mesure globale automatique. Les artifices de collecte sont toujours possibles et la non universalité des méthodes favorise l'analyse de certains composés au détriment d'autres. Dans tous les cas les méthodes diffèrent pour l'analyse de la phase minérale et de la phase organique.

IV.8.1 Analyse de la matière organique

❖ Extraction de la matière organique

En général, on extrait la matière organique du filtre, par une extraction ultrasonique, à l'aide de solvants organiques polaires et/ou non polaires. L'extrait est concentré, soit par évaporation à l'évaporateur rotatif, soit par passage d'un débit d'azote sec, puis il est éventuellement purifié par passage sur une colonne chromatographique. Les échantillons recueillis correspondant aux diverses fractions diffèrent par leur polarité. On trie ainsi l'échantillon par familles chimiques. On peut aussi procéder à une chromatographie d'exclusion sur gel de silice, destinée à trier les composés suivant leur masse moléculaire.

En fin, l'extrait est repris dans un autre solvant organique compatible avec l'analyse finale.

❖ Analyse chromatographique

L'analyse proprement dite des fractions organiques est effectuée par : Chromatographie en phase gazeuse (CPG) :

- A. On emploie le plus souvent un détecteur universel comme le FID (flame ionization detector).
- B. Pour les composés soufrés on emploie un détecteur spécifique FPD (flame photometric detector).
- C. Pour les composés halogénés et les pesticides on emploie un détecteur à capture d'électrons ECD (electron capture detector).

On couple souvent la GC à un spectromètre de masse [92].

❖ Chromatographie liquide (HPLC)

Couplée à un détecteur UV ou de préférence, fluorescence l'HPLC est utilisé pour l'analyse des hydrocarbures aromatique lourds (HAP). Cette méthode peut être complétée par un dérivatisateur permettant à l'aide d'une réaction chimique appropriée, à la sortie de la colonne d'éluion de rendre le produit fluorescent, donc de permettre une quantification des traces, puisque la fluorescence est une méthode ultra sensible. C'est le cas des nitro-HAP non fluorescents qui sont réduits en amino-HAP, très fluorescents, après passage de la solution extraite sur une colonne catalytique réductrice [92].

IV.8.2 Analyse des éléments inorganiques et des métaux

❖ Fluorescence X

Un faisceau, émis par une cathode spécifiquement choisie pour l'analyse d'un élément, est dirigé directement sur le filtre, sans traitement préalable. L'intensité du rayonnement émis est proportionnelle à la concentration de l'élément.

Cette mesure est rapide et permet l'analyse de nombreux échantillons, même peu chargés en matière particulaire. Elle nécessite néanmoins un étalonnage fréquent avec des filtres sur lesquels on dépose des solutions de titre connu, contenant l'élément recherché en concentration variable. La méthode est quantitative mais réservée aux éléments plus lourds que le magnésium.

❖ PIXE et Activation Neutronique

Ces méthodes sont proches de la fluorescence X. Seule l'agent exciteur change. L'échantillon est bombarde par des protons dans la spectroscopie PIXE (photon induced X electron) ou par des neutrons en activation neutronique. Les éléments sont excités, induisant un rayonnement X. On mesure la radioactivité induite par l'échantillon excite. Le rayonnement utilise les longueurs d'onde « discrètes » spécifiques de chaque élément. Ces méthodes sont complémentaires de la fluorescence X, car les éléments ne pouvant pas être analyses par une méthode le sont correctement par une autre.

❖ Absorption atomique

Cette méthode est largement employée pour l'analyse des particules. Elle nécessite un traitement et une destruction préalable du filtre par attaque acide. L'échantillon en solution est vaporisé dans une flamme. Un faisceau lumineux produit par une lampe spécifique, traverse la flamme et atténué proportionnellement à la concentration de l'élément présent dans la flamme, suivant la loi de Beer Lambert. On peut aussi utiliser un four à la place d'une flamme.

❖ ICP

La méthode par torche à plasma, appelée ICP (Inductively Coupled Plasma) permet de déterminer les concentrations de presque tous les éléments inorganiques et métaux. Les éléments sont ionisés par une torche à plasma.

IV.8.3 Analyse des ions

❖ Colorimétrie

La méthode colorimétrique donne des résultats valables pour des ions, tels que les sulfates, nitrates ou les ions ammonium. Ainsi les nitrates sont réduits en nitrites par l'hydrazine en présence de cuivre : Le dérivé azoïque formé est mesuré à 524 nm [91, 92].

❖ Chromatographie ionique (CI)

Cette méthode est maintenant très employée. Elle permet l'analyse rapide de tous les ions simultanément. Les ions sont détectés par la mesure de leur conductivité électrique. Les sulfates et nitrates sont séparés sur une colonne basique par élution avec une solution de carbonate de sodium. On utilise un supprimeur qui est constitué d'une colonne contenant une résine imprégnée d'acide fort, permettant la conversion des carbonates en CO_2 et H_2O et celles des nitrates et sulfates en acides de haute conductivité. Les appareils se présentent comme des appareils de HPLC avec colonne et solvants. Ceux-ci sont aqueux et contiennent des tampons [91, 92].

CHAPITRE V

Chapitre V- Méthodologie

V- Méthodologie

On va présenter dans cette partie la méthodologie adoptée pour le prélèvement et l'analyse des PM-10, PM-3 et PM-1.

V.1 - choix du site de prélèvement

Le site est retenu pour l'étude des PM-10 et de leurs différentes fractions granulométriques PM-3, PM-1 ainsi que les métaux lourds qu'elles véhiculent, et est localisé au niveau de l'APC de Bach-Djerrah à l'est d'Alger. Ce site est situé au milieu des cités de la commune et il est considéré comme étant un site urbain à forte densité de population résidente.

En ce site le poste de prélèvement est implanté sur la terrasse de l'APC à environ 9 m du sol. Les coordonnées géographiques du site sont :

Latitude : 36°43'3.81°Nord

Longitude : 3°6'37.01°Est

Altitude par rapport à la mer : 55 m.

La figure N°V.1 donne la localisation du site de mesure (image Google Earth).



Figure N°V.1 : localisation du site de prélèvement

Chapitre V- Méthodologie

Les figures V.2 et V.5 sont prises de la terrasse de l'APC de Bach-Djerrah, et illustrent bien l'entourage qui enveloppe notre point de mesure.



Figure N°V.2 : Vue sur le côté ouest de l'APC.



Figure N°V.3 : Vue sur le côté sud de l'APC.

Chapitre V- Méthodologie

IV.2 - Technique d'échantillonnage

Le prélèvement par classe granulométrique des PM-i a été effectué à l'aide d'un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 (figure N°V.4) muni d'un cascadeur Sierra-Andersen (marque Graseby, USA) à 4 étages pour le fractionnement granulométrique (pour nos prélèvements on en a utilisé que deux ; l'un pour les PM-1 et l'autre pour les PM-3).

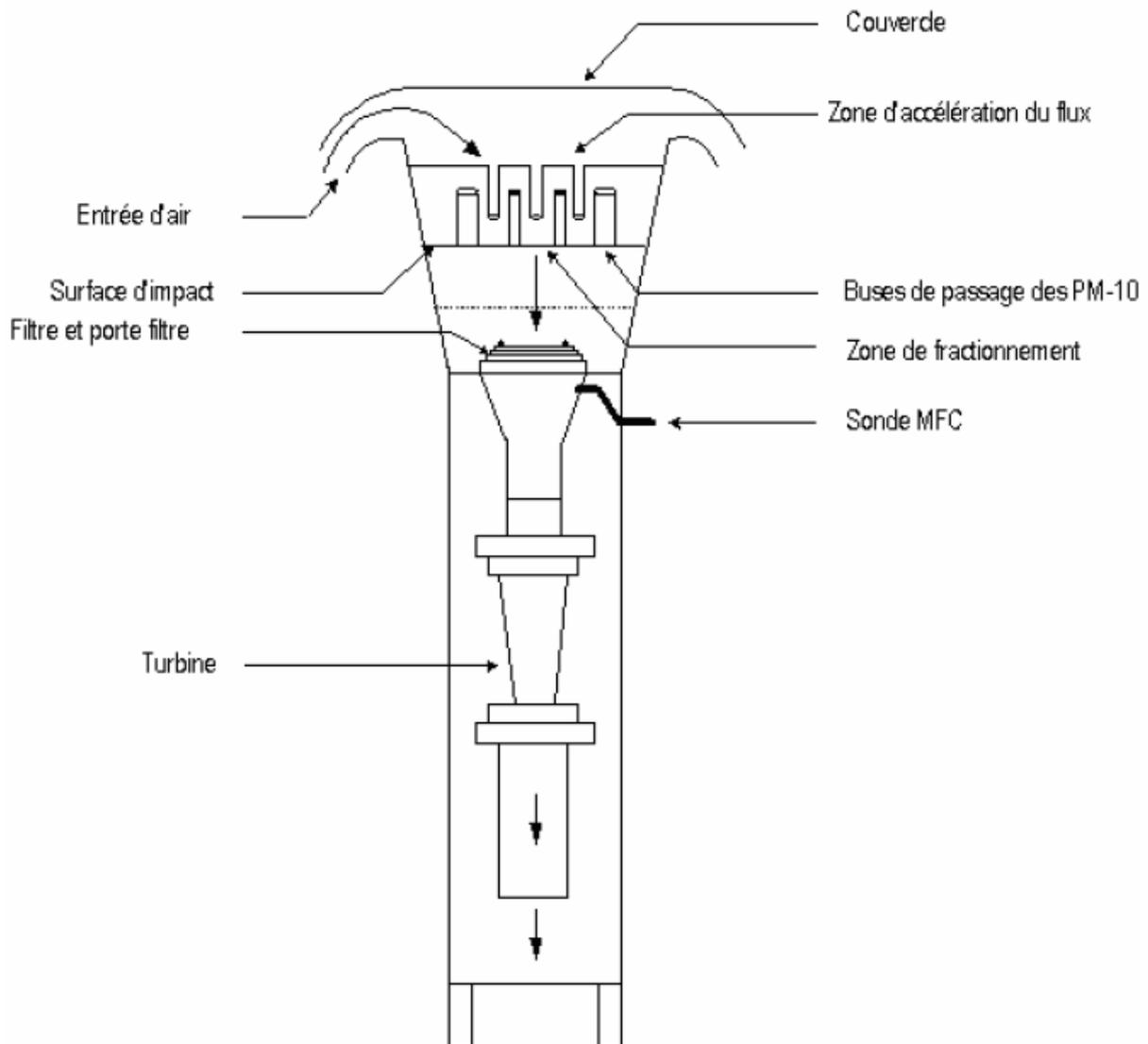


Figure N°V.4 : Schéma du principe de collecte des PM – i par l'échantillonneur HVS PM-10.

Chapitre V- Méthodologie

Cet échantillonneur qui a été largement décrit dans les travaux antérieurs [29], est constitué principalement de trois parties :

- Le High volume sampler (HVS) qui comprend la turbine d'aspiration, le compartiment porte filtre et le contrôleur du débit d'aspiration d'air.
- La tête sélective PM-10 qui fixe le seuil de coupure des particules à collecter à 10 μm . la séparation à ce seuil se fait par impact sur une surface plane.
- Le cascadeur d'Andersen qui permet le fractionnement granulométrique. Il est doté de quatre étages qui permettent d'accéder à 5 classes granulométriques mais pour notre cas on a utilisé deux étages seulement donnant les classes granulométriques :
 - ❖ 0-1 μm « PM-1 » et 1-10 μm « PM-(1-10) ».
 - ❖ 0-3 μm « PM-3 » et 3-10 μm « PM-(3-10) ».

Le principe de fonctionnement de l'échantillonneur est basé sur la différence de quantité de mouvement (ou d'énergie cinétique) des particules. Pour les trier par taille, il faut que la vitesse du fluide soit très bien contrôlée et connue, chose qui est assurée par un contrôleur électronique de débit le MFC (Mass Flow Controller). En raison de leur inertie, les particules ont tendance à effectuer un trajet direct alors que le flux de gaz est dévié par un obstacle. Les particules d'une masse définie, donc d'un volume et d'une taille définis et si leur densité est plus ou moins homogène, vont s'impacter sur cet obstacle (**filtre**). Les particules plus légères vont contourner l'obstacle et venir s'impacter sur un étage suivant, correspondant à un diamètre de coupure plus petit (figure V.5).

Pour les particules i de masse m_i , l'énergie cinétique est $E_i = 1/2 m_i \cdot V_0^2$ et la quantité de mouvement (impulsion) est $p_i = m_i \cdot V_i$

Le tri est correct si les particules ont des densités voisines. Dans ce cas, le tri par masse est équivalent à un tri par volume, donc par diamètre aérodynamique D_p .

On peut interposer sur le flux d'air plusieurs plaques avec des fentes de tailles de plus en plus petites (étages de 1 à 4). À la sortie des vides de l'étage N°01, où la vitesse V_1 , seules les particules de masse m_1 (masse élevée) sont impactées sur le filtre qui se trouve juste en dessous. La réduction de la taille du vide dans l'étage N°02, augmente la vitesse de l'effluent ($V_2 > V_1$) et les particules de masse m_2 (avec $m_2 < m_1$) seront alors impactées dans le filtre suivant, et ainsi de suite, donc plus la particule est de grande taille, plus sa masse est importante, plus tôt elle s'arrête, on recueille les grosses particules sur les premiers filtres et les petites sur les derniers filtres [26,88].

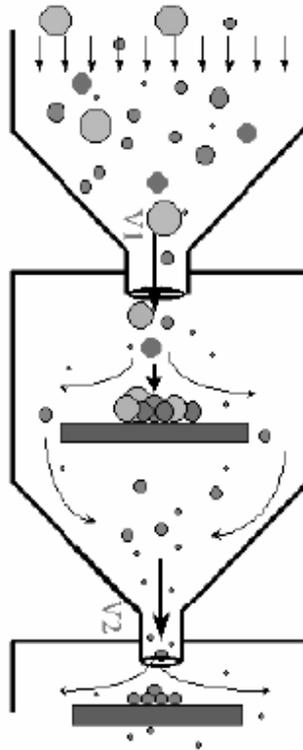


Figure V.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade [88].

Les étages sont posés sur un grand porte filtre sur le quel on met un filtre classique, dit « filtre total », qui recueille les très fines particules.

Les paramètres de fonctionnement sont :

- Le débit d'aspiration : $1,1\text{m}^3/\text{mn}$.
- La durée de prélèvement : 24 heures.

En fonction du volume d'air prélevé, on détermine alors la teneur atmosphérique des particules en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figure N°V.6 : Photos de l'appareil d'échantillonnage.

Les filtres de rétention des particules sont en fibre de verre (Wattman) de dimension 12X12 cm pour les différentes fractions et 20X20 cm pour le filtre final. Ces filtres sont pesés avant et après collecte à 0,1mg près. Le résultat est ensuite exprimé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Durant la période de prélèvement qui s'est étalée du 01/03/2009 au 09/06/2009 nous avons pu effectuer 20 prélèvements ; ce qui donne en moyenne 7 prélèvements par mois. Globalement on a pu recueillir 29 filtres chargés de particules de différentes classes granulométriques. Chaque prélèvement compte soit une, soit deux fractions de particules qui correspondent à l'un des étages utilisé.

Les figures V.7 et V.8 représentent les deux types de filtres utilisés tout au long de la période de prélèvement.

Chapitre V- Méthodologie



Figure N°7 : Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.



Figure N°8: Photo d'un grand filtre après prélèvement

V.3 - Minéralisation des échantillons et analyse des métaux lourds

Afin d'extraire les métaux lourds présents dans les particules fines collectées sur les filtres on procède à la minéralisation des échantillons.

La matière particulaire recueillie sur les filtres est mise en solution à reflux avec de l'acide nitrique et l'acide chlorhydrique (mélange volumique de 1/3). La préparation des échantillons à analyser est faite conformément à la norme **ISO 9885** [93].

La technique d'analyse utilisée pour la détermination des teneurs en métaux lourds présents dans les particules est la spectroscopie d'absorption atomique à flamme sur un appareil de type SOLAAR. Les métaux analysés sont le plomb, le cadmium, le fer, et le cuivre.

CHAPITRE VI

VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce qui suit, et après exploitation de nos données nous allons présenter:

- Les évolutions temporelles des teneurs atmosphériques des particules dans l'air.
- 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.

VI.1 - Etude de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines

VI.1.1 - Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 :

L'évolution des teneurs atmosphériques des particules PM-10 est caractérisée par les paramètres statistiques résumés dans le tableau N°VI.1.

La figure N°VI.1 illustre l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 mesurées pendant notre période de prélèvement.

Celles-ci oscillent entre $24\mu\text{g}/\text{m}^3$ et $136.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ et leur teneur moyenne s'élève à $93.9\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau N°VI.1 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-10

Paramètres	Valeur
Nombre de prélèvement	20
Teneur maximale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	136.7
Teneur minimale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24.0
Teneur moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	93.9
Ecart type ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13.2

Chapitre VI – Résultats et discussion

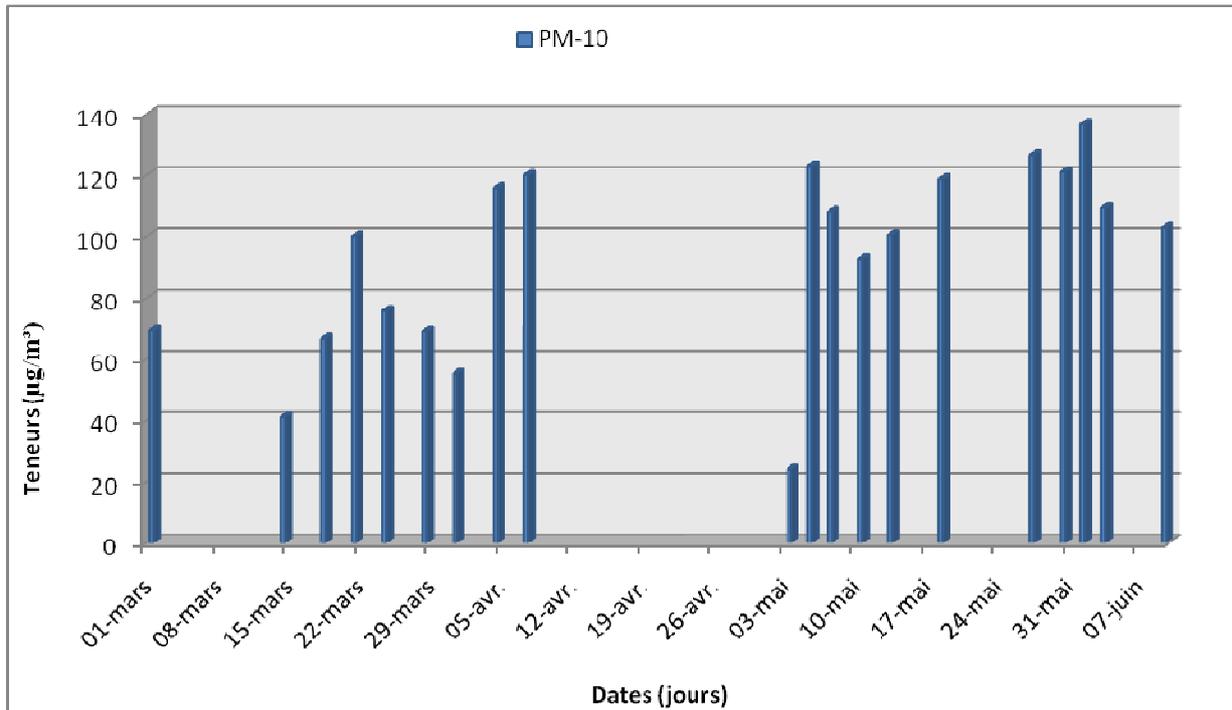


Figure N°VI.1 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10.

L'analyse à l'œil nu indique que les couches des particules collectées sur les filtres lors des prélèvements des PM-10 ont une couleur grise très foncée. Ceci peut nous renseigner sur la nature de ces dernières, on remarque donc qu'elles sont riches en suies et en imbrûlés issus des émissions du trafic routier et éventuellement des usines qui se trouvent dans les environs de la commune de Bach-Djerrah, ainsi que les chantiers aux alentours du site de prélèvement.

Durant la période du 7 Avril au 5 Mai on a rencontré des problème concernant la turbine de l'appareil.

Le domaine de dispersion des concentrations des PM-10 dans l'air, s'étale sur un rayon de $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la teneur moyenne de $93.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Au cours des deux jours du 14 mars et du 03 mai, on relève les teneurs les plus basses de l'étude. Durant cette période les conditions climatiques (fortes pluies, vent...) étaient favorables à la réduction des teneurs des particules présentes dans l'air (par lessivage de l'atmosphère et entraînement des particules vers des sites plus éloignés). Aussi, ces mêmes conditions ont probablement générées une réduction de la resuspension des particules déposées.

Chapitre VI – Résultats et discussion

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-3) et à la fraction très fine (PM-1), nous avons effectué des prélèvements avec fractionnement granulométrique.

Les fractions recueillies sur les deux étages du cascadeur d'Andersen sont de 10 à 3 μm et 3 à 0.01 μm (5 prélèvements ont été réalisés en ce qui concerne ces deux fractions), l'autre étage correspond aux fractions 10 à 1 μm et 1 à 0.01 μm (ceci a été fait pour les quatre autres prélèvements où on a utilisé des étages).

La figure N°VI.2 illustre l'évolution temporelle des différentes classes granulométriques.

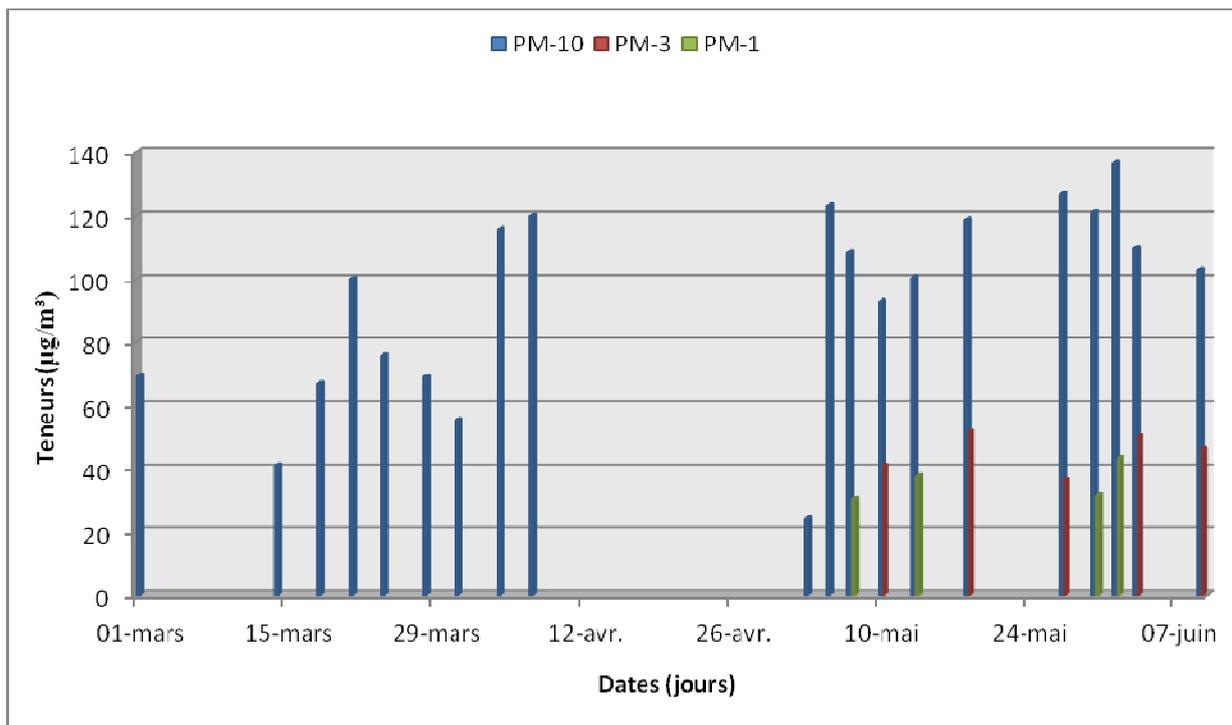


Figure N°VI.2 : Evolution temporelle des teneurs journalières des PM-i.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Le tableau N°VI.2 résume les teneurs moyennes et extrêmes des différentes fractions granulométriques ainsi que les rapports PM-i / PM-10.

Tableau N°VI.2 : Valeurs moyennes et extrêmes des différentes classes granulométriques.

Classe granulométrique	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecart type ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM-10	136.7	24.0	93.9	13.2
PM-3	51.5	36.3	45	6.3
PM-1	43.4	30.4	35.7	6.0

Les teneurs moyennes annuelles des particules alvéolaires PM-3 et des particules très fines PM-1 s'élèvent respectivement à $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et à $35.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La distribution massique, par classe granulométrique, des particules est illustrée dans les figures VI.3 et VI.4. Cette répartition montre que les particules alvéolaires PM-3 contribuent à un peu moins de la moitié (48%) de la masse totale des PM-10.

Comparé à d'autres études effectuées en milieu urbain [51,103] ce taux en PM-3 est relativement bas, habituellement il est de l'ordre de 55 à 65%. Ceci signifie qu'à Bach-Djerrah l'influence des particules d'origine naturelle et de diamètre supérieur à $3\mu\text{m}$ est importante.

Il s'agit probablement de l'impacte des proches chantiers et travaux du métro.

Le potentiel de nuisance des particules à Bach-Djerrah est aussi visible dans le taux élevé des PM-1 qui constitue presque le tiers de l'ensemble des particules collectées. Avec un taux de 31% ces dernières sont aussi à un niveau relativement bas et ce pour les mêmes raisons que dans le cas des PM-3.

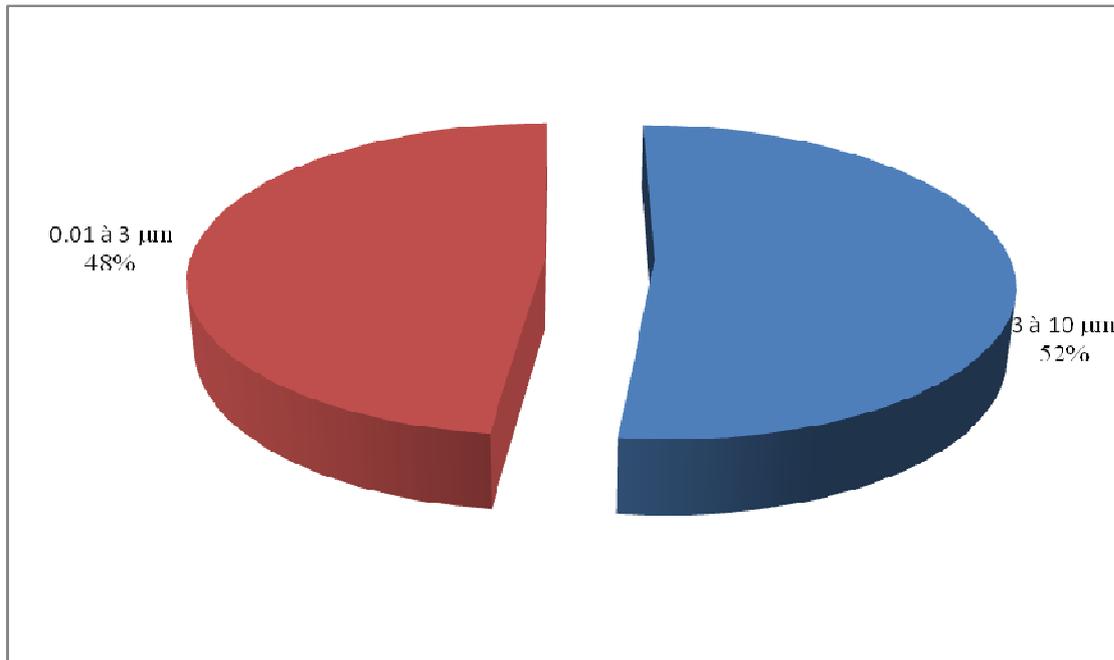


Figure N°VI.3 : Contribution massique des particules fines PM-3.

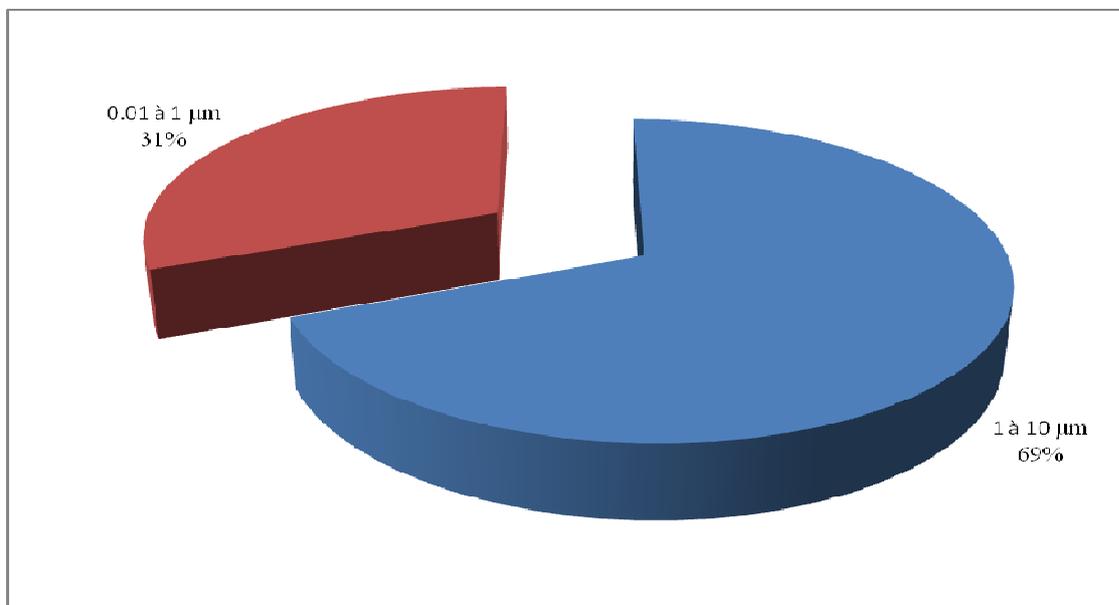


Figure N°VI.4 : Contribution massique des particules très fines PM-1.

Chapitre VI – Résultats et discussion

VI.1.3 - Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes de particules :

L'étude des corrélations entre les PM-i nous permettra de comprendre davantage l'origine et les mécanismes de formation des particules, dans ce site urbain.

A travers l'analyse des teneurs illustrées par les figures VI.5 et VI.6 nous pouvons constater que les couples de particules PM-10/PM-1 et PM-10/PM-3 n'évoluent pas toujours de la même manière, et semblent être indépendants l'un de l'autre et donc on peut dire que les particules sont émises par des sources différentes. Néanmoins un examen approfondi de cette évolution reste indispensable pour voir davantage si les différentes fractions sont influencées par les mêmes facteurs. C'est ainsi alors que nous traitons cas par cas les corrélations entre les teneurs des différentes classes des PM-i.

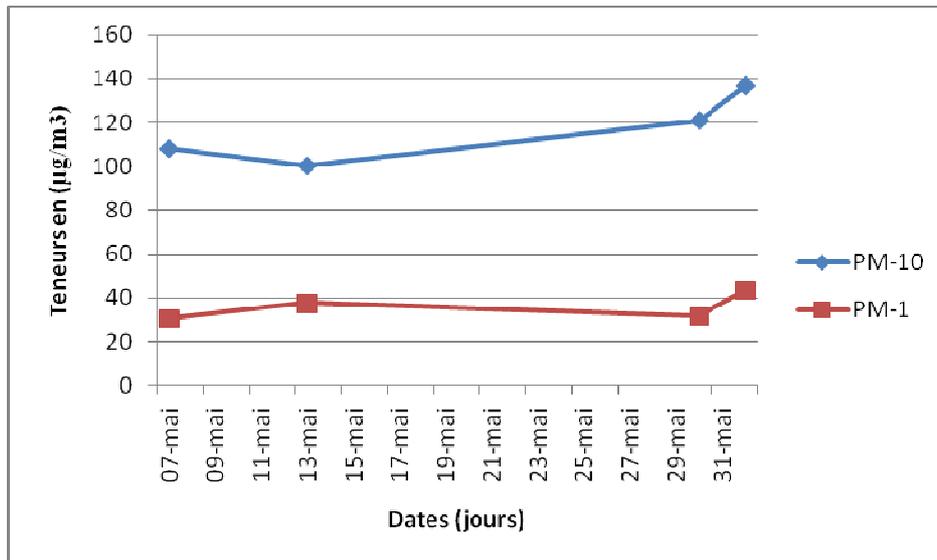


Figure N°VI.5 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-1

Chapitre VI – Résultats et discussion

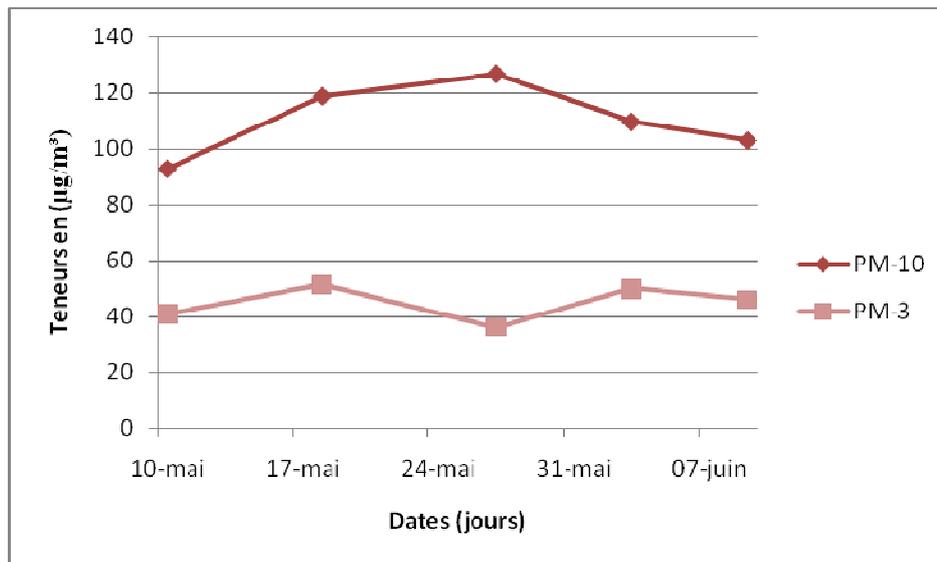


Figure N°VI.6 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-3

Sur les figures VI.7, VI.8, VI.9 et VI.10 nous illustrons les graphes qui permettent l'estimation des facteurs de corrélations entre les divers couples de PM-i qui sont prélevés simultanément.

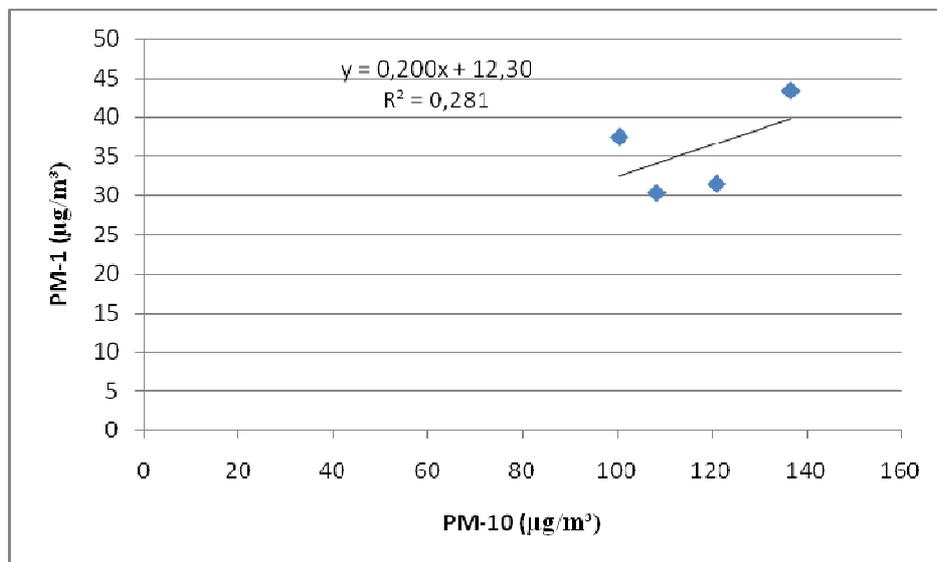


Figure N°VI.7 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-1.

Chapitre VI – Résultats et discussion

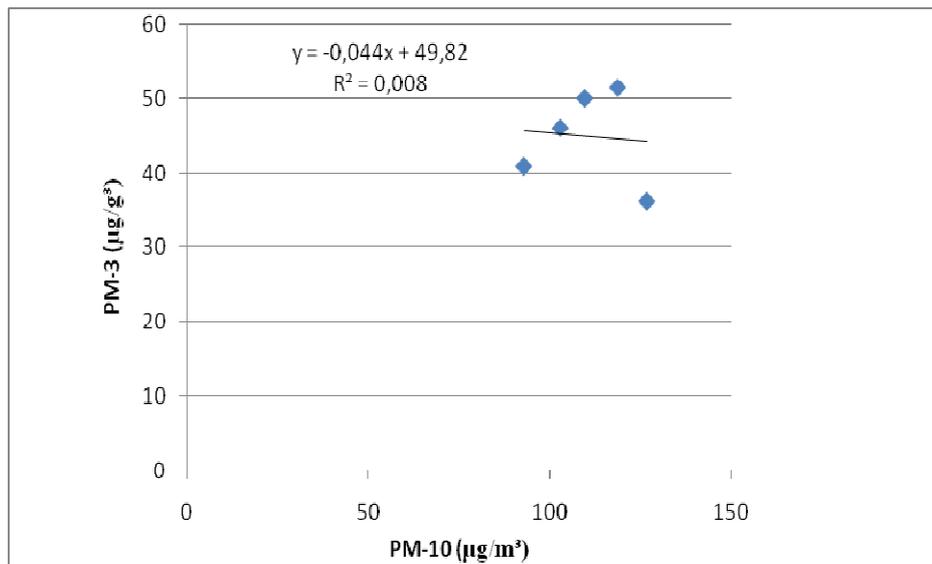


Figure N°VI.8 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-3.

Concernant les deux corrélations PM-10/PM-3 et PM-10/PM-1 les résultats indiquent des facteurs de corrélation très faibles. Ce résultat suggère que la formation des PM-10 est influencée par des sources de pollution autres que celles des PM-3 et PM-1, telles que les sources de l'écorce terrestre. En effet l'érosion des sols engendre des particules grossières [5].

Les PM-3 quant à elles, sont en général produites par des sources de combustion (trafic routier, industries,...) [94,95].

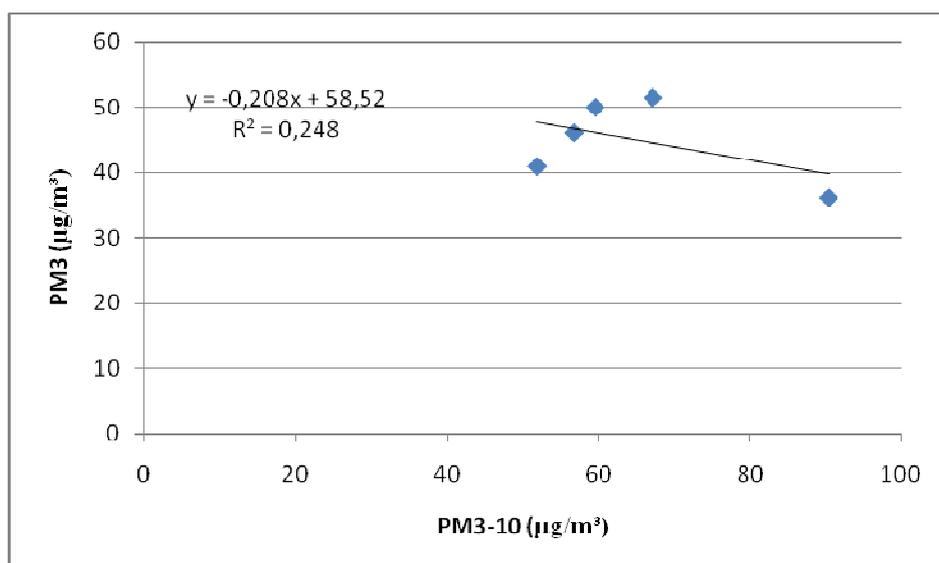


Figure N°VI.9 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM3-10 et en PM-3.

Chapitre VI – Résultats et discussion

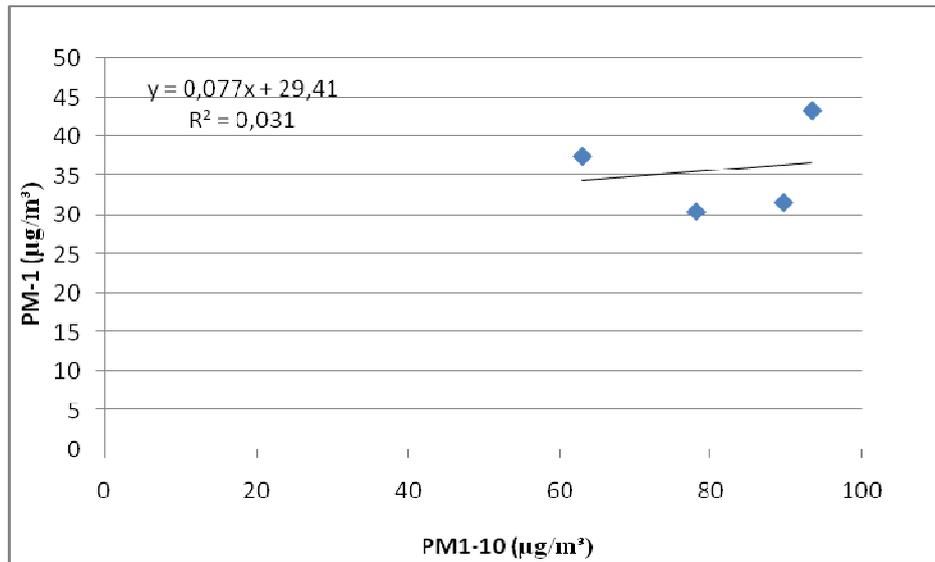


Figure N°VI.10 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM1-10 et en PM-1.

Les faibles facteurs de corrélation pour les couples PM-(3-10)/PM-3 et PM-(1-10)/PM-1 sont encore une autre preuve qui indique que les particules fines, ont des sources et des voies de formation totalement différentes de celles des grosses particules. Les PM-3 et PM-1 véhiculent les suies très fines du trafic routier, alors que les autres sont liés à l'érosion mécanique des sols c'est-à-dire une pollution d'origine naturelle.

VI.2 - Ampleur de la pollution de l'air et étude comparative

Il est utile de comparer les niveaux observés dans cette étude aux normes et valeurs guides internationales pour estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurée à Bach-Djerrah.

En effet, si on veut adopter des mesures de restriction contre la pollution de l'air dans notre pays, il est intéressant de se référer aux expériences des autres pays pionniers dans ce domaine.

Nous résumons dans les tableaux N°VI.3 et N°VI.4 certaines normes et les valeurs guides des PM-10, et des PM-2.5.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau VI.3 : Normes et recommandation pour les PM-10.

Pays et régions	Valeur limite annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur limite journalière	Références
Etat unis d'Amérique	50	150	[44]
Californie	20	50	[44]
OMS	20	50	[60]
Union Européenne	30	50	[51]

Tableau VI.4 : Normes et recommandation pour les PM 2,5.

Pays et régions	Valeur limite annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur limite journalière	Références
Etat unis d'Amérique	15	65	[44]
Californie	12	--	[44]
OMS	10	25	[60]
Union Européenne	10	25	[51]

Réglementation algérienne :

La législation algérienne définit des valeurs limites relatives aux émissions des particules fines en suspension qui sont [96]:

- Valeur limite : $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Objectif de qualité : $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'insuffisance de ces normes algériennes reste apparente dans :

- La non spécification de la classe granulométrique à laquelle ces valeurs se réfèrent (PM-10 ou particules en suspension).
- L'absence de valeur limite concernant la fraction des particules ayant un diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$.
- Les valeurs désignées ne sont pas clarifiées si elles sont des limites annuelles ou journalières.

Chapitre VI – Résultats et discussion

A travers ces différentes données nous constatons que la teneur moyenne annuelle des PM-10 dans notre site, qui s'élève à plus de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dépasse largement non seulement les valeurs prescrites par l'Union Européenne, notamment celles qui sont envisageables d'ici 2010 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et la valeur limite annuelle prescrite aux USA ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mais aussi les moyennes obtenues dans plusieurs autres villes du monde. D'ailleurs même les normes algériennes qui ne sont pas sévères sont dépassées.

On note par ailleurs que sur 20 prélèvements, 18 valeurs ont dépassé de loin le seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, au moment où cette valeur ne doit pas être dépassée plus de 35 fois sur 365 prélèvements, tel qu'il a été indiqué dans les normes européennes.

Avec une teneur moyenne de $44.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, les PM-3 atteignent des niveaux très inquiétants et ne respectent ni les normes américaines ni les normes OMS concernant les PM-2.5.

Une comparaison entre les teneurs en PM-10 et PM-3 (on peut associer les PM-3 aux PM-2,5) mesurées à Bech-Djerrah et celles relevées dans certaines villes du monde, est présentée en tableau N°VI.5.

Ainsi le taux de pollution par les particules fines à Bech-Djerrah est inquiétant et risque de créer des nuisances auprès de la population résidente

D'ailleurs l'étude épidémiologique réalisée par l'Institut National de la Santé Publique (INSP) en 2001-2002, relative à l'évaluation de l'impact sanitaire lié à la pollution de l'air par les PM-10 à Alger, révèle que le nombre de consultations pour motif respiratoire attribuable à l'exposition aux PM-10 s'élève sur la période considérée à **439**, représentant **4,5%** de l'ensemble des événements sanitaires observés [96].

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau VI.5 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurées dans certains pays et villes du monde.

<i>Villes</i>	<i>Teneur moy</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Teneur max</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Année</i>	<i>Type du site</i>	<i>Références</i>
Pékin - Chine	200	420	2006	Site urbain (PM-10)	[97]
Hong-Kong	80	80	2003	Site urbain (PM-10)	[98]
Ispra -Italie	-	40	2002	Site urbain (PM-2,5)	[99]
USA	45	-	2001	Site urbain	[99]
Monagrega - Espagne	17	-	2002	Site Rural (PM-10)	[100]
Sofia -Bulgarie	54	92	2004	-	[100]
Eger - Hongrie	47	97	2004	-	[100]
Tirgu Mures - Roumanie	68	105	2004	Région chaude	[100]
Québec - Canada	9	-	2005	Site urbain	[101]
Bruxelles - Belgique	20	30	2008	Station trafic	[102]

Ainsi, les émissions du trafic routier, la mauvaise combustion du parc automobile qui est très âgé, et les émissions naturelles de l'érosion terrestre (nudité des sols, aridité du climat, chantiers et travaux d'aménagement) contribuent fortement à la pollution de l'air par les particules dans la commune de Bech-Djerrah.

Pour avoir un aperçu global sur la pollution dans notre pays, il est utile aussi de comparer nos résultats avec ceux obtenus en d'autres sites d'Alger.

Le tableau N°VI.6 donne des résultats obtenus pour d'autres sites à Alger.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau N°VI.6 : comparaison des teneurs en PM-i mesurées en différentes sites à Alger.

Sites à Alger	PM-10	PM-3	PM-1	Références
ENP, site de proximités				
- Année 2001	84.1	-	-	[98]
- Année 2003	75.2	40.3	25.9	[103]
Bab-Ezzouar, site urbain, 2005	70.4	35.3	22.0	[104]
Place 1er mai, site urbain, 2006	64.1	34.7	15.1	[106]
Dely Brahim, ISMAL site semi urbain, 2007	27.0	18.1	14.8	[91]
Bouzereah, CDER, site semi urbain, 2008	33.5	23.3	10.2	[105]
Bach-Djerrah, APC, site urbain, 2009	93.9	45.0	35.7	Présente étude

Nous avons montré par ces deux comparaisons, l'influence que peuvent avoir le site d'implantation de l'appareil de mesure ainsi que la période de prélèvements sur les résultats de mesure. On remarque que durant l'année en cours et pour le site urbain de Bach-Djerrah, on a prélevé des quantités beaucoup plus importantes que dans la plupart des autres sites et ceci est dû comme ça a été cité plus haut à la nudité des sols et aux chantiers aux alentours de la commune.

VI.3 - Etude des métaux lourds associés aux particules fines

Dans le cadre de la caractérisation chimique des particules fines, nous avons déterminé les fractions de certains métaux lourds associés aux différentes classes granulométriques de particules étudiées. Cette caractérisation a pour objectif la spécification des sources émettrices de pollution dans notre site et ceci à travers les corrélations existantes entre les teneurs des différents métaux d'une part et d'autre part par la distribution massique de ces différents métaux dans chacune des fractions des particules.

VI.3.1 - Niveau de pollution de l'air par les métaux lourds

Les teneurs atmosphériques en métaux lourds Fe, Pb et Cu ont été déterminées sur la totalité des échantillons (filtres) préparés et recueillis. Les résultats obtenus sont illustrés en figures VI.11,

Chapitre VI – Résultats et discussion

VI.12 et VI.13. On constate que dans leur évolution les teneurs subissent des fluctuations dues à plusieurs facteurs tels que la nature et l'ampleur des émissions et la météorologie.

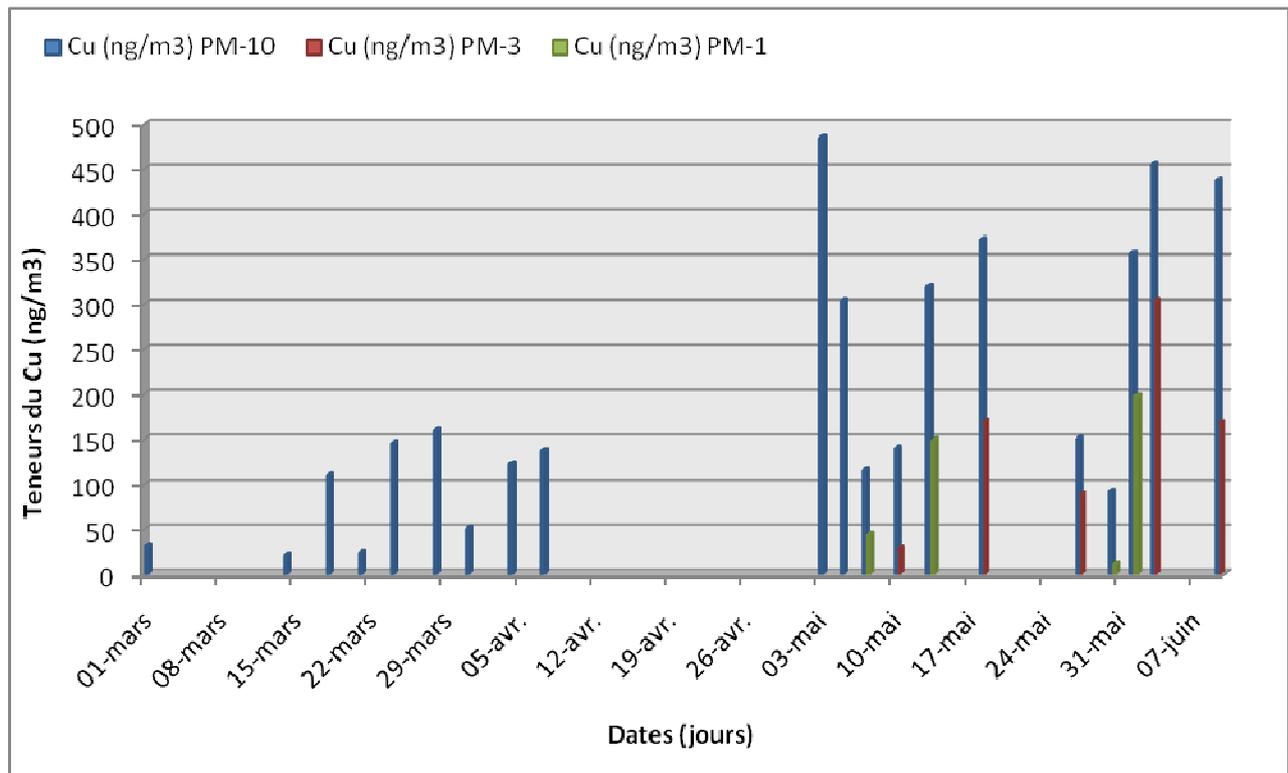


Figure N°VI.11 : Evolution des teneurs atmosphériques du **Cuivre**.

Chapitre VI – Résultats et discussion

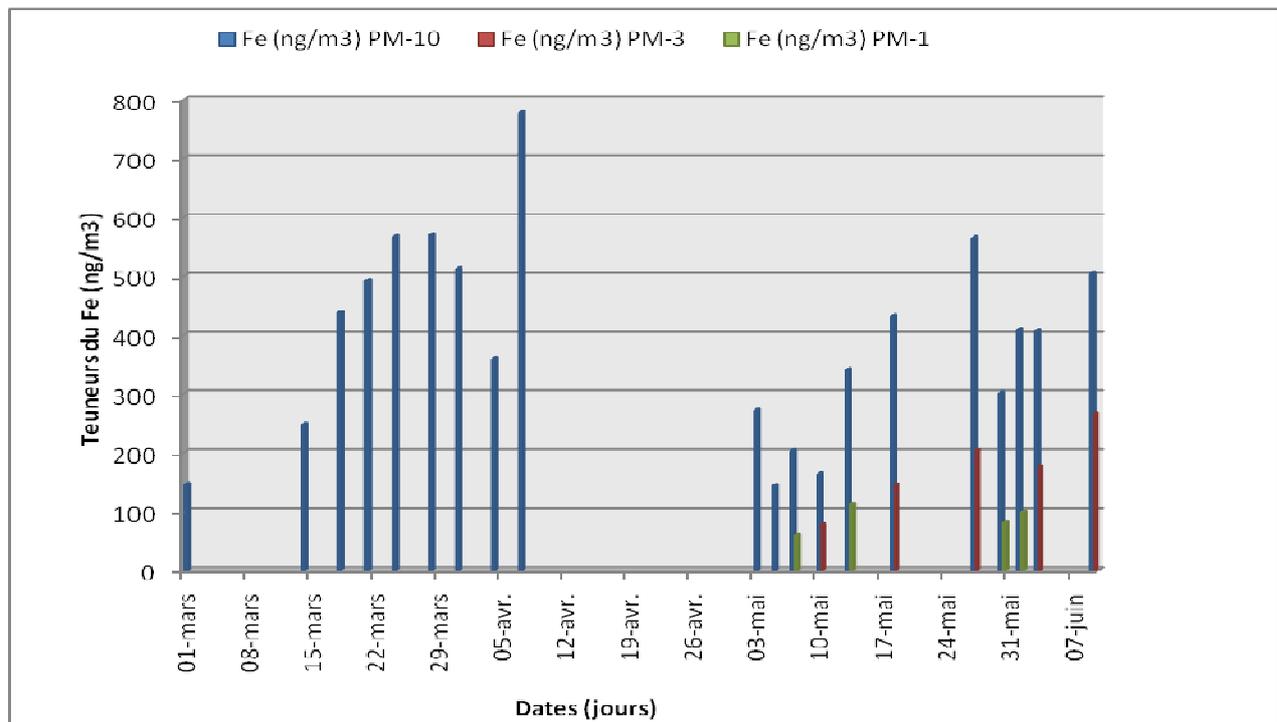


Figure N°VI.12 : Evolution des teneurs atmosphériques du Fer.

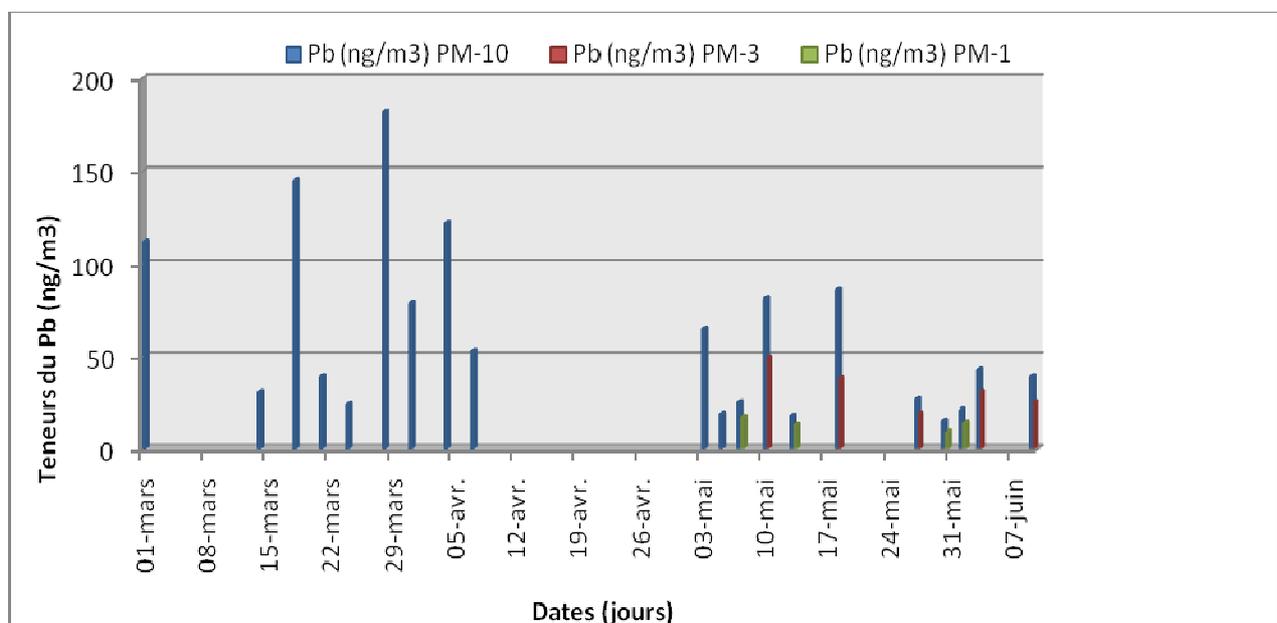


Figure N°VI.13 : Evolution des teneurs atmosphériques du Plomb.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Le tableau VI.7 résume les teneurs moyennes des différents métaux selon les classes granulométriques de particules.

Une première lecture des données du tableau VI.7 et des figures VI.14, VI.15, VI.16 et VI.17 montre que le fer accuse les teneurs le plus élevées. Sa teneur moyenne dans les PM-10 s'élève à 392,4 ng/m³ avec une contribution massique de l'ordre de 0,42 %. En ce site, il est intéressant de noter que le plomb est moins abondant que le fer et sa teneur reste relativement acceptable. Il est important aussi de signaler que le Cadmium n'a pas été décelé et ceci dans tous les échantillons prélevés.

Tableau N°VI.7 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques correspondantes en métaux lourds.

	Teneurs des métaux lourds (ng/m³) et fractions massiques correspondantes en %.		
	PM-1	PM-3	PM-10
Cu	100,75	152,40	201,70
	0,04%	0,07%	0,06%
Fe	87,75	173,00	392,40
	0,24%	0,39%	0,42%
Pb	13,25	32,40	61,30
	0,28%	0,34%	0,21%

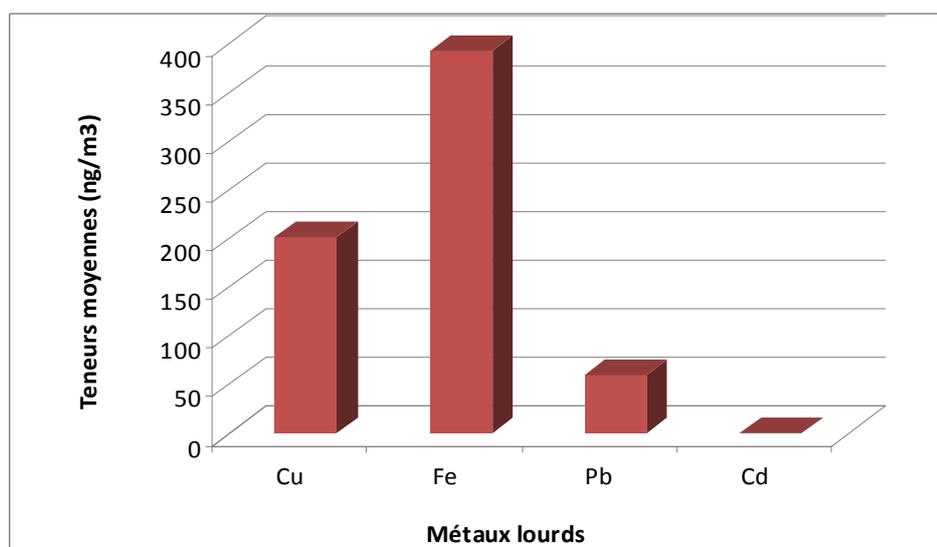


Figure N°VI.14 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

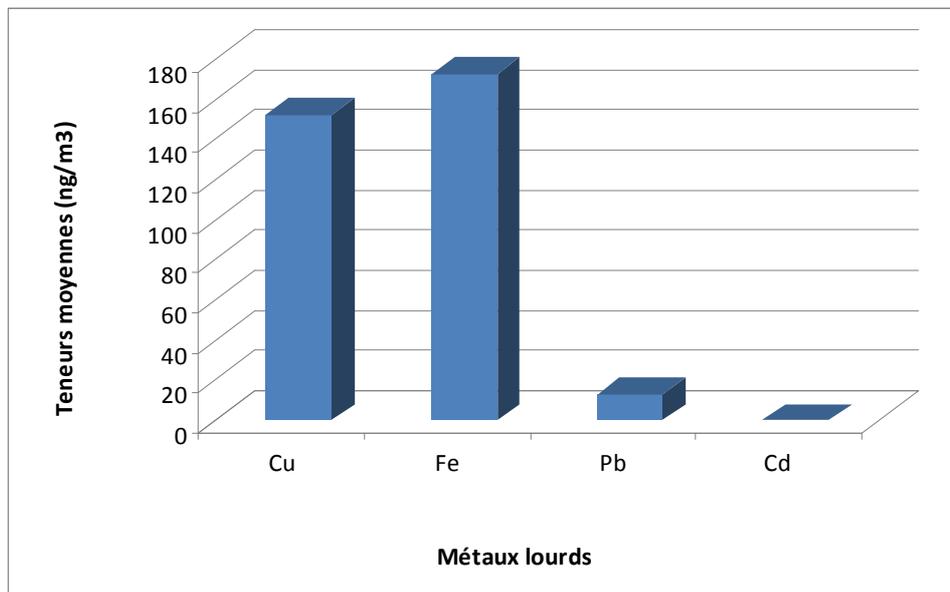


Figure N°V.15 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.

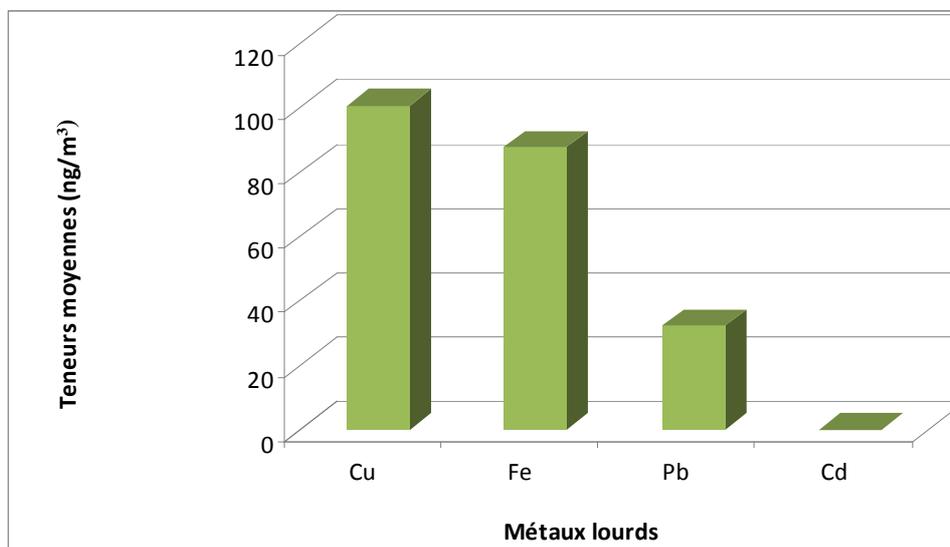


Figure N°VI.16 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-1.

Chapitre VI – Résultats et discussion

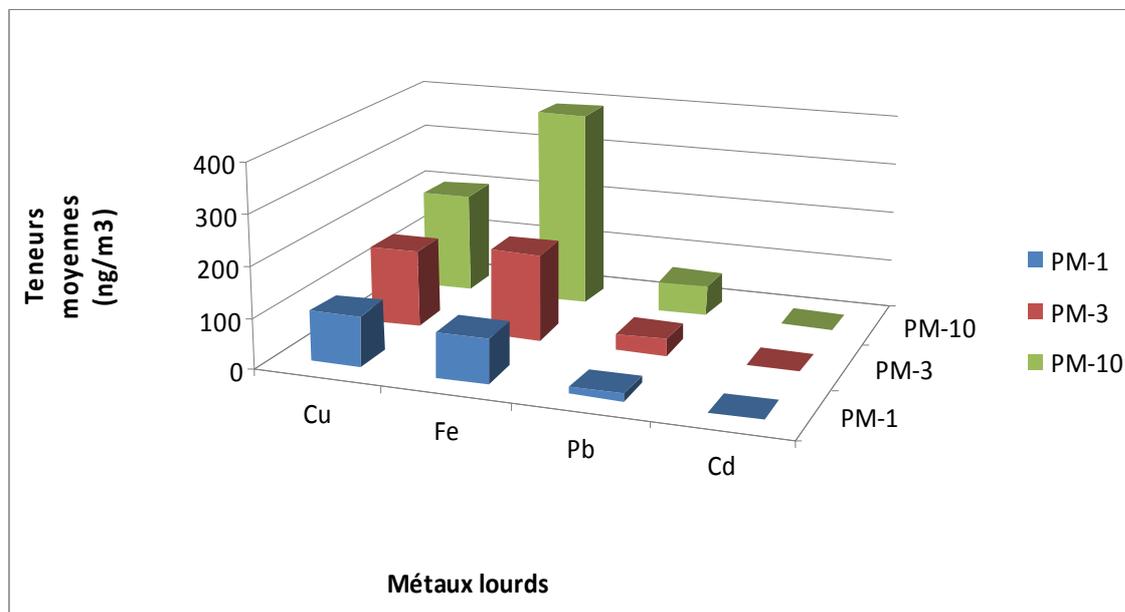


Figure N°VI.17 : Vision globale sur les teneurs moyennes des métaux lourds présents dans les différentes classes des PM-i.

La pollution par le fer et par le cuivre provient probablement des émissions naturelles (érosion du sol) des travaux et des nouvelles constructions, ainsi que les industries dans la commune de Bach-Djerrah.

Le site subit aussi l'influence du trafic routier roulant dans sa majorité à l'essence plombée, d'où ces quantités assez importantes de plomb.

En ce site la pollution plombée n'est toute fois pas excessive. Elle est en dessous de la nouvelle norme européenne de 200 ng/m^3 et respecte aussi les recommandations de l'OMS (500 ng/m^3) [60]. La pollution par le fer et les autres métaux reste très élevée et est caractéristique d'un milieu urbain peu industrialisé.

L'examen des fractions massiques (tableau VI.7 et figure VI.18) montre que les métaux lourds étudiés se répartissent de manière différente sur les fractions de particules. La fraction massique du fer et du cuivre augmente en passant des PM-1 aux PM-10. Ce qui montre que ces métaux qui se trouvent dans l'écorce terrestre et qui composent les matériaux de construction prédominent dans la fraction des grosses particules. Ceci semble en cohérence avec plusieurs études notamment celles élaborées par Klee et Beinstein [107,108].

Le plomb quant à lui a une granulométrie fine et il est plus enrichi dans les particules très fines (PM-1 et PM-3) que dans les PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

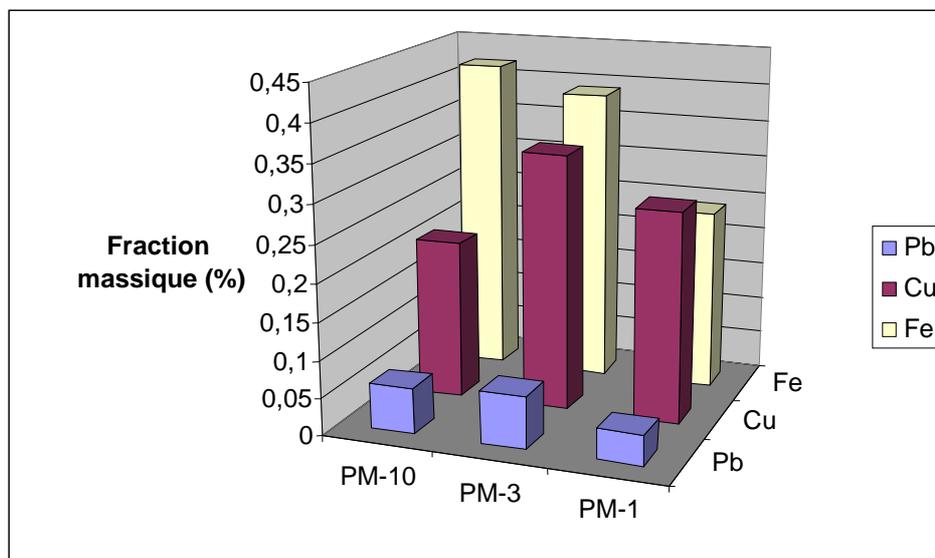


Figure N°VI.18 : Pourcentages massiques par classe granulométrique, des différents métaux

VI.3.2 Comparaison inter-sites du niveau de pollution par les métaux lourds :

La comparaison donnée en tableau VI.8 montre que par rapport à d'autres sites à Alger, Bach-Djerrah accuse des teneurs plus élevées en fer et en cuivre. Les teneurs en plomb sont similaires à ceux prélevées à Bab-Ezzouar. Ainsi l'impacte du trafic routier est équivalent en ces sites urbains, mais l'impacte de la pollution naturelle et éventuellement la source industrielle y est différent. Il y a actuellement à Bach-Djerrah plusieurs chantiers de construction auquel il faut ajouter les émissions de l'usine de fabrication de pneus qui est à environ 1 Km du site de mesure.

Tableau N°VI.8 : Comparaison inter-sites des teneurs des métaux lourds suivant la classe des PM-i.

Métaux lourds	Teneurs massiques des métaux lourds (ng/m ³)								
	Station urbaine 1er Mai (2006)			Station urbaine Bab-Ezouar (2005)			Station urbaine Bech-Djerrah (présente étude)		
	PM1	PM3	PM10	PM1	PM3	PM10	PM1	PM3	PM10
Pb	110,64	181,40	220,30	39	65	98	13,25	32,4	61,3
Fe	47,65	102,17	199,45	47	80	136	87,75	173	392,4
Cu	31,19	78,03	108,67	30,4	57	87	100,75	152,4	201,7

Chapitre VI – Résultats et discussion

Cette comparaison montre ainsi que l'ampleur de la pollution est en fonction de la nature du site, sa topographie et son aménagement urbain. A Bach-Djerrah les rues sont très poussiéreuses et cela se reflète sur les niveaux des PM-10, du fer et du cuivre.

V.3.3 - Corrélation entre les différents couples de métaux lourds et entre métaux et PM-i :

Comme pour l'étude des classes granulométriques PM-i et dans le même but, nous essayons d'évaluer dans cette partie les corrélations entre le fer et le plomb, et ceci pour les classes PM-10 et PM-3.

Nous présentons dans les figures VI.19, VI.20 et VI.21 les corrélations PM-10/Pb, Pb/Fe dans les PM-10 et dans les PM-3.

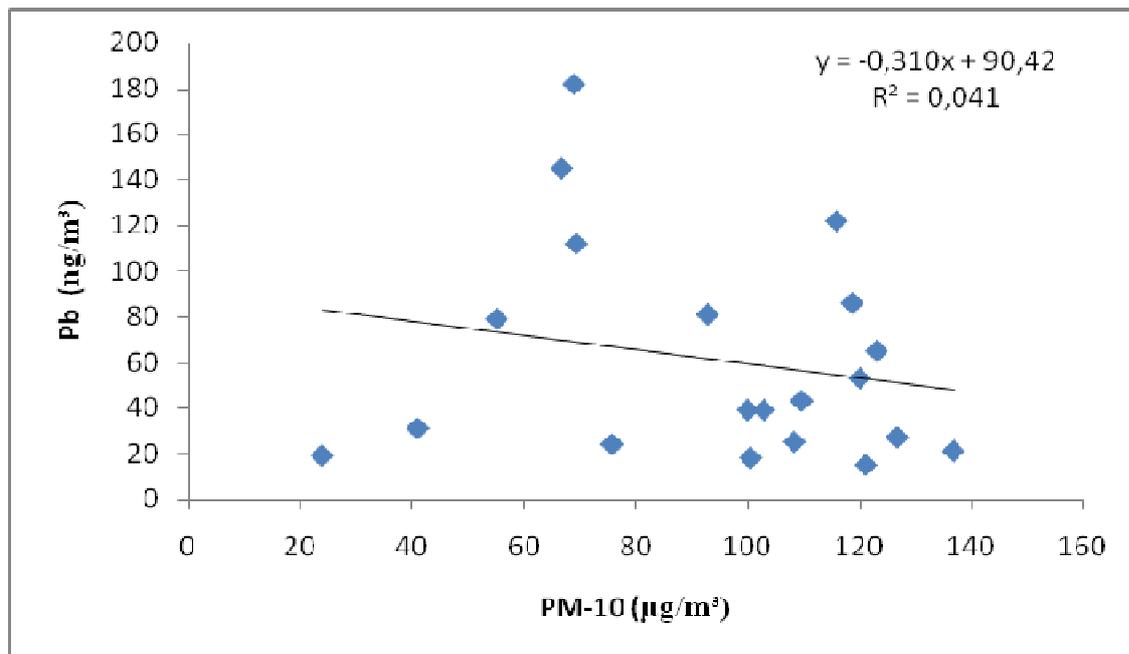


Figure N°VI.19 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle des PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

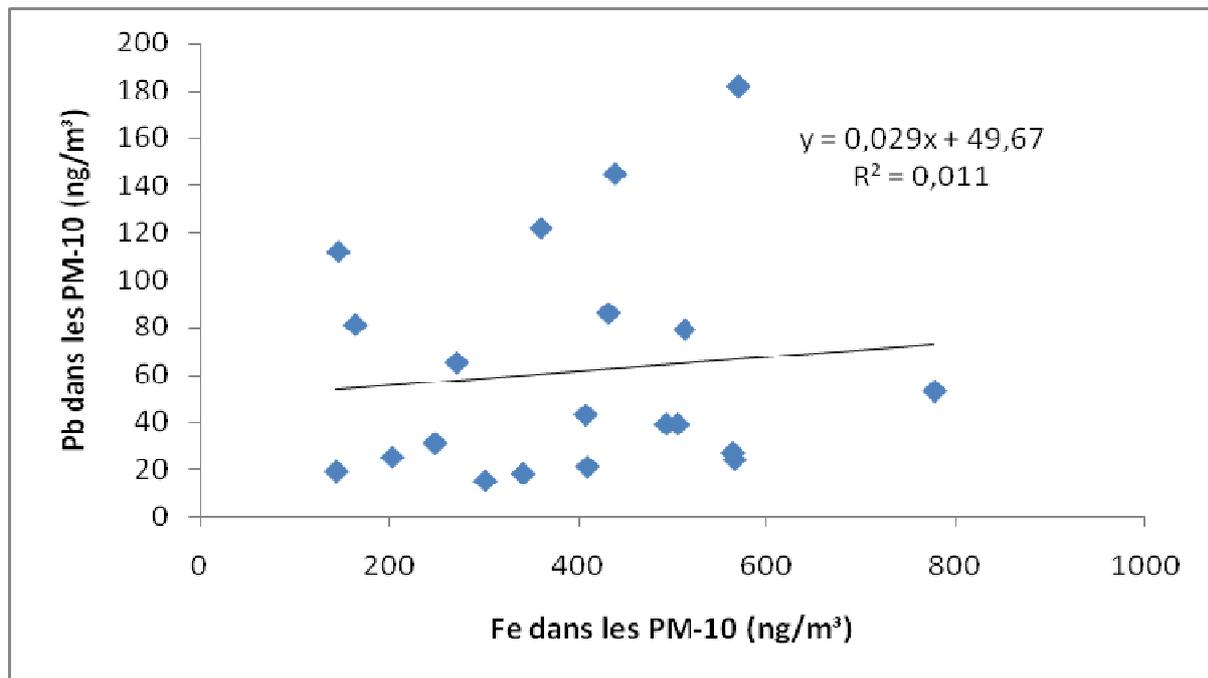


Figure N°VI.20 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle du fer dans les PM-10.

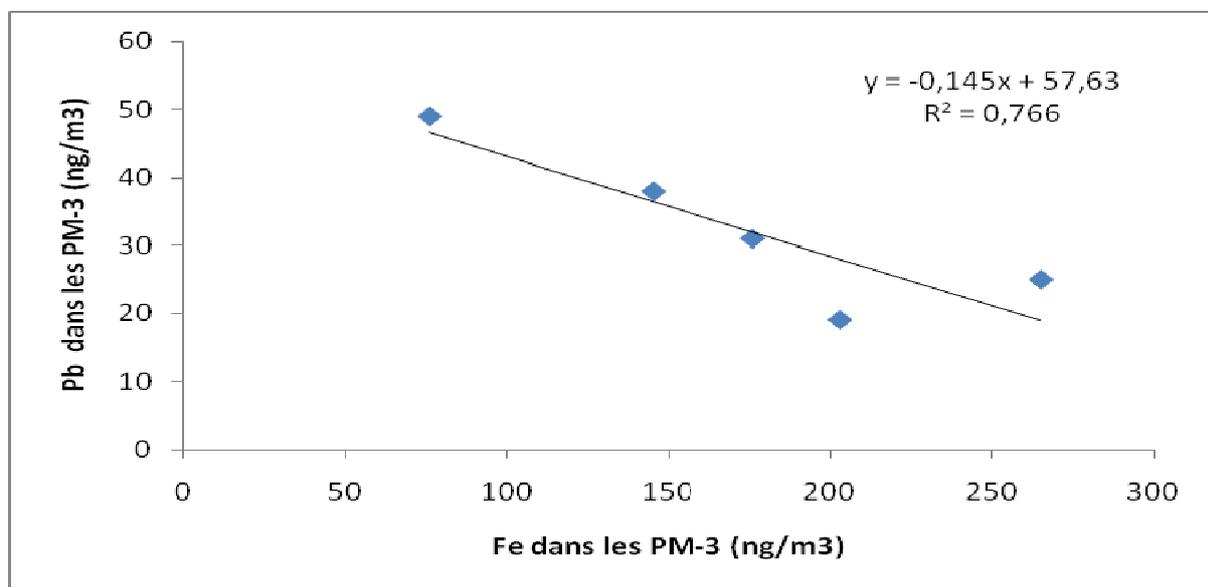


Figure N°VI.21 : Corrélation linéaire entre la teneur du plomb et celle du fer dans les PM-3.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Il en résulte que le plomb qui se trouve plus dans les particules alvéolaires et très fines (PM-3 et PM-1) ne présente pas une bonne corrélation avec les particules PM-10.

La figure VI.20 montre que dans les PM-10, le fer ne suit pas l'évolution du plomb, ceci rejoint le fait que ces derniers présentent des granulométries différentes (le fer est plus enrichi dans les PM-10, alors que le plomb l'est dans les PM-3).

Enfin dans la fraction PM-3, la figure VI.21 présente une corrélation négative entre le fer et le plomb, montrant par là de nouveau que ces métaux sont d'origines différentes.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude qui s'est focalisée sur la caractérisation de la pollution atmosphérique par les particules fines PM-10 et ses fractions, au niveau d'un site urbain de la ville d'Alger (commune de Bech-Djerrah) nous a permis d'estimer le niveau de cette pollution, d'identifier certains facteurs qui l'influent notamment la météorologie et enfin à évaluer le taux des métaux lourds (Pb, Fe, Cd et Cu) existants dans les différentes fractions granulométriques de ces particules.

L'estimation des niveaux de pollution par les PM-10 et autres fractions granulométriques durant la saison printanière montre que les teneurs sont relativement élevées comparativement aux normes et aux valeurs trouvées dans d'autres études; (PM-1 = 35.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM-3 = 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et PM-10= 93.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ponctuellement, on relève des teneurs excessives en PM-10 et PM-3 qui dépassent toutes les normes et recommandations de protection de la santé.

L'évolution fluctuante des niveaux journaliers est mise en évidence et est expliquée par l'influence des facteurs météorologiques.

Cette pollution par les particules se caractérise par une fraction élevée de particules fines. Les PM-1, PM-2,5 constituent respectivement environ 31 et 41% des PM-10.

L'étude des métaux lourds Pb, Fe et Cu associés aux différentes classes granulométriques a montré, que le plomb et le fer sont émis par des sources différentes.

Le cuivre et le fer présentent des concentrations très élevées. Le plomb par contre reste, avec une moyenne de 0,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, à une teneur relativement acceptable.

Ainsi, ce site urbain subit en plus de l'influence des émissions du trafic routier qui n'est pas dense, d'autres émissions industrielles et naturelles. Ces émissions proviennent non seulement des grands axes routiers de la ville mais aussi certainement des chantiers et travaux en cours dans la commune de Bech-Djerrah.

L'étude de la répartition massique de ces métaux par classe granulométrique de particules, nous a permis de déduire que le plomb se concentre davantage dans les particules les plus fines ; 50 % de la masse totale du plomb se trouve dans les PM-3.

Globalement, en ce site urbain, la pollution de l'air par les particules présente un potentiel de nuisance élevé et ce de part la finesse des particules et des métaux qui leur sont associés.

La comparaison des niveaux de pollution mesurés sur divers sites montre la complexité dans l'appréhension de la pollution dans ses divers aspects et la nécessité de surveillance et de contrôle sur plusieurs sites d'environnement diversifié.

On note aussi qu'on a les moyennes les plus élevées concernant les PM-10 (presque 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais ceci reste bien sur temporaire, en attendant la fin des travaux de construction en ce site.

CONCLUSION GENERALE

Pour diminuer la concentration des particules dans l'air on conseille de :

- Contrôler régulièrement les émissions industrielles.
- Encourager la bicarburation Essence / GPL ou GNC.
- Multiplier les campagnes de plantation d'arbres et d'aménagement des espaces verts afin de réduire les aires nues et donc la pollution par érosion éolienne.

Enfin les citoyens sont appelés à s'informer sur les risques sanitaires auxquels ils s'exposent quotidiennement et faire ressentir les implications de l'ampleur de ce type de pollution, afin de préserver la qualité de l'air dans tout les milieux.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Wilson R, Spengler JD** [Eds]. Particles in our air. Concentrations and health effects. Cambridge: Harvard University Press, 1996.
- [2] **Logan WPD**. Mortality in the London fog incident, 1952. *Lancet* 1953; 14: 336_39.
- [3] **Davis DL, Bell ML, Fletcher T**. A look back at the London smog of 1952 and the half century since. *Environ Health Perspect* 2002; 110: A734_A735.
- [4] **Segala C, Le Moullec Y, Festy B**. La pollution atmosphérique particulaire : les données épidémiologiques actuelles peuvent-elles aider aux choix météorologiques en termes de surveillance de la qualité de l'air ? Convention ADEME-APPA N° 0462C0058 - Paris 19-8-2006, 140 p. (+ annexes) : article résumé paru dans la revue *Pollution Atmosphérique* N° 196, octobre-décembre 2007.
- [5] **O.Blanchard, F.Del Gratta, M.Durif, E.Frejafon, O.Le Bihan**, « Exposition par inhalation aux aérosols : Principes et méthodes de mesures », INERIS, Paris, (2004).
- [6] **P.Masclat, H.Cachier**, « L'aérosol atmosphérique : Caractéristiques physico-chimiques », *ANALYSIS MAGAZINE*, Vol 26, N° 9, (1998).
- [7] **J.Priest**, « Problems of our Physical Environment », Addison-Wesley Publishing Company , pp 59-70, (1973).
- [8] **R.M.Harrison, A.M.Jones, R.G.Lawrence**, « A pragmatic mass closure model for airborne particulate matter at urban background and roadside sites », *Atm.Env*, Vol 37, pp 4927- 4933, (2003).
- [9] **X.Querol, A.Alastuey, S.Rodriguez, F.Plana, C.R.Ruiz, N.Cots**, « PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain », *.Atm.Env*, Vol 35, pp 6407-6419, (2001).
- [10] **A.A.Almeids, J.L.F.C.Lima**, « Determination of Cd, Cr, Cu, Ni, and Pb in industrial atmospheric particulate matter by ETA-AAS using solid samples directly from trapping filters », *Atomic Spectroscopy*, Vol 16, N°6, pp 261-265, (1995).
- [11] **Y.Kryu, A.Tri-Tugaswati, S.Suzuki, T.Kawada**, « Effect on health of atmospheric Pb in roadside exposure in Jakarta », *Environmental Health and Preventive Medicine*, Vol1, N°1, pp 9-13, (1996).
- [12] **Kerbachi R., M. Boughedaoui, N. Koutai et T. Lakki** : La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. *Poll. Atm.*, Avril - Juin, 1998, pp 89-101.
- [13] **Kerbachi R., M. Boughedaoui, L. Bounoua et M. Keddam** : Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers, *Atm. Env.*, N°40, 2006, pp.3995-4003.

- [14] **Boughedaoui M., R. Kerbachi et R. Joumard** : Mesure de la pollution plombifère dans l'air ambiant d'Alger, Poll. Atm., N°121, 2004, pp.105-111.
- [15] **Kerbachi R., M. Boughedaoui, Y. Kerchich et R. Joumard** : Evaluation de la pollution de l'air par les PM-10 à Alger. Int. Symp, Transport and Air Pollution, Avignon, France, 5-2 Juin, 2000.
- [16] **Herrebaut L. et J. Beguin** : Mesure des pollutions particulaire et gazeuse, Mesure – Analyse - Contrôle, Nuisance et Environnement, France, Mai 1976, pp. 24-26.
- [17] Ontario : Particules en suspension, Qualité de l'air, Ministère de l'Environnement et de l'Energie, Canada, Mai 2000.
- [18] **Magdelaine C.** : Les PM10 : Des particules de diamètre > 2,5 microns, Les particules atmosphériques, 2001-2002. webmaster@notre-planete.info
- [19] **Detrie J.P.** : La pollution atmosphérique, Edition Dunod, Paris, 1969.
- [20] **Renoux A.** : Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique, Poll. Atm., Janvier – Mars, 1990, pp. 10-16.
- [21] **Stern A. C. and Boubel R. W.**: Fundamentals of air pollution, Academic Press, 2^{ème} édition, London, 1984.
- [22] OFEFP, Cahier de l'environnement « Particule en suspension mesures et évaluations des effets sur la santé », Berne, 1996.
- [23] **Mohamedou B. et J. Colosio** : Qualité de l'air : une surveillance accrue des particules, mais des concentrations à réduire d'ici l'an 2005, Les données de l'environnement, IFEN, N°58, France, Septembre 2000.
- [24] Ministère de l'Environnement de Canada, « les particules de l'air ambiant : vue d'ensemble », 1998.
- [25] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, « Mesures de réduction des émissions de PM10 », Berne, (2001).
- [26] **P.Masclat**, « Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives », Edition Ellipse, Paris, (2005).
- [27] **Kerbachi.R**, Cours de pollution atmosphérique 5^{ème} année, ENP, Alger, 2005.
- [28] **Ikawa. K. O.**: Trace analysis atmospheric, John Wiley et Sons, London, 1997.

- [29] **Dang C. T. P. Fontelle et R. Leygonie** : Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission. Poll. Atm., Janvier-mars, 1990, pp. 38-46.
- [30] **Brumer P.h** : Approche Globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères. Poll. Atm., Juillet-Septembre, 1998, pp. 301-308.
- [31] **Magdelaine C.** : Les particules inférieurs à 2.5 microns (PM_{2,5}), Les particules atmosphériques, 2001-2002 webmaster@notre-planete.info
- [32] Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, « Inventaire des émissions de particules primaires », Paris, (2001).
- [33] **Leygonie R.** : Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures et effets, Poll. Atm., Juillet-Septembre, 1993, pp. 63-74.
- [34] National Center for Environmental Assessment : Information about particulate, Particulate matter, Environmental Protection Agency, U. S., 2003. www.epa.org
- [35] **Chirou.M, Quenel.P, Zmirou.D**, « La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique ». Pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp41-52, 1997.
- [36] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : La qualité de l'air en France en 1995-1996, Editions ADEME, Paris, 1998.
- [37] **Dore C.J., J.W.L. Goodwin, J.D. Watterson, T.P. Murrels, N.R. Passant, M.M. Hobson, K.E. Haigh, S.L. Baggot, S.T. Pye, P.J. Coleman, and K. R. King** : UK émission of air pollutants 1970 to 2001, Report www.naei.org.uk/reports.php, 2003.
- [38] **Degobert P.** : Origine et réduction des émissions au niveau moteur, Pollution Atmosphérique, Technique de l'Ingénieur, B2710, France, 1994, pp. 1-15.
- [39] **Chiron M., P. Quenel et D. Zmivan** : Pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, Poll. Atm., Janvier – Mars, 1997, pp. 41-52.
- [40] CITEPA : L'émission annuelle des PM-10 due au trafic routier en France en 2000, France, Décembre 2001. www.citepa.org.
- [41] CITEPA : Emissions dans l'air en France métropolitaine – particules en suspension, Paris, France, Avril 2004. www.citepa.org.
- [42] **Arthur C., Stern**: Air pollution, Air pollutants, Their transformation and transport, Academic Press, Newyork, 1976.
- [43] **Hinds W. C.**: Aerosol technology, Wiley Interscience, London, 1982.

- [44] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, « Poussières fines PM10 : Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les effets sur la santé et les mesures », Berne, (2005).
- [45] O.M.C. Chang, G.C.England, « Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems », Critical Review of Source Sampling and Analysis Methodologies for Characterizing Organic Aerosol and Fine Particulate Source Emission Profiles, (2005).
- [46] US.Environmental Protection Agency, « The Particle Pollution Report: Current Understanding of Air Quality and Emissions through 2003 », EPA report 454-R-04-002, Décembre 2004.
- [47] **Arthur.C, Stern**, "Air pollution, air pollutants, their transformation and transport", Academic Press, Newyork, 1976.
- [48] **Barnea M., P. Ursu**, « Pollution et protection de l'atmosphère », Ed. Eyrolles, Paris, 1974.
- [49] **Pierre CHARBIER de la SAULNIERE**« la pollution atmosphérique », les industries, leurs productions, leurs nuisances, 1974.
- [50] **Ackermann-Liebrich, U. et al. and SAPALDIA Team**. Lung Function and Long-term Exposure to Air Pollutants in Switerezland, Am. J. Respir. Crit. Care med, 155, 122-129, 1997.
- [51] **N.BERKOUKI**, « CARACTERISATION DE LA POLLUTION DE L' AIR PAR LES PARTICULES FINES ET DES METAUX LOURDS ASSOCIES, EN MILIEU URBAIN À ALGER CENTRE », mémoire de magistère, ENP, 2007.
- [52] Politique publique, pollution atmosphérique et santé : poursuivre la réduction des risque, Juin 2000.
- [53] **Holgate ST, Samet JM, Koren JM and Maynard RL**. Academic Press In Air pollution and health. 1999.
- [54] **Brauer M, Avila-Casado C, Fortoul TI, Vedal S, Stevens B and Churg A**. Air pollution and retained particles in the lung. Environ Health Perspect. 109, 1039-1043, 2001.
- [55] **Churg A, Brauer M, del Carmen Avilla-Casado M, Fortoul TI, Wright JL**. Chronic exposure to high levels of particulate air pollution and small airway remodelling. Environ Health Perspect. 111, 714-718, 2003.
- [56] **Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J, Nanotoxicology**: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, Environ Health Perspect. 113, 823-839, 2005.

- [57] **Kim CS and Kang TC.** Comparative measurement of lung deposition of inhaled fine particles in normal subjects and patients with obstructive airway disease. *Am J Respir Crit Care Med.* 155, 899-905, 1997.
- [58] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, « Poussières fines :Un fléau », Berne, (2005).
- [59] Politique publique, pollution atmosphérique et santé : poursuivre la réduction des risque, Juin 2000.
- [60] OMS : Update and revision of air quality guidellines for Europe, WHO Regional Publications, European, Serien, Copenhagen, 1997.
- [61] Environnement Canada, Les particules de l'air ambiant « vue d'ensemble », Québec, Février, 1998.
- [62] **Robert R. Lauwerys,** Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles, Edition Masson, 3^{ème} Edition, Paris, Milan, Barcelone, Bonn, 1992.
- [63] **Badj S. :** Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [64] **Colosio J. :** Définition et explication des phénomènes lies à la pollution atmosphérique, 2002.
- [65] GSF 2005: Aerosolforschung in der GSF. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg Deutschland (2005)
- [66] US EPA 2004: Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I and II, United States Environmental Protection Agency www.epa.gov/ncea (2004)
- [67] **Martin J et L.Y. Masteyer :** Santé et pollution de l'air, Presses Polytechniques, Vol. 145, Romandes, Suisse, 1988, pp. 46-59.
- [68] **Fiala J. :** Qualité de l'air en milieu urbain, *Naturopa*, N°94, 2000, pp. 10.
- [69] **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.
- [70] **J.P. Putauda, F.Raesa, R.Van Dingenena,** « A European aerosol phenomenology-2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe » *Atm.Env*, Vol 38, pp 2579-2595, (2004).

- [71] **U. Lohmann et J. Feichter**, « Global indirect aerosol effects: a review », *Atmos. Chem. Phys.*, Vol 5, pp 715-735, (2005).
- [72] **Whitby, K. T.** *Electrical measurements of aerosols in fine particles*, Byh Liu, Ed., Academic Press, 1976.
- [73] Norme X 43-100. Qualité de l'air – Définitions des fractions de tailles des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé, AFNOR, Paris, novembre 1984.
- [74] **Renoux, A.** (Université Paris XII) L'aérosol atmosphérique, ses origines ; quelques notions sur les principales propriétés physiques des aérosols, Journées d'études du CITEPA (17/12/96).
- [75] **Belot, G.** (groupe PSA) Emissions particulières par les transports routiers essence et diesel, caractéristiques chimiques et granulométriques, contribution, Journées d'études du CITEPA (17/12/96).
- [76] **Boutonnet F.** : Etude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre, 2003-2004.
- [77] Norme NF X 43-057 Détermination d'un indice de fumées noires, AFNOR, Paris, 1977.
- [78] **Chow, J. C. J.** *J. Air Waste Manage. Assoc.* 1995, 45.
- [79] Norme AFNOR X43-021 Prélèvement sur filtre des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Appareillage automatique séquentiel, AFNOR, Paris, décembre 1984.
- [80] **Ralph, M. O.; Barrett, C. F.; Upton, S. L.** Further wind tunnel measurements of the inlet efficiency of the Environnement SA type PPA60 suspended particle sampler, Warren Spring Laboratory Laboratory Report (1983), Department of industry, Stevenage (UK).
- [81] **Mc Farland, A. R.; Ortiz C. A.** Characterization of Sierra- Andersen PM-10 inlet Air Quality Laboratory Report (1983), Civil Engineering Department Texas University, College Station USA.
- [82] **Allen, G. et al.** *J. Air Waste Manage. Assoc.* 1997, 47, 682- 689.
- [83] **Mathé, F.; Sauvage, S.** Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (L.C.S.Q.A.) – École des Mines de Douai, Rapport final d'activités (Nov. 1997) Convention Ministère de l'Environnement n°17/96.
- [84] Norme européenne EN 12341 Field test procedure to demonstrate reference equivalence of sampling methods for the PM-10 fraction of suspended particulate matter (CEN Bruxelles)

1997.

- [85] Norme NF X 43-017 Mesure de la concentration des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Méthode par absorption de rayons bêta, AFNOR, Paris, juillet 1984.
- [86] **Lipfert, F. W.; Morris, S. C; Wyzga, R. E.** Environ. Sci. Technol. 1989, 11,1316-1322.
- [87] **Person, A.; Lopez, B.; Masclet, P.** Méthodes de mesure dans l'environnement des polluants non réglementés d'origine automobile, Colloque Pollution de l'Air par les transports, Paris 1987, 2-3 juin, INRETS Ed.; pp 161-170.
- [88] **J.P. Quisefit, A. Gaudichet,** « Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques », ANALUSIS MAGAZINE, Vol 26, N° 9, (1998)
- [89] **Kim CS and Kang TC.** Comparative measurement of lung deposition of inhaled fine particles in normal subjects and patients with obstructive airway disease. Am J Respir Crit Care Med. 155, 899-905, 1997.
- [90] **Pierre MASCLET,** (professeur des universités de Paris), « pollution atmosphérique », paris, 1998.
- [91] **SELHI SOUFIANE** « evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger » : PFE, ENP, Alger, 2007.
- [92] Techniques de l'ingénieur, « Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X ».
- [93] Norme ISO 9855, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectés sur des filtres », (1993).
- [94] **J.C.Chow, J.G.Watson, Z.Lu, H.D.Lowenthal, C.A.Frazier, P.A.Solomon, R.H.Thuillier, K.Magliano,** « Descriptive analysis of PM2.5 and PM10 at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX », Atm.Env, Vol 30, pp 2079-2112, (1996).
- [95] **F.Wei, E.Teng, G.Wu, W.Hu, W.E.Wilson, R.S.Chapman, J.C.Pau, J. Zhang,** « Ambient concentrations and elemental compositions of PM10 and PM2.5 in four Chinese cities », Environmental Science & Technology, Vol 33, pp 4188-4193, (1999).
- [96] **Y. Laïd, M. Atek, R. Oudjehane, L. Filleul, L. Baough, N. Zidouni, M. Boughedaoui, J-F. Tessier,** « Health effects of PM10 air pollution in a low-income country: the case of Algiers », Int.J.Tuberc.Lung.Dis 10(12), pp 1406–1411, (2006).
- [97] The State of the Environment of China in 2008, <http://english.mep.gov.cn/>.

- [98] **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 », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique , 2003 .
- [99] ICP:EHAZ 94 05/ PBOI, Regional Office of Europe , Wold Heath Organisation, Copen Hagen 1995.
- [100] **J.M. Lopez, M.S. Callen et al.**, “Levels of selected metals in ambient air PM₁₀ in an urban site of Zaragoza (Spain)”, Environmental Research 99, pp 58 -67, (2005).
- [101] Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement - Rapport complet de 2007, <http://www.ec.gc.ca/>
- [102] Le baromètre conjoncturel de la région de Bruxelles -CAPITALE – Juillet 2008, <http://www.cmh.eris.ens.fr/>
- [103] **N.OUCHER**, mémoire de magistère, ENP, 2006.
- [104] **A.BITOUCHE**, « contribution à l'étude par classe granulométrique des aerosols particulaires sur un site de proximité à l'ENP », mémoire de magistère, ENP, 2007.
- [105] **S.Drif** « Pollution atmosphérique par les particules fines », Mémoire de fin d'étude, ENP, Juin 2008.
- [106] **BEN DADA Mehdi**, « evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger» : PFE, ENP, Alger, 2006.
- [107] **S.Calvert, H.M.Englund**, « Handbook of air pollution technology », Ed Wiley, New York, pp 513-550, (1984).
- [108] **T.J.Kneip, M.Lippmann**, « The New York Summer Aerosol Study», Ann. N.Y. Acad. Sci. N°322, pp 87-97, (1979).

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم مستويات التلوث بالجزيئات الدقيقة (PM-10,PM-3, PM-1) في منطقة حضرية شرق الجزائر العاصمة (باش جراح). وقد تم تسجيل نسب متوسطة من التلوث قدرت بـ 93.90 ميكرو غ / م³، فيما بلغت النسبة العالية 136.70 ميكرو غ / م³ من بين المعادن الثقيلة سجلنا نسب عالية من الحديد حيث بلغت المتوسطة منها 0.39 ميكرو غ / م³ التي توافق 0.42% من الجزء الكتلتي.

الكلمات المفتاحية : نوعية الهواء، منطقة حضرية، المعادن الثقيلة، الجزائر العاصمة، PM-10.

Résumé :

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les particules fines (PM-10, PM-3 et PM-1) en un site urbain dans l'est d'Alger (Bach-Djerrah). 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 93.90µg/m³. Le maximum atteint est de 136.70µg/m³. Il en résulte une moyenne pollution par les particules inhalables. Parmi les métaux lourds associés aux PM-10, c'est surtout le fer qui accuse des valeurs relativement élevées. On y mesure une teneur moyenne de 0.39 µg/m³ correspondant à une fraction massique de l'ordre de 0.42%.

Mots- clefs : *Qualité de l'air, site urbain, métaux lourds, Alger, PM-10.*

Abstract:

This study presents the level of air pollution by the fine particles (PM-10, PM-3 et PM-1) in urban site in the east of Algiers (Bach-Djerrah). The taking away of the particles is carried out by a sampler with strong flow, HVS-PM-10.

In this site the average daily content of PM-10 rises to 93.90µg/m³. The maximum reaches 136.70µg/m³.

In results from it an average pollution by the particles inhalable. Among the heavy metals associated the PM-10, it especially the iron which shows relatively high values. One measure there is an average content of 0.39µg/m³ correspondent with a mass fraction of about 0.42%.

Keys- words: *Air quality, urban site, heavy metals, Algiers, PM-10.*