

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

المدرسة الوطنية المتقدمة للتقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'étude

Thème :

Etude de la pollution de l'air
à Alger par les particules
fines (PM-10, PM-2,5 , PM-1)
et évaluation de l'aérosol
acide

Proposé par :

Pr. R. Kerbachi

réalisé par :

Mr. A. Bitouche

Dirigé par :

Pr. R. Kerbachi
M^{lle} F. Boumechhour

Promotion : 2001-2002

ENP : 10, Avenue Hassen Badi EL-Harrach Alger.

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude de la pollution de l'air à Alger, par les particules fines (PM-10, PM-2,5, PM-1) et l'évaluation de l'aérosol acide dans les fractions inhalable et respirable. L'étude effectuée en site urbain influencé par les émissions du trafic routier montre que la pollution particulaire est très élevée. Les teneurs moyennes mesurées s'élèvent à : PM-10 = 81,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2,5 = 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-1 = 31,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La fraction respirable constitue environ 50% des PM-10.

La majeure partie des SO_4^{2-} et NO_3^- véhiculés par les particules se retrouve dans la fraction alvéolaire (80% pour les sulfates et 60% pour les nitrates). Des corrélations linéaires plus ou moins significatives ont pu être établies.

Mots clés : Pollution atmosphérique, particules, matières particulaires PM, aérosol, acide.

Abstract :

This work is about the survey of the air pollution in Algiers, by the fine particles (PM-10, PM-2,5, PM-1) and the assessment of the acidic aerosol in inhalable and breathable fractions. The survey done in urban site influenced by broadcasts of the road traffic shows that pollution by particles is very raised. The measured middle contents rise à : PM-10 = 81,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2,5 = 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-1 = 31,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The breathable fraction constitutes about 50% of the PM-10.

The major part of the SO_4^{2-} and NO_3^- transported by particles meets in the alveolar fraction (80% for sulphates and 60% for nitrates). Some more meaningful linear correlations have been established.

Keys words : atmospheric pollution, particles, particulate matter PM, aerosol, acide.

ملخص :

مضمون هذه الأطروحة هو دراسة التلوث الجوي بالجزائر العاصمة عن طريق الدقائق الحرة: (PM-1، PM_{2.5}، PM-10) إضافة واليات تحدي التركيبة الكيميائية لهذه الجزيئات. الدراسة تمت في موقع بمنطقة حضرية قريبة من حركة المرور، وقد سجلنا نسب عالية من التلوث حيث كانت معدلات هذه الدقائق مرتفعة :
PM-1 = 31,2 µg/m³ ، PM-2.5 = 49 µg/m³ ، PM-10 = 81,6 µg/m³
إن الجزء الأكبر للتركيبية الكيميائية لهذه الدقائق معمول في الجزيئات الدقيقة ذات قطر أحفر من 2,5 µm .

كلمات مفتاح :
التلوث الجوي ، الجزيئات ، المادة الجزيئية (PM) ، الدقائق ، المحض .

Remerciements

Je remercie le prof R. Kerbach pour tous ses conseils et son grand soutien.

Je remercie également Mlle F. Boumechhour pour son aide.

Je remercie le responsable du laboratoire de la chromatographie ionique de CRD, Mr. S. Hafidh.

Comme je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à finir ce travail Rabah, Mohand, Mustapha, Billal, Nabil et Tarek.

Je remercie également les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers :

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A mes grandes mères

A toute ma famille

A tous mes amis

I – Introduction	1
II- Généralités sur la pollution de l'air par les particules	4
II.1- Nature et origine des particules en suspension	4
II.1.1- Définitions	4
II.1.2- La fraction thoracique et la fraction alvéolaire des particules fines : les PM-10 et les PM-2,5	5
II.1.3- Les principales sources des particules en suspension	7
II.1.3.1-les particules d'origine naturelle	7
II.1.3.2- Les particules d'origine anthropogène.....	7
II.1.4 - Mécanismes de formation des particules en suspension	11
II.1.4.1- Les particules primaires	11
II.1.4.2- Les particules secondaires	11
II.2- Caractéristiques des particules en suspension	16
II.2.1- Dimensions des particules	16
II.2.2- Classement granulométrique des particules en suspension	17
III.2.3 - Durée de vie des particules atmosphérique	19
II.2.4 - Comportement aérodynamique des particules atmosphériques	19
III- Effets sur la santé et sur l'environnement des particules en suspension	25
III.1- Effets sur l'être humain	25
III.2- Effets sur les animaux	31
III.3- Effets des particules atmosphériques sur les matériaux	31
III.4- Effets sur les végétaux	32
III.5- Autres effets	32

IV– Principales méthodes de mesure et d’analyse des particules en suspension	33
IV.1- Echantillonnage.....	33
IV.1.1- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique	34
IV.1.2- Prélèvement avec coupure granulométrique: Mesure des PM-10	36
IV.1.3 - Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	37
IV.2- Les filtres et membranes de rétention	38
IV.2.1 - Les filtres à fibre de verre.....	39
IV.2.2 Les filtres membranes	39
IV.3 - Analyse des particules en suspension	40
V- Méthodologie	41
V.1- Site de prélèvement	41
V.2- Mode de prélèvement	41
V.3 – Traitement et analyse élémentaire des particules fines	46
VI- Résultats et interprétations	47
VI.1- Etude des teneurs en PM-10	47
VI.2- Etude de la répartition granulométrique des particules fines : Evaluation de la pollution par les PM-2,5 et les PM-1	50
VI.3- Etude des particules respirables et leur relation avec les PM-10	55
VI.4- Ampleur de la pollution atmosphérique par les particules fines	61
VI.5- Evaluation de l’aérosol acide véhiculé par les particules inhalables et respirables	64
VI.6- Relation entre la composante acide et les particules inhalables et respirables	74
VII– Conclusion	79
Bibliographie	81

a) Les sources stationnaires :

La plupart des activités industrielles sont génératrices de la matière particulaire dans l'air.

Les industries responsables de l'émission particulaire sont :

✓ **L'industrie thermo énergétique [19]:**

La combustion introduit dans l'atmosphère plusieurs variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies,...), ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules tels que les NO_x et le SO_2 .

✓ **L'industrie sidérurgique [12] :**

Les principaux polluants issus de ce domaine sont des poussières de composition chimique variable et de granulométrie allant de 2 à 100 μm (SiO_2 , AlO_3 , CaO_2 , K_2O , ZnO , ...) et des particules fines entre autre les fumées d'oxyde de fer .

En général, ces émissions résultent des différents processus de production tels que :

l'agglomération (frittage) des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport, etc.

✓ **L'industrie des métaux non ferreux [12] :**

Elle participe à l'émission d'importantes quantités de Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Hg, etc.

Lors du raffinage de ces métaux au cours des opérations de fusion, des vapeurs métalliques se répandent dans l'air, s'oxydent et se subliment en fines particules, qui sont entraînées à de longues distances par la circulation de l'air.

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

A cause des procédés d'extraction, de transport, de broyage et de fusion des minerais la production des matériaux de construction contribue fortement à la pollution particulaire.

Les cimenteries sont des grandes émettrices de poussières, du fait de l'importance des quantités de ciment produite et des roches utilisées pour sa production.

Pour produire 1 tonne de ciment environ 2,8 tonnes de matières premières doivent être réduites à l'état de poussière [12].

✓ **L'industrie chimique :**

En générale, l'industrie chimique ne présente pas une importante source de poussières dans l'air, mais elle participe d'une façon indirecte dans la pollution particulaire par l'émission des gaz qui se transforment en particules .

Certains métaux tel que le cadmium et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques sont produits dans l'air par les raffineries de pétrole [16].

✓ **Incinération des déchets :**

L'incinération des déchets engendre l'émission de grandes quantités de particules.

Ces particules peuvent contenir d'importantes quantités de métaux tels que : fer, zinc, cadmium, plomb, mercure et d'oxydes métalliques divers dont la toxicité peut être considérable [20]. En plus de ces particules on ajoute les gaz qui se transforment, dans l'air, en particules tel le dioxyde de soufre SO₂.

b) Les sources mobiles : le trafic routier

Le parc automobile, dont le volume croit continuellement, constitue en milieu urbain la majeure source des particules [21].

En France par exemple la part de la pollution particulaire due au trafic routier s'élève à 30% de l'ensemble des émissions particulaires [22]. On estime pour ce pays une teneur moyenne des particules de 18 µg/m³ imputable uniquement au trafic routier [1].

La pollution issue de trafic routier comprend les émissions suivantes[23] :

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

La distribution des particules issues des véhicules montre un seul mode autour d'un diamètre moyen de 0,1-0,2 μm [1], d'où l'importance de l'étude des PM-1 pour appréhender les émissions du trafic routier. C'est ainsi que dans les émissions diesel, la quasi totalité du carbone élémentaire est contenu dans la fraction inférieure à 1 μm [13,23].

Les facteurs d'émission varient naturellement suivant le type du véhicule, le carburant et l'état de véhicule. Pour les véhicules catalysés et en bon état les émissions s'élèvent à 0,1 g/véhicule. Km et 0,13 g/véhicule. Km respectivement pour les PM-2,5 et PM-10. Dans ces émissions à l'échappement les rapport PM-2,5 / PM-10 s'élève à 74%. Dans les PM-2,5 le carbone élémentaire et le carbone organique constitue 80% de la masse des particules [24].

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

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

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

A l'ensemble de ces sources d'émission des particules solides (sources stationnaires et mobiles), il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère, par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules. C'est surtout le cas des sulfates et nitrates issus respectivement du SO_2 et des NO_x [18].

Globalement, l'émission de particules d'origine anthropogénique s'élève à 269.10^9 kg/an, soit environ 12% du taux des particules naturelles. L'émission directe des particules anthropogéniques s'élève seulement à 1/3 du taux global, le reste résulte de la conversion gaz/particule [6].

Tableau 1 : Vitesse de chute de quelques particules sphériques [17].

Diamètre (μm)	Vitesse de sédimentation (cm/s)
200	120
100	30
50	7
10	0,3
5	0,07
1	0,003
0,5	0,0007

Selon leur taille, les particules peuvent se comporter comme suit :

a) Cas des particules de diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$ [27]:

Lorsqu'une particule est suffisamment grosse par rapport au libre parcours moyen des molécules de gaz vecteur (l'air dans notre cas), théoriquement il est possible de prédire une trajectoire en fonction des diverses forces agissant sur elle.

Le mouvement peut être prédit en résolvant l'équation d'équilibre des forces :

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (15)$$

m : masse de la particule ;

\vec{F} : forces extérieures agissant sur la particule ;

\vec{v} : la vitesse de chute de la particule ;

C'est la loi de Stokes dont les conditions d'application sont, en fait, très limitées (vitesse de la particule très faible, inférieure à 1m/s, couche superficielle parfaitement adhérente et écoulement laminaire), qui nous permet de déterminer la vitesse de chute des particules.

La particule de diamètre d_p tombant sous l'effet de son poids, atteint sa vitesse limite de chute V_{ts} lorsque la force de viscosité équilibre la pesanteur et la poussée d'Archimède.

Donc :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0} \quad (16)$$

Les forces qui agissent sur la particule dans ce cas sont :

- La force de gravité: $P = m \cdot g = \frac{4}{3} \rho_p \pi \left[\frac{d_p}{2} \right]^3 \cdot g$ (17)

avec ρ_p : la masse volumique de la particule ;

d_p : le diamètre de la particule ;

g : le champ de gravité .

- La poussée d'Archimède : $f = \frac{4}{3} \pi \rho_a \left[\frac{d_p}{2} \right]^3 g$ (18)

où ρ_a : la masse volumique de l'air .

- La force de viscosité : $f_v = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot v$ (19)

avec μ : la viscosité dynamique de l'air .

En remplaçant dans l'équation (15), on aura :

$$V_{ts} = \frac{\rho_p \cdot g}{18 \cdot \mu} d_p^2 \quad (20)$$

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

Les concentrations moyennes ayant un effet sont résumées en tableau 5.

Tableau 5 : Concentrations moyennes des particules et effets sur la santé [41]

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

Les hausses de mortalité observées pour chaque hausse de teneur de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont comprises entre 0,5% et 1,7% environ pour le PM-10 et sont de l'ordre de 1,5% pour le PM-2,5 et de 2,2% pour les sulfates [41].

Les hausses d'hospitalisation, pour chaque hausse de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la teneur en particules vont de 0,7% à 0,8% pour les PM-2,5 et de 2% à 2,7% pour les sulfates. Ainsi les PM-2,5 et les sulfates semblent entraîner de plus fortes hausses de mortalité et de morbidité que les PM-10 [41].

L'une des plus importantes conclusions de ces études épidémiologiques est l'absence de seuil sécuritaire : il n'existe pas de concentration-seuil au-dessous de laquelle les particules n'affectent pas la santé. Des effets ont été observés en présence de faibles teneurs et ses effets

augmentent constamment à mesure qu'augmente la concentration. C'est ainsi que l'OMS ne recommande aucune norme sécuritaire pour les PM-10, PM-2,5, sulfates et nitrates.

III.2- Effets sur les animaux [39] :

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 traité dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et des modifications du pH.

III.3- Effets des particules atmosphériques sur les matériaux [17] :

Les dégradations des matériaux dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène se produit par les substances oxydantes et acides supportées par les particules solides.

La dégradation de la propriété bâtie (bâtiments, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible qui se traduit par le noircissement des façades par les dépôts de suies et de poussières. Les peintures peuvent être assombries par les dépôts de particules solides noires. Car les surfaces fraîchement peintes sont généralement collantes et retiennent les particules.

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

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

III.4- Effets sur les végétaux [15,40] :

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance.

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

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

III.5- Autres effets [42] :

En plus de leurs effets sur les êtres humains, les animaux, les matériaux et les végétaux, les particules en suspension dans l'atmosphère peuvent avoir des effets sur la transparence de l'atmosphère et le climat. En fait, l'augmentation de la teneur en particules dans l'air se traduit par une diminution de la visibilité, ce qui a des répercussions importantes sur les activités humaines, notamment en matière de transport terrestre et aérien.

Les sulfates et les nitrates, composantes importantes des PM-2,5, dispersent très efficacement la lumière et contribuent ainsi grandement à la réduction de la visibilité [41].

Les particules peuvent aussi constituer un écran pour les rayons solaires incidents, ce qui peut avoir des répercussions sur le climat en général.

Chapitre IV

Principales méthodes de mesure et d'analyse des particules en suspension

IV– Principales méthodes de mesure et d'analyse des particules en suspension :

La phase particulaire est complexe et peut être caractérisée selon trois axes :

- La masse des particules en suspension (TSP, PM-10, ...).
- Le spectre granulométrique des particules en suspension (taille, nombre et répartition).
- La nature chimique des particules en suspension.

La caractérisation des aérosols dans l'air exige le passage par les étapes suivantes :

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

IV.1- Echantillonnage:

La filtration sur filtre ou membrane est sans aucun doute la méthode la plus largement répandue pour l'échantillonnage des particules en suspension dans l'air.

Le prélèvement de ces aérosols comprend en général deux aspects :

- L'analyse pondérale qui permet d'accéder à la masse des particules par unité de volume d'air.
- L'analyse granulométrique en nombre ou en masse qui donnent des informations quant à l'origine des particules et des informations relatives aux risques d'inhalation par les êtres humains.

Le rendement granulométrique d'un prélèvement des particules en suspension (diamètre inférieur à 100 μm) n'est égale à 100% que pour les tailles approximativement inférieures à 3 μm . 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 [39].

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

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

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

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

IV.1.1- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique [12,39]:

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

On distingue, dans cette catégorie selon la taille et la nature des particules trois modes de prélèvement :

a) Méthode des fumées noires (F.N) :

Cette méthode est utilisée en principe, pour la collecte des particules de faible diamètre ($d < 10 \mu\text{m}$).

Les particules de taille inférieure à 5 μm sont collectées avec une grande efficacité.

L'échantillonnage est pratiqué à débit relativement faible (environ 80 l/h).

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

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

La durée de prélèvement est généralement de 24 heures. L'indice de fumée noire est donné en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette technique longtemps utilisée en Europe, tend à être remplacée par celle des PM-10.

b) Méthode de prélèvement sur filtre ouvert à débit moyen :

Dans ce cas, les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et rétention des particules sur un filtre ouvert de 47 mm de diamètre. Le débit d'aspiration est de l'ordre de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$. La durée d'échantillonnage est de 24 heures ou plus.

La méthode donne la teneur des particules totales en suspension (TSP) qui est, en général, supérieure à celle des fumées noires. Par cette méthode, les particules collectées sur filtre peuvent faire l'objet de toutes sortes d'analyse au laboratoire.

c) Méthode de prélèvement à très fort débit :

La méthode utilise, comme la précédente, la rétention des particules sur filtre. Toutefois les appareils sont dotés d'une pompe d'aspiration d'un très fort débit de l'ordre de $60 \text{ à } 100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ces appareils portent le nom de **High Volume Sampler, HVS**. Comme la méthode précédente ils donnent les TSP et peuvent avoir une efficacité de collecte des particules de diamètre supérieur à $10 \mu\text{m}$ qui atteint jusqu'à 25 % pour les grosses particules de $30 \mu\text{m}$. Le fort débit utilisé permet d'avoir sur une durée de 24 h de grandes masses de particules recueillies, ce qui rend aisé les analyses ultérieures de l'échantillon.

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

IV.1.2- Prélèvement avec coupure granulométrique: Mesure des PM-10 :

Il s'agit d'un équipement doté d'une tête, qui par sa conception, ne capte que les particules dont le diamètre est inférieur à une valeur fixe. En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$. 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 $< 10 \mu\text{m}$ [12].

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

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

- Méthode par radiométrie bêta [44]:

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un rayonnement bêta constitué d'électrons d'énergie 0,01 et 0,1MeV ayant traversé un filtre chargé de particules (source radioactive C14).

le filtre, après prélèvement est placé entre un émetteur de rayonnement bêta et un détecteur qui compte le nombre d'électrons qui ont traversé le filtre. La masse des particules déposées sur le filtre est d'autant plus grande que le nombre d'électrons qui traversent le filtre est faible. La mesure consiste à calculer la variation d'absorption entre le filtre vierge et celui chargé du dépôt de particule [44]. L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des

particules déposées sur le filtre. Par cette méthode, les particules collectées ne peuvent pas faire l'objet d'analyse au laboratoire.

- **Méthode TEOM ou microbalance oscillante [27]:**

La méthode Taperez Element Oscillating Microbalance, TEOM (microbalance à élément conique oscillant) est basée sur le principe de la microbalance à quartz. Elle mesure l'accumulation, en masse, des particules sur un filtre fixé sur un quartz oscillant. La variation de fréquence du quartz est utilisée pour mesurer en continu et en direct la masse des particules accumulées.

Selon la tête de prélèvement installée, cette méthode permet de mesurer les PM-10 et PM-2,5.

IV.1.3 - Les prélèvements avec fractionnement granulométrique :

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inspirables. La sélection des particules en classe granulométrique se fait par impaction d'où le nom d'impacteur.

Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen ($1,7 \text{ m}^3/\text{h}$) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ($d < 2,5 \mu\text{m}$) et la fraction trachéobronchique ($2,5 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) [27].

Les impacteurs à cascade sont équipés de 5 à 7 niveaux d'impaction et permettent d'avoir 5 à 7 fractions granulométriques (de 0 à $1 \mu\text{m}$, de 1 à $2,5 \mu\text{m}$ etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort (30 à $60 \text{ m}^3/\text{h}$).

L'appareil le plus connu est le HVS-PM10 équipé d'un impacteur d'Andersen. Il est considéré comme référence par l'agence américaine EPA [3].

Nous résumons, dans le tableau 6, les principales méthodologies de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension [39].

Tableau 6 : Principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension.

Dispositif de prélèvement	Sélection granulométrique	Nombre de fraction	Diamètre des particules (µm)	Débit (m ³ /h)	Durée de prélèvement (h)	Principe de mesure	Analyse ultérieure des particules
Sans tête (fumée noire)	Non	1	<10	<1	24	Réfléctométrie	Non
Sans tête (TSP)	Non	1	0,1 à 20-30	1,5	24	Gravimétrie	Oui
HVS (TSP)	Non	1	0,1 à 20-30	66 -100	24	Gravimétrie	Oui
HVS-PM10	Oui	1	<10	66 -100	24	Gravimétrie	Oui
Jauge-bêta	Oui	1	<10	1,5	En continu	Radiométrie	Non
HVS-PM10 impacteur à cascade	Oui	2 à 7	<10	34 - 68	24	gravimétrie	Oui
TEOM	Oui	1	<10	1	En continu	Fréquence de vibration	Non

IV.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 égale à 0,3 µm et plus.
- Une hygroscopicité faible.
- Un taux d'impuretés aussi faible que possible pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières

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

IV.2.1 - Les filtres à fibre de verre:

Ils ont une efficacité de collection de 99,9% pour les particules de diamètres supérieur à 3 μ m. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate. L'hygroscopicité de ces filtres est faible.

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. Les filtres *Gelman* type A et *whatman* GF-A par exemple contiennent plus de 50 μ g Zn/cm².

IV.2.2 Les filtres membranes :

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

Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité de l'ordre 8 μ m. Ces fibres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques. Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utiliser dans les HVS pour les prélèvements à fort débit.

Avec les deux types de filtres (filtres en fibres de verre et filtres membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0.1 μ m de diamètre.

IV.3 - Analyse des particules en suspension [11,27]:

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

- La composante acide est déterminée, généralement, par :
 - La chromatographie ionique.
 - La spectrométrie UV-visible.

- Les éléments métalliques sont déterminés par diverses méthodes classiques :
 - La spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A).
 - Emission par plasma.
 - Fluorescence x.
 - Méthodes nucléaires.

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

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

V- Méthodologie :

Dans ce chapitre relatif au protocole expérimental, nous allons présenter le site étudié, le mode de prélèvement et la méthode d'analyse utilisée.

V.1- Site de prélèvement :

Pour étudier les particules fines en suspension dans l'air en milieu urbain, ainsi que la composante acide associée à ces particules, on a choisi un site de prélèvement de type « site de proximité » c'est à dire un site qui est directement influencé par les sources émettrices en l'occurrence le trafic routier.

Le site retenu est situé à l'Ecole Nationale Polytechnique à environ 10Km à l'est d'Alger et à proximité d'un important axe routier, la route nationale N°5 (RN5). Cette route fait l'objet d'un intense trafic routier. En ce site, le poste de prélèvement est implanté sur les salles de cours du département génie chimique à 4m d'altitude et à environ 9m du bord de la route RN5. Le site est caractérisé par une absence d'obstacles ce qui permet une bonne circulation de l'air.

A noter l'absence d'installations industrielles émettrices de particules à proximité de ce site.

V.2- Mode de prélèvement :

En vue de suivre l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10, 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 $10\mu\text{m}$ est en plus doté d'un système de fractionnement granulométrique à plusieurs étages d'impaction.

Ce dispositif est composé essentiellement de trois parties essentielles (figure 4) :

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

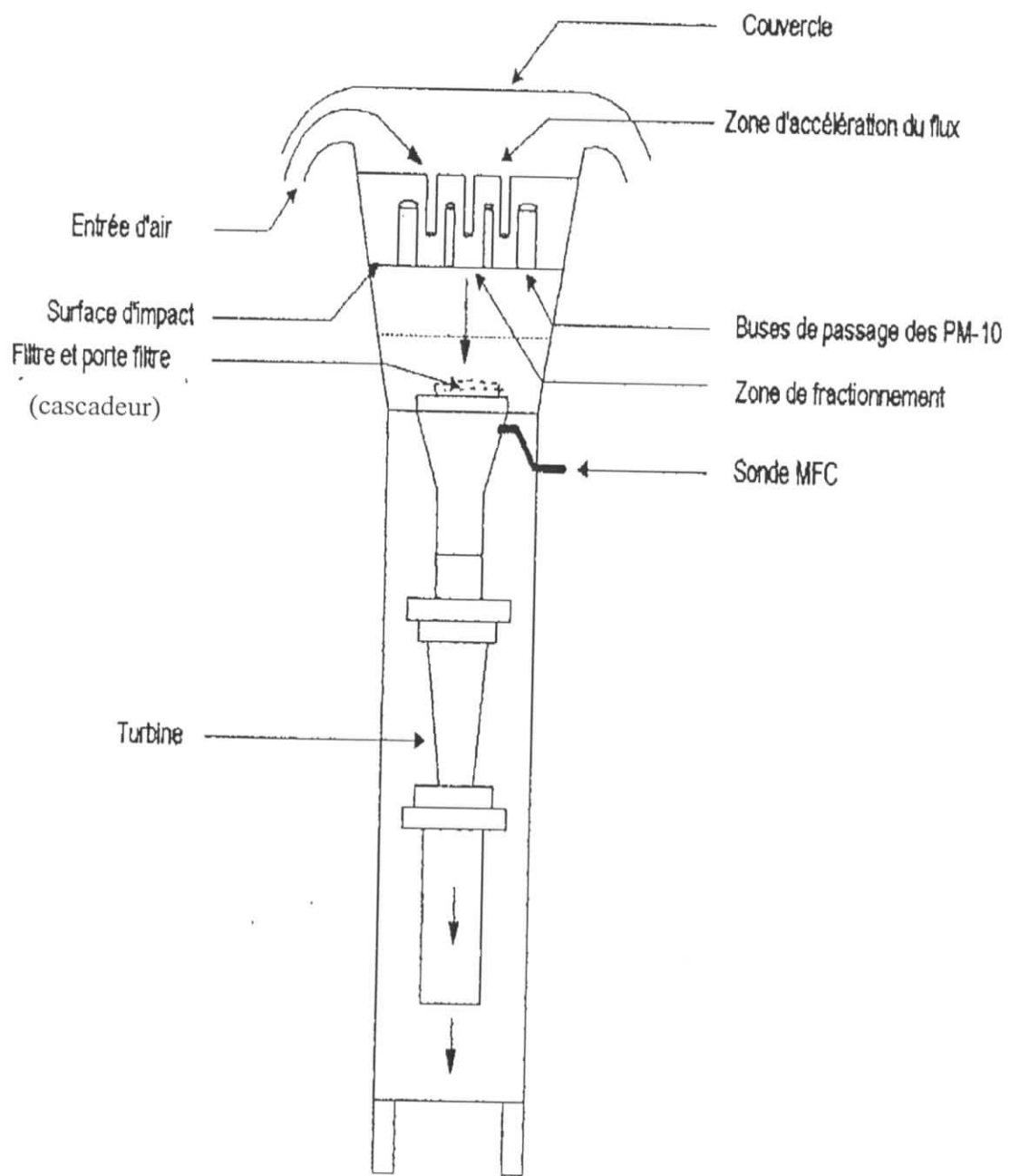


Figure 4- Schéma du principe du collecte des PM-10 par l'échantillonneur HVS-PM-10.

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

- ◆ D'une turbine d'aspiration d'air.
- ◆ D'un conduit d'aspiration.
- ◆ Des étages de sélection qui servent comme porte-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.
- ◆ D'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 par colmatage du média filtrant est automatiquement corrigée.

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

Le cascadeur d'Andersen est équipé de quatre étages et permet d'accéder aux classes granulométriques présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Etage et classe granulométrique correspondant.

Etage	Classe granulométrique (μm)
1	>7
2	>3
3	$>1,5$
4	>1

Ainsi on résume en figure 5 les différentes classes granulométriques étudiées par cet appareil.

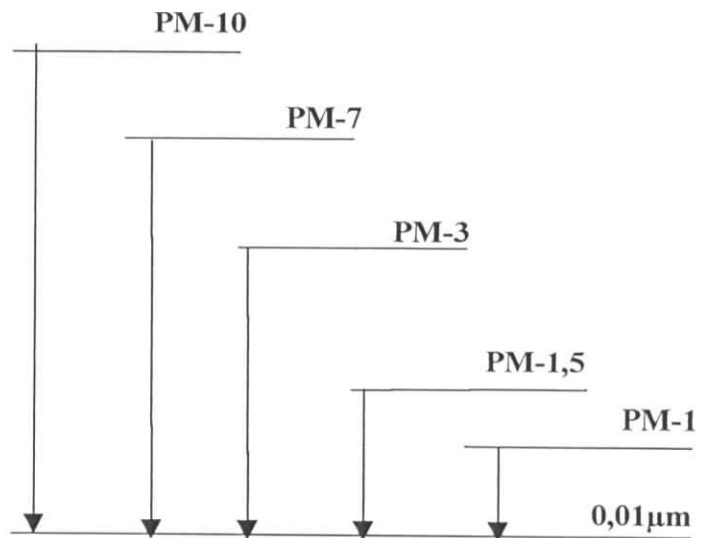


Figure 5 – classes granulométriques recueillies par cet échantillonneur.

Nous présentons, en figure 6, un schéma simplifié de mode d'échantillonnage.

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

Les filtres utilisés pour la rétention des particules sont en fibres de verre de type Whatman.

Les filtres utilisés pour le fractionnement sont de dimensions $12\text{cm} \times 12\text{cm}$, le filtre de rétention final est de dimensions $20\text{cm} \times 25\text{cm}$. Pour déterminer les teneurs en particules fines, les filtres sont pesés avant et après collecte à $0,1\text{ mg}$ près. Le résultat est ensuite exprimé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

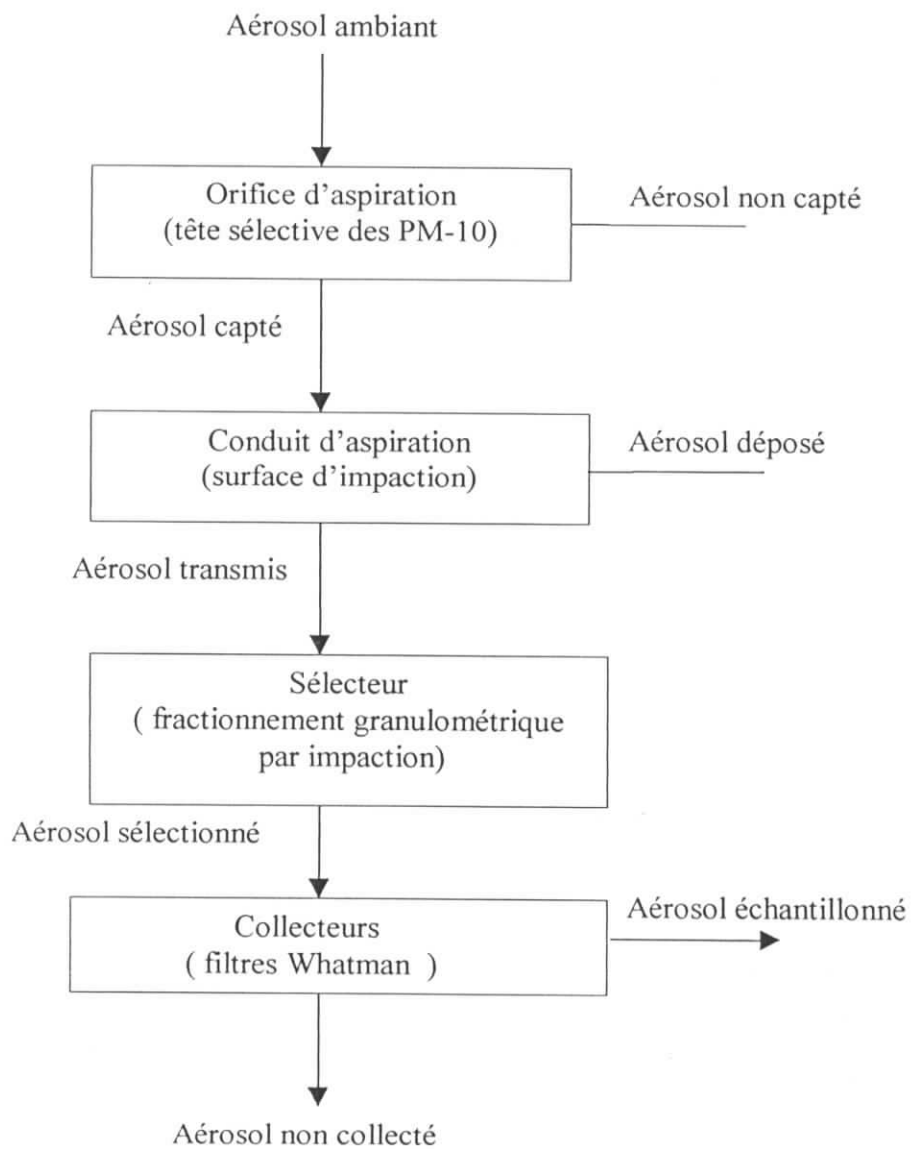


Figure 6 – schéma simplifié de mode d'échantillonnage.

V.3 – Traitement et analyse élémentaire des particules fines :

Afin d'analyser les sulfates et nitrates correspondants à la composante acide des particules fines, on procède à une extraction des particules collectées sur les fractions granulométriques PM-10 et PM-3..

Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 ml contenant 100ml d'eau dionisée.

Le mélange est mis sous agitation pendant une heure à température ambiante. La solution est en suite filtrée sur un filtre (Gelman) de porosité 0,45 μm . Afin d'éviter la perte des composés semi-volatils tels que les nitrates d'ammonium et inhiber l'activité microbienne, on conserve le filtrat à une température de 4°C.

A noter que la vitesse d'agitation est maintenue constante pour tout les échantillons pour avoir le même degré d'extraction.

Après extraction l'analyse des nitrates et sulfates est effectuée par chromatographie ionique (appareil chromatographe ionique Adionex dx100) avec un détecteur conductimètre (Anion micromembrane supressor-11 (MMMS)).

VI- Résultats et interprétations :

Le suivi des teneurs en PM-10 et des diverses classes granulométriques a été effectué au niveau de l'ENP, en bordure de la RN5.

Les prélèvements ont été menés durant la période allant du 27 janvier au 21 juin 2002.

Cette campagne de mesure nous a permis de recueillir plus de 80 échantillons de fractions de particules (PM-10, PM-7, PM-3, PM-1,5 , PM-1).

VI.1- Etude des teneurs en PM-10 :

L'évolution temporelle des teneurs en PM-10 enregistrée durant notre campagne de collecte, est illustrée en figure 7.

On y relève une importante fluctuation temporelle. La teneur minimale enregistrée est de $45,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tandis que le maximum s'élève à $119,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La teneur moyenne, calculée sur l'ensemble des observations, est de $81,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une déviation standard de $22,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il est important d'indiquer la valeur statistique perceptible 95 qui s'élève, ici, à $115,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le tableau 8 résume les teneurs extrêmes et moyennes en PM-10 observées en ce site.

Tableau 8 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM-10

Paramètre	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Maximum	119,3
Minimum	45,7
Moyenne	81,6
Ecart type	22,8
P95	115,6

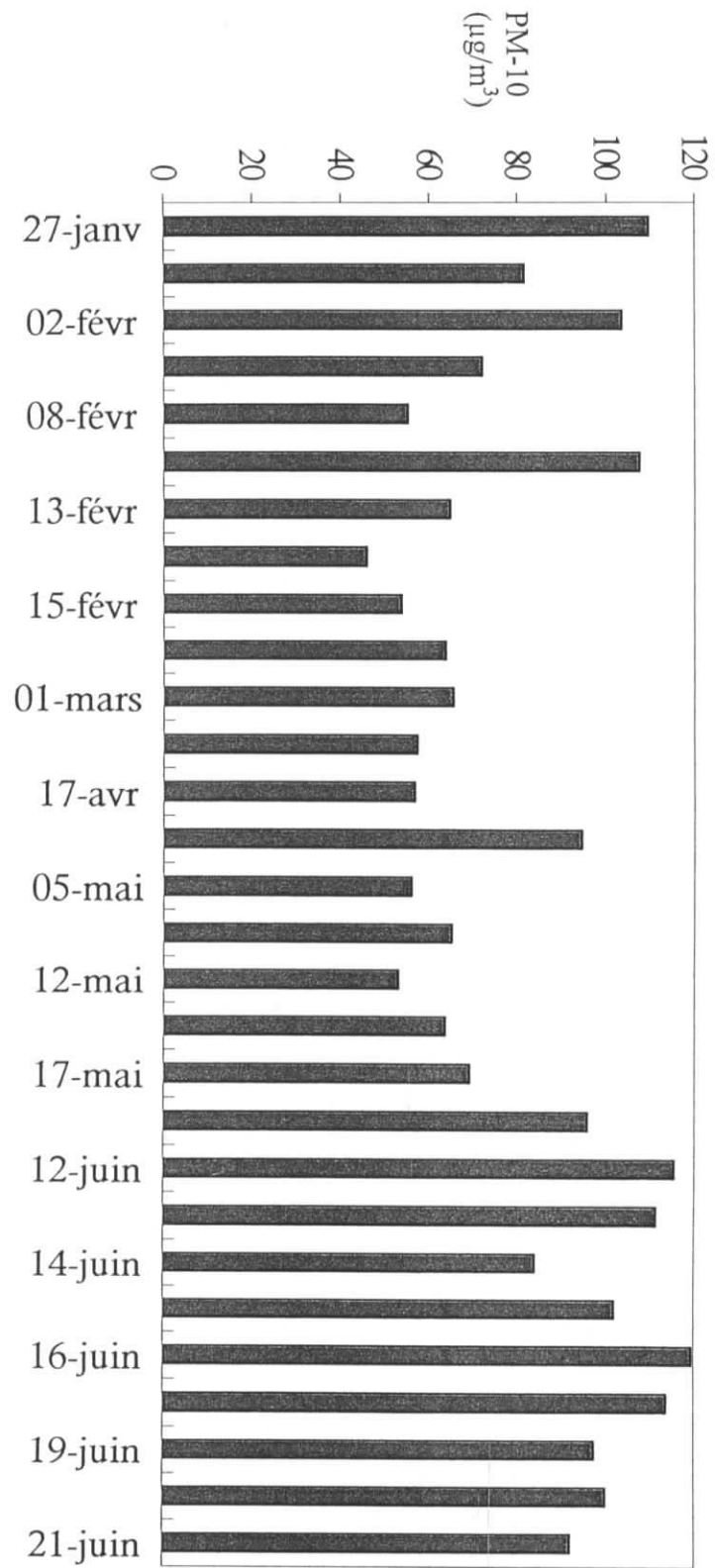


Figure 7 : Evolution temporelle des teneurs en PM-10

Dans les gaz d'émission des véhicules et avant dilution dans l'air ambiant, ce rapport s'élève à environ 70% [24].

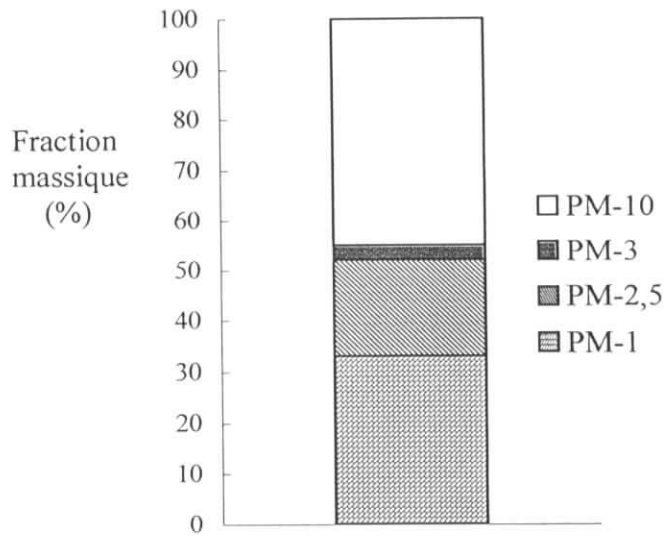


Figure 13 : Fractions massiques des particules respirables PM-1 et PM-3 par rapport aux particules inhalables.

b) Corrélation entre PM-1, PM-3 et PM-10 :

L'examen des teneurs journalières (figure 14) montre que les PM-1, PM-3 et PM-10 suivent une évolution similaire. C'est particulièrement le cas des PM-1 et PM-3 qui varient dans le même sens. Cette similitude dans l'évolution indique que ces particules ont en grande partie la même origine, le trafic routier dans notre cas. Dans le cas des PM-10, il faut considérer aussi la source représentée par l'écorce terrestre.

Dans l'étude des corrélations entre les PM-1 et les PM-10 ; PM-3 et PM-10 et PM-1 et PM-3 (figure 15, 16 et 17), on constate que les PM-1 sont plus ou moins indépendants des PM-10 (une forte teneur en PM-10 n'induit pas automatiquement une forte teneur en PM-1).

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

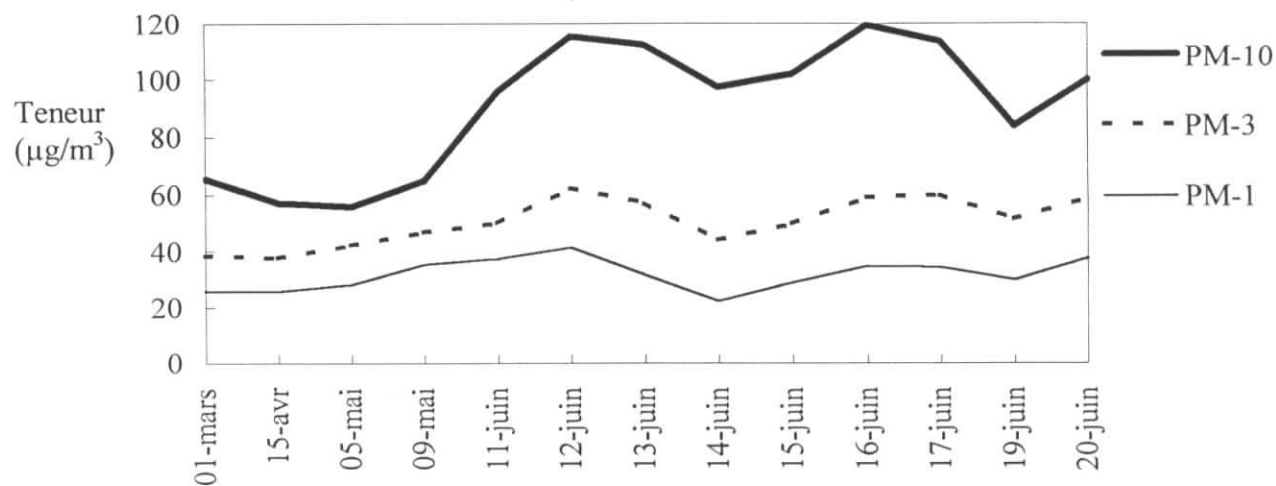


Figure 14 : Evolution des teneurs en particules fines PM-10, PM -3 et PM-1.

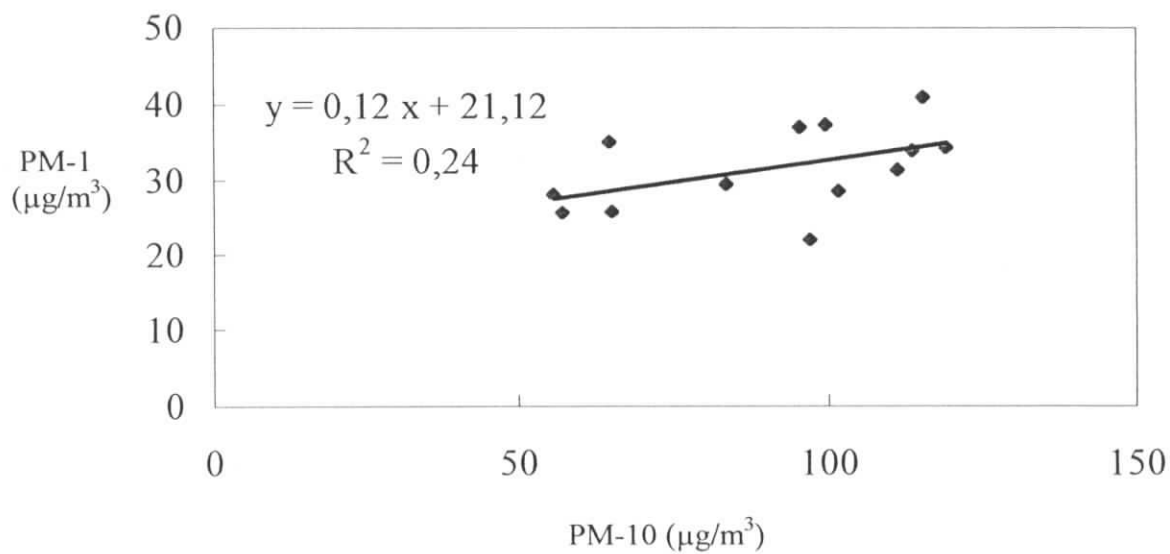


Figure 15 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-10.

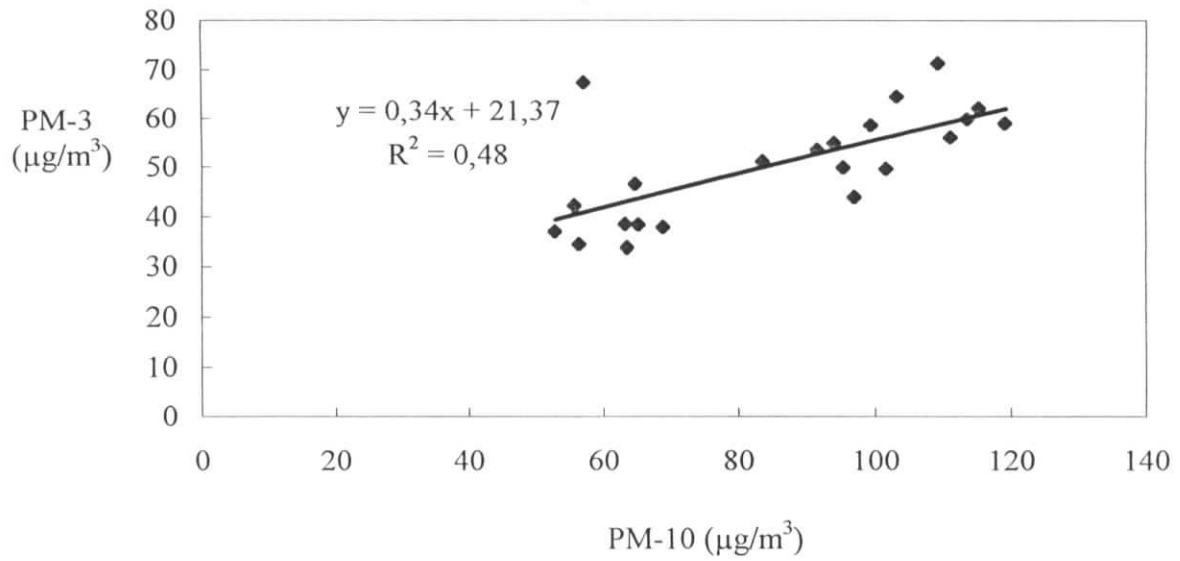


Figure 16 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3 et PM-10.

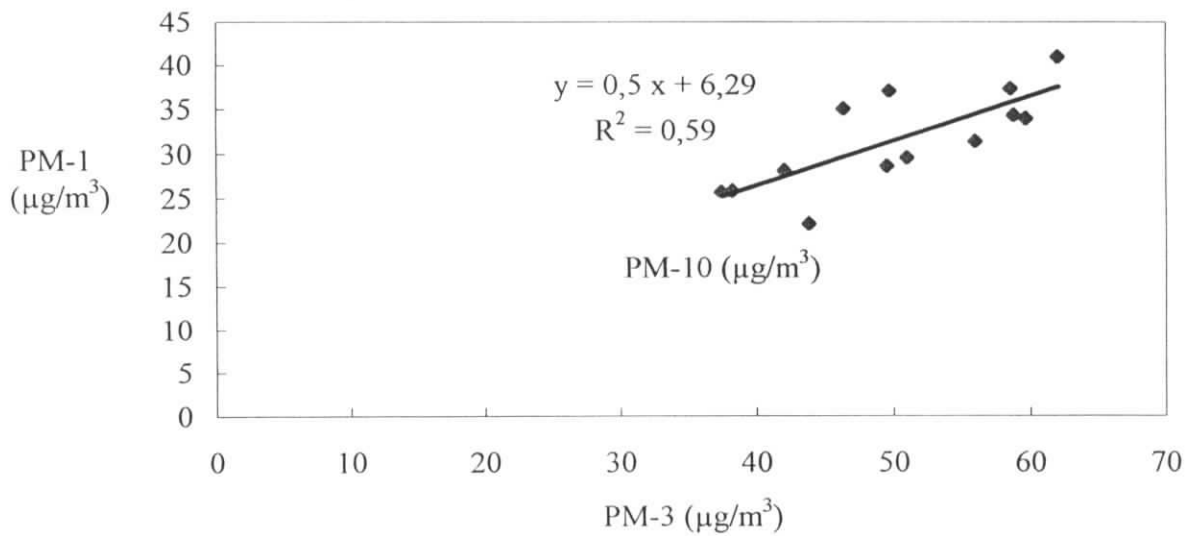


Figure 17 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-3.

VI.4- Ampleur de la pollution atmosphérique par les particules fines :

Afin d'estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurées à Alger, il est utile de comparer les niveaux observés aux normes et valeurs guides internationales et de les situer par rapport aux taux mesurés dans d'autres villes du monde.

La réglementation sur les PM-10 est très récente et dans certain pays elle est encore à l'état de projet. Cette nouvelle réglementation remplace en fait celle relative aux TSP (particules totales en suspension). En ce qui concerne les PM-2,5 dont l'étude remonte seulement à quelques années, les seuils admissibles sont encore à l'étude et ne sont définitivement adoptés qu'aux USA.

Nous résumons en tableau 12 les normes et valeurs guides des PM-10 en vigueur dans certains pays.

Parallèlement à ces normes, Airparif qui gère un vaste réseau de surveillance en Ile de France recommande les limites d'exposition suivantes [43] :

PM-10 : 25 – 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

PM-2,5 : 15 – 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les normes américaines relatives aux PM-2,5 qui ont été adoptées en 1977 [46] sont plus complexes et s'énoncent comme suit :

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

65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Valeur limite journalière (moyenne sur trois années des PM-98).

La comparaison présentée en tableau 13 entre les teneurs en PM-10 et PM-2,5 mesurées à Alger et celles relevées dans certaines villes, montre aussi qu'Alger accuse en site de proximité un taux très élevé en particules inhalables (PM-10) et alvéolaires (PM-2,5).

Tableau 12 : Normes et valeurs guide régissant les PM-10

Pays	Valeur limite en $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Référence
Etats-Unis	150 50	Maximum journalier (p99 sur 3 ans) Moyenne annuelle des teneurs journalières (sur 3 ans)	[46]
Union Européenne - Jusqu'à 2005	50 30	Limite journalière à ne pas dépasser plus de 25 fois par an Moyenne annuelle	[47 ,48]
- Jusqu'à 2010	50 20	Limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an Moyenne annuelle	
Suisse	50 20	Moyenne sur 24 heures Moyenne annuelle	[49]
Suède	100	P98 de moyennes sur 24h	[49]
OMS	Pas de normes. Il n'y a pas de seuils admissibles		[34]

Tableau 13 : Teneurs atmosphériques en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes.

Villes	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observations	Références
Arnheim (Hollande)	74,5	42,9	Moyenne sur un moi mesurée à 1 m de la route	[2]
Paris	28 – 39	-	Selon le site	[13]
Barcelone	49,8	-	Site urbain	[50]
Marseille	29	-	Site urbain	[51]
Prague	105	-	Site de proximité, intersection de routes (mesure sur 5 mois)	[52]
Mexico	-	96,4	Site de proximité (mesure sur 2 mois)	[53]
Edmonton (Canada)	25	9	Site urbain	[45]
Montréal	28 – 45	16 – 30	Teneur dépendant des sites	[45]
Alger	82	49	Site de proximité (mesure sur 3 mois)	Présente étude

VI.5- Evaluation de l'aérosol acide véhiculé par les particules inhalables et respirables :

Le potentiel de nuisance qu'exercent les particules fines sur la santé dépend de la taille des particules mais aussi des composés chimiques qui leur sont associés. Dans ce contexte il a été montré que l'aérosol acide composé essentiellement de particules de sulfates et de nitrates accentue le pouvoir nocif des particules.

Rappelons que cet aérosol provient de sources primaires et de sources secondaires. Dans ce dernier cas les précurseurs sont les gaz SO_2 et NO_x émis par les activités humaines (combustion, transport, etc.).

Aussi et afin de cerner le problème de la pollution particulaire sous ses divers aspects, nous avons évalué les teneurs atmosphériques en SO_4^{2-} et NO_3^- véhiculés par les PM-10 et PM-3. A cet effet, les sulfates et nitrates particulaires ont été analysés dans 10 échantillons de PM-10 et 10 échantillons de PM-3.

Les résultats obtenus sont illustrés en figure 18 et 19 qui retracent respectivement les teneurs atmosphériques en SO_4^{2-} véhiculés par les PM-10 et PM-3 et les fractions massiques correspondantes.

Les résultats de l'étude des nitrates sont présentés de la même manière en figure 20 et 21.

Les tableaux 14 et 15 et les figures 22 et 23 synthétisent les teneurs et les fractions massiques moyennes des sulfates et nitrates calculées sur l'ensemble des échantillons étudiés.

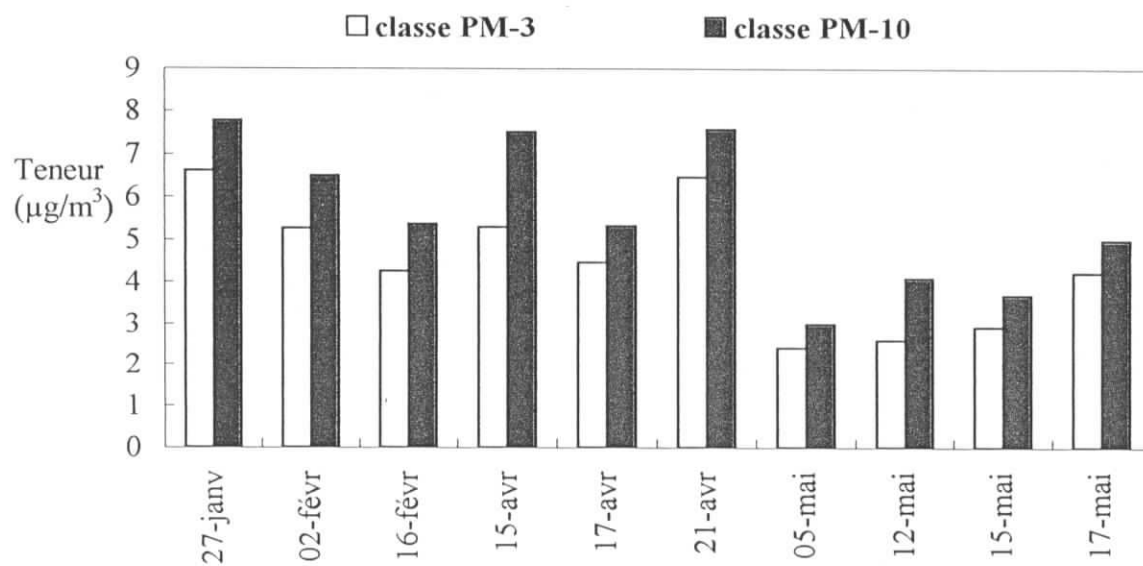


Figure 18 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en sulfates associés aux PM-3 et PM-10

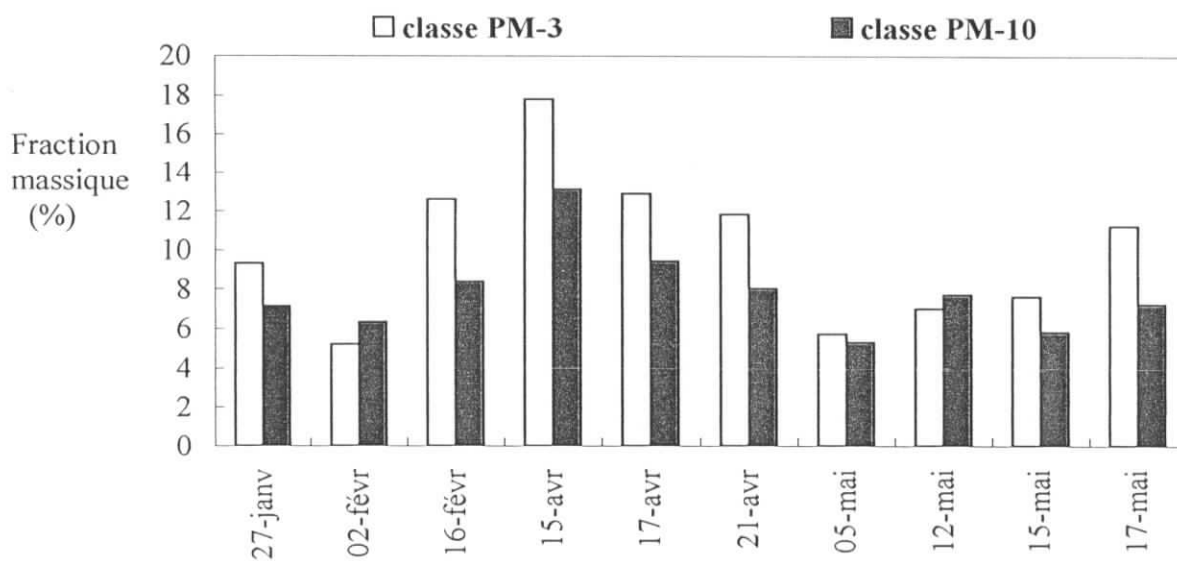


Figure 19 : Evolution temporelle de la fraction massique des sulfates associés aux PM-3 et PM-10

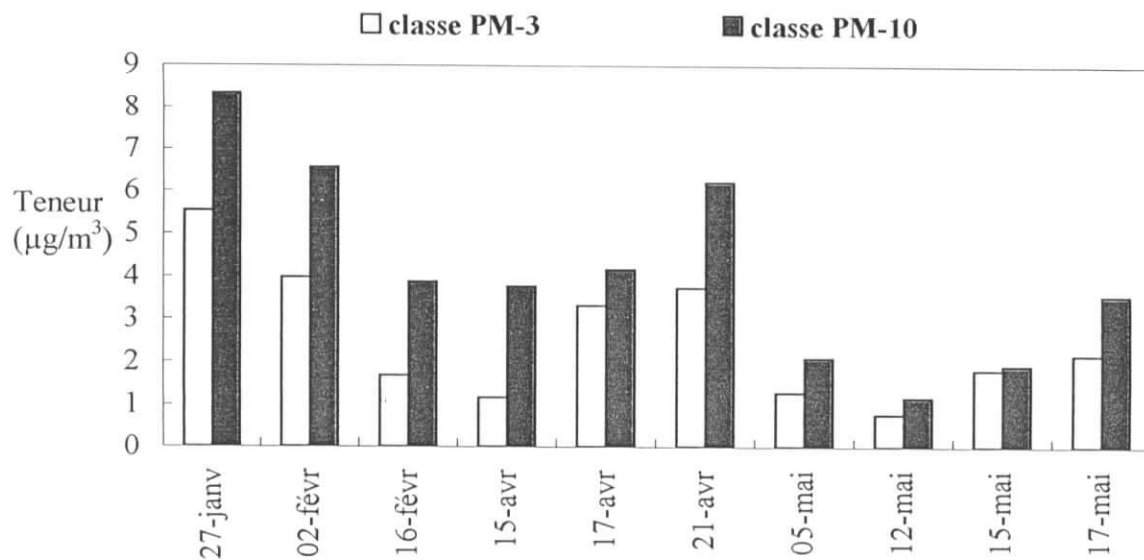


Figure 20 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en nitrates associés aux PM-3 et PM-10

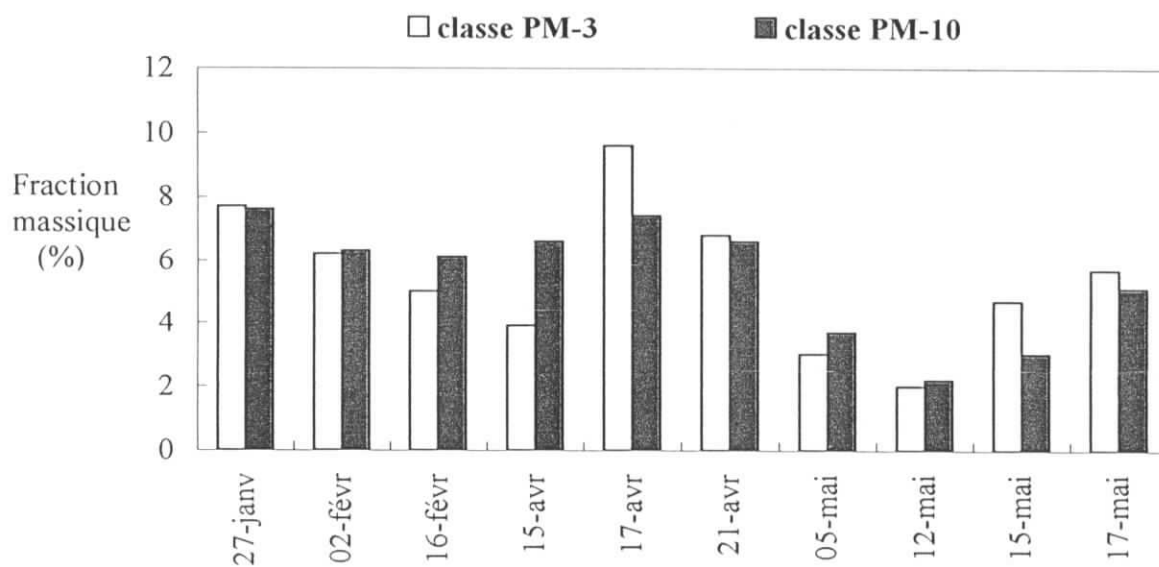


Figure 21 : Evolution temporelle de la fraction massique des nitrates associés aux PM-3 et PM-10

Tableau 14 : Valeurs moyennes et extrêmes des sulfates associés aux PM-10 et PM-3.

Valeur	SO ₄ ²⁻ en (µg/m ³) dans :		Fraction massique en (%) par rapport à :	
	PM-3	PM-10	PM-3	PM-10
Minimum	2,4	3	5,2	5,3
Maximum	6,6	7,8	17,8	13,1
Moyenne	4,5	5,6	10,1	7,8
Ecart type	1,5	1,7	3,9	2,2

Tableau 15 : Valeurs moyennes et extrêmes des nitrates associés aux PM-10 et PM-3.

Valeur	NO ₃ ⁻ en (µg/m ³) dans :		Fraction massique en (%) par rapport à :	
	PM-3	PM-10	PM-3	PM-10
Minimum	0,8	1,2	2	2,2
Maximum	5,5	8,3	9,6	7,6
Moyenne	2,5	4,2	5,5	5,5
Ecart type	2,3	1,5	2,3	1,9

On constate que quelque soit la classe de particules et le composé étudié, les teneurs mesurées oscillent dans un large intervalle où l'écart entre le minimum et le maximum est assez important.

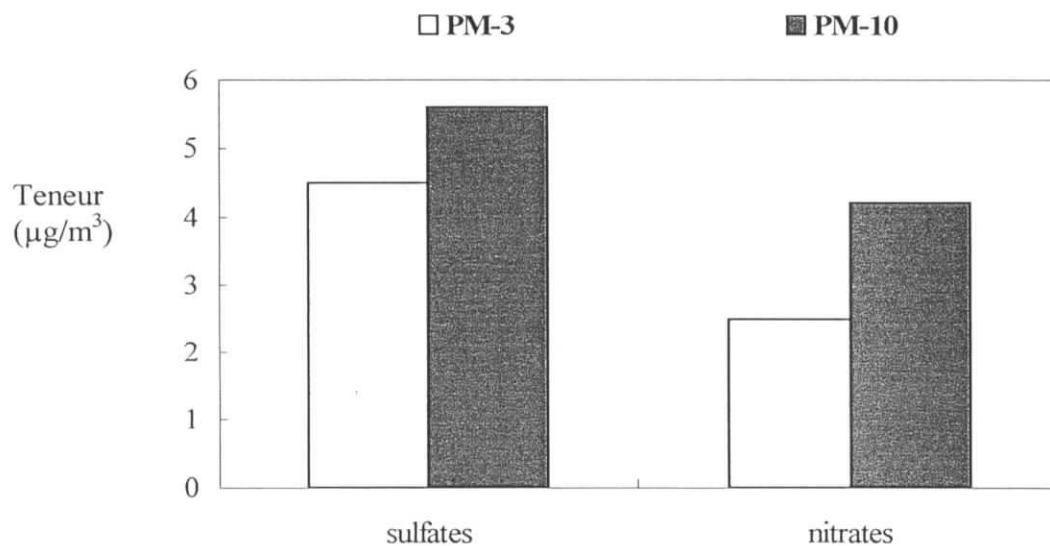


Figure 22 : Teneurs moyennes en sulfates et nitrates associés aux PM-3 et PM-10.

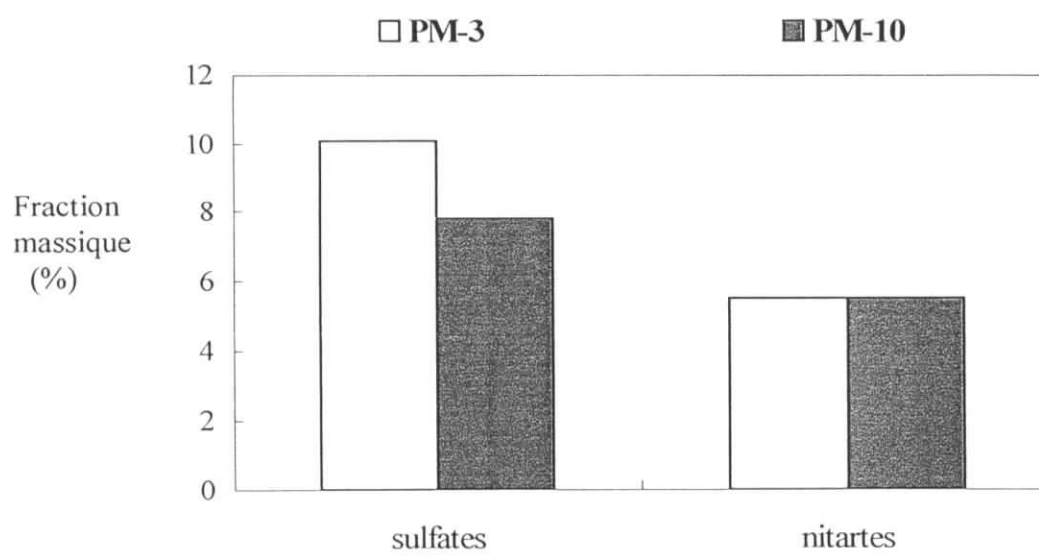


Figure 23 : Fraction massique moyennes des sulfates et nitrates associés aux PM-3 et PM-10.

a) Sulfates et nitrates dans les PM-10 :

Dans les PM-10, la teneur moyenne en sulfates s'élève à environ $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour les nitrates ce taux est de l'ordre de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figure 22).

Les sulfates constituent ainsi environ 8% (figure 23) de la masse des PM-10 et les nitrates environ 6%.

Les teneurs en sulfates sont généralement supérieures à celle des nitrates, de façon que le rapport $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ est supérieur à l'unité.

A Alger, au site étudié, on obtient $\frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{NO}_3^-]} = 1,3$.

Dans des études effectuées au Canada, ce rapport s'élève à 2,4 [45].

A Sfax, en Tunisie, en site influencé par le trafic routier, on observe des teneurs similaires à celles mesurées à Alger, soit $8,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les sulfates (ou $2,7 \mu\text{g S}/\text{m}^3$) et $3,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour

les nitrates (ou $0,85 \mu\text{g N}/\text{m}^3$) et $\frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{NO}_3^-]} = 2,2$ [54].

Si on considère, comme c'est proposé par plusieurs auteurs [25,42], que les sulfates et nitrates sont présents sous forme de sels de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et NH_4NO_3 (forme préférée des ions SO_4^{2-} et NO_3^-), on calcule une teneur globale en NH_4^+ de $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La composition globale de l'aérosol acide qui en résulte est donné en figure 24.

Dans les PM-10, la composante acide correspond ainsi à une fraction massique de 19,6% ($7,8\% \text{SO}_4^{2-}$, $5,5\% \text{NO}_3^-$ et $6,6\% \text{NH}_4^+$).

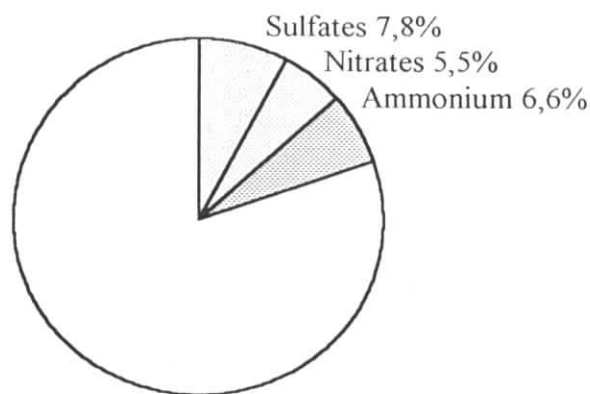


Figure 24 : Composition de l'aérosol acide dans les PM-10

b) Sulfates et nitrates dans les PM-3 :

La teneur moyenne en sulfates véhiculés par la fraction PM-3 s'élève à $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle est de $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les nitrates. Le rapport $\left(\frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{NO}_3^-]} \right)_{\text{PM-3}} = 1,8$.

Il est plus élevé que dans les PM-10.

Au Canada, on a observé un rapport de l'ordre de 3,2. Il ne s'élève plus qu'à 0,25 dans l'ouest des USA [45].

On constate par ailleurs que les PM-3 sont plus riches en sulfates (la fraction massique passe de 7,8% dans les PM-10 à 10,1 dans les PM-3) alors que pour les nitrates cet enrichissement est plus faible et les fractions massiques sont équivalentes (figure 23). Il y a peut être un apport de l'écorce terrestre de particules grossières de nitrates de diamètre supérieur à $3\mu\text{m}$.

Il est important de considérer maintenant la répartition des sulfates et nitrates sur les fractions inhalable et respirable.

L'examen du rapport des teneurs en sulfates et en nitrates dans les PM-10 et PM-3 donne :

$$\frac{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{PM-3}}}{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{PM-10}}} = 0,8$$

Ce résultat signifie que 80% de l'ensemble des sulfates sont présents dans la fraction fine des particules et ont donc un diamètre inférieur à $3 \mu\text{m}$. Ils peuvent profondément pénétrer dans les alvéoles pulmonaires.

Dans le cas des nitrates le rapport $\frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{PM-3}}}{[\text{NO}_3^-]_{\text{PM-10}}}$ s'élève à 61% et signifie que, comme pour

les sulfates, la majorité du nitrate particulaire se retrouve aussi dans la fraction alvéolaire (figure 25).

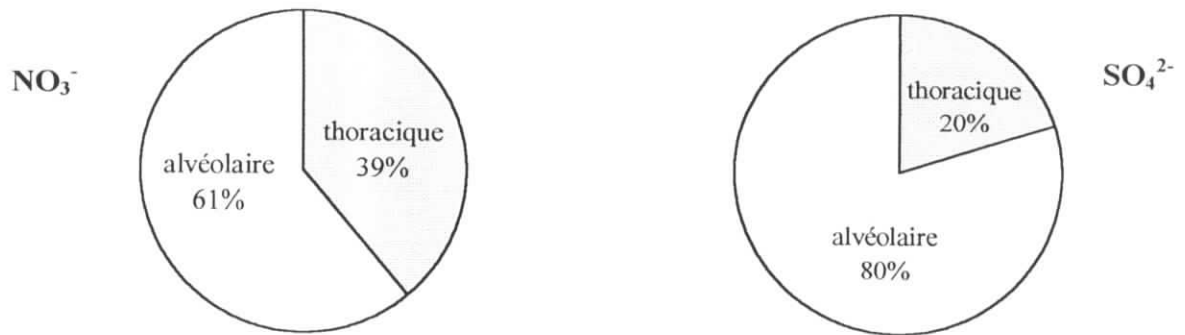


Figure 25 : répartition des teneurs sulfates et nitrates dans les fraction alvéolaire (PM-3) et thoracique (PM₃₋₁₀).

Cette répartition confirme le résultat d'autres chercheur qui aboutissent à une répartition prépondérante de l'aérosol acide sur la fraction alvéolaire de particules en suspension dans l'air [45, 54].

Ainsi, en milieu urbain influencé par le trafic routier, l'aérosol acide primaire et secondaire constitue une composante essentielle des particules respirables et c'est dans cette fraction que devait être focalisée son étude.

A ces teneurs en sulfates et nitrates dans les PM-3, correspond une teneur globale en NH_4^+ de $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (calculée par rapport aux sels de $(\text{NH}_4^+)_2 \text{SO}_4$ et $\text{NH}_4 \text{NO}_3$).

La composition globale de l'aérosol acide véhiculé par les PM-3 est illustrée en figure 26.

La composante acide s'élève globalement à 21% de la masse globale des PM-2,5. D'après la bibliographie, les 70 – 80% restant sont constitués de carbone élémentaire et de carbone organique. Une très faible fraction est représentée par des minéraux insolubles [25,45].

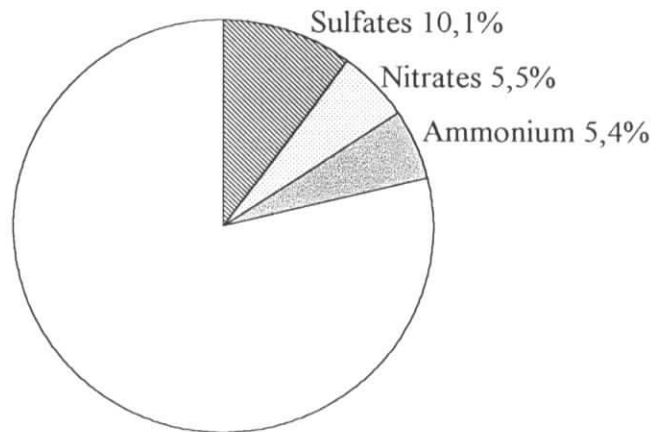


Figure 26 : Composition de l'aérosol acide dans les PM-3

Une comparaison avec les teneurs mesurées dans d'autres pays (tableau 16) montre qu'à Alger les teneurs atmosphériques en SO_4^{2-} et NO_3^- associés aussi bien aux PM-10 qu'aux PM-2,5, sont plus ou moins comparables à celles qu'on rencontre dans un certain nombre de régions européennes et autres.

Les teneurs en sulfates ne sont pas très élevées car les combustibles algériens (pétrole, gaz, essence, diesel) ne sont pas riches en soufre. Les teneurs en nitrates par contre peuvent atteindre en été, où la photochimie est plus intense, des niveaux plus élevés que ceux relevés durant cette étude.

- [10] Renoux A.: Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique. Poll. Atm., Janvier-mars, pp 10-16, 1990.
- [11] Stern A. C. et al., Fundamentals of air pollution, 2^{ème} édition, Academic Press, London, 1984.
- [12] Kerbachi R., Cours de pollution atmosphérique 5^{ème} année, ENP, Alger, 2002.
- [13] La qualité de l'air en France en 1995-96, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Editions ADEME, Paris, 1998.
- [14] Hamidi I., Etude de la pollution de l'air par les particules fines, les PM-10, à Alger, PFE, ENP, Alger, 1999.
- [15] Martin J., L. Y. Mayster, Santé et pollution de l'air, Presses polytechniques Romandes, Suisse, 1988.
- [16] Barnea M., Ursu P., Pollution de l'atmosphère et protection d'écologie, Edition Eyrolles, Paris, 1974.
- [17] Detrie J. P., La pollution atmosphérique, Dunod, Paris, 1969.
- [18] Ramade F., Elément d'écologie : action de l'homme sur la biosphère, MC Graw Hill, Paris, 1982.
- [19] Dang C., T. P. Fontelle et R. Leygonie: Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission. Poll. Atm., Janvier-mars, pp 38-46, 1990.
- [20] Brumer P. H. : Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères. Poll. Atm., Juillet-septembre, pp 301-308, 1988.
- [21] Brochard D. et al. : Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées. Poll. Atm., Avril-juin, pp178-182, 1999.

- [22] Degobert P. : Pollution atmosphérique : origine et réduction des émissions au niveau moteur. Techniques de l'ingénieur, B2710, pp 1-16, 1994.
- [23] Kleeman M. J., J. P. Schauer et G. R. Cass : Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles. Env. Sc. Tech., Vol. 34, N°7, 2000.
- [24] Gillies J. A., A. W. Gertler, J. C. Sagebiel et W. A. Dippel : On road particulate matter (PM-2,5 and PM-10) emissions in the sepulveda tunnel, Los Angeles, California. Env. Sc. Tech., Vol.35, N°6, 2001.
- [25] Zannetti P., Air pollution modelling theories, computational methods and available software, Computational mechanics publication, 1990.
- [26] Ramade F., Elément d'écologie : écologie appliquée, MC Graw Hill, Paris, 1982.
- [27] Renoux A. et D. Borlaud, Les aérosols : physique et méthodologie, Techniques et documentation, Paris, 1998.
- [28] Hinds W. C., Aerosol Technology, Wiley Interscience, London, 1982.
- [29] Joumard R. : quels polluants ? contribution des transports, Poll. Atm., Juillet-septembre, pp 5-8,1989.
- [30] Achiouane H., Etude des particules en suspension en milieu urbain, PFE, ENP, Alger,1996.
- [31] Assailly A. : Les poussières. Que sais je ?, N° 717, 1956.
- [32] Lazaridis M. et al. : Integrated exposure and dose modeling and analysis System. 3. deposition of inhaled particles in the human respiratory tract. Env. Sc. Tech., Vol. 35, N°18, pp 3727-3734, 2001.
- [33] Klassen et al., Casarett and Doull's toxicology, The basic science of poisons, 3^{ème} édition, pp343, 1986.

- [34] OMS : Update and revision of air quality guidelines for Europe, WHO regional publications, European Series, Copenhagen, 1997.
- [35] Ackermann-Lieblich U. et al : Effects of long term exposure to air pollution on lung function. SAPALDIA-Study, Am. J. Respir. Crit. Care Med.; 149/4, :A663, 1994.
- [36] Zemp E. et al. : Long term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms. SAPALDIA-Study, Am. J. Resp. Crit. Care Med.; 149/4 : A662, 1994.
- [37] Braun-fahrlander C. et al., : Respiratory symptoms and exposure to long term air pollution and climate in swiss schoolchildren. Am. J. Resp. Crit. Cure Med., 1996.
- [38] Dockery D. W. et al. : Effects of inhaled particles on respiratory heald of children. Am. Rev. Respir. Dis, pp 138; 587-594, 1989.
- [39] Coviaux F. Petit, A. Person et Y. Le Moullec : Connaissance atmosphérique. Poll. Atm., Janvier-mars, pp 21-30, 1990.
- [40] Fiala J. : Qualité de l'air en milieu urbain. Naturoipa, N°94, pp10, 2000.
- [41] Environnement Canada, les particules de l'air ambiant _ vue d'ensemble, Février 1998, Quebec.
- [42] Elichegaray C. : Aérosols et visibilité, aérosols et climat. Poll. Atm., Janvier-mars, pp 7-9, 1990.
- [43] Airparif, surveillance de la qualité de l'air de l'Ile de France, Actualité N°1, Avril 1998.
- [44] Shaw R. : La pollution par les particules atmosphériques. Pour la science, Octobre 1987, pp 7-9.

- [45] Cheng L. et al : Characteristics of inhalable particulate matter in Alberta cities. *Atm. Env.*, Vol.32, N°22, pp 3835-3844, 1998
- [46] US-EPA, National ambient air quality standards (NAAQS) for particulate matter, *Federal register* vol.62, N°138, 1997.
- [47] Commission Européenne, Législation réglementaire, *Poll. Atm.*, Janvier-mars, pp 13-16, 1998.
- [48] Mathé F. et al., La mesure des particules en suspension dans l'air ambiant : application dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air, *Analysis magazine*, 26, N°9, 1998, pp 27-33.
- [49] Cahier de l'environnement, publication de l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFEP) N°270, 1996, Berne – Suisse.
- [50] La contaminació atmosfèrica a Barcelona, Rapport annuel de ajuntament de Barcelone, Direction des services de surveillance de l'air ambiant, Avril 1997.
- [51] Rapport du ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (France), Bilan de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations 1991-2000, Paris, 2001.
- [52] Hovorka J. et M. Donkelaar, Elemental composition and stable lead isotope ratios of winter time PM-10 aerosols in Prague – centre cross roads, 8th international symposium transport and pollution, Juin 1999, Graz, Autriche.
- [53] Vega E., I. Garcia et al., Application of a chemical mass balance receptor model to respirable particulate matter in Mexico – cities, *J.A.W.M.A*, Vol. 47, pp 524-529, 1997.
- [54] Azri C., A. Maalej et K. Medhioub : Etude de la variabilité des constituants de l'aérosol dans la ville de Sfax (Tunisie). *Poll. Atm.*, N°165, Janvier-mars 2000, pp 121-129.

- [55] Le Moullec Y., F. Coviaux and B. Festy : Daily measurements of atmospheric sulfates in Paris. *The Science of the Total Environnement*, 32 (1982), pp 387-392, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1982.
- [56] Giroux M., J. Esclassan, C. Arnaud, J. J. Chaté : analysis levels of nitrates and derivatives of ammonia in an urban atmosphere. *The science of the Total Environment* 196 (1997), pp 247-254, Elsevier Scientific Publishing Company, 1997.
- [57] Kasper A. and H. Puxbaun : seasonal variation of SO₂, HNO₃, NH₃ and select aerosol components at Sonnblick, *Atm. Env.*, Vol. 32, N° 23, pp 3925-3939, 1998.
- [58] Brook J. R. and an. : Temporel and spatial relationships in fine particle strong acidity, sulphate, PM-10 and PM-2,5 across multiple canadian locations. *Atm ; Env.*, Vol. 31, N°24, pp 4223-4236, 1997.
- [59] Yong Pyo Kim and al. : summer time characteristics of aerosol composition at chezu Island, Korea. *Atm. Env.*, Vol. 32, N°22, pp 3905-3915, 1998.