

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'EL-HARRACH



ECOLE DOCTORALE INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

Option : Gestion et Protection de l'Environnement

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par:

M^{elle} IAZZOURENE Ghania

Ingénieur d'Etat en Technologie Alimentaire de l'ENSA (Ex. INA).

Thème

Etude de la qualité de l'air du site de Draria par les techniques d'analyse : Activation Neutronique et spectrométrie d'émission des Rayons X Fluorescence X.

Soutenu le : 22/06/2011 à 10h30.

Le jury:

Président : **Mr. BELLAL M.M. Professeur (ENSA).**

Dirigé par : **M^{me} MOUHOUCHE F. Professeur (ENSA).**

Examineurs : **Mr. MAMERI N. Professeur (ENP).**

: **Mr. LOUNICI H. Professeur (U.M.M.T.O)**

Invités d'honneur : **M^{me} KHODJA Z. Attachée de Recherche (CRND).**

Mr. MOUZAI M. Chargé de Recherche (CRND).

Année universitaire 2010/2011

ENP, 10 Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

❧ Remerciement ❧

Je voudrais adresser mes sincères remerciements et ma gratitude la plus profonde à *M^{me} Mouhouché F.*, ma directrice de thèse, que je remercie pour son aide et ses conseils éclairés. Je tiens particulièrement à souligner la qualité remarquable de son encadrement.

Je remercie tous ceux qui vont lire ce mémoire, à commencer par les membres du jury qui ont accepté sans hésitation d'évaluer et de critiquer ce travail:

Mr Bellal M. Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à *Mr Lounici H.* Professeur à Université M. MAMMERI de T.O., d'avoir accepté de juger ce travail, je le remercie pour toutes ses remarques indispensables et sa disponibilité.

Je remercie également *Mr. Mammeri N.* Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté de faire partie du jury.

C'est avec sympathie que j'associe à ces remerciements l'ensemble du personnel du CRND qui m'a aidé tant sur le plan administratif et matériel que sur le plan scientifique.

Le travail fut tellement plus simple grâce à *M^{me} khodja Z.*, attachée de recherche au CRND « qui me symbolise la beauté, la gentillesse et la pureté », avec qui j'ai eu un réel plaisir à travailler, merci pour sa disponibilité, sa confiance et pour m'avoir fait profiter de sa culture scientifique, J'ai particulièrement apprécié son dynamisme et sa bonne humeur.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude à *Mr. Mouzaï M.*, chargé de recherche au CRND, pour avoir partagé ses compétences scientifiques et techniques et de répondre à mes interrogations.

Je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à *M^{me} Zergoug, Mr. Azli, Mr. Nedjar et Mr Alek.*

J'ai eu également la chance de travailler au CRNA. Je remercie *Mr. Belamri* qui m'a accueillie au sein de sa division, *Mr Toumert* pour sa précieuse aide pour tout ce qui a concerné la ED-S sans oublier *M^{elle} Omari et Chafika.*

Je remercie également *Mr. Boucharef*, le directeur d'ONM, de m'avoir offert les données météorologiques gratuitement.

Merci à ma famille, mes amis et mon cœur appartient encore et toujours à ma mère.



Dédicaces



A mes très chers parents, mes sœurs et frères.

A la mémoire de ma grand-mère « Rahma » que Dieu lui accorde sa miséricorde.

A ATMA Wafa et toute sa famille.

A tous mes amis et collègues qui ont su chacun, m'apporter leur amitié notamment Mr Ait Allala, Rahmani S., Imène, Ahlam, Nadia, Lattifa, Souad.

A Mme Khodja « à qui je suis redevable et j'ai toujours adoré sa compagnie ».

A Mr. Etsouri, professeur à l'ENSA sans oublier Elaarbi, Lila et Samia.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Je dédie ce modeste travail spécialement à la famille Kader et tous les habitants de ma région natale « Ait Djaned ».



Ghania



ghaniaiazourene@yahoo.fr

Sommaire

<i>Liste des tableaux</i>	I
<i>Liste des figures</i>	II
<i>Listes des symboles et abréviations</i>	V

Partie I : Etude bibliographique

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols particuliers	3
1. Définition de la pollution atmosphérique.....	3
2. Définition de la pollution particulaire.....	3
3. Origine des Particules	6
3.1. Sources Naturelles	6
3.2. Les sources anthropiques.....	7
3.2.1. Nucléation homogène de vapeur.....	7
3.2.2. Nucléation hétérogène de vapeur.....	8
4. Caractérisation des particules atmosphériques.....	8
4.1. Taille des particules.....	8
4.2. Temps de résidence.....	9
4.3 Composition chimique des aérosols.....	10
4.4. Les modes de dépôts.....	11
4.5. Dispersion des particules en suspension.....	12
5. Les facteurs régissant l'évolution des polluants.....	12
5.1. La turbulence atmosphérique.....	12
5.2. Le vent.....	12
5.3. La température.....	13
5.4. La stabilité et l'instabilité atmosphérique.....	13
5.5. Les précipitations.....	13
6. Effets des particules en suspensions	14
6.1. Effets des particules sur la santé humaine	14
6.2. Effets sur les animaux	16
6.3. Effets sur les végétaux	16
6.4. Effets des particules solides sur les matériaux	16

6.5. Effets sur le climat	17
Chapitre II. Pollution atmosphérique par les métaux.....	18
1. Généralités	18
2. Définitions	18
2.1 Les éléments traces métalliques	18
2.2. Les éléments majeurs	18
2.3. Toxicité des éléments minéraux.....	19
3. Contamination de l'air par les métaux.....	20
3.1. Les sources d'émission.....	21
3.2. Transport et dépôt.....	21
4. Effets toxiques de certains métaux sur la santé humaine.....	22
5. Effets sur l'environnement	27
6. Cadre réglementaire.....	28
6.1. Législation Internationale	28
6.2. Réglementation algérienne	30
Chapitre III: Principales techniques de mesure, d'échantillonnage et d'analyses des	
aérosols.....	32
1 .Classification des stations de surveillance de la qualité de l'air	32
1.1. Typologie des stations	32
1.2. Classification des stations en fonction des objectifs de surveillance	32
1.3. Classification des stations en fonction des sources	34
2. Les principales techniques d'échantillonnage des aérosols.....	36
2.1. Echantillonnage	36
2.1.1. Les prélèvements sans coupure granulométrique précise.....	36
2.1.2. Les prélèvements avec coupure granulométrique	36
2.1.3 Les prélèvements avec fractionnement granulométrique.....	36
2.2. Débit d'échantillonnage.	37
2.3. Les filtres.....	37
2.3.1. Les filtres en fibre de verre	37
2.3.2. Les filtres membranes.....	37
3. Les principales techniques d'analyse des aérosols.....	38
3.1. La méthode gravimétrique	38

3.2. La réflectométrie (indice de fumées noires).....	38
3.3. La radiométrie (jauge bêta).....	38
3.4. La microbalance à variation de fréquence.....	38
4. Analyse des métaux dans les particules atmosphériques.....	39
4.1. L'Analyse par Activation Neutronique NAA.....	39
4.1.1. Principe.....	39
4.1.2. Caractérisation d'éléments simples par spectrométrie gamma sous irradiation neutronique.....	40
4.1.3. Théorie de la croissance et de la décroissance des radioéléments...	41
4.1.4. Procédure d'analyse.....	42
4.1.5. Quelques Champs d'application :.....	46
4.1.6. Avantages et inconvénients de la technique.....	47
4.2. Spectrométrie d'émission des rayons X Fluorescence X.....	48
4.2.1. Principes de la spectrométrie d'émission X.....	48
4.2.1.1. Niveaux d'énergie des électrons atomiques.....	48
4.2.1.2. Transitions entre niveaux.....	48
4.2.2. Différents types de spectromètres X.....	49
4.2.2.1. Spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-S).....	49
4.2.2.2. Spectromètres à dispersion d'énergie (ED-S).....	49
4.2.3. Pratique de l'analyse.....	51
4.2.3.1. Analyses qualitative, quantitative.....	51
4.2.3.2. Préparation des échantillons.....	51
4.2.4. Exemples d'utilisation de la spectrométrie d'émission X.....	51
4.2.5. Avantages et inconvénients de la technique.....	52

Partie II : Méthodologie expérimentale, résultats et discussions.

Chapitre IV : Méthodologie expérimentale.....	53
1. Description du site de prélèvement	53
2. Situation géographique et démographique de la commune de Draria.....	54
3. Mode de prélèvement.....	55
4. Conditionnement et analyse des aérosols collectés	56
4.1. Procédure de la Détermination des teneurs en TSP	56
4.2. Procédures d'analyses des métaux dans les particules atmosphériques...	56
4.2.1. Procédure de l'analyse par Activation Neutronique	57

4.2.2. Procédure d'analyse par ED-S	60
Chapitre V : Résultats et discussions.....	63
1. L'ampleur de la pollution.....	63
2. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en TSP	64
3. Etude des métaux associés aux TSP	67
3.1. Le chrome.....	69
3.2 Le plomb.....	70
3.3. L'arsenic.....	71
3.4. Le nickel.....	71
3.5. Le fer.....	72
3.6. Le Vanadium	73
3.7. Le zinc.....	74
3.8. Le manganèse.....	75
3.9. Le sélénium.....	76
3.10. Le cobalt.....	77
3.11. L'antimoine	78
3.12. Le baryum	79
3.13. Le calcium	80
3.14. Le cuivre	81
3.15. Le brome	82
3.16. Le scandium.....	82
3.17. Le hafnium.....	83
3.18. Le cérium.....	84
4. Comparaison des résultats avec certaines données publiées.....	85
5. Corrélation entre les métaux	86
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques.....	92
Annexes	99
Résumé	

Liste des tableaux

Tableau 1: Termes importants concernant les particules en suspension.....	5
Tableau 2: Tableau de la classification périodique des éléments.....	19
Tableau 3: Concentrations admises pour l'eau potable distribuée suivant les NF ..	20
Tableau 4: Les classes de stations en fonction des objectifs et des polluants.....	32
Tableau 5: Classes de stations et types de sources et d'émetteurs.....	33
Tableau 6: Principales sources isotopiques pour spectromètres à D.E.....	50
Tableau 7: Distance minimale d'éloignement d'une source de trafic pour une station urbaine et périurbaine.....	49
Tableau 8 : Normes et recommandations pour les PM-i.....	49
Tableau 9 : Comparaison entre les valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en TSP en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] du site urbain et périurbain à Alger.....	53 63
Tableau 10: Valeur limite, valeur cible et valeur à ne pas dépasser pour les métaux en teneur ambiante.....	68
Tableau 11 : Comparaison des résultats obtenus avec les résultats de certaines villes du monde.....	85
Tableau 12 : Coefficient de corrélation de Pearson entre les différents couples de métaux étudiés.....	87
Tableau 13 : Rapports massiques Fe/Al pour différents échantillons de sol.....	102
Tableau 14 : Valeurs du rapport K/Na pour différentes sources d'aérosols.....	102
Tableau 15 : Statistique descriptive des teneurs en éléments métalliques étudiés...	103
Tableau 16 : Comparaison des L.D. de certaines méthodes d'analyse	104
Tableau 17 : Données météologiques moyennes journalières du mois du Mai enregistrées sur Alger.....	104
Tableau 18: Données météologiques moyennes journalières du mois du Juin enregistrées sur Alger.....	105
Tableau 19 : Données météologiques moyennes journalières du mois du Juillet enregistrées sur Alger.....	105
Tableau 20: Données météologiques moyennes journalières du mois du Août enregistrées sur Alger.....	106
Tableau 21: Données météologiques moyennes journalières du mois du Septembre enregistrées sur Alger.....	107
	108

Tableau 22 : Tableau périodique des éléments.....

Liste des figures

Figure 1: Classification et taille des particules présentes dans l'atmosphère.....	4
Figure 2: Formation d'aérosols terrigènes et marins	6
Figure 3: Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols atmosphériques	9
Figure 4: Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules..	10
Figure 5: schéma de la structure verticale de la troposphère.....	12
Figure 6: Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne.....	15
Figure 7 : L'estimation de la diminution de l'espérance de vie en Europe imputable aux particules fines en l'an 2000.....	15
Figure 8: Emission, transport et dépôt des métaux sous forme d'aérosols.....	22
Figure 9 : Le schéma de désintégration du Sodium après activation neutronique.	40
Figure 10 : Diagramme illustrant le processus de la capture neutronique par un noyau	40
Figure 11 : Schéma de voies de sortie possibles des réactions neutroniques.....	41
Figure 12 : Schéma simplifié de la procédure d'analyse par l'activation neutronique.....	42
Figure 13: Décroissance de l'activité.....	43
Figure 14: Schéma d'une installation de mesure des rayons γ utilisée en analyse par activation.....	44
Figure 15 : Schématisation du principe d'analyse par XRF.....	48
Figure 16 : Spectromètre à dispersion d'énergie.....	49
Figure 17 : L'image satellitaire relative au site de prélèvement.....	54
Figure 18 : Schéma du dispositif de prélèvement des aérosols.....	55
Figure 19 : Évolution des teneurs atmosphériques en TSP	64
Figure 20 : Influence de la météorologie sur la pollution en particules fines.....	66
Figure 21 : Variation des concentrations du chrome en fonction de la date de prélèvement.....	69
Figure 22 : Variation des concentrations du plomb en fonction de la date de prélèvement.....	70
Figure 23: Variation des concentrations de l'arsenic en fonction de la date de	

prélèvement.....	71
Figure 24 : Variation des concentrations du Nickel en fonction de la date de prélèvement.....	71
Figure 25 : Variation des concentrations du fer en fonction de la date de prélèvement.....	72
Figure 26 : Variation des concentrations du vanadium en fonction de la date de prélèvement.....	73
Figure 27 : Variation des concentrations du zinc en fonction de la date de prélèvement.....	74
Figure 28 : Variation des concentrations du manganèse en fonction de la date de prélèvement.....	75
Figure 29 : Variation des concentrations du sélénium en fonction de la date de prélèvement.....	76
Figure 30 : Variation des concentrations du cobalt en fonction de la date de prélèvement.....	77
Figure 31 : Variation des concentrations d'antimoine en fonction de la date de prélèvement.....	78
Figure 32 : Variation des concentrations du baryum en fonction de la date de Prélèvement.....	79
Figure 33 : Variation des concentrations du calcium en fonction de la date de Prélèvement.....	80
Figure 34 : Variation des concentrations du cuivre en fonction de la date de Prélèvement.....	81
Figure 35 : Variation des concentrations du brome en fonction de la date de prélèvement.....	82
Figure 36 : Variation des concentrations du scandium en fonction de la date de prélèvement.....	82
Figure 37 : Variation des concentrations du hafnium en fonction de la date de prélèvement.....	83
Figure 38 : Variation des concentrations du cérium en fonction de la date de prélèvement.....	84
Figure 39 : La distinction des différentes sources de plomb par l'étude des rapports isotopiques.....	99
Figure 40 : Présentation du rapport Cu/Sb pour différents sites.....	101

Liste des symboles

Ac : Activité

A : Masse atomique

eV : Electronvolt

E : Energie

ΔE : Différence d'énergie

E_{ex} : Energie d'excitation

m : Masse de l'élément d'intérêt dans l'échantillon

n : Nombre d'atomes radioactifs formés

θ : Abondance de l'isotope de la réaction d'intérêt

λ : Constante de décroissance radioactive de l'isotope radioactif formé ($\lambda = Ln2/T$)

σ_a : Section efficace microscopique de capture de l'élément cible de la réaction

ϵ : Efficacité de la chaîne de comptage pour le pic gamma d'énergie totale

γ : Intensité des gammas émis

Na : Nombre d'Avogadro = $6,023 \cdot 10^{23}$

M : La masse molaire de l'élément.

θ : L'abondance isotopique.

ϕ : Flux neutronique ($\phi = 10^{13}$ neutrons / cm^2/s).

Td : Temps de décroissance

Tc : Temps de comptage

V : Le volume d'air aspiré.

$T_{1/2}$: Demi-vie

Z : Numéro atomique

Ci : Le Curie.

Bq : Le Becquerel.

Liste des abréviations

AAN : Analyse par Activation Neutronique.

INAA: Analyse par Activation Neutronique Instrumentale.

AIEA: Agence Internationale de l'Energie Atomique.

AMP: Amplificateur

HVS: High Volume Sampler

TSP : Total suspended particulate (Particules totales en suspension)

LVS : Low Volume Sampler

Logiciel AXIL: (Analysis of X-ray spectra by Iterative Least squares)

MCA : multi canal Analyseur

PIXE : L'analyse par rayons X induits par particules chargées

SAA : La chromatographie d'absorption atomique

DPAN : Division Physique et Applications Nucléaires

XRF : La spectrométrie d'émission des rayons X de fluorescence X.

ED-S: Energy Dispersive Spectrometry.

WD-S: Wave-Length Dispersive Spectrometry.

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

ADEME : l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

ATSDR: Agence américaine des substances toxiques et du registre des maladies (Agency for Toxic Substances and Disease Registry).

US EPA: Agence américaine de l'environnement (United States Environmental Protection Agency)

IRIS: Integrated Risk Information System. (Base de données)

OMS: Organisation Mondiale de la Santé.

ONM : Office National de Météorologie.

IARC: International Agency for Research on Cancer.

CIRC: Centre international de recherche sur le cancer.

TEOM: Tapered Element Oscillating Microbalance.

PIXE : La spectrométrie d'Emission X Induite par Protons.

SAAE : La Spectrométrie d'Absorption Atomique Electrothermique.

ICP-AES : La Spectrométrie d'Emission Atomique Induite par Couplage Plasma.

ICP-MS : La Spectrométrie de Masse Induite par Couplage Plasma

AFS : La Spectrométrie de Fluorescence Atomique.

TMJA : Trafic moyen journalier Annuel dans les deux sens.

UIOM : Usines d'incinération des ordures ménagères.

Partie I :

Introduction générale



« Le commencement de toutes les sciences, c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont. »

- Aristote -

Introduction générale

Les problèmes d'environnement à l'échelle planétaire ont pris depuis quelques années une importance croissante dans notre vie au quotidien, que ce soit par la médiatisation qui a pu en être faite ou par les préoccupations sociétales que les discours de la classe politique ont relevées, sans doute à juste titre. L'industrialisation de nos sociétés a introduit des perturbations significatives au sein de cette complexe et fragile machine que constitue le système climatique terrestre. Dans ce monde qui change, l'impact des activités humaines sur ce dernier est devenu aujourd'hui l'un des enjeux scientifiques et de société majeurs pour les prochaines décennies. Cette sensibilité accrue des populations touche tout particulièrement les problèmes relatifs à l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire littéralement la sphère de gaz :

« *atmosphaira*. » qui enveloppe notre planète. Cette définition étymologique est toutefois très réductrice, tant cette couche d'épaisseur infime par rapport au rayon de la terre constitue un milieu hétérogène nécessaire à la présence de la vie sur Terre et qui est le siège d'un très grand nombre d'interactions entre molécules gazeuses, particules solides et gouttelettes liquides (*Raut, 2008*).

Depuis longtemps, la qualité de l'air vient en tête des préoccupations du public. Au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances de l'impact de la pollution de l'air sur la santé, notamment celle des enfants et des personnes âgées, cette préoccupation s'est renforcée et a été à l'origine du développement d'une politique de protection de la qualité de l'air. Le souhait du pouvoir public de respecter le droit à chacun de respirer un air de qualité et donc de réduire la pollution atmosphérique a donné lieu à la mise en place d'une législation complète sur la pollution de l'air.

(*Technique de l'Ingénieur, Doc : G 1010*)

La pollution de l'air résulte de multiples facteurs anthropiques. La nature dynamique de l'atmosphère facilite ensuite le transport des particules émises à différentes échelles spatiales. Ces apports anthropiques sont déposés suivant différents processus sur tous les types de milieux, tant urbains que ruraux, en les affectant plus ou moins irrémédiablement (*Azimi, 2004*).

Dans l'Histoire plusieurs événements ont fait prendre conscience des troubles de santé occasionnés par les aérosols atmosphériques. L'épisode de « smog » à Londres en 1952, « The Great Smog », qui fit 4000 morts (Ministry of Health, 1954) en est un des plus célèbres. Ce phénomène se produit dans tous les lieux où les conditions météorologiques (le brouillard « fog ») se combinent aux rejets industriels et des transports routiers (« smoke ») (*Le Floch, 2004*).

En effet, la qualité de l'air ne dépend pas seulement des quantités des polluants émises par les sources, mais également des conditions météorologiques et climatiques de la région. Les facteurs météorologiques les plus importants sur la dispersion de la pollution sont le vent et la stabilité de l'atmosphère. Nous concevons aisément que la présence d'un vent fort favorise la dispersion de la pollution atmosphérique. Quant à la stabilité, elle gouverne les turbulences qui favorise le mélange vertical des masses d'air, et par conséquent, la dilution des polluants. Plus l'atmosphère sera instable et plus vite les polluants seront dispersés et diffusés. (*Anthes, 1997*).

Les aérosols, particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère à l'exception des gouttelettes nuageuses, ont, en particulier, un rôle dans le changement climatique et dans notre perception de la qualité de l'air ainsi que sur la santé humaine. Les aérosols sont plus difficiles à caractériser que les gaz atmosphériques à cause de leur composition chimique complexe et de leur très large gamme de taille de quelques nanomètres à quelques micromètres. (*Kacenenbogen, 2008*).

Il est clair de nos jours que les particules fines ont une relation avec la présence des métaux toxiques dans l'air et affectent ainsi la santé humaine, particulièrement en milieu urbain et à proximité des zones industrielles. On relève d'autre part que plus ces particules diminuent en granulométrie, plus leur pouvoir toxique augmente (*Sandrine, 2005*). C'est ainsi que les particules très fines de diamètre inférieur à 1µm sont plus nuisibles que les particules de diamètre inférieur à 2.5 µm qui elles le sont plus toxiques que les particules de diamètre inférieur à 10 µm.

Dans ce contexte de récents travaux qui ont montré que le Grand Alger fait l'objet d'une pollution atmosphérique (*Oucher, 2006*); (*Bitouche., 2008*); (*Khodja, 2010*)... et afin d'estimer l'ampleur de la pollution atmosphérique entre le milieu urbain et périurbain, nous avons choisi un site à Draria, l'Ouest d'Alger. A noter que dans ce type de site, les émetteurs peuvent être soit dans la commune ou à l'extérieur de celle-ci. (*Guivac'h et al, 2002*).

La procédure de prélèvement consiste à piéger les aérosols collectés au niveau du site dans des filtres adaptés en ester de cellulose selon le mode de collection sur filtres ouverts sans coupure granulométrique précise. L'étude de la fraction minérale associée à ces particules sera abordée par l'utilisation de deux techniques nucléaires, hautement sensibles et sélectives à savoir, la technique d'analyse par activation neutronique et la spectrométrie d'émission des rayons X fluorescence X.



Chapitre I :

*Généralités sur la pollution de
l'air par les aérosols
particulaires*

« *Le monde est un spectacle à regarder et non un problème à résoudre.* »
- Jules de Gaultier -

I. Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols particuliers.

1. Définition de la pollution atmosphérique.

La pollution atmosphérique est définie comme l'introduction par l'homme, directement et/ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux sources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives. (*JORF, 1997*).

2. Définition de la pollution particulaire.

Les particules sont des entités solides ou liquides en suspension dans l'air où elles forment avec celui-ci un aérosol (*Renoux, 1990*).

L'aérosol de pollution se définit par sa nature chimique, sa forme, sa densité, sa granulométrie et sa concentration en nombre (particule par m³ d'air) ou en poids (milligrammes ou microgrammes par m³) (*Herrebaut et Beguin, 1976*).

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

Les aérosols : Ce sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère à l'exception des gouttelettes nuageuses et qui ont en particulier, un rôle dans le changement climatique et dans notre perception de la qualité de l'air ainsi que sur la santé humaine. Ce qui dans l'air et dans les conditions normales, correspond à des particules de dimensions inférieures à 100 µm, les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms (*Stern and Boubel, 1984*), (*Renoux, 1990*).

Les fumées noires : ce sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5 µm.

Les suies : il s'agit de particules de carbone et d'imbrûlés que produisent les combustibles qui ne brûlent qu'incomplètement.

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

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

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

Les particules : ce terme englobe l'ensemble des définitions précédentes, indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles.

Ces dernières années et suite à la standardisation des échantillonneurs de prélèvement et de collecte, aux recommandations des études épidémiologiques et à l'adoption dans plusieurs pays de seuil limites à ne pas dépasser, on assiste à une certaine uniformisation et homogénéisation dans l'étude des particules aéroportées (Tableau-1). Les anciennes définitions sont de plus en plus délaissées au profit de nouvelles qui portent sur :

Les particules totales en suspension (TSP) : ces particules de diamètre aérodynamique inférieur à $75 \mu\text{m}$, et dont la vitesse de chute est $\leq 10 \text{ cm/s}$ séjournent longtemps dans l'atmosphère et sont en général captées par le segment extra thoracique (elles sont arrêtées au niveau de la bouche et du nez).

Les particules inhalables appelées PM-10 (PM = particulates matters) : de diamètre aérodynamique moyen inférieur à $10 \mu\text{m}$, ces particules peuvent pénétrer dans le système respiratoire.

Les particules respirables ou alvéolaires, PM-2,5 : c'est la fraction de particules en suspension qui ont une granulométrie inférieure à $2,5 \mu\text{m}$. Ces particules pénètrent profondément dans le système respiratoire pour atteindre les alvéoles ;

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

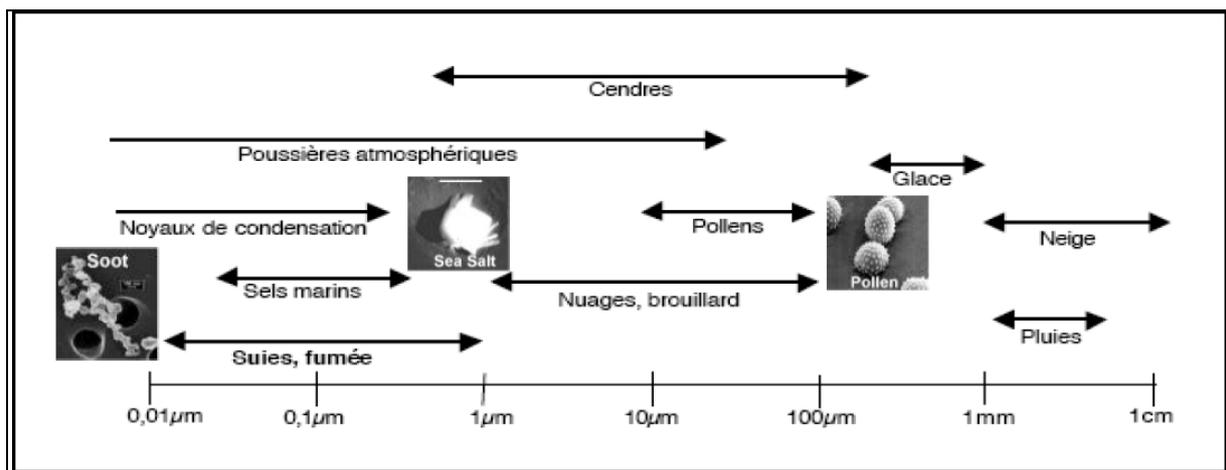


Figure 1 : Classification et taille des particules présentes dans l'atmosphère (Clarck, 1982).

*Tableau 1 : Termes importants concernant les particules en suspension
(Selon ISO 7708, 1995).*

Terminologie française	Terminologie anglaise	Abréviation	Remarques
Total des particules contenues dans l'air.	Suspended Particulate Matter, Total airborne particles.	SPM	Toutes les particules contenues dans l'air dans un volume d'air donné.
Poussières en suspension (total).	Total Suspended Particulates.	TSP	Concentration des particules en suspension mesurée avec la méthode américaine conventionnelle HIVOL, en tant que valeur estimative pour les SPM. Malgré le mot « total », les TSP représentent une quantité moindre que les SPM.
Inhalable.	Inhalable.		Particules pénétrant dans le corps lors de la respiration (bouche, nez, ou plus profondément).
Thoracique	Thoracic.		Particules atteignant le larynx.
Alvéolaire	Respirable.		Particules atteignant les alvéoles pulmonaires.
Fraction thoracique	Thoracic fraction.		Particules inhalées en proportion de la masse qui passent par le larynx et continuent.
Convention thoracique	Thoracic convention.		Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique.
PM-10	PM-10	PM-10	Objectif fixé pour la performance d'échantillonnage des appareils de mesure de la fraction thoracique.

Source : (ADEME, 1998).

3. Origine des Particules :

La pollution de l'air par les matières particulaires atmosphériques, comprend une gamme très variée de composantes biologiques (bactéries, virus, insectes) et autre non viables (minéraux, produit des combustions,..). Il existe deux types d'aérosols mélangés dans toutes les atmosphères terrestres : naturel et anthropogénique (*Renoux, 1990*).

3.1. Sources Naturelles :

L'aérosol naturel comprend quatre sources principales :

✚ La source marine :

L'aérosol marin est produit par le 'spray océanique'. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosses tailles sont projetées dans l'atmosphère (phénomène de bubbling). Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du SO₂, qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques (*Masclat, 2005*).

✚ La source terrigène :

L'aérosol terrigène est généré par l'érosion éolienne des sols. Ces émissions dépendent de la vitesse du vent. Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques, exemple : fer, manganèse et d'aluminosilicates, exemple : oxydes d'aluminium et de silicium. On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus (*Figure-2*). (*O.F.E.F.P., 2001*).

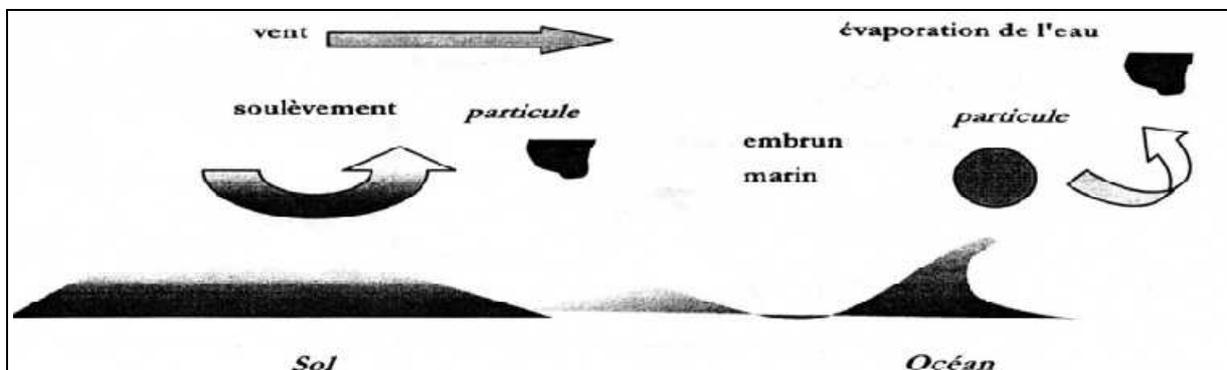


Figure 2 : Formation d'aérosols terrigènes et marins (*Masclat, 2005*).

La source biogénique :

Les émissions biogéniques sont produites par des phénomènes biologiques naturels, éventuellement dans le cadre d'une utilisation humaine comme c'est le cas pour les émissions des plantes cultivées ou des animaux d'élevage. Les végétaux émettent des COV très réactifs, principalement de l'isoprène et des terpènes. Les bactéries présentes dans le sol émettent entre autres des oxydes d'azote, de l'ammoniac, des composés soufrés et du méthane (CH₄) (*Finlayson-Pitts et Pitts, 2000*).

En dehors de milieux fortement urbanisés, les émissions biogéniques deviennent la principale source en intensité. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium (*Ramade, 1982*).

La source volcanique :

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les trois précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du SO₂ gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol arrive jusqu'à la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte (*Dang et al, 1990*).

3.2. Les sources anthropiques:

Deux types de sources anthropiques peuvent être distingués. D'une part, les activités émettant directement vers l'atmosphère comme par exemple l'abrasion des pneumatiques et des plaquettes de frein ou encore les cimenteries. D'autre part, les particules formées par conversion gaz/particule qui représentent la majorité des aérosols d'origine anthropique. Cette conversion, qui intervient lors de tous les processus de combustion à haute température tels les moteurs automobile, les usines d'incinération ou les centrales thermiques, peut être effectuée de deux façons différentes : la nucléation homogène ou hétérogène de vapeur (*Pruppacher et Klett, 1997*).

3.2.1 Nucléation homogène de vapeur

Une telle nucléation se passe au niveau des produits de combustion. Cela concerne principalement les gaz de faible température d'ébullition qui se trouvent en super-saturation. Les vapeurs émises condensent sous forme de gouttes ou de particules après avoir réagi ou non en phase gazeuse. Les composés typiquement impliqués dans ces mécanismes sont les suies, les huiles, l'acide sulfurique, les sulfates ou encore les carbonates. Les particules formées recouvrent une large gamme de taille avec cependant un diamètre majoritairement inférieur à 0,1 µm.

3.2.2 Nucléation hétérogène de vapeur

Cette voie de conversion implique des particules d'aérosols préexistantes. Les éléments les plus volatils présents en phase gazeuse lors du processus de combustion se condensent à la surface des particules déjà présentes dans le milieu lors de la diminution de la température (*Linton, 1976*). La taille de ces particules dépend de la quantité de matière ajoutée à l'aérosol initial mais cependant, elle est en général comprise entre 0,1 et 2 μm .

4. Caractérisation des particules atmosphériques

4.1 Taille des particules

Les particules d'aérosols présents dans l'atmosphère ont des tailles comprises entre 10^{-3} et 100 μm de diamètre (*Lodge, 1991*). Elles peuvent être séparées en trois classes.

(*Whitby, 1976*) :

- ✎ les grosses particules dont le diamètre est compris entre 2 et 100 μm ;
- ✎ les fines, de diamètre compris entre 0,1 et 2 μm ;
- ✎ les particules ayant un diamètre inférieur à 0,1 μm .

Ces dernières, constituant 90 % de la masse des aérosols atmosphériques, sont des noyaux de condensation appelés noyaux d'Aitken. Ces aérosols ont une vitesse brownienne élevée et sont éliminés par impaction (*Renoux, 1990*). Cette distribution en taille dépend d'une part de l'origine de l'aérosol et d'autre part de la distance par rapport aux sources (*Slinn, 1983*).

En général, les particules de taille inférieure à 2 μm sont formées par conversion gaz/particule, alors que celles de taille supérieure à 2 μm sont formées par des processus mécaniques. La relation existante entre les mécanismes de formation des particules atmosphériques et leur taille est schématisée en Figure-3.

Le diamètre le plus souvent utilisé est le diamètre aérodynamique moyen. Il correspond à celui d'une sphère ayant la même vitesse de chute que la particule et une masse spécifique égale à 1g.cm^{-3} (*Renoux et Bouland, 1998*). Dans le cas d'une particule quelconque, le diamètre aérodynamique moyen est donné par la formule suivante (*Fermandjan, 1982*) :

$$\boxed{d_a = \sqrt{(\rho / \chi) * d_{50}} \dots\dots\dots (1).$$

ρ : masse spécifique de l'aérosol (en g.cm^{-3}).

χ : facteur de forme dynamique. Il représente le rapport des forces aérodynamiques s'exerçant sur la particule sur celles s'exerçant sur une sphère de même volume et de même vitesse limite de sédimentation (sans dimension).

d_{50} , diamètre médian en masse de la distribution granulométrique des aérosols (en m).

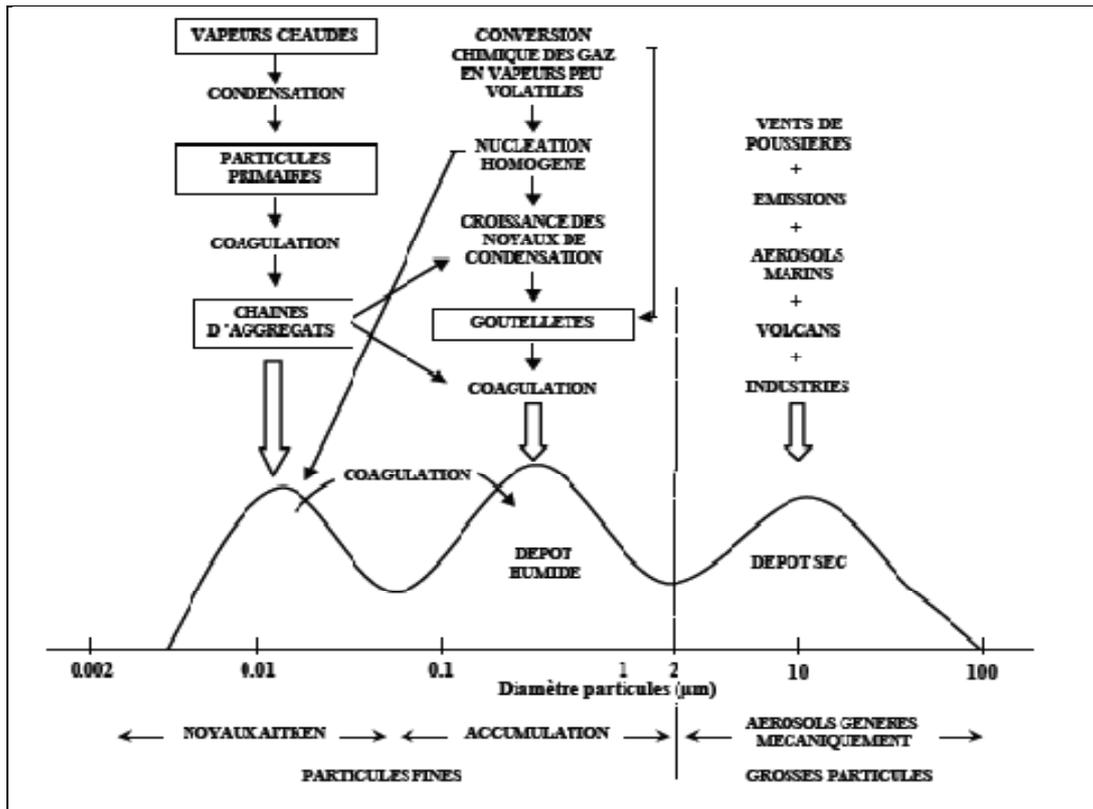


Figure 3 : Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols atmosphériques selon (Whitby, 1976).

Il apparaît que les fines particules formées par nucléation homogène ou par condensation de gaz sur des particules préexistantes, peuvent passer dans le mode d'accumulation par coagulation. Les aérosols subissent des collisions les uns avec les autres du fait des mouvements thermiques ou browniens et s'agrègent en une particule de taille plus importante. Ce processus de grossissement est particulièrement important lors du transport longue distance des aérosols (Prospero et al, 1987).

4.2. Temps de résidence.

La durée du séjour atmosphérique des aérosols varie en fonction de plusieurs paramètres dont les conditions météorologiques (vent, température, humidité), la nature des particules (matrice minérale ou organique) et surtout leur granulométrie (Junge, 1979). D'après Renoux (1990), dans la troposphère (0 à 11 km d'altitude), le temps de séjour le plus long est d'environ 10 jours correspond à des aérosols de 0,1 µm. Par contre les particules les plus grosses (> 10 µm) et l'aérosol ultra- fin (10⁻⁴ à 10⁻³ µm) possèdent les temps de séjour les plus courts de quelques minutes à quelques heures : leur principale cause de disparition est le dépôt sec.

Dans la stratosphère qui est de 11 à 53 km d'altitude, la durée de vie d'une particule peut atteindre plusieurs années. Dans l'atmosphère, il y a une véritable dichotomie physique entre les particules fines ($< 2 \mu\text{m}$) et les plus grosses ($> 2 \mu\text{m}$) qui évoluent de façon tout à fait indépendante et disparaissent par des mécanismes séparés. Un des corollaires à ces phénomènes de temps de résidence est la distance de transport des particules atmosphériques qui est comprise entre quelques mètres pour les plus grosses et des milliers de kilomètres pour les plus fines (Boutron and al 1993) ; (Wroble and al 2000).

4.3 Composition chimique des aérosols

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

La fraction minérale soluble dans l'eau : Elle contient principalement les aérosols secondaires, les sulfates et les nitrates provenant de la conversion du SO_2 et NO_2 ainsi que les ions chlorures et ammonium.

La fraction minérale insoluble : Elle est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction carbonée: Elle 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 les débris de matériaux organiques relargués par les activités humaines.

La fraction organique : Elle se trouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques. Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbones. La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules. (figure-4).

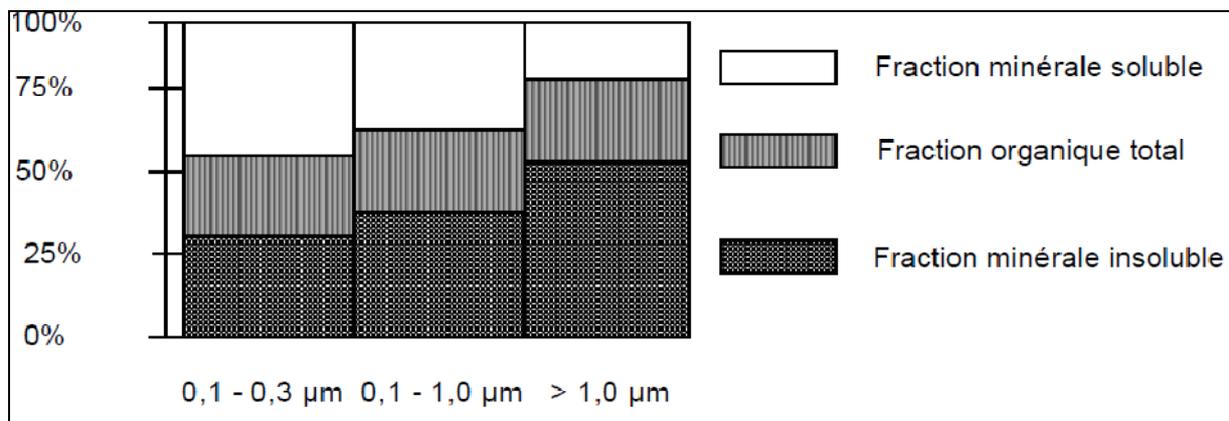


Figure 4 : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille (Giusti and al 1993).

L'origine des aérosols est étroitement corrélée avec leur taille (*Pruppacher and Klett, 1997*). Ces changements reflètent l'évolution de la nature des particules dans les différentes classes de taille et particulièrement de leur mode de formation, c'est-à-dire un arrachement au substrat terrestre ou une conversion gaz/particule (*Heintzenberg, 1998*). Les prélèvements d'aérosols à leur source mettent ainsi en évidence que les aérosols anthropiques sont principalement composés d'espèces solubles. Ainsi, les particules urbaines (émises par des sources anthropiques) mais également celles d'origine marine possèdent une fraction soluble plus importante que les aérosols provenant de l'érosion éolienne. La première catégorie, constituée des particules anthropiques est formée d'éléments comme les sulfates, les nitrates, des métaux lourds tels Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, V et Zn (*Giusti and al 1993*), (*Heintzenberg, 1998*), (*Sternbeck, 2002*) et des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (*Colombo and al, 1989*). La fraction grossière terrigène contient principalement de la matière insoluble comportant essentiellement Al, Fe, Si de même que Ca, K et Mg, des carbonates (*Gomes, 1990*), alors que les particules issues du pétilllement marin sont principalement constituées de halite avec des quantités variables de CO₃, SO₄, K, Mg et Ca. (*Pruppacher and Klett 1997*).

Toutefois, plusieurs observations montrent que les particules prélevées en zone éloignée ne présentent pas des compositions uniformes, typiques de celle des zones sources, mais plutôt des mélanges de plusieurs types d'aérosols. (*Levin and Ganor, 1996*).

4.4. Les modes de dépôts.

Les particules peuvent être éliminées de l'atmosphère par des processus de piégeage, lessivage ou par gravitation. Le premier phénomène concerne les particules qui se trouvent piégées lors de la formation des gouttes d'eau nuageuses. Le second mécanisme se produit lorsque les particules atmosphériques sont lessivées durant les précipitations. Le dernier phénomène est le dépôt sec (*Renoux, 1990*) ; (*Vukmirovic et al 1997*). Ces modes d'élimination des particules de l'atmosphère permettent de définir deux processus de dépôt atmosphérique :

Les retombées sèches et les retombées humides. La nature des sources, les conditions météorologiques et les caractéristiques physiques des composés piégés sur ces particules (taille de la particule, pression de vapeur, solubilité, température) déterminent ces deux processus. (*Galloway, 1982*) ; (*Harrison et al 1993*).

4.5. Dispersion des particules en suspension.

Une fois produits, les polluants se dispersent dans l'atmosphère, leur dispersion s'effectue essentiellement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux (Figure- 5) (Brochard *et al*, 1999).

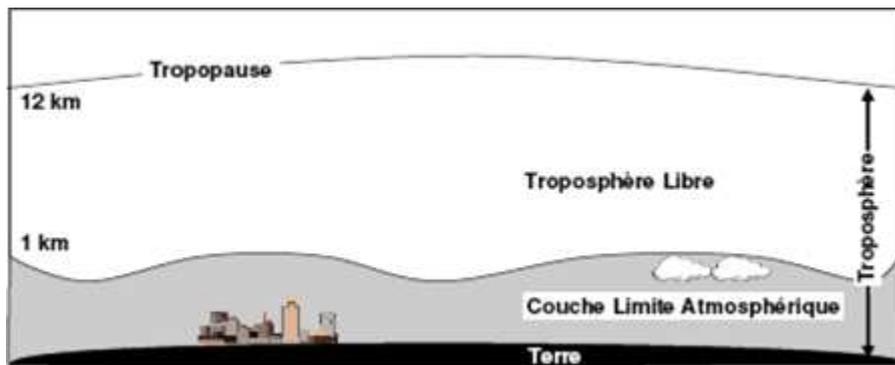


Figure 5 : a) schéma de la structure verticale de la troposphère : la zone grise définit la couche limite atmosphérique (CLA) et le reste est appelé troposphère libre (TL) (Stull, 1988).

5. Les facteurs régissant l'évolution des polluants

5.1. La turbulence atmosphérique.

Sachant que, les mouvements à petite échelle vont brasser la masse d'air et permettre la dilution des polluants, les mouvements à plus grande échelle vont assurer le transport.

Plus la turbulence est importante, meilleure est la dispersion atmosphérique, de ce fait :

- les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc à de bonnes conditions de dispersion ;
- les situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants, entraînent des épisodes de pollution (inversion thermique)

5.2. Le vent.

Entre la vitesse du vent et les niveaux de concentrations de polluants, il existe une relation évidente :

- la dispersion des polluants augmente avec la vitesse et la turbulence du vent ;
- alors que, l'accumulation des polluants est favorisée par un vent faible.

La vitesse du vent augmente en général avec l'altitude.

5.3. La température.

Les inversions de température sont des phénomènes sources de pollution. Ils se produisent le plus souvent en hiver ou en été par des nuits sans nuages.

En plus du transport horizontal des polluants, il ne faut pas négliger la composante verticale : l'air près du sol se réchauffe plus rapidement, il se dilate et devient plus léger. La température de l'air diminuant avec l'altitude, cet air plus chaud s'élève dans les couches supérieures de l'atmosphère entraînant avec lui les polluants dont il est chargé.

5.4. La stabilité et l'instabilité atmosphérique.

La stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère sont les facteurs principaux de la dispersion atmosphérique.

Selon que l'atmosphère sera stable ou instable, la dilution des polluants sera faible ou importante.

Si on enlève une particule d'air d'une certaine altitude, elle va subir une chute de pression et donc une chute de température :

- si la particule d'air que l'on vient de soulever est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus lourde et donc redescendra à son niveau de départ, l'atmosphère est alors stable.
- si la particule d'air subissant cette élévation est plus chaude et plus légère que le milieu environnant, elle a donc tendance à continuer son ascension, l'atmosphère est alors instable.

5.5. Les précipitations.

Certains polluants gazeux et certaines particules solides peuvent se dissoudre ou être captés dans les gouttelettes d'eau des brouillards, des nuages ou des pluies voire même dans les flocons de neige. Lors d'une pluie ou d'une chute de neige, les composés captés sont alors précipités au sol : on dit que l'atmosphère a été « lessivée ».

Ainsi la météorologie est un élément essentiel dans l'appréhension des phénomènes de dispersion de la pollution. Des paramètres météorologiques, on tire les informations relatives aux types de temps favorables ou défavorables à la dispersion et les types de temps favorables ou défavorables aux transformations physico-chimiques des polluants gazeux en particules.

6. Effets des particules en suspensions.

6.1. Effets des particules sur la santé humaine.

L'action nocive des matières particulaires en suspension dans l'air s'exerce ainsi principalement, si ce n'est exclusivement, par les voies respiratoires. Il faut rappeler ici qu'une personne respire chaque jour 15 m^3 d'air et que la zone des échanges gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface de 70 m^2 environ entre le milieu extérieur et l'organisme.

L'impact sanitaire des particules est dépendant de leur taille qui influence la pénétrabilité de la particule dans le système respiratoire humain et son assimilation (figure-6)

Ainsi les particules de diamètre aérodynamique supérieur à $10\text{ }\mu\text{m}$ sont retenues au niveau des voies aériennes supérieures. Leur rétention se fait par deux mécanismes principaux :

La filtration interception et l'impaction au niveau du nez, gorge et des voies aériennes supérieures.

Les particules de diamètre compris entre $2,5$ et $10\text{ }\mu\text{m}$ se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchite par impaction. Dans cette zone, les particules peuvent être éliminées par clearance mucociliaire et la toux (*Brochard et al, 1999*) ; (*Lazaradis and al, 2001*).

Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à $2,5\text{ }\mu\text{m}$ pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires où ils se déposent par diffusion. En ce point la vitesse de l'air est très faible.

Au niveau alvéolaire, les particules déposées peuvent être phagocytées par les macrophages et selon leur solubilité, certaines seront retenues alors que d'autres sont véhiculées vers les lymphatiques bronchiques d'où elles pourront diffuser par voie hémotogène dans tous les organes (Figure-6) (*Brochard et al, 1999*) ; (*Lazaradis and al, 2001*).

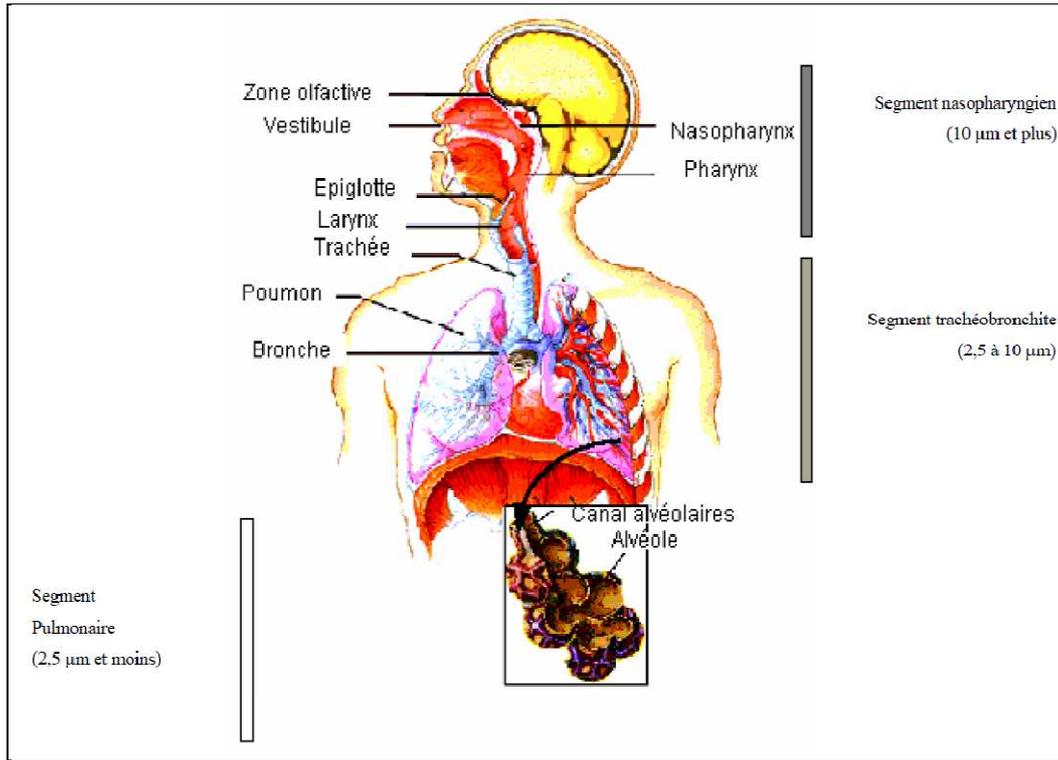


Figure 6 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne (Lazaradis and al, 2001).

En Europe, l'estimation en l'an 2000 de la diminution de l'espérance de vie (en mois) imputable aux particules fines de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2.5 µm est représentée dans la figure suivante.

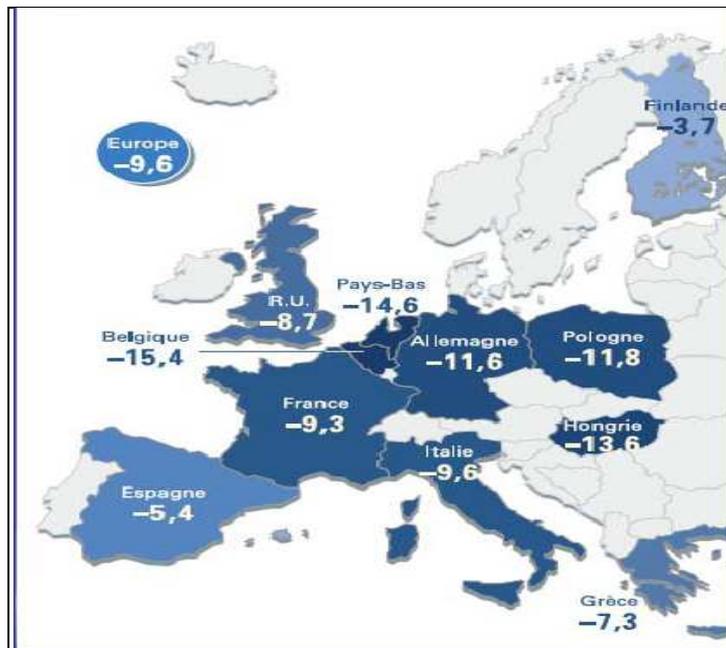


Figure 7 : L'estimation de la diminution de l'espérance de vie (en mois) en Europe imputable aux particules fines en l'an 2000 (Kacenenbogen, 2008).

En Algérie, on ne dispose pas encore d'études épidémiologiques spécifiques sur les relations entre les niveaux de pollution mesurés et des indicateurs de santé notamment cardio-respiratoires, cependant, des études réalisées par l'Institut National de Santé Publique d'Alger ont mis en évidence la place importante tenue par les maladies respiratoires chroniques dans la pathologie générale.

6.2. 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 modifications du pH (*Person, 1990*).

6.3. Effets sur les végétaux

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). L'impact environnemental des aérosols se traduit notamment par le dépôt des particules sur les sols et la végétation et l'altération de l'activité photosynthétique des végétaux. Alors que les conséquences du dépôt d'aérosols en surface peuvent être positives dans le cas d'un apport essentiel en nitrates et phosphates (*Tyson, 2002*), elles sont néfastes dans le cas des pluies acides.

Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussière et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux (*Martin et Mayster, 1998*).

6.4. Effets des particules solides sur les matériaux

Les dégradations des matériaux, (métaux, pierres, peintures, tissus, cuir, plastiques, caoutchouc, papier...), utilisés dans différentes fonctions (bâtiment, grands équipements, matériels mécaniques et électroniques, revêtements...) dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène se produit par les substances oxydantes et acides supportés par les particules solides (*Detrie, 1969*).

6.5. Effets sur le climat

L'étude de *Colbeck* (1995) a montré que les particules pouvaient avoir une influence sur le bilan radiatif (différence entre rayonnement solaire incident et réfléchi) de l'atmosphère et donc jouer un rôle dans le changement climatique global (*Colbeck, 1995*).

Les particules agissent de deux manières sur le bilan radiatif de l'atmosphère :

- par un effet direct des aérosols qui dépend de leur quantité et de leurs propriétés optiques.

Les particules d'aérosols diffusent la lumière solaire et renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire avant qu'il ne participe au chauffage de la Terre ;

- par un effet indirect par le biais des nuages. Les aérosols servent de "noyaux de condensation" pour la formation des nuages. Dans une atmosphère fortement chargée en aérosols, une même quantité d'eau peut se répartir sur un plus grand nombre de gouttes, qui sont alors plus petites. Or, un nuage formé de petites gouttes plus nombreuses réfléchit plus le rayonnement solaire vers l'espace. Par ailleurs, on peut penser que les petites gouttes vont moins facilement conduire à des précipitations, conduisant ainsi à augmenter la durée de vie du nuage. Les résultats de l'étude révèlent que ce sont essentiellement les activités humaines (aérosols d'origine anthropique provenant des pratiques agricoles, industrielles, domestiques et de transport) qui génèrent l'effet observé sur les nuages.

Ainsi, les particules atmosphériques exercent un « forçage négatif » sur le bilan radiatif en diminuant l'apport global d'énergie solaire (*Dulac, 2002*).



Chapitre II:
Pollution atmosphérique par
les métaux

« Ils se contentent de tuer le temps en attendant que le temps les tue. »
- Anonyme -

Chapitre II. Pollution atmosphérique par les métaux.

1. Généralités

Les métaux sont émis dans l'air sous formes de très fines particules. Ces particules sont alors transportées par le vent et finissent par retomber au sol ou sur un plan d'eau à des distances très variables de leur lieu d'émission, pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. Les conditions de transport des particules sont très fortement liées aux conditions météorologiques, ainsi qu'à leur taille et leur composition physico- chimique. Pour les écosystèmes naturels, ces dépôts sont une charge supplémentaire par rapport aux teneurs naturelles du fond géométrique. Ils peuvent ainsi provoquer des effets dommageables sur l'environnement et conduire à des problèmes économiques et de santé publique (Sandrine, 2005).

2. Définitions

2.1 Les éléments traces métalliques

La convention de Genève désigne par le terme « métaux lourds » les éléments possédant une masse volumique supérieure ou égale à $4,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Cependant, ce terme est souvent remplacé par «éléments traces métalliques » (ETM). Les métaux lourds sont dits à l'état de trace lorsque leur concentration est inférieure à 1 g.kg^{-1} de matière sèche dans la croûte terrestre ou inférieure à $0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ de matière sèche chez les êtres vivants.

La plupart des ETM ne sont que très faiblement volatils et ne sont pas biodégradables. Ces deux principales caractéristiques confèrent aux ETM un grand pouvoir d'accumulation dans tous les compartiments de la biosphère. Ainsi, même si nombre d'entre eux sont indispensables dans les différentes étapes des divers cycles métaboliques (Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), l'augmentation de leur concentration dans l'environnement, associée à leur capacité d'accumulation, induisent des risques pour le développement des différents organismes (Azimi , 2004).

2.2. Les éléments majeurs

L'analyse qualitative et quantitative précise des éléments cationiques (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ou anioniques (P provenant principalement de HPO_4^{2-} et S provenant principalement de SO_4^{2-}), contenus dans les retombées atmosphériques sont essentielles car ces composés sont des traceurs de qualité et permettent l'estimation du degré d'impact des émissions anthropiques (Chang and al, 1953). Il existe par exemple une relation directe entre les sources atmosphériques d'aérosols et la concentration de différentes espèces chimiques dans les eaux de pluie (Morelli and Löye 1988).

Le suivi de ces éléments majeurs apparaît donc comme un complément important de la mesure des métaux traces dans l'optique d'identification de sources.

2.3 Toxicité des éléments minéraux.

Le tableau-7 présente le tableau périodique des éléments chimiques selon Mendeleïev. Sur celui-ci, le cadre en gras précise les éléments considérés comme métaux lourds et sont marqués en grisé les éléments considérés comme toxiques dans divers documents (arrêtés, directives européennes, conventions internationales).

Cette représentation souligne que plusieurs éléments toxiques n'appartiennent pas à la famille des métaux lourds. Certains de ces éléments possèdent des densités moyennes (métalloïdes : As, Se et Te) et même faible (Be) (Azimi, 2004).

Tableau 2 : Tableau de la classification périodique des éléments.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	Lanthanides				Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
	Actinides			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw	

Le cadre en gras indique les métaux lourds et le fond grisé indique les éléments cités comme toxiques pour l'homme et l'environnement dans divers documents (Leygonie, 1993).

Ce tableau souligne également que plus de 65 % des éléments lourds ne sont pas considérés comme dangereux pour l'homme et l'environnement. En prenant comme critère de toxicité leur concentration maximale admise dans une eau potable (Tableau-3), il apparaît que le Hg et le Cd sont 1000 fois plus toxiques que d'autres métaux de transition, comme le Cu ou le Zn. Dans une classe intermédiaire, se situent des éléments tels, l'As, le Cr, le Pb ou le Ni qui sont toxiques en solution aqueuse. Ainsi, par exemple, le Cr et le Pb, et dans une moindre mesure le Cu, provoquent des troubles au niveau des systèmes nerveux et respiratoire chez l'homme alors que les effets sur les écosystèmes se présentent sous diverses formes comme l'anémie chez les mammifères ou des effets neurologiques sur les comportements de la méso

et macro faunes (*Galsomies, 1996*). Enfin, d'autres métaux sont plutôt générateurs de goût (Na, Mg, K) ou de couleur (hydroxyde de Fe) (*Leygonie, 1993*).

Tableau 3 : Concentrations admises pour l'eau potable distribuée suivant les normes françaises.

Conc. max ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)	1	5	10	50	200	1000	5000	12000	50000	150000
	Hg	Cd	Ag	As	Al	Cu	Zn	K	Mg	Na
Eléments métalliques			Se	Cr	Fe					
			Sn	Mn						
				Ni						
				Pb						
			Toxiques				Posant des problèmes à fortes concentrations			

Source : (*décret 95-363 du 5 avril 1995 et 89-3 du 3 juin 1989*).

Une classification des principaux éléments métalliques en fonction de leur degré de toxicité a été établie (*Förstner et Wittman, 1983*). Trois classes ont ainsi été définies :

- Classe des éléments non critiques : Na, K, Mg, Ca, H, O, N, C, P, Fe, S, Cl, Br, F, Li, Rb, Sr, Al, Si, Cu et Zn ;
- Classe des éléments toxiques mais très insolubles ou très rares : Ti, Hf, Zr, W, Nb, Ta, Re, Ga, La, Os, Rh, Ir, Ru et Ba ;
- Classe des éléments très toxiques et relativement répandus : Be, Co, Ni, Sn, As, Se, Te, Pd, Ag, Cd, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Sb et Bi.

En général, les métaux « libres », c'est-à-dire sous forme cationique, sont plus réactifs que ceux liés à des espèces chimiques minérales ou organiques présentant des propriétés complexantes. Toutefois, certaines formes organométalliques, comme le méthyl-mercure (CH_3Hg^+) ou encore l'association d'éléments tels As, Cd, Cr, Ni et Zn avec des chlorures ou des sulfates augmentent la toxicité des complexes considérés (*Galsomies, 1996*).

3. Contamination de l'air par les métaux.

Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. De nombreux éléments se trouvent à l'état de traces dans des particules atmosphériques provenant de combustions à haute température, de fusions métallurgiques, des incinérateurs municipaux, des véhicules, etc. Les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant la taille de ces particules. Dans l'air ambiant, on trouve de nombreux

éléments, comme le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, etc., dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines (*Sandrine, 2005*).

3.1. Les sources d'émission :

Si la plupart des métaux sont présents naturellement à l'état de trace dans le fond géométrique (sols, eaux), des quantités plus en moins importantes sont également émises dans l'air par des sources d'émission naturelles ou liées aux activités humaines. On distingue deux catégories principales de sources atmosphériques de métaux :

☞ Les sources d'origine naturelle :

- Volcans (As, Ni, Hg, Zn).
- L'érosion de la croûte terrestre (Al, As, Cr, Fe, Ni, V).
- Les feux de forêt (Zn).
- Les émissions biologiques issues de la végétation (Hg, Mo, As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn) et les embruns marins (Hg, Na).

☞ Les sources d'origine anthropique : elles sont liées à l'industrie, au transport et à l'agriculture, notamment :

- La combustion de combustibles fossiles (pétrole et charbon dans l'industrie, le chauffage et les transports :(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).
- L'extraction de minerais (As, Fe, Ni, V).
- La métallurgie (industrie du fer et de l'acier : Pb, Cd, Ni ; et de métaux non ferreux : As, Cd).
- L'incinération des déchets ménagers (Hg, Pb, Cd).
- Les engrais et les pesticides (Cd, As, Hg).

A l'échelle mondiale, les émissions d'origine anthropique dépassent dorénavant les émissions d'origine naturelle pour bon nombre d'éléments tels que le plomb, le cadmium, le zinc, l'arsenic et le mercure (*Sandrine, 2005*).

3.2. Transport et dépôt.

De manière simplifiée, le cycle des métaux suit trois étapes : Emission, transport et dépôt (figure-8). Les productions naturelle et anthropique de particules génèrent des éléments métalliques spécifiques à la source et au processus d'émission. Ces métaux sont sujets au phénomène de transport qui dépend de la granulométrie des particules, des transformations physico-chimiques et de la dynamique atmosphérique.

Enfin, la dernière étape correspond au dépôt de ces particules (humide ou sec).

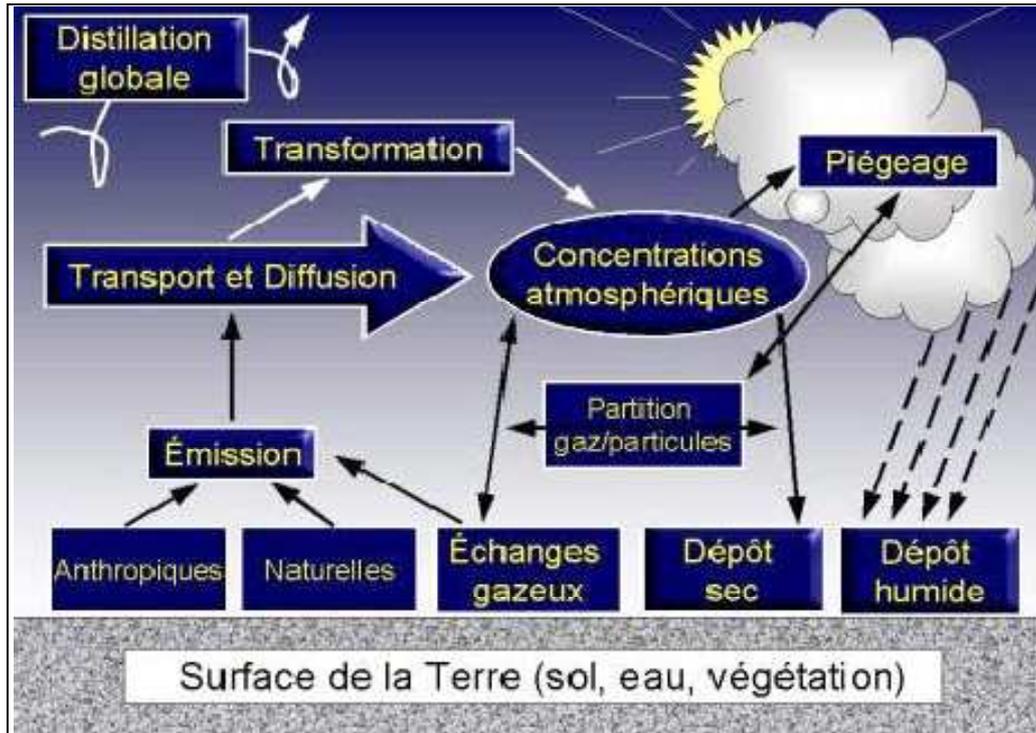


Figure 8: Emissions - transports – dépôts des éléments métalliques (Veschambre, 2006).

Les métaux sont des éléments très abondants à la surface de la terre. A l'état naturel, on peut les retrouver sous des formes d'oxydes et d'hydroxydes ou comme inclusion dans une matrice minérale silicatée. Les gisements naturels, comme le pétrole et le charbon, entraînent la mobilisation des métaux au cours de leur exploitation par l'homme. Les activités humaines produisent ces éléments à l'état de corps purs, d'alliages, de poussières... Les métaux sont transférés dans l'atmosphère essentiellement sous forme de particules fines. Le vent met en mouvement ces particules de diamètres variables. Ces particules s'ajoutent à celles produites par les mécanismes naturels (érosion éolienne, vocalisme et production d'aérosols marins). Par ailleurs, les fumées de volcan, d'usine et d'échappement des moteurs thermiques entraînent des émissions de métaux à l'état de gaz. Ces émissions à haute température se refroidissent dans l'atmosphère et les métaux se condensent en très fines particules (Veschambre, 2006).

4. Effet toxique de certains métaux sur la santé humaine.

A court et à long terme, les métaux sont connus pour leurs effets sur la santé humaine. Parmi les voies de pénétration dans l'organisme (inhalation de l'air, ingestion de nourriture ou d'eau, contact dermique). L'inhalation est le principal mode de contamination, les particules

les plus fines chargées en métaux pouvant pénétrer plus profondément dans les voies respiratoires (*Sandrine, 2005*).

☞ Le plomb.

Ce métal qui a des propriétés cumulatives importantes est toxique. Le plomb minéral est distribué à raison de 94% dans les os et de 6% dans les autres tissus, dont 4% dans le sang. Le plomb organique se fixe préférentiellement dans le cerveau d'où des manifestations toxiques particulières (Encéphalopathie). L'action toxique essentielle du plomb minéral est la perturbation de la biosynthèse de l'hémoglobine, qui se traduit par une légère anémie hypochrome, parfois des hématies à granulations basophiles, dites « ponctuées » et une augmentation de la plombémie (*Robert, 1992*).

Certaines interrogations subsistent sur l'impact à long terme, en particulier sur certains sujets sensibles. Néanmoins, à l'image des connaissances concernant les infections virales et les pneumo-allergies, on peut redouter une augmentation de l'inflammation des bronches favorisant de ce fait les maladies respiratoires chroniques, surtout en cas d'expositions répétées au cours de l'année (*Dockery, 1989*).

☞ Le Nickel.

Le nickel métal et ses composés inorganiques sont considérés comme étant assez peu toxiques. En revanche, certains composés organiques comme le nickel tétracarbonyle sont extrêmement toxiques et possèdent un fort potentiel allergène et mutagène. La cancérogénicité du nickel se manifeste essentiellement par inhalation. Les composés du nickel sont classés dans la catégorie 1 « cancérogènes pour l'homme. » et le nickel métallique dans la catégorie 2B « *cancérogènes possibles pour l'homme* » par l'agence internationale de recherche sur le cancer (*IARC, 1990*).

Le nickel métal augmenterait l'incidence des décès par pathologie respiratoire à une concentration supérieure à 0,04 [mg/m³].

☞ Le manganèse.

L'exposition au manganèse par inhalation est neurotoxique. En effet l'exposition au dioxyde ou au tétraoxyde de manganèse peut entraîner une réponse inflammatoire au niveau des poumons, avec de la toux, des bronchites, des pneumonites, et parfois des pneumonies. L'inhalation de fortes concentrations de manganèse peut entraîner des troubles neurologiques (manganisme). Les premiers signes sont généralement subjectifs, comme un sentiment

général de faiblesse, une lourdeur ou une raideur des jambes, de l'anorexie, des douleurs musculaires, de l'irritabilité, des céphalées. Les poussières de manganèse induiraient une diminution de la fertilité masculine.

Par ingestion : peu de données sont disponibles, probablement parce que l'organisme exerce un fort contrôle homéostatique sur la quantité de manganèse absorbée suite une à exposition par voie orale. Ce contrôle protège ainsi l'organisme des effets toxiques du manganèse. Les études disponibles montrent des effets neurologiques pour de fortes doses de manganèses.

Selon *US EPA (1996)* le manganèse appartient à la classe D « *Substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme* ».

☞ **Le Vanadium.**

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

Le Vanadium a des effets membranaires : il augmente l'activité de l'adénylcyclose et inhibe l'ATPase Na^+K^+ au niveau du rein, du cerveau et du cœur et en conséquence, il inhibe la pompe à sodium. Il perturbe d'autres métabolismes, diminue la résistance immunologique et la réactivité allergique et présente une certaine toxicité rénale. Il provoque en quelque sorte la bronchite chronique et la pneumonie (*Braun and al, 1997*).

☞ **Le chrome :**

Le chrome trivalent (Cr^{+3}) est un oligoelement essentiel pour le métabolisme du glucose et de l'insuline qui est important lors de pathologies de la senescence comme le diabète de type 2 et les maladies cardiovasculaires (*Anderson, 1994*).

La toxicité du chrome chez l'homme est habituellement causée par des ingestions accidentelles de composés hexavalents du chrome qui peuvent résulter dans des dommages du tractus digestif, du foie, des reins et du système nerveux. Le chrome (CrVI) est classé dans la catégorie 1 « *cancérogène pour l'homme.* » par l'*IARC (1990)*.

Par inhalation, les effets aigus se manifestent par les irritations des muqueuses respiratoires (ulcération, perforation du septum nasal, syndrome asthmatiforme).

☞ Le Cuivre.

Le cuivre est un oligoélément essentiel qui joue un rôle vital dans divers métabolisme. Il est connu pour intervenir notamment dans la qualité des cartilages, la minéralisation des os, la synthèse et la régulation de peptides neurotransmetteurs, l'immunité et le métabolisme du fer. Les intoxications au cuivre sont rares mais peuvent survenir d'une ingestion involontaire de sels de cuivre. Ils peuvent provoquer des intoxications graves avec vomissement et syndrome dysentérique entraînant un collapsus (*Leblanc et al, 2004*). L'inhalation des fumées de cuivre peut être aussi responsable de la « fièvre du fondeur » (frissons, nausées et parfois vomissement et courbatures) qui réaccompagne d'une fatigue, de douleurs diffuses et de maux de tête.

Parmi les intoxications chroniques liées au cuivre, il y a la maladie de *WILSON*, qui est une maladie héréditaire, à transmission autosomique récessive, liée à l'accumulation de cuivre dans le foie et les noyaux gris centraux (*Haguenoer, 1982*).

☞ Le Zinc.

Le zinc est l'élément trace le plus répandu dans l'organisme après le fer, Chez l'homme, l'effet le plus prononcé est la toxicité aiguë du zinc qui se manifeste par des troubles gastro-intestinaux. Les sels solubles du zinc sont toxiques par ingestion. Ils peuvent provoquer des irritations des muqueuses gastro-intestinales (chlorure de zinc). L'inhalation de leurs fumées peut également provoquer des irritations des muqueuses respiratoires des dermatoses et ulcération de la muqueuse nasale (chromate de zinc). Ce dernier est soupçonné d'avoir une action cancérogène pour l'homme.

L'inhalation des fumées d'oxyde de zinc peut entraîner des effets connus sous le terme de « fièvre du fondeur », à des concentrations supérieures à 200[$\mu\text{g}/\text{l}$] (*Keck and Vernus, 1999*).

☞ Le Sélénium.

Le sélénium est un métalloïde dont les propriétés physicochimiques sont proches de celles de soufre. Les sélénométhionines sont les formes prédominantes du sélénium alimentaire.

Les risques toxiques du sélénium ont été identifiés avant son utilité.

Le sélénium et ses composés sont classés dans la catégorie 3 « ne peut se prononcer quant à la cancérogénicité pour l'homme » par *IARC* (1987). Mais il existe encore de nombreuses lacunes dans la connaissance de son métabolisme (limite, sécurité).

La formation de dérivés méthylés, par exemple avec la méthionine, le rend beaucoup moins toxique.

La sélénométhionine peut suivre le même métabolisme que la méthionine et être incorporée dans le pool protéique. Ce processus conduit à une séquestration du sélénium et réduit son activité biologique (*Salbe and Levander, 1990*).

En revanche, en cas de surdosage, il est beaucoup plus difficile pour l'organisme d'éliminer l'excès de sélénométhionine. Mais il semble en réalité que l'effet toxique du sélénium soit un effet oxydant du sélénite de sodium en présence de glutathion (*Therond and al 1997*).

Cet effet est celui qui se manifeste vis-à-vis des cellules tumorales ou de certaines cellules inflammatoires qui ont un statut redox anormal. Cela expliquerait les effets possiblement anticarcinogènes du sélénium (*Spallholz, 1994*).

Il n'y aurait alors aucune preuve que son effet soit toxique sur les cellules normales.

(*Therond and al 1997*).

☞ Le cobalt

Le cobalt élémentaire ne pose aucun risque connu pour la santé aux personnes qui y sont très peu exposées par la nourriture et les milieux naturels. En milieu professionnel, l'exposition se fait par inhalation et entraîne des atteintes du système respiratoire (syndrome irritatif avec rhinite, conjonctivite, toux asthme, pneumopathies, hypersensibilités associant des signes fonctionnels respiratoires à un syndrome pseudogrippal).

Par ingestion, des cas mortels de cardiomyopathies ont été décrits après ingestion de cobalt. Par contre, une autre étude a montré que le cobalt (0,6 à 1 mg de cobalt/kg/j) n'induisait pas d'effet cardiaque. Selon *CIRC – IARC (1991)*, le Cobalt et ses composés (évalués en groupe) sont classés dans le Groupe 2B « L'agent (le mélange) est peut-être cancérigène pour l'homme. Le mode d'exposition à cet agent entraîne des expositions qui sont peut-être cancérigènes pour l'homme. ».

☞ L'arsenic.

L'arsenic élémentaire est un oligo-élément, peu toxique, contrairement à ses formes inorganiques : arsine (AsH_3) ($\text{As}(-\text{III})/\text{As}^{3-}$), arsénite $\text{As}(\text{III})/\text{As}^{3+}$ et son oxyde (As_2O_3), arséniate $\text{As}(\text{V})/\text{As}^{5+}$ et son oxyde (As_2O_5). Les états d'oxydation les plus communs sont As(III) et (V), les dérivés trivalents seraient plus toxiques que les pentavalents (3 à 5 fois).

Par inhalation, les poussières induisent une irritation respiratoire, rhinite, pharyngite ou laryngite. Le trioxyde de diarsenic est un fort irritant respiratoire (toux, dyspnée, ulcérations voire perforations de la cloison nasale).

Par ingestion : les symptômes d'une intoxication à l'arsenic inorganique sont : nausées, anorexie, vomissements, douleurs épigastriques et abdominales, diarrhées (10 minutes à 1 heure après l'ingestion). Une exposition sévère peut se traduire par une encéphalopathie aiguë, une insuffisance cardiaque congestive, convulsions, paralysie, coma et mort. La dose létale chez l'homme a été estimée à environ 0,6 mg/kg/j.

Contact cutané : l'arsenic inorganique est un fort irritant cutané. Il peut induire des dermites et des ulcérations.

D'après le Comité Européenne, le pentoxyde d'arsenic, trioxyde d'arsenic, arséniate de plomb, acide arsénique et ses sels sont classés en Catégorie 1 « *substances que l'on sait être cancérogènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour établir l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à de telles substances et l'apparition d'un cancer.* ». Mais l'arsenic n'est pas classé.

Egalement selon *US EPA (IRIS) (1998)*, l'arsenic inorganique appartient à la classe A « *Substance cancérogène pour l'homme* ».

Tout arséniure métallique peut, en présence d'acide, libérer de l'arsine, gaz hémolysant extrêmement toxique (mortel dès 40 [mg/m³]).

5. Effets sur l'environnement.

Les dépôts d'origine atmosphérique sont pour les écosystèmes naturels, une charge supplémentaire par rapport aux teneurs naturelles du fond géochimique (sol, eau). L'exposition à une pollution atmosphérique par les métaux lourds est connue pour provoquer des effets dommageables, à court et à long terme. Les effets toxiques des métaux dépendent de leur dose (à l'exception du plomb, cadmium et mercure toujours toxiques) et de leur forme chimique. Ces effets sont multiples chez les végétaux et les animaux, et se traduisent par exemple par une diminution de la fonction de la reproduction (chrome), des baisses de croissance, de productivité ou de biodiversité (arsenic, cadmium et vanadium), une apparition de chloroses (nickel), ou encore des troubles neurologiques, digestifs, cardiovasculaires ou rénaux (mercure) (*Sandrine, 2005*).

Dans les systèmes aquatiques, la pollution métallique affecte la qualité des eaux de surface et des nappes phréatiques pouvant aller jusqu'à une limitation de l'utilisation de l'eau (*Sandrine, 2005*).

Par exemple, la toxicité du nickel pour les organismes marins est considéré comme faible. Cette toxicité devient significative pour des concentrations qui varient entre 0,030 et 0,107 [mg/l] chez les mollusques d'eau de mer (*Branch, 1973*).

Le zinc réduit l'activité de la microflore des rivières pour des concentrations supérieures ou égales à 0.05 ppm. C'est un métal toxique vis-à-vis des bactéries et des protozoaires, mais aussi sur les huîtres, les œufs et les larves de poissons ainsi que sur les poissons eux mêmes (Rocher, 2008).

D'une manière générale, tous les végétaux sont des accumulateurs de métaux, qu'ils soient aquatiques ou terrestres. Premier maillon de la chaîne alimentaire, les végétaux sont le point de départ du transfert des métaux dans cette chaîne, et peuvent ensuite se concentrer de manière parfois importante dans les échelons trophiques supérieurs (Sandrine, 2005).

6. Cadre réglementaire :

6.1. Législation Internationale.

Historiquement, c'est dans un climat de confrontation et non de conciliation entre l'écologie et l'économie que se tient la conférence des Nations Unies sur l'environnement humain, à Stockholm, en 1972. Cette conférence sera à l'origine du premier vrai concept de développement durable baptisé à l'époque éco-développement. Au cours des années 1980, le grand public découvre les pluies acides, le trou dans la couche d'ozone, l'effet de serre, la déforestation et la catastrophe de Tchernobyl.

Un rapport de Gro Harlem Brundtland, premier ministre en Norvège et présidente de la Commission Mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre Avenir à tous*, publié en 1987, s'attache à définir ce concept de *Sustainable Development* par « un développement qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Depuis cette date, le concept de développement durable a été adopté dans le monde entier et la législation avance (Badol, 2005). Parmi les protocoles et conventions internationaux on peut citer :

☞ Convention de Genève du 13/11/1979

Sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, signée par les Etats Européens et l'Amérique du nord. Elle constitue une étape importante dans la prise en charge de l'hygiène de l'air dans ces pays. Dans son « article 2 », elle appelle les parties à élaborer et harmoniser leurs politiques nationales pour réduire graduellement les polluants atmosphériques (Hamdad, 2002)

☞ Protocole d'Helsinki du 08/07/1985

Premier traité international comportant des objectifs précis et vérifiables en ce qui concerne la lutte contre la pollution de l'air, ce protocole obligeait les Etats parties à réduire leurs émissions nationales de soufre d'au moins 30% avant 1993. (*Kiss, 2004*)

☞ Protocole de Genève du 18/11/1991

Il concerne la lutte contre les émissions des composés organiques volatiles ou leur flux transfrontières. Ce protocole oblige les Etats parties à réduire leurs émissions de 30%.

☞ Le Sommet de Rio de Janeiro de Juin 1992

Lors du Sommet de Rio de Janeiro en 1992 qui fut pour la première fois le théâtre d'une rencontre entre un aussi grand nombre d'Etats (182) pour débattre de l'avenir de la planète, la Communauté internationale a pris conscience du phénomène mondial de dérèglement climatique, résultat direct de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre produites par l'activité humaine. Au travers de l'adoption d'une convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, les gouvernements des Pays s'engagent solennellement à agir contre l'effet de serre.

☞ Le Protocole de Kyoto en 1997.

Le Protocole de Kyoto de 1997 prévoit une réduction des émissions de gaz à effet de serre à horizon 2010. Les pays développés se sont engagés à réduire pour 2010 leurs émissions (par rapport à celles émises en 1990) : - 8% pour l'Union européenne, - 6% pour le Japon et le Canada, stabilisation au même niveau qu'en 1990 pour la France.

☞ Protocoles d'Aarhus du 24/06/1998.

L'un concerne les pollutions organiques persistantes et l'autre sur les métaux lourds. Ils prévoient la réduction des émissions des polluants organiques persistants et des métaux lourds.

☞ Protocole de Copenhague du 11/12/2009.

L'accent est mis sur :

- Le niveau de réduction des émissions de gaz à effet de serre: une baisse de 15 à 30 % dans les pays développés d'ici 2020
- L'augmentation de la température de la terre.
- Le financement des transferts technologiques.

6.2. Réglementation Algérienne :

Les décrets exécutifs relatifs à la pollution atmosphérique sont :

✍ Décret exécutif n° 2006-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.

✍ Décret exécutif n° 2006-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.

✍ Décret exécutif n° 07-299 du 15 Ramadhan 1428 correspondant au 27 septembre 2007 fixant les modalités d'application de la taxe complémentaire sur la pollution atmosphérique d'origine industrielle.

✍ Le journal officiel de la République Algérienne du 8 Dhou El Hidja 1426/8 janvier 2006 consacre les articles 03, 04, 05, 06, 07, 08 et 09 pour la surveillance de la qualité de l'air.

Art.3. La surveillance de la qualité de l'air concerne les substances suivantes :

- . le dioxyde d'azote ;
- . le dioxyde de soufre ;
- . l'ozone ;
- . les particules fines en suspension.

Art. 4. La surveillance de la qualité de l'air est confiée à l'observatoire national de l'environnement et du développement durable.

Elle s'effectue selon les modalités techniques fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement.

Art. 5. La détermination des objectifs de qualité de l'air et des valeurs limites de pollution atmosphérique est fixée sur une base moyenne annuelle.

Art. 6. Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit :

Particules fines en suspension :

- a) objectif de qualité : 50 micro grammes/m³;
- b) valeur limite : 80 micro grammes/m³.

Cet article parle aussi des valeurs limites des autres polluants, à savoir le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone.

Art. 7. Les seuils d'information et les seuils d'alerte sont fixés sur une base moyenne horaire.

Art. 8. Les seuils d'information et les seuils d'alerte sont fixés pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, l'ozone et les particules fines en suspension selon les caractéristiques physiques et chimiques des particules concernées. Les seuils d'alerte sont fixés, le cas échéant, par arrêté conjoint du ministre chargé de l'environnement et du ministre concerné par l'activité engendrant le type de particule considérée.

Art. 9. Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés par l'article 8 ci-dessus sont atteints ou risquent de l'être, le ou les walis concernés prennent toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes.



Chapitre III:
Principales techniques
d'échantillonnage et d'analyses
des aérosols

III. Principales techniques d'échantillonnage et d'analyses des aérosols

1. Classification des stations de surveillance de la qualité de l'air.

La classification des stations de mesures est un élément préalable indispensable à toute définition d'une stratégie de la surveillance de la pollution atmosphérique.

Les critères fondamentaux de choix d'une station parmi les différentes classes de station sont les suivant :

- Les objectifs de surveillance de la station.
- L'environnement du site.
- Les critères d'implantation de la station (*Guivarc'h et al, 2002*).

1.1. Typologie des stations.

A partir des classes européennes et des réflexions du groupe de travail français « caractérisation des sites », la classification recommandée est la suivante :

Station trafic ;

Station industrielle ;

Station urbaine ;

Station périurbaine ;

Station rurale régionale ;

Station rurale nationale ;

Station d'observation spécifique.

Les classes de stations sont divisée en deux groupes : les stations dites de fond (urbaine, périurbaine, rurale régionale, rurale nationale) et les stations de proximité (trafic, industrielle) (*Guivarc'h et al, 2002*).

1.2. Classification des stations en fonction des objectifs de surveillance

Un des critères essentiels de choix d'une station est l'objectif ou les objectifs de surveillance poursuivis par son installation. Le tableau-4 représente les classes de stations en fonction des objectifs et des polluants.

Tableau 4: Les classes de stations en fonction des objectifs et des polluants.

Classes de stations	objectifs	Polluants
trafic	L'objectif de ces stations est de fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum d'exposition auquel la population située en proximité d'une infrastructure routière est susceptible d'être exposée	Polluants recommandés : les polluants réglementés d'origine «automobile » comme CO,NO _x , PM ₁₀ , composés organiques toxiques...Les polluants optionnels sous condition de niveaux pertinents sont les suivants SO ₂ , Pb. La mesure de l'ozone n'est pas pertinente.
Industrielle	L'objectif de ces stations est de fournir des informations sur les concentrations représentatives du niveau de pollution induit par des phénomènes de panache ou d'accumulation issu d'une source industrielle.	Polluants recommandés : les polluants réglementés d'origine industrielle comme le SO ₂ , COV, HAP, métaux lourds, NO _x sous conditions de niveaux pertinents.Polluant non recommandé : O ₃ , CO.
Urbaine	L'objectif de ces stations est le suivi du niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de « fond » dans les centres urbains	Polluants recommandés :les polluants réglementés NO _x ,PM ₁₀ ,O ₃ , SO ₂ , composés organiques volatils toutefois la mesure systématique de tous les polluants en continu en station fixe est sous conditions de niveaux pertinents.
Périurbaine	l'objectif de ces stations est le suivi du niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de « fond » à la périphérie du centre urbain.	Polluants recommandés : NO _x , O ₃ , précurseurs photochimiques. Polluants optionnels sous conditions de niveaux pertinents : SO ₂ , PM ₁₀ et autres polluants.
Rurale régionale	Ces stations participent à la surveillance de l'exposition des écosystèmes et de la population à la pollution atmosphérique de fond notamment photochimique à l'échelle régionale. Elles participent à la surveillance de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire.	Polluants recommandés : NO _x ,O ₃ , précurseurs photochimiques ou analyse des retombés séches ou humides, suivi de phénomène de pollution locale (ammoniac par exemple).
Rurale nationale	Ces stations participent à la surveillance dans les zones rurales de la pollution atmosphérique dites de fond issue des transports de masse d'air à longue distance notamment transfrontaliers.	Polluants recommandés : NO _x ,O ₃ , précurseurs photochimiques ou analyse des retombés séches ou humides
Observations spécifiques	Stations utilisées pour des besoins spécifiques tels que l'aide à la modélisation ou la prévision.	Selon l'objet de la station.

Source : (Guivarc'h et al, 2002).

1.3. Classification des stations en fonction des sources :

Une surveillance est mise en place dans une zone donnée lorsqu'un émetteur ou un groupe d'émetteurs influencent la qualité de l'air de cette zone. Un ou plusieurs émetteurs constituent une source d'émission d'une certaine surface. Ces sources ont donc des caractéristiques spatiales qui constituent une typologie de source, elles peuvent être linéaires (une émission en tonnes/km), ponctuelles (une émission en tonnes/an) ou surfaciques (émission en tonne/km²).

Nous présentons dans le tableau ci-dessous les différentes stations avec leurs types de sources et catégories d'émetteurs associés.

- Les stations trafic doivent être placées à proximité immédiate de sources linéaires et dont les polluants sont principalement générés par une activité du transport routiers.
- Les stations industrielles doivent être en proche de sources industrielles localisées et dont les polluants sont générés principalement par une activité industrielle.
- Les stations urbaines et périurbaines doivent être en présence directe ou sous influence de types de sources et d'émetteurs divers situés à l'intérieurs ou à la périphérie d'une agglomération urbaine et n'appartenant pas aux deux cas de figures cités ci-dessus.
- Les stations rurales régionales doivent être sous l'influence d'une ou plusieurs catégories d'émetteurs répartis sur plusieurs sources différentes à une échelle (pas forcément administrative mais aussi climatologique ou topographique).
- Les stations rurales nationales doivent être en présence immédiate de sources surfaciques possédant des émetteurs directs majoritairement non- anthropiques (catégorie «autres secteurs ou indifférenciés » y compris nature) et/ou sous l'influence d'émetteurs qui ne sont pas situés sur le territoire national.
- Les stations d'observations sont celles dont la configuration ne permet pas d'isoler un des cas de figures cités ci- dessus (*Guivarc'h et al, 2002*).

Tableau 4 : Classes de stations et types de sources et d'émetteurs.

Classes de station	Type de source	Catégories d'émetteurs principaux
Trafic	Source linéaire	Transport routier
industrielle	Source ponctuelle Industrielles fixes ou zones industrielles.	Emission générée par une activité industrielle : Extraction, transformation d'énergie et distribution Industrie y compris traitement des déchets.
Station urbaine	Sources surfaciques	Multi- émetteurs (transport, chauffage, industrie) : Résidentiel, tertiaire, commercial, institutionnel. Transport routier. Modes de transports autres que routier. Industrie y compris traitement des déchets. Les émissions sont plutôt à l'intérieur de la zone urbaine.
Station périurbaine	Sources surfaciques.	Multi- émetteurs (transport, chauffage, industrie) : Résidentiel, tertiaire, commercial, institutionnel. Les émissions proviennent de l'intérieur et/ou de l'extérieur de cette zone.
Station rurale régionale	Sources surfaciques régionales	Multi- émetteurs (transport, chauffage, industrie, émetteurs biogéniques). Les émissions proviennent en majorité de l'extérieur de la zone surveillée.
Station rurale nationale	Sources surfaciques Sources non régionales	Multi-émetteurs à longue distance. Il n'y a pas d'émetteurs directs qui influent la station.
Station d'observations spécifiques	diverses	Divers

Source : (Guivarc'h et al, 2002).

2. Les principales techniques d'échantillonnage des aérosols.

2.1. Echantillonnage :

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

Il est reconnu que l'efficacité de collecte des particules en suspension de diamètre inférieur à 100 μm n'approche 100 % que pour les tailles de particules approximativement inférieures à 3 [μm]. Au-delà de cette dimension, cette efficacité est fortement influencée par les conditions météorologiques (vitesse du vent) et de prélèvement (débit d'aspiration, position et conception du dispositif de captation). Pour des vitesses de vent constantes, l'efficacité de collecte décroît lorsque le diamètre des particules augmente (*Anonyme , 1984*).

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

2.1.1 Les prélèvements sans coupure granulométrique précise :

Ce sont des méthodes dites intégrales qui collectent ou mesurent les aérosols sans dimension. Ils sont généralement effectués selon l'une des trois techniques suivantes :

La méthode de mesure dite des « fumées noires » : à faible débit d'aspiration (85 l/h) privilégie la captation sur filtre des particules fines inférieures à environ 5 μm constituants de suies imbrûlées émis par les unités de combustion fixes et mobiles.

Les prélèvements sur filtre ouvert de 47mm : généralement en nitrate de cellulose de porosité 0,8 μm , à un débit relativement élevé (de 1 à 1,5 m³/h) où les particules de diamètre supérieur à 0,3 μm sont retenues quantitativement sur le filtre.

Les échantillonneurs HVS (High Volume Sampler) : à grand débit (plus de 1m³/mn) configurés en mode TSP (Particules Totales en Suspension) dont l'efficacité de collecte des particules de grand diamètre est significative.

2.1.2 Les prélèvements avec coupure granulométrique :

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

2.1.3 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 (*Renoux, 1996*).

2.2. Débit d'échantillonnage

Selon le préleveur utilisé, le débit d'échantillonnage peut varier de un mètre cube par heure (Low Volume Sampler - LVS) à quelques dizaines de mètres cubes par heure (High Volume Sampler - HVS). Chaque type de préleveur a ses inconvénients et ses avantages.

Les HVS permettent de collecter des quantités de matière importantes sur des filtres de grand diamètre (150 mm, par exemple).

Les LVS utilisent des filtres dont le diamètre est de l'ordre de 47 et 37 mm.

Par contre, il est possible d'utiliser des filtres de type membrane (Téflon, esters de cellulose...). L'intégralité des particules est mise en solution, il n'y a pas de problème d'homogénéité, ni de découpe du filtre.

2.3. Les filtres

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).

2.3.1. Les filtres en fibre de verre

Ils ont une efficacité de collection de 99,9% pour les particules de diamètre supérieur à 0,3 µm. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate.

L'hygroscopicité 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 µg Zn/cm². (*Norme ISO 9885, 1993*).

2.3.2. Les filtres membranes

Ce sont des filtres nitro-cellulose (Sartorius et Millipore) ou acétate et ester de cellulose (Gelman GA-3) qui sont solubles dans les éthers et alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. L'étape de minéralisation est ainsi facilitée (*Norme ISO 9885, 1993*).

3. Les principales techniques d'analyse des aérosols.

Les diverses techniques de mesure existantes varient selon le type de particules surveillées et débouchent sur des résultats notablement différents selon la technique utilisée.

3.1 La méthode gravimétrique.

Cette méthode simple consistant à peser des filtres avant et après prélèvement est cependant astreinte à des contraintes d'utilisation. Le relevé des filtres est manuel, les filtres empoussiérés doivent être pesés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les filtres vierges, sans perdre de matière lors des manipulations (*Belot, 1996*).

3.2 La réflectométrie (indice de fumées noires).

L'air échantillonné passe à travers d'un papier filtre sur lequel se déposent les particules. L'analyse du filtre, effectuée ultérieurement par réflectométrie, consiste à éclairer le filtre par de la lumière visible et à mesurer les intensités incidente (I_0) et réfléchi (I).

La réflectance (I/I_0) qui varie de 100 à 0% suivant le degré de noircissement du filtre est convertie par le biais d'une courbe d'étalonnage en concentration de fumées noires par unité de surface. La connaissance du débit permet de calculer un indice de fumées noires en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La courbe d'étalonnage est établie pour un type de papier filtre et un réflectomètre donnés (*Putauda and al, 2004*).

3.3 La radiométrie (jauge bêta)

La méthode de mesure de la concentration des particules dans l'air ambiant, au moyen d'un dispositif basé sur l'absorption des rayons β par la matière est définie par la norme AFNOR NF X43-017. Le principe repose sur l'absorption des rayons β de faible énergie par la matière, adsorption qui est quasiment proportionnelle à la masse de matière traversée, avec un coefficient qui varie peu en fonction de la nature des particules collectées à l'exception des éléments très lourds. La réduction de l'intensité du faisceau incident est connue sous le nom d'atténuation du rayonnement β . La mesure est effectuée automatiquement avant et après formation du dépôt de poussières prélevées dans l'air ambiant et collectées sur un ruban filtre.

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

Le TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) développé par Rupprecht et Patashnick est composé d'une microbalance utilisant un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle, et d'un microprocesseur. Les particules aspirées au moyen d'une pompe de prélèvement sont déposées sur le filtre disposé en haut du cône et en augmentant la masse du système, elles produisent une décroissance de la fréquence naturelle de vibration.

4 .Analyse des métaux dans les particules atmosphériques :

Il existe deux grandes familles de techniques analytiques permettant l'analyse des métaux dans les aérosols :

- les techniques d'analyse de l'échantillon sous forme solide. Parmi celles-ci, les plus accessibles sont la Spectrométrie de Fluorescence X (XRF), la spectrométrie d'Emission X Induite par Protons (PIXE), activation neutronique.
- les techniques d'analyse de l'échantillon sous forme liquide. Les plus couramment utilisées sont : la Spectrométrie d'Absorption Atomique Electrothermique (SAAE), la Spectrométrie d'Emission Atomique Induite par Couplage Plasma (ICP-AES), la Spectrométrie de Masse Induite par Couplage Plasma (ICP-MS) et la Spectrométrie de Fluorescence Atomique (AFS).

4.1. L'Analyse par Activation Neutronique NAA (Neutron Activation Analysis).

4.1.1. Principe.

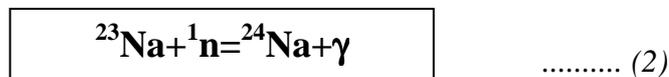
Zikovsky (1995) définit l'analyse par activation comme une méthode analytique qui repose sur les transformations (spécifique, pour chaque élément) des noyaux atomiques et l'émission d'un rayonnement caractéristique. Leurs transmutations, pendant ce processus, nous permettent d'identifier et de quantifier chaque élément. La détermination de la concentration d'un élément se nomme dosage (*Benoit ; 2000*).

L'activation peut être provoquée aussi bien par les particules neutres que par les particules chargées. Néanmoins les réactions de capture radiative (n, γ) avec les neutrons thermiques présentent une section efficace bien plus élevée que les autres types de réactions.

La figure-10 illustre le phénomène d'une réaction nucléaire

Exemple :

L'exemple suivant représente la réaction nucléaire produite par un neutron qui percute un atome de sodium :



L'atome de sodium percuté par un neutron se transforme en l'isotope ${}^{24}\text{Na}$ qui émet, suivant l'équation (2), une particule bêta et des rayons gamma afin de retrouver l'état fondamental.

La figure-9 illustre la désintégration de l'atome de sodium.

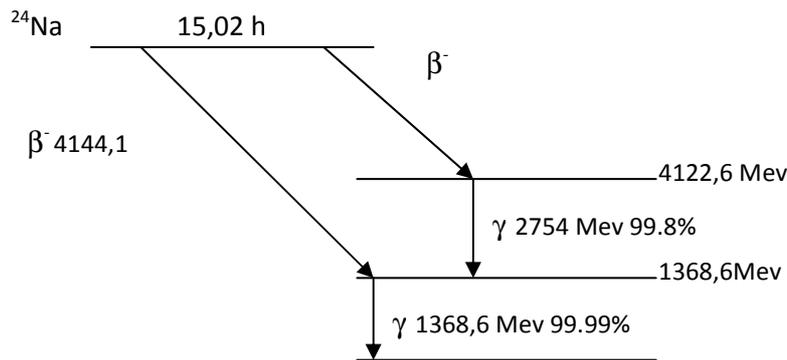


Figure 9 : Le schéma de désintégration du Sodium après activation neutronique. ^{24}Na peut être identifié par ces pics d'absorption totale apparaissant sur le spectre : 1368,6 Mev et 2754 Kev.

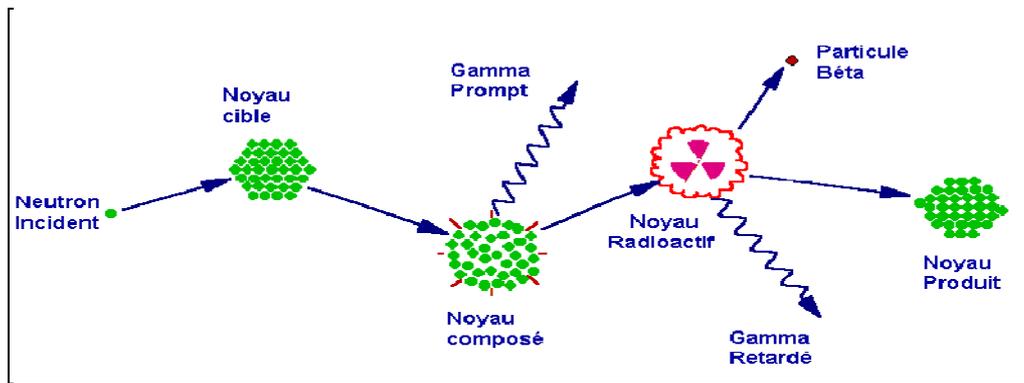


Figure 10. Diagramme illustrant le processus de la capture neutronique par un noyau cible suivi d'une émission de rayons gamma (Glascock, 2004).

4.1.2. Caractérisation d'éléments simples par spectrométrie gamma sous irradiation neutronique.

🚧 Les réactions neutroniques sources de rayonnements gamma

Lors de l'absorption d'un neutron par un noyau cible, il se forme un noyau composé, créé dans un état fortement excité. Cet état instable, d'une durée de vie de l'ordre de 10^{-14} S, peut se désexciter selon plusieurs voies, en émettant (figure-11) :

- Des particules massiques associées ou non à des rayonnements gamma :
 - o un neutron : on a alors une réaction de diffusion ;
 - o plusieurs neutrons : réactions $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, (n, xn) ;
 - o un noyau léger : (n, p) , (n, d) , (n, t) , $(n, 3\text{He})$, $(n, 4\text{He})$;
 - o des fragments de fission associés à des neutrons et des gamma : réaction (n, f) ;
- Des rayonnements gamma : réaction (n, γ) , gamma de désexcitation. (Baudry, 2003).

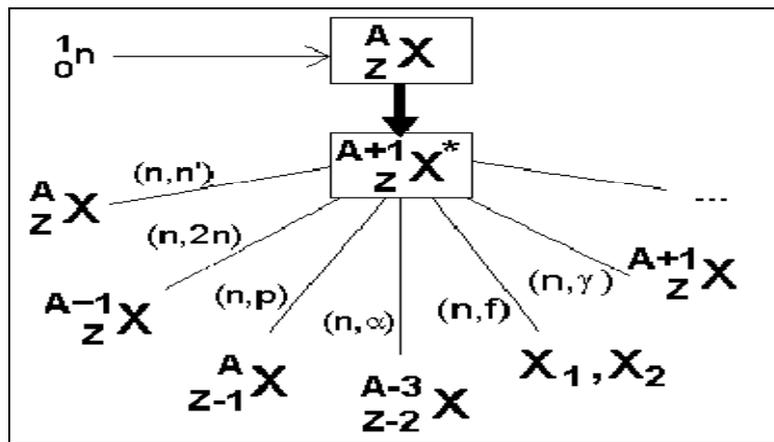


Figure 11 : Schéma de voies de sortie possibles des réactions neutronique (Baudry, 2003).

Les notations de la figure-11 sont les suivantes :

X : noyau cible Z : nombre de protons A : nombre de nucléons
 n : neutron γ : gamma de capture.

4.1.3. Théorie de la croissance et de la décroissance des radioéléments.

Lois fondamentales de la radioactivité.

Une substance est radioactive lorsque ses noyaux se désintègrent spontanément en émettant des particules nucléaires. Ces noyaux sont appelés indifféremment radio-isotopes ou radionuclides.

L'activité d'une substance radioactive ($A(t)$: (taux de désintégration) est le nombre de noyaux détruits par unité de temps. La loi fondamentale de la radioactivité s'écrit :

$$A(t) = \lambda N(t) \dots\dots\dots (03)$$

N est le nombre de noyaux à l'instant considéré

λ est la constante de désintégration exprimée en sec^{-1} .

Unités de mesure :

L'unité de mesure est le Becquerel (Bq)

1 Bq = 1 désintégration d'un noyau d'atome par seconde

ancienne unité :

Le Curie (Ci) = nombre de noyaux se désintégrant dans 1 gramme de radium par seconde

1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq soit 37 milliards de désintégrations par seconde.

4.1.4. Procédure d'analyse.

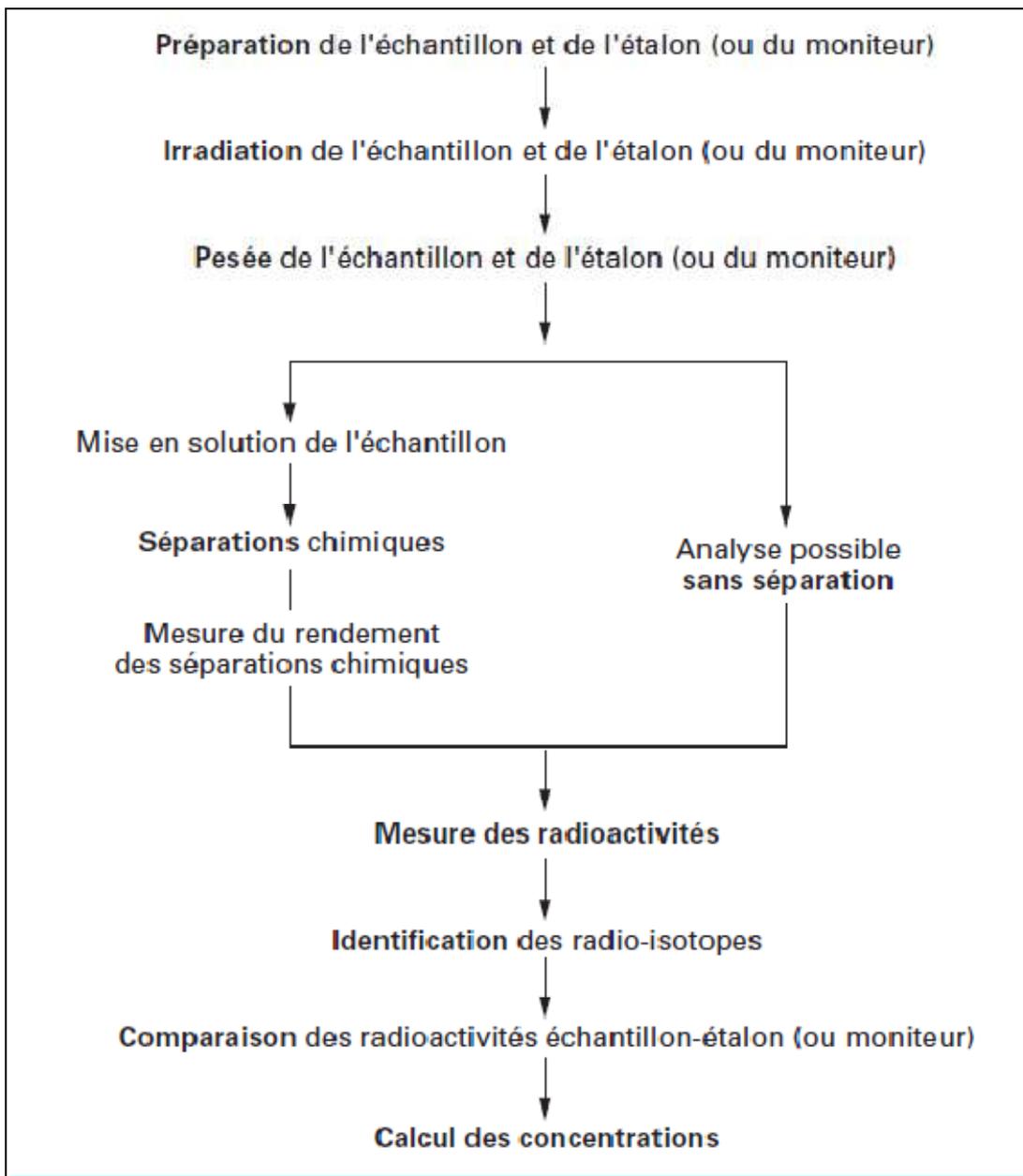


Figure 12 : Schéma de principe de l'analyse par activation
(Techniques de l'ingénieur P2565)

🚧 Préparation :

Avant de les irradiés, les échantillons généralement sous forme solide sont conditionnés soit dans des capsules en quartz soit dans des enveloppes dont le matériau dépend de la période des radioéléments à analysés. Ce matériau peut être en polyéthylène si les radioéléments à analyser sont de courte période (inférieure à quelque dizaine de minutes), il est en aluminium si les radioéléments sont de longue période. Quelques centaines de milligrammes sont suffisantes pour permettre l'analyse multiélémentaire des traces.

(Mouzai, 2010).

🚧 Irradiation.

La position, la durée et le mode d'irradiation doivent être soigneusement choisis et doivent prendre en considération la nature et l'aspect de l'échantillon.

🚧 Etape de décroissance de l'échantillon

La durée du refroidissement doit être choisie de façon optimale c'est à dire permettre la manipulation de l'échantillon en évitant que le radioélément à analyser disparaisse dans le bruit de fond.

L'activité de l'échantillon se met alors à décroître. La figure-13 illustre la décroissance de l'activité.

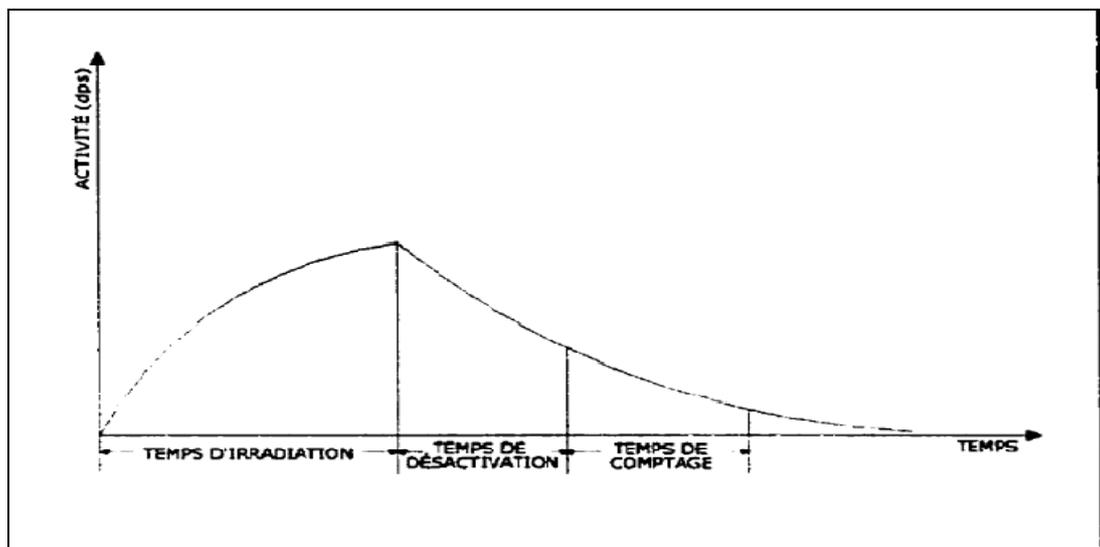


Figure 13 Décroissance de l'activité (Benoit ; 2000).

✚ Mesure des radioactivités, traitement des spectres :

La chaîne se compose d'un détecteur à semi-conducteur qui est actuellement dans la majorité des cas en germanium de très haute pureté. Ces détecteurs permettent de mesurer les rayons γ dans une gamme d'énergie de l'ordre de la centaine de KeV jusqu'à quelques MeV. Le pouvoir séparateur de ces détecteurs est de 1,5 à 1,8 keV pour une énergie de l'ordre du MeV.

Le détecteur est associé à un préamplificateur, un amplificateur et une haute tension. Le signal sortant de l'amplificateur est envoyé dans un codeur multicanaux. Un micro-ordinateur pilote à la fois la mesure et le traitement du signal. Un passeur automatique d'échantillons, mécanique ou pneumatique, permet d'utiliser au mieux ce matériel et d'analyser simultanément de nombreux échantillons. Le traitement du signal comprend la recherche et l'identification des différents pics, leur sommation bruit de fond déduit.

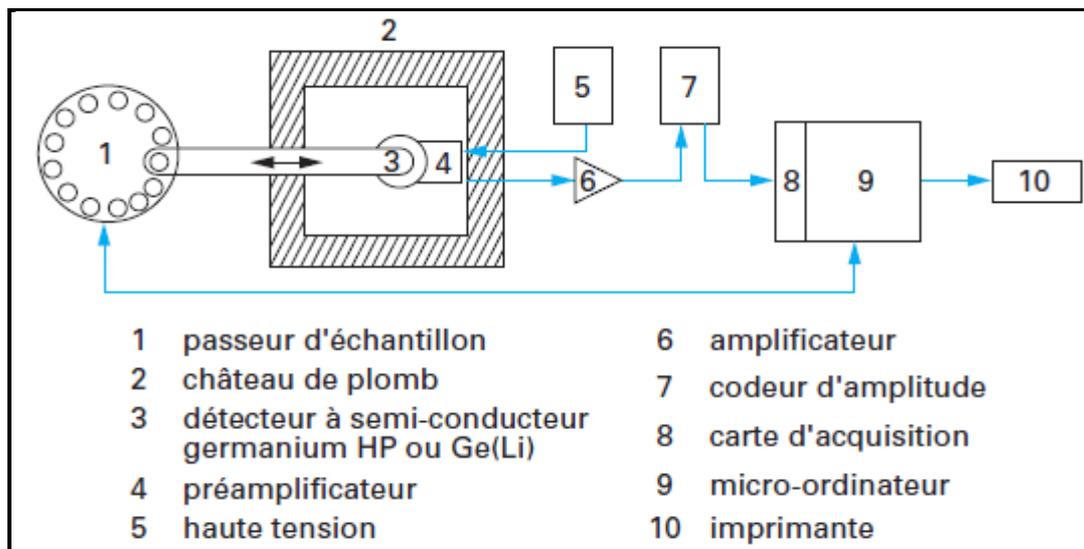


Figure 14 : Schéma d'une installation de mesure des rayons γ utilisée en analyse par activation (Techniques de l'Ingénieur : P2 565).

✚ Mesure

Après une irradiation de durée t et une décroissance de durée égale à t' , l'expression de l'activité A_c d'un radioélément d'après De Soete 1972 s'écrira:

$$A_c = N_0 \Phi_n \sigma (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t'} \dots\dots\dots(04)$$

Où $N_0 = \theta(w/A)Na$

θ : abondance isotopique de l'élément.

w: masse de l'élément à analyser.

A: Masse atomique.

Na: Nombre d'avogadro.

D'après cette expression, il est théoriquement possible de calculer la teneur de l'élément, cependant l'incertitude sur la valeur exacte des sections efficaces, du flux de neutrons et de son spectre d'énergie limitent cette méthode à un procédé d'estimation grossière. Cette méthode est dite analyse par voie absolue.

En pratique, on irradie en même temps que les échantillons, ou dans des conditions aussi reproductibles que possible, des étalons contenant des quantités connues des éléments à doser. Ces étalons peuvent être soit des substances chimiques mono ou multiéléments préparées en laboratoire, soit des standards d'origine naturelle fournis par les laboratoire de métrologie de nature semblable au prélèvement analysé. Ces derniers appelés aussi standard de référence matériel (SRM).

Par opposition à la voie absolue, la méthode utilisant les standards est dite analyse par voie relative.

L'expression qui lie le comptage N à la teneur de l'élément est la suivante:

$$N = Na \theta \gamma M \frac{C}{A \lambda} (\sigma \Phi_{th} + I \Phi_{ep}) F_i F_d F_c \dots\dots\dots(05)$$

avec : **γ** :taux d'embranchement

M: la masse de l'échantillon

C: concentration de l'élément dans l'échantillon

λ : constante de décroissance de l'élément

F_i : Facteur d'irradiation; il est égale à $(1 - \exp(-\lambda t_i))$

F_d : Facteur de décroissance; il est égale à $\exp(-\lambda t_d)$

F_c : Facteur de mesure ; il est égale à $(1 - \exp(-\lambda t_c))$.

Pour éviter les sources d'erreurs, on compare le comptage du radioélément contenu dans l'échantillon avec celui contenu dans le standard .

n représente le comptage massique ramené à la fin de l'irradiation (*De Soete et al, 1972*).

$$C_e = C_s \frac{n_e}{n_s} \dots\dots\dots(06)$$

4.1.5. Quelques Champs d'application :

Les applications de l'NAA sont nombreuses et variées. Nous donnons dans ce qui suit les applications courantes.

☞ Environnement

L'analyse par activation est utilisée pour le dosage des poussières atmosphériques retenues par des filtres (*Dams and al, 1970*), sur les mousses ou les lichens.

Pour l'analyse des filtres, elle est en compétition avec les méthodes de fluorescence X et de PIXE, mais la NAA présente l'avantage d'avoir une sensibilité supérieure.

☞ Domaine Nucléaire

Dans ce domaine, les analyses suivantes sont effectuées de façon routinière :

-Analyse de la pureté du graphite utilisé comme modérateur dans les réacteurs (Pureté exigée : 99,999%).

-Analyse de la pureté de la capsule en aluminium utilisée pour activer les échantillons dont les éléments à doser possèdent une longue période (Pureté exigée 99,99%).

- Analyse du taux de cobalt dans l'acier. L'acier utilisé dans le réacteur doit contenir un très faible taux de cobalt.

☞ Domaine biologique et médical :

Dans ces domaines, la NAA a donné lieu à une multitude d'applications in vitro et quelquefois in vivo. De très nombreux éléments ont été ainsi dosés dans le sang, l'urine et la plupart des tissus. La NAA est l'une des méthodes les plus sensibles pour les dosages de traces de certains d'entre eux, tels le sélénium et le vanadium.

☞ Archéologie et Criminologie

4.1.6. Avantages et inconvénients de la technique

Les avantages de cette technique sont très nombreux et les inconvénients sont rares mais importants.

Avantages

- Elle présente une excellente sensibilité (de 10^{-6} g à 10^{-13} g) dépendant de l'élément à analyser. Cette caractéristique permet à l'analyste de manipuler des échantillons de très faible masse.
- Elle présente une excellente précision ($\pm 5\%$). Cependant, ce facteur dépend des soins apportés lors des différentes phases du processus d'analyse.
- La technique d'analyse par activation neutronique instrumentale (INAA) est non destructive. En effet, l'échantillon analysé n'est ni contaminé par des produits chimiques ni détruit. Il peut être analysé plusieurs fois.
- Plusieurs éléments peuvent être analysés simultanément. Le tableau de Mendéleev est constitué de 109 éléments dont 83 seulement sont naturels. Parmi ces derniers, 60 éléments sont analysables en utilisant les forts flux issus du réacteur.
- Elle permet de quantifier deux isotopes d'un même élément tel que la détermination du rapport de combustible U^{235}/U^{238} . Ceci ne peut être accompli par les techniques chimiques d'analyse. L'INAA peut aussi doser des éléments tels que I, Br, Cl appartenant à la même colonne du tableau de Mendéleev et les discerner parfaitement.

Inconvénients

- La technique peut identifier uniquement les éléments et non pas leur valence.
- La sensibilité bien qu'elle soit un avantage certain pour la méthode, elle peut toutefois devenir un inconvénient. Ceci est vrai lorsque l'on veut analyser deux éléments qui présentent un seuil de détection très différent tels que par exemple le fer et l'or qui ne peuvent être analysés simultanément.

4.2. Spectrométrie d'émission des rayons X Fluorescence X :

4.2.1. Principes de la spectrométrie d'émission X.

4.2.1.1. Niveaux d'énergie des électrons atomiques

Les électrons constituant le cortège électronique des atomes libres sont situés sur des niveaux d'énergie bien définis, correspondant aux différentes couches (K, L, M, etc.) et sous-couches. Deux électrons, au maximum, sont sur la couche K (la plus énergétique en valeur absolue), huit, au maximum, se trouvent sur la couche L, subdivisée en sous-couches L_1 , L_2 et L_3 ; dix-huit, au maximum, remplissent la couche M, subdivisée en sous-couches M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 ,... Ces niveaux ont une certaine largeur, en général négligeable sauf pour les sous-couches les plus externes qui interviennent dans la liaison chimique.

4.2.1.2. Transitions entre niveaux

Sous l'influence d'un événement venant de l'extérieur (arrivée d'une particule chargée ou d'un rayonnement d'énergie suffisante), un électron du cortège électronique d'un atome, situé sur un certain niveau d'énergie E_x (rappelons que cette énergie est négative), peut être arraché de la couche à laquelle il appartient. La place libre est susceptible d'être comblée par un électron situé sur un autre niveau d'énergie $E_y > E_x$ (en valeur absolue) , avec émission d'un rayonnement électromagnétique.

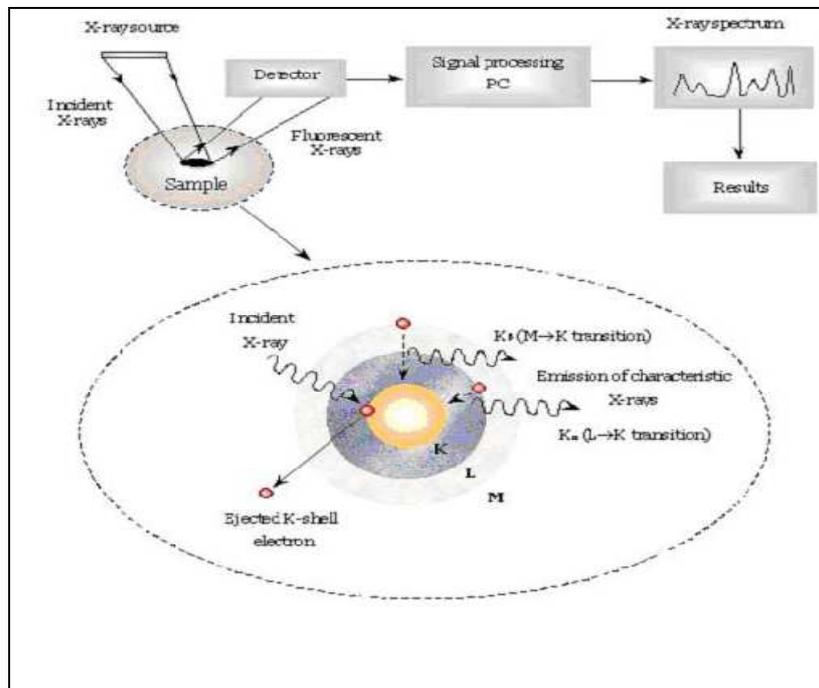


Figure 15. : Schématisation du principe d'analyse par XRF (Papachristodoulou, 2002).

4.2.2. Différents types de spectromètres X.

4.2.2.1. Spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-S).

Leur principe repose sur la réflexion sélective d'un faisceau de rayons X par un cristal avec utilisation de la loi de Bragg : $n \lambda = 2d \sin\theta$ (07)

d : distance réticulaire du cristal analyseur pour la réflexion utilisée.

λ : longueur d'onde.

2θ : angle du faisceau réfléchi avec le faisceau Incident

n : (nombre entier positif souvent égal à l'unité) c'est l'ordre du réflexion.

Ces spectromètres peuvent être à cristal plan ou à cristal courbé (Meisel and al, 1989).

4.2.2.2. Spectromètres à dispersion d'énergie (ED-S) :

L'organe essentiel est le détecteur, celui-ci est sensible non seulement au flux mais encore à l'énergie des photons reçus : il délivre des impulsions électriques de hauteur proportionnelle à cet énergie, un sélecteur d'amplitude permet donc l'analyse en énergie du rayonnement.

* Constitution des spectromètres à dispersion d'énergie

Les éléments essentiels de ces spectromètres sont la source, le porte-échantillon, le détecteur et, naturellement, le système de traitement du signal.

🚦 **Source** : Plusieurs types de source peuvent être employés:

a. Sources radioactives : Il existe trois sources principales :

Source annulaire, centrale et latérale (Figure-16).

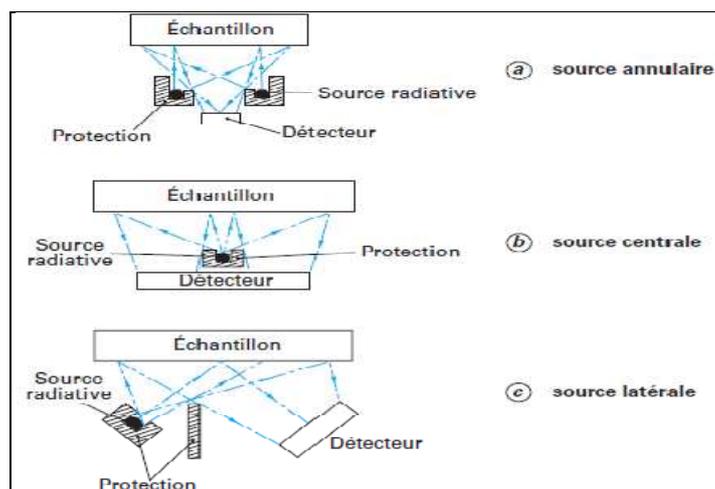


Figure 16 : Spectromètre à dispersion d'énergie : excitation par une source radioactive (Jenkins, 1981).

Les activités de ces sources sont comprises entre 50 et 4 000 MBq et le flux de photons émis est de 10^6 à $5 * 10^7$ par seconde et stéradian. Le tableau suivant représente les principales sources isotopiques et leurs caractéristiques.

Tableau 6 : Principales sources isotopiques pour spectromètres à dispersion d'énergie.

Isotope	Période (ans)	Emission		Numéros atomiques des éléments excités	
		Nature	Energie (keV)	Spectre K	Spectre L
⁵⁵ Fe	2,7	Mn K	5,9	14 à 23	41 à 58
²⁴⁴ Cm	17,8	Pu L	14,3	22 à 34	57 à 82
¹⁰⁹ Cd	1,3	Ag K et γ	22,1 et 87,7	24 à 42	65 à 92
²⁴¹ Am	458	γ	59,6	30 à 60	72 à 92

Source : Technique de l'ingénieur : Doc. P2 695

b. Tube à rayons X :

Un tube à rayons X de faible puissance (quelques dizaines de watts par exemple) émettant un rayonnement continu.

Un tube à rayons X de plus forte puissance excitant les raies caractéristiques d'un élément constituant une source secondaire; cet élément est choisi de manière à n'exciter à son tour que certains éléments de l'échantillon à analyser.

Détecteur

Le détecteur procurant la meilleure résolution est le silicium-lithium; c'est le plus utilisé actuellement, mais on emploie souvent, pour les appareils portables, des détecteurs moins exigeants. Le compteur proportionnel est connu depuis longtemps ; il est bien au point, plus sensible que le silicium-lithium au rayonnement X mou et ne se sature que pour de très hauts flux.

Porte-échantillon

Le porte-échantillon doit permettre le passage, éventuellement automatique, d'un échantillon à un autre, certains échantillons pouvant être constitués par des étalons. La surface utile est de quelques centimètres carrés mais peut être réduite dans certains cas à quelques millimètres carrés ou même moins.

Traiteur du signal et calcul des concentrations

Le traitement du signal est très élaboré : filtrage numérique, lissage, soustraction du fond continu, recherche de pics... ; il bénéficie de tous les perfectionnements apportés depuis quelques années à l'électronique et à l'informatique des microsondes et microscopes à balayage.

4.2.3. Pratique de l'analyse

4.2.3.1. Analyses qualitative, quantitative

L'application principale de la spectrométrie de fluorescence X étant l'analyse chimique élémentaire, aussi bien qualitative que quantitative.

➤ **Analyse qualitative**

Les spectres X sont simples et bien connus ; les raies d'émission sont donc facilement identifiables si le pouvoir séparateur de l'appareil est suffisant, ce qui est presque toujours le cas, tout au moins en dispersion de longueur d'onde ; les ambiguïtés (recouvrement de pics) peuvent être levées en recherchant, automatiquement ou manuellement, plusieurs raies caractéristiques du même élément.

➤ **Analyse quantitative**

Pour être précise, l'analyse quantitative nécessite une préparation soignée des échantillons, identique pour tous les échantillons de même espèce. L'étalonnage est parfois très simple mais peut souvent présenter des difficultés, étant donné l'influence de l'effet de matrice, surtout si la série d'échantillons à analyser n'est pas homogène.

4.2.3.2. Préparation des échantillons.

L'échantillon doit offrir au rayonnement primaire une surface plane de quelques centimètres carrés de manière à bien utiliser le faisceau incident. Cette surface peut cependant être réduite dans certains cas jusqu'à une fraction de millimètre carré.

Si l'échantillon est à l'état liquide, il faut tenir compte de la possibilité de radiolyse et d'un échauffement local, avec formation éventuelle de bulles.

4.2.4. Exemples d'utilisation de la spectrométrie d'émission X

Études de pollution

Les progrès en analyse de traces de la spectrométrie de fluorescence X se sont répercutés dans les études de pollution. L'analyse des particules en suspension dans l'air est en effet très facile : ces particules sont recueillies sur une membrane par simple filtrage de l'air

(Ruch and al, 1987). L'analyse de l'eau peut être effectuée soit directement soit à l'aide de membranes échangeuses d'ions (Van Grieken, 1977), les échantillons étant alors en couche mince, les effets de matrice sont supprimés.

Grâce à cet enrichissement, les limites de détection peuvent être de quelques [ng/g] et les plus petites quantités décelables sont de l'ordre de quelques ng par cm² de substrat.

☛ **Industries minière et cimenteries :**

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode de choix pour l'analyse de minerais et de minéraux, les échantillons étant mis sous forme de pastilles ou de perles.

(Smallbone, 1977).

☛ **Métallurgie :** Les aciers peuvent être analysés de manière complète, y compris le carbone pour cet élément, un canal spécial est souvent utilisé, l'analyse des métaux et alliages non ferreux est également aisée (*Techniques de l'ingénieur, Doc : P 2695*).

4.2.5. Avantages et inconvénients de la technique :

👍 Avantage :

- Multi-élémentaire (Na à U).
- La technique d'analyse par XRF est non destructive.
- La préparation des échantillons est simple.
- Temps d'analyse est court par rapport à NAA.
- Très sensible pour certains éléments tels que l'arsenic et le nickel.

👎 Inconvénients :

- Les erreurs liées à l'effet de matrice posent problèmes, en effet l'échantillon et le standard doivent-être de la même nature.
- Temps d'analyse plus long par rapport aux PIXE et IBA (Ion beam analysis).
- Problèmes d'interférence entre les raies des éléments.

Partie II :

Chapitre IV :

Méthodologie expérimentale

*« C'est une triste chose de penser que la nature parle et que le genre
humain n'écoute pas. »*

- Victor Hugo -

Chapitre IV. Méthodologie expérimentale

1. Description du site de prélèvement :

En fonction de l'objectif assigné à ce travail et afin d'estimer l'ampleur de la pollution atmosphérique entre le milieu urbain et périurbain, et de compléter les études antérieures, nous avons choisi un site qui d'après la classification européenne, appartient à la catégorie de site de type « périurbain » qui a l'objectif d'estimer le niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de « fond » à la périphérie du centre urbain. Dans ce type de site, les émetteurs peuvent être soit dans la commune ou à l'extérieur de celle-ci.

Le site de mesure se situe à l'intérieur du Centre de Recherche Nucléaire de Draria. En ce site, le poste de mesure est implanté au niveau de la terrasse du bâtiment de la Division Physique et Applications Nucléaires (DPAN) à une hauteur d'environ 13 m du sol (La hauteur de prélèvement au sol recommandée doit être comprise entre 2 et 15 m) (ADEME, 2002). Ce site qui se caractérise par l'absence d'obstacles, fait l'objet d'une bonne ventilation naturelle. Hormis le trafic routier, le site n'est exposé à aucune source émettrice qui peut influencer directement sur le site étudié.

Les données géographiques ainsi que l'image satellitaire (figure-17) relatives au site de prélèvement sont obtenues grâce au logiciel *GoogleEarth Software 2010*.

Latitude : 36°41'33'' Nord.

Longitude : 3°03'15.68'' Est.

Altitude par rapport à la mer : 229 m.

☞ Distance aux voies de circulation

La distance minimale de la station à la voie est fonction de l'intensité du trafic (Tableau-7). La distance étant prise de la verticale du point de prélèvement au bord de la première voie de circulation, voie de bus ou de stationnement.

Tableau 7 : distance minimale d'éloignement d'une source de trafic pour une station urbaine et périurbaine.

Débit (TMJA) en véhicules / jour.	Distance minimale à la voie en mètres
< 1000	/
1000 à 3000	10
3000 à 6000	20
6000 à 15 000	30
15 000 à 40 000	40
40 000 à 70 000	100
>70 000	200

Source : Guivarc'h et al, 2002.

3. Mode de prélèvement :

La méthode de collection sur filtre a été particulièrement développée pour la mesure de la concentration massique et la composition chimique de l'aérosol. Son principe est de recueillir sur un média filtrant un échantillon représentatif de l'aérosol par aspiration d'un volume connu d'air. L'échantillonneur est généralement constitué d'une tête d'échantillonnage, d'un porte-filtre renfermant le média filtrant, d'un dispositif de mesure du débit d'air et d'un système de pompage (Delmas, 2005).

Dans notre travail, la collection des aérosols est effectuée sur des filtres ouverts sans coupure granulométrique précise. (Figure-18).

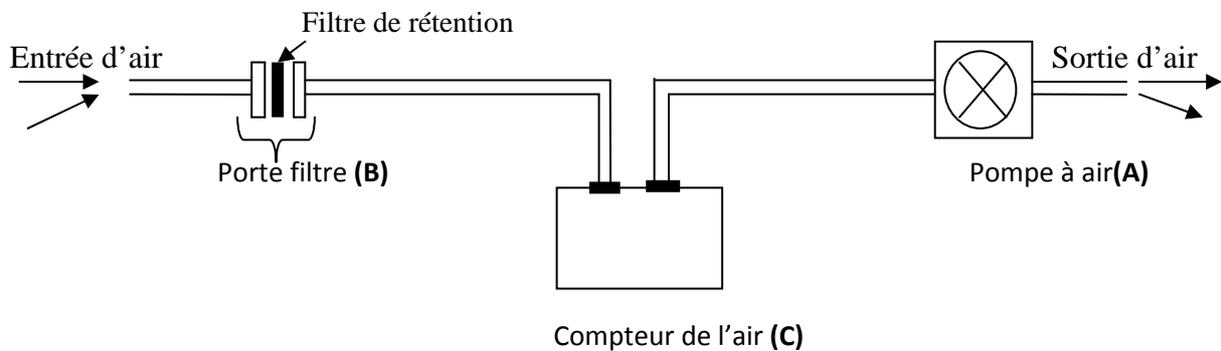


Figure18 : Schéma du dispositif de prélèvement des aérosols.

- La pompe de prélèvement (A) alimentée par un courant électrique qui aspire l'air avec un débit de $1\text{m}^3/\text{h}$ (Low Volume Sampler - LVS), Les quantités de poussières prélevées pour un temps donné sont moins grandes qu'avec un HVS.
- l'air aspiré passe à travers le porte filtre (B).

Les particules en suspension (TSP) sont retenues par le filtre d'ester de cellulose de porosité de $0.8\mu\text{m}$ et d'un diamètre de 37 mm.

Le choix des filtres utilisés pour le prélèvement est primordial. Deux phénomènes peuvent résulter d'un mauvais choix : le colmatage du filtre lors du prélèvement et la contamination de l'échantillon par des teneurs en métaux issues du filtre.

Pour sélectionner un filtre, nous utilisons les critères suivants:

- L'efficacité de collecte, l'efficacité doit être supérieure à 99% des poussières totales.
- La résistance au colmatage.

- La résistance mécanique : le filtre doit être suffisamment résistant pour minimiser les fuites
- La stabilité chimique : le filtre ne doit pas réagir avec les particules et les composés chimiques échantillonnés.
- La stabilité à la température : le filtre doit être stable aux différentes températures.
- La concentration du blanc : le blanc doit comporter les composés à analyser dans des concentrations inférieures à la limite de détection.
- Le coût.

➤ Le volume d'air échantillonné est donné par un volumètre (C) placé entre le porte filtre et la pompe de prélèvement.

La surveillance de l'état de la pression au niveau du dispositif est nécessaire afin d'éviter le colmatage des filtres de rétention.

La durée de prélèvement est d'environ 48h.

4. Conditionnement et analyse des aérosols collectés :

4.1. Procédure de la détermination des teneurs en TSP :

Nous avons déterminé les teneurs en TSP par la méthode gravimétrique. Le relevé des filtres est manuel, les filtres empoussiérés doivent être pesés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les filtres vierges, sans perdre de matière lors des manipulations.

Après la collecte et la pesée, nous avons déposé l'échantillon dans une boîte de pétri étanche qui est par la suite stockée dans des dessiccateurs à température ambiante.

Les connaissances du poids déposé, de la durée d'échantillonnage et du débit d'air moyen d'où le volume moyen, permettent de calculer la concentration de la matière particulaire exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.2. Procédures d'analyses des métaux dans les particules atmosphériques :

Afin d'analyser les métaux qui sont véhiculés par les TSP, nous avons utilisé deux techniques nucléaires : Analyse par Activation Neutronique et spectrométrie d'émission des Rayons X Fluorescence X. Le gros avantage de ces techniques tient dans l'analyse de l'échantillon directement sous sa forme solide. Elles permettent d'éviter une étape de mise en solution qui est longue, coûteuse et risque de dénaturer l'échantillon (contaminations, pertes...).

Les filtres d'aérosol sont coupés en deux, la première moitié est destinée à l'analyse par NAA et l'autre par XRF.

Un test d'homogénéité a été effectué par l'analyse par activation neutronique sur quelques échantillons de filtres.

4.2.1. Procédure de l'analyse par Activation Neutronique :

L'irradiation est effectuée par le réacteur de recherche « NUR » du CRND qui est un réacteur ouvert de type piscine. Il est doté d'une grande flexibilité expérimentale et sa puissance nominale est de un (1) MW. Le flux neutronique atteint 10^{13} n/ cm²/sec.

Le réacteur dispose verticalement de sites d'irradiation dans le cœur et dans la colonne thermique. Il dispose également de cinq canaux d'irradiation horizontaux.

Les autres principaux constituants du réacteur nucléaire NUR sont :

- Le cœur.
- Le système de refroidissement.
- La protection biologique.
- Les canaux d'irradiation.

Les matériaux de conditionnement doivent présenter une pureté suffisante pour ne pas altérer les résultats d'analyse. L'analyse des traces nécessite l'utilisation d'ustensiles très propre et toutes les précautions doivent être prises pour que l'échantillon ne soit pas contaminé.

Nous avons effectué l'analyse par voie relative. Cette méthode consiste en l'irradiation simultanée de l'échantillon et de l'étalon contenant une quantité connue de l'élément à doser. On compare par la suite l'activité de l'échantillon et du standard (étalon).

Les échantillons préalablement préparés, sont pesés et enveloppés dans des feuilles en aluminium de grande pureté nucléaire (99.999%) dont les poids sont connus d'avance.

Les standards utilisés sont des standards certifiés (AIEA) en poudre de concentrations en éléments connues, exemple : GBW09101, GSV-4...

Après l'introduction de ces standards dans des enveloppes en aluminium, les échantillons et ces derniers sont disposés ensemble dans un même paquet d'aluminium de grande pureté nucléaire (99.999%) et organisé de manière à permettre aux échantillons et aux standards de recevoir le même flux neutronique.

En vue de l'irradiation et dans le but de déterminer les impuretés des éléments métalliques contenues dans ces filtres, les filtres blancs en Nitrate de cellulose sont introduits et préparés de la même manière que l'échantillon

Le contrôle de l'intensité du flux neutronique au sein de la capsule d'irradiation est effectuée grâce à l'insertion des moniteurs de flux.

Le temps d'irradiation est de 4 heures.

Le temps de refroidissement est de 7 jours.

Pour assurer la radioprotection du personnel manipulateur, l'étape de refroidissement est obligatoire, tout en respectant deux conditions primordiales, à savoir :

-Avoir une activité suffisante pour la mesure

- Ne pas dépasser la période des éléments recherchés (courtes, moyennes ou longues périodes)

L'échantillon et l'étalon sont extraits de la navette d'irradiation dans un laboratoire aménagé à cet effet.

Le comptage par spectrométrie gamma:

Le procédé final est l'analyse des spectres émis, par une chaîne de spectrométrie gamma, elle est effectuée par le comptage des échantillons radioactifs dans une chaîne de détection des rayons gamma, le temps d'acquisition de ces derniers est de 7 200 secondes pour chaque échantillon.

Le détecteur est constitué par du germanium hyper-pur.

-Analyse qualitative :

Le dépouillement spectral est effectué à l'aide du logiciel d'acquisition et d'analyse des spectres gamma GENIE 2000 qui nous donne pour chaque échantillon l'aire du pic qui caractérise chaque élément métallique contenu dans l'échantillon, ainsi que, la date de l'irradiation, le temps d'acquisition, l'énergie, l'intensité et l'erreur probable sur l'intensité.

Le radio-isotope produit est identifié à travers ses énergies des rayonnements émis.

-Analyse quantitative :

Les surfaces des pics calculées par le logiciel nous permettent de quantifier la quantité d'élément recherché dans l'échantillon.

D'après *De Soete (1972)*, l'équation utilisée pour calculer la masse d'un élément dans un échantillon inconnu relative à un standard est la suivante :

$$m_{ie} = C_{is} M_s \frac{(N_{ie} * e^{\lambda t_{de}} - N_{ib} * e^{\lambda t_{ibe}})}{(N_{is} * e^{\lambda t_{ds}} - N_{ibs} * e^{\lambda t_{ibs}})} \dots\dots\dots (08)$$

Avec :

- m_{ie}** : Masse de l'élément « i » à doser dans l'échantillon [mg].
- C_{is}** : Concentration de l'élément « i » à doser dans le standard [µg/g].
- M_s** : masse du standard en [g].
- N_{ie}** : Comptage spécifique relatif à l'élément recherché dans l'échantillon [%].
- t_{de}** : Temps de décroissance de l'échantillon [sec].
- N_{ib}** : Comptage spécifique relatif à l'élément recherché dans le blanc de l'échantillon [%].
- t_{ibe}** : Temps de décroissance du blanc de l'échantillon [sec].
- λ** : Constante de décroissance de l'élément [sec⁻¹].
- N_{is}** : Comptage spécifique relatif à l'élément recherché dans le standard [%].
- t_{ds}** : Temps de décroissance du standard [sec].
- N_{ibs}** : Comptage spécifique relatif à l'élément recherché dans le blanc standard [%].
- T_{ibs}** : Temps de décroissance du blanc standard [sec].

On a :

$$\lambda = \ln 2 / T \dots\dots\dots(09).$$

Avec **T** : La période de l'élément recherché en seconde qui représente le temps nécessaire pour que la moitié des atomes présents initialement soit désintégrée. On parle de demi-vie.

Cette période est très variable selon les éléments :

Polonium 214 = 1/10 000 s

Uranium 238 = 4,5 milliards d'années.

La concentration de l'élément d'intérêt est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$C_{ie} = \frac{m_{ie}}{V} \dots\dots\dots(10).$$

Où : **C_{ie}** : la concentration de l'élément d'intérêt dans l'échantillon [ng/m³].

m_{ie} : la masse calculée de l'élément dans l'échantillon [ng].

V : le volume d'air aspiré [m³].

4.2.2. Procédure d'analyse par fluorescence X :

La fluorescence X est une méthode spectrale d'analyse non destructive qui exploite la fluorescence des atomes dans le domaine des rayons X et permet de réaliser une analyse quantitative de la composition élémentaire d'un échantillon solide. L'échantillon est irradié avec une source radioactive et il réémet une photoluminescence caractéristique des éléments présents dans l'échantillon dans le domaine des rayons X.

Nous avons déterminé les concentrations élémentaires des dépôts sur filtres par la méthode d'analyse XRF à dispersion d'énergie (ED-S).

Le montage expérimental est formée par :

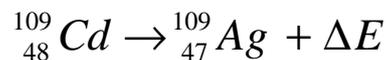
a) source d'excitation

Deux sources radioactives, émettrices de rayonnements X de type annulaire et scellées ont été utilisées pour l'excitation atomique des différents filtres (échantillon, standards et blancs), ce qui nous a permis de balayer une gamme d'énergie assez large.

- **Cadmium 109 :**

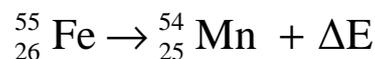
La transmutation nucléaire de l'isotope Cd (109) conduit à l'émission de rayonnement X. La désintégration se fait par capture électronique (le noyau capte un électron), la case vide de la couche interne est réoccupée par un électron des couches supérieures, la perte d'énergie est émise sous forme de rayonnement X.

Le noyau du cadmium 109 se transforme en noyau Argent 109.



- **Fer 55 :**

Le fer 55 se désintègre par capture électronique de la même façon que le cadmium 109 et il se transforme en noyau Manganèse 55.



- **Américium 241 :**

La source d'américium 241 se désintègre en émettant des particules α (noyau d'hélium), il y a formation de neptunium 237, instable et émetteur de rayonnement X.



Le temps d'acquisition est de 3600 seconde pour chaque filtre et par chaque source d'excitation.

b) La chaîne de détection

La chaîne de détection spectrométrique utilisée est constituée par :

- Un détecteur semi-conducteur de type Si (Li) ayant une face active de 30mm² et une résolution de 180 ev.

-une chaîne spectroscopique « Quantum 4000 » de type PGT formée par:

- Un préamplificateur sensible à la charge électrique.
- Un amplificateur, dont la fonction consiste à amplifier et à mettre en forme les impulsions délivrées par le préamplificateur.
- Un analyseur multi canaux (MCA), dont la fonction consiste à sélectionner les impulsions suivant leurs amplitudes.
- Un micro-ordinateur pour stocker et traiter les spectres, doté d'un logiciel d'acquisition « excalibur ».

c) le dépouillement spectral :

Les spectres enregistrés sont traités par le logiciel AXIL. Ce code est basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires, il nous a donné pour chaque filtre l'aire du pic qui caractérise chaque élément métallique contenu dans le filtre, la date de l'irradiation, le temps d'acquisition, le numéro atomique, la raie ou la couche irradiée (K,L,M...), l'énergie, l'intensité et l'erreur probable de l'intensité.

Analyse qualitative :

L'identification d'un élément contenant dans l'échantillon est basée sur l'énergie du rayonnement X émis. Selon la loi de Moseley, l'énergie du rayon X émis est proportionnelle au carré du numéro atomique de l'élément émetteur.

Cette proportionnalité est donnée par l'expression suivante :

$$E = R * C * (Z - \sigma)^2 * (1/n^2 - 1/p^2) \dots\dots\dots (11).$$

Avec :

R : Constante de Rydberg (**R=13.6eV**).

C : Vitesse de la lumière.

Z : Numéro atomique.

σ: Constante d'écran.

n et p : Nombres quantiques correspondants aux niveaux d'énergie initial et final.

Analyse quantitative :

La méthode que nous avons utilisé est comparative, elle consiste à comparer l'aire du pic, dans le standard, pour un élément donné avec l'aire de pic de cet élément dans l'échantillon.

Préparation des filtres standards :

Les filtres standards ou standards chimiques servent comme référence lors de calculs des concentrations des éléments à rechercher dans les filtres échantillonnés. Ce sont des filtres qu'on prépare à partir des solutions d'élément purs et concentrations connues.

Nous avons prélevé 30 µl de chaque solution que nous avons versée sur des filtres vierges de même nature que ceux utilisés lors de l'échantillonnage de l'air.

Les filtres sont séchés dans l'étuve à une température de 30°C.

Selon *Clarck* (1961), La concentration d'un élément dans l'échantillon mince est calculée à partir de l'expression suivante :

$$C_x = \frac{(I_e - I_b) \times m}{(I_{st} - I_b) \times V} \dots\dots\dots (12)$$

Tel que :

C_x : la concentration de l'élément dans l'échantillon [µg/m³].

I_e : l'aire du pic de l'élément métallique contenu dans l'échantillon [%].

I_b : l'aire du pic de l'élément métallique contenu dans le blanc [%].

I_{st} : l'aire du pic de l'élément métallique contenu dans le standard [%]

m : masse de l'élément métallique dans le standard [µg].

V : volume d'air aspiré [m³].

Chapitre V:
Résultats et discussions

« La vérité de demain se nourrit de l'erreur d'hier. »
- Antoine de Saint-Exupéry -

Chapitre V. Résultats et discussions

1. L'ampleur de la pollution.

Depuis le début du siècle dernier l'accroissement démographique et le développement industriel sont à l'origine d'importantes émissions de gaz et d'aérosols. Les modifications de la constitution de l'atmosphère qui en découlent, peuvent avoir des répercussions aussi bien à l'échelle locale (conséquences sur la santé humaine, les végétaux ou les matériaux) qu'à l'échelle planétaire (modification du climat : effet de serre, diminution de la couche d'ozone stratosphérique).

Afin d'estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules totales en suspension à Draria, Ouest d'Alger, il est nécessaire de comparer les niveaux mesurés aux normes et valeurs guides nationales et internationales réglementant cette forme de pollution.

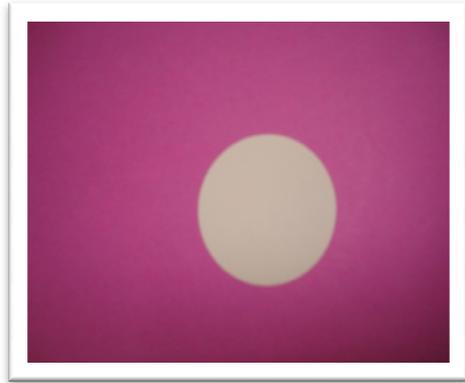
Tableau 8: Normes et recommandations pour les PM-i.

	Fraction PM-i	Valeur limite journalière en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	Valeur limite annuelle $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	Références
Etats-Unis	PM-10 PM-2.5 TSP	150 65 250	50 15 50	(O.F.E.F.P, 2001)
Union Européenne : - Jusqu'à 2005 - Jusqu'à 2010	PM-10 PM-10	50 50	30 20	(Puente-Lelievre, 2009)
Suisse	PM-10	50	20	(Ikawa, 1997)
Suède	PM-10	50	20	(Ikawa, 1997)
Algérie	particules fines en suspension	/	80	(Anonyme, 2006)
OMS	TSP PM-10 PM-2.5	250 50 25	100 20 10	(OMS, 1997)

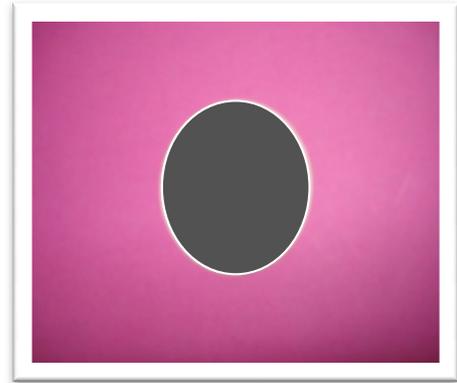
L'étude de la pollution de l'air par les TSP à Draria, à l'ouest d'Alger a été effectuée durant la période allant de la mi-mai jusqu'à la fin septembre 2010, à raison d'une moyenne de trois prélèvements par semaine. Ce suivi nous a permis de collecter 53 échantillons.

Qualitativement on constate que les filtres recueillis sont peu chargés, d'une couleur grise à noire et leur majorité ne présente pas une couleur très foncée comme c'était le cas lors des études antérieures en site urbain.

Ceci signifie que les sources d'émission des suies et d'imbrûlées issues de la combustion ne sont pas abondantes en ce site.



a) Filtre avant prélèvement



b) Filtre après prélèvement

2. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en TSP :

L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en TSP est illustrée en figure-19. La comparaison entre les teneurs moyennes, les valeurs extrêmes ainsi que les écarts types observés en ce site périurbain et des sites urbains à Alger Centre sont résumés en tableau-9.

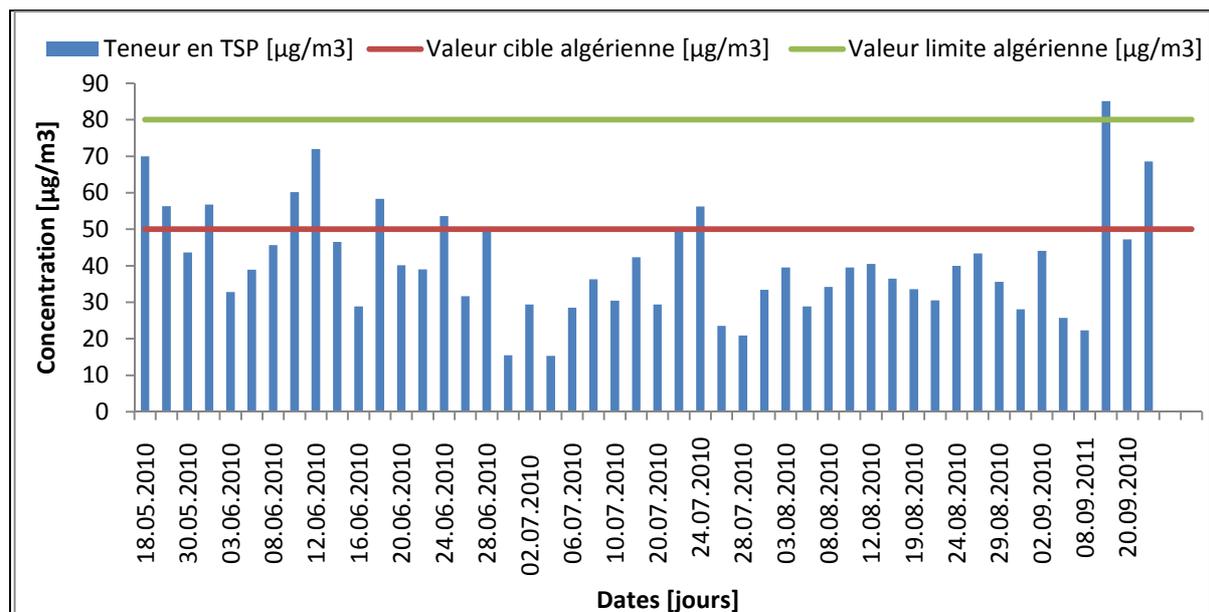


Figure 19 : Évolution des teneurs atmosphériques en TSP.

Tableau 9: Comparaison entre les valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en TSP en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ du site urbain et périurbain à Alger.

	Maximum $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	Minimum $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	Moyenne $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	Ecart type $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	N :(nombre d'échantillon)
Teneur en TSP $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ du site périurbain(Draria)	85	15,3	40	14.9	53
Teneur en TSP $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ du site urbain (Alger Centre)	164	35	80	31	25
Teneur en PM-10 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ du site urbain (Alger Centre)			52	16.5	

Ces résultats montrent qu'il existe une importante fluctuation des teneurs en particules totales en suspension durant la période des prélèvements. Ces fluctuations dépendent souvent aussi bien des variations dans les activités humaines que de l'influence des facteurs météorologiques (direction et vitesse du vent, ensoleillement...).

Les teneurs mesurées oscillent entre $15,3 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ et $85 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ avec une teneur moyenne de $40 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ calculée sur l'ensemble des observations.

Si on compare la teneur moyenne en matière particulaires en suspension enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2008, pour la même période au niveau d'un site urbain à Alger Centre (*khodja, 2010*) on relève une certaine diminution, ceci signifie que la qualité de l'air s'améliore en s'éloignant des grandes agglomérations.

L'écart type, considéré comme étant un indicateur de dispersion des valeurs enregistrées par rapport à leur moyenne, est caractérisé par des valeurs assez élevées ceci peut être expliqué par la grande fourchette de variation des teneurs, qui est probablement liée aux facteurs météorologiques instables d'une journée à une autre. Néanmoins ces mêmes valeurs peuvent être considérées comme étant relativement faibles, notamment si celles-ci sont comparées par rapport à celles des autres études effectuées dans le même axe de recherche, comme celle réalisée sur un site urbain à Alger centre en 2006 et en 2008. (*Berkouki, 2009*) et (*khodja, 2010*).

Pour l'Algérie qui a promulgué en 2006 un décret fixant les normes en matière de pollution atmosphérique (CO , SO_2 , NO_2 , O_3 et particules en suspension), le législateur utilise

le terme vague de particules fines en suspension sans préciser s'il s'agit des particules totales en suspension (TSP de diamètre $< 75\mu\text{m}$) ou de PM-10. Dans ce décret on retrouve un objectif de qualité de $50 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ et une valeur limite de $80 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en moyenne annuelle (JORA, 2006).

En tenant compte de ces normes, nous constatons que 76% des échantillons prélevés ne dépassent pas la valeur cible ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ainsi que toutes les valeurs enregistrées ne dépassent pas la valeur limite ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sauf celle obtenue le 17/09/2010.

Il est clair que la durée de prélèvement est insuffisante pour mettre clairement en évidence l'ensemble de facteurs qui interagissent sur les teneurs en TSP. Nous représentons dans la figure-20 les teneurs en particules totales en suspension en fonction des valeurs journalières moyennes de la température, la vitesse des vents et les précipitations enregistrées sur Alger fournies par l'Office National de Météorologie de Dar El Beida.

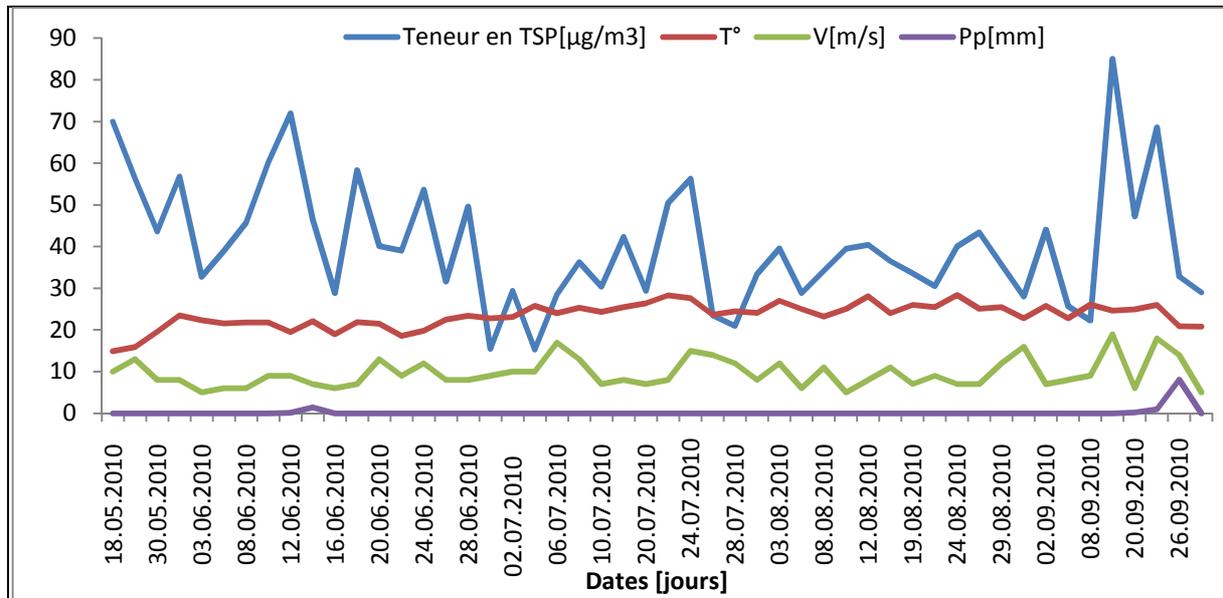


Figure 20: Influence de la météorologie sur la pollution en TSP.

La vitesse du vent joue un rôle important sur les conditions de dispersion. Nous remarquons que les faibles concentrations en particules coïncident le plus souvent avec les fortes vitesses de vent (meilleure dispersion des particules atmosphériques), mais certaines concentrations semblent augmenter à mesure que la vitesse du vent augmente. La diminution est facile à comprendre par une plus grande turbulence, donc une meilleure dilution du polluant. L'augmentation des concentrations avec la vitesse du vent peut s'expliquer par un apport de polluant, issu surtout de l'érosion éolienne et la mise en suspension locale des particules fines dans l'atmosphère.

La période est caractérisée par des températures moyennes élevées, dépassants les 20 °C dans la plupart des journées de prélèvement. Les températures élevées favorisent la formation photochimique des particules secondaires. Les précipitations sont nulles dans quasiment la plupart de ces jours qui ne donnent pas lieu au phénomène de lessivage de l'atmosphère. Nous remarquons que malgré cet effet conjugué de ces deux facteurs, l'évolution temporelle des teneurs en particules totales en suspension, montre que 76% des valeurs obtenues restent inférieures à la valeur cible algérienne et normes OMS (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et restent lointaines de la valeur limite journalière préconisée par OMS et USA pour les TSP (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Sur la base de ces normes, on constate qu'à Draria, la pollution par les TSP sur la période de prélèvement qui s'étale du mi Mai jusqu'à la fin Septembre 2010 est tolérable et n'est pas inquiétante avec une moyenne de [40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$].

3. Etude des métaux associés aux TSP (particules totales en suspension):

Les éléments inorganiques sont essentiellement présents dans l'atmosphère sous forme particulaire qui est leur vecteur de transport privilégié.

La connaissance de la contamination de l'environnement par les métaux s'est développée au cours du 20^{ième} siècle afin d'expliquer le comportement des métaux, leurs impacts sur les écosystèmes et sur la santé humaine. Les cycles biogéochimiques de ces éléments sont désormais notablement affectés par les activités humaines.

En effet, en plus des polluants gazeux « classiques » (COx, SO2, NOx, Ozone), les études ont mis en évidence le rôle de la fraction particulaire solide sur la santé humaine et sur l'ensemble des écosystèmes. Ces constatations ont amené l'Union Européenne à inclure dans la liste des polluants à surveiller, les particules fines (PM10, PM2.5), l'arsenic, le cadmium, le mercure et le nickel (en plus du plomb). Ces polluants sont générés par les activités industrielles, mais aussi par l'incinération des déchets ménagers et par les transports routiers.

Tableau 10: Valeur limite, valeur cible et valeur à ne pas dépasser (valeurs réglementées et recommandées) pour les métaux en teneur ambiante, dépôt et dose tolérable.

Métal	Valeurs réglementaires	Valeurs recommandées		
	Air : moyenne annuelle (ng/m ³)	Air : moyenne annuelle µg/m ³	Dépôt moyen annuel en µg/m ² /j	Alimentation (dose tolérable) en µg/kg /j
	Directive 99/30/CE Valeur limite	OMS Valeur à ne pas dépasser.	Projet directive 2003/0164/COD Valeur cible.	
plomb	500	0.5		
Cadmium	5	0.005	2.5- 5	0.75- 0.95
mercure	50	1		0.1
arsenic	6			
nickel	20			

Source : (Sandrine, 2005).

N.B. : Concernant le plomb, le décret 2002-231 français relatif à la surveillance de la qualité de l'air et à ses effets sur la santé et sur l'environnement fixe un objectif de qualité de 0,25 µg/m³ comme moyenne annuelle. (Puente-Lelievre, 2009).

Selon OMS, la valeur limite du manganèse est de 1µg/m³.

La connaissance du niveau de pollution par les métaux dans une grande agglomération telle que la wilaya d'Alger reste une chose délicate et qui nécessite de déployer des efforts considérables.

Les études antérieures (khodja, 2010) ; (Berkouki, 2009) ; (Oucher, 2007) en milieu urbain et périurbain, au niveau de cette wilaya , révèlent la présence et contamination des sites étudiés par des émissions automobiles qui sont dans la plupart des cas chargées par les métaux lourds, notamment le plomb qui présente une teneur de 299 [ng/m³] à El Harach, (Oucher, 2007), 98 [ng/m³] à Bab Ezzouar (Badj, 2005) et 220 [ng/m³] à la place 1^{er} Mai (Bendada, 2006).

Dans notre travail, les teneurs atmosphériques en métaux Cr, Pb, As, Ni, Fe, V, Zn, Mn, Se, Co, Sb, Ba, Br, Sc, Hf, Ce, Ca et Cu ont été dosés sur la totalité des échantillons par les deux techniques d'analyse : Analyse par activation neutronique et la spectrométrie à dispersion d'énergie (ED-S), afin d'évaluer l'ampleur de la pollution atmosphérique entre un milieu urbain et périurbain. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes.

3.1. Le Chrome

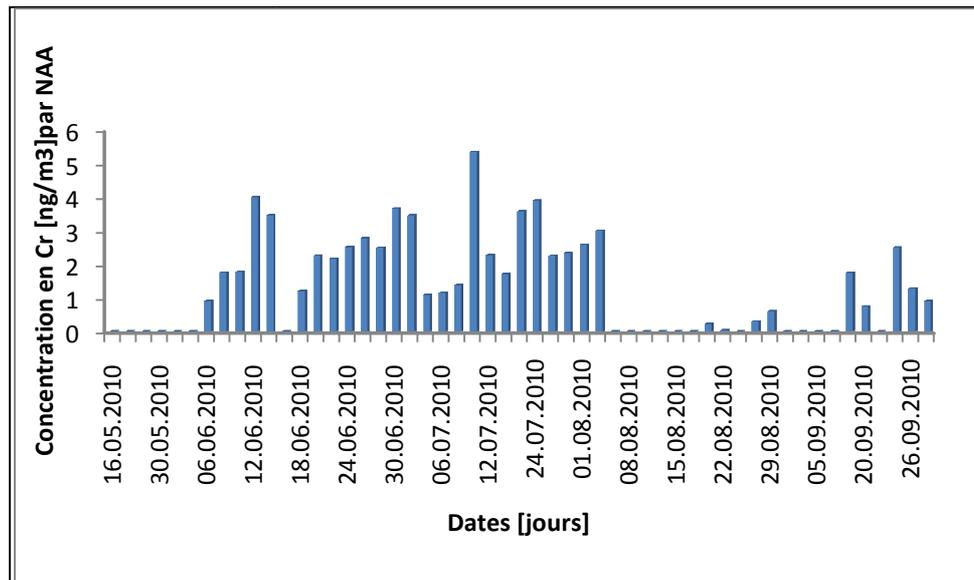


Figure 21: Variation des concentrations du Chrome en fonction de la date de prélèvement.

La valeur maximale enregistrée pour le chrome est de 5.35 [ng/m³] avec une moyenne de 1.34 [ng/m³]. Nous remarquons que les teneurs en cet élément présentent trois plateaux concentriques nuls ou non décelables : le premier s'étale du 16 mai au 3 juin, le deuxième du 5 août jusqu'à 17 du même mois et le troisième s'étale du premier au 8 septembre. Sur la même période de prélèvement, les études antérieures en milieu urbain révèlent des concentrations plus élevées avec un minimum de 22 [ng/m³] et un maximum de 70 [ng/m³] (Khodja, 2010).

A Draria, la source suspectée d'émission de cet élément peut être naturelle (terrigène), subséquentement, l'érosion éolienne est la cause principale de la mise en suspension des particules terrestres dans l'atmosphère. En effet, de nombreux travaux sur la formation et le transport des particules atmosphériques ont permis une meilleure connaissance des particules provenant de l'érosion éolienne par rapport aux autres sources naturelles. Ainsi, celle-ci compte pour au moins 50 % des émissions de Cr vers l'atmosphère (Azimi, 2004).

Le site d'étude peut être également contaminé par certains éléments émis par le trafic routier. Et d'après Veschambre (2006), le chrome est parmi les éléments qui sont émis par la combustion des essences, des revêtements des pots catalytiques ou de l'usure des jantes.

En termes de toxicité, le chrome peut présenter un danger pour le fœtus car cet élément se concentre dans les tissus des poumons. De récentes études tendent aussi à démontrer que l'inhalation du chrome hexavalent pourrait être responsable du cancer du poumon (Benoit, 2000).

3.2. Le Plomb

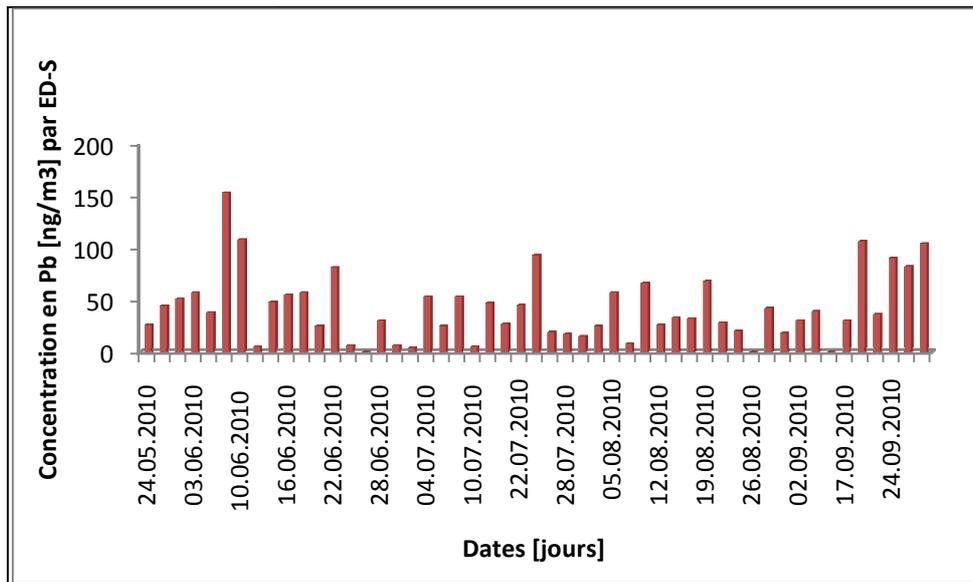


Figure 22: Variation des concentrations du Plomb en fonction de la date de prélèvement.

La présence du plomb dans l'air est fréquente avec une teneur maximale de 140 [ng/m³] et une moyenne de 49 [ng/m³], ces valeurs restent en dessous des normes OMS (500 ng/m³) et l'objectif de qualité fixée par le décret 2002-231 français relatif à la surveillance de la qualité de l'air et à ses effets sur la santé et sur l'environnement (0,25 µg/m³). Cette diminution importante des teneurs en plomb dans l'atmosphère est la conséquence de la politique d'élimination du plomb dans les carburants automobiles.

En termes de toxicité, le plomb a plusieurs effets dégénératifs sur l'être humain. La majeure partie du plomb entre par voie gastro-intestinale et par la respiration. Il s'accumule dans les os et dans les organes (Benoit, 2000).

3.3. L'Arsenic

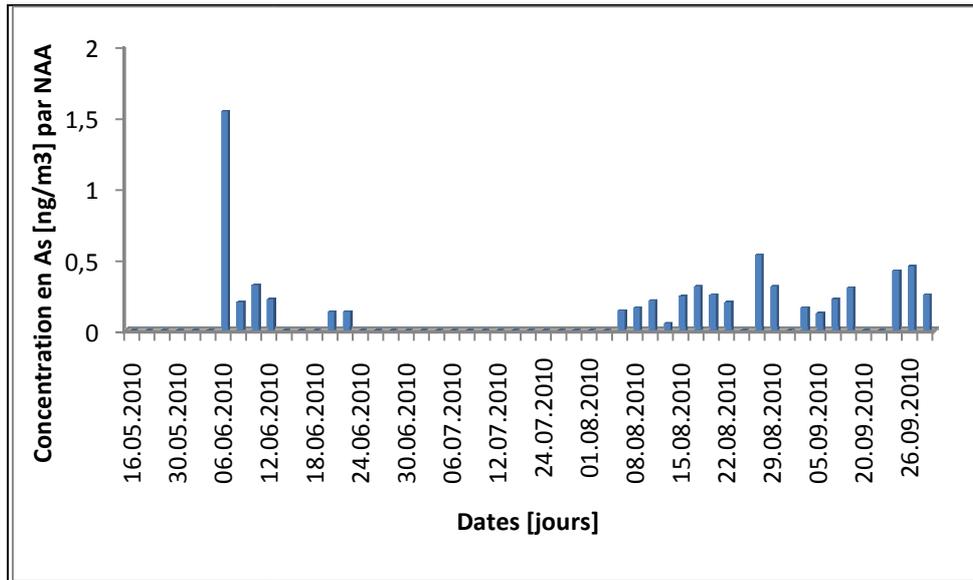


Figure 23: Variation des concentrations de l'Arsenic en fonction de la date de prélèvement.

La présence de l'arsenic sur le site d'étude n'est pas fréquente, la teneur maximale est de $1.54 \text{ [ng/m}^3\text{]}$, ces valeurs restent faibles et inférieures à la valeur limite fixée par la directive européenne qui est de $[6 \text{ ng/m}^3]$ avec un plateau de valeurs concentriques nulles ou non détectées.

La toxicité de l'arsenic dépend en grande partie de sa forme chimique. Il a été démontré que le taux d'accumulation chez les organismes vivants est plus grand que le taux d'élimination (Benoit, 2000).

3.4. Le Nickel

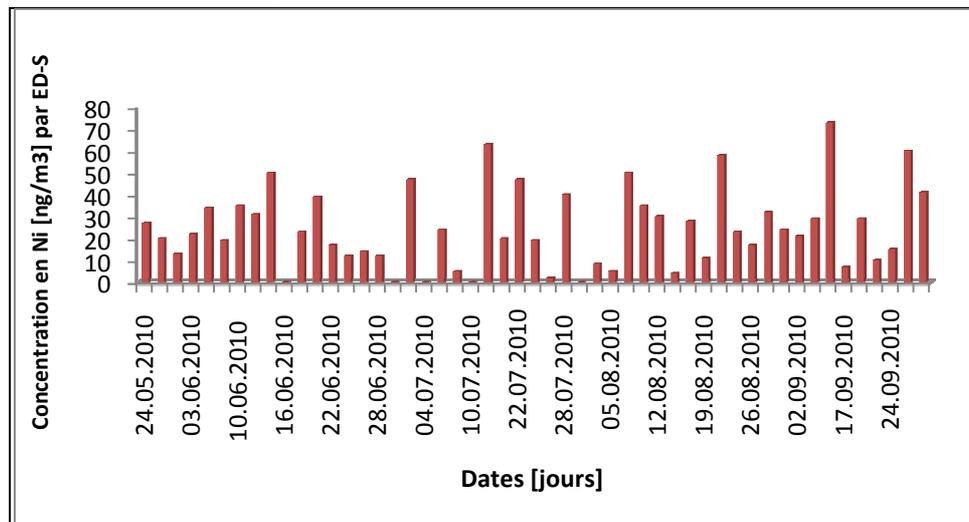


Figure 24 : Variation des concentrations du Nickel en fonction de la date de prélèvement.

On remarque que le Nickel est présent dans l'air sur toute la période de prélèvement, le maximum des concentrations est de 73 [ng/m³] avec une moyenne de 24 [ng/m³], ces concentrations sont fréquemment élevées et 50% des teneurs dépassent la valeur limite fixée par l'OMS (20ng/m³). Cet élément peut avoir une origine terrigène dans les régions méditerranéennes peu industrialisées (Sandrine, 2005). Egalement le nickel peut avoir une origine anthropique puisque cet élément caractérise la circulation automobile qui n'est pas négligeable dans cette région.

La forme chimique du nickel affecte grandement sa toxicité. Le Ni(CO)₄ est le composé le plus toxique de tous les composés du nickel. Il peut causer la mort après une exposition de 30 µg/g pendant 30 minutes. (Benoit, 2000).

3.5. Le Fer.

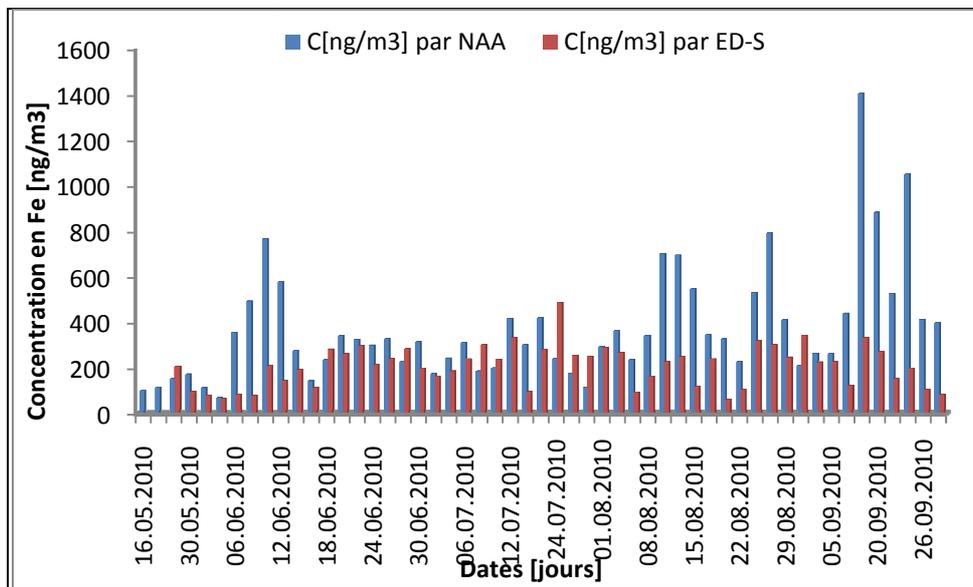


Figure 25 : Variation des concentrations du Fer en fonction de la date de prélèvement.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le fer est présent dans tous les échantillons à des concentrations relativement élevées, cette constatation est valable quelque soit la technique d'analyse utilisée, mais nous remarquons que l'activation neutronique révèle des concentrations plus importantes que la ED-S avec une moyenne de 372 [ng/m³], parallèlement, 206 [ng/m³] est la moyenne enregistrée par ED-S, ce ci signifie que l'activation neutronique est la technique la plus sensible pour le dosage de cet élément.

Même en l'absence de valeur guide nationale ou internationale, ces teneurs restent très élevées et sans doute présentent un risque pour la santé humaine lors d'une exposition chronique.

La source probable de cet élément est naturelle terrigène, par conséquent, une part non négligeable de la contamination de ce site pourrait provenir du phénomène de l'érosion éolienne et la mise en suspension des particules de sol dans l'atmosphère en période de sécheresse, mais d'après *Birmili (2006)*, le fer peut aussi provenir du trafic routier (usure des freins).

3.6. Le Vanadium

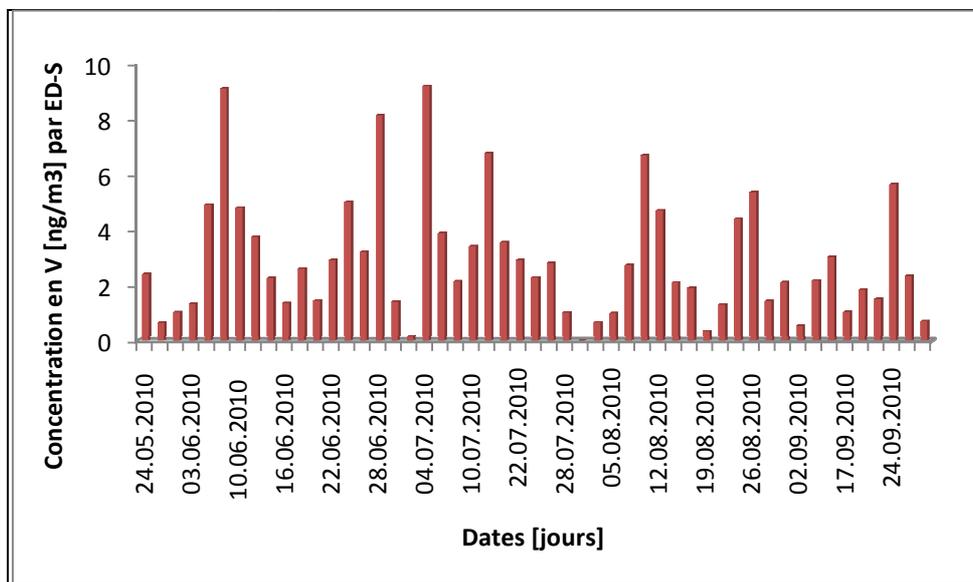


Figure 26 : Variation des concentrations du Vanadium en fonction de la date de prélèvement.

La concentration maximale en vanadium est de 8.13 [ng/m³] avec une moyenne de 2.89. Malgré sa présence fréquente dans les échantillons prélevés, les valeurs restent relativement faibles.

Dans une région méditerranéenne peu industrialisée comme Draria, la présence du vanadium dans l'air pourrait s'expliquer par une source d'origine naturelle liée à la mise en suspension locale des particules de sol. De même, d'après *Lin et al 2005* cet élément peut provenir du trafic routier.

L'absence de normes nationales et/ou internationales rend difficile l'évaluation du niveau de la pollution par cet élément.

En termes de toxicité, le vanadium est toxique pour les voies respiratoires. À de très hautes concentrations, il peut causer des troubles gastrointestinaux, des dommages au foie et des palpitations cardiaques ont été observés (Benoit, 2000).

Le vanadium a une valeur toxicologique de référence et selon CIRC – IARC (2003), l’inhalation du pentoxyde de vanadium provoque des irritations de la peau et des muqueuses. Certains composés du vanadium réagissent avec l'eau et produisent des vapeurs toxiques et irritantes contenant de l'acide chlorhydrique. Les personnes exposées à des concentrations élevées en vanadium pendant des périodes courtes ont présenté des symptômes respiratoires persistant 7 à 14 jours.

3.7. Le Zinc

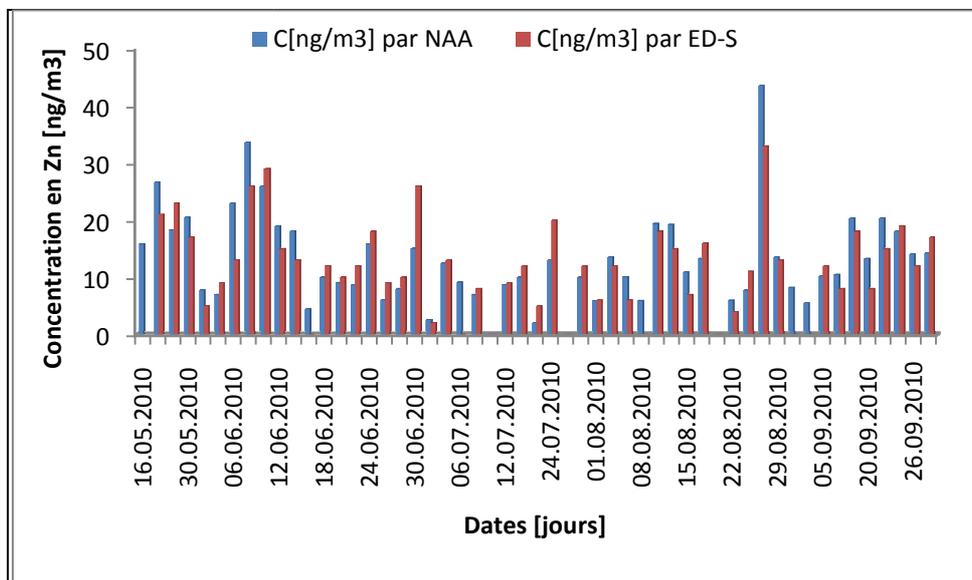


Figure 27 : Variation des concentrations du Zinc en fonction de la date de prélèvement.

Les moyens des concentrations obtenus en zinc par les deux techniques d’analyse à savoir l’activation neutronique et ED-S sont 12.66 et 11.51 [ng/m³] respectivement.

L’absence de normes nationales et/ou internationales rend difficile l’évaluation du niveau de la pollution atmosphérique par cet élément, mais en comparaison avec les résultats de certains travaux publiés internationalement ces valeurs restent faibles et tolérables.

D’après plusieurs études et dans le même axe de recherche (Sandrine 2005 ; Pacyna et Pacyna, 2001 ;...) le zinc est parmi les éléments qui caractérisent une origine anthropique. Par exemple, Selon le CITEPA, les émissions du zinc en France sont provenus pour 32% de l’incinération des ordures ménagères avec récupération d’énergie, pour 28% de l’industrie du fer et de l’acier, pour 18% du secteur résidentiel (chauffage domestique) et pour seulement de

7.2% lié à l'industrie des métaux non-ferreux (Veschambre 2006) . En effet, dans une région peu industrialisée comme Draria, la présence du zinc dans l'air est peut être associée directement au trafic routier et Selon Pakkanen et al, 2001, il apparaîtrait que le Zn soit émis de façon significative lors des phénomènes de combustion en plus d'être contenus dans les garnitures de freins et de pneumatiques.

Pour l'homme, l'inhalation et l'exposition aux vapeurs de composés de zinc (chlorure et oxyde de zinc) peut induire la mort suite à une détresse respiratoire importante et à l'autopsie, une fibrose pulmonaire a été observée. Les fumées contenant des particules ultrafines d'oxyde de zinc induisent la «fièvre des fondeurs», caractérisée par une gorge sèche et douloureuse, une toux, une dyspnée, de la fièvre, des douleurs musculaires, des céphalées et un goût métallique dans la bouche. Des effets cardiaques et gastrointestinaux peuvent aussi être associés à l'exposition à ces fumées (Anonyme; 1993).

Par ingestion, le zinc métal peut induire des vertiges, une léthargie, des difficultés à marcher et à écrire. L'ingestion de sulfate de zinc peut induire des désordres gastrointestinaux. Le contact cutané du chlorure de zinc est classé comme corrosif par la Commission européenne. L'oxyde, le sulfate et le stéarate de zinc ne sont pas irritants. (Anonyme; 1993).

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le niveau de détection de zinc par ED-S dans les TSP est en moyenne du même ordre de grandeur que celui observé par l'activation neutronique. En effet, la sensibilité de détection du zinc dans les TSP pour les deux techniques d'analyse est bonne.

3.8. Le Manganèse

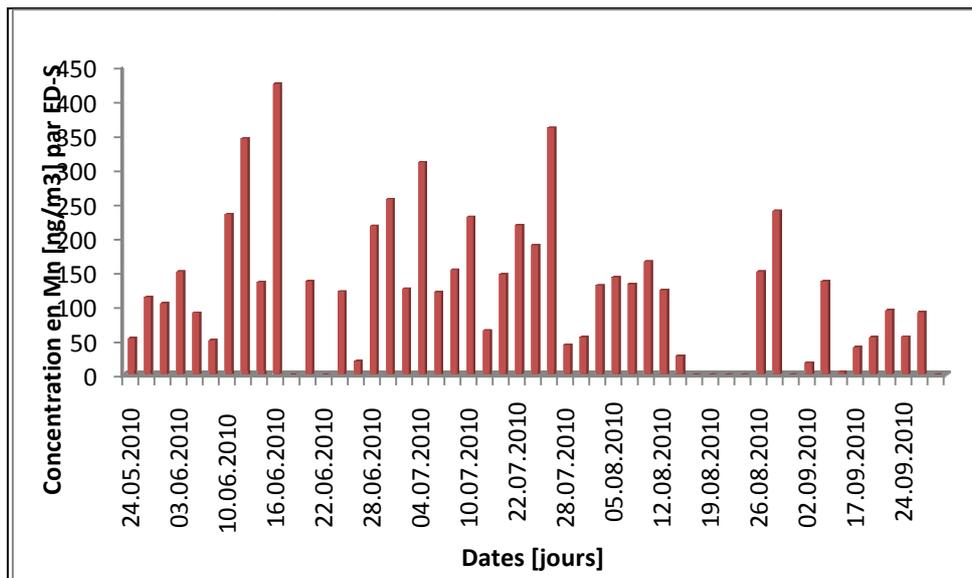


Figure 28 : Variation des concentrations du Manganèse en fonction de la date de prélèvement.

D'après les résultats obtenus, le Manganèse est présent dans l'air avec une moyenne de 92 [ng/m³]. Nous remarquons que la concentration maximale enregistrée est de 278 [ng/m³] et toutes les valeurs sont relativement faibles et restent inférieures à la valeur limite fixée par OMS (1µg/m³).

D'après Sandrine (2005), la présence de cet élément dans l'air peut avoir trois origines : terrigène, anthropique et marine. Pour le site étudié, le manganèse peut provenir de la mise en suspension des particules du sol dans l'atmosphère mais également du trafic routier.

Pour l'homme, l'inhalation des poussières ou des fumées d'oxydes de manganèse provoquent une irritation intense avec alvéolite caustique. Les fumées d'oxyde de manganèse peuvent entraîner l'apparition de frissons, de fièvre, de sudation, de nausées et de toux. (ATSDR ; 2005). Par ingestion aucune donnée n'est disponible chez l'homme. Chez l'animal, les composés du manganèse ont une faible toxicité par voie orale. Il existe une valeur toxicologique de référence pour le dioxyde de manganèse, oxydes et sels de manganèse et d'après US EPA, le manganèse appartient à la classe D « Substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme » (Anonyme, 1993).

3.9. Le Sélénium

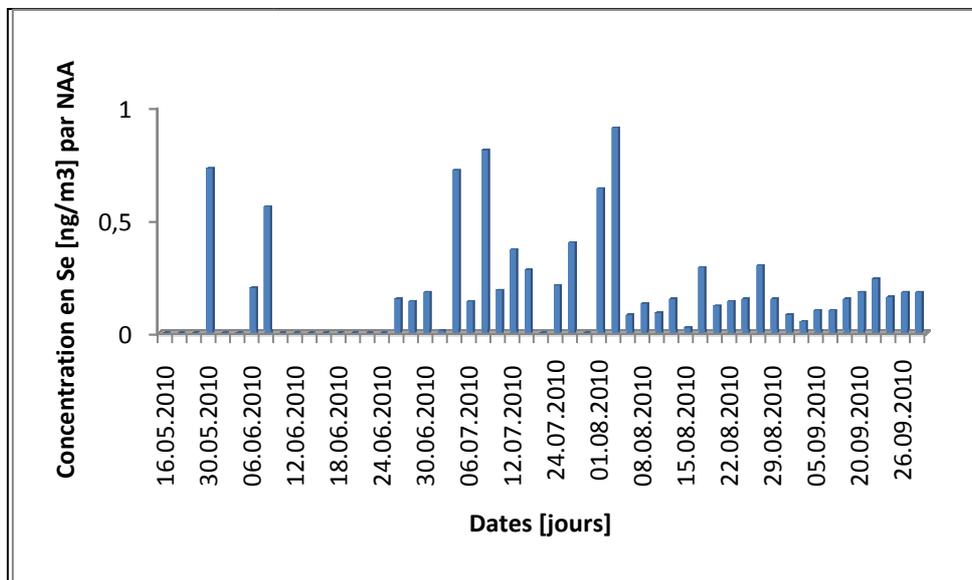


Figure 29 : Variation des concentrations du Sélénium en fonction de la date de prélèvement.

D'après les résultats obtenus, les concentrations en Sélénium sont faibles et restent inférieures à 1 [ng/m³] et la valeur maximale enregistrée est de 0.91 [ng/m³] avec une moyenne de 0.18 [ng/m³].

Si on compare la teneur moyenne enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2008, qui est de 0.66 [ng/m³] pour la même période au niveau d'un site urbain à Alger Centre (*khodja, 2010*), on relève une certaine diminution.

A Draria, la présence du sélénium dans l'air est peut être associée directement à l'érosion éolienne.

En termes de toxicité, aucune donnée n'est spécifique au sélénium élémentaire, par contre le sélénite, le sélénate ou le dioxyde de sélénium peuvent affecter l'organisme s'ils sont inhalés. Le dioxyde de sélénium est le principal problème, qui intervient dans la plupart des expositions industrielles où le sélénium est chauffé. Le dioxyde forme, en présence d'eau ou de transpiration, l'acide sélénieux qui est un irritant puissant. Il est généralement admis que le sélénite et le sélénate de sodium ainsi que la sélénométhionine et le séléno glutathion sont parmi les espèces les plus toxiques (*ATSDR, 2005*).

Malgré que le sélénium et ses composés sont classés dans la catégorie 3 « *ne peut se prononcer quant à la cancérogénicité pour l'homme* » par l'Agence Internationale de Recherche sur le Cancer, des apports insuffisants en sélénium peuvent provoquer une dystrophie des muscles et une fréquence accrue des infections. Par exemple, en ex-Yougoslavie, la faible teneur des sols en sélénium se répercute sur toute la chaîne alimentaire et entraîne un statut en sélénium déficitaire dans la population: ce déficit endémique s'accompagne de deux types de pathologies, la néphropathie endémique des Balkans et des tumeurs du tractus urinaire (*Maksimovic; 1992*).

3.10. Le Cobalt

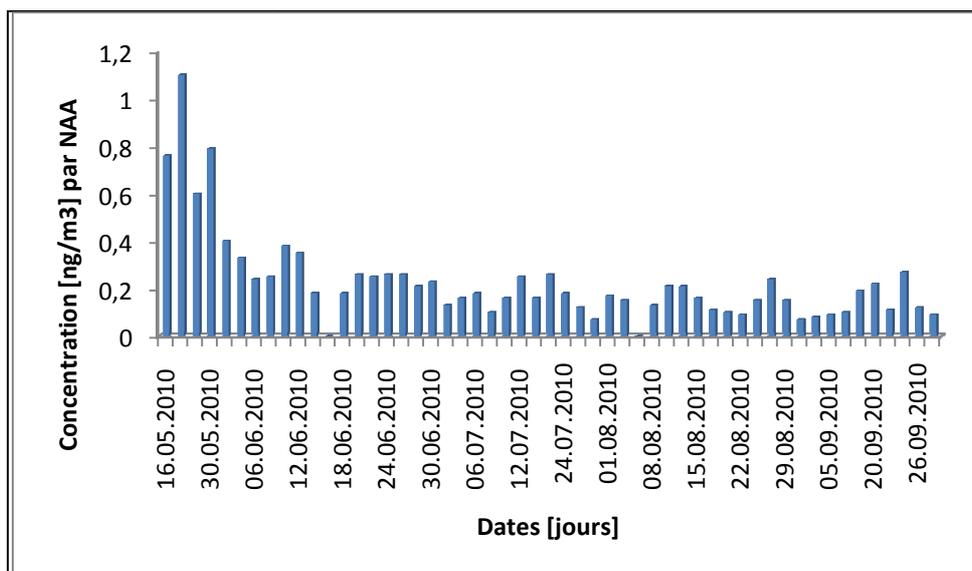


Figure 30 : Variation des concentrations du Cobalt en fonction de la date de prélèvement.

D'après les résultats obtenus, la présence du Cobalt est fréquente sur toute la période de prélèvement, mais avec des teneurs faibles. La teneur maximale enregistrée est de 1.1 [ng/m³] tandis que la minimale est de 0.09 [ng/m³] avec une moyenne de 0.22 [ng/m³].

Si on compare ces teneurs enregistrées durant cette étude aux celles mesurées en 2008 pour la même période de prélèvement au niveau d'un site urbain à Alger Centre, on relève une certaine diminution et la moyenne des valeurs est de 0.59 [ng/m³] (*khodja, 2010*).

La présence du cobalt dans l'air peut être liée directement aux émissions du trafic routier d'après *De Miguel et al 1997*, mais également il peut provenir du sol. (*Sandrine 2005*). En termes de toxicité, il n'existe pas une valeur toxicologique de référence pour le cobalt élémentaire mais elle existe pour ses dérivés organiques et inorganiques.

Par inhalation, l'organe cible du cobalt est le système respiratoire. Les effets sont multiples : irritation respiratoire, respiration bruyante, asthme, pneumonies et fibroses. Une exposition professionnelle à des poussières de cobalt entraîne des cardiomyopathies. Une sensibilisation au cobalt par inhalation a été également démontrée. Une exposition à des aérosols de chlorure de cobalt entraîne une crise d'asthme (*ATSDR, 2005*).

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'activation neutronique est une technique qui est très sensible pour le dosage de cet élément dans les particules atmosphériques.

3.11. L'Antimoine

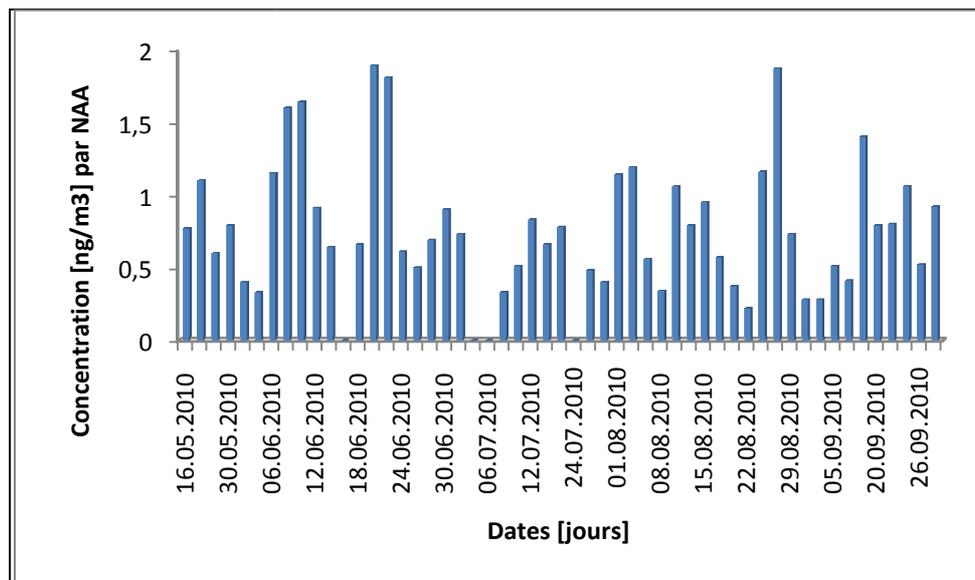


Figure 31 : Variation des concentrations d'Antimoine en fonction de la date de prélèvement.

Les teneurs détectées en Antimoine sont très faibles, les valeurs minimale et maximale sont de 0.22 1.89 [ng/m³] respectivement avec une moyenne de 0.74 [ng/m³]. L'Antimoine n'est pas réglementé dans l'air par des seuils à respecter. Si on compare ces teneurs moyennes enregistrées durant cette étude à celle mesurée en 2008, pour la même période au niveau d'un site urbain à Alger Centre (*khodja, 2010*), nous constatons une certaine diminution par rapport à celles de ce dernier avec des valeurs qui oscillent entre 0.25 et 5.08 ng/m³. D'après *Azimi 2004*, l'érosion éolienne est parmi les sources émettrices d'antimoine dans l'air. Ainsi, celle-ci compte pour au moins 20 à 30 % des émissions de Sb vers l'atmosphère. Egalement, l'antimoine peut provenir du trafic routier, principalement des garnitures de freins. Cet élément, qui a remplacé l'amiante précédemment utilisée dans la fabrication des plaquettes de freins, est utilisé en tant qu'alliage comprenant 5 à 20 % de Cu et 1 à 5 % de Sb. Ce dernier est également présent dans les graisses et dans une moindre mesure dans les huiles lubrifiantes (*Azimi ; 2004*).

En termes toxicité l'inhalation des poussières d'antimoine entraîne des troubles gastro-intestinaux, dyspnée, céphalées, vomissement, conjonctivite et écoulement nasal. (*ATSDR, 2005*).

3.12. Le Baryum

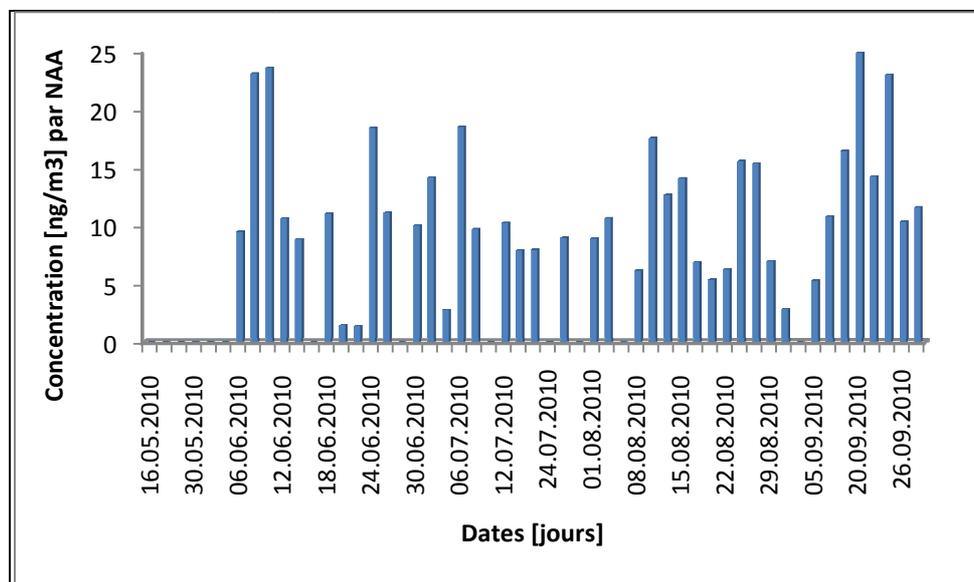


Figure 32 : Variation des concentrations du Baryum en fonction de la date de prélèvement.

Pour le site de prélèvement, nous constatons que la présence du baryum est fréquente dans l'air mais avec des concentrations relativement faibles avec un maximum de 24.89 [ng/m³] et une moyenne de 8.5 [ng/m³]. Sur la période qui s'étale du 15 mai au 3 juin, les teneurs en

baryum sont nulles et/ou non décelables. La présence du baryum dans l'air peut être liée directement au trafic routier, il est émis avec les rejets de combustion puisqu'il est utilisé lors du traitement des fumées de diesel, mais, il est également présent dans les huiles lubrifiantes et les garnitures de freins (Pakkanen et al, 2001).

3.13. Le Calcium

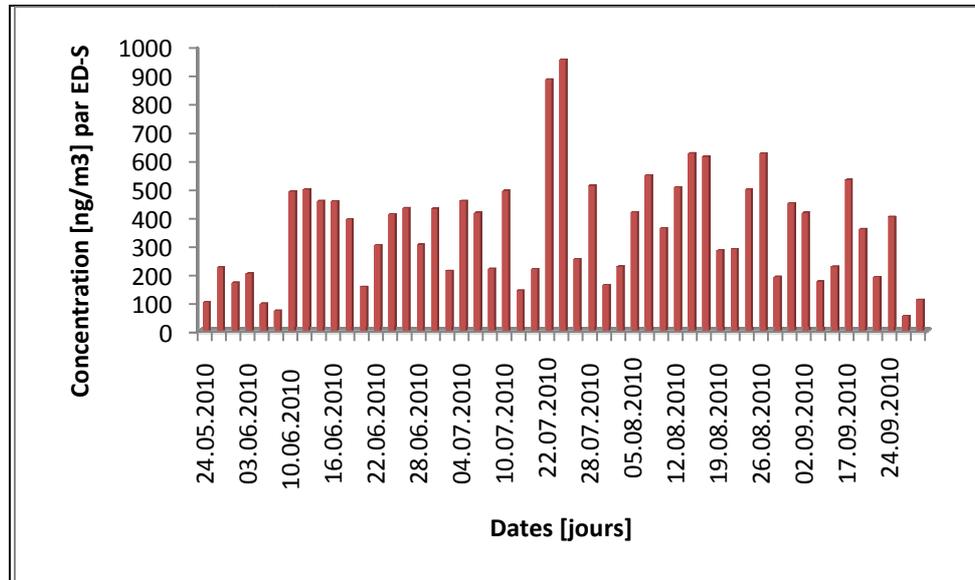


Figure 33 : Variation des concentrations du Calcium en fonction de la date de prélèvement.

Selon les résultats obtenus, la présence du Calcium dans l'air est fréquente et des concentrations importantes en calcium sont observées sur le site d'étude. La valeur maximale est de 952[ng/m³] avec une moyenne de 355 [ng/m³].

La source suspectée de présence du calcium dans l'air est naturelle terrigène puisque le calcium parmi les composés inorganiques qui caractérisent le sol et d'après Duchaufour (1998), le sol est un complexe qui comporte des sels (des carbonates de calcium ou de magnésium), des silicates (micas), et des colloïdes comme les hydroxydes de fer ou d'aluminium.

Comme la plupart des métaux, le calcium n'est pas réglementé dans l'air par des seuils à respecter.

3.14. Le Cuivre

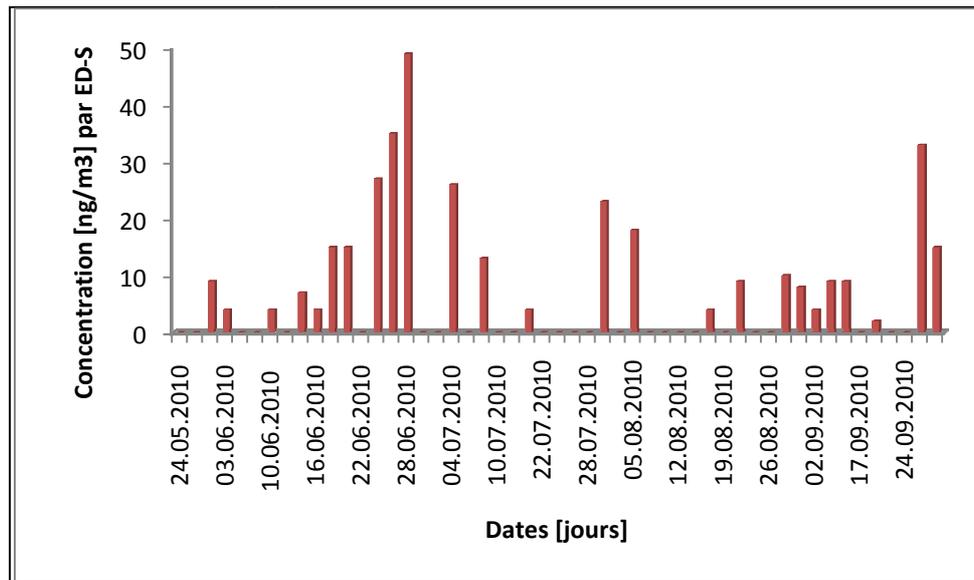


Figure 34 : Variation des concentrations du Cuivre en fonction de la date de prélèvement.

La présence du Cuivre dans l'air n'est pas fréquente sur le site étudié. La valeur maximale enregistrée est de 49 [ng/m³] avec une moyenne de 6.98 [ng/m³]. L'absence de normes relatives pour ce métal rend difficile l'appréhension du niveau de la pollution par le cuivre dans la région d'étude.

En termes de toxicité, il existe une valeur toxicologique de référence pour le cuivre et ses dérivés mais le cuivre métallique a une toxicité plus faible que les sels de cuivre.

Selon *US EPA (IRIS, 1991)*, le Cuivre et ses dérivés sont classés dans la classe D « *Substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme* ».

Pour l'homme, l'inhalation des fumées et des poussières contenant du cuivre provoquent : irritation des muqueuses respiratoires et oculaires, congestion des muqueuses nasales, congestion du pharynx, ulcération voire perforation du septum nasal.

Ainsi, l'ingestion d'une dose unique d'un dérivé du cuivre donne lieu à : goût métallique, douleurs épigastriques, céphalées, nausées, étourdissements, vomissements et diarrhée, tachycardie, difficultés respiratoires, anémie, hématurie, hémorragie gastro-intestinale massive, insuffisance hépatique et rénale aboutissant à la mort (*Anonyme, 2005*).

3.15. Le Brome

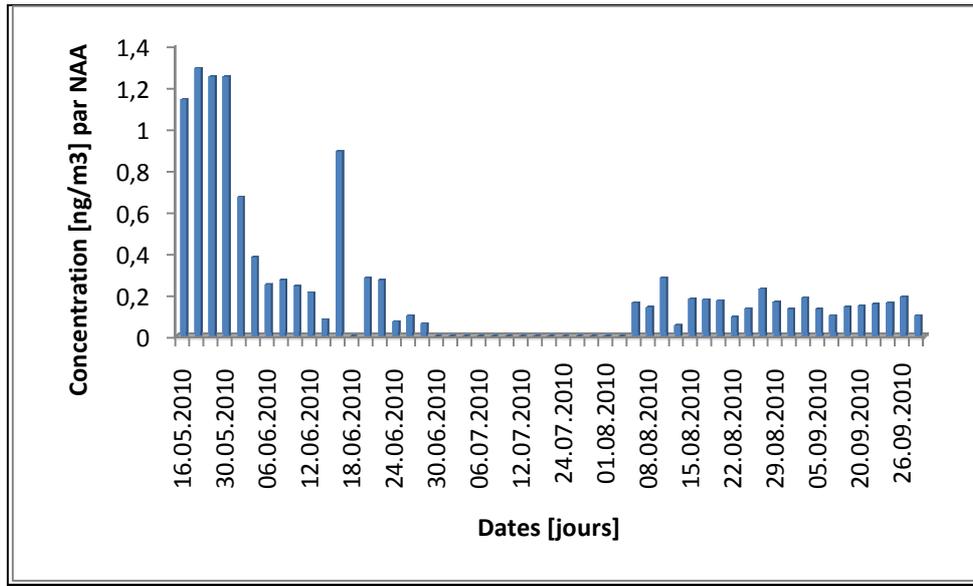


Figure 35 : Variation des concentrations du Brome en fonction de la date de prélèvement.

Les teneurs détectées en Brome sont très faibles et ne dépassent pas 1.29 [ng/m³], avec un plateau des concentrations nulles ou non décelables sur la durée qui s'étale de 30 juin 2010 au 05 aout de la même année.

3.16. Le Scandium

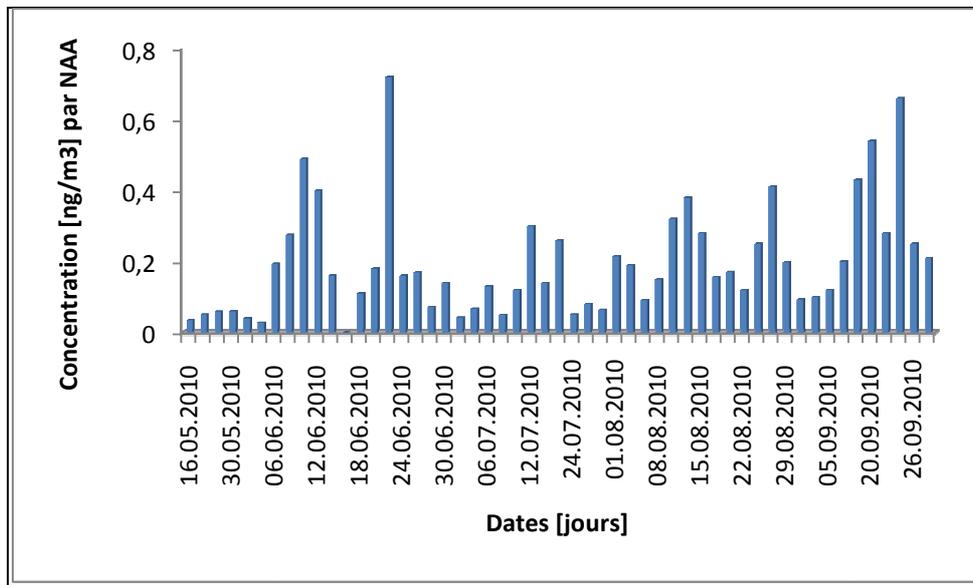


Figure 36 : Variation des concentrations du Scandium en fonction de la date de prélèvement.

Le Scandium est présent presque dans tous les échantillons mais à des concentrations infimes qui varient entre 0.03 et 0.72 [ng/m³]. Comme la plupart des métaux, le Scandium n'est pas réglementé dans l'air par des seuils à respecter, ce qui empêche toute conclusion.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'activation neutronique est une technique qui est très sensible pour le dosage de cet élément dans les particules atmosphériques.

3.17. Le Hafnium

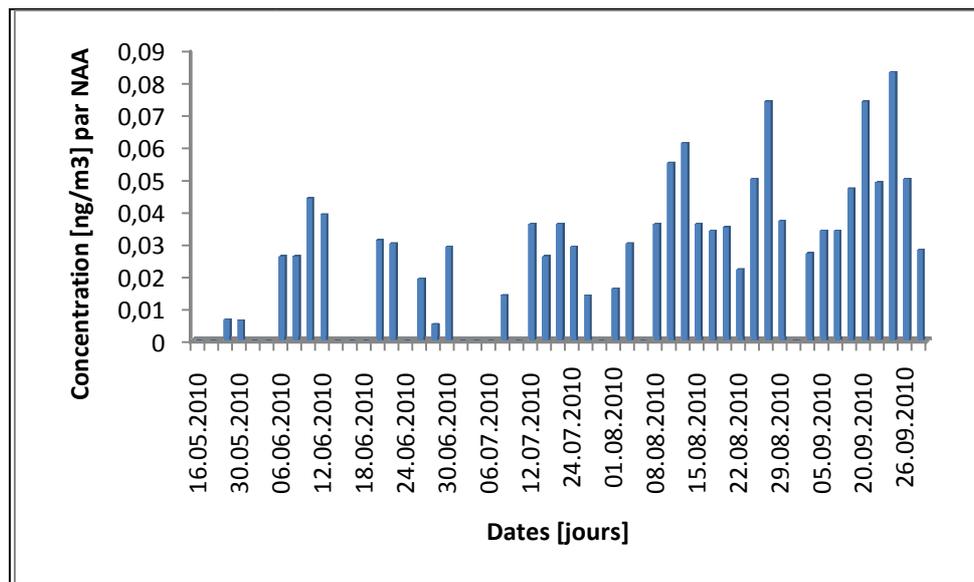


Figure 37 : Variation des concentrations du Hafnium en fonction de la date de prélèvement.

Les teneurs détectées en Hafnium sont très faibles, la teneur maximale enregistrée est de 0.08 [ng/m³] avec une moyenne de 0.025[ng/m³]. Si on compare cette teneur moyenne enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2008, qui est de 0.067 [ng/m³] pour la même période au niveau d'un site urbain à Alger Centre (*khodja, 2010*), on relève une certaine diminution.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'activation neutronique est une technique qui est très sensible pour le dosage de cet élément dans les particules atmosphériques.

Comme la plupart des métaux, le Hafnium n'est pas réglementé dans l'air par des seuils à respecter.

3.18. Le Cérium

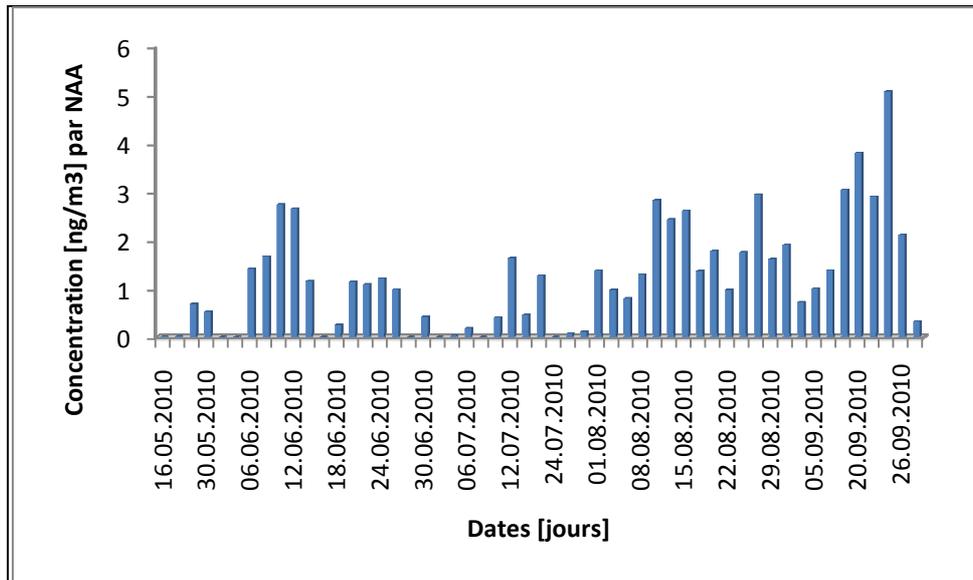


Figure 38 : Variation des concentrations du Cérium en fonction de la date de prélèvement.

La valeur maximale en Cérium est de 5.07 [ng/m³] avec une moyenne de 1.22 [ng/m³]. L'absence de normes relatives pour ce métal rend difficile l'appréhension du niveau de la pollution par le Cérium dans la région d'étude.

En effet, dans un milieu méditerranéen, périurbain et peu industrialisé comme Draria, on peut distinguer deux principales sources d'émission des particules atmosphériques : l'une est naturelle terrigène et l'autre anthropique (trafic routier), mais à l'échelle mondiale, les tailles et les natures des particules sont diverses, il est donc difficile et très délicat de quantifier leur origine et les quantités émises.

On remarque que la plupart des métaux n'ont pas de normes, ce qui rend difficile d'estimer leur degré de pollution. En effet, certaines constatations sont basées sur les résultats des travaux similaires publiés internationalement.

Enfin, ces résultats doivent être pris avec une certaine précaution puisqu'ils ne couvrent pas toute l'année.

4. Comparaison des résultats avec certaines données publiées :

Tableau 11 : Comparaison des résultats obtenus avec les résultats de certaines villes du monde.

Ville Métaux: [ppm]	Présente étude	Alger centre. (Khodja ; 2010)	Goteborg (Janhall and al ; 2002).	Copenhague. (Anoop and al ; 2007)		Hanoi (Michel et al ; 2005).	Chand- igarth. (Bandhu and al ; 2000).
Cr	1.34	35.45	/	271	645	3.8	180
Fe	372	1380	1190	18.5	8.69	320	20277
As	0.12	/	/	27.5	38	/	/
Sb	0.74	2.17	/	123	40	/	/
Br.	0.22	/	9	/	/	/	/
Sc	0.19	/	/	/	/	/	/
Hf	0.025	0.067	/	/	/	/	/
Ba	8.58	/	/	703	540	/	/
Ce	1.22	/	/	8.5	4.5	/	/
Co	0.22	0.64	/	13	20.8	/	/
Zn	12.66	/	49	2.88	4.5	100	1209
Se	0.18	0.74	/	32.9	36.8	/	/
Ca	3.56	/	740	13.37	8.6	440	13695
Mn	92	/	20	295	198	24	718
Cu	6.98	/	16	168	1.56	7	30
Pb	49	/	/	/	/	83	1497
Ni	24	/	/	8.6	19.87	1.2	229
V	2.89	/	/	316	428	4.8	/
Remarques	-Site périurbain (TSP) (mai - septembre 2010).	-Site urbain (TSP). (mai - septembre 2008)	-Site urbain (TSP). (Septembre et octobre 1999).	-Site de proximité(TSP) (Avril- Juin ; 2005)	-Site urbain (TSP). (Avril- Juin ; 2005).	-Site urbain (PM 2.5). (Mai- octobre 2000).	- Site urbain (TSP). (été 1996).

Dans un milieu méditerranéen, périurbain et peu industrialisé comme Draria, la comparaison des résultats avec des données similaires des autres villes du monde montre que les moyennes des valeurs enregistrées à Draria restent relativement faibles par rapport à ceux qui ont été enregistrés dans les villes considérées, excepte le Nickel qui révèle une moyenne supérieure à celle de Copenhague (Danemark) et Hanoi (Vietnam) mais c'est une valeur inférieure à celle de Chandigarh (Inde), ainsi la teneur moyenne en Manganèse est supérieure à celle de Göteborg (Suède) et celle enregistrée à Hanoi (Vietnam) mais cette dernière étudie les particules considérées sont les PM-2.5. Également, la teneur moyenne en Zinc est supérieure à la valeur enregistrée à Copenhague (Danemark) et reste inférieure aux celles des autres villes considérées.

5. Corrélation entre les métaux :

A l'échelle mondiale, malgré la multiplicité des sources des éléments inorganiques et l'absence d'éléments caractérisant celles-ci, quelques méthodes de détermination des origines peuvent être élaborées (voir l'annexes). Donc, les outils de détermination de métaux dans les aérosols qui sont souvent utilisés sont:

Le premier outil est basé sur les différences de rapports isotopiques du plomb (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb).

Le second regroupe d'une part le calcul d'un facteur d'enrichissement et, d'autre part, le calcul de rapports massiques simples. Dans le premier cas, il est possible de déterminer l'enrichissement des éléments par rapport à la composition du sol, permettant ainsi de distinguer l'origine terrigène des apports. Dans le second cas, les rapports massiques Cu/Sb, Fe/Al et K/Na permettent la distinction des apports respectivement automobiles, terrigènes et marins. Mais la plupart des travaux qui tentent de déterminer les origines des éléments inorganiques utilise des outils statistiques de traitement des données, comme par exemple l'analyse en composante principale (*Blanchard et al., 2002 ; Carlosena et al., 1998 ; Cyrus et al., 2003 ; Fernandez et al., 2000*).

Ce type de méthode se base sur l'affinité existante entre les éléments de même origine, mais ne permet pas une généralisation des résultats (*Azimi, 2004*).

En effet, nous essayons d'évaluer dans ce paragraphe les corrélations qui existent entre les différents couples de métaux étudiés, nous représentons dans le tableau suivant le coefficient de corrélation de Person, ce dernier est une mesure d'association (d'interdépendance) entre deux éléments (variables), elle mesure l'intensité de la co-variation entre les deux variables.

Plus ce coefficient est proche de 1 en valeur absolue, plus les éléments sont dits corrélés :

S'il est proche de « +1 », ceci signifie que les deux variables varient dans le même sens.

S'il est proche de « -1 », ceci signifie que les deux variables varient dans le sens inverse l'une de l'autre.

Plus il est proche de « 0 » moins les éléments sont corrélés et la valeur « 0 » signifie l'absence de corrélation entre les deux éléments considérés.

Sur ce principe, nous considérons ce coefficient comme un critère qui nous donne l'idée sur la possibilité d'existence d'une source émettrice commune entre les éléments métalliques étudiés.

Tableau 12 : Coefficient de corrélation de Pearson entre les différents couples de métaux étudiés:

Métal	Fe	Zn	As	Sb	Br	Sc	Hf	Ba	Ce	Mn	Se	Ca	Co	Cu	Pb	Ni	V	Cr	
Fe N : 53	1	0.45 **	0.36 **	0.54 **	-0.25 *	0.79 **	0.80 **	0.71 **	0.86 **	0.51 **	0.04	0.13	-0.12	-0.01	0.17	00	-0.17	0.4 **	
Zn N : 53		1	0.41 **	0.49 **	0.22	0.36 **	0.36 **	0.39 **	0.42 **	0.39 **	0.10	0.09	0.06	0.04	0.19	0.08	-0.12	-0.15	
As N : 53			1	0.33 **	-0.08	0.32 *	0.41* *	0.23 **	0.39 **	-0.08	-0.04	0.18	-0.10	-0.07	0.32 **	0.18	-0.21	-0.18	
Sb N : 53				1	0.14	0.66 **	0.5 **	0.43 **	0.49 **	0.06	0.07	0.2	0.19	0.24	0.02	-0.04	-0.03	0.17	
Br. N : 53					1	0.23 *	0.30 *	0.3	0.18	0.68	-0.21	-0.24	-0.04	0.02	- 0.01	-0.06	-0.07	-0.30	
Sc N : 53						1	0.78 **	0.61 **	0.81 **	-0.05	-0.06	0.2	0.05	0.2	0.16	-0.02	-0.11	0.12	
Hf N : 53							1	0.59 **	0.84 **	-0.17	0.03	0.24 *	-0.03	0.02	0.24 *	0.16	-0.14	-0.10	
Ba N : 53								1	0.67 **	-0.17	0.12	0.24 *	0.24 *	0.06	0.13	-0.03	0.02	0.09	
Ce N : 53									1	-0.11	-0.04	0.09	0.10	0.10	0.24 *	0.06	-0.14	0.08	
Mn N : 53										1	-0.07	-0.2	-0.05	-0.06	- 0.07	-0.15	-0.09	-0.1	
Se N : 53											1	0.10	0.07	-0.06	0.07	0.17	-0.06	0.07	
Ca N : 53												1	0.16	-0.21	- 0.13	-0.13	0.04	0.14	
Co N : 53													1	0.08	-0.1	-0.12	0.01	0.2	
Cu N : 53														1		-0.06	0.18	0.17	
Pb N : 53															1	0.67 **	-0.04	0.32 **	
Ni N : 53																1	-0.01	-0.21	
V N : 53																	1	0.03	
Cr N : 53																			1

(SPSS-10)

* : La corrélation de Pearson est significative au niveau 0.05 (unilatérale).

** : La corrélation de Pearson est significative au niveau 0.01 (unilatérale).

N : Le nombre d'échantillon.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la corrélation de Person est relativement significative entre les couples d'élément (Fe/ Zn), (Fe/As), (Fe, Sb), (Fe, Sc), (Fe, Hf), (Fe, Ce), (Fe, Mn) et (Fe, Cr) et en sachant que le Fer est un élément qui caractérise la source terrigène, ce ci signifie que ces éléments proviennent majoritairement de l'écorce terrestre pour le site d'étude.

Egalement, nous remarquons une bonne corrélation entre le Plomb et le Nickel, ce ci signifie que ces derniers proviennent du trafic routier qu'est leur principale source d'émission.

Par contre, à titre d'exemple, ce coefficient est nul entre le Fer et le Nickel, donc les sources d'émission de ces deux éléments sont complètement différentes pour le site étudié.

Par conséquence, dans un site périurbain et une région peu industrialisée comme Draria, les éléments métalliques peuvent être provenir de l'intérieur et/ou de l'extérieur de la commune, puisque ces éléments se déplacent sur des longues distances et d'après *Sandrine* (2005), le voyage des métaux s'achève selon des processus aux cinétiques différentes en fonction des conditions météorologiques, par le dépôt à proximité des sources d'émission [0- 10 Km] concernant les métaux associés aux grosses particules, et par un dépôt qui est loin des sources d'émission [10- 1000 Km] pour les éléments associés aux petites particules.



Conclusion générale

*« Toute aventure humaine, quelque singulière qu'elle paraisse, engage
l'humanité entière. »
- Jean-Paul Sartre -*

Conclusion générale

Au cours de cette étude, nous avons évalué les niveaux de pollution de l'air ambiant par les particules totales en suspension et certains métaux qui sont véhiculés par ces dernières.

L'étude montre qu'en ce site semi-urbain, la pollution de l'air par les TSP atteint des niveaux relativement faibles, nous remarquons que 76% des teneurs obtenues ne dépassent pas l'objectif de qualité fixé par la réglementation algérienne et celle de l'OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et restent lointaines de la valeur limite journalière fixée par l'OMS et les Etats-Unis, qui est de $250 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$. La teneur moyenne sur la période de prélèvement (surveillance en continu) s'élève à $40 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$, la teneur maximale est de l'ordre de $85 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Et comparé aux teneurs mesurées en sites urbains d'Alger, les niveaux de pollution relevés à Draria ne sont pas inquiétants, ceci signifie que la qualité de l'air s'améliore en s'éloignant des grandes agglomérations.

L'étude des métaux : Cr, Pb, As, Ni, Fe, V, Zn, Mn, Se, Co, Sb, Ba, Br, Sc, Hf, Ce, Ca et Cu associés aux particules totales en suspension montre que ces dernières véhiculent des métaux à caractère toxique, malgré que leurs teneurs généralement ne dépassent pas les valeurs qui réglementent internationalement cette forme de pollution, l'inhalation de certains métaux tels que l'arsenic, le cobalt, le plomb, le nickel, le chrome, le manganèse et le vanadium, même en de faibles quantités peut sur une longue durée conduire à des niveaux de concentration toxiques par effet d'accumulation dans l'organisme.

En effet, dans un milieu méditerranéen, périurbain et peu industrialisé comme Draria aucune source émettrice n'influe directement sur le site étudié hormis le trafic routier qui est caractérisé par la présence du nickel et le plomb dans les TSP, et l'érosion éolienne qui est la principale cause de la mise en suspension des particules du sol dans l'air sur une période de sécheresse qui s'étale de la mi mai jusqu'à fin septembre. Cette source terrigène contribue fortement à la pollution de l'air par les particules dans l'agglomération d'Alger. Elle est surtout caractérisée par la présence des éléments majeurs: le fer et le manganèse dans les TSP.

Les deux techniques d'analyse utilisées, à savoir l'analyse par activation neutronique et la spectrométrie d'émission des rayons X fluorescence X sont complémentaires mais la première est plus sensible par rapport à l'ED-S pour le dosage du cobalt, le chrome, le fer, le sélénium, le hafnium et le scandium. Par contre, le dosage du plomb qui n'est pas décelable par NAA, le nickel, le vanadium, le calcium, le manganèse est le cuivre est effectué grâce à la spectrométrie d'émission des rayons X à dispersion d'énergie.

Les émissions anthropiques de polluants sont en effet l'un des points d'entrée importants de la perturbation humaine dans les cycles biogéochimiques et dans le fonctionnement de l'atmosphère et des océans. Leurs conséquences directes (trou de zone d'ozone, altération de la qualité de l'air, pluies acides, effet de serre) sont bien connues. Toutefois, si les connaissances sur les phénomènes nouveaux que sont les changements climatiques et la pollution des milieux naturels par les activités humaines ont largement progressé, le public est averti, mais n'a sans doute pas les connaissances pour en appréhender les enjeux et la complexité.

Aujourd'hui les outils actuels de la recherche incluent des moyens expérimentaux complexes, souvent embarqués sur des supports mobiles divers (avions, ballons, satellites). Il est en effet indispensable de réaliser de nombreuses mesures dans le milieu atmosphérique et de les inscrire dans une perspective à long terme de surveillance de son évolution. Un moyen privilégié aujourd'hui dans le domaine de la recherche atmosphérique est la modélisation numérique, désormais outil de base pour l'intégration des connaissances avec des applications importantes, comme la prévision à différentes échelles de temps.

Nous prenons désormais conscience de la nécessité de contrôler, voire de contraindre, les activités humaines susceptibles de modifier notre environnement. Il existe en effet une préoccupation forte pour ce qui touche à la nature, au confort de vie et à la sécurité. Il est aujourd'hui important d'accroître la diffusion des connaissances et l'information sur l'influence de l'homme sur son environnement, afin qu'à moyen terme, les populations acceptent les efforts nécessaires pour tenter de maîtriser les évolutions les plus néfastes.

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

☞ Stimuler le développement des énergies alternatives et renouvelables (biomasse, solaire, éolien...) et contribuer à la baisse de polluants de l'air qui présentent par ailleurs des risques pour la santé humaine.

☞ Améliorer le transport collectif pour éviter les conséquences de la motorisation croissante et véhicules usagés ou mal entretenus, carburant de mauvaise qualité et contribuer à limiter la surface de voirie occupée en ville, en dérivés par exemple des espaces verts ou de zone piétonnes.

☞ Encouragement de la bicarburant Essence / GPL ou GNC.

Conclusion générale

- ✍ Instaurer, efficacement le contrôle technique et la maintenance des véhicules.
- ✍ La surveillance de la qualité de l'air ambiant et de sa composition chimique est plus que nécessaire pour l'acquisition de données utiles à la mise en œuvre de politiques de prévention.
- ✍ Mise en place des politiques en faveur du principe du pollueur – payeur.
- ✍ 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 notre air pour les générations futures.

Références Bibliographiques



*« L'homme n'est pas entièrement coupable : il n'a pas commencé l'histoire ;
ni tout à fait innocent, puisqu'il la continue. »*

- Albert Camus -

Références bibliographiques.

- [1]- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 1998. La qualité de l'air en France en 1995-1996, Editions ADEME, Paris.
- [2]- *Anderson R.*, 1994. Chromium nutrition in the elderly. In Handbook of Nutrition in the Aged. Watson RR, ed. Boca Raton, FL: CRC Press. p. 385-92.
- [3]- *Anonyme*, 1984. Norme NF X 43-017 Mesure de la concentration des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Méthode par absorption de rayons bêta, AFNOR, Paris.
- [4]- *Anonyme*, 1993. Official Journal of the European Communities. Commission Directive 93/72/EC, 19th time Council directive 67/548EEC.
- [5]- *Anonyme*, 2000. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Rapport National sur l'Etat et l'avenir de l'Environnement, Alger, Algérie.
- [6]- *Anonyme 2010*. L'Assemblée populaire de la commune de Draria.
- [7]- *Anoop K. S.*, 2007. Genotoxicity, inflammation and physico-chemical properties of fine particle samples from an incineration energy plant and urban air. ScienceDirect 633 -95–111.
- [8]- *Anthes R.A.*, 1997. Meteorology. upper saddle river: Prentice hall, 7^{ème} edition, p.214.
- [9]- *Arthur C; Stern*, 1976. Air pollution, air pollutants, their transformation and transport, Academic Press, New York.
- [10]- *Azimi S.*, 2004. Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement, France, p.275.
- [11]- *Badj S.* 2005. Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger, projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [12]- *Badol C.*, 2005. Caractérisation des Composés Organiques Volatils dans une atmosphère urbaine sous influence industrielle : de l'identification à la contribution des sources. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie de Lille 1. Ecole des mines de Douai. France.
- [13]- *Bandhu; Sanjiv P.; Shahi; Mehta D.; Garg M.L.; Nirmal S. ; Mangal P.C.; Suri C.R.; Swietlicki R.et Trehan P.N.*, 2000. Elemental composition and sources of air pollution in the city of Chandigarh, India, using EDXRF and PIXE techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 160 126-138.
- [14]- *Baudry G.*, 2003. Correction des effets de matrice par spectrométrie des rayonnements gamma de capture : application à la mesure par Interrogation Neutronique Active (I.N.A.). Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, p.159.
- [15]- *Belot G.*, 1996. Emissions particulaires par les transports routiers essence et diesel, caractéristiques chimiques et granulométriques, contribution, Journées d'études du CITEPA (17/12/96).
- [17]- *Bendada M*, 2006. Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger. Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [18]- *Benoit F.*, 2000. Détermination de la composition chimique des cendres provenant de centrales thermiques au pétrole par activation neutronique. Mémoire de maîtrise de l'énergie des sciences appliquées, Ecole Polytechnique de Montréal.

- [19]- *Birmili W.; Allen A. G.; Bary F. et Harrison R. M.*, 2006. Trace metal concentrations and water solubility in size-fractionated atmospheric particles and influence of road traffic. *Env. Sci. Tech.*, 40, 1144-1153.
- [20]- *Bitouche A.*, 2007. Contribution à l'étude par classe granulométrique des aérosols particulaires sur un site de proximité à l'ENP », mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [21]- *Boutonnet F.*, 2004. Etude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre. Mémoire de magister. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [22]- *Boutron C.F. Ducroz F.M.; Gorlach U.; Jaffrezo J.L.; Davidson C.I. et Bolshov M.A.*, 1993. Variations in heavy metal concentrations in fresh greenland snow from January to August 1989. *Atmospheric Environment*, 27, 2773-2779.
- [23]- *Branch H.C.*, 1973. Corrosion resistance material for U equipment: Material resistance and performance . Vol °12 , N°3, pp 9-13.
- [24]- *Braun C.*, 1997. Respiratory health and long term exposure to air pollutants in, suisse school children.
- [25]- *Brochard.D ; Pairon.J.C et Bignon.J*, 1999. Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées *Pollution atmosphérique*, pp178-182.
- [26]- *Bitouche A.*, 2008. Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger. Mémoire de Magister, ENP, Alger.
- [27]- *Céline Puente-Lelievre*, 2009. La qualité de l'air en milieu aéroportuaire : Etude sur l'aéroport Paris-Charles-De-Gaulle. Thèse de doctorat. Université Paris XII - Val de Marn, France.
- [28]- *Chang M.B. ; Lin N.H. ; Lee H.M. et Lo Y.C.*, 1997. Rainwater contamination and sources in Taoyuan county, Taiwan. *A32*, 1641 - 1653.
- [29]- *Clarck G.L.*, 1961. Les rayons x et leurs applications. Université d'illinois, Dunod, paris.
- [30]- *Clarck W.C.*, 1982. Carbone dioxide review, Clarendon press, Oxford. collected in Corsica related to changes in the origins of incoming aerosols. 19, 577 - 585.
- [31]- *Colbeck, I.*, 1995. Particle emission from outdoor and indoor sources. In: K.e. Samara Editor, Airbone particulate matter, pp. 1-34.
- [32]- *Colombo J.C. Pelletier E. ; Brochu C. et Khalil M.* 1989. Determination of hydrocarbon sources using n-alcane and polyaromatic hydrocarbon distribution indexes. Case study: Rio de la Plata estuary, Argentina. *Environmental Science and Technology*, 23, 888-894.
- [33]- *Dams R. and al.*, 1970. Non destructive activation analysis of air particulates. *Anal.Chem.* 42, p. 861-867.
- [34]- *Dang.C ; Fontelle.T.P et Leygonie.R.*, 1990. Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission, *pollution atmosphérique*, Janvier-Mars, pp. 38-46.
- [35]- *Delmas R. ; Gérard M. et Vincent- H. P.*, 2005. Physique et chimie de l'atmosphère. Edition belin. Paris, France.
- [36]- *De Miguel E. ; Llamas J. F. ; Chacon, E.; Berg T., Larssen S. ; Royset O. and Vadset, M.*, 1997. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead. *Atm. Environ.*, 31, 2733-2740.

- [37]- *De Soete ; Gibels R. Hoste J.*, 1972. Neutron Activation Analysis. Ed. Wiley-interscience, London.
- [38]- *Detrie J. P.*, 1969. La pollution atmosphérique. Ed. Dunod, Paris, France.
- [39]- *Dockery. D.W.; Speizer F.E; Stram D.O, Ware J.J.H.; Spengler J.D.and Ferris B.G*, 1989. Effects of inhalable particles on respiratory health of children”, Am. Rev. Respir Dis.
- [40]- *Duchaufour P.*, 1998. Pédologie, Sol, Végétation, Environnement abrégé, Masson, 5^{ème} édition, France.
- [41]- *Dulac, F., 2002.* Aérosols et climat, Lettre n°14 Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PIGB-PMRC). CNRS.
- [42]- *Fermandjan, J.*, 1982. Etude de la modélisation du comportement des aérosols solides dans une enceinte. Rapport CEA R5151, CEA, Paris.
- [43]- *Finlayson-Pitts B. and Pitts J.*, 2000. Chemistry of the upper and lower atmosphere. Academic Press.
- [44]- *Förstner U. et Wittman G.T.W.*, 1983. Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag, Germany, pp.486.
- [45]- *Galloway*, 1982. Trace metals in atmospheric deposition : a review and assessment. Atmospheric Environment, 16, 1677 - 1700.
- [46]- *Galsomies L. Savanne D. ; Letrouit M.A. ; Ayrault S. et Chabre B.*, 1999. Retombées atmosphérique de métaux en France : estimation par dosage dans les mousses - Campagne 1996. ADEME, France.
- [47]- *Gatebe A.* , 1996. Determination of suspended particulate matter of major significance to human health using nuclear techniques in Kenya », Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol 203, N°1, pp 125-134.
- [48]- *Giusti L.; Yang Y.L.; Hewitt C.N.; Hamilton-Taylor J. and Davison W*, 1993. The solubility and partitioning of atmospherically derived trace metals in artificial and natural waters : a review. Atmospheric Environment, 27A, 1567-1578.
- [49]- *Gomes L.* 1990. Approche géochimique du soulèvement des aérosols à l'interface solatmosphère en zone désertique. Thèse de doctorat: Paris VII, France.
- [50]- *Guivac'h et Thieleke ; Leopold A.; Delmas A.N. ; Lameloise et Renaudot A.*, 2002. Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air. Réseau national de surveillance et d'information sur l'air, ADEME, France.
- [51]- *Haguenoer J.M.*, 1982. Toxicologie et hygiène industrielle, 1ère partie Ed. Tec Doc.
- [52]- *Hamdad N.*, 2002. Protection internationale de l'environnement : entre prise de conscience et mise en œuvre. Thèse, Ecole Nationale Polytechnique: pp.56 ; 62.
- [53]- *Harrison S.J and al*, 1993. The estimation of aerial inputs of metals to estuarine waters from point pattern data using an isoplething technique : Severn estuary, U.K. Atmospheric Environment, 27A, 2365 - 2373.
- [54]- *Heintzenberg J.*, 1998. Condensed water aerosols dans Atmospheric particles. Ed. WileyEurope.
- [55]- *Herrebaut L. ; J. Beguin*, 1976. Mesure des pollutions particulaire et gazeuse, Mesure-Analyse- Contrôle, Nuisance et environnement, France, pp.24-26.
- [56]- *Hinds W. C.*, 1982. Aerosol technology, Wiley Interscience, Londres.
- [57]- *Ikawa. K.* 1997. Trace analysis atmospheric, John Wiley et Sons, London.

- [58]- *Janhall S.; Peter M.; Hallquist M.* 2003. Vertical distribution of air pollutants at the Gustavii Cathedral in Goteborg, Sweden. *AE International – Europe*, 37 209–217.
- [59]- *Jenkins*, 1981. *Quantitative X-ray spectrometry*. 586 p. Marcel Dekker New York.
- [60]- *Journal Officiel de la République Algérienne N°1*, 8 Janvier 2006 disponible sur : www.joradp.dz
- [61]- *Journal Officiel de la République Française*, N° 1, page 11, 1^{er} Janvier 1997.
- [62]- *Junge C.* 1979. The importance of mineral dust as an atmospheric constituent, mobilization, transport and deposition dans Saharan Dust. Ed. Morales. John, Wiley and Son, NewYork.
- [63]- *Kacenenbogen T. M.*, 2008. Application de la télédétection spatiale à la surveillance de la pollution en aérosols. Thèse du doctorat, l'université de Lille I, France, p.179.
- [64]- *Keck G ; Vernus E.* ; 1999. Déchets et risques pour la santé. *Techniques de l'ingénieur*.
- [65]- *KerbachiR.*, 2009. Pollution atmosphérique. Cours de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [66]- *Khodja Z.*, 2010. Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux lourds en utilisant la méthode d'Analyse par Activation Neutronique. Mémoire de Magister, ENP, Alger.
- [67]- *Kiss A.*, 2004. *Droit international de l'environnement* .3^{eme} édition. Edition Pedone 256 ; 257.
- [68]- *Lazaradis M.*, 2001. Integrated exposure and dose modelling and analysis system, deposition of inhaled particles in the respiratory tract. *Env. Sc. Tech.* Vol.35 N° 3727-3734.
- [68]- *Le Floch M.*, 2004. Caractérisation physico-chimique et traçage des émissions particulaires métalliques d'une usine d'incinération d'ordures ménagères dans l'air ambiant. Exemple de l'uiom de toulon (var, france). Thèse doctorale, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Paris.
- [69]- *Levin Z. ; Ganor E.*, 1996. The effect of desert particles on cloud and rain formation in the eastern Mediterranean in: *The impact of Desert dust across the Mediterranean*. R. Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 77-86.
- [70]- *Leygonie R.*, 1993. Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures et effets, *Poll. Atm.*, pp. 63-74.
- [71]- *Lin, C. C. Chen, S. J.; Huang, K. L.; Hwang W. I.; Chang-Chien G. P. and Lin W. Y.*, 2005. Characteristic of metals in nano/ultrafine/fine/coarse particles collected beside a heavily trafficked road. *Environ. Sci. Technol.*, 37.
- [72]- *Linton R.W*, 1976. Surface prédominance of trace metals in airborne particles. *Science of the total environment*, 191, 852-854.
- [73]- *Lodge J.P.J.*, 1991. Global climatic effects of aerosols. *Atmospheric Environment*, 25A, 2061-2062.
- [74]- *Maksimovic* , 1992. Selenium deficiency in Yougoslavia. *Biol Trace Elem Res* 33:187-96.
- [75]- *Martin J. et L. Y. Mayster*, 1998. Santé et pollution de l'air. Presse polytechniques Romandes, Suisse.
- [76]- *Masclat P. ; I. Cachier*, 1998. L'aérosol atmosphérique, *Analysis Magazine*, Vol. 26, N°09, pp. 11-17.

- [77]- *Masclat P.*, 2005. Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives. Ed. Ellipse, Paris.
- [78]- *Meisel A.; Leonhardt G.; Szargan R.*, 1989. X-ray spectra and chemical binding, vol.n° 37, pp.464.
- [79]- *Michael G., Johan B.; Annemarie W.; Janhäll S .and Jan I.* 2006. Assessment of inorganic content of PM_{2.5} particles sampled in a rural area north-east of Hanoi, Vietnam. *Science of the Total Environment* 368-675– 685.
- [80]- *Morelli J ; Löye-Pilot M.D.*, 1988. Fluctuations of ionic composition of precipitations collected in Corsica related to changes in the origins of incoming aerosols. 19, 577 – 585.
- [81]- *Mouzai M.*, 2010. Cours d'analyse par activation neutronique, Centre de Recherche Nucléaire de Draria, Algérie.
- [82]- *Norme AFNOR X43-021*,1984. Prélèvement sur filtre des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Appareillage automatique séquentiel, AFNOR, Paris.
- [83]- *Norme ISO 9885*, 1993. Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectées sur des filtres. France.
- [84]- Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, 2001. Mesures de réduction des émissions de PM10, Berne.
- [85]- OMS, 1997. Update and revision of air quality guidellines for Europe, WHO Regional Publications, European, Serien, Copenhagen.
- [86]- *Oucher N.*, 2006. Contribution a l'étude, par classe granulométrique, des aérosols particulaires et des métaux lourds qui leurs sont associées à Alger. Mémoire de Magister, ENP, Alger.
- [87]- *Pakkanen, T. A. Kerminen, V. M.; Korhonen, C. H.; Hillamo, R. E.; Aarnio, P.; Koskentalo T.; Maenhaut, W.* 2001. Use of atmospheric elemental size distributions in estimating aerosol sources in the Helsinki area. *Atm. Environ.*, 35, 5537-5551.
- [88]- *Papachristodoulou C.*, 2002. The XRF Laboratory sur Web site: http://omega.physics.uoi.gr/xrf/English/the_xrf_technique.htm (2010).
- [89]- *Person A.*, 1990. Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques, *Pollution atmosphérique*, Janvier Mars, pp. 21-30.
- [90]- *Pruppacher H.R.; Klett J.D.* ,1997. Microphysics of clouds and precipitation. *Kluwer Pure & Appl. Chem.* 49, p.1609-1620.
- [91]- *Puente-Lelievre C.*, 2009. La qualité de l'air en milieu aéroportuaire : étude sur l'aéroport Paris-Charles-De-Gaulle. Thèse de doctorat, université Paris XII - Val de Marne. France.
- [92]- *Putauda J.P. ; Raes, F. ; Van Dingenen R. ; Brüggemann,E. ; Facchini, M. C. ; Decesari S. ; Fuzzi S. ; Gehrig R., ;Huglin C. ; Laj P. ; Lorbeer G. ; Maenhaut W. ; Mihalopoulos N. ; Müller K. ; Querol X. ; Rodriguez S., Schneider J. ; Spindler G. ; Ten H. ; Tørseth K. ; Wiedensoher, A.*, 2004. A European aerosol phenomenology-2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atm. Env*,Vol N°38, pp 2579-2595.
- [93]- *Raut J.C.*, 2008. Synergie expérimentale impliquant la mesure lidar pour la caractérisation optique et microphysique de l'aérosol : applications à la qualité de l'air et au transfert radiatif. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.

- [94]- **Ramade F.**, 1982. Eléments d'écologie, action de l'homme sur la biosphère, Mc Grawtill, Paris.
- [95]- **Renoux, A.**, 1996. L'aérosol atmosphérique, ses origines ; quelques notions sur les principales propriétés physiques des aérosols, Journées d'études du CITEPA (17/12/96). Université Paris XII.
- [96]- **Renoux A.**, 1990. Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique. Poll. Atmo., pp10-16.
- [97]- **Renoux, A. ; Bouland, D.**, 1998. Les aérosols Physique et Métrologie. Edition Lavoisier, Paris.
- [98]- **Robert L.**, 1992. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles, Ed. Masson, 3^{ème} Edition, Paris, France.
- [99]- **Rocher V.**, 2008. Synthèse et caractérisation de billes d'alginate magnétiques pour l'élimination de polluants organiques dans les effluents par séparation magnétique. Thèse de doctorat de l'université pierre et marie curie – France.
- [100]- **Ruch C.**, 1987. Analyse d'éléments traces par fluorescence X à dispersion d'énergie. Analysis 15, n° 4, p. 159-167.
- [101]- **Salbe A.D.; Levander OA**, 1990. Comparative toxicity and tissue retention of selenium in methionine deficient rats fed sodium selenate or L-selenomethionine. J Nutr 120: 207-12.
- [102]- **Sandrine G. Laurence G ; Cathrine R. ; Sébastien L. ; Rémi L. ; Jean-Louis C. et Bruno C.** , 2005. La pollution atmosphérique par les métaux lourds. Ed.EPE Science, ADEME, France.
- [103]- **Schroder W.**, 1987. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter. Air Poll.Pp.1267.
- [104]- **Slinn W.G.N.**, 1983. Air-Sea Exchange of Gases and particles dans Air-sea exchange of gases and particles. Kluwer Academic Publishers, pp. 299-405.
- [105]- **Smallbone A.;H.**, 1977. Automated on line analysis for controlling industrial processes. Pure & Appl. Chem. 49, p.1609-1620.
- [106]- **Spallholz JE**, 1994. On the nature of selenium toxicity and carcinostatic activity. Free Radic Biol Med 1: 45-64.
- [107]- **Stern A.C.; Boubel r.W.**, 1984: Fundamentals of air pollution, Academic Press, 2^{ème} edition, London.
- [108]- **Sternbeck J.; Sjodin A.; Andreasson K.**, 2002. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. Atmospheric Environment, 36,4735-4744.
- [109]- **Stull R.B.**, 1988. An introduction boundary layer meteology, ed. Springer, ISBN: 978-90- 277- 2769- 5, 680 pages.
- [110]- **Therond P.; Malvy D; Favier A**, 1997. Toxicite du selenium a doses pharmacologiques par voie orale. Nutr Clin Metabol 11:91-101.
- [111]- **Tyson P.**, 2002.Regional change kinkages : Southern africa. In Global- Regional kinkages in the earth system.IGBP Series p 3-73
- [112]- **Van Grieken R.**, 1977. Chelex 100 ion exchange filter membranes for preconcentration in X-ray fluorescence analysis of water. Analytical Chem. 49 n° 9, p. 1326-1331.

[113]- *Veschanbre S.*, 2006. Caractérisation et quantification des éléments traces métalliques dans les dépôts et les particules atmosphériques de la vallée d'Apse (Pyrennes). Mise en place d'indicateurs de la qualité de l'air liés au trafic routier. thèse doctorale, université de Pau et de pays de l'Aour.

[114]- *Vukmirovic Z.*, 1997. Resuspension of trace metals in Belgrade under conditions of drastically reduced emission levels. *Water, air and soil pollution*, 93, 137-156.

[115]- *Whitby K.*, 1976. Physical characterization of aerosols in methods and standards for Environmental measurement. *Proceedings of the 8th Materials Research Symposium*, Gaithersburg, USA, 165-173.

[116]- *Wrobel A.; Rokita E.; Maenhaut W.*, 2000. Transport of traffic-related aerosols in urban areas. *The Science of the Total Environment*, 257, 199-211.

Références Web :

ATSDR. Spéciation des métaux, toxicité des métaux et de leurs différentes formes. Agence américaine des substances toxiques et du registre des maladies, sur le site :

<http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html> .(Consulté en février 2010).

UE. Classification de l'Union Européenne, sur le site : <http://www.kemi.se/nclass/default.asp> (Consulté en juin 2010)

IARC – CIRC International Agency for Research on Cancer, World Health Organization – Centre international de recherche sur le cancer, Organisation Mondiale de la Santé, sur le site : : <http://www.iarc.fr/> . (Consulté en 4 avril 2010).

INERIS Fiches toxicologiques: <http://www.ineris.fr/> (Consulté le 02 Avril 2010).

US EPA. United States Environmental Protection Agency, base de données IRIS, sur le site : <http://www.epa.gov/iris/>. (Consulté en 15 mars 2010).

Glascock M.D., 2004. University of Missouri Research Reactor (MURR). Columbia, Website:http://www.missouri.edu/~glascock/naa_over.htm (Consulté en novembre 2010)

Techniques de l'Ingénieur, Doc : P 2695.

Technique de l'Ingénieur, Doc : G 1010.

Techniques de l'Ingénieur, Doc : P2565.

Annexes



1. Les outils d'identification des sources de métaux

A l'échelle mondiale l'identification des sources d'émissions de métaux reste difficile et très délicates. Néanmoins, il existe quelques outils d'identification des sources d'éléments inorganiques. Ces outils sont (1) les isotopes du plomb qui possèdent des ratios différents suivant les origines, (2) les facteurs d'enrichissement qui permettent la détermination des éléments terrigènes et (3) trois ratios caractéristiques qui sont le Cu/Sb, Fe/Al et K/Na (Azimi 2004).

1.1 Les isotopes du plomb

La caractérisation des principales sources de métaux par la détermination de signatures isotopiques est une méthode relativement ancienne et bien connue à ce jour. Il y a plus de 25 ans, Chow *et al.* (1975) ont mis en évidence la possibilité de distinguer l'origine du Pb provenant des gaz de combustion par une signature isotopique. Le Pb possède quatre isotopes stables qui sont ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb . Les trois derniers sont des fins de chaînes stables de dégradations radioactives respectivement du ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th et ne subissent aucune variation durant le temps de résidence atmosphérique, quel que soit le processus physique ou chimique subi (Doe, 1970). De plus, chaque site de minerai de Pb possède sa propre composition isotopique caractéristique qui dépend de l'âge de la roche mère et des conditions de sa genèse (Doe et Stacey, 1974). Cette technique est souvent utilisée dans un but de détermination des sources anthropiques de Pb dans l'atmosphère (Bollhöfer *et al.*, 2000 ; Bonniwell *et al.*, 1999 ; Lowenthal *et al.*, 1997 ; Monna *et al.*, 2000 ; Monna *et al.*, 1997).

La figure suivante représente la distinction des différentes sources de plomb par l'étude des rapports isotopiques.

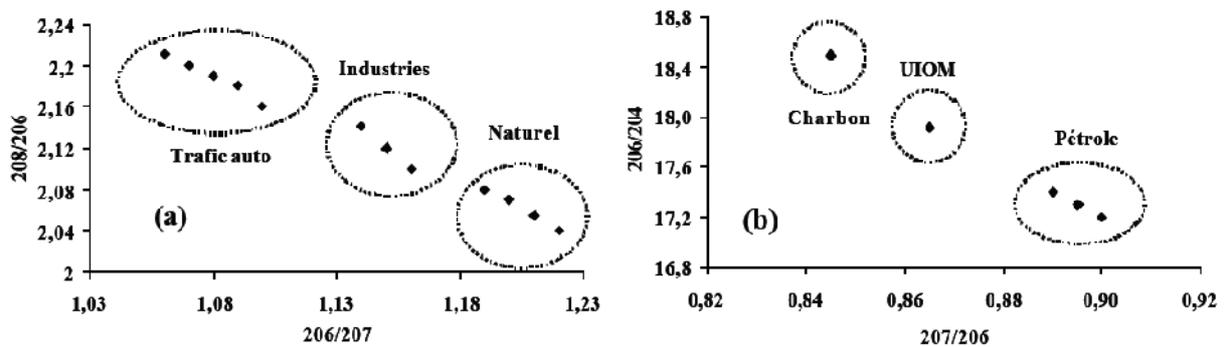


Figure 39 : La distinction des différentes sources de plomb par l'étude des rapports isotopiques.

Grâce à ces deux représentations, à savoir le rapport du ^{208}Pb sur ^{206}Pb (noté 208/206) en fonction du rapport ^{206}Pb sur ^{207}Pb (noté 206/207) et le rapport ^{206}Pb sur ^{204}Pb (noté 206/204)

en fonction du rapport ^{207}Pb sur ^{206}Pb (noté 207/206), il semble possible de distinguer l'ensemble des sources anthropiques et naturelles du plomb. Pour le trafic automobile par exemple, les rapports isotopiques sont de 1,045 pour le Pb 206/207 et 2,225 pour le rapport Pb 208/206.

Néanmoins, la détermination des isotopes du plomb nécessite un protocole analytique lourd qui n'est pas à notre disposition. Il semble donc nécessaire d'étudier d'autres outils utilisés dans la détermination des origines des éléments inorganiques.

1.2. Les facteurs d'enrichissement

Le calcul des facteurs d'enrichissement est communément utilisé comme première approche dans la détermination des sources de métaux. Cette méthode consiste à utiliser un élément de référence d'origine terrigène, principalement l'Al, le Fe ou le Si qui sont reconnus comme émis par les sources terrigènes (*Gao et al., 2002 ; Kim et al., 2000*), afin de déterminer la part terrigène des apports métalliques. Le facteur d'enrichissement d'un élément **X** contenu dans un échantillon, par rapport à un élément de référence est obtenu par :

$$EF_x = \frac{[X]/[ref]_{ech}}{[X]/[ref]_{sol}}$$

FE_x représente le facteur d'enrichissement de l'élément **X**, **[réf]** représente la teneur de l'élément de référence. Ainsi, le rapport d'un élément sur sa référence dans les échantillons, constitués par les particules atmosphériques, divisé par le même rapport obtenu pour un échantillon de la croûte terrestre (obtenue par analyse d'échantillons de sol de la zone considérée) permet de distinguer la fraction terrigène de l'élément considéré. Si le **FE** est proche ou égal à l'unité, l'élément considéré est majoritairement d'origine terrigène.

Par contre, si cette valeur est supérieure à 2, la source prépondérante de l'élément est non terrigène. Cette valeur prend en compte les éventuelles variations de rapports des éléments contenus dans la croûte terrestre (*Gao et al., 2002*). Néanmoins, l'utilisation de cette méthode suppose l'absence de sources anthropiques d'Al, Fe ou Si selon le choix de l'élément de référence.

1.3 Les rapports intermétalliques

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les sources atmosphériques de métaux sont nombreuses et ne se distinguent pas les unes des autres par des émissions d'éléments spécifiques. Cependant, quelques rapports intermétalliques ont été proposés pour caractériser certaines sources.

1.3.1. Le rapport Cu/Sb

Un des seuls rapports intermétalliques dans la littérature concerne la source automobile. Plusieurs auteurs (*Stechmann et Dannecker, 1990 ; Sternbeck et al., 2002 ; Weckwerth, 2001*) ont estimé que le Cu et le Sb pouvaient être utilisés comme traceurs du trafic routier puisqu'une forte corrélation avait été observée entre eux en milieux urbains et semi-urbains. *Stechmann (1990)* a déterminé une valeur de rapport des teneurs massiques de Cu sur Sb de 5,6 dans un tunnel routier en Allemagne. Des travaux plus récents, effectués dans un tunnel routier en Allemagne, ont déterminé un ratio de 4,86 (*Weckwerth, 2001*). De plus, *Sternbeck et al. (2002)*, a calculé un rapport massique Cu/Sb de 4,6 en 2002 au sein d'un tunnel suédois. Il semblerait donc que les variations spatiales et temporelles de ce rapport soient faibles, permettant son utilisation comme outil d'identification des sources automobiles. De plus, en étudiant ce même rapport massique dans les apports terrigènes, il apparaît une différence pouvant atteindre un facteur 10. En effet, *Wedepohl (1995)* a évalué ce rapport à 83 alors que *Weckwerth (2001)* a obtenu une valeur de 125. Afin de compléter cette étude, nous avons calculé le rapport massique Cu/Sb pour quelques travaux effectués en milieux urbains près d'axes routiers. La Figure 40 présente le rapport Cu/Sb calculé sur différents sites urbains, tous proches d'axes routiers ou à l'intérieur de tunnels, à différentes périodes depuis 1990.

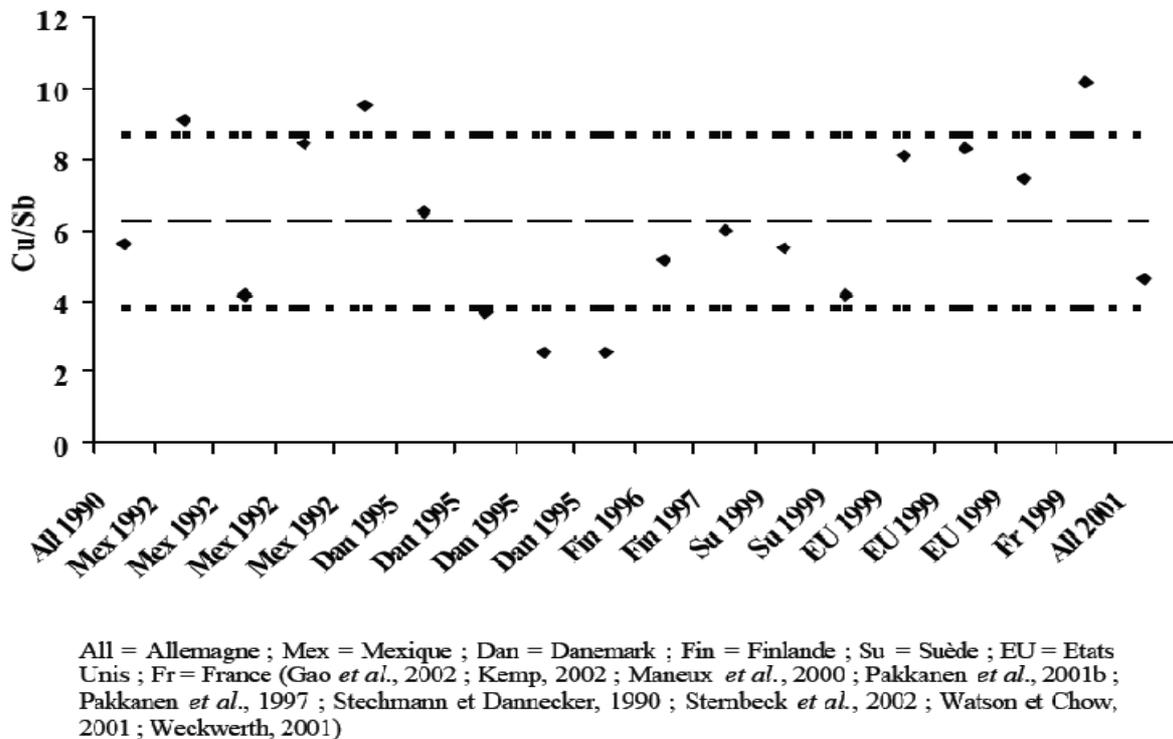


Figure 40 : Présentation du rapport Cu/Sb pour différents sites (Azimi, 2004).

1.3.2. Le rapport Fe/Al

Ce rapport massique sert à identifier les apports naturels provenant de la remise en suspension des particules terrigènes. Le tableau-13 regroupe les différents résultats obtenus au cours des quarante dernières années sur le rapport Fe/Al de particules naturelles du sol. Cette synthèse montre que quel que soit le type de sol considéré et quel que soit le lieu, la valeur du rapport Fe/Al reste comprise entre 0,40 et 0,62. La valeur moyenne calculée pour l'ensemble de ces travaux est de 0,52 montrant une homogénéité des proportions de ces deux éléments au sein de la croûte terrestre.

Tableau 13: Rapports massiques Fe/Al obtenus pour différents échantillons de sol.

	Turekian et wedepohl (1961)	Martin et Withfield (1983)	Gieu (1991)	Wedepohl (1995)	Taylor et Mclenan (1995)	Guieu and Thomas (1996)
Type de sol	Argiles	Sédiment	Sable	Manteau supérieur	Manteau supérieur	Sable
Site	EU	-	France	Allemagne	-	Sahara
Fe/Al	0,59	0,52	0,69	0,40	0,44	0,62

De plus, en comparant ces proportions à celles des échantillons issus de sources anthropiques, des différences significatives apparaissent. En effet, les rapports déterminés en zones urbaines, proches des sources anthropiques, sont généralement plus élevés.

Par exemple, des valeurs de rapport Fe/Al de 3,1 ; 2,8 et 4,1 ont été déterminées en zones urbaines respectivement au Danemark, en Pologne et au Etats-Unis (*Gao et al., 2002 ; Pakkanen et al., 1997 ; Wrobel et al., 2000*).

1.3.3 Le rapport K/Na

Ce rapport massique permet de distinguer les apports d'origine marine des apports terrigènes ou anthropiques.

Tableau 14: Valeurs du rapport K/Na pour différentes sources d'aérosol.

	Sol	Sels Marins	Incinération	Combustion charbon	Trafic auto	Industrie
Etats-Unis		0,036 ^d	1,2 ^b	0,11-0,56 ^c	1,1 ^d	3,8-4,4 ^e
Japon			1,7 ^f		4,4 ^f	
Grèce					1,5 ^e	
Allemagne	0,907 ^e					

^aThurman (1994); ^bMamane (1988); ^cOndov et al. (1989); ^dHuang et al. (1994); ^eScheff and Valiozis (1990); ^fMizohata et mamuro (1980); ^gWedepohl (1995).

Du fait des variations observées, il est prudent de n'utiliser ce rapport qu'à des fins de distinction des aérosols marins. En effet, pour cette dernière source, le rapport K/Na est inférieur aux valeurs observées pour les autres sources, d'un facteur 30 à 100, permettant d'obtenir une distinction nette (*Azim, 2004*).

Tableau 15 : Statistique descriptive des teneurs en éléments métalliques étudiés.

	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>Cr</i>	<i>1.34</i>	<i>1.41</i>
<i>Pb</i>	<i>49</i>	<i>35</i>
<i>As</i>	<i>0.13</i>	<i>0.24</i>
<i>Ni</i>	<i>24</i>	<i>18</i>
<i>Fe</i>	<i>372</i>	<i>253</i>
<i>V</i>	<i>2.89</i>	<i>2.2</i>
<i>Zn</i>	<i>12</i>	<i>8</i>
<i>Mn</i>	<i>92</i>	<i>62</i>
<i>Se</i>	<i>0.18</i>	<i>0.22</i>
<i>Co</i>	<i>0.22</i>	<i>0.19</i>
<i>Sb</i>	<i>0.74</i>	<i>0.46</i>
<i>Ba</i>	<i>8.5</i>	<i>7.15</i>
<i>Ca</i>	<i>355</i>	<i>192</i>
<i>Cu</i>	<i>6.98</i>	<i>10</i>
<i>Br</i>	<i>0.3</i>	<i>0.37</i>
<i>Sc</i>	<i>0.19</i>	<i>0.15</i>
<i>Hf</i>	<i>0.02</i>	<i>0.02</i>
<i>Ce</i>	<i>1.22</i>	<i>1.13</i>

(SPSS-10)

Tableau 16 : Comparaison des limites de détection en [ng/m³] d'éléments traces associés aux particules en suspension de certaines méthodes d'analyse.

Eléments	SAA Flamme	SAA Four	XRF	INAA
As	20	0.5	0.75	4
Cd	0.2	0.02	13	/
Co	0.8	0.15	2	0.025
Cr	2	0.3	3	0.25
Cu	1	0.25	2	5
Fe	10	1	3	0.02
Mn	1	0.1	2	0.6
Ni	4	1.5	1	20
Pb	2	0.2	5	/
Se	/	/	0.75	0.1
V	10	2.5	2.5	2
Zn	0.2	0.004	1	1
Br.	/	/	/	4
Hf	/	/	/	0.1
Sc	/	/	/	0.004

(Kerbachi, 2009).

Tableau 17 : Données météorologiques moyennes journalières du mois du Mai enregistrées sur Alger.

Année	mois	jj	Pp	Tmoy	Tmin	Tmax	D	Vv
2010	5	1	2	22,5	15,5	29,6	350	9
2010	5	2	0	19	14,5	23,5	60	8
2010	5	3	0,8	18	13,3	22,7	320	14
2010	5	4	6,4	14	10,5	17,5	270	13
2010	5	5	0	14	9	19	290	14
2010	5	6	0	14,9	6,2	23,5	360	9
2010	5	7	2,7	16,5	10,4	22,6	330	6
2010	5	8	0	16,2	8	24,4	330	8
2010	5	9	0	20	11,8	28,3	340	8
2010	5	10	0,2	18,7	12,5	24,9	300	8
2010	5	11	0,2	19,5	12,4	26,5	290	10
2010	5	12	0	19,3	14	24,5	260	10
2010	5	13	0,3	14,8	10,4	19,1	240	8
2010	5	14	9,5	15,1	12,5	17,7	260	15
2010	5	15	1,9	15	8	22	240	13
2010	5	16	0	15,6	7,5	23,6	300	10
2010	5	17	0	15	8	22	70	9
2010	5	18	0	14,9	6	23,9	30	10
2010	5	19	0	15,3	6,7	23,8	60	11
2010	5	20	0	15,9	8,5	23,3	60	13
2010	5	21	0	17	9,5	24,5	60	12
2010	5	22	0	15,9	8,4	23,5	50	9
2010	5	23	0	18	13,1	23	20	7
2010	5	24	0	17,5	9,6	25,5	60	10
2010	5	25	0	21,8	11	32,5	40	8
2010	5	26	Traces	21,4	15,7	27	10	6
2010	5	27	1,4	21,4	15,5	27,2	160	7
2010	5	28	Traces	19,5	14	25	340	8
2010	5	29	0,3	19,5	15,8	23,2	320	9
2010	5	30	0	19,6	11,8	27,5	340	8
2010	5	31	0	22,3	12,5	32	250	9

Source :(ONM, 2010)

Tableau 18 : Données météorologiques moyennes journalières du mois du Juin enregistrées sur Alger.

Année	mois	jj	Pp	Tmoy	Tmin	Tmax	D	Vv
2010	6	1	0	23,5	14,4	32,5	350	8
2010	6	2	0	24	16	31,9	90	7
2010	6	3	0	22,3	15,6	29	40	5
2010	6	4	0	22,6	16,9	28,4	10	7
2010	6	5	0	21	12,7	29,2	30	7
2010	6	6	0	21,6	11,7	31,5	360	6
2010	6	7	0	23	18,1	27,9	360	7
2010	6	8	0	21,8	15,4	28,2	330	6
2010	6	9	0	22,8	16	29,6	330	8
2010	6	10	0	21,8	15,5	28	320	9
2010	6	11	0	22,1	15,6	28,6	280	13
2010	6	12	0,1	19,5	12,4	26,7	360	9
2010	6	13	Traces	21,1	15,3	26,9	20	8
2010	6	14	1,4	22,1	20,5	23,7	40	7
2010	6	15	3	21,5	18,5	24,6	310	7
2010	6	16	0	19	13,5	24,6	20	6
2010	6	17	0,1	21,1	15,4	26,9	300	12
2010	6	18	0	21,9	17,8	26	350	7
2010	6	19	0	21,5	15	28	280	13
2010	6	20	0	21,5	15,5	27,5	310	13
2010	6	21	0	19,1	11,6	26,6	60	6
2010	6	22	0	18,6	10	27,3	30	9
2010	6	23	0	19,2	9,9	28,5	80	11
2010	6	24	0	19,8	10,2	29,4	60	12
2010	6	25	0	22,5	15,6	29,3	60	14
2010	6	26	0	22,5	17,6	27,5	60	8
2010	6	27	Traces	23	18,5	27,4	50	8
2010	6	28	0	23,4	19,4	27,4	330	8
2010	6	29	0	23,8	17,7	29,8	40	8
2010	6	30	0	22,8	15,5	30,1	80	9

Source :(ONM, 2010)

Annexes

Tableau 19 : Données météorologiques moyennes journalières du mois du Juillet enregistrées sur Alger.

Année	mois	jj	Pp	Tmoy	Tmin	Tmax	D	Vv
2010	7	1	0	23,1	14,6	31,7	40	10
2010	7	2	0	23,1	15,8	30,4	40	7
2010	7	3	0	24,7	19,6	29,8	60	8
2010	7	4	0	25,8	20	31,6	100	10
2010	7	5	0	26,9	22,8	30,9	60	16
2010	7	6	0	24,4	17	31,7	50	17
2010	7	7	0	25,6	18,7	32,5	60	11
2010	7	8	0	25,3	16	34,5	60	13
2010	7	9	0	25,5	16,5	34,6	40	7
2010	7	10	0	24,3	19	29,6	30	7
2010	7	11	0	25,4	22,1	28,7	340	7
2010	7	12	0	24,5	19,5	29,4	340	8
2010	7	13	0	25,8	18,3	33,2	340	7
2010	7	14	0	25,5	17,5	33,6	360	8
2010	7	15	0	26,5	18,5	34,4	340	7
2010	7	16	0	25	19	30,9	360	8
2010	7	17	0	28	24,5	31,5	40	8
2010	7	18	0	27,9	24,5	31,2	90	10
2010	7	19	0	26,6	21,6	31,7	40	10
2010	7	20	0	26,4	19,4	33,4	360	7
2010	7	21	0	27	23	31	360	7
2010	7	22	0,1	28,3	23	33,5	240	8
2010	7	23	0	28,5	24,5	32,5	10	11
2010	7	24	0	27,6	25	30,3	70	15
2010	7	25	0	24,8	18,9	30,6	90	11
2010	7	26	0	23,6	16,9	30,3	60	14
2010	7	27	0	24	17,2	30,7	70	15
2010	7	28	0	24,5	17	32	80	12
2010	7	29	0	25,5	18,3	32,6	90	9
2010	7	30	0	24,7	18,2	31,2	50	9
2010	7	31	0	24,5	17,6	31,5	70	9

Source :(ONM, 2010)

Tableau 20 : Données météorologiques moyennes journalières du mois d'Août enregistrées sur Alger.

Année	mois	jj	Pp	Tmoy	Tmin	Tmax	D	Vv
2010	8	1	0	24,1	16	32,2	40	8
2010	8	2	0	26,5	18,7	34,3	350	6
2010	8	3	0	27	23,4	30,5	60	12
2010	8	4	0	25	19	30,9	50	10
2010	8	5	0	25	17	33,1	200	6
2010	8	6	0	24	17,5	30,6	40	15
2010	8	7	0	23,6	17,5	29,8	60	12
2010	8	8	0	23,2	15	31,4	60	11
2010	8	9	0	24,9	16	33,7	20	7
2010	8	10	0	25	19,8	30,1	360	5
2010	8	11	0	26,5	20	33	360	6
2010	8	12	0	28,1	20	36,2	20	8
2010	8	13	0,8	27,1	23,1	31,2	80	8
2010	8	14	3,6	25,7	23	28,4	50	10
2010	8	15	0	24	17,5	30,5	60	11
2010	8	16	0	26,1	22,1	30,1	40	10
2010	8	17	9,7	25	20,6	29,4	40	10
2010	8	18	8,2	25,3	22	28,5	100	9
2010	8	19	0	26	21,5	30,4	60	7
2010	8	20	0,5	27	23,1	30,8	360	9
2010	8	21	0	27,1	23,4	30,8	360	8
2010	8	22	0	25,5	19,9	31	320	9
2010	8	23	0	25,2	17,4	33	30	7
2010	8	24	0	28,4	21,2	35,5	30	7
2010	8	25	0	26,3	18,1	34,4	40	9
2010	8	26	0	25,1	17,6	32,7	60	7
2010	8	27	0	27,3	16,5	38	360	9
2010	8	28	0	26,6	20	33,3	20	8
2010	8	29	0	25,5	20,8	30,1	20	12
2010	8	30	0	24	18	30	60	11
2010	8	31	0	22,8	16,5	29,1	60	16

Source :(ONM, 2010)

Tableau 21 : Données météorologiques moyennes journalières du mois du Septembre enregistrées sur Alger.

Année	mois	jj	Pp	Tmoy	Tmin	Tmax	D	Vv
2010	9	1	0	23	16,6	29,4	50	8
2010	9	2	0	25,8	22,3	29,2	360	7
2010	9	3	Traces	24,7	21,1	28,3	360	8
2010	9	4	0	23	17	29	50	8
2010	9	5	0	22,8	15	30,5	90	8
2010	9	6	0	24	17,4	30,6	40	7
2010	9	7	0	25,7	20	31,4	270	7
2010	9	8	0	26,1	21,8	30,5	20	9
2010	9	9	0	23,9	19	28,8	360	8
2010	9	10	0	22,8	16,6	29	40	11
2010	9	11	0	22,6	16,2	29	50	13
2010	9	12	0	23,7	18	29,4	40	9
2010	9	13	0	21,9	14,3	29,4	60	10
2010	9	14	0	21,9	15	28,8	60	11
2010	9	15	0	21,1	14	28,2	20	7
2010	9	16	0	23,1	14,7	31,6	10	5
2010	9	17	0	24,6	16,4	32,9	270	19
2010	9	18	0	27,4	23,5	31,2	340	10
2010	9	19	0	24,9	19,8	30	50	9
2010	9	20	0,2	24,9	20,5	29,2	20	6
2010	9	21	0	24,5	20,6	28,5	60	6
2010	9	22	0	23,5	18	29	360	8
2010	9	23	0	23,8	15,2	32,4	60	7
2010	9	24	1	26	23	28,9	20	18
2010	9	25	2,1	20,8	16	25,5	290	10
2010	9	26	8,1	20,9	14	27,7	320	14
2010	9	27	0	22,5	16,5	28,6	320	6
2010	9	28	1	22,5	18	27	300	9
2010	9	29	0	20,8	14	27,5	340	5
2010	9	30	0	21,2	11,6	30,8	40	6

Source : (ONM, 2010)

Pp : Quantité de pluie [mm].

T : Température [°C].

D : Direction du vent dominant [°].

Vv : Vitesse du vent dominant [m/s].

Tableau 22: Tableau périodique des éléments.

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

<http://www.ktf-spl.it/periodic/>

PÉRIODE	GROUPE 1 IA												GROUPE 18 VIIIA					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.0079 H HYDROGÈNE																	2 4.0026 He HÉLIUM
2	3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BÉRYLLIUM											5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE	8 15.999 O OXYGÈNE	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NÉON
3	11 22.990 Na SODIUM	12 24.305 Mg MAGNÉSIMUM										13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE	16 32.065 S SOUFRE	17 35.453 Cl CHLORE	18 39.948 Ar ARGON	
4	19 39.098 K POTASSIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.867 Ti TITANE	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROME	25 54.938 Mn MANGANÈSE	26 55.845 Fe FER	27 58.933 Co COBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.39 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.80 Kr KRYPTON
5	37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTRIUM	40 91.224 Zr ZIRCONIUM	41 92.906 Nb NIOBIUM	42 95.94 Mo MOLYBDÈNE	43 (98) Tc TECHNÉTIUM	44 101.07 Ru RUTHÉNIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ÉTAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE	52 127.60 Te TELLURE	53 126.90 I IODE	54 131.29 Xe XÉNON
6	55 132.91 Cs CÉSIIUM	56 137.33 Ba BARYUM	57-71 La-Lu Lanthanides	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.95 Ta TANTALE	74 183.84 W TUNGSTÈNE	75 186.21 Re RHÉNIUM	76 190.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATINE	79 196.97 Au OR	80 200.59 Hg MERCURE	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTATE	86 (222) Rn RADON
7	87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Ac-Lr Actinides	104 (261) Rf RUFORFOLIUM	105 (262) Db DUBNIUM	106 (263) Sg SEABORGIUM	107 (264) Bh BOHRIIUM	108 (277) Hs HASIUM	109 (268) Mt MEITNERIUM	110 (281) Uun UNUNIUM	111 (272) Uuu UNUNIUM	112 (285) Uub UNUBIUM	114 (289) Uuq UNUNQUADIUM					

Lanthanides

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASEYMIUM	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLIUMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTÉRIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Actinides

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERNÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es ENSTÉNIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (268) Md MENDELÉVIUM	102 (269) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

(1) Pure Appl. Chem., 73, No 4, 667-683 (2001)
La masse atomique relative est donnée avec 6 chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.
Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

Editor: Michel Driess

ملخص

مضمون هذا العمل هو دراسة التلوث الجوي غرب الجزائر العاصمة بدرارية عن طريق الجزيئات الدقيقة. جمع العينات تم تقريبا في 5 اشهر وهذا باستعمال جهاز LVS النتائج تبين لنا أن التلوث عن طريق الجزيئات الصغيرة في درارية ضعيف نسبيا حيث يقدر معدل هذه الجزيئات ب 40 مكرغ/م³ و 76% من عيناتنا لا يتجاوز 50 مكرغ/م³ خلال هذا العمل تطرقنا بشكل خاص للمعادن المنتقلة مع هذه الجزيئات المتمثلة في Cu و Cr, Pb, As, Ni, Fe, V, Zn, Mn, Se, Co, Sb, Ba, Br, Sc, Hf, Ce, Ca وهذا باستعمال طرق نووية (NAA); (XRF) الدراسة حول نوعية الهواء في منطقة شبه معمارية (درارية) برهنت عن وجود المعادن لكن بتركيزات ضعيفة على مستوى [نغ/م³] مقارنة مع اعمال اخرى في هذا السياق لكنها تبقى خطيرة نظرا لتميزها بخاصية التجمع في جسم الانسان مثل الزئبق الكروم النيكل و الارسنيك.

المفاتيح:

نوعية الهواء, الجزيئات الدقيقة, المعادن, طرق نووية, منطقة شبه معمارية, درارية, الجزائر العاصمة

Abstract

This study presents the levels of air pollution by the fine particles in an urban semi site at Draria, west of Algiers with middle exposed population density. The taking away of the particles is carried out by a sampler with low flow. In this site, the content average of TSP rises with 40 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. (inferior to 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) We have used a nuclear method: (NAA) and (XRF) for the detection of metals in our samples of filters. The results show the existence of Cr, Pb, As, Ni, Fe, V, Zn, Mn, Se, Co, Sb, Ba, Br, Sc, Hf, Ce, Ca et Cu. The whole of metals associated to the fine particles present relatively low values compared to limits values preconized internationally. Also, they are lower to values of some studies done before at Algiers in urban site or in other cities of world. In spite of low values, these metals like lead, nickel, chrome, arsenic, manganese and cobalt are very dangerous because they are able to accumulate in human body.

Key words:

Quality of the air, TSP, metals, nuclear method, semi urban site, Draria and Algiers.

Résumé

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les TSP et la fraction minérale qui est véhiculée par ces dernières en un site périurbain à Draria, Ouest d'Alger à moyenne densité de population, pendant une période d'environ cinq mois. Le prélèvement des particules est effectué par un échantillonneur à faible débit, la collecte d'aérosols est réalisée par filtres ouverts et sans coupure granulométrique précise. L'étude montre qu'en ce site semi-urbain, la pollution de l'air par les TSP atteint des niveaux relativement faibles. Nous remarquons que 76% des teneurs obtenues ne dépassent pas l'objectif de qualité fixé par la réglementation algérienne et celle de l'OMS (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), en conséquence, la pollution par les TSP est tolérable, avec une moyenne de [40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]. L'analyse des métaux associés aux TSP par les méthodes nucléaires NAA et XRF montre la présence du Cr, Pb, As, Ni, Fe, V, Zn, Mn, Se, Co, Sb, Ba, Br, Sc, Hf, Ce, Ca et Cu qui accusent des valeurs relativement faibles comparées aux valeurs limites qui réglementent cette forme de pollution et aux valeurs publiées dans ce même axe de recherche mais l'inhalation de certains métaux comme le plomb, le chrome, le nickel, l'arsenic, le vanadium, le manganèse, le cobalt et l'antimoine même en de faibles quantités peut sur une longue durée conduire à des niveaux de concentration toxiques par effet d'accumulation dans l'organisme.

Mots clés :

Qualité de l'air, TSP, métaux, techniques nucléaires, site périurbain, Draria et Alger.