

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Départements de Génie de l'environnement**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Réalisé par :**

**M<sup>lle</sup> KADI Sabrina**

**Mr GHEBACHE Nassim**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN  
GENIE DE L'ENVIRONNEMENT**

**THEME**

**L'étude de la pollution de l'air par les particules fines à  
Alger – application de l'activation neutronique à l'analyse  
des métaux lourds**

**Dirigé par : M<sup>me</sup>. L.OMARI, Attachée de recherche au CRNA**

**Mr. R.KERBACHI, Professeur à l'ENP**

**Présider par: M<sup>me</sup>. D.ARRAR, Docteur à l'ENP**

**Examiner par: Mr.A.CHERGUI, Maître de conférence, ENP**

**Mr.Y.KERCHICHE, Maître assistant, U.Médéa**



**Promotion : Juin 2013**

## ملخص :

تنطوي هذه الأطروحة على مراقبة نوعية الهواء بتقدير كمية العناصر الدقيقة المحتوات به (PM-10, PM-2, 5) باستعمال جهاز أخذ عينات ذو توتر ضعيف LVS-PM-10 في منطقة شبه حضرية الجزائر العاصمة (تاغارا). أثبتت الدراسة أن تركيز هاته الجزيئات منخفض نوعا ما بالمقارنة مع دراسات أجريت سابقا سواء كانت بمناطق جزائرية أو بمناطق أجنبية تتميز بمناخ مشابه لهاته الأخيرة حيث قدر أعلى تركيز بـ 89, 48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  بالنسبة لـ PM-10 و 37, 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  بالنسبة لـ PM-2, 5. كما تم معايرة بعض المعادن الثقيلة كـ (As, Sc, Sb, La, Na, K, Ce, Fe, Zn, Co, Cr, Br) وذلك باستعمال تقنية التحليل بالتحريض النيوتروني.

**الكلمات الجوهرية :** نوعية الهواء , PM-10 , PM-2, 5 , منطقة شبه حضرية , التحريض النيوتروني

## Résumé :

Cette thèse consiste à surveiller qualité de l'air par l'évaluation des teneurs en PM-i (PM-10, PM-2, 5) à l'aide d'un système de prélèvement à faible débit LVS-PM 10 dans un site urbain de proximité à Alger (Tagarrin).

Cette étude a prouvé que la concentration de ces particules est faible par rapport à des études réalisées antérieurement dans quelque site d'Alger, ou dans des villes étrangères caractérisées par un climat similaire. Les teneurs moyennes enregistrées sont de l'ordre de 89,48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM-10 et de 37.61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM-2,5.

L'étude porte aussi sur l'analyse de certains métaux lourds (Ce, K, Na, La, Sb, Sc, As, Br, Cr, Zn, Fe) en utilisant la technique d'analyse par activation neutronique.

**Mots clés :** qualité de l'air, PM-10, PM-2,5 zone semi urbaine, activation neutronique.

## Abstract:

This study consists of monitoring the air quality by evaluating the amount of micro particle contained in it (PM-10, PM-2, 5) by mean of a sampling device of low flow LVS-PM 10 in a semi-urban area in Algiers (Tagarain). This study showed that the concentration of the particles is low compared to previous studies in some regions of Algeria, or foreign areas with a similar climate, where the highest concentration is: 89.48  $\text{g} / \text{m}^3$  for PM-10 and: 37.61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for PM-2, 5. Also, a calibration was made using some heavy metals such as: (Ce, K, Na, La, Sb, Sc, As, Br, Cr, Zn, Fe) using the technique of analyzing by activation neutrons.

**Key words:** air quality, PM-10, PM-2,5, semi-urban area, incitement neutron.

## Remerciements

*Nous remercions tout d'abord ALLAH qui nous a orienté vers le chemin du savoir et les portes de la science.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Madame OMARI Leïla qui, en tant que promotrice au CRNA, nous a accueillis, pris en charge, et suivi durant toute la période de notre stage.*

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur KERBACHI Rabeh, notre promoteur à l'ENP, pour l'orientation, la confiance et ses bonnes explications.*

*Aussi, nous tenons à remercier vivement :*

- *Madame D. ARAR pour avoir accepté de présider le Jury ainsi que pour nous avoir encadrés durant notre cursus, pour sa gaité et sa remarquable pédagogie.*
- *Monsieur A. CHERGUI et Monsieur Y. KERCHICHE pour leur disponibilité et pour avoir pris le temps de bien étudier et examiner notre mémoire.*

*Notre gratitude à ami SALAH qui a toujours été là pour nous encourager et nous guider vers le bon chemin, que dieu vous garde pour toutes les personnes qui vous aime.*

## Dédicaces

*A la mémoire de mon très chère papa RACHID qui est partie sans voir ni cueillir le fruit de ces efforts.*

*Je dédie ce modeste travail à ma formidable mère centre de ma vie et ma raison d'être, celle qui m'a soutenue tout au long de ma vie et particulièrement durant cette épreuve celle qui n'a jamais cessé de s'inquiéter pour moi.*

*A mes adorables sœurs Kahina, Lynda, Ouezna source de mon bonheur qui ont toujours été présentes pour me faciliter la vie, et qui simplifient mes problèmes et soucis avec un raisonnement distingué ainsi qu'à mes charmants frères Hocine et Massinissa.*

*A S.CHIBAH l'exemple de la sagesse et de la générosité.*

*A K.MOKRANI pour sa bonté inépuisable.*

*A mes chers amis polytechniciens, particulièrement BOULARAS Lamia et Dzanouni Imane, avec les quelles j'ai passé une année inoubliable.*

*A mes sœurs spirituelles KAID Sarra et LOGRADA Samia qui m'ont toujours épaulé.*

*Sabrina.*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents*

*A mes frères et sœurs*

*A tous mes amis*

*A tous ceux que j'aime.*

*Nassim.*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

1. Composition de l'air :.....	4
2. Définition de la pollution de l'air : .....	4
3. Structure de l'atmosphère terrestre :.....	4
3.1. la biosphère (couche limite) : .....	5
3.2. La troposphère : .....	5
3.3. La stratosphère :.....	5
3.4. La mésosphère :.....	5
3.5. La thermosphère : .....	5
4. L'origine de la pollution :.....	6
4.1. Les sources naturelles : .....	6
4.1.1. Les éruptions volcaniques :.....	6
4.1.2. Le pollen :.....	7
4.1.3. les autres sources naturelles [2] :.....	7
4.2. Les sources anthropiques :.....	7
4.2.1. La combustion : .....	7
4.2.2. Les rejets automobiles :.....	7
4.2.3. Les activités industrielles : .....	8
4.2.4. L'agriculture :.....	8
5. les principaux polluants atmosphériques : .....	8
6. Les niveaux de pollution : .....	10
6.1. La pollution à l'échelle locale : .....	10
6.2. La pollution à l'échelle régionale : .....	10
6.3. La pollution à l'échelle planétaire :.....	11
7. Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants:.....	11
7.1. Le vent :.....	11
7.2. La température :.....	12
7.3. Le soleil : .....	12
7.4. Les précipitations : .....	12
7.5. Les inversions de température :.....	12

## CHAPITRE II : POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES FINES

Introduction :.....	14
1. Définition : .....	14
1.1. Aérosol : .....	14
1.1.1. Aérosols naturels : .....	15
1.1.2. Aérosols polluants :.....	15
1.2. Diamètre aérodynamique : .....	15
1.3. Particules : .....	15

1.3.1.	TSP (« Total suspended particles »):	15
1.3.2.	PM :	15
a.	Les grosses particules PM-10 :	15
b.	Particules fines PM-2.5:	15
c.	Particules ultrafines PM-0,1 :	15
1.3.3.	Les poussières (dust)	16
1.3.4.	Les fumées noires	16
1.3.5.	Brouillard et brume	16
1.3.6.	Les suies :	16
1.3.7.	Les cendres volantes :	16
2.	Sources des particules fines :	16
2.1.	Particules de sources naturelles :	16
2.1.1.	La source terrigène :	17
2.1.2.	La source marine	17
2.1.3.	La source volcanique :	17
2.1.4.	La source biogénique :	17
2.2.	Particules de sources anthropogéniques :	17
2.2.1.	Trafic motorisé	18
2.2.2.	Procédés industriels	18
2.2.3.	Traitement des déchets :	18
2.2.4.	Agriculture :	18
3.	Propriétés des particules :	18
3.1.	Composition chimique :	18
3.1.1.	Composante primaire :	18
3.1.2.	Composante secondaire :	19
3.2.	Caractéristiques physiques	20
3.2.1.	Structure des particules :	20
3.2.2.	Formes des particules :	20
3.3.	Mécanisme de formation :	21
4.	Les normes des particules en suspension :	21
	*TSP [35]:	21
	*PM-10 [36]:	21
	*PM-2,5 [36]:	22

## CHAPITRE III : POLLUTION ATMOSPHERIQUE PAR LES METAUX LOURDS

	Introduction :	23
1.	Définition :	23
1.1.	Mercuré Hg :	23
1.2.	Plomb Pb :	23
1.3.	Cadmium Cd :	24
1.4.	Antimoine Sb :	24
1.5.	Arsenic As :	24
1.6.	Chrome Cr :	24
1.7.	Cobalt Co :	24
1.8.	Cuivre Cu :	25

1.9.	Molybdène Mo :	25
1.10.	Nickel Ni :	25
1.11.	Sélénium Se :	25
1.12.	Vanadium V :	25
1.13.	Zinc Zn :	26
2.	Les principales sources d'émission:	26
3.	Les impacts des métaux lourds :	27
3.1.	Impact sur la végétation :	27
3.2.	Impact sur les animaux :	28
3.3.	Impact sur la santé :	28
4.	Les normes de rejets :	29

## **CHAPITRE IV : METHODES DE PRELEVEMTN DES PM-i ET TECHNIQUE D'ANALYSE DES METAUX LOURDS**

1.	Mode de prélèvement :	32
❖	la jauge $\beta$ :	32
❖	HVS :	32
❖	LVS :	33
2.	Méthodes d'analyse des métaux associés aux PM-i :	33
2.1.	La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) :	34
2.1.1	Principe :	34
2.1.2	La loi d'absorption:	34
3	La technique PIXE :	35
3.1	Principe :	35
4	La spectrométrie par fluorescence X (XRF : X-Ray Fluorescence) :	35
4.1	Les rayons X :	35
4.2	Principe :	36
5	Analyse par activation neutronique (NAA) :	36
5.1	Principe de la méthode :	36
5.2	Principes généraux de l'analyse par activation neutronique :	36
5.2.1	L'irradiation :	36
5.2.2	La radioactivité :	39
5.2.2.1	Équation de l'activité :	40
a.	La méthode absolue :	42
b.	La méthode relative :	42
5.3	Avantages de la NAA :	43
5.4	Inconvénient de la NAA :	43
5.5	Limites de la NAA.....	44

## CHAPITRE V : METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

1. Présentation de la région d'étude :.....	46
2. Mode de prélèvement :.....	47
3. Analyse des métaux lourds :.....	49
3.1. Préparation et conditionnement :.....	49
3.2. L'irradiation :.....	51
a. Le réacteur nucléaire NUR de Draria :.....	51
b. Conditions d'irradiation :.....	51
c. Comptage par spectrométrie gamma :.....	51
4. Calculs :.....	53
4.1. Détermination de la concentration finale en PM-i dans l'air prélevé :.....	53
4.2. Détermination de la concentration des métaux lourds :.....	53
4.3. Calcul de l'erreur.....	54

## CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction.....	56
1. Etude de l'ampleur de la pollution atmosphérique par les particules fines :.....	56
1.1. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 :.....	57
1.2. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-2,5 :.....	57
1.3. Corrélation entre les teneurs massiques des PM-i :.....	60
1.4. Discussion des résultats :.....	61
a. PM-10 :.....	61
b. PM-2,5 :.....	62
c. Corrélation entre les différentes classes granulométriques :.....	63
2. Comparaison de la pollution mesurée à Alger avec d'autres sites :.....	63
3. Etude et ampleur des métaux lourds associés aux particules fines:.....	65
3.1. Niveaux de pollution par les métaux lourds :.....	65
• Discussion :.....	92
3.2. Corrélation :.....	93
CONCLUSION GENERALE.....	98

## Liste des tableaux

<b>TableauN°01</b> : Nature et origine des principaux groupes de polluants atmosphériques.....	9
<b>TableauN°02</b> :Les normes des PM-10 dans l'air.....	21
<b>TableauN°03</b> :Les normes des PM-2,5 dans l'air.....	21
<b>TableauN°04</b> :Les principales sources d'émissions de polluants .....	21
<b>TableauN°05</b> :Les normes de rejets de quelques polluants dans l'air .....	27
<b>TableauN°06</b> :Différents types d'analyse par activation .....	39
<b>TableauN°07</b> :Caractéristiques climatiques d'Alger.....	47
<b>TableauN°08</b> : Tableau d'énergie .....	53
<b>TableauN°09</b> :Teneurs moyennes quotidiennes des PM-10 et PM-2,5.....	58
<b>TableauN°10</b> :Caractéristiques statistiques des teneurs atmosphériques en PM-i.....	59
<b>TableauN°11</b> :Teneurs atmosphérique en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes.....	64
<b>TableauN°12</b> :Tableaux représentant les concentrations des éléments métalliques dans les PM-2,5.....	76
<b>TableauN°13</b> :Tableaux représentant les concentrations des éléments métalliques dans les PM-10.....	77
<b>TableauN°14</b> :Tableaux représentant les concentrations moyennes des éléments métalliques dans les PM-2,5.....	78
<b>TableauN°15</b> :Tableaux représentant les concentrations moyennes des éléments métalliques dans les PM-10.....	78

## Liste des figures

<b>Figure N°01</b> : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre.....	6
<b>Figure N°02</b> : Influence de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes.....	11
<b>Figure N°03</b> : Phénomène de retombée en panache.....	12
<b>Figure N°04</b> : Composition des particules suivant leur diamètre .....	19
<b>Figure N°05</b> : Constitution d'une particule fine.....	20
<b>Figure N°06</b> : Principe de mesure de la jauge $\beta$ .....	32
<b>Figure N°07</b> : Principe de collecte des PM-i par le HVS .....	33
<b>Figure N°08</b> : Principe de la technique de l'activation neutronique.....	37
<b>Figure N°09</b> : Carte de la Baie d'Alger indiquant le site de prélèvement .....	46
<b>Figure N°10</b> : Photo de l'appareil d'échantillonnage(LVS).....	48
<b>Figure N°11</b> : Photo du poste de prélèvement.....	48
<b>Figure N°12</b> :Photo du filtre de porosité 0,4 $\mu$ m avant et après le prélèvement.....	49
<b>Figure N°13</b> : Photo du filtre de porosité 8 $\mu$ m avant et après le prélèvement.....	49
<b>Figure N°14</b> : Schéma de conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à L'irradiation .....	50
<b>Figure N°15</b> : Exemple de spectre.....	52
<b>Figure N°16</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10.....	57
<b>Figure N°17</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes des PM-2,5.....	57
<b>Figure N°18</b> : Teneurs moyennes des différentes classes granulométrie .....	60

<b>Figure N°19</b> : Contribution massique des fractions PM-i dans les PM-10 .....	60
<b>Figure N°20</b> : Corrélacion entre les teneurs atmosphériques en PM-2,5 et PM-10.....	61
<b>Figure N°21</b> : Corrélacion entre les teneurs atmosphériques en PM-2,5 et PM (2,5-10).....	61
<b>Figure N°22</b> : Corrélacion entre les teneurs atmosphériques en PM (2,5-10) et PM-10.....	61
<b>Figure N°23</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Fer dans les PM-2,5.....	79
<b>Figure N°24</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Fer dans les PM-10.....	79
<b>Figure N°25</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Zinc dans les PM-2,5.....	80
<b>Figure N°26</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Zinc dans les PM-10.....	80
<b>Figure N°27</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Chrome dans les PM-2,5...81	
<b>Figure N°28</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Chrome dans les PM-10....81	
<b>Figure N°29</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cobalt dans les PM-2,5.....82	
<b>Figure N°30</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cobalt dans les PM-10.....82	
<b>Figure N°31</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Arsenic dans les PM-2,5.....83	
<b>Figure N°32</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Arsenic dans les PM-10.....83	
<b>Figure N°33</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Antimoine dans les PM-2,5.....84	
<b>Figure N°34</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Antimoine dans les PM-10.....84	
<b>Figure N°35</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Sodium dans les PM-2,5.....85	
<b>Figure N°36</b> : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Sodium dans les	

PM-10.....	85
<b>Figure N°37 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Potassium dans les</b>	
PM-2,5.....	86
<b>Figure N°38 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Potassium dans les</b>	
PM-10.....	86
<b>Figure N°39 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Scandium dans les</b>	
PM-2,5.....	87
<b>Figure N°40 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Scandium dans les PM-</b>	
10.....	87
<b>Figure N°41 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Lanthane dans les</b>	
PM-2,5.....	88
<b>Figure N°42 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Lanthane dans les</b>	
PM-10.....	88
<b>Figure N°43 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cérium dans les</b>	
PM-2,5.....	89
<b>Figure N°44 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cérium dans les PM-10....</b>	89
<b>Figure N°45 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Brome dans les PM-2,5...</b>	90
<b>Figure N°46 :Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Brome dans les PM-10....</b>	90
<b>Figure N°47 :Evolution des teneurs moyennes des métaux dans les PM-2,5.....</b>	91
<b>Figure N°48 :Evolution des teneurs moyennes des métaux dans les PM-10.....</b>	91
<b>Figure N°49 : Comparaison entre les teneurs moyennes des métaux dans les PM-2,5et</b>	

PM-10.....	91
<b>Figure N°50</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/PM-2,5.....	94
<b>Figure N°51</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/PM (2,5-10).....	94
<b>Figure N°52</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Cr/PM-2,5.....	94
<b>Figure N°53</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Cr/PM (2,5-10).....	95
<b>Figure N°54</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br/PM-2,5.....	95
<b>Figure N°55</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br/PM (2,5-10).....	95
<b>Figure N°56</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br (PM-10)/Cr (PM-10).....	96
<b>Figure N°57</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe (PM-10)/Br (PM-10).....	96
<b>Figure N°58</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe (PM-2,5)/Br (PM-2,5) .....	96
<b>Figure N°59</b> :Corrélation linéaire entre les teneurs du couple K (PM-10)/Na (PM-10).....	97

# Liste des abréviations

**GES** : Gaz à Effet de Serre.

**LAURE** : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle d'Energie.

**HAP** : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique .

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé.

**TSP** : Total Suspended Particules.

**PM** : Particulate matter.

**ETM** : Eléments Traces Métalliques.

**US EPA**: United States Environmental Protection Agency.

**UE** : Union Européenne.

**SAA** : Spectrométrie d'Absorption Atomique.

**PIXE**: Particle Induced X-ray Emission.

**XRF**: X-Ray Fluorescence.

**NAA**: Neutron Activation Analysis.

**LVS** : LowVolumeSampler.

**HVS** : High VolumeSampler.

**AIEA** : Agence Internationale de l'Energie Atomique.

# Liste des symboles

**A** : Isotope stable de l'atome cible de l'élément à doser.

**B** : Radio-isotope produit par irradiation.

**X** : Particule incidente.

**Y** : Rayonnement émis pendant ou après l'irradiation.

$d_B^F$ : Nombre d'atome formé.

$d_B^D$ : Nombre d'atome de B détruit.

$N_0$ : Nombre d'atome cible.

$\sigma_{AB}$ : Section efficace (probabilité d'incidence en barns<sup>10</sup>).

$\Phi_{AB}$ : Flux ou débit de particules incidentes (neutrons. cm<sup>-2</sup>. s<sup>-1</sup>).

**dt** : Intervalle de temps d'irradiation.

$N_B$ : Nombre d'atome de B présent à l'instant «t».

$\lambda$  : Constante de désintégration ( $\lambda = \ln 2/T$ ).

**T** : Temps de demi-vie de l'isotope radioactive formé.

**N\*** : Le nombre de noyau radioactif.

$N_A$  : Nombre d'Avogadro (6,023.10<sup>23</sup> atomes/mole).

**m** : Masse de l'élément recherché (grammes).

**I** : Abondance isotopique de l'élément (%).

**M**: Masse atomique de l'isotope irradié (grammes).

**t<sub>i</sub>** : Temps d'irradiation de l'échantillon (seconde).

**t<sub>d</sub>** : Temps de désactivation (seconde).

**A<sub>R</sub>**: Activité de l'élément recherché dans l'étalon.

**A<sub>E</sub>**: Activité de l'élément recherché dans l'échantillon.

**m<sub>R</sub>** : Masse de l'élément recherché dans l'étalon.

**m<sub>E</sub>** : Masse de l'élément recherché dans l'échantillon.

$\epsilon$  : Efficacité de détecteur.

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE :

Bien que connue de longue date, la pollution atmosphérique n'a pris une place importante dans la vie sociale qu'à partir des années 1950, marquées par une série d'épisodes majeurs ("smog" londonien en 1952, accident de SEVESO en 1976, ...). Les décennies suivantes ont alors été ponctuées par la prise de conscience des risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique et des mesures de prévention qu'ils impliquent. Les connaissances sur les phénomènes de pollution de l'air et leurs conséquences biologiques et sanitaires ont été rapidement évolutives.

Cette pollution atmosphérique se caractérise par des émissions primaires qui sont soit d'origines naturelles, soit anthropogéniques (produites par l'homme), et des émissions secondaires qui résultent de la transformation dans l'atmosphère de polluants primaires dont le potentiel de nuisance encore plus élevé [1].

En plus des composés gazeux, ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  ... etc), la pollution de l'air véhicule des aérosols de particules, c'est à dire des particules plus au moins fines qui séjournent dans l'atmosphère assez longtemps et qui, sous l'effet des phénomènes météorologiques, se dispersent, se déposent ou se condensent.

Ces particules fines véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus de processus de combustion, des particules secondaires issues de la conversion gaz/ particules, des éléments minéraux liés à l'érosion des sols et à la remise en suspension des particules déposées ainsi que divers métaux lourds toxiques tels que le Pb, Cu, Ni, Cr, etc. qui jouent sans doute un rôle important dans la toxicité de l'aérosol. Les activités du transport contribuent de manière importante à la pollution de l'air par les particules. En milieu urbain, le trafic routier constitue, en effet l'une des principales sources émettrices de particules fines.

De nos jours, l'étude des différentes fractions de particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air.

Dans le cadre de notre étude nous nous intéresserons particulièrement à la pollution de l'air par les métaux lourds véhiculés par les particules fines en un site urbain de proximité en s'appuyant sur l'activation neutronique (NAA) qui est une méthode très sensible, fiable dotée d'une grande précision.

**CHAPITRE I**

**GÉNÉRALITÉS SUR LA**

**POLLUTION ATMOSPHERIQUE**

### 1. Composition de l'air :

L'air sec est composé majoritairement d'azote (78%) et d'oxygène (21%) accompagné d'un peu d'argon (0.9%) et de dioxyde de Carbone (0.035%). Le solde est constitué de gaz rares (Hélium, Krypton, Xénon) et d'hydrogène [1].

La vapeur d'eau est présente en proportion variables allant de moins de 0.1% dans les régions polaires en hiver à plus de 5% en climat tropical hyper humide. il en est de même avec un certain nombre d'autres constituants dits gaz à effet de serre (GES) [1].

A ces composants s'ajoutent de nombreux gaz polluants, des poussières et particules microscopiques.

### 2. Définition de la pollution de l'air :

La pollution de l'air a été définie en 1949 selon American Medical Association comme étant: «La concentration excessive de produits étrangers aux biens» [2]. Cette définition a évolué en 1956 vers la définition suivante :

*« présence dans l'atmosphère extérieure de substances ou contaminants, apportés par l'homme, en quantités ou à des concentrations et pendant des périodes telles qu'ils gênent une proportion importante des habitants d'un secteur, ou nuisent à la santé publique, à la vie humaine, végétale ou animale, ou aux biens, ou portent atteinte à l'agrément de l'existence ou à la jouissance des biens dans l'état, ou dans les provinces ou les zones de l'état qui sont touchés » [2].*

### 3. Structure de l'atmosphère terrestre :

L'atmosphère est composée de plusieurs couches distinctes qui diffèrent surtout par leurs compositions et leurs températures.

#### 3.1. la biosphère (couche limite) :

Comprise entre le sol et une centaine de mètres d'altitude. Cette zone correspond en milieu naturel au sommet des arbres (canopée) et en milieu urbain elle s'étend jusqu'au sommet des cheminées (canopée urbaine) et c'est la zone d'émission des polluants atmosphériques [1].

#### 3.2. La troposphère :

Elle s'étend du sol jusqu'à 12 Km d'altitude environ cette altitude varie suivant les régions du globe. C'est la zone où les composés chimiques se mélangent et réagissent entre eux [3].

Elle est caractérisée par un gradient thermique verticale négatif, la température décroît d'environ  $0.5^{\circ}\text{C}$  tous les 100m. C'est dans cette couche qu'ont lieu pratiquement tous les phénomènes météorologiques qui nous intéressent directement [2].

### 3.3. La stratosphère :

Elle est comprise en moyenne entre 12 et 50 Km d'altitude. Les polluants y sont rares mais destructeurs [3]. Dans cette partie de l'atmosphère, les mouvements verticaux sont peu importants et les écoulements se font en lames parallèles. Ainsi lorsque des polluants sont injectés (éruption volcanique, essais nucléaires aériens,...) il leur faut plusieurs années pour retomber sur la surface terrestre, dans cette couche le gradient thermique verticale est positif, la température croît avec l'altitude à cause de l'ozone qui absorbe le rayonnement solaire dans l'ultraviolet [2].

### 3.4. La mésosphère :

Elle se trouve au-delà de la stratosphère dont elle est séparée par la stratopause se caractérise par une décroissance de la température avec l'altitude. Elle se termine par la Mésopause à 85 Km d'altitude.

La mésopause est surmontée par la Thermosphère dans laquelle les raréfies sont sous forme ionisées. La température décroît pour atteindre à même dépasser  $500^{\circ}\text{C}$  vers 500 Km [2]. Au-delà, la force d'attraction de la terre est négligeable et dans l'exosphère, l'hydrogène atomique peut s'échapper vers l'espace [2].

### 3.5. La thermosphère :

C'est la dernière couche qui se trouve à une altitude au-dessus de 85 km. Au-delà, la force d'attraction de la terre est négligeable et dans l'exosphère (au-delà de 400 à 500 km), l'hydrogène atomique peut s'échapper vers l'espace [2].

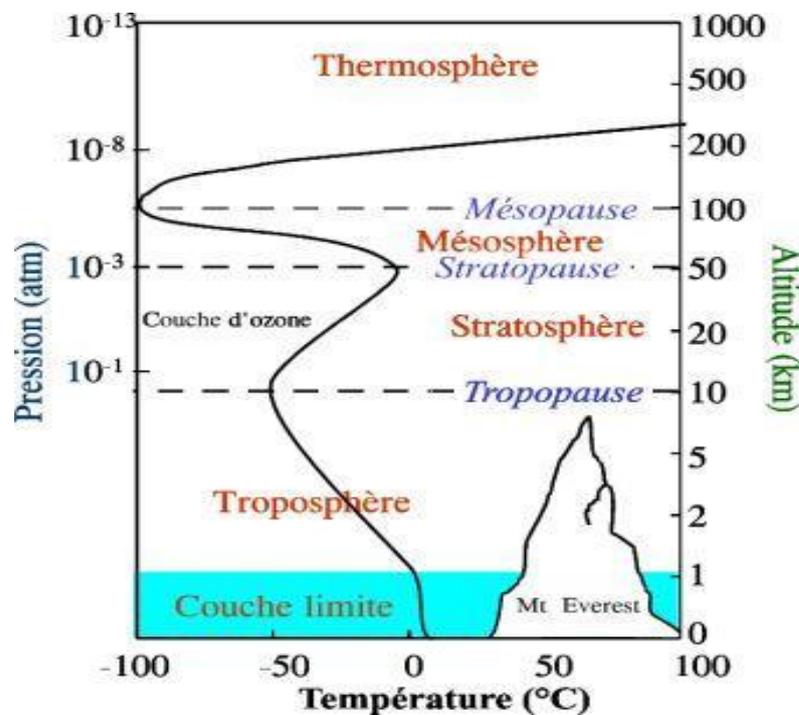


Figure N°01 : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre.

#### 4. L'origine de la pollution :

Les émissions de polluants dans l'atmosphère peuvent être divisées en deux grandes catégories: les sources anthropiques liées directement à l'activité humaine (transports, industries, chauffage des bâtiments, incinération des déchets, etc.) et les sources naturelles (émissions volcaniques, plantes produisant le pollen, foudre, etc.) [3]. l'atmosphère et finissent par disparaître sans causer de dégâts. Pour cela, la pollution anthropique sera essentiellement traitée dans ce qui suit [3].

##### 4.1. Les sources naturelles :

Les polluants d'origines naturelles existent depuis la création de la terre. Leurs émissions sur la surface de la terre à de faibles concentrations, et du fait des conditions météorologiques.

##### 4.1.1. Les éruptions volcaniques :

Les éruptions volcaniques peuvent injecter dans l'atmosphère de très grande quantité de gaz et de particules. Ces produits peuvent atteindre la stratosphère et leur séjour moyen varie de quatre à deux ans. Par exemple : l'éruption du Pinatubo (Philippines), en 1991, a libéré 12 millions de tonnes de poussières volcaniques et 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ).

Ces particules ont la propriété de diminuer le rayonnement solaire à la surface du sol, et donc, d'entraîner une baisse de la température ambiante [2].

### 4.1.2. Le pollen :

Les grains de pollen, gamètes mâle des fleurs des végétaux, sont portés par les étamines. Grâce à l'action des insectes et du vent, ils peuvent aussi pénétrer dans nos voies respiratoires et provoquer des réactions allergiques, parfois violentes, chez les sujets sensibles [2].

### 4.1.3. les autres sources naturelles [2] :

- la foudre, en oxydant l'azote atmosphérique, produit de grandes quantités d'oxyde d'azote ( $\text{NO}_x$ ).
- les algues, à la surface des océans, émettent du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
- les zones humides, les marais où la végétation se décompose, les rizières, les tourbières, les lacs peu profonds produisent du méthane ( $\text{CH}_4$ ), qui est puissant gaz à effet de serre.
- L'érosion éolienne introduit de nombreuses particules dans l'atmosphère
- Les plantes et les arbres émettent des hydrocarbures comme l'isoprène. Ces gaz interviennent dans la formation de l'ozone.

### 4.2. Les sources anthropiques :

#### 4.2.1. La combustion :

Pour tous les processus de combustion, on utilise couramment des combustibles constitués principalement de carbone (charbon, fuel, bois, gaz naturel), source de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) [2].

Ces combustion ne sont jamais complètes et dégagent du monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures imbrûlés. En présence de l'azote de l'air, se forment des oxydes d'azote. Le soufre présent dans le fuel et le charbon d'oxyde pour devenir du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) [2].

L'homme utilise ces combustibles pour se déplacer, se chauffer et pour obtenir l'énergie nécessaire aux multiples procédés de production industrielle.

#### 4.2.2. Les rejets automobiles :

Depuis 1960, la part du secteur transport, dans les émissions anthropiques de  $\text{NO}_x$  et particules, tend à croître. Cette observation est la conséquence de plusieurs phénomènes antagonistes provenant [4]:

- De la croissance du parc automobile.
- De la hausse du kilométrage moyen parcouru par véhicule.
- D'une certaine saturation des réseaux urbains.

### 4.2.3. Les activités industrielles :

Les industries rejettent également certains polluants spécifiques :

Les installations de traitement des minerais émettent des métaux lourds comme le cadmium, le zinc et le plomb. Les sources industrielles (cimenteries, usines chimiques etc...), pour de nombreux gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , COV,  $\text{NH}_3$ ) ne constituent pas la principale source d'émission. Pour d'autres tels que le  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ , l'industrie représente une part non négligeable, mais néanmoins devant les émissions liées au transport et aux combustions [5].

### 4.2.4. L'agriculture :

L'agriculture est en partie responsable du fait des émissions des gaz à effet de serre [5]:

- Le méthane, produit par le système digestif des ruminants.
- Le protoxyde d'azote, suite à l'épandage d'engrais azotés.
- Le dioxyde de carbone, émis par les engins mécaniques.
- Les rizières fortement émettrices de méthane.
- L'élevage est également la principale source d'ammoniac.

Leur part dans les bilans globaux des émissions est particulièrement importante, notamment pour le méthane et les composés azotés.

En contrepartie, les cultures sont considérées comme des puits à carbone au même titre que les forêts.

## 5. les principaux polluants atmosphériques :

Aux classiques habituels mais toujours réels polluants tels que les poussières, le  $\text{SO}_2$ , les  $\text{NO}_x$ , le CO, les métaux lourds, les composés organiques volatils, le fluor, l'acide chlorhydrique, ...etc. sont venus s'ajouter progressivement d'autres substances telles que les gaz à effets de serre : le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$ , le  $\text{NO}_2$ , les CFC, HFC, PFC,  $\text{SF}_6$  et d'autres substances telles que l'ozone, les organochlorés (dioxines et furannes), les HAP ...etc [6].

**Tableau N°01:** nature et origine des principaux groupes de polluants atmosphériques [7].

Etat des polluants	Nature chimique	Sources d'émission
Gazeux	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Volcanisme Respirations des êtres vivants Combustibles fossiles
	Oxyde de carbone	Volcanisme Emissions des moteurs à explosion
	Hydrocarbures	Plantes verts, bactérie Emission des moteurs à explosion
	Composés organiques gazeux	Industries chimiques Incinérations d'ordures Combustions diverses
	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) et autres dérivés soufrés	Bactéries Embruns marins Combustion fossiles Volcanisme
	Oxyde d'azote (NO <sub>x</sub> ) et d'autres dérivés nitrés	Bactéries Combustions diverses Emission des moteurs à explosion
	Radionucléides	Industrie nucléaire Explosion (test d'armements nucléaire ou accident)
Particulaires	Métaux toxiques, Composés inorganiques	Volcanisme, météorites Erosion éolienne, embruns marins Industrie diverses Emissions des moteurs à explosion
	Composés organique naturels ou de synthèse	Industries chimiques Incinérations des ordures Combustions Agricultures (pesticides)
	Radionucléides	Industrie nucléaire Explosion (test d'armements nucléaire ou accident)

### 6. Les niveaux de pollution :

La pollution et ces effets se produisent à des échelles de temps et d'espace très variable puisque cela va de l'habitation jusqu'à l'ensemble de la planète. On peut citer la pollution urbaine et ses effets sur la santé, les pluies acides, la pollution de la stratosphère et le trou d'ozone, la pollution par les gaz à effets de serre et les risques de modification climatiques, la pollution par les dioxines et d'autres produits organique difficilement biodégradable, la pollution radioactive ...

Toutes ces pollutions ont chacune leurs spécificités, mais elles ne sont pas indépendantes les unes des autres [8].

#### 6.1. La pollution à l'échelle locale :

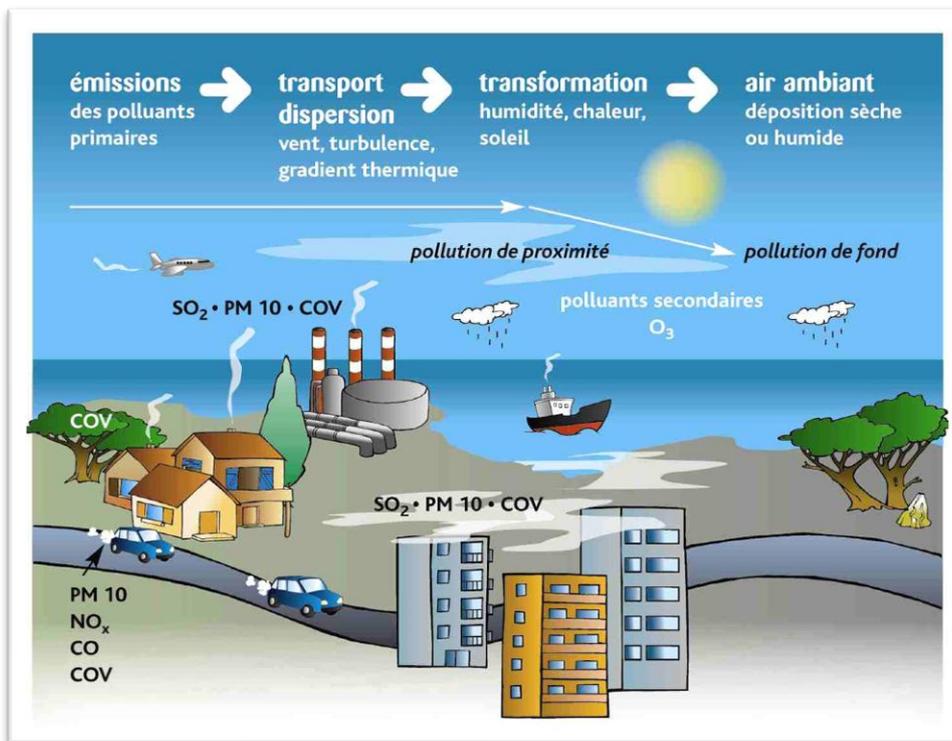
Dans les agglomérations urbaines, ou encore dans les sites industriels, les émissions sont importantes et les concentrations en plusieurs polluants primaires vont atteindre des valeurs élevées, en particulier lors de situations météorologique défavorables à la dilution. On observe ainsi de fortes concentrations de dioxyde de soufre, d'oxyde d'azote, de particules, d'hydrocarbures. La pollution locale (ou micro météorologique) qui apparait dans les agglomérations où la densité des émissions est forte et les concentrations, élevées, va se traduire par des effets sur la santé de l'homme, des animaux, sur la végétation, ...etc [8].

#### 6.2. La pollution à l'échelle régionale :

La pollution atmosphérique se manifeste aussi à l'échelle régionale (d'une dizaine à plusieurs centaines, voire des milliers de kilomètres), encore appelée méso météorologique. Les niveaux de concentration ne sont pas élevés que localement et les effets, principalement dues polluants secondaires, vont se faire sentir de façon plus insidieuse [8].

- **Les Pluies acides :**

En l'absence de pollution, le pH d'une pluie serait de l'ordre de 5,6. Une pluie acide est donc une pluie dont le pH est inférieur à 5,6. Les pluies acides font parties des polluants secondaires, et leurs principaux précurseurs sont le SO<sub>2</sub> et les NO<sub>x</sub>[9]. Les précurseurs de l'acide nitrique sont le monoxyde et le dioxyde d'azote qui se forment à haute température et le soufre qui produit du dioxyde de soufre se transformant en acide. Tous ces facteurs contribuent à l'augmentation du pouvoir oxydant de l'air. D'où, il en résulte Une acidification des eaux de surface et un dépérissement des forets [2].



**Figure N°02 :** Influence de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes.

### 6.3. La pollution à l'échelle planétaire :

La pollution atmosphérique est un phénomène qui affecte l'ensemble de la planète, elle se manifeste par la destruction de l'ozone stratosphérique (trou d'ozone) et l'augmentation de l'effet de serre, avec des risques de modification climatique et des répercussions sur la biosphère.

## 7. Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants:

La pollution atmosphérique ne connaît pas de frontières. Les polluants sont transportés à des distances variables par les mouvements de masses d'air et des nuages. Pendant leur transport, les substances polluantes sont transformées et dispersées sous l'action des conditions météorologiques [10].

### 7.1. Le vent :

La vitesse du vent augmente avec le gradient de pression entre anticyclone (zone de haute pression) et dépression (zone de basse pression). À la surface de la Terre, les différents obstacles ralentissent la vitesse du vent. L'épaisseur de cette « couche de frottement » varie de 500 à 1 000 mètres. La vitesse du vent augmente donc avec l'altitude. D'autre part, le « profil » de vitesse du vent ou ensemble des vitesses moyennes est différent le jour ou la nuit. Le jour, les courants de convection thermique ramènent rapidement au sol l'air qui se déplace en altitude, renforçant ainsi les vents de surface. Par contre, la nuit, la convection thermique plus faible accentue les vents

d'altitude. Le vent a une grande importance dans la diffusion des polluants atmosphériques. Ainsi, avec un vent de force moyenne et de mauvaises conditions de rejet des effluents (cheminée trop basse, vitesse d'éjection des gaz insuffisante, etc.), il peut se produire un phénomène de retombée en panache vers le sol comme le montre la figure N°03 [11].

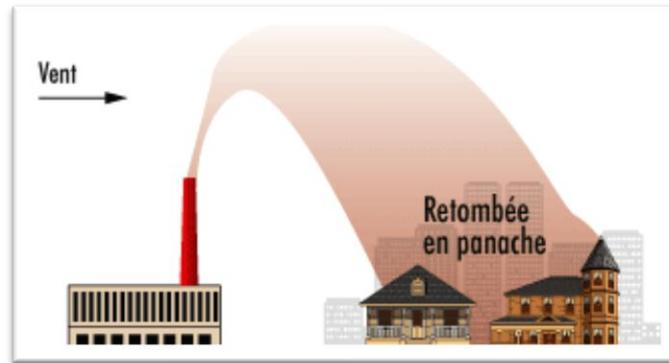


Figure N°03 : Phénomène de retombée en panache

### 7.2. La température :

Elle détermine le degré de stabilité de l'atmosphère et joue un rôle dans la dispersion verticale de la pollution. Elle agit sur la chimie des polluants : le froid diminue la volatilité de certains gaz tandis que la chaleur estivale est nécessaire à la formation photochimique de l'ozone [10].

### 7.3. Le soleil :

Il influe directement sur la pollution en transformant les oxydes d'azote en ozone [10].

### 7.4. Les précipitations :

Leur rôle c'est le lessivage de l'atmosphère par entrainement des polluants au sol [10].

### 7.5. Les inversions de température :

Dans certaines conditions météorologiques, il se produit en altitude une inversion de température où la masse d'air est bloquée par cette couche d'inversion qui agit comme un couvercle empêchant la dispersion verticale des polluants. L'air sous la couche d'inversion est plus froid et plus dense et ne peut se mélanger.

La modélisation de ces épisodes au cours desquelles la forte stabilité de l'air est favorable à l'accumulation des polluants est délicate car la vitesse du vent dans les basses couches de l'atmosphère est difficile à évaluer. Un accroissement du vent de 2 à 3 m/s peut être suffisant pour balayer l'inversion thermique [12].

## **CHAPITRE II**

# **POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES FINES**

### **Introduction :**

Les particules fines peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. La part de chacun des deux types dépend de l'éloignement des centres d'activité humaine et industrielle et de la proximité des zones non habitées, désertiques et marines, très peu polluées mais qui sont souvent des zones de fortes émissions d'aérosols naturels. Quelle que soit l'origine des particules, naturelle ou anthropique, elles sont générées soit par des processus primaires (combustion, érosions, etc.) soit par des processus secondaires (transformations photochimiques dans l'atmosphère de polluants gazeux en particules) [13].

### **1. Définition :**

Pour une meilleure approche de la pollution atmosphérique par particules, il est nécessaire de distinguer entre les différents constituants de la phase particulaire, afin de mieux localiser, l'impact de chaque composant sur l'environnement. La diversité des aérosols particuliers, est le résultat premier de la multiplicité des sources. Elle est définie selon la composition chimique, la forme, la granulométrie, la densité, mais aussi selon la concentration en nombre ou en masse.

Afin de mieux percevoir le comportement aérodynamique des particules, l'OMS prend en compte la notion de diamètre aérodynamique appelé taille particulaire, qui est un facteur important de classification d'un point de vue toxicologique [14]. Le diamètre aérodynamique d'une particule est égal au diamètre d'une sphère de masse volumique  $1 \text{ g/cm}^3$ , dont la vitesse de chute est égale à celle de la particule considérée, en absence de vent et de turbulences [15,16]. La complexité de la pollution de l'air par les particules se traduit par l'existence dans la littérature de plusieurs définitions. Selon que l'on soit physiciens, environnementalistes, ou toxicologues, on utilise fréquemment les expressions suivantes :

#### **1.1. Aérosol :**

C'est la notion de système di ou tri-phasique, qui inclut la suspension de particules solides ou liquides ou encore les deux dans une phase gazeuse. Ces particules ont un diamètre inférieur à  $100 \mu\text{m}$ , suivant des conditions météorologiques bien définies ; au repos on retrouve des particules d'un diamètre de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$  et en cas de turbulence (vents forts, orage,...) des particules de diamètre de l'ordre de  $100 \mu\text{m}$ . Les aérosols sont présents au niveau de la couche troposphérique de l'atmosphère et y séjournent longtemps à cause de la faible vitesse de chute des particules les constituant. Ceci explique l'exposition proche et chronique de l'homme à ce phénomène [17].

Il existe schématiquement deux types d'aérosols [17]:

### 1.1.1. Aérosols naturels :

- Aérosol terrigène : comme son nom l'indique c'est le résultat de l'érosion des sols.
- Aérosol marin : suspension de cristaux résultant d'évaporation de gouttelettes d'eau chargées en sels.

### 1.1.2. Aérosols polluants :

- Aérosol primaire : constitué de particules émises directement sous forme solide.
- Aérosols secondaire : suspension de particules issues de conversion chimique de gaz et de mécanisme photochimique complexe ajouté au phénomène de condensation.

## 1.2. Diamètre aérodynamique :

Comme les particules en suspension dans l'air peuvent présenter des formes et des densités variables, il n'est pas aisé de leur attribuer un diamètre. Le diamètre aérodynamique est une grandeur qui se prête à la description d'une série de processus. Il correspond au diamètre qu'une particule sphérique d'une densité de  $1 \text{ g/cm}^3$  devrait avoir pour présenter la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée [18].

## 1.3. Particules :

### 1.3.1. TSP (« Total suspended particles »):

Poussières totales en suspension dont la vitesse de chute est inférieure à  $10 \text{ cm/s}$ ; particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à  $57 \mu\text{m}$  [19].

### 1.3.2. PM :

C'est une abréviation anglaise de « Particulate matter » et qui signifie matière particulaire [18].

#### a. Les grosses particules PM-10 :

Particules inhalables de diamètre inférieur à  $10 \mu\text{m}$ , c'est-à-dire six à huit fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu ou la taille d'une cellule [19].

#### b. Particules fines PM-2.5:

Particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$ . Cette fraction parcourt l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires [20].

#### c. Particules ultrafines PM-0,1 :

Particules dont le diamètre aérodynamique inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$  ou particules ultrafines (origine anthropique non contrôlée). Leur taille inférieure aux structures cellulaires leur confère des propriétés de pénétration au niveau intracellulaire

spécifique [20]. Celles-ci sont également dénommées nanoparticules bien que cette dernière dénomination soit plutôt réservée aux particules manufacturées à l'échelle nanométrique (moins de 100 nm) [21].

### 1.3.3. Les poussières (dust)

Terme qui regroupe les particules totales en suspension TSP, le mot anglais dust désigne les particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 75  $\mu\text{m}$  pour celles d'une dimension supérieure le dépôt est à proximité de la source émettrice [22].

### 1.3.4. Les fumées noires

Particules majoritairement composées de carbone et dont le diamètre aérodynamique inférieur à 5  $\mu\text{m}$  [22].

### 1.3.5. Brouillard et brume

Suspension de gouttelettes liquide de diamètre aérodynamique supérieur à 1  $\mu\text{m}$  dans l'air. Pour des conditions de visibilité de 1-2 km on appelle cette suspension brume et pour des conditions de visibilité inférieure à 1 km on appelle cette suspension brouillard [23].

### 1.3.6. Les suies :

Solides essentiellement composés de carbone et éventuellement d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, possèdent une structure proche de celle du graphite. Elles sont produites dans les systèmes de combustion et de pyrolyse. Les particules de suies sont généralement très fines [24].

### 1.3.7. Les cendres volantes :

Solides carbonés résiduels, qu'on retrouve dans les gaz résultant de la combustion, évidemment leur composition varie d'un combustible à un autre [24].

## 2. Sources des particules fines :

Les particules fines peuvent être émises de deux sources différentes, sources naturelles et sources anthropogénique :

### 2.1. Particules de sources naturelles :

Les particules naturelles comprennent les poussières du sol et les particules minérales soulevées par le vent, la poussière volcanique, les embruns salins et les matières biologiques comme le pollen, les spores, les bactéries et les débris provenant des feux de forêt. En général, les sources naturelles produisent des particules grossières mais, sous l'effet de températures très élevées (dans le cas de feux de forêt, par exemple) certaines d'entre elles produisent des particules fines [25].

Les quatre principales sources naturelles sont [13,26,27]:

### 2.1.1. La source terrigène :

L'aérosol terrigène (ou cristal) est généré par l'érosion éolienne des sols. Ces émissions dépendent de la vitesse du vent 'U' et une vitesse minimale d'arrachement de la matière superficielle, dite vitesse de friction  $U^*$  (vitesse de seuil). Cette vitesse dépend de la nature du sol (sable, argile ou granit).

Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques (fer, manganèse) et d'aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus.

### 2.1.2. La source marine

L'aérosol marin est produit par le 'spray océanique'. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosses tailles sont projetées dans l'atmosphère (phénomène de bubbling). Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du  $SO_2$ , qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques.

### 2.1.3. La source volcanique :

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les deux précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du  $SO_2$  gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol se retrouve principalement dans la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte. Les apports troposphériques sont faibles et on ne prendra pas en compte cette source.

### 2.1.4. La source biogénique :

L'aérosol biogénique provient, d'une part de l'émission directe d'hydrocarbures lourds par les plantes et les arbres et d'autre part de l'oxydation atmosphérique d'hydrocarbures biogéniques plus légers comme l'isoprène. On trouve aussi des cires vasculaires (esters) à haut poids moléculaire. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium.

## 2.2. Particules de sources anthropogéniques :

Sachant que les particules fines sont des polluants primaires ou secondaires, on déduira alors facilement que les sources anthropologiques peuvent être très variables et nombreuses. Les principales sources anthropogéniques sont les suivantes [28,29] :

### 2.2.1. Trafic motorisé

Les particules fines nocives proviennent principalement du trafic motorisé on distingue parmi ses sources :

- Les émissions à l'échappement.
- Les émissions hors échappement (pneus, embrayage, et plaquettes de freins).
- L'usure des routes.

### 2.2.2. Procédés industriels

Les sources les plus importantes sont liées aux activités suivantes :

- Sidérurgie
- Matériaux de construction, cimenteries.
- Production des produits bâtiments, des métaux, des polymères....etc.
- Utilisation de solvants et autres produits.

### 2.2.3. Traitement des déchets :

- Incinération d'ordures ménagères.
- Incinération des déchets industriels, des boues d'épuration et des déchets hospitaliers.
- Feux ouverts de déchets agricoles.

### 2.2.4. Agriculture :

- Elevage.
- Labourage.
- Moissonnage.
- Séchage des céréales et du fourrage.

## 3. Propriétés des particules :

### 3.1. Composition chimique :

La poussière est un mélange physico-chimique complexe. Elle comporte aussi bien des composants primaires émis que des composants secondaires formés [18].

#### 3.1.1. Composante primaire :

La composante primaire contient principalement :

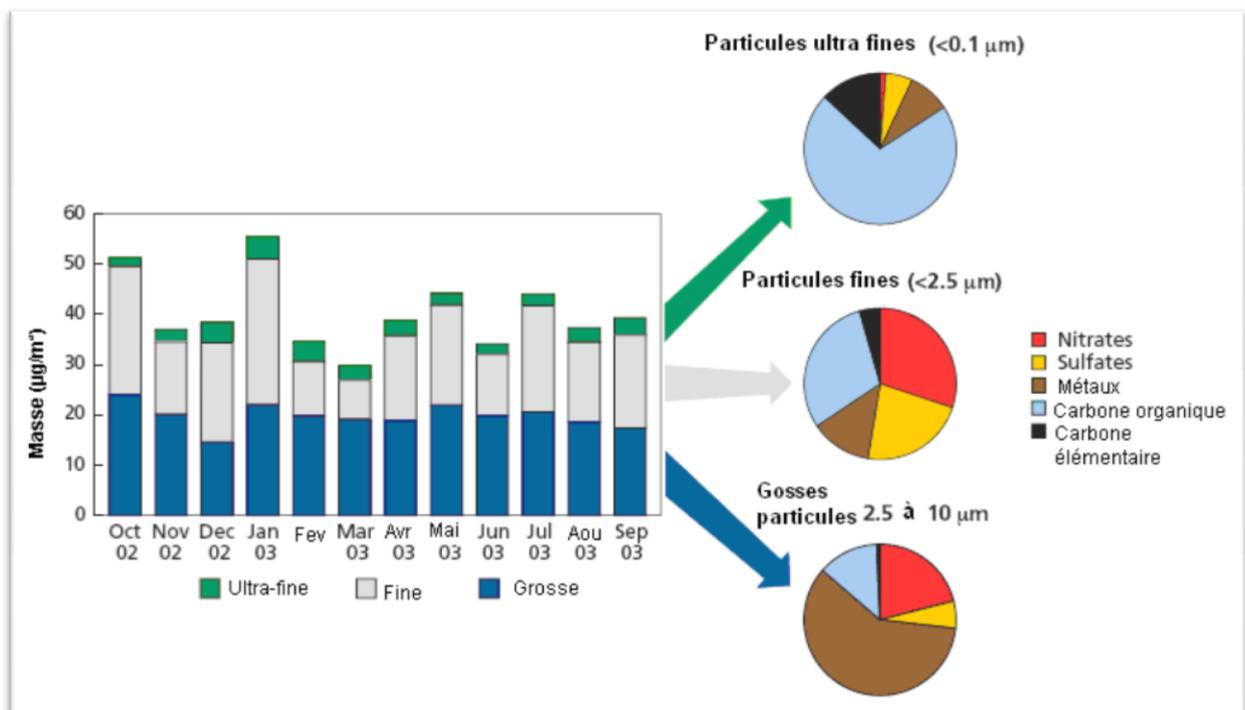
- ✓ Les suies.
- ✓ Les matières géologiques.
- ✓ Les métaux lourds.
- ✓ Les matières biologiques (virus, bactérie, pollen,...).
- ✓ Les particules formées par abrasion.

3.1.2. Composante secondaire :

Elle véhicule entre autre :

- ✓ Les nitrates.
- ✓ Les sulfates.
- ✓ L'ammonium.
- ✓ Le carbone organique.

La composition des particules change suivant qu'elles sont fines, ultra fines ou grossières. Les PM-2,5 se composent d'environ 80 % de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon », de carbone organique (HAP et autres composés organiques lourds) et de métaux lourds en traces. Cette fraction englobe aussi la majeure partie des aérosols secondaires issus de la conversion gaz/particules (nitrates et sulfates provenant de la conversion dans l'atmosphère des polluants SO<sub>2</sub> et NO<sub>2</sub>) [25]. Les fractions des particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 µm (fractions thoraciques) contiennent environ 50 % des composés qu'on trouve dans les PM-2,5 ainsi qu'un taux important de minéraux insolubles tels que les composés d'aluminium, de silicates, de fer et d'autres métaux lourds [25]. La fraction des PM-1 est généralement plus enrichie en suies, en HAP et en sulfates que celle des PM-2,5. La figure N°04 illustre la composition moyenne des particules aux USA en fonction de la classe granulométrique.



### 3.2. Caractéristiques physiques

#### 3.2.1. Structure des particules :

La figure N°05 synthétise la vision actuelle de la constitution de l'aérosol de pollution. Notons que cette approche reste partiellement spéculative, en raison de l'absence de preuves définitives [13].

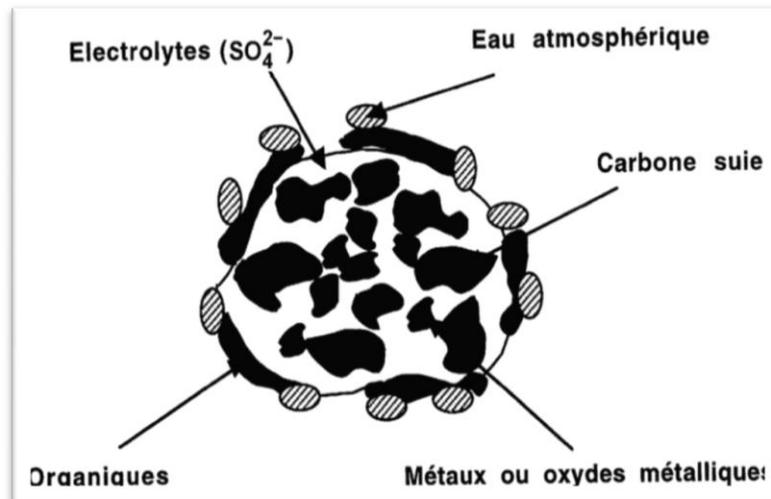


Figure N°05 : Constitution d'une particule fine [13].

#### 3.2.2. Formes des particules :

Il y a une grande différence entre les formes des particules atmosphériques. Elles peuvent être divisées en sphériques, irrégulières, cubiques, flocons, fibres, flocons condensés. La forme de particule dans un aérosol dépend en général de la source d'émission [31,32].

#### 3.3. Mécanisme de formation :

Aujourd'hui, on admet que l'aérosol troposphérique est formé de trois distributions normales [33,34].

- ✓ Le mode "**nucléation**" défini par les particules dont le diamètre est inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ; elles sont issues pour l'essentiel de la combustion en moteurs ou bien des processus de conversion gaz-particules,
- ✓ Le mode "**accumulation**" constitué des particules dont le diamètre est compris entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  ; elles proviennent soit du grossissement de noyaux par condensation, soit de la coagulation de particules du mode "**nucléation**",

- ✓ Le mode des "**grosses particules**" formé par les particules supérieures à 2  $\mu\text{m}$  ; ces particules sont formées, pour l'essentiel, à partir de processus mécaniques.

#### 4. Les normes des particules en suspension :

\*TSP [35]:

**Tableau N°02:** Les normes des TSP dans l'air.

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

\*PM-10 [36]:

**Tableau N°03:** Les normes des PM-10 dans l'air.

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

\*PM-2,5 [36]:

**Tableau N°04:** Les normes des PM-2,5 dans l'air.

	OMS	Directives européenne
Valeur limite journalière ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ )	25	/
Valeur limite annuelle ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ )	10	25

## **CHAPITRE III**

# **POLLUTION ATMOSPHERIQUE PAR LES METAUX LOURDS**

### **Introduction :**

Les métaux lourds, ou éléments traces métalliques (ETM), existent naturellement mais en quantités très faibles dans les sols, l'eau et l'air [37].

Certaines activités humaines, comme la combustion du charbon, du pétrole, des déchets et certains procédés industriels en rediffusent en revanche en grande quantité dans l'environnement. Ils sont souvent liés aux particules fines PM-2,5, à l'exception du mercure, qui est principalement gazeux [37].

Si une partie des métaux lourds peut retomber aux alentours de la source d'émissions, certains métaux lourds peuvent voyager sur de longues distances [37].

Les métaux lourds ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air : ils sont bio-persistants, perturbent les écosystèmes, détériorent les sols, les eaux de surface, les forêts et les cultures et s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Certains sont cancérigènes pour l'homme [37].

### **1. Définition :**

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques (ETM). On considère en général les métaux lourds suivants: Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn).

Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre:

#### **1.1. Mercure Hg :**

Le mercure est le seul métal liquide à température ambiante. Il se combine très aisément avec d'autres composés et a une volatilité importante. Pour le mercure métallique (Inorganique), on le retrouve sous forme gazeuse, liquide ou ionique. Mais le mercure peut également se combiner avec du gaz carbonique et on parle alors de mercure organique. Le mercure est très sensible à l'acidité du milieu. Il est extrêmement toxique et a des effets sur le système nerveux. La volatilité importante du mercure en fait un polluant important dans les études de pollution transfrontière [38].

#### **1.2. Plomb Pb :**

Une source importante des émissions de plomb dans l'atmosphère a été le transport car le plomb a été pendant longtemps additionné à l'essence du fait de son pouvoir antidétonant. De ce fait, il contamine souvent les terrains en bordures d'axes routiers. L'ingestion de plomb déclenche le saturnisme [38].

### 1.3. Cadmium Cd :

Il provient surtout de l'incinération des déchets, ainsi que de procédés industriels (métallurgie..). Il a des effets sur le système respiratoire et gastro-intestinaux [37].

### 1.4. Antimoine Sb :

L'antimoine est un métalloïde de couleur gris métallique, présentant deux niveaux d'oxydation (III et V). Il est utilisé comme retardateur de flamme, dans les semi-conducteurs et dans des alliages métalliques. Cet élément est répandu dans l'environnement par la combustion du charbon, les activités minières ou métallurgiques [38].

### 1.5. Arsenic As :

L'arsenic est un métalloïde de couleur gris métallique, possédant deux états d'oxydation (III et V). Il est souvent associé aux activités minières et à la combustion de ressources organiques fossiles. Il a été utilisé en agriculture en tant que pesticide (arséniate de plomb), en tant que durcisseur dans les cartouches de chasse, ou associé à Ga (Galium) ou In (Indium) pour former des matériaux supraconducteurs.

C'est un élément non essentiel et un poison puissant dont la toxicité varie avec l'état d'oxydation : les arsénites (III) sont plus toxiques et plus mobiles dans les sols que les arséniates (V) [38].

### 1.6. Chrome Cr :

Le chrome est un métal dur, blanc grisâtre, possédant 3 degrés principaux d'oxydation (II, III, VI) et cinq états d'oxydation inhabituels (-II, -I, 0, IV, V). L'état d'oxydation conditionne la stabilité et la toxicité de Cr dans les sols (Cr (III) plus stable mais moins toxique que Cr (VI)). Il est principalement utilisé dans la fabrication de l'acier et d'autres alliages, de pigments et dans le traitement du cuir, du bois et de l'eau. C'est un élément essentiel pour l'homme (maintien du métabolisme du glucose), mais sa nécessité n'a pas été démontrée pour les végétaux [37].

### 1.7. Cobalt Co :

Le cobalt est un métal de transition de couleur blanc-argenté, présentant deux états d'oxydation (II et III). Il est utilisé dans les alliages, les aimants, les médias d'enregistrement, et comme catalyseur dans l'industrie chimique et pétrolière. C'est un élément essentiel entrant, par exemple, dans la composition de la vitamine B12 mais présentant un caractère toxique dû à ses propriétés chimiques [39].

### 1.8. Cuivre Cu :

Le cuivre est l'un des métaux les plus anciennement connus car il existe à l'état natif (comme Ag, As, Au, Sb, Pb). Il est principalement utilisé (seul ou sous forme d'alliage) dans la confection de feuilles métalliques, de câbles électriques ou de tuyaux (très largement utilisé pour les conduites d'eau) [39].

Le Cu est un oligo-élément, il est plus communément étudié pour les problèmes de carence qu'il peut engendrer chez les végétaux, le bétail et l'homme, que pour sa toxicité.

### 1.9. Molybdène Mo :

Le molybdène est un métal de transition, d'aspect blanc métallique, et très résistant à l'état pur. Il est principalement utilisé dans les alliages pour ses propriétés efficaces dans le durcissement de l'acier.

La disponibilité de Mo augmente avec le pH (ce qui le distingue de la majorité des ETM). [2]

### 1.10. Nickel Ni :

Métal de couleur généralement grise, le Ni est ferromagnétique et présente plusieurs propriétés communes avec Fe. Il est ordinairement présent dans l'environnement à un état d'oxydation (+II) [39].

Le Ni est largement utilisé dans l'industrie car il apporte aux alliages (acier inoxydable par exemple) solidité, résistance à la corrosion, et autres propriétés relatives au comportement électrique, magnétique et thermique. Le Ni est un oligo-élément essentiel, mais à de très faibles teneurs.

### 1.11. Sélénium Se :

Le sélénium est un élément non métallique de couleur gris-noir, présentant 3 états d'oxydation (II, IV, VI).

La gamme dans laquelle il est présent dans les systèmes biologiques en quantité suffisante pour éviter une carence, mais sans être toxique, est étroite : de 0.04 à 4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  [39].

### 1.12. Vanadium V :

Le vanadium est un métal blanc, brillant, mou et ductile. Il possède une bonne résistance à la corrosion par les composés alcalins et par les acides chlorhydrique et sulfurique. Les états d'oxydation communs du vanadium sont +II, +III, +IV et +V. La majorité du vanadium produit est employé en tant que ferro-vanadium ou comme additif de l'acier [38].

Le vanadium est classé carcinogène par l'USEPA.

**1.13. Zinc Zn :**

Le zinc est un métal, moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde blanc imperméable. On le trouve généralement à l'état d'oxydation (II) [37].

Il est principalement extrait sous forme de sulfure (ZnS : sphalérite) dont l'oxydation est généralement accompagnée d'une oxydation de la pyrite créant un contexte acide favorable à la mise en solution de différents ETM. Zn est largement utilisé pour la galvanisation de l'acier, mais aussi dans des produits cosmétiques (crèmes, shampoings), batteries, pigments et peintures.

Les trois premiers métaux (Hg, Pb, Cd) se distinguent des autres métaux souvent considérés comme des oligo-éléments pouvant être utiles. Les premiers sont tous très toxiques (effets sur le système nerveux) et ont une durée de vie très grande et une conductivité électrique élevée. Les métaux ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air, mais aussi pour celle de l'eau et des sols.

**2. Les principales sources d'émission:**

Le quart de la contamination par les métaux est dû aux ordures ménagères (piles au cadmium, batteries au plomb, cuivre et zinc des pesticides, etc.). Les principales autres sources d'émission sont les suivantes [40] :

Le tableau ci-dessous indique les principales sources d'émissions de polluants :

Tableau N°05 : Les principales sources d'émissions de polluants.

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

### 3. Les impacts des métaux lourds :

La présence des métaux lourds dans l'environnement est connue depuis bien des années. La forte concentration de ces derniers présente un risque majeur pour la santé humaine et pour l'environnement par leurs propriétés [41]:

- Ils ne sont pas dégradables.
- Ils sont enrichis au cours de processus minéraux et biologiques, puis s'accumulent dans la nature.
- Ils peuvent être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire, entraînant des effets aigus ou chroniques.

#### 3.1. Impact sur la végétation :

«Les trop fortes teneurs en métaux lourds diminuent la densité, la biodiversité et l'activité de la microflore et de la microfaune du sol» [42].

Une forte concentration des métaux lourds entraîne un déséquilibre métabolique. En effet, l'accumulation des métaux lourds dans l'organisme des végétaux se traduit par le remplacement des éléments essentiels par leur pouvoir oxydant et leur

forte stabilité. Ceci conduit non seulement à la nécrose des racines et par la suite la mort des végétaux mais aussi le transfert de ces métaux dans la chaîne alimentaire. [43]

### 3.2. Impact sur les animaux :

«Les animaux peuvent être contaminés par contact avec la peau, par inhalation de poussières toxiques et par ingestion de l'eau et d'aliments pollués. La dispersion des métaux constitue un danger pour la faune sauvage, le bétail et l'Homme, qui se situe en bout de chaîne alimentaire. Dans certaines zones très contaminées, le pâturage, les cultures fourragères ou destinées à l'alimentation humaine sont interdites.»

### 3.3. Impact sur la santé :

Les métaux lourds dans l'atmosphère sont sous forme de particules en suspensions à l'exception de certains métaux qui sont volatils à température ambiante. Par conséquent, l'homme est touché par cette pollution via les voies respiratoires qui se traduit par l'apparition de nombreuses maladies (cancers, maladies respiratoires...etc.) [44]

#### ❖ Symptômes sur le système nerveux central [45]:

- Irritabilité.
- Peur.
- Nervosité.
- Inquiétude.
- instabilité émotionnelle.
- perte de confiance.
- timidité (symptôme principal chez les adolescents).
- Indécision.
- perte de la mémoire immédiate.
- toutes les sortes d'insomnies.
- Dépression.

#### ❖ Symptômes neurologiques [45]:

- fourmillement des mains.
- sentiment de brûlure constante avec endormissement des membres inférieurs (symptôme caractéristique des perturbations dues au mercure).
- léger tremblement des mains.

#### ❖ Symptômes au niveau de la tête [45]:

- saignement des gencives.
- gencives qui se retirent mettant l'os du maxillaire à nu.

- dents qui bougent.
  - mauvaise haleine.
  - sentiment de brûlure sur les lèvres, la langue et le visage.
  - abcès buccaux.
  - vertiges.
  - sifflement dans les oreilles.
  - troubles de l'audition.
  - difficultés oculaires (baisse de la vision des contrastes et des couleurs dues à des dépôts de métaux lourds dans le cervelet).
- ❖ Symptômes liés à l'appareil digestif [45]:
- allergies alimentaires, particulièrement aux œufs et au lait.
  - Coliques.
- ❖ Symptômes cardiaques :
- arythmie (due aux dépôts de métaux lourds dans les nerfs commandant l'activité cardiaque).
  - problèmes de pression (à ce sujet une étude à long terme effectuée sur dix mille patients démontre qu'après six mois de traitement au DMPS, (chélateur), les problèmes de pression avaient disparu et que le taux de cholestérol s'était normalisé).

#### **4. Les normes de rejets :**

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le journal officiel de l'Union européenne (UE), la réglementation ne touche que certains métaux lourds [46]. Le tableau N°06 exprime les valeurs limites et les valeurs cibles de quelques métaux lourds selon l'OMS et la directive de l'Union européenne.

**Tableau N°06** : Les normes de rejets de quelques polluants dans l'air[46].

Polluant	UE		OMS
	Valeur limite	Valeur cible	Valeur limite
Plomb	0,5 µg/m <sup>3</sup>	-	0,5 µg/m <sup>3</sup>
Arsenic	-	6 ng/m <sup>3</sup>	-
Cadmium	-	5 ng/m <sup>3</sup>	5 ng/m <sup>3</sup>
Nickel	-	20 ng/m <sup>3</sup>	20 ng/m <sup>3</sup>
Mercuré [15]	50 ng/m <sup>3</sup>	-	-

- les normes spécifient des valeurs limites à ne pas dépasser ou des objectifs à long terme.
- L'élaboration des normes tient compte de l'impact sanitaire de la pollution mais aussi des facteurs socio-économiques.
- Pour être efficace, une norme doit être réaliste.
- Il y a réévaluation constante des normes.
- Les normes constituent un élément important de la stratégie globale de protection de l'environnement.

**CHAPITRE IV**

**METHODES DE PRELEVEMENT**

**DES PM-i ET TECHNIQUES**

**D'ANALYSE DES METAUX**

**LOURDS**

## 1. Mode de prélèvement :

Le protocole de prélèvement d'un aérosol doit être très précis. Pour l'échantillonnage massique, il existe des méthodes dites continues telles que la jauge  $\beta$  ou discontinues gravimétriques comme le HVS « High Volume Sampler » et le LVS « Low Volume Sampler ».

### ❖ la jauge $\beta$ :

La méthode par jauge Beta consiste à collecter les particules (PM-10 ou PM-2,5) par aspiration d'un volume d'air déterminé sur un filtre en fibre de verre qui défile de manière séquentielle devant une jauge bêta (Figure N°06). La masse du dépôt de poussière est déterminée en mesurant l'atténuation du rayonnement  $\beta$  par les poussières recueillies sur le filtre [47].

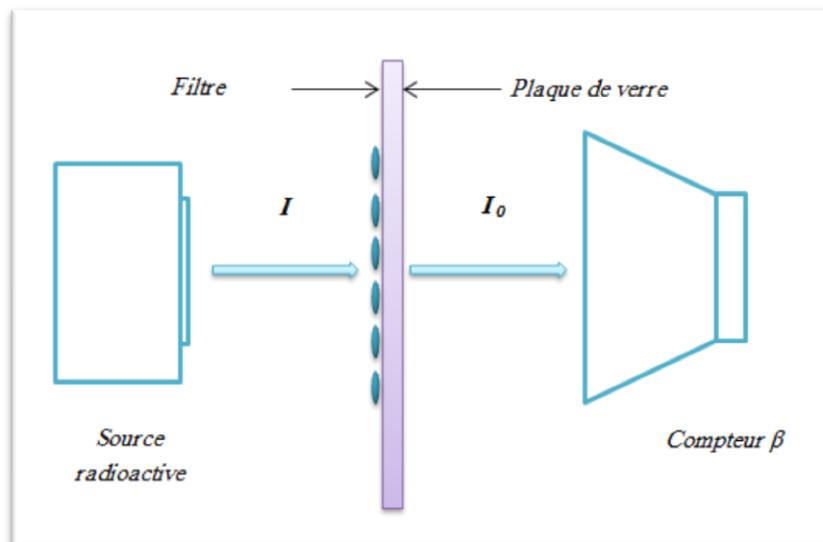
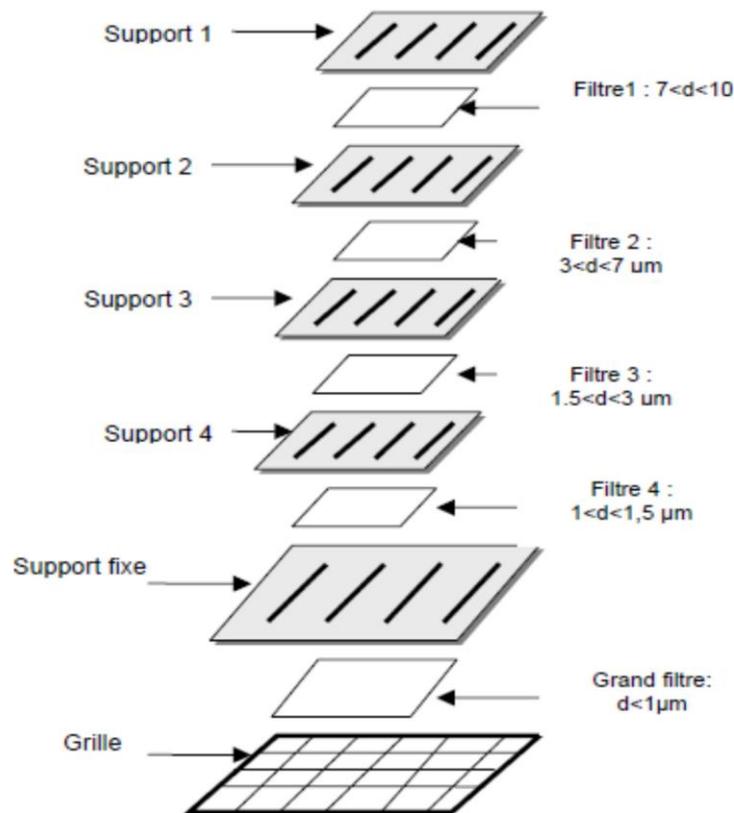


Figure N°06 : Principe de mesure de la jauge  $\beta$  [48].

### ❖ HVS :

Le principe de fonctionnement de l'échantillonneur est basé sur la différence de quantité de mouvement (ou d'énergie cinétique) des particules. Pour les trier par taille, il faut que la vitesse du fluide soit très bien contrôlée et connue, chose qui est assurée par un contrôleur électronique de débit le MFC (Mass Flow Controller). En raison de leur inertie, les particules ont tendance à effectuer un trajet direct alors que le flux de gaz est dévié par un obstacle. Les particules d'une masse définie, donc d'un volume et d'une taille définis, si leur densité est homogène, vont s'impacter sur un obstacle (filtre). Les particules les plus légères vont contourner l'obstacle et venir s'impacter sur un étage suivant, correspondant à un diamètre de coupure plus petit [49].

La figure N°07 montre le principe de collecte des PM-i par le HVS



**Figure N°07 : Principe de collecte des PM-i par le HVS [50].**

❖ **LVS :**

Il existe aussi des échantillonneurs à faible débit (1 à 1,5 m<sup>3</sup>/h), Low Volume Sampler (LVS). Comme dans le cas du HVS la durée de prélèvement se fait sur 24h. Ce type de préleveur équipe souvent les réseaux de mesure en Europe [50]. L'inconvénient est que la quantité collectée est relativement faible de l'ordre de quelques mg, ce qui nécessite une technique analytique très performante comme NAA que nous allons décrire dans les prochains paragraphes.

## **2. Méthodes d'analyse des métaux associés aux PM-i :**

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'air, rend difficile leur mise en évidence. Cependant avec le développement technologique, plusieurs méthodes plus au moins développées permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration [51].

## **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. Dans le cas des énergies modérées seuls les électrons externes de l'atome sont concernés. Cette méthode est utilisée pour l'analyse des métaux dans les échantillons biologiques, métallurgiques, pharmaceutiques atmosphériques, etc [52].

### **2.1.1 Principe :**

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 [52].

### **2.1.2 La loi d'absorption:**

L'intensité de l'absorption dépend directement du nombre de particules absorbant la lumière selon la loi de Beer Lambert selon laquelle l'absorbance est proportionnelle au coefficient d'absorption spécifique  $a$ , au trajet optique  $b$  et à la concentration  $c$ .

$$A = abc \quad \text{Où}$$

$$A = \log I_0/I$$

$I$  = intensité après absorption par les atomes

$I_0$  = intensité initiale de la source lumineuse

Cependant en pratique, cette relation n'est pas toujours vérifiée. On n'obtient pas toujours une droite d'étalonnage. C'est le cas si la concentration devient trop élevée. La gamme de dosage est le domaine dans lequel la droite d'étalonnage est pratiquement une droite. Il est limité pour les faibles concentrations par la limite de détection et pour les fortes concentrations par l'erreur sur la fidélité, à une très forte variation de la

concentration correspond une faible variation de l'absorbance. La gamme de dosage est généralement donnée par le constructeur. Elle dépend de la raie de dosage utilisée [53].

### **3 La technique PIXE :**

En anglais : Particle Induced X-ray Emission, en français : émission de rayons X induite par particules chargées ou aussi : fluorescence X induite par particules accélérées. En pratique, les particules dont il est question sont le plus souvent des protons, c'est-à-dire des noyaux d'hydrogène, mais il est possible d'utiliser d'autres ions accélérés. On parle ainsi de méthode HIXE pour des ions d'hélium ou DIXE pour des deutons. C'est l'émission de rayons X induits par les particules chargées, elle a été signalée pour la première fois en tant que méthode d'analyse en 1970 à LUND en Suède. La technique PIXE est rapidement développée depuis, et en quelques années elle est devenue incontournable en tant qu'outil puissant d'analyse multi élémentaire [54].

#### **3.1 Principe :**

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 trois phases :

- 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 [55].

## **4 La spectrométrie par fluorescence X (XRF : X-Ray Fluorescence) :**

### **4.1 Les rayons X :**

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. Son avantage par rapport à la SAA c'est qu'elle constitue une analyse multiéléments simultanée.

#### **4.2 Principe :**

L'échantillon est bombardé par un rayonnement X issu d'une source radioactive. Ainsi l'atome devient excité, ce qui générera un déplacement de l'électron vers l'orbite supérieure. La case quantique laissée vide par l'électron éjecté sera prise par un électron d'un niveau plus élevé avec une énergie supérieure à celle de l'électron éjecté. La différence d'énergie ( $\Delta E$ ) 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 [55].

#### **5 Analyse par activation neutronique (NAA) :**

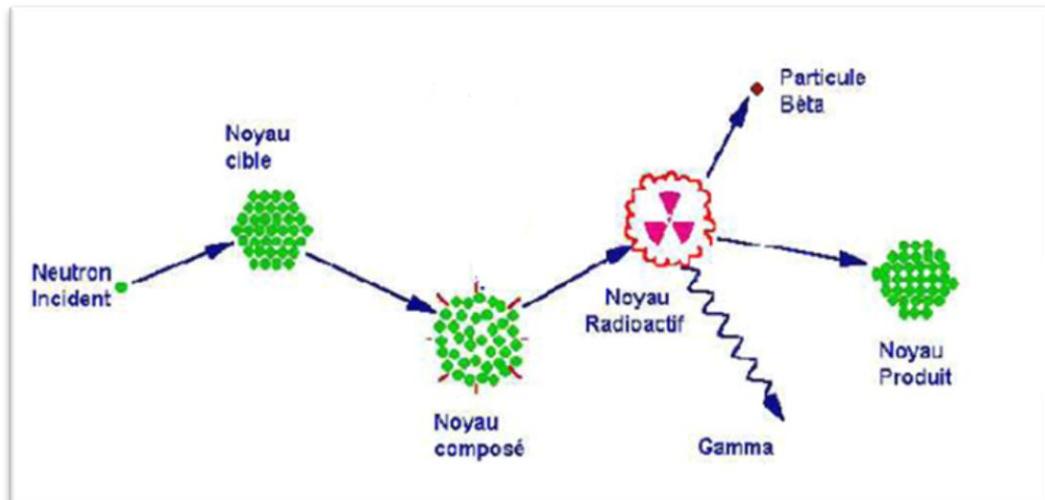
L'analyse par activation neutronique, symbolisée NAA (Neutron Activation Analysis), est une méthode d'analyse qualitative et quantitative de divers éléments. Elle a été mise en œuvre dans les années 50 et a été déclarée méthode de référence dans les années 60 à 70 pour le dosage d'éléments traces dans des analyses de milieux biologiques, les polluants industriels et également en criminologie [56].

En effet, étant une méthode multi-élémentaire, sélective, dotée d'une excellente sensibilité et non destructive, actuellement la méthode est surtout utilisée comme méthode d'analyse de traces et d'ultra traces. Grâce à la spectrométrie gamma ( $\gamma$ ), elle couvre une large gamme d'utilisation telle la géochimie, la médecine, la bio surveillance...etc [57].

##### **5.1 Principe de la méthode :**

Elle est fondée sur la conversion d'un noyau stable en un noyau radioactif et la mesure postérieure du rayonnement émis. Parmi le rayonnement émis, le rayonnement gamma offre les meilleures caractéristiques pour une détermination sélective et simultanée des éléments (figure N°08) [58].





**Figure N°08 :** Principe de la technique de l'activation neutronique [58].

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 de 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 plusieurs éléments avec une grande limite de détection [59].

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.
- Refroidissement des échantillons.
- Mesure des rayonnements gamma issus de l'échantillon irradié et du standard.
- Interprétation des spectres gamma en termes d'éléments et de concentrations.

**5.2 Principes généraux de l'analyse par activation neutronique :**

**5.2.1 L'irradiation :**

Le but de l'irradiation est de créer des radio-isotopes qui pourront, par la suite, être identifiés avec certitude et quantifiés avec précision. Pour se faire, la probabilité de la production des radio-isotopes doit être non négligeable et leur durée de vie suffisamment longue pour pouvoir les détecter [58]. Cependant, le choix du mode d'irradiation, pour le dosage de la totalité des éléments, doit être fait en fonction des propriétés des radio-isotopes créés et des éléments à doser [57].

Le tableau N°06 indique les différentes méthodes d'analyse par activation :

**CHAPITRE IV : METHODES DE PRELEVEMENT DES PM-I ET TECHNIQUE  
D'ANALYSE DES METAUX LOURDS**

**Tableau N°06 : Différents types d'analyse par activation [57].**

Méthodes d'analyse par activation				
Particules incidentes	Réactions	Sources	Domaines nucléaires d'application	Produites d'irradiation
Neutrons thermiques	(n,γ)		Réacteurs nucléaires	Dosages très sensibles, $10^{-13}$ à $10^{-9}$ g. de très nombreux éléments à partir de Z > 11. Analyse d'ultra-traces et analyses multi-élémentaires. Possibilité d'irradier plusieurs échantillons simultanément.
Neutrons rapides	(n,p) (n,α) (n,2n) Etc	Accélérateurs de neutrons sources radioactives Réacteur nucléaires (irradiation sous Cd)		Analyse multi-élémentaire de certains de certains échantillons naturels. Dosage de contrôle sur sites ou en milieu industriel. Sensibilité en général moindre qu'avec Les neutrons thermiques, à intensité de flux égale.
Photons gamma	(γ,n)	Accélérateurs d'électrons (accélérateurs linéaires, microtrons..)		Dosage des éléments légers : N, C, O, F, avec peu de risques d'interférences et de certains éléments lourds Non dosables Sensibilité aux neutrons (ex : Pb). $10^{-8}$ à $10^{-5}$ g.
Particules chargées (p, d, t, $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ ...)	(p,x)(d,y)(He, z)etc.	Accélérateurs	Vande Graaff limitée des particules dans lamatière. Cyclotrons...	Dosage des éléments légers (Li, Be, B, C, N, O, F, S). Nombreux risques d'interférences, pénétration linéaires, Analyse multi-élémentaire possible aux protons par exemple. Sensibilité: $10^{-9}$ - $10^{-10}$ g.

**5.2.2 La radioactivité :**

Une réaction nucléaire peut s'écrire sous une forme d'une réaction chimique normale, mais le plus souvent elle est écrite sous la forme [57] :



**A** : isotope stable de l'atome cible de l'élément à doser.

**B** : radio-isotope produit par irradiation.

**X** : particule incidente.

**Y** : rayonnement émis pendant ou après l'irradiation.

### 5.2.2.1 Équation de l'activité :

Le nombre d'atome formé ( $d_B^F$ ) par unité de temps ( $dt$ ) est proportionnel au nombre d'atomes cible ( $N_0$ ), de la probabilité de la réaction ( $\sigma_{AB}$ ) et le débit de particules incidentes ( $\Phi_{AB}$ ) on obtient [58]:

$$d_B^F = N_0 \sigma_{AB} \Phi_{AB} dt \quad (1)$$

$d_B^F$ : Nombre d'atome formé.

$N_0$ : Nombre d'atome cible.

$\sigma_{AB}$ : Section efficace (probabilité d'incidence en barns<sup>10</sup>).

$\Phi_{AB}$ : Flux ou débit de particules incidentes (neutrons. cm<sup>-2</sup>. s<sup>-1</sup>).

$dt$  : Intervalle de temps d'irradiation.

Le nombre  $\lambda$  d'atome détruit pendant le même temps ( $dt$ ) :

$$d_B^D = N_B \lambda dt \quad (2)$$

$d_B^D$ : Nombre d'atome de B détruit.

$N_B$ : Nombre d'atome de B présent à l'instant «t».

$\lambda$  : Constante de désintégration

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

T : Temps de décroissance radioactive.

Le nombre d'atome effectivement présents par unité de temps :

$$d_B^f - d_B^D = N_0 \sigma_{AB} \Phi_{AB} dt - N_B \lambda dt \quad (3)$$

Soit :

$$\frac{dN_B}{dt} + N_B \lambda = N_0 \sigma_{AB} \Phi_{AB} \quad (4)$$

Par l'intégration de cette relation, le nombre d'atome radioactif ( $N^*$ ) à la fin de l'irradiation peut être obtenu :

$$N^* = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

$N^*$  : Le nombre de noyau radioactif.

L'activité  $A$  définit comme étant une désintégration par seconde s'écrit :

$$A = N^* \lambda \quad (6)$$

L'équation (5) devient :

$$A = \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (7)$$

En remplaçant par la relation :

$$N_0 = \frac{m N_A I}{M} \quad (8)$$

$N_0$  : Nombre d'Avogadro (6,023. 10<sup>23</sup> atomes/mole).

$m$  : La masse de l'élément recherché (grammes).

$I$  : L'abondance isotopique de l'élément (en %).

$M$  : La masse atomique de l'isotope irradié (grammes).

La relation (7) devient :

$$A = (1/M) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t}) \quad (9)$$

La sensibilité de la mesure dépend essentiellement de  $\sigma$ ,  $\Phi$ ,  $\lambda$  etc. Pour augmenter la sensibilité le flux doit être élevé et le temps d'irradiation assez long. Dans le meilleur des cas, il est aussi préférable que  $\sigma$  et  $I$  soient grands.

Dans le cas où il s'est écoulé un temps  $t_d$  depuis la fin de l'irradiation l'équation de l'activité devient :

$$A = (1/M) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (10)$$

$t_i$  : Le temps d'irradiation de l'échantillon (seconde).

$t_d$ : Le temps de désactivation (seconde).

Pour le calcul de la teneur de l'élément recherché, trois méthodes sont utilisées :

**a. La méthode absolue :**

Elle consiste à établir une relation entre l'activité et la masse de l'élément dans un échantillon.

Si  $\sigma_{AB}$  est exprimée en barns (1barns =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>) :

$$A = 0,6 (1/M) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (11)$$

En pratique, cette méthode est peu utilisée à cause de l'imprécision de la connaissance de la fluctuation du flux  $\Phi$  dans l'espace et dans le temps.

**b. La méthode relative :**

Cette méthode est utilisée lorsque l'échantillon et l'étalon sont irradiés en même temps. De ce fait, l'activité de l'étalon est (9) :

$$A_R = (1/M) m_R \sigma \Phi I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_R} \quad (12)$$

$m_R$  étant connue, l'activité de l'échantillon est :

$$A_E = (1/M) m_E \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_E} \quad (13)$$

Finalement, la masse de l'échantillon est (9):

$$m_E = \frac{A_E m_R}{A_R} e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})} \quad (14)$$

La relation entre le taux de comptage et l'activité :

$$A = \varepsilon C \quad (15)$$

$\varepsilon$  : L'efficacité de comptage.

L'équation (13) devient :

$$m_E = (C_E m_R / C_R) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})} \quad (16)$$

### **5.3 Avantages de la NAA :**

L'analyse par activation neutronique couvre une large gamme d'analyse des éléments sans se soucier de l'aspect physique ou chimique de l'échantillon ce qui lui procure les avantages suivant [60] :

- Les échantillons peuvent être liquides, solides, en suspensions ou gaz. Ils n'ont pas besoin d'être mis en solution ou vaporisés.
- Un des avantages les plus importants, est que la matrice utilisée en NAA n'interfère pas dans l'analyse concernant le milieu biologique, car elle est composée de H, C, O, N, P et Si qui ne forme pas de radio-isotopes. Ce qui lui confère une haute sensibilité.
- La NAA est non destructive. L'échantillon est directement analysé sans ajout de réactifs ce qui permet d'un côté de récupérer l'échantillon par la suite mais aussi éviter la contamination de ce dernier lors de la manipulation.
- La NAA requière une faible quantité de l'échantillon (100-200 mg).
- La NAA étant principalement une technique d'analyse instrumentale et avec son approche analytique, elle réduit le temps de contact du technicien avec l'échantillon ce qui la rend efficace.
- C'est une technique multi-élémentaire. Elle permet une analyse simultanée de plusieurs éléments dans un même échantillon sans avoir à changer d'appareil.
- C'est une technique rapide tant qu'elle permet d'irradier plusieurs échantillons simultanément afin d'analyser plusieurs éléments dans chacun d'eux.
- Très haute sensibilité pour les éléments traces métalliques. Cela dépend du flux de neutron, de la section efficace des éléments recherchés, du temps d'irradiation, la composition de la matrice et la résolution du détecteur. A des conditions optimales, la NAA atteint ses limites théoriques pour les éléments traces.

### **5.4 Inconvénient de la NAA :**

La NAA présente toutefois les inconvénients suivants [59]:

- 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 est la nécessité d'une installation onéreuse qui est un 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.
- Enfin signalons que la NAA ne permet d'analyser le Pb car son irradiation ne donne pas de rayonnement gamma.

### **5.5 Limites de la NAA :**

- Des éléments produisant des rayons gamma ( $\gamma$ ) avec des énergies proches peuvent créer une interférence. Cependant, ce problème est usuellement contourner par le choix d'une autre énergie d'émission pour l'un des éléments ou, en attendant que l'activité de l'élément qui a la durée de vie la plus petite disparaisse (temps de refroidissement).
- La limite de détection d'un élément peut décroître lorsque le ratio de l'activité est augmenté. Réciproquement, la limite de détection diminue en fonction de l'efficacité du détecteur, le temps d'irradiation et le temps de décroissance de la radioactivité.
- La limitation la plus importante est que la NAA prend beaucoup temps pour une analyse complète. Cela est dû au fait que la durée de vie des éléments n'est pas la même et elle est divisée en trois catégories [60] :
  - ❖ Courte période : de quelques secondes à quelques heures.
  - ❖ Moyenne période : de quelques heures à quelques jours.
  - ❖ Longue période : à partir de quelques jours jusqu'à plusieurs années.

Pour analyser un élément de longue durée de vie, il faut attendre quelques semaines pour que l'activité des éléments courte et moyenne durée de vie soit nulle pour avoir une meilleure détection.

- Le Cu, Al, P et S sont caractérisés d'une très courte durée de vie et une faible section efficace rend leur détection par la NAA difficile, raison pour laquelle la fluorescence à rayon X (XRF) est avantagée à la NAA [60].

**CHAPITRE V**

**METHODOLOGIE**

**EXPERIMENTALE**

Dans ce chapitre nous allons aborder la description du site étudié, la technique de prélèvement utilisée et la méthode d'analyse des métaux lourds par NAA.

## 1. Présentation de la région d'étude :

Le choix d'un site d'étude est fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller et du risque liés à l'exposition des êtres humains à des niveaux variables d'une pollution. Il est nécessaire de sélectionner des sites représentatifs du type de pollution et du niveau d'exposition, on distingue en effet des sites de proximité, des sites urbains, des sites semi urbains et des sites ruraux.

Pour l'étude de la pollution atmosphérique par les particules inhalables et les métaux lourds y associés, nous avons en fonction de l'objectif fixé et des moyens disponibles, opté pour un site urbain de proximité, c'est-à-dire influencé par des sources émettrices de polluants qui sont surtout liés au trafic routier mais aussi à une forte densité humaine. En effet le site choisi pour le prélèvement se trouve dans le quartier de Tagarrin au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) qui est localisé sur les hauteurs d'Alger à une altitude d'environ 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 côté du site de prélèvement.

Ce site se caractérise par l'absence d'obstacles (absence d'urbanisme), fait l'objet d'une très bonne ventilation naturelle. Hormis le trafic routier, le site n'est pas exposé à des émissions industrielles qui peuvent l'influencer directement.

La localisation exacte du poste de prélèvement est indiquée sur la carte Google en figure N°09



**Figure N°09 :** Carte de la Baie d'Alger indiquant le site de prélèvement [61].

- **Caractéristiques climatiques du site :**

Alger bénéficie d'un climat méditerranéen et est connue par ses longs étés chauds et secs, les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes. Le tableau N°7 résume la température et les précipitations moyennes d'Alger.

**Tableau N°07 : Caractéristiques climatiques d'Alger [62].**

Mois	Température moyenne (°C)	Précipitation moyenne (mm)
Octobre(2012)	19,61	1,48
Novembre(2012)	15,25	2,26
Décembre(2012)	12,21	0,1
Janvier(2013)	12,72	0,29
Février(2013)	12,17	0,92
Mars (2013)	14,66	0,93

## 2. Mode de prélèvement :

Pour le prélèvement des PM-10 et PM-2,5 nous avons utilisé un préleveur LVS de type Gent Sampler. Ce système a été conçu pour l'IAEA dans le cadre du contrat de recherche à l'institut des sciences scientifiques, université Gent, Belgique 1992/1995.

L'échantillonneur d'air Gent Sampler comporte :

- Module de prélèvement.
- Module de commande avec programmation.
- Prélèvement PM-10 et PM-2.5 simultané.

Ce dispositif est illustré en (figure N°10). L'avantage de ce système est qu'il permet un contrôle dynamique du débit à 16L/min, maintenant ce débit constant quel que soit l'évolution de la perte de charge du système (c-à-d augmentation de la charge d'aérosols sur le filtre). Cet échantillonneur est dit « manuel », car il nécessite l'intervention d'un opérateur pour effectuer des prélèvements séquentiels de filtre. Cet appareil indique automatiquement le volume d'air aspiré et la durée du prélèvement.



Figure N°10 : Photo de l'appareil d'échantillonnage (LVS).



Figure N°11 : Photo du poste de prélèvement.

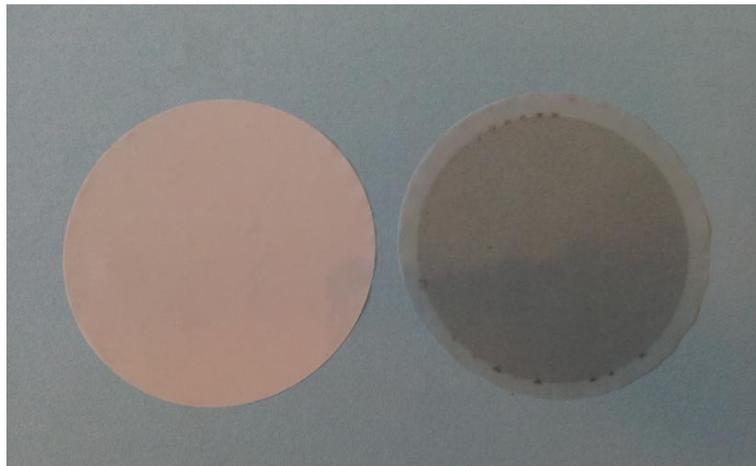
Les échantillons collectés sont des dépôts obtenus après aspiration d'air déposés sur des filtres de polycarbonate de diamètre 47 mm et de deux porosités différentes 0,4  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$ . L'appareil dispose d'une grille qui joue le rôle du seuil de coupure de 10  $\mu\text{m}$ .

L'appareil est conçu et optimisé de façon que Les porosités 8  $\mu\text{m}$  et 0,4  $\mu\text{m}$  représentent les seuils de coupure des particules grossière (corse) et particules fine (PM-2,5). Ainsi pour chaque prélèvement journalier nous recueillons des échantillons correspondant aux deux classes granulométriques.

Les figures N° (12,14) représentent des photos prises des filtres de porosité 0,4  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$  avant et après dépôts.



**Figure N°12** : Photo du filtre de porosité 0,4  $\mu\text{m}$  avant et après dépôts.



**Figure N°13** : Photo du filtre de porosité 8  $\mu\text{m}$  avant et après dépôts.

### **3. Analyse des métaux lourds :**

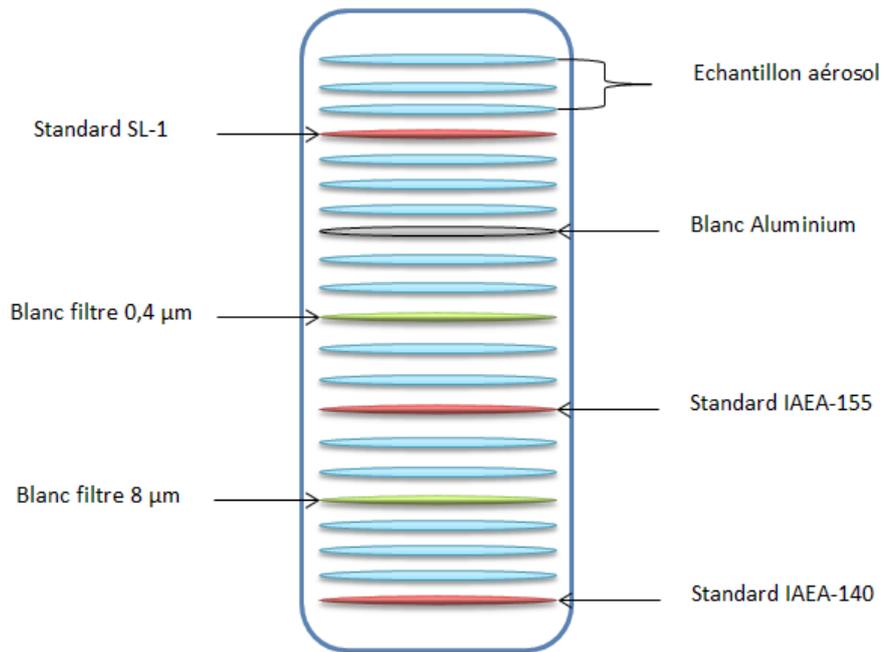
#### **3.1. Préparation et conditionnement :**

La préparation et le conditionnement est une étape importante de la procédure. La maîtrise des opérations de prélèvement, de pesée et de conditionnement minimise considérablement l'erreur sur la valeur finale. Après prélèvement les filtres sont placés

dans des boîtes pétri fermées puis stockées dans des dessiccateurs afin d'éviter l'humidité. Afin d'obtenir des concentrations élémentaires précises tout en préservant les propriétés chimiques nous avons suivi les étapes suivantes :

- Les échantillons ainsi que les standards ont été pesés à l'aide d'une balance semi-micro analytique.
- Avant irradiation les filtres (échantillons et blanc) sont placés dans des enveloppes en aluminium de haute pureté (99,99), puis mis ensemble dans le même paquet en aluminium et organisés de manière à ce que les échantillons ainsi que les standards reçoivent le même débit neutronique. Ces derniers servent comme références pour le calcul des concentrations en polluants.

La figure N°14 représente le conditionnement des filtres et des standards dans la capsule.



**Figure N°14 :** Schéma de conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à

L'irradiation

### 3.2.L'irradiation :

#### a. Le réacteur nucléaire NUR de Draria :

L'irradiation a été effectuée dans un des canaux du réacteur NUR de Draria. Le Réacteur NUR est un réacteur de recherche ouvert de type piscine. Il est doté d'une grande flexibilité expérimentale et sa puissance nominale est de 01 Mégawatt. Le flux neutronique thermique de ce réacteur atteint une intensité de  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>/s. Le réacteur dispose de sites d'irradiation verticaux 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.

Le transfert des échantillons vers les sites d'irradiations s'effectue soit par voie manuelle, soit par voie pneumatique. La voie manuelle est utilisée pour les longues durées d'irradiation pour l'analyse des radioéléments de longue période tel que le fer, le sélénium ou le cobalt. L'analyse des radioéléments de courte période (cuivre, aluminium, Manganèse, vanadium, etc.) se fait par voie pneumatique.

#### b. Conditions d'irradiation :

Dans notre cas l'irradiation a été effectuée par voie manuelle pendant une durée de six heures (6) dans un flux intense de neutrons thermiques afin de favoriser la réaction (n,  $\gamma$ ). Après l'irradiation, les échantillons subissent un temps de refroidissement de cinq (5) à neuf (9) jours avant d'être analysés par spectrométrie gamma.

#### c. Comptage par spectrométrie gamma :

La spectrométrie gamma ( $\gamma$ ) est effectuée au réacteur NUR du CRND.

Nous avons utilisé une chaîne de spectrométrie gamma dotée d'un détecteur à cristaux de germanium hyper pur Ge (HP) de haute résolution refroidi à l'azote liquide. Le détecteur permet la mesure en énergie et en intensité des rayons ( $\gamma$ ) émis par l'échantillon. Le signal obtenu est proportionnel à l'énergie absorbée par le détecteur. La chaîne de spectrométrie gamma est constituée :

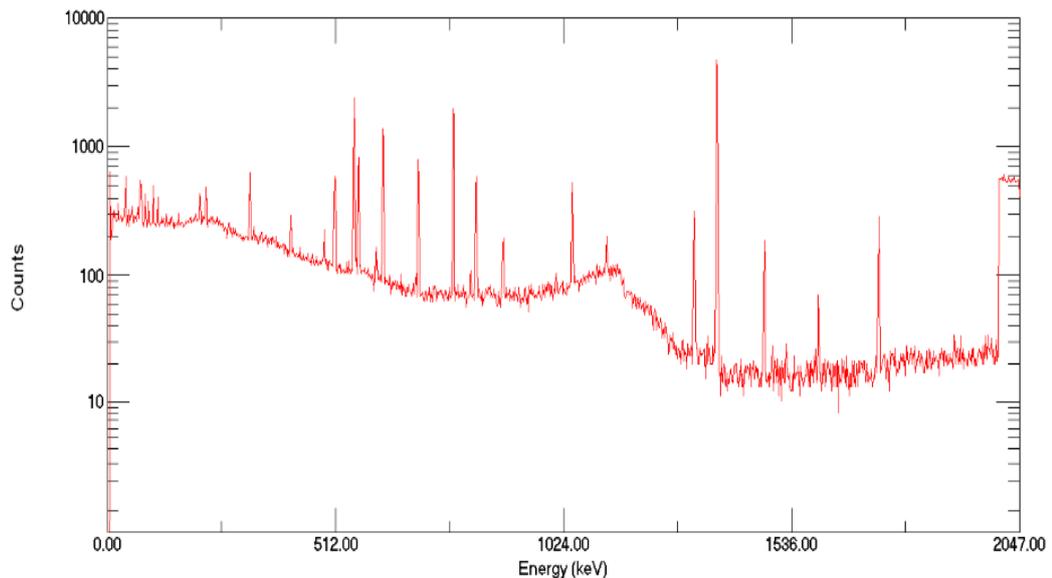
- D'un détecteur Ge(HP).
- D'un préamplificateur.
- D'un amplificateur.
- D'un codeur ou convertisseur analogique-numérique.

- Et d'un système d'acquisition et d'analyse de spectre.

L'analyseur fait appel à un logiciel dont les fonctions principales sont :

- La gestion des acquisitions.
- La mesure des paramètres de la chaîne de spectrométrie (résolution, énergie et rendement).
- La localisation des pics d'absorption totale .
- Le calcul de l'abscisse et de la surface de chaque pic.

Le spectre obtenu est basé sur des canaux électriques d'intensité variable, la calibration avec des sources d'énergies connues telle que le Co 60 permettant d'obtenir des spectres en énergie (figure N°15).



**Figure N°15** : Exemple de spectre

Le logiciel génie 2000 permet le traitement de spectre, il nous donne l'énergie, la surface du pic et le radio-isotope associé. Les dépouillements effectués par le génie 2000 sont refaits manuellement en utilisant des abaques donnant les énergies des radioéléments (tableau N°8) et la nature des réactions.

Dans notre cas les éléments pris en compte sont de moyenne à longue période.

Tableau N°08 : Table d'énergie

isotopes	Cr51	Au198	Sb122	Ag110	Br 82 (100)	Ce141 (100)	Sc 46 (100)	Fe59 (100)
Énergie (keV)	320	411.8	564	657.8	776.6	145,4	889.4	1098.6
isotopes	Zn 65 (100)	Co 60 (100)	Fe 59 (80)	Co 60 (60)	Na 24 (90)	K40 (100)	La140 (100)	As76 (100)
Énergie (keV)	1115.4	1173.1	1291.5	1332,4	1368.4	1460,7	1595,4	559,2

#### 4. Calculs :

##### 4.1. Détermination de la concentration finale en PM-i dans l'air prélevé :

Les teneurs en PM-i sont déterminées à l'aide des équations suivantes :

$$C_{PM-2.5} = m_{f0.4} / V \quad C_{Corse} = m_{f8} / V$$

$$C_{PM-10} = C_{PM-2.5} + C_{Corse}$$

V: volume d'air aspiré.

$M_{f0.4}$ : masse déposée sur le filtre (0,4 µm).

$M_{f8}$ : masse déposée sur le filtre (8 µm).

##### 4.2. Détermination de la concentration des métaux lourds :

En supposant que les masses des enveloppes en aluminium sont identiques nous avons :

$$I = \frac{m_{el\ éch}}{m_{el\ st}} = \frac{(A_{éch} * e^{\lambda t d\ éch}) - (A_{bl} * e^{\lambda t d\ bl})}{(A_{st} * e^{\lambda t d\ st}) - (A_{bl} * e^{\lambda t d\ bl})}$$

Où:

$m_{el\ éch}$ : masse de l'élément recherché dans l'échantillon.

$m_{el\ st}$ : masse de l'élément recherché dans le standard.

A : la surface nette sous le pic

$t d\ éch$  : temps de décroissance de l'échantillon

$t d\ bl$  : temps de décroissance du blanc

*tdst* : temps de décroissance du standard

#### 4.3. Calcul de l'erreur

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

- L'erreur sur la balance ( $\Delta m$ )
- L'erreur sur le volume d'air aspiré ( $\Delta V$ )
- L'erreur sur l'intensité ( $\Delta I$ )
- L'erreur sur la concentration de l'élément dans le standard ( $\Delta C_{st}$ )

Le comptage étant une valeur statistique l'erreur sur l'aire ( $A$ ) est :

$$\Delta A = \sqrt{A}$$

En supposant que l'erreur sur le temps est nulle donc l'erreur pour la concentration finale ( $\Delta C$ ) des éléments se fait selon la formule suivant :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta C_{st}}{C_{st}} + \frac{\Delta V}{V}$$

# **CHAPITRE VI**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

## **Introduction**

Dans ce qui suit on présentera les résultats obtenus en étudiant les points suivant :

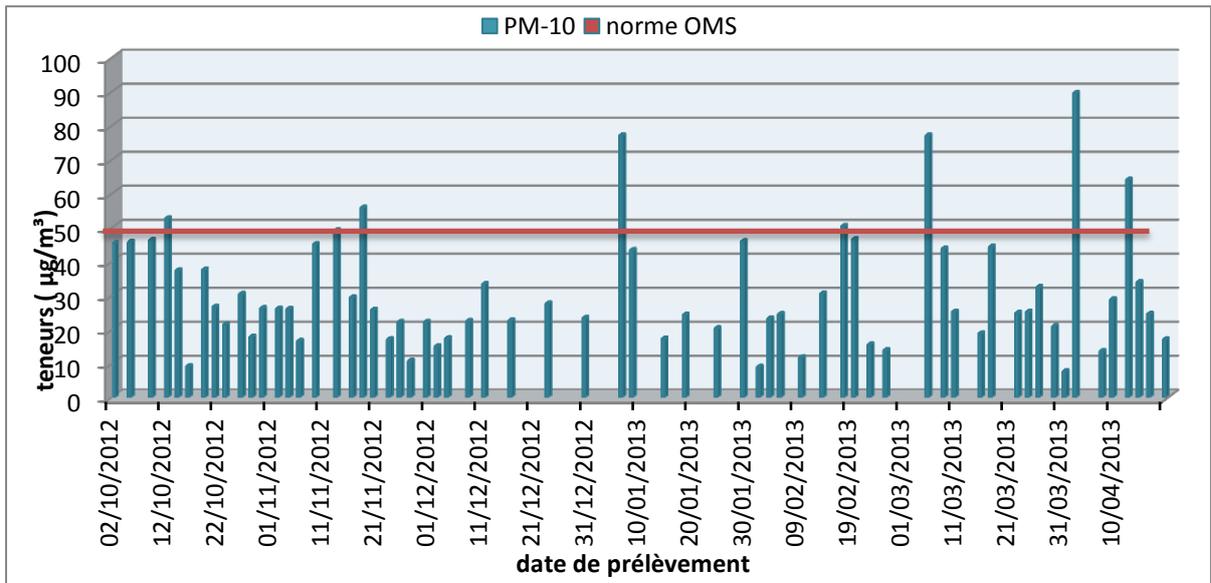
- L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques enregistrés en PM-i, leur ampleur par rapport aux normes internationales et les corrélations entre elles.
- comparaison avec des résultats enregistrés dans d'autres études.
- La répartition des teneurs des métaux lourds par classe granulométrique.

### **1. Etude de l'ampleur de la pollution atmosphérique par les particules fines :**

L'étude des particules fines a été effectuée sur une durée globale de six mois (du mois d'octobre 2012 au mois de mars 2013) à raison d'une moyenne de douze (12) prélèvements journaliers par mois. Chaque prélèvement compte deux fractions de particules correspondant au PM-10 et PM-2,5. Nous avons ainsi réalisé 63 prélèvements journaliers.

**1.1. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 :**

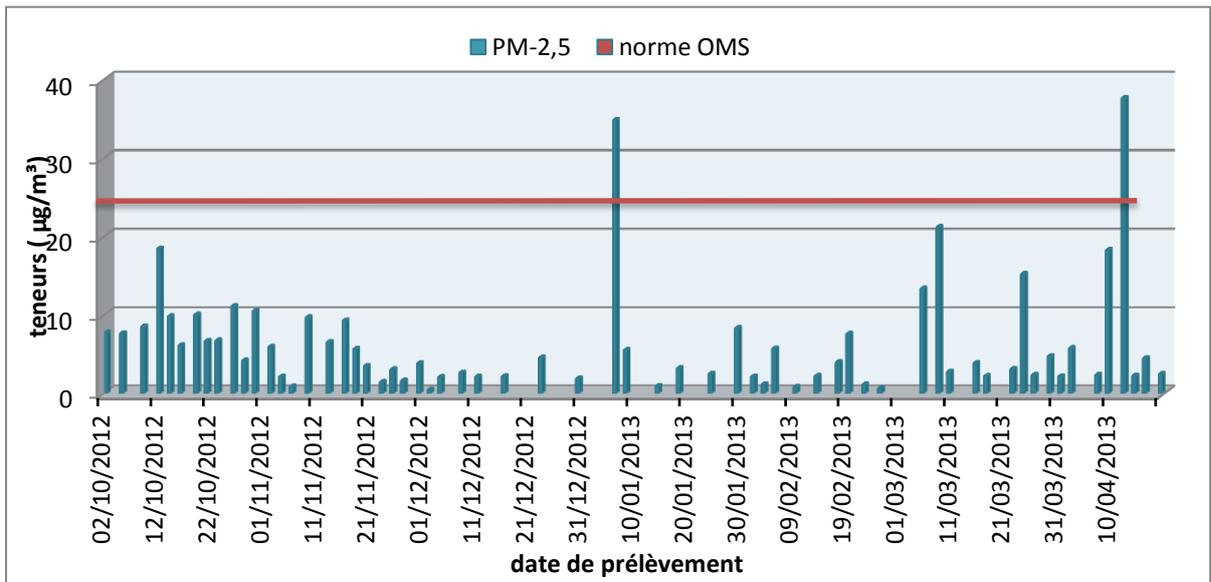
Nous illustrons en figure N°16 L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-10 mesurées pendant la durée d'étude à Tagarrin.



**Figure N°16 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes des PM-10

**1.2. Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-2,5 :**

La figure N°17 illustre L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-2,5 mesurées pendant la durée d'étude.



**Figure N°17 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes des PM-2,5.

Les tableaux N°9 et N°10 regroupent respectivement les teneurs journalières et les caractéristiques statistiques en PM-2,5 et PM-10.

**Tableau N°9 : Teneurs moyennes quotidiennes des PM-10 et PM-2,5**

<b>DATE</b>	<b>Teneurs en PM-10(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Teneurs en PM-2,5(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
02/10/2012	45,30	7,75
05/10/2012	45,71	7,62
09/10/2012	46,22	8,49
12/10/2012	52,59	18,41
14/10/2012	37,29	9,77
16/10/2012	9,11	6,08
19/10/2012	37,48	9,99
21/10/2012	26,61	6,65
23/10/2012	21,35	6,70
26/10/2012	30,35	11,07
28/10/2012	17,80	4,14
30/10/2012	26,15	10,46
02/11/2012	26,03	5,92
04/11/2012	25,97	2,09
06/11/2012	16,54	0,83
09/11/2012	44,98	9,64
13/11/2012	49,04	6,51
16/11/2012	29,39	9,24
18/11/2012	55,72	5,62
20/11/2012	25,73	3,46
23/11/2012	17,04	1,42
25/11/2012	22,12	3,02
27/11/2012	10,70	1,61
30/11/2012	22,13	3,79
02/12/2012	14,94	0,43
04/12/2012	17,32	2,04
08/12/2012	22,40	2,60
11/12/2012	33,22	2,11
16/12/2012	22,59	2,13
23/12/2012	27,52	4,50
30/12/2012	23,28	1,87
06/01/2013	77,04	34,79
08/01/2013	43,27	5,48
14/01/2013	17,21	0,91
18/01/2013	24,23	3,16
24/01/2013	20,25	2,46
29/01/2013	45,84	8,28

Suite du tableau N°9

01/02/2013	8,92	2,10
03/02/2013	23,18	1,13
05/02/2013	24,44	5,68
09/02/2013	11,68	0,80
13/02/2013	30,51	2,18
17/02/2013	50,33	3,96
19/02/2013	46,40	7,55
22/02/2013	15,48	1,11
25/02/2013	13,82	0,65
05/03/2013	77,00	13,31
08/03/2013	43,67	21,15
10/03/2013	25,13	2,74
15/03/2013	18,74	3,83
17/03/2013	44,25	2,17
22/03/2013	24,75	3,09
24/03/2013	25,05	15,20
26/03/2013	32,37	2,31
29/03/2013	20,89	4,69
31/03/2013	7,64	2,12
02/04/2013	89,48	5,72
07/04/2013	13,55	2,32
09/04/2013	28,80	18,21
12/04/2013	63,93	37,61
14/04/2013	33,82	2,23
16/04/2013	24,48	4,45
19/04/2013	17,00	2,43

**Tableau N°10 : Caractéristiques statistiques des teneurs atmosphériques en PM-i**

classes granulométriques	Maximum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Minimum ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Moyenne ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ecart type ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
PM-10	89,48	7,64	30,89	17,14
PM-2,5	37,61	0,43	6,35	7,09

Nous présentons ci-dessous la figure N°18 illustrant les teneurs moyennes en PM-i et la figure N°19 qui montre la contribution des différentes fractions particulières dans les PM-10

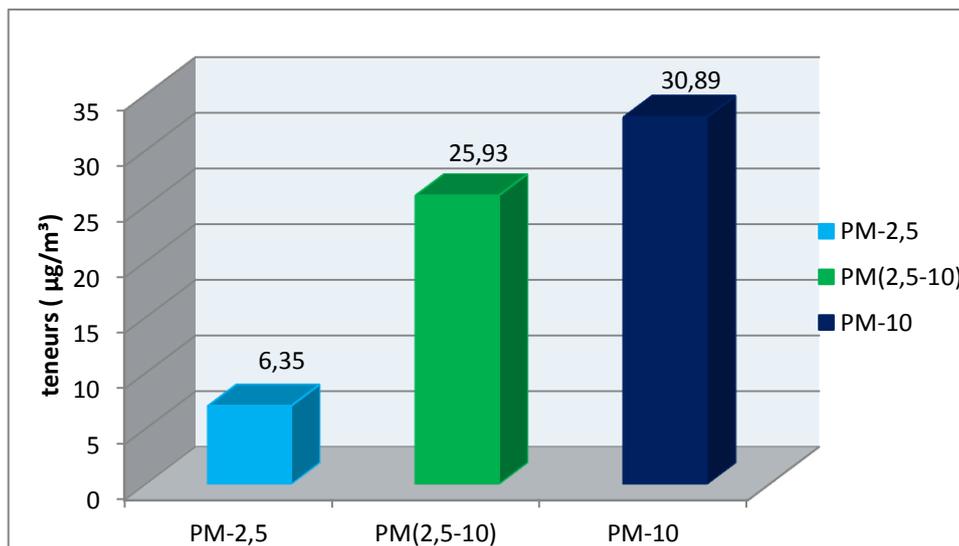


Figure N°18 : Teneurs moyennes des différentes classes granulométrie.

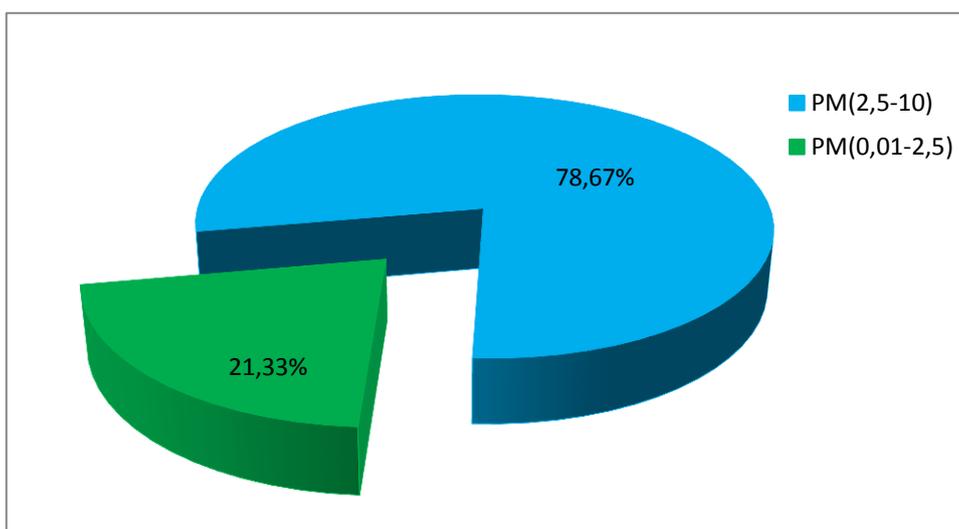


Figure N°19 : Contribution massique des factions PM-i dans les PM-10.

### 1.3. Corrélation entre les teneurs massiques des PM-i :

Dans le but de comprendre l'évolution des différentes classes granulométriques étudiées, et pour permettre de distinguer les différentes sources et mécanismes de formation, nous avons traité les corrélations entre différents couples de PM-i.

Les figures N° 20 à 22 présentent une comparaison entre l'évolution des teneurs en PM-2,5 et PM-10, entre PM-2,5 et PM (2,5-10) et enfin entre celles des PM (2,5-10) et PM-10 respectivement.

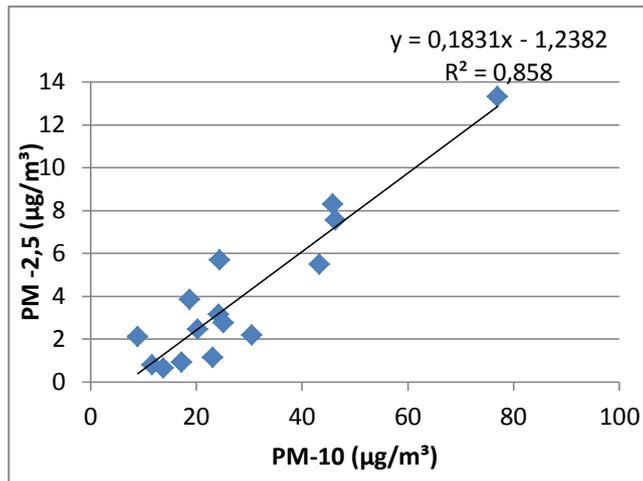


Figure N°20 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-2,5 et PM-10.

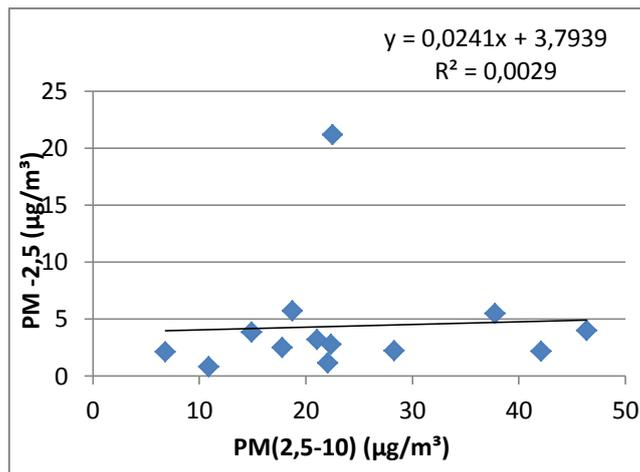


Figure N°21 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-2,5 et PM (2,5-10).

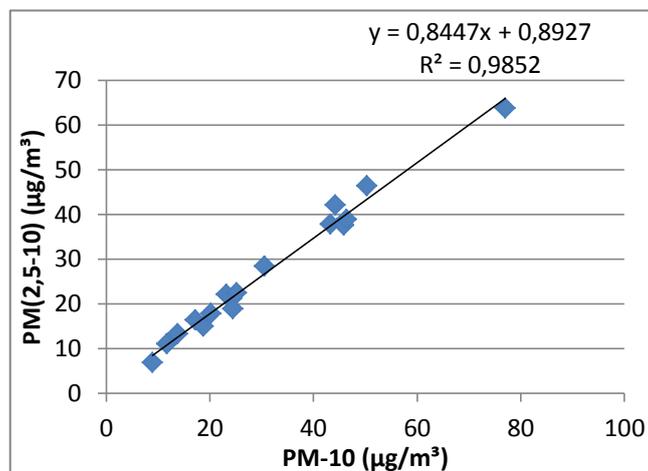


Figure N°22 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM (2,5-10) et PM-10.

#### 1.4. Discussion des résultats :

##### a. PM-10 :

L'évolution temporelle montre que, comme c'est souvent le cas des teneurs en PM-10 varient fortement d'un jour à un autre. Ces variations sont normales et attendues

car elles sont liées aux variations des conditions météorologiques et aux variations dans l'intensité des activités humaines. Nous constatons que les teneurs en PM-10 oscillent entre  $7,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $89,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  avec un rayon de dispersion de 17,14 par rapport à la teneur moyenne des PM-10 qui est de  $77,4 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ .

La teneur maximale en PM-10 ( $89,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a été mesurée le mardi 02 avril 2013. En ce jour de semaine où les conditions météorologique étaient normales, il y a eu probablement un intense trafic routier.

Les teneurs les plus faibles ( $7,64$  et  $8,92$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  enregistrées respectivement le 31 mars et le 01 février correspondaient à une météorologie favorable, à une bonne dispersion des particules (vent fort : plus de  $50\text{km}/\text{h}$ ) et à une réduction des teneurs par lessivage de l'atmosphère par les pluies.

La figure N°19 illustre la contribution des classes granulométriques dans les PM-10, on constate que les particules corse (PM (2,5-10)) présentent 78,67% de la masse totale des PM-10. Normalement, dans les grands centres urbains, ce taux reste inférieur à 50% car les particules corse proviennent en majorité des émissions naturelles. Dans le cas de notre site il y a certainement un apport non négligeable de particules naturelles (érosion éolienne). L'insuffisance de la couverture végétales, les chantiers de construction et la resuspension des poussières déposées sur le bas-côté des routes enrichissent sans doute cette fraction granulométrique des particules grossières. Ainsi une amélioration végétale réduira la part de ces particules mais n'aura que peu d'influence sur les teneurs des particules alvéolaires qui sont les plus toxiques.

En comparaison avec la norme OMS qui fixe pour les PM-10 une limite de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , nous constatons, comme illustré en figure N°16, que dans 9,5% des journées étudiées, il y a eu dépassement de cette limite.

### **b. PM-2,5 :**

Les teneurs atmosphériques enregistrés en PM-2,5 sont faibles et cela s'explique par l'absence d'obstacles dans ce site, qui fait l'objet d'une bonne ventilation naturelle. Les teneurs en PM-2,5 varient entre  $0,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $36,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dont le rayon de dispersion est de 7,07 par rapport à la teneur moyenne des PM-2,5 qui est de  $6,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le prélèvement effectué le vendredi 12 avril correspond à la valeur maximale, cela est contradictoire si on se réfère au taux du trafic routier qui est généralement minimal le jour de week-end mais ça s'explique par les particules fines qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et que si les conditions météorologiques ne changent pas

(changement de direction du vent ou présence de précipitation) les émissions du jour précédent persistent longtemps dans l'atmosphère et se retrouveront dans l'échantillon collecté le jour suivant. Le pourcentage de dépassement de la norme est de 3,12% (figure N°17).

**c. Corrélation entre les différentes classes granulométriques :**

La figure N°22 illustrant l'évolution des PM-10 en fonction des PM (2,5-10) montre qu'il y a une très bonne corrélation ( $R^2 = 0,985$ ) entre les deux classes granulométriques, ce résultat était attendu car les facteurs de formation et origines d'émission sont les mêmes.

Les particules PM-2,5 et PM-10 sont en bonnes corrélations linéaires avec un facteur de corrélation ( $R^2 = 0,858$ ).

A l'inverse, nous constatons que le couple PM-2,5 / PM (2,5-10) (figure N°21) n'évolue pas de la même manière, il n'y a pas de corrélation linéaire entre les deux classes de particules ( $R = 0,002$ ). Ce résultat montre que les particules fines sont dans leurs formations et dans leurs origines complètement différentes des particules grossières. En d'autres termes une forte teneur en PM (2,5-10) n'induit pas automatiquement une forte teneur en PM-2,5. Ceci s'explique par le fait que les PM (2,5-10) proviennent de l'érosion des sols et que de ce fait n'y a pas de lien avec les PM-2,5 provenant des émissions du trafic routier.

En effet les PM-2,5 véhiculent surtout les HAP et les métaux lourds et les suies du carbone qui ont une très fine granulométrie [13].

**2. Comparaison de la pollution mesurée à Alger avec d'autres sites :**

Pour situer le niveau de pollution mesuré au site étudié à Alger il est utile de le comparer aux teneurs enregistrées dans d'autres sites d'Alger et autres villes.

Le tableau N°11 résume les teneurs atmosphériques mesurées en différents sites

**Tableau N°11 : Teneurs atmosphérique en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes.**

Pays – Villes	PM-10 (µg/m3)	PM-2,5 (µg/m3)	Année	Description	Références
<b>Bulgarie (4 villes)</b>	72	44	11/1995 au 09/1996	Site urbain	[63]
<b>République Tchèque (4 villes)</b>	75	52			
<b>Hongrie (5 villes)</b>	60	40			
<b>Pologne (4 villes)</b>	74	55			
<b>Roumanie (4 villes)</b>	70	43			
<b>Slovaquie (4 villes)</b>	49	34			
<b>Barcelone (Espagne)</b>	49,80	35	06/1999 au 06/2000	Site urbain	[64]
<b>Mexico</b>		96,4	1995	Site de proximité (mesure sur 2 mois)	[65]
<b>Le Caire (Egypte)</b>	220 142	135 48	Hiver 1999 Eté 2002	Site de proximité Site urbain résidentiel	[66]
<b>Marseille</b>	29	-	1999	Site urbain	[67]
<b>Rennes</b>	24	-	1999	Teneur relative au PM-3 Site de proximité	[67]
Pays – Villes	PM-10 (µg/m3)	PM-2,5 (µg/m3)	Année	Description	Références
<b>Paris</b>	22	-	2000	Site urbain	[68]
<b>Berne (Suisse)</b>	39,6	24,1	2001	Site de proximité	[69]
<b>Arnheim (Hollande)</b>	74,5	42,9	1994	Moyenne sur un mois mesuré à 1 m de la route	[70]
<b>Londres City</b>	35	22	2003	Site de proximité (80.000 Veh/j route à 6 voies)	[71]
<b>USA</b>	45	-	2001	Site urbain	[72]
<b>Montréal</b>	28 - 45	16 - 30	1996	Teneur dépendant du site	[73]
<b>Hong-Kong</b>	69,5	47	2001	Site urbain	[74]
<b>Alger (sites Place du 1er Mai et Bab-El-Oued)</b>	60 - 66	-	2003	Sites urbains influencés par le trafic routier	[75]
<b>Alger (site ENP)</b>	75,20	36,10	2002-2003	Site de proximité	[76, 77]
<b>Alger (Tagarrin)</b>	30,89	6,35	2012-2013	Site urbain de proximité	Présente étude

Ce tableau montre que la pollution enregistré au Tagarrin à Alger n'est pas aussi élevé que celle mesurée dans certaines villes des pays en voie de développement. Le taux mesuré par exemple au Caire est quatre fois plus élevé qu'à Alger. Les teneurs

mesurées sont pratiquement du même ordre de grandeur que celles enregistrées dans certains pays occidentaux.

La comparaison avec les autres sites d'Alger (Place du 1er Mai, Bab-El-Oued et ENP) montre également que sur la hauteur de la ville, la pollution est relativement moindre. Ceci s'explique par le fait que le site de Tagarrin subit une très bonne ventilation naturelle qui s'oppose à la stagnation des polluants. Par ailleurs la période étudiée a été globalement très pluvieuse par rapport aux autres années ce qui réduit aussi la pollution par lessivage atmosphérique.

Il est toute fois possible que les conditions de prélèvement avec l'appareil utilisé (gent sampler PM-10) ne correspond pas exactement aux normes utilisées par d'autre appareils plus connus et qui ont fait leurs preuves (exemple : jauge beta).

### **3. Etude et ampleur des métaux lourds associés aux particules fines:**

#### **3.1. Niveaux de pollution par les métaux lourds :**

Après l'analyse qualitative et quantitative des résultats, nous obtenons l'évolution temporelle de la teneur des métaux lourds véhiculés par les PM-i en moyenne période radioactive ainsi qu'en longue période pour certain métaux. La technique INAA a permet de détecter la présence des métaux lourds (Fe, Zn, Co, Cr, Sb As, Hg et l'Au) les lanthanides (Sc, Ce et La) les alcalins (Na, k et le Br). Le Mercure et l'Or n'ont pas pu être analysés quantitativement en raison de leur absence dans les standards utilisés.

Les tableaux N°12, N°13 et Les figures N°23 à 46 représentent l'évolution des teneurs atmosphériques mesurées pour chaque métal dans les fractions PM-2,5 et PM-10. Les calculs d'erreurs ont été effectués pour l'analyse.

Les tableaux N°14 et N°15résument les caractéristiques statistiques des métaux lourds dans les PM-2,5 et PM-10 et Les figures N°47 et N°48 représentent la distribution des teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-2,5 et PM-10.

## CHAPITRE VI : Résultats et discussion

**Tableau N°12 :** Tableaux présente les concentrations en ng/m<sup>3</sup> des éléments métalliques dans les PM-2,5

DATE	Fe	Zn	Cr	Co	As	Sb	Na	K	Sc	La	Ce	Br
06/01/2013	279,91±73,81	-	56,57±10,18	10,07±3,34	0,62±0,08	3,26±0,47	74,04±2,34	4320,51±319,53	0,21±0,01	0,58±0,23	<LD	55,88±10,56
08/01/2013	-	-	18,04±5,19	-	<LD	0,13±0,05	-	-	0,04±0,01	0,28±0,13	<LD	17,43±3,33
14/01/2013	-	-	81,39±6,27	2,75±0,2	<LD	0,14±0,12	-	-	<LD	0,14±0,14	<LD	11,75±8,16
18/01/2013	-	-	23,74±8,34	1,85±0,56	<LD	0,04±0,01	-	-	0,05±0,01	<LD	<LD	4,68±1,27
24/01/2013	-	-	43,55±17,42	0,39±0,17	<LD	0,2±0,09	140,72±19,87	-	0,03±0,01	<LD	<LD	15,72±4,95
29/01/2013	520,14±31,69	-	63,02±26,63	-	<LD	0,93±0,44	541±78,01	-	0,03±0,01	0,15±0,09	<LD	21,66±7,31
01/02/2013	795,36±20,99	-	21,69±3,6	1,44±0,97	<LD	1,02±0,4	1413,47±38,70	-	0,4±0,06	0,06±0,02	0,93±0,26	13,64±2,43
03/02/2013	420,47±30,49	-	29,93±17,89	0,15±0,18	<LD	0,16±0,1	1439,26±101,49	-	0,37±0,22	1,06±0,74	2,94±2,05	6,39±3,95
05/02/2013	535,48±16,83	-	15,15±3,05	0,16±0,13	<LD	0,31±0,13	1008,51±31,42	-	0,26±0,05	0,17±0,05	0,71±0,22	10,3±2,21
09/02/2013	324,79±29,30	-	30,33±2,31	0,06±0,02	0,14±0,07	0,02±0,01	234,83±20,75	-	0,07±0,06	0,03±0,01	0,27±0,24	<LD
13/02/2013	-	-	55,31±23,53	0,25±0,13	<LD	0,22±0,11	-	-	0,06±0,02	0,12±0,07	<LD	16,33±5,7
17/02/2013	673,22±23,37	-	37,91±9,07	2,51±1,85	<LD	0,39±0,18	1251,1±43,71	-	0,34±0,08	0,58±0,2	2,43±0,83	9,9±2,54
19/02/2013	419,27±12,35	30,97±5,78	13,07±2,27	3,79±2,49	<LD	0,26±0,11	1014,18±28,59	-	0,24±0,04	<LD	<LD	8,52±1,6
22/02/2013	489,48±35,11	29,73±18,42	17,06±10,25	2,06±2,26	<LD	0,17±0,14	1034,03±73,83	-	0,23±0,14	<LD	<LD	7,09±4,39
25/02/2013	858,54±85,23	33,98±30,99	12,87±1,61	0,52±0,04	<LD	1±0,9	1127,56±114,32	-	0,27±0,25	0,03±0,02	<LD	18,06±16,46
05/03/2013	-	-	105,44±12,22	-	0,21±0,01	0,37±0,19	687,25±14,58	4249,84±261,37	0,27±0,03	0,71±0,16	1,99±0,48	10,71±1,34
08/03/2013	-	-	31,27±3,1	-	0,44±0,04	1,37±0,14	725,67±14,78	8791,99±527,16	<LD	0,56±0,12	<LD	9,73±1,13
10/03/2013	-	30,79±12,16	36,66±8,93	-	0,54±0,09	0,33±0,12	632,67±22,0	2155,77±160,95	2,7±0,71	<LD	<LD	12,35±3,21
15/03/2013	-	-	55,07±10,29	-	0,37±0,05	0,24±0,06	-	1745,87±120,62	0,28±0,06	<LD	<LD	18,53±4,18
17/03/2013	1437,58±18,92	-	67,78±5,78	10,21±2,31	0,79±0,02	7,27±0,3	1666,54±30,91	3663,56±216,03	3,81±0,37	1,9±0,36	1,89±0,4	65,38±6,1
19/03/2013	-	16,58±4,43	49,6±3,65	-	0,6±0,05	0,32±0,06	2622,65±47,89	6208,65±359,30	0,06±0,01	<LD	<LD	12,17±1,16

## CHAPITRE VI : Résultats et discussion

**Tableau N°13 :** Tableaux présente les concentrations en ng/m<sup>3</sup> des éléments métalliques dans les PM-10

DATE	Fe	Zn	Cr	Co	As	Sb	Na	K	Sc	La	Ce	Br
06/01/2013	279,91±3,34	-	91,64±3,12	50,19±7,75	0,75±0,01		3203,51±58,44	10245,79±349,96	0,21±0,01	1,53±0,19	<LD	159,43±9,75
08/01/2013	-	-	42,51±4,49	0,96±0,17	0,73±0,08		1339,77±164,40	-	0,04±0,01	0,39±0,04	<LD	113,19±11,9
14/01/2013	418,42±17,03	104,73±19,83	104,55±4,34	6,57±0,6	<LD		4517,94±565,68	-	<LD	0,29±0,06	<LD	85,65±10,93
18/01/2013	-	-	45,52±4,21	3,47±0,27	<LD		2251,33±280,65	-	0,05±0,01	<LD	<LD	29,2±3,6
24/01/2013	-	-	70,71±5,41	0,39±0,17	<LD		9227,15±1128,86	-	0,03±0,01	<LD	<LD	108,16±13,13
29/01/2013	829,22±85,84	49±10,28	99,12±6,53	-	1,03±0,13		2532,62±245,09	-	0,1±0,01	0,16±0,01	<LD	94,24±9,23
01/02/2013	1284,4±142,61	-	48,27±4,64	1,83±0,28	<LD		2713,66±369,1	-	0,76±0,06	0,1±0,01	1,21±0,08	32,54±3,52
03/02/2013	1081,97±152,61	-	59,86±3,69	0,92±0,5	<LD		5791,94±981,97	-	0,68±0,04	1,7±0,97	5,01±0,47	41,99±0,22
05/02/2013	2012,17±308,99	35,75±5,13	36,05±2,71	0,53±0,25	<LD		2996,85±471,91	-	0,66±0,05	0,31±0,03	0,99±0,07	37,44±0,5
09/02/2013	1607,8±294,9	53,08±7,77	57,45±3,97	0,76±0,47	0,14±0,07		2607,28±609,95	-	0,36±0,04	0,62±0,15	2,14±0,47	53,24±1,03
13/02/2013	976,25±251,78	68,25±15,47	69,23±1,47	1,9±1,16	<LD		4961,15±146,87	-	0,48±0,08	1,13±0,35	2,91±0,87	119,33±18,92
17/02/2013	2410,22±324,64	54,22±6,02	59,36±2,4	2,62±0,06	<LD		2786,37±342,95	-	0,73±0,04	0,76±0,04	2,43±0,83	50,58±4,85
19/02/2013	1627,99±238,09	87,61±6,23	63,41±5,48	12,11±4,91	<LD		3889,66±627,82	-	0,6±0,04	0,07±0,02	0,36±0,08	29,69±2,62
25/02/2013	1582,9±187,62	97,98±15,88	201,95±20,64	27,01±5,82	1,25±0,04		7904,33±147,95	-	1,13±0,12	0,35±0,08	<LD	138,19±16,06
05/03/2013	2676,57±229,29	-	162,75±4,77	15,65±3,32	0,77±0,01		2159,51±270,53	15110,56±635,16	4,89±0,44	3,72±0,55	6,27±0,85	45,82±3,27
08/03/2013	-	-	78,83±4,59	-	0,65±0,01		5194,93±869,03	8791,99±527,16	0,37±0,04	0,56±0,12	<LD	61,65±5,42
10/03/2013	-	30,79±12,16	106,53±6,65	-	0,72±0,03		2561,46±373,53	11005,8±1082,56	2,7±0,71	0,52±0,1	<LD	53,56±4,27
15/03/2013	-	-	130,31±7,76	-	0,46±0,013		2177,45±443,68	14016,18±742,57	0,28±0,06	0,62±0,13	<LD	94,37±8,44
17/03/2013	-	-	116,85±13,56	10,21±2,31	1,15±0,13		1666,54±309,13	4848,83±92,48	4,36±0,16	1,9±0,36	1,89±0,4	81,19±4,64
19/03/2013	1705,79±66,17	16,58±4,43	74,65±2,71	0,05±0,04	0,66±0,02		2816,57±44,25	6208,65±359,30	0,13±0,01	0,03±0,01	0,22±0,05	12,17±1,16

**Tableau N°14 :** Tableaux représentant les concentrations moyennes des éléments métalliques dans les PM-2,5.

Elément	Maximum (ng/m <sup>3</sup> )	Minimum(ng/m <sup>3</sup> )	Moyenne (ng/m <sup>3</sup> )	Ecart type (ng/m <sup>3</sup> )
Fe	1437,58±189,27	279,91±73,81	614,02 ±28,33	327,96
Zn	33,98±3,099	16,58±4,43	28,41±4,356	6,8
Cr	105,44±12,22	12,87±1,61	41,21 ±13,28	24,58
Co	10,21±2,31	0,06±0,09	2,58 ±1,23	3,4
As	0,79±0,02	0,14±0,07	0,46 ±0,05	0,2
Sb	7,27±0,3	0,02±0,01	0,86 ±0,19	1,63
Na	2622,65±478,89	74,04±23,34	975,84 ±42,71	643,56
K	8791,99±527,163	1745,87±120,62	4448,02 ±28,01	2422,01
Sc	3,81±0,37	0,03±0,01	0,51 ±0,11	1
La	1,9±0,36	0,03±0,02	0,455±0,17	0,52
Ce	2,94±0,20	0,28±0,02	0,53±0,21	0,94
Br	65,38±0,3	4,68±1,1	17,31 ±4,6	15,53

**Tableau N°15 :** Tableaux représentant les concentrations moyennes des éléments métalliques dans les PM-10

Elément	Maximum (ng/m <sup>3</sup> )	Minimum(ng/m <sup>3</sup> )	Moyenne (ng/m <sup>3</sup> )	Ecart type (ng/m <sup>3</sup> )
Fe	2676,57±229,29	279,91±3,34	1422,58 ±188,93	711,71
Zn	104,73±19,83	16,58±4,43	59,80±10,32	29,44
Cr	201,95±20,64	36,05±2,71 1	85,98±5,81	42,35
Co	50,19±7,75	0,05±0,04	8,44 ±1,75	13,35
As	1,25±0,04	0,14±0,07	0,76±0,049	0,31
Sb	11,25±0,33	0,34±0,01	3,91 ±0,48	3,23
Na	9227,15±11288,68	1339,77±1644,05	3665,00 ±1612,77	2062
K	15110,56±6351,62	4848,83±924,82	10032,54 ±5413,15	3778,9
Sc	4,89±0,44	0,03±0,01	0,98±0,10	1,42
La	3,72±0,55	0,03±0,01	0,82±0,18	0,91
Ce	6,27±0,85	0,22±0,05	2,343±0,37	1,96
Br	159,43±9,75	12,17±1,16	72,08 ±6,67	40,6

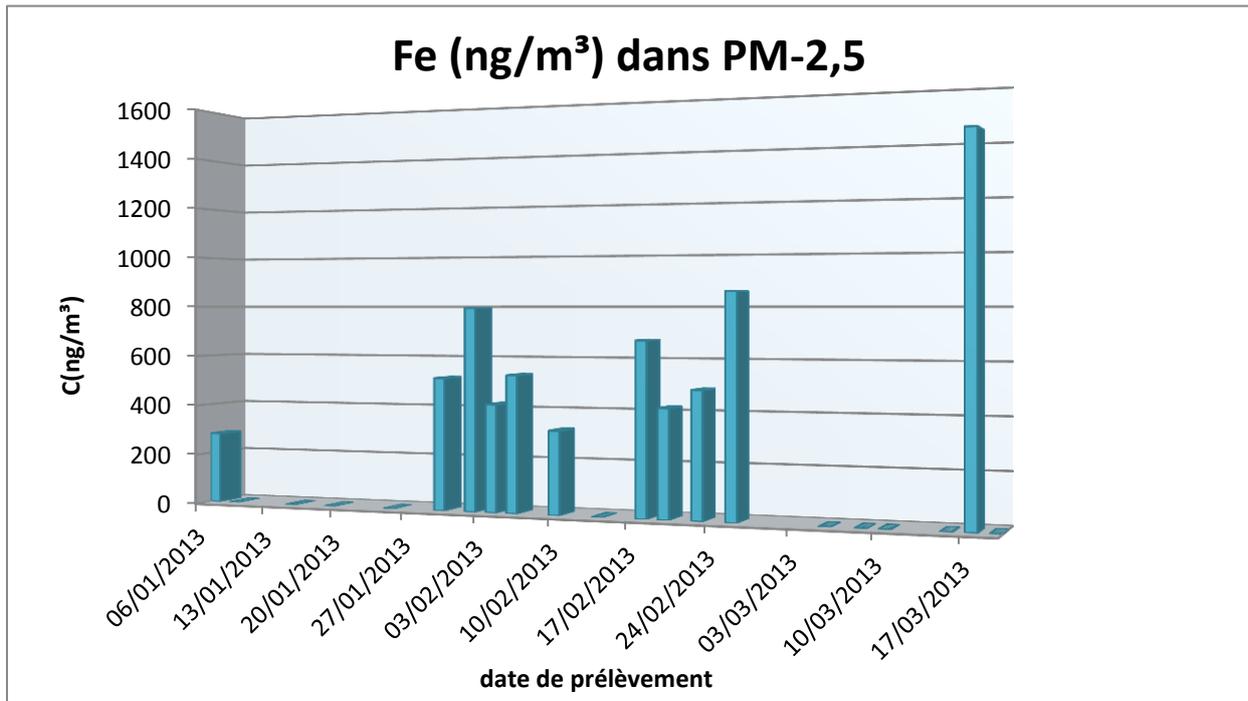


Figure N°23 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Fer dans les PM-2,5.

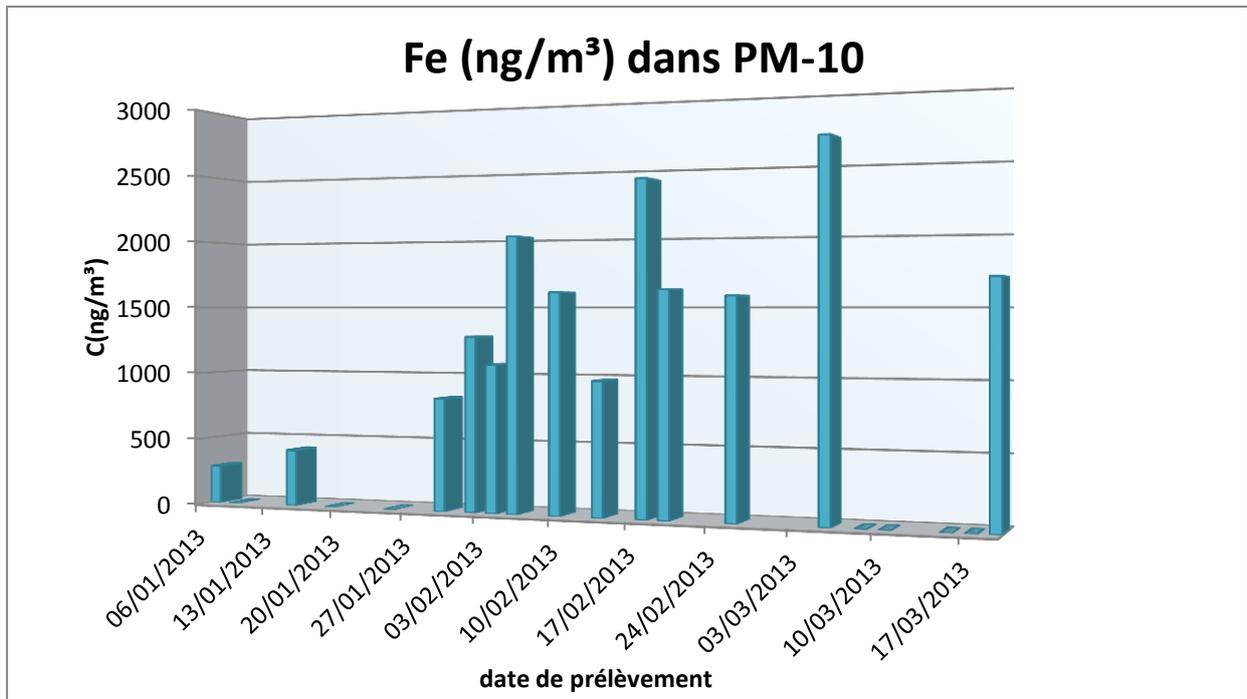
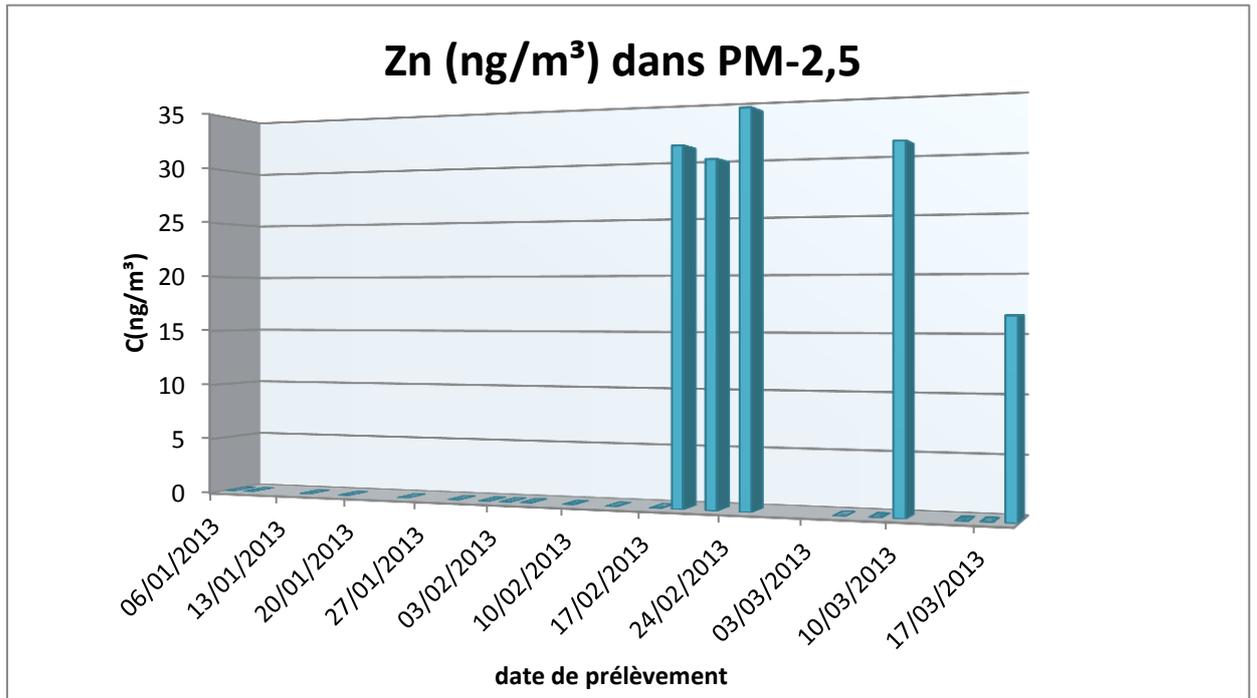
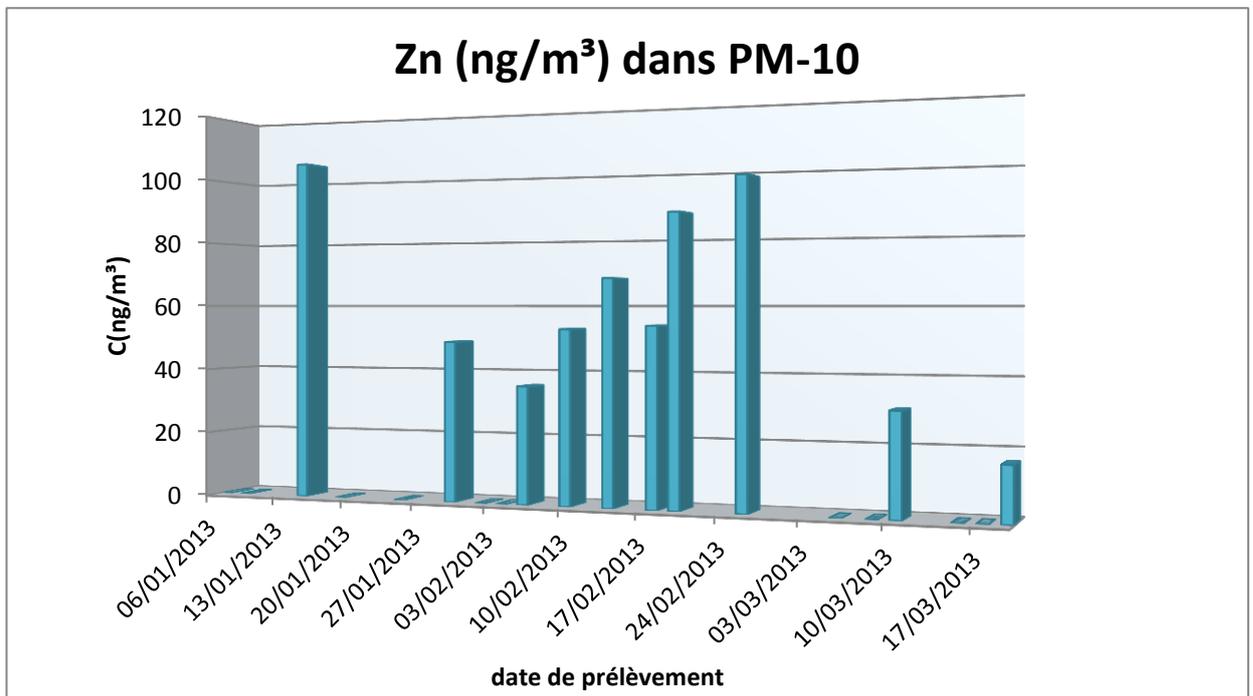


Figure N°24 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Fer dans les PM-10.



**Figure N°25 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Zinc dans les PM-2,5.



**Figure 26 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Zinc dans les PM-2,5.

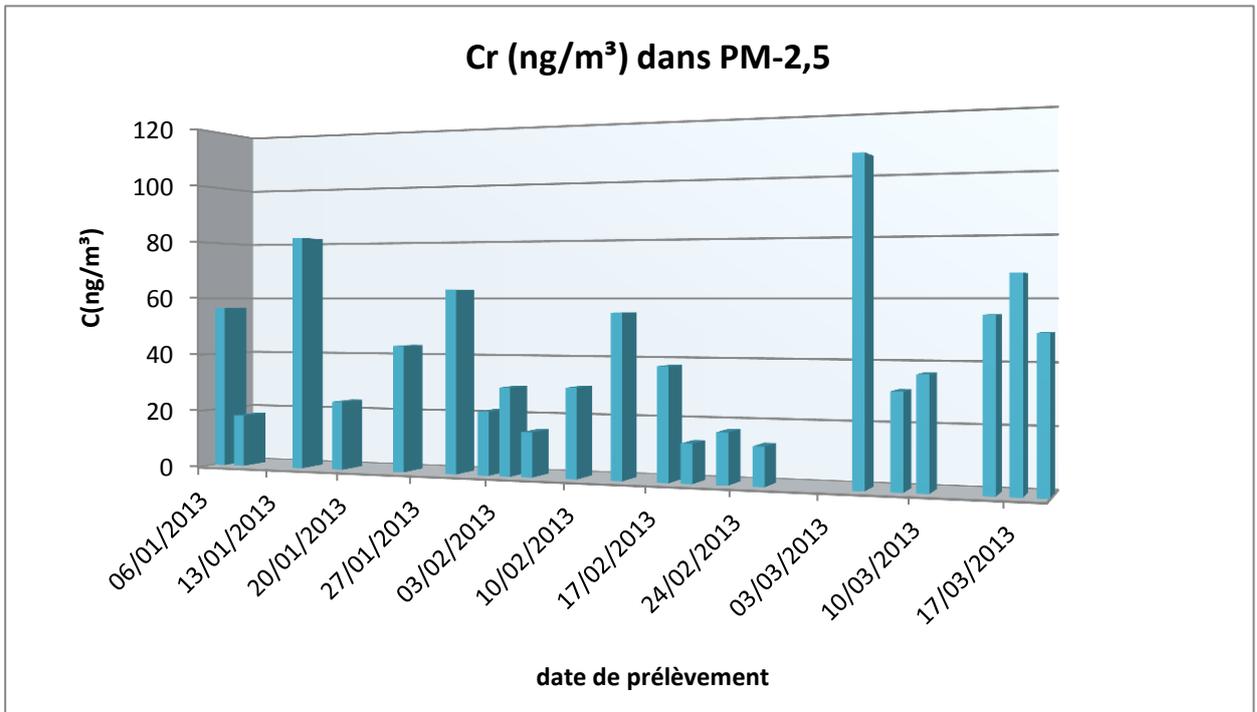


Figure N°27: Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Chrome dans les PM-2,5.

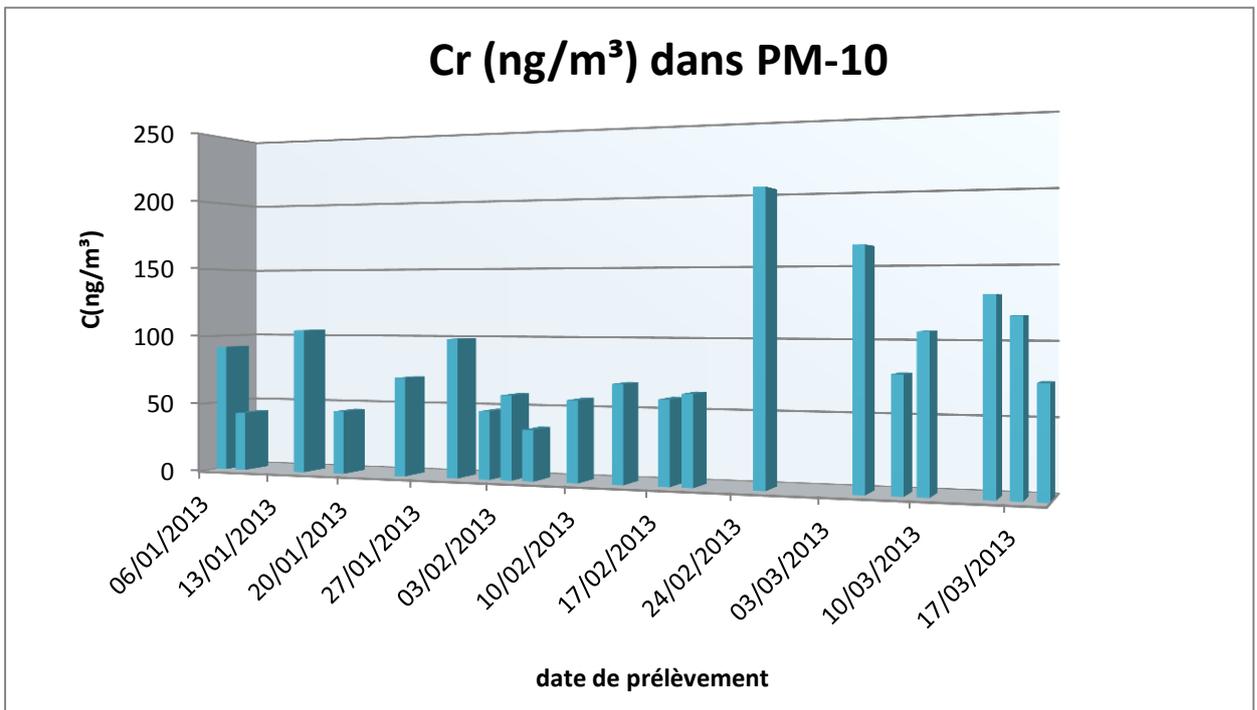


Figure N°28 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Chrome dans les PM-10.

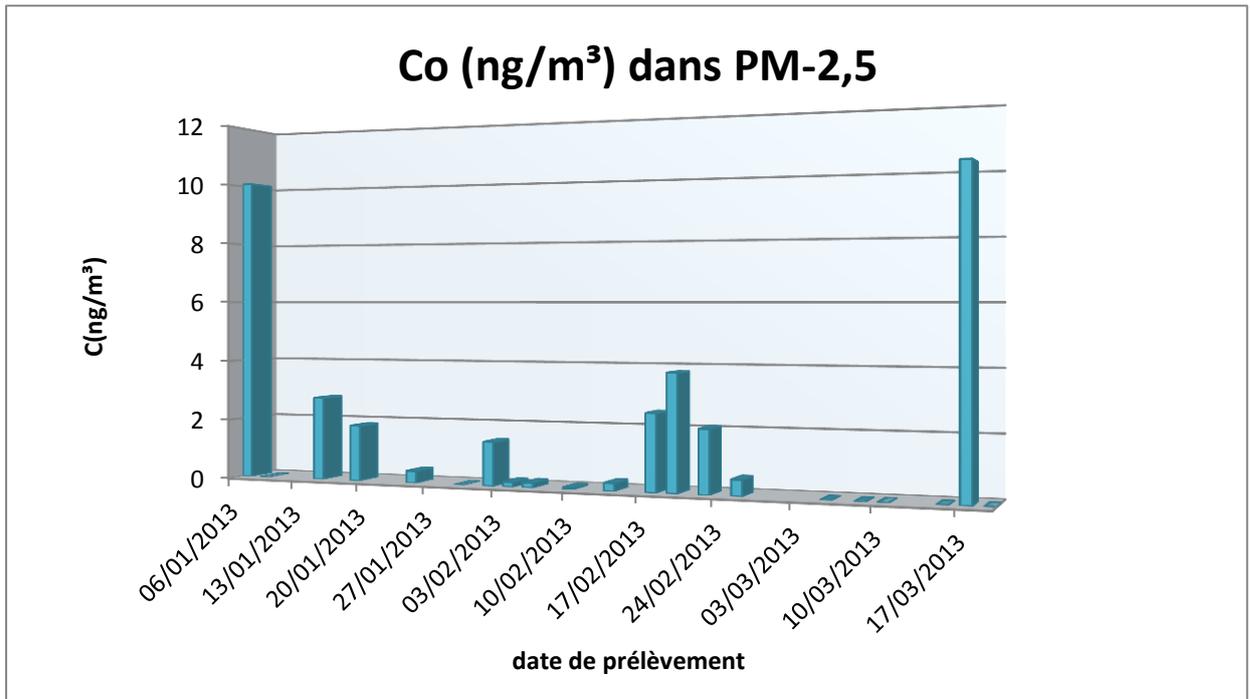


Figure N°29 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cobalt dans les PM-2,5.

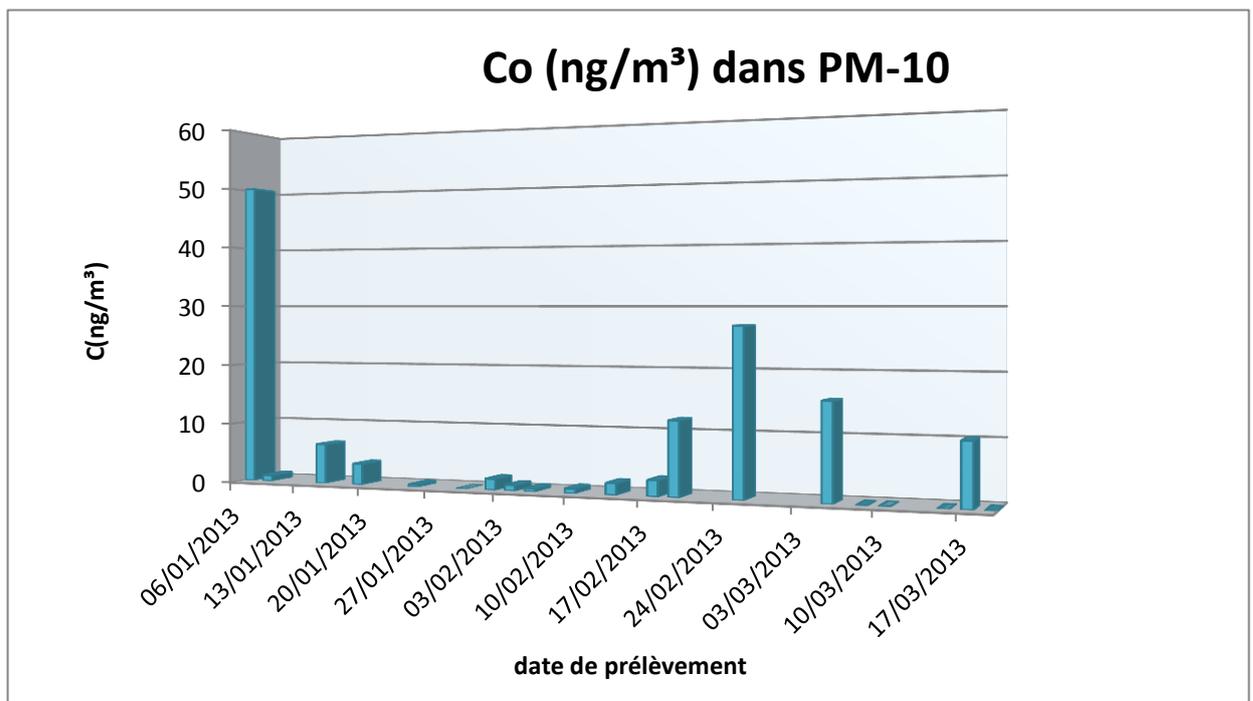


Figure N°30 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cobalt dans les PM-10.

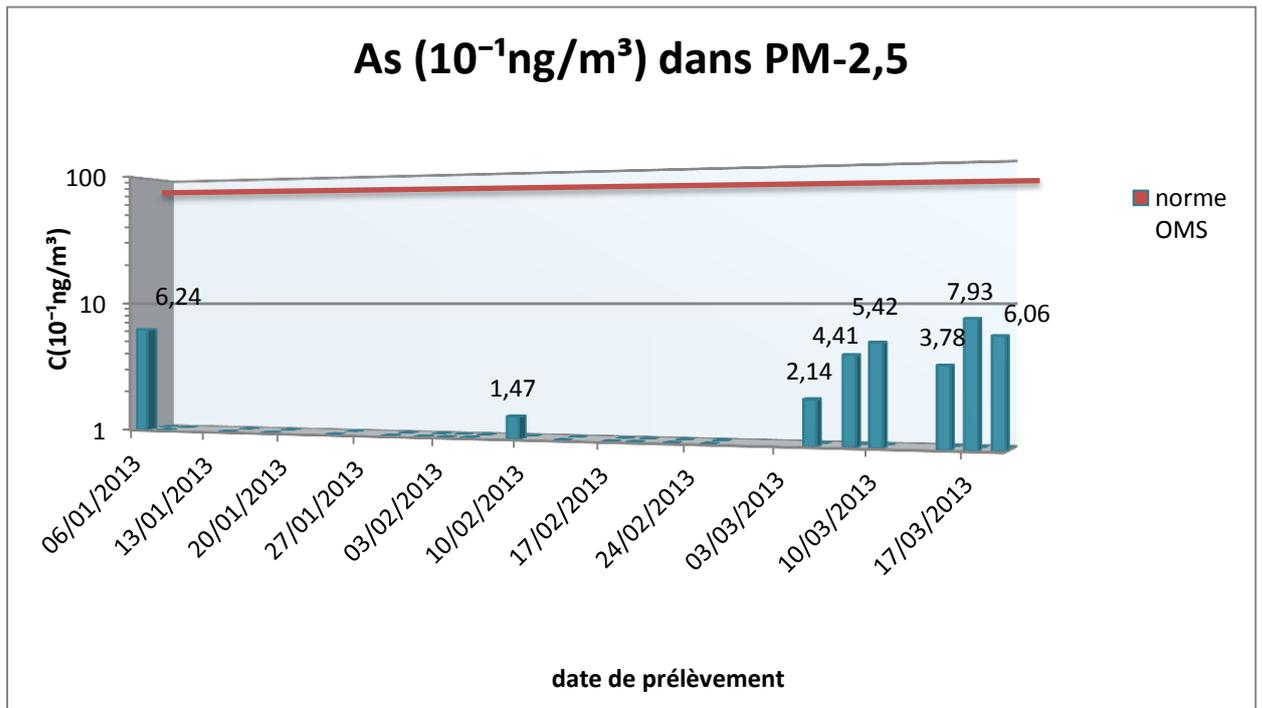


Figure N°31 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Arsenic dans les PM-2,5.

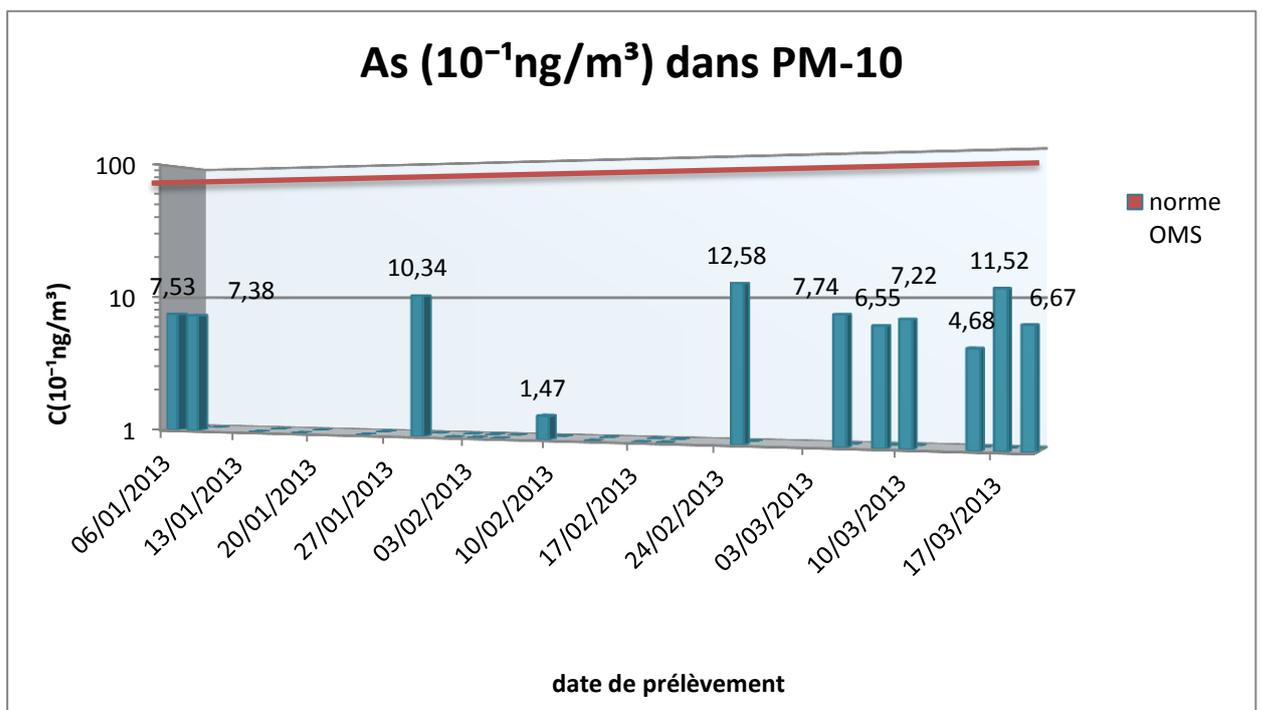
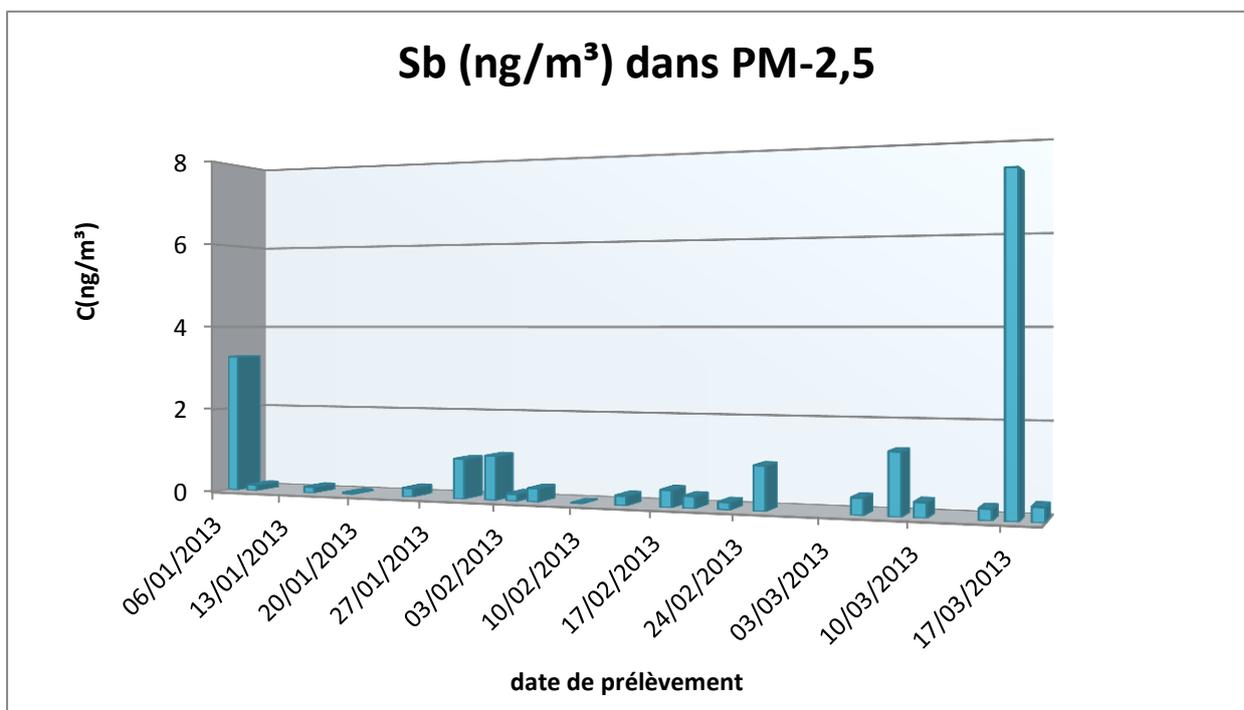
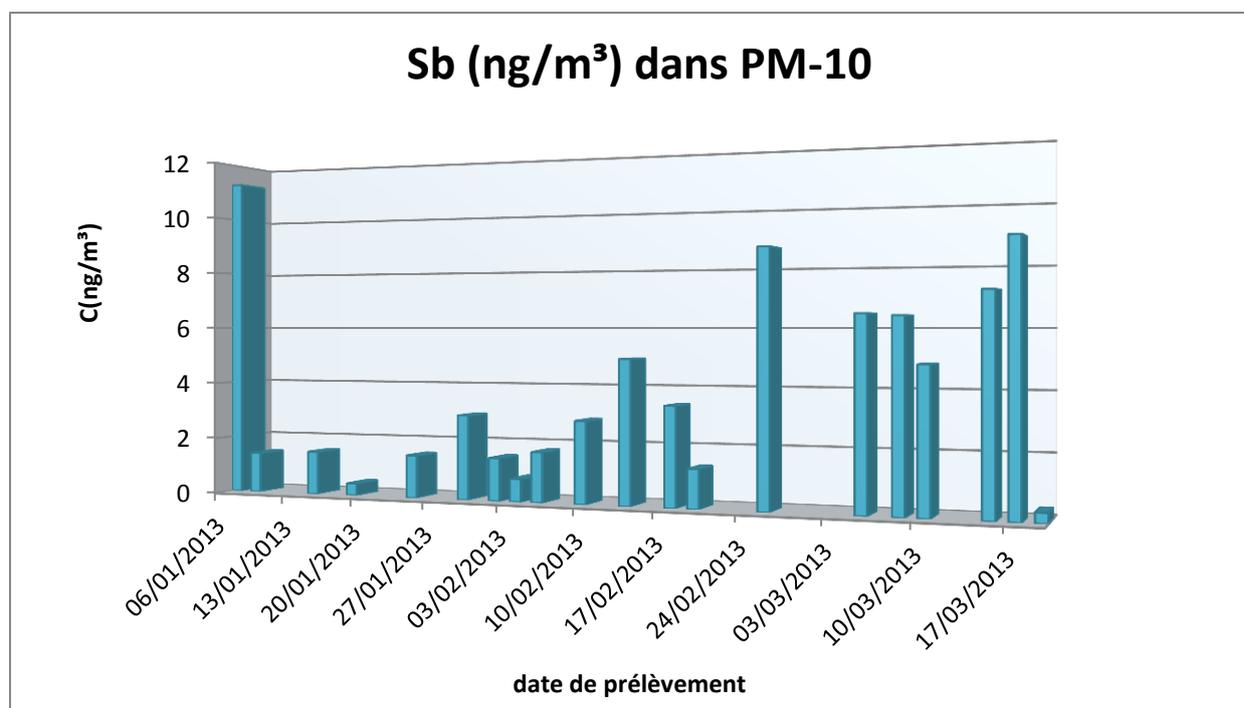


Figure N° 32 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Arsenic dans les PM-10.



**Figure N°33** : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Antimoine dans les PM-2,5.



**Figure N°34** : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes d'Antimoine dans les PM-10.

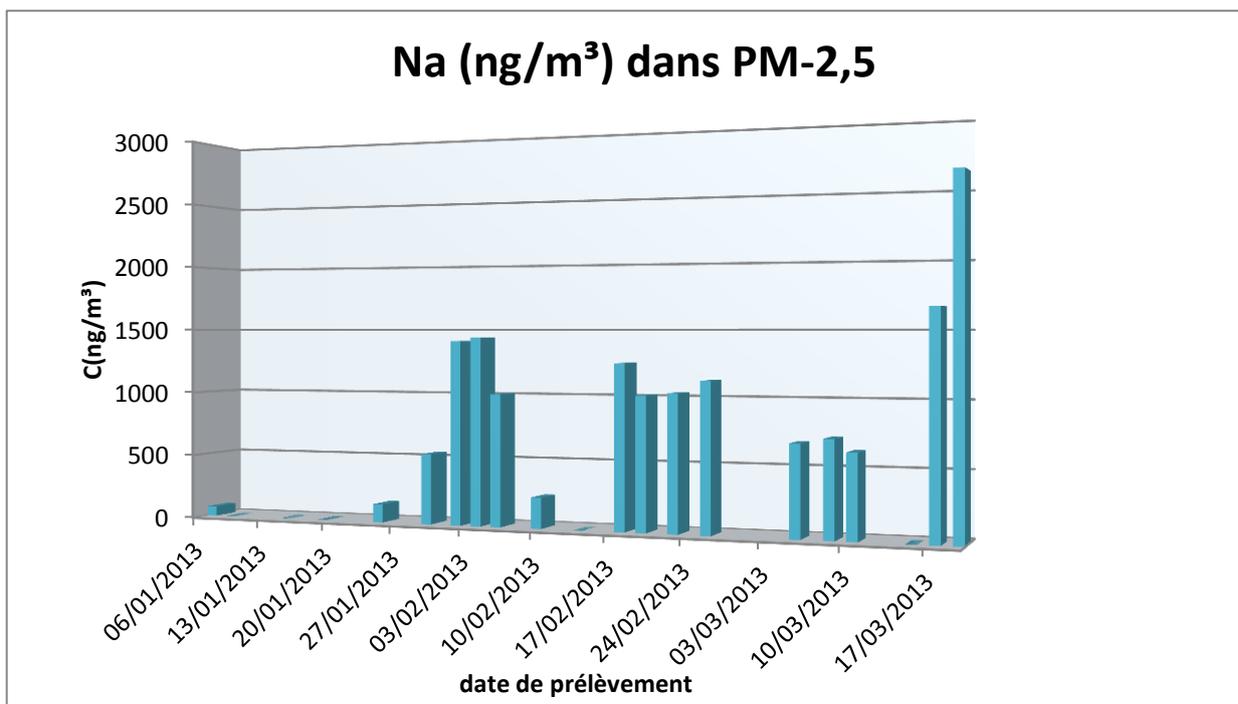


Figure N°35 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Sodium dans les PM-2,5.

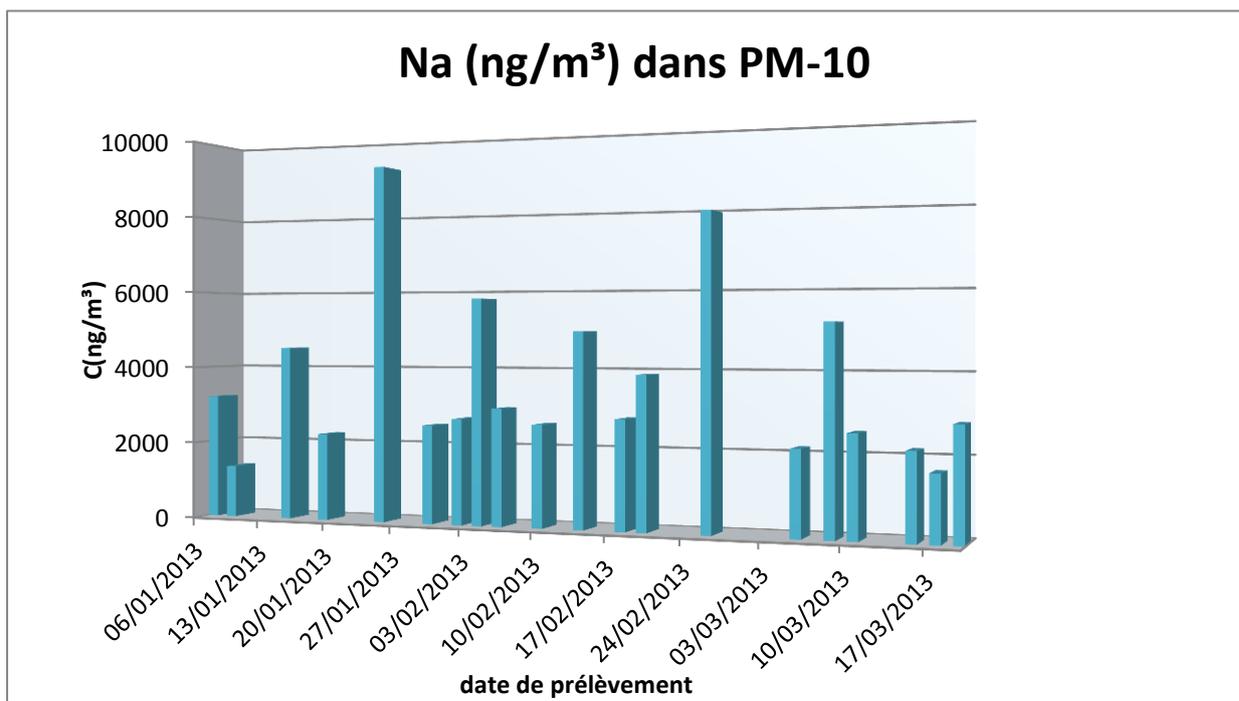
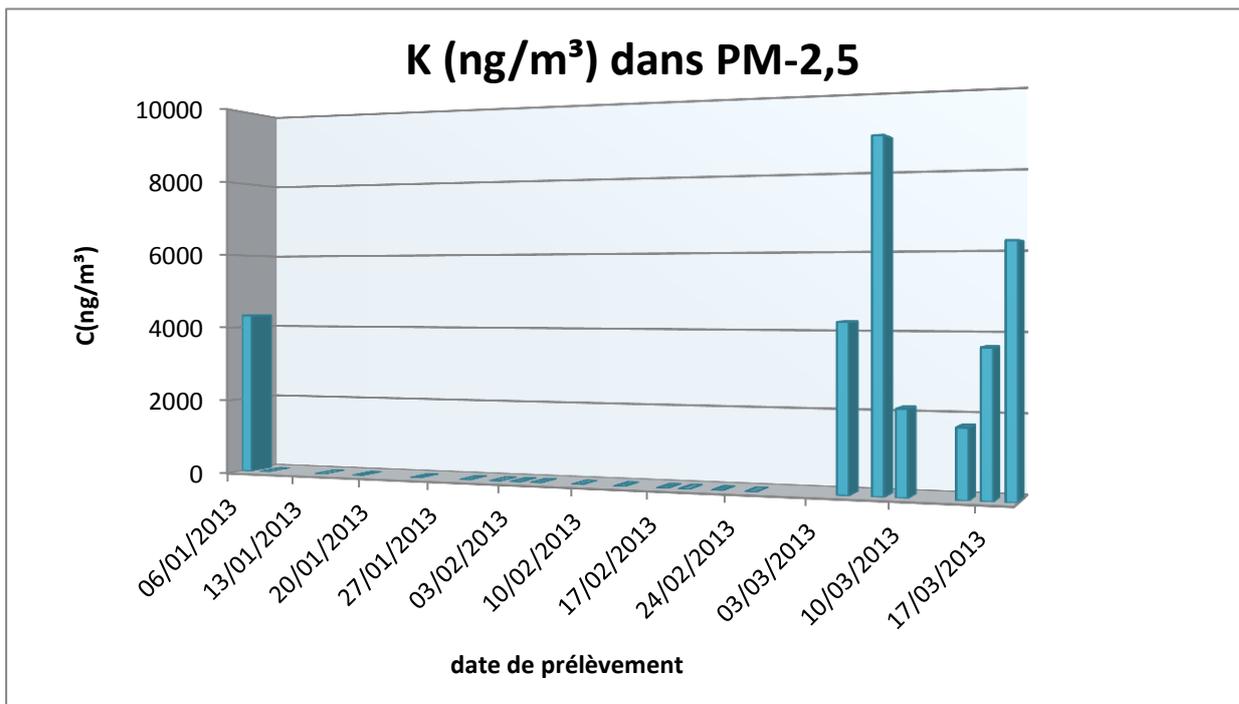
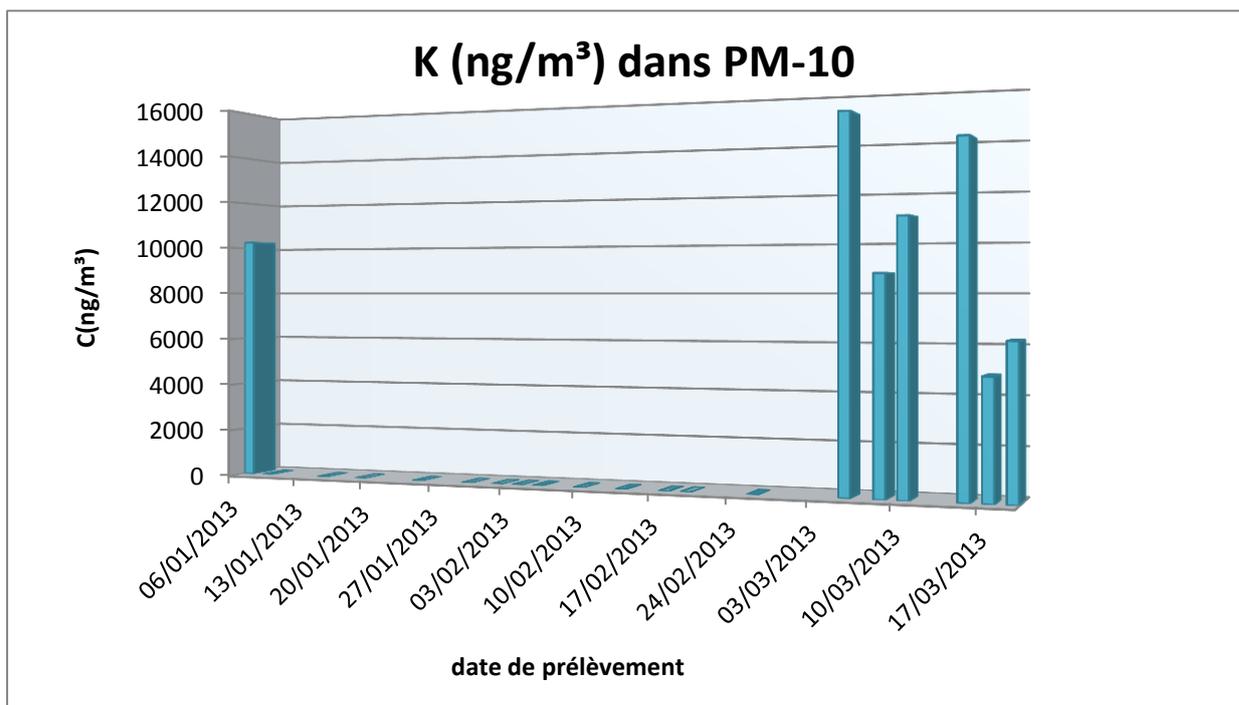


Figure N°36 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Sodium dans les PM-10.



**Figure N°37 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Potassium dans les PM-2,5.



**Figure N°38 :** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Potassium dans les PM-10.

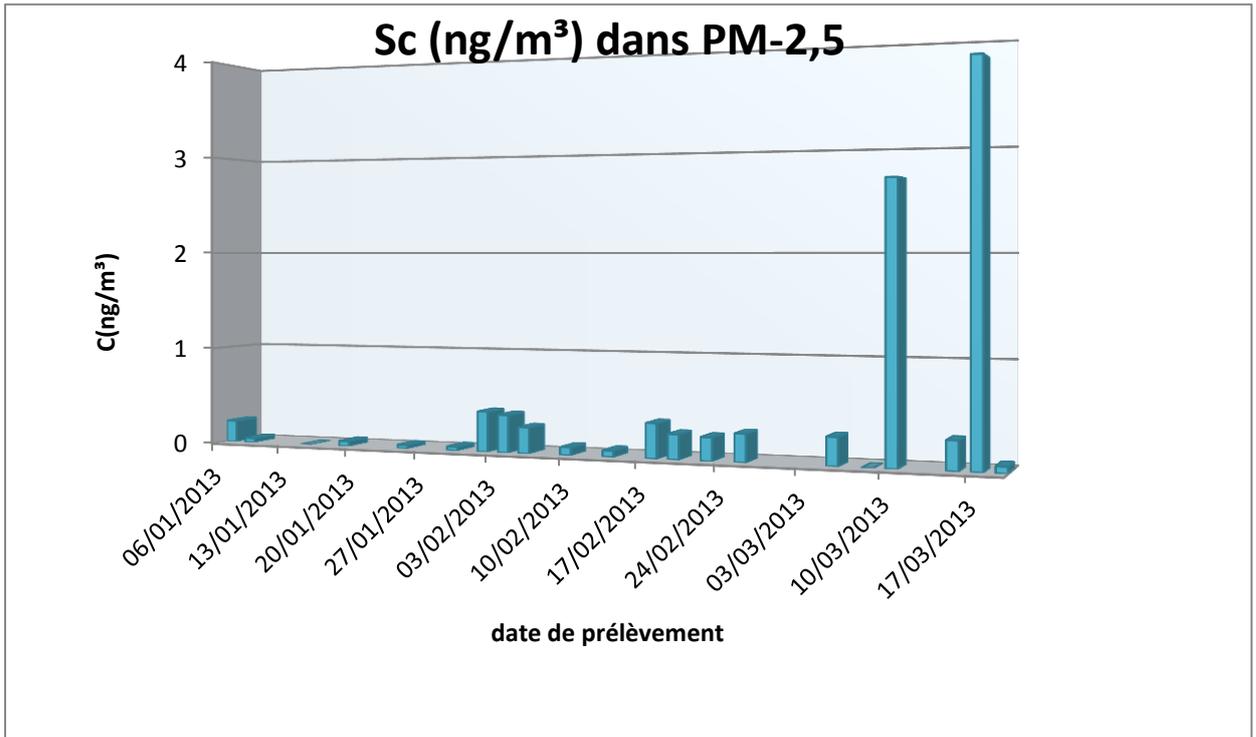


Figure N°39 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Scandium dans les PM-2,5.

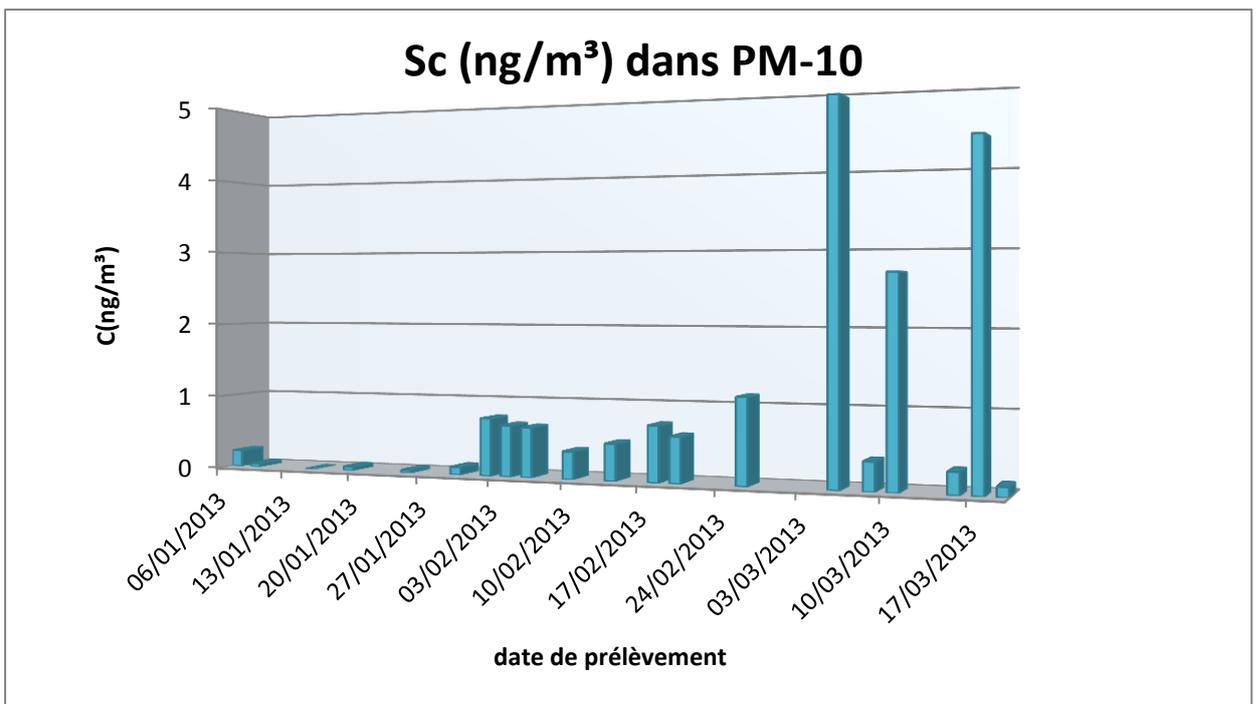
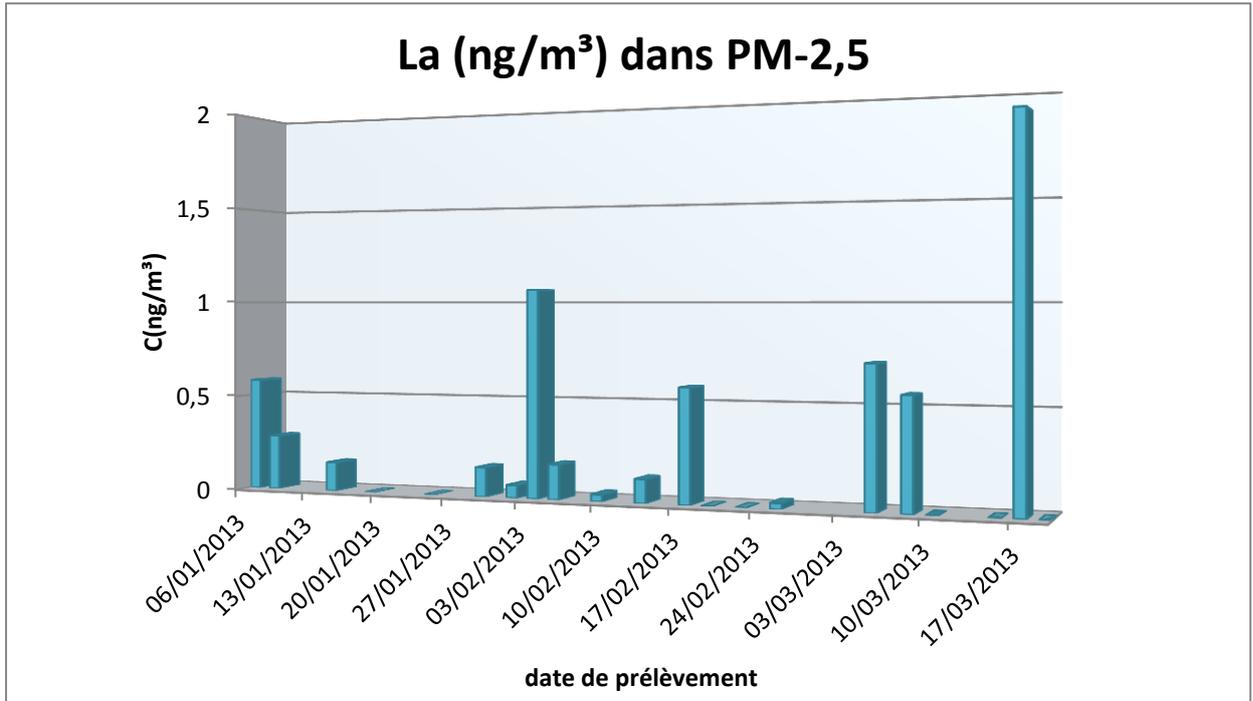
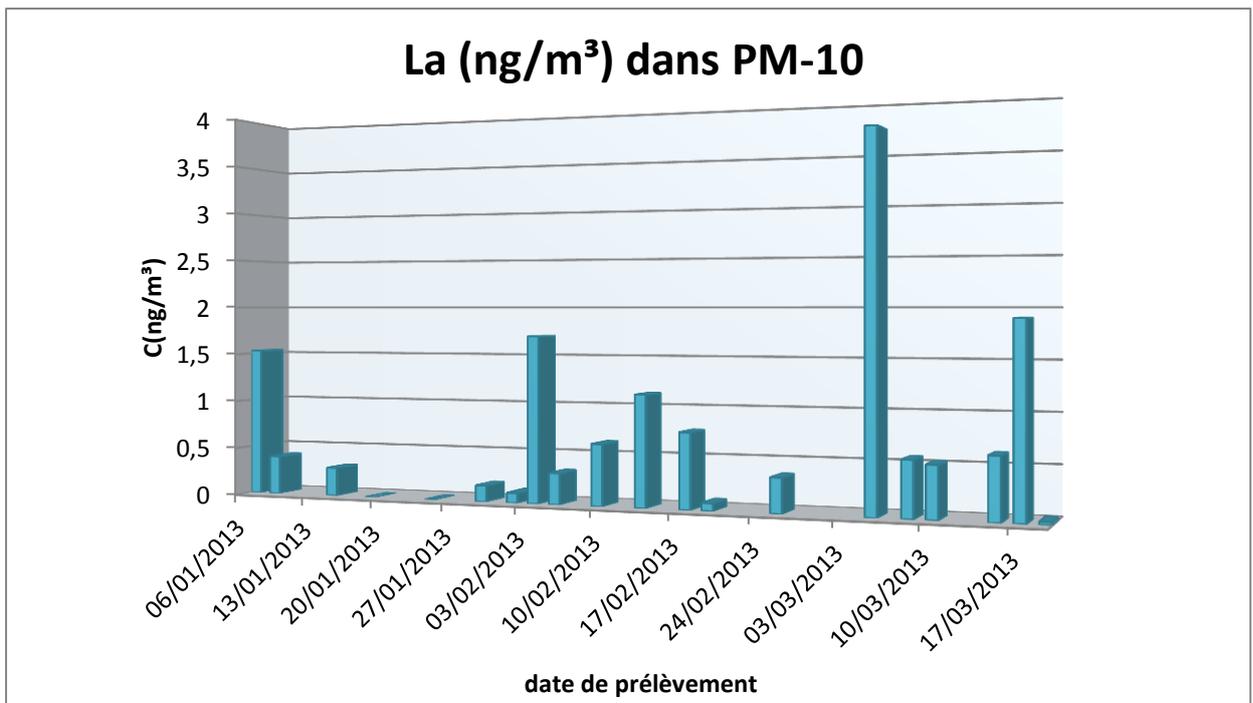


Figure N° 40 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Scandium dans les PM-10.



**Figure 41:** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Lanthane dans les PM-2,5.



**Figure N°42:** Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Lanthane dans les PM-10.

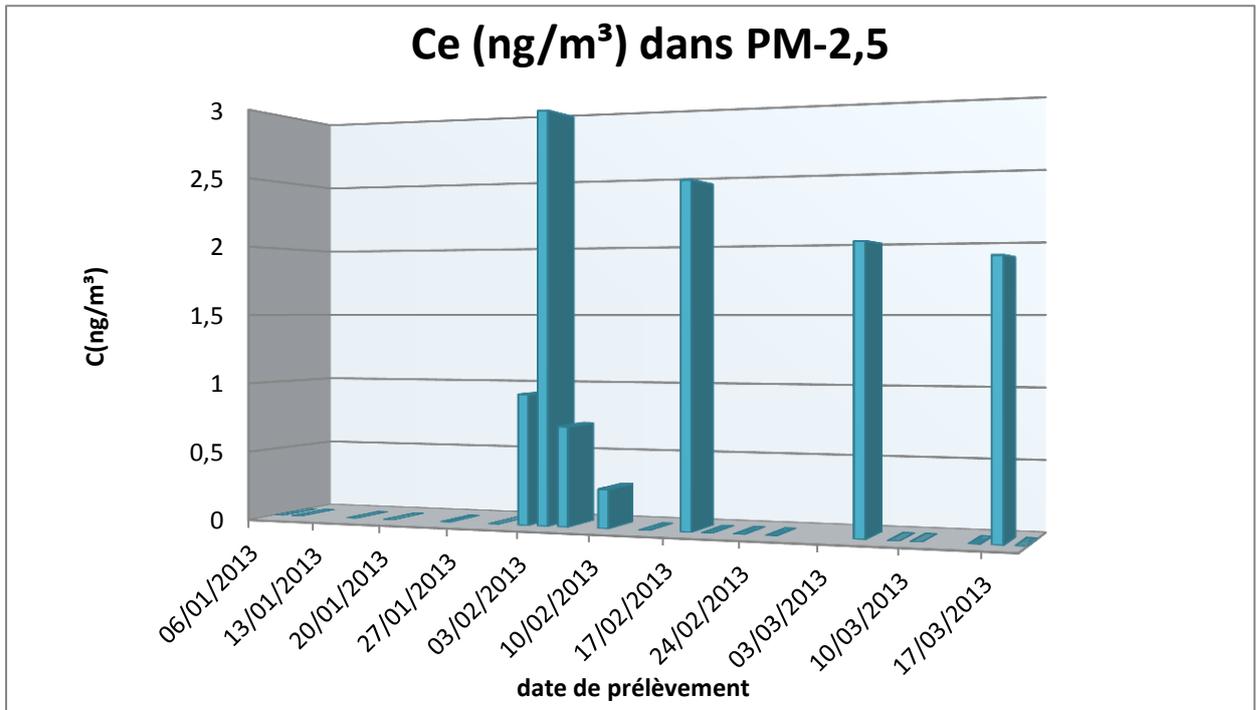


Figure N°43: Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cérium dans les PM-2,5.

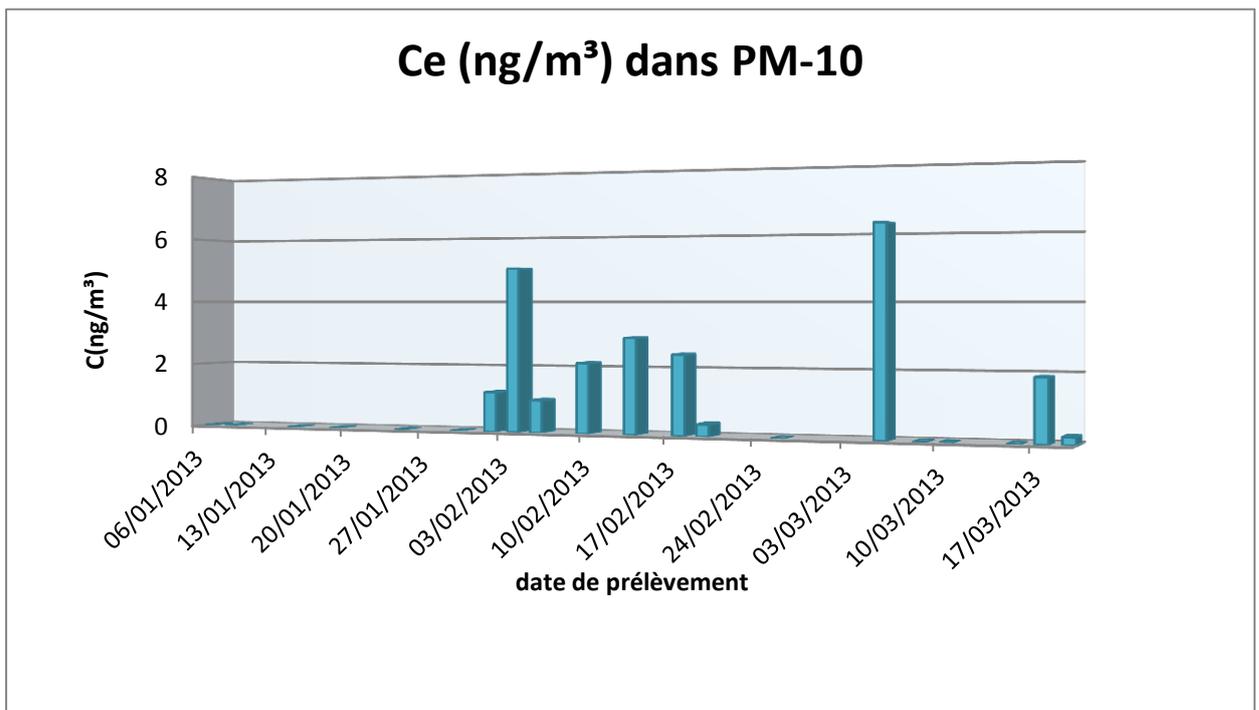


Figure N°44 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Cérium dans les PM-10.

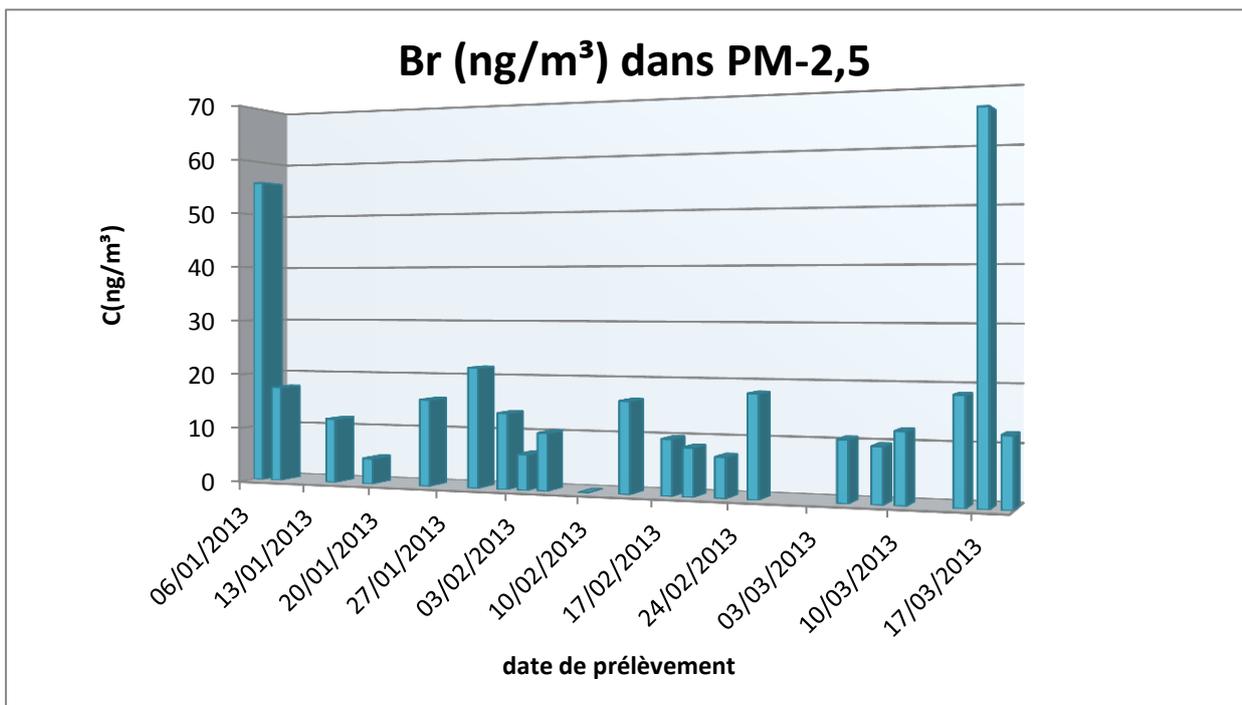


Figure N°45 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du Brome dans les PM-2,5.

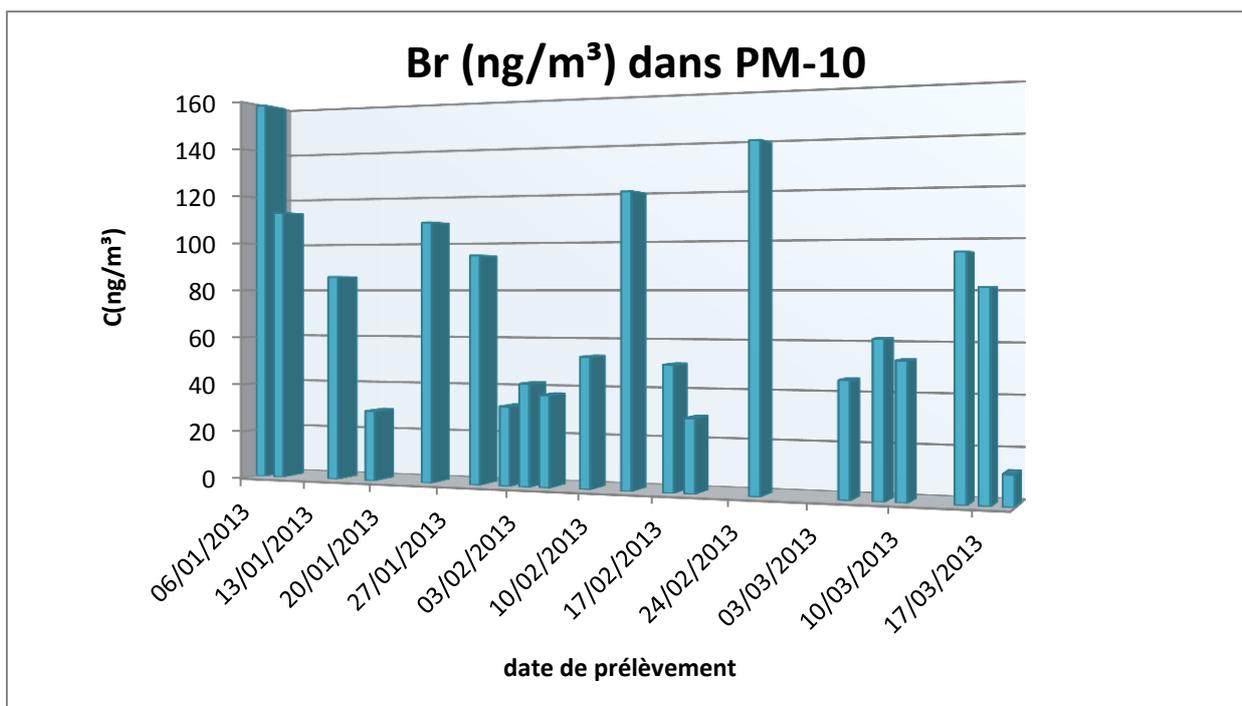


Figure N°46 : Evolution des teneurs moyennes quotidiennes du brome dans les PM-10.

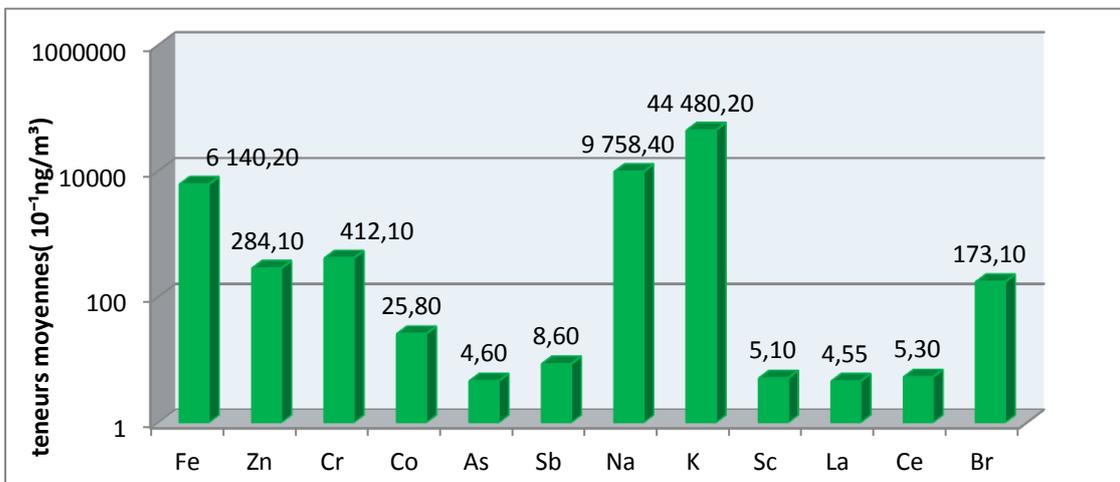


Figure N°47 : distribution des teneurs moyennes des métaux dans les PM-2,5.

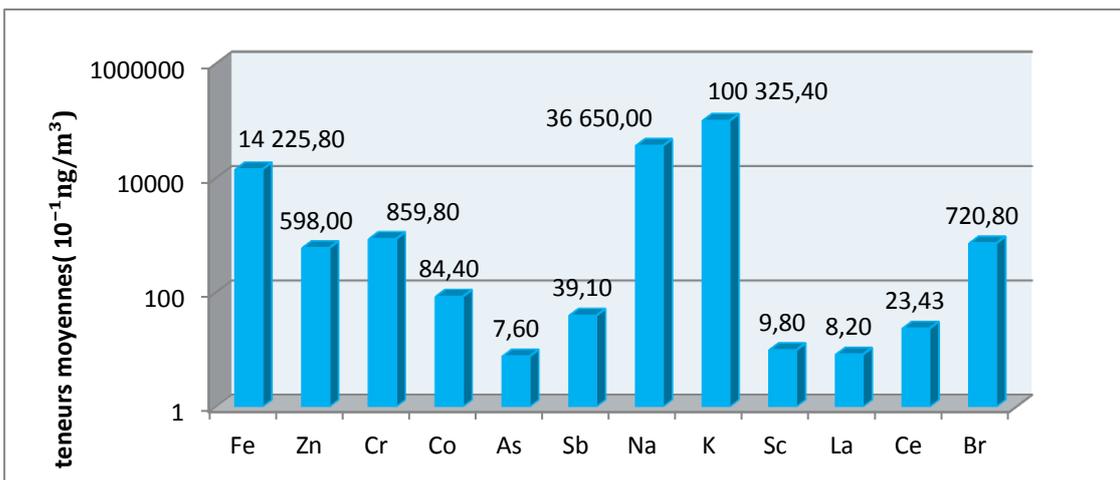


Figure N°48 : distribution des teneurs moyennes des métaux dans les PM-10.

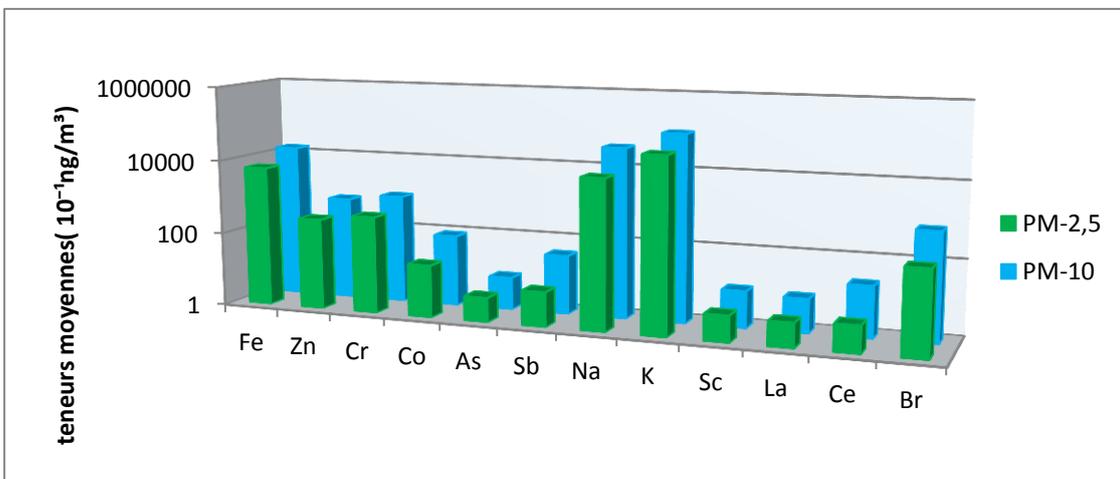


Figure N°49 : Comparaison entre les teneurs moyennes des métaux dans les PM-2,5 et PM-10.

Le tableau N°16 montre la distribution des métaux dans les différentes classes granulométriques.

- **Discussion :**

Parmi les éléments analysés, le potassium et le sodium avec des teneurs moyennes de 10032,54 ng/m<sup>3</sup> et 3665 ng/m<sup>3</sup>, sont les plus abondants dans les PM-10. Ils représentent environ 32,4% et 11,8% respectivement des PM-10, 70% et 15% des PM-2,5. Cette présence est due d'une part à la proximité du site étudié de la mer et d'autre part par la présence de ces composés dans le sol naturel. Le potassium est plus enrichi dans le sol que le sodium ce qui se répercute sur ces teneurs atmosphériques qui sont très élevées. Ces deux éléments sont très solubles et vont être très rapidement lessivés par les pluies.

Les résultats montrent également la forte présence du fer dans les particules. La teneur moyenne enregistrée dans les PM-10 est de 1422,58 ng/m<sup>3</sup> correspondant à une fraction massique d'environ 4,6%. Ce résultat était attendu du fait de son abondance dans la croûte terrestre.

Les concentrations en chrome présente des variations assez importantes avec des teneurs moyennes de 412,1 ng/m<sup>3</sup> en PM-10 et de 859,8 ng/m<sup>3</sup> en PM-2,5.

Le brome est un élément de trace très volatil qui est un bon indicateur de la pollution automobile. En effet les sels de brome sont ajoutés au mélange antidétonant dans les carburants et on le retrouve surtout dans l'atmosphère urbaine où le trafic routier est dense. La teneur moyenne en brome s'élève à 17,31 ng/m<sup>3</sup> dans les PM-2,5 et à 72,08 ng/m<sup>3</sup> dans les PM-10.

Les concentrations du Zinc varient entre 16,58 ng/m<sup>3</sup> et 33,98 ng/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 28,41 ng/m<sup>3</sup> dans les PM-2,5 et entre 16,58 ng/m<sup>3</sup> et 104,73 ng/m<sup>3</sup> dont la moyenne est de 59,8 ng/m<sup>3</sup>. L'impact sur la santé humaine de la pollution de l'air par le Zinc est difficile à déterminer à cause de l'absence de normes en vigueur pour protéger la santé humaine. C'est un élément indispensable au corps humain mais il est toxique à des doses très élevées.

Le cobalt est détecté aussi bien dans les PM-10 que dans les PM-2,5 il varie de 0,05 ng/m<sup>3</sup> à 0,79 ng/m<sup>3</sup> dans les PM-2,5 et de 0,06 ng/m<sup>3</sup> à 0,79 ng/m<sup>3</sup> dans les PM-10. La présence du Cobalt dans l'air peut être liée directement aux émissions du trafic routier, mais il peut également provenir du sol. En terme de toxicité, il n'existe pas une valeur toxicologique de référence pour le cobalt élémentaire mais elle existe pour ses dérivés organiques et inorganiques.

L'Arsenic étant un élément très toxique dont la présence était improbable, est effectivement présent mais en très faibles concentrations. Les teneurs enregistrées sont en

effet largement inférieure à la norme fixée par l'UE ( $6 \text{ ng/m}^3$ ). De ce fait, il ne devrait pas présenter d'inquiétude particulière.

Les éléments tel que : Le Cérium et le lanthane sont des composés purement terrigène à l'état de trace.

Le scandium est beaucoup plus abondant dans le soleil et certaines étoiles terrestres et est relativement rare sur la terre, ceci est bien en coordination avec les résultats obtenus qui nous donne une teneur moyenne de  $5,4 \text{ ng/m}^3$  en PM-2,5 et  $10,98 \text{ ng/m}^3$  en PM-10. Le scandium n'est pratiquement pas émis par les activités humaines et peut être donc considéré comme référence pour la pollution naturelle éolienne.

Globalement à part le fer la pollution par les métaux lourds véhiculés par les PM-10 est caractéristique d'un milieu urbain où la pollution industrielle n'est pas importante.

### 3.2. Corrélation :

Afin d'avoir une idée sur les sources respectives des métaux considérés il est judicieux d'étudier les corrélations possibles. Les figures N°50 à N° 55 représentent les corrélations obtenues entre les teneurs de certains couples de métaux et les PM-i:

- Le Fer dans les PM-2,5 et les PM-2,5 (figure N°50)
- Le Fer dans les PM (2,5-10) et les PM (2,5-10) (figure N°51)
- Le Chrome dans les PM-2,5 et les PM-2,5 (figure N°52)
- Le Chrome dans les PM (2,5-10) et les PM (2,5-10) (figure N°53)
- Le Brome dans les PM-2,5 avec les PM-2,5 (figure N°54)
- Le Brome dans les PM (2,5-10) et les PM (2,5-10) (figure N°55)

Nous représentons aussi les corrélations entre certains couples de métaux en figures N°56 à N°59:

- Le Brome et le Chrome dans les PM-10 (figure N°56)
- Le Brome et le Fer dans PM-10 (figure N°57)
- Le potassium et le sodium dans les PM-10 (figure N°58)
- Le Fer et le brome dans les PM-2,5 (figure N°59)

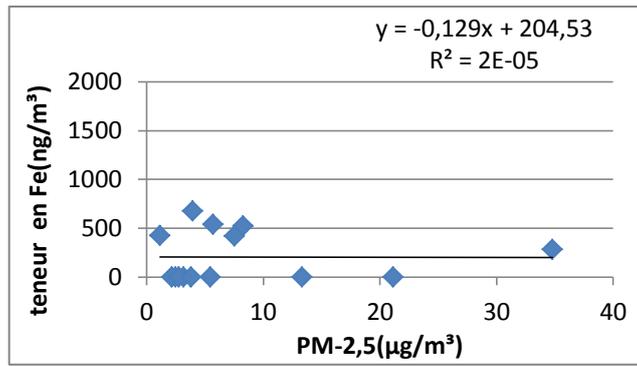


Figure N°50 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/PM-2,5

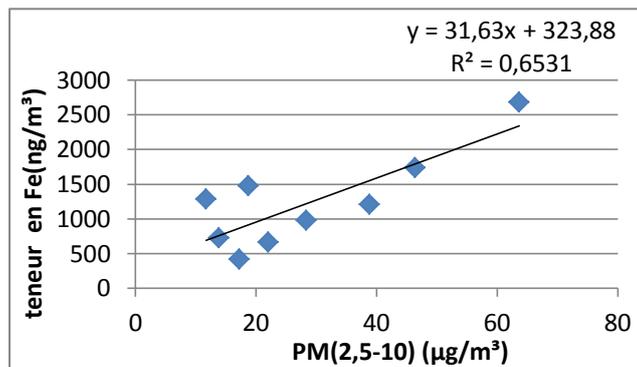


Figure N°51: Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe/PM (2,5-10)

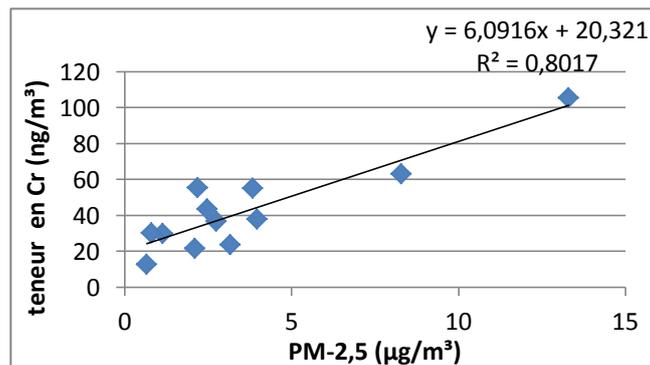


Figure N°52: Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Cr/PM-2,5

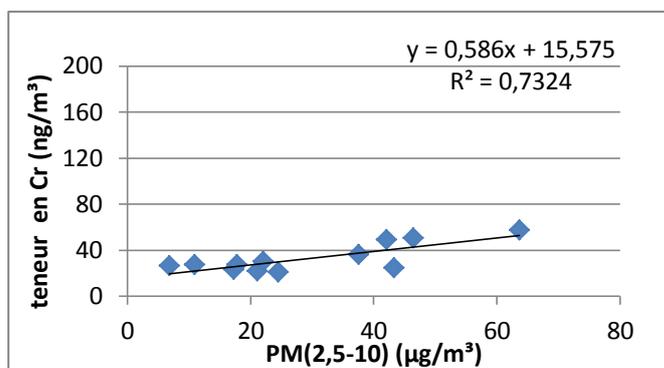


Figure N°53: Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Cr/PM (2,5-10)

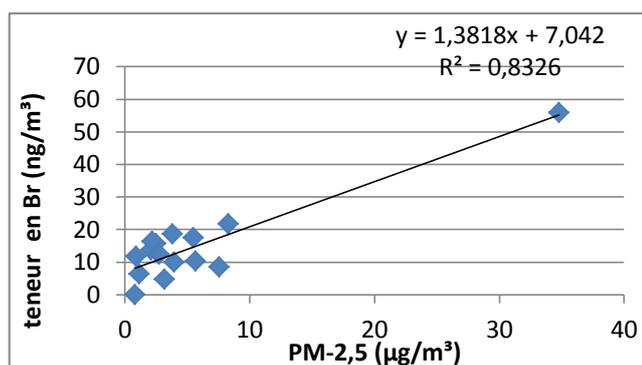


Figure N°54 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br/PM-2,5

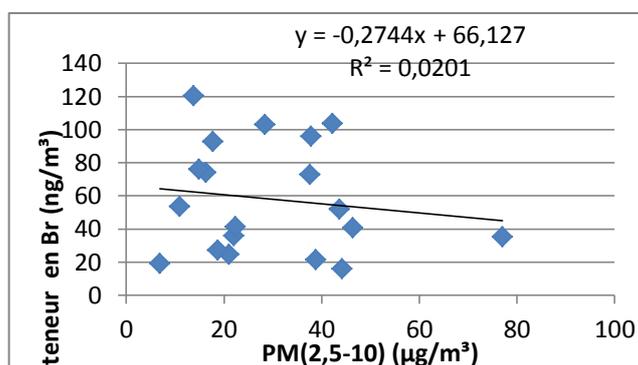


Figure N°55 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br/PM (2,5-10)

En tenant compte du fait que les particules corse sont d'origine naturelle et les fines d'origine anthropique, Ces résultats montrent que Le fer présente une bonne corrélation linéaire avec les corse PM (2,5-10) ( $R^2=0,65$ ). Il ne donne aucune corrélation avec les particules fines. Ce résultat suggère ainsi que le fer est issue beaucoup plus des particules de la croute terrestre que du trafic routier.

Dans le cas du Chrome on constate qu'il y a une assez bonne corrélation avec les deux fractions granulométriques. Cet élément provient probablement aussi bien de la croûte terrestre que des activités humaines.

Le Brome évolue en relation directe avec les PM-2,5 et ne présente aucune corrélation avec les corses ce résultat confirme que le brome provient essentiellement du trafic routier.

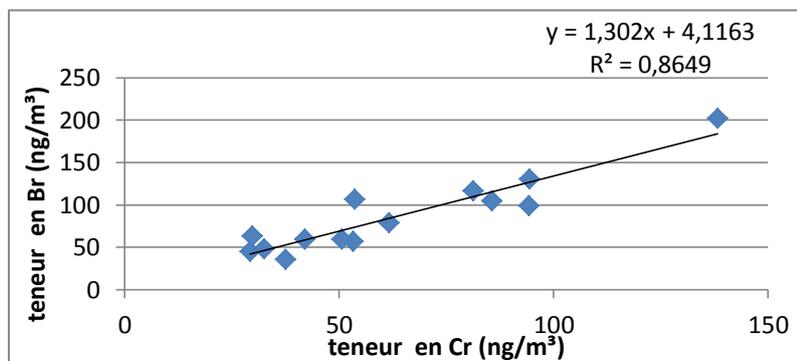


Figure N°56 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Br (PM-10)/Cr (PM-10)

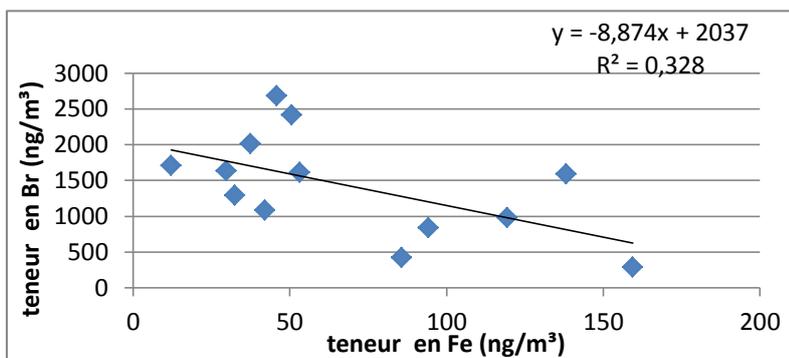


Figure N°57 : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe (PM-10)/Br (PM-10)

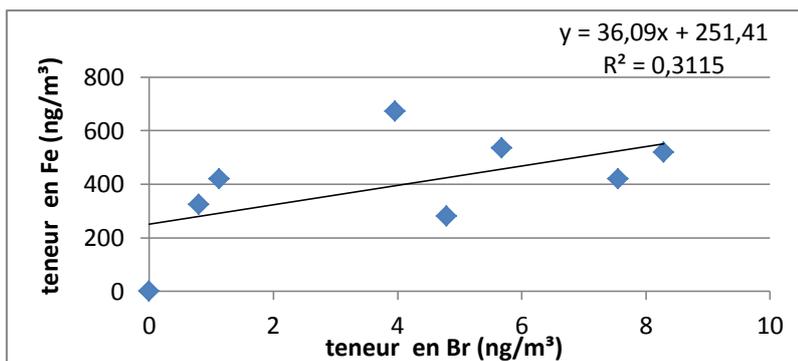
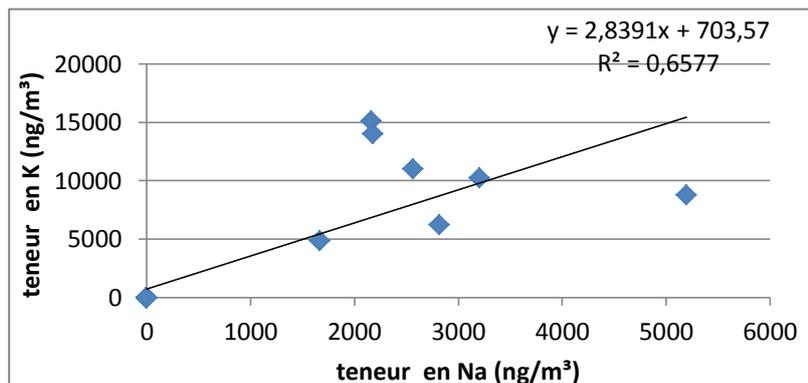


Figure N°58: Corrélation linéaire entre les teneurs du couple Fe (PM-2,5)/Br (PM-2,5)



**Figure N°59** : Corrélation linéaire entre les teneurs du couple K (PM-10)/Na (PM-10)

A partir de ces figures nous remarquons :

Dans les PM-10 les corrélations les plus élevées et donc les plus significatives sont observées entre le chrome et le brome. Les deux éléments étant issus du trafic routier (un peu moindre concernant le chrome) ils se forment et ils évoluent de la même manière.

Avec le Fer, le Brome ne donne pas de corrélation.

Dans le cas des alcalins on observe que les deux éléments potassium et sodium sont linéairement dépendant ce qui confirme leurs sources communes (aérosols marin et croute terrestre).

# CONCLUSION

### CONCLUSION :

La pollution de l'air, en particulier, celle induite par les particules atmosphériques fait l'objet ces dernières années d'une attention particulière. L'OMS estime que cette forme de pollution, qui exerce de vastes nuisances sur la santé humaine, constitue de nos jours un problème de santé publique, même dans les pays avancés.

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.

C'est dans ce contexte que nous avons réalisé ce travail portant sur l'étude la pollution de l'air par les PM-10 et PM-2,5 à Alger au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). En plus de l'évaluation des niveaux de pollution, nous avons étudiés les teneurs atmosphériques de certains éléments, principalement les métaux lourds, véhiculés par les aérosols atmosphériques.

Les prélèvements des deux classes granulométriques ont été effectués par un échantillonneur de type LVS "Low Volume Sampler" sur une durée de 6 mois

L'analyse a été effectuée par la technique de l'activation neutronique des échantillons collectés. Cette technique d'analyse élémentaire permet de déterminer les éléments présents dans l'atmosphère à des teneurs de l'ordre du ng/m<sup>3</sup>.

Les résultats obtenus montrent qu'en ce site situé sur les hauteurs d'Alger et qui est très bien ventilé, la pollution atmosphérique par les matières particulaires (PM-2,5, PM-10) n'atteint, relativement à d'autres sites (à Alger ou dans d'autres villes), pas des seuils très inquiétants. On relève que seul 3% des échantillons dépassent la valeur limite journalière pour les PM-2,5 et 9,5% pour les PM-10.

Dans ces particules, la source terrigène semble être prédominante. En effet le taux de particules corses est supérieur à celui des particules fines émises par le trafic routier.

Toutefois, cette source de pollution est toujours préoccupante car le trafic automobile augmente en Algérie à une vitesse effrénée (croissance du parc automobile de 20% en moins de deux années). Dans ce parc le taux de véhicules diesel prend de plus en plus d'ampleur (environ 35% actuellement) ce qui va induire toujours plus de particules fines et très nocives dans les milieux urbains.

L'analyse par activation neutronique des échantillons collectés, montre que les métaux lourds (Fe, As, Cr, Na, Sb, etc.) contenus dans les PM-i, n'atteignent pas des niveaux très élevés. Les teneurs sont en général bien en de ça des limites fixées par les normes internationales. Au de là de la quantification des métaux, ce travail nous a permis de nous familiariser avec une technique d'analyse nucléaire qui est peu développée dans les pays comme le nôtre, mais qui présente une meilleure performance que les techniques classiques d'analyse de métaux lourds.

L'impact du trafic routier étant clairement mis en évidence, c'est sur cette source émettrice que des mesures doivent être prises pour réduire les niveaux de pollution par les particules fines et pour cela nous proposons les recommandations suivantes :

- Rénover le parc automobile.
- L'intégration du pot catalytique dans tous les véhicules.
- L'utilisation des énergies propre comme le gaz naturel et le GPL comme carburant.
- Améliorer la fluidité de la circulation
- Améliorer le transport public pour réduire les déplacements individuels motorisés

En outre, les travaux de recherche peuvent être améliorés et développés en appliquant les démarches suivantes :

- l'élaboration d'une cartographie fine afin d'identifier les zones du territoire national dont les niveaux de pollution atmosphérique est important.
- L'établissement d'une réglementation en matière de qualité de l'air ambiant comprenant des normes d'émissions et de rejets pour tous les polluants susceptibles de nuire à la santé humaine.
- Développer des études épidémiologiques permettant d'appréhender la contribution de la pollution atmosphérique dans l'augmentation du nombre de maladie chronique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [2]**Christian Elichegarary**: Contribution de l'air: Sources, Effet, Prévention. Edition DUNOD. (2008)
- [3]**JEL YAMANI, Mounia**. Environnement et milieu: pollution atmosphérique urbaine. S.I: Afsset, juin 2006.
- [4]**Académie des sciences CADAS** : Pollution atmosphérique due aux transports et santé publique. Rapport commun N°12 (1999)
- [5]**Robert Delmas. Serge Chauzy. Jean-Marc Verstraete. Hélène Ferré**: Atmosphère, Océan et Climat. Edition BELIN pour la Science.(2007)
- [6]**CITEPA**: source de pollution : Différentes échelles Principaux phénomènes Effets. (2012)
- [7]**François Ramade**: Elément d'écologie : Ecologie appliquée. 6<sup>ème</sup> Edition/ DUNOD(2005)
- [8]**Jaques Fontan**: les pollutions de l'air : les connaitre pour les combattre. Edition VUIBERT, 2<sup>ème</sup> Edition (2004)
- [9]**Christian Le Coz, Bruno Tassinot Daniel Thévenot, 1998** : pluie et environnement. Edition Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [10]**WEXLER, Harry**. Météorologie et pollution de l'air. Etat Unis d'Amerique
- [11] **Maria Popescu. Jean-Marie Blanchard. Jean Carré**, 1998 : Analyse et traitement physicochimique des rejets atmosphériques industriels : Emissions, fumées, odeurs et poussières. Editions Lavoisier TEC & DOC
- [12] **Mascllet Pierre**, 2005: Pollution atmosphérique : Causes, Conséquences, Solutions, Perspectives. Edition ELLIPSES
- [13] **P.Mascllet, H.Cachier**, « L'aérosol atmosphérique :Caractéristiques physico-chimiques», analysis magazine, Vol 26, N° 9, (1998)

[14] Pope AC et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287:1132-1141(2002)

[15] **AFNOR**. (1985). Air ambiant - Concepts relatifs à l'échantillonnage des matièresparticulaires en suspension (Norme AFNOR X43-022)

[16] **MacNee W & Donaldson K**. (2003). Mechanism of lung injury caused by PM10 andultrafine particles with special reference to COPD. *EurRespir J Suppl* 40, 47s-51s. Edition, London, 1984

[17] **SCHMAUS.A**, 1920, Die Chemie des Nobels, der Wolkenund des Regens, DieUmschau; Jahrg 14; pp 61-63

[18] **O.M.C. Chang, G.C.England**. (2005) « Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems », *Critical Review of Source Sampling and Analysis Methodologies for Characterizing Organic Aerosol and Fine Particulate Source Emission Profiles*,

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

[20] **Donaldson K & Stone V**, (2003), Current hypotheses on the mechanisms of toxicity ofultrafine particles. *Ann Ist Super Sanita* 39, 405-410

[21] **Schaumann F, Borm PJ, Herbrich A, Knoch J, Pitz M, Schins RP, LuettigB, Hohlfeld JM, Heinrich J & Krug N**, Metal-rich ambient particles (particulate matter 2.5) cause airway inflammation in healthy subjects. *Am J RespirCrit Care Med* 170, 898-903. (2004),

[22] **Dalal NS, Suryan MM, Vallyathan V, Green FH, Jafari B&Wheeler R**, Detection of reactive free radicals in fresh coal mine dust and their implication forpulmonary injury. *Ann OccupHyg* 33, 79-84.(1989)

[23] **SECTEN CITEPA**, (2004), – Inventaire des émissions de polluants atmosphériques enFrance – Séries sectorielles et analyses étendues. Réf. CITEPA 494/Convention MATE26/2001

[24]**Borm PJ, Robbins D, Haubold S, Kuhlbusch T, Fissan H, Donaldson K, Schins R, Stone V, Kreyling W, Lademann J, Krutmann J, Warheit D & Oberdorster E**, The potential risks of nanomaterials: a review carried out for ECETOC. Part Fibre Toxicol 3-11 (2006),

[25]Ministère de l'Environnement de Canada, « les particules de l'air ambiant : vue d'ensemble », (1998)

[26]Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, « Mesures de réduction des émissions de PM10 », Berne, (2001)

[27]**P.Masclat**, « Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives », Edition Ellipse, Paris, (2005)

[28]Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, « Inventaire des émissions de particules primaires », Paris, (2001)

[29]Report of the Airborne Particles Expert Group, « Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom », London, (1999)

[30]US.Environmental Protection Agency, « The Particle Pollution Report: Current Understanding of Air Quality and Emissions through 2003 », EPA report 454-R-04-002, Décembre 2004

[31]**J.Priest**, « Problems of our Physical Environment », Addison-Wesley Publishing Company, pp 59-70, (1973)

[32]**W.C.Hinds**, « Aerosol technology », Wiley Interscience, London, (1982)

[33]**X.Chaucherie, C.Magnenot, G.Vatry**, « Détermination de la granulométrie des aérosols dans les émissions diffuses d'ateliers sidérurgiques : PM-10, PM-2.5, PM-1 et PM-0.1 », ADEME, (2004)

[34]**O.Blanchard, F.Del Gratta, M.Durif, E.Frejafon, O.LeBihan**, « Exposition par inhalation aux aérosols : Principes et méthodes de mesures », INERIS, Paris, (2004)

[35]**Bouhila Zahra**: Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux lourds en utilisant la méthode d'Analyse par Activation Neutronique. Mémoire de magister en Ingénierie et Environnement 2009-2010

[36]**Julie Rigo**: Centre d'Education Populaire André Genot. Cellule RISE. Pollution de l'air: quels impacts sur la santé 2009

[37]**BLIN, Cathrine**, et al, Les micropolluants dans l'air. Wallonne : s.n., 2004

[38]**Bur, Thomas**. Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de Midi-Pyrénées implication en termes de limites et de charges critiques. L'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 2008

[39]**Marcel, GIROUX, Louise, Deschaines, Raynald et Chassé**. Les éléments traces métalliques leur accumulation dans les sols agricoles au Québec. Québec: s.n, 2006

[40]**Gérard, MIQUEL**. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. s.l: office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2001

[41]**SERAGHNI, N**. Mesure de la pollution particulaire et métallique dans l'air au niveau de trois sites urbains de la ville de Constantine. Constantine : Université de Constantine, 2007

[42]**BERT, V et DERAM, A**. Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds. France : Environnement et Développement alternatif, 1999.

[43] Cité par **Fanny, VANOBERGHEN**. La phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. Bruxelles : université libre de Bruxelles, 2010

[44] IFMT-MS-Santé. Santé. 2006

[45] **Dr. Dietrich Klinghardt**: conférence à l'école polytechnique de Zurich, le 14 mai 1998

[46] Journal officiel de l'Union européenne. 1999

[47] **Norme EN 14907**, « Méthode de mesurage gravimétrique de référence pour la détermination de la fraction massique PM<sub>2.5</sub> de matière particulaire en suspension dans l'air ambiant »(2005)

[48] **Norme EN 12341**, « Qualité de l'air – Détermination de la fraction PM<sub>10</sub> de matière particulaire en suspension – Méthode de référence et procédure d'essai in situ pour démontrer l'équivalence à la référence de méthodes de mesurage ».(1999)

[49] **A.Bitouche**, « Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger », Mémoire de Magister, ENP, (2008).

[50] **Boumechhour F**: Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les acides véhiculés par les particules inhalables et respirables à Alger, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.

[51] **Chaboun et al., Chahboun J., Salmon J.M., Viallet P.**, "Are histidine rings the main potential sites of the interaction between proteins and fluorescent MG<sup>2+</sup> indicator Mag-Indo-1?", 2007, Journal of Histochemistry and Cytochemistry, 1995

[52] **Matteini et al.** Pietro Porcinai: Architetto Del Giardino et Del Paesaggio de Milena Matteini et al, 1991

[53] **KERBACHI, R** cours de technique d'analyse physico-chimique 4<sup>ème</sup> année

[54] **Chaib Marzouk et Rahmani Mohamed**: Evaluation de la pollution atmosphérique par les métaux lourds au niveau d'un site urbain de la ville de Draa Ben Khedda par la technique de spectrométrie à fluorescence X (XRF). Mémoire d'ingénieur, 2009-2010

[55] **Bouhila Zahra**: Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux lourds en utilisant la méthode d'Analyse par Activation Neutronique. Mémoire de magister en Ingénierie et Environnement 2009-2010

[56] **Widemann, François** [Citation : 29 Mars 2012.]

[57] **REVEL, Gilles**. Technique de l'ingénieur: Analyse par activation

[58] **Reuss, Paul**. Précis de neutronique. s.l: EDP sciences collection génie atomique, 2003

[59] **LEYNI, BARBAZ, DANIEL.** Développement d'une méthode de dosage du mercure dans l'air à base d'hopcalite par analyse par activation neutronique. Montréal: Université de Montréal, 2001

[60] **Verma, H.R.** Atomic and atomic analytical methods: XRF, Mössbauer, XPS, NAA and. Berlin: Springer, 2007

[63] **Houthuijsa D, O. Breugelmansa and G. Hoekb:** PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe "results from the Cesar study", *Atm. Env.*, Vol 35, 2001, pp.2757-2771

[64] **Xavier Q., A. Alastueya, S. Rodriguez et al:** PM10 and PM-2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain, *Atm. Env.*, Vol 35, 2001, pp.6407-6419

[65] **Vega. E., I. Garcia et al:** Application of a chemical mass balance receptor model to respirable particulate matter in Mexico –Cities, *J. A. W. M. A.*, Vol.47, 1997, pp.524-529.

[66] **Gerther A. W., M. Abu-Allaban and D. H. Lowenthal :** The mobile source contribution to observed PM-10, PM-2,5 and VOCs in the greater Cairo area, 2nd Conf. Environment and transport, Proceedings N°107, Vol.1, Inrets Ed., France, 12-14 juin 2006, pp. 263-269.

[67] Rapport du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement Bilan chiffré de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations, Paris, France, 2000.

[68] Association de Surveillance de la Qualité de l'Air (ASQ), France, 2000.

[69] **Gehrig R., Ch. Huglin et P. Hofer:** Contributions of Road Traffic to Ambient PM-10 and PM-2,5 Concentrations, 1er Swiss Transport Research Conference, Monte Verila/Ascona, March 1-3, 2001.

[70] **Jansen N. A. H, D. F. M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek :** Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations, *Atm. Env.*, Vol. 31, N°8, 1997, pp. 1185-1193.

[71] **Charron A. and R. M. Harisson,** 2nd Conf. Environment and transport, Proceedings N°107, Vol.1, Inrets Ed., France, 12-14 juin 2006, pp. 255-262.

[72]ICP, EHAZ 94 05/PBOL, Regional office of Europe, World Health Organisation  
Copen-Hagen, 1995

[73]**Cheng L. et al**: Characteristics of inhalable particulate matter in Alberta cities, *Atm. Env.*, Vol. 32, 1998, pp. 3835-3844.

[74]**Christopher Y., C. Kelvin and K. Wong**: Residential indoor PM10 and PM2.5 in Hong Kong and the elemental composition, *Atm. Env.*, Vol 36, 2002, pp. 265–277.

[75]**Oucher N. et R. Kerbachi** : Etude de la pollution de l'air par les particules fines et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger, 1er Séminaire International sur l'Environnement et ses Problèmes Connexes (SIEPC'2005), Bejaia, 5-7 Juin, 2005.

[76]**Kerbachi R., M. Boughedaoui, F. Boumechhour et N. Oucher** : Etude de la pollution de l'air par les particules fines (PM-10, PM-2,5 et PM-1) et évaluation de l'aérosol acide à Alger, 12th Colloque Internationale Transport and Air Pollution, Proceedings INRETS, Vol. 2, N°92, Avignon, France, 15-17 juin, 2003, pp.93-98.

[77] **Kerbachi R., M. Boughedaoui et R. Joumard** : Etude des PM-10 dans l'agglomération d'Alger, 9th Colloque International Transport and Air Pollution, 5-7 juin 2000, Avignon, France.

#### **Sites web:**

[1] L'air 40. atmo-alsace. [En ligne] <http://www.atmo-alsace.net/site/Lair-40.html>

[61]cartographie. Tagarrin-Alger [En ligne] <http://www.googleearth.com>

[62]<http://www.accuweather.com>

## ANNEXE

Page 24

A Q C S R E F E R E N C E M A T E R I A L S (continued)

T A B L E 2.1 : LISTING OF MATERIALS BY MATRIX

TO BE REQUESTED ON REQUEST FORM 1  
 VALUES FOR ACTIVITY OR CONCENTRATION AND CONFIDENCE INTERVALS IN THIS TABLE SHOULD NOT BE USED  
 FOR QUALITY ASSESSMENT. PLEASE REFER TO THE RESPECTIVE CERTIFICATES !!

ENVIRONMENTAL MATERIAL(S)

MATRIX	REFERENCED ANALYTE	ACTIVITY OR CONCENTRATION	CONFIDENCE INTERVAL	UNIT PRICE US\$ /LIMIT. per LAB /UNIT SIZE	SAMPLE CODE
FELDSPAR	U	2.52 mg/kg	2.26-2.78	60/5/ 25 g	F-1
	K	83.0 g/kg	80.0-86.0		
SEDIMENT, LAKE	As	27.5 mg/kg	24.6-30.4	110/5/ 25 g	SL-1
	Ba	639 mg/kg	586-692		
	Br	6.82 mg/kg	5.09-8.55		
	Cd	0.26 mg/kg	0.21-0.31		
	Ce	117 mg/kg	100-134		
	Co	19.8 mg/kg	18.3-21.3		
	Cr	104 mg/kg	95.0-113		
	Cs	7.01 mg/kg	6.13-7.89		
	Cu	39.0 mg/kg	24.4-35.6		
	Dy	7.46 mg/kg	5.34-9.58		
	Fe	67.4 g/kg	65.7-69.1		
	Hf	4.16 mg/kg	3.58-4.74		
	La	52.6 mg/kg	49.5-55.7		
	Mn	3.46 g/kg	3.30-3.62		
	Na	1.72 g/kg	1.60-1.84		
	Nd	45.8 mg/kg	41.0-46.0		
	Ni	44.9 mg/kg	36.9-52.9		
	Pb	37.7 mg/kg	30.3-45.1		
	Rb	113 mg/kg	102-124		
	Sb	1.31 mg/kg	1.19-1.43		
	Sc	17.3 mg/kg	16.2-18.4		
	Sm	9.25 mg/kg	8.74-9.76		
	Th	14 mg/kg	13-15		
	Ti	5.17 g/kg	4.80-5.54		
	U	4.02 mg/kg	3.70-4.34		
	V	170 mg/kg	155-185		
Yb	3.42 mg/kg	2.78-4.06			
Zn	223 mg/kg	213-233			

contin

## 2.1 Biological

### 2.1.1 Animal Products

Fresh bovine blood was obtained from a slaughter house and was freeze dried at Seibersdorf. A batch of 40 kg of the dried material, designated **IAEA-A-13**, was prepared. The fraction that passed through a 300 µm nylon sieve was further homogenized and dispensed into plastic bottles.

Both, milk powder **IAEA-153** and whey powder **IAEA-155** were donated to the IAEA by a milk processing facility in the former USSR.

These materials have been γ-sterilised to ensure long-term stability of the material by inhibiting microbial action.

IAEA Code Matrix Date of Release Unit size / Price Analyte	IAEA-A-13 Animal Blood March 1983 25g 110 US \$				IAEA-153 Milk Powder May 1989 50g 60 US \$				IAEA-155 Whey Powder November 1990 50g 60 US \$			
	[mg/kg]	95% C.I.	N	R/I	[mg/kg]	95% C.I.	N	R/I	[mg/kg]	95% C.I.	N	R/I
Al									52.9	38.0 - 67.8	21	I
As									0.049	0.016 - 0.083	6	I
B									5.1	4.3 - 6.0	6	I
Br	22	19 - 24	13	R	12.32	11.01 - 13.64	5	R	39.1	36.1 - 42.0	18	R
Ca	286	226 - 332	18	R	12870	12540 - 13170	17	R	42100 <sup>#</sup>	40400 - 43900	17	I
Cd									0.016	0.012 - 0.020	18	R
Cl									69200	65900 - 72400	10	R
Co									0.043	0.029 - 0.056	16	R
Cr									0.59	0.51 - 0.66	28	R
Cs									0.086	0.071 - 0.102	9	R
Cu	4.3	3.7 - 4.8	32	R	0.57	0.38 - 0.78	16	I	0.57	0.46 - 0.68	28	I
Fe	2400	2200 - 2500	34	R	2.53	1.66 - 3.47	12	R	62	50 - 74	35	I
Hg									0.003	0.0015 - 0.0038	9	R
K	2500	2100 - 2700	18	R	17620	16480 - 18760	15	R	41700	35400 - 48100	25	I
Mg	99	81 - 139	16	I	1060	1000 - 1150	13	R	3190	3060 - 3310	16	R
Mn					0.19	0.12 - 0.26	7	I	9.3	8.78 - 9.82	19	R
Mo					0.31	0.09 - 0.60	6	I				
Na	12600	11600 - 13500	19	R	4180	3870 - 4440	16	R	15800	15200 - 16400	21	R
Ni	1	0.6 - 1.4	4	I					0.54	0.44 - 0.64	15	R
P	940	690 - 1120	5	I	10100	9010 - 11040	7	R	16200	15500 - 17000	10	R
Pb	0.18	0.15 - 0.29	5	I					0.104	0.071 - 0.136	15	R
Rb	2.3	1.7 - 3.1	10	R	14.03	12.27 - 16.10	8	R	39.2	36.4 - 42.0	18	R
S	6500	6000 - 7000	4	R					3000	1600 - 4400	6	I
Sc									0.028	0.021 - 0.034	10	R
Se	0.24	0.15 - 0.31	7	R					0.064	0.051 - 0.077	9	R
Sr					4.09	3.49 - 4.73	6	I	10.5	6.6 - 14.5	6	I
Zn	13	12 - 14	34	R	39.56	37.66 - 41.23	21	R	34.3	32.8 - 35.7	54	R
<b>IAEA Report</b>	<b>IAEA/RL/98</b>				<b>IAEA/AL/010</b>				<b>IAEA/AL/034</b>			

(N) Number of accepted laboratory means which were used to calculate the recommended or information values and their respective confidence intervals about the mean value

(R/I) Classification assigned to the property value for analyte (Recommended/Information)

[#] The information value for Ca was calculated from a set of selected results (for details see report)

The values listed above were established on the basis of statistically valid results submitted by laboratories which had participated in one, or more, international intercomparison exercise organized by the Chemistry Unit, Agency's Laboratories at Seibersdorf. The details concerning the criteria for qualification as a recommended or information value can be found in the respective reports which are available free of charge upon request. Orders for these materials should be sent to AQCS, Seibersdorf.

CANADIAN CERTIFIED REFERENCE METATERIALS PROJECT

REFERENCE SOIL SO-2 (provenant de toumert)

Element	Recommandé	élément	Recommandé
	Valeur %		valeur
Si	24,99	Sr	340 µg/g
Al	8,07	Zn	124 X
Fe	5,56	V	64
K	2,45	Pb	21
Ca	1,96	Cr	16 X
Ti	0,86	Cu	7
Mg	0,54	Hg	0,082
Mn	0,072		
Séché à 105 ° pendant 16 heures			