



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

PROJET DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR
D'ÉTAT EN GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Présenté par : *M^r DRIF Seif Eddine*

THÈME :

Pollution de l'air par les particules fines en milieu semi-urbain à Alger

Soutenu le : 26/06/2008 devant le jury suivant :

Présidente :	M ^{me} N.BELHANECHÉ	Professeur à l'ENP
Promoteur :	M ^r R.KERBACHI	Professeur à l'ENP
Examineurs :	M ^r Y.KERCHICHE	Chargé de cours à l'université de Médéa
	M ^r A.CHERGUI	Chargé de cours à l'ENP

PROMOTION 2008

**Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement
ENP.10, Avenue Hassen-Badi, El Harrach, Al**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

لله الحمد و الشكر أولا و آخرا و أبدا، فله الفضل، كل الفضل، في توفيقى لاكتساب ما استطعت من العلم و الوصول إلى ما أنا عليه، راجين منه أن ينفعنا بما علمنا و أن يزيدنا علما.

إلى من رباني على خلق الإسلام و طاعة الله و رسوله و توفي على ذلك: "أبي الغالي"، "رحمه الله و أسكنه فسيح جنانه".

إلى من حملتني وهنا على وهن، وسهرت و ربت و علمت، و كانت و لا تزال بصيرتي للإسلام: "أمي الحبيبة"

إلى من نشأت و تربيت معهم و كانوا عوناً لي في دين أو دنيا، إخوتي الأعمام: خلدون، حنان، سامي، سناء، خولة، مروان، الياس و شعيب دون أن أنسى مبروك، عزيز و الكتكوتة "و جد".

إلى عماتي اللتان كانتا كأمين لي: شريفة و لويزة، وكذا أولادهم صغيرا و كبيرا.

إلى أعمام أخوال في الدنيا، دون نسيان خالتي عقيلة "رحمها الله".

إلى كل أفراد عائلتي: "ظريف" و "خليفي".

ولا أنسى جميع الأصدقاء و الأحبة، خاصة: عليوة، طارق،

بومدين، حسام، عبد العالي، فيصل، سمير، ناصر...

Remerciements

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

Ma reconnaissance va à l'égard du Pr. N.BELHANACHE, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciement vont à : Mr. A.CHERGUI et Mr. Y.KERCHICHE, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi à :

Tout le personnel du Centre de Développement d'Energie Renouvelable, en particulier Melle AZIZA.

Je tiens également à remercier mes amis et camarades de promotion, Houcine Hamza, Yacine, Karim, Raouf, Wassila, Hassiba, Thanina et Kahina pour leur sincère amitié et leur précieux soutien, sans oublier Mehdi, Leila et Abderrahmane.

J'adresse mes plus vifs remerciements à toute l'équipe du laboratoire de génie de l'environnement à l'ENP.

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

SOMMAIRE

Sommaire :

I-	Introduction.....	1
II-	Généralités sur la pollution par les particules.....	4
	1. Définition.....	5
	A. Composition naturelle de l'air.....	5
	B. L'air pur.....	5
	C. L'air pollué.....	6
	2. Sources des particules.....	8
	A. Les sources naturelles.....	8
	B. Les sources anthropogéniques.....	10
	3. Propriétés des particules.....	14
	A. Dimension et granulométrie des particules.....	14
	B. Formation des particules.....	16
	C. Composition chimique des particules	18
	D. Impact des particules sur le climat.....	19
	4. L'influence des facteurs météorologiques sur la diffusion des particules.....	20
III-	Effets des particules.....	25
	1. Effets sur la santé humaine.....	26
	2. Effets sur les animaux.....	29
	3. Effets sur la végétation.....	30
	4. Effets des particules solides sur les matériaux.....	30
	5. Effets sur la visibilité.....	32
IV-	Techniques et méthodes d'analyse des particules.....	33
	1. Echantillonnage de l'air.....	34
	A. Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique.....	35
	B. Prélèvement avec coupure granulométrique.....	37
	C. Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	38
	2. Les filtres et membranes de rétention	39

3.	L'analyse physique.....	40
A.	Détermination de la masse des particules.....	40
B.	Détermination du nombre des particules.....	41
4.	L'analyse chimique.....	42
A.	Analyse de la matière organique.....	43
B.	Analyse des éléments inorganiques et des métaux.....	44
C.	Analyse des ions	45
V-	Méthodologie.....	46
1.	Site de prélèvement.....	47
2.	Mode de prélèvement.....	48
3.	Traitement et analyse des particules	52
VI-	Résultats et interprétation.....	54
1.	Etude de la répartition granulométrique des particules.....	55
A.	Etude des particules respirables et leur relation avec les PM-10.....	55
B.	Corrélation entre PM-1, PM-3 et PM-10.....	60
C.	Ampleur de pollution et étude comparative.....	62
2.	Etudes des métaux lourds associées.....	66
VII-	Conclusion.....	73
VIII-	Références.....	76

Liste des figures

Figure N°1 : Le classement des particules selon leur granulométrie	15
Figure N°2 : Différents processus de formations des particules.	17
Figure N° 3 : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille.	18
Figure N° 4 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne.....	27
Figure N°5 : Formes de particule.....	41
Figure N°6 : localisation du site de prélèvement.....	47
Figure N°7 : autre photo du site de prélèvement.....	48
Figure N°8 : échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 (High volume sampler) de marque « Andersen ».....	49
Figure N°9 : Schéma du principe de collecte des PM – 10 par l'échantillonneur HVS PM–10.....	50
Figure N°10 : Etage du cascadeur d'Anderson et classes granulométrie.....	50
Figure N°11 : la tête de HVS PM-10.....	51
Figure N°12 : Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.....	52
Figure N°13 : Photo du grand filtre après prélèvement.....	52
Figure N°14 : Evolution journalière des teneurs atmosphériques en particules inhalable PM-10.....	56
Figure N°15 : Evolution Répartition journalière de la pollution par les particules fines en fonction de leur classe granulométrique.....	58

Figure N°17 : Répartition massique des PM-10 par classe granulométrique.....	59
Figure N°16 : Teneur moyenne des particules fines selon leur taille.....	59
Figure N°18 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-3....	60
Figure N°19 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-3.....	61
Figure N°20 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM (3-10) et en PM-3.....	61
Figure N°21 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cd	66
Figure N°22 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cu	67
Figure N°23 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Mn	67
Figure N°24 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Fe	68
Figure N°25 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10.....	69
Figure N°26 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.....	69
Figure N°27 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-1.....	70
Figure N°28 : répartition massique en % des métaux lourds sur les trois classes granulométrique.....	71
Figure N°29 : Evolution de teneur de fer en fonction des teneurs en PM-10.....	72

Liste des tableaux

Tableau n°1 : Production des particules d'origine naturelle [5].	9
Tableau n° 2 : Taux d'émission de particules anthropiques [18].	13
Tableau N°3 : Dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux	31
Tableau N°4 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-10.....	55
Tableau N°5 : Caractérisation des différentes classes granulométriques.....	57
Tableau N°6 : Normes et valeurs guide régissant les PM-10.....	63
Tableau n°7 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurée dans certaine villes.....	64
Tableau N°8 : comparaison des teneurs en PM-i mesurées en différentes sites à Alger.....	65
Tableau N°9 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques moyennes des métaux lourds étudiés.....	86
Tableau N°10 : Comparaison des teneurs atmosphériques en métaux lourds mesurés dans certaines grandes villes.....	72

Chapitre I :
INTRODUCTION

INTRODUCTION

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est un type de pollution défini par une altération de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique ou écotoxique .

On compte aujourd'hui des dizaines de milliers de molécules différentes, polluants avérés ou suspectés qui, pour beaucoup, agissent en synergie entre eux et avec d'autres paramètres (UV solaire, ozone, humidité de l'air, acides, etc.). Les effets de ces synergies sont encore mal connus.

Le développement industriel rapide provoque une augmentation de la pollution atmosphérique, en particulier dans les grandes agglomérations.

La pollution peut être locale (voitures, transport aérien, usines, etc.) ou globale (augmentation de l'effet de serre due au CO₂). Elle peut aussi être ponctuelle dans le temps ou chronique.

Lorsqu'on parle de particules fines, on distingue communément les particules sédimentables et les particules en suspension. On considère généralement que les poussières du premier type 'sédimentables' sont dommageables pour l'esthétique urbaine, la santé des végétaux via les phénomènes d'accumulation par dépôt sur le sol ou les cours d'eau, alors que l'effet des particules en suspension sur la qualité de l'air et la santé publique est plus direct.

Les particules en suspension dans l'air, encore appelées aérosols, sont constituées de substances solides et/ou liquides, présentant une vitesse de chute négligeable. Minérales ou organiques, composées de matières vivantes (pollens...) ou non, grosses ou fines, les particules en suspension constituent un ensemble extrêmement hétérogène de polluants dont la taille varie de quelques dixièmes de nanomètres à une centaine de micromètres.

Les particules de l'air sont généralement divisées en :

grosses particules, d'un diamètre supérieur à 10 micromètres, non dangereuses pour la santé

particules de diamètre inférieur à 10 micromètres (PM-10), qui pénètrent dans les poumons

particules fines de diamètre inférieur à 2,5 micromètres (PM-2.5)

La toxicité des particules en suspension est essentiellement due aux particules de diamètre inférieur à 10µm, les plus grosses étant arrêtées puis éliminées au niveau du nez ou des voies respiratoires supérieures.

Il est maintenant établi que ce sont les particules les plus fines (diamètre inférieur à 2,5 micromètres) émises essentiellement par les moteurs diesel qui atteignent en plus grand nombre les alvéoles des poumons, et causent le plus de dommages pour la santé.

Le poids de ces particules en suspension et leur taille, de l'ordre du micromètre à la centaine de micromètres de diamètre, leur permettent de se diffuser au gré des vents. Une fois émises, elles peuvent rester en suspension pendant des heures et même des jours. Elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons des animaux, et ce d'autant plus que leur taille est réduite. Dépendant de leur constitution (mélange comprenant plusieurs éléments), de leur concentration et des durées d'exposition, les particules peuvent causer des allergies, des difficultés respiratoires ou encore des lésions pouvant entraîner des cancers dans certains cas.

La pluie en lessivant l'atmosphère ramène de nombreux polluants au sol. Mais une partie d'entre eux, pourra, une fois déshydratée, repartir dans l'air. Certains polluants plus légers que l'eau ou liposolubles sont provisoirement fixés par les océans, dans le biofilm, mais ils peuvent repasser dans le compartiment atmosphérique par évaporation ou via les embruns emportés par le vent à des dizaines voire des centaines de kilomètres lors des tempêtes.

Une vaste gamme de manifestations sanitaires, à court ou long terme, est associée aux concentrations des particules dans les études épidémiologiques.

Le rôle des particules en suspension a été montré dans le cas de certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, des affections respiratoires chroniques (notamment la bronchite chronique obstructive), le déclenchement de crises d'asthme, l'altération du débit ventilatoire et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire.

Au niveau environnemental, les métaux toxiques, de manière générale, s'accumulent dans les organismes vivants et ont tendance à retarder la croissance des espèces et à induire une contamination dans la chaîne alimentaire.

Les substances les plus dangereuses sont : le cadmium, le mercure, et le plomb. Les principales sources d'émission proviennent de la combustion (chaudières au fioul, charbon, usine d'incinération de déchets ménagers ou dangereux...) ou du procédé industriel (verrerie, cristallerie, sidérurgie...).

La connaissance de ces émissions est souvent basée sur des mesures ponctuelles ou des estimations. Elle n'est donc pas forcément exhaustive, ni précise.

Ainsi et au vu de ces caractéristiques et de son impact sur la santé, l'étude de la pollution de l'air par les particules fines constitue de nos jours une priorité et un volet important dans la maîtrise de la qualité de l'air.

C'est dans ce contexte, et en continuité des travaux antérieurs effectués sur la pollution par les particules fines [1,2] au sein du laboratoire Sciences et Techniques de l'Environnement de l'ENP, que nous nous proposons dans ce travail d'étudier par classe granulométrique les niveaux de pollution de l'air par les particules fines atteints à Alger en un site semi urbain à faible densité de population et qui n'est pas exposé directement aux émissions du trafic routier.

Chapitre II :
GENERALITES SUR
LA POLLUTION DE
L'AIR PAR LES
PARTICULES FINES

II- GENERALITES SUR LA POLLUTION PAR LES PARTICULES :

1. Définitions :

A. Composition naturelle de l'air :

L'atmosphère naturelle est constituée, de manière permanente et on tous lieux à la surface du sol, de gaz en même proportions. La composition naturelle de l'air peut se modifier seulement dans des lieux où se produisent des décompositions de substance au sol ou des émanations du sous-sol, surtout dans les terrains volcaniques et marécageux [3].

Sur les hauteurs se modifie seulement la densité de l'air, les quantités de gaz à l'unité de volume d'air et les proportions de ceux-ci restent constantes. De même, en fonction du temps et de l'espace, il existe des différences de composition seulement en ce qui concerne la vapeur d'eau, qui se trouve d'habitude en proportion de 1—3%. Les gaz entrant dans la composition naturelle de l'air se maintiennent à une concentration constante. Cette composition a les pourcentages suivants :

Azote 78.09% ; oxygène 20.94% ; argon 0.93% ; gaz carbonique 0.03% ; néon 0.0018% ; hélium 0.0005% ; méthane 0.0001% ; krypton 0.0001% ; monoxyde d'azote 0.00005% ; hydrogène 0.00005% ; xénon 0.00008% ; bioxyde d'azote 0.000002% ; ozone 0.000001%—0.000004% [3].

B. L'air pur :

L'air est considéré comme pur lorsqu'il ne contient pas de substances autres que celles qui entrent dans sa composition naturelle. Dans les derniers temps, ce concept a subi des modifications, dues à certaines découvertes, qui ont montré le risque provoqué par l'augmentation de concentration de certains gaz de la composition naturelle de l'air (le gaz carbonique et l'ozone) qui peuvent constituer des indications de pollution d'origine artificielle.

L'air pur ayant une composition naturelle constante est une notion théorique : en réalité il est à peu près impossible de trouver un air absolument pur même dans les bassins les plus isolés de l'atmosphère comme sont la surface des océans ou des massifs forestiers. Même dans ces conditions et même à des altitudes de milliers de mètres, l'air contient des traces d'impuretés sous forme de particules ou de gaz [3].

La notion relative d'air pur signifie qu'il est dépourvu d'impuretés atteignant une concentration qui affecte d'une manière évidemment différente, en comparaison avec l'air naturel, tous les êtres vivants ou les objets [3].

C. L'air pollué :

La présence de substances étrangères dans la composition de l'air et les modifications de la concentration normale des gaz dans celui-ci se nomment, pollution de l'air. Le passage de l'air pur à l'air pollué se fait lentement, de telle sorte que la différence entre ces deux est au début peu sensible. Une différence très nette s'enregistre quand les substances de pollution arrivent à une concentration nocive pour l'organisme. A ce moment, leur concentration peut être de l'ordre de milligrammes ou même de centièmes de milligrammes par mètre cube d'air, parfois même quelque partie par million (ppm) et par centièmes de millions (ppcm) modifiant d'une manière à peine perceptible la composition en pourcentage de l'air.

L'air pollué se rencontre actuellement surtout à la partie inférieure de l'atmosphère terrestre, dans les grandes villes, dans les zones industrielles et leurs alentours. A cause des développements technique et industriel, la pollution de l'atmosphère tend à s'intensifier et à s'étendre à tous les lieux habités.

Plus encore, la pollution de l'air peut s'étendre à de grandes régions, comprendre des pays entiers et même la totalité de l'atmosphère terrestre.

Le terme de « pollution » se réfère à la présence, dans l'atmosphère libre extérieure, de poussières et de gaz. Du fait de l'ubiquité de la présence de l'air, la pollution extérieure affecte aussi l'air de l'intérieur des locaux.

Un secteur important de la question est la pollution de l'air intérieur dans les locaux où l'on travaille, avec des caractéristiques propres et des implications limitées à certaines professions. Le problème est traité dans le secteur d'hygiène et protection du travail.

L'air intérieur des habitations et des locaux publics ou collectifs souffre des modifications physico-chimiques, ayant comme cause la présence de l'homme et étant déterminées par le manque de ventilation. Le complexe de ces modifications se nomme viciation ou confinement. Parmi toutes ces modifications, la préoccupation particulière de notre époque est tournée vers la pollution produite par les poussières et gaz de l'air extérieur, surtout dans les localités industrielles très agglomérées. La pollution due aux aérosols liquides, théoriquement possible, a lieu pratiquement de façon insignifiante. La variété des termes employés dans ce

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

L'aérosol : ce mot désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Ce qui, dans l'air et dans les conditions normales, correspond à des particules de dimensions inférieures à $100\mu\text{m}$, les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms [4].

- Les fumées noires : il s'agit de particules carbonées de diamètre inférieur à $5\mu\text{m}$ [5].
- Les suies : sont des particules de carbone et d'imbrûlés, que produisent les combustibles qui ne brûlent pas complètement [5].
- Les poussières : on appelle ainsi les particules solides de diamètre inférieur à $75\mu\text{m}$, Les plus grosses retombent près de la source d'émission.
- Les brumes : la brume est un terme appliqué à un ensemble de gouttelettes dans un gaz. Ces particules ont des dimensions supérieures à $1\mu\text{m}$.
- Les cendres volantes : le mot « cendre » désigne le résidu solide subsistant après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes [4].
- Les particules : ce terme englobe en fait l'ensemble des définitions précédentes indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles [5].

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

- ✓ les particules totales en suspension (TSP) qui désignent les particules dont le diamètre est inférieur à $30\text{-}40\mu\text{m}$. La majeure partie de ces particules est captée par le segment extra thoracique du système respiratoire [5].
- ✓ les PM-10 (particulate matter < $10\mu\text{m}$) : ces particules représentent les particules inhalables dont le diamètre est inférieur à $10\mu\text{m}$.
- ✓ les PM-2.5 : ceux sont les particules les plus fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $2.5\mu\text{m}$.
- ✓ les PM-1 : sont des particules très fines de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ qui se forment par coagulation et agglomération des particules submicroniques.

2. Sources des particules :

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

- ✓ Les particules d'origine naturelle.
- ✓ Les particules d'origine anthropogénique.

A. Les particules d'origine naturelle :

Les phénomènes naturels sont à l'origine d'une importante émission de particules dans l'atmosphère. Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ $2\,096.10^6$ tonnes [7].

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

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

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

Les phénomènes naturels qui y contribuent le plus souvent sont :

- L'érosion éolienne qui se produit et s'accroît surtout sur les sols désertiques à faible couvert végétal ou dans les zones à climat sec ou à longue saison sèche [3,8].
- Les éruptions volcaniques qui peuvent représenter une importante source de particules dans l'air, dont certaines résultent de la transformation de polluants gazeux en particules, c'est le cas par exemple, des particules de sulfates issues du gaz SO_2 [10].
- Les embruns et les sels marins qui sous l'effet du vent et de la brise de mer sont dirigés vers les zones côtières. Ces aérosols donnent après évaporation de l'eau des particules salines essentiellement du $NaCl$.

➤ Les particules d'origine extra-terrestre qui représente de petites particules provenant de la décomposition des météorites et qui pénètrent de façon constante dans l'atmosphère terrestre. Ces particules sont riches en alcalins, alcalino-terreux et certains métaux lourds.

Comme autres formes de pollution, on peut signaler :

- Les particules d'origine végétale comme les grains de pollens qui sont émis par une grande diversité de plantes et qui peuvent être de puissants allergènes.
- Les feux spontanés des forêts qui sont principalement causés par la foudre et qui émettent des quantités non négligeables de particules [8].

Le tableau N°1 résume les sources et quantités émises des particules d'origine naturelle.

Tableau N°1 : Production des particules d'origine naturelle [7].

<i>Source d'émission</i>	<i>Quantité émise (Méga tonnes/an)</i>	<i>Pourcentage</i>
<i>Aérosol</i>	<i>908</i>	<i>43.32</i>
<i>Nitrate (issus du NO et NO₂)</i>	<i>390</i>	<i>18.61</i>
<i>Ammonium</i>	<i>245</i>	<i>11.69</i>
<i>Sulfates</i>	<i>182</i>	<i>8.68</i>
<i>Terpènes biogéniques</i>	<i>182</i>	<i>8.68</i>
<i>Erosion éolienne</i>	<i>182</i>	<i>8.68</i>
<i>Eruption volcanique</i>	<i>4</i>	<i>0.20</i>
<i>Feux spontanés</i>	<i>3</i>	<i>0.14</i>
<i>Total</i>	<i>2096</i>	<i>100</i>

B. Les particules d'origine anthropogénique :

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

En plus de ces émissions primaires, on note qu'une partie importante de la pollution particulaire résulte des réactions chimiques que subissent dans l'atmosphère les polluants gazeux tels que SO₂ et les NO_x, ce sont des émissions secondaires [7].

➤ La combustion :

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

On y retrouve particulièrement les particules d'imbrûlés riches en carbone organique et élémentaire, les métaux lourds et les composés organiques polycycliques aromatiques fixés sur les particules carbonées [11].

➤ Les process industriels :

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

➤ Industrie des matériaux de construction :

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

Les cimenteries sont les plus polluantes du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production. Ainsi pour obtenir une tonne de ciment, il faut environ 1.6 tonnes de matières premières [13].

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

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

➤ Incinération des déchets :

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

L'incinération de ces derniers engendre l'émission d'importantes quantités de particules. Ces particules contiennent entre autre des métaux lourds tels que : Fer, Zinc, Cadmium, ...etc. ainsi que divers oxydes métalliques dont l'importance toxicologique est considérable [13].

➤ Le trafic routier :

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

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

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

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

La pollution particulaire qui en résulte est constituée principalement par les composés suivants [14]:

- **Les suies** : qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés dénommées « fumés noires » qui sont dues à la combustion incomplète, et qui sont émis par les échappements des véhicules.
- **Les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP)** : qui sont présents dans le carburant lui même ou synthétisés lors de la combustion. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (susceptibles d'être cancérigènes).
- **Les métaux lourds** : parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain. Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0.15g à 0.4g/l il est rejeté presque totalement dans l'atmosphère des villes [15].

On estime qu'environ 16% de la production globale du plomb est destinée à être utilisé comme additif dans l'essence. Une voiture utilisant une essence à 0.15 g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/Km de particules dont la masse en plomb peut dépasser les 25% [7].

Il y a quelques années, les émissions de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10^6 Kg/an [17].

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

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

La pollution engendrée par le trafic routier provient aussi de l'usure des routes, des pneus, des plaquettes de frein et du moteur. Cette source de pollution n'est pas négligeable puisque l'inventaire effectué en France en 2000 montre qu'environ 42% des émissions des PM-10 sont du à l'usure des routes.

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

L'émission des particules d'origine anthropogénique s'élève globalement à 269.10^9 Kg/an, soit environ 12% de la quantité de particules d'origine naturelle [19]. Comme la montre le tableau N°2.

L'émission directe des particules anthropiques s'élève seulement au 1/3 du taux global, les 2/3 restants, résultent de l'émission secondaire, c'est -à dire la conversion gaz/particules [7].

Tableau N° 2 : Taux d'émission de particules anthropiques [20].

Source d'émission	Quantités émises [Kg/an]
<i>Emissions sous forme de particules</i>	84.10^9
<i>Particules formées des gaz</i>	
<i>polluants</i>	
• <i>Sulfates à partir de SO₂</i>	133.10^9
• <i>Nitrates à partir de NOX</i>	27.10^9
• <i>Particules photochimiques issues des hydrocarbures</i>	25.10^9
Total	296.10^9

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

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

3. Propriétés des particules :

A. Dimensions et granulométrie des particules

➤ Dimensions des particules

Comme la granulométrie d'une particule a une influence prépondérante sur son comportement, il est important de déterminer ses dimensions. Les théories physiques des particules sont établies, le plus souvent, pour des particules sphériques. Malheureusement, les particules dispersées dans l'air sont loin d'avoir cette forme idéale. C'est ainsi, qu'on a été amené à définir la notion de la particule sphérique équivalente. Soit en valeur, soit en comportement aérodynamique. En pollution atmosphérique, une particule est généralement caractérisée par son diamètre aérodynamique moyen :

- ✓ **Le diamètre aérodynamique** : C'est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute que la particule, et une masse spécifique égale à 1g/cm^3 .

➤ Granulométrie des particules :

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

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

- **Les grosses particules :**

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

Ce type de particule joue un rôle important dans la physico-chimie de l'atmosphère par leur action catalytique dans l'absorption et l'adsorption des polluants gazeux et elles contribuent de façon notable à la masse de l'aérosol atmosphérique. Elles disparaissent de l'air par la sédimentation. La portion ayant un diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ séjourne le plus de temps que celle ayant un diamètre supérieur à $10\mu\text{m}$ [32].

• **Les particules fines :**

Elles représentent les particules dont le diamètre varie entre 2.5 et 0.1 μm , cette dernière dimension représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement brownien dont les forces de viscosité deviennent supérieures à celle de la gravitation [3].

Ces particules se rencontrent partout dans l'atmosphère, mais leur concentration décroît très vite au-delà de la troposphère. Elles sont issues essentiellement de la conversion à partir de la phase gazeuse ou d'effluents de combustion, ou de vapeurs organiques ou métalliques condensées. Ces aérosols disparaissent de l'air, par les mécanismes de diffusion, lessivage et pluies [34].

La figure N°1 récapitule les types de particules selon leur granulométrie.

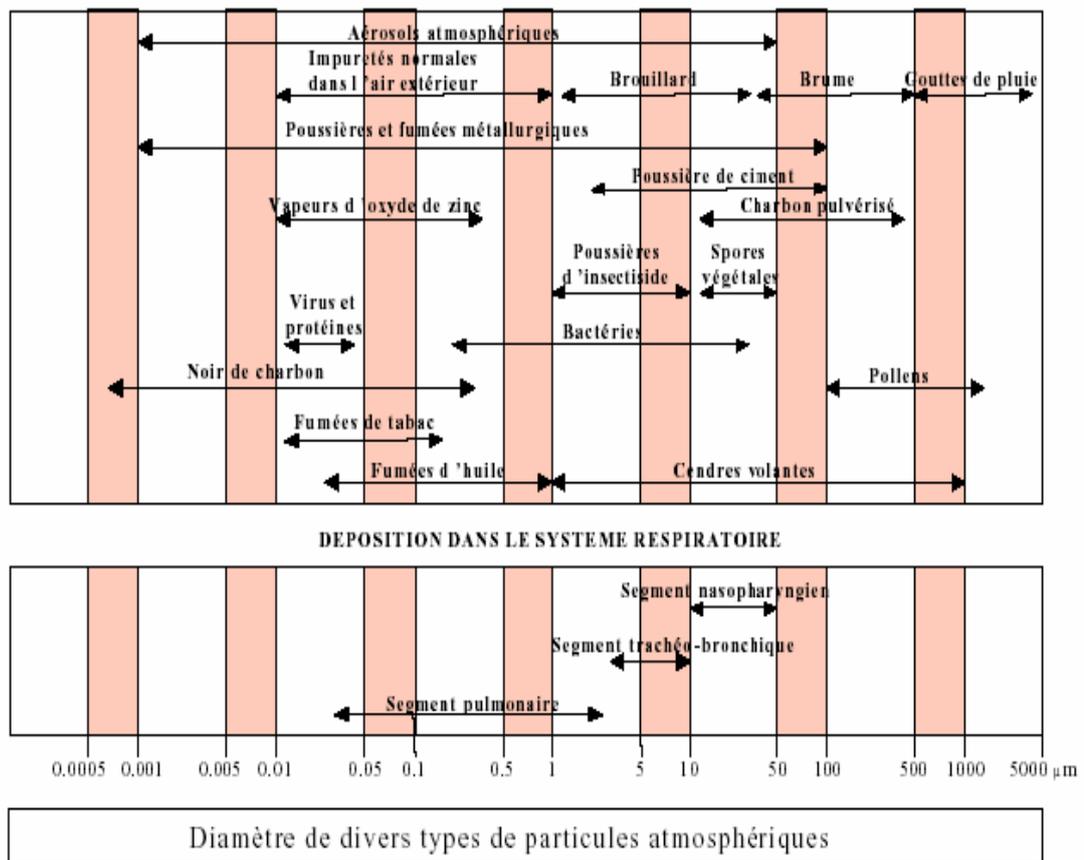


Figure N°1 : Le classement des particules selon leur granulométrie [35].

B. Formation des particules

Les particules PM-10 peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et les procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore des réactions chimiques entre gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ammonium). De part de leur finesse ces particules pénètrent dans l'appareil respiratoire. La catégorie des PM-10 est elle-même subdivisée en deux catégories selon que leur diamètre est supérieur ou inférieur à $2,5\mu\text{m}$:

- la fraction thoracique englobant les particules de diamètre compris entre $2,5$ et $10\mu\text{m}$.
- la fraction respirable ou alvéolaire de diamètre inférieur à $2,5\mu\text{m}$ (PM-2,5).

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

La formation des particules fines s'opère en deux étapes. D'abord, par la formation de petits agrégats par réaction chimique ou par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules, ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde étape. Ainsi les grosses particules disparaissent dans l'atmosphère par sédimentation et les particules submicroniques s'agglomèrent pour donner des particules de diamètre supérieur. Il ne reste alors en suspension dans l'air que les particules de diamètre inférieur à environ $30\mu\text{m}$ [18].

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

On distingue les particules primaires, qui ont été émises directement en tant que telles, et les particules secondaires, qui se sont formées dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux.

Les particules primaires anthropiques se forment lors des combustions ; ce sont avant tous des particules ultrafines et fines d'un diamètre inférieur à environ 0.3 µm (par exemple la suie).

Les particules qui se forment par abrasion ou qui s'élèvent dans l'air du fait de tourbillons sont en général plus grandes que 1 à 2 µm.

Les sources naturelles possibles sont le pollen, les embruns, l'érosion éolienne, et les volcans.

Les particules de grandeur moyenne (entre 0,1 et de 2,5 µm) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par conversion gaz particule à partir des précurseurs SO₂, NO_x, NH₃ et COV.

La figure N°2 illustre les différents processus de formation des particules.

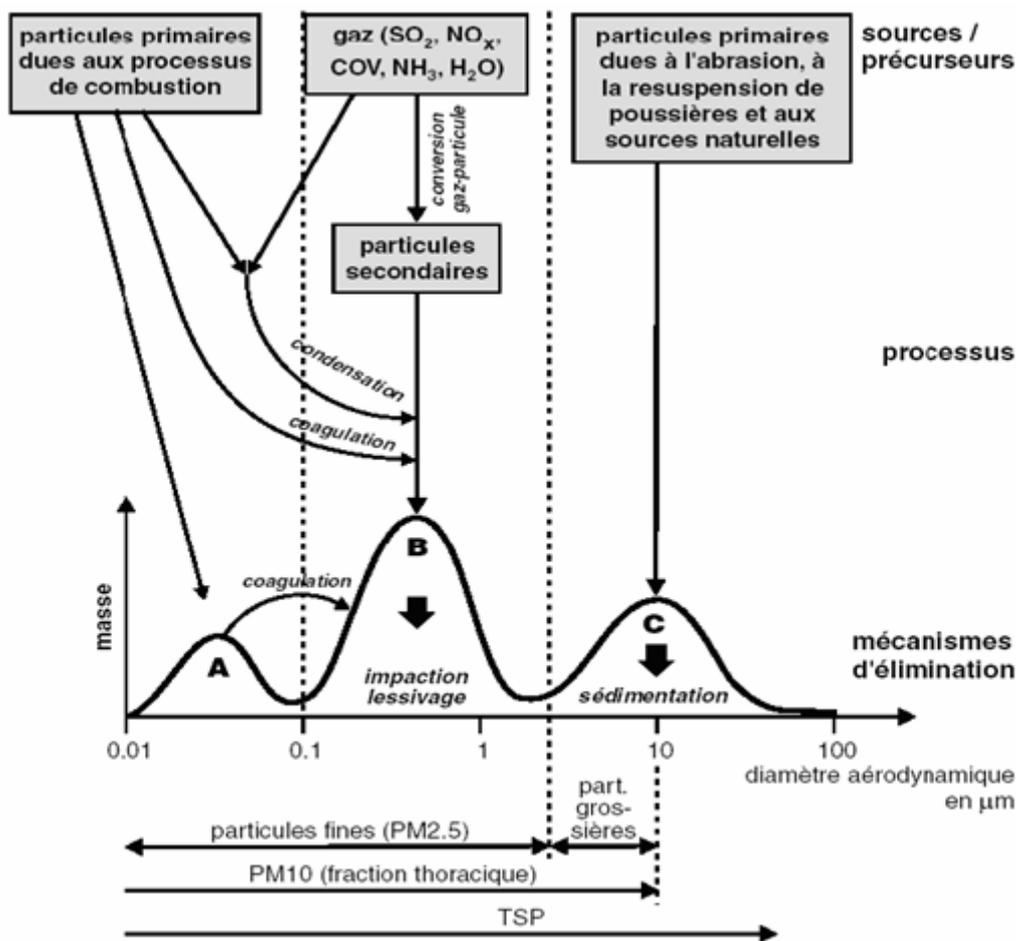


Figure N°2 : Différents processus de formations des particules [18].

C. Composition chimique des particules

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

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

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

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

L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante (Figure N°3) [34].

La fraction minérale soluble contient principalement les aérosols secondaires, sulfates et nitrates provenant de la conversion du SO₂ et NO₂ ainsi que les ions chlorures et ammonium.

La partie insoluble est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction carbonée est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et des débris de matériaux organiques largués par les activités humaines.

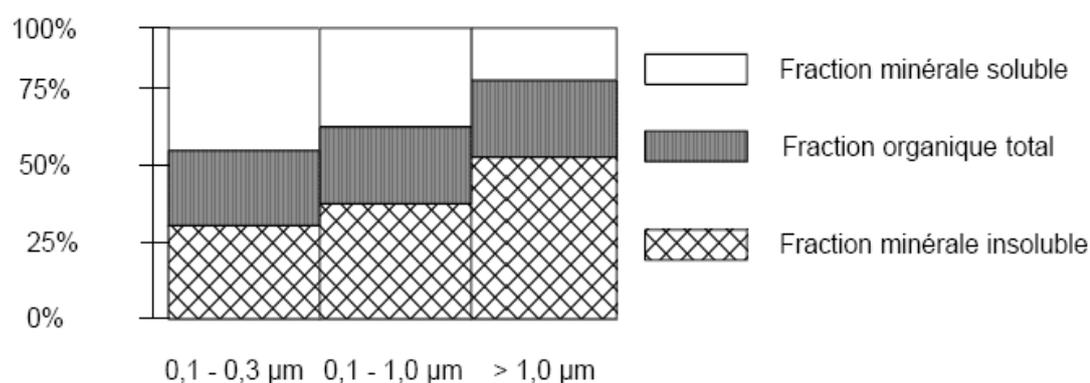


Figure N° 3 : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille.

Le carbone organique se retrouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbone [34].

On estime globalement que plus de 80% du carbone élémentaire et carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les PM-2,5. Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 μm contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles [39].

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

On peut trouver une partie organique formée de carbone, une part minérale (aluminosilicates...), des nitrates provenant de l'oxydation des oxydes d'azote, des sulfates provenant de l'oxydation du dioxyde de soufre, des cations et anions solubles (Na^+ , Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , NH_4^+ , Cl^- ...), des métaux.

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

D. Impact des particules sur le climat :

Les particules fines modifient le climat en :

- Changeant les propriétés radiatives des particules (effet direct).
- Modifiant la capacité à fixer l'eau atmosphérique (effet indirect).

Les particules modifient l'Albédo terrestre, par leur couleur. Un aérosol carboné se comporte comme un « corps noir » au sens de la thermodynamique, alors que les poussières terrigènes sont plutôt blanches et réfléchissent la lumière solaire. Par ailleurs, les composés présents dans ou à la surface de l'aérosol peuvent être solubles. Certains sont très solubles comme les sulfates ou les nitrates (composés hydrosolubles). D'autres sont moyennement solubles comme les acides organiques (composés hydrophiles). Enfin d'autres, comme les HAP, sont totalement insolubles (composés hydrophobes). Les premiers confèrent à l'aérosol un comportement de noyaux de condensation de nuages (CCN). En revanche les derniers, en ne captant pas l'eau atmosphérique, défavorisent la formation des nuages [21].

4. Influence des facteurs météorologiques sur la diffusion des particules :

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

- Soit à l'échelle « synoptique », échelle horizontale d'une centaine de kilomètres, relativement très faible en épaisseur, se présentant sous la forme d'une galette très aplatie dont le mouvement quasi-horizontale est décrit par l'étude du vent synoptique représenté sur les cartes météorologiques.
- Soit à l'échelle aérologique, échelle de quelques dizaines ou centaines de mètres au dessus du sol ou les courants ascendants thermiques et la turbulence due à la nature du sol et à son relief ont une grande importance pour la dispersion des panaches.

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

La turbulence atmosphérique peut avoir une origine mécanique ou une origine thermique. Dans le premier cas, elle est due principalement au passage du vent sur les aspérités du sol. Dans le second, elle dépend essentiellement de la répartition des températures à partir du sol en fonction de l'altitude. Les facteurs mécaniques et thermiques peuvent intervenir simultanément, les uns prédominant sur les autres suivant les circonstances.

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

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

A. Le vent :

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

Le mouvement général de l'air a pour origine les mouvements de l'air chaud de l'équateur qui s'élève et qui est remplacé par un courant d'air froid venant du pôle [22].

➤ Direction du vent :

La direction du vent au sol peut être différente de celle du vent synoptique par suite des effets dus au frottement du sol, au gradient thermique ou au relief [22].

➤ Vitesse du vent :

La vitesse du vent est d'autant plus grande que les variations de pression sont grandes donc que les distances entre les isobares sont faibles. Elle augmente généralement en hiver, étant donné que, durant cette période, les gradients horizontaux et verticaux de température sont plus élevés [22].

B. La température de l'air :

A la base du mouvement de l'air est la température qui a des valeurs différentes à la surface du sol due à des caractéristiques thermiques différentes et à des variations d'emmagasinement de la chaleur solaire. Alors que les différences de température sur de grandes surfaces déterminent la production des vents, celles qui se produisent sur des surfaces restreintes provoquent de petits courants horizontaux ou seulement un déplacement vertical. Le plus important phénomène dû à la température est la convection sur la verticale, qui représente l'ascension de l'air d'une couche inférieure de l'atmosphère voisine du sol, à la suite de son échauffement par le soleil. Ce phénomène a lieu à cause du gradient thermique de l'air en continue baisse avec l'altitude (approximativement de 1° par 100 m). La convection ascendante représente un des phénomènes les plus importants de l'autopurification ; dans ce courant sont entraînées, en même temps que l'air, les impuretés évacuées par différentes sources de pollution. De cette manière, le volume d'air dans lequel se réalise la dilution augmente [3].

C. La turbulence de l'air :

L'agitation et le mélange des différentes portions des masses d'air ayant des caractères différentes, sous forme de tourbillons qui s'interpénètrent, ont été nommés turbulence. Ce phénomène est le résultat de certains processus mécaniques complexes provoqués par des différences de température, mouvement et frottement. La diffusion et la dilution des polluants

dans la masse d'air se réalisent sous son influence d'autant plus rapidement que la turbulence est proportionnelle à la vitesse du vent, compte tenu de l'existence de constructions au sol, des différences de relief et de la capacité d'emménagement de la chaleur. La turbulence minimum se rencontre au dessus des grandes surfaces lisses et homogènes : mers, massifs forestiers, etc.

L'altitude jusqu'à la quelle est ressentie la turbulence varie entre 300 et 3000 m.

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

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

Le phénomène de diffusion turbulence maximum des impuretés se réalise au contact entre la masse de gaz évacuée par les cheminées et la masse d'air dans laquelle ceux-ci se déplacent. Les tourbillons de mélange sont d'autant plus grands que la vitesse du mouvement de l'air est plus grande [3].

D. Les précipitations :

La pluie, la neige et les autres formes de précipitations atmosphériques réalisent le lavage, l'absorbance et l'entraînement vers le sol des impuretés de l'air de façon d'autant plus marquée que la durée et l'intensité de ces précipitations sont plus grands. A cause de cela l'atmosphère peut être considérée comme pure après une période suffisamment longue de précipitations. D'après Willet [3], la pluie réalise le lavage de l'atmosphère, spécialement des gaz, et la neige, des impuretés solides. D'après Haagen-Smit les précipitations sont insuffisantes pour épurer l'atmosphère des particules plus petites que 2μ [3].

Grace au phénomène de lavage des impuretés, l'eau des précipitations (spécialement celle des commencements de ces précipitation) est utilisée pour déterminer le degré et la nature des polluants, les précipitations continuent à retenir les impuretés même d'après leur arrivée au sol par dissolution, absorption de (ou réaction avec) celles qui arrivent ultérieurement sur la surface humide du sol [3].

E. L'humidité :

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

Une humidité élevée favorise la formation du brouillard et la concentration des impuretés. Les oscillations inégales de température des particules de l'air par rapport à celles du reste de la masse d'air donnent lieu à des condensations de vapeurs sur ces particules qui servant des noyaux de condensation.

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

F. Les nuages :

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

Ces sortes de zones se rencontrent surtout dans les régions nordiques et montagneuses pendant les périodes froides de l'année. En revanche, les nuages en mouvement qui ne couvrent que partiellement une région peuvent entrainer les impuretés, réalisant ainsi une autopurification [3].

G. Les phénomènes macrométéorologiques :

L'importance des masses d'air pour l'autopurification a été constatée par l'analyse des lieux environnants où se sont produits les accidents collectifs mentionnés dans la littérature. Au début, on a constaté que ceux-ci ont coïncidé avec la superposition de phénomènes météorologiques défavorables : brouillard, inversion thermique et calme atmosphérique, durant plusieurs jours. Ultérieurement on a constaté que tous ces accidents ont eu lieu pendant certains phénomènes macrométéorologiques similaires : masse anticyclonique à pression atmosphérique élevée, absence de mouvement de l'air, conditions favorables pour la

production de l'inversion thermique et brouillard. Sur le globe il existe des zones où la fréquence et la durée des masses anticyclonique sont particulièrement grandes.

En général, cette masse d'air persiste au-dessus d'un territoire pendant quatre jours, mais parfois cette durée peut être seulement de quelques heures et d'autres fois des dizaines de jours. La durée des masses anticycloniques se prolonge davantage en automne et en hiver et se trouve habituellement réduite au printemps et en été [3].

Chapitre III :
EFFETS DES
PARTICULES

III- EFFETS DES PARTICULES :

Il est maintenant connu que la pollution atmosphérique peut être un facteur déterminant de la mortalité et de la morbidité chez l'homme.

Les chercheurs ont également pu prouver que la pollution atmosphérique cause des effets indésirables sur les animaux, la végétation, les biens matériels et le milieu atmosphérique lui-même.

1. Effets sur la santé humaine :

Le dioxyde de soufre et les matières particulaires ont été identifiés comme les principaux responsables des plus dramatiques épisodes de pollution survenus au cours du dernier siècle. Dans tous les cas, ces épisodes ont été associés à des conditions météorologiques extrêmement défavorables à la dispersion des contaminants atmosphériques.

Les particules fines peuvent se déposer et persister dans l'appareil respiratoire

La taille des particules détermine leur site de déposition dans l'appareil respiratoire et l'on peut ainsi déterminer trois régions de dépôt (figure N°4): les régions nasopharyngée et trachéobronchiale où le mécanisme de clairance est mucociliaire et l'élimination des particules rapide (en 24 h environ), la région alvéolaire où la clairance macrophagique est plus lente, la demi-vie des particules pouvant atteindre des mois. Il est admis que les grosses particules ($d > 5 \mu\text{m}$) s'arrêtent dans la région nasopharyngée, les particules de 1 à 5 μm dans la région trachéobronchiale, alors que les particules fines, inférieures à 1 μm , peuvent atteindre les régions bronchiolaire et alvéolaire et y persister [28]. Ceci est conforté par des études récentes [29,30] fondées sur l'analyse au microscope électronique de biopsies provenant de poumons humains, à Mexico (forte pollution particulaire, PM-10 : 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et Vancouver (faible pollution particulaire, PM-10 : 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces études montrent que les premières contiennent environ 10 fois plus de particules que les secondes, et qu'il s'agit à 96% de particules carbonées fines sans doute associées aux processus de combustion, dont le trafic automobile.

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

Cependant, les particules ultrafines se comportent de façon particulière dans la mesure où leur dépôt se fait à la fois essentiellement dans les régions nasopharyngée et alvéolaire. De plus, dans le poumon profond, leur élimination par le processus de clairance alvéolaire est perturbée. En effet, il semble qu'elles soient plus difficilement phagocytées que les particules fines par les macrophages alvéolaires, ce qui conduit à une persistance accrue et une interaction avec les cellules épithéliales [27].

Par ailleurs, la déposition particulaire dans les poumons est sensiblement plus marquée chez des malades atteints de pathologies obstructives telles que l'asthme et la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), elle est hétérogène selon les zones du poumon et la variabilité interindividuelle est très forte [31].

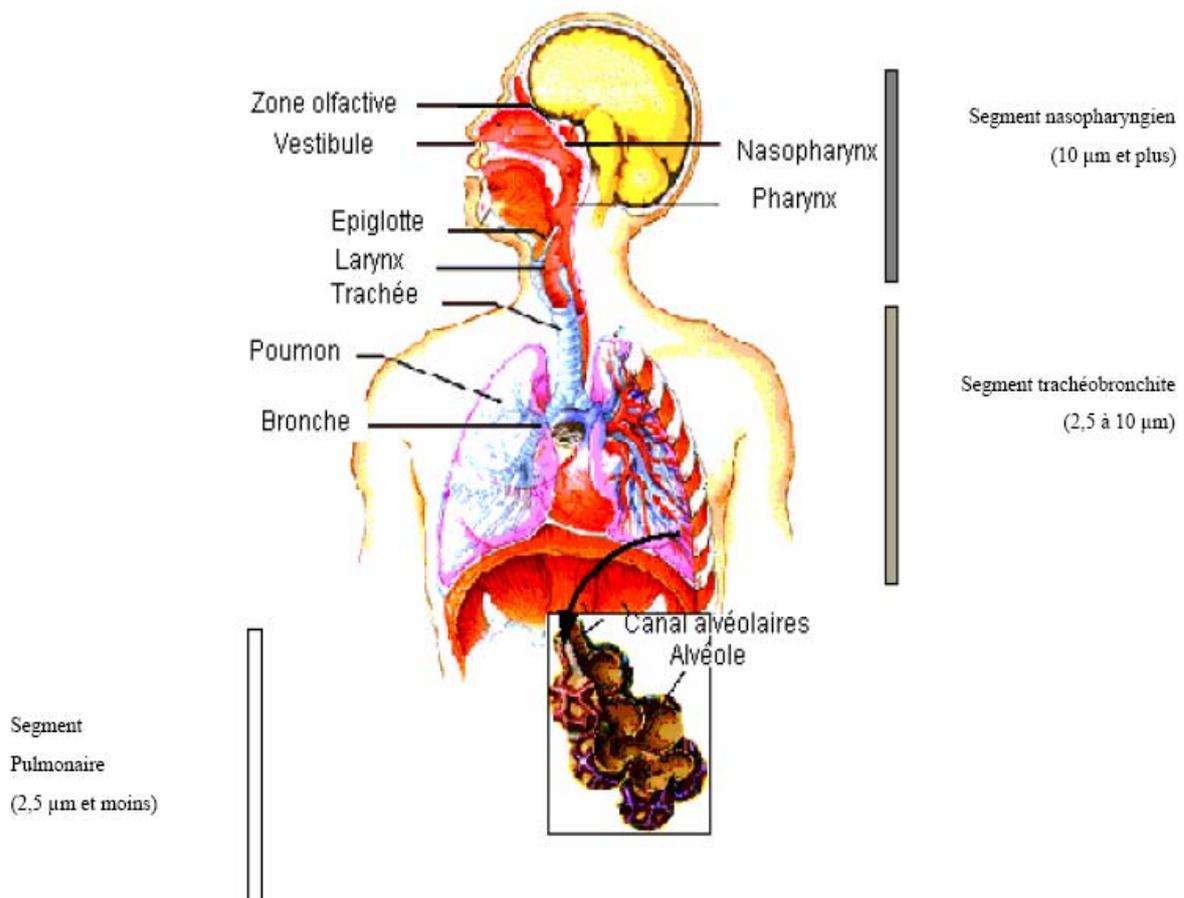


Figure N°4 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne [26].

Mode d'action et effets des contaminants sur l'organisme

Les contaminants atmosphériques peuvent pénétrer de diverses façons dans l'organisme humain : absorption par la peau, ingestion et inhalation. La réponse biologique de l'organisme humain dépend de plusieurs facteurs, comme la concentration ambiante et la durée d'exposition.

La respiration constitue le principal mode de pénétration des contaminants dans le corps humain. Il est donc normal que les organes du système respiratoire soient les plus exposés aux contaminants atmosphériques même si d'autres organes peuvent être affectés à la suite de leur pénétration dans le système respiratoire

Les contaminants qui pénètrent dans le système pulmonaire sous forme particulaire ou gazeuse sont toxiques en eux-mêmes ou inertes. Toutefois, les particules inertes servent souvent de support à divers toxiques dissous ou absorbés à la surface.

➤ Les particules

De façon générale, les particules supérieures à 10 μm de diamètre sont captées au niveau du système respiratoire supérieur (nez et pharynx) tandis que celles plus petites, de 2 ou 3 μm de diamètre, s'insinuent profondément, jusque dans les alvéoles pulmonaires.

En dépit de leur élimination du système respiratoire, certains contaminants peuvent se déposer dans des organes spécifiques par l'intermédiaire du système gastrointestinal ou du système sanguin. Ainsi, plusieurs des composés toxiques que l'on retrouve dans les particules fines ont déjà été reconnus comme des contaminants susceptibles d'affecter sérieusement certains organes spécifiques.

Le plomb peut causer l'anémie et des troubles du système nerveux. Il semble que l'exposition atmosphérique aux poussières de plomb ne présente pas de risques élevés pour la population adulte.

Les risques sont toutefois plus élevés pour les enfants, particulièrement le groupe des 0 à 4 ans, car ils sont souvent en contact avec les poussières du sol et leur système nerveux, en plein développement, est plus sensible que celui des adultes.

➤ Les gaz

Une faible partie seulement des gaz inhalés est filtrée par le nez. Si ces gaz sont irritants (SO₂, HCl, H₂S) et relativement solubles, ils sont absorbés dans les sécrétions aqueuses recouvrant le segment supérieur du système respiratoire. Il s'ensuit une irritation des cils vibratiles qui, si elle est répétée, peut entraîner des modifications des cellules (prolifération ou mutation). Ces gaz irritants affectent le segment pulmonaire lorsqu'ils sont absorbés sur des particules suffisamment fines pour atteindre les alvéoles. Ce mode d'action est souvent associé aux maladies respiratoires, notamment la bronchite chronique. Ces contaminants gazeux causent aussi des irritations des membranes du nez, des sinus nasaux ou de l'œil. Ce type d'effets caractérise l'Ozone et les nitrates de peracétyle.

Les gaz non irritants et insolubles qui parviennent aux alvéoles pulmonaires peuvent être absorbés par le sang et éventuellement transportés vers les organes vitaux où ils peuvent s'accumuler.

Pour sa part, le monoxyde de carbone a pour effet de limiter la capacité de transport de l'Oxygène par le sang dans les tissus cellulaires. Les concentrations urbaines de CO ne sont pas suffisamment élevées pour créer des effets aigus ou chroniques, mais elles peuvent être parfois suffisantes pour accentuer chez certains individus les maladies associées à une diminution de la capacité respiratoire.

L'interaction de divers contaminants a souvent pour effet d'augmenter la toxicité des contaminants pris isolément. On appelle cette interaction "effet de synergie".

L'exemple le plus connu d'effet synergétique est celui du dioxyde de soufre associé aux matières particulaires respirables.

2. Effets sur les animaux :

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

L'arsenic, le plomb et le sélénium sont toxiques pour les animaux. Ils se produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et du tube digestif. Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et modification du pH [35].

3. Effets sur la végétation :

Les végétaux sont sensibles aux contaminants atmosphériques et leurs réactions varient comme pour les humains et les animaux en fonction de la dose, de la fréquence et de la durée des expositions ainsi que de plusieurs autres facteurs internes ou externes. Les facteurs internes sont liés à la génétique et au stade de développement. Ainsi, la sensibilité à un contaminant varie non seulement entre les espèces, mais aussi entre les individus d'une même espèce. De plus, la sensibilité des plantes est généralement plus grande à des moments spécifiques de développement comme l'éclosion des bourgeons, la pousse des feuilles et la floraison. Les facteurs externes sont d'ordre climatique (ensoleillement, température, humidité), édaphiques (nature du sol, de l'eau et de la fertilité) et biotiques (parasites, maladies).

Les effets aigus et chroniques sont visibles. Ils se manifestent le plus souvent sous forme de chlorose (décoloration des feuilles à la suite d'une réduction de la fonction chlorophyllienne), de nécrose (destruction des cellules) ou de malformations. Les effets subtils sont invisibles. Ils affectent surtout la croissance, le rendement et la reproduction.

Les stomates, ces orifices minuscules que l'on retrouve sur l'épiderme des feuilles, jouent un rôle essentiel à la respiration et à la transpiration des tissus végétaux. C'est par les stomates que les contaminants gazeux pénètrent dans les organes de la feuille et causent des dommages à la végétation. Par ailleurs, les particules accumulées à la surface du feuillage peuvent affecter le fonctionnement des stomates et la photosynthèse.

Certaines plantes, surtout les mousses et les lichens, servent fréquemment d'indicateur biologique de la pollution de l'air dans les milieux urbains à cause de leur sensibilité reconnue au dioxyde de Soufre et aux particules [23].

4. Effets des particules solides sur les matériaux :

Si l'humidité, la température, le rayonnement solaire et le processus de gel et de dégel ont une action directe sur la dégradation des matériaux (façades, toitures, peintures, etc.), plusieurs contaminants jouent un rôle non négligeable. Les contaminants atmosphériques peuvent endommager les biens matériels de diverses façons :

Abrasion : les grosses particules solides peuvent avoir une action abrasive sur les matériaux lorsqu'elles voyagent dans l'air à une grande vitesse.

Attaque chimique : plusieurs contaminants peuvent réagir directement sur les matériaux et les détériorer (exemple du décapage de surfaces métalliques par des brouillards acides).

Attaque chimique indirecte : certains matériaux absorbent les contaminants et sont endommagés lorsque ceux-ci subissent une transformation chimique. Le dioxyde de soufre absorbé par le cuir est transformé en acide sulfurique, lequel détériore le cuir.

Corrosion électrochimique : la plupart des dommages aux matériaux ferreux sont causés par ce processus. La différence de potentiel entre des cellules positives ou négatives est la force qui régit l'action corrosive. Celle-ci est absente lorsque la surface est propre et sèche. Par contre, la corrosion surviendra lorsque la surface sera humide et contaminée, la conductivité électrique étant alors activée.

Les dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux sont indiqués dans le tableau N°3. Pour donner une idée de l'ampleur que peuvent prendre ces problèmes, il suffit de mentionner qu'à Athènes, la frise du Parthénon a subi davantage de détériorations causées par la pollution des 100 dernières années qu'au cours des deux premiers millénaires de son existence. Les oxydes de soufre réagissent sur le calcaire (CaCO_3) en présence d'humidité et forment du sulfate de calcium (CaSO_4) et du gypse (sulfate de calcium hydraté), lesquels sont solubles dans l'eau.

Tableau N°3 : Dommages causés par la pollution atmosphérique à divers matériaux [41].

<i>Matériaux</i>	<i>Type de dommage</i>	<i>Principaux contaminants</i>	<i>Autres facteurs environnementaux</i>
<i>Métaux</i>	<i>Détérioration des surfaces, corrosion, ternissure</i>	<i>Dioxyde de soufre (SO₂), gaz acides</i>	<i>Humidité, température</i>
<i>Matériaux des édifices</i>	<i>Décoloration, dissolution</i>	<i>SO₂, gaz acides, particules adhérentes</i>	<i>Humidité, gel</i>
<i>Peinture</i>	<i>Décoloration</i>	<i>SO₂, acide sulfurique (H₂S), particules adhérentes</i>	<i>Humidité</i>
<i>Cuir</i>	<i>Affaiblissement des surfaces</i>	<i>SO₂, gaz acides</i>	<i>Usure</i>
<i>Papier</i>	<i>Friabilité</i>	<i>SO₂, gaz acides</i>	<i>Ensoleillement</i>
<i>Textiles</i>	<i>Réduction de l'extensibilité, souillure</i>	<i>SO₂, gaz acides</i>	<i>Ensoleillement, humidité</i>
<i>Teinture</i>	<i>Atténuation</i>	<i>Dioxyde d'Azote (NO₂), oxydants, SO₂</i>	<i>Ensoleillement, humidité</i>
<i>Caoutchouc</i>	<i>Fendillement</i>	<i>Ozone (O₃) et autres oxydants</i>	<i>Ensoleillement</i>
<i>Céramique</i>	<i>Changement d'apparence de l'émail</i>	<i>Acide fluorhydrique (HF), gaz acides</i>	<i>Humidité</i>
<i>Verre</i>	<i>Perte de transparence</i>	<i>HF, gaz acides</i>	<i>Humidité</i>

5. Effet sur la visibilité :

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

La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière. L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines (PM-2.5), est fonction de la taille des particules ; elle est donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique des particules et leur processus de formation [24].

Les sulfates et les nitrates, composantes importantes des particules PM-2.5 dispersent très efficacement la lumière et contribuent fortement à la réduction de la visibilité. L'effet de l'humidité est aussi important : plus elle augmente, plus la capacité des particules à disperser la lumière augmente [24].

Chapitre IV :
TECHNIQUES ET
METHODES
D'ANALYSE DES
PARTICULES

IV - LES PRINCIPALES TECHNIQUES ET METHODES D'ANALYSE DES PARTICULES FINES :

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

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

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

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

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

1. Echantillonnage de l'air :

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

Selon les recommandations de la Commission of European Communities Environmental Institute, concernant la surveillance des émissions de particules fines, les prélèvements doivent tenir compte de certains critères qui varient selon le type de site à étudier (site urbain, trafic routier, site industriel, etc.) [37].

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

Quel que soit le mode d'échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n'est égal à 100% que pour les tailles approximativement inférieures à 3 μ m. Au-delà de cette dimension, l'efficacité de la collecte des divers dispositifs est influencée, aussi bien, par les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent, que par les conditions de prélèvement telles que le débit d'aspiration, la position et les conceptions du dispositif de captage.

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

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

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

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

- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique : ce sont des méthodes dites intégrales qui collectent ou mesurent les aérosols sans dimension
- Les prélèvements avec coupure granulométrique.
- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique, ou méthodes discrètes qui collectent ou mesurent les aérosols sélectivement, en fonction de leur dimension [42].

A. Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique :

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

On distingue, dans cette catégorie, selon la taille et la nature des particules, trois modes de prélèvement [43].

- Les Fumées Noires :

Cette méthode est utilisée en principe, pour la collecte des particules fines de tailles inférieures à $5\mu\text{m}$ qui sont collectées avec une grande efficacité. L'échantillonnage est pratiqué à débit relativement faible (environ 80l/h).

L'analyse ultérieure du filtre est effectuée par réflectométrie. Celle-ci consiste à mesurer le degré de noircissement du filtre collecteur par référence à une échelle de gris étalons. Une courbe de calibration fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt et la masse des particules déposées.

Cette méthode est généralement utilisée pour les prélèvements des particules issues de la combustion du fuel et du charbon et pour les suies émises par le trafic routier diesel.

La durée de prélèvement est généralement de 2 heures. L'indice de fumée noire est donné en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les mesures de fumées noires bénéficient en Occident d'un historique important. De nos jours cette technique est de plus en plus remplacée par celle des PM-10 qui est plus représentative [25].

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

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

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

Les particules fixées sur le filtre peuvent servir d'échantillons pour d'autres analyses [44].

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

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

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

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

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

Les modes de prélèvement à débit moyen et par HVS sont largement utilisées de nos jours [45].

B. Prélèvement avec coupure granulométrique :

- Mesure des PM-10 :

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

En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur à 10 μm . Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inhalables, c'est-à-dire, la fraction trachéobronchique et alvéolaire.

L'appareil le plus connu de nos jours et qui est accepté comme référence, est le HVS-PM-10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules $<10 \mu\text{m}$ [38].

En plus de la technique HVS-PM-10 qui demeure une méthode manuelle (Changement manuel du filtre collecteur à intervalles de temps réguliers), il existe deux autres méthodes automatisées qui de nos jours équipent la majorité des réseaux de surveillance. Il s'agit de la jauge bêta et de l'appareil TEOM [38].

- La jauge bêta :

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

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

La masse des particules déposées sur le filtre est d'autant plus grande que le nombre d'électrons qui traversent le filtre est faible. La mesure consiste à calculer la variation d'absorption entre le filtre vierge et celui chargé du dépôt de particule [40].

L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules déposées sur filtre. Par cette méthode, les particules collectées ne peuvent pas faire l'objet d'analyse au laboratoire. Dans cette méthode, des erreurs peuvent se produire, si la taille des particules est importante, si le dépôt n'est pas homogène ou si l'aérosol est composé de particules de poids atomiques élevés [40].

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

Cette méthode repose sur le principe suivant : Un cristal piézo-électrique, quand il est soumis à une pression, développe des charges électriques. Le quartz, qui est un corps piézo-électrique, vibre à une fréquence propre très précise qui peut être mesurée avec une grande précision s'il est placé dans un circuit oscillant approprié. Si l'on dépose une masse supplémentaire telle que des aérosols, sur la surface active du cristal, on observe une décroissance de la fréquence d'oscillation en fonction de la masse ajoutée. Cette propriété a été mise en œuvre dans de nombreux dispositifs commerciaux appelés « balance à quartz ». Ces dispositifs permettent, avec un temps de réponse très court, la mesure de masses très faibles. C'est sur cette base que fonctionne l'appareil Tapered Element Oscillating Microbalance TEOM (microbalance à élément conique oscillant) qui consiste à mesurer les variations de fréquence de vibration d'un élément oscillant maintenu à la température de 50 °C et sur lequel les particules prélevées se sont déposées. Dans ce dispositif on peut avoir les teneurs instantanées.

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

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

C. **Les prélèvements avec fractionnement granulométrique :**

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

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

Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen (1.7 m³ /h) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ($d < 2.5 \mu\text{m}$) et la fraction trachéobronchique ($2.5 < d < 10 \mu\text{m}$).

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

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

2. Les filtres et membranes de rétention :

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

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

Les filtres les plus utilisés sont les filtres en fibre de verre et les filtres membranes à base de dérivés de cellulose (acétate et ester de cellulose) [11].

A. Les filtres en fibre de verre :

Ils ont une efficacité de collection de 99.9% pour les particules de diamètres supérieur à 0.3 μm . Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate.

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

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

B. Les filtres membranes :

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

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

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

Avec les deux types de filtres (filtres en fibre de verre et filtres membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0.1 μm de diamètre [11].

3. Analyse physique des particules :

A. Détermination de la masse des particules :

➤ Pesée :

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

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

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

➤ Mesure par rayonnement [31]:

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

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

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

On mesure l'émission radioactive :

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

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

L'appareil jauge β travaille selon ce principe.

- Détermination de la forme des particules :

On détermine la forme des particules par microscopie électronique à balayage (MEB), pour des particules de taille comprise entre 0,001 et 1,0 μm (Figure N°5). La couche sur le filtre doit être une quasi-mono couche. Ceci est donc possible si le filtre est peu chargé. En général on ne peut ensuite effectuer d'analyse chimique car le bombardement électronique produit des dégradations de matière organique et volatilise certains composés [21].

Aérosol carboné.



Forme variable

Aérosol de sulfate.



Forme sphérique

Figure N°5 : Formes de particule [21].

B. Détermination du nombre de particules :

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

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

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

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

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

Certains paramètres peuvent affecter le coefficient de diffusion tels que la composition chimique et l'humidité relative si celle-ci est supérieure à 70% [33].

➤ Compteurs optiques :

Les aérosols diffusent la lumière. La diffusion dépend de l'indice de réfraction et de la taille des particules. En admettant que les particules soient sphériques, on peut calculer

- pour diverses longueurs d'onde et angles d'incidence - la lumière diffuse. Ceci est valable pour un indice de réfraction donné, donc pour un type de particules donné. Le calibrage nécessite l'emploi d'un aérosol de même indice de réfraction.

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

➤ Compteurs de noyaux de condensation :

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

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

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

4. Méthode d'analyse chimique :

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

A. Analyse de la matière organique :

➤ Extraction de la matière organique :

En général, on extrait la matière organique du filtre, par une extraction ultrasonique, à l'aide de solvants organiques polaires et/ou non polaires. L'extrait est concentré, soit par évaporation à l'évaporateur rotatif, soit par passage d'un débit d'azote sec, puis il est éventuellement purifié par passage sur une colonne chromatographique.

Les échantillons recueillis correspondant aux diverses fractions différent par leur polarité. On trie ainsi l'échantillon par familles chimiques. On peut aussi procéder à une chromatographie d'exclusion sur gel de silice, destinée à trier les composés suivant leur masse moléculaire.

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

➤ Analyse chromatographique :

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

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

On couple souvent la GC a un spectromètre de masse [43].

➤ chromatographie liquide (HPLC) :

Couplée à un détecteur UV ou de préférence, fluorescence a l'HPLC est utilisé pour l'analyse des hydrocarbures aromatique lourds (HAP).

Cette méthode peut être complétée par un dérivatisateur permettant à l'aide d'une réaction chimique appropriée, à la sortie de la colonne d'élution de rendre le produit fluorescent, donc de permettre une quantification des traces, puisque la fluorescence est une méthode ultra sensible. C'est le cas des nitro HAP non fluorescents qui sont réduits en amino HAP, très fluorescents, après passage de la solution extraite sur une colonne catalytique réductrice [43].

B. Analyse des éléments inorganiques et des métaux :

➤ Fluorescence X :

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

Cette mesure est rapide et permet l'analyse de nombreux échantillons, même peu chargés en matière particulaire.

Elle nécessite néanmoins un étalonnage fréquent avec des filtres sur lesquels on dépose des solutions de titre connu, contenant l'élément recherché en concentration variable.

La méthode est quantitative mais réservée aux éléments plus lourds que le magnésium.

➤ PIXE et Activation Neutronique :

Ces méthodes sont proches de la fluorescence X. Seule l'agent excitateur change.

L'échantillon est bombarde par des protons dans la spectroscopie PIXE (photon induced X electron) ou par des neutrons en activation neutronique. Les éléments sont excités, induisant un rayonnement X. On mesure la radioactivité induite par l'échantillon excité. Le rayonnement utilise les longueurs d'onde « discrètes » spécifiques de chaque élément.

Ces méthodes sont complémentaires de la fluorescence X, car les éléments ne pouvant pas être analysés par une méthode le sont correctement par une autre.

➤ Absorption atomique :

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

➤ ICP :

La méthode par torche à plasma - appelée ICP - permet de déterminer les concentrations de presque tous les éléments inorganiques et métaux. Les éléments sont ionisés par une torche à plasma.

C. Analyse des ions [34, 43] :

➤ Colorimétrie :

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

➤ Chromatographie ionique (CI) :

Cette méthode est maintenant très employée. Elle permet l'analyse rapide de tous les ions simultanément. Les ions sont détectés par la mesure de leur conductivité électrique. Les sulfates et nitrates sont séparés sur une colonne basique par élution avec une solution de carbonate de sodium. On utilise un suppresseur qui est constitué d'une colonne contenant une résine imprégnée d'acide fort, permettant la conversion des carbonates en CO₂ et H₂O et celles des nitrates et sulfates en acides de haute conductivité.

Les appareils se présentent comme des appareils de HPLC avec colonne et solvants.

Ceux-ci sont aqueux et contiennent des tampons.

Chapitre V :
METHODOLOGIE

V- METHODOLOGIE:

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

1. choix du site de prélèvement :

Le site retenu pour l'étude des PM-10 et de leurs différentes fractions granulométriques PM-3, PM-1 ainsi que les métaux lourds qu'elles véhiculent est localisé au « Centre de développement des énergies renouvelables CDER » à Bouzereah (au sud sur les hauteurs d'Alger). Ce site qui n'est pas exposé directement aux émissions des grandes axes routiers et à proximité duquel il n'existe pas de sources industrielles émettrices de poussières, peut être considéré comme étant un site semi urbain à basse densité de population résidente (le CDER se trouve à quelques 2 Km du centre de Bouzereah).

En ce site le poste de prélèvement est implanté sur la terrasse de la bibliothèque du CDER à environ 5 m d'altitude. Ce site qui se caractérise par l'absence d'obstacles, fait l'objet d'une bonne ventilation naturelle. La figure N°6 montre la localisation du site sur carte Google. La photo en figure N°7 illustre le poste de mesure donnant sur la forêt et la coté d'Alger.

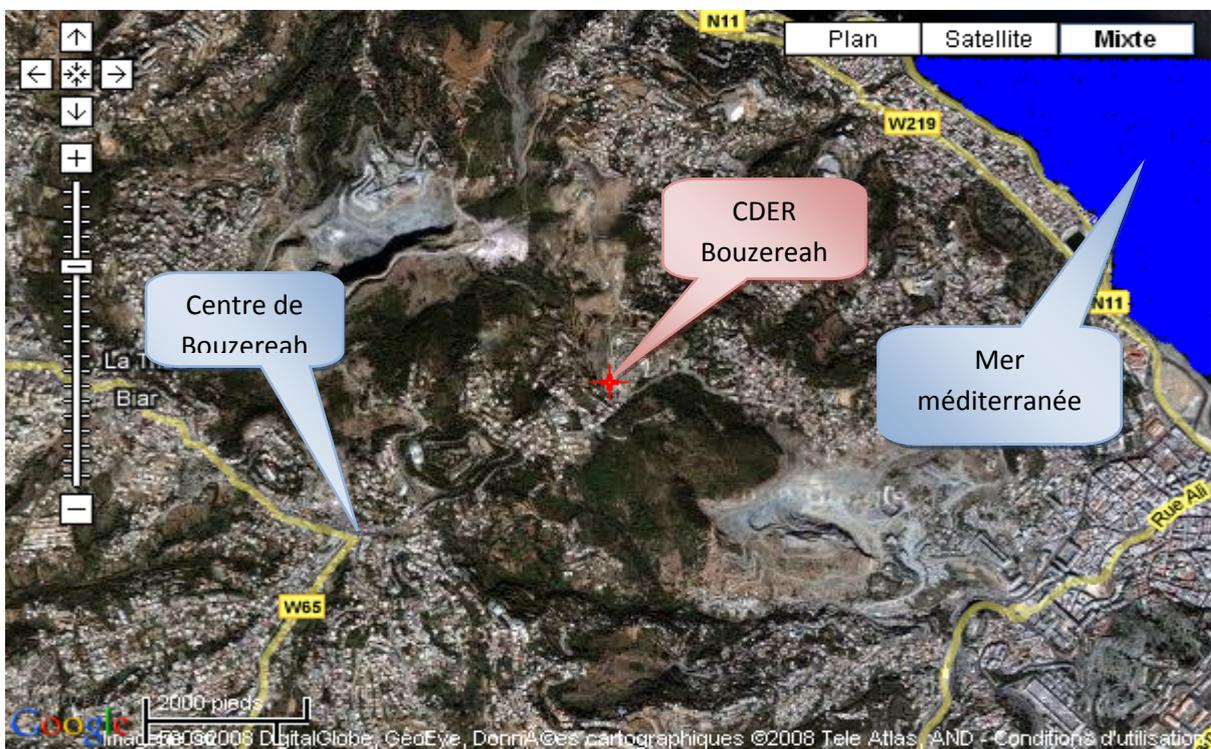


Figure N°6 : localisation du site de prélèvement



Figure N°7 : autre photo du site de prélèvement

2. Mode de prélèvement :

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

Ce dispositif décrit déjà dans les travaux antérieurs [25,33] est composé essentiellement de trois parties essentielles : (figure N°8,9 et 10)

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

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

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

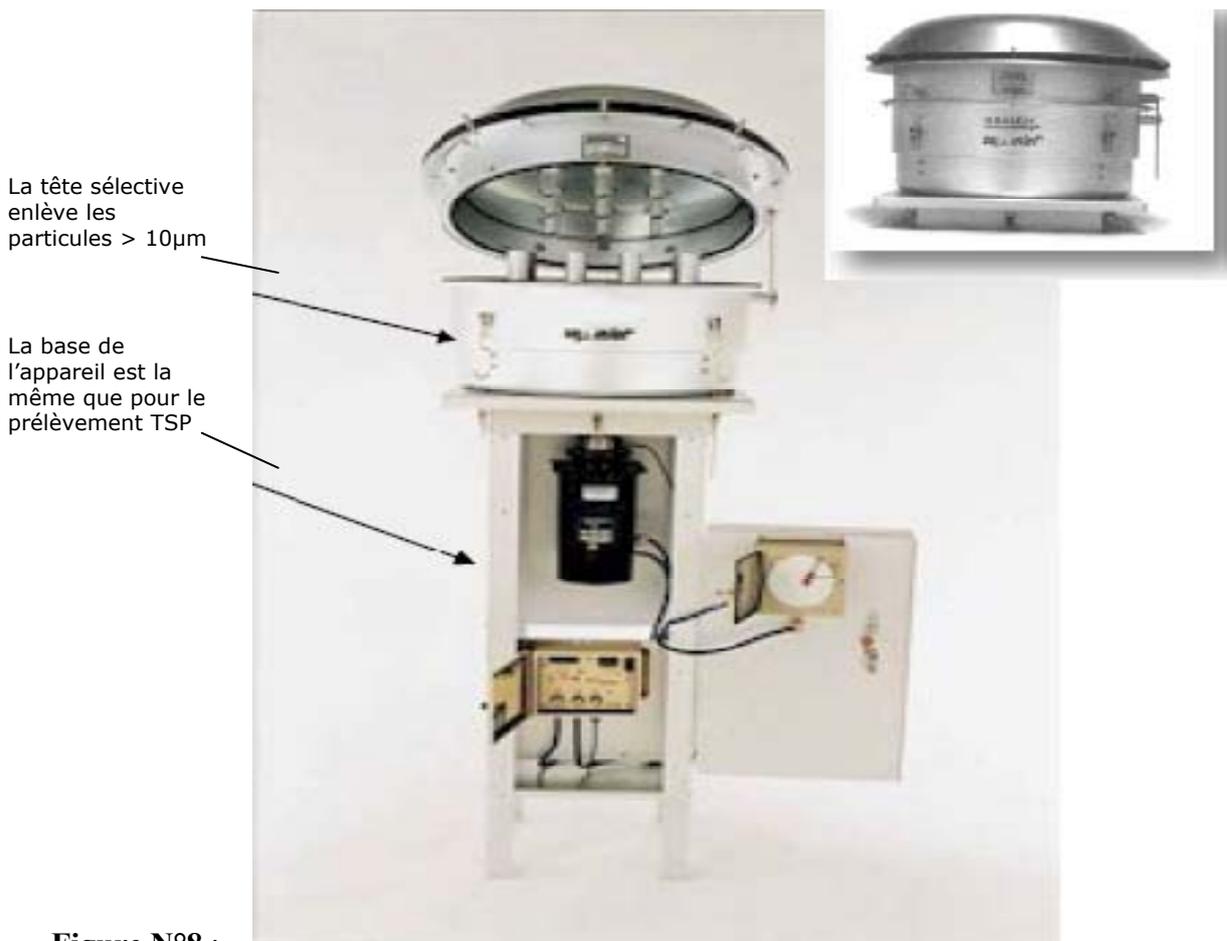


Figure N°8 : échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 (High volume sampler) de marque « Andersen ».

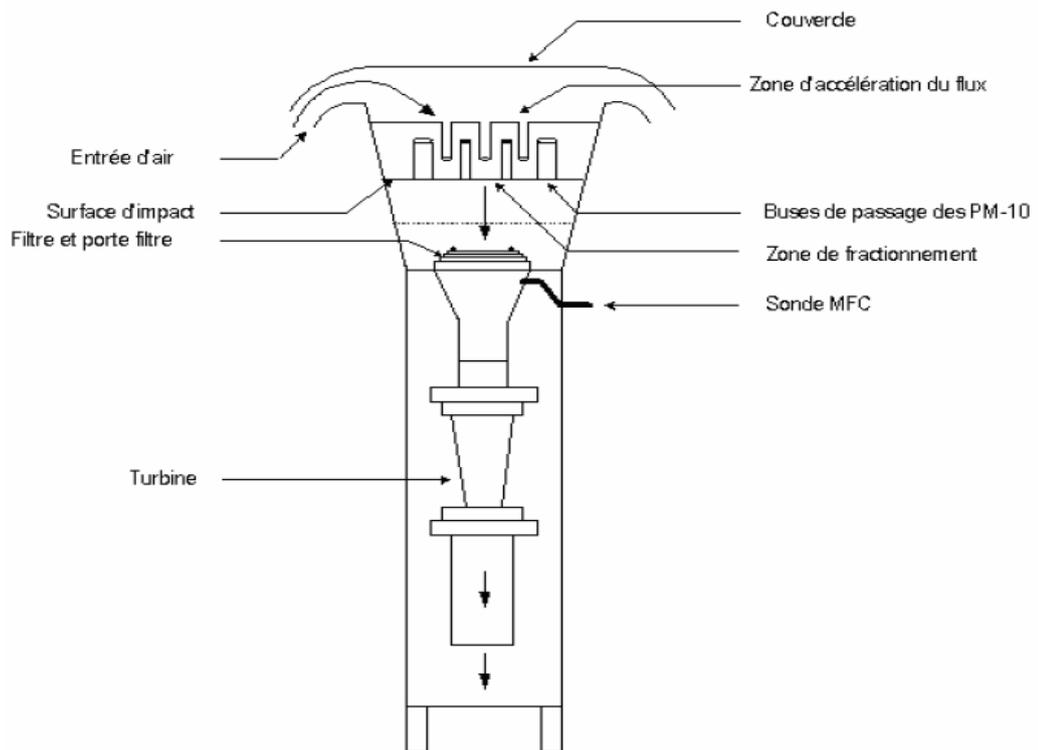


Figure N°9 : Schéma du principe de collecte des PM – 10 par l'échantillonneur HVS PM-10.

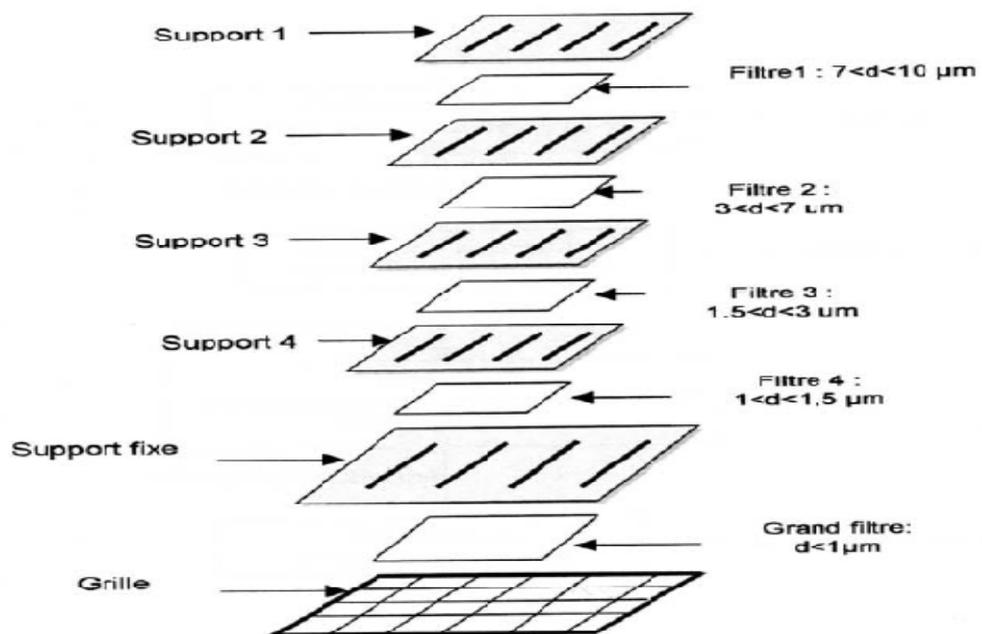
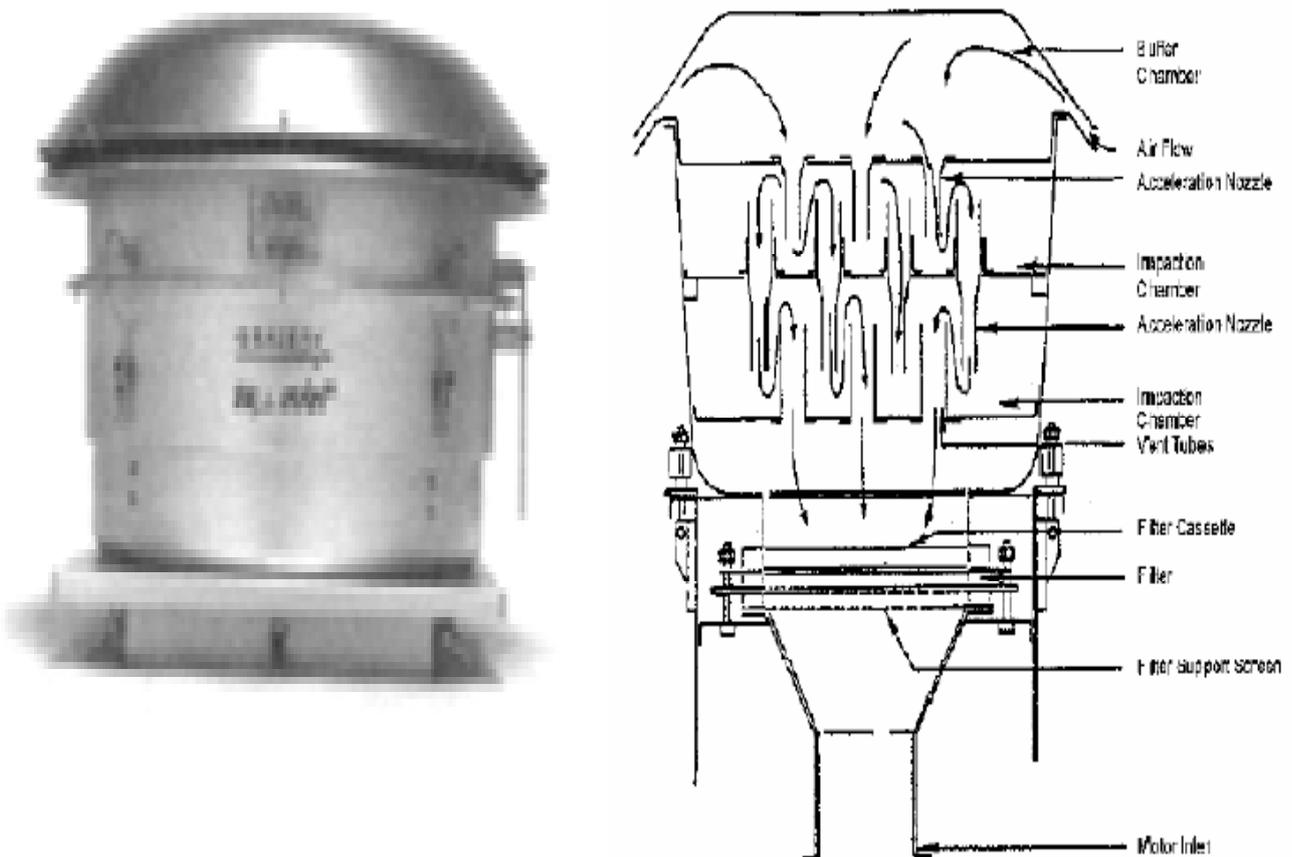


Figure N°10 : Etage du cascadeur d'Anderson et classes granulométrie.

La tête sélective PM-10 (figure N°11) comporte une zone où le fractionnement se fait par impaction directe. Cette impaction repose sur l'effet aérodynamique induit par la présence de 9 buses circulaires placées au-dessus d'une surface lisse d'impaction. Les particules inférieures au seuil de coupure de 10 μm sont entraînées par le flux de l'air dans les buses et sont collectées sur des filtres. Tandis que les particules les plus grosses s'écartent de flux et impactent sur la surface d'impaction en raison de leur inertie plus élevée. Afin d'éviter le réentraînement des particules grosses, la surface d'impaction est graissée (huile de silicone) et nettoyée régulièrement.

**Figure N°11 :** la tête de HVS PM-10

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

Les figures N°12 et N°13 représentent des filtres chargés par les particules fines.



Figure N°12 : Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique après prélèvement.

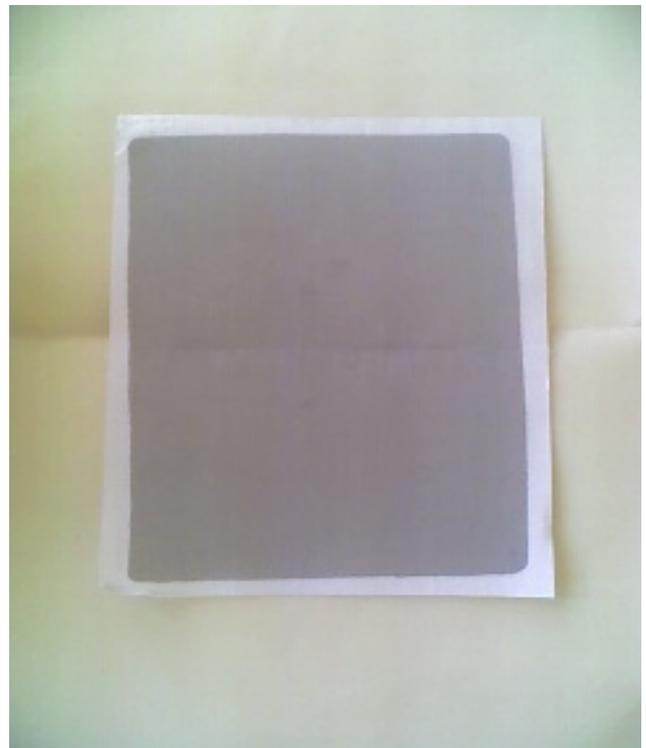


Figure N°13: Photo d'un grand filtre après prélèvement.

3. Traitement et analyse élémentaire des PM-10 :

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

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

La solution est alors portée à ébullition sous reflux pendant 2h. Après évaporation partielle, une seconde minéralisation est effectuée dans les mêmes conditions. On évapore ensuite à sec et après refroidissement, le résidu est repris dans 30 ml d'eau distillée. Le minéralisât est ensuite filtré sur filtre whatman pour retenir les impuretés insolubles (carbone noir, silicates) etc. Le filtrat est transféré dans une fiole jaugée, puis ajusté avec de l'eau distillé à un volume de 50ml.

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

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

Chapitre VI :
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

VI- RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

Le suivi des teneurs atmosphériques en particules fines a été effectué durant la période du 05 avril au 19 mai 2008 à raison de 2 à 3 prélèvements par semaine. Cette campagne nous a permis de mesurer les teneurs de 12 jours, ce qui a donné un total de 22 échantillons répartis entre 3 classes granulométriques, PM-1, PM-3 et PM-10.

Dans ce qui suit, nous présentons:

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

1. Etude de la pollution atmosphérique par les particules fines

A. Etude des teneurs atmosphériques en particules inhalables PM-10

L'évolution temporelle des teneurs en PM-10 enregistrée le long de ce travail est illustrée graphiquement sur la figure N°14.

Cette évolution est caractérisée par les paramètres statistiques rapportés sur le tableau N°4.

Tableau N°4 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-10

Paramètres	Valeur
Nombre de prélèvement	12
Teneur maximale	75.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Teneur minimale	10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Teneur moyenne	33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ecart type	13.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rapport (Ecart type/Teneur moyenne)	39 %

Les résultats montrent qu'il existe, comme c'est souvent le cas en pollution de l'air, une importante fluctuation temporelle due entre autre à l'influence des paramètres météorologiques (vent, précipitation).

Les teneurs journalières en PM-10 varient de $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $75.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La teneur moyenne enregistrée s'élève à $33.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette valeur respecte les limites annuelles des PM-10 pour la protection de la santé humaine ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour 2007 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour 2010) établies dans le cadre de la nouvelle directive Européenne pour l'évaluation et le management de la qualité de l'air ambiant [47].

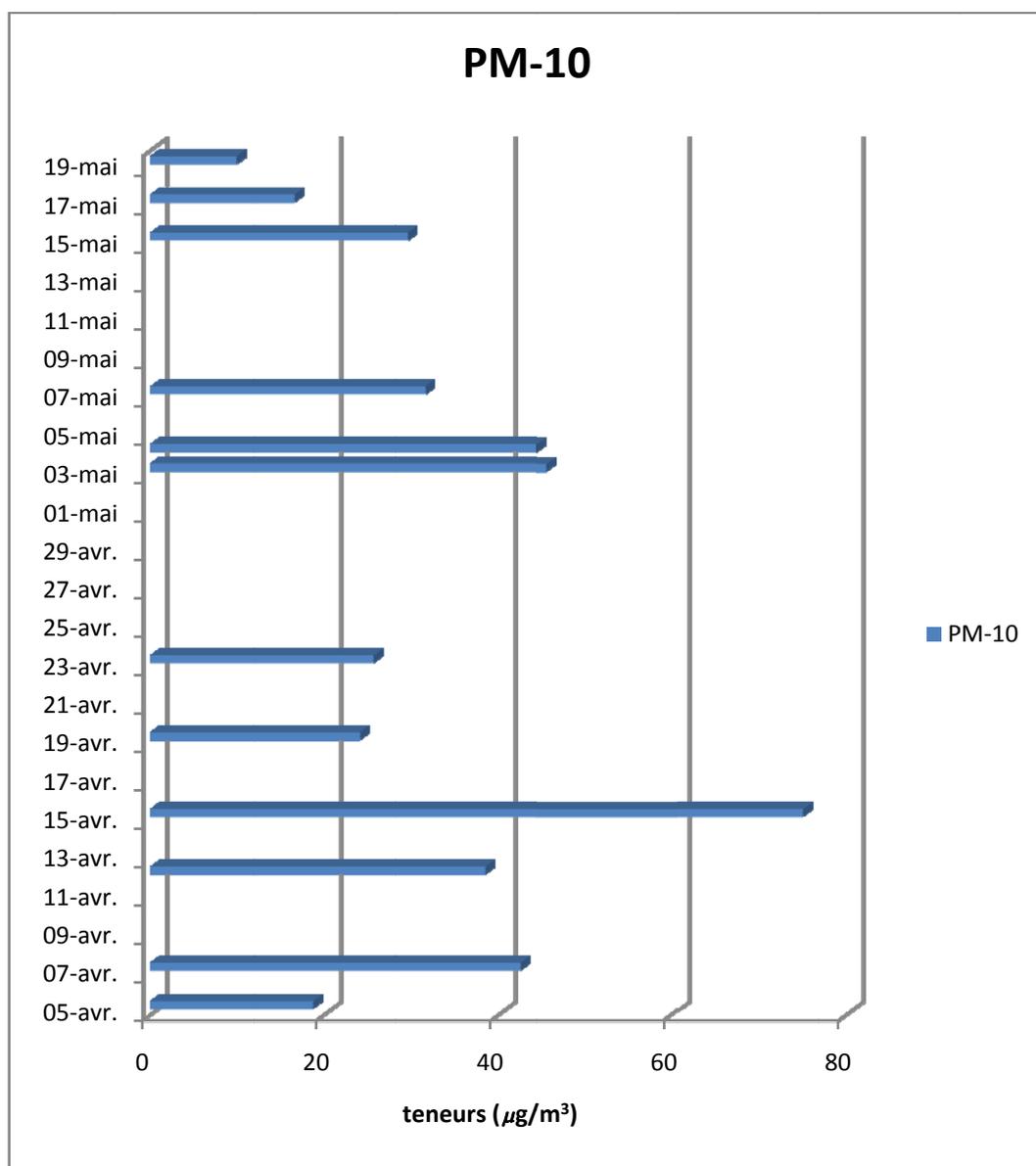


Figure N°14 : Evolution journalière des teneurs atmosphériques en particules inhalables PM-10

Le domaine de dispersion des concentrations des PM-10 dans l'air, s'étale sur un rayon de $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la teneur moyenne de $33.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

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

Au cours des deux jours du 17 et du 19 mai, on relève les teneurs les plus basses de l'étude. Durant cette période les conditions climatiques (vent fort, pluies, froid, brouillard...) étaient favorables à la réduction des teneurs des particules présentes dans l'air (par lessivage de l'atmosphère, entraînement des particules sur de longues distances). Aussi, ces mêmes conditions ont probablement générées une certaine réduction des déplacements motorisés.

B. Etude de la répartition granulométrique des particules fines :

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

Les fractions recueillies sur les trois étages du cascadeur d'Andersen sont : 10 à $3 \mu\text{m}$, 3 à $1 \mu\text{m}$, et enfin la fraction terminale du filtre absolu 1 à $0,01\mu\text{m}$. La figure N°15 illustre l'évolution temporelle des différentes classes granulométriques.

Le tableau N°5 résume les teneurs moyennes et extrêmes des différentes fractions granulométriques ainsi que les rapports PM i / PM-10.

Tableau N°5: Caractérisation des différentes classes granulométriques.

Classe granulométrique	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rapport PM-i / PM-10
PM-1	14.6	6.9	10.2	0.33
PM-3	34.4	12.1	23.3	0.75
PM-10	75.1	10.0	30.5	1

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

La figure N°16 illustre graphiquement les teneurs moyennes des teneurs en particules fines, PM-10, PM-3 et PM-1.

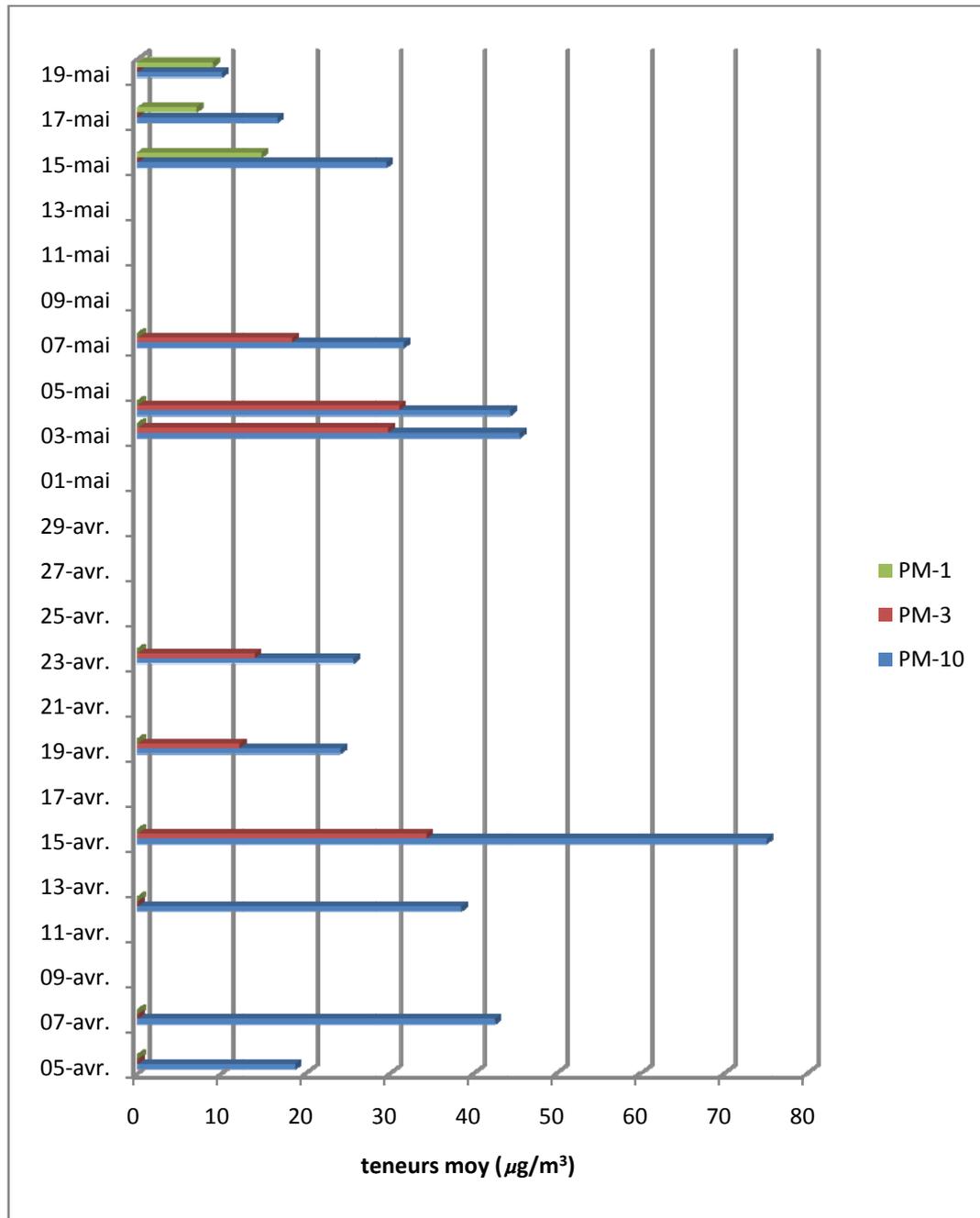


Figure N°15 : Evolution Répartition journalière de la pollution par les particules fines en fonction de leur classe granulométrique.

Les teneurs en PM-3 varient entre 12.7 à 39.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la teneur moyenne est de 23.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour les particules très fines, les PM-1, leurs teneurs fluctuent selon les jours de prélèvement de 6.9 à 14.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, accusant une teneur moyenne de 10.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La répartition par classe granulométrique est visualisé en figure N°17.

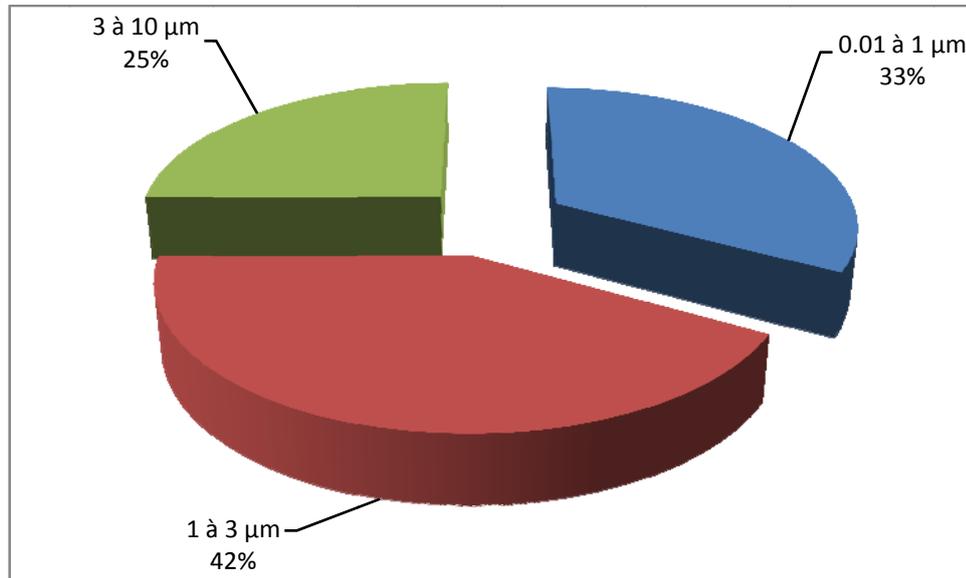


Figure N°17 : Répartition massique des PM-10 par classe granulométrique.

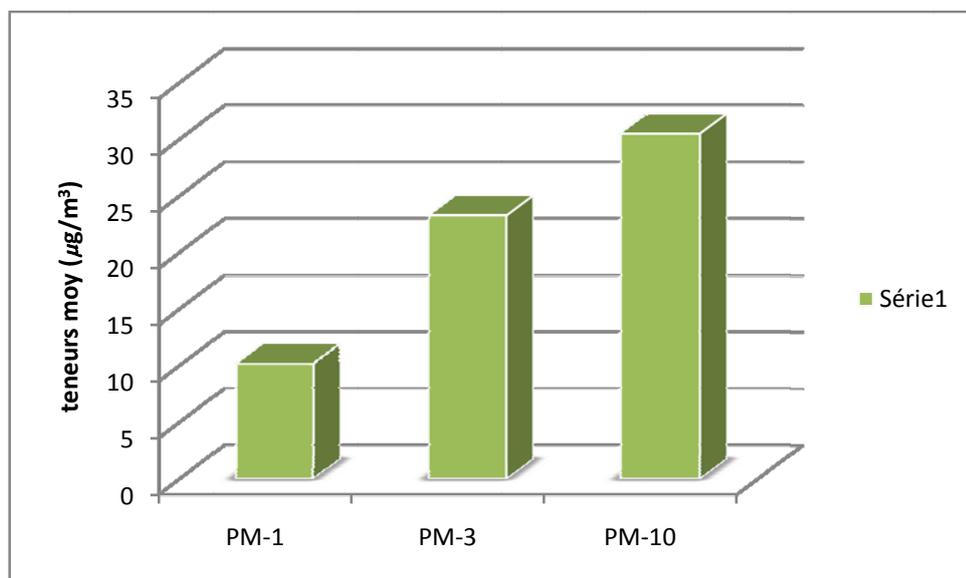


Figure N°16 : Teneur moyenne des particules fines selon leur taille.

Les résultats montrent que 75% des PM-10 ont un diamètre inférieur à $3\mu\text{m}$ (particules alvéolaires) et que 1/3 des PM-10 sont des particules qui ont un diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ (particules très fines). En d'autres mots, les particules atmosphériques en ce site sont très enrichies en particules fines qui sont très nocives.

Ce sont aussi ces particules fines qui véhiculent les composés les plus toxiques (HAP, métaux lourds, sulfates,...).

C. Corrélation entre les PM-3 et PM-10:

La figure N°18 retrace l'allure d'évolution temporelle des deux classes granulométriques PM-10, PM-3. Pour des échantillons prélevés de même jour.

On constate que les PM-3 et PM-10 n'évoluent strictement de la même manière.

Dans l'étude des corrélations entre les PM-3 et les PM-10 d'une part et les PM (3-10) et PM-3 d'autre part donnée en figures N°19 et N°20, on constate qu'il n'y a pas une bonne corrélation entre ces classes granulométriques. Ce résultat suggère qu'en ce site les particules fines PM-3 et les particules moins fines ou grossières PM-10 et PM (3-10) ont des origines différentes. Les particules fines proviennent essentiellement du trafic routier et les particules grossières sont liées principalement aux sources naturelles comme l'érosion des sols.

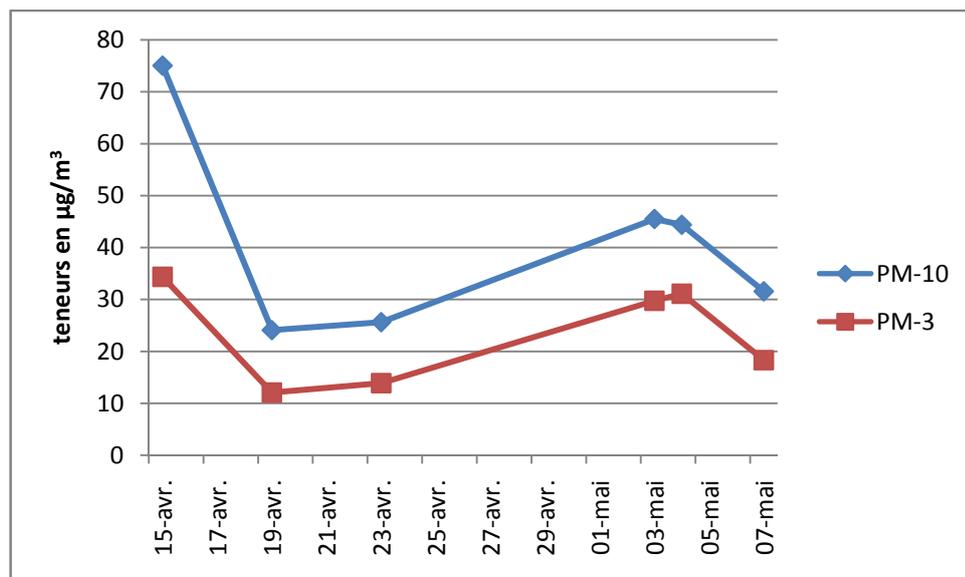


Figure N°18 : Evolution des teneurs atmosphériques en particules fines PM-10 et PM-3

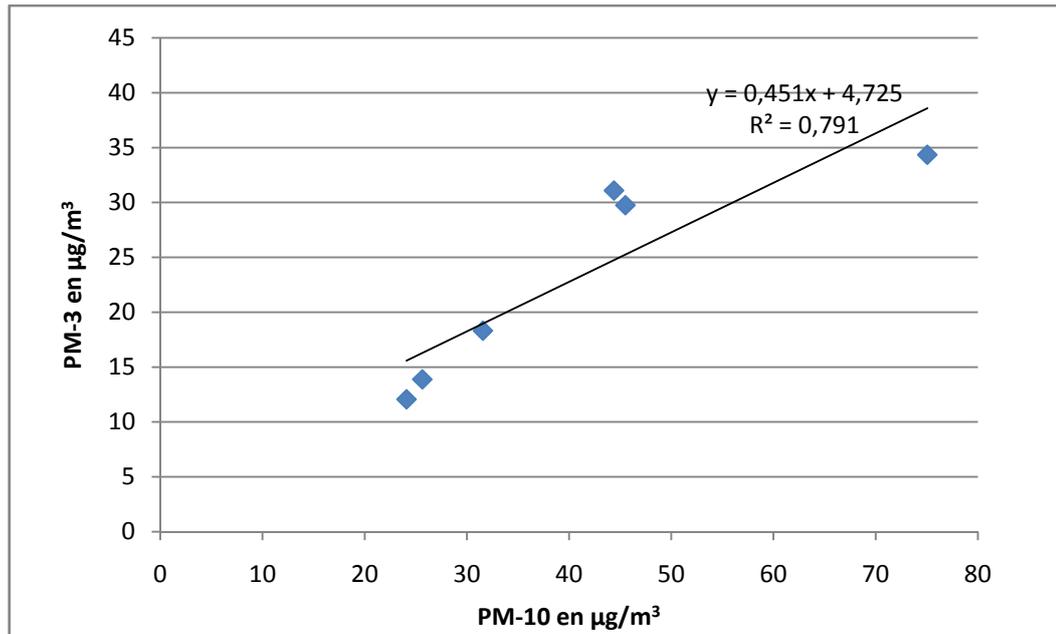


Figure N°19 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-10 et en PM-3.

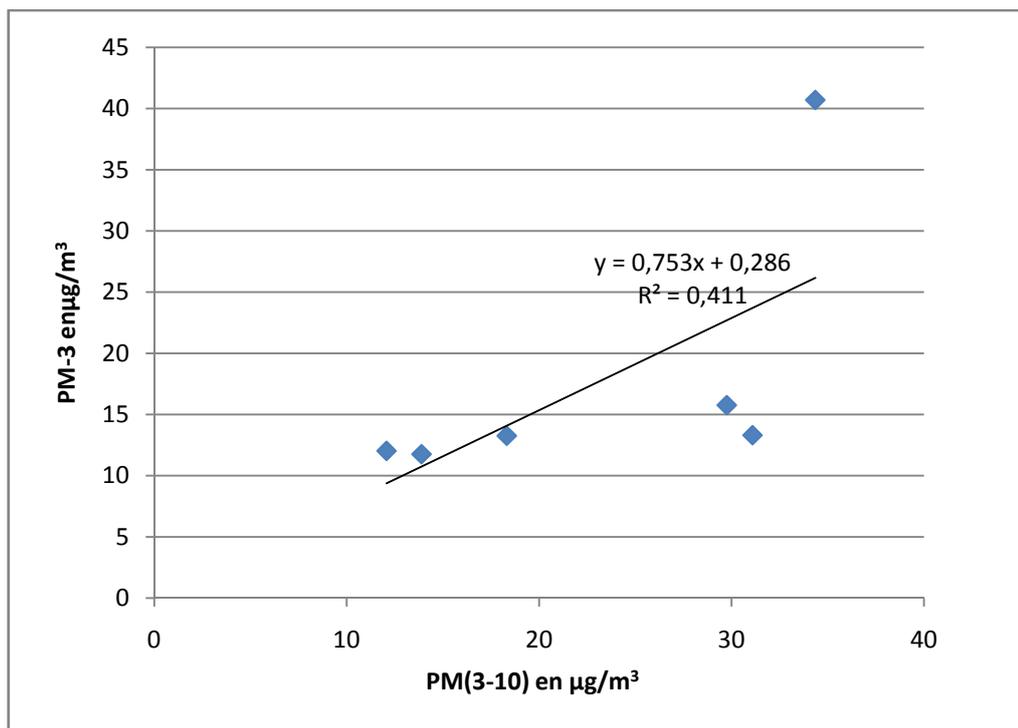


Figure N°20 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM (3-10) et en PM-3.

D. Ampleur de pollution et étude comparative :

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

Nous resumons en tableau N°6 les normes et les valeurs les PM-10, pour les Pm-2.5 il n'y a que peu de normes.

Les normes relatives aux PM-2.5 sont :

OMS : * $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne journalière.

* $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle.

USA : * $15\mu\text{g}/\text{m}^3$: moyenne sur trois années des moyennes spatiales annuelles (c'est la moyenne des moyennes d'une zone à plusieurs stations de mesure).

* $65\mu\text{g}/\text{m}^3$: valeur limite journalière [50].

Les limites d'exposition aux PM-2.5 recommandées par AIR.PARIF (réseau de surveillance en Ile de France) sont de 15 à $25\mu\text{g}/\text{m}^3$. [48]

Par rapport à ces normes nous constatons que les teneurs en PM-10 en ce site semi-urbain sont à la limite des normes Européennes. Elles respectent toutes fois largement les normes algériennes qui ne sont pas sévères.

Avec une teneur moyenne de $23.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, les PM-3 n'atteignent, pas relativement aux normes des PM-2.5, des niveaux très inquiétants.

Toutes fois la norme OMS est dans les deux classes granulométriques légèrement dépassée.

Une comparaison entre les teneurs en PM-10 et PM-2.5 mesurées à Bouzereah et celles relevées dans certaines villes, est présentée en tableau N°7.

Tableau N°6: Normes et valeurs guide régissant les PM-10.

Pays	Valeur limite en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Référence	
Etats-Unis	150 maximum journalier (p99 sur 3 ans)	[48]	
	50 moyenne annuelle de teneurs journalières (sur 3 ans)		
Union Européenne		[50 ,51]	
	■ jusqu'à 2005		50 limite journalière à e pas dépasser plus de 25 fois par an
			30 moyenne annuelle
	■ jusqu'à 2010		50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an
	20 moyenne annuelle		
Suisse	50 moyenne sur 24 heures	[42]	
	20 moyenne annuelle		
Suède	100 P98 de moyennes sur 24h	[42]	
OMS	50 moyenne journalière	[59]	
	20 moyenne annuelle		
Algérie	80 moyenne annuelle	[58]	
	50 objectif de qualité		

Tableau n°7 : Valeurs des teneurs des PM-10 mesurée dans certaine villes.

<i>Villes</i>	<i>Teneur moy</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Teneur max</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Année</i>	<i>Remarques</i>	<i>Références</i>
Santiago-chile	53	-	1997	Site industriel	[54]
Hong-Kong	80	90	2003	Site urbain (PM-10)	[55]
Ispra (Italy)	-	40	2002	Site urbain PM-2,5	[37]
USA	45	-	2001	Site urbain	[57]
Monagrega (Espagne)	17	-	2002	600m d'altitude	[1]
Marketa Domasova (Czechestan)	78	110	2003	Saison d'été et hiver	[57]
Sofia (Bulraria)	54	92	2004	-	[47]
Eger (Hangary)	47	97	2004	-	[48]
Tirgu Mures (Romania)	68	105	2004	Région chaude	[48]
Zilina (Slovakia)	47	67	2004	-	[49]

La comparaison entre les teneurs en PM-10 mesurées à Bouzereah et celles relevées dans des milieux urbains de certaines villes de plus ou moins grandes envergures montre aussi qu'en site semi urbain à Bouzereah, les niveaux de pollution restent à des niveaux acceptables

Toutes fois une comparaison avec des sites peu pollué comme celui de Monagrega en Espagne [56], indique que le taux de pollution à Bouzereah est loin d'être modéré.

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

Le tableau N°8 donne des résultats obtenus a des autres sites à Alger.

Tableau N°8 : comparaison des teneurs en PM-i mesurées en différents sites à Alger.

Sites à Alger	PM-10	PM-3	PM-1	Références
ENP, site de proximités				
Année 2001	84.1	-	-	[55]
Année 2003	75.2	40.3	25.9	[60]
Bab-Ezzouar, site urbain, 2005	70.4	35.3	22.0	[61]
Place 1er mai, site urbain, 2006	64.1	34.7	15.1	[25]
Dely Brahim, ISMAL site semi urbain, 2007	27	18.1	14.8	[33]
Bouzereah, CDER, site semi urbain, 2008	33.5	23.3	10.2	Présente étude

Cette comparaison montre qu'en site semi urbain (Bouzereah ou Dely Brahim) les teneurs sont fortement réduites par rapport aux sites urbains.

Ainsi en s'éloignant des émissions du trafic routier du centre urbain, il y a une nette diminution des taux de pollution par les PM-i.

2. Etude des métaux lourds associés aux PM-10 et PM-3

Formées par voie naturelle ou lors d'un processus de combustion, de taille, de poids et de composition très variables, les particules fines peuvent véhiculer des métaux lourds présents à l'état de traces qui doivent être surveillés, car toxiques et pénétrants jusqu'aux alvéoles pulmonaires.

L'étude des métaux lourds Cd, Fe, Cu, Mn et Pb associés aux particules fines a porté sur une vingtaine de fractions granulométriques.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 21 à 24. Ces figures illustrent graphiquement l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en métaux lourds véhiculés par les PM-10, PM-3 et PM-1.

Le tableau N° 9 et les figures de 25 à 27 résument les teneurs atmosphériques moyennes et les fractions massiques moyennes correspondantes.

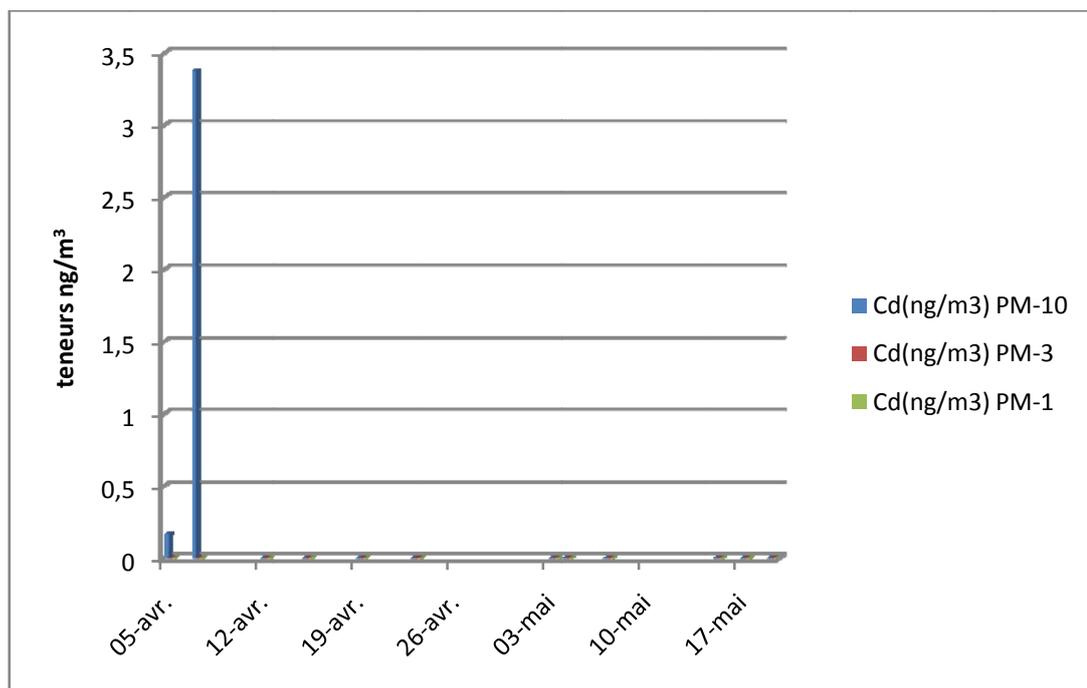


Figure N°21 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en **Cd**.

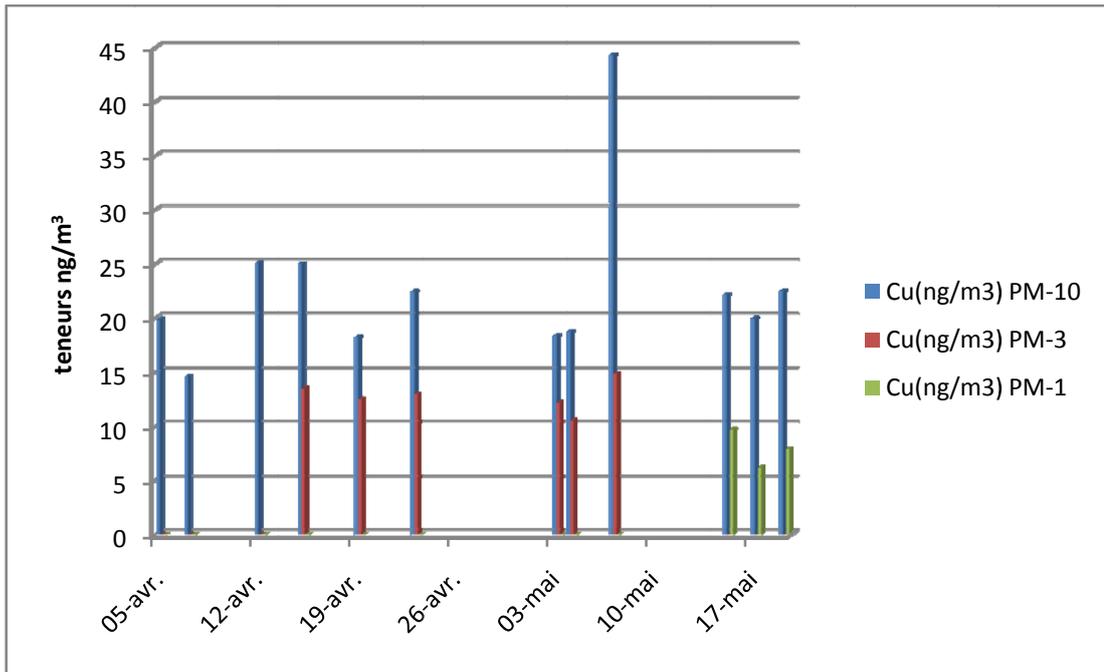


Figure N°22 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en **Cu**.

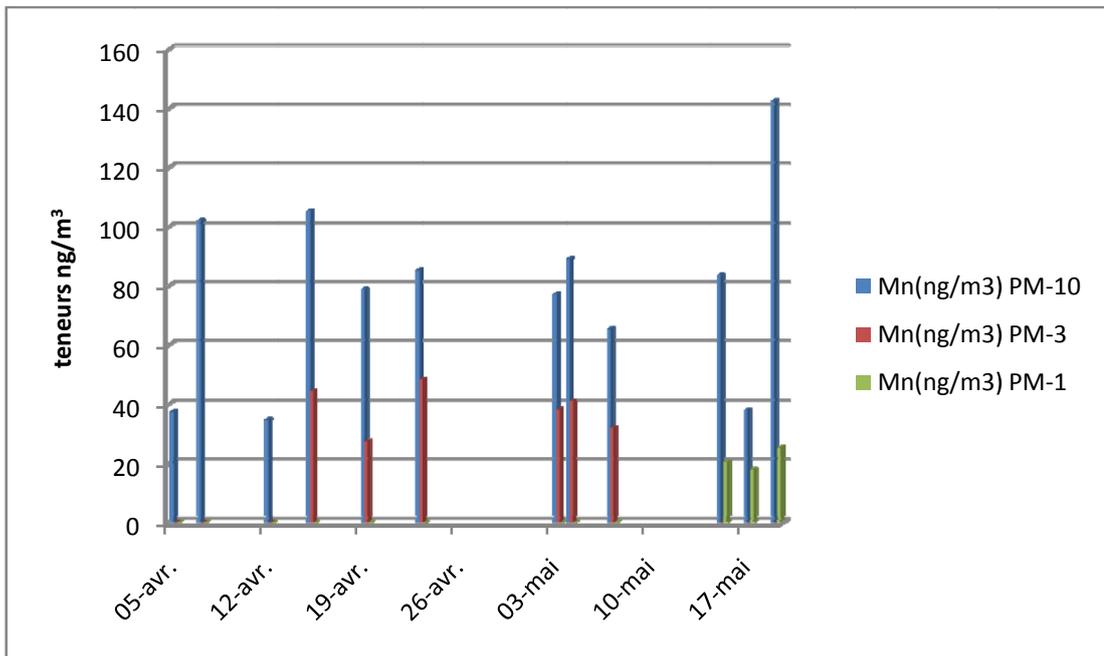


Figure N°23 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en **Mn**.

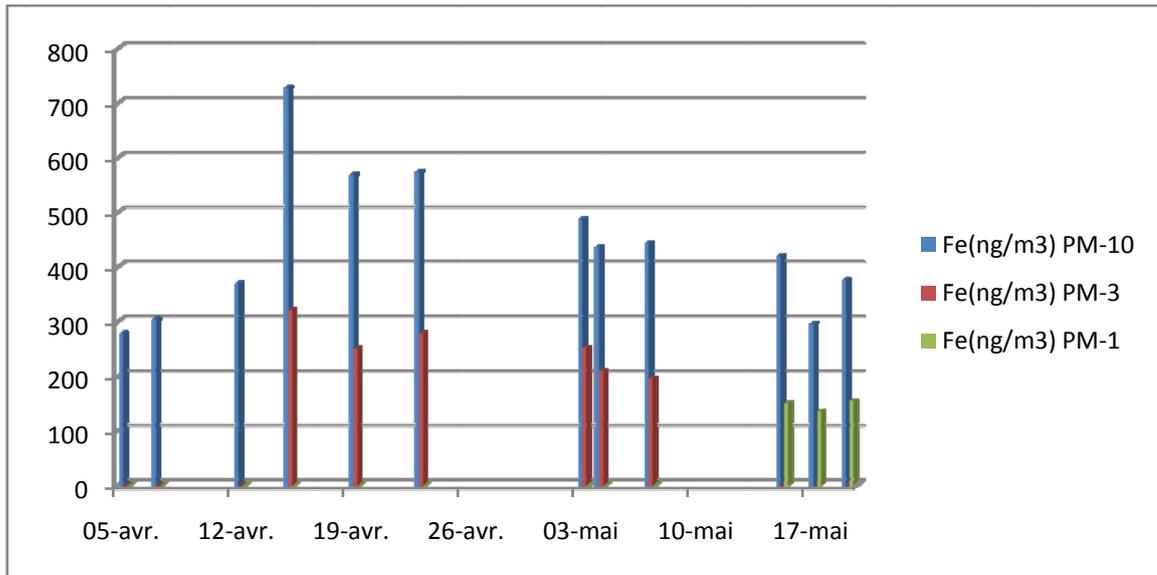


Figure N°24 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Fe.

Tableau N°9 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques moyennes des métaux lourds étudiés

Paramètres		Pb (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)
PM-10	Teneur maximale	ND*	44.3	142.6	573.9	3.38
	Teneur moyenne	ND	22.6	78.4	440.3	0.30
	Fraction moyenne	-	0.03	0.10	0.58	0.0004
PM-3	Teneur maximale	ND	14.9	48.4	278.5	ND
	Teneur moyenne	ND	12.8	38.7	251.4	ND
	Fraction moyenne	-	0.04	0.11	0.75	-
PM-1	Teneur maximale	ND	9.7	25.4	153.9	ND
	Teneur moyenne	ND	7.9	21.3	146.6	ND
	Fraction moyenne	-	0.04	0.11	0.78	-

*ND : non décelable

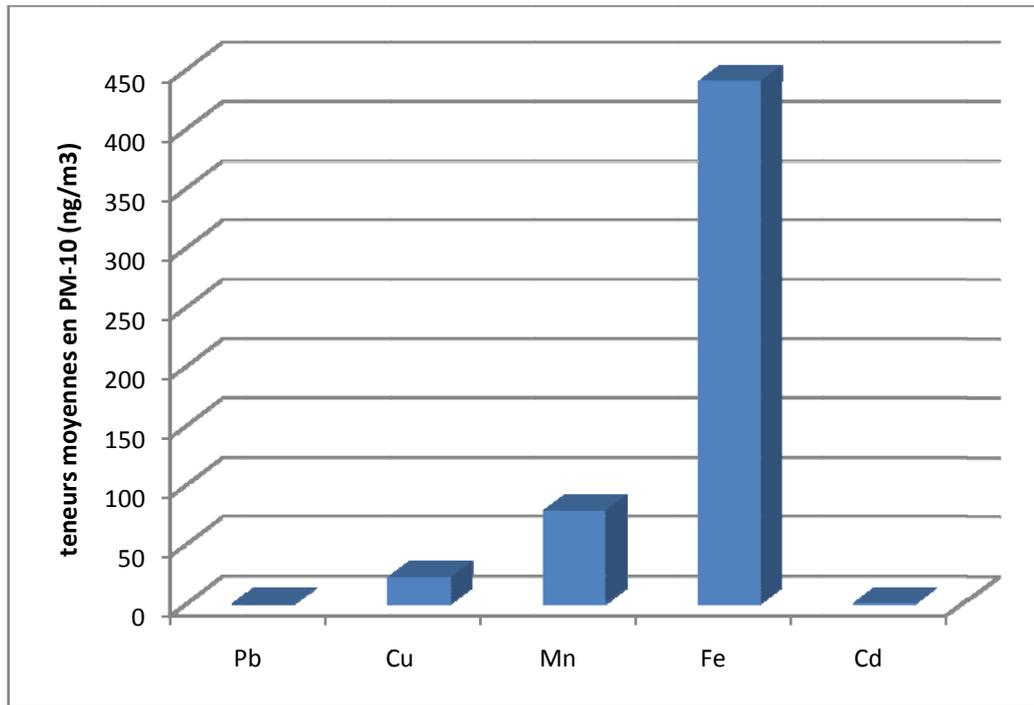


Figure N°25 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10.

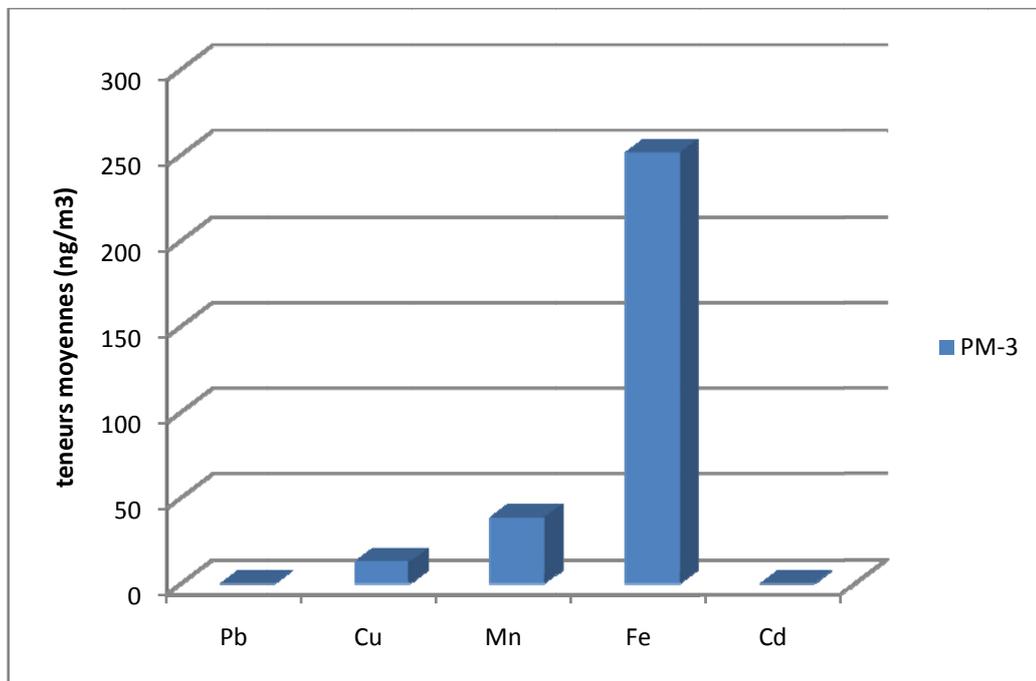


Figure N°26 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.

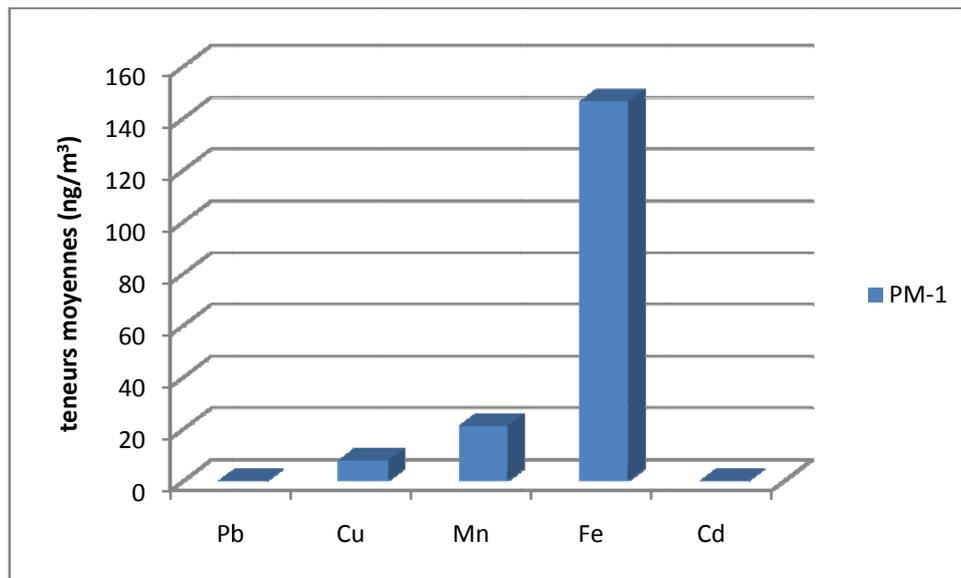


Figure N°27 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-1.

Tout comme dans le cas de l'étude des PM-i, on relève pour l'ensemble des éléments une variation temporelle assez importante.

Parmi les métaux lourds étudiés, le fer est de loin le composé majoritaire, Il varie de 0.11 à 0.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et la teneur moyenne est de l'ordre de 0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En fraction massique le fer constitue en moyenne 0,58 % de la teneur des PM-10, tandis que dans les PM-3 il en constitue environ 0,75 %.

Après le fer, c'est en manganèse que les particules sont le plus enrichies. cet élément constitue avec un teneur moyenne de 78 ng/m^3 , 0.1% de la masse des PM-10 et autant des PM-3 et des PM-1.

Le plomb qui est lié aux émissions du trafic routier n'a pas été décelé au site du CDER, ce qui confirme la faible influence du trafic routier en ce site.

Le cadmium n'a pas été décelé que dans un nombre très réduit d'échantillons de PM-10.

Les teneurs en cuivre restent faibles et attestent d'un milieu qui n'est pas influencé par les émissions industrielles.

On note ainsi globalement que ceux sont les émissions naturelles qui dominent dans cette zone. On y retrouve à des teneurs élevées du fer et du manganèse qui sont des éléments issus principalement de la croûte terrestre.

Le graphe de la répartition massique des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques (figure N°28) montre que le fer se répartit en proportion plus ou moins égale sur les PM-10, PM-3, PM-1. Le manganèse suit également une répartition similaire. Ce comportement semble être spécifique de ce milieu semi-urbain. Dans d'autres sites en particulier en site urbain et de proximité, de Fe et Mn sont beaucoup plus enrichies dans les fractions de particules grossières.

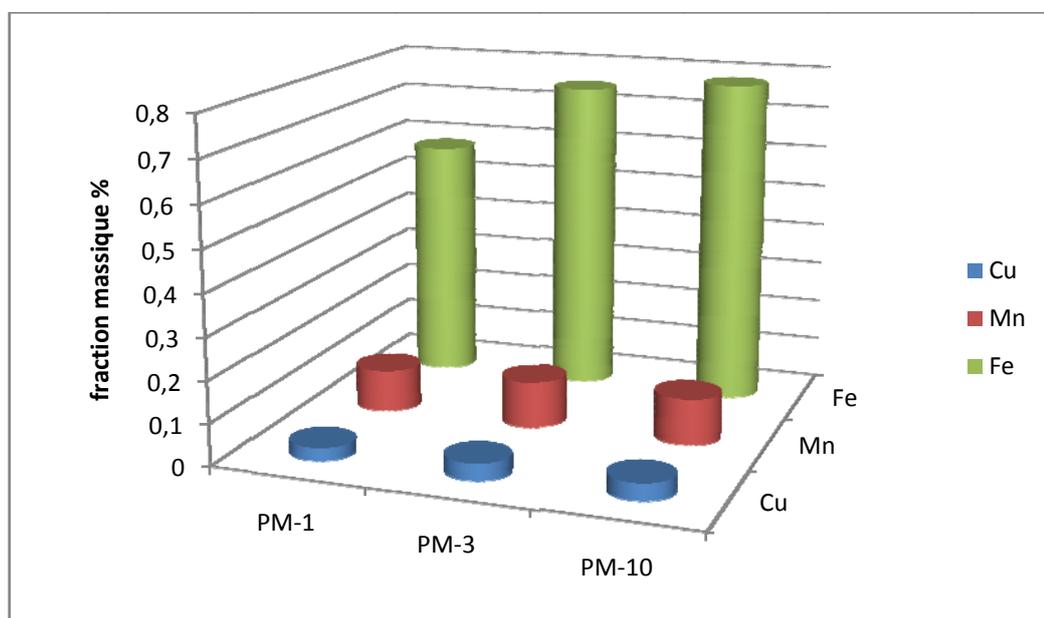


Figure N°28 : répartition massique en % des métaux lourds sur les trois classes granulométrique.

Ainsi le fer par exemple montre, comme cela est illustré en figure N°29, une tendance linéaire en fonction des PM-10.

La figure N° 29 montre, qu'il n'y a pas de corrélation entre les teneurs en PM-10 et celles de Fe. Ainsi cela signifie qu'une forte pollution en PM-10 n'entraîne pas systématiquement une forte pollution par le fer. Car le site de prélèvement si situe à environ 600 m d'altitude et il est très proche de la mer (la source du fer est le milieu marin).

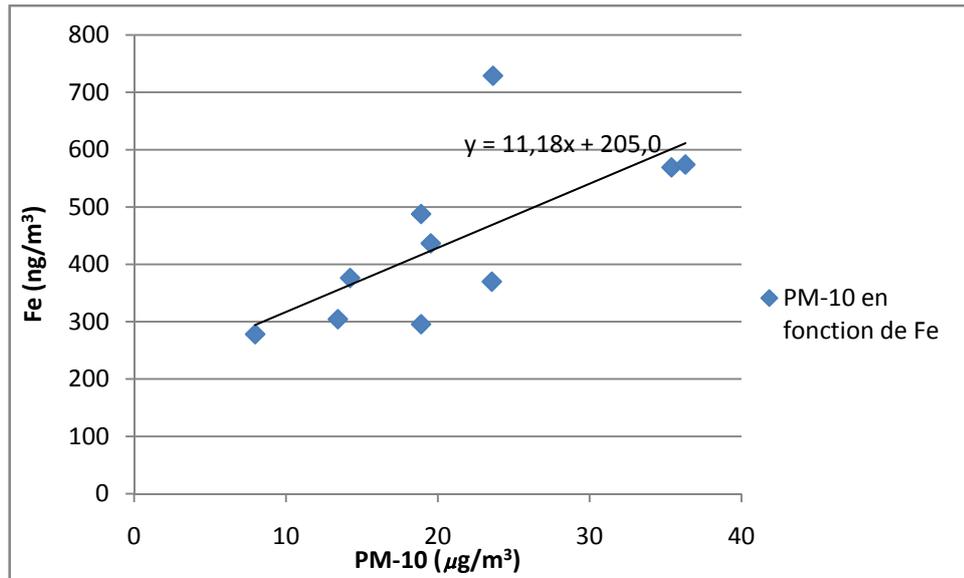


Figure N°29 : Evolution de teneur de fer en fonction des teneurs en PM-10.

La comparaison avec les teneurs en métaux lourds mesurés dans d'autres villes (tableau N°10) confirme aussi la faible pollution par les métaux lourds à Bouzereah.

Tableau N°10 : Comparaison des teneurs atmosphériques en métaux lourds mesurés dans certaines grandes villes.

Villes	Prague [46]	Paris [56]	Khartoum [1]	Barcelone [2]	Alger Est [9]	Alger centre [25]	Bouzereah
Pb (ng/m^3)	132	162	47	340	182.8	256	-
Cd (ng/m^3)	1.76	2.2	-	-	1.17	2.3	0.30
Mn(ng/m^3)	36.2	22	91	-	47.7	6.9	78.39
Ni (ng/m^3)	7.8	12.8	6.1	-	-	4.7	-
Cu (ng/m^3)	55.7	31	6.9	-	81.8	31.7	22.61
Fe (ng/m^3)	-	-	-	-	-	-	440.3

CONCLUSION

VII- CONCLUSION :

Au cours de cette étude, nous avons mesuré par classe granulométrique, les niveaux de pollution de l'air ambiant par les particules fines : PM-1, PM-3 et PM-10

L'étude montre qu'en ce semi site urbain de l'agglomération d'Alger, la pollution de l'air par les PM-10 atteint des niveaux moyens, qui sont à la limite des normes en vigueur dans les pays occidentaux.

La teneur journalière moyenne s'élève à 33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la teneur maximale et de l'ordre de 75.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ainsi et comparé aux teneurs mesurées en sites urbains d'Alger, les niveaux de pollution relevés à Bouzereah ne sont pas inquiétants.

Ces particules se distinguent par le fait qu'environ 70% des PM-10 est constitué de particules respirables (PM-3) et que le tiers appartient au PM-1 qui sont très nocive. Ce part élevé de particules fines suggère que ce site reçoit des émissions naturelles et anthropiques. On note par ailleurs que ces teneurs sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en d'autres sites semi urbain.

L'étude de certains métaux lourds, (Pb, Cd, Mn, Cu et Fe) associés aux particules fines montre, que les PM-10 ne véhiculent pas une pollution élevée par les métaux lourds à caractère toxique.

Le Fer et le Manganèse issus de la croûte terrestre sont les métaux les plus abondants. Le plomb provenant du trafic routier n'a pas été décelé par la technique analytique utilisé.

Il faut rappeler que ces résultats concernent un site semi-urbain qui de part sa topographie et son éloignement des grands centres urbains n'est pas fortement influencé par les émissions anthropiques.

Le fer et le manganèse se répartissent sur toutes les classes granulométriques. Ceci suggère qu'ils proviennent non seulement de la croûte terrestre (particules PM-(3-10)), mais aussi d'autres sources anthropiques qui émettent des particules très fines.

A la lumière de ces résultats et afin d'améliorer graduellement la situation ou au moins éviter son aggravation, nous présentons les recommandations suivantes :

- Contrôler régulièrement les émissions industriels.
- Encouragement de la bicarburation Essence / GPL ou GNC.
- Amélioration de la gestion du transport avec réduction des points de congestion et multiplication des transports en commun.
- Réduire les aires nues et donc la pollution par érosion éolienne.

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

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie :

- [1]: Kerbachi R., M. Boughdaoui, N. Koutai et T. Lakki : La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. *Poll. Atm.*, Avril-Juin, pp 89-101, 1998.
- [2]: Kerbachi R., Boughdaoui M., Y. Kerchich et Journard R., Evaluation de la pollution, 5-7 Juin 2000, Avignon (France).
- [3] : Barnea M., P. Ursu, « Pollution et protection de l'atmosphère », Ed. Eyrolles, Paris, 1974.
- [4] : Chovin.P, Rousel.A, Physicochimie et physiopathologie de polluants atmosphériques, Masson, Paris, 1973
- [5] : Boughdaoui.M, Kerbachi.R, « la pollution particulaire à Rais Hamidou, ampleur et dispersion » *Ajot*, volume10,sérieD, N°1,pp149-168,1994
- [6]: Stern.A, Fundamentals of air pollution, 2ème édition, Academic Press, London, 1984.
- [7]: Kerbachi.R, Cours de pollution atmosphérique 5ème année, ENP, Alger, 2008.
- [8]: Detrie.J.P, La pollution atmosphérique, Dunod, Paris, 1990.
- [9] : BADI .S, « evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger» : PFE, ENP, Alger, 2005.
- [10] : Ramade.F, Eléments d'écologie, action de l'homme sur la biosphère, Mc Grawtill, Paris, 1982.
- [11] : Dang.C, Fontelle.T.P, Leygonie.R, Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission, pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp38-46, 1990.
- [12] : Nessah.S, « Contribution à l'étude des TSP dans le grand Alger » :PFE, ENP, Alger, 1995.
- [13] : Brunner.P.H, « Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères ». *Pollution atmosphérique*, Janvier-Septembre, pp 301-308, 1988.
- [14] : Dagobert.P , « Pollution atmosphérique, origine et réduction de émissions au niveau du moteurs », *Techniques de l'ingénieur*, pp01-16, 1994.
- [15] : Leygonie.R, « Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures, effets ». *Pollution atmosphérique*, Juillet-Septembre, pp63-74, 1993.
- [16] : Chiron.M, Quenel.P, Zmirou.D, « La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique ». *Pollution atmosphérique*, Janvier-Mars, pp41-52, 1997.
- [17] : [http/ : www. EPA.org](http://www.EPA.org), « Questions et réponses sur la pollution par les particules fines ».

- [18]: Arthur.C, Stern, "Air pollution, air pollutants, their transformation and transport", Academic Press, Newyork, 1976.
- [19] : Renoux.A, Borland.D, Le aérosols: physique et méthodologie, Technique et Documentation, Paris, 1998.
- [20] : El-Tayeb M. H. et al.,«Source and composition of aerosols from Khartoum, Sudan», *Atm. Env.*, vol.976, N°01, pp.67-76, 1993.
- [21] : Pierre MASCLET, (professeur des universités), « pollution atmosphérique», paris, 1998
- [22] : Pierre CHARBIER de la SAULNIERE« la pollution atmosphérique », les industries, leurs productions, leurs nuisances, 1974.
- [23] : www.yvelines.fr/Routes_Transports/tram/35_tome2_ph_effets.pdf
- [24] : 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.
- [25] : BEN DADA Mehdi, « evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger » : PFE, ENP, Alger, 2006.
- [26] : Lazaradis M. et al., « Integrated exposure and dose modelling and analysis system, deposition of inhaled particles in the respiratory tract. » *Env. Sc. Tech.* Vol.35 PP 3727-3734, 2001.
- [27]: Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J, Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environ Health Perspect.* 113, 823-839, 2005.
- [28]: Holgate ST, Samet JM, Koren JM and Maynard RL. Academic Press In *Air pollution and health.* 1999.
- [29] : Brauer M, Avila-Casado C, Fortoul TI, Vedal S, Stevens B and Churg A. Air pollution and retained particles in the lung. *Environ Health Perspect.* 109, 1039-1043, 2001.
- [30] : Churg A, Brauer M, del Carmen Avilla-Casado M, Fortoul TI, Wright JL. Chronic exposure to high levels of particulate air pollution and small airway remodelling. *Environ Health Perspect.* 111, 714-718, 2003.
- [31] : Kim CS and Kang TC. Comparative measurement of lung deposition of inhaled fine particles in normal subjects and patients with obstructive airway disease. *Am J Respir Crit Care Med.* 155, 899-905, 1997.

- [32] : Hinds W. C., «Aerosol technology», Wiley Interscience, Londres, 1982.
- [33] : SELHI SOUFIANE « evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger » : PFE, ENP, Alger, 2007.
- [34] : Masclet P.C, H.Cachier, « L'aérosol atmosphérique », analysis magazine, 1998, 26, N°09 pp. 11-17.
- [35] : Brochard.D, Pairon.J.C, Bignon.J, « Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées », Pollution atmosphérique, Avril Juin, pp178-182, 1999.
- [36] : Renoux A., « Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique » Poll. Atmo., Janvier Mars, pp10-16, 1990.
- [37]: WHO, Updating and revision of the air quality guideline of atmosphère classical" où polluants, EUR.
- [38]: Pop et Al, "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective of US-adlts", Respir crit care, pp669-674, 1995.
- [39] : Colls J., Air Pollution, an introduction, Ed. E et FN SPON, London, 1997.
- [40] : Ministère de l'aménagement de territoire et de l'environnement, « Inventaire des émissions de particules primaires », Centre interprofessionnel Technique d'études de la pollution atmosphérique, Paris, 2001.
- [41] : D'après J.E. Yocom et J.B. Upham, 1976, AIR POLLUTION (édité par A.C. Stern).
- [42] : Ikawa K. O., « Trace analysis atmospheric », Edition John Wiley and Sons, London, 1997.
- [43]: Techniques de l'ingénieur, « Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X ».
- [44] : Madelaine.G, « Métrologie des aérosols », Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, pp270-274, 1998.
- [45]: Martin.J et Mayster.L.Y, « Santé et pollution de l'air », Presse Polytechniques Romandes, Suisse, 1998.

- [46]: Hovorka J. et M. Donkelaar, « Elemental composition and stable lead isotope ratios of wintertime PM-10 aerosols in Prague-centre cross-roads », 8th international symposium transport and pollution, 31 Mai-02 Juin 1999, Graz, Autriche.
- [47]: Deletraz.G.SET, Paul .Lama.E, “Etat de l’air pour l’étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes », Contrat ADEME, Mars,1998.
- [48]: Shaw .W, « La pollution par les particules atmosphériques pour la science », Octobre, PP 22-31, 1987.
- [49]: La contaminatio atmosférica a Barcelona, « Rapport annuel de ajuntament de Barcelona », Direction des services de surveillance de l’air ambiant, Avril 1997.
- [50]: Schröder .W, Dobson .M, Kane.D.M et Johnson.N.D, «Toxic trace elements associated with airborne particulate matter”, A.Review.J.Air Poll.Control Ass (JAPCA), PP 1267, 1987.
- [51]: Madelain.G, « Métrologie des aérosols », pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, PP 270-274.
- [52]: « OMS: Update and revision of air quality guidellines for Europe », "Classical" air pollutants EUR/ICP/EHAZ 94 OS/ PB01. Regional office for Europe, World Healt Organisation, Copenhegen, 1995.
- [53] Ackermann.U, Liebrich, Leuenberger, Schwartz.J, Perruchoud.AP, Braidli, Schindler et Sapaldia-Team,“Effects of long term exposure to air pollution on long fonctions”, Spaldia study Am J Respir Crit Care Med, 1994.
- [54]: Norme ISO 9855, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d’aérosols collectés sur des filtres », France, 1993.
- [55]: Y.Kerchich, « Etude de la pollution de l’air par les particules fines (Les PM-10) et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique , 2003 .
- [56]: Person A. et Al., «Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l’agglomération parisienne », Poll. Atm., N°139, pp. 75-88, 1993.
- [57]: ICP:EHAZ 94 05/ PBOI, Regional Office of Europe , Wold Heath Organisation, Copen Hagen 1995 .

[58] : JURDAP, decret n° 06-02 du 7,1-2006 définissant les valeurs limites, qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, J.O. N°1, 2006.

[59] : <http://www.un.org/apps/newsFr/storyFAr.asp?NewsID=13036&Cr=OMS&Cr1=air>.

[60] : N.OUCHER, thèse de magistère, ENP, 2006.

[61] : A.BITOUICHE, thèse de magistère, ENP, 2007.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم مستويات التلوث بالجزيئات الدقيقة ($PM-10$, $PM-3$, $PM-1$) في منطقة شبه حضرية غرب الجزائر العاصمة (بوزريعة). وقد تم تسجيل نسب متوسطة من التلوث قدرت المتوسطة منها بـ 33.50 ميكروغ/م³، فيما بلغت النسبة العالية 75.05 ميكروغ/م³. من بين المعادن الثقيلة سجلنا نسب عالية من الحديد حيث بلغت المتوسطة منها 0.44 ميكروغ/م³، التي توافق 1.3% من الجزء الكتلّي. **الكلمات المفتاحية :** نوعية الهواء، منطقة شبه حضرية، المعادن الثقيلة، الجزائر العاصمة، $PM-10$

Résumé :

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les particules fines ($PM-10$, $PM-3$ et $PM-1$) en un site semi urbain dans le West d'Alger (Bouzereah). 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 $33.50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le maximum atteint $75.05\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il en résulte une moyenne pollution par les particules inhalables.

Parmi les métaux lourds associés aux $PM-10$, c'est surtout le fer qui accuse des valeurs relativement élevées. On y mesure une teneur moyenne de $0.44\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondant à une fraction massique de l'ordre de 1.3% .

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

Abstract:

This study presents the level of air pollution by the fine particles ($PM-10$, $PM-3$ et $PM-1$) in urban site in the West of Algiers (Bouzereah). The taking away of the particles is carried out by a sampler with strong flow, HVS- $PM-10$. In this site the average daily content of $PM-10$ rises to $33.50\mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum reaches $75.05\mu\text{g}/\text{m}^3$.

In results from it an average pollution by the particles inhalable. Among the heavy metals associated the $PM-10$, it especially the iron which shows relatively high values. One measure there is an average content of $0.44\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondent with a mass fraction of about 1.3% .

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