

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:
BOUHILA Zohra épouse KHODJA

En vue de l'obtention du Diplôme de Magister

Thème

**Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux
lourds en utilisant la méthode d'Analyse par Activation
Neutronique**

Soutenu publiquement le : 23 / 05 / 2010 à 11 h30 à la Bibliothèque centrale de l'ENP

Devant le jury composé de:

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

Dirigé par : **M^{me} MOUHOUCHE F. Maitre de Conférence (ENSA El Harrach)**

Examineurs : **Mr.BELLAL M.M. Professeur (ENSA El Harrach)**

: **Mr.HANINI S. Professeur (U. Médéa)**

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

Invité d'honneur: **Mr. BELAMRI M. Chargé de Recherche (CRNA/COMENA)**

Année universitaire 2009/2010

Sommaire

<i>Liste des tableaux</i>	I
<i>Liste des figures</i>	II
<i>Liste des symboles</i>	
<i>Liste des abréviations</i>	IV
<i>Introduction générale</i>	1
Partie I : Etude bibliographique	
Chapitre I: Pollution et polluants atmosphériques	4
1. Généralités sur la pollution atmosphérique	4
2. Les différents polluants atmosphériques	4
2.1. Les aérosols	4
2.2. Les particules en suspension dans l'air	4
2.2.1. Taille et origines des particules	6
2.2.2. Classification des particules en suspension.....	6
3. Les niveaux de pollution	6
3.1. La pollution à l'échelle locale	6
3.2. La pollution à l'échelle régionale	6
3.3. La pollution à l'échelle planétaire	6
4. Les facteurs régissant l'évolution des polluants	7
4.1. Les facteurs météorologiques	7
4.1.1. L'influence du vent	7
4.1.2. L'influence de la chaleur et de la température	7
4.1.3. La présence de pluies.....	7
4.1.4. L'inversion thermique.....	8
4.1.5. L'effet de brises	8
4.2. Les facteurs topographiques	8
4.3. Chimie de l'atmosphère	9
5. La pollution atmosphérique par les particules en suspension	12
5.1. Les caractéristiques des particules	12
5.2. Les différentes classes de particules.....	12

6. Pollution atmosphérique par les métaux lourds.....	12
6.1. Introduction.....	12
6.2. Généralités sur les métaux lourds.....	14
6.3. Omniprésence de quelques métaux lourds.....	15
6.3.1. Pourquoi l'homme utilise-t-il des métaux lourds ?.....	15
6.3.2. Les principaux métaux lourds utilisés par l'homme, sources, applications et toxicité.....	15
6.3.2.1. L'arsenic (As).....	15
6.3.2.2. Le cadmium (Cd).....	16
6.3.2.3. Le chrome (Cr).....	17
6.3.2.4. Le mercure (Hg).....	17
6.3.2.5. Le plomb (Pb).....	18
6.3.2.6. Le nickel (Ni).....	19
6.3.2.7. Aluminium (Al).....	19
6.3.2.8. Vanadium(V).....	20
6.3.2.9. Cuivre (Cu)	20
6.3.2.10. Zinc (Zn)	21
6.3.2.11. Le Sélénium (Se).....	21
6.4. Origines naturelles et humaines des métaux lourds dans l'environnement.....	21
6.5. Distribution des métaux lourds et impact sur l'environnement.....	21
6.5.1. Contamination des sols.....	21
6.5.2. Contamination de l'air.....	21
6.5.3. Contamination de l'eau.....	22
6.6. Impact sur l'homme.....	22
6.6.1. Exposition de l'homme aux métaux lourds.....	22
6.6.1.1. Absorption par voie respiratoire.....	23
6.6.1.2. Absorption par voie orale.....	24
6.6.2. La toxicité chez l'homme.....	25
 7. Normes et réglementation.....	 25
7.1. Législation internationale	26
7.2. Législation nationale	27
7.3. Normes de quelques gaz présents dans l'air	27

7.4. Normes des particules en suspension dans l'air	28
7.5. Normes de quelques métaux lourds présents dans l'air	29

Chapitre II : Echantillonnage et méthodes d'analyse de polluants

Atmosphériques	30
1. Echantillonnage	30
1.1. Introduction.....	30
1.2. Choix du site d'étude.....	30
1.3. Débit de prélèvement.....	30
1.3.1. Echantillonnage à faible volume (<i>LVS : Low Volume Sampler</i>)	30
1.3.2. Echantillonnage à grand volume (<i>HVS : High Volume Sampler</i>)	39
1.4. Types de prélèvements	31
1.4.1. Prélèvement sans coupure granulométrique	31
1.4.2. Prélèvement avec coupure granulométrique.....	32
1.4.3. Prélèvement avec fractionnement granulométrique	32
1.5 Les filtres et les membranes de rétention.....	32
1.5.1. Les filtres en fibre de verre	32
1.5.2. Les filtres membranaires	32
2. Méthodes d'analyse de polluants atmosphériques	33
2.1. Présentation générale des méthodes d'analyse	33
2.2. Méthodes d'analyse des métaux lourds	33
2.2.1. La spectrométrie d'absorption atomique (SAA).....	33
2.2.2. L'analyse par rayons X (PIXE).....	34
2.2.3. La spectrométrie par fluorescence X (XRF : <i>X-Ray Fluorescence</i>)	35
2.2.4. Analyse par activation neutronique.....	36
2.2.4.1. Principe de la méthode d'Analyse par Activation Neutronique (AAN)	36
2.2.4.2. Irradiation de l'échantillon.....	37
2.2.4.3. Equation fondamentale de l'AAN et méthode de calcul....	39

2.2.4.4. Détermination de la concentration des éléments dans un échantillon inconnu.....	41
2.2.4.5. Choix du temps d'irradiation	45
2.2.4.6. Choix du temps de refroidissement	45
2.2.4.7. Avantages et inconvénients de la NAA.....	46
2.2.4.8. Sources d'erreurs liées à l'utilisation de la NAA.....	48
2.2.4.9. Les réactions d'interférences.....	48

Partie II : Matériels et méthodes

1. Objectif	51
2. Description du site de prélèvement	51
3. Matériel et méthodes	53
3.1. Matériels	53
3.1.1. Echantillonneur.....	53
3.1. 2. Réacteur nucléaire	54
3.1. 3. Chaîne de comptage	55
3.1.3.1. Haute tension (H.T.).....	55
3.1.3.2. Détecteur.....	55
3.1.3.3. Préamplificateur.....	56
3.1.3.4. Amplificateur.....	56
3.1.3.5. ADC ou Analogique Digital Convertisseur.....	56
3.1.3.6. MCA ou Multi Canal Analyseur.....	56
3.2. Méthodes	56
3.2.1. Mode de prélèvement	56
3.2. 2. Le dosage des métaux lourds	57
3.2.2.1. Préparation des standards chimiques.....	57
3.2.2.2. Conditionnement des échantillons et standards pour analyse...	57
3.2.2.3. L'irradiation.....	58
3.2.2.4. Le refroidissement des échantillons.....	58
3.2.2.5. Procédures analytiques du dosage des métaux lourds	59
❖ Calibration de la chaîne de mesure.....	59
❖ Analyse des échantillons et des standards.....	60
• Analyse qualitative des résultats	61

- Analyse quantitative des résultats 61
- Détermination de la concentration finale en éléments de trace dans l'air prélevé 62
- Calcul d'erreur pour les résultats d'analyse 62

Partie III : Résultats et discussions

1. Etude des Concentrations de TSP	63
2. Etude des concentrations des métaux lourds détectés dans les échantillons l'air	68
2.1. Le Chrome.....	73
2.2. Le Cobalt.....	74
2.3. Le Sélénium.....	75
2.4. Le Mercure.....	76
2.5. Le Scandium.....	77
2.6. Le Hafnium.....	78
2.7. Le Tantale	78
2.8. L'Antimoine.....	79
2.9. Le Rubidium	80
2.10. Le Fer.....	80
2.11. Le Terbium.....	81
2.12. Le Lanthane	82
2.13. Le Samarium.....	82
2.14. L'Argent	83
2.15. Le Césium.....	83
2.16. Le Brome.....	84
2.17. L'Ytterbium.....	85
2.18. Le Lutétium.....	85
3. Comparaison des résultats avec des données publiées et discussion..	86
Conclusion générale	90
Références bibliographiques	94
Annexes	99
Résumé	105
Valorisation	106



*A la mémoire de ma très chère mère
partie sans voir ni cueillir
le fruit de ses efforts*

Remerciements

Je remercie, d'abord et avant tout, Dieu le tout puissant de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail et qui m'a donné de la connaissance, de la volonté, du courage et surtout de la patience durant ce petit parcours de la vie.

Ce travail a été réalisé en étroite collaboration avec la Division des Technique Nucléaires du CRNA avec l'aide et le soutien du personnel de cette division en particulier Mr Belamri M. Directeur de la DTN, lila, chafika, naima, Toumert, Samia et Azzebouche. A ce propos je leur dis merci à tous de tout mon cœur.

J'exprime mes remerciements et ma reconnaissance à ma directrice de thèse Mme Mouhouche F. (Maitre de conférences à l'ENSA) pour ses orientations et nombreux conseils, pour son incomparable dévouement, disponibilité et sérieux. A ce propos je lui dis merci de tout mon cœur.

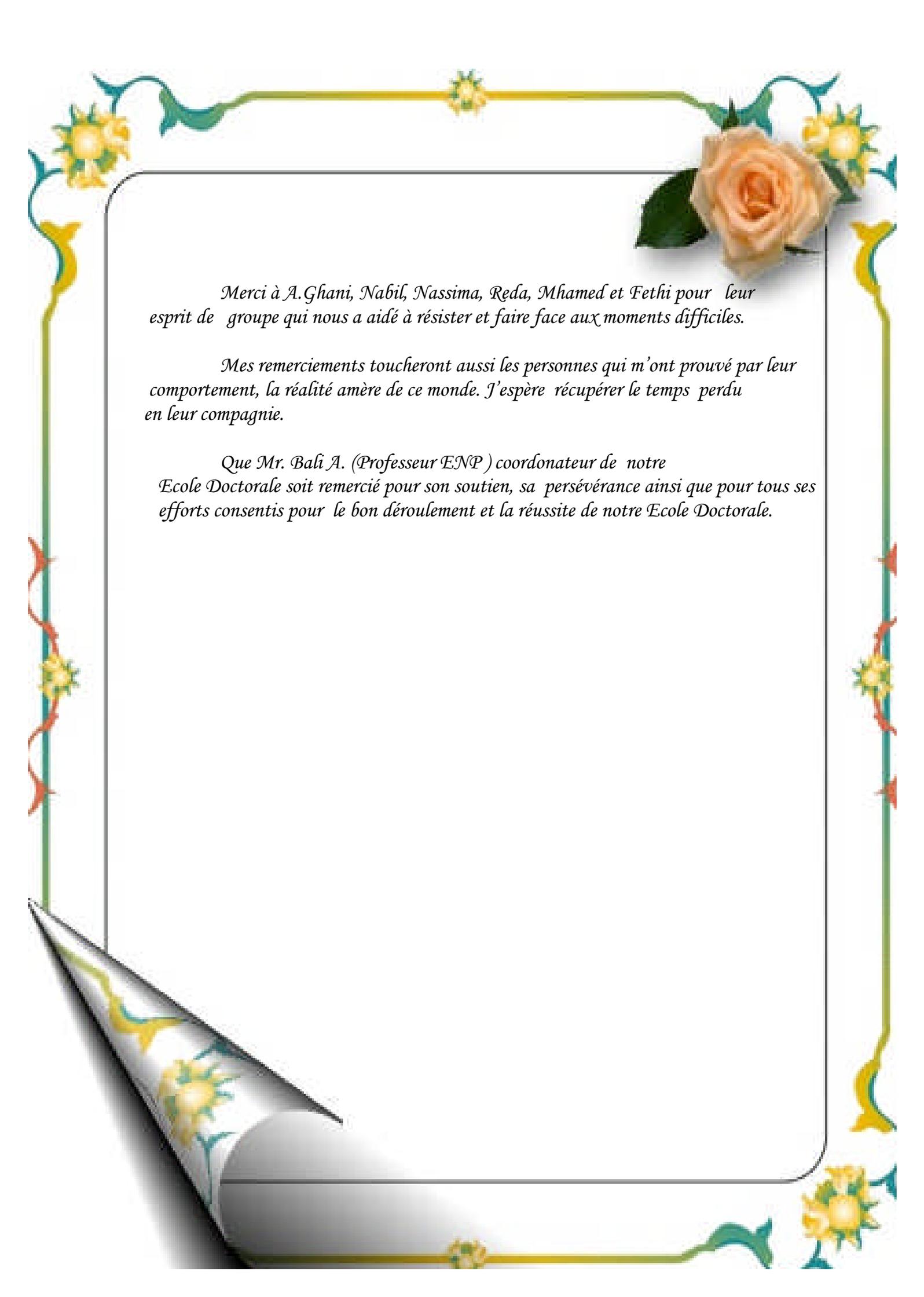
Un merci spécial à Mr Mameri N. (Professeur ENP) pour avoir accepté de présider ce jury et pour tous ses efforts consentis pour le bon déroulement et la réussite de notre Ecole Doctorale.

Un grand merci à Mr Belamri M. (Chargé de recherche au CRNA et Directeur de Division des Applications Nucléaires) pour avoir accepté de m'accueillir au sein de sa Division, pour ses conseils judicieux, pour son intérêt dans la réussite du projet et son support compétent pour la résolution des problèmes rencontrés.

Que Mr Bellal M. (Professeur ENSA) veuille bien trouver l'expression de toute ma gratitude d'avoir accepté de faire parti de ce jury et qui dans la sérénité de ses explications pendant ses cours, a pu me transmettre des notions importantes d'un travail expérimental.

Mes remerciements vont aussi à Mr Lounici H. (Professeur) pour tous ces conseils et dévouement pour notre Ecole Doctorale, et Mr Hanini S. (Professeur Université de Médéa) d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci à toute ma famille: ma seule et grande fortune dans ce monde spécialement à Hamid, Houda et Sarah pour leur patience, Mon père, mes sœurs et frères pour leurs encouragements, et à tous mes amis et collègues en l'occurrence :Mr Allek, MrNejar, Mr Mouzai, Mr Mokadem, Mr Ghazel, Rachida, Dallel, 2xLatifa, Naima, Sabiha, Khalida, Zina, Abbas, Moha, Habani, Boualem, Tarrek, Benhidour et Personnel du réacteur NUR pour leur aidé et soutien moral.



Merci à A.Ghani, Nabil, Nassima, Reda, Mhamed et Fethi pour leur esprit de groupe qui nous a aidé à résister et faire face aux moments difficiles.

Mes remerciements toucheront aussi les personnes qui m'ont prouvé par leur comportement, la réalité amère de ce monde. J'espère récupérer le temps perdu en leur compagnie.

Que Mr. Bali A. (Professeur ENP) coordonateur de notre Ecole Doctorale soit remercié pour son soutien, sa persévérance ainsi que pour tous ses efforts consentis pour le bon déroulement et la réussite de notre Ecole Doctorale.

Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux types de transport atmosphérique des polluants.....	7
Tableau 2: Toxicité de certains métaux lourds.....	13
Tableau 3: Répartition des consommations du nickel dans le monde en 2005....	19
Tableau 4: Les normes des TSP dans l'air.....	28
Tableau 5: Les normes des PM ₁₀ dans l'air	28
Tableau 6: Les normes des PM _{2,5} dans l'air.....	28
Tableau 7: Les valeurs limites de quelques métaux lourds dans l'air.....	29
Tableau 8: Avantages et inconvénients de l'utilisation des échantillonneurs LVS et HVS.....	31
Tableau 9: Les méthodes d'analyse de polluants.....	33
Tableau 10: Le temps d'irradiation en fonction de la période et du type de l'échantillon.....	45
Tableau 11: Temps de refroidissement de quelques éléments.....	46
Tableau 12: Exemple de réaction d'interférences primaires.....	49
Tableau 13: Interférences spectrales de rayons gamma de quelques éléments.	50
Tableau 14: Quelques caractéristiques du site de prélèvement.....	52
Tableau 15 : Valeurs des efficacités en fonction de l'énergie.....	60
Tableau 16: Teneurs en TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en fonction des dates de prélèvements.....	63
Tableau 17: Teneurs (ng/m^3) en principaux métaux lourds détectés dans les différents échantillons d'air.	68
Tableau 18: Les teneurs (ng/m^3) en d'autres éléments de trace détectés dans les différents échantillons d'air..	71
Tableau 19: Teneurs en éléments de traces (ng/m^3) obtenues dans différentes régions européennes et à Alger.....	86
Tableau 20: Tableau périodique des éléments.....	99
Tableau 21: Les énergies caractéristiques des éléments étudiés.....	
Tableau 22: Relevé météorologique d'Alger centre de l'année 2008.....	

Liste des figures

Figure 1: Emissions, transformation et dépôts des polluants.....	9
Figure 2: Schéma de base d'un appareil de Spectrométrie d'absorption atomique	34
Figure 3: Schéma illustrant le principe de la PIXE.....	35
Figure 4: Schéma du dispositif expérimental de l'XRF.....	36
Figure 5: Diagramme illustrant the processus de la capture neutronique par un noyau cible suivi d'une émission de rayons gamma.....	39
Figure 6: Carte du centre d'Alger.....	52
Figure 7: porte filtre ou cassette.....	53
Figure 8: Les filtres en ester de cellulose.....	54
Figure 9: Schéma de configuration d'une chaîne de spectrométrie gamma.....	55
Figure 10: Schéma du conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à l'irradiation dans le cœur du réacteur NUR.....	58
Figure 11 : Courbe d'efficacité en fonction de l'énergie.....	60
Figure 12 : Variation de la teneur en TSP en fonction de la période de prélèvement.	66
Figure 13 : Variation des concentrations du Chrome en fonction de la date de prélèvement.....	73
Figure 14: Variation des concentrations du Cobalt en fonction de la date de prélèvement.	74
Figure 15: Variation des concentrations du sélénium en fonction de la date de prélèvement.....	75
Figure 16: Variation des concentrations du mercure en fonction de la date de prélèvement.....	76
Figure 17 : Variation des concentrations du Scandium en fonction de la date de prélèvement.	77
Figure 18 : Variation des concentrations du Hafnium en fonction de la date de prélèvement.....	78
Figure 19: Variation des concentrations du Tantale en fonction de la date de prélèvement.....	78
Figure 20: Variation des concentrations de l'Antimoine en fonction de la date de prélèvement.....	79
Figure 21: Variation des concentrations du Rubidium en fonction de la date de prélèvement.....	80
Figure 22 : Variation des concentrations du Fer en fonction de la date de	

prélèvement.....	80
Figure 23 : Variation des concentrations du Terbium en fonction de la date de prélèvement.....	81
Figure 24: Variation des concentrations du Lanthane en fonction de la date de prélèvement.....	82
Figure 25: Variation des concentrations du Samarium en fonction de la date de prélèvement.....	82
Figure 26: Variation des concentrations de l'Argent fonction de la date de prélèvement.....	83
Figure 27: Variation des concentrations du Césium en fonction de la date de prélèvement.....	83
Figure 28 : Variation des concentrations du Brome en fonction de la date de prélèvement.....	84
Figure 29 : Variation des concentrations de l'Ytterbium en fonction de la date de prélèvement.....	85
Figure 30 : Variation des concentrations du Lutétium en fonction de la date de prélèvement.....	85
Figure 31 : Spectre illustrant la variation relative du flux de neutron en fonction de l'énergie.....	100
Figure 32 : Exemple d'un résultat délivré par la chaîne de comptage Gamma relatif au comptage d'un échantillon d'air.....	101
Figure 33 : Spectre gamma de 0 à 800 keV des éléments mesuré d'un échantillon irradié pendant 24 heures, temps de refroidissement de 9 jours et temps de comptage de 30 mn.....	102

Liste des symboles

A : 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

N : Nombre d'Avogadro : $6.02 \cdot 10^{23}$

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

λ : Constante de décroissance radioactive de l'isotope radioactif formé ($\lambda = \ln 2/T$)

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

N_A : 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 / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$).

γ : Rapport d'embranchement.

Δm : L'erreur sur la masse de l'élément lors des pesées.

ΔV : L'erreur sur le volume d'air aspiré.

(ΔI) : L'erreur sur l'intensité du standard et des échantillons.

(ΔC AIEA) : L'erreur sur la concentration de l'élément dans le standard AIEA

V : Le volume d'air aspiré.

T_{1/2} : Demi-vie

Z : Numéro atomique

Liste des abréviations

AAN : Analyse par Activation Neutronique

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique

A_{Ne} : Surface nette du pic de l'échantillon

A_{Ns} : Surface nette du pic du standard

AMP : Amplificateur

C_e : Facteur de comptage de l'échantillon

C_s : Facteur de comptage du standard

D : Détecteur

D_e : Facteur de décroissance de l'échantillon

D_s : Facteur de décroissance du standard

Dewar : Conteneur à azote liquide

GPC : La chromatographie en phase gazeuse

HT : Détecteur à semi conducteur

HVS : High Volume Sampler

HPLC : La chromatographie liquide haute performance

TSP : Total suspended particulate (Particules totales en suspension)

I_{ech} : L'intensité de l'élément à doser dans l'échantillon.

I_{st} : L'intensité de l'élément à doser dans le standard.

INAA : Analyse par Activation Neutronique Instrumentale

LVS : Low Volume Sampler

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

m_{ie} : Masse de l'élément i dans l'échantillon

m_{is} : Masse de l'élément i dans le standard

MCA : multi canal Analyseur

ORD : Ordinateur

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

PA : Préamplificateur

SAA : La chromatographie d'absorption atomique

Tc : Temps de comptage

Td : Temps de décroissance

Ti : Temps d'irradiation

t_{ds} : Temps de décroissance

t_{ce} : Temps de comptage

t_{cs} : Temps de comptage

XRF : La spectrométrie de fluorescence X

Introduction générale

La pollution atmosphérique est la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de constituants de l'air susceptible de provoquer un effet nuisible ou de créer une gêne, compte tenu des connaissances scientifiques du moment

Aujourd'hui, le seuil élevé atteint par la pollution de l'air nous fait prendre conscience de l'importance du problème et des dangers qu'il représente pour la santé des êtres vivants et de l'homme en particulier. Cette contamination de l'air est avant tout marquée dans les régions industrielles et dans les villes mais certains polluants peuvent monter dans l'atmosphère puis, poussés par les vents, voyager sur des dizaines ou des centaines de Km, n'épargnant ni les régions rurales, ni les endroits les plus reculés.

Cependant, la composition de l'air que nous respirons est modifiée par l'apport d'éléments d'origine naturelle et artificielle. Les sources naturelles dépassent de loin les sources artificielles mais il est évident que ces dernières sont beaucoup plus importantes à proximité des zones très peuplées. En effet chaque jour, nos poumons filtrent environ 15 kg de ce mélange gazeux pour en extraire l'oxygène indispensable à la vie.

La liste des polluants atmosphériques est longue. Aux classiques habituels mais toujours réels polluants tels que les poussières, le SO₂, les NO_x, le CO, les métaux lourds, les composés organiques volatils, le fluor, l'acide chlorhydrique, etc. sont venus s'ajouter progressivement à d'autres substances telles que les gaz à effet de serre : le CO₂, le CH₄, le N₂O, les CFC, HFC, PFC et SF₆ et d'autres substances telles que l'ozone, les organochlorés (dioxines et furannes), les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), etc.

Bien entendu les sources émettrices de polluants dans l'atmosphère sont fort nombreuses et concernent tous les secteurs relatifs aux activités humaines (domestique, industrie, agriculture, transports, etc.) (*Ramade, 2000*). On constatera que la part des émissions dévolue à chaque secteur et varie considérablement selon les constituants, notamment en ce qui concerne les secteurs principalement consommateurs d'énergie.

Pour des raisons physiologiques et psychologiques, la pollution par les poussières a été très tôt ressentie par les populations et a fait l'objet de réglementations depuis fort longtemps bien que la toxicité soit souvent moindre que de nombreux constituants gazeux. Cette dernière affirmation doit bien entendu être modulée selon la nature des poussières et leur granulométrie (fines poussières < 2,5 µm, fibres et poussières d'amiante,...).

Les particules solides servent de vecteurs à différentes substances toxiques voire cancérogènes ou mutagènes des métaux lourds et restent de ce fait un sujet important de préoccupation (*Paul et al. 1978*) (*Paul et al., 1983*), (*Yusof al., 2001*).

La recherche scientifique sur les métaux lourds a pris une ampleur croissante avec une attention particulière portée aux effets aigus de ces pollutions liées à des nuisances locales et régionales ainsi qu'à la toxicité chronique (problème endocrinien, neurologique et immunitaire) due à la pollution à grande échelle liée aux métaux.

Les pays développés ont construit année après année des politiques visant à réduire les niveaux de métaux dans l'environnement et mettant en place des programmes de santé publique. Les priorités de ces pays se focalisent largement sur la réduction des effets chroniques. Les pays en voie de développement quant à eux se consacrent aujourd'hui prioritairement à bâtir leur développement économique dans un contexte de forte croissance de leur population; ces populations sont confrontées aujourd'hui à d'importants problèmes de pollution en métaux toxiques, aussi bien dans l'air que dans l'eau ou dans la nourriture.

En Algérie le manque de données relatives à la qualité de l'air fait que l'impact de cette forme de pollution sur l'environnement soit très mal connu. Les sources de pollution sont nombreuses et les nuisances sont déjà perçues, mais leur relation directe ou indirecte avec la dégradation de l'environnement n'est pas établie.

C'est dans ce contexte et en continuité avec des travaux en cours de réalisation au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, que nous nous proposons par ce travail d'étudier les niveaux de pollution de l'air par les particules fines et plus particulièrement par les métaux lourds au niveau de site urbain d'Alger à forte densité de population exposée directement aux sources émettrices de pollution. En effet et dans ce cadre, plusieurs travaux en Algérie ont été réalisés, Ces études de diagnostic environnemental concernent la qualité de l'air par l'évaluation des teneurs en métaux lourds dans l'air au niveau de plusieurs régions du pays (*Hamdad, 2002*), (*Kerbachi et al., 2009*), (*Rapports internes: CRNA/COMENA; 2008 et 2009*).

Par notre contribution, nous avons utilisé une technique nucléaire, à savoir la technique d'analyse par activation neutronique (*Bert Wolterbeek, 2001*) (*Kayasth et al., 2004*), pour la détection de traces de métaux lourds dans nos échantillons de filtres d'ester de cellulose.

En effet l'analyse chimique par activation neutronique est une méthode analytique très sensible, particulièrement bien adaptée pour analyser la pureté d'un échantillon. La méthode consiste d'abord à irradier un échantillon par un flux de neutrons puis les différentes impuretés contenues dans l'échantillon subissent des réactions nucléaires qui conduisent à la formation d'isotopes instables. Ces isotopes sont alors identifiés et quantifiés par l'étude de leur spectre de rayons γ .

L'objectif principal visé par le présent travail, est de déterminer, en utilisant la méthode d'analyse par activation neutronique, la teneur des éléments de trace dans des échantillons d'air prélevé sur une durée d'une année à raison d'un échantillon par semaine, sur site urbain d'Alger centre et d'étudier les différentes relations qui pourraient exister entre ces teneurs et leur provenance. L'ensemble des mesures enrichit une base de données qui permet de voir l'évolution de la qualité de l'air sur le long terme, donne des informations sur le lien complexe qu'il y a entre les émissions de polluants et la qualité de l'air observée et aide à suivre en temps réel d'éventuels épisodes de pollution.

Chapitre I : Pollution et polluants atmosphériques

1. Généralités sur la pollution atmosphérique

Les processus qui régissent la pollution atmosphérique s'échelonnent en plusieurs étapes. Tout d'abord s'effectue l'émission des polluants, rapidement suivie de leur dispersion puis de la phase de transformation chimique, qui a lieu au sein même de l'atmosphère.

Les émissions de polluants ont une forte influence sur la qualité de l'air. Les polluants primaires, dont les NOX, le SO₂, le CO, les poussières, les métaux et les Composés Organiques Volatils (COV), sont directement émis dans l'atmosphère (*Querol et al. 1997*)

Ils proviennent aussi bien des sources fixes, chauffages urbains, activités industrielles, domestiques ou agricoles que des sources mobiles, en particulier les automobiles (*Rosbach et al. 2000*).

Le phénomène de dispersion, c'est-à-dire le déplacement des polluants depuis la source, est joué un rôle important dans l'accumulation d'un polluant ou sa dilution dans l'atmosphère. La dispersion dépend de plusieurs paramètres dont le climat et la topographie locale (altitude, relief, cours d'eau...). Elle diffère selon le lieu : plaine, vallée plus ou moins encaissée, sommet de colline ou de montagne. Deux types de dispersion peuvent être distingués : verticale, liée au gradient vertical de température de la troposphère (basse couche de l'atmosphère) et horizontale, liée aux vents et aux gradients de pression. Ainsi, une situation anticyclonique, avec de très faibles vents, favorise des niveaux de pollution élevés car elle entraîne une accumulation des gaz.

L'inversion du gradient thermique vertical, observable fréquemment en hiver en zone montagneuse, induit les mêmes conséquences. A l'inverse, une situation dépressionnaire, avec vents plus sensibles, permet une bonne dilution des polluants dans l'atmosphère d'autant plus que la pluie lessive l'atmosphère, entraînant le dépôt des polluants.

2. Les différents polluants atmosphériques

L'air peut être contaminé par toute une gamme de particules très différentes. Bon nombre d'entre elles peuvent nuire à notre santé, en particulier les très petites particules qui peuvent pénétrer profondément dans les poumons. (*Romina et al., 2009*)

2.1. Les aérosols

Les Aérosols sont de fines **particules** liquides ou solides en suspension dans un gaz, dont la taille varie de 0.001 à 100 **micromètres** et ayant une durée de vie d'une semaine.

2.2. Les particules en suspension dans l'air

Les particules en suspension dans l'air sont toutes les particules solides et liquides suspendues dans l'air, de diamètre inférieur à 100µm. Ce mélange complexe contient entre autre de la poussière, du pollen, de la suie, de la fumée et des gouttelettes d'eau.

2.2.1. Taille et origines des particules

On mesure la taille des particules en donnant le diamètre qu'aurait une sphère de comportement aérodynamique équivalent. Ceci n'est pas vrai pour les particules fibreuses (comme l'amiante) qui nécessitent l'observation de prélèvements au microscope électronique afin de les compter et de les mesurer.

✓ **Particules naturelles**

Leur origine est : volcanique, saline (cristaux salins : NaCl), feux de brousse, organique : formes vivantes microscopiques (bactéries, acariens, moisissures...), graines aigrettées, pollen (de 30 à 40 μm), fibres végétales (champignons...) ou animales, tellurique telles que les argiles dont le diamètre est inférieur à 2 μm , limons (de 2 à 50 μm), sables fins (de 50 à 200 μm).

✓ **Particules anthropiques**

Ce sont des poussières chimiques et minérales (*Beijer et al., 1986*) elles résultent :

- de la combustion industrielle (hauts fourneaux et fours) du chauffage
- des incinérateurs à grilles ou à lit fluidisé
- des transports (notamment routier), celles-ci sont généralement constituées de:
 - charbon (carbone si la combustion est incomplète)
 - d'oxydes métalliques : fer, aluminium...
 - de ciment
 - de calcaire
 - de silice
 - de goudron.

2.2.2. Classification des particules en suspension

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

• **Le classement par taille des particules**

Dans le cadre du contrôle de la pollution atmosphérique, on s'intéresse généralement à deux granulométries de particules : les PM₁₀ et les PM_{2,5}.

On distingue principalement :

- ✓ Les poussières totales (TSP) ou toutes les particules en suspension dans l'air
- ✓ Les particules de diamètre inférieur à 10 μm , sont des particules inhalables ou inspirables. (PM₁₀)
- ✓ Les particules de diamètre inférieur à 2,5 μm , c'est des particules qui atteignent les voies alvéolaires, c'est les particules respirables. (PM_{2,5})

Il arrive qu'on étudie des particules comprises entre deux tailles, par exemple la fraction comprise entre 10 μm , et 2,5 μm et même inférieure à 2,5 μm .

• **Le classement par Compositions chimiques**

- ✓ Les PM₁₀ sont constituées majoritairement de 6 composants différents (Bitouche, 2002) :
 - des matériaux terrigènes (oxydes d'aluminium, silice)

- du carbone organique
 - du carbone élémentaire
 - des sulfates
 - des nitrates et de l'ammonium
 - Enfin, les PM10 contiennent des éléments issus de l'érosion comme le fer, mais aussi des embruns (HCl)
- ✓ Les PM2.5 sont constituées de :
- plomb
 - des HAP
 - du fer et du magnésium
 - des métaux lourds
 - d'une fraction insoluble des sulfates et dérivés soufrés.
 - d'hydrocarbures imbrûlés.

3. Les niveaux de pollution

3.1. La pollution à l'échelle locale

Dans les agglomérations urbaines ou encore dans les sites industriels, les émissions sont importantes et les concentrations en polluants primaires atteignant des valeurs élevées, en particulier lors des situations défavorables à la dilution. Les situations les plus favorables pour l'accumulation de ces polluants vont se rencontrer en hiver lors des situations de haute pression atmosphérique (anticycloniques) souvent accompagnées de brouillard ou de nuages bas. A cette échelle, la pollution produit des effets sur la santé humaine (*Zghaid et al., 2005*).

3.2. La pollution à l'échelle régionale

La pollution atmosphérique se manifeste aussi à l'échelle régionale. Les niveaux de concentration ne sont aussi élevés que localement. La pollution à cette échelle ne connaît pas de frontières en pays et on l'appelle pollution transfrontière. Elle provoque des effets spectaculaires comme l'acidification des eaux de surface et le dépérissement des forêts.

3.3. La pollution à l'échelle planétaire

Elle affecte toute la planète et ses répercussions sont plus spectaculaires et plus médiatisées (tab.1). Les plus connues sont la destruction de la couche d'ozone dans la stratosphère et les modifications climatiques dues à l'effet de serre.

Tableau 1 : Principaux types de transport atmosphérique des polluants. (*Ramade , 1992*)

Echelle de distance	Mécanismes de transport	Mécanisme d'élimination
Locale (0 – 50 Km)	Vents dominants	Déposition
Moyenne (50 - 1000Km)	Mélanges dans la troposphère Critères climatiques	Dépôts, resuspension et photochimie
Globale	Circulation générale	Puits océaniques et arctiques

4. Les facteurs régissant l'évolution des polluants

Une fois dans l'air, les polluants atmosphériques sont dispersés et subissent des modifications physico-chimiques. Quelques uns y restent et d'autres se déposent dans la nature. Le facteur principal impliqué dans l'évolution d'un polluant est la météorologie puis vient, avec un degré moindre, la topographie (*Richard Boubel et al., 1995*).

4.1. Les facteurs météorologiques

4.1.1. L'influence du vent

En l'absence de relief, le vent tend à disperser les polluants atmosphériques. Plus le vent est fort plus est importante la vitesse de dispersion d'une pollution. En zones montagneuses, si les polluants rencontrent une barrière montagneuse, la pollution peut alors retourner en arrière et revenir sur son site d'origine. Dans ce cas il y a accumulation et pas dispersion. C'est le cas des villes situées dans des cuvettes en montagne.

4.1.2. L'influence de la chaleur et de la température

La température agit sur la chimie des polluants : la volatilité de certains gaz diminue en période froide tandis que la chaleur estivale est nécessaire à la formation photochimique de l'ozone.

Avec l'altitude, l'air se refroidit selon un gradient de 0,65°C par 100 m. Lorsque ce gradient est plus élevée en raison de la chaleur au sol ou de la présence de l'air froid en altitude, l'atmosphère deviendra instable et favorisera les mouvements ascendants des masses d'air et donc la dispersion des polluants vers le haut sera rapide.

Au contraire, lorsque le sol est froid ou l'air en altitude est chaud on dit que l'air est stable, donc il n'y aura pas de mouvements verticaux des masses, ce qui s'opposera à la diffusion des polluants.

4.1.3. La présence de pluies

La présence de pluies (ou de neiges) conduit à une diminution de la pollution. Cette dernière se fera par deux phénomènes de lessivages de l'atmosphère par les pluies qui sont :

- L'incorporation des gaz solubles dans les gouttes d'eau des nuages
- Le lessivage des particules sous les nuages par les pluies (*Gondala et al., 2009*)

4.1.4. L'inversion thermique

Dans certains cas, il se produit, en altitude, une inversion de température. L'air à la surface est plus froid et plus dense que celui en altitude, donc ils ne peuvent pas se mélanger. Cette couche d'inversion, en bloquant la masse d'air de surface, agit comme un couvercle empêchant la dispersion verticale des polluants. Les causes d'existence de cette couche d'inversion sont :

- ✓ Le rapide refroidissement du sol.
- ✓ Le chauffage photochimique de l'air en altitude provenant de l'océan.

4.1.5. L'effet de brises

En bord de mer, les écarts de températures entre la mer et le continent vont entraîner des circulations de l'air local. Pendant le jour, au printemps ou en été, le continent est plus chaud que la mer. Une dispersion thermique se crée sur le continent et il s'établit pour la combler une brise de mer, soufflante dans les basses couches de la mer sur la terre. En altitude, à quelques centaines de mètres, un écoulement de retour s'établit de la terre vers la mer. Pendant la nuit, la circulation s'inverse, la mer étant plus chaude que le continent. Ces phénomènes de brises entraînent une circulation locale des polluants, qui s'accumulent dans la cellule de brises, pouvant entraîner de sérieux problèmes.

4.2. Les facteurs topographiques

Les effets de la topographie sont aussi importants dans les mécanismes de diffusion des polluants. La stabilité atmosphérique combinée à une topographie complexe empêche la circulation de l'air et donc l'évolution des polluants.

La topographie d'un site peut influencer la circulation des masses d'air. Par exemple les rues canyon, les bords de mer et les vallées peuvent modifier la dispersion des polluants.

Le littoral

La nuit, les masses d'air ne se déplacent pas dans le même sens que le jour. En effet, durant la journée, la brise de mer ramène les polluants sur les côtes. Mais la nuit, ce phénomène s'inverse car le sol se refroidit plus vite que la mer. La pollution est alors renvoyée sur la mer.

Les vallées

Les masses d'air ne se déplacent pas dans le même sens de jour et de nuit. Le jour l'air s'échauffe sur les pentes et crée un courant qui remonte la vallée ce qui fera que les polluants se dispersent rapidement. Mais de nuit ce phénomène s'inverse : l'air froid s'écoule le long des pentes et s'accumule au fond de la vallée tout en descendant. La pollution évacuée la journée est alors ramenée dans la vallée la nuit.

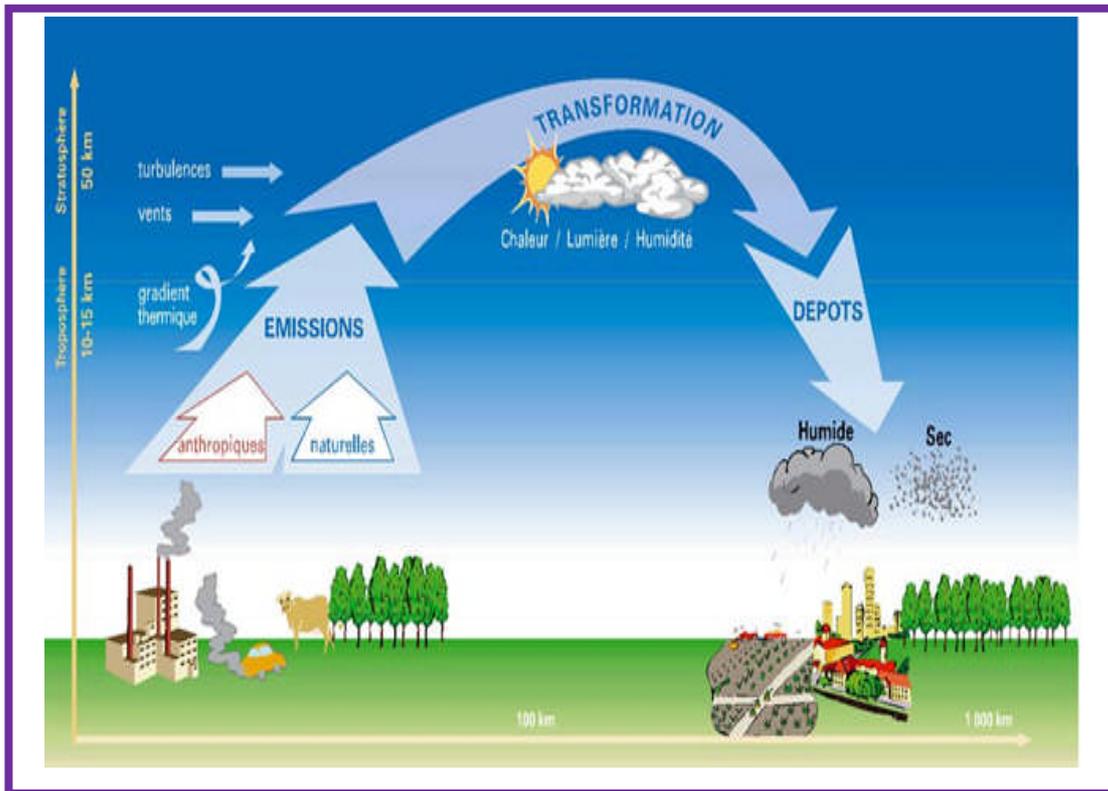


Figure 1: Emissions, transformation et dépôts des polluants (Afsset, 2006).

4.3. Chimie de l'atmosphère

Au cours de la dispersion, les polluants peuvent se transformer par réactions chimiques complexes pour former des polluants secondaires tels que l'ozone. Sa production nécessite un fort rayonnement solaire et la présence de certains précurseurs, comme les COV. Des réactions mêlant polluants primaires et secondaires se produisent, la plus courante étant la réaction réversible entre l'ozone et les oxydes d'azote ($\text{NO} + \text{O}_3 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{NO}_2$) qui a lieu en présence de lumière et pour de fortes concentrations en NO. Cette réaction explique les concentrations en ozone plus fortes en zone périurbaine qu'en ville. Elle explique également pourquoi la teneur en ozone dans les agglomérations faiblit pendant les heures où le trafic est important. A contrario, les stations périurbaines, situées sous le vent de la ville, connaissent les pointes maximales d'ozone, car en l'absence d'émissions importantes d'oxydes d'azote, les masses d'air polluées transportées s'enrichissent en ozone par recombinaison avec l'oxygène de l'air.

C'est très important de pouvoir classer et comprendre les différents processus chimiques se déroulant dans l'atmosphère, mais le problème réside dans la source de la pollution puisque le comportement atmosphérique des polluants dépend d'abord de leur source. (Pavageau 2003).

Les transformations chimiques au sein de l'atmosphère sont principalement des phénomènes liés aux différentes réactions d'oxydation impliquant les atomes de carbone, azote et soufre. Ces réactions impliquent l'oxydation des hydrocarbonés, NO, et SO_2 à partir des produits oxygénés comme les aldéhydes, le dioxyde d'azote (NO_2) et l'acide sulfurique (H_2SO_4). Dans l'atmosphère, ces espèces oxygénées deviennent des produits secondaires issus des différentes émissions primaires de polluants de source anthropogénique ou naturelle.

Ces réactions sont classées en fonction du milieu réactionnel, elles sont qualifiées d'homogènes lorsqu'elles se font dans une interphase gaz-gaz et d'hétérogènes lorsqu'elles se produisent sur des particules solides ou sur des gouttelettes de liquide. En effet, concernant l'oxydation du SO_2 dans des gouttelettes liquide, en fonction de la nature du milieu réactionnel, nous avons des produits secondaires comme le NO_2 et O_3 en interphase gaz-gaz, du SO_2 en phase liquide-liquide et une condensation formant des aérosols sur l'interphase gaz-solide.

Les molécules existantes dans l'atmosphère interagissent avec les radiations solaires en absorbant les photons provoquant ainsi la formation des radicaux libres.

Le mercure:

Les formes naturelles de mercure sont des dépôts hydrothermaux de sulfure HgS (cinabre). Cet élément se rencontre sous l'état rédox Hg^{++} (II) ou bien Hg liquide (0). En conditions réductrices sa concentration en solution est limitée par la solubilité du sulfure HgS (cinabre) et en conditions oxydantes, par l'oxyde HgO . Toute fois la chimie du mercure dans l'environnement est très complexe à cause de l'aptitude de cet élément à former des complexes organométalliques. Dans des conditions réductrices, le mercure se lie avec des radicaux méthylés, issus de la matière organique sédimentaire, et forme des composés ioniques solubles $\text{Hg}(\text{CH}_3)^+$ et des espèces aqueuses neutres particulièrement volatiles $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2^0$ et très toxiques. Les composés volatiles s'échappent donc facilement vers l'atmosphère où ils peuvent subir des réactions photochimiques et être transformés en espèces non volatiles qui peuvent se redéposer. L'affinité du mercure avec les composés organiques facilite la formation de complexes avec les acides humiques et fulviques des sols et des eaux. Le mercure s'accumule ensuite tout au long de la chaîne alimentaire. La consommation de poissons importante par ces populations les rend vulnérables.

Le Plomb

Les sols du voisinage autoroutier ou du réseau routier sont contaminés. L'essentiel du plomb rejeté dans l'atmosphère par les gaz d'échappement retombe à faible distance. Le plomb migre à faible distance dans l'air. Concernant la chimie du plomb, cet élément n'est pas affecté pas les processus redox, mais selon les conditions de pH, il peut subir différents mécanismes de contrôle de sa solubilité. En milieu réducteur, sa solubilité est limitée par la précipitation du sulfure de plomb (la galène). En conditions oxydantes, le plomb est nettement plus soluble et précipite sous forme de sulfate de plomb (anglésite) ou de carbonate de plomb (cérusite) en milieu carbonaté. Avec les ions carbonates, il forme des complexes, ce qui augmente sa solubilité aux pH élevés. La précipitation de plomb sous forme de cérusite peut dans certaines conditions de pH et de pression partielle en CO_2 maintenir la teneur en plomb à des niveaux très bas. En revanche, ce n'est pas le cas de l'anglésite (sulfate de plomb) dont la solubilité est telle, que même avec précipitation jusqu'à l'équilibre théorique avec ce minéral, les teneurs en plomb dissous demeurent élevées.

Enfin, le plomb présente une affinité avec les matières organiques, notamment de poids moléculaire moyen, pour former des complexes organométalliques qui peuvent présenter une grande toxicité et faciliter leur mobilité. De manière générale, le plomb sera plus soluble en conditions acides qu'avec des eaux incrustantes où le danger sera moindre.

L'arsenic

Ce n'est pas un métal lourd, mais il sera classé dans cette rubrique à titre de contaminant inorganique et parce qu'il est souvent associé à des métaux lourds. Cet élément est naturellement présent dans des minéraux tels que les arsénopyrites dont l'altération oxyde les arséniures insolubles en arséniates solubles. Le comportement de l'arsenic ressemble à celui du soufre (sulfure insoluble oxydé en sulfure soluble). Les arséniates solubles migrent avec l'eau. Si le climat est aride, les eaux se concentrent (minéralisation) et la teneur en arsenic dissous augmente jusqu'à des niveaux dangereux.

Dans les régions d'extraction de minerais (sulfures) associées à des minéralisations d'origine profonde ou à du volcanisme, il faudra suspecter des teneurs naturellement élevées en arsenic. Accessoirement, des contaminations plus locales sont liées à un usage de produits de traitement du bois. Au niveau sanitaire, l'arsenic provoque notamment des cancers cutanés. Il augmente la fréquence de ces maladies et présente un effet cumulatif.

En conditions oxydantes, l'arsenic est soluble sous deux niveaux d'oxydations, la forme pentavalente ($\text{AsO}_4^{=}$ -, $\text{HAsO}_4=$, H_2AsO_4^- , $\text{H}_3\text{AsO}_4^\circ$ selon le pH). C'est la forme prédominante en conditions très oxydantes. Lorsque les conditions sont moins oxydantes, la forme majoritaire est la trivalente, nettement plus toxique ($\text{AsO}_3^{=}$ -, $\text{HAsO}_3=$, H_2AsO_3^- , $\text{H}_3\text{AsO}_3^\circ$ selon le pH). En plus des arséniures stables en conditions réductrices et de celles mentionnées plus haut, d'autres niveaux redox existent pour cet élément. Les formes trivalentes et pentavalentes étant solubles, elles peuvent atteindre de fortes concentrations sans être affectées par des processus de précipitation de minéraux. Heureusement, ces formes sont susceptibles de s'adsorber à la surface de minéraux tels que les oxydes métalliques, en particulier les oxydes de fer.

5. La pollution atmosphérique par les particules en suspension

5.1. Les caractéristiques des particules

Selon le domaine concerné (chimie, physique, ...), le mot « particule » a plusieurs significations. Ainsi, dans le domaine de la protection de l'environnement, une particule désigne une petite partie de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ou déposée sur une surface et susceptible de se mettre en suspension. (*Krzyzanowski, 2005*)

Les particules en suspension ne forment pas un seul et unique polluant de l'air, mais représentent plutôt une classe de polluants constituée de plusieurs sous-classes variant dans une gamme de granulométrie de $0,005\mu\text{m}$ à environ $1000\mu\text{m}$. Chaque sous-classe de particules peut être constituée ou contenir différentes espèces chimiques. Ainsi, selon leur origine, les particules ont une gamme de taille et une composition physico-chimique très variable, c'est pourquoi différentes terminologies existent pour classifier, définir ou nommer une classe de particules polluantes.

5.2. Les différentes classes de particules

✓ Les particules totales en suspension (TSP : Total Suspended Particulates) :
Elles représentent toutes les particules en suspension dans un volume d'air. Aux Etats-Unis, les TSP sont définies comme étant les particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à $50\mu\text{m}$, alors qu'en Europe, elles désignent toutes les particules en suspension d'un diamètre inférieur à $100\mu\text{m}$.

✓ Les PM10 :

Les PM10, ou *particulate Matter*, sont les particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 10 µm. Cette classe de particules peut pénétrer dans le système respiratoire humain.

✓ Les PM2,5 :

Elles représentent les particules fines en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2,5 µm. Ces particules sont plus dangereuses dans la mesure où ils pénètrent plus profondément dans les poumons et peuvent atteindre la région alvéolaire.

6. Pollution atmosphérique par les métaux lourds

6.1. Introduction

Les métaux lourds sont des polluants engendrés par l'activité humaine qui ont un fort impact toxicologique. Les métaux toxiques sont nombreux, mais on peut citer surtout l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure. Ils ont des impacts sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme.

Tableau 2 : Toxicité de certains métaux lourds (Zayed et al., 2003)

Particules	Impact sur la santé	Les organes cibles des métaux lourds
Plomb	Troubles du système nerveux, affection du foie et des reins	
Cadmium	Affections respiratoires, troubles rénaux	
Mercure	Troubles du système nerveux (mémoire, fonctions sensorielles de coordination)	
Nickel	Maladies respiratoires, asthme, malformations congénitales, cancers	
Chrome	Cancers, troubles dermatologiques, anémie	

sont variés tels que les ions métalliques se fixent sur les globules rouges (Pb, Cd, CH₃Hg). Les métaux s'accumulent dans le foie et les reins qui sont des organes très vascularisés, les dents et les os accumulent le plomb. D'autre part, les métaux solubles dans les lipides comme le plomb tétraéthyl ou le méthylmercure peuvent pénétrer dans le système nerveux central (*Harrison et al., 2000*).

Le danger est encore plus grand pour les enfants car chez eux la barrière hémato-encéphalique n'est pas entièrement développée (intoxication au Plomb possible).

Par diffusion passive et grâce à leur solubilité dans les lipides, le cadmium, le plomb, le nickel, le méthyl-mercure, traversent le placenta et peuvent s'y concentrer. Il a donc été nécessaire de réglementer les teneurs en métaux lourds des eaux destinées à la consommation, mais aussi des rejets industriels. Il existe aussi des teneurs limites des effluents en métaux lourds comme nous le verrons dans la partie sur la réglementation.

Les origines anthropiques des métaux sont diverses, on peut citer notamment l'industrie du traitement de surface. L'industrie du traitement de surface (galvanoplastie, peintures...) est une source de pollution par les métaux lourds particulièrement importante. La part la plus importante de pollution industrielle apportée par cette activité est celle par les métaux et est de 36 %. Les industries

doivent rendre au milieu une eau non toxique, respectant des valeurs seuils en constituants.

Pour que les normes soient respectées il est nécessaire de faire des mesures. Pour la mise en place de mesures d'autocontrôle, il faut donc que les industriels soient équipés pour cela : l'utilisation de spectromètres est alors recommandée car ils sont faciles d'emploi et donnent des résultats fiables.

Les métaux lourds sont aussi issus des combustions car on les trouve, à l'état de traces, dans le charbon et le fioul. Ils se retrouvent dans les cendres et dans les cheminées. On ne peut pas encore faire de mesure en continu, on prélève donc des échantillons de gaz et de poussières et on les analyse.

Les mesures des métaux lourds sont des opérations délicates à mener, d'autant plus que le nombre d'éléments est grand et qu'ils sont présents le plus souvent à l'état de traces.

Les méthodes de mesure sont très variées et ont chacune leurs avantages et inconvénients, le choix de l'une d'elles dépendra de l'exploitation que l'on désire faire du résultat.

Nous verrons d'abord quelques généralités sur les métaux lourds, puis les méthodes de mesure qui existent, enfin nous comparerons ces différentes méthodes.

6.2. Généralités sur les métaux lourds

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser.

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5 g/cm^3 .
- Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium ($Z=11$),
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques.

Certains chercheurs utilisent des définitions plus spécifiques encore. Le géologue, par exemple, considérera comme métal lourd tout métal réagissant avec la pyrimidine ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$).

- ✓ Dans le traitement des déchets liquides, les métaux lourds indésirables auxquels on s'intéresse principalement sont : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se), le zinc (Zn).
- ✓ Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), le zinc (Zn).
- ✓ Enfin, dans l'industrie en général, on considère comme métal lourd tout métal de densité supérieure à 5, de numéro atomique élevé et présentant un danger pour l'environnement et/ou pour l'homme.
(Zayed et al., 2003)

Dès lors que l'on aborde la problématique des métaux lourds, il faut avoir présent à l'esprit que ces éléments se retrouvent dans notre environnement quotidien sous des

formes chimiques très diverses, pouvant chacune conférer une propriété particulière (solubilité, toxicité...) au métal étudié. En effet, à côté des formes minérales les plus simples (exemple : Pb^{2+}), les métaux lourds peuvent aussi exister sous forme organique, c'est-à-dire combinés à

un atome de carbone (exemple : le plomb tétraéthyl des essences) mais aussi sous forme de complexes (exemple : le salicylate de plomb, provenant de la complexation du plomb avec une substance humique des sols) ou encore sous forme de chélates (exemple : complexe de plomb-EDTA). Toutes ces formes, même si elles sont présentes en quantité minime, et quelles que soient les transformations qu'elles subissent lors de leur cheminement dans l'environnement, doivent être prises en compte lorsque l'on étudie les métaux lourds et ceci confère à ce sujet toute sa complexité.

L'étude de toutes ces formes de métaux lourds constitue une discipline à part entière, connue actuellement sous le terme d'étude de la spéciation des métaux lourds.

Nous exposerons successivement les raisons et l'ampleur de leur présence dans l'environnement, ainsi que les impacts observés ou supposés chez l'homme.

6.3. Omniprésence de quelques métaux lourds

6.3.1. Pourquoi l'homme utilise-t-il des métaux lourds ?

La problématique même des métaux et des métaux lourds en particulier repose sur le fait qu'ils sont très utiles, voire indispensables à l'homme. En effet, de par leurs propriétés, ils entrent dans la composition d'une grande variété de produits, et se retrouvent à de nombreux niveaux: métallurgie, chimie, pharmacie, énergie, etc.

6.3.2. Les principaux métaux lourds utilisés par l'homme, sources, applications et toxicité

6.3.2.1. L'arsenic (As)

Sources et applications

Il provient, d'une part, des combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd, et d'autre part dans certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, de métaux non ferreux ou de la métallurgie des ferreux.

Les sources d'arsenic dans notre environnement sont nombreuses : processus industriels, pesticides (fongicides raticides), eau courante, peintures, produits de protection du bois.

L'arsenic a été largement utilisé en agriculture et dans l'industrie pour éliminer une multitude d'organismes ou en réduire le nombre. Les traitements fongicides pour les semences et l'application d'insecticides sur les cultures sont des exemples d'utilisations passées, dont certaines ont été abandonnées.

Aujourd'hui, l'arsenic et ses dérivés sont employés dans les applications suivantes:

- Le traitement du bois sous pression,
- La fabrication d'émail et de céramique en verrerie ;
- Le durcissement des alliages de cuivre et de plomb en métallurgie.

Parmi les applications secondaires de l'arsenic, on peut citer:

- Les feux d'artifice,
- Les micropuces et les éléments « photoélectriques » dans l'industrie de l'électronique ou l'arséniure de gallium représentent un nouveau semi-conducteur très prometteur.

Toxicité

Les symptômes d'une exposition chronique sont : modifications nerveuses et sensorielles (engourdissements, fourmillements), sensations de brûlure dans les mains et les pieds, Neuropathie (perte du fonctionnement des nerfs) progressive, etc. Pour la mesure de l'exposition à long terme, le niveau d'Arsenic dans le corps peut être mesuré par les cheveux et les ongles. Le test sanguin ou d'urine mesure l'exposition à court terme.

6.3.2.2. Le cadmium (Cd)

Sources et applications

Le cadmium est émis par la production de zinc et l'incinération de déchets essentiellement. La combustion à partir des combustibles minéraux solides, du fioul lourd et de la biomasse engendre une part significative des émissions. Le cadmium est utilisé pour protéger l'acier contre la corrosion (cadmiage), ou comme stabilisant pour les plastiques et les pigments. Il est émis aussi par l'incinération de caoutchouc, de plastique et de colorants, par les huiles des moteurs, les engrais phosphatés et enfin par la cigarette.

Le cadmium est récupéré lors de l'élaboration du zinc, du plomb et du cuivre.

Appliqué en couche mince, il protège l'acier contre la corrosion. Il constitue les plaques négatives des accumulateurs au nickel-cadmium.

Le cadmium entre dans la composition d'alliages dont il abaisse le point de fusion et d'alliages antifriction.

Absorbant fortement les neutrons lents, le cadmium est utilisé pour la commande des réacteurs nucléaires et le blindage d'appareils de mesure. Les sels de cadmium sont employés dans la photographie, la fabrication des feux d'artifice, les caoutchoucs, la porcelaine, etc.

Les oxydes de cadmium sont utilisés dans l'industrie chimique, pour la galvanoplastie, dans les accumulateurs électriques, comme stabilisants pour matières plastiques, et pigment pour émaux.

Toxicité

Les vapeurs de cadmium et ses sels sont très toxiques; ils ne doivent pas entrer en contact avec les matières alimentaires. Les effets du cadmium sur la santé sont nombreuses Ils se manifestent par des lésions rénales, Artériosclérose, Bronchite chronique, Emphysème, ostéomalacie, et Cancer broncho-pulmonaire.

6.3.2.3. Le chrome (Cr)

Sources et applications

Le chrome provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies. Plus de 60% de la production de chrome est réservée à la fabrication des produits métalliques, et environ 20% est utilisé dans les réfractaires. Il est principalement utilisé dans les alliages avec le fer, le nickel ou le cobalt. .

Le chrome, est utilisé sous forme de chromite (FeOCrO_2) dans l'industrie métallurgique et dans l'industrie chimique. On le trouve également sous la forme de ferrochrome, utilisé pour la production d'aciers inoxydables et d'alliages divers.

Le chrome est également employé comme pigment pour la peinture, le caoutchouc, le papier, l'encre d'imprimerie, ou encore pour le tannage des peaux. Réalisé industriellement depuis 1920, le chromage est utilisé pour donner un aspect décoratif et assurer une bonne résistance à la corrosion atmosphérique.

Toxicité

On lui attribue des propriétés cancérogènes et des effets sur l'appareil digestif et excréteur. Le chrome VI est particulièrement toxique. (López-Luna et al., 2009) (Weidong et al., 2009)

6.3.2.4. Le mercure (Hg)

Sources et applications

Il est émis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels. Avant Il se présentait sous toutes les formes : pilules, sirop, solutions et pommades. Au XVIIIe siècle, le cyanure de mercure était utilisé comme antisiphilitique. Au début de notre siècle, des médecins ont crié au danger et tiré la sonnette d'alarme lorsque les dentistes ont commencé à le mettre dans la composition des amalgames en bouche. Personne n'a vraiment voulu les écouter : soigner avec une bonne rentabilité était la priorité.

On obtient le mercure par grillage du cinabre (sulfure de mercure). Il se combine avec d'autres métaux pour former des alliages, appelés amalgames. Il permet d'extraire l'or et l'argent avec lesquels il se combine. On l'emploie dans la fabrication de thermomètres, baromètres, pompes à vides, lampes et redresseurs à vapeurs de mercure. Il sert à l'étamage des glaces, à la fabrication de colorants, il entre dans la composition des cosmétiques (mascara), des adhésifs, des filtres des systèmes à air conditionné, etc.

Employé en thérapeutique depuis l'Antiquité, le mercure a perdu de son intérêt au profit d'autres médicaments plus actifs et moins toxiques. Sont parfois employés le bichlorure (sublimé) comme antiseptique, le protochlorure (calomel) comme purgatif, les oxydes jaunes et rouges en pommades dermatologique et ophtalmologique. En France, on utilise de moins en moins pour la désinfection des plaies la mercurescéine et le mercurobotol.

Toxicité

Les dégâts causés dans l'organisme par le mercure ont été découverts depuis de nombreuses années. Prenons, par exemple, le désastre écologique et humain de la baie de Minamata, qui a commencé en 1932 par des versements intempestifs de

méthyl-mercure dans les eaux de la baie. Les premières atteintes des personnes sont apparues 20 ans après : les symptômes étaient de grandes fatigues, des maladies de Parkinson, d'Alzheimer. Le plus dramatique fut lorsque des mères commencèrent à mettre au monde des enfants autistes, lourdement handicapés physiquement et mentalement. Il a été démontré que le mercure cause des mutations chromosomiques à la conception, celles-ci donnant des enfants atteints de troubles physiques et mentaux. Aujourd'hui, l'emploi du mercure se trouve dans les diverses branches de l'industrie et en médecine.

6.3.2.5. Le plomb (Pb)

Sources et applications

Le plomb est principalement émis par le trafic automobile.

La fabrication des accumulateurs constitue la principale utilisation du plomb (environ 50 % de la consommation totale). Les caractères d'imprimerie, les gaines de câbles électriques et les tuyaux pour les canalisations d'eau et de gaz constituaient des marchés importants qui ont considérablement diminué. D'autres comme les bandes et les tables de plomb laminé pour les couvertures et l'insonorisation dans le bâtiment, le plomb de chasse, les capsules de bouteilles et les métaux d'apport pour soudures se maintiennent ou éventuellement progressent. Les plaques de plomb sont utilisées dans la lutte contre la corrosion (industrie chimique) et dans la protection contre les rayonnements (installations utilisant les rayons X ou γ , énergie nucléaire).

Le plomb entre dans la composition de nombreux alliages à bas point de fusion et d'alliages antifriction (avec de l'étain ou du cuivre).

Les composés chimiques du plomb sont importants pour leurs applications industrielles: Matière active des accumulateurs, cristallerie, verrerie technique (tubes de télévision), Fabrication des pigments, de peintures anticorrosion, de stabilisants pour les plastiques, de glaçures pour les céramiques et les poteries, etc.

Les additifs à base de plomb (plomb tétraéthyle) ont joué un rôle important dans l'industrie des carburants grâce à leurs propriétés antidétonantes, mais sont de moins en moins employés à cause de la pollution atmosphérique qu'ils engendrent.

Les principales sources de plomb se trouvent en Australie, aux Etats-Unis, au Canada, au Mexique, au Pérou et en Russie. Les Etats-Unis consomment la moitié de la production mondiale.

Toxicité

Fumer augmente de 25% l'absorption de plomb et de cadmium. Une cigarette détruit 25 microgrammes de vitamines C. Certaines peintures contiennent du plomb : celles de couleur orange et jaune; la couleur blanche est fabriquée à partir de céruse (carbonate de plomb), zinc et titane. D'ailleurs, certains artistes peintres souffraient de troubles de la vision et certains de démence... ; parmi les maladies que provoque le plomb on trouve, l'anémie, le colique, la fatigue, la convulsion, l'hypercinésie, la psychose etc.

6.3.2.6. Le nickel (Ni)

Il est émis dans l'air essentiellement par la combustion du fioul lourd qui contient des traces de ce métal.

Comme de nombreux autres métaux, les applications du nickel à l'état pur sont beaucoup moins importantes que celles sous forme d'alliage avec d'autres composants. Le nickel est actuellement l'élément d'addition le plus répandu dans les alliages modernes. La proportion de nickel dans l'alliage est très variable selon les propriétés souhaitées

Tableau 3 : répartition des consommations du nickel dans le monde en 2005 (Eramet ,2005).

Proportion du Nickel (%)	Alliages
1 - 3	Aciers spéciaux
8 - 14	Aciers inoxydables
15 - 40	Alliages spéciaux
40 - 90	Alliages spéciaux pour l'industrie aéronautique et électronique

A ce jour, plus des quatre cinquièmes de la production mondiale de nickel sont utilisés dans la fabrication d'alliages. Plus de 3000 sortes d'alliages sont recensés.

Le nickel est le plus allergisant de tous les métaux. Plus de 12% de la population y est allergique, dont une majorité de femmes. Les réactions les plus fréquentes sont des dermatites de contact provoquées par le port de bijoux fantaisie, d'accessoires vestimentaires (boucles, boutons, fermetures éclair, etc.) Pour cette raison, le nickel a été exclu de l'alliage utilisé pour les nouvelles pièces de monnaies européennes. Il y a aussi des polémiques sur l'utilisation du nickel dans les amalgames dentaires.

6.3.2.7. Aluminium (Al)

On trouve de l'Aluminium dans des additifs alimentaires, certains antiacides comme hydroxyde d'aluminium, l'aspirine tamponnée, des sprays nasaux, déodorants, l'eau courante, les gaz d'échappement, la fumée du tabac, le papier aluminium, les ustensiles de cuisine en aluminium, les pétards, certaines céramiques. L'eau courante contient des traces d'aluminium car il est utilisé dans les coagulants qui servent à la purification des eaux usées.

Le débat autour du possible lien entre Aluminium et maladie d'Alzheimer dure depuis longtemps. Certaines études suggèrent que l'aluminium pourrait faciliter la maladie d'Alzheimer : les tissus du cerveau des patients atteints de maladie d'Alzheimer contiennent en moyenne plus d'aluminium que ceux des personnes saines. Il existe aussi une corrélation entre la présence d'aluminium dans l'eau courante et la maladie d'Alzheimer.

Mais les études complémentaires faites jusqu'à ce jour ne démontrent pas de lien de cause à effet. Le fait d'éviter ou non par précaution des expositions inutiles à l'aluminium est donc vraiment un choix personnel.

Les symptômes de la toxicité à l'aluminium (quantités importantes) sont : perte de mémoire, difficultés d'apprentissage, perte de la coordination et de l'orientation, confusion mentale, coliques, flatulences, migraines.

Le test du niveau d'aluminium dans l'organisme se fait par l'analyse du sang, des urines, des cheveux, des ongles et des selles. Le test sanguin sous-estime probablement les niveaux corporels d'aluminium (l'analyse des cheveux semblant plus fiable).

6.3.2.8. Vanadium

Le vanadium est émis principalement par le raffinage du pétrole et la combustion du charbon. Il est utilisé dans les alliages spéciaux de l'acier et, sous forme carbure, pour l'usinage d'outils du fait de sa haute dureté. Il est très utilisé en métallurgie pour fabriquer des aciers spéciaux et autres alliages ayant une forte résistance mécanique et/ou à la corrosion ainsi que dans l'industrie chimique.

L'inhalation de particules ou de fumées de vanadium en milieu professionnel expose à un risque de redoutables intoxications chroniques, voir aiguës car il s'agit d'un élément présentant une importante toxicité. Les intoxications aiguës peuvent provoquer un oedème pulmonaire. Les intoxications chroniques sont responsables de dyspnée asthmatique et de troubles métaboliques.

6.3.2.9. Cuivre (Cu)

Provient majoritairement de l'usure des caténaires induites par le trafic ferroviaire. Par ailleurs, comme pour les autres métaux lourds, les procédés de la métallurgie des métaux ferreux et non ferreux, le traitement des déchets et la combustion constituent à des degrés divers les principales sources émettrices de cuivre.

6.3.2.10. Zinc (Zn)

Il provient de la combustion du charbon et du fioul lourd mais aussi de certains procédés industriels appartenant à la métallurgie des ferreux et non ferreux ainsi qu'à l'incinération des déchets.

6.3.2.11. Le Sélénium (Se)

Il provient essentiellement de la production de verre. L'utilisation du fioul lourd contribue également aux émissions, du fait qu'il contient des traces de ce métal.

6.4. Origines naturelles et humaines des métaux lourds dans l'environnement

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines.

Cette contamination a plusieurs origines telles que la combustion de fossiles, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle via les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc. (*Gombert et al., 2005*)

6.5. Distribution des métaux lourds et impact sur l'environnement

6.5.1. Contamination des sols

Les surfaces concernées par la pollution métallique sont estimées, en France, à 200 000 ha le long des axes routiers et à 400 000 ha à proximité des sites industriels. Les métaux peuvent être soit fixés dans les roches et les sédiments, soit mobiles.

Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement. Mais lorsque les conditions changent de telle

manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes. En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles (*Singh et al., 2009*).

6.5.2. Contamination de l'air

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.

6.5.3. Contamination de l'eau

Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement, car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexation, etc.), et car cette évolution dépend fortement du milieu.

En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est fonction de nombreux paramètres:

- La forme chimique initiale du métal,
- La perméabilité du sol et du sous-sol,
- La porosité du sol,
- Le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors que dans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- L'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérer des métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogénèse,
- Le potentiel redox du sol ;
- la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- la teneur en matières organiques du sol:(complexation des métaux par les substances humiques).

6.6. Impact sur l'homme

6.6.1. Exposition de l'homme aux métaux lourds

Les pages précédentes nous ont révélé le caractère omniprésent des métaux lourds dans notre environnement habituel. Toutefois, les conséquences de cette omniprésence seraient moindres si elle n'était pas associée à un risque direct de contamination pour l'homme. De manière très intuitive, on comprend qu'à terme, l'homme qui peut se trouver à tous les échelons du cycle de répartition des métaux lourds dans l'environnement, va en absorber par différentes voies et devenir lui-même réservoir de métaux lourds avec des conséquences probables sur sa santé.

C'est ce passage des métaux lourds de l'état de polluants du sol, de l'air et des eaux à celui d'éléments toxiques absorbé en quantité suffisante pour nuire que nous allons étudier plus précisément dans ce paragraphe.

Les polluants peuvent atteindre l'homme par:

- Passage à travers la peau,
- Ingestion (diffusion par gradient de concentration jusqu'à la circulation sanguine; le plomb et le cadmium peuvent prendre la place du calcium et de la vitamine D en cas de carence)
- Ou par inhalation (les vapeurs peuvent se dissoudre dans les muqueuses du système respiratoire ou arriver dans la circulation sanguine par l'intermédiaire des alvéoles pulmonaires - le mercure et le plomb tétraéthyl peuvent être à l'état vapeur à température ambiante
Quant aux particules :
 - Celles de diamètre supérieur à 20 µm sédimentent
 - Celle de diamètre compris entre 10 et 20 µm ont un impact sur le nasopharynx,
 - Celle de diamètre compris entre 1 et 5 µm sédimentent dans la trachée,
 - Celles de diamètre inférieur à 1 µm atteignent les bronchioles et la circulation sanguine.

6.6.1.1. Absorption par voie respiratoire

Beaucoup de métaux lourds se trouvent dans l'air sous une forme inhalable par l'homme et peuvent être à l'origine d'une contamination par la voie respiratoire. Plus encore que dans les sols, l'eau ou les aliments, cette présence des métaux lourds dans l'air est difficile à mettre en évidence et à éviter.

En l'état actuel de la contamination de l'air, on peut dire que les phénomènes toxiques aigus ne s'observent pratiquement que dans des situations locales très particulières (concentration forte dans une pièce mal aérée...) mais on ne sait presque rien de la contribution de ces métaux lourds sous forme volatile dans les phénomènes de toxicité chronique.

Les métaux lourds dans l'air peuvent se trouver principalement sous deux formes :

- Soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatiles ou dont la pression de vapeur saturante est élevée (c'est le cas du mercure même à température ambiante);
- Soit sous forme de composés métalliques solides, déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion (c'est le cas du plomb sur les particules formées dans les moteurs à explosion et le cas de tous les métaux sur les particules formées dans les incinérateurs d'ordures ménagères).

Pour des raisons de thermodynamique et de cinétique, les métaux lourds présents ont en effet tendance à s'accumuler sur les particules solides formées lors des réactions de combustion. Dans les deux cas (gaz ou fines particules), les métaux peuvent pénétrer dans les voies aériennes supérieures lors d'une inhalation normale et, si la taille des particules le permet, atteindre les alvéoles pulmonaires, véritables échangeurs air/sang d'où ils diffusent (gradient de concentration) dans le torrent circulatoire et sont solubilisés dans le sang de la personne exposée.

- Le diamètre des particules est un des paramètres qui détermine lesquelles pénètrent dans le système respiratoire humain et à quel endroit elles se localisent ainsi nous avons :

- Les grosses particules d'un diamètre supérieur à 10µm sont arrêtées par les poils du nez et par les muqueuses nasales, c'est le système de filtration humaine de première ligne et elles sont absorbées par des glaires donc elles n'ont pas une influence de longue durée sur la santé (la tête)
- Les particules de diamètre compris entre 2.5 et 10 µm se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchite par l'impaction, dans cette zone les particules peuvent être éliminées par clearance ciliaire et toux (région Thoracique).
- Les petites particules inférieure à 2.5 µm sur les quelles sont absorbés la plupart des polluants pénètrent jusqu'aux alvéoles et peuvent être résorbées pendant le transport.

Les particules ne sont enlevées des poumons que très lentement et incomplètement, la désorption de ces particules qui se dissolvent lentement hors des alvéoles, peut duré des semaines et même des années.

Donc ces particules peuvent même s'étendre plus loin par résorption dans l'organisme.

Présents dans la circulation sanguine, les métaux peuvent alors atteindre tous les organes, ce qui fait de la voie respiratoire une voie de contamination très efficace.

6.6.1.2. Absorption par voie orale

- **La contamination de la chaîne alimentaire et la bioaccumulation**

Les métaux lourds contenus dans notre environnement (eau, air, sols) peuvent, par des cycles parfois complexes, se retrouver dans une étape végétale de notre chaîne alimentaire et entraîner une contamination de l'homme par voie orale. Toutefois, un simple passage passif dans notre chaîne alimentaire aurait un impact limité, sans l'existence d'un phénomène très particulier pour les métaux lourds qui est la bioaccumulation.

C'est donc ce phénomène de bioaccumulation que nous allons décrire brièvement.

La bioaccumulation est un phénomène, existant pour les métaux lourds mais également mis en évidence pour d'autres composés chimiques, qui a pour conséquence une concentration en polluant dans un organisme vivant supérieure à la concentration de ce polluant dans le biotope de l'organisme. Au-delà de cette définition, qui sert à comprendre l'utilité des bio-indicateurs (organismes vivants dont la contamination est révélatrice de la pollution du biotope), dans le cas des métaux lourds, c'est la bioaccumulation qui se transmet tout au long de la chaîne alimentaire qui explique que l'homme puisse être exposé à des quantités dangereuses de métaux lourds par son alimentation.

Cette bioaccumulation est le fait des êtres vivants qui peuvent être végétaux ou animaux. Pour tous les métaux lourds, il est possible de trouver une plante ou un animal appartenant à la chaîne alimentaire de l'homme qui sert d'accumulateur vivant de métaux lourds. A l'inverse, il existe très peu d'espèces capables de détoxifier ou d'éliminer efficacement ces métaux lourds de la chaîne alimentaire. Par conséquent, lorsqu'un bio accumulateur de métaux lourds apparaît dans la chaîne alimentaire, ses effets sur la teneur finale des aliments se poursuivent jusqu'à l'homme (lorsqu'il n'y a pas intervention de plusieurs bio accumulateurs, ce qui est souvent le cas). Si on ajoute à cela que l'homme lui-même ne possède pas de métabolisme efficace des métaux lourds susceptible de les éliminer, on comprend comment peut survenir la toxicité chez l'homme (qui devient lui-même un bio accumulateur).

- **Contamination de l'eau et des boissons**

Dans la chaîne alimentaire de l'homme, les aliments ne sont pas les seuls à être contaminés par des métaux lourds, les boissons peuvent l'être également. Nous avons vu dans le chapitre précédent des causes possibles de contamination de l'eau. Les eaux de boisson que nous utilisons quotidiennement participent donc à notre contamination chronique en métaux lourds, même si leur participation reste faible.

6.6.2. La toxicité chez l'homme

Pour l'homme, la problématique des métaux lourds est majeure car elle affecte toutes les caractéristiques de la vie (*Jose et al., 2009*), du faite que :

En effet, la cellule est l'unité biologique fondamentale la plus petite or les métaux lourds peuvent entraîner sa dégénérescence. Certains d'entre eux sont cancérogènes, il peut donc y avoir atteinte de l'entité élémentaire de la vie.

Les métaux lourds peuvent entraîner chez l'homme des pathologies touchant à son intégrité physique et mentale. Il n'est alors plus capable de réagir et de s'adapter aux diverses situations.

Comme nous l'avons vu plus haut, les métaux lourds peuvent s'accumuler au sein de l'organisme et donc perturber son organisation interne.

Certains métaux ont des effets tératogènes et d'autres peuvent entraîner des troubles de la fécondité (*Esteban , 2006*).

Comme nous le voyons donc, chaque fonction fondamentale et vitale de l'homme est mise en danger par la présence des métaux lourds dans son environnement.

7. Normes et réglementation

Partout à travers le monde, le développement de l'industrie minière se fait actuellement dans un contexte de protection environnementale auquel l'Algérie souscrit, ainsi c'est en 1983 qu'une loi cadre sur l'environnement a été promulgué en Algérie, Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement. Cette loi a été abrogée par la loi 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

7.1. Législation internationale

- *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 en 1992

Lors du Sommet de Rio de Janeiro en 1992, 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.

7.2. Législation nationale

- Loi 03-10 du 19/07/2003

Relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Dans « l'article 46 » préconisé. (*Journal officiel n°43 du 20 juillet, 2003*)

- Loi 04-20 du 25/12/2004

Relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. Dans son « article 10 », prévoit la prise en charge par des dispositifs de prévention des risques majeurs, dont les pollutions atmosphériques. (*Journal officiel n°84 du 29 décembre, 2004*)

- Décret exécutif n°06-138 du 15/04/2006

Réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, vapeurs, fumées, particules solides ou liquides, aussi les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle. (*Journal officiel n°24 du 16 avril, 2006*)

7.3. Normes de quelques gaz présents dans l'air

La récente directive européenne du 21/05/2008 fixe de nouvelles normes : (*Directive européenne (Réf.2008/50/CE) du 21 mai 2008*)

Anhydride sulfureux(SO) :

Valeur limite horaire	→	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valeur limite journalière	→	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'alerte	→	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Dioxyde d'azote (NO₂) :

Valeur limite horaire	→	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valeur limite annuelle	→	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'alerte	→	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Ozone (O₃) :

Valeur cible (sur 8heures)	→	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'information (sur 1 heure)	→	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'alerte	→	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Monoxyde de carbone (CO) :

Valeur limite annuelle	→	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
------------------------	---	-----------------------------

7.4. Normes des particules en suspension dans l'air (Bouladraouat et al., 2007)(Tab.4 ; Tab.5 ; Tab.6 et Tab.7)

- **TSP** :

Tableau 4: Les normes des TSP dans l'air

	Normes requises en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
OMS	100 (valeur limite annuelle)	250 (valeur limite journalière)
Normes algériennes	80 (valeur limite annuelle)	50 (valeur cible annuelle)

- **PM₁₀** :

Tableau 5: Les normes des PM₁₀ dans l'air

	OMS	Directive Européenne
Valeur limite journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50	50
Valeur limite annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	20	40
Valeur cible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	/	30
Seuil d'information ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	/	80
Seuil d'alerte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	/	125

- **PM_{2,5}** :

Tableau 6: Les normes des PM_{2,5} dans l'air

	OMS	Directive Européenne
Valeur limite journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	25	/
Valeur limite annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10	24

7.5. Normes de quelques métaux lourds présents dans l'air :

Tableau 7: Les valeurs limites de quelques métaux lourds dans l'air

Métal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OMS	Directive européenne
As	/	0,006
Cd	0,005	0,005
Mn	1	/
Ni	0,02	0,02
Pb	0.5	0.9

Chapitre II : Echantillonnage et méthodes d'analyse de polluants atmosphériques

1. Echantillonnage

1.1. Introduction

Généralement l'échantillonnage des particules en suspension dans l'air, se fait par la méthode de filtration où les particules contenues dans un volume d'air aspiré par une pompe et traversant un filtre avec des mailles suffisamment petites, pouvant arrêter les molécules les plus fines et seront piégées par ce filtre.

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

Donc, l'efficacité globale de l'échantillonnage est liée :

- A la géométrie de l'appareil.
- A la vitesse du vent.
- Au débit de la pompe employée.

1.2. Choix du site d'étude

Le choix d'un site d'étude est en fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller et du risque encouru d'une exposition des êtres humains à des niveaux variables d'une pollution.

Tant que c'est la santé humaine qui est mise en jeu, l'installation de stations de surveillance de la qualité de l'air au niveau des centres urbains à densité importante est plus que nécessaire.

1.3. Débit de prélèvement

Il existe deux types de systèmes de prélèvement classés selon leurs débits de fonctionnement. On distingue l'échantillonnage LVS et HVS; les avantages et inconvénients sont reportés dans le tableau 8.

1.3.1. Echantillonnage à faible volume (LVS : Low Volume Sampler)

C'est un appareil qui fonctionne à faible débit (de 1 à 20 l/mn). Le temps de prélèvement est long. La porosité des filtres est très faible et le volume minimum est de 24 m^3 . Ce type d'échantillonnage est utilisé pour les mesures à l'émission ou en milieu pollué. (*Rosbach, et al., 2000*).

1.3.2. Echantillonnage à grand volume (HVS : High Volume Sampler)

Cet appareil fonctionne avec un débit d'environ 70 m^3/h . la porosité des filtres est supérieure à 3 μm . Il est utilisé pour les mesures en site peu pollué ou pour effectuer des prélèvements courts. L'échantillonnage HVS doit être protégé de la pluie et de la lumière solaire directe.

Tableau 8: Avantages et inconvénients de l'utilisation des échantillonneurs LVS et HVS. (Robache et al.,2001)

Type de prélèvement	Avantages	Inconvénient
LVS	- Taille petite des filtres - Utilisation de nombreux médias filtrants	- Masse des particules collectées plus faibles que les HVS
HVS	- Masse importante de particules collectées	- Utilisation réduite des médias filtrant par crainte de colmatage - grande taille des filtres donc difficulté de transport, de stockage et d'analyse

1.4. Types de prélèvements

Généralement, pour la surveillance des teneurs en TSP (particules totales en suspension) dans l'air urbain, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu à trois (03) catégories de prélèvements :

1.4.1. Prélèvement sans coupure granulométrique

Ce sont des méthodes dites intégrales, car ils collectent les aérosols sans la prise en compte de leur dimension (*PETIT-COYIAUX F et al., 1990*)

On distingue trois méthodes de prélèvement sans coupure :

- Prélèvement sur filtre à débit moyen.
- Prélèvement sur filtre à très fort débit.
- Les fumées noires.

1.4.2. Prélèvement avec coupure granulométrique

L'appareillage utilisé est équipé d'une tête qui permet de collecter que les particules dont le diamètre est inférieur à une valeur fixe. Exemple : PM₁₀ et PM_{2,5} (*Ayad et Cherifi, 2006*).

1.4.3. Prélèvement avec fractionnement granulométrique

Les dispositifs utilisés pour ces prélèvements fonctionnent à bas et haut débit et sélectionnent les particules par impaction et les trier suivant leur taille. Le principe est basé sur la différence de l'énergie cinétique des particules. Lorsqu'un jet d'air est soufflé perpendiculairement à une plaque, les particules se déposent progressivement par l'effet de leur inertie (*Le Boufant , 1988*).

1.5. Les filtres et les membranes de rétention

Les filtres utilisés dans la collection des particules en suspension dans l'air ont un rôle important et le diamètre de leurs pores varie de 0,01 à 10 µm. Ces filtres doivent remplir deux conditions essentielles (*Kikuo Oikawa*) :

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules d'un diamètre supérieur à 0,3 µm.
- Une hydroscopicité faible.

On emploie divers types de filtres dont l'efficacité diffère suivant leur nature et leur texture. Le choix du filtre est effectué en fonction des composés à analyser. Les filtres les plus couramment utilisés sont :

1.5.1. Les filtres en fibre de verre

Ils ont une efficacité de collection de 99,9% pour les particules de diamètre supérieur à 0,3µm. La dimension de leurs pores varie de 0,1 à 4 µm. L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Les éléments les plus gênants sont le fer et zinc.

1.5.2. Les filtres membranaires

Ce sont des filtres nitrocellulose, acétate et ester de cellulose qui sont solubles dans les éthers et les alcools. Ils ont une grande efficacité et même les particules très fines peuvent être collectées.

Les filtres membranaires les plus utilisés pour la collecte des particules en suspension dans l'air sont ceux présentant des pores de 0,8 µm.

Leur seul inconvénient c'est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'il soit impossible de les utiliser pour les prélèvements à forts débits (HVS).

2. Méthodes d'analyse de polluants atmosphériques

2.1. Présentation générale des méthodes d'analyse

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'air, rend difficile leur mise en évidence. Rien n'empêche qu'avec le développement technologique, plusieurs méthodes plus au moins développées permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration. (Chaboun et al., 2007). Le tableau 9 donne les différentes méthodes d'analyse de chaque polluant :

Tableau 9: Les méthodes d'analyse de polluants.

polluants	Méthode d'analyse
Composante acide	- La chromatographie ionique - La spectrométrie UV visible
Composante organique contenant les HAP	- La chromatographie liquide haute performance (CLHP) - La chromatographie en phase gazeuse (CPG)
Eléments métalliques	- La chromatographie d'absorption atomique (SAA) - L'analyse par activation neutronique (NAA) - La spectrométrie de fluorescence X (XRF) - L'analyse par rayons X induits par particules chargées (PIXE)
Carbone élémentaire et carbone organique	- La combustion à différentes températures sous forme de CO ₂

Comme notre travail consiste à étudier la pollution de l'air par les métaux lourds, on va définir quelques méthodes d'analyse de ces derniers.

2.2. Méthodes d'analyse des métaux lourds

2.2.1. La spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) étudie les émissions ou absorptions de lumière par l'atome libre, c'est-à-dire lorsque celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre. Généralement seuls les électrons externes de l'atome sont concernés. Ça sera le cas si les énergies mises en jeu sont modérées. Cette méthode est utilisée pour l'analyse des métaux dans les échantillons biologiques, métallurgiques, pharmaceutiques et atmosphériques (*Matteini et al. 1991*).

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) est basée sur le principe suivant : L'absorption des radiations électromagnétiques des régions visibles et UV du spectre par les atomes libres résulte d'un changement dans la structure électronique. L'absorption de chaque élément est spécifique et permet de le déterminer. L'appareil qui permet de mettre en évidence est un spectrophotomètre qui donne l'absorbance de l'élément dosé.

Après la calibration de l'instrument avec des standards de concentrations connues, les mesures des concentrations des éléments sont déterminées par une droite d'étalonnage.

Dans le cas où les échantillons sont liquides ou solides, les atomes ou les ions doivent être vaporisés dans une flamme ou dans un four graphite.

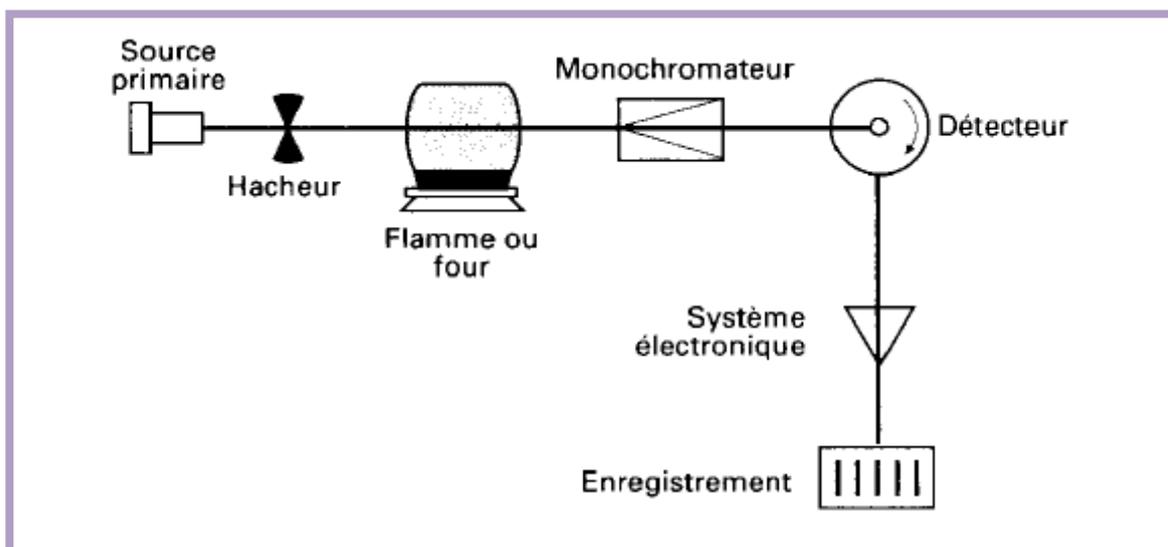


Figure 2: Schéma de base d'un appareil de Spectrométrie d'absorption atomique.

2.2.2. L'analyse par rayons X (PIXE)

Le principe de la PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*) est lié à l'atome et son cortège d'électrons. Le scénario se décompose en 3 phases (*Chassot ,2004*) :

- En pénétrant dans l'échantillon à analyser, une particule du faisceau éjecte un électron proche du noyau d'un atome qui sera excité.
- Ce dernier ne reste pas dans l'état excité, un électron d'une orbite supérieure viendra combler le vide laissé lors de l'excitation.
- Lors de ce réarrangement, l'atome émet un rayon X caractéristique pour libérer son excès d'énergie. Chaque élément chimique possède un rayon X caractéristique. Une fois ce dernier détecté, la reconnaissance des éléments contenus dans l'échantillon est possible.

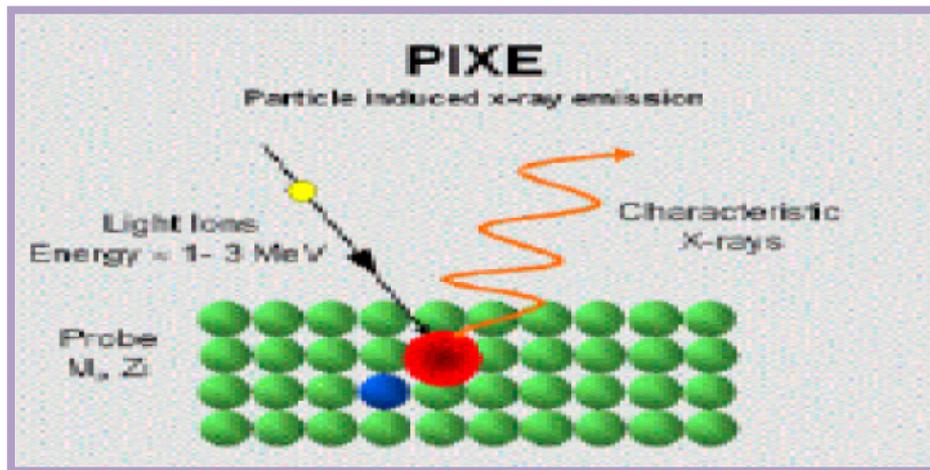


Figure 3: Schéma illustrant le principe de la PIXE

2.2.3. La spectrométrie par fluorescence X (XRF : X-Ray Fluorescence)

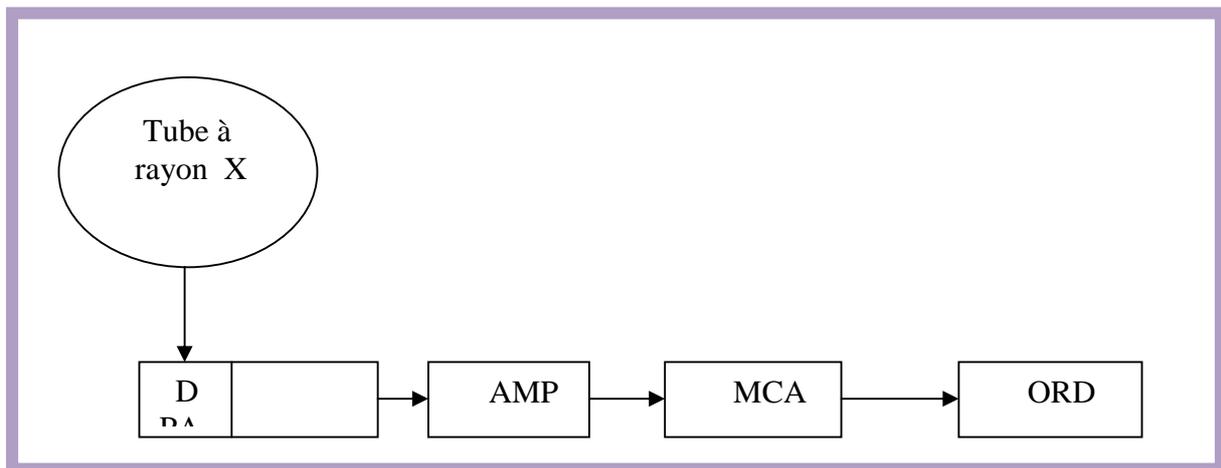
Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques pénétrants dont la longueur d'onde est dix mille fois plus petite que celle de la lumière. Ils ont été découverts par hasard en 1895 par Wilhelm RÖNTGEN.

La spectrométrie par fluorescence X permet l'analyse qualitative et quantitative des éléments dont les numéros atomiques (Z) sont supérieurs ou égaux à 13. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'environnement, la géologie, la minéralogie et la biologie.

- Principe

L'échantillon est bombardé par un rayonnement X issu d'une source radioactive. Ainsi l'atome devient excité, ce qui génèrera un déplacement de l'électron vers l'orbite supérieure. La case quantique laissée vide l'électron éjecté sera prise par un électron d'un niveau plus élevé avec une énergie supérieure à celle de l'électron éjecté. (Kalnicky et al., 2001).

La différence d'énergie (ΔE) des deux électrons est alors émise sous forme de rayon X caractéristique de cet atome. Et ainsi on peut déterminer la nature de l'élément irradié. (Loupilov et al., 2001).



D : détecteur AMP : amplificateur PA : préamplificateur
MCA : analyseur multi canal ORD : ordinateur

Figure 4: Schéma du spectromètre de fluorescence X (XRF).

2.2.4. Analyse par activation neutronique

2.2.4.1. Principe de la méthode d'Analyse par Activation Neutronique (AAN)

Dans son principe, la méthode d'Analyse par Activation Neutronique remonte à la découverte de la radioactivité artificielle par Frédéric et Irène Joliot-Curie en 1934.

L'analyse par activation neutronique auprès d'un réacteur de recherche est une méthode d'analyse élémentaire non destructive, très sensible vis-à-vis de beaucoup d'éléments, sélective (l'élément est identifié sans ambiguïté) particulièrement bien adaptée pour analyser la **pureté** d'un **échantillon** tant sur le plan qualitatif que quantitatif. (Belamri, 2009)

La méthode consiste à **irradier** un échantillon par un flux de **neutrons**. Les différents constituants contenus dans l'échantillon subissent alors des réactions **nucléaires** qui conduisent à la formation d'**isotopes** instables qui sont alors identifiés et quantifiés par l'étude de leur **spectre** de **rayons γ** . (Saeid Hosseini et al., 2009)

L'irradiation d'un échantillon, contenant en général plusieurs éléments, conduit à la production d'une multitude de radionucléides dont l'analyse peut être réalisée de deux manières :

- L'échantillon irradié est analysé après avoir subi une séparation chimique. Cette méthode destructive, dite méthode radiochimique (RNAA), permet la détermination d'une soixantaine d'éléments avec une limite de détection inférieure à 1 ppb (10^{-9} g/g).
- L'échantillon irradié est gardé intact, l'analyse est faite en tirant profit de la différence des périodes des éléments formés, en effectuant des mesures à des intervalles de temps successifs. Cette méthode non destructive, dite méthode instrumentale (INAA), permet la détermination de beaucoup d'éléments avec une grande limite de détection.

Dans ce qui suit, on se limitera à la technique instrumentale ; La procédure d'analyse par activation neutronique instrumentale comprend les étapes suivantes :

- Préparation des échantillons
- Irradiation neutronique dans le réacteur nucléaire

- Mesure des rayonnements gamma de l'échantillon irradié
- Interprétation des spectres gamma en termes d'éléments et de concentrations.

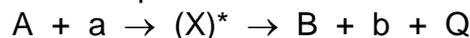
2.2.4.2. Irradiation de l'échantillon

Le choix du site d'irradiation dépend de la réaction utilisée ; le réacteur dispose de deux sites d'irradiation par voie pneumatique pour les courtes périodes, l'un dans le cœur du réacteur et l'autre dans la colonne thermique, et deux sites d'irradiation dans le cœur pour les longues périodes.

- Principe

Le but de l'irradiation est de créer des radio-isotopes qui pourront être identifiés avec certitude et quantifiés avec précision après irradiation. Aussi, ces radio-isotopes doivent avoir une probabilité non négligeable d'être produits à partir des éléments à doser et leur durée de vie devra être suffisamment longue pour permettre leur détection. Pour doser la totalité des éléments, il est nécessaire de faire appel à plusieurs modes d'irradiation. Dans la pratique, le choix sera fait en fonction des propriétés des radio-isotopes créés dans l'échantillon à partir du ou des éléments à doser et des autres éléments présents. (*Capannesi et al., 1978*) , (*Bruno et al., 1980*)

L'analyse nucléaire est basée principalement sur les réactions nucléaires. Une réaction nucléaire peut être décrite par :



Où :

- a = particule incident au rayonnement
- A = noyau cible
- (X) = noyau composé à l'état intermédiaire sous excitation élevée
- B = noyau radioactif
- b = particule émise au rayonnement
- Q = l'énergie de réaction [la quantité d'énergie dégagée ou absorbée durant la réaction]

Lorsqu'une interaction se produit plusieurs événements peuvent se produire :

- La diffusion de la particule incidente avec possibilité de transfert de l'énergie au noyau cible.
- Excitation temporaire du noyau suivie d'une désexcitation instantanée de l'ordre de 10^{-14} s à travers l'émission de particulier subatomique et de rayonnements β et/ou γ .
- Excitation temporaire suivi d'une désexcitation instantanée et d'une transformation du noyau cible en d'autres noyaux avec un nombre de particules subatomique différents.
- Pour beaucoup de cas, le noyau transformé subira une désexcitation γ caractéristique retardée en émettant des particules nucléaires ou des rayonnements β et/ou γ .

Le résultat d'une irradiation comporte deux phases distinctes durant lesquelles se produit l'émission des particules et celles des rayonnements β et/ou γ .

La première phase se produit durant l'interaction nucléaire et la seconde se produit après l'interaction nucléaire.

Les deux phases offrent des potentialités d'utilisation en analyse.

En principe, toutes les méthodes nucléaires d'analyses se rejoignent en deux types de techniques d'analyse dépendant de la phase prise en considération dans le processus d'analyse :

- prompt analysis : la mesure des radiations se fait pendant l'interaction
- delayed analysis : la mesure des radiations se fait pendant la désintégration

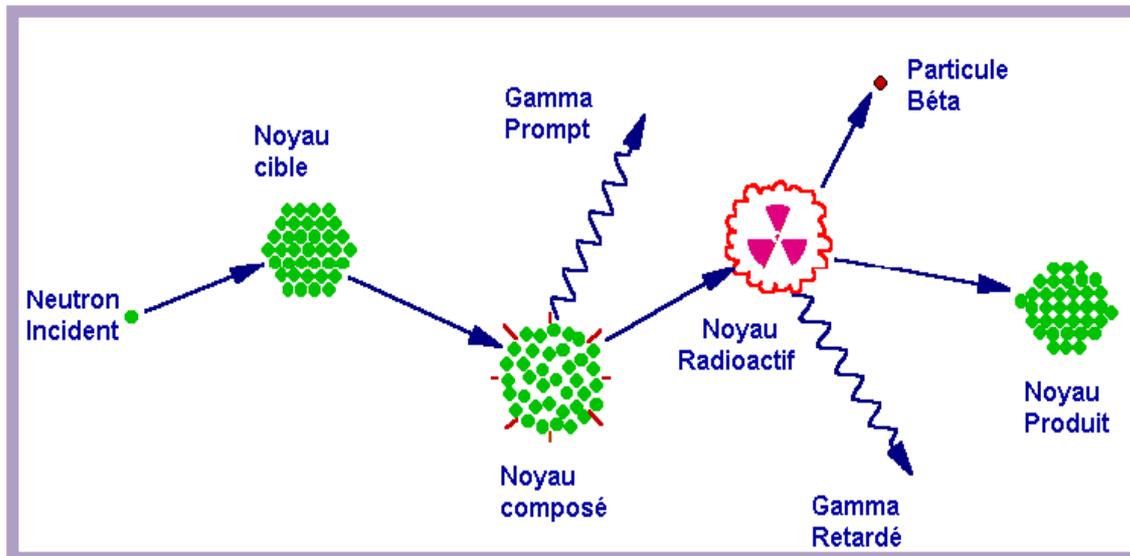


Figure 5: Diagramme illustrant le processus de la capture neutronique par un noyau cible suivi d'une émission de rayons gamma.

Chacune de ces réactions se produit avec une probabilité liée à l'énergie d'excitation du noyau composé qui est lié à l'énergie du neutron incident.

Le nucléide résultant est caractérisé par :

- Sa demi-vie $T_{1/2}$
- Son temps de décroissance ;
- L'énergie des radiations émises lors du processus de décroissance.

On mesure donc à l'aide d'un détecteur semi-conducteur au germanium le spectre de rayons gamma émis lors de la désexcitation du noyau final. On choisit pour la mesure de chaque élément un pic photoélectrique le plus intense et le plus dégagé de chevauchements correspondant à l'absorption d'un rayon γ par le détecteur. L'aire de ce pic est une mesure de l'abondance de l'élément initial.

2.2.4.3. Equation fondamentale de l'AAN et méthode de calcul

Soit un échantillon de masse m , de section efficace microscopique d'activation σ_a , de constante de décroissance radioactive λ et de masse atomique A , irradié par un flux neutronique ϕ , la variation de nombre d'atomes radioactifs formés pendant l'irradiation est donné par l'expression (De Soete et al., 1972) :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N\phi m}{A} \sigma_a - \lambda n \quad (1)$$

ou:

n : nombre d'atomes radioactifs formés à l'instant

N : nombre d'Avogadro : $6.02 \cdot 10^{23}$

θ : abondance de l'isotope

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

λ : constante de décroissance radioactive de l'isotope radioactif formé

($\lambda = \ln 2 / T$)

T : demi-vie de l'isotope radioactif formé

σ_a : section efficace microscopique de capture de l'élément cible

Le nombre d'atomes radioactifs formés à la fin de l'irradiation sera :

$$n = \frac{N\sigma_a\theta m}{A\lambda} \varphi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

t étant la durée d'irradiation et φ le flux de neutrons par unité de surface

L'activité de l'échantillon à la fin de l'irradiation sera :

$$A = \lambda n = \frac{N\sigma_a\theta m}{A} \varphi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

$$A = A_\infty(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

Le terme $A_\infty = \frac{N\sigma_a\theta m}{A\lambda} \varphi$ est l'activité à saturation, celle que prendrait l'échantillon pour un temps d'irradiation infini.

Si t_d représente la durée de décroissance entre la fin de l'irradiation et le début du comptage, l'activité de l'échantillon au début du comptage sera :

$$A = \lambda n = \frac{N\sigma_a\theta m}{A} \varphi(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_d} \quad (5)$$

Si t_c représente la durée du comptage et ε l'efficacité de la chaîne de mesure, le nombre de coups compté sera :

$$A_N = \varepsilon \gamma \int_0^{t_c} \frac{N\sigma_a\theta m}{A} \varphi(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_d} e^{-\lambda t} dt \quad (6)$$

$$A_N = \varepsilon \gamma \frac{N\sigma_a\theta m}{A} \varphi(1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_d} \frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda} \quad (7)$$

Où :

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

γ : intensité des gammas émis

En posant :

$S = 1 - e^{-\lambda t}$ Facteur de saturation

$D = e^{-\lambda t_d}$ Facteur de décroissance

$C = \frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda}$ Facteur de décroissance durant le comptage

La masse de l'élément recherché est donnée par :

$$m = \frac{1}{SDC} \frac{A}{N\sigma_a\theta\gamma\varphi} \frac{AN}{\varphi} \quad (8)$$

Remarque

La sensibilité relative de détection pour une variété d'éléments dépend de leurs propriétés nucléaires telles que :

- Section efficace de réactions des neutrons
- Demi-vie $t_{1/2}$ du radionucléide
- Poids atomique et fraction d'abondance des isotopes (père) de l'élément
- Le schéma de décroissance du radionucléide

2.2.4.4. Détermination de la concentration des éléments dans un échantillon inconnu

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

$$C_{ie} = \frac{m_{elm}}{V} \quad (9)$$

Où :

C_{ie} : la concentration de l'élément d'intérêt dans l'échantillon

m_{elm} : la masse calculée de l'élément dans l'échantillon

V : le volume d'air aspiré.

Le dosage des éléments dans un échantillon par la technique AAN peut se faire soit par la voie absolue soit par la voie relative.

Voie relative

La méthode relative est généralement simple et rapide.

Son principe consiste à l'irradiation de l'échantillon et le standard dans les mêmes conditions pour que le terme $\frac{1}{S} \frac{A}{N \cos \theta \sin \varphi} \frac{1}{\rho}$ soit identique pour l'échantillon et le standard ; on pourra alors écrire :

$$\frac{m_{ie}}{m_{is}} = \frac{D_s}{D_e} \frac{C_s}{C_e} \frac{A_{Ne}}{A_{Ns}} \quad (10)$$

Où :

m_{ie} : masse de l'élément i dans l'échantillon

m_{is} : masse de l'élément i dans le standard

D_e : facteur de décroissance de l'échantillon (temps de décroissance t_{de})

D_s : facteur de décroissance du standard (temps de décroissance t_{ds})

C_e : facteur de comptage de l'échantillon (temps de comptage t_{ce})

C_s : facteur de comptage du standard (temps de comptage t_{cs})

A_{Ne} : surface nette du pic de l'échantillon

A_{Ns} : surface nette du pic du standard

$$m_{ie} = \frac{D_s}{D_e} \frac{C_s}{C_e} \frac{A_{Ne}}{A_{Ns}} m_{is} \quad (11)$$

Dans la méthode comparative que nous avons utilisée, le facteur de comptage de l'échantillon C_e et le facteur de comptage du standard C_s se simplifient car le temps de comptage des échantillons et des standards sont les mêmes.

En termes d'intensités, on détermine la masse des éléments contenus dans l'échantillon par comparaison avec la masse connue des éléments dans le standard selon l'expression suivante :

$$m_{ie} = m_{is} \left(\frac{I_{ech} * e^{\lambda t_{dech}}}{I_{st} * e^{\lambda t_{dst}}} \right) \quad (12)$$

m_{ie} : masse de l'élément i à doser dans l'échantillon.

m_{is} : masse de l'élément i à doser dans le standard.

I_{ech} : l'intensité de l'élément à doser dans l'échantillon.

I_{st} : l'intensité de l'élément à doser dans le standard.

λ : constante radioactive de l'élément à doser.

td : temps de décroissance.

La masse m_{ie} (μg) d'un élément i dans le standard est donnée par la formule suivante :

$$m_{is} = m_s * C_{is} \quad (13)$$

m_s : masse du standard préparé ou pesé en (g).

C_{is} : concentration de l'élément dans le standard en ($\mu\text{g/g}$).

Dans le cas où l'élément considéré se retrouve au niveau des blancs utilisés, alors la formule sera corrigée et devient :

$$m_{ie} = m_{is} \frac{(I_{ech} * e^{\lambda t d_{ech}} - I_{blf} * e^{\lambda t d_{blf}})}{(I_{st} * e^{\lambda t d_{st}} - I_{bla} * e^{\lambda t d_{sblat}})} \quad (14)$$

m_{ie} : masse de l'élément i à doser dans l'échantillon.

m_{is} : masse de l'élément i à doser dans le standard.

I_{ech} : l'intensité de l'élément à doser dans l'échantillon.

I_{blf} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc filtre.

I_{bla} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc aluminium.

I_{st} : l'intensité de l'élément à doser dans le standard.

λ : constante radioactive.

I_{blf} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc filtre.

I_{bla} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc aluminium.

td : temps de décroissance.

td_{ech} : temps de décroissance de l'échantillon.

td_{st} : temps de décroissance du standard.

td_{blf} : temps de décroissance blanc filtre.

td_{sba} : temps de décroissance du blanc aluminium.

Voie absolue

Cette méthode consiste à calculer la masse des éléments présents dans l'échantillon et absents dans le standard. Par cette méthode l'activité peut être déterminée si on connaît le flux, la section efficace de capture, l'efficacité du détecteur, etc. La précision sur cette activité est liée aussi à la détermination de ces paramètres qui ne sont pas connus avec précision.

La formule de calcul de la masse est la suivante :

$$m_{ie} = \frac{I * M * \lambda}{N_A * \theta * \Phi * \epsilon * \gamma * \sigma (1 - e^{-\lambda t_i}) * e^{-\lambda t_d} * (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (15)$$

Où :

m_{ie} : la masse de l'élément à doser dans l'échantillon.

N_A : nombre d'Avogadro = $6,023 * 10^{23}$

M : la masse molaire de l'élément.

λ : constante radioactive ($\lambda = \ln 2/T$) où T = période de l'élément).

θ : l'abondance isotopique.

Φ : flux neutronique ($\Phi = 10^{13}$ neutrons / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$).

γ : rapport d'embranchement.

σ : section efficace.

ϵ : l'efficacité du détecteur.

t_i : temps d'irradiation.

t_d : temps de décroissance.

t_c : temps de comptage.

I : intensité du pic.

2.2.4.5. Choix du temps d'irradiation

La saturation par activation d'un échantillon est atteinte après un temps d'irradiation égale à 5 fois la période de l'élément à analyser. Pratiquement, le temps d'irradiation est fixé expérimentalement après un certain nombre d'expériences.

Sur la base de cette expérience, il est établi le tableau 10 :

Tableau 10: Le temps d'irradiation en fonction de la période et du type de l'échantillon

Type d'échantillon	Élément à courte période	Élément à moyenne et longue période
Biologique	1 à 5 minutes	8 à 16h
Géologique	10 à 30 secondes	6 à 8h

Il faut choisir d'une part la masse de l'échantillon de telle manière que l'activité globale ne dépasse pas une certaine valeur (pour qu'elle soit manipulable sans danger), et d'autre part le temps d'irradiation compatible avec les éléments à doser. En effet si l'on veut doser des éléments qui produisent par capture un isotope à courte vie, de l'ordre de quelques minutes à quelques heures, il est évidemment inutile d'irradier longtemps puisque le facteur de saturation est obtenu au bout de 3 ou 4 $T_{1/2}$ de l'élément produit ; par exemple pour doser l'aluminium par la réaction $^{27}\text{Al}(n,\gamma) ^{28}\text{Al}$, $T_{1/2} = 2,24$ min (g de 1778,9 keV), il suffit d'irradier 1 dizaine de minutes, si l'on irradiait quelques heures un échantillon par exemple du silicoaluminate de sodium, on obtiendrait une très forte activité de ^{24}Na ($t_{1/2} = 15$ h), qui outre une section efficace de capture importante, possède un spectre d'énergie avec 3 photons g de haute énergie (1368, 2754 keV) donnant une contribution Compton importante. Ainsi en adoptant une irradiation courte on a la sensibilité maximale sur l'aluminium et une faible activation du sodium, etc.. Quelquefois au contraire, la détermination des concentrations de certains éléments nécessitent des irradiations longues si l'on veut avoir une bonne sensibilité pour des éléments qui conduisent à des périodes $T_{1/2}$ grandes.

Exemple: cas du Se (^{75}Se 120 j), Hg (46 j), Fe (^{59}Fe (45j) Co (^{60}Co , 5,3 a) etc on est alors amené selon la concentration attendue à irradier entre 1 journée à 1 semaine, quitte à laisser refroidir la source pour laisser décroître les activités indésirables à courte ou moyenne période : ^{24}Na , etc.

2.2.4.6. Choix du temps de refroidissement

Après irradiation, beaucoup de tests de mesures sur une longue période sont effectués pour déterminer le temps optimal de refroidissement du point de vue niveau de comptage et niveau radiologique. Le temps de refroidissement pour le même élément diffère d'une nature d'échantillon à une autre et du niveau de concentration de ces éléments. Il faudra aussi tenir compte des périodes de ces éléments.(tab.11)

Tableau 11: Temps de refroidissement de quelques éléments.

Nature	Élément	Courte période	Longue période
Biologique	Cl	10 mn	/
	Al	2 à 3 mn	/
	Na, P Br	/	3 à 7 jours >15 jours
Géologique	Ti, Mg	>10mn	/
	Al, Mn		
	Na Sc	/	7 à 9 jours >15 jours

2.2.4.7. Avantages et inconvénients de la NAA

Inconvénients :

La NAA présente toute fois les inconvénients suivants :

- Dans certains cas l'indisponibilité des standards adaptés ;
- Impossibilité de déterminer la limite de détection sans présence de standard préalablement préparé concernant la méthode relative;
- L'effet de l'auto absorption des neutrons dans l'échantillon et le standard.
- L'inconvénient majeur de cette méthode par activation neutronique est la nécessité d'une installation onéreuse qui est Réacteur nucléaire.
- Un autre inconvénient lié aux méthodes nucléaires, est la génération de déchets radioactifs, ce qui risque de poser un problème de radioprotection et gestion de déchets radioactifs.

Avantages :

Cette technique occupe une place très particulière parmi les méthodes analytiques pour plusieurs points de vue.

- par son incomparable sensibilité pour le dosage d'éléments de très faibles concentrations.
- Pour la plupart des techniques analytiques physico-chimiques la variation de sensibilité d'un élément à l'autre est relativement peu importante (*Innocenzio et al., 1998*) , (*Ziemacki et al.,2003*)

En général les éléments abondants sont faciles à doser, et les limites de détection empêchent essentiellement le dosage des éléments peu abondants. La capture neutronique est le schéma le plus important pour rendre compte de la nucléo genèse, processus qui a permis la formation des planètes du système solaire, composées d'éléments lourds, de Z élevé, alors que le soleil dont elles sont issues est constitué d'éléments très légers.

- C'est une des rares techniques qui permet le dosage d'une large gamme d'éléments.

Dans une autre technique, à supposer qu'un élément aussi peu abondant soit détecté, le signal de l'élément abondant couvrirait celui de l'élément faible jusqu'à le rendre indétectable.

Hormis l'abondance naturelle, certains éléments peuvent être plus ou moins faciles à doser suivant le schéma de désexcitation des niveaux du noyau descendant. Le phosphore, par exemple, ne peut être dosé par cette méthode : exceptionnellement le noyau-fils est directement produit à son état fondamental par la radioactivité β . Elle n'est donc pas suivie d'émission γ . Le plomb ne donne qu'un radioélément de période trop courte pour être mesuré pratiquement.

- c'est la seule méthode non-destructive qui permet une analyse de l'ensemble du volume d'un échantillon. (*Djingo* *et al.*, 1991) , (*Moau* *et al.*, 1991)

Ceci se comprend facilement : les neutrons ne sont pas arrêtés par les barrières de potentiel atomiques qui arrêtent les particules chargées très près de la surface d'un matériau. Après capture, les rayons γ qui sont des ondes électromagnétiques, en général de haute énergie, sont aussi très pénétrants. A l'aller des neutrons comme au retour des rayons gamma vers le détecteur, l'absorption reste marginale; elle est d'ailleurs prise en compte par de petites corrections linéaires.

Les spectres enregistrés avec leurs paramètres d'accompagnement sont traités par un programme d'ordinateur qui donne les teneurs dans les éléments détectés.

2.2.4.8. Sources d'erreurs liées à l'utilisation de la NAA

Plusieurs sources d'erreurs dans la technique d'analyse par activation neutronique peuvent affecter la sensibilité et détériorer la précision. Parmi elles, on peut citer :

➤ **Erreurs physiques**

Les erreurs physiques qui peuvent intervenir lors du calcul des concentrations sont classées de la manière suivante :

- Erreurs liées aux mesures des activités (fluctuation statistiques lors de la décroissance radioactive)
- Erreurs liées à l'auto absorption des neutrons pendant l'irradiation
- Erreurs liées à l'hétérogénéité du flux : le flux neutronique est variable pendant l'irradiation et au long de la capsule d'irradiation ; et pour minimiser cette erreur, il faut diminuer l'épaisseur de la cible et d'irradier le standard et l'échantillon dans le même site et en même temps.

➤ **Erreurs chimiques**

Les erreurs chimiques peuvent être liées à plusieurs raisons telles que la contamination de la cible pendant sa préparation ou alors un mauvais traitement du standard ou alors à une faible précision dans les procédés nécessitant des séparations chimiques.

2.2.4.9. Les réactions d'interférences

➤ Interférences primaires

La réaction nucléaire désirée est provoquée principalement par les neutrons thermiques. Mais il se peut aussi qu'une réaction interférente prend place avec les neutrons rapides comme pour le cas des réactions nucléaires suivantes



D'où la détermination du Cr dans une matrice riche en Fe en utilisant un réacteur à eau légère peut donner des résultats erronés. Une situation pareille est rencontrée lors de la détermination du Cr dans le sang qui est riche en Fe.

Tableau 12: Exemple de réaction d'interférences primaires

Réactions analytiques	Réactions d'interférences primaires
$^{23}\text{Na} (n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	$^{24}\text{Mg} (n,p) ^{24}\text{Na}, ^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$
$^{26}\text{Mg} (n,\gamma) ^{27}\text{Mg}$	$^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Mg},$
$^{37}\text{Cl} (n,\gamma) ^{38}\text{Cl}$	$^{41}\text{K} (n,\gamma) ^{38}\text{Cl}$
$^{45}\text{Sc} (n,\gamma) ^{46}\text{Sc}$	$^{46}\text{Ti} (n,p) ^{46}\text{Sc}$
$^{51}\text{V} (n,\gamma) ^{52}\text{V}$	$^{55}\text{Mn} (n,\gamma) ^{52}\text{V}$
$^{50}\text{Cr} (n,\gamma) ^{51}\text{Cr}$	$^{54}\text{Fe} (n,\gamma) ^{51}\text{Cr}$
$^{55}\text{Mn} (n,\gamma) ^{56}\text{Mn}$	$^{56}\text{Fe} (n,p) ^{56}\text{Mn}$
$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$	$^{64}\text{Zn} (n,p) ^{64}\text{Cu}$
$^{65}\text{Cu} (n,\gamma) ^{66}\text{Cu}$	$^{66}\text{Zn} (n,p) ^{66}\text{Cu}$

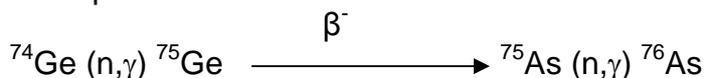
➤ Interférences secondaires

Les interférences secondaires sont définies comme le montre la réaction suivante :

β^-
 Nucléide 1(n,γ) Nucléide 2 $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$ Nucléide 3 (n,γ) Nucléide 4

Quand le nucléide 4 est considéré comme indicateur de l'élément qui nous intéresse, la réaction de décroissance précédente présente une interférence secondaire.

Exemple :



Pour la détermination de l'Arsenic, cette interférence est importante lors de l'analyse du cristal de Germanium de haute pureté.

➤ Interférences spectrales des rayons γ

Il est possible que deux radionucléides émettent des gamma d'énergies proches ; c'est ce qu'on appelle interférences spectrales. La meilleure façon pour résoudre ce problème est d'avoir un détecteur de très bonne résolution couplé avec un programme d'analyse de pics très efficace. Ceci peut nous fournir une solution instrumentale au problème.

Une autre façon de résoudre le problème est de se baser sur la différence de demi-vie entre les deux radionucléides.

L'ajustement du temps d'irradiation peut aussi être utilisé pour favoriser la mesure d'un radionucléide. De ce fait une courte irradiation est un bon moyen pour discriminer entre les radionucléides de courtes et de longues périodes.

Le dosage de certains éléments nécessite parfois un filtre qui agit par rapport à l'énergie du neutron. C'est le cas de l'uranium par les neutrons épithermiques. En effet, la section efficace de l'uranium reste élevée pour ces neutrons alors qu'un grand nombre de radioéléments disparaissent du spectre en raison d'une faible section efficace au flux épithermiques, ce qui favorise l'émergence du pic de l'uranium.

Tableau 13: Interférences spectrales de rayons gamma de quelques éléments.

Elément	Energie(Mev)	Interférence possible	Raie de chevauchement
¹⁷⁷ Lu	208	^{177m} Lu	208
²³⁹ Np	228.27	^{177m} Lu	229
¹⁴¹ Ce	146	⁵⁹ Fe	143
⁹⁵ Zr	757	¹⁵⁴ Eu	757
⁵⁸ Co	811	¹⁵² Eu	811
¹⁶⁰ Tb	299	²³³ Pa	300
¹⁴⁰ La	1297	¹⁵² Eu	1299

Matériels et méthodes

1. Objectif

Notre contribution par ce travail est d'étudier la qualité de l'air en milieu urbain. On se propose dans ce travail d'étudier la pollution de l'air par les métaux lourds contenus dans les aérosols prélevés dans un site urbain sur les hauteurs d'Alger à 200 m par rapport au niveau de la mer.

Tant que c'est la santé humaine qui est mise en jeu, connaître la qualité de l'air que nous respirons est d'une grande priorité. Ainsi, des solutions pourront être apportées pour y remédier. Citons comme exemple : l'installation de stations de surveillance de la qualité de l'air au niveau des centres urbains à densité importante ce qui aide à suivre en temps réel d'éventuels épisodes de pollution.

2. Description du site de prélèvement

Le choix d'un site d'étude est en fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller et du risque encouru d'une exposition des êtres humains à des niveaux variables d'une pollution. Pour l'étude de la pollution atmosphérique en milieux urbains, par les particules inhalables en particulier les métaux lourds, nous avons en fonction de l'objectif fixé et des moyens disponibles, opté pour un site urbain de proximité, c'est à dire un site influencé par des sources émettrices de polluants du site choisi qui sont liées surtout au trafic routier, mais aussi à la forte densité humaine. (fig. 6)

Le lieu de prélèvement se trouve au niveau de la terrasse de la tranche A du CRNA localisé sur les hauteurs d'Alger à 200 m par rapport au niveau de la mer, entre deux routes à grande circulation ; d'où l'importance du nombre de véhicules qui transitent à coté du site de prélèvement.

Mis à part ces deux grandes routes au voisinage du site il n'y a pas d'autres sources émettrices de pollution.

Par ce choix, il est question de connaître la quantité totale de pollution produite par le trafic routière dans le but de prendre des mesures à fin de réduire les risques que pose la pollution atmosphérique d'origine automobile sur la santé .

Toutefois, cette source de pollution est toujours préoccupante parce que :

- Le nombre de véhicules sur nos routes et autoroutes a augmenté au fil des ans .
- Plus de gens conduisent des véhicules personnels qui consomment beaucoup de carburant (essence et diesel) et qui sont par conséquent très polluants.(tab.14)



Figure 6: Carte du centre d'Alger. (Europa Technologies 2009)

Tableau 14: Quelques caractéristiques du site de prélèvement.

Caractéristiques du site de prélèvement	
Superficie	1,8 Km ²
Population	Environ 2,2 millions d'habitants en 2009
Hauteur par rapport à la mer	200 m

En effet, certaines particules sont émises dans les gaz d'échappement des véhicules tandis que d'autres sont formées dans l'atmosphère par des réactions chimiques entre les polluants émis dans les gaz d'échappement. Les particules fines aggravent les symptômes des personnes atteintes de maladies respiratoires ou cardiovasculaires.

3. Matériels et méthodes

3.1. Matériels

3.1.1. L'échantillonneur

Un appareil LVS "Low Volume Sampler", pour aspirer l'air, avec un débit plus ou moins constant (petites variations dues au colmatage) de $8.7\text{m}^3/\text{h}$; cet appareil nous donne aussi le temps de prélèvement et la pression.

Un porte filtre ou cassette (Fig. 7) utilisé comme support de filtre pendant la collecte.

Les filtres utilisés pour la collecte des aérosols sont en ester de cellulose de porosité de $0.8\mu\text{m}$ (type AA) et d'un diamètre de 37 mm. (Fig. 8)



Figure 7: porte filtre ou cassette



a) Filtre avant prélèvement



b) Filtre après prélèvement

Figure 8: Les filtres en ester de cellulose

a) Filtre avant prélèvement

b) Filtre après prélèvement

3.1. 2. Réacteur nucléaire

Les différentes opérations d'irradiations, que nous avons réalisées ont été exécutées dans un des canaux du réacteur NUR de Draria.

Le réacteur nucléaire est un dispositif de contrôle des réactions en chaîne.

Il est très loin la meilleure source de neutrons avec un flux allant jusqu'à 10^{14} n/cm².s. Un réacteur nucléaire peut produire un faisceau de neutrons très intense avec différents types d'énergie (thermique, épithermique, rapide).

Le Réacteur de Recherche NUR est un réacteur ouvert de type piscine. Il est doté d'une grande flexibilité expérimentale et sa puissance nominale est de un (1) Mégawatt.

Le flux neutronique thermique de ce réacteur atteint la magnitude de 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 :

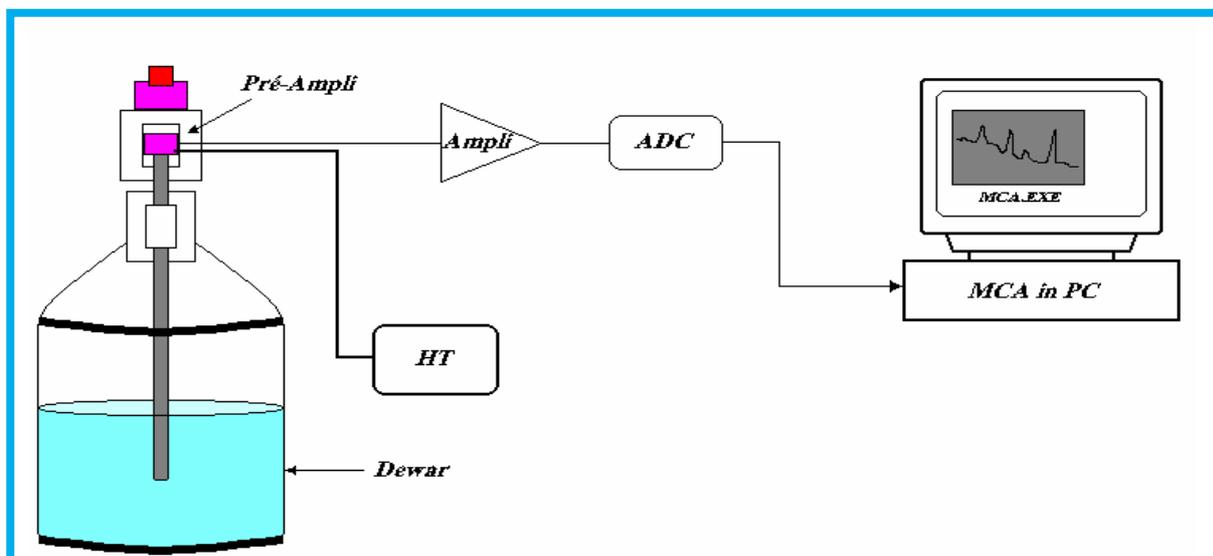
- Le cœur.
- Le système de refroidissement.
- La protection biologique.
- Les canaux d'irradiation.

3.1. 3. Chaîne de comptage

Les détecteurs semi-conducteurs sont de plus en plus substitués aux compteurs à scintillations dans les expériences de physique nucléaire et de microanalyse. La

cause réside dans leur résolution nettement supérieure (aptitude à discerner deux raies voisines).

Le traitement analogique du signal est effectué par une chaîne électronique qui est illustrée par le schéma suivant. (Fig. 9)



Pré-ampli : préamplificateur

Ampli : amplificateur

ADC : convertisseur analogique numérique

MCA : analyseur multicanal

HT : Haute Tension

Dewar : conteneur à azote liquide

Figure 9: Schéma de configuration d'une chaîne de spectrométrie gamma.

3.1.3.1. Haute tension (H.T.)

C'est la tension de polarisation du détecteur à semi-conducteur.

3.1.3.2. Détecteur

La fonction du détecteur est de convertir l'énergie déposée par le photon gamma en une impulsion électrique. Dans notre cas, nous avons utilisé un détecteur à semi-conducteur dont le cristal sensible est le germanium de haute pureté Ge (HP).

Le détecteur se compose essentiellement d'un cristal de germanium de haute pureté ; ainsi lors de l'interaction des photons avec la matière du détecteur, un grand nombre de paires d'électron-trou est formé et sous l'action d'un champ électrique intense qui règne dans la zone utile du détecteur, les porteurs de charges se dirigent selon leur signe vers l'un ou l'autre des électrodes.

3.1.3.3. Préamplificateur

Pour que le signal électronique provenant du détecteur soit utilisable, il faut le transformer en impulsion électrique. En fait le signal subit une première amplification linéaire dans le préamplificateur.

Afin d'augmenter le rapport signal sur le bruit de fond, il est nécessaire de placer le préamplificateur le plus près possible du détecteur.

3.1.3.4. Amplificateur

La fonction de l'amplificateur pour la spectroscopie nucléaire est de prendre en charge un signal de bas niveau, disponible aux bornes du préamplificateur, après amplification de ce dernier et la mise en forme des caractéristiques qui rendent ce signal, plus apte à être analysé.

3.1.3.5. ADC ou Analogique Digital Convertisseur

Il convertit le signal (0-10v) analogique (l'amplitude de l'impulsion) qui arrive de l'amplificateur en un nombre digital qui est mémorisé et affiché sous forme d'un spectre d'impulsions sur le MCA. Ainsi l'ADC produit un nombre d'impulsions proportionnel à la hauteur de l'impulsion. Ce nombre détermine le canal où l'impulsion sera stockée dans le MCA.

3.1.3.6. MCA ou Multi Canal Analyser

La fonction du MCA consiste à sélectionner les impulsions suivant leurs amplitudes, le MCA est basé sur 3 fonctions, chacune a sa propre mémoire contenant les instructions d'opérations ainsi qu'une mémoire utilisée pour l'acquisition, le stockage des paramètres d'analyse.

La mémoire du MCA est arrangée en série de canaux et chaque canal est capable de stocker un très grand nombre d'impulsions.

3.2. Méthodes

3.2.1. Mode de prélèvement

La collection des échantillons a été effectuée durant une période de douze (12) mois, comme cité ci-dessous :

La durée de prélèvement permet de suivre le niveau de la contamination pendant 48h et 72h pour obtenir ainsi une moyenne représentative de la pollution de l'air. Ceci nous permet d'une part une charge importante sur le filtre et d'autre part limiter la saturation pour certains éléments pour ne pas affecter les conditions d'analyse. (Avino et al., 2003)

Après la collecte et la pesée, l'échantillon est déposé 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tout au long de la période des prélèvements, nous avons essayé d'enregistrer toute remarque pouvant influencer les résultats, afin de donner une bonne interprétation.

3.2.2. Le dosage des métaux lourds

Idéalement on doit analyser un standard avec les caractéristiques les plus proches possibles de la matrice des échantillons qu'on a l'intention d'étudier. Mais, comme il n'y avait pas de standards spécifiques (standards en filtre d'ester de cellulose), on a dû choisir des standards avec une composition organique qui a déjà été caractérisé par plusieurs autres méthodes analytiques.

Dans notre cas, en plus des standards chimiques que nous avons préparé et dont nous voulons calibrer par rapport aux standards recommandés par l'AIEA, nous avons utilisé 3 types de standards AIEA, à savoir le SL1 (sédiment), le V-9 (poudre

de coton de cellulose), et le x4 (XRFAIEA) (sédiment), dont la composition en éléments ainsi que les concentrations correspondantes sont connues.

3.2.2.1. Préparation des standards chimiques

Les standards chimiques sur matrice identique que les échantillons, à savoir les filtres d'ester de cellulose, sont préparés à partir de solutions mère ou étalons ICP-MS de 1000ppm ($\mu\text{g/ml}$) de concentration.

Pour des raisons de commodité et d'économie concernant le poids des échantillons, nous avons utilisé $\frac{1}{2}$ filtre d'ester de cellulose pour les standards et échantillons destinés à être analysés.

Nous avons donc procédé de la façon suivante :

20 μl sont prélevés à l'aide d'une micropipette et déposés sur des filtres vierges d'ester de cellulose de même nature que les filtres utilisés pour le prélèvement, disposés sur des béchers très propre, ensuite on les laisse sécher à l'air libre.

Pour chaque élément donné la masse déposée sur le filtre est de 20 μg par filtre.

Le choix des éléments déposés sur les filtres est conditionné par la disponibilité des étalons, de ce fait les éléments utilisés pour la préparation des standards chimiques sont : Sn, As, Cr, Cd, Zn, Se, Ag, V, Co, Fe, Li, Mn

3.2.2.2. Conditionnement des échantillons et standards pour analyse

Afin d'obtenir des concentrations élémentaires les plus précises tout en préservant les propriétés chimiques initiales ; nous avons suivi les étapes suivantes :

- Toujours dans le même esprit de précision des mesures, le poids des échantillons ainsi que les standards chimiques ou AIEA ont été mesurés sur une balance analytique de précision de 0.1mg.
- Les échantillons ainsi que les standards ont été enveloppés dans des feuilles en aluminium de grande pureté nucléaire (99.999%), puis mis ensemble dans un même paquet en aluminium très pur et organisé de manière à ce que les échantillons et les standards reçoivent le même débit neutronique.

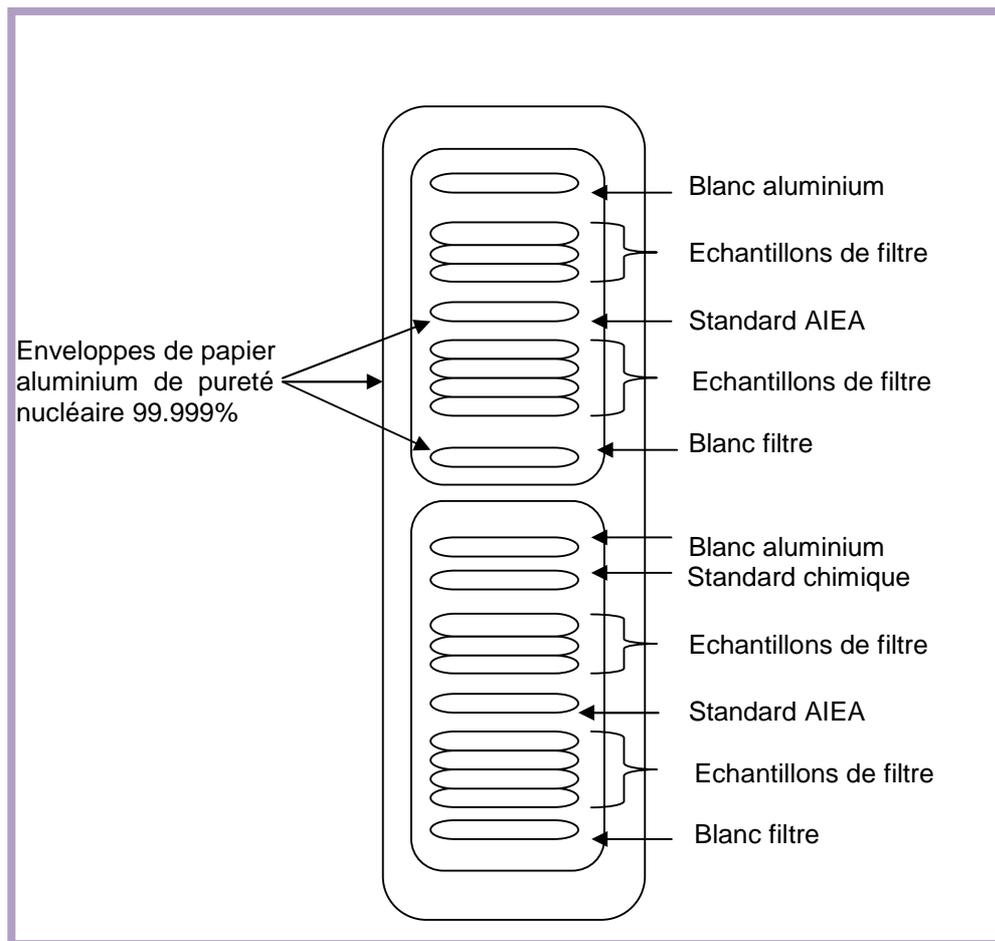


Figure 10: Schéma du conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à l'irradiation dans le cœur du réacteur NUR

L'emploi de plusieurs standards dans une telle expérience est très utile pour compléter le dosage des éléments. Ainsi on choisira l'un ou l'autre standard suivant le pic observé sur le spectre collecté.

3.2.2.3. L'irradiation

Les capsules contenant les échantillons et les standards ont été irradiées dans le réacteur NUR sous un flux neutronique thermique de puissance de l'ordre $2 \cdot 10^{13} \text{ n/Cm}^2 \cdot \text{s}$ pendant une durée de 6 heures.

3.2.2.4. Le refroidissement des échantillons

La durée de refroidissement des échantillons ou durée de décroissance dépend de la période des radionucléides à analyser.

Pour notre cas, et par mesure de radioprotection, nous avons choisi une durée de refroidissement de 7 jours. Une fois cette durée achevée, et dans des conditions de radioprotection strictes, nous procédons à la décapsulation et isolement des échantillons, ensuite au transfert de cette capsule au système de comptage.

Pour ce qui est de cette étape de refroidissement, deux conditions primordiales sont à respecter, à savoir :

- Avoir une activité suffisante pour la mesure

- Assurer la radioprotection du personnel manipulateur.

3.2.2.5. Procédures analytiques du dosage des métaux lourds

❖ Calibration de la chaîne de mesure

Une bonne mesure spectroscopique dépend de la calibration de la chaîne de mesure qui suit les étapes suivantes :

- La calibration de l'amplificateur en utilisant une source de cobalt 60 nécessaire pour l'analyse du spectre.
- Etalonnage en énergie : L'analyse du spectre nécessite l'alignement respectif des raies de la source d'étalonnage qui émet des photons gamma d'énergies connues aux canaux correspondants. Nous avons utilisé comme source de calibration la source d'Eu(152) qui couvre toute la gamme d'énergie qui nous intéresse.
- Etalonnage en efficacité : Pour une chaîne de spectroscopie, la connaissance de l'efficacité permet de retrouver l'activité d'une source radioactive ou, dans le cas de l'analyse par activation neutronique par voie absolue, de déterminer la concentration d'un élément dans l'échantillon ; en effet, lorsqu'il n'est pas possible d'appliquer la procédure relative en raison de l'absence du standard adapté au spécimen à doser, on applique la voie absolue qui nécessite la détermination de l'expression de l'efficacité. Elle est aussi utilisée pour établir des prévisions de comptage et déterminer les conditions de l'expérience telle que la durée d'irradiation, le niveau de flux et la durée de décroissance.

L'efficacité de la chaîne de détection est une fonction de l'énergie du photon gamma et de la distance source-détecteur.

A l'aide de logiciel du traitement des spectres GANAAS, nous avons déterminé l'expression de la courbe de régression efficacité en fonction de l'énergie.

Tableau 15 : Valeurs des efficacités en fonction de l'énergie

Energie (kev)	I (%)	Net	ϵ
244.46	7.5	13181	1.86×10^{-2}
344.31	26.5	41438	1.65×10^{-2}
444	2.8	4041	1.53×10^{-2}
779	12.7	12294	1.02×10^{-2}
964	14.4	12324	9.05×10^{-3}
1112	13.3	10697	8.51×10^{-3}
1407.82	20.7	14357	7.34×10^{-3}

L'évolution de l'efficacité en fonction de l'énergie, en utilisant une échelle Ln-Ln, est donnée par la courbe ci-dessous :

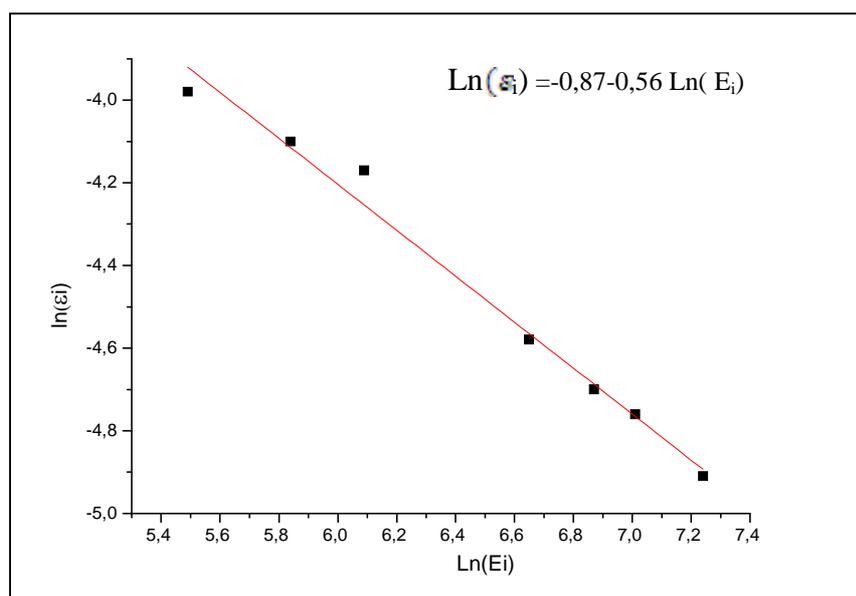


Figure 11 : Courbe d'efficacité en fonction de l'énergie

❖ Analyse des échantillons et des standards

Après l'irradiation et le refroidissement nécessaire, le radio-isotope produit est identifié à travers ses trois caractéristiques physiques : intensité des rayonnements émis, période radioactive et énergie des rayonnements émis.

La détection est faite à l'aide d'un détecteur au germanium hyper-pur ; les spectres sont enregistrés avec un analyseur multi canaux.

Ainsi, dans la salle de comptage, le détecteur est placé dans un château de plomb à basse teneur en matériaux radioactifs naturels qui le protège contre l'influence des autres échantillons à compter ou déjà comptés. Aussi il ne faut pas laisser dans la salle, des sources radioactives sans blindage de plomb.

Cette partie du travail a été réalisée en respectant les mêmes conditions expérimentales pendant toute la période de collection des résultats, à savoir la durée de collection qui est de 5000 secondes pour chaque échantillon.

• Analyse qualitative des résultats

Dans plusieurs cas, des problèmes d'identification et d'interprétation des résultats brut peuvent être posés, citons à titre d'exemple des interférences ou les radio-isotopes émettent la même énergie. Une grande attention est recommandée pour la

réalisation de cette étape, afin d'éliminer toute interférences spectrales induisant ainsi une grande marge d'erreur dans l'analyse quantitative des résultats brut. Dans notre cas citons comme exemple d'interférence trouvée entre le Sélénium et le Mercure interférant tout les deux avec une énergie de 279 KeV. Comme les rayons gamma émis sont caractéristiques, l'isotope émetteur est alors identifié.

- **Analyse quantitative des résultats**

La phase de quantification dure plusieurs jours à plusieurs mois selon le nombre d'échantillon analysé, ainsi que le type de nucléide à doser.

Vu que la méthode utilisée étant la méthode relative l'instabilité, la procédure utilisée pour le calcul de concentration de nos échantillons irradiés est de mesurer les énergies émises par l'échantillon et le standard, dans les mêmes conditions et même détecteur puis de corriger la différence de décroissances entre les deux.

L'équation utilisée pour calculer la masse d'un élément dans un échantillon inconnu relative à un standard est la suivante (De Soete et al., 1972):

$$m_{ie} = m_{is} \left(\frac{I_{ech} * e^{\lambda t d_{ech}}}{I_{st} * e^{\lambda t d_{st}}} \right) \quad (12)$$

m_{ie} : masse de l'élément i à doser dans l'échantillon.

m_{is} : masse de l'élément i à doser dans le standard.

I_{ech} : l'intensité de l'élément à doser dans l'échantillon.

I_{st} : l'intensité de l'élément à doser dans le standard.

λ : constante radioactive de l'élément à doser.

td : temps de décroissance.

La masse m_{st} (μ g) d'un élément dans le standard est donnée par la formule suivante :

$$m_{is} = m_s * C_{is} \quad (13)$$

m_s : masse du standard en (g).

C_{is} : concentration de l'élément dans le standard en (ppm).

Dans le cas où l'élément considéré se retrouve au niveau des blancs utilisés, alors la formule sera corrigée et devient :

$$m_{ie} = m_{is} \frac{(I_{ech} * e^{\lambda t d_{ech}} - I_{blf} * e^{\lambda t d_{blf}})}{(I_{st} * e^{\lambda t d_{st}} - I_{bla} * e^{\lambda t d_{sblat}})} \quad (14)$$

Où :

m_{ie} : masse de l'élément i à doser dans l'échantillon.

m_{is} : masse de l'élément i à doser dans le standard.

I_{ech} : l'intensité de l'élément à doser dans l'échantillon.

I_{blf} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc filtre.

I_{bla} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc aluminium.

I_{st} : l'intensité de l'élément à doser dans le standard.

λ : constante radioactive.

I_{bif} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc filtre.

I_{bla} : l'intensité de l'élément à doser dans le blanc aluminium.

td : temps de décroissance.

td_{ech} : temps de décroissance de l'échantillon.

td_{st} : temps de décroissance du standard.

td_{bif} : temps de décroissance blanc filtre.

td_{sba} : temps de décroissance du blanc aluminium

- **Détermination de la concentration finale en éléments de trace dans l'air prélevé**

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

$$C_{ie} = \frac{m_{elm}}{V} \quad (16)$$

m_{elm} : la masse calculée de l'élément dans l'échantillon.

V : le volume d'air aspiré relatif à cet échantillon.

- **Calcul d'erreurs pour les résultats d'analyse**

Les principales erreurs commises lors de l'analyse des métaux et métalloïdes prélevés sur des filtres sont :

- L'erreur sur la masse de l'élément (Δm) lors des pesées.
- L'erreur sur le volume d'air aspiré (ΔV)
- L'erreur sur l'intensité (ΔI) du standard et des échantillons.
- L'erreur sur la concentration de l'élément dans le standard AIEA ($\Delta C \text{ AIEA}$)

Le calcul de l'erreur pour la concentration finale (ΔC) des éléments se fait selon la formule suivante :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta C (AIEA)}{C (AIEA)} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} \quad (17)$$

Résultats et discussions

Après avoir fait l'analyse des échantillons collectés, les résultats cités ci-dessous illustrent le niveau de la pollution de l'air par les TSP et les métaux lourds dans le site choisi.

1. Etude des concentrations de TSP

Les résultats obtenus pour la matière particulaire en suspension dans l'air sont dressés dans le tableau 16 puis illustrés par la figure 12 :

Tableau 16: Les teneurs en TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en fonction des dates de prélèvements

Date de prélèvement	Poids TSP(mg)	Volume d'air aspiré (m^3)	Concentration TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
08/01/08	2.47	45.762	53.97
16/01/08	1.66	38.515	43.10
23/01/08	3.13	35.754	87.54
30/01/08	2.82	37.548	75.10
06/02/08	3.39	38.271	88.58
13/02/08	2.11	39.314	53.67
20/02/08	2.01	39.845	50.44
27/02/08	4.05	39.583	102.32
05/03/08	3	38.839	77.24
12/03/08	2.02	36.578	55.22
19/03/08	4.03	39.583	69.32
26/03/08	2.74	39.527	39.32
02/04/08	2.04	39.651	51.45
09/04/08	3.05	41.442	73.60
16/04/08	2.99	42.856	69.77
23/04/08	3.64	38.597	94.30

Suite du tableau16 :

30/04/08	3.45	39.239	87.92
07/05/08	3.15	41.07	76.69
14/05/08	1.61	31.725	50.75
21/05/08	2.51	38.938	64.46
29/05/08	2.61	36.668	71.18
04/06/08	2.58	37.854	68.16
11/06/08	3.01	30.056	100.15
18/06/08	4.14	37.258	111.12
25/06/08	3.4	32.377	105.01
02/07/08	2.72	38.291	71.03
09/07/08	3.64	30.974	117.52
16/07/08	5.87	35.785	164.03
23/07/08	2.31	33.539	68.87
30/07/08	3.51	37.612	93.32
06/08/08	2.29	37.351	61.31
13/08/08	3.13	37.103	84.36
20/08/08	2.71	36.921	73.40
27/08/08	1.88	37.836	49.88
03/09/08	2.54	33.559	75.69
10/09/08	3.93	30.032	130.86
17/09/08	1.6	31.641	50.57
24/09/08	1.44	28.396	50.71
29/09/08	0.54	15.244	35.42
08/10/08	2.88	38.032	75.72
15/10/08	4.77	41.441	115.10

Suite du tableau 16 :

22/10/08	2.88	37.32	77.17
29/10/08	2.5	36.397	68.69
05/11/08	1.37	31.298	43.77
12/11/08	2.74	36.116	75.87
19/11/08	1.42	38.209	37.16
26/11/08	3.02	86.36	34.97
03/12/08	1.28	41.613	30.76
07/12/08	0.33	11.073	29.02
17/12/08	1.2	38.112	31.48
24/12/08	2.57	39.738	64.67
31/12/08	3.07	32.775	93.67

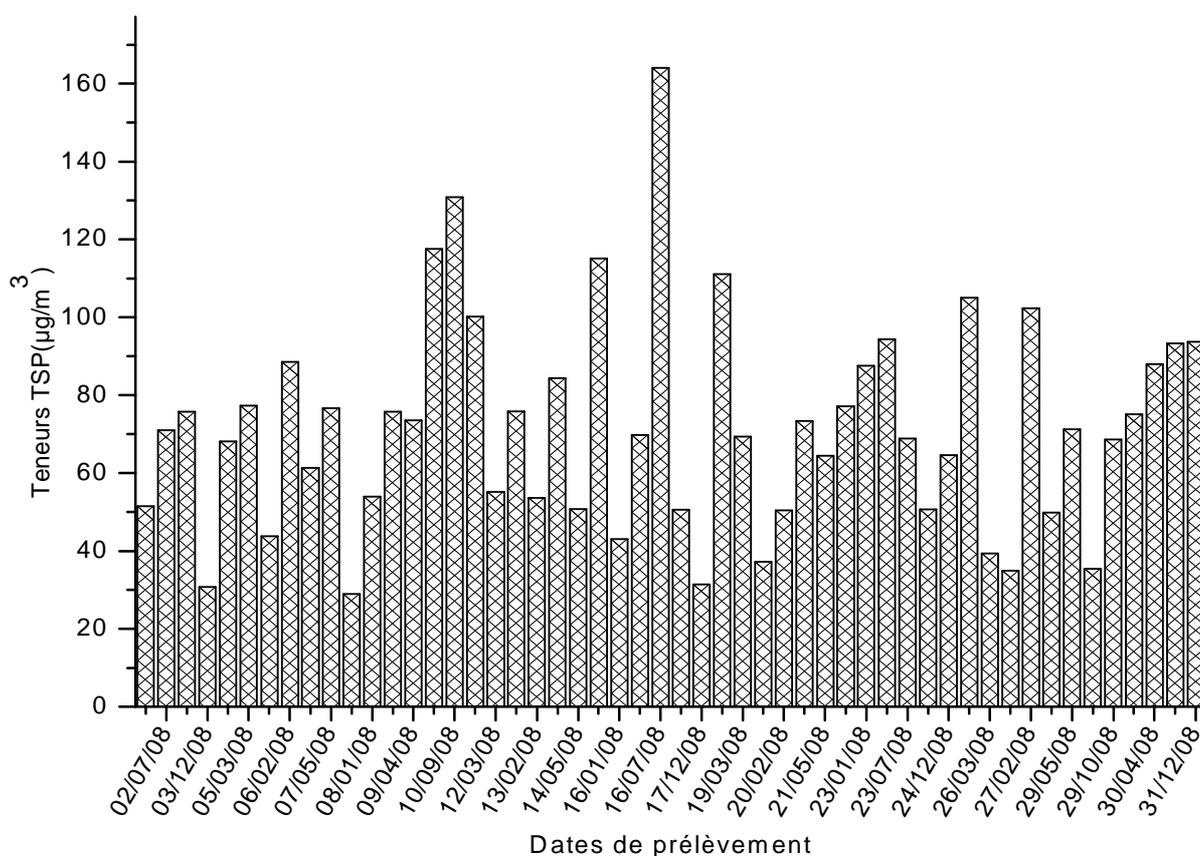


Figure 12 : Variation des teneurs en TSP en fonction de la période de prélèvement.

Nous remarquons que les teneurs en TSP mesurées pendant la durée des prélèvements évoluent dans une large gamme de valeurs. La plus basse teneur est de $29.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenue le dimanche 07/12/2008 ; alors que la teneur maximale, qui est de $164.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, est observée le mercredi 16/07/2008 liée surtout à la vitesse du vent faible et qui est de 0.1m/s .

En tenant compte des normes algériennes relatives aux particules en suspension dans l'air, on constate que presque tous les échantillons prélevés dépassent la valeur cible ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sauf ceux prélevés le mercredi 16 du mois de janvier, le mercredi 26 du mois de mars, le lundi 29 du mois de septembre ainsi que le mercredi 05, mercredi 19, et mercredi 26 du mois de novembre et le mercredi 03, dimanche 07 et mercredi 17 du mois de décembre.

La valeur limite ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est dépassée que le 23 janvier, les 06 et 27 février, les 23 et 30 avril, les 11, 18 et 25 du mois de juin, les 09, 16 et 30 du mois de juillet, le 13 du mois d'août, le 10 du mois de septembre ainsi que le 15 du mois d'octobre 2008.

Approximativement 80% des échantillons, dépassent la valeur algérienne cible ($50 \text{ng}/\text{m}^3$) ; alors que 34% des échantillons dépassent largement la valeur limite ($80 \text{ng}/\text{m}^3$) donnée par l'OMS.

Les variations temporelles des teneurs en TSP et leur présence dans l'air en concentrations alarmantes sont dues à plusieurs paramètres (*Masclet ,2005*), (*Elichegaray , 2008*).

- Le trafic routier est la principale source de l'augmentation des teneurs atmosphériques en TSP dans notre cas, sachant que la densité de la circulation à Alger centre n'est plus à démontrer. Cette pollution est due aux émissions de véhicules, en particulier ceux à moteur diesel (Bus) connues par leur combustion incomplète de gasoil, dérèglement de l'injection et absence de filtre à air (monolithes).

Les concentrations les plus élevées ont été enregistrées les débuts et fins de semaines.

- Les conditions météorologiques ont un rôle important dans la dispersion des polluants, en l'occurrence :
 - ❖ la vitesse du vent.
 - ❖ Ainsi, l'influence des précipitations est significative, les basses concentrations en TSP sont enregistrées lors des journées pluvieuses

et humides. En effet, en mois de Janvier, février et décembre, les précipitations varient de 112mm à 137mm (Sama safia, ministère de l'environnement, 2008), ce qui explique les teneurs basses en TSP ($29.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en cette période.

❖ L'augmentation de la température pendant la journée favorise l'augmentation des concentrations journalières expliquées par la diminution de l'humidité relative de l'air. En effet, pendant la saison chaude où le record de chaleur a atteint $41.6 \text{ }^\circ\text{C}$ en mois de juin, 41.1°C en juillet et $47.2 \text{ }^\circ\text{C}$ en aout, nous observons une augmentation de la concentration en TSP jusqu'à atteindre 164.03 en juillet.

- La topographie ainsi que les brises de mer à Alger jouent aussi un rôle non négligeable *dans la dispersion des différents polluants atmosphérique.* (Fontan , 2003)

2. Etude des concentrations des métaux lourds détectés dans les échantillons d'air

Une fois les échantillons analysés par la méthode NAA et les données traitées qualitativement et quantitativement, nous avons étudié la variation de la teneur des différents métaux lourds trouvée dans les différents échantillons en fonction de la date de prélèvement (fig.14, 15,jusqu'à fig. 28).

Tableau 17: Les teneurs (ng/m^3) en principaux métaux lourds détectés dans les différents échantillons d'air.

Echantillon	Cr	Co	Se	Sc	Hg	Sb
08/01/08	/	/	/	/	/	/
16/01/08	/	/	/	/	/	/
23/01/08	62.9 ± 8.3	1.062 ± 0.23	0.15 ± 0.002	0.70 ± 0.062	/	9.25 ± 2.1
30/01/08	41 ± 5.6	0.853 ± 0.21	0.38 ± 0.01	0.69 ± 0.086	/	5.9 ± 2.01
06/02/08	/	/	/	/	/	/
13/02/08	/	/	/	/	/	/
20/02/08	39.4 ± 5	1.117 ± 0.36	0.06 ± 0.0001	0.55 ± 0.1	/	3.00 ± 1.52

Suite du tableau 17 :

27/02/08	59.7± 6.8	1.948± 0.4	0.13±0.004	0.96±0.01	/	7.34±3.0 1
05/03/08	61± 5.6	1.197±0.5	0.19±0.0003	0.94±0.12	/	3.66±1.2
12/03/08	67± 7	0.485±0.3	2.18±0.2	0.60±0.061	/	3.53±0.3 2
19/03/08	64± 7.5	2.677± 0.66	0.21±0.001	1.00±0.078	/	7.81±2.4 1
26/03/08	43.7± 5	0.708±0.29	0.16±0.002	0.64±0.065	/	2.48±0.6 2
02/04/08	57.6± 6	1.065± 0.33	0.01±0.0000 1	0.54±0.012	/	2.38±0.8 5
09/04/08	67± 8	1.315± 0.35	0.15±0.001	0.87±0.085	/	4.38±0.3
16/04/08	47.6± 6.9	1.201±0.6	0.13±0.0009	0.70±0.1	/	5.07±0.4 5
23/04/08	26.8± 1	2.443± 0.55	ND	1.39±0.12	ND	3.1±0.52
30/04/08	54.4± 6.3	ND	1.04±0.09	1.08±0.25	ND	3.15±0.3 2
07/05/08	28.5± 3.2	ND	0.71±0.06	0.60±0.089	ND	1.36±0.6 6
14/05/08	32.3± 3.3	ND	1.13±0.09	0.60±0.032	ND	2.74±0.2 5
21/05/08	/	/	/	/	/	/
29/05/08	25.6± 4.7	ND	0.90±0.06	0.64±0.056	ND	2.13±0.8 0
04/06/08	33.4± 5.2	ND	0.49±0.05	0.68±0.075	ND	1.83±0.6 5
11/06/08	41.5± 6	0.887± 0.28	0.48±0.055	0.63±0.063	ND	2.08±0.3 2
18/06/08	41.4± 5.3	ND	ND	0.85±0.098	0.005±0.0001	5.08±0.9 8

25/06/08	34.3± 5.1	1.09± 0.35	ND	0.80±0.085	0.007±0.0003	2.48±0.3
02/07/08	41.9± 6	0.65±0.1	1.25±0.08	0.50±0.05	0.003±0.0006	1.47±0.1 2
09/07/08	33.4± 5	0.77±0.3	0.83±0.03	0.71±0.074	ND	1.67±0.3 2
16/07/08	50.8± 6.6	1.20± 0.32	0.73±0.04	1.07±0.12	0.002±0.0002	2.65±0.5 2
23/07/08	34.5± 4.9	1.08± 0.29	0.76±0.07	0.71±0.23	ND	1.70±0.4 2
30/07/08	41.5± 4.1	0.90± 0.22	0.25±0.008	0.69±0.32	0.006±0.0005	2.13±0.4 2
06/08/08	22.5 ± 2.3	0.80± 0.2	1.14±0.08	0.59±0.032	ND	1.31±0.1 5
13/08/08	29.2± 1.9	0.78± 0.11	0.79±0.05	0.77±0.054	ND	2.68±0.8 4

Suite du tableau 17 :

20/08/08	34.3± 4.9	0.82± 0.25	1.20±0.6	0.81±0.089	ND	1.98±0.5 7
27/08/08	27.3± 2	0.94±0.12	0.92±0.07	0.75±0.052	0.007±0.0003	2.30±0.8 5
03/09/08	28.7± 2.8	0.29±0.06	0.79±0.08	0.55±0.036	ND	1.07±0.5 8
10/09/08	30.2± 4	1.14± 0.4	ND	1.17±0.015	ND	1.92±0.5 2
17/09/08	42.8± 3.9	ND	ND	0.48±0.062	ND	1.27±0.6 8
24/09/08	33.1± 3.3	0.49±0.099	0.89±0.033	0.93±0.032	ND	2.25±0.5 9
29/09/08	70.4± 10	ND	1.41±0.22	0.97±0.052	ND	0.87±0.6 3
08/10/08	33± 3.9	ND	1.44±0.33	0.80±0.045	0.012±0.0001	2.64±0.8 4

15/10/08	26.8± 4.1	1.65±0.075	1.27±0.3	1.23±0.23	ND	3.19±0.0 36
22/10/08	42.1± 4.6	0.93±0.865	1.67±0.26	0.77±0.085	0.005±0.0005	3.05±0.0 5
29/10/08	24± 3.6	0.41±0.1	1.06±0.54	0.52±0.048 7	0.017±0.0006	2.36±0.8 9
05/11/08	35.9± 2	0.58±0.123	0.85±0.036	0.56±0.089	ND	1.46±0.5 4
12/11/08	34.7± 4.5	1.03±0.321	2.31±0.9	0.57±0.065	ND	2.91±0.8 1
19/11/08	21± 2.5	2.573±0.63	1.08±0.12	1.39±0.085	0.04±0.0003	1.44±0.3 2
26/11/08	21.4± 3.3	0.18±0.023	0.66±0.054	0.40±0.020	0.025±0.003	1.09±0.8 4
03/12/08	/	/	/	/	/	/
07/12/08	111.5 ± 14	0.40±0.063 2	4.35±1.23	1.64±0.31	0.032±0.001	3.14±0.3 9
17/12/08	35.9± 3.8	0.10±0.001	0.75±0.32	0.50±0.036 3	0.028±0.006	1.48±0.6 1
24/12/08	46.5± 5.1	0.30±0.032	1.06±0.23	0.58±0.081	0.057±0.002	3.17±0.8 7
31/12/08	44.8± 4	0.55±0.023	0.99±0.056	1.08±0.12	0.0006±0.000 1	2.46±0.4 0

Remarque :

Les différentes cases vides représentent les échantillons perdus pendant la manipulation. Il faut signaler que l'irradiation de la première capsule en aluminium, a provoqué l'éclatement de quelques enveloppes d'échantillons, pour cela nous avons perdu de résultats d'une certaine période de l'année et ceci pour certains éléments seulement. Notons que si une contamination est remarquée pendant ou après irradiation, l'échantillon est donc irrécupérable.

Tableau 18: Les teneurs (ng/m³) en d'autres éléments de trace détectés dans les différents échantillons d'air.

Echantillon	Ag	Hf	Fe	Cs	Ta	Br	La	Rb	Sm	Tb	Yb	Lu
08/01/08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
16/01/08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
23/01/08	ND	0.97	/	0.79	0.48	/	/	ND	/	/	/	ND
30/01/08	ND	0.27	/	0.67	3.72	/	/	ND	/	/	/	ND
06/02/08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
13/02/08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
20/02/08	ND	0.87	/	0.13	0.32	/	/	5.5	/	/	/	ND
27/02/08	ND	1.30	/	2.48	0.46	/	/	12.3	/	/	/	ND
05/03/08	ND	0.73	/	0.22	0.65	/	/	11.5	/	/	/	ND
12/03/08	ND	ND	/	ND	ND	/	/	ND	/	/	/	ND
19/03/08	0.62	1.36	/	1.09	0.81	/	/	11.3	/	/	/	0.10
26/03/08	0.74	ND	/	0.42	0.49	/	/	2.8	/	/	/	0.16 9
02/04/08	ND	0.31	/	0.50	0.60	/	/	6.7	/	/	/	0
09/04/08	ND	0.56	/	0.88	0.36	/	/	4.6	/	/	/	0.23
16/04/08	ND	1.03	/	1.50	0.60	/	/	9.7	/	/	/	ND
23/04/08	ND	ND	2280.6	0.77	ND	8.35	2.38	ND	0.44	0	ND	ND
30/04/08	ND	0.17	1499.8	0.27	ND	8.52	2.07	ND	0.20	0.09	ND	0.02
07/05/08	ND	0.12	1337.1	0.24	0.12	6.2	1.49	ND	0.15	0.05	ND	0
14/05/08	/	0.11	953.05	0.26	0.22	8.83	1.35	8.8	0.12	0.05	ND	0.02
21/05/08	ND	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
29/05/08	ND	0.10	1241.7	0.20	0.52	8.81	1.74	ND	0.18	0.05	ND	ND
04/06/08	ND	0.13	1265.3	0.33	0.08	6.3	1.93	ND	0.27	0.06	0.05	ND
11/06/08	ND	ND	1494.4	0.29	0.15	6.93	1.14	4.5	0.12	ND	0.10	0.01
18/06/08	ND	ND	2413	0.48	0.22	ND	3	3.8	0.36	ND	0.41	0.05

Suite du tableau 18:

25/06/08	ND	ND	1824.3	0.37	0.21	4.64	2.16	ND	0.28	ND	0.08	0.02
02/07/08	0.51	ND	979.41	0.24	0.15	ND	1.32	4.3	0.29	ND	ND	0.01
09/07/08	0.15	ND	1595.2	0.37	0.23	4.35	1.33	4.2	0.50	ND	0.17	0.05
16/07/08	ND	ND	3285.9	0.60	0.34	4.83	3.3	6.5	1.80	ND	0.30	0.06
23/07/08	0.21	ND	1337	0.23	0.20	4.19	1.72	3.8	0.26	ND	ND	ND
30/07/08	ND	ND	1393.8	0.44	0.21	3.65	1.75	5.3	0.69	ND	ND	0.02
06/08/08	ND	0.02	1033.9	0.25	0.15	3.6	1.41	3.7	0.47	ND	0.10	0.10
13/08/08	ND	ND	1748.7	0.37	0.20	5.5	2.04	2.9	0.97	ND	0.21	0.03
20/08/08	ND	ND	1663	0.55	0.18	4.25	1.73	5.4	0.73	ND	ND	0.02
27/08/08	ND	ND	1492.3	0.34	0.20	4.14	1.88	5.3	0.67	ND	0.30	ND
03/09/08	ND	ND	716.67	ND	ND	5.16	4.18	ND	0.70	ND	ND	ND
10/09/08	ND	ND	2420.1	0.31	0.28	3.56	4.04	5.4	1.26	ND	0.20	ND
17/09/08	ND	ND	568.28	ND	ND	1.48	1.63	ND	0.33	ND	ND	0.02
24/09/08	ND	ND	1438.6	0.19	0.29	3.88	1.9	ND	0.51	ND	ND	ND
29/09/08	0.1	ND	539.46	ND	0.81	1.83	2.57	ND	1.09	ND	ND	ND
08/10/08	ND	ND	1239.8	0.57	0.43	2.27	2.17	3.4	0.78	ND	ND	ND
15/10/08	ND	ND	3925.5	0.49	0.48	2.59	4.23	6.6	2.96	0.05	0.24	0.03
22/10/08	ND	ND	2226.9	0.29	0.42	2.15	2.07	4.6	2.47	ND	ND	0.03
29/10/08	ND	ND	1187.5	0.23	0.27	1.74	0.8	5.2	0.77	ND	ND	ND
05/11/08	ND	0.06	1128.8	0.53	0.70	2.1	ND	ND	0.02	ND	ND	ND
12/11/08	0.62	0.17	1353.3	0.40	0.96	2.29	1.01	5	0.03	ND	ND	ND
19/11/08	ND	0.07	515.08	0.40	0.61	ND	3.91	4.6	0.06	ND	ND	ND
26/11/08	0.74	0.07	1258.3	0.11	0.32	1.64	ND	1.6	0.06	ND	ND	ND

03/12/08	0.95	ND	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
07/12/08	0.31	ND	1016	ND	3.09	ND	ND	ND	1.22	ND	ND	ND
17/12/08	0.36	0.09	601.64	0.04	0.33	ND	ND	ND	6.77	ND	ND	ND

Suite du tableau 18:

24/12/08	0.45	0.23	1350.2	0.48	0.75	ND	ND	5.5	0.33	ND	ND	ND
31/12/08	ND	ND	2516.5	0.31	0.51	ND	ND	ND	1.50	ND	ND	ND

2.1. Le Chrome

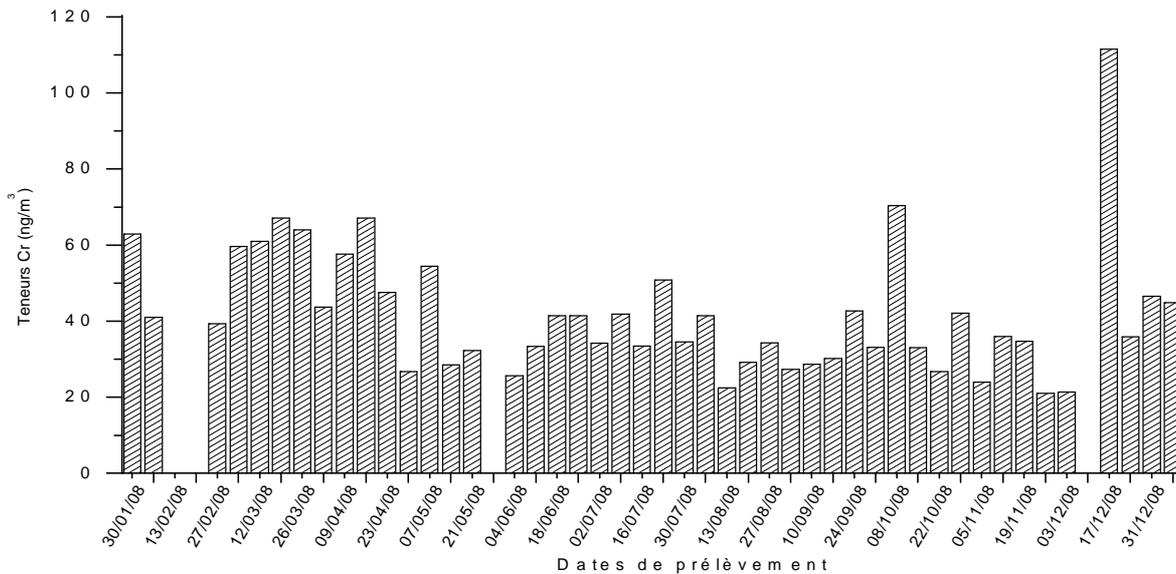


Figure 13 : Variation des concentrations du Chrome en fonction de la date de prélèvement.

Les teneurs des différents échantillons en Cr varient de 21 à 111ng/m³. (Fig.13)

L'indisponibilité d'une norme pour ce métal nous met dans l'impossibilité d'évaluer le niveau de pollution. Nous constatons que la valeur minimale est obtenue le mercredi 19/11/2008, alors que la maximale le dimanche 07/12/2008. Cette variation est due à la direction et la force du vent qui était de 2.5m/s le 19/11/2008.

2.2. Le Cobalt

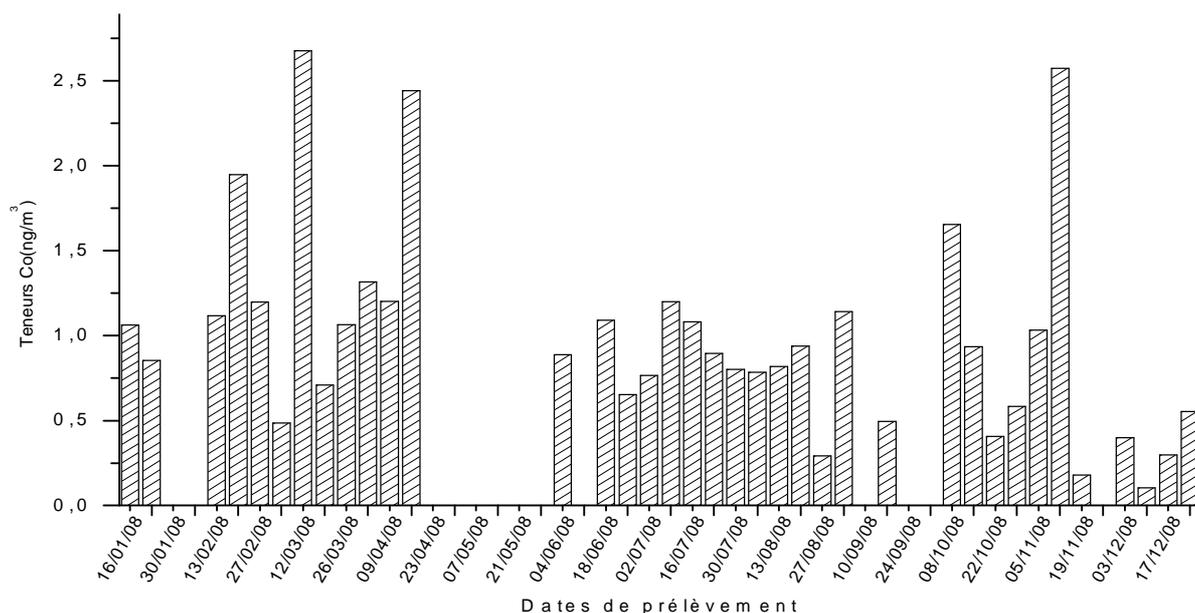


Figure 14: Variation des concentrations du Cobalt en fonction de la date de prélèvement.

La figure 14 montre que le Co est présent dans l'air avec des concentrations inférieures à 3 ng/m³. Les teneurs des différents échantillons en Co varient de 0 à 2. Nous constatons que la valeur maximale est obtenue le mercredi 19/03/2008, alors que les niveaux faibles en cobalt sont obtenus au mois de mai ou la vitesse du vent à atteint son maximal de 4.3m/s.

2.3. Le Sélénium

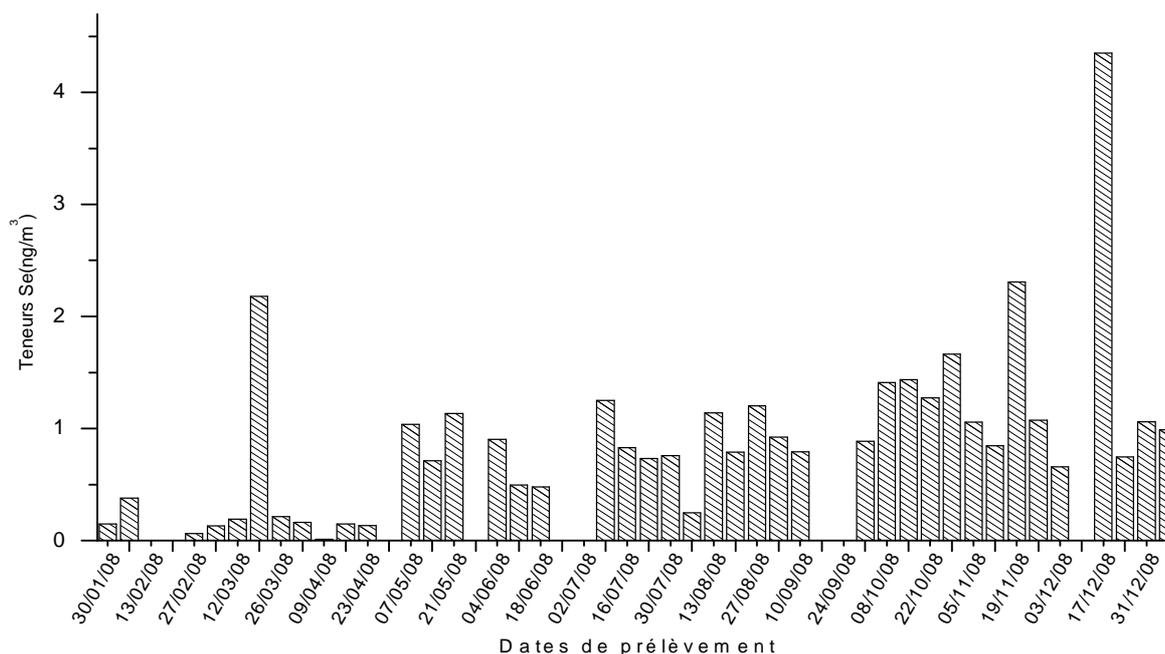


Figure 15: Variation des concentrations du sélénium en fonction de la date de prélèvement.

On remarque que le Se est présent dans l'air avec des concentrations faibles. Sa présence dans l'air est surtout liée aux moteurs des véhicules.

Les teneurs des différents échantillons en Sélénium varient de 0 à 4.35ng/m³.

Nous constatons que les valeurs minimales sont obtenues du 18 au 25 du mois de juin ou la vitesse du vent à atteint un maximal de 6.4m/s. Alors que le niveau élevé en Sélénium est obtenu à des vitesses du vent plus faibles (0.1m/s).(Fig.15)

Le Sélénium est un métal essentiel pour la vie. De petites quantités (ATSDR,1989) sont nécessaires dans la diète (il prend davantage d'oxygène sur les tissus, vitamine E). L'ingestion de quantité élevée de Se peut conduire à la perte de cheveux, déformation des ongles et perturbation de contrôle des mains et pieds, œdème pulmonaire, bronchites.

2.4. Le Mercure

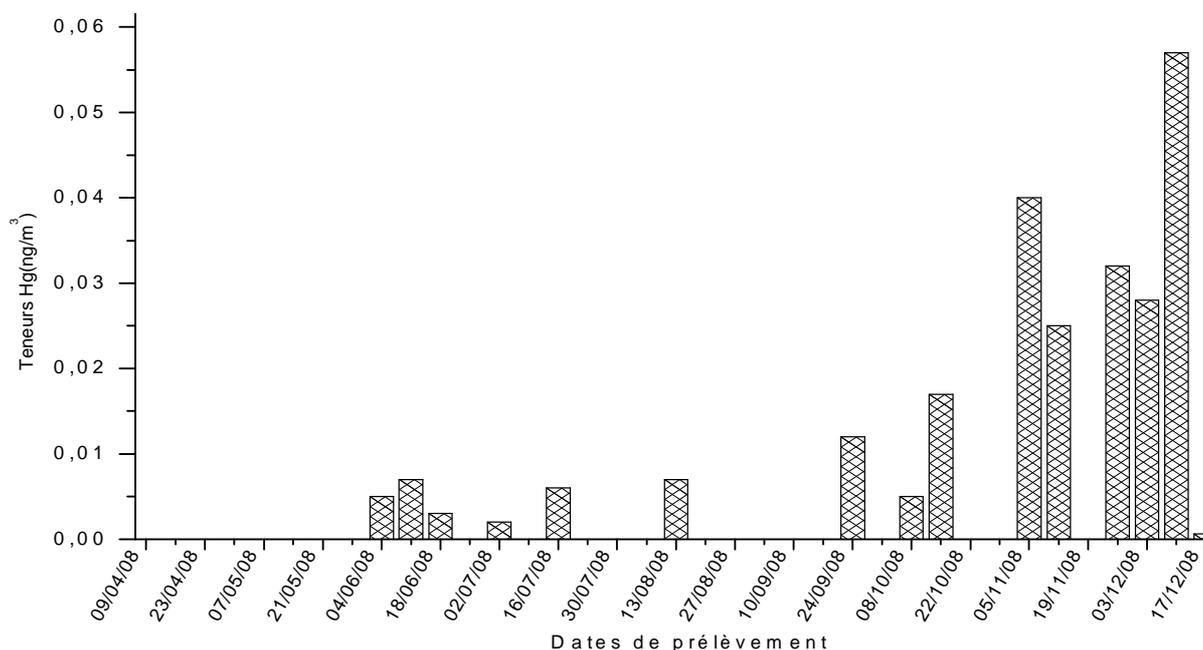


Figure 16: Variation des concentrations du mercure en fonction de la date de prélèvement.

Le mercure est connu pour sa toxicité ; son effet sur la sante humaine dépend essentiellement des différentes propriétés chimiques et physiologiques.

Les valeurs détectées de Mercure variant entre 0 ng/m³ et 0.057 ng/m³. (Fig.16)

Nous remarquons que les valeurs de Hg mesurées sont faibles comparées a celle limite donnée par l’OMS.

La chimie du mercure dans l’environnement est très complexe à cause de l’aptitude de cet élément à former des complexes organométalliques. Dans des conditions réductrices, le mercure se lie avec des radicaux méthylés, issus de la matière organique sédimentaire, et forme des composés ioniques solubles Hg(CH₃)⁺ et des espèces aqueuses neutres particulièrement volatiles Hg(CH₃)₂⁰ et très toxiques. Les composés volatiles s’échappent donc facilement vers l’atmosphère où ils peuvent subir des réactions photochimiques et être transformés en espèces non volatiles qui peuvent se redéposer.

Il très important de noter que l’analyse du Hg par INAA est difficile car certain composés de mercure se volatilisent et diffusent dans la capsule pendant l’irradiation dans le réacteur (Blotcky et al., 1995).

2.5. Le Scandium

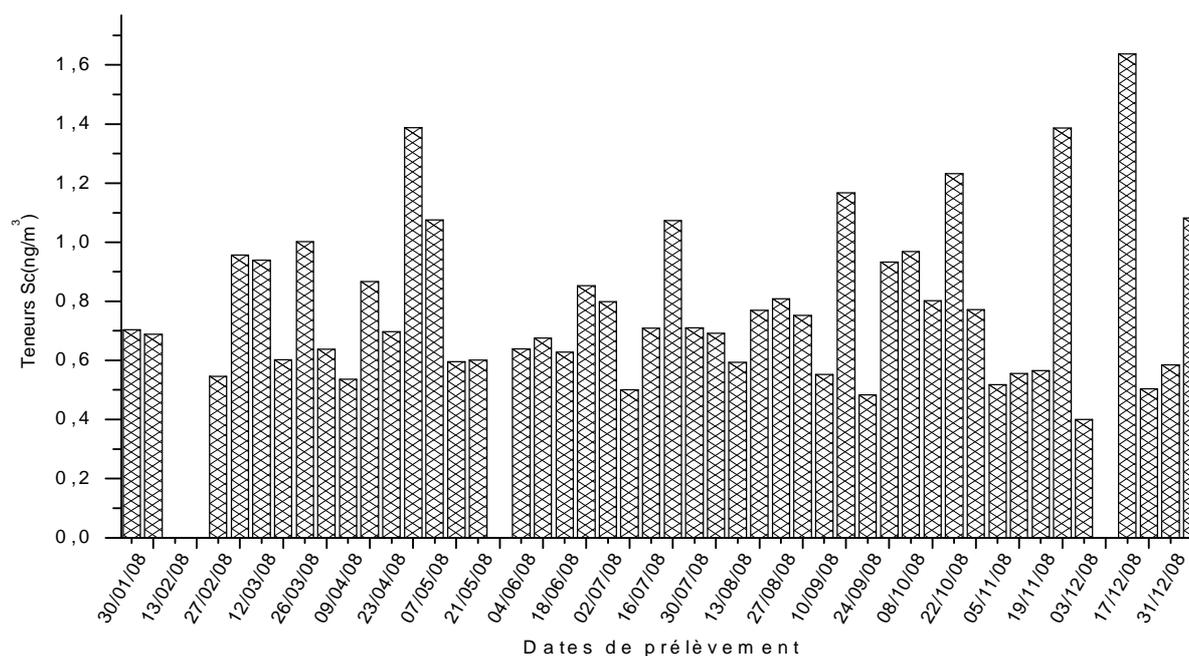


Figure 17 : Variation des concentrations du Scandium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Scandium varient entre 0,4 ng/m³ et 1,6 ng/m³.(Fig.17)

2.6. Le Hafnium

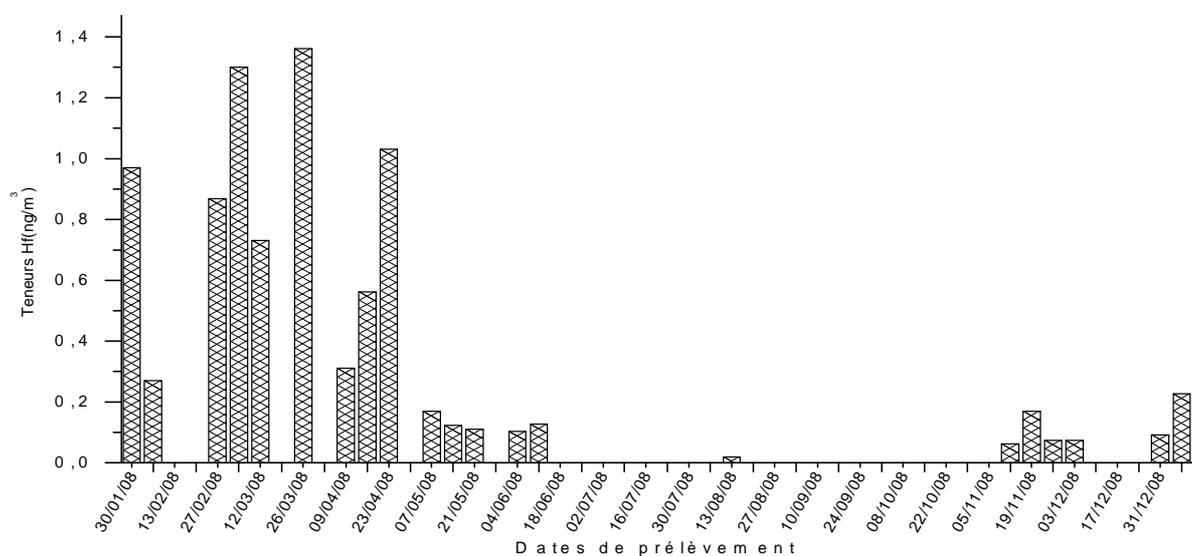


Figure 18 : Variation des concentrations du Hafnium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Hafnium varient entre 0 ng/m³ et 2,7 ng/m³.(Fig.18)

2.7. Le Tantale

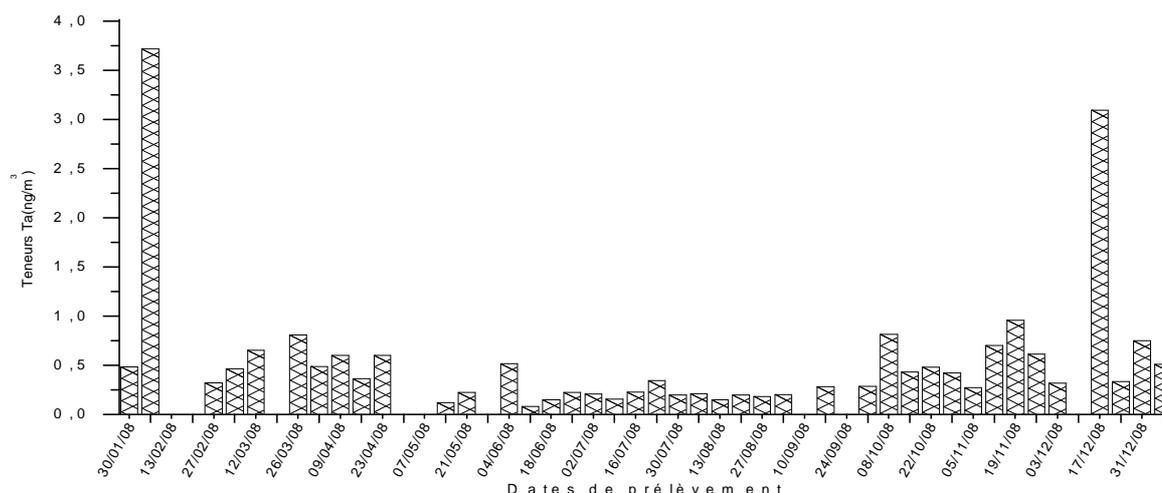


Figure 19: Variation des concentrations du Tantale en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Tantale varient entre 0 ng/m³ et 3.7 ng/m³.(Fig.19)

2.8. L'Antimoine

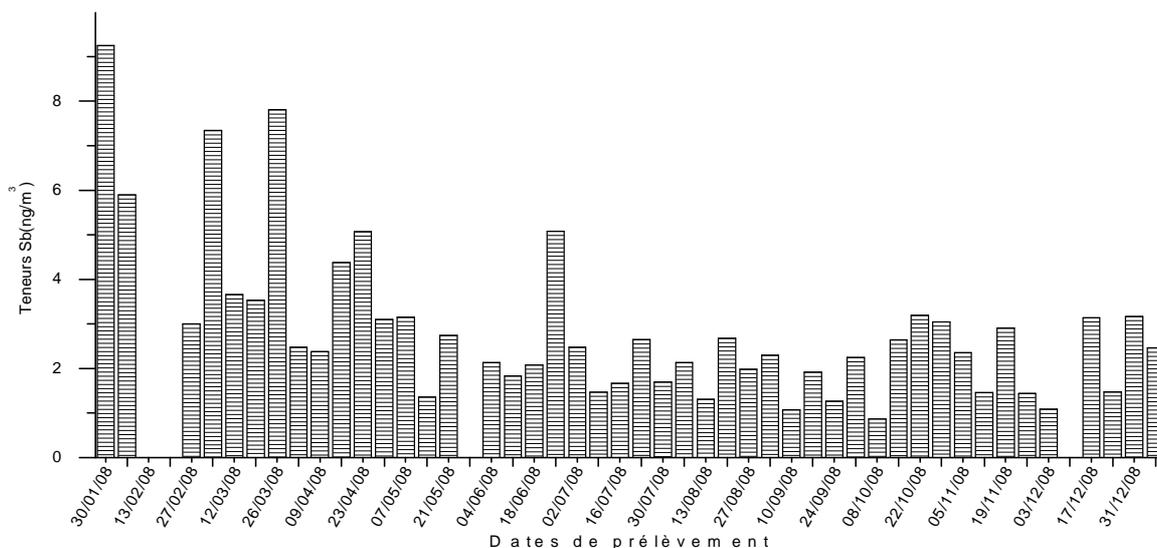


Figure 20: Variation des concentrations de l'Antimoine en fonction de la date de prélèvement. Les valeurs détectées en Antimoine varient entre 1 ng/m³ et un maximum de 9.3ng/m³(Fig.20). L'ingestion, l'inhalation ou l'absorption par la peau de large quantité d'antimoine peut causer des pneumoconioses, dermatites, rhinites, gastrite, conjonctivites, affections du cœur, éruption cutanées, Le Sb inhibe l'activité de certaines enzymes et perturbe la production du glycogène dans le foie. Il est suspecté d'être même cancérigène (*Encyclopedie oh Health, 1998*).

Plusieurs sources de pollution par le Sb peuvent être envisagées, mais comme l'analyse par activation neutronique ne donne pas de détails sur la nature chimique du Sb trouvé, on ne peut pas prédire une source de pollution privilégiée par rapport aux autres. (Capannesi et al., 1978) , (Bruno et al., 1980) , (Misaelides et al., 1993).

2.9. Le Rubidium

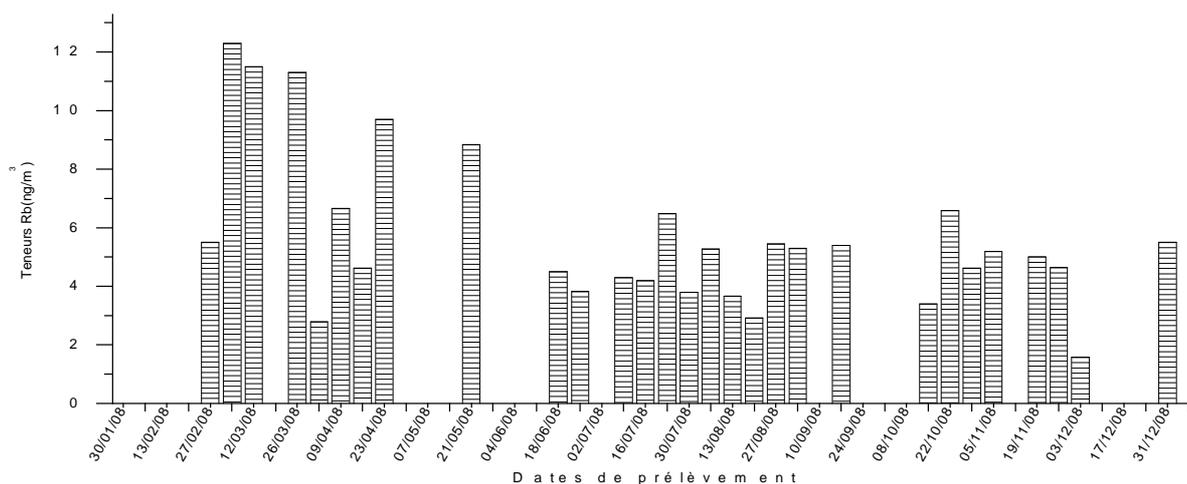


Figure 21 : Variation des concentrations du Rubidium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Rubidium varient entre 0 ng/m³ et 12.3 ng/m³.(Fig.21)

2.10. Le Fer

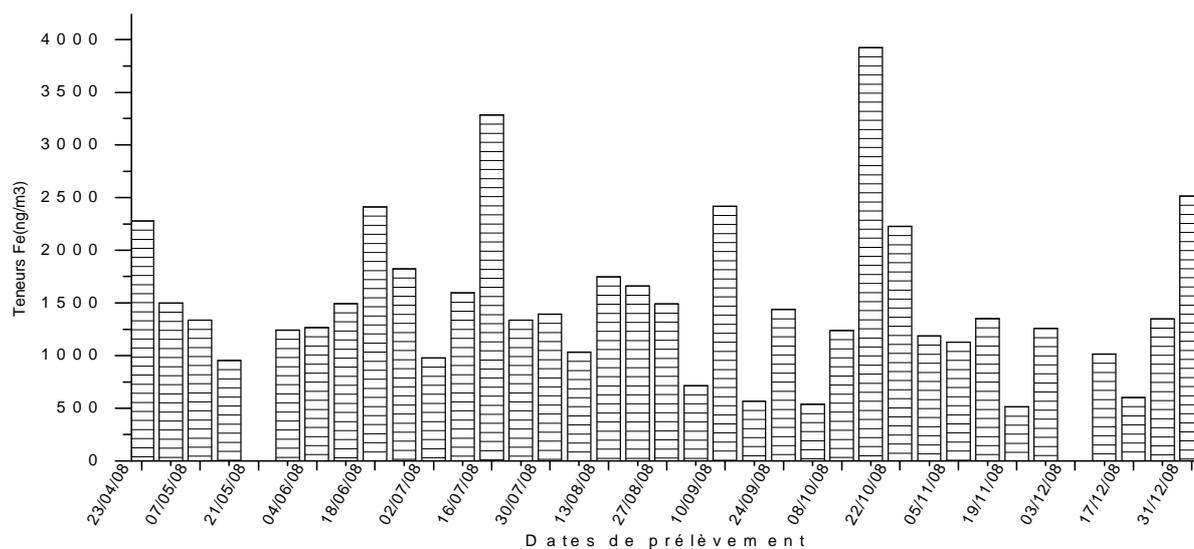


Figure 22 : Variation des concentrations du Fer en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Fer varient entre 515 ng/m³ et 3925 ng/m³.(Fig.22)

2.11. Le Terbium

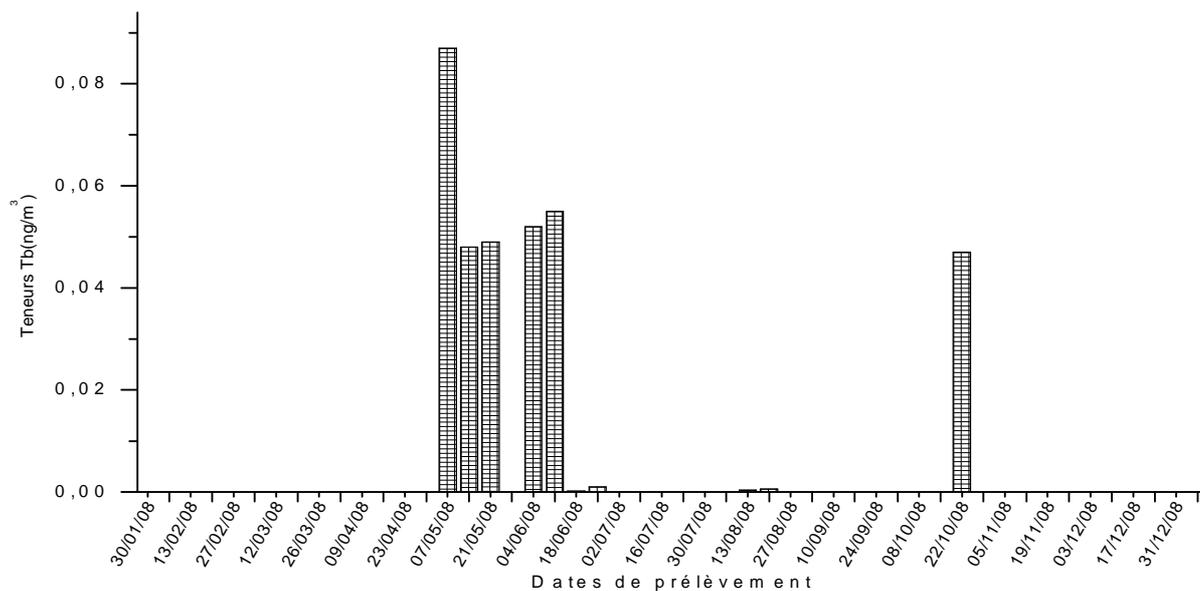


Figure 23 : Variation des concentrations du Terbium en fonction de la date de prélèvement.

Les teneurs détectées en Terbium varient entre 0 ng/m³ et 0.055 ng/m³.(Fig.23)

2.12. Le Lanthane

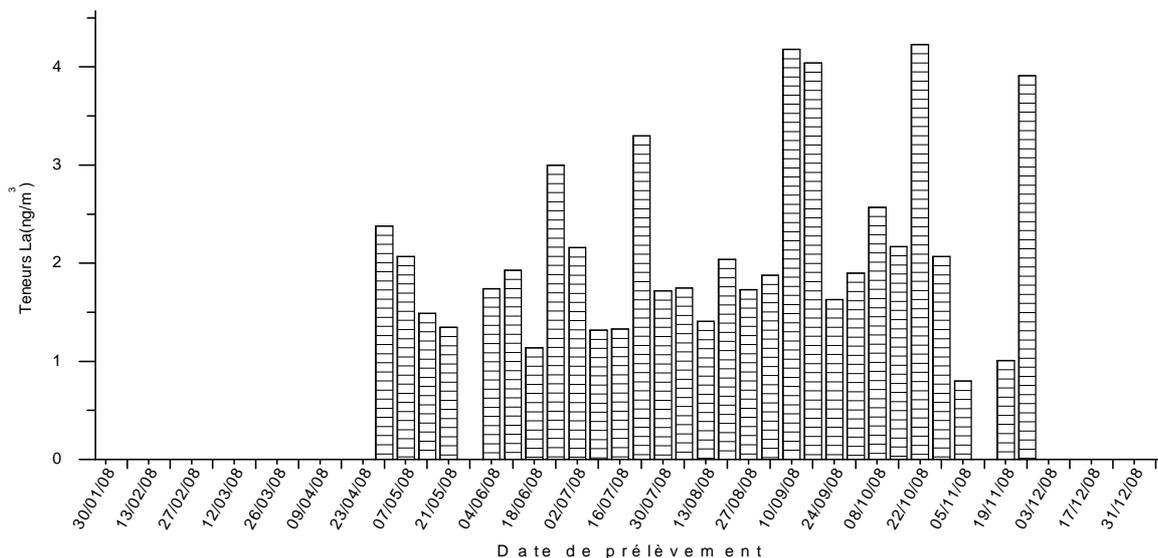


Figure 24: Variation des concentrations du Lanthane en fonction de la date de prélèvement

Les teneurs détectées en Lanthane varient entre 0 ng/m³ et 2.95 ng/m³(Fig.24)

2.13. Le Samarium

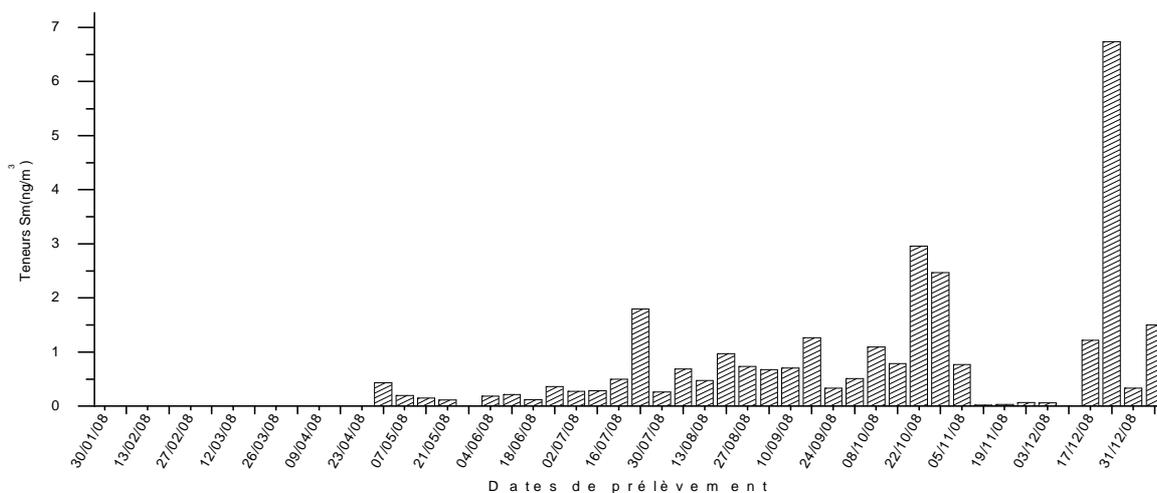


Figure 25: Variation des concentrations du Samarium en fonction de la date de prélèvement
 Les teneurs détectées en Samarium varient entre 0 ng/m³ et 4.23 ng/m³(Fig.25)

2.14. L'Argent

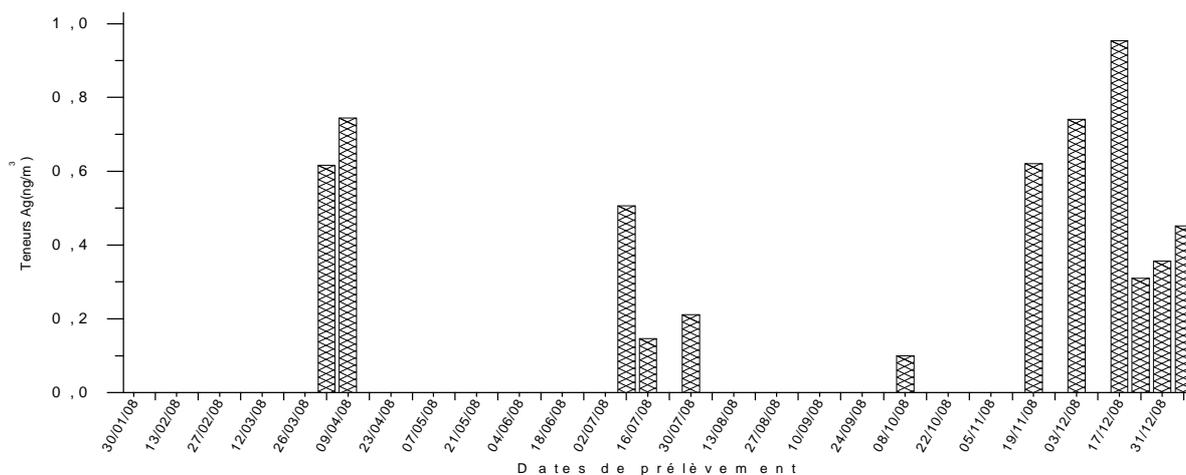


Figure 26 : Variation des concentrations de l'Argent en fonction de la date de prélèvement.
 Les teneurs détectées en Argent varient entre 0 ng/m³ et 2.48 ng/m³(Fig.26)

2.15. Le Césium

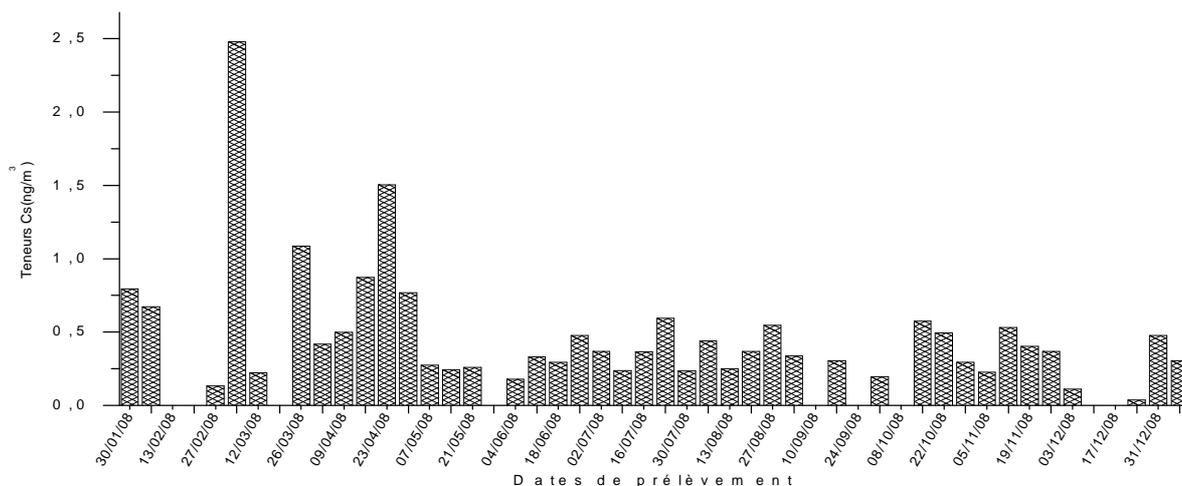


Figure 27 : Variation des concentrations du Césium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Césium varient entre 0 ng/m³ et 0.95 ng/m³(Fig.27).

2.16. Le Brome

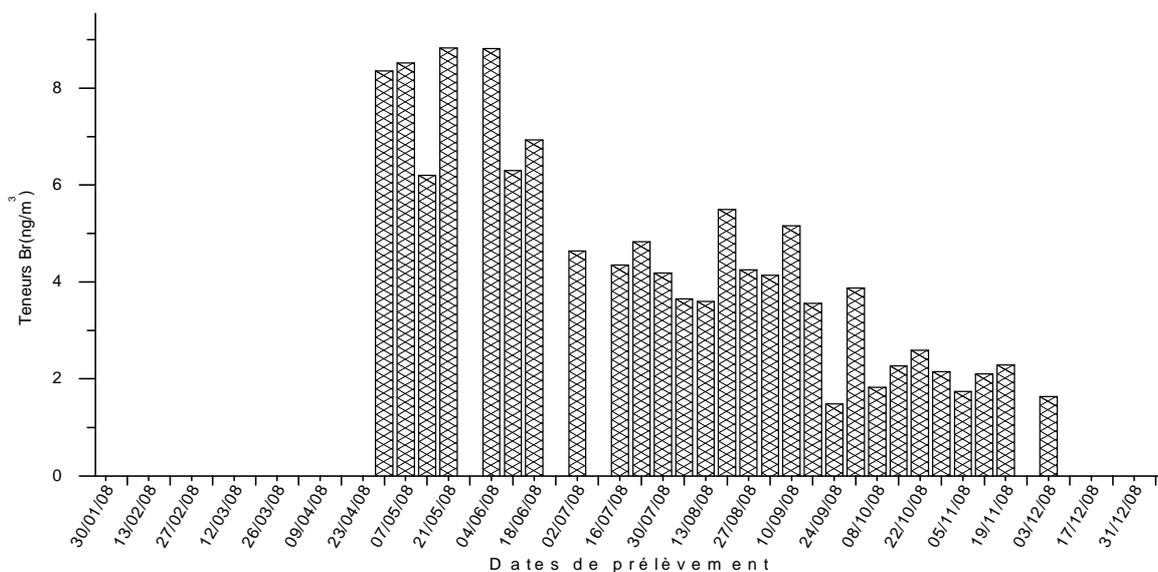


Figure 28 : Variation des concentrations du Brome en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Brome varient entre 0 ng/m³ et 8.83 ng/m³.(Fig.28)
Le Brome est un élément de trace très volatile, donc on peut suggérer qu'il reste que la teneur immobilisée dans les fibres de la matrice utilisée.

2.17. L'Ytterbium

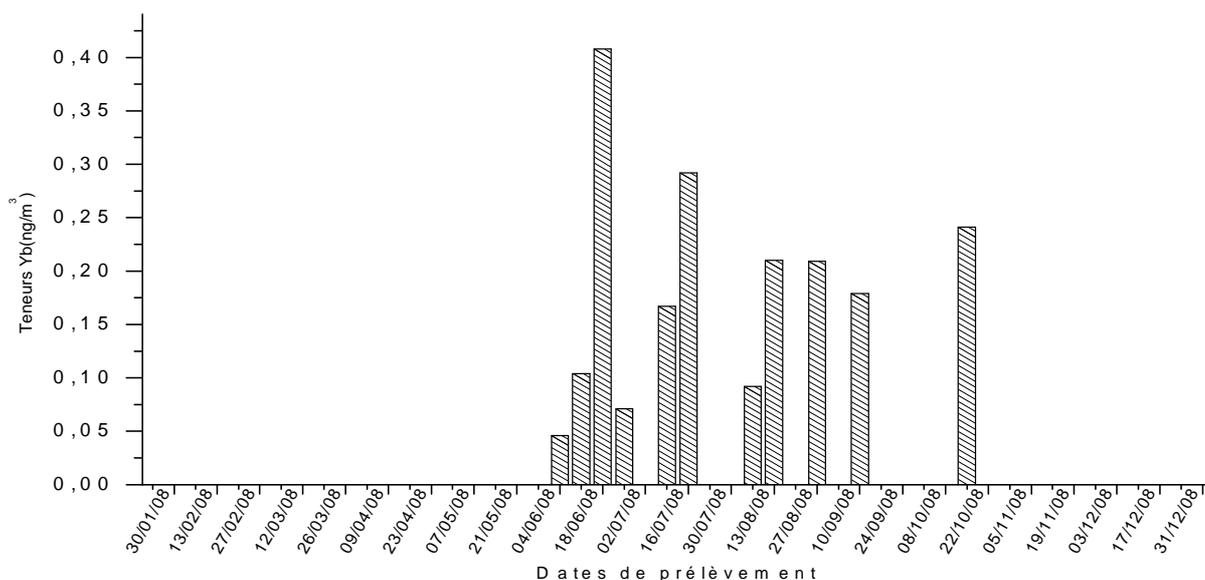


Figure 29 : Variation des concentrations de l'Ytterbium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Ytterbium varient entre 0 ng/m³ et 0.4 ng/m³.(Fig.29)

2.18. Le Lutétium

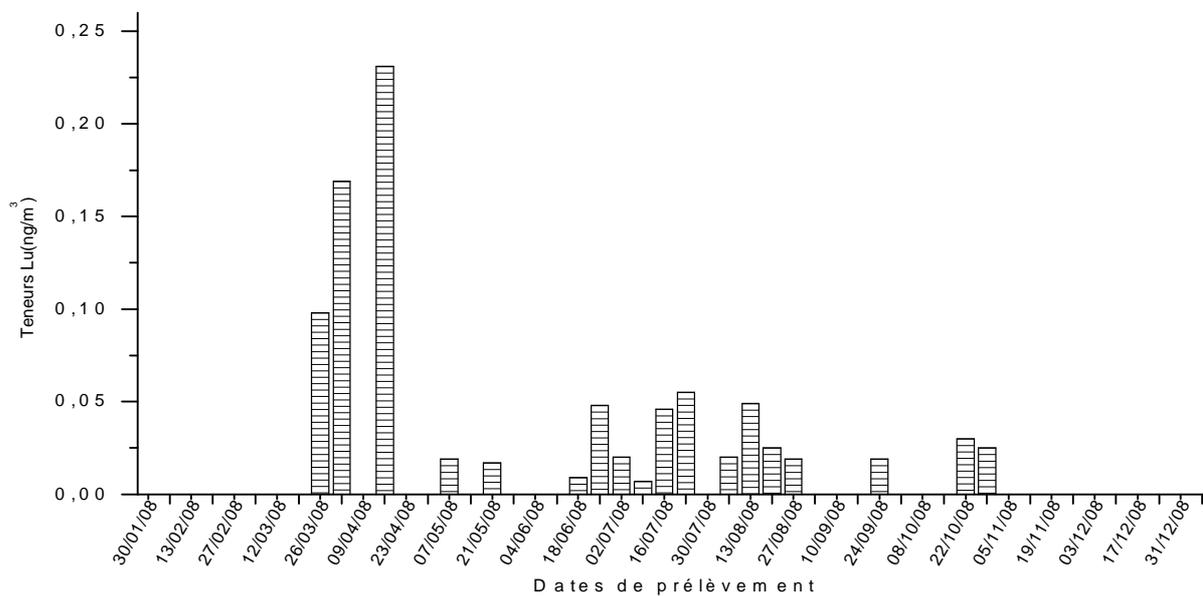


Figure 30 : Variation des concentrations du Lutétium en fonction de la date de prélèvement. Les teneurs détectées en Lutétium varient entre 0 ng/m³ et 0.25 ng/m³.(Fig.30)

3. Comparaison des résultats avec des données publiées et discussion

A cause de l'indisponibilité d'une norme délivrées par (WHO) ainsi que de valeurs limites délivrées par la Directive du Conseil européen, nous avons essayé de comparer nos résultats avec celles trouvées par d'autre études au niveau des régions Européennes (*Avino et al., 2008*), (*Rizzio et al., 2001*).

Tableau 19: Teneurs en éléments de traces (ng/m³) obtenues dans différentes régions européennes et à Alger

Elément	Ponzone*	Ispra**	Milan**	Rome***	Alger
Co	1.15±0.59	0.75±0.35	2.50±0.80	0.379±0.1799	0.757± 0.628
Cr	7.00±4.20	6.50±3.50	38.6±9.0	7.28±2.40	41.91± 16.94
Sb	4.90±1.50	4.50±1.40	68.3±25.5	9.22±6.97	2.87± 1.78
Se	0.60±0.01	0.037±0.014	1.80±0.70	0.687±0.45	0.80± 0.78
Sc	0.25±0.04	1.10±0.30	0.40±0.14	0.786±0.269	1.15± 0.59
Hf	0.06±0.01	0.04±0.03	0.88±0.55	0.020±0.010	0.19± 0.36
Ta	/	/	/	/	0.48± 0.67
Hg	/	/	/	1.07±0.842	0.007± 0.013
Tb	/	/	/	/	0.009± 0.022
Rb	1.0±0.1	0.76±0.5	5.2±2.3	2.19±1.18	3.58± 3.47
La	1.05±0.45	0.31±0.15	1.41±0.43	0.188±0.106	1.77± 1.19
Sm	/	/	/	0.0534±0.0311	0.84± 0.09
Fe	807±178	511±201	5800±2500	566±353	1509± 746
Ag	0.35±0.25	0.48±0.28	0.91±0.28	0.176±0.045	0.126± 0.025

Suite du Tableau 19:

Cs	0.050±0.001	0.24±0.20	0.22±0.20	0.151±0.115	0.425± 0.0425
Br	4.9±2	11±3.5	250±65	22.2±17.5	3.35± 2.17
Yb	/	/	/	0.015±0.007	0.06± 0.01
Lu	/	/	/	/	0.026± 0.0049

*Resultats de Ponzone obtenus en (hiver 1998/1999)

**Resultats d'Ispra et Milan (*Rizzio et al. (1999) and Gallorini et al.(1999)*).

***Concentrations des éléments déterminées dans les PM10 in (downtown Rome (Avino P. et al., 2008))

Les valeurs trouvées à Alger sont beaucoup plus grandes en comparaison de celles de Ponzone, d'Ispra et de Rome particulièrement pour le Chrome et tout à fait semblable à celles de Milan excepté pour l'Antimoine.

En effet, la concentration moyenne en chrome trouvée à Alger est de 41.91 ng/m^3 et est de 38.6 ng/m^3 à Milan alors qu'elle est d'environ 7 ng/m^3 en Ponzone, Ispra et Rome d'où une éventuelle pollution en chrome à Alger.

Celle de l'antimoine est de 2.87 ng/m^3 à Alger et inférieure à 10 ng/m^3 en Ponzone, Ispra et Rome, alors qu'elle est de 68.3 ng/m^3 à Milan d'où une pollution en Antimoine très prononcée à Milan.

Les valeurs trouvées en Mercure sont très faible devant celles trouvées à Rome et la limite délivrée par l'OMS.

Nous pouvons conclure par cela, que comparé à d'autres techniques, la technique d'analyse par d'activation neutronique de métaux lourds est d'une meilleure sensibilité et permet d'identifier l'élément quelque soit sa nature de sa combinaison chimique car c'est le noyau de la molécule qui est modifié par capture neutronique et non pas le cortège électronique. La NAA est souvent utilisée comme référence pour d'autres méthodes d'analyse qui font appel à un étalonnage préalable. (*Rapports internes. CRNA/COMENA, 2008 et 2009*), (*Tolgyessy et al., 1987*). (*Chutke et al., 1994*)

Pour conclure, il est à noter que l'absence relative des valeurs de références pour la majorité de métaux lourds analysés nous met dans l'incapacité et l'impossibilité d'évaluer l'importance de cette pollution atmosphérique, néanmoins vu les seuils d'alerte atteints surtout par les TSP, des mesures et décisions doivent être prises visant à protéger la santé humaine et l'environnement, en l'occurrence la réduction de la pollution de l'air d'origine automobile qui est devenue ces dernières années la première cause de la pollution atmosphérique au niveau des zones urbaines.

Toutefois, cette source de pollution est toujours préoccupante parce que le nombre de véhicules sur nos routes et autoroutes a augmenté au fil des ans.

De ce fait, il peut être préconisé de suivre certaines mesures de précaution telles que:

- ❖ Réglage de l'injection des moteurs diesel et équipement des véhicules par des filtres à particules (monolithes).

- ❖ Privilégier les modes de déplacement non polluants et encourager l'utilisation de nouveaux carburants et développement des transports ferroviaires électriques.
- ❖ Installation de dispositifs de surveillance de la qualité d'air surtout dans les villes et sur l'ensemble du territoire national.
- ❖ Instauration d'une éducation environnementale et réalisation des campagnes de sensibilisation sur l'impact de la pollution de l'air.
- ❖ Promotion des technologies de dépollution qui repose notamment sur une taxation des rejets de divers polluants atmosphériques et résulte du principe « pollueur -payeur ». Elle est acquittée par les exploitants d'installations de taille industrielle, ce qui peut être un moyen efficace pour améliorer la qualité de l'air en milieu urbain et de l'atmosphère en général.
- ❖ En cas de pollution déclarée, il est recommandé d'éviter les exercices physiques intenses en zone polluée. Il est recommandé aussi aux populations fragiles (enfants, personnes âgées, patients atteints d'une maladie chronique cardiaque ou respiratoire) de limiter les déplacements et de respecter scrupuleusement leur traitement médical en cours.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons identifié et quantifié 18 éléments : Cr, Co, Se, Hg, Sc, Hf, Ta, Sb, Ru, Fe, Tb, La, Sm, Ag, Cs, Br, Yb, Lu, dans des échantillons d'air provenant de la région d'Alger, en utilisant la méthode relative d'analyse par activation neutronique.

La pollution atmosphérique par différents polluants est un problème très complexe : les sources et les émissions doivent être identifiées, les méthodes analytiques doivent être validées, les risques doivent être évalués, les émissions doivent être contrôlées et les aspects économiques doivent être intégrés.

Des éléments de traces sont largement dispersés dans l'environnement et leurs interactions avec différents composants normaux ont comme conséquence des effets toxiques sur la biosphère.

L'objectif de notre travail est de connaître la qualité de l'air ou la quantité totale de pollution produite par le trafic routière dans le site choisi, à fin de prendre des mesures pour réduire les risques que pose cette pollution atmosphérique d'origine automobile sur notre santé . Le lieu de prélèvement se trouve sur les hauteurs d'Alger entre deux routes à grande circulation, à 200 m par rapport au niveau de la mer, mis à part deux grandes routes au voisinage du site, il n'y a pas d'autres sources émettrices de pollution.

Toutefois, cette source de pollution est toujours préoccupante parce que le nombre de véhicules sur nos routes et autoroutes a augmenté au fil des ans, ces véhicules consomment beaucoup de carburant (essence et diesel) qui sont par conséquent très polluants.

Nous avons utilisé, en fonction de l'objectif fixé et les moyens disponibles un échantillonnage d'air sur des filtres. La collection des échantillons a été effectuée durant une période de douze (12) mois. Pour aspirer l'air, le dispositif utilisé est un appareil LVS "Low Volume Sampler", avec un débit plus ou moins constant de $1\text{m}^3/\text{h}$ (petites variations dues au colmatage).

Le transport et la mobilisation de ces éléments ont déjà attiré beaucoup d'attention. L'étude que nous avons effectuée au sujet de la qualité dans l'air à Alger prouve que la pollution atmosphérique par les TSP a atteint des niveaux inquiétants, approximativement 80% des échantillons, dépassent la valeur Algérienne cible

(50ng/m³) ; alors que 34% des échantillons dépassent largement la valeur limite (80ng/m³) donnée par l'OMS.

En outre, l'étude que nous avons menée montre l'existence de ces métaux lourds aux concentrations très variables. En effet les niveaux de concentrations obtenues en ng/m³ expriment la sensibilité de la méthode d'analyse par activation neutronique. Toute fois cette étude nous a permis de constater que pour effectuer une analyse assez précise, les étapes suivantes doivent être respectées :

- ❖ La préparation des échantillons est une étape très délicate car une mauvaise préparation des échantillons ou des enveloppes correspondantes peut engendrer des contaminations et de ce fait générer des erreurs importantes dans l'analyse.
- ❖ Une bonne analyse quantitative dépend de la bonne calibration des différents éléments de la chaîne de mesure.
- ❖ La précision de cette méthode d'analyse peut être améliorée si on choisit les conditions optimales des différents facteurs liés à la mesure ; comme exemple on peut citer :
 - Le choix du temps de décroissance : en effet pour les éléments de longue période, il est souhaitable d'allonger la durée de décroissance.
 - Le choix du temps de collection qui est principalement lié à la concentration de l'élément à doser dans l'échantillon considéré.
- ❖ L'utilisation de plusieurs standards dans une telle expérience est très utile pour compléter le dosage de plusieurs éléments. En effet certains éléments contenus dans l'un peuvent être absents dans l'autre, on peut aussi utiliser l'un des standards comme comparateur et l'autre comme témoin.

Enfin, on peut dire que la méthode d'analyse par activation neutronique est une méthode très pratique pour le dosage des éléments de trace. Ces caractères multi élémentaire et non destructif permettent son application de façon routinière, d'où le but de ce travail.

Pour conclure, il est à noter que l'absence relative des valeurs de références pour la majorité de métaux lourds analysés nous met dans l'incapacité et l'impossibilité d'évaluer l'importance de cette pollution atmosphérique, néanmoins vu les seuils d'alerte atteints surtout par les TSP, des mesures et décisions doivent être prises visant à protéger la santé humaine et l'environnement, en l'occurrence la réduction de la pollution de l'air d'origine automobile devenue ces dernières années la première cause de la pollution atmosphérique au niveau des zones urbaines.

Des échantillons du même type ont été analysés par XRF, ont donné peu de résultats et la plupart des éléments sont indétectables. Les valeurs de concentrations en éléments de trace étaient au-dessous des valeurs de limite de détection pour la plupart des éléments analysés.

En perspectives, des futurs travaux de recherche et efforts pourraient être orientés vers :

- L'analyse des échantillons provenant des milieux contaminés en étudiant la teneur d'éléments toxiques en milieux industriels contaminés.
- Une caractérisation physico-chimique plus fine des polluants et leur éventuelle interaction avec les allergènes biologiques est nécessaire.
- Des travaux harmonisés de cartographie fine sont nécessaires afin d'identifier les portions du territoire national où les populations sont affectées par des niveaux de pollution atmosphérique les plus élevés.
- L'élaboration et la mise en œuvre de la réglementation en matière de qualité de l'air ambiant. Cette réglementation comporte des prescriptions techniques et des normes d'émissions des rejets pour les sources fixes et les véhicules automobiles. De plus, chaque pays doit établir ses propres valeurs limites pour les concentrations des éléments considérés dangereux.
- Le développement de nouvelles approches, pour faire la collecte des échantillons peut être envisagé et les résultats trouvés pourraient être comparés avec un possible impact environnemental.
- La mise en œuvre de politiques de prévention, le développement d'une plateforme de modélisation est plus que nécessaire: La démarche consiste à acquérir des données utiles et suffisamment précises pour développer et tester des modèles à partir des campagnes de mesures in situ couvrant

l'ensemble des situations atmosphériques et dont les plus caractéristiques servent de base à des simulations.

- Des études sur les effets à long terme de la pollution atmosphérique accompagnées d'évaluation d'impact sanitaire sont nécessaires .Les études toxicologiques et épidémiologiques sur des populations particulièrement fragiles doivent être envisagées pour connaître le rôle exact de la pollution atmosphérique dans l'accroissement du nombre de maladie chronique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- **Anić M.**, Tasić M. and Frontasyeva M.V. (2009) Active moss biomonitoring of trace elements with *Sphagnum girgensohnii* moss bags in relation to atmospheric bulk deposition in Belgrade, Serbia *Environmental Pollution* 157: 673–679
- 2- **Avino P.**, Capannesi G. and Rosada A., (2008) Heavy metal determination in atmospheric particulate matter by Instrumental Neutron Activation Analysis, *Microchemical Journal* 88: 97–106
- 3- **Avino P.** et Brocco D., Lepore L. and Pareti S.,(2009). Interpretation of atmospheric pollution phenomena in relationship with the vertical atmospheric remixing by means of natural radioactivity measurements (Radon) of particulate matter, *Annali di Chimica* 93: 589–594.
- 4- **Ayad R.** et Cherifi Y.,(2006) . Evaluation de la pollution atmosphérique par les TSP à Alger centre. Thèse : 33-45
- 5- **Belamri. M.**, (2009) Cours: Introduction aux applications neutroniques(CRNA) :91
- 6- **Beijer K.**, Jernelöv A., (1986). Sources, transport and transformation of metals in the environment, in: L. Frindberg, G.F. Nordberg, V.B. Vouk (Eds.), *Handbook on the Toxicology of Metals*, Vol. 1, 2nd ed. Elsevier Scientific Publ., Amsterdam, ISBN: 0444904131: 68–74.,
- 7- **Bert Wolterbeekn**, (2001) .*Radiation Physics and Chemistry*. 61: 323–327
- 8- **Bitouche. A.**, (2002). Etude de pollution de l'air à Alger par les particules fines PM10, PM2.5, PM1 et évaluation des particules acides. Thèse ENP : 55-60
- 9- **Bouladraouat. F** et Akacha.L., (2007). Analyse des métaux lourds par SAA et XRF en milieu atmosphérique urbain : cas de Bab El Oued et Tizi Ouzou. Thèse (Univ.Tizi Ouzou):63-65
- 10- **Blotcky, A.J.**, and Claassen, J.P., (1995). Optimization of procedures for Mercury-203 instrumental neutron activation analysis in human urine. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 159 (1): 109–116.
- 11- **Bruno F.**, Capannesi G., Gratani L. and Manes F., (1980). Characterization of mineral content in *Quercus ilex* leaves by photon and neutron activation analysis(Castelporziano, Rome), *Giornale Botanico Italiano* 114: 175–186.
- 12- **Capannesi G.**, and Mastinu G., (1978). Trace elements in air particulates from 1965 to 1978, CNEN Report RT/AMB (79)10: 1–27.

- 13- Chutke N.L.,** Ambulkar M.N., Aggarwal A.L. and Garg A.N., (1994). *Instrumental Neutron Activation Analysis of ambient air dust particulates from metropolitan cities in India, Environmental Pollution* 85: 67–76.
- 14- Chaboun. F** et Timechmachine R., (2007). *Evaluation de la pollution atmospherique par les métaux lourds en milieu urbain : Cas de Bad El Oued. Thèse USTHB* : 46-50
- 15- Chassot E.,** Barbotteau Y., Oudadesse H., et Irigaray J. L.(2004). *Evaluation par PIXE dans des coupes minces de la migration de certains éléments relargués par des implants métalliques. Laboratoire de physique corpusculaire, CNRS-IN2P3, France. Copyright © Published by Éditions scientifiques médicales Elsevier SAS* :2-4
- 16- De Soete D.,** Gijbels R. and Hoste J. (1972). *Neutron Activation Analysis. Chemical analysis, Wiley- Interscience, vol.34:311.*
- 18- Directive européenne** (Réf.2008/50/CE) du 21 mai (2008)
- 19- D'Innocenzio F.,** Di Filippo P., Lepore L. and Marconi A., (1998). *PM10 and PM2.5 concentrations in urban air and size fraction distribution of toxic metals,Annali di Chimica* 88: 281–289.
- 20- Djingova R.,** Arpadjan S. and Kuleff I., (1991). *INAA and flame AAS of various vegetable reference materials, Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 339: 181–186.
- 21- Esteban Remon,** (2006). *Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution , thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Faculté des sciences et techniques: 67-69*
- 22- Elichegaray. C.,** (2008). *La pollution de l'air : sources, effets, prévention. Edition Dunod,* 1-40
- 23- Fontan J.,** (2003). *Les pollutions de l'air, les connaître pour les combattre. Edition Vuivert:34-39*
- 24- Gombert S.,** (2005). *Pollution atmosphérique par les métaux. Edition EDP Sciences. 9 - 13.*
- 25- Gondala M.A.,** Hussainb T., Yamanía Z.H. and Baig M.A.,(2009). *On-line monitoring of remediation process of chromium polluted soil using LIBS, Journal of Hazardous Materials* 163 :1265–1271
- 26- Hamdad. N .,** (2002). *Protection internationale de l'environnement : entre prise de conscience et mise en œuvre. Thèse ENP* :56-62
-

- 27- Harrison R.M. and Yin J., (2000).** *Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? The Science of Total Environment* 249 :85–101.
- 28- Journal officiel n°43 du 20 juillet (2003)**
- 29- Journal officiel n°84 du 29 décembre (2004)**
- 30- Journal officiel n°24 du 16 avril (2006)**
- 31- Jose R. Peralta-V.M., Laura L. and Mahesh N., (2009).** *The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. The international journal of biochemistry and Cell Biology*, 41: 1665-1677
- 32- Kalnicky D.J. and Singhvi R. (2001).** *Field portable XRF analysis for environmental samples. Journal of Hazardous Materials* 83: 93-122.
- 33- Kayasth. S, and Swain K., (2004).** *Determination of rare-earth elements in Periyar River water and seawater using neutron activation analysis. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 262, N° 1: 191-194.*
- 34- Kikuo Oikawa : (1998)***Trace analysis of atmospheric samples*
- 35- Kiss A., (2004).** *Droit international de l'environnement 3eme édition. Edition Pedone* 256 - 257.
- 36- Krzyzanowski M., (2005).** *La pollution atmosphérique par les particules en suspension : ses effets nuisibles sur la santé. EURO/04/05, Centre européen de l'environnement et de la santé de l'OMS : 1*
- 37- Le Boufant. L., (1988).** *Pollution atmosphérique (par les aérosols solides et liquides) Appareils de prélèvement et de mesure. Techn. De l'Ing., Vol. p.4.316 :16*
- 38- López-Luna J., González-Chávez M.C., Esparza-García F.J. and Rodríguez-Vázquez R., (2009).** *Toxicity assessment of soil amended with tannery sludge, trivalent chromium and hexavalent chromium, using wheat, oat and sorghum plants, Journal of Hazardous Materials* 163: 829–834
- 39- Loupilov A., Sokolov A. and Gostilo V. (2001).** *X-ray Peltier cooled detectors for X-ray fluorescence analysis. Radiation Physics and Chemistry* 61: 463-464.
- 40- Masclat P., (2005).** *Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives. Edition Ellipes. 137: 29-30.*
- 41- Matteini M., Lalli C. and Tosini I. (1991).** *Examination of the soluble components of patinas by means of ion chromatography and atomic absorption. In : ODP restauro : rivista dell'Opificio delle pietre dure e Laboratorio di restauro di Firenze, 3, pp. 40-46.*

- 42- Moauro A., and Carconi P.L., (1991).** A European intercomparison of vegetal standard reference materials, based on INAA and some non nuclear spectrochemical techniques, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 151:149–157.
- 43- Mounia E.Y., (2006).** Pollution atmosphérique urbaine, Afsset : 2
- 45- Misaelides P., Samara C., Noli F., Kouimtzis Th. And Anou I., (1993).** Toxic element concentrations in airborne particulate matter in the area of Thessaloniki, Greece, *The Science of Total Environment* 130 139–146.
- 46- Paul A. C. Pillai, (1978).** *Air Soil Pollut.*, ISSN 0049-6979. VOL.19 N°1: 133.
- 47- Paul A. C. Pillai, (1983).** *Air Soil Pollut.*, ISSN 0049-6979. VOL.19 N°1:62- 63.
- 48- Pavageau M.P. (2003).** Caractérisation et intensité des flux des formes chimiques (volatiles et particulaires) des métaux lourds d'origine anthropique à l'atmosphère Correspondant INERIS : Direction de chimie analytique environnementale/Qualité de l'air : Thèse , CNRS
- 49- Petit-Coviaux F., Person A. , Le Moullec Y. , Courtois Y., Festy B., Dufour G. and Brochard P. , (1990).** Knowledge atmospheric particles in urban environment: biological representativeness and metrological difficulties. *Journal of Pollution atmosphérique* ISSN 0032-3632 CODEN POATBH vol. 32, n°125:21-30
- 50- Querol X., Alastuey A., López-Soler A., Boix A., Sanfeliu T., Martynov V.V., Piven P.I., Kabina L.P. and Souschov P.A., (1997) .** Trace element contents in atmospheric suspended particles: inferences from instrumental neutron activation analysis, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 357: 934–940.
- 51- Ramade F., (1992) :** Précis d'écotoxicologie. Edition Masson : 22
- 52- Ramade. F., (2000).** Dictionnaire encyclopedique des pollutions. Edition Dunod ,225.
- 53- Rossbach, M., Jayasekera, R. and Kniewald, G., (2000).** Large scale air monitoring biological indicators versus air particulate matter. IAEA-TecDoc- 1152 : 71–80.
- 54- Rapports internes: Etude de la qualité de l'air par l'évaluation des teneurs en métaux lourds dans l'air au niveau de la ville de Tizi-Ouzou »(2008) « Diagnostic environnemental de la gare de Tizi-Ouzou: détection de la pollution métallique d'origine automobile , (2009).** CRNA/COMENA; Alger
- 55- Richard W. Boubel, Donald L. Fox, D. Bruce Turner and Arthur C. Stern. (1994).** *Fundamentals of Air Pollution.* Academic press. Third edition, Elsevier (USA):243-273.
-
- 56- Rizzio E. and Bergamaschi L.,(2001).** Trace elements determination in lichens and airborne particulate matter for the evaluation of the atmospheric pollution in a region of northern Italy . *Environmental international* 26: 543-549

- 57- Robache A.**, François M., Jean-Claude G., Benoît H., Bruno M., et MEZRAG M. (2001). *Prélèvement et analyse des métaux dans les particules en suspension dans l'air ambiant. Ecole des mines de Douai, Département chimie et environnement. Etude n°4 :4-6*
- 58- Romina C.** DeLucca B, et Patricio L.m., (2009). *Effect of different doses of Hexavalent chromium on mandibular growth and tooth eruption in juvenile wistar rats. Experimental and toxicologic pathology 61 :347 – 352.*
- 59- Saeid Hosseini M.**, and Foroogh Belador (2009). *Cr (III)/Cr(VI) speciation determination of chromium in water samples by luminescence quenching of quercetin, Journal of Hazardous Materials 165: 1062-1067*
- 60- Singh K.K.**, Hasan S.H., Talat M., Singhc V.K.and Gangwarc S.K., (2009). *Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using wheat bran, Chemical Engineering Journal, 151 :113 – 121.*
- 61- Tolgyessy J.** and Klehr E.H., (1987). *Nuclear Environmental Chemical Analysis, Ellis Harwood Ltd, West Sussex, UK 0470: 208-341.*
- 62- Weidong Zhang** and Junteng Liu, (2009). *Kinetic study of chromium(VI) facilitated transport through a bulk liquid membrane using tri-n-butyl phosphate as carrier, Chemical Engineering Journal 150 : 83–89*
- 63- Yusof A. M.**, Akyl S., and Wood A. K. H. J., (2001). *Determination of rare-earth elements in Periyar River water (Kerala, India) and seawater (Mumbai, India) using neutron activation analysis Radioanal. Nucl. Chem. Vol., 262: 249- 333.*
- 64- Ziemacki G.**, Cattani G., Cusano M.C., Stacchini G. and Marconi A., (2003). *Contenuto di metalli nelle varie frazioni dimensionali di materiale particellare, Annali dell'Istituto Superiore di Sanità 39 : 371–379.,*
- 65- Zayed A. M.** and Terry N., (2003). *Chromium in the environment: factors affecting biological remediation, Kluwer Academic Publishers, Plant and Soil 249: 139–156.*
- 66- Zghaid M.** , Bounakhla M. , Doukkali A. , Benkirane O. , Quayou A. et N. Saidi, (2005). *Evaluation de la pollution atmosphérique et son impact sur la sante dans la ville de kenitra. 3 Journées Internationale des Géosciences de l'Environnement El Jadida. Université Chouaïb Doukkali - Faculté des Sciences – Département de Géologie ; Maroc.30 :1*

Tableau 20: Tableau périodique des éléments.

Métaux lourds importants

On remarquera que nombre d'entre eux sont chalcophiles c'est à dire qu'ils forment des minéraux

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 73	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89															
Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71				
Th 90	Pa 91	U 92															

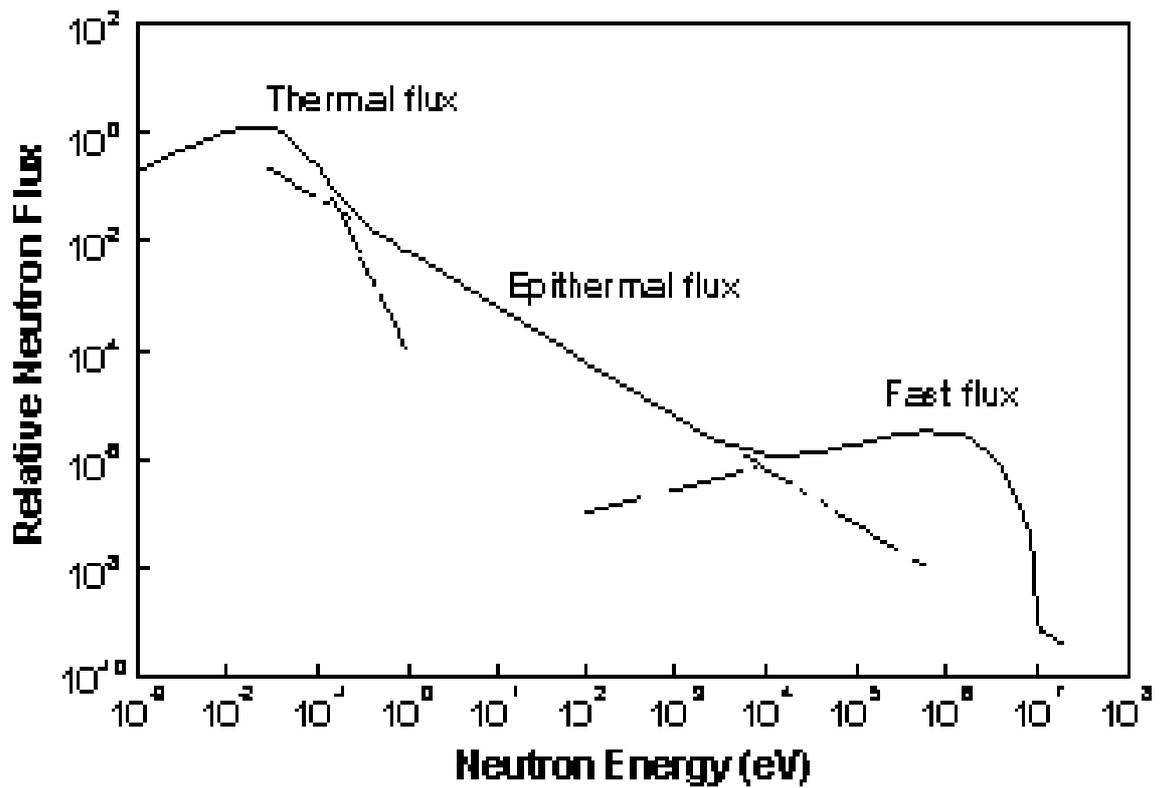


Figure 31 : Spectre illustrant la variation relative du flux de neutron en fonction de l'énergie

Annexes

Sample description: filter ester de cellulose Khodja 04
 Detector #1 ACQ 04-mai-2009 at 13:22:34 RT = 5005.6 LT = 5000.0

MCB 25		ROI#	RANGE(keV)	GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/4)M	LIBRARY (keV)		
cA	+/-											
1	26.04	51.93	13586	7730	220	29.15	2.34	12.62	Np-237	29.38	15.78	
	0.45											
2	55.23	69.55	8069	1350	157	66.74	1.17	1.82	Au-196	66.83	0.61	0.07
3	71.21	76.71	3024	426	50	73.97	0.84	1.41	Pb-214	74.81	1.35	0.16
4	81.12	86.63	2200	235	43	83.82	1.06	1.64	Ta-182	84.68	1.77	0.32
5	96.54	103.15	2583	297	54	99.23	0.95	2.60	Ac-228	99.45	4.36	0.79
6	106.46	116.92	3087	177	83	113.45	1.26	2.59	Ta-182	113.67	1.84	0.86
7	118.03	124.64	2360	148	52	121.41	1.18	1.74	Se-75	121.12	0.18	0.06
8	129.59	139.51	2971	460	76	136.13	0.86	1.41	Hf-181	136.25	1.51	0.25
9	142.26	162.64	6269	822	172	145.31	1.04	1.45	Ce-141	145.45	0.34	0.07
10	189.08	195.69	1620	160	43	192.23	0.81	1.28	Fe-59	192.34	1.03	0.28
11	212.76	225.43	2853	289	89	216.12	1.54	2.57	Tb-160	215.65	1.44	0.44
12	244.71	251.32	1267	-24	38	248.10	0.99	1.51	Eu-154	248.04	0.00	0.12
13	261.23	267.84	1321	166	38	264.11	2.06	2.68	Ta-182	264.07	0.91	0.21
14	275.55	282.16	1246	124	37	279.03	1.23	1.80	Hg-203	279.17	0.03	0.01
15	295.93	302.54	1111	75	35	299.20	1.60	2.25	Tb-160	298.57	0.05	0.03
16	308.05	314.66	1300	297	38	311.43	1.45	2.10	Np-239	315.88	3.74	0.48
17	316.31	322.92	3170	2130	57	319.81	1.30	1.89	Cr-51	320.07	4.33	0.12
18	408.28	414.89	1973	1020	46	411.47	1.41	1.98	Kr-89	411.42	7.81	0.35
19	478.22	484.83	825	121	30	481.68	1.59	2.25	Hf-181	482.16	0.03	0.01
20	492.54	499.14	800	185	30	495.72	2.80	3.63	Ru-103	497.08	0.04	0.01
21	506.85	513.46	894	149	31	510.60	2.59	3.01	Tl-208	510.72	0.13	0.03
22	518.42	525.03	652	-5	27	521.59	0.62	1.07	Pa-234	521.00	0.00	0.45
23	550.36	556.96	699	-20	28	553.66	0.55	0.83	Br-82	554.34	0.00	0.01
24	560.27	566.88	1301	655	37	563.64	1.55	2.21	Cs-134	563.26	1.56	0.09
25	598.81	605.42	4201	3202	66	602.28	1.57	2.29	Te-131	602.04	15.26	
	0.31											
26	642.31	648.92	869	273	31	645.60	1.62	2.13	Rh-106M	645.80	1.78	
	0.20											
27	718.30	726.01	905	325	34	722.33	1.69	2.40	Ce-143	722.00	1.18	
	0.12											
28	791.53	799.23	662	132	30	795.24	1.29	1.89	Ac-228	794.80	0.55	
	0.12											
29	806.39	814.10	520	67	27	810.05	1.63	3.16	J-132	809.80	0.46	
	0.19											
30	830.07	837.77	686	178	30	834.22	1.47	2.86	Mn-54	834.81	0.04	
	0.01											
31	884.57	892.28	4131	3548	66	888.65	1.69	2.48	Sc-46	889.26	0.71	
	0.01											
32	963.84	971.55	344	26	22	967.68	1.35	1.78	Sb-124	968.22	0.28	
	0.24											
33	993.02	1000.73	236	-9	18	996.73	0.73	1.19	Eu-154	996.30	0.00	
	0.03											
34	1094.86	1102.57	960	765	32	1098.48	1.89	2.68	Fe-59	1099.22	0.27	
	0.01											
35	1110.82	1123.48	3897	3657	66	1119.77	1.91	2.78	Bi-214	1120.28	4.86	
	0.09											
36	1168.62	1176.33	223	135	6	1172.36	1.92	2.56	J-132	1173.20	2.45	
	0.29											
37	1184.58	1192.29	136	41	13	1188.59	1.09	1.65	Ta-182	1189.05	0.05	
	0.02											
38	1217.06	1224.76	145	67	13	1220.85	0.92	3.58	Ta-182	1221.42	0.05	
	0.01											

Figure 32 : Exemple d'un résultat délivré par la chaîne de comptage Gamma relatif au comptage d'un échantillon d'air

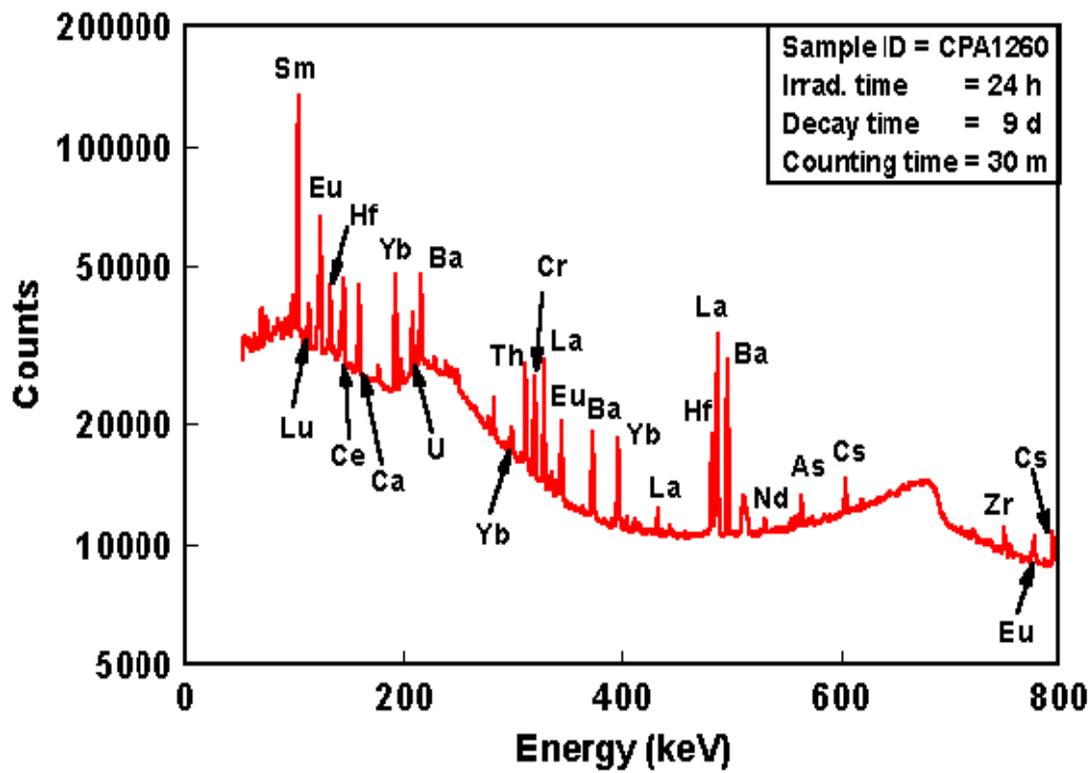


Figure 33 : Spectre gamma de 0 à 800 keV des éléments mesuré d'un échantillon irradié pendant 24 heures, temps de refroidissement de 9 jours et temps de comptage de 30 mn

Tableau 21 : Les énergies caractéristiques des éléments étudiés

Elément	Symbole	Z	Energies caractéristiques (KeV)
Mercure	Hg	80	77.6 ; 133.9 ; 158.3 ; 203.8 ; 279.1 ; 373.6
Chrome	Cr	24	320
Antimoine	Sb	51	176.2 ; 427.8 ; 463.1 ; 564 ; 600.4 ; 602.6 ; 606.6 ; 635.8
Scandium	Sc	21	889.4 ; 1120.3
Cobalt	Co	27	1173.1 ; 1332.4
Sélénium	Se	34	96.7 ; 121.1 ; 136 ; 264.6 ; 279.6 ; 400.7
Hafnium	Hf	73	133.1 ; 345.7 ; 482.2
Tantale	Ta	73	67.7 ; 100.3 ; 152.4 ; 179.5 ; 222.3 ; 1121.2 ; 1188.8 ; 1221.6 ; 1231 ;
Argent	Ag	47	433.8 ; 632.9 ; 657.8 ; 706.4 ; 763.9 ; 884.5 ; 937.2 ; 1384
Fer	Fe	27	192.5 ; 1098.6 ; 1291.5
Lanthane	La	57	328.6 ; 486.8 ; 815.5 ; 1595.4
Brome	Br	35	554.3 ; 619 ; 698.3 ; 776.6 ; 827.8 ; 1043.9 ; 1317.2 ; 1474.7
Rubidium	Rb	37	1076.6
Cesium	Cs	55	563.2 ; 569.3 ; 604.7 ; 795.8 ; 802 ; 1364.8
Samarium	Sm	62	69.6 ; 103.2 ; 172.9
Le Terbium	Tb	65	87 ; 197.2 ; 215.8 ; 298.6 ; 879.4 ; 965.8 ; 1177.6 ; 1199.7 ; 1271.6 ; 1311.9
L'Ytterbium	Yb	70	113.5 ; 137.4 ; 144.7 ; 282.6 ; 396.1
Le Lutétium	Lu	71	113 ; 208.4 ; 250.1

Annexes

Tableau 34 : Relevé météorologique d'Alger centre de l'année 2008 (ADH.org,2009)

mois	jan.	fév.	mar.	avr.	mai	juin.	juil.	août.	sep.	oct.	nov.	déc.	année
Température minimale moyenne (°C)	-2	3	5	14	14	17	18	20	11	6	3	0	11,5
Température maximale moyenne (°C)	6	8	11	18	23	27	27	29	26	15	5	2	17,2
Précipitations (mm)	112	84	74	41	46	15	1	5	41	79	130	137	764
Nombre de jours avec pluie	10	6	3	4	3	0,5	2	2	1,5	0,5	5	5	
Record de froid (°C)	-9	-6	-5	3,8	3,8	9,4	13,4	13,8	11,6	7,2	1,6	-7	-9
Record de chaleur (°C)	24,4	30	28,8	37,2	38,8	41,6	41,1	47,2	44,4	37,7	31,1	24,4	47,2

الدراسة حول نوعية الهواء في الجزائر برهنت عن وجود المعادن الثقيلة مع تركيزات متغيرة، على مستوى [نغ/م³] يبرهن عن حساسية الطريقة رفيع المستوى، تقريبا 80% من عيناتنا % يتجاوز كثيرا 50 غ/م³ و 34% TSP. هذه الدراسة عرضت أيضا أن قد بلغ تلوث جوي ب (NAA) يتجاوز كثيرا 80 نغ/م³ لمعطيات OMS.

ABSTRACT

In Algeria, the lack of relative data to air quality makes that the impact of this form of pollution on the environment very badly known. The sources of pollution are numerous and the harmful effects are already perceived, but their direct relationship or indirect with the environmental pollution is not established.

It is in this context and in continuity with work under development at the Nuclear Research Center of Algiers, that we propose by this study the levels of air pollution by the fine particles and more particularly by heavy metals on the level of an urban site of Algiers with force directly exposed population density with the transmitting sources of pollution.

We have used a nuclear method: neutron activation analysis technique (NAA), for the detection of traces of heavy metals in our samples of filters collected throughout one year, from January to December, at a rate of approximately one sample per week. In total 52 samples were analyzed by this method.

The results found show the existence of this pollution and one will note that this pollution varies considerably according to the components, in particular for Chromium (Cr), Mercury (Hg), Cobalt (Co), Selenium (Se), Bromine (Br), iron (Fe), etc...

The study we done about the air quality in Algiers show the existence of the heavy metals with variable concentrations. This study show also that atmospheric pollution by TSP has reached a high level, approximately 80% of our samples are higher than the Algerian target value (50ng/m³) and 34% exceed largely the limit value (80ng/m³) given by OMS.

Key words: Atmospheric pollution, NAA, Heavy metals, Algiers.

RESUME

En Algérie le manque de données relatives à la qualité de l'air fait que l'impact de cette forme de pollution sur l'environnement soit très mal connu. Les sources de pollution sont nombreuses et les nuisances sont déjà perçues, mais leur relation directe ou indirecte avec la dégradation de l'environnement n'est pas établie.

C'est dans ce contexte et en continuité avec les travaux en cours de réalisation au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, que nous nous proposons par ce travail d'étudier les niveaux de pollution de l'air par les particules en suspension et plus particulièrement par les métaux lourds au niveau d'un site urbain d'Alger à forte densité de population exposée directement aux sources émettrices de pollution. Nous avons utilisé une technique nucléaire, à savoir la technique d'analyse par activation neutronique (AAN), pour la détection de traces de métaux lourds contenus dans les échantillons de filtres d'ester de cellulose collectés sur une période d'une année de janvier à décembre 2008 à raison d'un échantillon par semaine. Au total 52 échantillons ont été analysés par cette méthode.

Les résultats trouvés confirment l'existence de la pollution de l'air et que cette pollution mise en évidence varie considérablement selon les constituants, notamment pour le Chrome (Cr), le Mercure (Hg), le Cobalt (Co), le Sélénium (Se), le Brome (Br), le Fer (Fe), etc..

L'étude que nous avons effectuée au sujet de la qualité d'air à Alger montre l'existence de ces métaux lourds. Cette étude prouve aussi que la pollution atmosphérique par les TSP a atteint des niveaux inquiétants, approximativement 80% des échantillons, dépassent la valeur Algérienne cible (50ng/m³) ; alors que 34% des échantillons dépassent largement la valeur limite (80ng/m³) donnée par l'OMS.

Mots clés: Pollution atmosphérique, NAA, Métaux lourds, Alger.

Valorisation

Les résultats que nous avons obtenus ont fait l'objet de deux communications internationales orales dans deux manifestations différentes:

1. lors d'une conférence internationale, organisée au Nigéria, par l'Agence Internationale à l'Energie Atomique, et l'Université Ahmadou Bello de Zaria (Nigéria).

«6^{ième} Conférence Africaine sur les réacteurs de Recherche: Utilisations et sûreté» du 2 au 3 Novembre 2009 Abuja, Nigeria

L'intitulé de la communication:

**Study of the levels of air pollution by heavy metals
on an urban site of Algiers by neutron activation analysis (NAA)**

*KHODJA Z.*¹⁾; *MOUHOUCHE F.*²⁾; *BELAMRI M.*³⁾; *OMARI L.*³⁾;
*LAKHDAR CHAOUCH C.*³⁾ *AZBOUCHE. A.*³⁾;
*NEDJAR A.*¹⁾, *AZLI T.*¹⁾; *ZERGOUG Z.*¹⁾

1) Nuclear Research Center of Draria CRND, / COMENA.
BpN°43, Sebala, Draria, Algiers, ALGERIA

2) Higher National Institute of Agronomy INSA, Algiers, ALGERIA

3) Nuclear Research Center of Algiers CRNA / COMENA.
2, Bd Frantz Fanon BP 399, Alger Gare, 16200, Algiers, ALGERIA

2. Lors d'une conférence Internationale sur les « Dégradations de l'Environnement. Quelles solutions ?» CIDES09 Skikda, 06 - 08 Décembre 2009.

L'intitulé de la communication :

**Evaluation de la dégradation de la qualité de l'air par
le dosage des métaux lourds**

M. Belamri *, *Z.Khodja* **, *L.Omari* *, *C. Lakhdar Chaouch**, *A.Azbouche* *, *F.Mouhouche* ***

*Division des techniques nucléaires, Centre de Recherche Nucléaire d'Alger

**Division physique et applications nucléaires/ Centre de Recherche Nucléaire de Draria

***Institut National d'Agronomie El Harrach