

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie de l'environnement

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur

Thème

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

Présenté par :

M^{lle}.BETROUNI Yasmine

Dirigé par : Mr. R.KERBACHI, Professeur, ENP

Présidé par : Mr. A.CHERGUI, Maître de conférence, ENP

Examiné par : Mr. Y.KERCHICHE, Maître assistant, U.Médéa

Année Universitaire 2009 - 2010

Ecole Nationale Polytechnique

10, Avenue Hacen Badi,

El-Harrach, Alger.

Tel: 021 52 14 94 Fax: 021 52 29 73

Promotion : juin 2010



Dédicaces

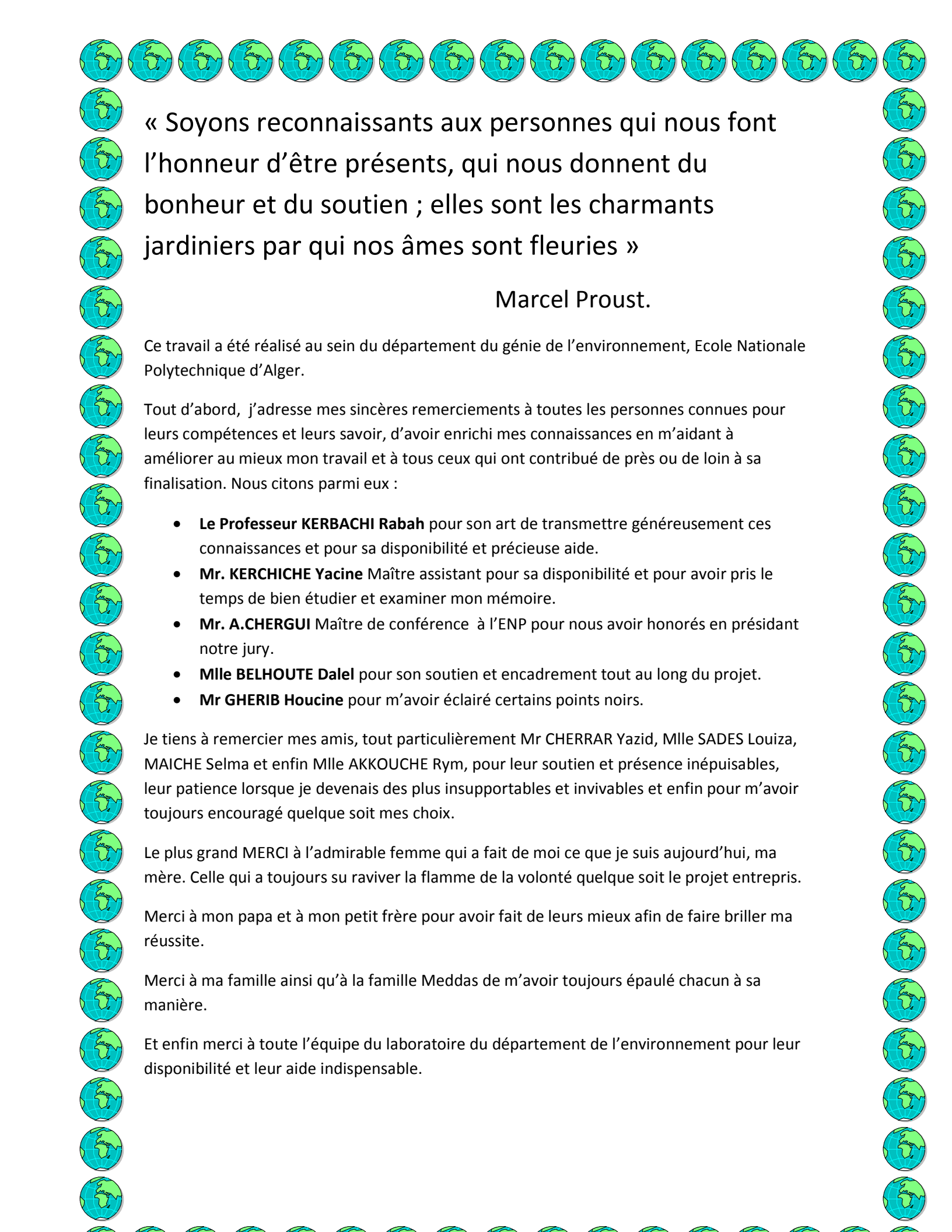
Ce travail est dédié à :

Toute ma famille

Tous mes amis

Tous ceux qui ont contribué à
sa réalisation de près ou de
loin

Tous les environnementalistes



« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous font l'honneur d'être présents, qui nous donnent du bonheur et du soutien ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries »

Marcel Proust.

Ce travail a été réalisé au sein du département du génie de l'environnement, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes connues pour leurs compétences et leurs savoir, d'avoir enrichi mes connaissances en m'aidant à améliorer au mieux mon travail et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa finalisation. Nous citons parmi eux :

- **Le Professeur KERBACHI Rabah** pour son art de transmettre généreusement ces connaissances et pour sa disponibilité et précieuse aide.
- **Mr. KERCHICHE Yacine** Maître assistant pour sa disponibilité et pour avoir pris le temps de bien étudier et examiner mon mémoire.
- **Mr. A.CHERGUI** Maître de conférence à l'ENP pour nous avoir honorés en présidant notre jury.
- **Mlle BELHOUTE Dalel** pour son soutien et encadrement tout au long du projet.
- **Mr GHERIB Houcine** pour m'avoir éclairé certains points noirs.

Je tiens à remercier mes amis, tout particulièrement Mr CHERRAR Yazid, Mlle SADES Louiza, MAICHE Selma et enfin Mlle AKKOUCHE Rym, pour leur soutien et présence inépuisables, leur patience lorsque je devenais des plus insupportables et invivables et enfin pour m'avoir toujours encouragé quelque soit mes choix.

Le plus grand MERCI à l'admirable femme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, ma mère. Celle qui a toujours su raviver la flamme de la volonté quelque soit le projet entrepris.

Merci à mon papa et à mon petit frère pour avoir fait de leurs mieux afin de faire briller ma réussite.

Merci à ma famille ainsi qu'à la famille Meddas de m'avoir toujours épaulé chacun à sa manière.

Et enfin merci à toute l'équipe du laboratoire du département de l'environnement pour leur disponibilité et leur aide indispensable.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION GENERALE.....</u>	<u>1</u>
<u>I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines.....</u>	<u>4</u>
I.1 – Définitions	4
I.2 – Sources des particules fines	8
I.2.1 Les sources naturelles	11
I.2.2 Les sources anthropiques	12
<u>II - Propriétés des particules fines.....</u>	<u>19</u>
II.1 – Propriétés physiques	19
II.2 – Composition chimique	20
II.3 – Mécanismes de formation	22
II.4 – Influence des facteurs météorologiques sur la diffusion des particules	26
<u>III - Effets des particules fines sur la santé et l'environnement</u>	<u>28</u>
III.1 – Impacts sur la santé	28
III.1.1 – Généralités.....	28
III.1.2 – Effets de certains métaux lourds.....	30
III.1.3 – Effets des hydrocarbures aromatiques polycycliques.....	31
III.2 – Impacts sur les écosystèmes.....	31
III.3 – Impacts sur les matériaux et les édifices.....	32
III.4 – Impacts sur le climat	32
<u>IV - Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines</u>	<u>33</u>
IV.1– La sélection des particules en fonction de leurs tailles.....	33
IV.1.1 – Les prélèvements sans coupure granulométrique précise.....	33
IV.1.2 – Les prélèvements avec coupure granulométrique	33
IV.1.3 – Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	36

IV.2 – La caractérisation de la concentration massique.....	37
IV.2.1 – La méthode de référence ou méthode gravimétrique.....	37
IV.2.2 – Les méthodes automatiques	38
IV.3 – Les filtres et membranes de rétention	40
IV.4 – Analyse physique des particules fines	41
IV.5 – Analyse chimique des particules.....	43
IV.5.1 – Analyse de la matière organique.....	43
IV.5.2 – Analyse des éléments inorganiques et des métaux	43
IV.5.3 – Analyse des ions.....	45
<u>V- METHODOLOGIE.....</u>	46
V.1 – Choix du site de prélèvement	46
V.2 – Techniques d'échantillonnage	48
V.3– Minéralisation des filtres.....	52
<u>VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION</u>	53
VI.1 - Etude de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines	53
VI.1.1 – Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10	53
VI.1.2 – Etude de la répartition granulométrique des particules fines	55
VI.1.3 – Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes de particules.....	58
VI.2 – Ampleur de la pollution de l'air par les particules fines et études comparatives.....	64
VI.3 – Etude des métaux lourds associés aux particules fines	68
VI.3.1 – Niveau de pollution de l'air par les métaux lourds	69
VI.3.2 – Comparaison inter-sites du niveau de pollution par les métaux lourds.....	73
VI.3.3 – Corrélation entre les différents couples de métaux lourds et entre métaux et PM-i	74
VI.4 – Perspectives de réduction des émissions de particules fines.....	76
<u>CONCLUSION GENERALE.....</u>	81

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Composition des particules suivant les origines.....	9
Tableau N° 2 : Emissions moyennes des aérosols en (Tg an ⁻¹) et répartition hémisphérique	10
Tableau N° 3 : Estimations moyennes des émissions mondiales en matière particulaire de sources naturelles en Méga tonne.....	12
Tableau N° 4 : Estimations moyennes d'émissions mondiales de particules anthropiques en Méga tonne.....	13
Tableau N° 5 : Emissions industrielles des métaux lourds.....	18
Tableau N° 6 : Les principales formes de particules.....	19
Tableau N° 7 : Composition moyenne d'aérosols d'origines différentes.....	21
Tableau N° 8 : Caractéristiques des différentes classes des particules.....	25
Tableau N° 9 : Caractéristiques statistiques des teneurs en PM-10.....	56
Tableau N° 10 : Caractéristiques statistiques des différentes classes granulométriques.....	59
Tableau N° 11 : Cadre réglementaire internationale pour les teneurs en PM-1.....	65
Tableau N° 12 : Cadre règlementaire internationale pour les teneurs en PM-2,5.....	65
Tableau N° 13 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurées dans certains pays et villes du monde	67
Tableau N° 14 : Comparaison des teneurs en PM-i dans différents sites a Alger.....	68
Tableau N° 15 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques correspondantes en métaux lourds	71
Tableau N° 16 : Comparaison inter-sites des teneurs des métaux lourds suivant la classe des PM-i	71
Tableau N° 17 : Caractéristiques des différents dépoussiéreurs.....	80

Liste des figures

Figure N° 1 : Image d'aérosol minéral.....	6
Figure N° 2 : Image d'aérosol urbain obtenue par microscope électronique.....	6
Figure N° 3 : Image de suies obtenue par microscope électronique.....	7
Figure N° 4 : Image de cendre volante obtenue par microscope électronique.....	8
Figure N° 5 : Granulométrie des particules suivant les origines.....	9
Figure N° 6 : Composition moyenne des particules diesel en pourcentage du poids total.....	15
Figure N° 7 : Structure hypothétique d'une particule d'aérosols.....	21
Figure N° 8 : Composition chimique des particules de diamètre inférieur à 1 µm en milieu urbain européen.....	22
Figure N° 9 : Processus de formation des particules.....	24
Figure N° 10 : Représentation d'une réaction inflammatoire dans le système respiratoire Profond.....	29
Figure N° 11 : Conception de la tête d'impaction française.....	34
Figure N° 12 : Tête américaine de type PM-10.....	35
Figure N° 13 : Tête américaine de type PM-2,5.....	36
Figure N° 14 : Principe de mesure de la jauge beta.....	39
Figure N° 15 : Structure du filtre en nitrocellulose.....	41
Figure N° 16 : Localisation de parc Miremont sur carte google.....	46
Figure N° 17 : Vue du coté sud du poste de mesure.....	47
Figure N° 18 : Vue du coté nord du poste de mesure.....	47
Figure N° 19 : Principe de collecte des PM-i par le HVS	48
Figure N° 20 : Principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade	50
Figure N° 21 : Photo de l'appareil d'échantillonnage	50
Figure N° 22 : Photo du filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.....	51

Figure N° 23 : Photo du grand filtre après prélèvement.....	52
Figure N° 24 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10.....	54
Figure N° 25 : Evolution temporelle des différentes classes granulométriques.....	56
Figure N° 26 : Contribution massique pour un fractionnement PM-1, PM-3.....	57
Figure N° 27 : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-3, PM-10.....	58
Figure N° 28 : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-1, PM-10.....	59
Figure N° 29 : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-7, PM-10.....	59
Figure N° 30 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3, PM-10.....	60
Figure N° 31 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1, PM-10.....	61
Figure N° 32 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-7, PM-10.....	61
Figure N° 33 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3, PM-(3-10).....	62
Figure N° 34 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1, PM-(1-10).....	63
Figure N° 35 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-7, PM-(7-10).....	63
Figure N° 36 : Evolution temporelle du plomb associé aux différentes classes granulométriques.....	69
Figure N° 37 : Evolution temporelle du fer associé aux différentes classes granulométriques.....	70
Figure N° 38 : Evolution temporelle du cuivre associé aux différentes classes granulométriques.....	70
Figure N° 39 : Teneurs moyennes des métaux lourds associés aux différentes fractions granulométriques.....	72
Figure N° 40 : Contributions massiques des métaux lourds dans les différentes classes granulométriques.....	72
Figure N° 41 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/PM-10.....	74
Figure N° 42 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/PM-3.....	75
Figure N° 43 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/Pb dans les PM-10.....	75
Figure N° 44 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/Fe dans les PM-3.....	76
Figure N° 45 : Les cyclones.....	78

Figure N° 46 : Les filtres à manches.....79

Figure N° 47 : Electrofiltre.....79

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

« Et qu'est-ce d'autre qu'un nuage infernal et déplaisant de charbon, mélangé à l'air normalement pur, de sorte que les habitants de cette région respirent un épais brouillard contenant des fumées impures ».John Evelyn 1661 [1].

Monsieur Evelyn paysagiste avait déjà décrit l'atmosphère comme un dépotoir de fumée à l'aube de la drastique chasse à l'énergie dans laquelle le monde a continué d'évoluer jusqu'au jour d'aujourd'hui.

En plus des polluants gazeux (SO_2 , NO_x , etc...), cette fumée contient des particules plus ou moins fines qui détériorent la qualité de l'air.

La phase particulaire de l'atmosphère est caractérisée par son hétérogénéité, d'un point de vue granulométrique ou de composition chimique d'après une large diversité des sources [2]. Les particules en suspension dans l'air, mieux connues sous l'abréviation PM, peuvent être le produit de la nature (volcans, embruns marins, pollens, érosion, bactéries virus...), mais aussi d'origine anthropique résultat de la combustion et de procédés physiques tel que le broyage de ciment [3].

Ce n'est qu'en 1902 que le terme aérosol a été utilisé par monsieur M.Schmauss. Il désigne la suspension de particules solides ou liquides dans une phase gazeuse, ayant des vitesses de chute négligeables, qui peuvent se disperser, se déposer ou encore se condenser suivant les conditions météorologiques [2].

Les aérosols particuliers dit secondaires sont le résultat de divers phénomènes complexes, ils mettent en jeu des précurseurs gazeux tel que les oxydes de soufre et d'azote suivant un processus photochimique [3, 4].

L'expansion du trafic routier est considérée comme le plus important des facteurs. Il induit, la formation de particules dans l'atmosphère, ces dernières proviennent de la combustion du fuel et de gaz d'échappement [5,6].

Les aérosols particuliers primaires sont issus de processus naturels tels que l'évaporation des océans, éruption volcanique, incendies et combustion naturelle de biomasse [5].

INTRODUCTION GENERALE

Il est à préciser que la présence de métaux lourds et de pesticides mais aussi d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'air est directement et partiellement liée à la présence de particules, qui sont généralement constituées d'une fraction minérale (métaux lourds..), et d'une fraction organique tel que (HAP, suies,..) [7].

L'exemple de la grande tragédie de 4000 décès en Angleterre en 1952 [1] illustre bien le caractère néfaste des particules en suspension dans l'air sur la santé humaine mais qui s'étend aussi sur les écosystèmes et la biodiversité [7].

En plus de la dimension qui est un facteur de toxicité, ces dernières véhiculent des composés chimiques pouvant aggraver leur impact [8].

Le contexte réglementaire dans le domaine de la qualité de l'air est fortement marqué par les directives européennes qui portent en particulier sur la qualité de l'air, sur la réduction des émissions de certains polluants ainsi que sur certaines sources (véhicules routiers, engins mobiles non routiers, grandes installations de combustion, installations d'incinération de déchets, installations utilisatrices de solvants ...) [9]. Des mesures ont été prises afin de réguler cette problématique. En plus de dispositifs de surveillance, des campagnes préventives et des plans d'urgences en cas de pic de concentration ont été mis sur pied dans de nombreux pays développés [10].

Comme le degré de toxicité est inversement proportionnel au diamètre aérodynamique, les particules qui suscitent le plus d'intérêt et qui présentent un réel danger pour la santé humaine sont les PM-1, PM-2,5. Ces fines particules pénètrent profondément dans le système respiratoire et altèrent le système cardiovasculaire. [11]. Les PM-10 présentent moins de danger car elles ne pénètrent qu'au niveau supérieur du système respiratoire [12]. Ces dernières sont peu nombreuses mais présentent une masse qui elle est importante [13]. Pour les particules dont le diamètre est supérieur à 10 μ m, la vitesse de chute est suffisante pour permettre un dépôt et donc une rapide élimination de l'atmosphère [14].

En Algérie, pays en voie d'industrialisation et de développement, la pollution atmosphérique est un sujet qui suscite de plus en plus d'attention. La croissance continue du parc automobile induite par une situation socio-économique florissante, oriente les regards vers la question des particules fines, et la qualité de l'air que nous respirons. Certaines études menées sur l'aire de la capitale, région fortement urbanisée, indiquent une exposition de la population à d'importantes concentrations de particules fines [15, 16,17]. La combustion à l'air des déchets urbains constitue également une source non négligeable de pollution atmosphérique [18].

INTRODUCTION GENERALE

Ce sont les populations urbaines, celles résidant au voisinage des sources d'émissions industrielles ou de combustion qui sont le plus exposées à ces différents rejets atmosphériques qui affectent en premier lieu les personnes les plus faibles : asthmatiques, bronchitiques, allergiques, et autres affections respiratoires. Les personnes âgées et les enfants en bas âge sont les plus vulnérables [18]. Aussi et en continuité des études réalisées par le laboratoire des sciences et techniques de l'environnement de l'ENP, nous nous proposons d'étudier dans ce travail l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines en un milieu urbain situé dans le quartier résidentiel de Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger. Une étude comparative avec d'autres sites et une analyse de certains métaux lourds associés aux particules seront également effectuées.

CHAPITRE I

I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

I.1 - Définitions

Pour une meilleure approche de la pollution atmosphérique par particules, il est nécessaire de distinguer entre les différents constituants de la phase particulaire, afin de mieux localiser, l'impact de chaque composant sur l'environnement.

La diversité des aérosols particuliers, est le résultat premier de la multiplicité des sources. Elle est définie selon la composition chimique, la forme, la granulométrie, la densité, mais aussi selon la concentration en nombre ou en masse.

Afin de mieux percevoir le comportement aérodynamique des particules, l'OMS prend en compte la notion de diamètre aérodynamique appelé taille particulaire, qui est un facteur important de classification d'un point de vue toxicologique [19]. Le diamètre aérodynamique d'une particule est égal au diamètre d'une sphère de masse volumique 1 g/cm^3 , dont la vitesse de chute est égale à celle de la particule considérée, en absence de vent et de turbulences [20, 21]. La complexité de la pollution de l'air par les particules se traduit par l'existence dans la littérature de plusieurs définitions. Selon que l'on soit physiciens, environnementalistes, ou toxicologues, on utilise fréquemment les expressions suivantes :

❖ **Aérosol :**

C'est la notion de système di ou tri-phasique, qui inclut la suspension de particules solides ou liquides ou encore les deux dans une phase gazeuse.

Ces particules ont un diamètre inférieur à $100 \mu\text{m}$, suivant des conditions météorologiques bien définies ; au repos on retrouve des particules d'un diamètre de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ et en cas de turbulence (vents forts, orage,..) des particules de diamètre de l'ordre de $100 \mu\text{m}$.

Les aérosols sont présents au niveau de la couche troposphérique de l'atmosphère et y séjournent longtemps à cause de la faible vitesse de chute des particules les constituant. Ce qui explique l'exposition proche et chronique de l'homme à ce phénomène [2].

Il existe schématiquement deux types d'aérosols :

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

- **Aérosols naturels** [2] :
 - ✓ Aérosol terrigène : comme son nom l'indique c'est le résultat de l'érosion des sols.
 - ✓ Aérosol marin : suspension de cristaux résultant d'évaporation de gouttelettes d'eau chargées en sels.
- **Aérosols polluants** [2] :
 - ✓ Aérosol primaire : constitué de particules émises directement sous forme solide.
 - ✓ Aérosols secondaire : suspension de particules issues de conversion chimique de gaz et de mécanisme photochimique complexe ajouté au phénomène de condensation.

❖ **Particules :**

Dans le domaine de la protection de l'environnement, le terme particule définit une petite partie de matière solide ou liquide, qui forme un aérosol ou se dépose sur une surface [9]. On retrouve dans la littérature deux grands types de classification, basés sur un paramètre dimensionnel. La dénomination métrologique fait référence à la taille particulaire. On définit l'abréviation anglaise PM-i (P : particulate, M : matter, indice i : diamètre aérodynamique). En toxicologie et en épidémiologie une dénomination plus imagée est utilisée : grosse, fine, ultrafine [22].

Les sous-classes sont définies comme suit :

- **Particules totales en suspension (TSP) :**

Abréviation anglaise (total suspended particulates) qui désigne « toutes les particules en suspension dans un volume d'air d'après les normes NF EN 12341 et NF EN 481. Les TSP représentent les particules de diamètre aérodynamique variant entre 30-40 μm pour la définition américaine et de 0-100 μm pour l'européenne. les TSP sont potentiellement inhalables mais contrés au niveau des narines et des bronches [9].

- **Les grosses particules PM-10 :**

Particules inhalables de diamètre inférieur à 10 μm (Fig. 1), c'est-à-dire six à huit fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu ou la taille d'une cellule [23].

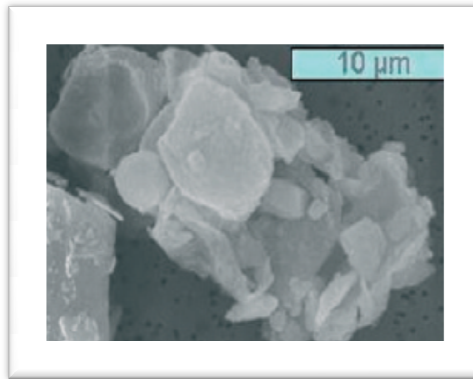


Figure N° 1 : Image d'aérosol minéral [24].

- **Les particules fines PM-2,5:**

Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 μm , (Fig. 2) cette fraction parcourt l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires [11].

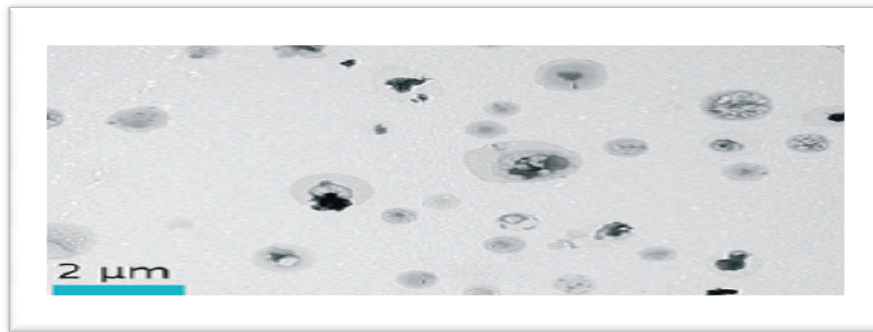


Figure N° 2 : Image d'aérosol urbain obtenue par microscope électronique [24].

- **Les particules ultrafines PM-0,1 :**

Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 0,1 μm ou particules ultrafines (origine anthropique non contrôlée). Leur taille inférieure aux structures cellulaires leur confère des propriétés de pénétration au niveau intracellulaire spécifique [21,11]. Celles-ci sont également dénommées nanoparticules bien que cette dernière dénomination soit plutôt réservée aux particules manufacturées à l'échelle nanométrique (moins de 100 nm) [25].

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

- **Les poussières (dust) :**

Terme qui regroupe les particules totales en suspension TSP, le mot anglais dust désigne les particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $75\ \mu\text{m}$, pour celles d'une dimension supérieure le dépôt est à proximité de la source émettrice [26]

- **Les fumées noires :**

Particules majoritairement composées de carbone et dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $5\ \mu\text{m}$ [26].

- **Brouillard et brume :**

Suspension de gouttelettes liquides de diamètre aérodynamique supérieur à $1\ \mu\text{m}$ dans l'air. Pour des conditions de visibilité de 1-2 km on appelle cette suspension brume et pour des conditions de visibilité inférieure à 1 km on appelle cette suspension brouillard [27].

- **Les suies :**

Solides essentiellement composés de carbone et éventuellement d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, possèdent une structure proche de celle du graphite. Elles sont produites dans les systèmes de combustion et de pyrolyse. (Fig. 3). Les particules de suies sont généralement très fines.

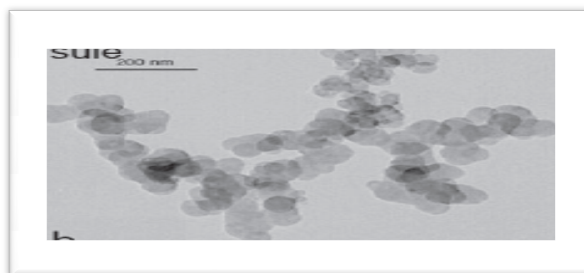


Figure N° 3 : Image de suies obtenue par microscope électronique [24].

- **Les cendres volantes :**

Solides carbonés résiduels, qu'on retrouve dans les gaz résultant de la combustion, évidemment leur composition varie d'un combustible à un autre (Fig. 4).

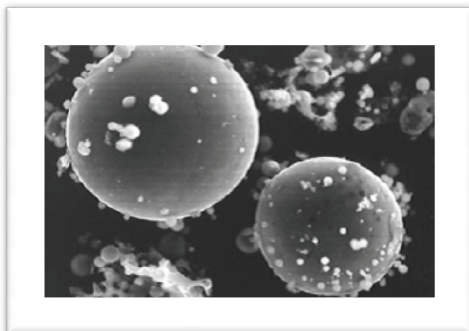


Figure N° 4 : Image de cendre volante obtenue par microscope électronique [24].

I.2 - Sources des particules fines

Les types d'aérosols présents dans l'atmosphère sont définis d'après leur provenance. Les suspensions primaires sont majoritairement formées de particules dites grossières PM-(2,5-10) dont la fraction minérale est prépondérante. D'une manière directe ou éventuellement indirecte elles sont issues de sources naturelles diverses [28]. On retrouve les résultats d'érosion, d'éruptions volcaniques, d'embrun marin, d'activité de la flore...etc. Actuellement la réglementation et les recommandations internationales, visent essentiellement les classes de particules fines PM-10 et en particulier les PM-2,5 présentes en grandes proportions dans les aérosols secondaires, qui véhiculent des espèces minérales ou organiques toxiques. Ces dernières proviennent principalement de manière directe ou indirecte de l'activité humaine [29]. Selon les études menées sur la qualité de l'air urbain et celui des sites industriels, l'utilisation de combustibles fossiles est la plus incriminée concernant la présence des PM-2,5 [30]. On y retrouve les moteurs diesel, les centrales thermiques, les centres d'incinération, Etc. Les industries pointées du doigt sont : les cimenteries, les cokeries, le domaine de la sidérurgie, des pesticides, etc.

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

Généralement les caractéristiques physico-chimiques des particules sont fonction des sources dont elles proviennent. La figure N° 5 illustre la granulométrie des particules en fonction de leur source [9]. Le tableau N° 1 résume l'origine et la composition globale des particules fines et très fines [31].

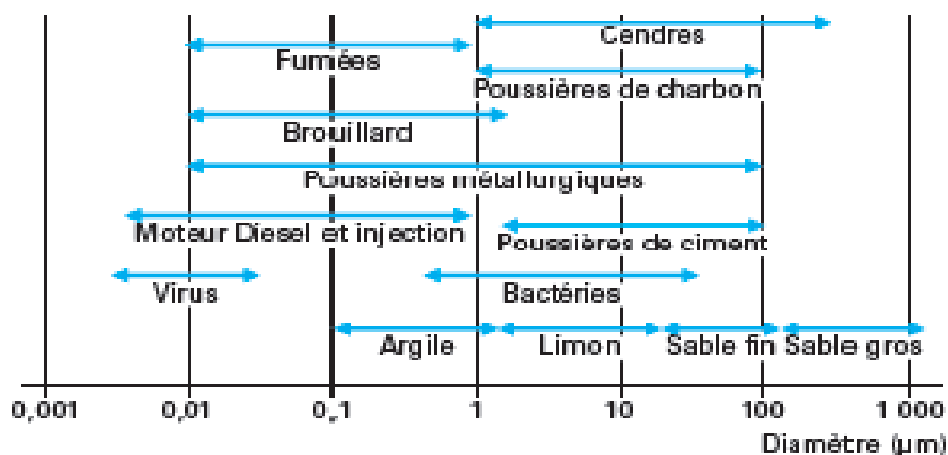


Figure N° 5 : Granulométrie des particules suivant les origines [9].

Tableau 1 : Composition des particules suivant les origines [31].

PARTICULES FINES diamètre : 2,5-10 μm	PARTICULES TRÈS 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 (NOx, SO2). Procédés industriels à très haute température (métallurgie, incinération).

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

Pour une meilleure approche de cette pollution, il est indispensable de localiser les zones à forte exposition ou encore à forte teneur à un niveau mondiale. Le facteur développement qui inclut la croissance socio-économique, les facteurs géographiques, et météorologiques confèrent une distribution justifiée des aérosols entre le sud et le nord. Le tableau 2 représente cette distribution annuelle [32].

Tableau N° 2 : Emissions moyennes des aérosols en ($Tg\ an^{-1}$) et répartition hémisphérique.

Entre crochés la plage de variation des estimations [32].

type	total	Plage de variation des estimations	Nord(%)	Sud(%)
Sel de mer	3344	1000-6000	43	57
Dont partie < 1 μm	54	18-100		
Dont partie [1,16] μm	3290	1000-6000		
Aérosol minéral (« sable »)	2150	1000-3000	84	16
Dont partie < 1 μm	110			
Dont partie < [1,2] μm	290			
Dont partie [2,20] μm	1750			
Aérosol organique				
Dont feux de biomasse	54	45-80	50	50
Dont combustion	28	10-30	98	2
fossile	56	0-90	98	2
Dont biogénique				
Carbone élémentaire	12.3			
Dont feux de biomasse	5.7	5-9	50	50
Dont combustion	6.6	6-8	98	2
fossile				
Poussières industrielles	100	40-130		

Il existe globalement deux types de sources, les sources naturelles et les sources artificielles. Nous allons traiter chacune d'elles, afin d'évaluer l'ampleur de l'exposition à cette pollution et établir un point de départ, pour des perspectives visant l'amélioration de ce que nous respirons.

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

I.2.1 - les sources naturelles :

A) Source terrigène :

L'érosion éolienne est à l'origine de la présence de composés constituant le sol tels que les oxydes métalliques (fer, manganèse) et les aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On note la présence de bactéries, de moisissures et des débris provenant de l'humus. L'intensité de l'érosion, c'est-à-dire la vitesse du vent et la couverture végétale influence sur la teneur et sur la composition. Exemple : la présence de particules de sable qui est due à la désertification [33].

B) Source marine :

Les embruns marins sont le résultat de l'évaporation de fines gouttelettes d'eau éventuellement engendrées par l'écrasement des vagues sur les rochers, donnant naissance à des cristaux qui séjournent dans l'atmosphère. L'aérosol marin a une structure similaire à celle de l'eau de mer. On y retrouve également des nitrates produits éventuellement de l'activité du vivant microbiologique des écosystèmes marins [33].

La flore marine se caractérise aussi par l'émission d'un composé sulfuré appelé dimethylsulfure qui s'oxyde en SO_2 puis en sulfates. Le sulfure organique dissout présent dans l'eau, subit des oxydations dans l'atmosphère pour donner des sulfates.

C) Source volcanique :

Cet aérosol est essentiellement constitué de métaux, tel que le cadmium, et de sulfates provenant de l'oxydation du dioxyde de soufre qui est rejeté d'une manière continue par le volcan [33].

D) Source biogénique :

Ces aérosols sont quasi exclusivement constitués de composés organiques, tels que les hydrocarbures à haut poids moléculaire émis par la flore, ou résultant de l'oxydation d'hydrocarbures plus légers. On note la présence de cires, de pollens et de potassium qui est à la base un élément nutritif présent dans le sol [33].

Il est constaté, que les sources naturelles sont à l'origine d'émissions de particules majoritairement primaires et de particules secondaires en plus faible proportion.

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

Le tableau N° 3 illustre des estimations moyennes de teneurs à l'échelle mondiale de ces dernières [34].

Tableau N° 3 : Estimations moyennes des émissions mondiales en matière particulaire de sources naturelles en Méga tonne [34].

Sources naturelles			
Type des particules	Particules :	De toutes tailles	Plus petites que 5 µm
primaires	Embruns marins	1000	500
	Poussières soulevées par le vent	500	250
	Eruptions volcaniques	-	25
	Débris météoriques	10	-
	Feux de forêts	25	5
	total		1535 (61%)
secondaires	Sulfates	420	335
	Nitrates	75	60
	hydrocarbures	75	75
	total		570 (23%)

I.2.2 - les sources anthropiques :

L'expansion de l'activité humaine a un impact important à une échelle planétaire. Des études ont montré que la pollution par les particules est responsable d'une manière considérable, de la présence accrue de la fraction granulométrique (PM-2,5) [35], qui véhiculent des espèces toxiques et atteignent sérieusement la santé humaine. Le marché automobile a débouché vers la croissance du parc qui joue un rôle des plus importants dans l'exposition à de fortes teneurs polluantes dans le milieu urbain [18].

L'industrialisation de part le monde est basée principalement sur l'utilisation d'énergies fossiles. Ce qui ne régularise pas la qualité de l'air des sites où sont implantées différentes industries. Qu'elle soit d'origine chimique ou mécanique, on retrouve des particules de type primaire ou secondaire. Il est à noter que celles de types secondaires représentent 70% à 80% de l'aérosol anthropique total [36,37].

Le tableau N° 4 représente des estimations moyennes d'émissions mondiales en matière de particules anthropiques [34].

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

Tableau N° 4 : Estimations moyennes d'émissions mondiales de particules anthropiques en Méga tonne [34].

Type des particules	Sources anthropiques		
	Particules :	De toutes tailles	Plus petites que 5 µm
primaires	Processus industriels	56.4	12.4
	Source fixes de combustion	43.4	9.6
	Incinération de déchets solides	2.4	0.4
	Transport divers	2.2	1.8
	total	28.8	5.4
secondaires	total	133.2	29.6
	Sulfates	220	200
	Nitrates	40	35
	hydrocarbures	15	15
total	275 (11 %)	250 (16 %)	

La classification des sources anthropiques est basée sur deux facteurs qui sont :

- Processus de formation des particules (mécanique ou chimique)
- Sources fixes ou mobiles

A) Processus de formation :

— Les poussières d'origine mécanique

Ce sont des particules primaires principalement, générées par les opérations de broyage, concassage, éclatement d'un solide ainsi que les poussières issues de l'attrition (usure par frottement) de solides divisés lors de leur transport ou de leur utilisation. Ces particules sont en général de taille supérieure à 2,5 µm et contiennent une proportion très faible de particules submicroniques [27].

— Les particules d'origine chimique et thermique

Ce sont des particules secondaires qui sont formées lors d'un changement d'état de la matière, lors d'une réaction chimique ou lors d'étapes de condensation de gaz ou solidification de liquides.

Ces particules sont majoritairement de taille très fine (PM-1), mais s'agglomèrent entre elles et sur d'autres poussières pour former des particules de taille plus importante (PM-2,5) [27].

B) Sources fixes ou mobiles :

— Les sources mobiles :

En milieu urbain, la concentration en particules est généralement la plus élevée au niveau des axes de grande circulation, notamment lorsque la fréquentation de ces axes par des véhicules diesel y est importante [38]. En plus des particules diesel, les moteurs (essence) sont indirectement liés à la formation de particules secondaires, résultants de transformations chimiques ou photochimiques de gaz (SO_2 , NO_x , NH_3 , COV) et qui s'adsorbent ou se condensent à la surface des suies. A cela, il faut ajouter l'émission des HAP qui comportent une toxicité considérable lors d'exposition chronique [39].

Il faut souligner que la classe granulométrique la plus concernée par ces sources est les particules fines et ultrafines.

Les émissions qu'on y retrouve sont les suivantes :

• **Particules diesel :**

Le diesel, initialement utilisé quasi exclusivement pour les véhicules lourds, a vu son emploi se développer très fortement pour les véhicules particuliers au cours de ces dernières années. En Algérie d'après l'Office National des Statistiques (ONS), le parc automobile compte environ 27,33 % de véhicules diesel. Il est communément admis qu'un véhicule diesel émet en moyenne 60 mg de poussières par kilomètre parcouru, alors qu'un véhicule à essence n'émet que 3 mg/km [18].

Cet aérosol est injecté dans l'atmosphère après formation des particules au niveau du moteur (Fig. 6). Ces dernières sont constituées à partir de suies solides (carbone) et les combinaisons chimiques qui découlent notamment de la présence de soufre dans le gazole et les huiles de lubrification, imprégnés par les hydrocarbures imbrûlés (HAP), mais aussi de métaux lourds (Zn, Fe,...) suivant la composition du carburant [40]. Ces particules sont contenues dans la fraction granulométrique des PM-2,5, (appelées aussi particules alvéolaires), c'est-à-dire celles qui présentent un degré de toxicité très inquiétant.

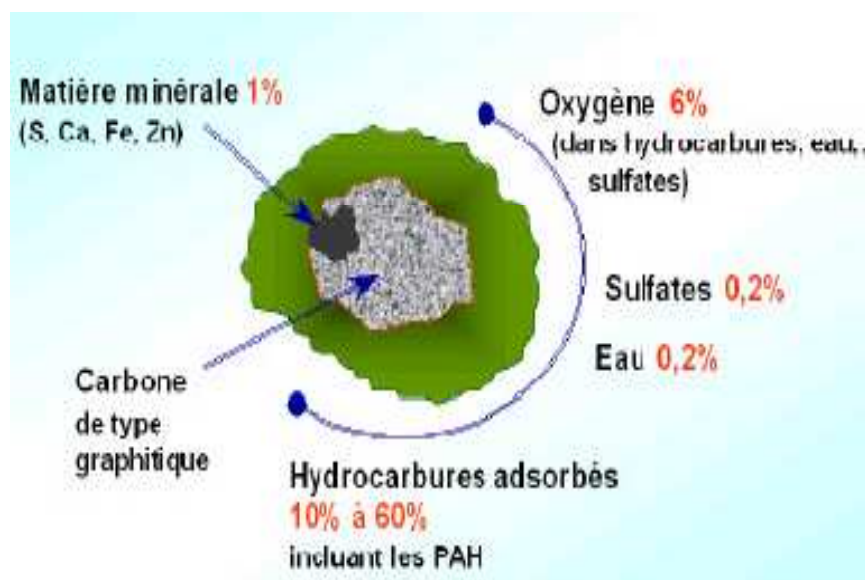


Figure N° 6 : Composition moyenne des particules diesel en pourcentage du poids total [41].

- **Particules routières :**

La composition des carburants utilisés par les moteurs est très riche, cette richesse est due en partie aux différents additifs de carburant et d'huile de lubrification à des fins multiples (réduction en terme de consommation, caractère économe, amélioration des performances et de la durée de vie du moteur). Les éléments visés sont les halogénures (Br,Cl) de plomb qu'on retrouve dans les gaz d'échappement.

- **Les métaux lourds :**

Les métaux lourds (plomb, cadmium, mercure,..) sont les éléments de masse volumique élevée (supérieur à 5g/cm³) présents naturellement mais en faible quantité dans les sols, l'eau et l'air, et qui peuvent être particulièrement toxiques.

Par extension, d'autres éléments sont rattachés à cette catégorie comme le zinc qui est un métal toxique mais particulièrement lourd, ou encore l'arsenic qui n'est pas un métal mais possède un caractère de toxicité presque équivalent à celui des métaux lourds, c'est pourquoi, la réglementation regroupe ces éléments toxiques sous terme « éléments trace » [42].

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

La toxicité des métaux lourds est renforcée par un phénomène d'assimilation et de concentration dans l'organisme où ils s'y retrouvent par ingestion d'après le phénomène de bioaccumulation c'est-à-dire accumulation à chaque étape de la chaîne alimentaire (flore → faune → homme) ou par inhalation (particules fines présentes dans l'atmosphère).

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 [43].

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% [44]. Il y'a quelque années, les émissions de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10^6 Kg/an [45].

— Sources fixes :

Les rejets particuliers industriels peuvent être le résultat d'utilisation d'énergie fossile c'est-à-dire de combustion mais aussi de certains procédés chimiques tels que le raffinage et mécaniques tel que broyage.

Les principales industries émettrices sont les suivantes :

• Centrales thermiques :

Les rejets atmosphériques issus de la combustion sont variés, on y trouve des espèces minérales, des métaux, des particules carbonées mais aussi des composés secondaires pouvant conduire à la formation de particules par transformation des gaz oxydes d'azote, dioxyde de soufre mais ou de l'ammoniac [47].

• L'industrie de sidérurgie :

Les différents processus de production tels que l'agglomération et frittage des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les fourneaux à haute température...sont à l'origine de l'émission d'une large gamme de poussières (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , ZnO_2 ..), on retrouve aussi les oxydes de fer qui sont caractérisés par leur faible diamètre aérodynamique [47].

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

- **L'industrie des métaux non ferreux :**

C'est une source d'émission d'importantes quantités de métaux tels que le Pb, Zn Cu, Cd, Ni, Hg...qui sont produits au cours du raffinage par des procédés de fusion à haute température. Les vapeurs métalliques se diffusent dans l'atmosphère, d'où la formation de fines particules par voie de condensation et d'oxydation, ces dernières sont caractérisées par un diamètre aérodynamique inférieur à 1 μ m [47].

- **L'industrie des matériaux de construction :**

Les procédés mécaniques tels que le broyage, le concassage, l'extraction, les opérations de fusion de transport...sont à l'origine de l'émission d'une grande quantité de poussières. Les cimenteries représentent une source considérable en termes de pollution atmosphérique, qui s'accroît avec l'importance du marché de construction [47].

- **L'industrie pétrochimique :**

Elle ne demeure pas grande émettrice de poussières, l'industrie pétrochimique contribue de manière indirecte à la formation de particules et ceci à travers l'émission de composés tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques et de certains métaux tels que le cadmium, vanadium, mercure...au cours des procédés de craquage et de raffinage [47].

- **Les installations d'incinération des déchets :**

En cas d'absence de traitement des rejets atmosphériques et de tri rigoureux, l'incinération est une voie génératrice de multiples particules d'une toxicité considérable, on retrouve des quantités importantes de métaux (Zn, Fe, Pb, Cd, Hg...), de suies, de cendres et des composés gazeux soufrés qui donnent naissance au dioxyde de soufre par oxydation dans l'air, des oxydes métalliques tels que les oxydes de fer, des hydrocarbures qui résultent d'une combustion incomplète [47]. Ainsi les sources industrielles sont à l'origine d'une importante émission de métaux lourds. Le tableau N° 5 résume les principales sources d'émission de métaux lourds dans l'atmosphère.

Chapitre I - Généralités sur la pollution de l'air par les particules fines

Tableau N°5 : Emissions industrielles des métaux lourds [46].

Industrie émettrice	Principaux métaux lourds émis à l'atmosphère
Combustibles minéraux solides	Arsenic (As), Cadmium (Cd), Cuivre (Cu)
Combustion fioul lourd	Arsenic (As), Cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Sélénium (Se), Zinc (Zn)
Combustion du charbon,	Mercure (Hg), Zinc (Zn)
Combustion du pétrole	Mercure (Hg)
Combustion biomasse	Cadmium (Cd)
Incinération de déchets	Cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Zinc (Zn)
Production de verre	Arsenic (As), Chrome (Cr), Sélénium (Se)
Fabrication de certains verres (cristal),	Plomb (Pb)
Métallurgie des ferreux	Arsenic (As), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Zinc (Zn)
Métallurgie non ferreux	Arsenic (As), Cuivre (Cu), Zinc (Zn)
Fonderie	Chrome (Cr)
Production de zinc	Cadmium (Cd)
Industrie du chlore	Mercure (Hg)
Production de ciment	Chrome (Cr)
Production de chlore	Mercure Hg
Première et seconde fusion du plomb	Plomb (Pb)
Fabrication de batteries électriques,	Plomb (Pb)
Usure des caténaires induit par le trafic ferroviaire	Cuivre (Cu)

CHAPITRE II

II – Propriétés des particules fines

La caractérisation des particules se fait généralement selon trois critères , qui peuvent aussi nous renseigner sur le degré de toxicité ; ces critères sont :

- Propriétés physiques : Aspect morphologique
- Composition chimique
- Mécanismes de formation

II.1 - Propriétés physiques






- Aspect morphologique :

La source d'émission est le principal facteur qui définit la forme d'une particule, on retrouve des particules sphériques telles que les cendres volantes et les pollens, des particules cubiques irrégulières, flocons tels que les minéraux, fibreuses telles que les fibres végétales et enfin flocons condensé tels que les fumées.

Leur proportion en masse est fonction du type d'aérosol rencontré [48].

Le tableau N° 6 illustre les différentes formes citées plus haut.

Tableau N° 6 : Principales formes de particules [48].

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

Chapitre II – Propriétés des particules fines

II.2- Composition chimique

La composition chimique des particules est très variée et ceci est du à la diversité des sources. Ainsi, les PM-2,5 d'origine urbaine (production d'énergie et trafic routier) sont majoritairement constituées de sulfates (SO_4^-), nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+), composés organiques et carbone élémentaire. Les particules d'origine industrielle et plus particulièrement celles issues de la combustion du charbon sont essentiellement constituées de trois familles de composants:

— les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) proviennent du carbone organique imbrûlé lors de la combustion (de 1 à 90 % de la masse de particules suivant les conditions de combustion) [49].

— les matières minérales contenues dans le charbon peuvent s'échapper avec les particules (Si, Al, Ca, Fe, ...) [49].

— les métaux lourds contenus dans le charbon peuvent être vaporisés au niveau du brûleur.

Les particules d'origine naturelle sont riches en oxydes de métaux (alumine, fer, titane, silice, Cd...) issus de l'érosion, pollens et composés marins (Na, Cl...), et contiennent éventuellement des sulfates produit de transformation du SO_2 émis par les volcans [50].

La figure N° 7 illustre d'une manière générale la composition hypothétique d'une particule.

La composition des aérosols issus de différentes origines est illustrée par le tableau N° 7.

La figure N° 8 représente la composition moyenne d'un aérosol urbain européen en PM-1.

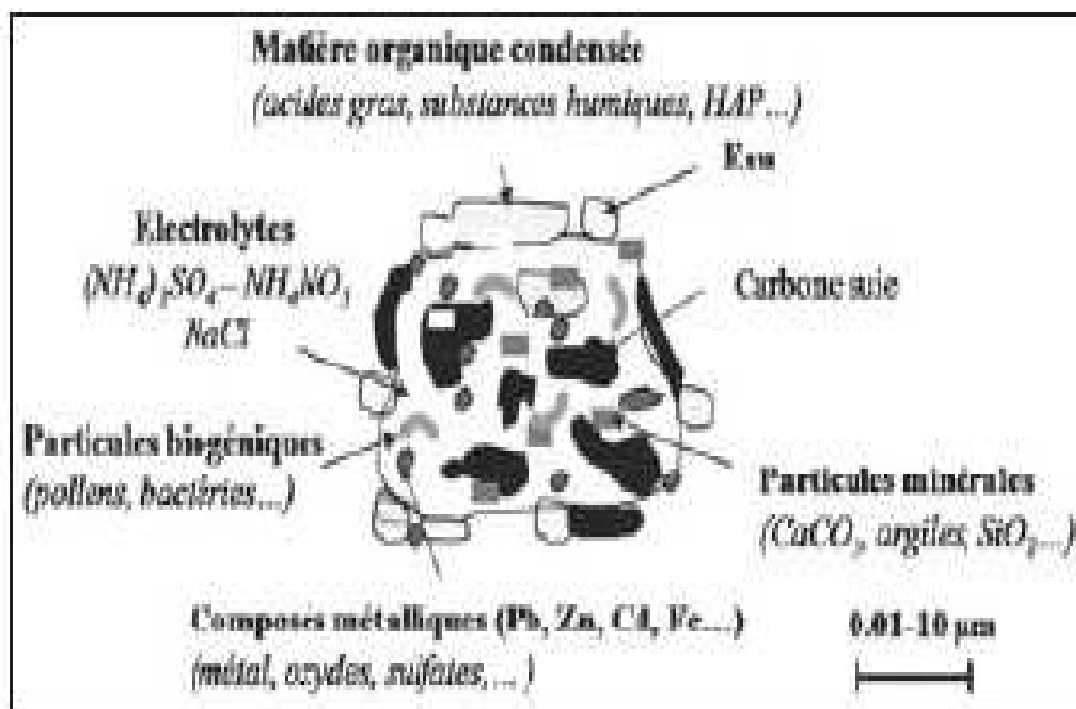


Figure N° 7 : Structure hypothétique d'une particule d'aérosols [51].

Tableau N° 7 : Composition moyenne d'aérosols d'origines différentes [2].

Aérosol Urbain	Composition (%)	Aérosol Marin	Composition (%)
Composés organiques	20	Chlore	55
Nitrates	15	Sodium	30,6
Sulfates	13	Sulfates	7,7
Composés minéral	9	Magnésium	3,7
Suie	7	autres	3
Sel de mer	5		
autres	4		
	27		

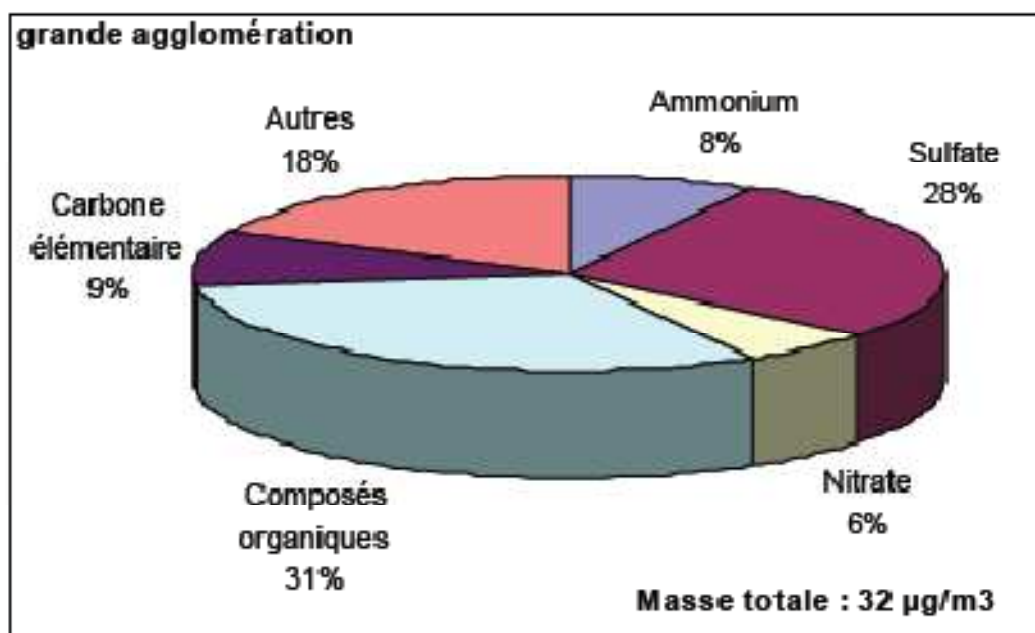


Figure N° 8 : Composition chimique des particules de diamètre inférieur à 1 µm en milieu urbain européen [2].

II.3- Mécanismes de formation

Les travaux de Whitby ont montré que la distribution granulométrique des aérosols peut être décrite en 3 modes principaux [52, 53], représentés sur la figure N° 9.

— **Le mode nucléation :**

Contient des particules ultrafines, de diamètre inférieur à 0,1 µm ; qui sont formées principalement par condensation de vapeurs chaudes au cours de procédés de combustion à température élevée ou par nucléation homogène ou hétérogène de composés à faible pression de saturation, issus de la conversion photochimique des certains gaz (NO_x, SO₂, COV, NH₃). Bien que le plus grand nombre de particules atmosphériques apparaissent dans le mode nucléation, ces particules contribuent peu à la masse totale de particules en raison de leur très petite taille [53].

Chapitre II – Propriétés des particules fines

— Le mode accumulation :

Contient des particules de diamètre compris entre 0,1 et 2 μm qui résultent de la coagulation de particules du mode nucléation, ainsi que de la condensation de vapeurs sur les particules existantes (suies), dont la taille augmente alors dans la gamme. Ce mode contribue de façon majeure à la surface et à la masse totale des aérosols dans l'atmosphère. Le mode accumulation est appelé ainsi car les procédés d'élimination atmosphériques sont moins efficaces dans cette gamme de tailles. Ces fines particules peuvent rester en suspension dans l'atmosphère pendant des jours voire des semaines. Les dépôts sec et humide (lessivage par les précipitations) sont les principaux processus par lesquels ces particules sont finalement éliminées de l'atmosphère [53].

Toujours liés l'un à l'autre dans l'atmosphère, ces deux modes forment le groupe des fines particules, qui jouent un rôle essentiel dans la physico-chimie atmosphérique.

— La formation mécanique :

Plus spécifique des particules primaires d'origine naturelle car il s'agit de l'érosion éolienne, des météorites et des embruns. Les particules primaires sont essentiellement retrouvées dans la fraction des grosses particules, alors que les particules secondaires sont principalement présentes dans les classes des particules fines et ultrafines [54].

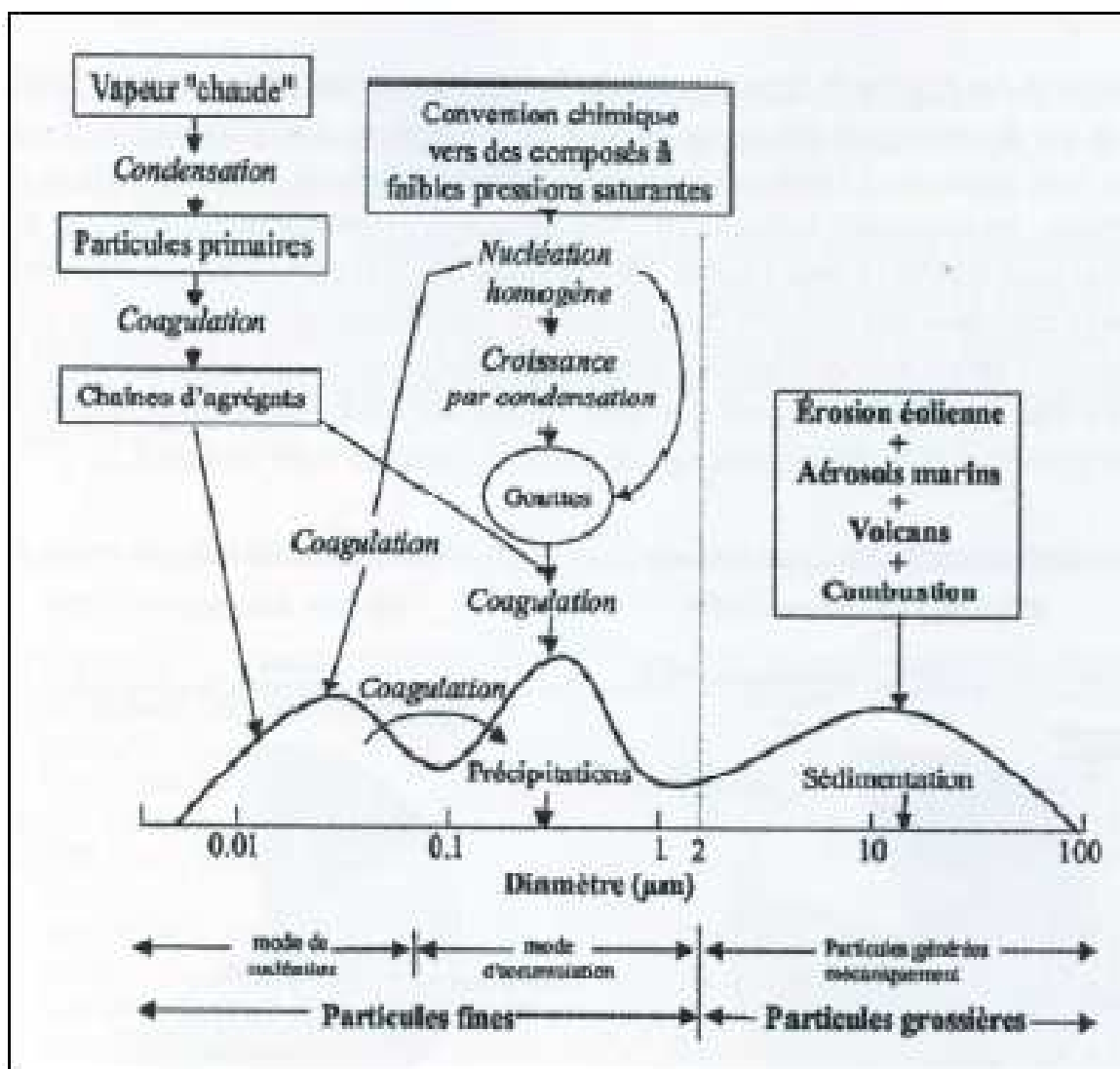


Figure N° 9 : Processus de formation des particules [53].

Les substances majoritaires composant les particules sont les sulfates, les nitrates, l'ammonium, le chlorure de sodium, le carbone et des matières minérales. Mais la composition des particules est en lien direct avec leurs origines, il peut donc être utile d'associer pour chaque classe de particules, les sources, le mode de formation et leur composition (tableau N° 8).

Chapitre II – Propriétés des particules fines

Tableau N° 8 : Caractéristiques des différentes classes des particules [55].

Dénomination		Origine	Type de formation	composition
Toxicologique	Métrologique			
grosses	PM-10	Naturelle ou anthropique	-Erosion minérale -Usure de la chaussée, des pneus, des garnitures de freins	-Matériaux terrigènes (oxydes d'aluminium, silice) -Carbone organique -Carbone élémentaire -Sulfates, nitrates, ammonium -Embrun(HCl)
fines	PM-2,5	Anthropique essentiellement	-Déchets de combustion -Accumulation -Nucléation -Condensation	-Matériaux terrigènes (oxydes d'aluminium, silice) -Carbone organique -Carbone élémentaire -Sulfates, nitrates, ammonium -HAP** -Métaux lourds*
ultrafines	PM-0.1	Anthropique essentiellement	-Déchets de combustion -Nucleation	-Carbone élémentaire -HAP** -Métaux lourds*

**82% des PM-2,5 contiennent des HAP.

*80% des PM-2,5 contiennent du plomb.

Chapitre II – Propriétés des particules fines

II.4 - Influence des conditions météorologiques

La dispersion atmosphérique désigne l'ensemble des mécanismes physiques (diffusion, transport) de mélange d'une substance dans l'air. Les émissions de polluants ainsi que les phénomènes de dispersion s'effectuent essentiellement dans la couche limite de l'atmosphère (CLA), qui s'étend du sol jusqu'à 1 ou 2 km d'altitude [56]. Cette couche est agitée sans cesse par des mouvements tant horizontaux que verticaux. L'état de la couche limite atmosphérique a un impact important sur la dispersion des panaches à l'intérieur de celle-ci. Cet état, et donc la dispersion et le transport des polluants dans l'air, dépendent des conditions météorologiques. La dispersion d'une substance dépend de plusieurs paramètres :

- **Le vent :**

C'est un facteur essentiel qui explique la distribution des émissions polluantes. Il intervient tant par sa direction pour orienter les panaches de pollution que par sa vitesse pour diluer et entraîner les émissions de polluants. Une absence de vent contribuera à l'accumulation de polluants près des sources et inversement [57].

- **Le gradient vertical de température :**

Il détermine le mouvement ascendant ou descendant d'une masse d'air. La température de l'air diminue généralement avec l'altitude (1° pour 100 m d'altitude) ce qui favorise la dispersion des polluants. Les inversions thermiques sont des cas particuliers où l'atmosphère, au lieu de se refroidir avec l'altitude, se réchauffe jusqu'à un certain niveau. Ce niveau représente une discontinuité thermique qui bloque toute possibilité d'échange vertical. Les polluants sont alors bloqués dans la basse couche de l'atmosphère où ils s'accumulent. Les inversions peuvent être observées tout au long de l'année par des nuits sans nuages avec un refroidissement fort du sol, surtout en absence de couverture végétale qui maintient la chaleur à ce niveau. En hiver, le réchauffement diurne n'est pas toujours suffisant pour faire disparaître cette inversion de basse couche qui a tendance à s'affirmer au fil des jours au cours de longs épisodes froids persistants [58].

Chapitre II – Propriétés des particules fines

- **La topographie :**

L'air froid et la pollution s'écouleront toujours vers les vallées ou par densité. Cet air et la pollution environnante seront captifs. Sous l'influence du rayonnement solaire, des phénomènes de brise de pente, montante ou descendante et de brise de vallée, entraînent l'air de la vallée vers le plateau et inversement, peuvent être observés. Les obstacles naturels ou les grandes constructions peuvent provoquer des tourbillons ou gêner la dispersion des polluants. L'agglomération constitue également un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour. L'air chaud s'élève, provoque une dépression qui va attirer l'air plus frais de la périphérie, entraînant du même coup les polluants qui peuvent s'y trouver [52].

- **La température de l'air :**

Elle modifie les conditions de dispersion des polluants. Le froid diminue la volatilité de certains gaz et donc limite leur dispersion tandis que la chaleur estivale et le rayonnement solaire favorisent les mécanismes photochimiques.

Les phénomènes de brise interviennent aussi dans la dispersion. En été et en l'absence de vent, on observe sur le littoral ou au bord des grands lacs, des phénomènes de brise de terre (le matin) et de brise de mer (l'après-midi). Dû aux différences de température, ce phénomène fait évacuer les polluants le matin et les fait revenir l'après midi.

En présence de polluants issus de l'automobile ou de l'industrie, il y a aussi l'influence de l'ensoleillement qui provoque la formation d'ozone [58].

- **Le dépôt humide :**

Le dépôt humide est la principale voie d'élimination des particules, selon deux modes, les fines particules, en particulier celles contenant des composés hygroscopiques, servent de noyaux de condensation sur lesquels se forment des gouttelettes de nuage. Lorsque ces gouttelettes grossissent suffisamment pour qu'il pleuve, les particules sont éliminées avec les précipitations. Lorsqu'il pleut les gouttes d'eau entraînent également les particules les plus grosses [53].

CHAPITRE III

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

A ce jour, les effets des aérosols sur la santé ont fait l’objet de nombreuses études. Il est aujourd’hui admis que les particules jouent un rôle important dans les effets sanitaires engendrés par la pollution atmosphérique.

En plus d’un effet nocif sur l’être humain, des effets ont été aussi observés sur les écosystèmes. L’impact de cette pollution se faire sentir même sur le plan économique.

III.1 - Impact sur la santé

III.1.1 - Généralités :

Les principaux effets recensés sont des troubles cardio-respiratoires qui peuvent survenir à court terme (dans les quelques jours à quelques semaines suivant l’exposition) ou bien à long terme (suite à une exposition chronique sur plusieurs années). Les particules atmosphériques (PM-10, PM-2,5 et PM-1) peuvent déclencher des réactions inflammatoires, une amplification des réactions allergiques, des maladies respiratoires obstructives chroniques (asthme), un stress oxydant, mais aussi un remodelage irréversible des tissus pulmonaires et une modulation de l’expression des gènes responsable de l’apparition d’un cancer. On constate à la fois une aggravation des affections respiratoires et une augmentation de l’indice de ces maladies. Par ailleurs, les particules peuvent engendrer des effets néfastes sur le système cardio-vasculaire. Ces différents effets peuvent se traduire notamment en thème de consultation médicale, d’hospitalisation, ou de décès anticipés [53, 54].

La figure N° 10 illustre une réaction inflammatoire induite par la pénétration des particules dans le système respiratoire.

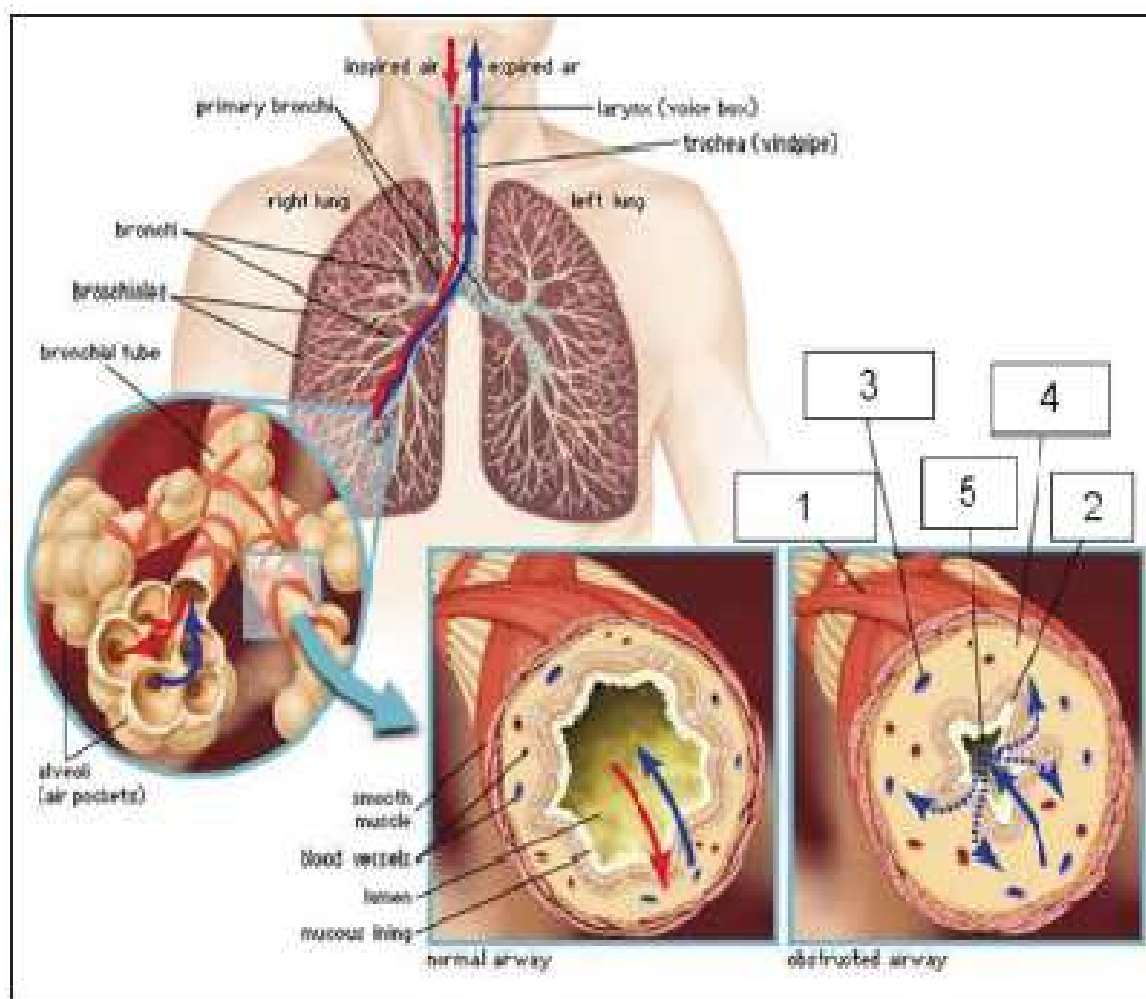


Figure N° 10 : Représentation d'une réaction inflammatoire dans le système respiratoire profond (D'après Encyclopaedia Britannica, Inc.).

- (1) une contraction des muscles lisses (congestion active),
- (2) une sécrétion en excès de mucus,
- (3) la contraction des muscles lisses qui favorise l'arrivée massive de cellules du système immunitaire dans le tissu pulmonaire par diapédèse,
- (4) la formation de l'œdème inflammatoire qui provoque un renflement localisé,
- (5) le renflement réduit ainsi le diamètre du tube bronchique.

III.1.2 – Effets de certains métaux lourds :

- **Le plomb (Pb) :**

D'après ce que l'on sait aujourd'hui, le plomb n'a aucune fonction dans l'organisme, il n'a que des effets nocifs. En milieu urbain, il provient ou provenait essentiellement du trafic routier. En Europe par exemple, la concentration maximale du Pb est de 50µg/l de sang alors qu'elle était de 400µg/l en 1976 [54], selon le type d'exposition on définit:

- Les effets indésirables d'une exposition chronique représentés par :

- ✓ Troubles de la biosynthèse de l'hémoglobine et anémie
- ✓ Augmentation de la pression artérielle (HTA)
- ✓ Problème aux reins
- ✓ Fausses couches
- ✓ Dommages au cerveau
- ✓ Déclin de la fertilité des hommes
- ✓ Capacités d'apprentissage de l'enfant diminuée
- ✓ Trouble du comportement chez l'enfant (hyperactivité, agressivité..)

- Les effets d'une forte exposition :

- ✓ Saturnisme (pouvant être du a une exposition chronique)
- ✓ Troubles neuro-moteurs
- ✓ Cancers
- ✓ Encéphalopathie
- ✓ Paralysie

- **Le cadmium (Cd) :**

Chez l'Homme, il provoque notamment des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension. En outre, issu des fumées et les poussières perdues par certaines industries (métallurgie, recyclage des batteries au cadmium, engrais phosphorés), la fumée de cigarettes (source principale de contamination de la population générale), son inhalation est dangereuse. Des risques potentiels sont à craindre avec les téléphones portables et sans fil : En particulier s'ils sont utilisés peu de temps après chargement (ce qui est moins fréquent avec les portables mais récurrent avec les téléphones sans fil), car les piles ou batteries rechargeables sont alors chaudes et dégagent souvent, même neuves, des vapeurs toxiques en faible quantité, mais facilement inhalées de par la proximité des voies respiratoires. En Europe, la valeur limite d'exposition est fixée à 0,05 mg/m³, pour les fumées d'oxyde [55].

III.1.3 - Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont composés, comme leur nom l'indique, d'au moins deux cycles (ou encore anneaux) de benzène accolés. On les retrouve dans la fraction des particules fines et ultrafines (PM-1)

La structure moléculaire de certains types de HAP les amène à être transformés dans l'organisme en composés extrêmement toxiques, appelés époxydes. Les époxydes réagissent très facilement avec l'ADN, ce qui peut entraîner des mutations génétiques et parfois au cancer. Certains HAP peuvent également affecter la reproduction ou le développement fœtal. Ces effets ont été démontrés en expérimentation animale, mais le risque existe également pour l'homme. Le benzopyrène est particulièrement toxique sur ce plan, puisque ses effets cancérigènes sont prouvés chez l'homme. Il est considéré aussi comme mutagène, tératogène et toxique pour le développement [49].

III.2 - Impact sur les écosystèmes

Les effets des aérosols sur les écosystèmes sont encore mal connus. En se déposant sur la plante, les particules peuvent avoir des effets directs sur le fonctionnement via des réactions physiques et/ou chimiques, le blocage des échanges gazeux, la dégradation ou l'abrasion de la cuticule, des salissures entraînent une diminution de la photosynthèse et le développement d'organismes pathogènes, tel que les champignons [56, 57].

Ces effets sont essentiellement rencontrés de façon localisée, à proximité immédiate des sources. Mais les particules peuvent aussi avoir un impact sur les écosystèmes en modifiant le milieu, notamment l'eau et le sol. Par ces modifications, on peut citer l'apport de nutriment (qui peut être bénéfique dans certains cas mais nocif en trop grande quantité), l'acidification et la contamination par dépôt de polluants toxiques tels que les polluants organiques persistant (HAP ou dioxine par exemple) [58].

III.3 - Impact sur les matériaux et édifices

Le processus d'altération des bâtiments résulte de l'action combinée des différents éléments atmosphériques. Ce qui entraîne la modification de la couleur, de la texture, de la composition et de la forme des édifices exposés. On observe ainsi une perte de matière et un aspect inesthétique.

Il est difficile d'évaluer la responsabilité de chacun des polluants atmosphériques dans la dégradation du patrimoine bâti. Néanmoins, les particules, essentiellement carbonées (suies et cendres volantes), sont principalement responsables du noircissement et de l'encrassement des façades. Porteuses de soufre et de métaux, elles peuvent altérer des matériaux suite à certaines réactions d'oxydation. Les nettoyages et ravalements successifs mis en œuvre pour la préservation du bâti représentent un coût important pour la société et entraînent une perte de matière sur les édifices. Outre la mise en péril du patrimoine historique, les effets des particules sur le bâti constituent donc un enjeu économique important [57].

III.4 - Impact sur le climat

Les aérosols jouent un rôle important sur le climat car ils participent au bilan radiatif de la terre. Ils ont des effets directs sur le rayonnement solaire, et des effets indirects en modifiant les propriétés des nuages. En effet, les particules atmosphériques diffusent et absorbent la lumière du soleil. Il y a donc une perte de lumière avant qu'elle n'atteigne le sol. Perte liée directement à la taille des particules. Cette dernière sera également différemment absorbée ou réfractée selon la nature et la concentration des espèces chimiques adsorbées à leur surface. Les aérosols atmosphériques influent également sur la nébulosité et la pluviométrie en participant à la formation des nuages ainsi qu'à leur durée de vie : les très fines particules servent de noyaux de condensation, ainsi la vapeur d'eau présente dans l'air va se condenser à leur contact et former des gouttelettes dans les nuages, pouvant donner des précipitations si leur taille augmente suffisamment [59].

On constate aussi que la présence de particules qui contiennent des composés organiques volatils favorise la formation de l'ozone troposphérique, en interagissant avec les photo-oxydant de l'atmosphère via des mécanismes chimiques ou photochimiques.

Aujourd'hui, le bilan global de l'effet des aérosols sur le climat est difficile à estimer, mais il est primordial de les prendre en compte dans le cadre de l'étude du réchauffement climatique [60].

CHAPITRE IV

IV - Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

IV.1 - La sélection des particules en fonction de leur taille

L'échantillonnage des particules atmosphériques peut se faire avec ou sans sélection des particules et en fonction de leur taille. Dans le cas de l'échantillonnage avec sélection granulométrique, l'air est aspiré à travers une tête de prélèvement placée à l'entrée du système de prélèvement d'air qui, de par sa conception, permet d'éliminer les particules dont le diamètre aérodynamique est supérieure à une valeur définie ; on parle de seuil de coupure granulométrique. Les seuils de coupure les plus fréquents sont 2,5 et 10 μm ; on parle alors respectivement de tête PM-2,5 et PM-10. Cependant, il faut souligner qu'aucune tête de prélèvement n'est strictement sélective. A titre d'exemple, lors d'un prélèvement de PM-2,5, aucun appareil ne permet une sélectivité stricte, ainsi, l'appareil ne collecte jamais 100 % des particules inférieures à 2,5 μm et à l'opposé l'appareil n'exclut pas 100 % des particules de taille supérieures à 2,5 μm . De plus, le seuil de coupure granulométrique peut être fonction du débit de prélèvement, du colmatage du filtre, ainsi que des conditions ambiantes de température et de pression [61].

IV.1.1 - Les prélèvements sans coupure granulométrique précise :

Ce type de prélèvement assure une coupure granulométrique mal connue (estimée autour de 50 μm) qui peut être influencée par les conditions météorologiques. Ce dernier est notamment utilisé dans la mesure des fumées noires ou avec les échantillonneurs à grand débit HVS (High Volume Sampler) configurés en mode TSP (Total Suspended Particules) [62]. Ces têtes de prélèvement sont aujourd'hui peu utilisées, car elles prélèvent des particules trop grosses pour être inhalées et qui présentent donc peu d'intérêt en termes de protection de la santé humaine [63].

IV.1.2 - Les prélèvements avec coupure granulométrique :

Ils sont effectués à l'aide d'une « tête » de prélèvement qui, par sa conception, ne capte en théorie que des particules de diamètre aérodynamique inférieur à une valeur définie. Cette méthode permet ainsi de focaliser la surveillance sur les particules inhalables [64]. Les têtes les plus couramment utilisées sont la tête définie par la norme française NFX43-021 et les têtes PM-10 et PM-2.5 d'origine américaine [65].

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

A) La tête d'impaction française normalisée AFNOR NF X 43-021 :

Cette tête a été longtemps utilisée au niveau des réseaux de surveillances jusqu'en 1995. Elle fonctionne à un débit d'aspiration continu et constant ($1.5\text{m}^3/\text{h}$), elle présente un seuil de coupure de $10\mu\text{m}$ [66]. Il est aussi nécessaire de noter que son efficacité est liée à la vitesse du vent, ce qui lui confère un manque de précision. Néanmoins elle reste utilisée malgré l'introduction de la tête PM-10 qui présente une meilleure efficacité [67].

La figure N° 11 illustre la conception de cette tête.

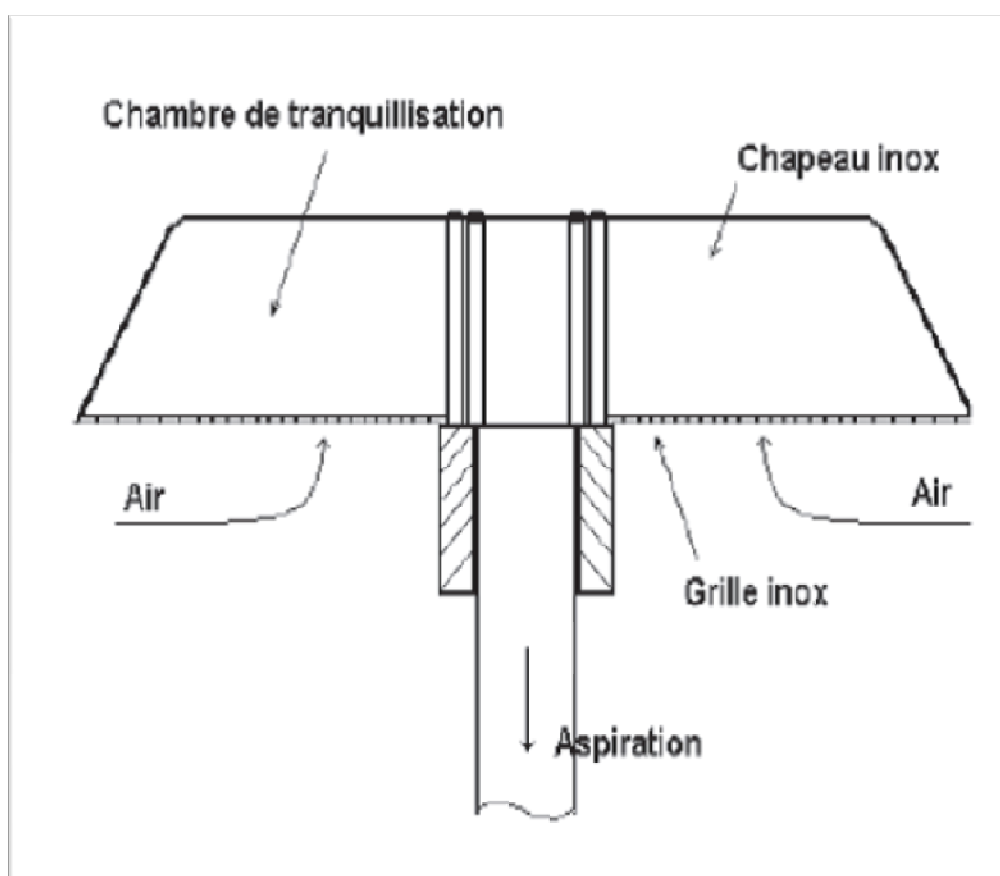


Figure N° 11 : conception de la tête d'impaction française [68].

B) La tête PM-10 américaine :

Depuis 1995, l'utilisation de la tête américaine type PM-10 est répandue dans plusieurs réseaux de surveillance. Comme son nom l'indique, elle annonce un seuil de coupure de $10\mu\text{m}$ [70], son succès est dû à une meilleure impaction, qui se fait par effet aérodynamique induit par un système de chicane, en plus de l'élimination du risque de re-envoi des particules dont le diamètre aérodynamique est supérieur à $10\mu\text{m}$ par graissage de la surface d'impaction, elle est peu influencée par la vitesse du vent.

Le débit est fixé à $1\text{m}^3/\text{h}$, la température du tube d'adduction entre la tête et le dispositif de mesure ou d'accumulation est maintenue à 30° pour éviter tout phénomène de condensation sur les parois [71].

Il est nécessaire de souligner que l'augmentation de l'air aspiré peut provoquer l'évaporation de certains composés volatils.

La figure N° 12 représente la tête PM-10.

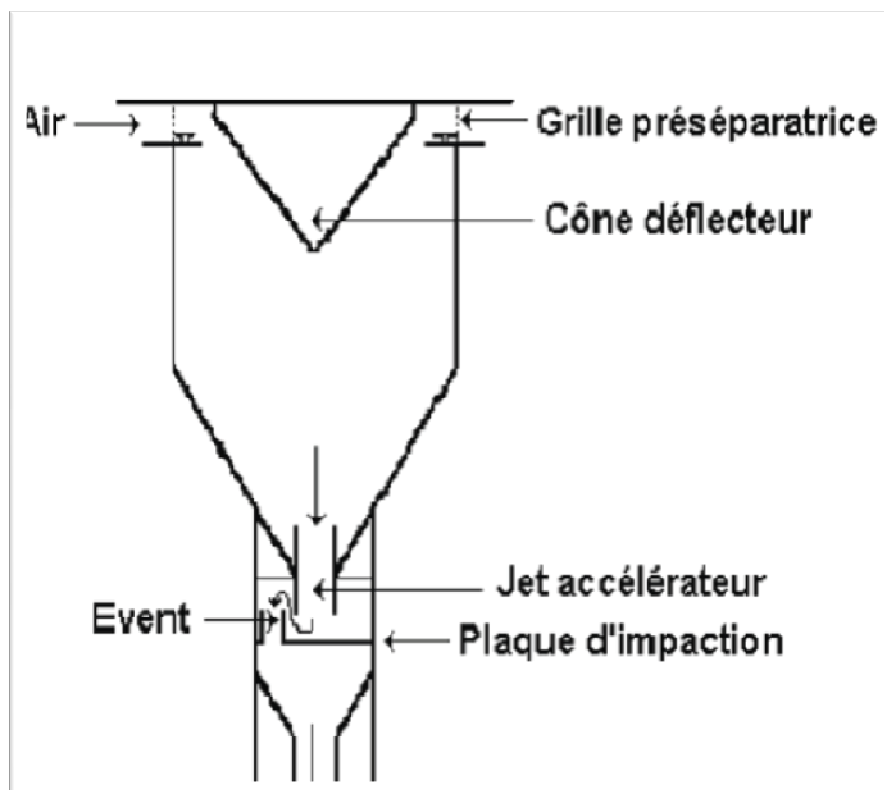


Figure N° 12 : Tête américaine de type PM-10 [69].

C) La tête type PM-2,5 d'origine américaine :

Elle est proposée par les constructeurs sur des appareils tels que la microbalance à variation de fréquence (voir plus loin le descriptif de la microbalance). La coupure granulométrique annoncée à $2,5 \mu\text{m}$ 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 sont récupérées dans un réceptacle amovible.

Contrairement à la tête PM-10, ce dispositif n'est pas démontable en vue d'un éventuel nettoyage ce qui n'est pas vraiment rentable sur le plan économique [71].

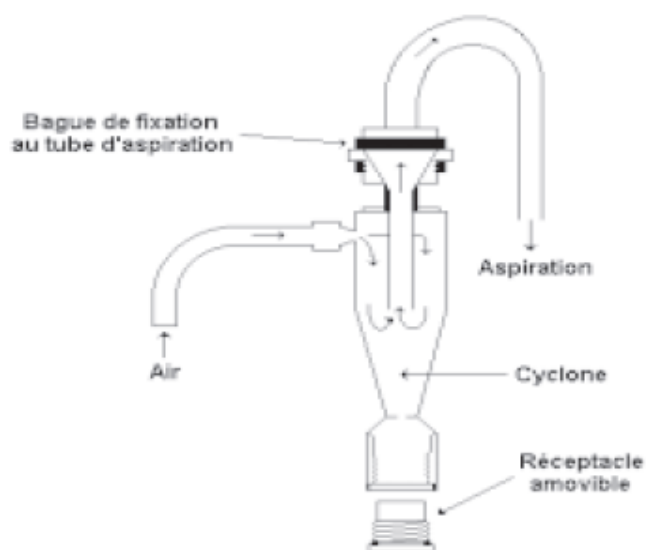


Figure N° 13 : Tête américaine de type PM-2,5 [69].

IV.1.3 - les prélèvements avec fractionnement granulométrique :

Réalisables à l'aide d'impacteurs en cascade. Cette méthode permet de faire une séparation des particules selon leur taille afin d'en étudier la distribution granulométrique. Un impacteur en cascade est constitué d'une succession d'étages dits d'impaction, comportant chacun un ajustage dirigeant un jet d'air à haute vitesse contre une surface solide. Les particules supérieures à un diamètre donné ont une inertie telle qu'elles vont s'impacter sur cet obstacle, perpendiculaire au jet, sur lequel est posé un filtre. Les particules les plus fines sont entraînées vers l'étage suivant par le flux d'air qui contourne l'obstacle.

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

On récupère ainsi à chaque étage des particules de plus en plus fines. La phase d'échantillonnage est souvent critique car elle peut être sujette à des artefacts de prélèvement souvent difficiles à quantifier et à maîtriser (pertes dans le dispositif de prélèvement, colmatage des filtres, piégeage d'espèces gazeuses, volatilisation de composés). Le choix du substrat de prélèvement est donc très important. Dans tous les cas, l'échantillonnage sera suivi d'une phase de mesure ou d'analyse : détermination de la masse ou du nombre de particules, caractérisation chimique portant sur un ou plusieurs composés. Cette analyse peut se faire manuellement en différé dans un laboratoire, ou à l'aide d'appareils automatiques fonctionnant en mode « on-line » [63].

IV.2 - La caractérisation de la concentration massique

Dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, la mesure des particules repose essentiellement sur des mesures de concentration massique, conformément aux préconisations des directives européennes [72]. Les méthodes de mesure décrites ici permettent de fournir une valeur de concentration des particules dans l'air en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sans considération de granulométrie, de nombre de particules ou de composition [73].

IV.2.1 - La méthode de référence ou méthode gravimétrique :

Les directives définissent comme méthode de référence la méthode gravimétrique après mesure [74]. En effet, le préleveur doit être installé dans un endroit climatisé coupure granulométrique à $10\ \mu\text{m}$ (particules inhalables). Cette méthode consiste à prélever les particules PM-10 sur des filtres, et à les peser ensuite suivant la norme EN12341. C'est également cette méthode qui est définie comme référence pour les PM-2,5.

Cette méthode de mesure, très lourde à mettre en œuvre, est difficilement applicable dans le cadre de la production de données en routine des réseaux de avec retrait manuel des filtres exposés, régulièrement (tous les jours à 1 fois par semaine), ce qui entraîne une logistique lourde. La norme précise que les pesées doivent être réalisées dans des conditions définies, qui nécessitent une salle

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

blanche régulée en température et humidité, ce qui représente un investissement très important [72].

Cette méthode entraîne donc un différé dans l'obtention des résultats qui ne permettent pas la publication quotidienne d'un indice de qualité de l'air ni la mise en place d'une procédure d'information et d'alerte relative aux PM-10. Enfin, elle ne permet pas de disposer simplement de résultats à des pas de temps plus fins que 24 heures. Par ailleurs, cette méthode peut comporter des biais, liés à l'absorption ou à la volatilisation de certains composés sur le filtre [75]. Ainsi, lorsque les pesées se font à 50 % d'humidité, certains composés très hydrophiles peuvent entacher les résultats obtenus. D'autres types de filtres (cellulose) peuvent au contraire absorber de l'acide nitrique et du dioxyde de soufre. A l'inverse, il a été démontré que le nitrate d'ammonium peut être volatilisé en totalité à la surface de filtres lors d'échantillonnages réalisés en été. C'est la raison pour laquelle les normes donnent la possibilité d'utiliser d'autres méthodes dont on a prouvé l'équivalence ou pour laquelle on a montré qu'elle présentait un rapport constant avec la méthode de référence [74].

IV.2.2 - Les méthodes automatiques :

Plus légères en termes de logistique que la mesure gravimétrique, les méthodes automatiques ne nécessitent pas de pesée en différé. Elles permettent donc un suivi des niveaux de particules en temps quasi-réel, à des pas de temps. Les principaux analyseurs sont la jauge beta et le TEOM.

- **La jauge Beta :**

La méthode par jauge Beta consiste à collecter les particules (PM-10 ou PM-2,5) par aspiration d'un volume d'air déterminé sur un filtre en fibre de verre qui défile de manière séquentielle devant une jauge bêta (Figure 14). La masse du dépôt de poussière est déterminée en mesurant l'atténuation du rayonnement β par les poussières recueillies sur le filtre. La jauge Beta est un appareil de mesure robuste et normée. Néanmoins, il est difficile d'assurer la traçabilité aux différents étalons et il n'existe pas d'étalon-masse direct [76]. Par ailleurs, cette méthode est soumise à d'importantes contraintes administratives : nécessité d'une autorisation de détention de source radioactive, servitudes d'utilisation.

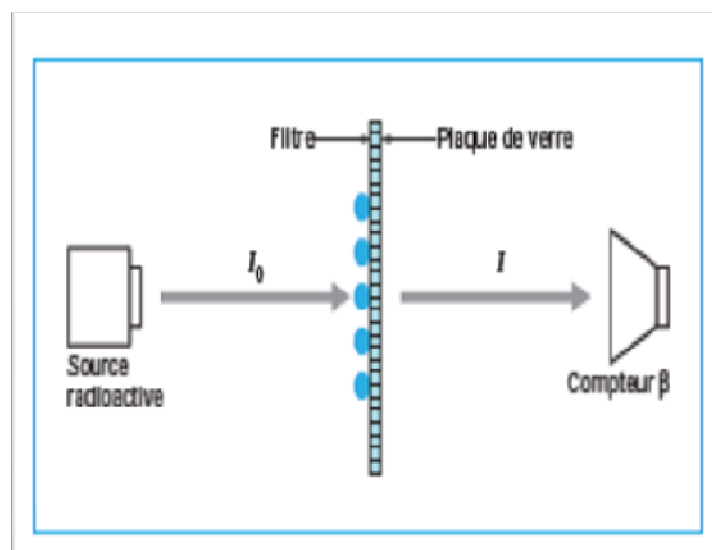


Figure N° 14 : Principe de mesure de la jauge beta [77].

- **Le TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)**

La méthode par microbalance à élément conique oscillant repose sur la mesure en continu des variations de fréquence de vibration d'un élément oscillant sur lequel les particules se déposent. Ces variations de fréquence sont converties en variations de masse de poussières déposées. La mesure du débit volumique permet de déterminer la concentration en microgrammes de particules par mètre cube d'air. En amont de cette microbalance est installée une tête de prélèvement PM-10 ou PM-2,5.

La sensibilité du TEOM est meilleure que celle de la jauge bêta, il présente néanmoins, tout comme la jauge β , un artefact de prélèvement. La microbalance est chauffée à 50°C de façon à ne pas condenser la vapeur d'eau contenue dans l'air. Ce chauffage peut occasionner une volatilisation de certains composés, ce qui entraîne une sous-estimation de la concentration mesurée, estimée à environ 30% [78 à 80].

En hiver, cette fraction semi-volatile est essentiellement constituée de nitrate d'ammonium, dont la condensation est favorisée par les basses températures et une humidité relative élevée.

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

En été, une contribution significative d'aérosols organiques secondaires, principalement formés par des processus photochimiques, a été observée, pouvant aller jusqu'à 50 % de la fraction semi volatile [81]. Pour compenser cette sous-estimation, la Commission européenne préconise l'application d'un facteur correctif constant de 1,3 [82]. Il a été toutefois montré dans plusieurs études de part le monde que le rapport « Méthode de référence/TEOM » varie selon les sites et les saisons (de 0,94 à 1,29 en été et de 1,13 à 1,40 en hiver), mais également selon le niveau de concentration mesurée. La sous-estimation est en effet plus importante à forte concentration [82 à 84].

IV.3 - 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 μm 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 en fibre de verre :**

Ce type de filtre satisfait les conditions précédentes, l'inconvénient est que la procédure de minéralisation est lente et que ces derniers contiennent de divers métaux à des teneurs variables, qui peuvent altérer les analyses, tels que les filtres Gelman type A et Wathman GF-A qui contiennent 50mg Zn/m² [85].

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

- **Les filtres membrane :**

Ce sont des filtres nitrocellulose type Sartorius et Milipore (Fig. 15) ou acétate et ester de cellulose (Gelman GA-3). Le procédé de minéralisation est simplifié car ces filtres sont solubles dans les éthers solvants organiques, ce qui fait qu'on peut les dissoudre dans l'acétone où les particules sont totalement récupérées après évaporation du solvant organique. L'hygroscopicité de ces filtres est plus élevée que celle des filtres en fibre de verre, ils présentent un diamètre de $8\mu\text{m}$, et des teneurs faibles en métaux mais l'inconvénient réside dans une résistance à l'écoulement considérable ce qui explique que le HVS ne peut être utilisé. Néanmoins les deux types de filtres peuvent retenir avec une efficacité satisfaisante les particules d'un diamètre de $0.1\mu\text{m}$ [85].

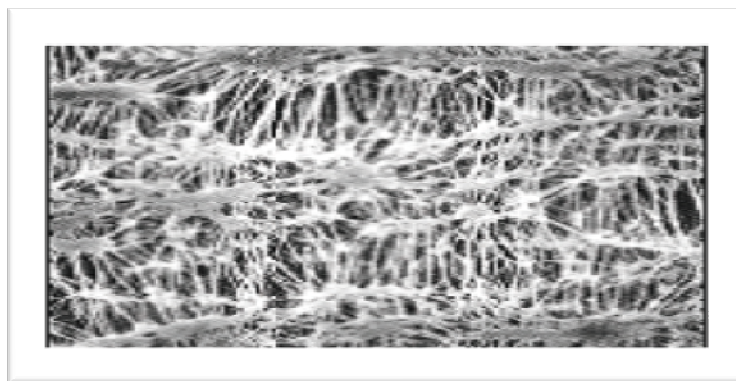


Figure N° 15 : Structure du filtre en nitrocellulose [85].

IV.4 - Analyse physique des particules

Les mesures physiques concernent la masse, le nombre, la taille et la morphologie des particules :

- **Mesures de masses :**

Cette mesure a pour but de déterminer la concentration en particules par m^3 d'air. Dans le cas d'échantillonnage manuel (échantillonneur à haut débit).

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

On pèse exactement le filtre avant et après collecte des particules. La différence de masse rapportée au volume d'air aspiré permet d'accéder à la teneur atmosphérique en particules. Pour les analyseurs automatiques (jauge béta et TEOM) la teneur est donnée directement par l'appareil [86].

- **Détermination du nombre de particules :**

Elle se fait entre autres avec un compteur de particules de condensation ou avec un compteur optique (qui peut également mesurer la taille). La première méthode s'effectue en trois étapes : 1) sursaturation d'une vapeur (eau, alcool, etc.), 2) grossissement des particules par condensation de cette vapeur, 3) détection des particules après croissance par une source lumineuse couplée à un photodétecteur. Cette méthode permet de compter des particules qui à la base font 3 nm [86].

- **Mesure de la taille des particules (granulométrie) :**

Pour ce paramètre, plusieurs techniques existent également, associant souvent la mesure de la taille au nombre de particules. La méthode inertielle permet par exemple de compter et de mesurer la distribution selon la taille de particules allant de 3 nm à 10 μm . L'échantillon, contenant les particules, passe dans un premier temps par un chargeur électrique puis pénètre dans un impacteur en cascade basse pression dont les étages sont électriquement isolés. Les particules chargées, collectées sur chaque plateau sont comptées en temps réel grâce à la mesure du courant électrique qu'elles produisent [87].

- **Détermination de la forme des particules :**

Par microscopie électronique à balayage ou à transmission [63].
En conclusion, on retiendra que la mesure de la pollution par les particules est complexe. Chaque méthode présente des inconvénients et des avantages d'où la difficulté de comparer les résultats obtenus par différentes techniques en différents sites avec différentes conditions météorologiques.

IV.5 - Analyse chimiques

Contrairement à l'analyse des gaz, il n'existe pas de méthodes bien adaptées à l'analyse d'un aérosol (suspension de particules solides ou liquides dans un gaz). Les analyses sont différées dans le temps par rapport à la phase de collecte de l'échantillon, ce qui est limitant en ce qui concerne les COV adsorbés. De plus, les analyses de la phase organique et de la phase minérale font appel à des techniques différentes.

IV.5.1 - Analyse de la matière organique :

La matière organique est généralement extraite du filtre par ultrasons ou dans un Soxhlet par l'utilisation de solvants polaires ou non polaires avant d'être concentrée. L'échantillon est ensuite préparé en fonction de la méthode d'analyse [87]. Deux méthodes sont principalement utilisées pour l'analyse :

- **La Chromatographie en phase Gazeuse (CPG) :**

La CPG est souvent couplée avec un détecteur universel comme le Détecteur à Ionisation de Flamme (FID) ou à la spectrométrie de masse. Plus spécifiquement, pour les composés soufrés on utilise un Détecteur Photométrique de Flamme (FPD) et pour les composés halogénés et pesticides un Détecteur à Capture d'Electrons (ECD) [50].

- **La Chromatographie en Phase Liquide Haute Performance (HPLC) :**

Par cette méthode, un grand nombre de composés organiques peuvent être séparés et analysés. Toutefois, en pratique elle est utilisée pour l'analyse des composés lourds. Du fait de la variété des détecteurs, il est possible de réaliser des analyses très spécifiques et très sensibles de la plupart des familles de composés. Par exemple, le spectromètre UV ou le spectromètre à fluorescence sont particulièrement sensibles lors de l'analyse des HAP [54].

IV.5.2 - Analyse des éléments inorganiques et des métaux :

Les méthodes les plus utilisées sont [86] .

Chapitre IV – Méthodes de mesures et d'analyses des particules fines

- **La Fluorescence X :**

On dirige sur le filtre un faisceau émis par une cathode spécifiquement choisie pour l'analyse d'un élément. La mesure est rapide et permet ainsi de nombreuses analyses d'échantillons même peu chargés en matière. De plus, cette méthode est non destructive et simple à réaliser car elle ne nécessite aucun traitement préalable du filtre.

- **L'analyse Particle-Induced X-ray Emission (PIXE) et activation neutronique :**

Méthodes proches de la fluorescence X, le filtre est bombardé par des protons (PIXE) ou des neutrons (activation neutronique) qui excitent les éléments et induisent un rayonnement X. Le rayonnement induit est mesuré.

- **La spectrométrie d'induction plasma (ICP) :**

Contrairement aux précédentes méthodes celle-ci nécessite la destruction du filtre par un acide. Chaque élément absorbe sélectivement la lumière émise par la source et comme chaque élément est sa propre source d'émission, presque tous les éléments peuvent ainsi être analysés [88].

- **Spectroscopie d'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 [89].

IV.5.3 - Analyse des ions :

- **Colorimétrie :**

On transforme les ions à analyser par des réactions chimiques en complexes qui absorbent la lumière dans l'UV-visible. Exemple : les nitrates sont réduits en nitrites par l'hydrazine en présence de cuivre ; le dérivé azoïque formé est mesuré à une longueur de 524 nm [90].

- **Chromatographie ionique :**

Cette méthode plus universelle est maintenant très employée. Elle permet l'analyse rapide de tous les ions simultanément. Les ions sont détectés par conductivité électrique.

Exemple : les sulfates et nitrates sont séparés sur une colonne basique par élution avec une solution de carbonate de sodium. Cet éluant ayant une forte conductivité masque en partie le signal. On utilise alors un suppresseur : colonne contenant une résine imprégnée d'acide fort qui permet la conversion des carbonates en CO_2 et H_2O et celles des nitrates et sulfates en acides de haute conductivité [91].

CHAPITRE V

V - Méthodologie

A travers les paragraphes suivants, on présentera la méthodologie adoptée pour les prélèvements et l'analyse des différentes fractions granulométrique PM-10, PM-7, PM-3 et PM-1.

V.1 - Choix du site de prélèvement.

Afin d'évaluer l'ampleur de la pollution de l'air en termes de particules PM-i et des métaux lourds qui leur sont associés, les prélèvements ont été effectués au niveau d'un site urbain à Alger. Conformément aux objectifs assignés à l'étude, le site devait se situer sur les hauteurs d'Alger dans une zone résidentielle et ne devait pas subir l'influence directe d'émissions industrielles ou celles issues du trafic routier. Le site ainsi retenu est localisé au niveau de la de Bouzaréah, plus exactement dans la cité Parc Miremont. En ce site, l'échantillonneur est installé sur la terrasse d'un immeuble à une altitude d'environ 16 m du sol (Fig. 16). Cette terrasse qui est dégagée de tout obstacle subit une bonne ventilation naturelle et constitue de ce fait un site optimal pour les prélèvements. Les photos présentées en figure N° 17 et N° 18 montrent l'environnement du poste de mesure.

Nord : 36° 47' 40.27 ". Est : 3° 0.2' 6.32".



Figure N° 16 : Localisation de parc Miremont sur carte Google.



Figure N° 17 : Vue du coté sud de parc Miremont.



Figure N° 18 : Vue du coté nord de parc Miremont.

Chapitre V - Méthodologie

V.2 - Technique d'échantillonnage

Les prélèvements des différentes fractions PM-i ont été effectués à l'aide d'un échantillonneur à fort débit (High volume sampler), le HVS-PM-10 qui est équipé d'un cascadeur Sierra-Andersen (marque Graseby, USA) à 4 étages pour accéder à un échantillonnage par fraction granulométrique (Fig. 19).

Pour cette étude, 3 étages ont été utilisés pour les PM-1, PM-3 et PM-7

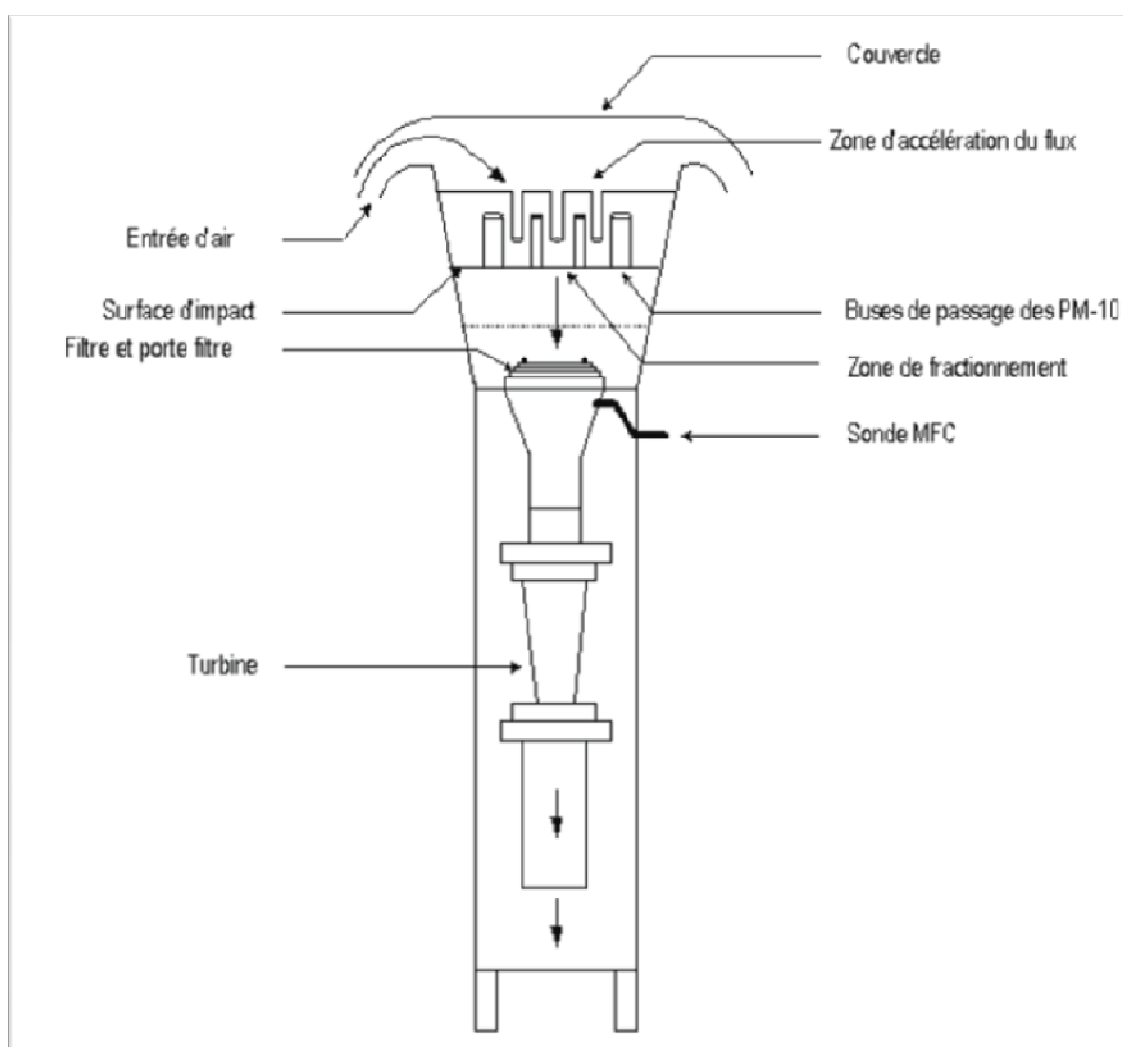


Figure N° 19 : Principe de collecte des PM-i par le HVS.

Chapitre V - Méthodologie

Cet échantillonneur qui a été largement décrit dans les travaux antérieurs (Fig. 21) [55, 66], 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.

Pour notre étude les fractions granulométriques prélevées sont les suivantes :

- ❖ 0-1 μm ; 1-3 μm ; 1-7 μm ; 3-10 μm et 7-10 μm correspondant respectivement aux PM-1, PM-(1-3), PM-(1-7) , PM-(3-10) et PM-(7-10).
- **Le principe de fonctionnement**

Les impacteurs sont destinés à trier les particules suivant leur taille. Le principe est basé sur la différence de quantité de mouvement des particules. Pour les trier par la taille, il est nécessaire que la vitesse du fluide soit très bien contrôlée et connue. Les particules, en raison de leur inertie, ont tendance à effectuer un trajet direct alors que le flux d'air est dévié par un obstacle. Les particules d'une masse définie – donc d'une taille définie, si leur densité est homogène – vont s'impacter sur cet obstacle. Les plus légères vont traverser l'obstacle et venir s'impacter sur l'étage suivant correspondant à un diamètre de coupure plus petit. Le tri s'effectue à énergie cinétique des particules constante :

A la sortie de la première buse, pour une vitesse V_1 , les particules de masse m_1 (masse élevée) sont impactées. Puis on augmente la vitesse de l'effluent ($V_2 > V_1$) en réduisant la taille de la buse d'entrée et les particules de masse m_2 (avec $m_2 < m_1$) sont alors impactées. Et ainsi de suite. 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 (Fig. 20).

En pratique, on interpose sur le flux d'air plusieurs plaques percées de trous ou de fentes de tailles de plus en plus petites (impacteurs en cascade). Plus la particule est grande, donc plus sa masse est importante, plus tôt elle sera arrêtée. Ainsi, on recueille les grosses particules sur les premières plaques et les petites sur les dernières [86].

Un impacteur peut être constitué de 5 à 10 plaques ; il est toujours terminé par un filtre classique qui recueille les très fines particules.

Chapitre V - Méthodologie

L'appareil HVS-PM-10 (Fig. 21) utilisé a déjà fait ces preuves en donnant des résultats représentatifs et cohérents durant les études effectuées antérieurement.

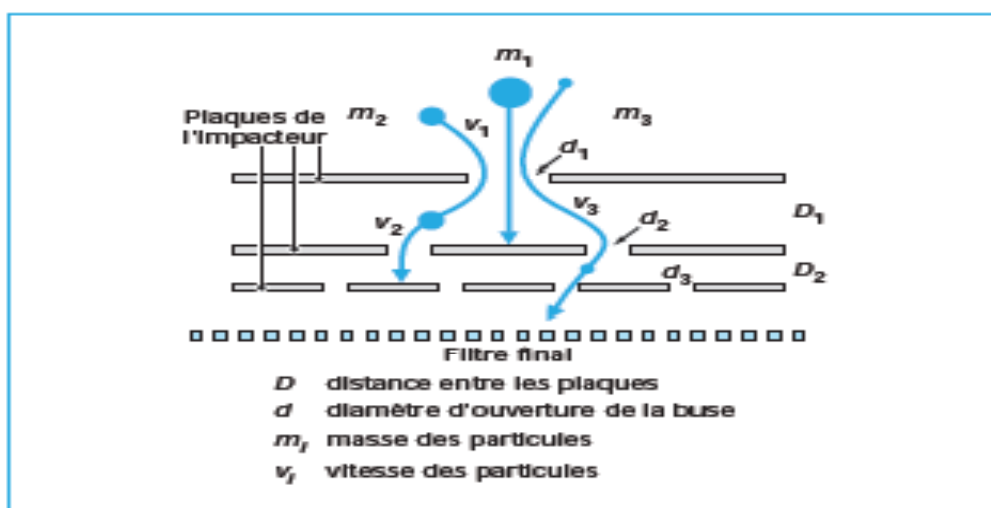


Figure N° 20 : Principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade [88].



Figure N° 21 : Photo de l'appareil d'échantillonnage.

Chapitre V - Méthodologie

Les impacteurs sont posés sur un grand porte filtre sur le quel on met un filtre classique, dit «filtre total », qui recueille les très fines particules (PM-(0-1) dans notre étude).

Les paramètres de fonctionnement sont :

- Le débit d'aspiration : $1,2 \text{ m}^3 / \text{mn}$ (débit conseillé par le constructeur de l'appareil pour l'étude des PM-10).
- La durée de prélèvement : 24 heures.

En fonction du volume d'air prélevé, on détermine alors la teneur atmosphérique des particules.

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

. La période de prélèvement s'est étalée du 25 /03/10 jusqu'au 11/05/10. Nous avons réalisé 12 prélèvements journaliers, ce qui nous a permis de collecter 32 classes granulométriques soit 32 filtres à analyser.

Les figures N° 22 et N° 23 illustrent à titre d'exemple les filtres chargés de particules après prélèvement.



Figure N° 22 : Photo du filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.



Figure N° 23 : Photo filtre total après prélèvement

V.3 - Minéralisation des filtres

Une fois l'échantillonnage terminé, on procède par la mise en solution des éléments traces (métaux lourds) véhiculés par les particules recueillies sur le filtre.

La minéralisation se fait par une mise en solution à reflux du filtre (finement découpé) avec de l'acide nitrique et chloridrique (mélange volumique à 1/3), sous agitation pendant deux heures (conformément à la norme ISO 9885) [92].

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

Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus. L'exploitation et l'interprétation des données obtenues nous permettent d'axer notre discussion sur les points suivants :

- Les évolutions temporelles des teneurs des différentes fractions granulométriques et les corrélations entre elles.
- L'ampleur des teneurs enregistrées par rapport aux standards internationaux et aux résultats enregistrés dans d'autres études.
- La répartition des teneurs des métaux lourds par classe granulométrique. Ceci nous permettra d'estimer le niveau d'exposition des habitants de la région cible.

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 :

Nous illustrons en figure N° 24 l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 mesurées pendant la durée d'étude à Bouzaréah. Le tableau N° 9 résume les caractéristiques statistiques des teneurs atmosphériques en PM-10.

Tableau N° 9 : Caractéristiques statistiques des teneurs atmosphériques en PM-10.

Paramètres	Valeurs
Teneur maximale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	105,6
Teneur minimale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40,9
Teneur moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	77,4
Ecart type ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	18

Chapitre VI – Résultats et discussion

Qualitativement, on constate que les couches de particules collectées sur les filtres sont de couleur noire ou gris foncée. Il s'agit sans doute de particules de suies et d'imbrûlés comme celles qui sont émis par le trafic routier ou les fumées de combustion. Les particules naturelles sont généralement plus claires marron, ocre ou rougeâtres selon la couleur du sol de la région.

L'évolution temporelle montre que, comme c'est souvent le cas en pollution atmosphérique, les teneurs en PM-10 varient fortement d'un jour à un autre. Ces variations sont normales et attendues car elles sont liées aux variations des conditions météorologiques et aux variations dans l'intensité des activités humaines. Nous constatons que les teneurs oscillent entre 40,9 et 105,6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) avec un rayon de dispersion de 33,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la teneur moyenne des PM-10 qui est de 77,4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

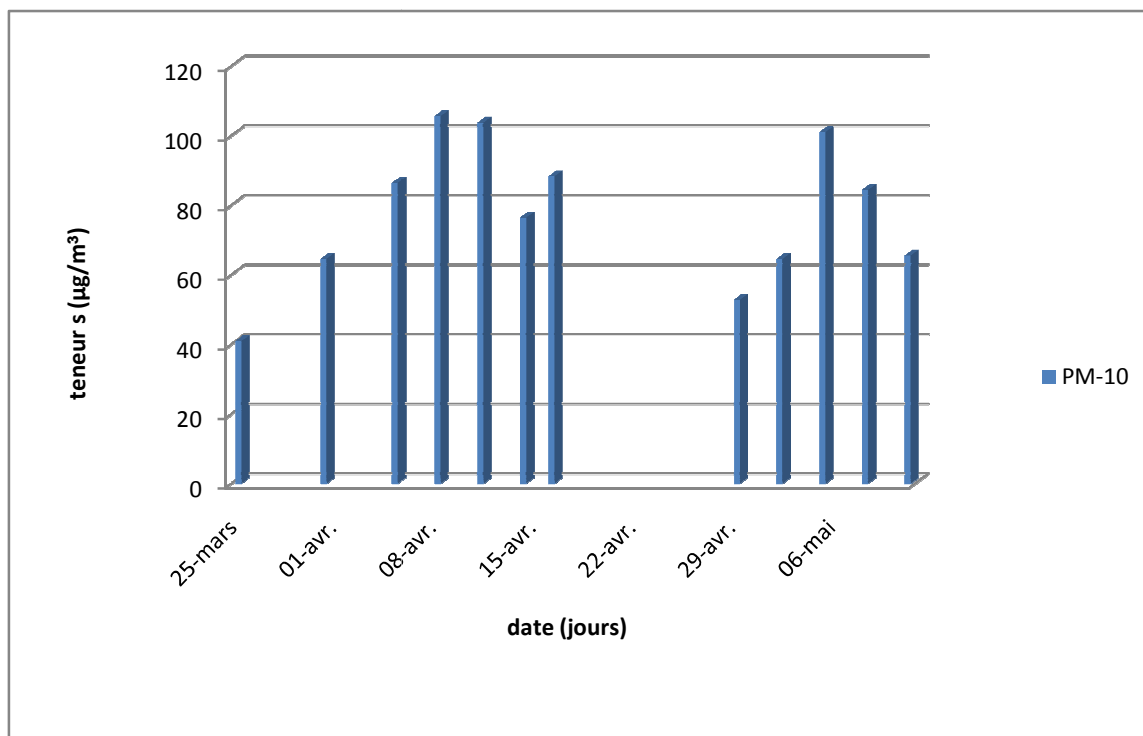


Figure N° 24 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

L'échantillonnage a été interrompu du 17 avril au 28 avril cause de problèmes techniques rencontrés par le HVS-PM-10.

Le prélèvement effectué le dimanche 11 avril et correspondant au maximum mesuré ($105,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) illustre clairement l'impact de la reprise des activités humaines (entre autre trafic routier plus dense que pendant le week-end) en début de semaine. Cela ne signifie toutefois pas que le vendredi, jour de week-end, correspondra aux teneurs minimales, car les particules fines séjournent longtemps dans l'atmosphère et si les conditions météorologiques ne changent pas (changement de direction du vent ou présence de précipitation). Les émissions du jour précédent persistent longtemps dans l'atmosphère et se retrouveront dans l'échantillon collecté le jour suivant. C'est le cas du prélèvement du vendredi 16 avril, qui avec $88,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dépasse la teneur moyenne mesurée pendant l'étude.

Les teneurs les plus faibles de $40,9$ et $52,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistrées respectivement le 25 mars et 29 avril correspondaient à une météorologie favorable à une bonne dispersion des particules (vent fort) et à la réduction des teneurs par lessivage de l'atmosphère par les pluies.

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 des PM-3 et PM-1 pouvant atteindre en profondeur le système respiratoire, nous avons effectué des échantillonnages par fractionnement granulométriques.

Les fractions collectées nous ont permis d'accéder aux PM-i suivants : les PM-1, PM-3, PM-7 et PM-10.

Le tableau N° 10 résume les caractéristiques statistiques des différentes classes granulométriques étudiées.

La figure N° 25 illustre l'évolution temporelle des différentes classes granulométriques.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau N° 10 : Caractéristiques statistiques 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	105,6	40,9	77,4	18
PM-3	66,4	39,1	49,9	10,92
PM-1	35,5	7,9	20,2	8,35
PM-7	77,3	28,2	50,3	18,68

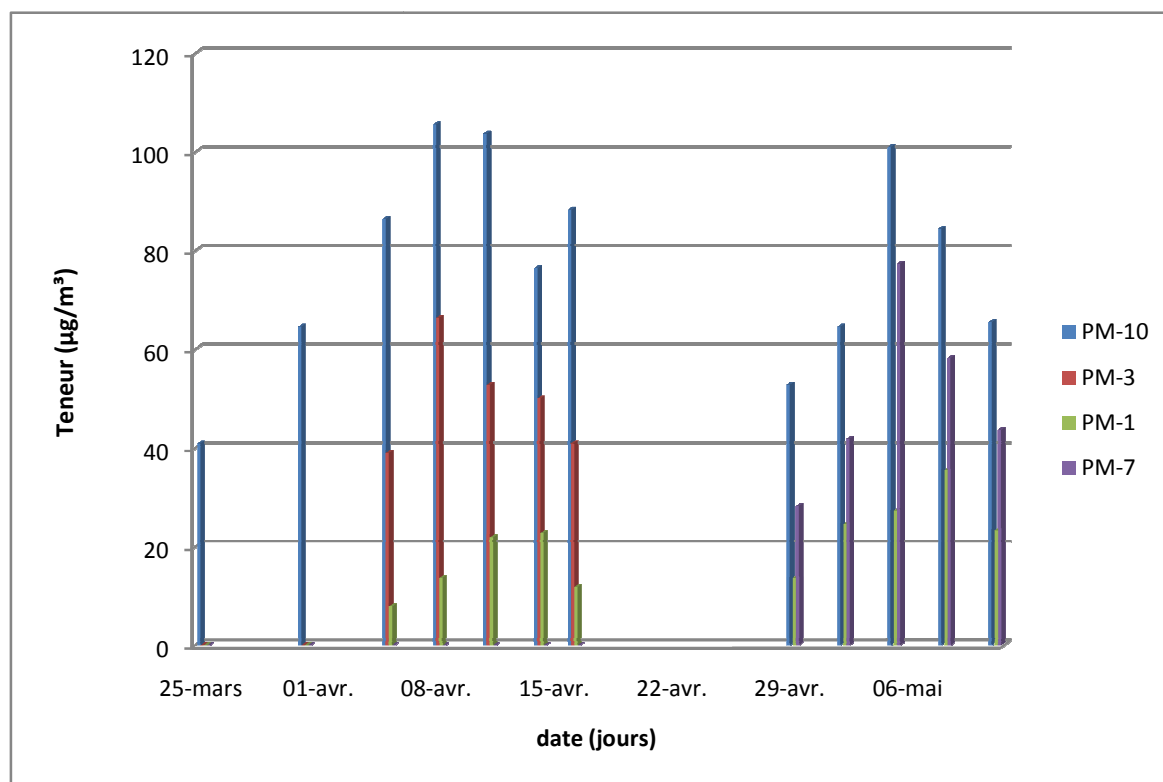


Figure N° 25 : Evolution temporelle des différentes classes granulométriques.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Les données enregistrées permettent d'évaluer les teneurs moyennes en particules fines PM-3 et en particules très fines PM-1 qui s'élèvent respectivement à 49,9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et 20,2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

La figure N° 26 illustre la distribution des contributions massiques des différentes classes granulométriques. La contribution de la classe alvéolaire PM-3 représente environ 64% de la masse totale des PM-10.

Le taux des PM-3 est considéré comme élevé et correspond aux taux habituellement enregistrés dans des études précédentes effectuées en milieu urbain (55%-65%).

Le taux des particules très fines PM-1 constitue environ 26 % des PM-10 et près de 40% des PM-3.

Ces résultats montrent que les PM-10 mesurées à Bouzaréah sont fortement enrichies en particules fines et très fines et présentent donc un important potentiel de nuisance sur la population exposée.

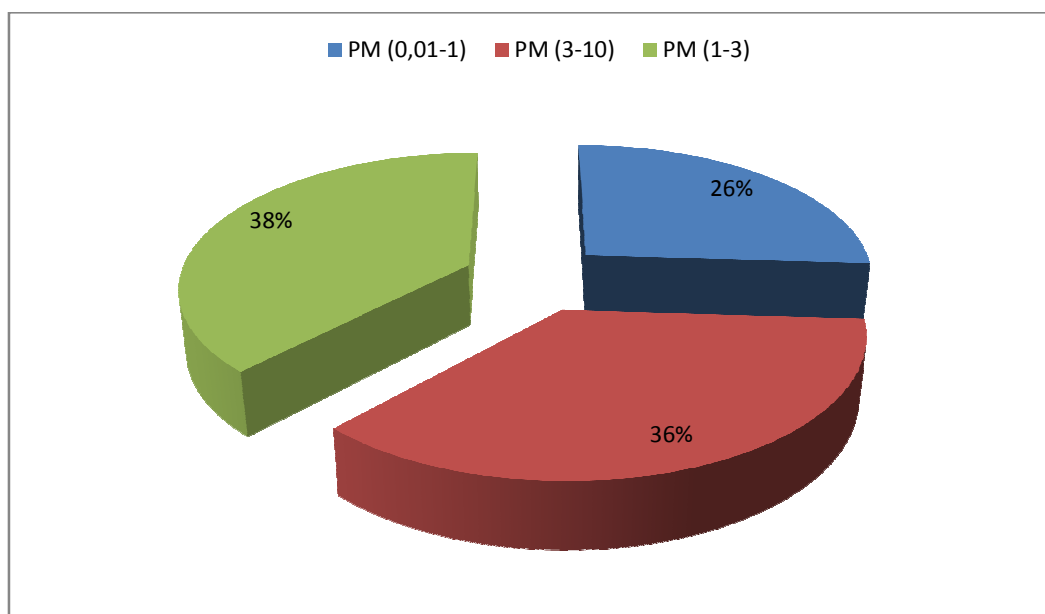


Figure N° 26 : Contribution massique des fractions PM-i dans les PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

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

Afin de mieux comprendre l'évolution des classes granulométriques ciblées par l'étude, et pour permettre de distinguer les différentes sources et mécanismes de formation, nous allons traiter les corrélations entre différents couples de PM-i.

Les Figures N° 27 à 29 présentent une comparaison entre l'évolution des teneurs en PM-10 et PM-3, entre PM-10 et PM-1 et enfin entre celles des PM-10 et PM-7 respectivement.

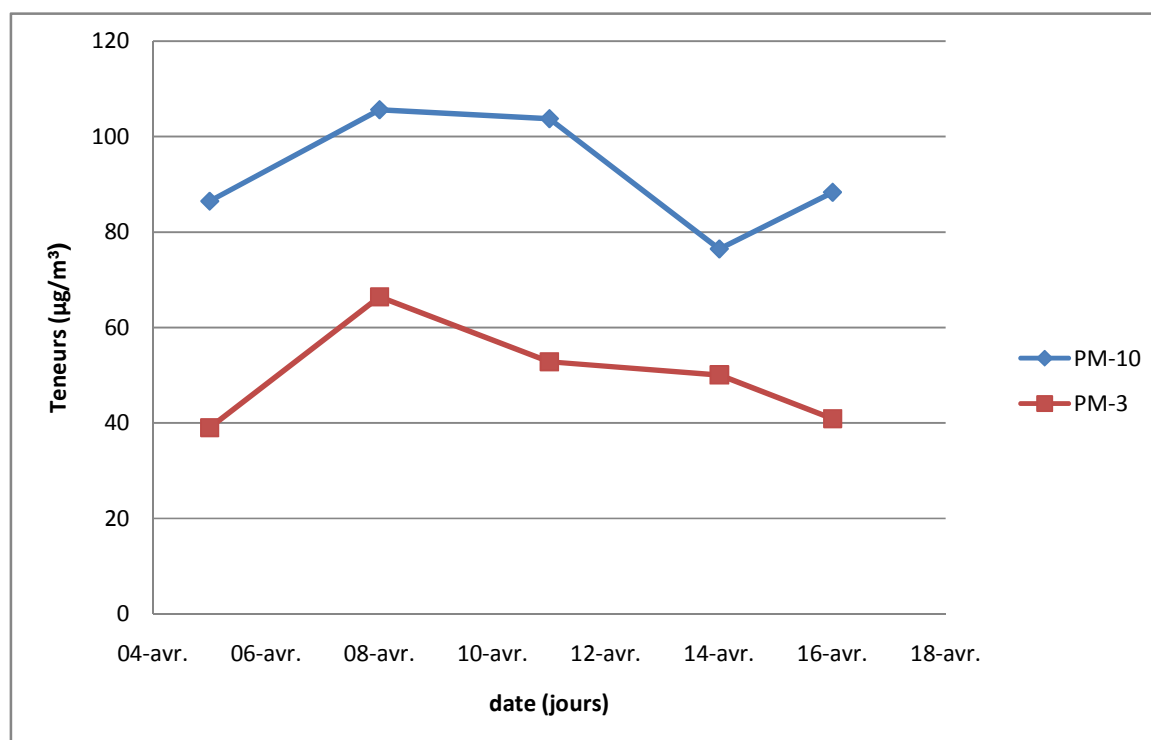


Figure N° 27 : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-3, PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

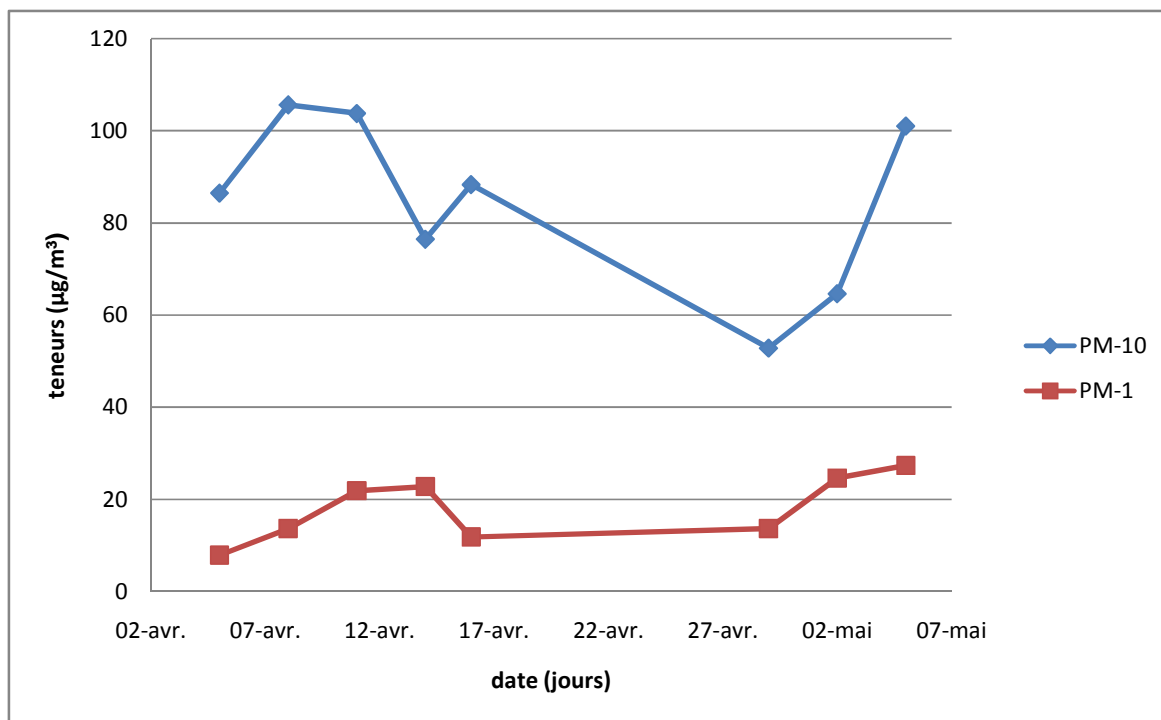


Figure N° 28 : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-1, PM-10.

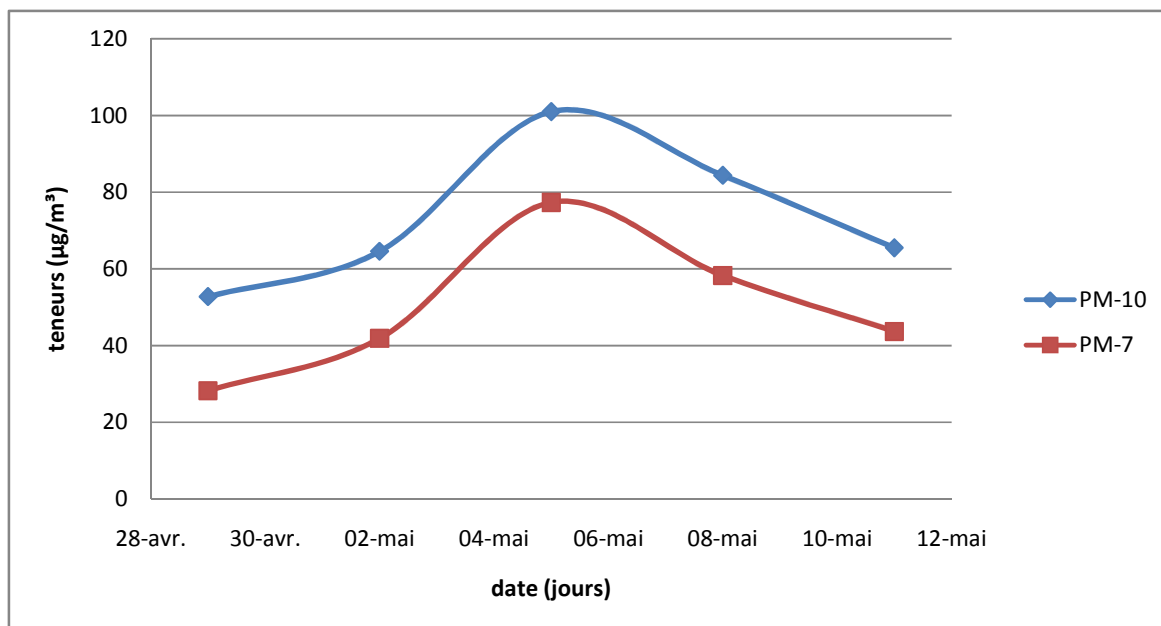


Figure N° 29 : Comparaison de l'évolution des teneurs atmosphériques en PM-7 et PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

L'examen des figures N° 27 et N° 28 montrent que les couples PM-1/PM-10 et PM-3/PM-10 n'évoluent pas de la même manière, c'est-à-dire qu'à des teneurs élevées en PM-10 ne correspondent pas automatiquement des teneurs élevées en PM-3 ou PM-1. Ce résultat suggère que les sources d'émission des particules fines PM-3 et PM-1 sont différentes de celles des particules grossières PM-10. En ce site, les particules fines proviennent très probablement des émissions du trafic routier, et les moins fines de la croûte terrestre.

A l'inverse, nous constatons que les évolutions des PM-7 et PM-10 (fig. 29) sont similaires. Ceci s'explique par le fait que dans ces classes granulométriques, la contribution massique des particules grossières est importante.

Dans ce contexte, il serait intéressant de procéder à un examen approfondi pour déterminer, les similitudes ou différences des facteurs influençant la présence des différentes classes granulométriques dans l'atmosphère. Pour cela, nous allons traiter les corrélations mathématiques entre les couples étudiés.

Les figures 30 et 31 illustrent les corrélations obtenues dans le cas des couples PM-3/PM-10 et PM-1/PM-10.

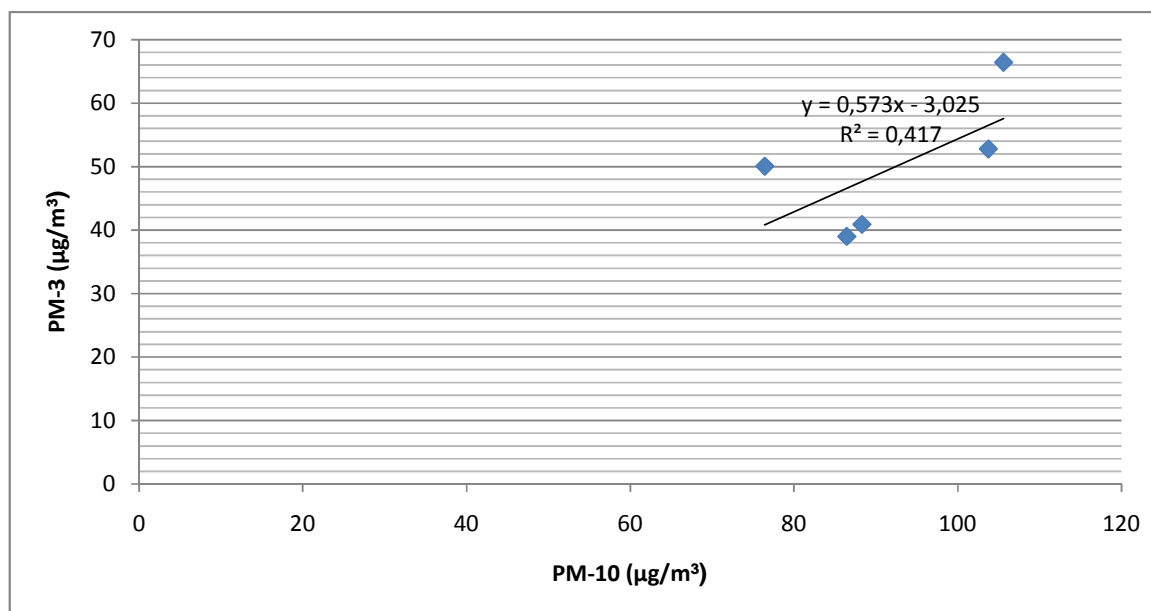


Figure N° 30: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3, PM-10.

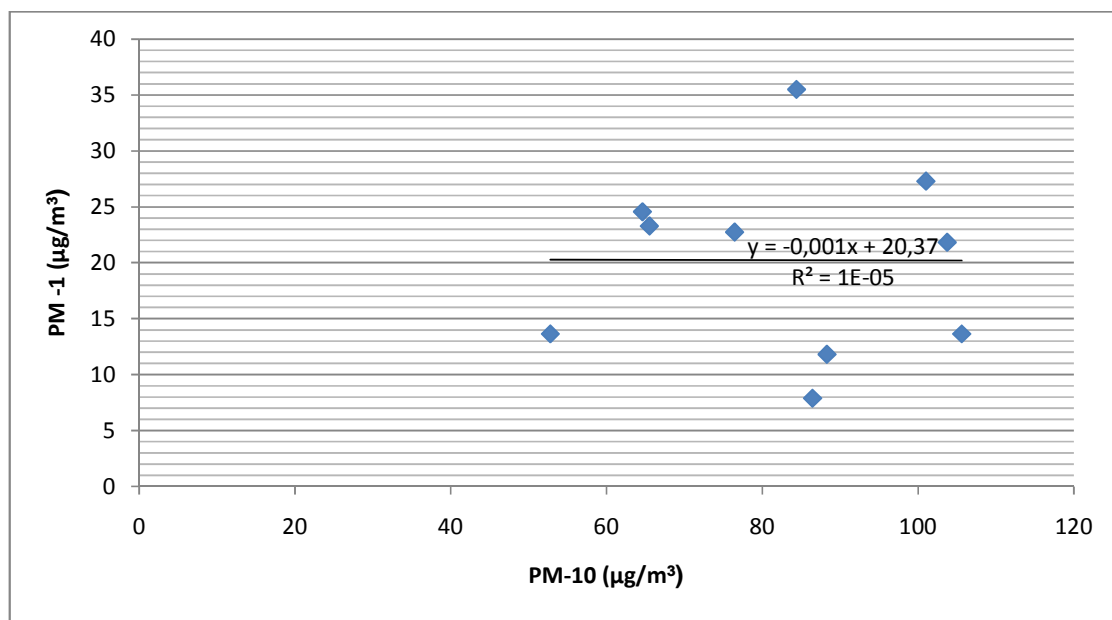


Figure N° 31 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1, PM-10.

Les facteurs R^2 des corrélations linéaires obtenues pour les deux couples PM-3/PM-10 et PM-1/10 sont très faibles, ce résultat confirme le résultat précédent selon lequel les PM-1 et PM-3 évoluent indépendamment des PM-10. Ainsi les facteurs qui influencent la formation des PM-10 différents de ceux des PM-1 et PM-3.

La figure N° 32 illustre la corrélation entre le couple PM-7/PM-10.

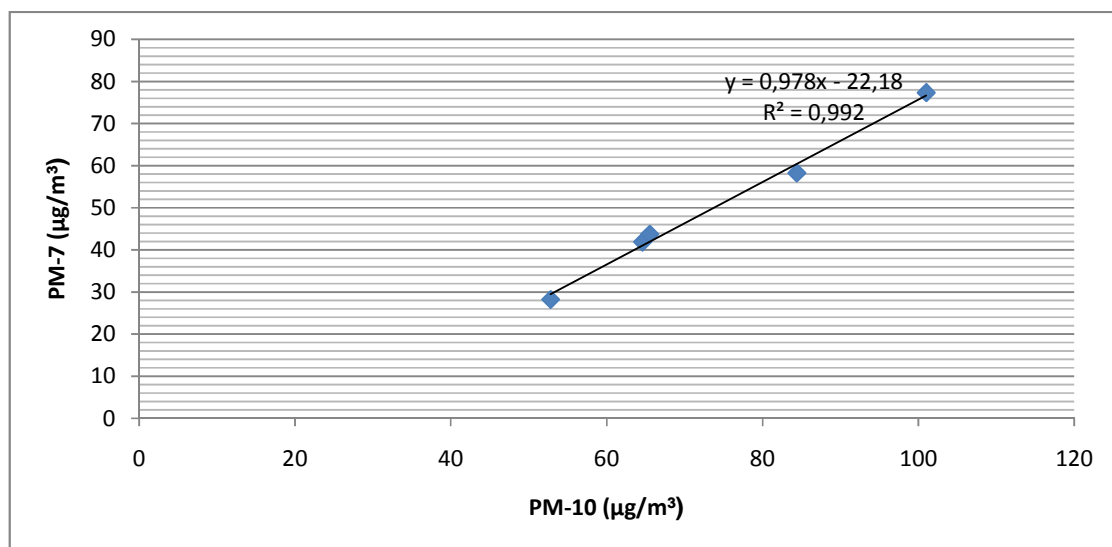


Figure N° 32 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-7, PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Le très bon facteur de corrélation obtenu ($R^2 = 0.99$) permet d'appuyer l'hypothèse formulée précédemment qui indique que les facteurs de formation et origines d'émission sont similaires.

Les figures N° 33 à 35 traitent de manière analogue les corrélations pouvant exister dans les couples des classes granulométriques suivantes : PM-3 / PM-(3-10), PM-1 / PM-(1-10) et enfin PM-7 / PM-(7-10).

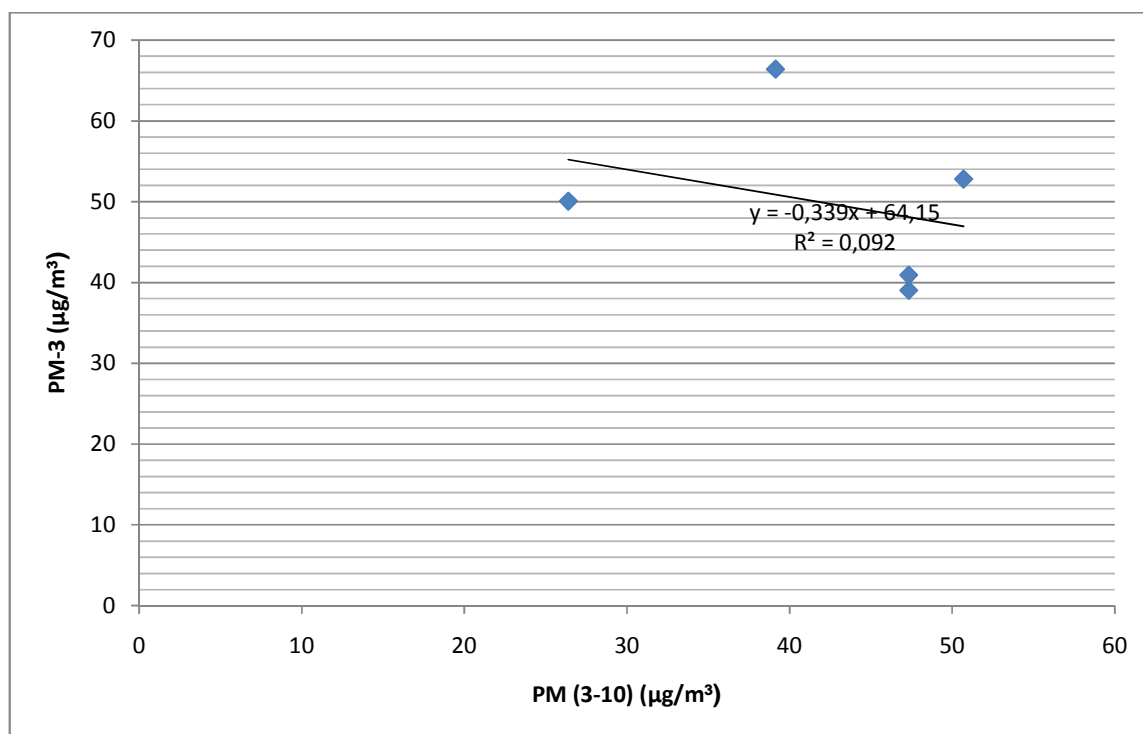


Figure N° 33: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3 et PM-(3-10).

Chapitre VI – Résultats et discussion

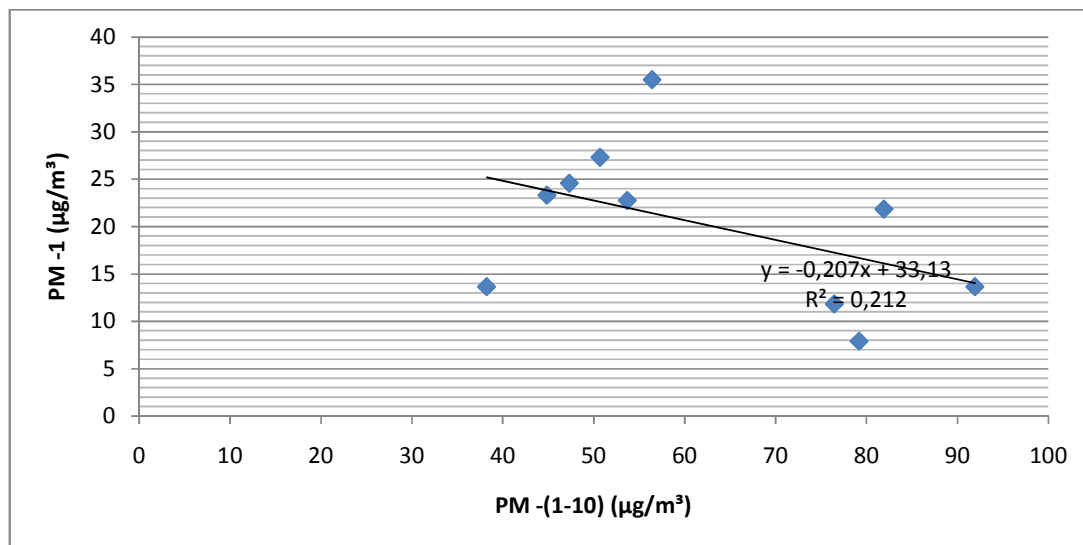


Figure N° 34 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM1 et PM-(1-10).

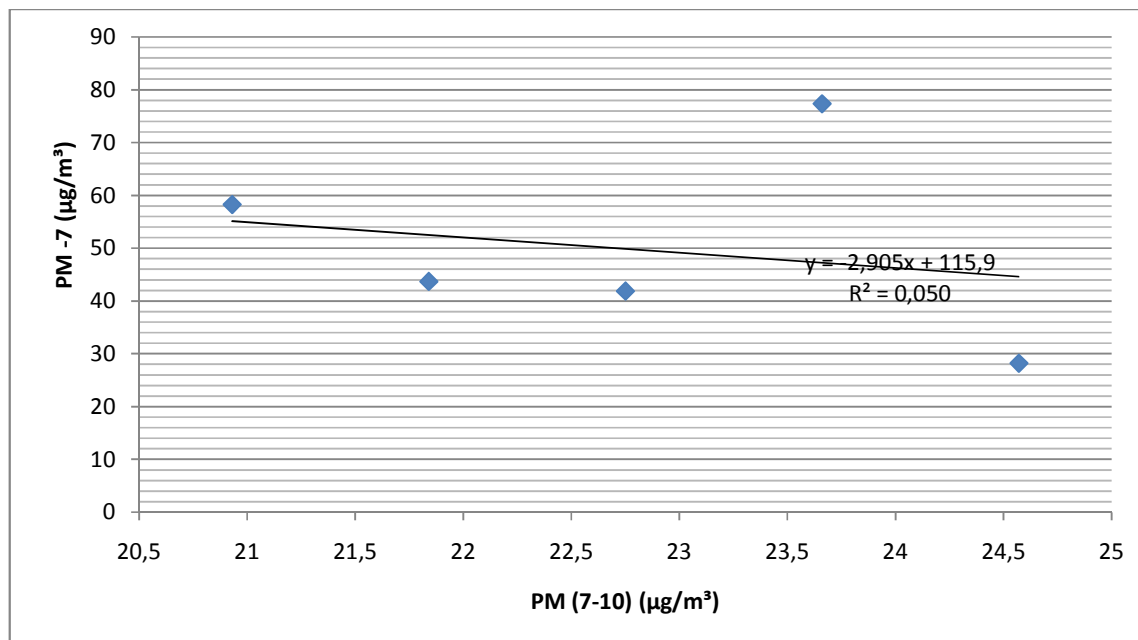


Figure N° 35 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-7 et PM-(7-10).

Chapitre VI – Résultats et discussion

Ces résultats montrent de nouveau que les particules fines sont dans leur formation et dans leur origine complètement différente des particules moins fines ou grossières. On peut avoir par exemple deux teneurs journalières en PM-10 identiques mais leurs composantes en classe granulométrique (0-3 μm) et en classe (3-10 μm) seront très probablement différentes. En d'autres termes, une amélioration du couvert végétal réduira la part des PM-(3-10) mais n'aura aucune influence sur la teneur des particules alvéolaires (classe 0-3 μm) qui sont les plus toxiques et qui sont dans notre cas particules carbonées (suies du trafic routier) et des particules secondaires de sulfates, mais surtout nitrates et composés organiques lourds provenant de la transformation photochimique dans l'atmosphère des NOx et COV issus du trafic routier.

Ainsi et à l'aide des multiples examens illustrés par les évolutions et les corrélations effectuées, nous pouvons déduire qu'effectivement la formation des classes granulométriques dans l'atmosphère est principalement dues à l'origine de leur émission. Plus proprement dit les particules fines et ultrafines PM-3 et PM-1 sont le résultat de l'activité humaine directe ou indirecte (le trafic routier et particules secondaires), alors que les particules grossières PM-(3-10), PM-(7-10) proviennent majoritairement de sources naturelles telle que l'érosion des sols et la resuspension de particules déposées.

VI.2 - Ampleur de la pollution de l'air et études comparatives

Afin de se situer par rapport au cadre de la réglementation, il est nécessaire de comparer les résultats de notre étude aux normes nationales et internationales, pour une meilleure évaluation des mesures à prendre pour une amélioration de la qualité d'air.

Les tableaux N° 11 résume les normes et directives réglementant les teneurs en PM-10 et PM-2.5 dans certains pays.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau N° 11 : Normes et directives internationales pour les teneurs en PM-10

Pays et régions	Valeur limite moyenne annuelle en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur limite journalière en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	références
Etas unis d'Amérique (US-EPA)	Retirée en 2006	150 à ne pas dépasser plus d'une fois par an en moyenne sur 3 ans	[93]
Californie	20	50	[95]
Union Européenne	40	50 à ne pas dépasser plus de 35 jours par an	[72]
OMS	20	50	[94]

Tableau N° 12 : Cadre règlementaire internationale pour les teneurs en PM-2,5.

Pays et régions	Valeur limite annuelle en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur limite journalière en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	références
Etas unis d'Amérique (US-EPA)	15	35	[93]
Californie	12	--	[95]
Union Européenne	10	25	[72]
OMS	10	25	[94]

L'agence américaine US-EPA définit une valeur moyenne annuelle de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2,5 [93]. En 2006, la norme relative à une exposition sur 24 heures pour les PM-2,5 a été abaissée de 65 à $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En revanche, la valeur annuelle pour les PM-10 a été supprimée car les études disponibles ne permettent pas de prouver un lien entre les problèmes de santé et une exposition à long terme à la fraction grossière des PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

La Californie préconise quant à elle de ne pas dépasser une concentration annuelle de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM-2.5 [95].

D'autres pays préconisent des seuils encore plus bas. C'est par exemple le cas de l'Australie, qui préconise une valeur annuelle de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2,5 [96].

La réglementation algérienne préconise une norme qui est extrêmement souple avec une valeur limite de 80 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les poussières [18]. L'objectif de qualité est estimé à 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [18], ce qui pose problème en ce qui concerne la réglementation algérienne est que les classes granulométriques aux quelles les valeurs se réfèrent ne sont pas spécifiées.

A Bouzaréah, la teneur moyenne en PM-10 obtenue dans cette étude s'élève à 77,4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), cette teneur dépasse toutes les normes internationales et représente environ quatre fois le seuil préconisé par l'OMS.

Il est nécessaire aussi de noter que sur 12 prélèvements, 11 ont dépassé 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), alors que la réglementation européenne prévoit un nombre de 35 jours sur une année ou la teneur ne doit pas dépasser 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), c'est un résultat tout de même inquiétant sur le plan santé humaine.

Pour la comparaison avec les normes des PM-2,5, nous pouvons associer la fraction PM-3 que nous avons mesuré à Bouzaréah à la réelle fraction PM-2,5, en effet divers études ont montré que la différence entre les deux fractions est minime [52, 63]. Ainsi et comparée aux normes données en tableau N° 14, la teneur moyenne en PM-3 de 49,9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurée à Bouzaréah est aussi largement supérieure à toutes les normes et recommandations internationales.

Les nuisances que peuvent engendrer de telles teneurs en PM-2,5 sont considérables si on se réfère à l'étude menée dans le cadre du programme Apehis. Le programme Apehis (Air Pollution and Health : a European Information System), mené sur 26 villes européennes situées dans 15 pays, a permis d'estimer qu'une réduction de l'exposition moyenne annuelle aux PM-2,5 à un niveau de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ permettrait d'éviter 13200 morts prématurées par an, et 22000 pour un niveau de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [21].

Il est par ailleurs très intéressant de comparer les teneurs mesurées à Bouzaréah à celles observées dans certaines grandes villes du monde (Tableau N° 14).

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau N° 13 : Valeurs des teneurs en PM-i dans différentes régions du globe

Villes	Teneur moy en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Teneur max en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	année	Type de site	references
Pékin-chine	200	420	2006	Site urbain (PM-10)	[96]
Hong- Kong	80	80	2003	Site urbain (PM-10)	[97]
Ispra -Italie		40	2002	Site urbain (PM-2,5)	[98]
USA	45		2001	Site urbain	[98]
Monagrega - Espagne	17		2002	Site Rural (PM-10)	[99]
Sofia -Bulgarie	54	92	2004		[99]
Eger - Hongrie	47	97	2004		[99]
Tirgu Mures - Roumanie	68	105	2004	Région chaude	[99]
Québec - Canada	9		2005	Site urbain	[100]
Bruxelles - Belgique	20	30	2008	Station trafic	[101]
Alger, Bouzaréah	77,4 49,9	105 66	2 mois (2010)	Site résidentiel urbain	Présente étude

Cette comparaison montre de nouveau le niveau très élevé de la pollution par les particules fines et très fines à Alger. Ce n'est que dans les pays similaires à l'Algérie qui sont en voie de développement qu'on retrouve de pareils niveaux de pollution. Les pays occidentaux avec leur forte industrie et leur important trafic routier n'accusent pas une pollution aussi sévère que celle rencontrée dans notre pays. S'agissant dans le cas de notre étude d'un travail qui entre dans le cadre d'une étude globale sur la pollution de l'air à Alger, la question qui se pose maintenant est de savoir où se situe Bouzaréah par rapport aux autres communes et quartiers d'Alger. Le tableau N° 15 résume à cet effet les teneurs moyennes mesurées en différents sites d'Alger.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Tableau N° 14 : Comparaison des teneurs en PM-i dans mesurées en différents sites d' Alger.

Site a Alger	PM-10	PM-3	PM-1	Références
ENP, site de proximité				[96]
- Année 2001	84.1	-	-	
- Année 2003	75.2	40.3	25.9	[101]
Bab-Ezzouar, site urbain, 2005	70.4	35.3	22.0	[102]
Place 1er mai, site urbain, 2006	64.1	34.7	15.1	[103]
Dely Brahim, ISMAL site semi urbain, 2007	27.0	18.1	14.8	[104]
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	[106]
Bouzareah, parc miremont, site urbain 2010	77,4	49,9	20.2	Présente étude

Cette comparaison montre qu'à Bouzaréah, quartier résidentiel situé sur les hauteurs d' Alger et considéré comme zone plus ou moins bien entretenue et aménagée, la pollution par les PM-10 n'est pas moins importante qu'ailleurs. On retrouve des niveaux similaires à ceux observés aux sites urbains de Bab-ezzouar ou de Sidi M'hamed. Seuls les sites éloignés des activités humaines (sites semi-urbains) sont moins pollués.

Bouzaréah se singularise toutefois par sa teneur élevée en particules alvéolaires (PM-3). Si l'érosion des sols est moins prédominante, ce n'est pas le cas pour les particules très fines. Il est très probable que Bouzaréah de part son altitude reçoit les émissions du trafic routier des zones environnantes (El-Biar, Château Neuf, etc.).

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

Afin de caractériser la composition chimique en termes de métaux lourds, nous allons procéder à la détermination des teneurs et de la distribution des contributions massiques de ces derniers dans les différentes classes granulométriques étudiées.

Les corrélations entre les couples plomb/fer seront établies afin de spécifier et de confirmer la variété des sources d'émission.

Chapitre VI – Résultats et discussion

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

L'analyse par absorption atomique des échantillons recueillis a permis d'accéder, selon les moyens disponibles, au teneurs de trois métaux lourds : plomb, fer, cuivre et cadmium.

Les figures N° 36 à 38 illustrent l'évolution temporelle des métaux lourds Pb, Fe et Cu associés aux différentes fractions granulométriques de particules.

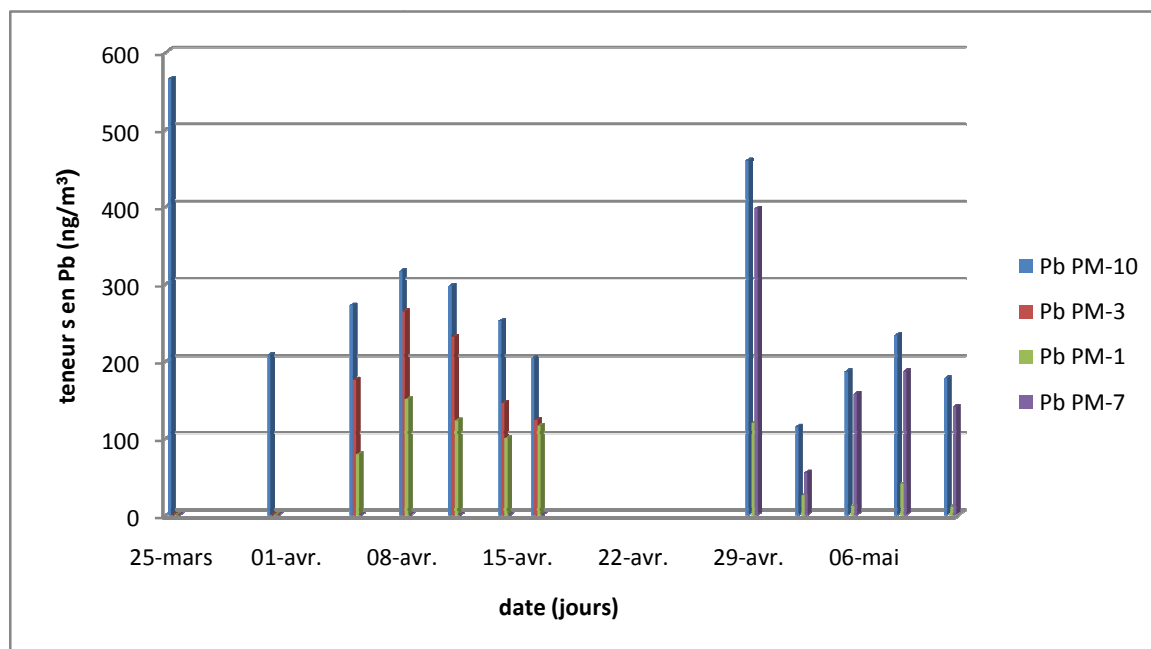


Figure N° 36 : Evolution temporelle du plomb associé aux différentes classes granulométriques.

Chapitre VI – Résultats et discussion

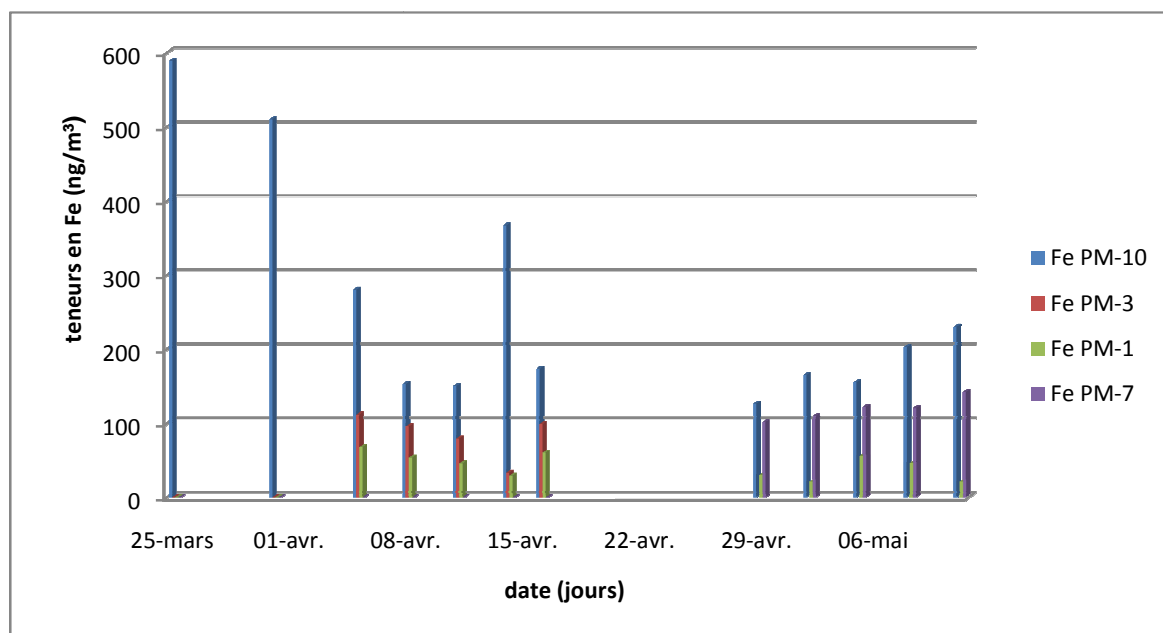


Figure N° 37 : Evolution temporelle du fer associé aux différentes classes granulométriques.

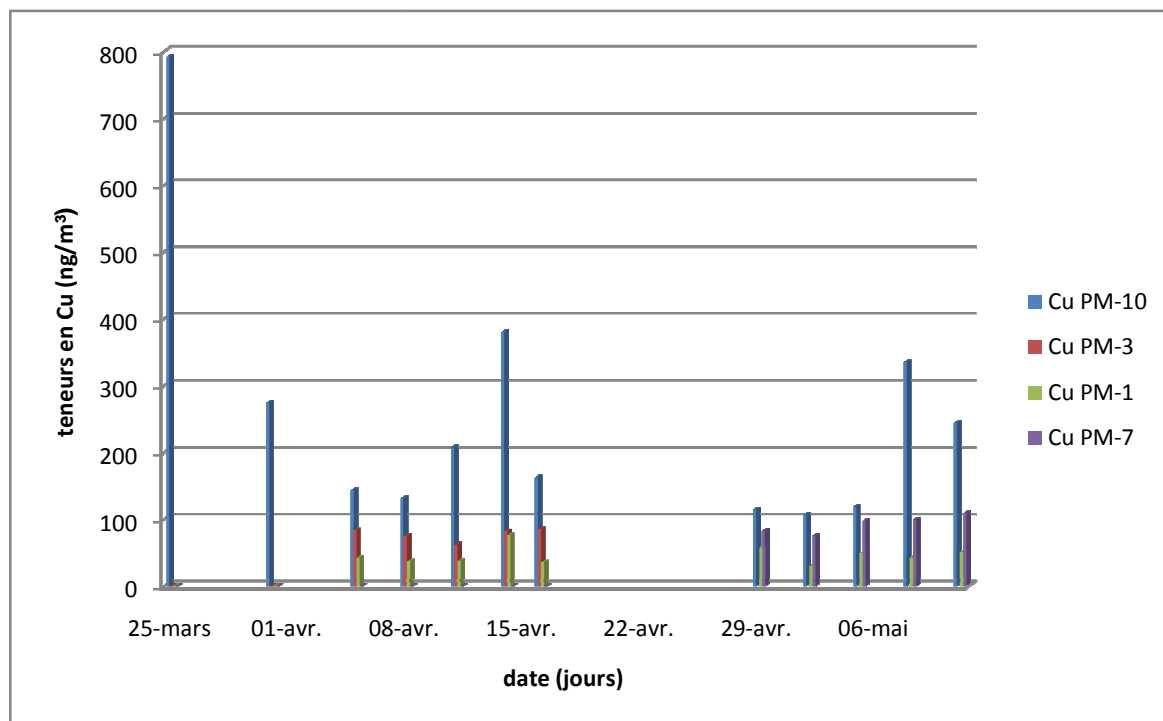


Figure N° 38 : Evolution temporelle du cuivre associé aux différentes classes granulométriques.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Le tableau N° 16 résume les teneurs moyennes et les contributions massiques pour chaque classe granulométrique. Le cadmium qui a été également recherché se trouve à des teneurs indécélables par la technique d'analyse utilisée.

La figure N° 39 illustre les teneurs moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique.

Tableau N° 15 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques correspondantes aux métaux lourds.

	Teneurs atmosphériques moyennes (ng/m ³) et fractions massiques en %			
	PM-10	PM-7	PM-3	PM-1
Pb	273,4	187,7	187	64,58
	0,32	0,34	0,33	0,29
Fe	258,5	118,94	83,6	35,93
	0,3	0,21	0,15	0,16
Cu	250,6	92,56	63,3	38,2
	0,29	0,17	0,11	0,17

Dans une première lecture du tableau N° 16 nous pouvons constater que le plomb accuse les teneurs les plus élevées parmi les métaux analysés. Avec une teneur moyenne de 273,4 ng/m³, il contribue pour 0,32 % (Fig. 39) de la masse des PM-10.

La pollution plombée au niveau de ce site respecte la valeur limite recommandée par l'OMS qui est de 500 ng/m³, par contre la valeur limite recommandée par l'Union Européenne qui est de 200 ng/m³ est dépassée.

Le fer qui est partiellement un traceur de la pollution naturelle, n'atteint pas des teneurs élevées. Il reste avec le cuivre en deçà des teneurs du plomb (figure N° 37).

Chapitre VI – Résultats et discussion

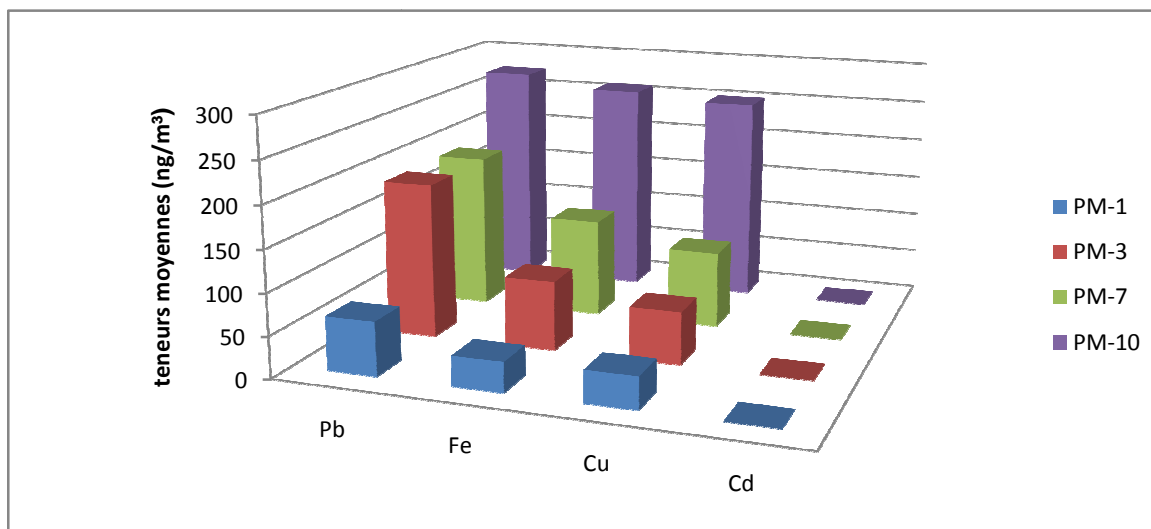


Figure N° 39: Teneurs moyennes des métaux lourds associés aux différentes fractions granulométriques.

La figure N° 40 représente les contributions massiques des métaux dans les différentes classes granulométriques.

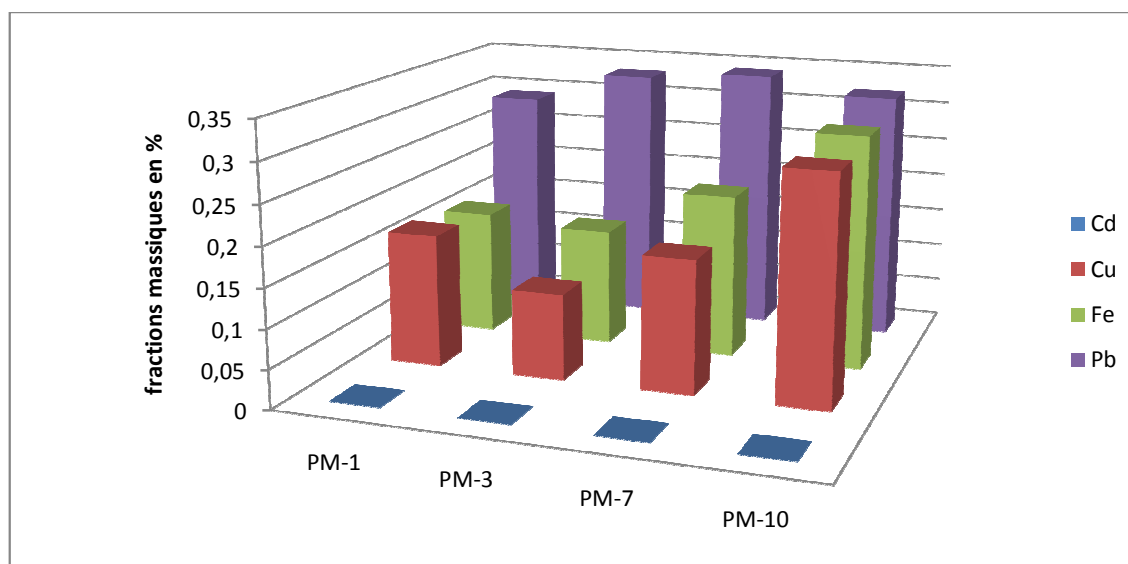


Figure N° 40 : Contributions massiques des métaux lourds dans les différentes classes granulométriques.

Chapitre VI – Résultats et discussion

L'examen de la répartition massique des métaux (fig. 39) montre que le plomb se distribue sur les diverses fractions de particules de manière totalement différente de celles du fer et du cuivre. En effet le fer et le cuivre enrichissent fortement les fractions supérieures à 3µm, alors que le plomb est relativement très enrichi dans les particules très fines (fractions de moins de 3 µm). Le plomb qu'on rencontre à Bouzaréah provient principalement du trafic routier (à Alger, il n'y a pas d'industrie émettrice de plomb) et se retrouve adsorbé sur les très fines suies des gaz d'échappement. Une partie du plomb se dépose et sera réentraînée dans la resuspension qui a une granulométrie moins fine que les suies, d'où cette répartition massique du plomb dans toutes les fractions PM-i.

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

Le tableau N° 17 illustre les études effectuées au niveau de différents sites afin d'évaluer le niveau de la pollution de l'air par les métaux lourds.

Tableau N° 16 : Comparaison inter-sites des teneurs en métaux lourds suivant la classe granulométrique

Sites de mesure	Fractions granulométriques	Teneurs en métaux lourds (ng/m ³)			références
		Pb	Fe	Cu	
Station urbaine 1er Mai (2006)	PM-10	220,30	199,45	108,67	[103]
	PM-3	181,40	102,17	78,03	
	PM-1	110,64	47,65	31,19	
Station urbaine Bab-Ezouar (2005)	PM-10	98	136	87	[102]
	PM-3	65	80	57	
	PM-1	39	47	30,4	
Station urbaine Bech-Djerrah (2009)	PM-10	61,3	392,4	201,7	[106]
	PM-3	32,4	173	152,4	
	PM-1	13,25	87,75	100,75	
Station urbaine bouzareah	PM-10	273.4	258.5	250.6	(présente étude)
	PM-3	187	83.6	63.3	
	PM-1	64.58	35.93	38.2	

Chapitre VI – Résultats et discussion

Les données du tableau N° 17 permettent de constater que la composition chimique de la phase particulaire de l'atmosphère dépend du site de prélèvement. Bien que les teneurs en métaux lourds dans la fraction des PM-10 recueillis au niveau de la daïra de Bouzaréah sont légèrement plus élevées que celle enregistrées dans les études précédentes, elles restent à un niveau acceptable pour un milieu urbain.

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

Comme pour les particules, il est intéressant d'étudier l'existence d'éventuelles corrélations qui nous confirment les sources respectives des métaux considérés.

Nous représentons les corrélations entre les teneurs des couples Pb/PM-10 (Fig. 41), Pb/PM-3 (Fig. 42) mais aussi Pb/Fe pour les classes granulométriques PM-10 et PM-3 (Fig. 43 et 44).

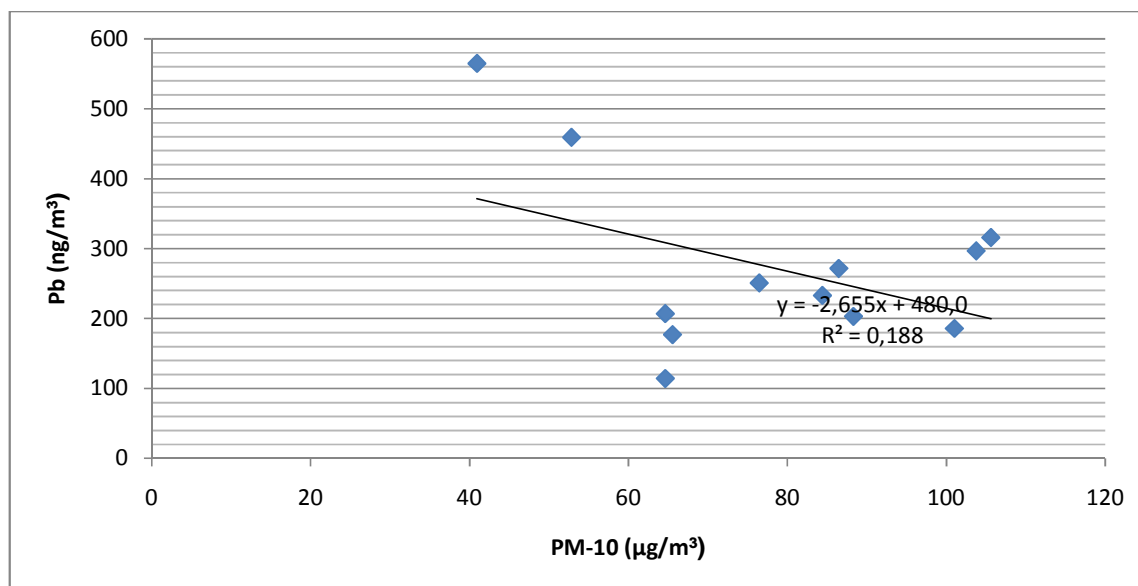


Figure N° 41 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/PM-10.

Chapitre VI – Résultats et discussion

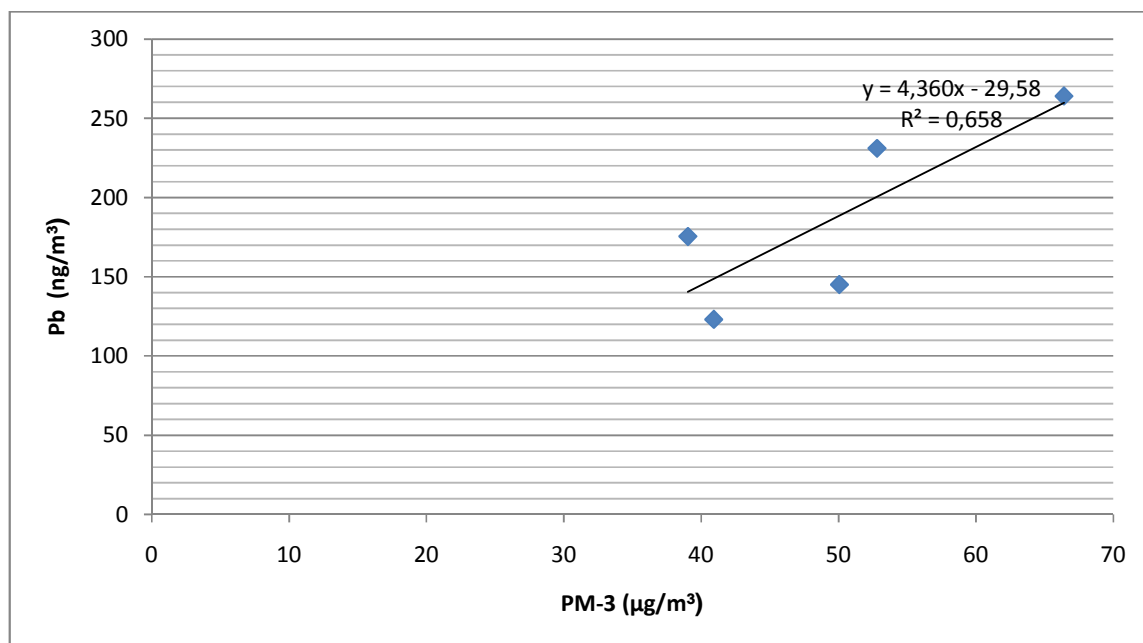


Figure N° 42 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/PM-3.

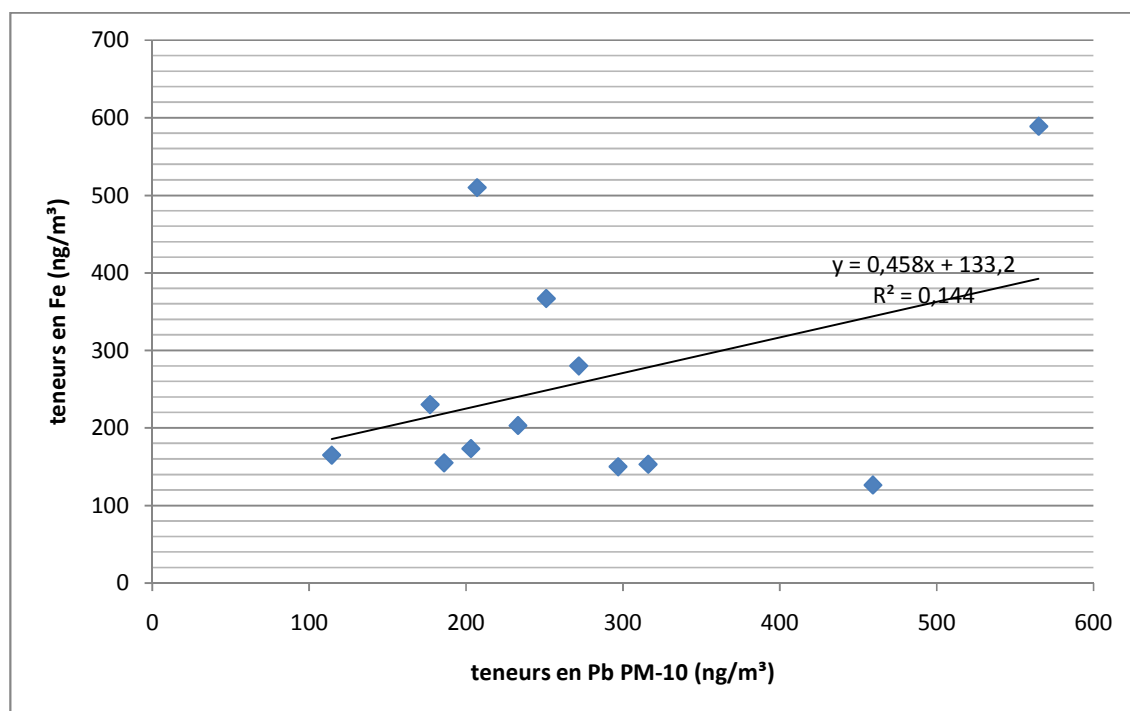


Figure N° 43 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/Pb dans les PM-10.

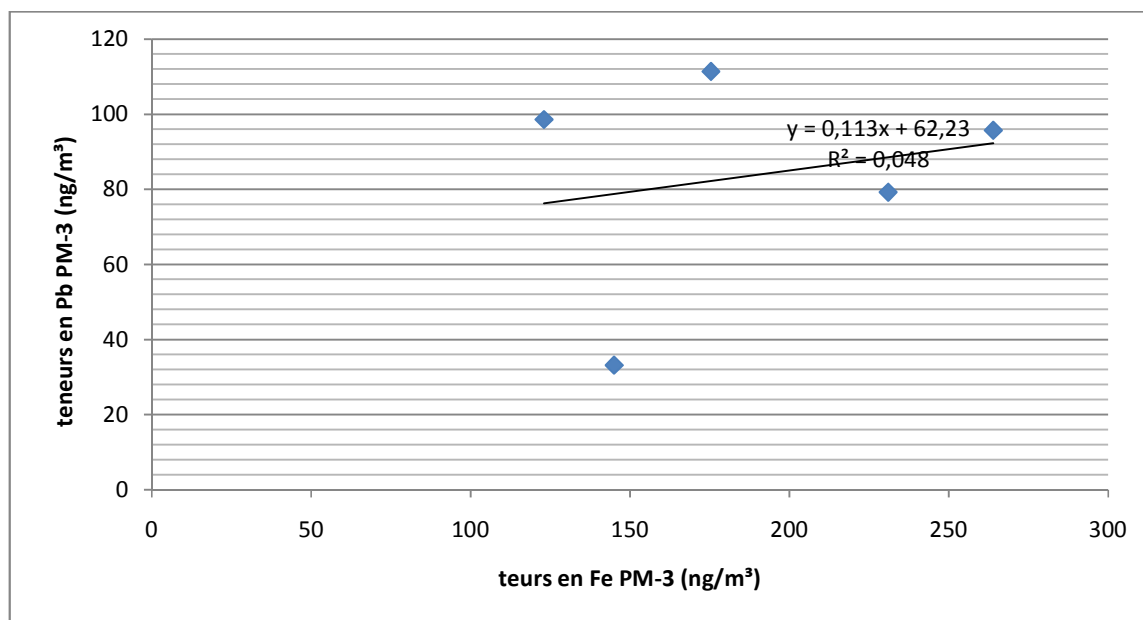


Figure N° 44 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Pb/Fe dans les PM-3.

On constate :

- Il n'y a pas de corrélation entre le Pb et les PM-10. Une teneur élevée en PM-10 n'implique pas automatiquement une teneur élevée en Pb (fig. 41).

Il existe une corrélation acceptable entre les teneurs en Pb et les PM-3 qui le supportent (Fig. 42) Ainsi le Pb du trafic routier est associé aux particules alvéolaires PM-3.

- Aussi bien dans les PM-10 que dans les PM-3, le Pb et le Fe ne sont pas corrélés (Fig. 43 et 44).

Ce résultat suggère, comme noté auparavant, que ces deux métaux ont des origines différentes. Le fer est issu de sources naturelles (écorce terrestre) alors que le plomb provient principalement du trafic routier.

VI.4 - Perspectives de réduction des émissions de particules fines

Depuis le rapport national sur l'état de l'environnement publié en 2000 en Algérie, différentes actions ont été entreprises afin de mieux cadrer les problèmes d'environnement rencontrés dans le pays [18]. On citera entre autres :

Chapitre VI – Résultats et discussion

- L'adoption de nouveaux textes législatifs et réglementaires définissant le cadre juridique pour une prise en charge de certains aspects qui ont un impact direct ou indirect sur l'environnement (Loi sur les déchets, loi sur le littoral, loi sur l'environnement et le développement durable, etc.).
- La mise en place de nouvelles institutions d'études et de formation (Observatoire National de l'Environnement, Centre National des Technologies de Production plus Propres, Agence Nationale des déchets, Conservatoire des métiers de l'environnement, etc.).
- Investissements dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air (réalisation de deux réseaux de mesure à Alger et à Annaba).
- Engagements de certaines unités industrielles pour le contrôle de leurs rejets dans le cadre des contrats de performance (plusieurs contrats ont été signés avec différentes industries).

En ce qui concerne la réduction des émissions du trafic routier en termes de particules fines, la conversion des automobiles au GPL, ou encore à des moteurs munis de filtre à particules, favoriserait la réduction de la teneur de la fraction alvéolaire PM-3.

Toutes ces actions n'ont malheureusement pas suffi pour améliorer la qualité de l'air dans les villes. Devant la croissance très rapide du parc automobile, il faudrait réfléchir à d'autres actions plus performantes.

Ainsi par exemple les moteurs munis de catalyseurs jouent un rôle dans la réduction des aérosols secondaire par la réduction des oxydes d'azote, des HAP et d'autres polluants résultant d'une combustion incomplète. Une réglementation exigeant la présence de catalyseurs dans tous les véhicules neufs serait certainement d'un apport positif.

Par ailleurs, le prix actuel du diesel n'est pas pour encourager les citoyens à renoncer au moteur diesel qui est très polluant en termes de PM-2,5.

Chapitre VI – Résultats et discussion

Le transport public est dans un état chaotique et est totalement désorganisé. Cette situation, non plus, ne pousse pas le citoyen à renoncer à son véhicule.

Pour agir au niveau des rejets industriels il serait judicieux d'équiper les installations polluantes de dépoussiéreurs.

Les dépoussiéreurs utilisés sont les suivants [47] :

➤ Les cyclones :

Ils sont efficaces sur les grosses particules ($>15\mu\text{m}$). Ce type de matériel met en jeu une force mécanique (pesanteur, inertie ou force centrifuge) pour faire migrer les poussières hors du courant du gaz porteur et assurer leur séparation. En effet la masse volumique des poussières est environ 1000 fois supérieure à celle des gaz. Ce matériel peut garantir des rejets de 250 120 mg/m^3 et il est souvent utilisé en pré-dépoussiérage (Fig. 45).



Figure N° 45 : Les cyclones [107].

➤ Les filtres à manches :

Le flux gazeux à traiter traverse un média filtrant qui retient les poussières. Celles-ci obstruent progressivement les pores du filtre et celui-ci doit être régulièrement régénéré par évacuation des poussières accumulées. Ce type de filtre (Fig. 46) permet de garantir des rejets de 10 à 5 mg/m^3 et présente une excellente efficacité pour toutes les poussières mêmes très fines.

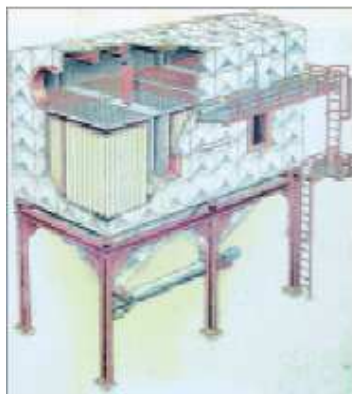


Figure N° 46 : Les filtres à manches [107].

➤ **L'électrofiltre :**

Les poussières présentes dans l'effluent gazeux sont ionisées puis piégées par l'action d'un champ électrique élevé créé entre une électrode collectrice et une électrode émissive.

L'électrode collectrice est régulièrement mise en vibration pour récolter les poussières accumulées. Cette technologie présente une très bonne efficacité pour toutes les particules et permet de respecter 50mg/m³ de poussières en rejet, voire 30 mg/m³ en adaptant le nombre de champs (Fig. 47).

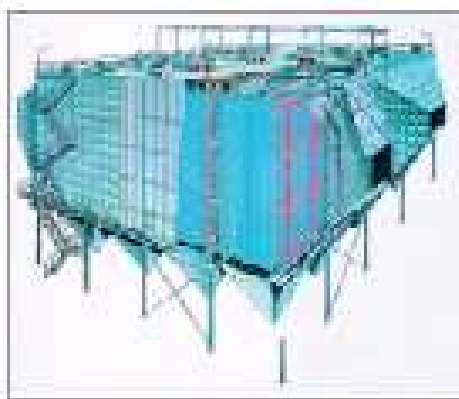


Figure N° 47 : Electrofiltre [107].

Normalement toutes les cimenteries algériennes devraient être équipées de filtres électrostatiques ou de filtre à manches.

Chapitre VI – Résultats et discussion

➤ Les laveurs :

Les laveurs s'avèrent parfois indispensables pour le dépoussiérage lorsque les gaz à traiter sont proches de la saturation en eau ou lorsque les problèmes de sécurité rendent très difficile leur épuration par voie sèche. Les laveurs ont l'inconvénient de transférer l'émission gazeuse vers une phase liquide. Un dépoussiéreur humide produit une boue qu'il faut traiter et au moins décanter. L'efficacité des laveurs est dépendante des niveaux d'énergie mis en jeu.

Le tableau N° 18 résume les caractéristiques des différents dépoussiéreurs.

Tableau N° 17 : Caractéristiques des différents dépoussiéreurs [107].

	Investissement	Exploitation	Emissions
Cyclones	Faible	Faible	< 250 à 120 mg/m ³
Electrofiltres	Elevé	Faible	< 50 à 30 mg/m ³
Filtres à manches	Elevé	Moyen	< 10 à 5 mg/m ³
Laveurs	Faible	Moyen / Elevé	< 50 mg/m ³

Cet aperçu montre que les techniques permettant de réduire les émissions polluantes et de préserver la qualité de l'air existent, certaines sont largement pratiquées dans les pays industriels depuis des décennies. On évoque souvent le problème des coûts, mais la pratique a montré que l'investissement dans l'environnement est rentable et crée même de l'emploi.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La pollution atmosphérique est considérée comme étant un sujet sensible est encore difficile à maîtriser, ceci du à la richesse et la variété des sources d'émission et de la composition de l'air que nous respirons, aux facteurs influençant, mais aussi à la complexité des mécanismes et interactions qui ont lieu dans l'atmosphère. L'étude que nous avons présenté fait partie d'une série études effectuées dans le but de caractériser la phase particulaire de l'atmosphère dans le Grand Alger. Il s'agissait d'estimer les teneurs moyennes des particules en suspension PM-10 et les fractions PM-3, PM-1 susceptibles de nuire à la santé humaine en premier lieu. Il a aussi été question d'analyser la composition chimique des particules en termes de métaux lourds (Pb, Fe, Cu, Cd) afin de déterminer leurs teneurs moyennes et leurs contributions massiques dans les diverses fractions.

Le site étudié, Parc Miremont à Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger, est représentatif des quartiers résidentielles aisés de la capitale, où apparemment l'entretien et l'aménagement donne l'illusion d'une certaine propreté et par là d'un faible taux de pollution. L'étude montre que la région est comme les quartiers populaires d'Alger (Bachdjarrah, Bab-Ezzouar) confrontée à une intense pollution par les particules atmosphériques. On y mesure en moyenne des taux de PM-10 ($77,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et PM-3 ($49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) qui dépassent largement les normes et recommandations internationales. De plus la région étudiée se caractérise par un taux élevé en particules fines qui présentent un potentiel de nuisance élevé (plus de 60 % des PM-10 ont une granulométrie inférieure à $3\mu\text{m}$).

L'interprétation des données obtenues a permis de mettre en évidence les sources de pollution qui y sont le plus incriminées. Le trafic routier, les particules secondaires, la resuspension et l'érosion des sols sont à l'origine cette inquiétante pollution. Ainsi le principal facteur influençant la tendance particulaire de l'atmosphère se résume aux sources d'émission. Il y a ensuite le facteur météorologie qui fait que les teneurs journalières accusent une forte variabilité temporelle.

L'analyse de quelques métaux lourds des particules recueillies par classe granulométrique a montré que le plomb, le fer et le cuivre sont présents dans toutes les classes granulométriques. Le plomb, avec une teneur moyenne de $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit 0,32% de la masse totale des PM-10, atteint un niveau qui certes respecte les normes de l'OMS mais demeure plus élevé que dans les pays qui ont généralisé l'utilisation de l'essence sans plomb. Ce qui est plus inquiétant c'est qu'une grande partie du plomb se retrouve dans la fraction alvéolaire des particules

CONCLUSION GENERALE

PM-3 qui pénètrent profondément dans le système respiratoire. L'érosion est principalement responsable de teneurs assez élevées en fer et en cuivre composants l'écorce terrestre.

Diverses corrélations ont été établies pour appuyer les hypothèses formulées quant à la contribution des différentes sources polluantes.

Une persévérance dans la réalisation des perspectives d'amélioration de la qualité de l'air devient nécessaire de nos jours, l'information reste capitale pour une meilleure maîtrise des risques encourus et des problèmes environnementaux qui bouleversent peu à peu l'équilibre naturel. La préservation de l'environnement est avant tout une culture qui n'a pas pour but de freiner le développement, il ne s'agit pas d'abandonner un mode de vie mais de se réconcilier avec notre habitat. La question n'est pas quelle terre allons-nous laisser aux générations futures, mais quels hommes allons-nous laisser à la terre.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] **Jean-Pierre Zellweger**. « Impact des particules fines sur la santé » Forum ARPEA Polyclinique Médicale Universitaire, Lausanne. 21 sept 2007.
- [2] **SCHMAUS.A**, 1920, Die Chemie des Nobels, der Wolken und des Regens, Die Umschau; Jahrg 14; pp 61-63.
- [3] **J.Priest**, « Problems of our Physical Environment», Addison-Wesley Publishing Company, pp 59-70, (1973).
- [4] **R.M.Harrison, A.M.Jones, R.G.Lawrence**, (2003), « A pragmatic mass closure model for airborne particulate matter at urban background and roadside sites », *Atm.Env*, Vol 37, pp 4927- 4933.
- [5] Aide-mémoire EURO/04/05, « La pollution atmosphérique par les particules en suspension ses effets nuisibles sur la santé », Berlin, Copenhague, Rome, 14 avril 2005.
- [6] **Stéphane Barbusse - Gabriel Plassat**, (2005), « Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination » Résultats du programme mené par l'ADEME depuis 1995 « Particules automobiles » Caractérisation physico-chimique des particules efficacité des dispositifs de dépollution.
- [7] **Chevreuil (M.), Ollivon (D.), Teil (M.J.), Garban (B.), Blanchoud (H.) Et Le Genti (L.)**, (2001), – Polluants organiques persistants (POP) : du compartiment atmosphérique aux stations d'épuration. Conférence internationale « Scientifiques et décideurs, agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux », Lyon, atelier 4 : Les activités du bassin versant et la qualité de l'eau.
- [8] Brochure de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), «Poussières fines: un fléau», 18 mars 2008.
- [9] Rapport national France, (2003) - Pollution atmosphérique.
- [10] **Organisation Mondiale de la Santé (OMS)**, (2005) : "Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide (2003)" et "Answer to follow-up questions from CAFE (2004)".
- [11] **Donaldson K & Stone V**, (2003), Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Ann Ist Super Sanita* **39**, 405-410.
- [12] **Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, Viana MM, Alarcon M, Mantilla E & Ruiz CR**, (2004), Comparative PM10-PM2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Sci Total Environ* **328**, 95-132.
- [13] **Baulig A, Blanchet S, Rumelhard M, Lacroix G, Marano F & Baeza-Squiban A**, (2007), Fine urban atmospheric particulate matter modulates inflammatory gene and Protein expression in human bronchial epithelial cells. *Front Biosci* **12**, 771-782.
- [14] **Annie Gaudichet**, (1995), « Aérosols nuages et pluies », LISA (unité mixte CNRS/ université Paris-XII et Paris VII) .
- [15] **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.

- [16] **Kerbachi R., M. Boughedaoui, L. Bounoua et M. Keddou**, 2006 : Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers, *Atm. Env.*, N°40, , pp.3995-4003.
- [17] **Kerbachi R., M. Boughedaoui, Y. Kerchiche 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.
- [18] **M.T. AOUDIA** (consultant matet), (2004), « Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement (RNE 2003) » volet : pollution atmosphérique. Ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme.
- [19] **Pope AC et al.** Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution(2002).. *Journal of the American Medical Association*, 287:1132–1141.
- [20] **AFNOR.** (1985). Air ambiant - Concepts relatifs à l'échantillonnage des matières particulaires en suspension (Norme AFNOR X43-022).
- [21] **MacNee W & Donaldson K.** (2003). Mechanism of lung injury caused by PM10 and ultrafine particles with special reference to COPD. *Eur Respir J Suppl* 40, 47s-51s. Edition, London, 1984.
- [22] **Moon C & Becker S.** (1999). Cytotoxicity and induction of proinflammatory cytokines from human monocytes exposed to fine (PM2.5) and coarse particles (PM10-2.5) in outdoor and indoor air. *Toxicol Appl Pharmacol* 155, 245-252.
- [24] **Borm PJ, Robbins D, Haubold S, Kuhlbusch T, Fissan H, Donaldson K, Schins R, Stone V, Kreyling W, Lademann J, Krutmann J, Warheit D & Oberdorster E,** (2006), The potential risks of nanomaterials: a review carried out for ECETOC. Part *Fibre Toxicol* 3-11.
- [25] **Schaumann F, Borm PJ, Herbrich A, Knoch J, Pitz M, Schins RP, Luettig B, Hohlfeld JM, Heinrich J & Krug N,** (2004), Metal-rich ambient particles (particulate matter 2.5) cause airway inflammation in healthy subjects. *Am J Respir Crit Care Med* 170, 898-903.
- [26] **Dalal NS, Suryan MM, Vallyathan V, Green FH, Jafari B & Wheeler R,** (1989), Detection of reactive free radicals in fresh coal mine dust and their implication for pulmonary injury. *Ann Occup Hyg* 33, 79-84.
- [27] **SECTEN CITEPA,** (2004), – Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – Séries sectorielles et analyses étendues. Réf. CITEPA 494/Convention MATE 26/2001.
- [28] **Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission (Marelli L.),** (2007), « Contribution of natural sources to air pollution levels in the EU – a technical basis for the development of guidance for the Member States», EUR 22779 EN.
- [29] **CITEPA,** (2007), « Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – Séries sectorielles et analyses étendues – Rapport d'inventaire national SECTEN », CITEPA 622/Convention MEDD 04 000074.

- [30] CITEPA, (2001), « Inventaire des émissions de particules primaires ».
- [31] **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.
- [32] **Masclat P & Marchand N** « aérosols, nuage, pluie » chapitre 5 Technique de l'ingénieur, 205-210.
- [33] **Masclat P., Cachier H.** (1998), « L'aérosol atmosphérique. Caractéristiques physico-chimiques », *Analisis Magazine*, 26, n°9, M11-17.
- [34] **M.bisson.** 1986, « introduction a la pollution à la pollution atmospherique », 30-150.
- [35] Environnement Canada (2005), « Le chauffage résidentiel au bois – Sommaire des résultants obtenus de 1999 à 2002 », *Pollution atmosphérique*, 187, 351-353.
- [36] **Legrand, M. and H. Puxbaum** (2007), « Summary of the CARBOSOL project: Present and Retrospective State of Organic versus Inorganic Aerosol over Europe », *Journal of Geophysical Research*, 112 (D23), doi: 1029/2006JD008271, 2007.
- [37] **Almeida S.M., Pio C.A., Freitas M.C., Reis M.A., Trancoso M.A.** (2006), « Source apportionment of atmospheric urban aerosol based on weekday/weekend variability: evaluation of road re-suspended dust contribution », *Atmospheric Environment* 40, 2058-2067.
- [38] La pollution automobile et ses effets sur la santé - États des connaissances – Interrogations et propositions, Rapport ADEME / INRETS, février 1995.
- [39] La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique - Bilan de 15 ans de recherche internationale, SFSP, mai 1996.
- [40] **V. Tatry, E. Leoz**, Caractérisation chimique de la matière organique gazeuse et particulaire due aux moteurs Diesel, à l'émission et dans l'air ambiant, Convention ademe/ineris - primequal-predit, décembre 1998.
- [41] CNRS. Expertise collective (1996).
- [42] **Dr S. Tissot**, Toxicité des particules émises par la circulation automobile, INERIS, décembre 1999.
- [43] **Leygonie R.** : Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures et effets, *Poll Atm.*, Juillet-Septembre, 1993, pp. 63-74.
- [44] Impact des technologies en Diesel et en essence sur la formation et la nature des particules issues de la combustion, Contrat ADEME/Renault/PSA n°9966009, juin 2003. Emission Factors and Influences on Particle Emissions of Modern 2-Stroke Scooters, HTI-BFH. Contrat BUWAL VLR.03.05, décembre 2003.
- [45] National Center for Environmental Assessment : Information about particulate, Particulate Matter, Environmental Protection Agency, U. S., 2003.

- [46] Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques – Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé présenté par le sénateur Gérard MIQUEL le 5 avril 2001.
- [48] **Hinds W. C.**: Aerosol technology, Wiley Interscience, London, 1982.
- [49] **Pierre CHARBIER de la SAULNIERE**, 1974, « la pollution atmosphérique », les industries, leurs productions, leurs nuisances.
- [50] **Calabrese E.J.**, (1978) - Pollutants and High-Risk Groups. New York.
- [51] **Sophie Sobanska, Marie Choel, Jacques Barbillat, Juliette Rimetz-Planchon, Myriam Moreau, Claude Bremard.** « Analyse des éléments Traces Métalliques dans les particules atmosphériques par micro-imageries », 1-23, 2008.
- [52] **Renoux A. et Boulaud D.**, (1998), « Les aérosols : Physique et métrologie », Edition Tec&Doc, Lavoisier, Paris.
- [53] **Hodzic A.**, (2005), « Modélisation des aérosols de pollution en Ile-de-France », Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique.
- [54] **Vautard R., Bessagnet B., Chin M., Menut L.**, (2005), « On the contribution natural Aeilan sources to particulate matter concentrations in Europe: testing hypotheses with modeling approach », Atmospheric Environment 39, 3291-3303.
- [55] **Choi JH, Kim JS, Kim YC, Kim YS, Chung NH & Cho MH**, (2004). Comparative study of PM2.5 - and PM10 - induced oxidative stress in rat lung epithelial cells. J Vet Sci 5, 11-8.
- [56] **CERTU-CETE Méditerranée**, juin 2002 – Dispersion de la pollution aux environs d'une route, et « santé », calcul ADMS, p 34.
- [57] **CEREA** – Modélisation da la dispersion des particules en bord de route et de leur dépôts – sujet de thèse laboratoire commun ENPC/EDF R&D (2002).
- [58] **Lefèvre R., Ausset P.**, (2001), « Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti : la pierre et le verre », Pollution Atmosphérique, 172, 571-588.
- [59] **Primequal-Predit** (2005), « Pollution par les particules atmosphériques : état des connaissances et perspectives de recherche », La documentation française, Paris.
- [60] **Chazette P.**, (2004), « Aérosol anthropique : impact climatique et environnemental », Techniques de l'ingénieur, Extrait de la collection, 10, RE 21-1 à 11.
- [61] 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.
- [62] **AIRPARIF/LISA/LSCE** (2006), « Etude des retombées de suies sur les matériaux en sites péri-aéroportuaires – Comparaison avec des sites urbains et ruraux », p 87.
- [63] **Quisefit J.P., Gaudichet A.**, (1998), « Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques », Analyses Magazine, 26, n°9, M21-27.

- [64] Norme NF X 43-057 Détermination d'un indice de fumées noires, AFNOR, Paris, 1977.
- [65] **Chow, J. C. J.** *Air Waste Manage. Assoc.* 1995, 45.
- [66] Norme AFNOR X43-021 Prélèvement sur filtre des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Appareillage automatique séquentiel, AFNOR, Paris, décembre 1984.
- [67] **Ralph, M. O.; Barrett, C. F.; Upton, S. L.** Further wind tunnel measurements of the inlet efficiency of the Environment SA type PPA60 suspended particle sampler, Warren Spring Laboratory Report (1983), Department of industry, Stevenage (UK).
- [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] **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.
- [71] **Allen, G. et al.** *J. Air Waste Manage. Assoc.* 1997, 47, 682- 689.
- [72] Directive 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant, *Journal Officiel des Communautés européennes* L163 du 29 juin 1999, p. 41-60.
- [73] Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe», *Journal Officiel de l'Union européenne* L152 du 11 juin 2008, p. 1-44.
- [74] **Chow JC, Fujita EM, Watson JG, Lu Z, Lawson DR, Ashbaugh** (1994), « Evaluation of filter-based aerosol measurements during the 1987 southern California air quality study », *Envir. Mon. and Assess.*30, 49-80.
- [75] **Witz S., Eden RW, Wadley MW, Dundwoody C., Papa R.P., Torre K.J,** (1990), « Rapid loss of particulate nitrate, chloride ad ammonium on quartz fiber filters during storage”, *Journal of the Air and waste Management Association*, 40 (1), 53-61.
- [76] Norme EN 14907 (2005), « Méthode de mesurage gravimétrique de référence pour la détermination de la fraction massique PM2.5 de matière particulaire en suspension dans l'air ambiant ».
- [77] Norme EN 12341 (1999), « Qualité de l'air – Détermination de la fraction PM10 de matière particulaire en suspension – Méthode de référence et procédure d'essai in situ pour démontrer l'équivalence à la référence de méthodes de mesurage ».
- [78] AFNOR (1984), Norme NF X 43-017 « Mesure de la concentration des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Méthode par absorption de rayons bêta », Paris.

- [79] **Allen G., Sioutas C., Koutrakis P, Reiss R., Lurmann F.W., Roberts P.T,** (1997), « Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas », *Journal of the Air and Waste Management Association*, 47, 682-689.
- [80] **Ayers G.P., Keywood M.D., Gras J.L,** (1999), « TEOM vs. manual gravimetric methods for determination of PM_{2.5} aerosol mass concentrations », *Atmospheric Environment*, 33, 3717-3721.
- [81] **LCSQA/INERIS/AIRPARIF,** (2001), « Etude comparative entre le TEOM1400 et différents préleveurs manuels sur filtre – Caractérisation physico-chimique de l'aérosol atmosphérique de Paris », *Rapport INERIS DRC-01- 27588-ERSA-OBI/449*.
- [82] **Favez O., Cachier H., Sciare J., Le Moullec Y.** (2007), « Characterization and contribution to PM_{2.5} of semivolatile aerosol in Paris (France)», *Atmospheric Environment*, 41, 7969-7976.
- [83] **Charron A., Harrisson R.M., Moorcroft S., Booker J,** (2004), « Quantitative interpretation of divergence between PM-10 and PM-2.5 mass measurement by TEOM and gravimetric (Partisol) instruments », *Atmospheric Environment*, 38, 415-423.
- [84] **Green D., Fuller G., Barratt B,** (2001), « Evaluation of TEOM “correction factors” for assessing the EU Stage1 limit values for PM₁₀ », *Atmospheric Environment*, 35, 2589-2593.
- [85] **Gehrig R., Hueglin C., Schwarzenbach B., Seitz T., Buchmann B,** (2003) « A new method to link PM₁₀ concentrations from automatic monitors to the manual gravimetric reference method according to EN12341 », *Atmospheric Environment*, 39, 2213-2223.
- [86] **J.P. Quisefit, A. Gaudichet,** « Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques », *ANALUSIS MAGAZINE*, Vol 26, N° 9, (1998).
- [87] **Person A & Tymen G.** (2005). Mesurage des particules en suspension dans l'air en relation avec la santé. *Pollution atmosphérique*, 271-285.
- [88] **Masclat P & Marchand N.** (2004). Méthodes de prélèvement et d'analyse des aérosols. *Techniques de l'Ingénieur* p 4-40.
- [89] *Techniques de l'ingénieur*, « *Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X* ». During SJVAQS/AUSPEX », *Atm Env*, Vol 30, pp 2079-2112, (1996).
- [90] **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 PM_{2.5} in four Chinese cities », *Environmental Science & Technology*, Vol 33, pp 4188-4193, (1999).
- [91] **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 PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations ».
- [92] **Norme ISO 9855,** « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectés sur des filtres », (1993).

- [93] U.S. EPA, National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).
- [94] OMS, (2006), « Air Quality Guidelines - Global Update 2005 - Particulate Matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide ».
- [95] California Air Resources Board (2002), « California Ambient Air Quality Standards for PM ».
- [96] Australian Government, Department of the Environment and Heritage (2004), « State of the Air: Community Summary 1991-2001 », site internet : <http://www.environment.gov.au/atmosphere/airquality/publications/standards.html> (National Standards for Criteria Air Pollutants).
- [97] The State of the Environment of China in 2008.
- [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, World Health Organization, Copen Hagen 1995.
- [100] J.M. Lopez, M.S. Callen et al, (2005), «Levels of selected metals in ambient air PM10 in an urban site of Zaragoza (Spain)», Environmental Research 99, pp 58 -67.
- [101] Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement - Rapport complet de 2007.
- [102] Le baromètre conjoncturel de la région de Bruxelles -CAPITALE – Juillet 2008.
- [103] N.OUCHER, mémoire de magistère, ENP, 2006.
- [104] A.BITOUCHE, « contribution à l'étude par classe granulométrique des aérosols 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] M.ALLOUCHE « Pollution de l'air par les particules fines en milieu urbain à alger », projet de fin d'étude, ENP, 2009.
- [107] AIRFOBEP, étude de la qualité de l'air « les particules sedimentables sur la zone de l'étang de Berre », février 2004.

Autres références

[23] **Marielle Court.** « Les particules fines, aussi visibles que dangereuses ». Le Figaro 08 novembre 2007.

[47] **Kerbachi.R,** Cours de pollution atmosphérique 5ème année, ENP, Alger, 2010.

ملخص:

تتمحور هذه الدراسة حول تحديد مستويات تلوث الهواء بموجب PM-10، PM-7، PM-3، و PM-1 في موقع حضري كثيف في الجزائر (بوزريعة). تم أخذ عينة من الجزيئات عن طريق توتر قوي HVS-PM-10.

في هذا الموقع، يقدر المحتوى اليومي المتوسط ل PM-10 بـ 77,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. المحتويات في PM-3، PM-7 و PM-1 تقدر على التوالي : 50,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ و 49,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ و 20,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. حوالي 64% من PM-10 مكونة من جزيئات نخروبية PM-3.

تظهر الدراسة علاوة على ذلك، أن الجزيئات المدروسة تتبع توزيعا مميزا لوسط حضري.

من بين المعادن الثقيلة المقترنة بـ PM-10، الرصاص الناتج عن حركة المرور الذي يسجل القيم الأكثر ارتفاعا.

نقيس محتوى متوسط بحوالي 0,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ الموافقة لفئة كتلية تقدر بـ 0,32%، هذه الفئة تقدر بأكثر من 0,33% من كتلة PM-3 و 0,29% من PM-1، مما يسمح لهذا العنصر من أن يتواجد في الحويصلات الرئوية.

محتويات الحديد هي النحاس، الناتجة بلا شك عن التآكل تمثل المحتويات المتوسطة و المقدره

بـ: 0,258 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ و 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ على التوالي.

غير أنه من الضروري تحقيق خاصيات التقليل من انبعاث الغبار، من أجل ضمان صحة السكان الأكثر عرضة، و البيئة بأكملها.

الكلمات الجوهرية: نوعية الهواء، موقع حضري، معادن ثقيلة، الجزائر العاصمة، PM-10

Résumé :

La présente étude porte sur la détermination des niveaux de pollution de l'air par les PM-10, PM-7, PM-3 et PM-1 en un site urbain dense au sud ouest d'Alger (Bouzareah). 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 77,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs en PM-7, PM-3 et PM-1 s'élèvent respectivement à 50,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 49,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 20,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Environ 64 % des PM-10 sont constitués de particules alvéolaires, les PM-3.

L'étude montre par ailleurs que les particules étudiées suivent une distribution caractéristique d'un milieu urbain.

Parmi les métaux lourds associés aux PM-10, le plomb issu du trafic routier accuse les valeurs les plus élevées. On y mesure une teneur moyenne d'environ 0,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondant à une fraction massique de l'ordre de 0,32 %. cette fraction s'élève respectivement à plus 0,33 % de la masse des PM-3 et 0,29 % des PM-1, ce qui permet à cet élément de se retrouver dans les alvéoles pulmonaires.

Les teneurs du fer et le cuivre, qui résultent certainement de l'érosion représentent respectivement des teneurs moyennes de 0,258 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 0,250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Néanmoins, les perspectives de réduction des émissions de poussières demeurent indispensables à réaliser afin de préserver la santé des populations les plus exposées, et de l'environnement sous toutes ses coutures.

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

Abstract:

This study focuses on determining the levels of air pollution by PM-10 PM-7 PM-3 PM-1 by a dense urban site in the west south of Algiers (Bouzareah). The particulate sampling is performed by a high volume sampler, the HVS-PM-10. In this site, the daily average concentration of PM-10, amounts to. The levels of PM-7 PM-3 PM-1 are respectively 50,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 49,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 20,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. About 64% of PM-10 particles are composed of cellular, PM-3.

The study also shows that the particles studied follow a characteristic pattern of an urban Among the heavy metals associated with PM10, is the lead from road traffic accuses the highest values. It measures an average grade of about 0.27 g/m^3 corresponding to a mass fraction of around 0.32%. This fraction rises to over 0.33% respectively of the total PM-3 and 0.29% of the PM-1, which allows this element to be found in the alveoli.

The levels of iron is copper, resulting in erosion certainly represent average levels of 0,258 ng/m^3 and 0,25 ng/m^3 .

Nevertheless, the prospects for reducing dust emissions are still essential to be done to preserve the health of populations most at risk, and the environment in all the seams

Key words: *air quality, urban site, heavy metals, Algiers, PM-10.*