



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE CHIMIE

Pour l'obtention du diplôme de :

**DOCTORAT EN SCIENCES**

**Spécialité:** Spectrochimie et méthodes d'analyses

Par :

**M<sup>Me</sup> BELARBI NADIA**

Sur le thème

---

**Etude de la pollution atmosphérique par les particules et les métaux lourds (Cr, Zn, Cd.....) au niveau de la ville d'Alger**

---

Soutenue publiquement le 29/07/2019 à Tlemcen devant le jury composé de :

<b>M<sup>r</sup> BENAMAR Dahmani</b>	Professeur	Université de Tlemcen	<b>Président</b>
<b>M<sup>r</sup> BENAMAR Mohammed E.A</b>	Professeur	Centre Universitaire de Tamanrasset	<b>Directeur de thèse</b>
<b>M<sup>r</sup> BELAMRI Mohamed</b>	Maitre de Recherche A	Centre de Recherche Nucléaire Alger	<b>Co-directeur de Thèse</b>
<b>M<sup>r</sup> BENGUELLA Belkacem</b>	Professeur	Université de Tlemcen	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>r</sup> BOUGHEDAOUI Menouer</b>	Professeur	Université de Blida1	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>r</sup> CHEKNANE Benamar</b>	Maitre de Conférences A	Université de Blida1	<b>Examineur</b>

:

*Laboratoire de Spectrochimie et pharmacologie structurale (LSPS)  
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

## *Dédicace*

### *À MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, Merci mes parents pour m'avoir éduqué et aidé à grandir dans le savoir durant toutes ces années d'études.*

*Que Dieu Vous protège*

### *A MON TRES CHER MARI*

*Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel m'ont permis de réussir mes études, j'aimerais bien que tu trouve dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères car grâce à ton aide et à ta patience avec moi que ce travail a pu voir le jour*

### *A MES ADORABLES ANGES*

*Rajaa, Rym et Mohamed Okacha  
C'est à vous, que maman dédie ce travail pour vous dire que vous resterez pour toujours le rayon du soleil qui égaye ma vie. Je vous aime mes petits et je vous souhaite tous le bonheur du monde*

*A*

*Mes sœurs qui m'ont soutenu de près ou de loin durant mes études.*

*Mon frère Zohir et ma belle sœur*

*Mes chères neveux et nièces*

*A  
Ma belle famille.  
Mes amies  
Toute ma famille.*

*A  
Tous ceux qui me sont chère.*

## Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au laboratoire de physique fondamental (FUNDAPL) de l'université Saad dahlab de Bliḍa sous la direction de M<sup>r</sup> Benamar Mohamed el amine et au centre de recherche nucléaire d'Alger (CRNA), division des techniques nucléaires sous la direction de M<sup>r</sup> Belamri Mohamed en collaboration avec le laboratoire de spectrochimie et pharmacologie structurale (LSPS) de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen sous la direction de M<sup>r</sup> Dahmani Benamar.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse Mohammed El Amine BENAMAR, professeur à la faculté des sciences de l'université de Bliḍa, d'abord d'avoir accepté de diriger ma thèse, pour ses conseils judicieux, son intérêt dans la réussite, ces conseils éclairés. Merci pour tout ce que vous avez fait pour la réalisation de ce travail.

Je suis très reconnaissante envers M<sup>r</sup> BELAMRI Mohammed, Co-directeur de thèse, pour la qualité de ses conseils, la confiance et la résolution des problèmes rencontrés.

Mes remerciements vont également aux membres du jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.

M<sup>r</sup> DAHMANI Benamar, professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen et directeur du laboratoire de recherche de spectrochimie et pharmacologie structurale (LSPS), pour l'honneur qu'il me fait en président ce jury.

Mr BENGUELLA Belkacem, Doyen de la faculté des sciences à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

Mr BOUGHEDAOUI Menouer Professeur à l'université de Bliḍa1.

Mr CHEKNANE Benamar Maître de Conférences à l'université de Bliḍa1.

Je suis très sensible à l'honneur qu'ils me font en accordant une partie de leur temps afin de juger ce travail.

J'adresse aussi ma gratitude, à mes collègues du laboratoire LSPS, ainsi que tous les membres de CRNA et FUNDAPL, qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.

A celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Merci

# Table des matières

<b>Liste des abréviations.....</b>	
<b>Liste des figures.....</b>	
<b>Liste des tableaux.....</b>	
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique</b>	
<b>I. Propriétés de l'atmosphère</b>	
<b>I.1. Structure de l'atmosphère .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 couches de l'atmosphère.....</b>	<b>4</b>
a) Troposphère.....	4
b) Stratosphère.....	4
c) Mésosphère.....	4
d) Thermosphère.....	4
<b>I.3 La composition naturelle de l'air .....</b>	<b>5</b>
<b>I.4 La chimie de l'atmosphère.....</b>	<b>6</b>
<b>II : La pollution atmosphérique particulaire et métallique</b>	<b>7</b>
<b>II.1 Généralités:.....</b>	<b>7</b>
▪ Les polluants primaires.....	7
▪ Les polluants secondaires.....	7
<b>II.2 Les sources de pollution atmosphérique.....</b>	<b>8</b>
<b>II.2.1: Les émissions naturelles.....</b>	<b>8</b>
<b>II.2.1.1 Les Poussières crustales .....</b>	<b>8</b>
<b>II.2.1.2 Les sels marins.....</b>	<b>8</b>
<b>II.2.1.3 Les éruptions volcaniques.....</b>	<b>8</b>
<b>II.2.1.4 La combustion de la biomasse.....</b>	<b>9</b>
<b>II.2.1.5 Les particules biogéniques .....</b>	<b>9</b>
<b>II.2.2: Les émissions anthropogéniques.....</b>	<b>9</b>
<b>II.2.2.1 les industries .....</b>	<b>9</b>
<b>II.2.2.2 Incinération des déchets.....</b>	<b>10</b>
<b>II.2.2.3 Le Trafic automobile.....</b>	<b>10</b>
<b>II-3 Le processus de la pollution atmosphérique.....</b>	<b>11</b>

# Table des matières

<b>II.3.1</b> L'émission.....	<b>12</b>
<b>II.3.2</b> Le transport .....	<b>12</b>
<b>II.3.3</b> La transformation.....	<b>12</b>
<b>II.3.4</b> L'immission .....	<b>12</b>
<b>II.4</b> La pollution atmosphérique particulaire	<b>12</b>
<b>II.4.1</b> Définitions et caractéristiques des particules atmosphériques .....	<b>13</b>
<b>II.4.2</b> Les différentes classes des particules.....	<b>13</b>
<b>II.4.3</b> Composition chimique des particules.....	<b>14</b>
<b>II.4.4</b> Le temps de séjour des particules dans l'atmosphère.....	<b>15</b>
<b>II.4.5</b> Les effets des particules en suspension.....	<b>15</b>
<b>II.4.5.1</b> Sur la santé humaine .....	<b>15</b>
<b>a</b> -Effet lié à leur taille.....	<b>15</b>
<b>b</b> -Effet lié à leurs caractéristiques toxicologiques, physicochimiques et microbiologiques.....	<b>17</b>
<b>II.4.5.2</b> Sur les ecosystems.....	<b>18</b>
<b>II.4.5.3</b> Sur le climat .....	<b>18</b>
<b>II.4.5.4</b> Sur les bâtisses.....	<b>18</b>
<b>II.5</b> La pollution atmosphérique par les métaux lourds .....	<b>19</b>
<b>II.5.1</b> Généralités .....	<b>19</b>
<b>II.5.2</b> Effets des métaux lourds .....	<b>19</b>
1. Le plomb.....	<b>19</b>
2. Le Cadmium .....	<b>20</b>
3. Le Mercure.....	<b>21</b>
4. Le Zinc.....	<b>21</b>
5. Le manganèse .....	<b>22</b>
6. Le Cuivre.....	<b>22</b>
7. Le nickel .....	<b>22</b>
8. Le Chrome.....	<b>22</b>
9. L'arsenic.....	<b>23</b>
<b>II.6</b> Législation concernant la pollution atmosphérique .....	<b>23</b>
<b>II.6.1</b> Normes des particules en suspension dans l'air .....	<b>24</b>
<b>II.6.2</b> Normes de quelques métaux lourds présents dans l'air.....	<b>25</b>

# Table des matières

<b>II.7</b> Les paramètres influençant la dispersion des polluants.....	<b>25</b>
<b>II.7.1</b> Facteurs météorologiques.....	<b>25</b>
<b>II.7.1.1</b> Le vent .....	<b>25</b>
<b>II.7.1.2</b> La température.....	<b>25</b>
<b>II.7.1.3</b> La pression .....	<b>26</b>
<b>II.7.1.4</b> L'humidité .....	<b>26</b>
<b>II.7.1.5</b> La nébulosité.....	<b>26</b>
<b>II.7.1.6</b> Les précipitations .....	<b>26</b>
<b>II.7.2</b> Facteurs topographiques .....	<b>26</b>
<b>III : Aspect d'échantillonnage</b> .....	<b>27</b>
<b>III.1</b> Choix du site de prélèvement .....	<b>28</b>
<b>III.2</b> Prélèvement et échantillonnage .....	<b>28</b>
<b>III.3</b> Les filtres et les membranes de rétention.....	<b>29</b>
<b>III.3.1</b> Les filtres en fibre de verre .....	<b>30</b>
<b>III.3.2</b> Les filtres membranaires .....	<b>30</b>

## **Chapitre II : Aspects théoriques de la technique de fluorescence X**

<b>II.1</b> Introduction.....	<b>31</b>
<b>II.2</b> La fluorescence X .....	<b>31</b>
<b>II.2.1</b> Processus de la fluorescence X.....	<b>32</b>
<b>II.2.1.1</b> Principe.....	<b>32</b>
<b>II.2.1.2</b> Interactions des rayons X avec la matière .....	<b>33</b>
▪ Effet photoélectrique.....	<b>34</b>
▪ Effet Compton.....	<b>35</b>
▪ Production de paires (matérialisation) .....	<b>36</b>
<b>II.3</b> Analyse par XRF: .....	<b>37</b>
<b>II.3.1</b> Analyse qualitative .....	<b>38</b>
<b>II.3.2</b> Analyse quantitative:.....	<b>38</b>
<b>II.3.2.1</b> Méthode relative.....	<b>38</b>
<b>II.3.2.2</b> Méthode de regression.....	<b>39</b>



# Table des matières

<b>II.3.2.3</b> Méthode de l'émission-transmission.....	<b>39</b>
<b>II.3.2.4</b> Méthode des paramètres fondamentaux.....	<b>40</b>
<b>II.4.</b> Dimensions et état physique des échantillons : .....	<b>42</b>

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

<b>III.1</b> Présentation de la ville d'Alger .....	<b>43</b>
<b>III.1.1</b> Situation géographique et démographique .....	<b>43</b>
<b>III.1.2</b> Géologie et Géomorphologie de la région .....	<b>44</b>
<b>III.1.3</b> La circulation automobile.....	<b>44</b>
<b>III.2</b> Description du site de prélèvement .....	<b>46</b>
<b>III.2.1</b> Etude climatologique.....	<b>47</b>
<b>III.2.1.1</b> Caractéristiques climatiques.....	<b>47</b>
<b>III.3</b> Les Moyens de prélèvement .....	<b>49</b>
<b>III.4</b> Préparation des échantillons et standards.....	<b>51</b>
<b>III.4.1</b> Préparation des filtres standards .....	<b>52</b>
<b>III.4.2</b> Préparation des filtres blancs.....	<b>53</b>
<b>III.5</b> Appareillage .....	<b>53</b>

## **Chapitre IV Résultats et discussions**

<b>IV.1</b> Etude des concentrations en TSP.....	<b>57</b>
<b>IV.1.1</b> Etude des teneurs en ETM associés aux TSP.....	<b>60</b>
<b>IV.2</b> Identification des sources d'éléments .....	<b>68</b>
<b>IV.2.2</b> Calcul des facteurs d'enrichissements .....	<b>68</b>
<b>IV.3</b> Variation temporelle des concentrations de PM10 et PM2.5.....	<b>72</b>
<b>IV.3.1</b> Le rapport entre PM 2,5 et PM10 .....	<b>73</b>
<b>IV.3.2</b> Les concentrations élémentaires.....	<b>74</b>
<b>IV.4</b> Corrélation des résultats avec les paramètres météorologiques.....	<b>86</b>
▪ Matrice de corrélation entre métaux lourds :.....	<b>86</b>
▪ Corrélation avec les paramètres météorologiques :.....	<b>86</b>

# Table des matières

<b>IV.5</b> Analyses statistiques des résultats.....	<b>89</b>
<b>IV.5.1</b> Identification de sources à l'aide de l'analyse en composante principale (ACP).....	<b>89</b>
<b>IV.5.2</b> Algorithme.....	<b>90</b>
<b>IV.5.3</b> Décomposition d'un vecteur propre.....	<b>90</b>
<b>IV.5.4</b> Décomposition de la valeur singulière.....	<b>91</b>
<b>IV.5.5</b> Estimer le nombre de PC.....	<b>91</b>
<b>IV.5.6</b> Interpretation des données.....	<b>92</b>
<b>IV.5.7</b> Rotations.....	<b>93</b>
<b>IV.6</b> Caractérisation des masses d'air arrivant au site à l'aide du model de simulation HYSPLIT.....	<b>97</b>
▪ Description du modèle HYSPLIT.....	<b>97</b>
- Model Langrégien.....	<b>98</b>
- Modèle eulérien .....	<b>98</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>103</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>105</b>

---

---

## Liste des abréviations

<b>TSP</b>	<b>Total suspended particulates</b>
<b>PM</b>	<b>Particulate matter</b>
<b>PM10</b>	<b>Particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 10</b>
<b>PM 2.5</b>	<b>Particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 2,5 µm</b>
<b>PM1</b>	<b>Particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 1 µm.</b>
<b>PM<sub>10-2,5</sub></b>	<b>Particules de taille inférieure à 10 µm et supérieure à 2,5 µm</b>
<b>CP</b>	<b>Coarse particules</b>
<b>BC</b>	<b>Black carbon</b>
<b>NO<sub>x</sub></b>	<b><u>O</u>xydes d'azote</b>
<b>HAP</b>	<b>Hydrocarbure aromatique polycyclique</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>Dioxyde de soufre</b>
<b>Cd,</b>	<b>Cadmium</b>
<b>O<sub>3</sub></b>	<b>Ozone</b>
<b>COV</b>	<b>Composés Organiques Volatils</b>
<b>Cu</b>	<b>Cuivre</b>
<b>Mn</b>	<b>Manganèse</b>
<b>Pb</b>	<b>Plomb</b>
<b>Zn</b>	<b>Zinc</b>
<b>As</b>	<b>Arsenic</b>
<b>Cr</b>	<b>Chrome</b>
<b>Hg</b>	<b>Mercure</b>
<b>Ni</b>	<b>Nickel</b>

---

---

---

<b>Sn</b>	<b>Etain</b>
<b>MeHg</b>	<b>Méthylmercure</b>
<b>MMT</b>	<b>Méthylcyclopentadienylmanganèse tricarbonyle</b>
<b>OMS</b>	<b>Organisation mondiale de la santé</b>
<b>USEPA</b>	<b>United States Environmental Protection Agency</b>
<b>WHO</b>	<b>World Health Organization</b>
<b>ACP</b>	<b>Analyse en Composantes Principales</b>
<b>NOAA</b>	<b>National Oceanic and Atmospheric Administration</b>
<b>PIXE</b>	<b>Particules induced X-ray emission</b>
<b>INAA</b>	<b>Instrumental neutron activation analysis</b>
<b>EDXRF</b>	<b>Energy dispersive X-ray fluorescence</b>
<b>AAS</b>	<b>Atomic absorption spectrometry</b>

---

---

---

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b> Les Couches de l'atmosphère.....	6
<b>Figure I.2</b> Mécanisme de la pollution atmosphérique.....	11
<b>Figure I.3</b> Appareil respiratoire et pénétration des particules inhalées en fonction de la taille.....	15
<b>Figure I.4</b> Phénomènes de brise côtière - Brise de mer le jour, brise de terre la nuit	26
<b>Figure I.5</b> Phénomènes de brises de vallée - Brise montante le jour, brise descendante la nuit	27
<b>Figure II.1</b> Principe de la spectrométrie de fluorescence X.....	32
<b>Figure II.2</b> Schéma de l'effet photoélectrique.....	35
<b>Figure II.3</b> Effet Compton.....	36
<b>Figure II.4</b> Zones de prédominance des interactions dans le plan énergie/numéro atomique.....	37
<b>Figure III.1</b> Wilayas limitrophes de la ville d'Alger.....	43
<b>Figure III.2</b> Répartition du parc automobile de la wilaya d'Alger par catégorie.....	44
<b>Figure III.3</b> Zone d'échantillonnage de l'air du site urbain d'Alger Centre.....	47
<b>Figure III.4</b> Gent Sampler.....	50
<b>Figure III.5</b> Schéma du dispositif de prélèvement.....	51
<b>Figure III.6</b> a)Filtre vierge                      b) Filtre pollué.....	52
<b>Figure III.7</b> Dispositif expérimental de XRF.....	54
<b>Figure III.8</b> Spectre typique de fluorescence X par dispersion d'énergie.....	55

---

---

---

<b>Figure IV.1</b>	Evolution des concentrations des TSP du 03/01/2009 au 25/02/2010.....	57
<b>Figure IV.2</b>	Variation des concentrations du Fer durant la période de prélèvement....	60
<b>Figure IV.3</b>	Variation des concentrations du Mn durant la période de prélèvement...	61
<b>Figure IV.4</b>	Variation des concentrations du Pb durant la période de prélèvement....	61
<b>Figure IV.5</b>	Variation des concentrations du Ni durant la période de prélèvement...	62
<b>Figure IV.6</b>	Variation des concentrations du Co durant la période de prélèvement...	63
<b>Figure IV.7</b>	Variation des concentrations du Cr durant la période de prélèvement...	63
<b>Figure IV.8</b>	Variation des concentrations du Zn durant la période de prélèvement...	64
<b>Figure IV.9</b>	Variation des concentrations du Cu durant la période de prélèvement...	65
<b>Figure IV.10</b>	Variation des concentrations du Cd durant la période de prélèvement...	65
<b>Figure IV.11</b>	Variation des concentrations d'As durant la période de prélèvement	66
<b>Figure IV.12</b>	Variation des concentrations du Se durant la période de prélèvement...	67
<b>Figure IV.13</b>	Variation des concentrations du V durant la période de prélèvement	67
<b>Figure IV.14</b>	Variation des concentrations du Mg durant la période de prélèvement	68
<b>Figure IV.15</b>	Facteurs d'enrichissement des éléments analysés.....	69
<b>Figure IV.16</b>	Variation des niveaux de PM2.5 et de PM10 mesurés dans le site Frantz Fanon.....	72
<b>Figure IV.17</b>	Variation de la concentration du Cr dans les PM10 et PM2.5.....	76
<b>Figure IV.18</b>	Variation de la concentration du Mn pour les PM2.5 et PM10.....	76
<b>Figure IV.19</b>	Evolution de la concentration du Fe pour les PM2.5 et PM10.....	77
<b>Figure IV.20</b>	Evolution de la concentration du Co pour les PM 2.5.....	78
<b>Figure IV.21</b>	Evolution de la concentration du Ni pour les PM2.5 et PM10.....	78
<b>Figure IV.22</b>	Evolution de la concentration du Cu pour les PM2.5 et PM10.....	79
<b>Figure IV.23</b>	Evolution de la concentration du Zn pour les PM2.5 et PM10.....	79
<b>Figure IV.24</b>	Evolution de la concentration du Pb pour les PM2.5 et PM10.....	80

---

---

<b>Figure IV.25</b> Evolution de la concentration du Cd pour les PM2.5 et PM10.....	81
<b>Figure IV.26</b> Evolution de la concentration du Mg pour les PM2.5 et PM10.....	81
<b>Figure IV.27</b> Evolution de la concentration du V pour les PM2.5 et PM10.....	82
<b>Figure IV.28</b> Evolution de la concentration du Sb pour les PM2.5 et PM10.....	82
<b>Figure IV.29</b> Exemple de tracé d'éboulis pour PCA. Les valeurs propres, représentant la variance, sont tracées dans l'axe des ordonnées.....	92
<b>Figure IV.30</b> Courbe des valeurs propres en fonction des facteurs Fi (PM10).....	94
<b>Figure IV.31</b> Contributions des variables (%) (PM10).....	95
<b>Figure IV.32</b> Courbe des valeurs propres en fonction des facteurs Fi (PM2.5).....	96
<b>Figure IV.33</b> Contributions des variables (%) (PM2.5).....	97
<b>Figure IV.34</b> Trajectoires des particules polluantes avant 48 h d'arriver au centre urbain d'Alger centre.....	100
<b>Figure IV.35</b> Trajectoires des particules polluantes après 48 h du centre urbain d'Alger centre.....	101

---

---

---

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Composition de l'air .....	6
<b>Tableau I.2</b> : Organes exposés aux particules fines.....	16
<b>Tableau I.3</b> : Effets des particules à court et à long terme.....	17
<b>Tableau I.4</b> : Les normes des TSP dans l'air.....	23
<b>Tableau I.5</b> : Les normes des PM10 dans l'air.....	24
<b>Tableau I.6</b> : Les normes des PM2.5 dans l'air.....	24
<b>Tableau I.7</b> : Les valeurs limites de quelques métaux lourds dans l'air.....	24
<b>Tableau I.8</b> : Types de prélèvement sans coupure granulométrique.	29
<b>Tableau I.9</b> : Propriétés et les caractéristiques des différents types des filtres ainsi que leurs efficacités.....	30
<b>Tableau III.1</b> : Répartition du parc national automobile selon le genre et la source d'énergie au 31/12/2009	45
<b>Tableau III.2</b> : Variation des températures moyennes minimales et maximales pour la région d'Alger (climat méditerranéen).....	48
<b>Tableau III.3</b> : Variation des précipitations pour la région d'Alger.....	48
<b>Tableau III.4</b> : Humidité relative moyenne mensuelle de la ville d'Alger (2009-2018).....	49
<b>Tableau IV.1</b> :Variation des concentrations des particules totales en suspension (TSP) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et paramètres météorologiques enregistrés durant la période de prélèvement.....	58
<b>Tableau IV.2</b> : Facteurs d'enrichissement (FE) de métaux lourds sélectionnés.....	69
<b>Tableau IV.3</b> : Matière Particulaires ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ) et teneur en métaux lourds ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) dans différents pays.....	71
<b>Tableau IV.4</b> : Concentration moyenne des polluants et leurs ratios PM2.5/PM10...	75
<b>Tableau IV.5</b> : Concentration de métaux lourds associée aux particules fines et grossières (PM2,5, PM10) à Alger et dans d'autres sites.....	83

---

---



---

<b>Tableau IV.6</b> : Matrice de corrélation entre métaux lourds.....	87
<b>Tableau IV.7</b> : Corrélation entre métaux lourds et les paramètres météorologiques....	88
<b>Tableau IV.8</b> : Valeurs de l'analyse en composantes principales pour les PM10.....	94
<b>Tableau IV.9</b> : Valeurs de l'analyse en composantes principales pour les PM 2.5...	96

---

---

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

Le fait de respirer de l'air pur est considéré comme une condition essentielle de la santé et du bien être de l'homme. Cependant, la pollution de l'air continue de faire peser une menace importante sur le plan sanitaire partout dans le monde [1].

La pollution de l'air se produit lorsque des substances nocives, y compris les particules et des molécules sont introduites dans l'atmosphère terrestre. Elle peut causer des maladies, des allergies ou la mort des humains; elle peut pareillement provoquer des effets néfastes à d'autres organismes vivants tels que les animaux et les cultures vivrières, et peut endommager l'environnement naturel ou construit. L'activité humaine et les processus naturels peuvent générer à la fois la pollution atmosphérique. La pollution de l'air intérieur et la mauvaise qualité de l'air en milieu urbain figurent parmi les pires problèmes de pollution les plus graves au monde dans le rapport publié par le Blacksmith Institute World's Worst Polluted Places en 2010 [2]. Selon le rapport 2014 de l'organisation mondiale de la santé, la pollution de l'air en 2012 a causé la mort de près de 7 millions de personnes dans le monde [3].

Parmi les substances émises dans l'atmosphère par l'activité humaine et susceptibles d'avoir des effets nocifs sur la santé, on peut citer à titre d'exemple et non exhaustif : le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), les oxydes d'azote ( $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$ , ensemble désignés par  $\text{NO}_x$ ), le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ), les composés organiques volatils (COV), les radicaux libres persistants. Les métaux toxiques, les chlorofluorocarbones, l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), les odeurs telles que les déchets, les eaux usées et les procédés industriels, les polluants radioactifs et les particules en suspension.

De multiples travaux expérimentaux et épidémiologiques ont permis de démontrer que la pollution atmosphérique d'origine particulaire joue un rôle considérable, même à faible dose, dans l'apparition d'affections respiratoires [4]. Dans ces recherches, la pollution associée à la circulation automobile dans les zones urbaines est constamment désignée comme le responsable de ces effets [5]. Cette pollution résulte des émissions spécifiques aux deux grands types de motorisation, essence ou diesel. Les moteurs diesel engendrent plus de particules fines, à peu près trente fois plus que les moteurs essences [6]. La pollution atmosphérique par les particules est plus grave dans les pays en développement que dans les pays développés en raison de l'urbanisation rapide et de l'augmentation soudaine du nombre des véhicules.

## Introduction générale

Il est accepté que la toxicité de cet aérosol particulaire est surtout due à la fraction des particules qui le compose. Les PM10 (particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 $\mu$ m) sont majoritairement arrêtés par les voies respiratoires supérieures alors que les PM2.5 (particule dont le diamètre est inférieur à 2.5 $\mu$ m) pénètrent les voies respiratoires inférieures jusqu'aux poumons et bronchioles (pour les plus fines), où les échanges physico-chimiques entre l'aérosol et l'organisme sont faciles [7].

Les méthodes d'analyses les plus connues pour l'investigation des éléments majeurs, traces et ultra traces sont la spectrométrie d'absorption atomique (AAS), et la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES). La difficulté de la préparation des échantillons pour l'AAS et l'ICP-AES nous a conduits à utiliser la spectrométrie de fluorescence X (XRF) pour notre étude environnementale [8].

La technique XRF a de plus en plus été appliquée, au cours des 20 dernières années, à l'analyse des aérosols, des eaux, des sédiments, des sols, des déchets solides et d'autres échantillons environnementaux. La technique XRF, sous ses diverses formes, est maintenant une technique puissante, bien établie et mature pour l'analyse environnementale, économique, rapide et facile à utiliser, et ses avantages et ses limites sont maintenant bien comprises. En effet, elle présente de nombreux avantages à savoir : non destructive et multi-élémentaire qui peut être appliquée à tout type d'échantillon: liquide ou solide (épais, intermédiaire ou mince) et dans de nombreux cas avec une sensibilité suffisante pour la détermination de nombreux éléments traces [9].

En Algérie, peu de travaux ont été menés dans ce domaine, des études récentes ont montré que le grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine est confrontée à une intense pollution atmosphérique [10,11] en raison d'un trafic routier intense, une activité économique importante et une concentration humaine considérable.

Le présent travail, consiste à analyser la qualité de l'air dans le site Frantz Fanon à Alger centre, où la densité de population est forte et est exposée directement aux différentes sources émettrices de pollution, en utilisant la technique **XRF** pour l'analyse de centaines de filtres d'air. On s'intéressera surtout aux émissions issues du trafic routier en raison de la part importante du secteur des transports algérois dans l'émission des polluants.

Les principaux objectifs de cette étude sont :

## Introduction générale

- (1) La quantification des polluants en aérosols (TSP, PM) qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et les métaux lourds qu'elles véhiculent (Cd, Ni, Cr, Pb, Cu, Sn, Zn, Mg, Fe, V, Cu, As, Co.....) ;
  - (2) L'évaluation des variations temporelles des particules atmosphériques ainsi que l'étude de l'influence des paramètres météorologiques sur la dispersion des polluants émis par les véhicules ;
  - (3) L'identification des sources lointaines des PM<sub>10</sub> en calculant les trajectoires (For Ward) et les retro trajectoires (Backward);
  - (4) L'identification des sources potentielles de pollution des PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> et des éléments métalliques en se basant sur l'analyse en composante principale et le facteur d'enrichissement.
- Ce travail de recherche est subdivisé en quatre chapitres qui se terminent par une conclusion.

Outre que l'introduction, le premier chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques générales de la pollution atmosphérique à savoir les propriétés de l'atmosphère, la pollution particulaire et métallique, ses origines et ses effets sur l'environnement et sur la santé humaine, l'aspect théorique d'échantillonnage et les méthodes utilisés pour l'analyse des échantillons de l'air.

Les bases théoriques de la fluorescence X seront décrites dans le deuxième chapitre.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre on abordera la description du milieu urbain d'Alger centre du point de vu géologique, géographique et démographique, suivi d'une étude climatique, on présentera aussi le mode de prélèvement et le matériel utilisé pour l'analyse des échantillons d'aérosols.

L'interprétation et la discussion des différents résultats obtenus ont une part dans le quatrième chapitre.

Une conclusion est donnée à la fin de la thèse.

---

# Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

---

## I. Propriétés de l'atmosphère

### I.1. Structure de l'atmosphère :

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particule qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleue foncée qui apparaît à l'horizon.

L'atmosphère est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre. Elle s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais elle est confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre [12].

### I-2 couches de l'atmosphère

#### A) Troposphère

La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. Son épaisseur est variable: 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres, selon les saisons, dans la zone tempérée. C'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius tous les 1000 mètres pour atteindre  $-56\text{ C}^\circ$  à la tropopause (zone séparant la troposphère de la stratosphère). L'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface réchauffe cette couche d'air [13].

#### B) Stratosphère

La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres. Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme [14].

#### C) Mésosphère

La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre  $-80\text{ C}^\circ$  à une altitude d'environ 80 km.

Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes » [12].

#### D) Thermosphère

La couche la plus haute est la thermosphère. Dans cette couche se trouve la région où se forment les aurores boréales et australes près des pôles. La température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La thermosphère devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio). Ces ondes, émises par un émetteur, rebondissent sur l'ionosphère et sont renvoyées vers la Terre. Si elles sont retournées avec un certain angle, elles peuvent faire presque le

# Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

tour du globe. L'ionosphère permet donc de communiquer avec des régions très éloignées. La séparation entre la mésosphère et la thermosphère s'appelle la mésopause. La séparation entre la troposphère et la stratosphère porte le nom de Tropopause. La figure suivante représente les différentes couches de l'atmosphère :

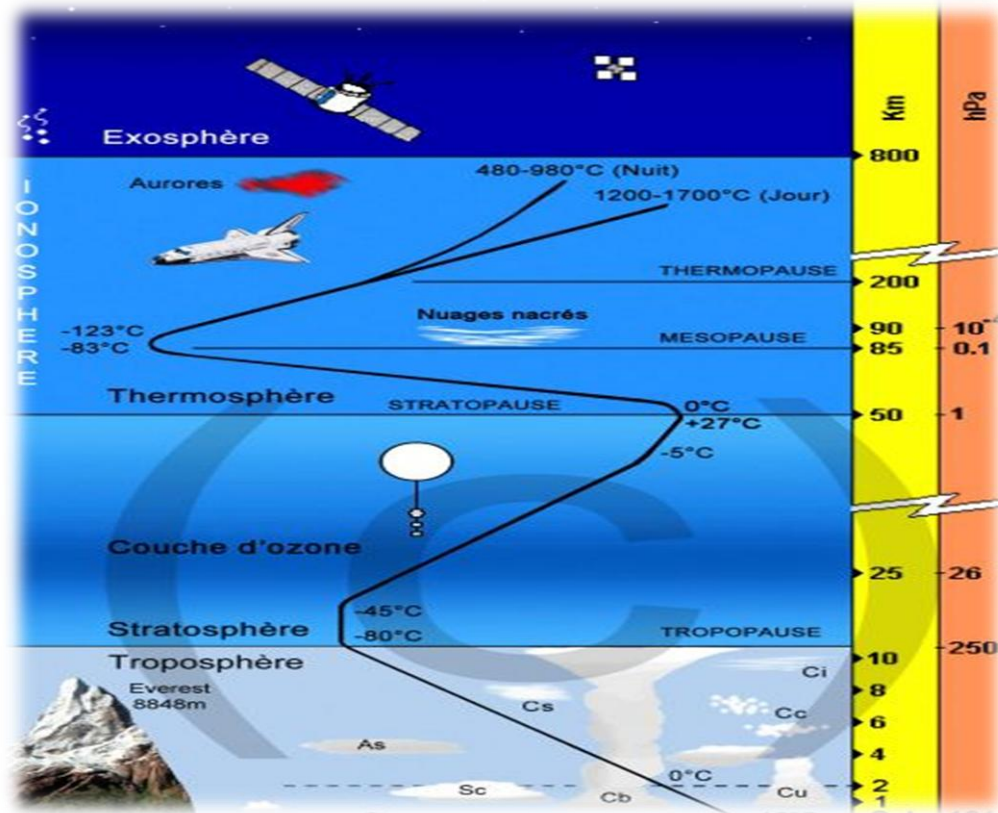


Figure I.1. Les Couches de l'atmosphère [15]

### I.3 La composition naturelle de l'air :

L'atmosphère naturelle est constituée de manière permanente et en tous lieux au voisinage du sol, de gaz de même proportions. La composition naturelle de l'air peut se modifier seulement dans les lieux où se produisent des émanations du sous sol surtout dans tous les terrains volcaniques et marécageux. Sur les hauteurs se modifie seulement la densité de l'air, les quantités de gaz à l'unité de volume d'air et les proportions de ceux-ci restent constantes, de même en fonction du temps et de l'espace. Il existe des différences de composition seulement en ce qui concerne la vapeur d'eau, qui se trouve d'habitude en proportion de 1 à 3%. Les gaz entrant dans la composition naturelle de l'air se maintiennent à une concentration constante. Cette composition a les pourcentages suivants [16]:



**Tableau I.1 :** Composition de l'air [16]

Nom	Formule	Proportion
Azote	N <sub>2</sub>	78.09%
Oxygène	O <sub>2</sub>	20.94%
Argon	Ar	0.93%
Gaz carbonique	CO <sub>2</sub>	0.03%
Néon	Ne	0.0018%
Hélium	He	0.0005%
Krypton	Kr	0.0001%
Monoxyde d'azote	NO	0.00005%
Hydrogène	H <sub>2</sub>	0.00005%
Xénon	Xe	0.00008%
Dioxyde d'azote	NO <sub>2</sub>	0.000002%
Ozone	O <sub>3</sub>	0.000001%

### I.4 Chimie de l'atmosphère :

Les polluants générés par les diverses sources, évoluent dans le temps et dans l'espace sous l'influence des conditions climatiques et météorologiques. Celles-ci amorcent différents processus complexes, de transport, de dilution, de transformation (gaz, particule, photochimie,...) et d'élimination (déposition, adsorption, solubilisation) des polluants.

En milieu urbain, l'interaction entre composés organiques volatils, oxyde d'azote et rayonnements solaires donne naissance à des composés photo oxydants dits « secondaires » dont l'indicateur principal est l'ozone O<sub>3</sub>. Ce polluant est aussi accompagné de multiples composés formés, par ces processus : composés oxygénés (aldéhydes, cétones, peroxydes) et/ou nitrés (péroxyacyl nitrates...), le brouillard photochimique résulte d'une modification de l'équilibre entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>.

Pour que l'ozone se crée, il faut qu'un mécanisme permette de réoxyder NO issu de la photolyse de NO<sub>2</sub> sans consommer de l'ozone. Ce sont les radicaux peroxydes qui le permettent en conduisant également à la formation d'aldéhydes.

## Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

En fait, les radicaux OH peuvent réagir avec le dioxyde d'azote ou avec un hydrocarbure pour créer de l'ozone. Il a été montré que lorsque le rapport hydrocarbures/oxydes d'azote est inférieur ou égal à 10, le milieu est plutôt défavorable à la formation d'ozone. C'est généralement le cas en ville, sauf si la masse d'air est stagnante et que le site est un peu éloigné du trafic routier.

En milieu rural, sous le vent de la ville, du fait de l'évolution des masses d'air, le rapport hydrocarbures/oxydes d'azote devient favorable à la formation d'ozone. Ceci explique que les teneurs les plus élevées sont souvent observées à des distances qui excèdent plusieurs dizaines de kilomètres des centres des villes. Toutefois, l'influence des sources locales naturelles ne peut être négligée.

Il y a lieu de noter que l'hiver lors de condition météorologique particulière, vent fort d'origine océanique, les niveaux de pollution par l'ozone peuvent atteindre des valeurs relativement élevées ( $70\mu\text{g}/\text{m}^3$  environ en zone rurale) [17].

### II : La pollution atmosphérique particulaire et métallique

#### II.1 Généralités :

On considère habituellement comme polluant toute substance ajoutée au milieu en concentration suffisante pour produire un effet mesurable sur l'homme, les animaux, la végétation ou les matériaux de construction [18].

Les polluants atmosphériques comprennent toutes les substances naturelles ou artificielles susceptibles d'être aéroportées : il s'agira de gaz, de particules solides, de gouttelettes liquides ou de différents mélanges de ces formes.

On peut considérer deux grandes classes de polluants :

#### ▪ Les polluants primaires :

Émis directement par les sources identifiables ; On peut proposer la liste suivante de substances pouvant constituer des polluants atmosphériques :

- les composés carbonés (CO et  $\text{CO}_2$ ) ;
- les composés azotés ( $\text{NO}_x$ ) ;
- les composés organiques, volatils (COV), irritants ou odorants ;
- les composés soufrés ( $\text{SO}_2$ ) ;
- les composés halogénés ;
- les composés métalliques ;
- les fines particules;
- les particules grossières ;
- L'ozone troposphérique : Si dans les hautes couches de l'atmosphère, au niveau de la stratosphère, la couche d'ozone fait écran à la partie nocive des UV et constitue donc un élément indispensable de l'écosystème terrestre, l'ozone dans les basse couches atmosphérique (troposphère) est un polluant nocif tant pour la santé humaine que pour la végétation[19].

### ▪ Les polluants secondaires :

Les polluants secondaires ne sont pas relâchés tels quels dans l'atmosphère, ils sont produits par des réactions chimiques ou photochimiques (réactions produites ou initiées par la lumière du soleil). C'est le cas de l'ozone, par exemple. Ces réactions se produisent entre polluants primaires ou entre certains polluants primaires et certains composants naturels de l'atmosphère [20].

### II.2 Les sources de la pollution atmosphérique

Les polluants que l'on retrouve dans l'atmosphère peuvent être d'origine naturelle ou anthropique, c.à.d. produits par les activités humaines.

#### II.2.1 : Les émissions naturelles

L'origine de ce type d'émission peut être crustale : due à l'érosion des sols, marine : par le pétillage de la mer, volcanique et plus localement liée aux feux naturels.

##### II.2.1.1 Les poussières crustales

Cette catégorie de poussières résulte de l'action du vent sur les sols dépourvus de végétation ainsi que de l'abrasion des roches, généralement dans les déserts et les régions arides et il est très important dans la mesure où ces zones couvrent environ le tiers de la surface des continents.

La composition chimique des aérosols atmosphériques provenant de l'érosion des sols indique qu'ils sont dans l'ensemble, constitués d'éléments caractéristiques de la croûte terrestre, à savoir Al, Si, Fe, Ti, Ca, Na, Mg et K [21].

##### II.2.1.2 Les sels marins :

Les particules de sels marins prennent naissance lors de l'éclatement des bulles d'air à la surface de l'eau : suite au mouvement des vagues, des bulles d'air se forment et atteignent la surface d'eau. L'éclatement de ces bulles aboutit à la formation de très petites gouttelettes en suspension dans l'air. Pendant leur transport dans l'atmosphère, ces gouttelettes s'évaporent et forment des solutions saturées en sels. Lorsque l'humidité relative est suffisamment basse, un changement de phase intervient et des particules solides sont obtenues [22]. Les éléments les plus caractéristiques dans l'eau de mer sont Cl, Na, les ions sulfates, Mg, Ca et K. A partir de ceux-ci, plusieurs composés sont formés par recristallisation lors de l'évaporation des gouttelettes dans l'atmosphère, avec NaCl comme composé principal, accompagné de KCl, CaSO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et de nombreux autres sels comme les carbonates [23].

##### II.2.1.3 Les éruptions volcaniques :

Les régions volcaniques donnent naissance pendant la durée des éruptions et des émanations permanentes, à des gaz vapeurs et parfois à des particules solides telles que les poussières et les cendres volantes. En général, les populations évitent d'habiter dans ces zones volcaniques qui sont très bien connus. Ce pendant, on relate de nombreux cas où le phénomène survient d'une manière inattendue de sorte que des villes et des régions entières ont été comprises dans les aires affectées par les éruptions.

Les éruptions volcaniques libèrent surtout de grosses quantités de gaz carbonique et de soufre, mais aussi des métaux lourds. On estime que les volcans libèrent en moyenne annuelle dans le monde de 800 à 1400 tonnes de cadmium, 18800 à 27000 tonnes de cuivre, 3200 à 4200 tonnes de plomb, et 1000 tonnes de mercure dans l'atmosphère [24].

### **II.2.1.4 La combustion de la biomasse :**

La combustion de la biomasse sur des grands espaces dans le monde se manifeste par les feux des forêts et des savanes. La différence entre les aérosols naturels et anthropiques produits dans ces conditions est difficile à établir dans la mesure où certains incendies proviennent de catastrophes naturelles alors que d'autres sont causés soit volontairement, soit involontairement par l'homme. La composition de la fumée provenant des feux des forêts varie énormément et est constituée des particules primaires sous forme des cendres et des suies auxquelles s'ajoutent des gaz. Ces gaz ainsi obtenus peuvent conduire à la formation des particules secondaires par conversion gaz-particules. La quantité des particules produites et leur composition dépendent des caractéristiques des bois et végétaux brûlés [23].

### **II.2.1.5 Les particules biogéniques :**

Les particules biogéniques, sont d'origine biologique variable telle que les pollens, les spores, les fragments d'animaux et des plantes, de l'ordre du micromètre, ainsi que les bactéries, les algues, les protozoaires, les moisissures et les virus de taille beaucoup plus petite. Les quantités les plus importantes de ces particules sont observées en plein air entre le printemps et l'automne [23].

### **II.2.2 : Les émissions anthropogéniques :**

Tous les secteurs d'activité humaine sont susceptibles d'émettre des polluants atmosphériques. On peut les classées en plusieurs catégories d'importance variable selon les agglomérations :

#### **II.2.2.1 les industries : [24-26]**

La plus part des branches industrielles sont génératrices de particule dans l'air. Les concentrations les plus élevées en particules dans l'air se rencontrent aux voisinages des installations industrielles. Comme exemple d'industrie responsable des émissions des particules dans l'atmosphère, on peut citer :

- **L'industrie thermoénergétique :**

Elle est basée essentiellement sur la combustion. Celle ci introduit dans l'atmosphère de nombreuses variétés minérales, des métaux et des particules carbonées ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules, tels que les  $\text{NO}_x$  et le  $\text{SO}_2$ . Les combustions incomplètes, assez fréquentes dans les petites installations de production d'énergie et des appareils de chauffage des habitations, sont à l'origine de l'émission d'importantes quantités de particules et d'impuretés de combustible. La combustion est classée en premier rang parmi les sources artificielles des particules dans l'atmosphère.

- **L'industrie sidérurgique :**

Dans ce type d'industrie à cause des impuretés du minerai et de charbon et en raison des opérations technologiques qui ne peuvent être exécutées de façon hermétique, les particules sont émises aux

différentes étapes de production de l'acier. L'agglomération des minerais, la cokéfaction, la fusion, dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport,...etc, sont tous des processus responsables de l'émission de particule sous forme de poussière, dont la plus grande partie est émise par les hauts fourneaux.

### ▪ **La métallurgie des métaux non ferreux :**

Du fait que les métaux non ferreux se trouvent dans les minerais sous forme de composé, en concentration relativement réduite, leur raffinage nécessite de nombreuses opérations au cours desquelles d'importantes quantités de métaux sont émises dans l'atmosphère.

La métallurgie des métaux non ferreux participe à l'émission d'importantes quantités de cuivre, Zinc, Cadmium, Plomb, Nickel, mercure, aluminium, étain, etc.

### ▪ **L'industrie des matériaux de construction :**

Les procédés de production du ciment, ainsi que les autres procédés de fabrication de la magnésie, du plâtre, de la chaux, de laitier, de la brique, de la céramique, du verre, de l'asphalte et de l'amiante sont tous responsables de l'émission d'importantes quantités de particules solides dans l'air. Les cimenteries sont les plus polluantes, du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production [25].

### ▪ **L'industrie chimique :**

L'industrie chimique ne représente pas une source importante de particules solides dans l'atmosphère, mais elle contribue de façon indirecte à la pollution particulaire de l'air du fait des quantités importantes de gaz qu'elle engendre et qui se transforment dans l'air en particules. D'autres branches de cette industrie, peuvent être considérées à l'origine de l'émission de particules solides dans l'air, telle que la production d'engrais minéraux. Les raffineries de pétrole participent aussi à l'émission de certains métaux tels que le vanadium et le nickel contenus dans le pétrole et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques.

### **II.2.2.2 Incinération des déchets:**

Des quantités importantes de produits déjà utilisés (boîtes de conserves, batteries, piles, plastiques, pneus, métaux,...etc.) dont la composition chimique est très diversifiée finissent leurs vies dans les décharges sous forme de déchets. L'incinération de ces derniers engendre l'émission d'importantes quantités de particules. Ces particules peuvent contenir des métaux tels que: Fer, Zinc, Cadmium, Plomb, Mercure, Aluminium, Sodium, etc..., et d'oxydes métalliques divers. L'importance toxicologique de certains métaux émis est considérable [26].

### **II.2.2.3 Le Trafic automobile [23,27] :**

C'est une source de pollution atmosphérique plus diffuse constituée d'une multitude d'émetteurs et donc, plus difficile à maîtriser. Les polluants émis correspondent aux constituants des carburants (hydrocarbures), aux additifs ou impuretés qu'ils contiennent (plomb dans les supercarburants et soufre dans le gasoil), et évidemment aux produits de combustion (monoxyde de carbone CO, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote NO<sub>x</sub>).

## Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

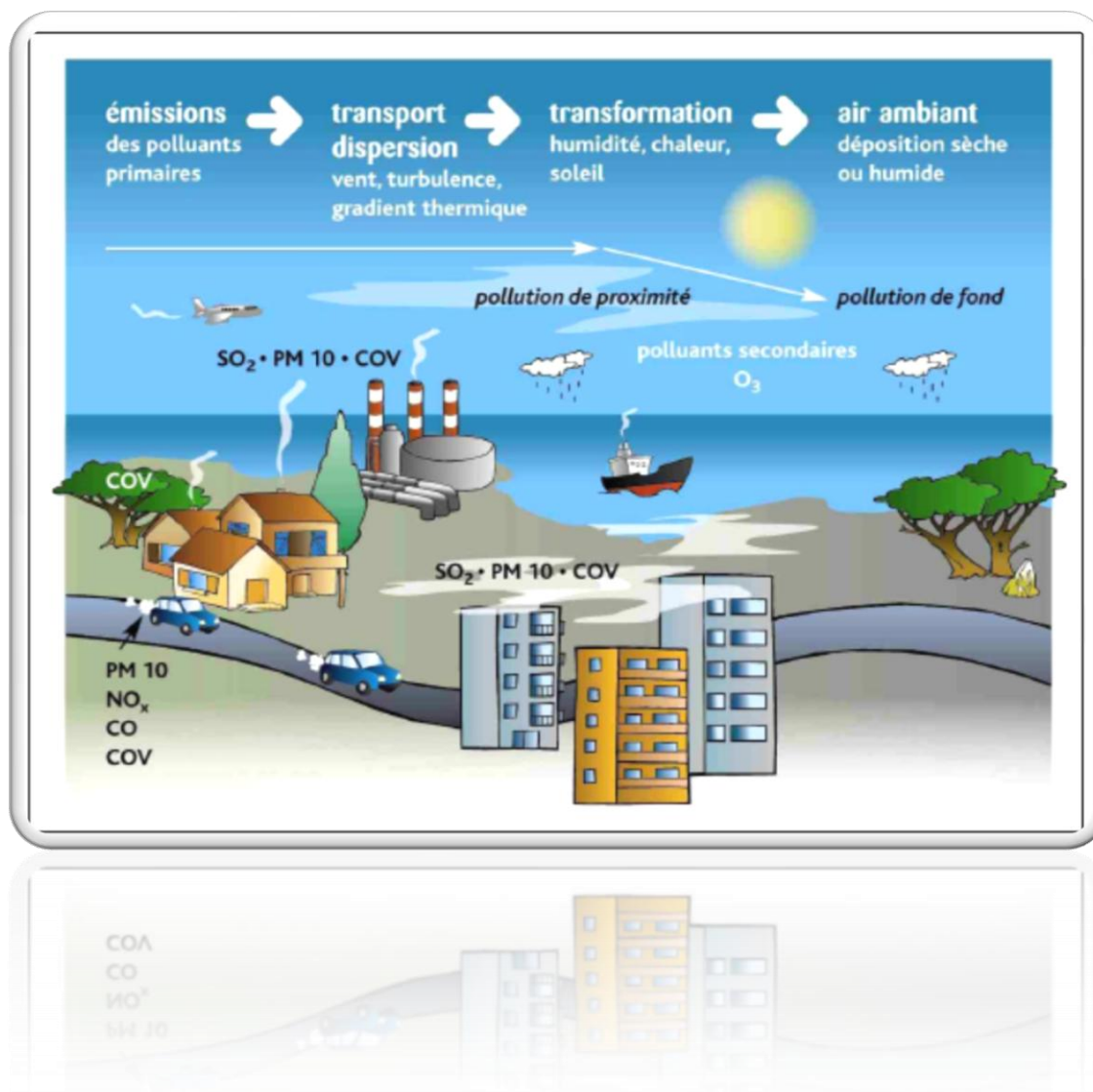
Rappelons que les véhicules de types diesel sont fortement émetteurs d'oxydes d'azote et de particules fines, surtout lorsqu'ils sont mal équipés. Les véhicules diesel plus modernes équipés de moteurs à injection directe ont apportés un progrès non négligeable dans la diminution des émissions.

Par ailleurs, les phénomènes d'évaporation lors du stockage et de la distribution des carburants contribuent à la présence dans l'atmosphère de composés organiques volatils.

### II-3 Le processus de la pollution atmosphérique :

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'air. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions des rejets polluants ainsi que des conditions météorologiques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces mêmes polluants. Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère qui représente la plus basse couche de l'atmosphère [27].

Les processus qui régissent la pollution atmosphérique s'échelonnent en 4 étapes (**Figure I.2**):



**Figure I.2** Mécanisme de la pollution atmosphérique [28]

### II.3.1 L'émission :

Les émissions des polluants ont une forte influence sur la qualité de l'air. Les polluants primaires, dont les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PM) et certains composés organiques volatils (COV), sont directement émis dans l'atmosphère. Ils proviennent aussi bien des sources fixes (incinération des déchets, chauffages urbains, activités industrielles, domestiques ou agricoles) que des sources mobiles, en particulier les automobiles [29].

### II.3.2 Le transport :

Les polluants gazeux ou aérosols peuvent être transportés à des distances variables par les vents et les courants atmosphériques. La dispersion des polluants dans l'air résulte de nombreux facteurs. Cependant, la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air: si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent rester faibles malgré des rejets importants. Par contre, si la dispersion se fait mal, des émissions relativement limitées peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air [30]. Le phénomène de dispersion est primordial puisqu'il détermine l'accumulation d'un polluant ou sa dilution dans l'atmosphère.

### II.3.3 La transformation :

Le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère dépend de leur capacité à se déposer sous forme sèche (sol, végétaux) ou humide (dissolution ou lessivage) ou à se transformer chimiquement. Cette transformation peut être provoquée par leur mélange dans l'atmosphère ou par une exposition à des conditions météorologiques particulières. Ainsi, la combinaison d'oxydes d'azote et des composés organiques volatils en présence des rayonnements ultraviolets conduit à la formation de photos oxydants puissants, tels que l'ozone [31].

### II.3.4 L'immission :

L'immission est le résultat des trois étapes décrites ci-dessus et désigne les taux de pollution mesurés dans l'air ambiant. Les polluants dits « primaires » sont directement émis et se retrouvent de ce fait en grande quantité près des sources d'émissions. Il s'agit d'une pollution dite de proximité. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne des sources, ces polluants primaires diminuent en concentration par effet de transport et de transformation pour laisser place aux polluants «secondaires », créés suite à ces transformations. Parmi ces quatre étapes, deux font l'objet d'une réglementation stricte : les émissions et les immissions [31].

## II.4 La pollution atmosphérique particulaire :

### II.4.1 Définitions et caractéristiques des particules atmosphériques :

Le mot « particule » a plusieurs significations selon le domaine concerné (chimie, physique...). Ainsi dans le domaine de la protection de l'environnement, une particule désigne une petite partie de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ou déposée sur une surface et susceptible de se mettre en suspension. Les particules en suspension ne forment pas un seul et unique polluant de l'air, mais représentent plutôt une classe des polluants constituée de plusieurs sous classes variant dans une

gamme de granulométrie de  $0.005\mu\text{m}$  à environ  $100\mu\text{m}$ . Chaque sous-classe de particule peut être constituée ou contenir différentes espèces chimiques. Ainsi, selon leur origine, les particules ont une gamme de taille et une composition physico-chimique très variables, c'est pourquoi différentes terminologies existent pour classer, définir ou nommer une classe des particules polluantes [32].

**II.4.2 Les différentes classes des particules :** Selon la granulométrie, on a plusieurs classes de particules :

- **Les particules totales en suspension :**

Ou total suspended particulates (TSP), représentent « toutes les particules en suspension dans un volume d'air » [33,34]. Aux États-Unis, les TSP sont définies comme les particules de diamètre aérodynamique inférieur à  $40\mu\text{m}$ , alors qu'en Europe, elles désignent toutes les particules en suspension inférieures à  $100\mu\text{m}$ . Les TSP sont représentatifs de la fraction inhalable des particules de l'air, c'est-à-dire des particules pénétrant le corps humain par le nez ou la bouche. Cependant, une partie de TSP est constituée de particules trop larges pour pénétrer le système respiratoire humain, cet indicateur n'est de ce fait pas bien adapté pour caractériser l'impact potentiel sur la santé.

- **Les  $\text{PM}_{10}$  :**

Les  $\text{PM}_{10}$  ou particulate matter (PM), sont des particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à  $10\mu\text{m}$ . Cette classe de particule peut pénétrer le système respiratoire humain, et pour cette raison, la US Environmental Protection Agency (EPA) a défini en 1987 les  $\text{PM}_{10}$  comme mesure standard de la qualité de l'air. La Communauté européenne a également mis en place la directive 1999/30/CE du 22 avril 1999 pour la mesure des  $\text{PM}_{10}$  en remplacement des TSP. Il n'existe pas de méthode universelle de conversion entre  $\text{PM}_{10}$  et TSP, mais l'EPA considère que les  $\text{PM}_{10}$  représentent 40 à 70 % en masse des TSP, alors que la directive européenne propose une relation simple entre les deux indicateurs :  $\text{TSP} = 1,2 \text{PM}_{10}$

- **Les  $\text{PM}_{2,5}$  :**

Les  $\text{PM}_{2,5}$  représentent les particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à  $2,5\mu\text{m}$ . Cette classe de particule qui pénètre les alvéoles pulmonaires représente un facteur pertinent pour qualifier la qualité de l'air d'un point de vue sanitaire. Ainsi, afin de dégager des tendances entre impact sur la santé et taille des particules, certaines études épidémiologiques définissent une sous-classe  $\text{PM}_{10-2,5}$ , ou coarse particules (CP), qui représente les particules de taille inférieure à  $10\mu\text{m}$  et supérieure à  $2,5\mu\text{m}$ .

- **Les  $\text{PM}_1$  :**

Les  $\text{PM}_1$  constituent la classe des particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à  $1\mu\text{m}$ . Cette classe des particules fait l'objet d'études spécifiques en termes d'échantillonnage et d'impact sur la santé, elle n'est toutefois pas préconisée par les normes et décrets existants.



### ▪ Les $PM_{0,1}$ :

Les **particules ultrafines**, ou **PUFs** ou encore  **$PM_{0,1}$**  sont des particules de dimension nanométrique (moins de  $0,1\mu m$  de diamètre) ; si petites qu'elles se comportent comme des gaz. Elles ont des origines naturelles (incendies de forêt, volcanisme, érosion éolienne...) et anthropiques (échappement des moteurs et chaudières, raffineries, usure des pneus, peintures, freins et autres sources mécanique, soudure et autres systèmes fonctionnant à systèmes haute température, etc.). En raison de leur taille minuscule, les PUF sont respirables. À la différence des  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  inhalées, elles ne se déposent qu'en partie dans les poumons, ce qui fait qu'en même temps que l'oxygène de l'air, elles pénètrent dans le réseau sanguin et de là dans la lymphe et potentiellement dans tous les organes du corps.

### ▪ Les poussières :

Les poussières définissent l'ensemble des particules solides en suspension dans l'air. Le terme poussière regroupe en fait les particules solides totales en suspension (TSP solide). Le terme anglais « dust » désigne les particules de dimension inférieure à  $75\mu m$  issues de processus mécaniques.

### ▪ Les fumées noires :

Elles sont constituées des particules carbonées de diamètre inférieur à  $5\mu m$ .

### ▪ Les suies :

Ce sont des particules de carbone et de produits de combustibles qui ne brûlent pas complètement;

### ▪ Les brouillards et brumes :

Les brouillards et brumes sont formés par une suspension de gouttelettes dans l'air. La brume est formée par une suspension de gouttelettes liquides de taille supérieure à  $1\mu m$  dans l'air et correspond à des conditions de visibilité de 1 à 2 km. Selon les conventions internationales, lorsque les conditions de visibilité sont inférieures à 1 000 m, le terme de brouillard est utilisé.

### ▪ Les aérosols :

Les aérosols représentent des particules solides et/ou liquides en suspension dans un gaz dont la vitesse de chute est négligeable. La notion d'aérosol est équivalente à celle des particules totales en suspension dans l'air ambiant pour des conditions de vent faible. Les aérosols englobent les poussières, les brumes et brouillards, et les aérosols microbiens [35].

### II.4.3 Composition chimique des particules :

Un autre critère de classification des particules en suspension est la composition chimique. Les particules ont des compositions chimiques différentes selon leur origine. Elles sont généralement composées de :

- Sels sous la forme nitrates, sulfates, carbonates, chlorures, etc. ;
- Composés carbonés organiques (HAP, oxydes, composés organiques condensables, etc).
- Des éléments traces tels que les métaux lourds, etc.
- Carbone suie (ou black carbon, noté BC en anglais) : Le carbone suie est liée aux combustions incomplètes de combustibles fossiles et de la biomasse.

### II.4.4 Le temps de séjour des particules dans l'atmosphère :

Les particules peuvent demeurer dans l'atmosphère plus ou moins longtemps, selon leur taille et leur stabilité. D'autres facteurs peuvent influencer sur leur durée de séjour dans l'air, par exemple les précipitations qui accélèrent leur élimination de l'atmosphère.

- Les particules grossières (fraction des PM de taille comprise entre 10 et 2,5 micromètres) retombent lentement. À titre d'exemple, la vitesse de chute d'une particule de diamètre aérodynamique de 10  $\mu\text{m}$  est de 3 mm/s en air calme [36], ce qui est faible par rapport à des courants d'air pouvant à tout moment les remettre en suspension. En l'absence de tout mouvement d'air, la durée de séjour dans l'air de ces particules grossières est de l'ordre de 1 jour.
- Ce sont les particules très fines (fraction des PM de taille comprise entre 1,0 et 0,1 micromètre) qui restent le plus longtemps en suspension dans l'atmosphère, jusqu'à 1 semaine environ. Elles peuvent ainsi être transportées sur des longues distances. Elles ne sont pratiquement éliminées que par les précipitations et ont le temps de s'accumuler dans l'air.
- Dans le cas des particules ultrafines (ou nanoparticules  $\text{PM}_{0,1}$ ), d'autres facteurs, qui accélèrent leur élimination de l'atmosphère, interviennent. Leur durée de séjour est très courte, de l'ordre de quelques minutes à quelques heures [37].

### II.4.5 Les effets des particules en suspension :

**II.4.5.1 Sur la santé humaine :** L'évaluation des émissions de particules revêt un grand intérêt compte tenu de leurs actions nocives sur la santé humaine et sur l'environnement. Les particules posent des problèmes spécifiques par rapport aux polluants gazeux, principalement en raison de la sélectivité de l'inhalation et du dépôt dans les voies respiratoires. Ils ont un double effet sur la santé [35] :

#### **a-Effet lié à leur taille :**

- Les particules de plus de 10 $\mu\text{m}$  sont retenues dans les voies respiratoires supérieures et rapidement rejetées ;
- Les particules de diamètre compris entre 3 et 10 $\mu\text{m}$  se déposent au niveau de la trachée et des bronches.
- Les particules moins de 3 $\mu\text{m}$  atteignent les alvéoles pulmonaires et peuvent même pénétrer dans la circulation sanguine [38]. Il se dégage un consensus pour considérer que l'essentiel des effets sanitaires liés à la pollution atmosphérique particulaire est le fait de ces particules fines.

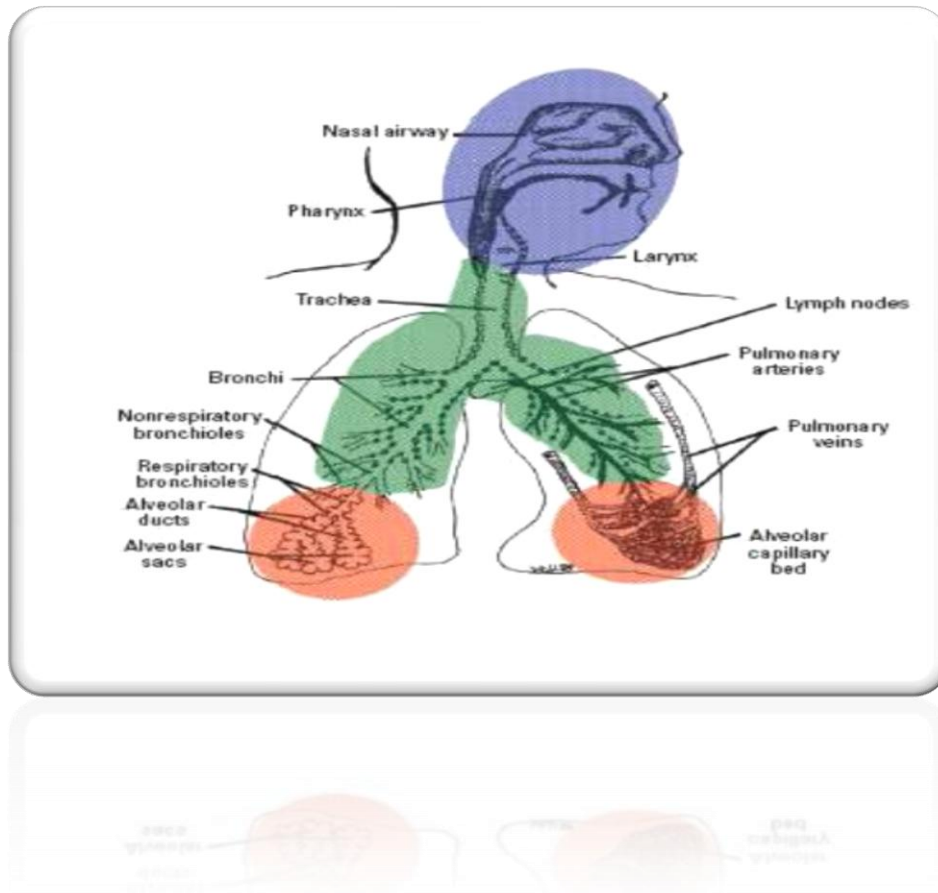


Figure I.3 Appareil respiratoire et pénétration des particules inhalées en fonction de la taille [39].

Tableau I.2 : Organes exposés aux particules fines [40]

Organes exposés	Dimensions des particules
Nez et gorge	5-10 $\mu\text{m}$
Trachée - artère	3 - 5 $\mu\text{m}$
Bronches	2 - 3 $\mu\text{m}$
Bronchioles	1 - 2 $\mu\text{m}$
Alvéoles (vésicules pulmonaires)	0,1 - 1 $\mu\text{m}$

## Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

### **b-Effet lié à leurs caractéristiques toxicologiques, physicochimiques et microbiologiques :**

- Les particules contiennent des produits nocifs pour la santé tels que les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
- La nocivité dépend également de l'état cristallographique, de la surface des composés et de leur solubilité ;
- Les particules peuvent transporter des micro-organismes vivants tels que moisissures, bactéries ou virus, ainsi que des fragments microbiens, voire des composés organiques volatils d'origine microbienne(COVm). Ces « particules biologiques » soumises aux mêmes lois physiques que les particules inertes peuvent avoir des effets néfastes sur la santé (légionellose, pneumopathie, intoxication...).

Les effets de la pollution atmosphérique dépendent de la quantité de polluant avec lequel l'organisme est en contact ; on parle de «dose». Cette dose varie en fonction de 3 facteurs :

- La concentration des polluants dans l'atmosphère :

Une étude épidémiologique réalisée dans l'union européenne en 2000 pour l'OMS a montré une corrélation entre l'augmentation de la mortalité et de la morbidité et la hausse de la quantité des particules atmosphériques [41].

- La durée de l'exposition :

Les données d'une étude réalisée par l'ACS (American Cancer Society), ont permis de montrer une corrélation entre des expositions prolongées à des particules fines et des cancers du poumon [42].

Le tableau ci dessous illustre les effets à court et à long terme. Une exposition de longue durée à des niveaux moyens de particules fines est nettement préjudiciable pour la santé qu'une exposition passagère à des niveaux élevés.

**Tableau I.3 :** Effets des particules à court et à long terme [38]

Effets à court terme	Effets à long terme
Réactions inflammatoires au niveau des poumons	Accroissement des affections des voies respiratoires inférieures
Symptômes respiratoires	Réduction des fonctions pulmonaires chez l'enfant et l'adulte
Affections du système cardio – vasculaire	Augmentation des maladies pulmonaires obstructives chroniques
Augmentation de la prise des médicaments	Diminution de l'espérance de vie,

Augmentation du nombre d'hospitalisations

principalement par mortalité lié aux

Accroissement de la mortalité

affections cardio-pulmonaires et

probablement par mortalité liée au cancer

du poumon

- L'intensité de l'activité physique.

Les troubles se manifestent principalement chez les personnes sensibles que sont :

- ➔ Les enfants.
- ➔ Les personnes âgées.
- ➔ Les asthmatiques, les insuffisants respiratoires, les cardiaques, les bronchitiques chroniques
- ➔ Les fumeurs.
- ➔ Les femmes enceintes.
- ➔ Les professionnels en contact avec des produits chimiques (garagistes, métiers du bâtiment, agents de l'industrie...)[43].

### II.4.5.2 Sur les écosystèmes :

Les êtres humains ne sont pas les seuls à être touchés par la pollution de l'air. Les plantes, les animaux et les bâtiments peuvent également subir les répercussions de la pollution atmosphérique. Les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement peuvent se ressentir à différentes échelles géographiques. Les polluants atmosphériques ont de lourds impacts sur les cultures et les écosystèmes. Par exemple lors des forts épisodes de pollution à l'ozone, des nécroses ou des tâches apparaissent sur les feuilles des arbres. Sur une période d'exposition prolongée à l'ozone, un affaiblissement des organismes et un fort ralentissement de la croissance est observé, et à terme cela impacte les cultures agricoles. Les polluants peuvent également parcourir des distances importantes et atteindre des écosystèmes sensibles. Sous l'effet des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les pluies, neiges, brouillard deviennent plus acides [44] et altèrent les sols et les cours d'eau (perte des éléments minéraux nutritifs). Ces apports engendrent un déséquilibre de l'écosystème. Cette transformation du milieu se traduit en général par un appauvrissement de la biodiversité puis par la perturbation du fonctionnement général des écosystèmes.

### II.4.5.3 sur le climat :

Les aérosols jouent un rôle important sur le climat car ils participent au bilan radiatif de la terre ; ils ont des effets directs en agissant directement avec le rayonnement solaire, et des effets indirects en modifiant les propriétés des nuages. En effet, les particules atmosphériques diffusent, et éventuellement absorbent la lumière du soleil. Il ya donc une perte de lumière avant qu'elles n'atteignent le sol, directement liée à la taille des particules. Elles influent également sur la nébulosité

et la pluviométrie en participant à la formation des nuages ainsi qu'à leur durée de vie : Les très fines particules servent de noyaux de condensation, c'est-à-dire que la vapeur d'eau présente dans l'air va se condenser à leur contact et former des gouttelettes dans les nuages, pouvant donner des précipitations si leur taille augmente suffisamment. Enfin, les aérosols influent sur le climat par leur implication dans les épisodes de la pollution photochimique. Il est donc primordial de les prendre en compte dans le cadre de l'étude du réchauffement climatique [45,46].

### II.4.5.4 Sur les bâtisses

Le processus d'altération des bâtiments résulte de l'action combinée des différents éléments atmosphériques ayant pour effet de modifier la couleur, la texture, la composition ou la forme des édifices qui y sont exposés, conduisant finalement à une perte de matière et à un aspect inesthétique du patrimoine bâti. Néanmoins, les particules, essentiellement carbonées (suies et cendres volantes), sont principalement responsables du noircissement des façades. Elles se déposent à la surface des édifices et conduisent à leur empoussièrement et à la formation de croûtes noires [47].

## II.5 La pollution atmosphérique par les métaux lourds :

### II.5.1 Généralités :

On appelle en général « métaux lourds », les métaux de densité supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$ .leur toxicité est signalé dans divers documents, arrêtés, directives européennes, conventions internationales, OMS, etc. Les composés métalliques sont émis dans l'atmosphère par des sources naturelles dont les plus importantes sont les volcans, les embruns marins et l'érosion. Ils résultent également d'activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles (industrie, chauffage, transport), la métallurgie, l'incinération des déchets, etc [48]. Les métaux lourds se caractérisent par leur persistance, leur toxicité et leur pouvoir d'accumulation dans le milieu naturel. De plus, ils peuvent être transportés dans l'atmosphère et se déposer dans des régions éloignées du lieu d'émission. Ils peuvent également être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus.

Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles, on dit que les métaux sont présents en traces. Les métaux lourds émis dans l'air sont les plus souvent des composants des particules polluantes. Leur toxicité est en fonction de :

- La taille des particules aux quels ils appartiennent et des combinaisons chimiques.
- Leur concentration,
- Le type d'organisme qu'ils affectent.

Ils sont classés comme générateurs de nuisances [49].

### II.5.2 Effets des métaux lourds :

Les métaux lourds sont des polluants particulièrement toxiques pour la santé humaine. Cette toxicité est renforcée par un phénomène d'assimilation et de concentration dans l'organisme qu'on appelle la bioaccumulation. Les métaux lourds ne sont pas dégradables. Ils peuvent pénétrer dans l'organisme par ingestion, mais également par inhalation. Les effets toxiques ne se manifestent qu'au-delà de

certaines doses [50]. Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), le zinc (Zn). Quelques métaux comme le Zn, Cu, Mn et Fe, sont indispensables à la croissance et au bien-être des organismes vivants. On peut néanmoins s'attendre à ce qu'ils aient des effets toxiques quand les organismes sont exposés à des niveaux de concentrations supérieures à ceux qu'ils requièrent normalement. D'autres éléments, comme le Pb, Hg et Cd, ne sont pas indispensables aux activités métaboliques et manifestent des propriétés toxiques [51].

### 1. Le mercure :

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 [43].

Les effets du mercure sur la santé dépendent de sa forme chimique (inorganique, organique et élémentaire). Les sels de mercure (forme inorganique), très irritants, provoquent des ulcères sur les lèvres et la langue, des troubles gastro-intestinaux et une insuffisance rénale. Le méthylmercure (MeHg, forme organique) se concentre le long des chaînes alimentaires. Très facilement absorbé par le tube digestif, il est ensuite distribué dans tout le corps et en particulier dans le cerveau, où il peut s'accumuler pendant une longue période et provoquer, chez l'adulte, des changements de personnalité, des tremblements, des troubles de la vision, une perte de coordination musculaire et de sensation, ainsi que des pertes de mémoire. Cette intoxication chronique ou « maladie de Minamata » peut être mortelle. Les vapeurs de mercure (forme élémentaire) provoquent, à faibles concentrations, des symptômes similaires à ceux associés au MeHg. Mais, à fortes concentrations, elles peuvent causer des lésions dans la bouche, les voies respiratoires et les poumons, s'accompagnant d'une insuffisance respiratoire pouvant être mortelle [57].

### 2. Le plomb :

Le plomb était utilisé dans les années 90 comme additif antidétonant dans les essences, il se trouvait principalement dans les gaz d'échappement des véhicules à essence. Il provient aussi de la sidérurgie, des industries du décapage et de traitement des métaux, de l'incinération des déchets, de la combustion du bois, des cimenteries, des véneries et des industries de fabrication des accumulations. Dans les villes, 90% du plomb est émis par les véhicules; 10% du plomb se répand dans un rayon de 100 m autour de la route, le reste est largement dispersé [52]. L'exposition au plomb peut entraîner des effets nocifs sérieux sur la santé, et peut même être mortelle à de fortes doses. Le plomb peut s'accumuler dans le corps, et son exposition, même à de très faibles doses, peut s'avérer dangereuse. Le plomb est particulièrement nocif pour les nourrissons, les jeunes enfants et les femmes enceintes, et peut nuire de façon permanente au développement des enfants, y compris le développement intellectuel et le développement comportemental [53].

### 3. Le Cadmium :

Le cadmium est un élément naturel présent dans certains minerais (notamment le zinc) sous forme d'impuretés. Ce métal a été utilisé dans les batteries, pour protéger l'acier contre la corrosion (cadmiage), ou comme stabilisant pour les plastiques et les pigments. Les sources d'émissions du cadmium dans l'air sont les fonderies de zinc, la métallurgie, l'incinération des ordures ménagères, la combustion de combustibles fossiles, les industries de la céramique, de la porcelaine et de la peinture (utilisation dans les pigments de peintures), l'agriculture, ainsi que l'usure des pneumatiques, des avions et des véhicules. La toxicité du cadmium résulte principalement de l'inhibition des enzymes thiols ainsi que de son affinité pour les hydroxyles et les carboxyles. Il est également l'agent étiologique de la maladie qui se manifeste par des troubles osseux et l'augmentation du taux de phosphatase alcaline [54]. L'exposition chronique à de faibles doses en cadmium provoque des dommages aux tubules rénaux, suivis de protéinurie, lésions pulmonaires, hypertension artérielle [55], de plus les oxydes, chlorures, sulfates et sulfures de cadmium sont classés cancérigènes [56].

### 4. L'arsenic :

C'est un métal qui en intoxication aiguë provoque la mort en 12 à 48 heures. Après inhalation et ingestion, rapidement assimilé, il s'accumule en particulier dans les muscles et les tissus comme la peau, les ongles ou les cheveux. En intoxication chronique l'arsenic entraîne des problèmes dermatologiques, il a aussi des effets tératogènes (mal formation de fœtus) et cancérigènes.

La principale source d'intoxication chronique dans le monde semble être l'eau de forage qui dans plusieurs pays ou régions est naturellement chargée en arsenic. Selon une étude publiée en 2007, plus de 137 millions de personnes, vivant dans plus de 70 pays sont probablement affectées par une intoxication chronique à l'arsenic à partir de l'eau de boisson [68].

### 5. Le nickel :

Le nickel et ses composés minéraux proviennent des branches industrielles suivantes :

- Le revêtement électrolytique des métaux.
- La fabrication d'aciers inoxydables.
- L'élaboration de nombreux alliages.
- La désulfuration des produits de pétrole
- Les batteries d'accumulations alcalines, etc.

Le nickel est considéré comme un élément carcinogène, jouant un rôle d'initiateur et de promoteur, provoquant des cancers des sinus, des fosses nasales et des bronches chez les sujets fortement exposés. Les autres phénomènes constatés concernent surtout les allergies cutanées et l'effet tératogène du nickel-carbonyle [20].

### 6. Le chrome :

Le chrome est utilisé sous forme de chromite  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  dans les industries métallurgiques et dans l'industrie chimique. On le trouve également sous la forme de ferrochrome, utilisé pour la production d'aciers inoxydables et d'alliages divers. Il est admis que le  $\text{Cr}(0)$  est relativement inerte et peu toxique.



Le Cr(III) est communément considéré comme élément trace essentiel ayant un rôle dans le métabolisme du glucose, des protéines et des lipides. Son rôle n'est toutefois pas clairement caractérisé et son caractère essentiel ne fait pas l'objet d'un consensus [66]. Les composés du Cr(VI) sont des puissants oxydants et donc potentiellement irritants et corrosifs et ont également une toxicité systémique plus importante que les composés du Cr(III) [67].

### 7. Le cuivre :

Le cuivre est un élément essentiel pour la santé ; il favorise la production d'hémoglobine [64]. La concentration du cuivre dans l'écorce terrestre est estimée à environ 70 ppm. Les principales sources d'exposition au Cu sont les érosions éoliennes, les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts, les embruns marins, l'industrie du bois, l'incinération des ordures ménagères, La combustion du charbon, d'huiles et d'essence, la fabrication des fertilisants [65]. Une exposition au cuivre à long terme peut provoquer une irritation du nez, de la bouche et des yeux ainsi que des maux de tête, des maux d'estomac, des vertiges, des vomissements et des diarrhées.

### 8. Le manganèse :

Le manganèse en lui-même n'est pas considéré comme toxique aux concentrations ambiantes [60,61]. Les teneurs rencontrées dans l'air ambiant sont en majorité dues à l'érosion des sols. Il a été émis par les échappements automobiles entre 1975 et 1978 lors de son utilisation comme additif antidétonant en substitution du plomb et sous forme de méthylcyclopentadienylmanganèse tricarbonyle (MMT) [62], incorporé dans les essences, à raison de 0.03 g/l.

Les risques de bouchage des supports catalytiques l'on fait abandonner comme additif [63]. A forte dose, comme dans les mines de Mg, il peut occasionner pneumonie et atteinte du système nerveux central [20].

### 9. Le zinc :

Le zinc est un oligo-élément qui est présent naturellement. Beaucoup d'aliments contiennent du zinc. L'eau potable contient aussi une certaine quantité de zinc, qui peut être plus élevée lorsque l'eau est stockée dans des réservoirs en métal. Il n'est généralement pas considéré comme un élément toxique aux concentrations couramment rencontrées dans l'air, il inhiberait même l'effet toxique de métaux comme le cadmium et le cuivre [58]. Il joue un rôle essentiel dans le métabolisme de l'être humain. Le corps humain contient 2 à 3 g de zinc (pour 7 g de fer), que l'on retrouve partout dans le corps mais avec toutefois des concentrations plus élevées dans les muscles, le foie, les reins, les os et la prostate.

La dose journalière de zinc recommandée est de 12 mg/jour pour une femme adulte et de 15mg/jour pour un homme adulte. Lorsqu'on absorbe trop peu de zinc on peut alors avoir une diminution des sensations de goût et d'odeur, les blessures cicatrisent lentement et on peut avoir des plaies [48]. Trop de zinc peut tout de même provoquer des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie, endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines. Une exposition intensive au chlorure de zinc peut provoquer des désordres respiratoires[59].

### II.6 Législation concernant la pollution atmosphérique

L'Algérie a établi un arsenal juridique pour lutter contre la pollution de l'air, notamment la loi N° 03-10 du 19 Juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Le chapitre 2 de cette loi est entièrement dédié à la protection de l'air et de l'atmosphère. En outre, le décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 confie la surveillance de la qualité de l'air à l'observatoire national de l'environnement et du développement durable et donne les définitions suivantes [69] :

**Objectifs de qualité :** Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère, fixée sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée.

**Valeur limite :** Un niveau maximal de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base des connaissances scientifiques.

**Seuil d'information :** Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé des catégories de la population particulièrement sensibles.

**Seuil d'alerte :** Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.

**Centile 98 :** Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 175 heures de dépassements autorisés par année civile de 365 jours.

**Centile 99,9 :** Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 24 heures de dépassements autorisés par année civile de 365 jours.

Le Décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 définit les objectifs et les valeurs limites de la qualité de l'air.

## Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

### II.6.1 Normes des particules en suspension dans l'air :

#### ❖ TSP :

**Tableau I.4 :** Les normes des TSP dans l'air.

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

#### ❖ PM10 :

**Tableau I.5 :** Les normes des PM10 dans l'air.

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

#### ❖ PM2.5 :

**Tableau I.6 :** Les normes des PM2.5 dans l'air.

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

### II.6.2 Normes de quelques métaux lourds présents dans l'air [43] :

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

Métal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	OMS	Directive Européenne
As	/	0.006
Cd	0.005	0.005
Mn	0.15	/
Ni	0.02	0.02
Pb	0.5	0.9

### II.7 Les paramètres influençant la dispersion des polluants

#### II.7.1 Facteurs météorologiques

Le climat est identifié comme un facteur influant sur la qualité de l'air, ayant un impact sur le comportement des polluants dans l'atmosphère. La qualité de l'air n'est pas seulement dépendante de la quantité de polluants émise par les sources, elle est également liée aux conditions climatiques, météorologiques, topologiques et morphologiques du milieu. Une fois émise par une source de polluant, son évolution dans l'atmosphère est dépendante du vent, de la stabilité de l'atmosphère, du rayonnement solaire, de la topographie et morphologie du milieu [70].

##### II.7.1.1 Le vent

Le vent, sa vitesse, sa direction sont très importants. Un vent fort permet de disperser les polluants. De ce fait, de fortes concentrations sont peu probables dans ces conditions. Toutefois, il peut également amener des masses d'air contenant des polluants en provenance d'autres sources. La direction du vent joue un rôle important dans le déplacement des polluants. Son rôle s'explique plus dans sa relation avec la topographie du site. En effet, la direction du vent influence directement le déplacement de polluant. Si le vent est stoppé par un obstacle, tel qu'un versant de montagne, on peut assister à une stagnation de polluant sur ce flanc, ou une remontée de la pollution sur le versant [19].

##### II.7.1.2 La température

La température agit sur la chimie des polluants. Le froid diminue la volatilité de certains gaz tandis que la chaleur estivale est favorable à la formation photochimique de l'ozone. La température a un effet sur la vitesse de déplacement et de réaction des molécules. Plus la température est élevée, plus les molécules ont de chances d'entrer en collision puisqu'elles se déplacent plus rapidement. De même, plus la température est élevée, plus les collisions produisent de réaction. Autrement dit, une hausse de la température accroît la vitesse des polluants de l'air [71].

### II.7.1.3 La pression

La pression dans le cas de situations dépressionnaires (basse pression) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion.

En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution.

### II.7.1.4 L'humidité

L'humidité joue un rôle dans le «captage» des particules polluantes, les gouttelettes d'eau en suspension retiennent les polluants, ce qui accroît leur stagnation [19].

La présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère est considérée comme un facteur météorologique défavorable au phénomène d'auto purification de l'atmosphère parce qu'elle empêche la dispersion des polluants [72].

### II.7.1.5 La nébulosité

Elle est responsable de la formation d'un «couvercle» au dessus d'une zone polluée. Elle réduit également l'apport radiatif du soleil, ce qui tend à diminuer les transformations physico-chimiques des polluants primaires [65].

### II.7.1.6 Les précipitations

La pluie lave l'atmosphère des particules et des gaz, pour les déposer ensuite sur le sol et dans l'eau ; les précipitations sont généralement associées à une atmosphère instable, qui permet également une bonne dispersion de la pollution atmosphérique. Elles peuvent parfois accélérer la dissolution de certains polluants. Mais, globalement, les concentrations en polluants dans l'atmosphère diminuent nettement par temps de pluie notamment pour les poussières et les éléments solubles tel que le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) [65].

### II.7.2 Facteurs topographiques :

Les effets de la topographie sont aussi importants dans les mécanismes de diffusion et dispersion des polluants. La stabilité atmosphérique combinée à une topographie complexe empêche la circulation de l'air et donc l'évacuation des polluants [19].

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

Sur les zones littorales, la nuit, les masses d'air ne se déplacent pas dans le même sens que de jour. En effet, durant la journée la brise de mer ramène les polluants sur les côtes. Mais de nuit, ce phénomène s'inverse car le sol se refroidit plus vite que la mer. La pollution est alors envoyée sur la mer (**figure I.4**).



**Figure I.4** Phénomènes de brise côtière - Brise de mer le jour, brise de terre la nuit [73]

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

la vallée la nuit [74].



**Figure I.5** Phénomènes de brises de vallée - Brise montante le jour, brise descendante la nuit [73]

### III : Aspect théorique d'échantillonnage:

Divers équipement existent aujourd'hui qui admettent de dériver des informations sur la qualité de l'air autant dans l'espace que dans le temps. Ils affrontent aujourd'hui des problèmes de validation et de limitation. La difficulté primordiale est le manque des stations de mesures. On ne peut pas doter chaque ville, quartier, rue et place de dispositifs de contrôle de la qualité de l'air en raison de leur coût élevé. Or la variation de la répartition spatiotemporelle des concentrations des polluants est élevée et un suivi optimal nécessite des constatations spatialement et temporellement denses [75].

### III.1 Choix du site de prélèvement :

Le choix d'un site de prélèvement est en fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller. L'objet de la surveillance étant notamment d'apprécier le risque individuel d'exposition des êtres humains à des niveaux élevés de pollution. Il est nécessaire de sélectionner des sites représentatifs de type de pollution et de niveaux d'exposition.

Une station urbaine dense doit rendre compte d'une exposition moyenne et de longue durée en zone urbanisée et fournir une représentation spatio-temporelle fiable du champ de pollution dans lequel évoluent les citoyens. Elle ne doit donc pas être influencée directement par des sources industrielles ou automobiles mais doit être installée de façon à être représentative du niveau ambiant général, pour une densité de population suffisante [76].

### III.2 Prélèvement et échantillonnage :

Généralement l'échantillonnage des particules en suspension se fait sur filtres et membranes par filtration de l'air ambiant. Selon les recommandations de la commission européenne de l'environnement, concernant la surveillance des émissions de particules fines, les prélèvements doivent tenir compte de certains critères qui varient selon le type de site à étudier (site urbain, trafic routier, site industriel, etc...).

La représentativité des prélèvements est fonction de la qualité de gestion des contraintes liées à l'échantillonnage et aux entraînements des particules dans l'appareil. Quelque soit le mode d'échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n'est égal à 100% que pour les tailles approximativement inférieures à  $3\mu\text{m}$ , au delà de cette dimension, l'efficacité de la collecte des divers dispositifs est influencée aussi bien, par les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent que par les conditions de prélèvement tels que le débit d'aspiration, la position et les conditions du dispositif de captage.

Ainsi, la géométrie de la tête de prélèvement et le débit d'air échantillonné conditionnent à la fois le diamètre des particules recueillies sur le filtre et le degré d'influence du vent sur l'efficacité d'échantillonnage [77].

Ils n'existent pas d'instrument idéal capable de mesurer à la fois la masse, les dimensions et la nature des particules. Diverses méthodes permettent de mesurer une partie seulement de leurs caractéristiques. Par ailleurs, les techniques de mesures peuvent déboucher sur des résultats de concentration notablement différents selon que le filtre est pesé par simple gravimétrie, examiné par réflectométrie ou analysé par méthode automatique (absorption par rayonnement ou microbalance oscillante).

Les particules en suspension peuvent être prélevées soit par aspiration d'un volume d'air au moyen d'une pompe, soit par dépôt passif sur un support de collecte.

Dans le cas d'un prélèvement passif, l'échantillonnage se fait par dépôt naturel (dépôt sec par gravité ou dépôt humide par les précipitations) sur un support de collecte conçu à cet effet. Les supports les plus utilisés sont les plaquettes de dépôt et les collecteurs de précipitation (jauge Owen) [78].

Dans le cas d'un prélèvement par aspiration on peut distinguer trois catégories :

## Chapitre I : Généralités: Pollution Atmosphérique

### ▪ Les prélèvements sans coupure granulométrique précise :

Ce type de prélèvement assure une coupure granulométrique mal connue (estimée autour de 100  $\mu\text{m}$ ), qui peut être influencée par les conditions météorologiques. Ce type de prélèvement est notamment utilisé dans la mesure des fumées noires ou avec les échantillonneurs à grand débit (HVS) (High Volume Sampler) configurés en mode (TPS) (Total Suspended Particulate). Ces têtes de prélèvement sont aujourd'hui peu utilisées, car elles prélèvent des particules trop grosses pour être inhalées, et présentant donc peu d'intérêt en terme de protection de la santé humaine [65].

Le tableau suivant montre trois types de prélèvement sans coupure[79]

**Tableau I.8** : Types de prélèvement sans coupure granulométrique.

Prélèvement sur filtre à moyen débit.	Prélèvement sur filtre à très fort débit.	Prélèvement des fumées noires
-La vitesse de prélèvement est de l'ordre de 1,5 m/s pendant une durée de 24 heures (LVS).  -La nature des filtres utilisés est en fibre de verre ou membrane de diamètre 47mm.  -Les particules collectées sont de tailles de 0,30 à 30 $\mu\text{m}$ , et une efficacité moindre pour les PM10 par rapport au PM 2,5.	-Les préleveurs utilisés sont de type HVS avec un débit de 60 à 100 m <sup>3</sup> /s pour une durée de 24h.  -Collecte des particules de taille plus importante.  -Une efficacité de l'ordre de 25 à 40% pour les particules de 30 $\mu\text{m}$ .	-Ce prélèvement se fait à une vitesse de l'ordre de 1 cm/s pour une durée de 24h.  -Utilisé pour la collecte des particules issues de la combustion dont le diamètre est inférieur à 10 $\mu\text{m}$ .  -Une efficacité significative pour les particules de taille inférieure à 5 $\mu\text{m}$ .

### ▪ Les prélèvements avec coupure granulométrique :

Ils sont effectués à l'aide d'une «tête» de prélèvement qui par sa conception, ne capte en théorie que des particules de diamètre aérodynamique inférieur à une valeur définie. Cette méthode permet ainsi de focaliser la surveillance sur les particules inhalables. Les têtes les plus couramment utilisés sont la tête définie par la norme française NFX43021 et les têtes PM10 et PM2.5 d'origine américaine [80].

### ▪ Les prélèvements avec fractionnement granulométrique,

Cette méthode permet de faire une séparation des particules selon leur taille afin d'en étudier la distribution granulométrique [81]. Le dispositif le plus utilisé est l'impaction en cascade, qui se compose d'une série d'étages d'impactions (2 à 9, selon le nombre de fraction que l'on désire avoir), constitué d'un orifice perpendiculaire à une surface plane [82].

### III.3 Les filtres et les membranes de rétention :

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

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égal à 0.3 $\mu\text{m}$  et plus.
- Une hygroscopicité faible



- Un taux d'impureté aussi faible que possible en éléments métalliques pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières [83].

Les filtres les plus utilisés sont les filtres en fibre de verre et les filtres membranaires à base de dérivés de cellulose (acétate et ester de cellulose) [79].

### III.3.1 Les filtres en fibre de verre :

Ils ont une efficacité de collection de 99% pour les particules de diamètres supérieur à 0.3µm. L'hygroscopicité des filtres en fibre de verre est faible. L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, les éléments les plus gênants sont le zinc et le fer qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées.

### III.3.2 Les filtres membranaires :

Ce sont des filtres nitrocellulose (sartorius et millipore) ou acétate et ester de cellulose (**Gelman GA-3**) qui sont solubles dans les éthers et les alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. Les filtres membranaires les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité supérieur à 0.8µm. Ces filtres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibre de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faible en éléments métalliques, leurs inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utilisés dans les HVS pour les prélèvements à forts débit.

Avec les deux types de filtres, on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0.1µm de diamètre.

Le tableau suivant montre les propriétés et les caractéristiques de chaque type de filtre ainsi que leurs efficacités [84].

**Tableau I.9** : Propriétés et caractéristiques des différents types des filtres ainsi que leurs efficacités.

Filtre	Type	Matériel	Epaisseur (mm)	Porosité (µm)	Résistance au colmatage	Efficacité(%)
<b>Whatman4</b>	Fibre	Cellulose	0,19	3 à 20	0,35	72
<b>Microsorban</b>	Fibre	Polystyrène	1,50	0,70	0,04	99,50
<b>MSA1106B</b>	Fibre	Verre	0,23	0,1 à 4	0,10	99,93
<b>Millopore AA</b>	Membrane	Ester cellulose	0,15	0,80	0,19	99,98

---

# Chapitre II : Aspects Théoriques De La Fluorescence X

---

### II.1 Introduction :

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'atmosphère rend difficile leur mise en évidence. Mais, il existe des méthodes plus au moins développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leurs concentrations. Le choix d'un temps d'échantillonnage adéquat avec une bonne résolution spatiale ainsi qu'une bonne séparation des tailles des particules fait appels à de nombreuses techniques d'analyses et de quantifications [43].

Plusieurs techniques ont prouvé leur fiabilité dans la détection et l'analyse des métaux lourds dans un gaz, dans un liquide ou dans un solide parmi lesquels on cite:

- La spectrométrie de masse induite par couplage plasma (ICPMS) pour l'analyse élémentaire de l'échantillon;
- La spectrométrie d'absorption atomique (SAA)
- L'Analyse par activation neutronique (NAA);
- L'Analyse par faisceaux d'ions (IBA) y compris la microsonde nucléaire couplée à l'analyse PIXE (micro-PIXE);
- La microscopie électronique à balayage environnementale couplée à l'analyse X automatisée par dispersion d'énergie (automated ESEM-EDS);
- La micro spectrométrie Raman (micro-Raman) [85,86].
- La Fluorescence de rayon X (XRF) ; C'est en effet cette méthode qui est utilisée au sein de ce travail.

### II.2 La fluorescence X :

La XRF est une méthode analytique permettant de déterminer la composition chimique de toutes sortes de matériaux. Les matériaux peuvent être sous forme solide, liquide, en poudre, filtrée ou autre. La XRF peut également parfois être utilisée pour déterminer l'épaisseur et la composition des couches et des revêtements. Cette technique est rapide, précise et non destructive et ne nécessite généralement qu'un minimum de préparation des échantillons. Les applications sont très larges et incluent les industries du métal, du ciment, du pétrole, des polymères, du plastique et de l'alimentation, ainsi que les industries minière, minéralogique et géologique, et l'analyse environnementale de l'eau et des déchets. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du sodium à l'uranium (Na à U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles. D'une manière générale, les éléments ayant des numéros atomiques élevés ont de meilleures limites de détection que les éléments plus légers [87].

Pour devenir la méthode d'analyse importante qu'elle est actuellement, la fluorescence X a dû attendre le développement des instruments de mesure des rayons X. Les bases théoriques de l'analyse par fluorescence X datent des travaux de Henry Moseley au début du 20<sup>ème</sup> siècle sur l'émission des rayons X [88,89]. Elle a été utilisée dès 1932 par Von Hevesy [90]. Mais, pour voir apparaître les premiers spectromètres commerciaux de fluorescence X, il a fallu attendre les années cinquante pour

## Chapitre II : Aspects Théoriques De La Fluorescence X

la mise au point des équations mathématiques (en 1955 par Sherman) puis les années quatre-vingt pour que les algorithmes d'optimisation et le calcul informatique puissent atteindre la puissance requise [91].

### II.2.1 Processus de la fluorescence X

#### II.2.1.1 Principe

Le principe physique qui régit cette méthode d'analyse est un processus atomique en deux étapes consécutives : ionisation en couche électronique interne de l'atome cible, suivie d'une cascade de transitions électroniques accompagnées d'émission de rayons X caractéristiques

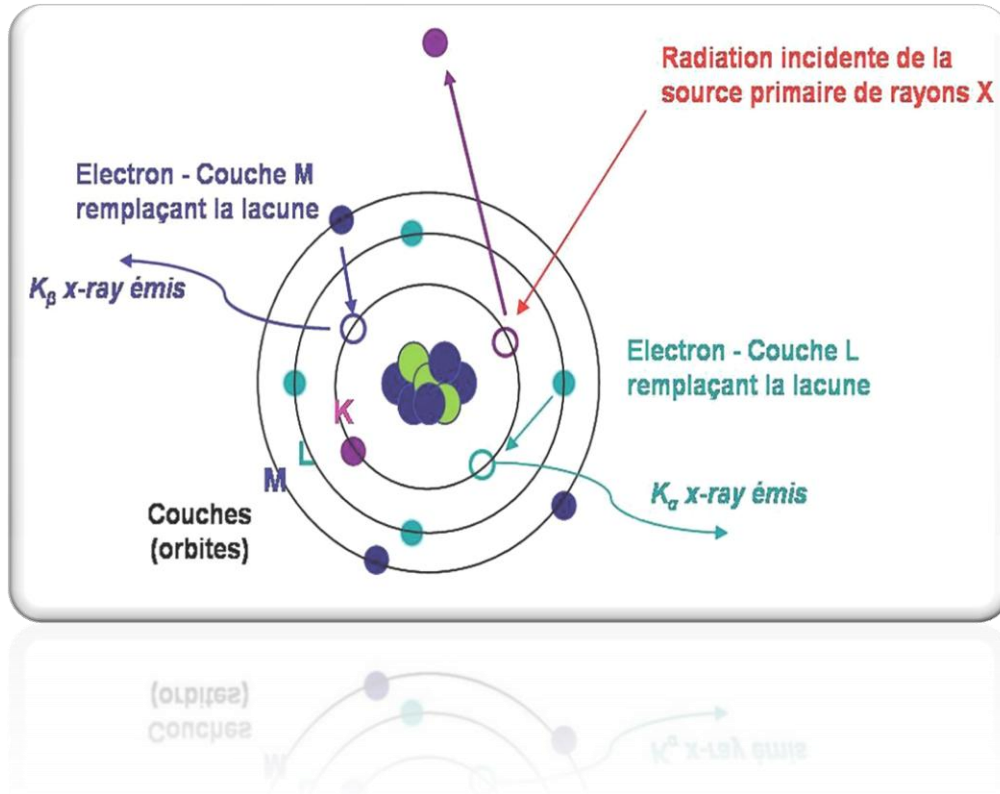


Figure II.1. Principe de la spectrométrie de fluorescence X [92]

Quand un atome est mis sous l'action d'une radiation incidente d'énergie suffisante, un électron de sa couche interne est éjecté. L'atome se trouve alors dans un état instable dit excité. Pour revenir à l'état stable, un électron d'une couche plus externe vient combler le trou laissé par le négaton éjecté. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X qui est caractéristique de l'élément en question. Ces raies sont appelées raies de fluorescence X (XRF). Plusieurs transitions électroniques sont possibles, la transition L→K est traditionnellement appelée K<sub>α</sub>, la transition M→K est appelée K<sub>β</sub>, la transition M→L est appelée L<sub>α</sub> et ainsi de suite (notation de Siegbahn). Chacune de ces transitions génère un photon fluorescent avec son énergie caractéristique et la longueur d'onde du photon est reliée à son énergie par la constante de Planck h.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad \text{II.1}$$

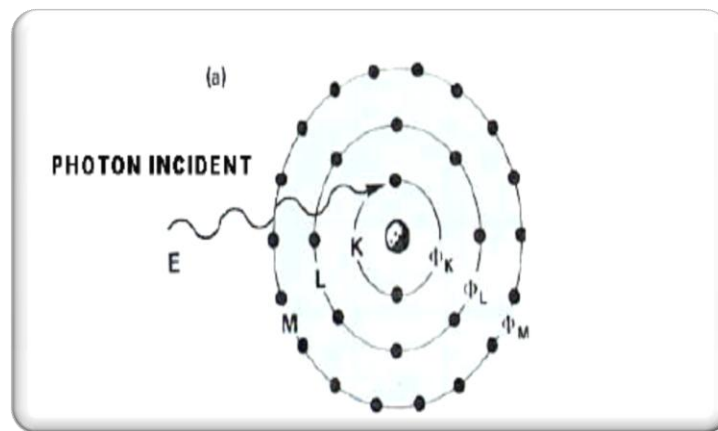
h : constante de Planck = 6.626.10<sup>-34</sup> J.s, c: est la célérité de la lumière dans le vide

L'analyse par fluorescence X ou la spectroscopie XRF est l'ensemble des mesures effectuées sur ces raies XRF.

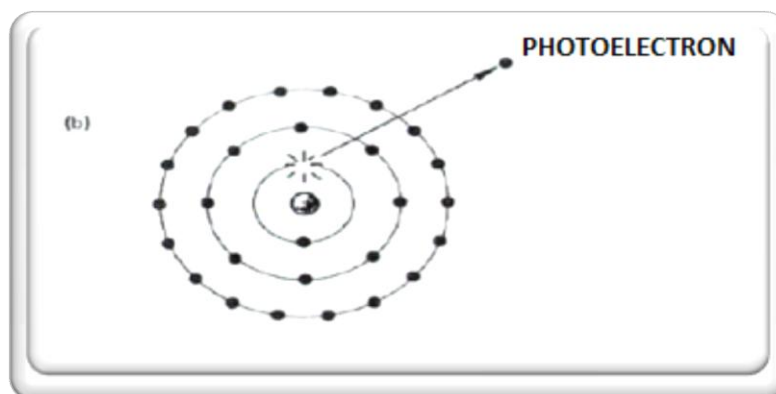
### II.2.1.2 Interactions des rayons X avec la matière

L'interaction des rayons X avec la matière conduit à la production de particules secondaires chargées qui sont responsables des ionisations dans le milieu. C'est pourquoi on classe les rayons X dans le domaine des rayonnements ionisants, mais ils sont en fait indirectement ionisants. Les effets des rayons X dans le milieu traversé proviennent des ionisations provoquées par les particules secondaires. Ce sont ces effets qui sont utilisés pour la détection, le comptage, la visualisation des rayonnements, et ce sont les mêmes particules secondaires qui engendrent les effets biologiques dans le tissus vivants. Lorsque l'on considère un faisceau de rayons X qui pénètre dans un milieu, on constate une disparition progressive du nombre de particules incidentes qui résulte de l'interaction d'un certain nombre d'entre elles avec la matière. Cette diminution est appelée l'atténuation et résulte de plusieurs processus d'interaction. On distingue les interactions du photon avec un atome du milieu (l'effet photoélectrique et la diffusion Rayleigh) ou avec un électron dans l'atome (la diffusion Compton) ou encore, plus rarement, avec le noyau d'un atome qui peut conduire à la création de paires électron-positron. Au cours d'une interaction, l'énergie du photon incident est complètement ou partiellement absorbée et transférée à un électron sous forme d'énergie cinétique. Celle-ci s'épuise dans le milieu en provoquant des ionisations. Si l'énergie incidente du photon n'est que partiellement absorbée, le reste se retrouve sous la forme de photons secondaires ou diffusés [93,94]. La probabilité de ces processus concurrents indépendants (l'effet photoélectrique, diffusion Rayleigh, etc.) peut être exprimée par la section efficace de collision par atome, par électron, ou par noyau dans l'absorbeur.

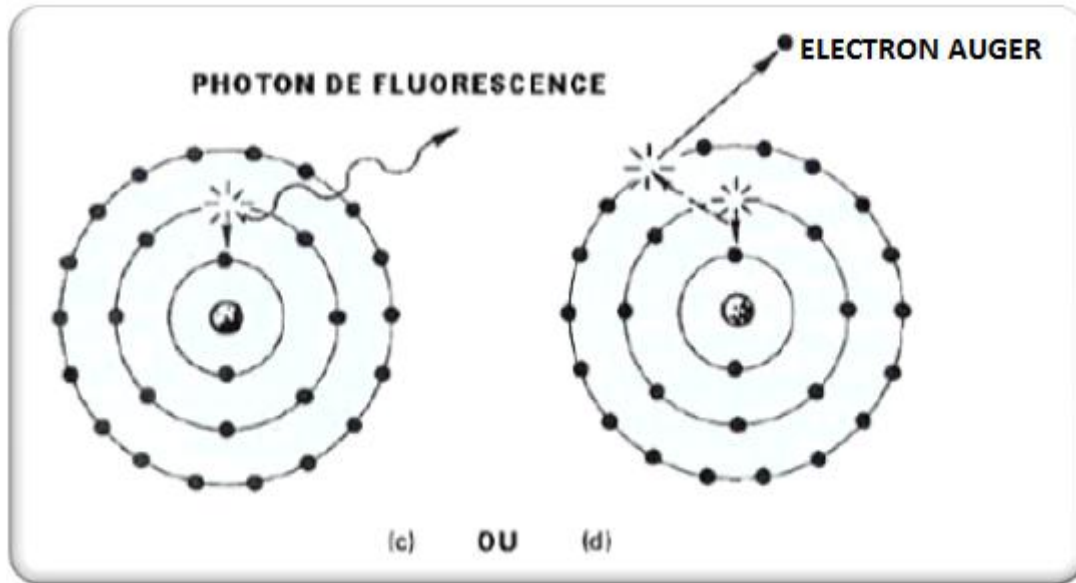
- Effet photoélectrique



(a) Représentation du photon incident d'énergie E et de «l'atome cible».



(b) Dans l'interaction photoélectrique, le photon est absorbé par un électron interne (**couche K, par exemple**), et l'électron est éjecté avec une énergie égale à l'énergie du photon moins l'énergie de liaison de l'électron dans sa couche originale.



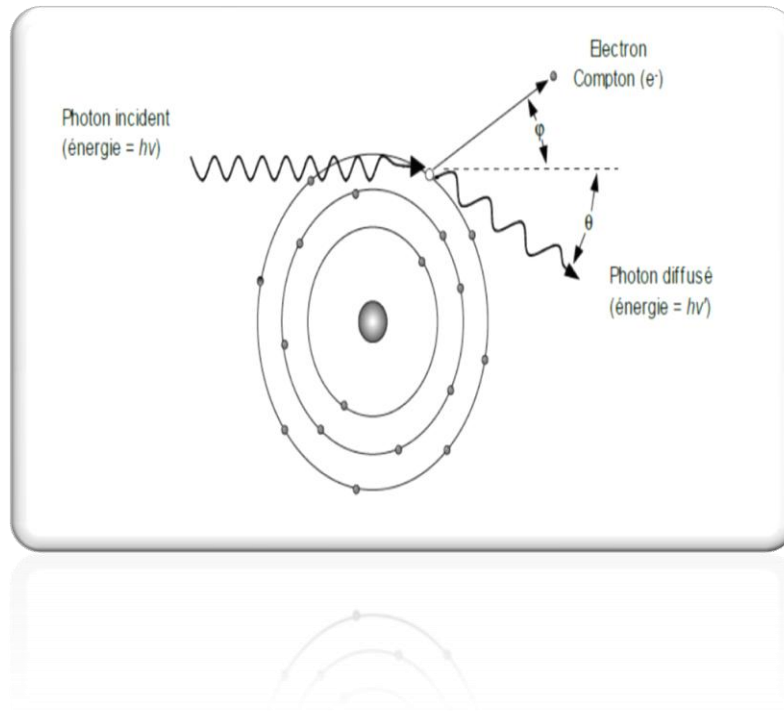
(c) La place sur la couche K, vacante par le photo électron est remplie par un électron d'une autre couche d'énergie plus faible, et la différence des énergies se retrouve sous la forme d'un photon de fluorescence caractéristique qui s'échappe de l'atome (c) ou qui provoque à son tour un nouvel effet photoélectrique sur une couche plus extrême provoquant l'arrachement d'un électron appelé électron Auger (d) [95].

**Figure II.2 Schéma de l'effet photoélectrique**

L'effet photoélectrique peut avoir lieu avec toutes les couches internes de l'atome (K, L,...) à condition que l'énergie  $E$  du photon incident soit supérieure à  $\Phi_i$ , l'énergie de liaison de l'électron sur sa couche. Le photoélectron est émis avec une énergie  $E - \Phi_i$ . Dans la figure II.2, on prend l'exemple d'un électron de la couche K. La place laissée libre dans la couche K représente une situation instable. Par conséquent, un électron d'une couche avec une énergie de liaison plus faible est transféré pour remplir la place libre. Le retour à l'équilibre de l'atome s'accompagne de l'émission d'un photon de fluorescence caractéristique ou bien d'un électron Auger. La probabilité de production de l'émission de fluorescence est donnée par ce que l'on appelle usuellement le «rendement de fluorescence». Pour des éléments de numéro atomique faible, l'émission d'un électron Auger est plus probable, alors que pour éléments de numéro atomique important, l'émission d'un photon de fluorescence caractéristique devient plus probable [95]. L'émission des photons X de fluorescence est généralement considérée comme isotrope [96,97].

### ▪ L'Effet Compton

Dans ce cas, le photon interagit avec un électron qui est supposé être peu lié à l'atome, auquel il ne transfère qu'une partie de son énergie.



**Figure II.3 Effet Compton (l'électron externe est éjecté et le photon est dévié avec perte d'énergie).**

L'interaction doit satisfaire la loi de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, ce qui impose des relations entre les énergies respectives de l'électron de recul et du photon diffusé, et les angles de diffusion. Il apparaît que l'énergie du photon diffusé ne peut pas être nulle et varie depuis un minimum lorsqu'il est diffusé vers l'arrière (rétrodiffusion) jusqu'à l'énergie incidente (choc tangentiel).

▪ **Production de paires (matérialisation):**

La matérialisation des photons en un couple électron-positron est observée lorsque leur énergie est supérieure à 1,02 MeV i.e. quand l'énergie incidente du photon X est supérieure au double de l'énergie de masse d'un électron au repos ( $h\nu = 2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ ). C'est grâce au champ électrique intense au voisinage d'un noyau qu'un photon peut être totalement absorbé et un couple électron-positron est émis. L'excès d'énergie ( $>1,02 \text{ MeV}$ ) est transmis au couple électron-positron sous forme d'énergie cinétique. Le positron est généralement annihilé à la suite de collisions dans le milieu, donnant lieu à deux photons d'annihilation émis à  $180^\circ$  l'un de l'autre [93].

✚ **Domaines d'apparition des différents effets :**

Les effets photoélectriques, Comptons et production de paires sont les processus les plus probables dans la gamme d'énergie de 0,01 à 10 MeV.



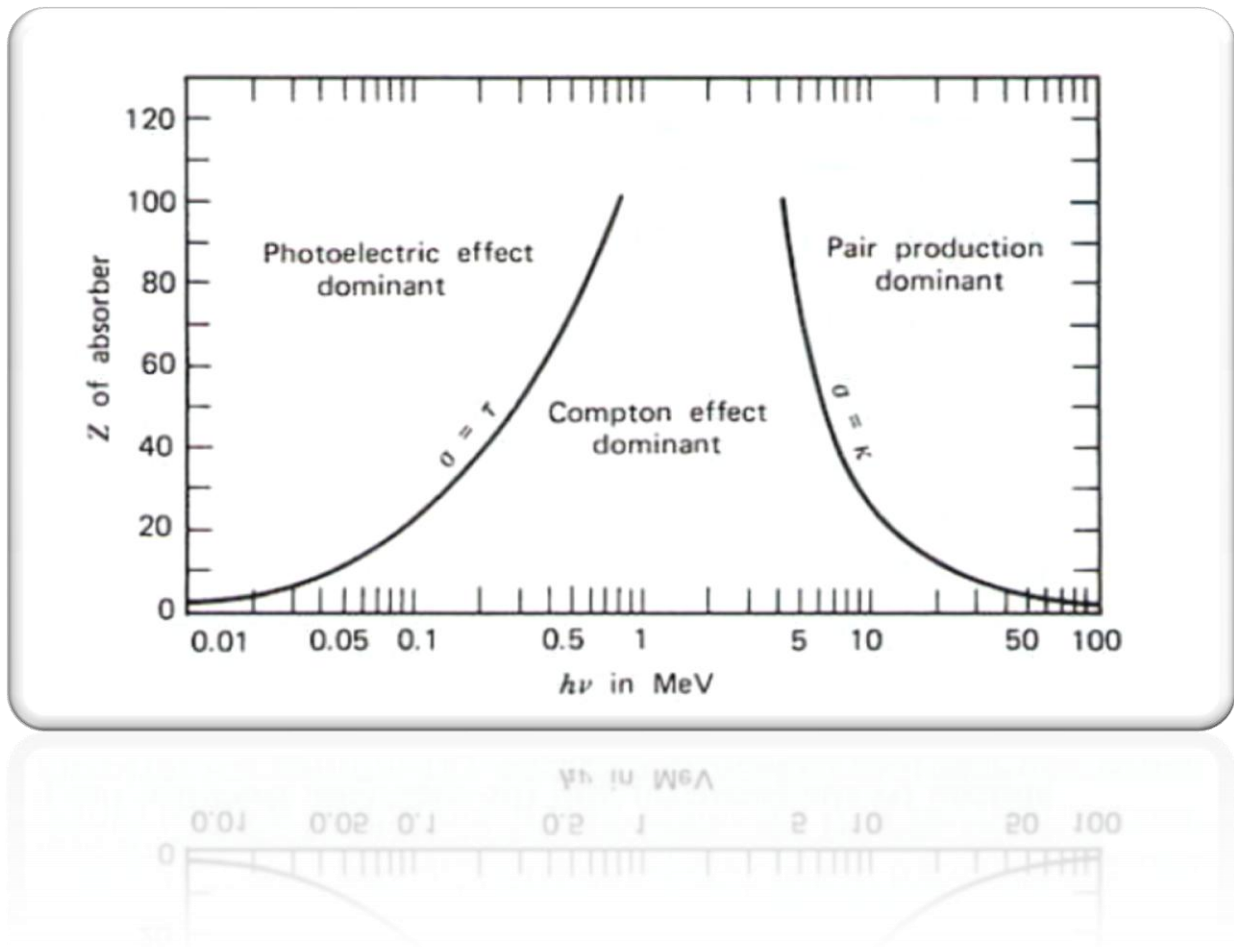


Figure II.4 Zones de prédominance des interactions dans le plan énergie/numéro atomique [95].

La figure II.4 montre que l'effet dominant dépend à la fois de l'énergie du rayonnement (MeV) mais aussi du numéro atomique (Z) de l'objet irradié. Pour des matériaux de Z faible, l'effet Compton est l'effet prédominant dans un large domaine d'énergie de photons; pour des valeurs de Z grands ou modérés, l'interaction photoélectrique est dominante à plus petite énergie et les interactions de productions de paires sont dominantes à grande énergie [93].

La diffusion de Rayleigh est plus importante pour les éléments ayant un numéro atomique Z élevé alors que la diffusion Compton est plus importante pour les éléments de Z faible.

Ces deux phénomènes, la diffusion de Rayleigh et l'effet Compton, sont à l'origine du "Bruit de fond" du signal représenté par le fond continu des spectres. Le Bruit de fond peut être causé aussi par deux autres phénomènes liés à l'échantillon: la diffraction des rayons X lorsqu'il s'agit d'un échantillon cristallisé et le rayonnement continu créé par le ralentissement des charges électriques lorsque les électrons sont éjectés.

### II.3 Analyse par XRF :

Après avoir mesuré un échantillon, il est analysé. Cela se fait en deux étapes: une analyse qualitative suivie d'une analyse quantitative.

### II.3.1 Analyse qualitative :

L'analyse qualitative de l'échantillon, revient à repérer la position en énergie des raies caractéristiques d'émission correspondant à des niveaux d'énergie dont les tables donnent la nature de l'élément chimique concerné. L'identification des pics est compliquée à cause de la superposition de raies de différents éléments, elle est aussi influencée par la limite de détection.

### II.3.2 Analyse quantitative :

L'analyse quantitative consiste à mesurer l'intensité d'une raie d'émission (généralement la raie  $K\alpha$  d'un élément léger ou moyen ou la raie  $L\alpha$  d'un élément lourd) et à calculer la concentration de l'élément correspondant.

Généralement, en fluorescence X, l'intensité d'une raie n'est pas proportionnelle à la concentration de l'élément : les autres atomes constituant l'échantillon modifient le signal. C'est ce qu'on appelle les "effets de matrice». En effet pour une même quantité d'un élément, plusieurs échantillons ne donneront pas la même réponse, car l'environnement de cet élément ne sera pas le même.

Les effets de matrices comprennent deux types de phénomènes:

- l'absorption : une, dite primaire, que subit le faisceau incident par l'échantillon avant d'atteindre l'atome cible. Après fluorescence, les rayons X émis sont partiellement absorbés par l'échantillon en ressortant, et c'est l'absorption secondaire.
- la fluorescence secondaire (ou surexcitation) : la fluorescence X émise par un atome peut exciter un atome voisin. Les atomes reçoivent donc simultanément les particules chargées ou les rayons X du faisceau incident et la fluorescence X d'autres atomes de la matrice [92].

A l'époque où l'on ne disposait pas de toutes les valeurs tabulées et de la puissance de calcul nécessaire pour prendre en compte les effets de matrice, il fallait mettre en place des méthodes empiriques et mathématiques (étalon interne, calcul par régression, paramètres fondamentaux...) qui tiennent compte de ces effets.

#### II.3.2.1 Méthodes relatives

##### *Méthode des standards externes*

Elle consiste en l'utilisation des composés standards contenant des éléments identifiés, à des concentrations connues. L'irradiation des standards et des échantillons à analyser dans les mêmes conditions, permet le calcul des concentrations inconnues des éléments constituant l'échantillon.

##### *Méthode du standard interne*

Cette méthode consiste à ajouter à l'échantillon un élément en proportion connue de telle manière qu'il n'interfère pas avec les éléments d'intérêt. Les concentrations des éléments présents sont calculées à partir des aires des raies X en tenant compte des facteurs de sensibilité et d'absorption. De manière générale, la concentration d'un élément  $i$  est donnée par l'expression ci-dessous :

$$C_i = C_s \cdot (I_i / I_s) \cdot (K_s / K_i) \cdot (A_s / A_i) \quad \text{II.2}$$

Où

$I_i$ : l'aire de la raie X de l'élément recherché,

$I_s$ : l'aire de la raie X du standard interne,

$K_i$  la sensibilité de l'élément recherché et  $K_s$  la sensibilité du standard interne.

### II.3.2.2 Méthode de régression

D'autres méthodes simples sont basées sur une approche de régression. Notamment, celle qui consiste à utiliser un standard interne. Une quantité fixe d'un standard interne est ajoutée à plusieurs composés standards contenant des éléments connus. Pour chaque élément contenu dans les standards, une courbe de régression est déterminée:

$$C_i = a_i + b_i \cdot C_{\text{stand\_interne}} \cdot I_i / I_{\text{standard\_interne}} \quad \text{II.3}$$

Une autre méthode simple similaire à celle indiquée ci-dessus est basée sur l'ajout d'un standard interne (seulement dans l'échantillon) et l'utilisation de facteurs de calibration. Une troisième méthode de régression consiste à utiliser les intensités des pics cohérents et incohérents. Plusieurs standards sont analysés et des coefficients de régressions sont obtenus pour chaque élément donné [92] :

$$C_i = a_i + b_i \cdot I_i / I_{\text{coh}} \quad \text{II.4}$$

### II.3.2.3 Méthode de l'émission-transmission

Dans le cas de l'émission-transmission, l'absorption de la radiation primaire et secondaire (raies caractéristiques) dans l'échantillon est mesurée expérimentalement. L'analyse d'un échantillon, consiste à irradier d'abord l'échantillon seul, ensuite la cible épaisse, et enfin l'ensemble de l'échantillon et de la cible en position juxtaposée l'un sur l'autre. Pour un échantillon d'épaisseur intermédiaire, la concentration d'un élément  $i$  est donnée par la relation [99]:

$$m_i = I_i F_i / S_i \quad \text{II.5}$$

Où  $I_i$  est l'intensité nette de la raie caractéristique de l'élément  $i$ ,  $S_i$  est son facteur de calibration et  $F_i$  est son facteur d'absorption qui est défini par:

$$F_i = \frac{\mu_i(E_0, E_{\text{char}}) X_i}{1 - \exp(-\mu_i(E_0, E_{\text{char}}) X_i)} = \frac{\log(I_i^T / (I_i^{T+S} - I_i))}{1 - I_i^T / (I_i^{T+S} - I_i)} = \frac{\log(A)}{1-A} \quad \text{II.6}$$

$I_i^T$  et  $I_i^{T+S}$  sont respectivement les intensités nettes des raies caractéristiques de l'élément  $i$ , correspondant respectivement aux analyses de la cible épaisse seule et l'ensemble cible-échantillon.

$\mu_i(E_0, E_{\text{char}})$  est le coefficient d'absorption massique de l'échantillon pour la radiation primaire et celle caractéristique de l'élément  $i$ , et  $X_i$  est l'épaisseur de l'échantillon. En ce qui concerne les

## Chapitre II : Aspects Théoriques De La Fluorescence X

éléments qui ne sont pas présents dans la cible épaisse, leurs facteurs d'absorption sont déterminés à partir d'une régression linéaire des autres facteurs mesurés.

### II.3.2.4 Méthode des paramètres fondamentaux

Pour un échantillon homogène, la relation entre la concentration (%) d'un élément  $i$  et l'intensité nette de sa raie caractéristique est donnée par [100]:

$$I_i = C_i(\%) \cdot G \cdot \epsilon(E_i) \cdot \sum I(E_n) \cdot [Q_i(E_n) \cdot A_i(E_n, E_{\text{char}_i}) + H_i(E_n)] \quad \text{II.7}$$

La sommation tient compte du caractère polychromatique de la radiation;  $I(E_n)$  est donné par la distribution de cette radiation sur les énergies.  $G$  est le facteur d'instrument moyen tenant compte de la géométrie de détection et d'excitation; théoriquement il est donné par la relation:

$$G = (d\Omega_1 \cdot d\Omega_2) / (4\pi \cos\varphi_1) \quad \text{II.8}$$

Où :

$d\Omega_1$  et  $d\Omega_2$  sont respectivement l'angle solide d'excitation et de détection. Il est plus pratique de déterminer le facteur  $G$  expérimentalement par l'analyse des standards purs afin d'inclure dans ce facteur géométrique toute incertitude sur: l'efficacité du détecteur, l'angle de détection ( $\varphi_2$ ), l'angle d'excitation ( $\varphi_1$ ) et les distances entre la source et la cible d'une part et d'autre part entre le détecteur et la cible.

$E_{\text{char}_i}$  est l'énergie caractéristique de l'élément  $i$ ,  $E_n$  est l'énergie primaire.  $A$  est le facteur de correction de l'absorption de la radiation primaire et secondaire dans l'échantillon :

$$A(E_n, E_{\text{char}_i}) = \frac{1 - \exp(-c(E_n, E_{\text{char}_i}))}{c(E_n, E_{\text{char}_i})} = \frac{1}{F_i} \quad \text{II.9}$$

$$c(E_n, E_{\text{char}_i}) = \frac{m_s(E_n)}{\cos\varphi_1} + \frac{\mu_s(E_{\text{char}_i})}{\cos\varphi_2} \quad \text{II.10}$$

$m_s$  est le coefficient d'absorption massique de l'échantillon qui est calculé par :

$$m_s(E) = \sum C_i(\%) \cdot m_i(E) \quad \text{II.11}$$

Où  $m_i(E)$  est le coefficient d'absorption massique total de l'élément  $i$ , pour une énergie donnée  $E$ . Dans la gamme d'énergie (1-100keV), le coefficient d'absorption massique regroupe la contribution des trois principaux types d'interactions rayonnement-matière [101]: photoélectrique ( $t$ ), diffusion élastique ( $\sigma_{\text{coh}}$ ) et diffusion inélastique ( $\sigma_{\text{incoh}}$ ).

$$m_i(E) = t_i(E) + \sigma_{\text{coh},i}(E) + \sigma_{\text{incoh},i}(E) \quad \text{II.12}$$

## Chapitre II : Aspects Théoriques De La Fluorescence X

### *Facteur d'accroissement (Hj)*

Les rayons X émis par les éléments lourds excitent les éléments légers. Il s'en suit une émission de rayons X secondaires par ces éléments. Il existe un effet d'accroissement (absorption négative) du à des réactions secondaires. Les raies caractéristiques deviennent une source d'excitation par les éléments avec des électrons des couches profondes ayant une énergie de liaison légèrement inférieure à celle des raies caractéristiques.

### *Pics de diffusion*

La radiation diffusée (Compton ou Rayleigh) est utilisée dans la méthode à paramètres fondamentaux comme source d'information pour l'estimation de la composition de la matrice irradiée. Elle permet également d'estimer l'épaisseur de l'échantillon. Dans le cas d'une excitation monochromatique, on a :

$$I_{coh} = G_{coh} \cdot \epsilon(E_{coh}) \cdot I(E_{coh}) A_i(E_{coh}, E_{coh}) [\sum_{detected} C_i(\%) \sigma_{coh,i} + \sum_{dark} C_i(\%) \sigma_{coh,i}] \quad \text{II.13}$$

$$I_{incoh} = G_{incoh} \cdot \epsilon(E_{incoh}) \cdot I(E_{coh}) A_i(E_{coh}, E_{incoh}) [\sum_{detected} C_i(\%) \sigma_{incoh,i} + \sum_{dark} C_i(\%) \sigma_{incoh,i}] \quad \text{II.14}$$

Où:

$$E_{incoh} = E_{coh} / (1 + (E_{coh}/511)(1 - \cos(\phi_1 + \phi_2))) \quad \text{II.15}$$

$$G_{coh} = G_{incoh} = 4\pi G \quad \text{II.16}$$

La première sommation ( $\sum_{detected} C_i(\%) \sigma_i$ ) tient compte des éléments ayant des raies caractéristiques détectées, alors que la deuxième sommation ( $\sum_{dark} C_i(\%) \sigma_i$ ) tient compte des éléments constituant de la matrice "dark". A partir des équations (II.15 et II.16), nous obtenons les relations suivantes:

$$\sum_{dark} C_i(\%) \sigma_{coh,i} = \frac{I_{coh}}{G_{coh} \epsilon(E_{coh}) I(E_{coh}) A_i(E_{coh}, E_{coh})} - \sum_{detected} C_i(\%) \sigma_{coh,i} \quad \text{II.17}$$

$$\sum_{dark} C_i(\%) \sigma_{incoh,i} = \frac{I_{incoh}}{G_{incoh} \epsilon(E_{incoh}) I(E_{coh}) A_i(E_{coh}, E_{incoh})} - \sum_{detected} C_i(\%) \sigma_{incoh,i} \quad \text{II.18}$$

### *Algorithme*

Les concentrations des éléments d'intérêt sont déterminées de manière itérative selon l'algorithme suivant:

- Initier les concentrations;
- Calculer les intensités théoriques;
- Estimer le Z effectif de la matrice et l'épaisseur de l'échantillon à partir des pics de diffusion;
- Obtenir de nouvelles estimations de concentrations pour chaque itération k selon l'expression suivante:

$$C_i^k = \frac{(I_i^{\text{expérimental}} - I_i^{\text{théorique}})}{G\varepsilon(E_i) \sum I(E_n) [Q_i(E_n) A(E_n, E - \text{char}_i) + H_i(E_n)]} + C_i^{k-1} \quad \text{II. 19}$$

L'exécution de cette boucle itérative s'arrête une fois que les calculs convergent [98].

#### II.4. Dimensions et états physiques des échantillons:

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

En première approximation, l'intensité des raies X est indépendante de l'état physique de l'échantillon, qui peut donc être sous forme liquide, pulvérulente, ou solide. Cependant des précautions, concernant essentiellement l'homogénéité et l'état de surface, sont à prendre si l'on désire une bonne précision.

Si l'échantillon est à l'état liquide, il faut tenir compte de la possibilité de radiolyse et d'un échauffement local, avec formation éventuelle de bulles ; pour les grandes longueurs d'onde (supérieur à 0.2 ou 0.3 nm), la mise sous vide étant hasardeuse, on peut opérer en atmosphère d'hélium.

Enfin de compte, les meilleurs résultats sont obtenus pour des échantillons à l'état massif, les minerais, entre autres, peuvent être ramenés à cet état par fusion vitrifiante avec du borax ou un composé analogue, ce qui donne aux échantillons l'aspect de perles.

Le cas de couches minces (solutions absorbées par du papier filtre ou poussières déposées sur une membrane), est aussi très intéressant, car l'effet de matrice est très faible ou nul; de plus, la quantité de matériau nécessaire est minimisée [102].

---

# Chapitre III : Matériels et Méthodes

---

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

### III.1 Présentation de la ville d'Alger :

#### III.1.1 Situation géographique et démographique :

Alger est la capitale politique, administrative et économique de l'Algérie, située en bordure de la méditerranée. La population de la ville d'Alger est évaluée approximativement à 4.500.000 habitants (Centre d'Alger), quant à l'agglomération du grand Alger, elle peut être évaluée à 7.000.000 habitants. Elle est considérée comme étant la première ville la plus importante en termes de population, d'activités de services, d'équipements, d'infrastructures, de centres de recherche, d'industries et de grands projets urbains. La province d'Alger couvre une superficie de 1190 kilomètres carrés sans compter la partie suburbain. Elle est bornée par la mer méditerranée au nord, la wilaya de Blida au sud, la wilaya de Tipaza à l'ouest et Boumerdès dans l'est. (**Figure III.1**).

Alger abrite le plus grand aéroport du pays, d'une capacité de 12 millions de passagers par an, mais également le plus grand port représentant 47% de toutes les activités portuaires du pays. C'est aussi une métropole régionale duquel l'aire d'influence s'étend au-delà de ses limites. Ainsi, la zone d'influence de la wilaya d'Alger comprend les wilayas avec frontière commune : Blida, Boumerdes et Tipaza, avec des mouvements quotidiens et des navettes entre la capitale algérienne et ces wilayas, et même d'autres wilayas éloignés tels que Médéa et Tizi Ouzou ainsi que toutes les wilayas du pays [103].

L'autoroute passe à travers la wilaya d'Alger au niveau des communes de Baraki et les Eucalyptus et Sidi Moussa [104].

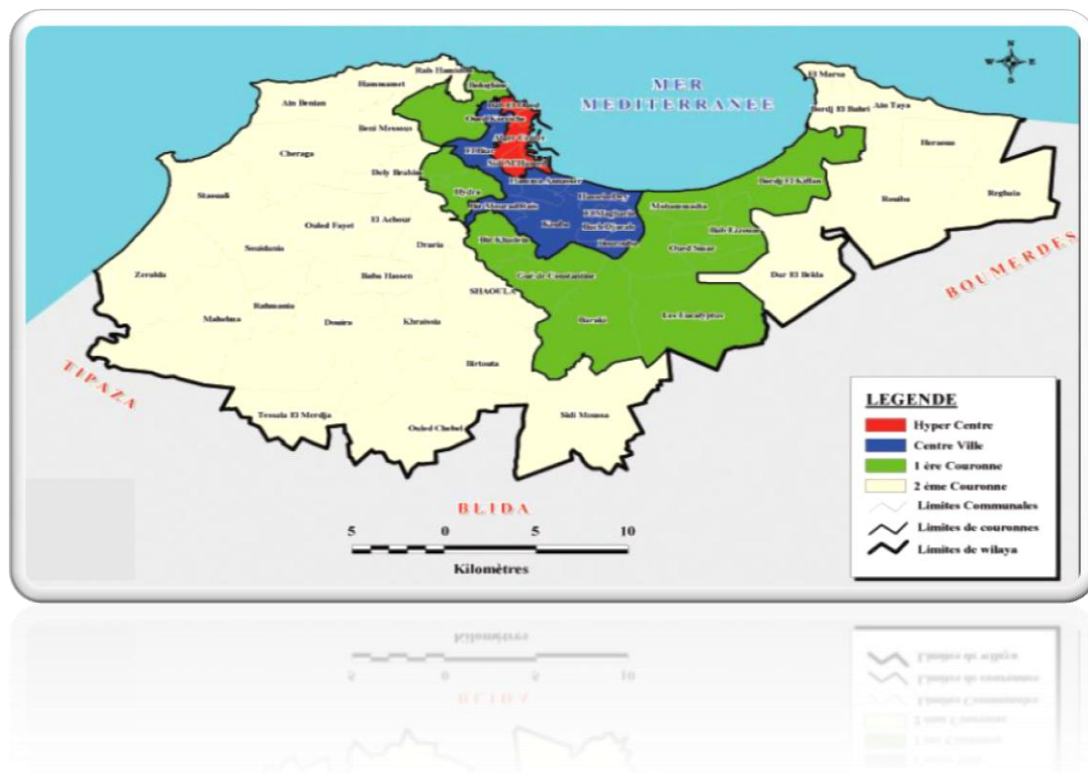


Figure III.1 Wilayas limitrophes de la ville d'Alger [103]



### III.1.2 Géologie et Géomorphologie de la région

L'étude géologique de la région algéroise, peu étendue en surface et formant un rocher qui s'avance dans la mer, révèle qu'en arrière il est recouvert par un cordon de dunes au-delà duquel on retrouve les terrains sédimentaires [105] de la série tertiaire [106]. Dans une esquisse géologique et topographique du littoral d'Alger datant de 1911, il apparaît que ce littoral comprend essentiellement toute la région basse qui borde sur plus de 100 kilomètres le pied de l'Atlas, depuis le massif de Sidi Fredj au nord de Thénia des Béni Aïcha, jusqu'au mont Chénoua à l'ouest de Tipaza. Le relief se caractérise par trois zones longitudinales : le Sahel, le littoral et la Mitidja.

### III.1.3 La circulation automobile

Le transport est l'une des pierres angulaires du développement durable et de la prospérité dans tous les pays. Un système de transport efficaces et des réseaux modernes sont donc une nécessité pour le développement économique, le bien-être social, la production à grande échelle, et la préservation de l'environnement. La croissance de la population augmente les volumes de demandes en déplacement. Dans notre pays, le secteur des transports concevait un véritable changement. De nombreux projets ont été exécutés, où sont en phase de confection, pour rendre ce secteur plus efficace et efficient dans sa contribution au développement économique. En interurbain on peut citer l'autoroute est-ouest et la rocade ferroviaire est-ouest. Des études ont montré que le grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique [107]. La principale source d'émission étant le trafic routier, vu l'accroissement du parc automobile algérien qui ne cesse d'augmenter chaque année. En 2009, le parc roulant a recensé près de 4,2 million de véhicules, soit 4 171 827 de voitures qui circulent sur nos routes. Soit une augmentation de plus de 20% par rapport au parc automobile recensé en 2006. 24.68 % du parc national automobile était concentrée dans la Wilaya d'Alger qui est concernée par la zone d'étude, soit un total de 1 029 682 véhicules tout types confondu, selon les statistiques de l'office national des statistiques [108].

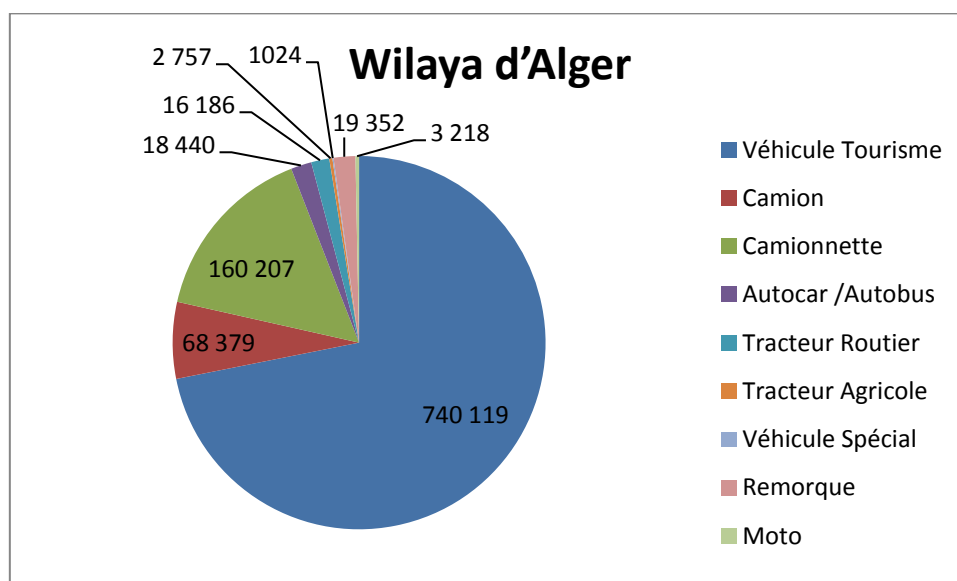


Figure III.2 Répartition du parc automobile de la wilaya d'Alger par catégorie (31/12/2009)

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

Les dysfonctionnements et la dégradation des transports publics ont favorisé l'usage de la voiture particulière, en forte progression, mais ont encouragé aussi le développement des transports informels par taxis clandestins.

Sur un autre plan, concernant l'âge du parc. La situation n'est guère brillante en dépit du fait que l'on assiste depuis les dernières années à un rajeunissement rapide du fait de l'accès facilité des ménages algériens à la voiture (formule de crédit et facilité d'achat). Selon l'office national des statistiques, le parc automobile national représente 22,36% des véhicules de moins de cinq ans d'âge ; un parc dominé par les véhicules de plus de 20 ans d'âge qui représente 57,42% dont 33,04% de véhicules particuliers. Une part importante de ce parc a été de marques françaises (Renault-Peugeot-Citroën) avec 51,53% [108].

Les carburants utilisés par les véhicules en Algérie sont principalement les essences, le gasoil et une faible part pour le GPL (4 %) qui peine à se généraliser malgré une politique gouvernementale incitative depuis les années 1980. L'essence représentait la source d'énergie pour plus de 72,67% des véhicules et en particulier pour 81,57, % des véhicules de tourisme (ONS, 2012)[108], mais pour des raisons de prix à la pompe (le gasoil est deux fois moins cher que l'essence), on observe une forte tendance à la diésélisation du parc. Seulement 61,42% des véhicules immatriculés 2002 sont à l'essence. Cette tendance s'est accentuée et fortement puisque les statistiques au niveau national montrent que seuls 49,52% des véhicules immatriculés en 2006 fonctionnent à l'essence. Concernant les camions et les poids-lourds, ils roulent en mazoute (**Tableau III.1**).

**Tableau III.1** Répartition du parc national automobile selon le genre et la source d'énergie au 31/12/2009.

GENRE	SOURCE D'ENERGIE				
	ESSENCE	%	GAZOIL	%	TOTAL
VEHICULES DE TOURISME	2 115 242	81,57	478 068	18,43	2 593 310
CAMIONS	20 018	5,53	342 239	94,47	362 257
CAMIONNETTES	525 978	64,02	295 648	35,98	821 626
AUTOCARS/AUTOBUS	1 442	2,06	68 628	97,94	70 070
TRACTEURS ROUTIERS	1 036	1,63	62 381	98,37	63 417
TRACTEURS AGRICOLES	2 816	2,15	128 023	97,85	130 839
VEHICULES SPECIAUX	347	10,33	3 011	89,67	3 358
MOTOS	10 241	93,29	737	6,71	10 978
<b>TOTAL</b>	<b>2 677 120</b>	<b>66,01</b>	<b>1 378 735</b>	<b>33,99</b>	<b>4 055 855 *</b>

Alger a atteint ses limites de fonctionnement dans l'état actuel des infrastructures. Les parkings existants sont saturés, le stationnement empiète sur la chaussée, les carrefours ne peuvent plus écouler

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

la demande malgré la réalisation des trémies, des bouchons se forment durant toute la journée et plus particulièrement aux heures de pointe des déplacements : migrations alternantes domicile-travail. La congestion gagne aujourd'hui la périphérie et les réseaux secondaires.

Les conditions de circulation à Alger peuvent donc se résumer par :

- L'absence de gestion et de régulation des carrefours.
- L'absence d'une politique liée au stationnement et à la logistique (livraisons, poids lourds, etc.).
- L'absence de mesures typiques et de priorité pour les transports collectifs.
- L'absence d'une prise en charge appropriée des piétons.

Face à cette situation, le ministère des transports dote Alger de plans de circulation et de transport afin de mieux diagnostiquer les problèmes de transport et de circulation que vit Alger au quotidien ; de prendre en compte les projets en cours de réalisation ou d'étude, en vue de proposer leur intégration dans un réseau cohérent [103].

### III.2 Description du site de prélèvement:

Pour étudier la pollution atmosphérique à travers les particules totales en suspension et les métaux lourds associés, dans les zones urbaines de la région algéroise, nous avons selon le but à atteindre et les moyens disponibles sélectionné un site de proximité, c.à.d. un site qui est significativement influencé par les sources émettrices, dans le cas présent le trafic routier.

Dans cette optique but, le Ministère de l'Environnement et le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), ont procédé depuis 2005 pratiquement à ce jour à une campagne d'échantillonnage réalisée au niveau des stations de prélèvement situées à Alger Centre [43].

Le site de mesure est un site urbain situé dans le quartier de Frantz Fanon à Alger centre. L'échantillonneur est installé sur les hauteurs d'Alger à 200 m par rapport au niveau de la mer et qui se trouve à proximité d'un axe routier important (environ 20000 à 50000 voiture par jours), d'où l'importance du nombre des véhicules qui transitent à côté du site de prélèvement.

La figure III.3 représente, le site de Frantz fanon, qui s'étale sur 1Km<sup>2</sup> et qui compte une densité de population évaluée à 200 000 habitants.

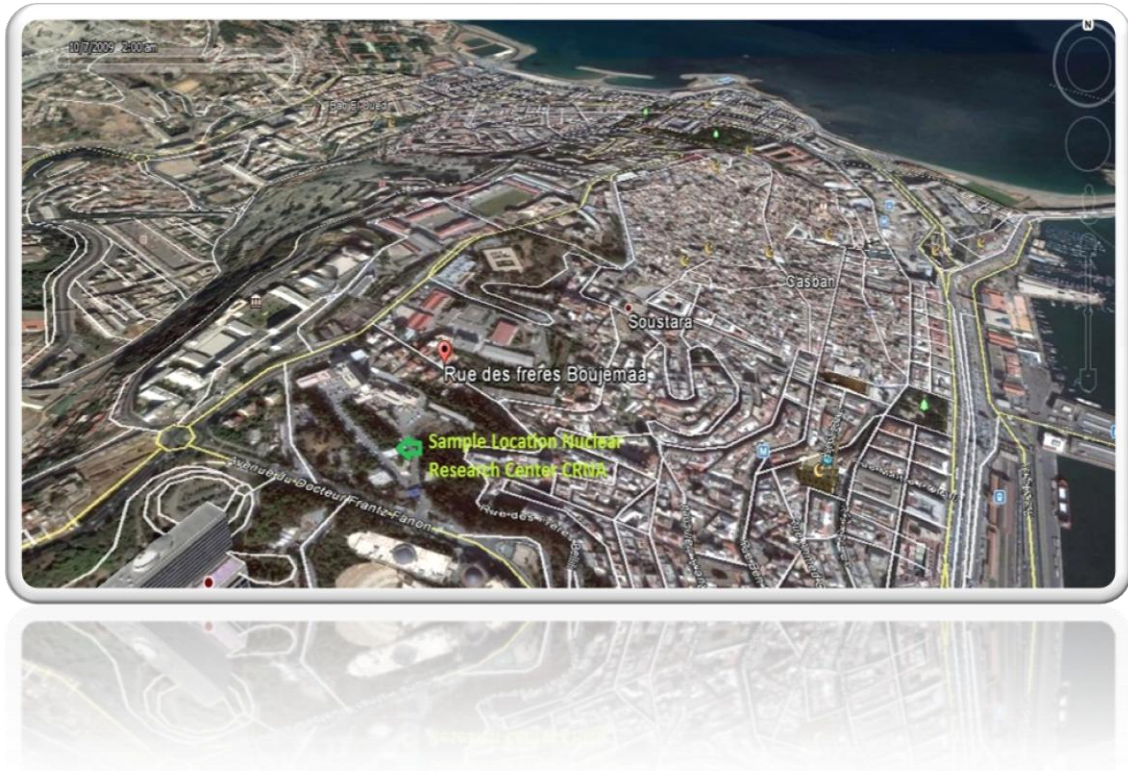


Figure III.3 Zone d'échantillonnage de l'air du site urbain d'Alger Centre

### III.2.1 Etude climatologique

Alger bénéficie d'un climat méditerranéen. Elle 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. Il fait généralement chaud surtout de la mi-juillet à la mi-août [109].

#### III.2.1.1 Caractéristiques climatiques

Tous les facteurs climatiques sous-cités ont une influence directe ou indirecte sur le comportement des polluants dans l'atmosphère (dispersion, demi-vie, ..etc). La température et la pluviosité sont les deux éléments principaux du climat [110].

- **La température**

La température est influencée par la topographie du milieu à savoir l'altitude, le relief, la pente et l'exposition, qui interviennent de façon déterminante dans la différenciation au sein d'un même méso climat et/ou de microclimat particuliers [111].

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

**Tableau III.2** Variation des températures moyennes minimales et maximales pour la région d'Alger (climat méditerranéen) [112].

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Année
<b>Min (°C)</b>	11	11	12	11	18	22	26	24	20	19	18	14	<b>17</b>
<b>Max (°C)</b>	15	16	20	20	27	32	36	35	29	28	24	20	<b>25</b>
<b>Moy (°C)</b>	13	14	16	15	22	27	31	29	25	23	21	17	<b>21</b>

Les températures sont uniformes: la moyenne quotidienne en janvier est d'environ 11/15 degrés, celle d'août (qui est quoique légèrement le mois le plus chaud) de 24/35 degrés. L'été est ensoleillé, l'air est humide, mais il y a aussi la brise de la mer.

- **La pluviométrie**

L'eau provient des précipitations(pluie, neige et grêle) et des phénomènes physiques et physiologiques. En Algérie, la pluviosité augmente avec de l'altitude ce qui nous mène à dire que les pluies sont d'origine orographiques [103].

La wilaya d'Alger reçoit des quantités annuelles de précipitations variant en moyenne entre 400 mm et 1200 mm. Elle est de ce fait plus arrosée que la plupart du reste du pays.

La grêle peut s'abattre en accompagnement de violentes averses, ainsi qu'une éventuelle chute de neige sur les hauteurs. Cette grêle, qui peut atteindre le dimensionnement des pierres, fond assez vite.

La neige tombe plutôt sur les zones élevées de Bouchaoui, Bouzaréah, Chéraga, Ben Aknoun, Bir Mourad Raïs et Douéra. Son épaisseur atteint alors à certains endroits, près de 10 cm. Les axes routiers sont fréquemment bloqués. Les communes doivent être équipées pour y faire face, sous peine de grands embouteillages en pleines heures de pointe routière au niveau de plusieurs axes routiers importants.

**Tableau III.3** Variation des précipitations pour la région d'Alger [112]

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
<b>Précipitations (mm)</b>	176	66	73	105	52	1	2	6	85	43	77	125	<b>811</b>

### ▪ Le Vent

Le vent est l'un des éléments les plus caractéristiques du climat, malheureusement l'observation et l'étude posent le plus de difficultés. Au sol, il est fortement influencé par les conditions topographiques locales [113].

Le vent est caractérisé par sa fréquence, sa vitesse et sa direction, il intervient dans la dispersion de divers éléments en suspension, tel que les particules fines, les fumées et l'odeur...etc.

Selon SELTEZER (1946) [113], la force des vents est estimée par une échelle télégraphique. Elle varie de (0 à 1m/s) pour un vent calme à (> 9m/s) pour un vent violent.

La wilaya d'Alger présente des vitesses moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres entre 1 m/s et 6 m/s [114]. L'hiver est caractérisé par des vents le plus souvent forts de direction dominante Ouest, Nord et Nord Ouest. L'été est caractérisé par domination des vents de direction Est et Sud Est, Ces derniers sont la cause derrière les tempêtes de sable modifiant la nature des particules en suspensions et leurs contenu élémentaire dans l'air [43].

### ▪ Humidité de l'air

L'humidité est relative à la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau, elle peut être exprimée de diverses manières : humidité absolue, humidité spécifique, humidité relative. L'air contient de la vapeur d'eau, on mesure la quantité d'eau par un taux d'humidité qui peut varier de 0% -100% [115]. L'humidité relative constitue par ses écarts brutaux l'un des caractères climatiques les plus importants des montagnes de l'Afrique du nord [116].

**Tableau III.4 :** Humidité relative moyenne mensuelle de la ville d'Alger [117].

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Humidité(%)	81	71	75	83	68	58	60	72	80	69	58	72	75

### III.3 Les moyens de prélèvement :

L'échantillonnage a été effectué pendant la période qui s'étalait du janvier 2009 au février 2010. Dans notre étude, nous avons procédé à deux types de prélèvement, les particules totales en suspension (TSP) et les matières particulaires PM2.5 et PM10 en utilisant :

#### ▪ Un échantillonneur d'air de type «Gent» à cartouche filtrante :

Cet appareil spécialement conçu pour l'échantillonnage de la fraction respirable (10microns) d'un aérosol suit le principe du filtrage en série (voir le schéma III.4). Conçu à l'Université de Gand — «Gent» en Flamand — il est actuellement fourni par l'Université Clarkson (Etats-Unis) et utilisé par

### Chapitre III : Matériels et Méthodes

un grand nombre de pays en Afrique pour l'étude de la pollution atmosphérique et aux projets associés. La cartouche filtrante comporte deux filtres en polycarbonate de diamètre 47 mm (pores de 8 microns et de 0.4 micron, respectivement); elle est logée dans un cylindre muni d'un pré filtre d'impact qui retient les particules de plus de 08 microns et laisse passer celles de moins de 08 microns dans les conditions normales de température et de pression, avec un débit de travail de 16.7 litres/min. A ce débit, le filtre grossier (8 microns) conserve une efficacité de 50 % pour les particules de 2 microns, de sorte qu'il retient en fait des particules entre 2 et 10 microns, tandis que le filtre fin arrête les particules de granulométrie inférieure.

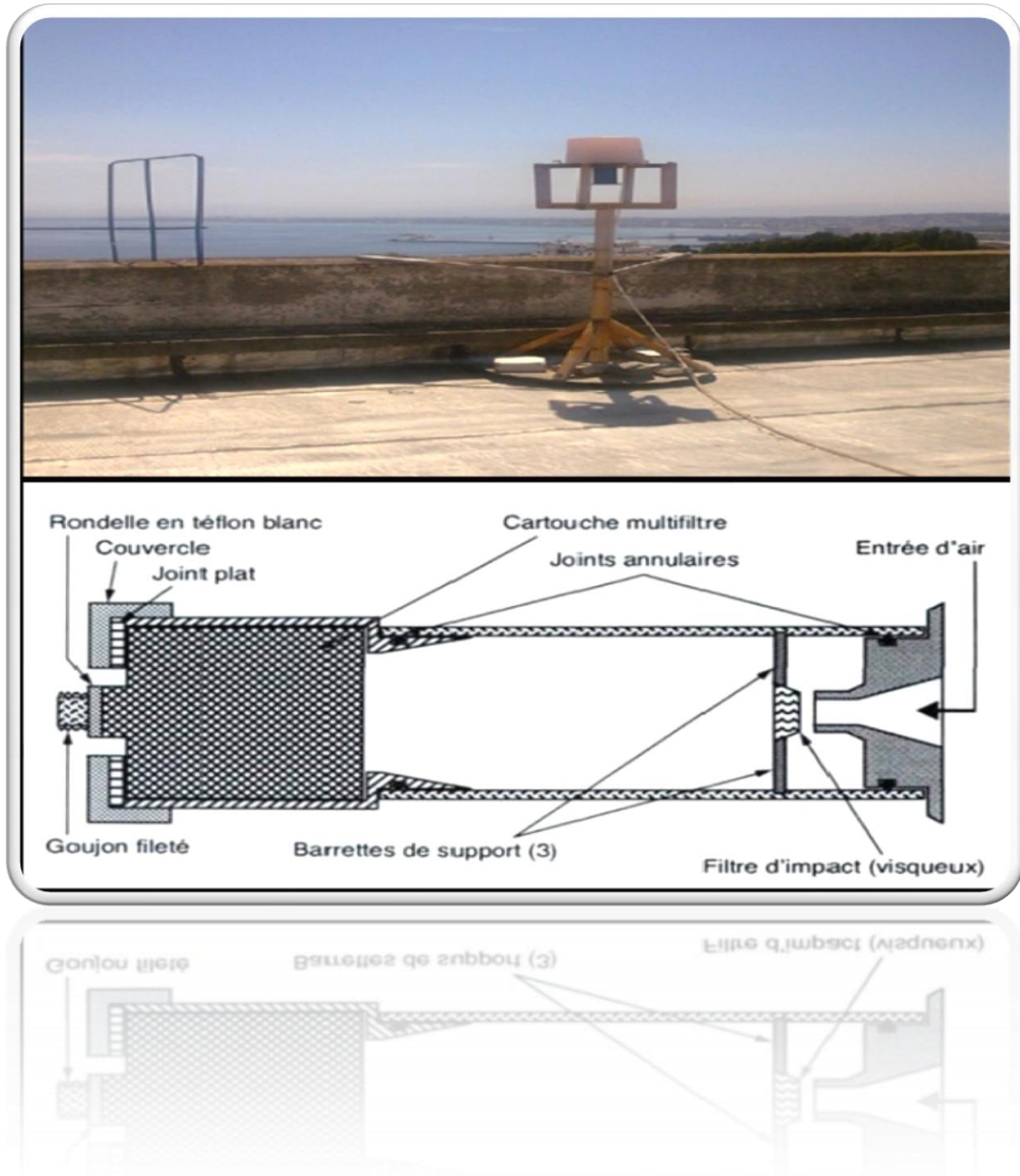


Figure III.4 Gent Sampler [43]

### ▪ Un échantillonneur TSP pour le prélèvement de la matière totale en suspension:

L'échantillonneur utilisé comporte un filtre à faible résistance en ester cellulosique, de porosité  $0.8\mu\text{m}$ , de type AA MILLIPORE et de diamètre 37mm, traversé par un volume d'air d'environ  $1.6\text{m}^3/\text{h}$ . Ce débit correspond à la moyenne du volume d'air inhalé par une personne. Ce genre d'appareil est particulièrement utile pour la surveillance, en des divers lieux sans contraintes majeures [118].

La pompe d'échantillonnage (A) (Figure III.5) aspire l'air, celui-ci traverse le porte-filtre (B). Les particules totales en suspension (TSP) sont maintenues par le filtre. Le volume d'air prélevé est donné par un débitmètre (C) placé entre le porte-filtre et la pompe d'échantillonnage [43].

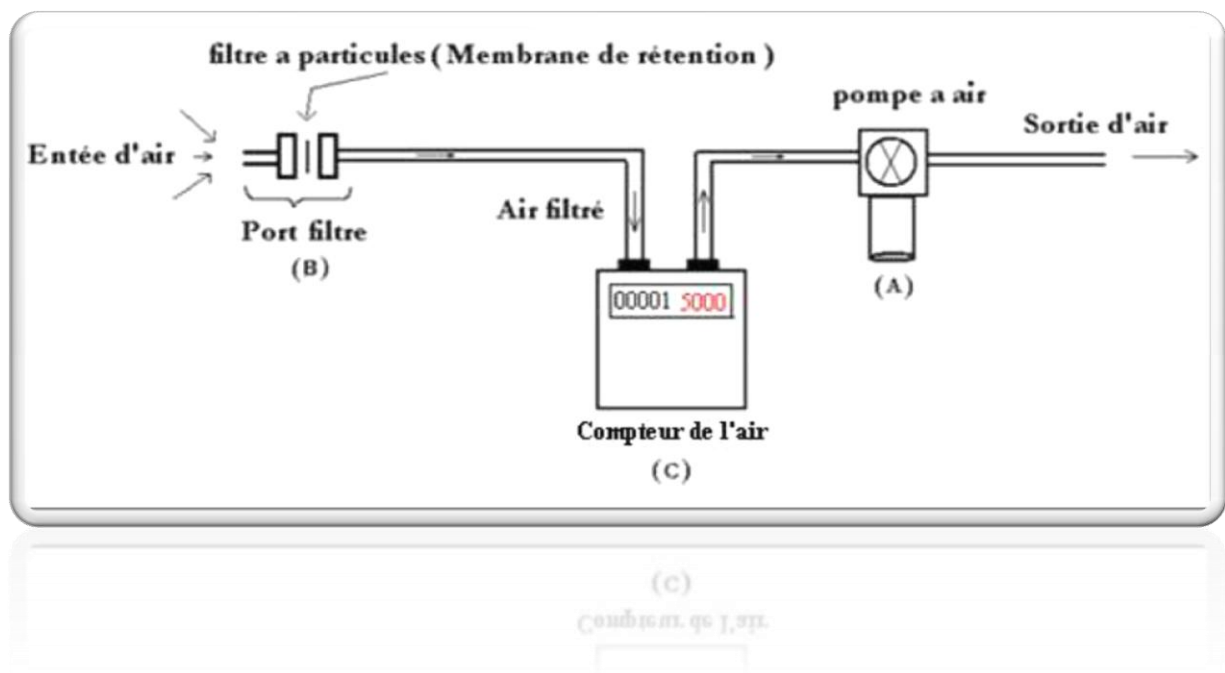


Figure III.5: Schéma du dispositif de prélèvement [43]

Pour chaque campagne de prélèvement, le débit marqué par le débitmètre doit être corrigé. L'étalonnage nous permet de confirmer que l'échantillonneur fonctionne à un débit de  $1.6\text{m}^3/\text{h}$ . Il prend en compte la température et la pression atmosphérique qui varient en fonction de l'altitude et des saisons.

La durée de la collecte des échantillons varie de 24h à 72h. Ce temps d'échantillonnage permet de cumuler une quantité assez importante d'aérosol afin qu'on puisse surveiller au mieux le niveau de la pollution de l'air.

#### I.4 Préparation des échantillons et standards:

Après la collecte et la pesée des filtres avant et après le prélèvement à l'aide d'une balance présentant une précision de  $0,001\text{mg}$ , les échantillons sont placés dans une boîte de pétri étanche et sont stockés dans un dessiccateur à température ambiante pour éviter toute contamination possible. La



connaissance du poids déposé, du temps de prélèvement et du débit d'air moyen permet de calculer la concentration de particules exprimée en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figure III.6** a) Filtre vierge

b) Filtre pollué

Pour une bonne progression de l'analyse par la fluorescence X, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes:

### III.4.1 Préparation des filtres standards :

Afin de calculer la concentration des métaux lourds contenus dans les aérosols cumulés sur les filtres, on a préparé des filtres sur lequel on a mis des standards chimiques qui sont utilisés comme standard de référence pour le dosage. Ces filtres de références standards sont préparés à partir des produits de haute pureté dont la concentration est connue avec précision. Ils sont préparés par dissolution dans une solution acide ou aqueuse en fonction du corps à dissoudre, puis on a procédé aux dilutions nécessaires pour réaliser des mélanges avec les concentrations désirées.

Nous avons préparé les filtres standards en versant un volume de 20  $\mu\text{l}$  de chaque élément métallique sur des filtres vierges de même nature que ceux utilisés lors du prélèvement des échantillons d'air, en utilisant une micropipette. Après nous avons mis les filtres dans l'étuve à une température de 30 °C pour le séchage.

Nous avons formé quatre groupes de mélange en prenant en considération la réactivité chimique des éléments métalliques entre eux et les interférences des pics énergétiques lors de l'analyse par la technique XRF.

« ST1 » composé de : V, Se, Ni et Zn.

« ST2 » composé de : Pb, Cu, Co et Mn.

« ST3 » composé de : Fe, Cr, Mg et As.

« ST4 » composé de : Sn, Cd et Sb.

### III.4.2 préparation des filtres blancs :

Les filtres blancs utilisés sont de nature similaire à ceux utilisés pour l'échantillonnage, à part que cette fois nous les avons analysés par la technique XRF dans leur état vierge, afin de quantifier les impuretés des éléments métalliques dans ces filtres.

### III.5 Appareillage:

Les concentrations élémentaires des dépôts sur les filtres ont été déterminées en utilisant un spectromètre XRF PANalytical de la gamme Epsilon 3 (Figure III.7). Ce spectromètre est caractérisé par [119] :

- Une Haute sensibilité grâce à un trajet optique optimisé en termes d'excitation et de détection
- Leader en termes de performance sur les éléments légers
- Sécurité Rayons X assurée
- Complète traçabilité des données
- Conformité intégrale aux normes réglementaires
- Outils flexibles pour une large gamme d'application : Epsilon 3 – utilisé sur la gamme (Na – Am) dans les domaines de la recherche au contrôle qualité.
- Peuvent gérer une grande variété de types d'échantillons, de quelques milligrammes allant à des tailles irrégulières (type morceaux de roches) : solides, poudres pressées, poudres en vrac, liquides, filtres, perles (disques de verre), pâtes, granulés, films ou revêtements.

La chaîne spectrométrique utilisée est constitué de:

- Un tube à rayon X métal-céramique à anode Rhodium de 50 kV avec une intensité de 3mA.
- Un détecteur semi-conducteur SDD (silicon drift detector) de haute résolution qui permet des seuils de saturation élevés (linéaire jusqu'à plus de 200,000 cps). La résolution de ce détecteur est indépendante du taux de comptage et est généralement meilleure que 135 eV pour éviter les chevauchements de raies.
- Un spinner et un passeur d'échantillons amovible à 10 positions.
- Un micro-ordinateur pour stocker et traiter les spectres, les spectres enregistrés sont traités par le logiciel Minipal.



**Figure III.7** Dispositif expérimental de la XRF

### ○ **Fonctionnement du spectromètre :**

L'analyse par fluorescence X a été réalisée par un spectrophotomètre PANalytical Epsilon 3 d'une puissance de 9 watts. L'appareil permet de sélectionner des conditions d'excitations optimales. L'analyse a été répétée trois fois, sous différentes conditions d'excitations. Les spectres obtenus ont été enregistrés avec 3 filtres :

- Un filtre en argent d'une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ , sous une ddp de 50,00 kV et un courant de 300  $\mu\text{A}$ . Il permet de détecter les pics de forte énergie.
- Un filtre en cuivre dense d'une épaisseur de 500  $\mu\text{m}$ , sous une ddp de 50,00 kV et un courant de 300  $\mu\text{A}$ .
- Un filtre en aluminium dense d'une épaisseur de 200  $\mu\text{m}$ , sous une ddp de 20,00 kV et un courant de 750  $\mu\text{A}$ .

L'utilisation du filtre en aluminium permet d'explorer la région du spectre comprise entre 1 et 20 keV. La diminution de l'épaisseur du filtre permet de mieux déceler des pics de faibles énergies.

Le logiciel de mesure nous permet d'obtenir des spectres exprimant l'intensité de l'émission fluorescente en coups par seconde en fonction de l'énergie des transitions correspondantes.

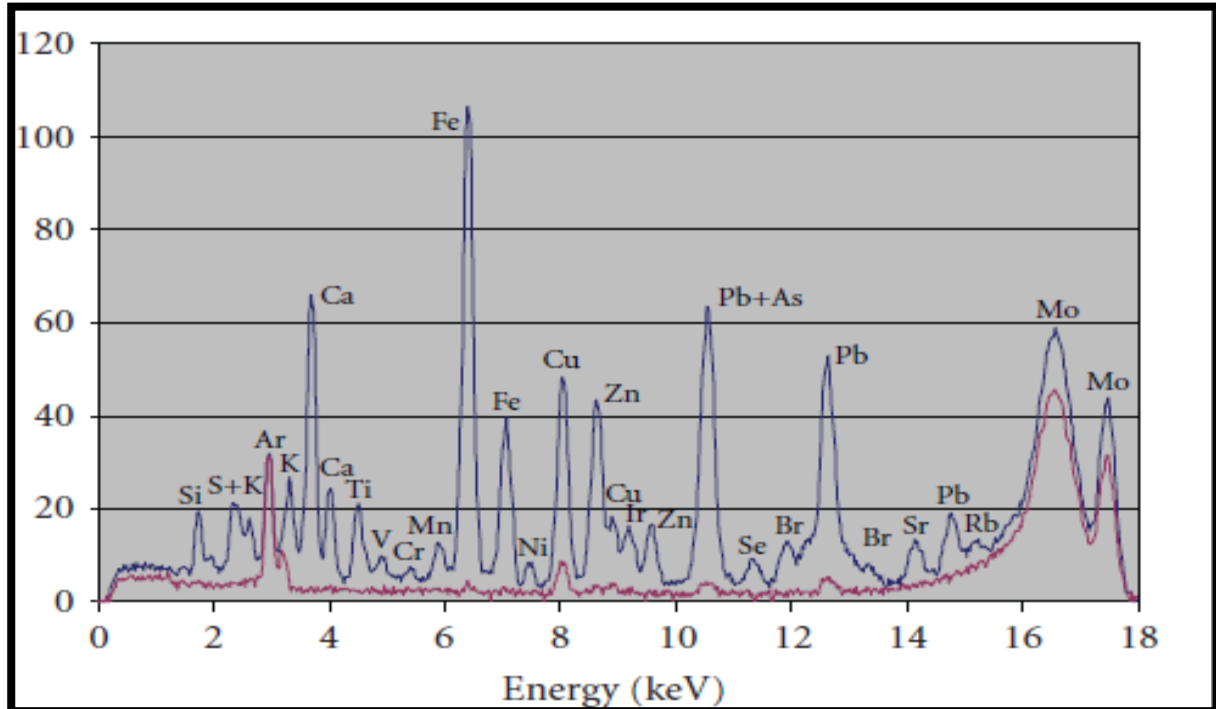


Figure III.8 : Spectre d'énergie typique en fluorescence X : pollution de l'air [120]

Le principe de la méthode d'analyse utilisée est basé sur la comparaison de l'intensité du pic dans le standard pour un élément donné avec l'intensité du pic de l'élément recherché dans l'échantillon, tout en faisant soustraire l'air du pic du blanc.

La concentration d'un élément dans l'échantillon est calculée à partir de l'expression suivante :

$$C_i = \frac{(I_{i,ech} - I_b) \times m_{st}}{(I_{i,std} - I_b) \times V}$$

Tel que :

$C_i$  : la concentration de l'élément **i** dans l'échantillon en ng/m<sup>3</sup>.

$m_{st}$  : la masse de l'élément **i** dans le standard en ng.

$I_{i,ech}$ ,  $I_{i,std}$  sont les intensités de l'élément **i** respectivement dans l'échantillon et dans le standard en coups.

$I_b$  : l'intensité de l'élément **i** dans le blanc en coups.

$V$  : volume d'air aspiré par la pompe pour chaque échantillon en m<sup>3</sup>.

---

# Chapitre IV : Resultats et discussions

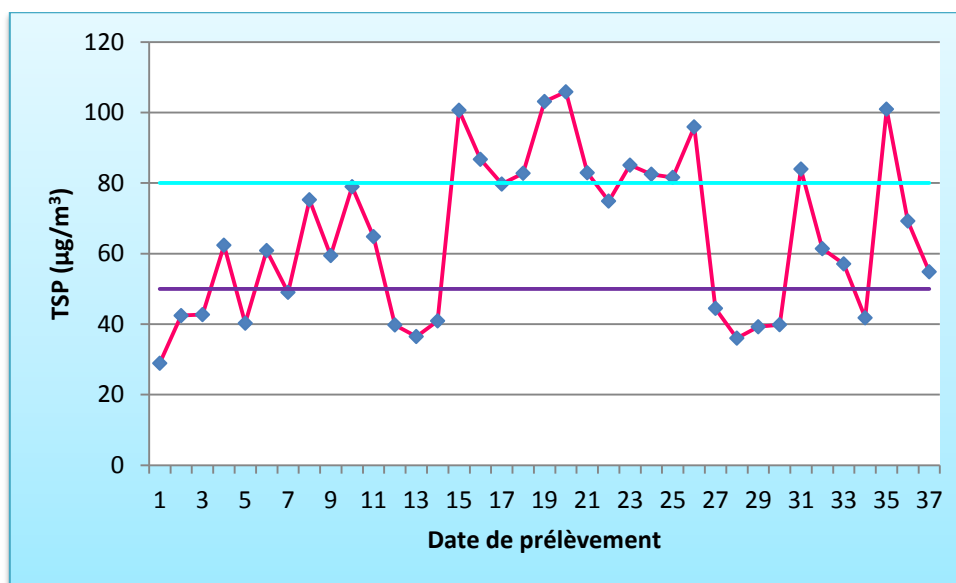
---

Après l'analyse des échantillons par la technique de fluorescence X, nous avons obtenu les résultats représentés ci-dessous.

Ces résultats illustrent le niveau de la pollution de l'air par les particules en suspension (TSP) et matière particulaire (PM10, PM2.5) ainsi que les ETM (Eléments-Traces Métalliques) associés au site choisi.

### IV.1 Mesure des concentrations en TSP

Durant la campagne des mesures, qui s'est étalé du 03/01/2009 au 25/02/2010, nous avons remarqué que les teneurs en TSP mesurées évoluent dans une large gamme de valeurs (**Figure IV.1**).



**Figure IV.1** Evolution des concentrations des TSP du 03/01/2009 au 25/02/2010

La plus basse teneur est de  $28\mu\text{g}/\text{m}^3$  alors que la teneur maximale atteint  $105\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentration moyenne en TSP observée est de  $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette concentration est inférieure à la valeur limite annuelle Algérienne recommandée par l'OMS qui est fixé à  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ , elle est, cependant, au-delà de la valeur cible annuelle fixé à  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Approximativement 67% des échantillons, dépassent la valeur cible ( $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), alors que 35% des échantillons dépassent largement la valeur limite Algérienne ( $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les conditions météorologiques jouent un rôle très important dans la dispersion des différents polluants de l'atmosphère [121]. Le Tableau IV.1 résume les résultats de l'analyse des TSP et les paramètres météorologiques tels que : la température, la vitesse du vent, l'humidité ainsi que la quantité de pluie enregistré au cours de la période de prélèvement des échantillons.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.1** Variations des concentrations des particules totales en suspension (TSP) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et paramètres météorologiques enregistrés durant la période de prélèvement.

Echantillon	Date de prélèvement	Teneurs en TSP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Pluie (mm)	Humidité (%)	Vent m/s	Température( $^{\circ}\text{C}$ )
1	03/01/09 06/01/09	28	8	84	4	15
2	10/01/09 14/01/09	42	7	83	5	13
3	17/01/09 21/01/09	43	8	75	4	16
4	24/01/09 28/01/09	62	9	80	10	14
5	31/01/09 04/02/09	40	7	75	7	17
6	14/02/09 18/02/09	61	0	66	4	15
7	21/02/09 25/02/09	49	1	72	4	15
8	28/02/09 04/03/09	75	2	57	5	20
9	14/03/09 18/03/09	59	2	82	5	20
10	21/03/09 25/03/09	79	0	58	5	19
11	28/03/09 01/04/09	65	5	80	5	18
12	04/04/09 08/04/09	40	4	72	5	19
13	11/04/09 15/04/09	36	5	81	7	18
14	18/04/09 21/04/09	50	7	87	5	17
15	25/04/09 29/04/09	101	1	79	6	25
16	02/05/09 06/05/09	87	1	81	5	21
17	16/05/09 20/05/09	80	0.2	60	3	28
18	30/05/09 03/06/09	83	3	72	4	29
19	06/06/09 10/06/09	103	0	64	5	27
20	13/06/09 17/06/09	105	0	45	5	35
21	27/06/09 01/07/09	83	0	55	4	33
22	04/07/09 08/07/09	75	1	48	5	34
23	11/07/09 15/07/09	85	0	58	5	36
24	18/07/09 22/07/09	83	0	62	5	35
25	01/08/09 05/08/09	82	0	65	5	35
26	01/09/09 03/09/09	96	0	69	5	34



## Chapitre IV : Résultats et discussions

27	06/09/09 10/09/09	45	0	81	6	30
28	13/09/09 17/09/09	36	7	82	4	27
29	22/09/09 24/09/09	39	12	90	5	24
30	04/10/09 08/10/09	40	0	58	4	34
31	18/10/09 22/10/09	84	4	66	6	25
32	25/10/09 29/10/09	61	0	60	4	26
33	02/11/09 05/11/09	57	2	62	7	24
34	08/11/09 12/11/09	42	7	68	7	19
35	22/11/09 26/11/09	101	0	61	4	24
36	06/12/09 10/12/09	69	0	68	4	21
37	21/02/10 25/02/10	55	1	66	8	22

L'examen du tableau IV.1 permet de constater que les pics des TSP sont atteints lors des mesures des filtres 15, 19, 20, 26 et 35 avec des concentrations respectivement :  $101\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $103\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $106\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $96\mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $101\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ces niveaux correspondent à l'absence de précipitation, généralement pendant les périodes chaudes qui engendrent des températures élevées et à l'occurrence des vents, en effet les vents sont susceptibles d'entraîner facilement, par resuspension, les poussières de sol vers le poste de mesure.

En outre, on constate l'existence de 3 tendances dans cette période de mesure. La période s'étalant du 03/01/09 au 21/04/09 est caractérisé par des concentrations relativement faibles variant entre  $28\mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $79\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La moyenne des concentrations enregistrées durant cette première période est de  $52\mu\text{g}/\text{m}^3$ . On peut attribuer ce faible niveau des TSP aux précipitations et humidités enregistrés. Le lessivage de l'atmosphère par les précipitations et la mouillabilité du sol empêchant la resuspension des poussières peuvent expliquer ces teneurs des TSP [48]. Une augmentation brutale des concentrations est ensuite observée à partir du 25/04/2009, généralement dans les périodes printanières et estivales caractérisés par une température élevée. La moyenne observée durant cette deuxième période est de  $89\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A partir du 06/09/09, on remarque du nouveau une diminution des concentrations en TSP, avec une valeur moyenne de  $52\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Généralement, les concentrations minimales sont associées aux week-ends ou sont attribuables à des conditions météorologiques particulières telles que les précipitations, l'humidité et les vitesses de vents.

Un pic de concentration  $101\mu\text{g}/\text{m}^3$  a été enregistré le 22/11/09, dans une journée ensoleillé et en absence de précipitation.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Rappelons dans ce contexte que Belamri [43] a fait des mesures des TSP durant les années 2006, 2007 et 2008 sur le même site d'étude et a obtenus les résultats suivants : 2006 ( $69\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2007 ( $79\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et 2008 ( $72\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), alors que nous avons trouvé une valeur de  $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces valeurs restent quasi stable durant la période 2006-2009. Cette tendance peut être attribuée au rajeunissement du parc automobile malgré la croissance constatée du trafic dans cette zone d'étude qui n'est pas à démontrer.

### IV.1.1 Evolution des teneurs en ETM associés aux TSP

Les résultats relatifs à l'analyse des ETM associés au TSP sont résumés comme suit :

- **Le fer :**

Les concentrations du fer sont très élevées, elles varient entre  $188\text{ ng}/\text{m}^3$  et  $7202\text{ ng}/\text{m}^3$ . La source probable de cet élément est terrigène, il provient essentiellement de l'usure des roches et du sol, aussi de l'abrasion des pneus (**Figure IV.2**) [19].

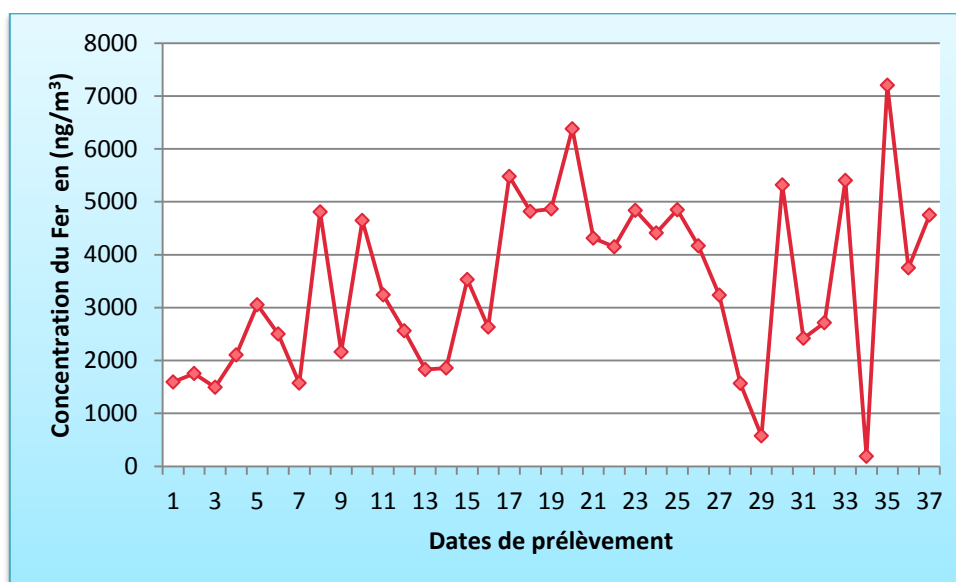


Figure IV.2 Variation des concentrations du Fer durant la période de prélèvement.

- **Le Manganèse :**

Les teneurs détectées en manganèse varient entre  $14\text{ ng}/\text{m}^3$  et  $248\text{ ng}/\text{m}^3$ . La principale source de cet élément est la croûte terrestre. La concentration moyenne du manganèse durant la période d'étude est de  $126\text{ ng}/\text{m}^3$  (Figure IV.3). Cette valeur est inférieure à la norme annuelle préconisée par l'OMS qui est de  $150\text{ ng}/\text{m}^3$ .

## Chapitre IV : Résultats et discussions

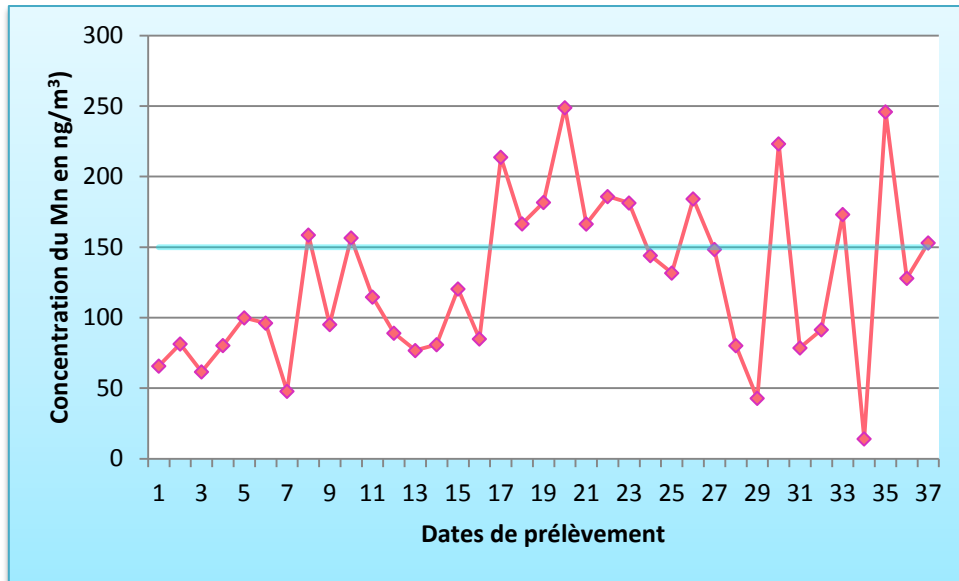


Figure IV.3 Variation des concentrations du Mn durant la période de prélèvement.

### Le plomb :

Les concentrations du plomb varient entre  $96\text{ng/m}^3$  et  $675\text{ng/m}^3$ . La teneur moyenne est de  $269\text{ng/m}^3$ . Sur les 37 échantillons analysés on a 4 échantillons dont les concentrations en Pb dépassent la norme de l'OMS ( $500\text{ng/m}^3$ ), mais inférieures à celle fixée par la directive européenne ( $900\text{ng/m}^3$ ) (Figure IV.4). La valeur maximale est enregistrée dans une journée ensoleillée caractérisé par une température élevée ( $35\text{C}^\circ$ ) et humidité faible. Le plomb provient principalement du trafic automobile.

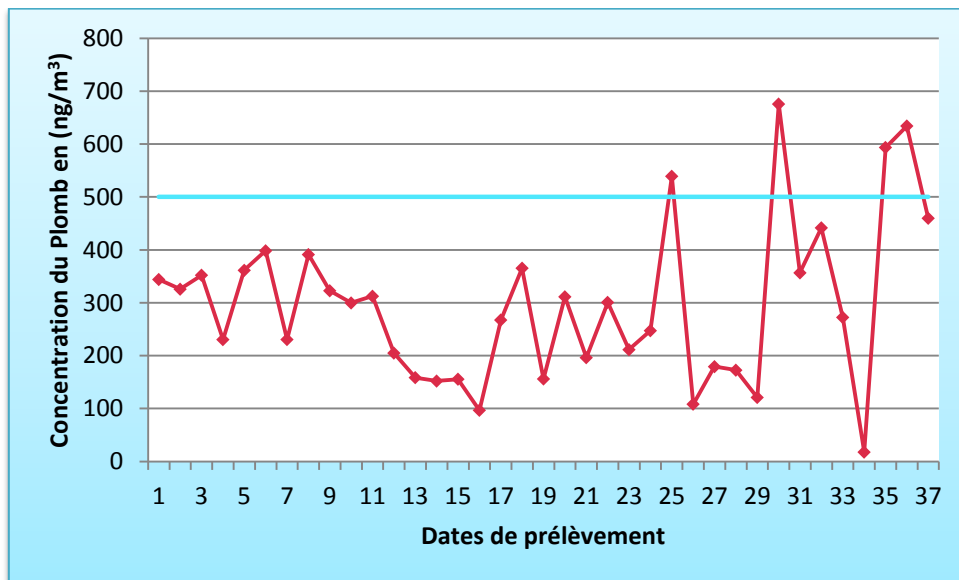


Figure IV.4 Variation des concentrations du Pb durant la période de prélèvement.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### ▪ Le Nickel :

Par comparaison avec la concentration limite, fixée par l'OMS ( $20 \text{ ng/m}^3$ ), une grande partie des prélèvements présentent des valeurs concentriques très élevées en nickel. Sa variation pendant toute la période de collecte est presque indépendante de la variation des paramètres météorologiques. Le site étudié présente donc une forte pollution par le nickel. Ce polluant provient des poussières émises par les pots catalytiques [122].

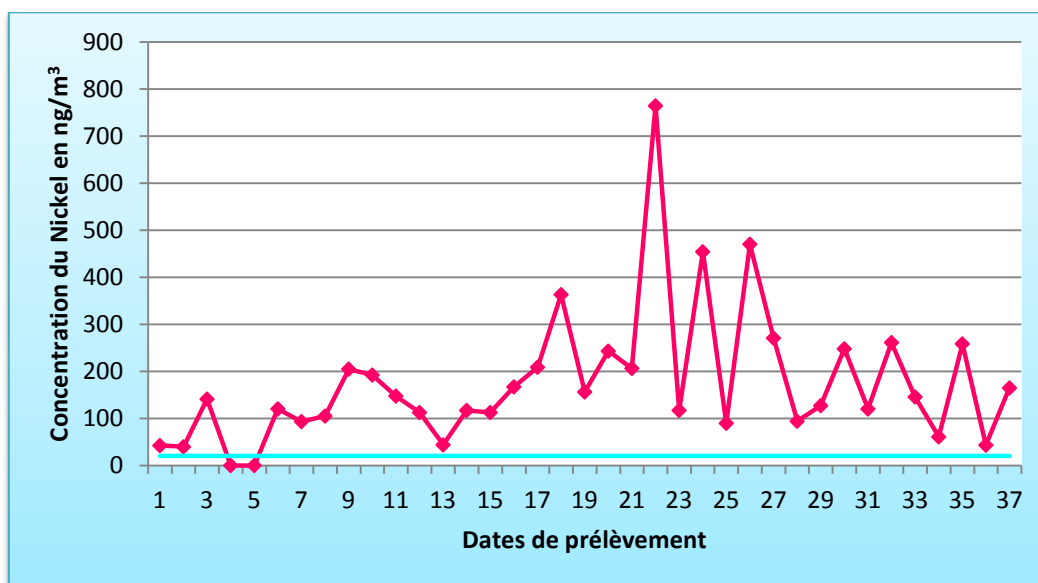


Figure IV.5 Variation des concentrations du Ni durant la période de prélèvement.

### ▪ Le Cobalt :

D'après la figure ci dessous, on remarque que les concentrations en Co varient de 2 à  $151 \text{ ng/m}^3$ . Le niveau moyen de Co ( $23 \text{ ng/m}^3$ ) est 4 fois plus élevé que la concentration de référence pour l'inhalation fixé à  $5 \text{ ng/m}^3$  [123]. Les teneurs en Co sont très élevées durant les périodes printanière et estival dont on a déterminé un pic de  $151 \text{ ng/m}^3$ .

## Chapitre IV : Résultats et discussions

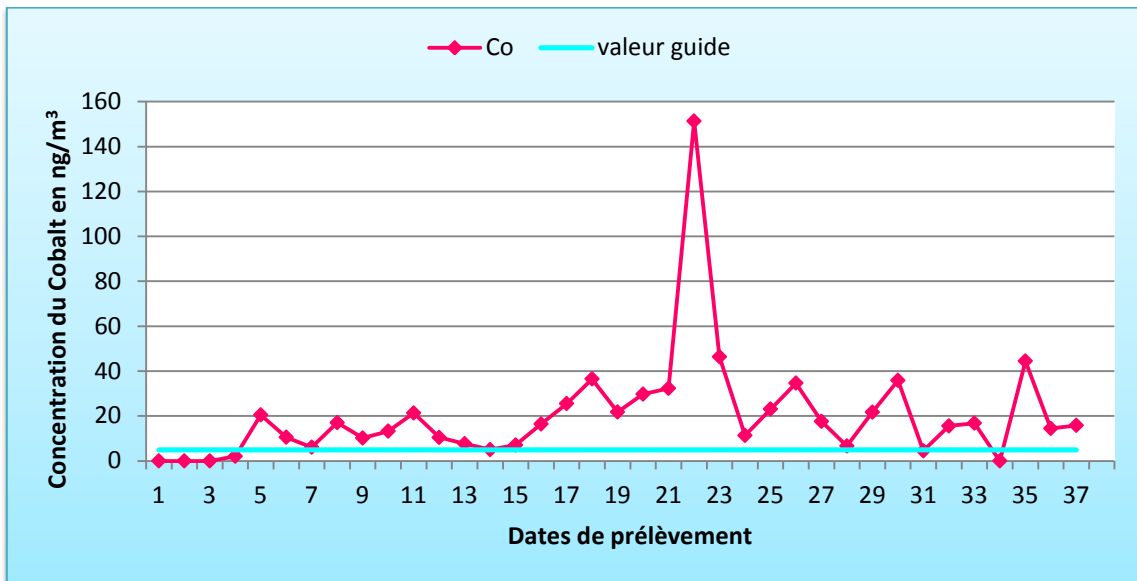


Figure IV.6 Variation des concentrations du Co durant la période de prélèvement.

### ▪ Le Chrome :

Les teneurs détectées en Chrome varient entre  $2 \text{ ng/m}^3$  et  $18 \text{ ng/m}^3$  avec une valeur moyenne de  $9 \text{ ng/m}^3$ . Les concentrations en Chrome dépassent la valeur norme fixée par l'OMS ( $0.25 \text{ ng/m}^3$ ) dans tous les échantillons prélevés. La source de ce polluant est la combustion d'essence, Les revêtements des pots catalytiques ainsi que de l'usure des jantes. A des teneurs fortes, le Chrome devient très toxique et portera sans doute atteinte à la santé humaine et les êtres vivants.

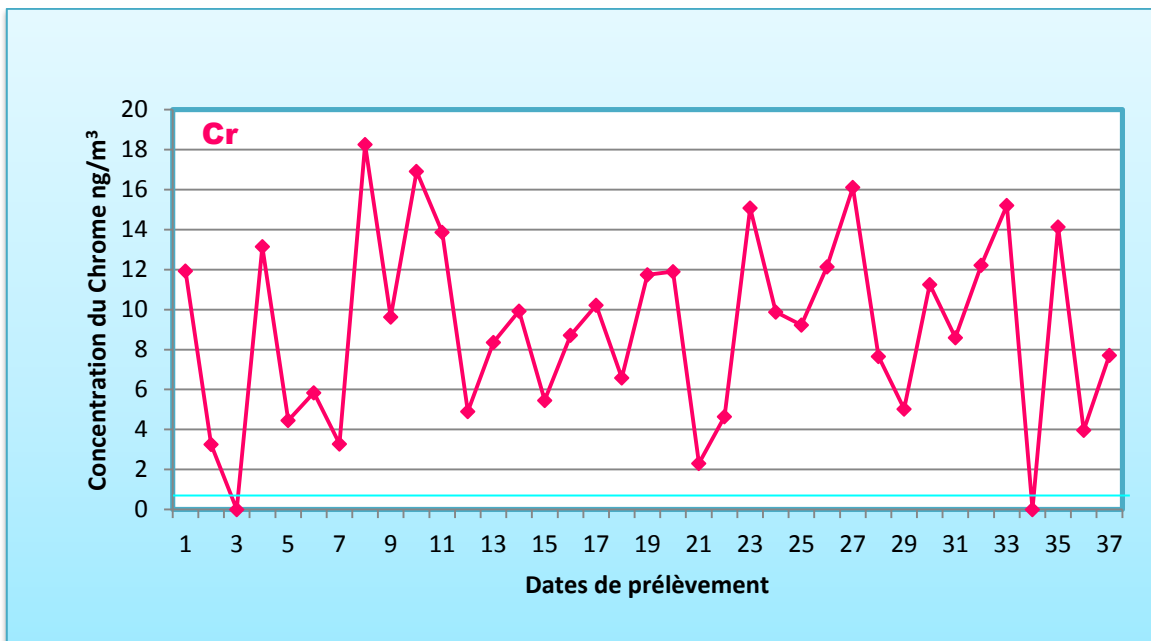


Figure IV.7 Variation des concentrations du Cr durant la période de prélèvement.

### ▪ Le Zinc :

D'après cette figure, nous remarquons que les teneurs en zinc sont relativement élevées durant la période des prélèvements, avec des concentrations qui varient de  $6 \text{ ng/m}^3$  à  $4071 \text{ ng/m}^3$ . La valeur minimale ( $6 \text{ ng/m}^3$ ) a été enregistrée dans un temps pluvieux et humide. Malgré son effet toxique à fortes doses, il n'y a pas de norme fixée pour cet oligo-élément afin de limiter sa présence dans l'air.

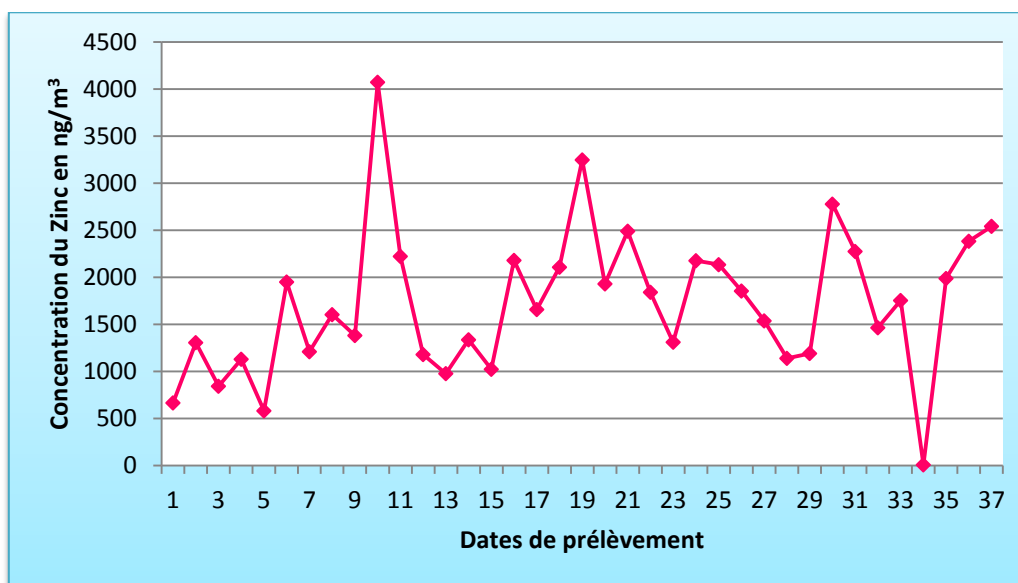


Figure IV.8 Variation des concentrations du Zn durant la période de prélèvement.

### ▪ Le Cuivre :

Les concentrations de cuivre dans l'air durant la période d'échantillonnage oscillent entre  $0.89 \text{ ng/m}^3$  et  $16 \text{ ng/m}^3$ . La moyenne des concentrations est égale à  $7 \text{ ng/m}^3$ . Cette valeur est largement inférieure à la norme en vigueur aux USA qui est de  $20 \text{ ng/m}^3$  [123]. L'évolution des concentrations en cuivre est presque indépendante des données météorologiques pendant toute la période de collecte.

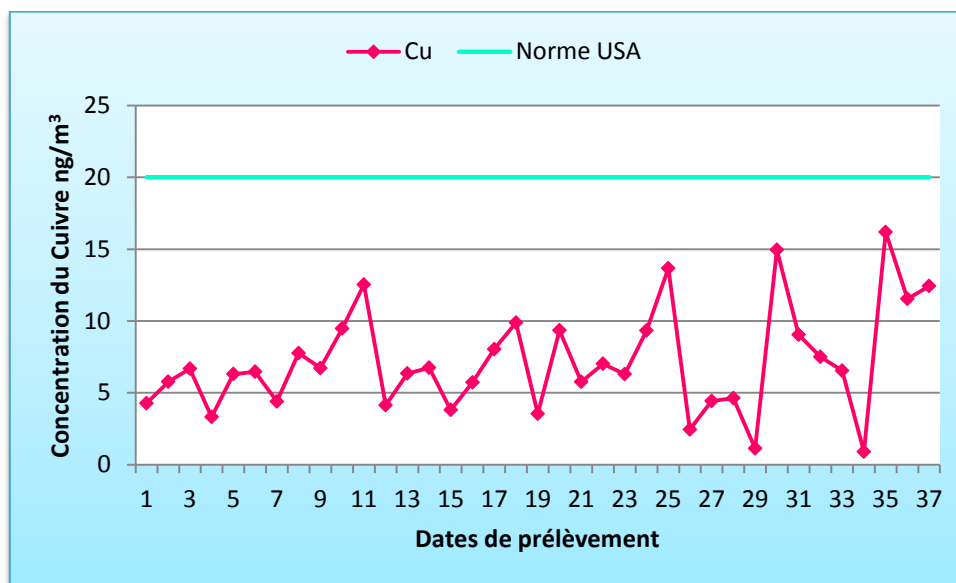


Figure IV.9 Variation des concentrations du Cu durant la période de prélèvement.

### Le Cadmium :

Les concentrations de cadmium dans l'air ambiant sont comprises entre 0 ng/m<sup>3</sup> et 1982 ng/m<sup>3</sup>. La moyenne des concentrations enregistrés est de 729 ng/m<sup>3</sup>. Cette valeur est largement supérieure à la norme annuelle dictée par l'OMS qui est de 5 ng/m<sup>3</sup>[123]. Les fortes concentrations de cet élément s'expliquent probablement par la très forte intensité de circulation des véhicules observée durant la période de prélèvement.

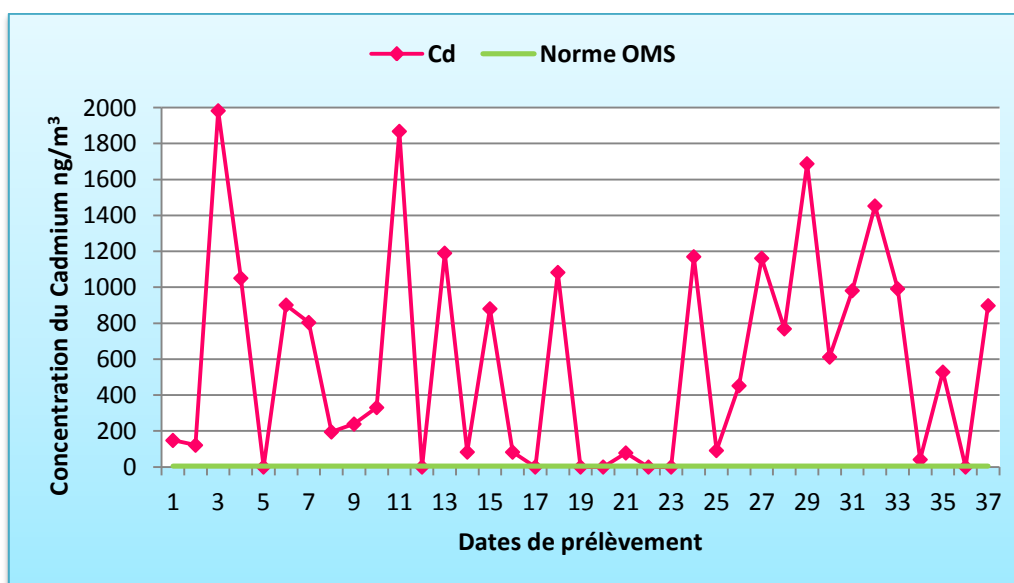


Figure IV.10 Variation des concentrations du Cd durant la période de prélèvement.

### ▪ L'Arsenic

Les teneurs détectées en Arsenic varient entre 0 ng/m<sup>3</sup> et 13 ng/m<sup>3</sup>. La concentration moyenne est de 3ng/m<sup>3</sup>. La teneur en As a dépassé la norme fixée par l'OMS (6 ng/m<sup>3</sup>) dans un seul échantillon avec une valeur de 13 ng/m<sup>3</sup>, enregistrée dans une journée caractérisé par un temps ensoleillé avec une température élevée et humidité faible.

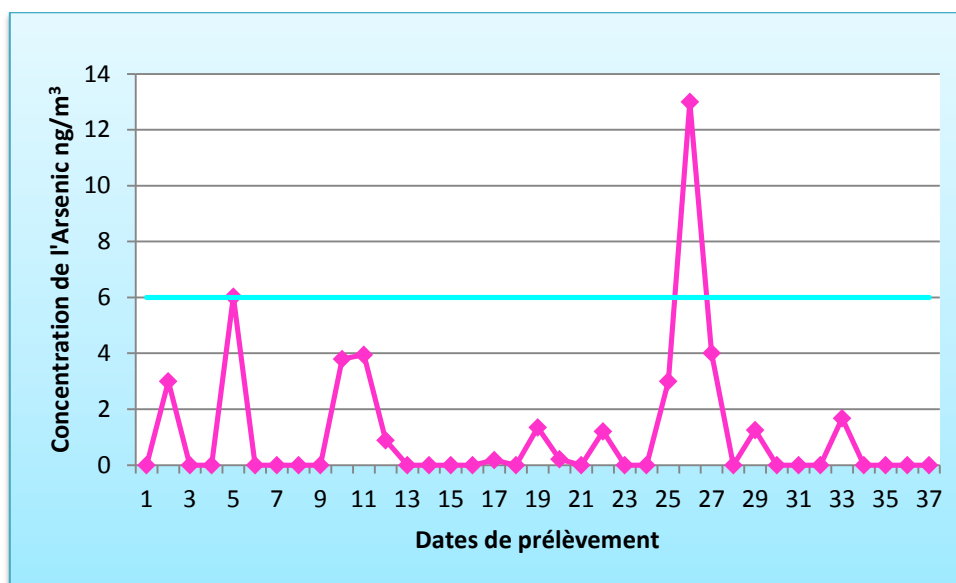


Figure IV.11 Variation des concentrations d'As durant la période de prélèvement

### ▪ Le Sélénium

Nous observons d'après cette figure que les teneurs détectées en Sélénium varient de 2 à 20 ng/m<sup>3</sup>. La teneur moyenne est de 10 ng/m<sup>3</sup>. Le niveau élevé en sélénium est enregistré dans une journée ensoleillée caractérisé par une haute température, faible humidité et un vent fort et sec (5.5m/s). Son existence est principalement liée aux lubrifiants, plaquette de freins et les moteurs des véhicules [122].



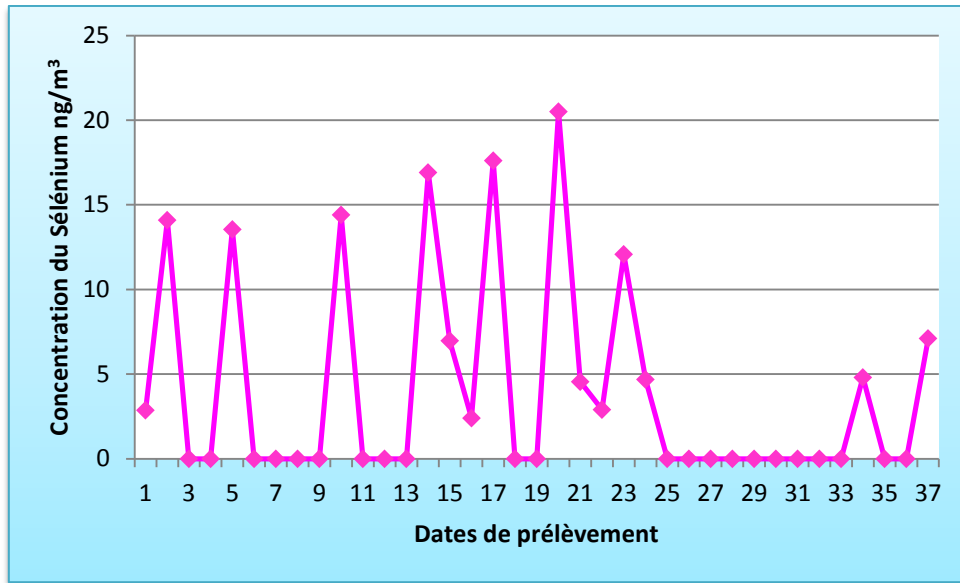


Figure IV.12 Variation des concentrations du Se durant la période de prélèvement

### ▪ Le Vanadium :

La concentration du vanadium dans les échantillons analysés varie de 0 à 1475 ng/m<sup>3</sup> avec une teneur moyenne égale à 342 ng/m<sup>3</sup>. Les fortes concentrations en vanadium sont enregistrées dans la période chaude. Ces concentrations relativement élevées du vanadium (V) qui est un métal très toxique, permettent de soupçonner une pollution de l'air même en absence de valeur seuil à ne pas dépasser.

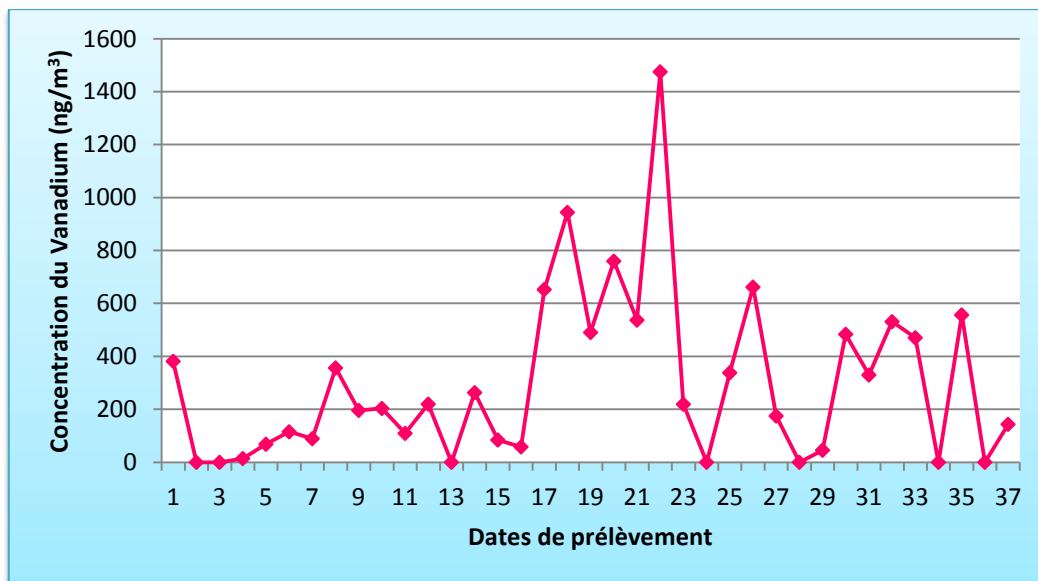


Figure IV.13 Variation des concentrations du V durant la période de prélèvement

### ▪ Le Magnésium :

L'examen de la figure IV.14 permet de constater que les concentrations du magnésium dans les TSP varient entre 1074 ng/m<sup>3</sup> et 9023 ng/m<sup>3</sup>. La concentration moyenne calculée sur tous les prélèvements est 3400ng/m<sup>3</sup>. Nous avons enregistré une forte teneur en magnésium durant toute la période de prélèvement.

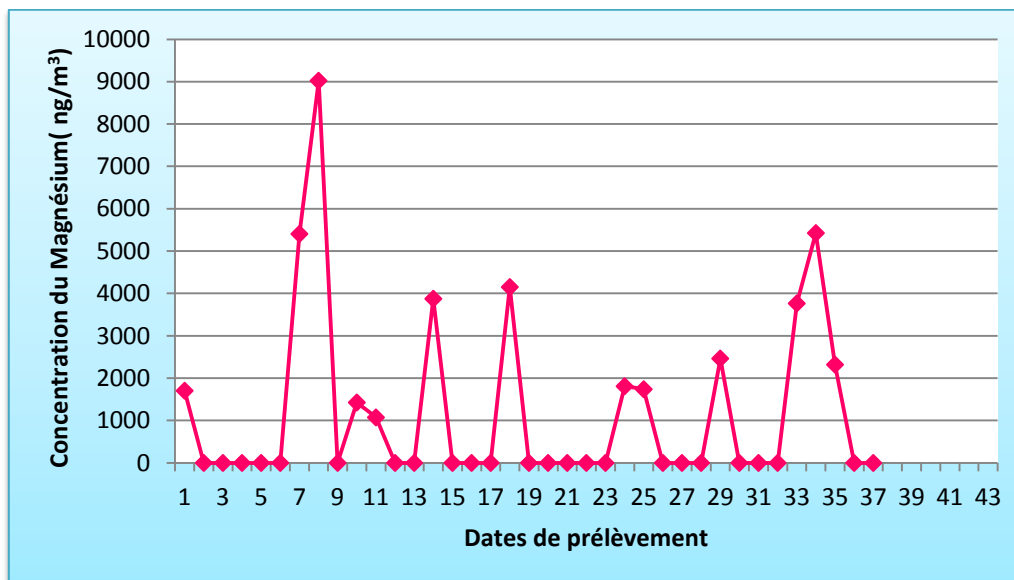


Figure IV.14 Variation des concentrations du Mg durant la période de prélèvement

### IV.2 Identification des sources des éléments :

L'identification des sources des éléments qui composent l'aérosol se fait grâce à l'étude des facteurs d'enrichissements. Ces facteurs nous permettent de classer les éléments selon leur origine naturelle : marine et terrigène ou anthropique.

#### IV.2.1 Calcul des facteurs d'enrichissements (FE):

Dans cette étude, nous avons choisi le fer comme élément de référence pour le calcul du facteur d'enrichissement puisque le sol est considéré comme la source la plus importante du fer dans les aérosols. Il a été déterminé en fonction de la concentration moyenne des éléments mentionnés par Masson (1966) [123]. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.2. Valeurs des facteurs d'enrichissements (FE)

Eléments	Facteurs d'enrichissements(FE)*
Fe	1
Mn	2
Pb	302
Co	13
Ni	36
Cr	2
Zn	357
Cu	2
Cd	530
As	24
Se	282
V	37
Mg	2

\* **FE <2**: L'enrichissement anthropique est considéré inexistant ou très faible, **2 <FE <5**: Enrichissement modéré, **5 <FE <20**: Enrichissement significatif, **20 <FE <40**: Très fort enrichissement, **FE > 40**: Extrême enrichissement [124].

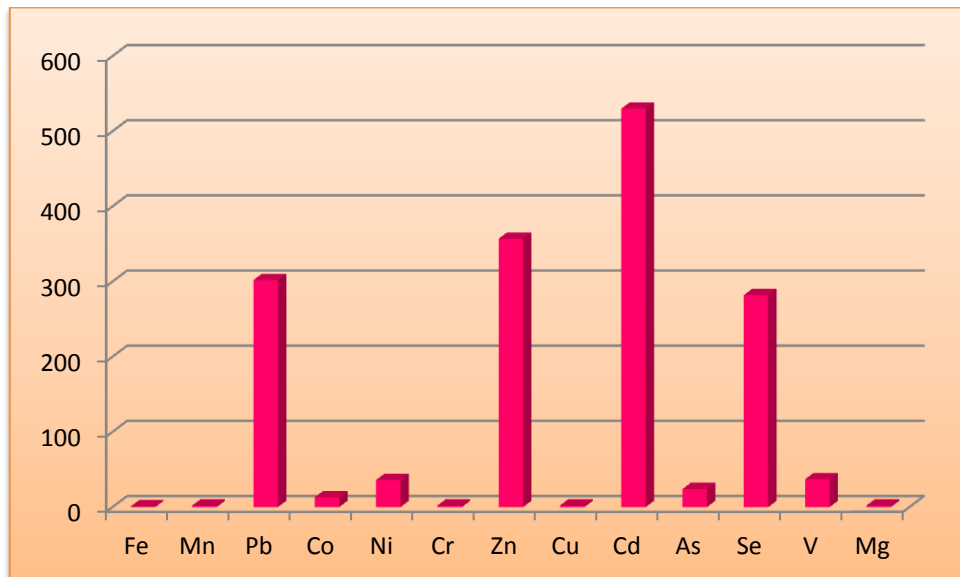


Figure IV.15 Facteurs d'enrichissements des éléments analysés.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Dans les échantillons d'aérosols analysés, les métaux ayant des FE inférieurs sont le manganèse, le chrome, le cuivre et magnésium, ce qui représente les métaux qui ont une source naturelle terrigène. La valeur du facteur d'enrichissement pour le cobalt était de 13 (<20), donc le cobalt est considéré comme ayant une source principalement non crustale [124]. Le nickel, vanadium et l'arsenic ont un FE<40 donc ils sont très fortement enrichit. Les valeurs FE élevées pour le Pb, Zn, Cd et Se indiquent qu'ils sont présent dans les aérosols atmosphériques en concentration trop élevée pour être expliqué en termes de processus normal d'altération crustale, ces éléments proviennent immensément des sources anthropiques.

- **Comparaison avec d'autres études :**

Le tableau IV.3 regroupe une comparaison des teneurs en TSP et métaux lourds associés entre le site étudié et quelques sites en Algérie en particulier, et avec quelques pays situés dans le bassin méditerranéen, parmi eux, le Maroc (Kenitra), Le Caire (Egypte), la Libye (Zawiya Ville), Izmir (Turquie) et Carthagène (Espagne).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.3** : Matières Particulaires ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et teneur en métaux lourds ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) dans différents pays.

Country	Site	TSP	Fe	Mg	Zn	Cu	Mn	Pb	Ni	Cd	Cr	Co
Frantz fanon, Alger(Algérie) Présente étude	Trafic	65	3425	3400	1714	7	126	296	185	729	9.5	23
Bab Eloued Alger, Algérie Belamri, 2009 [77]	Trafic	78	1509	-	-	-	-	119-1333	19-704	29-189	41	0.75
Didouche Mou- rad Constantine Ali Khodja, 2008[126]	Urbano indus- triel	300	-	-	-	24	50	46	11	1	16	-
Kenitra (Maroc) Zghaid, 2009[127]	Trafic	158	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cairo (Egypt.) Hassan, 2013[128]	Trafic	317	3612	1475	135	63	165	542	54	34	33	28
Izmir(Turkey) Yatkin, 2007[129]	Urbain	-	949	314	285	36	32	115	14	1.5	27	-
Cartagena (Spain) Grau, 2000[130]	Trafic	88	-	-	1540	32	-	255	-	23	-	-
Zawiya City (Lybia) Busheina, 2017[131]	Trafic	131	4432210	-	-	-	135910	1615100	-	-	-	-

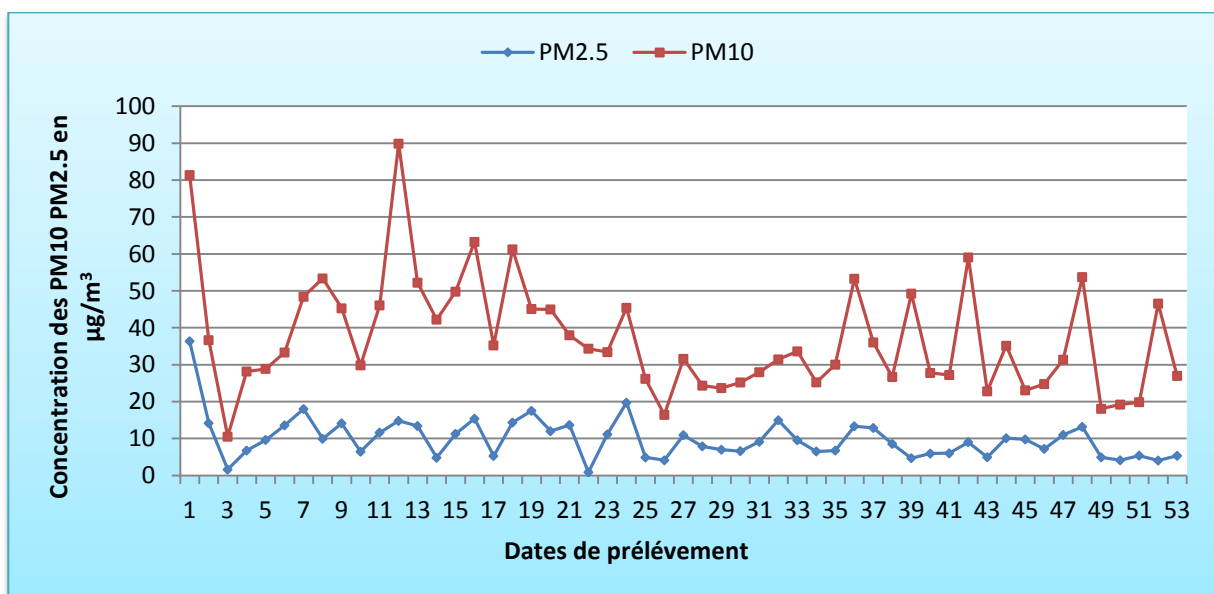
## Chapitre IV : Résultats et discussions

A partir de ce tableau, il apparaît que le niveau des concentrations en TSP est inférieur par rapport aux sites de Bab el oued d'Alger et Didouche Mourad à Constantine ainsi qu'aux autres pays du bassin méditerranéen. D'autre part, les valeurs des concentrations du fer mesurés en Egypte et Lybie sont supérieures à la valeur moyenne mesurée dans notre site. Pour le Mg ( $3400 \text{ ng/m}^3$ ), Zn ( $1714 \text{ ng/m}^3$ ), Cd ( $729 \text{ ng/m}^3$ ) et Ni ( $185 \text{ ng/m}^3$ ), les valeurs des concentrations sont supérieures à ceux trouvés en Constantine et à Bab el oued, aussi à L'Egypte, Turquie et l'Espagne d'où un risque d'éventuelle pollution par ces métaux. Concernant les éléments cuivre ( $7 \text{ ng/m}^3$ ) et chrome ( $9.5 \text{ ng/m}^3$ ), les concentrations mesurées sont inférieures à ceux trouvé dans les autres sites sujet de comparaison. Il semble que Les concentrations du Co et Mn sont relativement comparables entre notre site et l'Egypte.

Cette variation entre les valeurs des TSP et éléments associés est probablement due à la différence de la densité du trafic routier, les activités industrielles et l'intensité des activités humaines sans oublier l'impact des conditions météorologiques et les périodes d'échantillonnages.

### IV.3 Variation temporelle des concentrations de PM10 et PM2.5

Au total 104 échantillons des filtres de grosses et fines particules ont été collectés simultanément durant la période allant du 18/06/2009 au 27/12/2009. Les résultats des mesures sont représentés dans la figure suivante qui indique la variation des concentrations des matières particulaires PM10 et PM2.5 dans le site étudié :



**Figure IV.16** Variation des niveaux de PM2.5 et de PM10 mesurés dans le site Frantz Fanon.

La figure ci dessus montre que les teneurs en PM10 sont toujours supérieures au PM2.5. Selon les lignes directrices sur les matières particulaires, les valeurs quotidiennes de PM10 et PM 2,5 fixé à 50 et  $25 \text{ µg/m}^3$  (OMS, 2000) respectivement ont été dépassées huit fois pour les PM10 et 1 fois pour les

## Chapitre IV : Résultats et discussions

PM2.5 pendant la période d'échantillonnage. Les concentrations massiques journalières les plus élevées pour les PM10, PM2.5 étaient respectivement 89 et 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En revanche, les concentrations journalières les plus faibles étaient respectivement 16 et 0,87  $\mu\text{g} / \text{m}^3$ . Nous avons trouvé que les concentrations moyennes de PM10 (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et PM2,5 (10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées en même temps excèdent légèrement les normes établies par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) fixés à 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement, mais sont plus bas que les valeurs de l'UE (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Les données de masse révèlent également que le rapport moyen PM2.5 / PM10 est de 0,27. Cela signifie que la masse des particules grossières était plus élevée que celle des PM2.5.

A titre de comparaison, dans une étude visant à évaluer les effets sanitaires des PM10 à Alger en 2002 [132] au niveau du centre hospitalo-universitaire Mustapha, La concentration annuelle moyenne était de 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le niveau moyen de PM10 mesuré par Kerbachi et al. en 2009[133] sur un poste de proximité de type station trafic à l'école nationale polytechnique(Alger) était de 80.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En 2015, a Zouaghi (Constantine), Ahmed Terrouche et al. [134] ont trouvée des concentrations pour les PM10 et PM2.5 dans l'ordre suivant : 105 et 57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En comparant avec les concentrations enregistrées dans d'autres villes du nord-africain qui se caractérisent par une circulation intense, les concentrations de PM10 dans le site étudié sont en général inférieures à celles de Sfax (Tunisie) (66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) [135], du Maroc à Kenitra ( 81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) [136] et en Égypte (93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )[137].Les niveaux moyens de PM10 et PM 2.5 varient d'une région à l'autre en fonction du degré d'influence du trafic.

### IV.3.1 Le rapport entre PM2.5 et PM10 :

La distribution des éléments traces métalliques (ETM) dans différentes tailles de particules peut nous amener à l'évaluation des sources de particules dans l'air. Dans une recherche sur la composition et la taille des particules émises par les automobiles établis par Handler et al., Les résultats obtenus montrent que les phénomènes d'usures et de resuspensions sont la principale source des particules grossières émis dans l'air, alors que le processus de combustion est la principale source des particules fines [137].

La répartition des éléments traces dans les différentes tailles de particules peut conduire à une estimation des sources de particules dans l'air. Le trafic, par exemple, est une source majeure des particules dans l'air urbain.

Les rapports des concentrations moyennes des éléments dans les fractions PM2.5/PM10 sont indiqués dans le tableau IV.4. Les éléments qui ont un rapport PM2.5/PM10 au dessus de 0,5 sont plus contenus dans la fraction PM2.5.

Dans notre étude, le rapport PM2.5/PM10 est de l'ordre de 0,27, indiquant la prédominance de la fraction grossière des particules liées aux phénomènes d'usures mécaniques et de remises en suspensions.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

On remarque aussi que les éléments d'origine terrestre Mn, Mg se concentrent notamment dans la fraction PM2.5 à l'exception du fer qui se trouve plus dans la fraction PM10. Le Cd et le Zn se trouvent plus dans la fraction PM10 que la fraction PM2.5 car ils sont émis principalement par des procédés mécaniques (abrasion des pneus et des pièces mécaniques) que par les procédés de combustion [134]. Concernant le Pb, Co et le Cu, ils se concentrent fortement dans la fraction PM2.5. Ces éléments se trouvent souvent sous forme de particules fines, cela nous indique que la source majeure de ces éléments est la combustion du carburant.

### IV.3.2 Les concentrations élémentaires

Les concentrations moyennes élémentaires des métaux lourds (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Pb, Cu, Cd, Mg, V, Sb) associées aux PM2.5 et aux PM10 trouvées dans cette étude ainsi que les rapports PM2.5/PM10 sont représentés dans le tableau suivant :



## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.4 Concentrations moyennes des polluants et leurs ratios PM2.5/PM10**

Metal	Concentrations (ng/m <sup>3</sup> ) in:								
	PM 2.5				PM10				PM2.5/PM10
	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	
<b>PM(µg/m<sup>3</sup>)</b>	0.9	36	10	21.94	16	89	37	38.45	0.27
<b>Cr</b>	0.02	0.82	0.31	0.22	0.02	4	0.88	0.90	0.35
<b>Mn</b>	2	113	29	28.56	0.7	49	9	9.33	3.39
<b>Fe</b>	1	61	14	11.60	44.5	1624	282	311	0.04
<b>Co</b>	2	382	46	59.85	0.52	37	0.93	6.2	49.58
<b>Ni</b>	0.1	7	1.09	1.11	1.05	88	19	18.7	0.05
<b>Zn</b>	0.05	19	1.53	2.98	7.67	336	53	55.22	0.02
<b>Pb</b>	0.8	168	89	29.51	0.87	53	12	9.53	7.44
<b>Cu</b>	114	760	337	149.5	0.02	124.5	2.8	17	120.2
<b>Cd</b>	0.3	62	16	14.22	27.5	957	198	209	0.08
<b>Mg</b>	0	11199	4993	3685	0	13467	5013	3258	0.99
<b>V</b>	0	12.5	2.94	2.59	0	91	30	22	0.09
<b>Sb</b>	0	2269	893	611	0	91982	25895	26354	0.03

### Le Chrome :

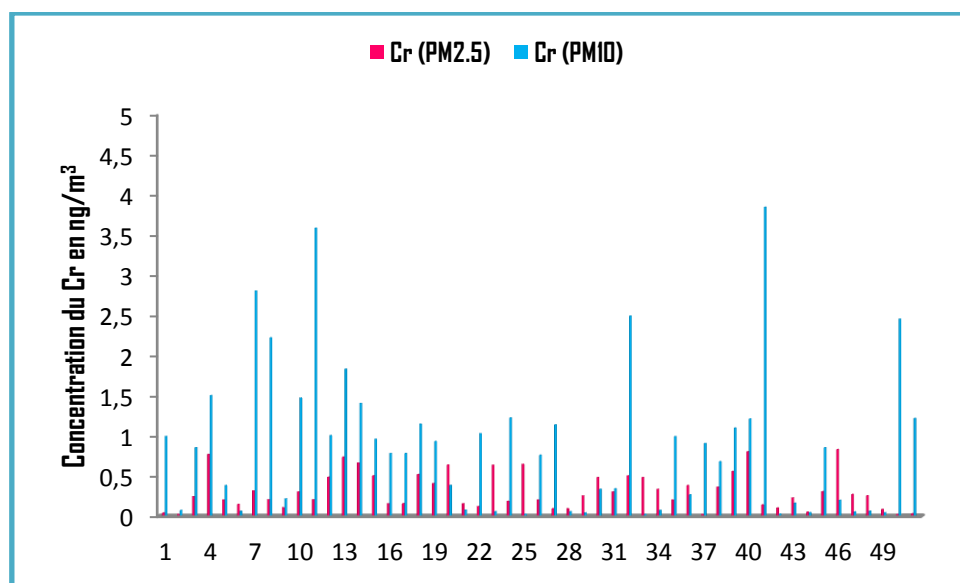


Figure IV.17 Variation de la concentration du Cr dans les PM10 et PM2.5

Les teneurs les plus faibles ont été trouvées pour le chrome avec des concentrations moyennes de 0,88  $\text{ng/m}^3$  et 0,31  $\text{ng/m}^3$  respectivement dans les PM10 et PM 2,5 (tableau IV.4). La valeur guide de l'OMS est seulement 0.25 $\text{ng/m}^3$ . En comparant avec d'autres pays d'Afrique, le niveau du chrome au site étudié est beaucoup plus bas qu'à Kenitra au Maroc (216 et 84  $\text{ng/m}^3$ ). (Tableau IV.5).

### Le Manganèse :

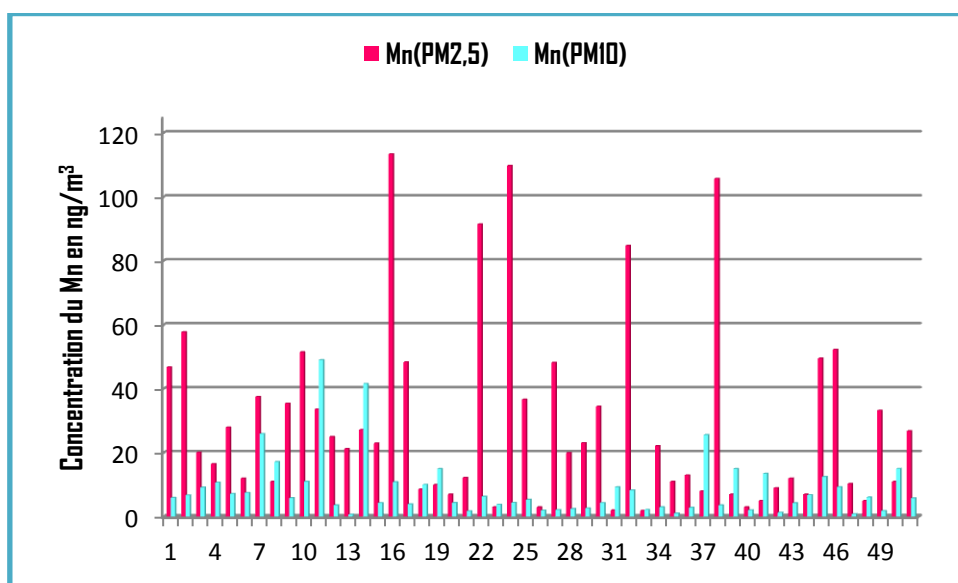
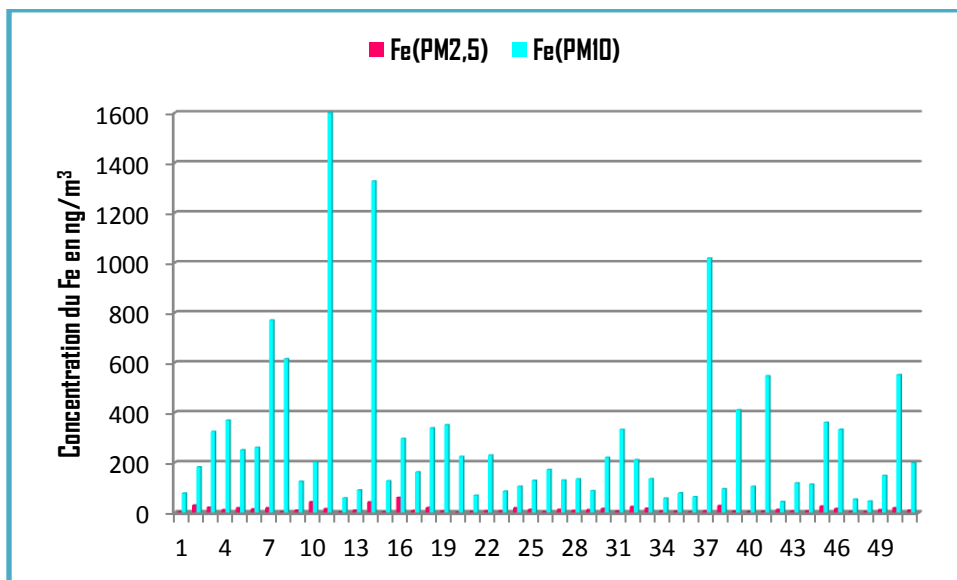


Figure IV.18 Variation de la concentration du Mn pour les PM2.5 et PM10

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Nous remarquons que les concentrations du manganèse sont très importantes dans les fractions PM2.5 par rapport au PM10. Le niveau du manganèse varie de 8.63- 29.32 ng /m<sup>3</sup> respectivement dans les PM10 et PM2.5 alors qu'au Maroc et en Tanzanie, ils étaient de (43- 23ng/m<sup>3</sup>) et (16- 2 ng/m<sup>3</sup>) respectivement (**Tableau IV.5**). La valeur de l'OMS est de 150 ng /m<sup>3</sup>.

### ▪ Le Fer :



**Figure IV.19 Evolution de la concentration du Fe pour les PM2.5 et PM10**

Les variations dans les concentrations du fer sont représentées dans la figure (IV.19) avec des valeurs de 13.85 et 281.74ng/m<sup>3</sup> pour les PM10 et PM2.5 dans cet ordre. Ces concentrations sont plus faibles que celles enregistrées au Kenya (3800ng/m<sup>3</sup> (PM10)), ou au Maroc (3079-1936 ng/m<sup>3</sup>). Les concentrations du fer acquis dans les fractions PM2.5 et PM10 sont plus faibles que celles observées dans le mode de collection en TSP.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### Le Cobalt :

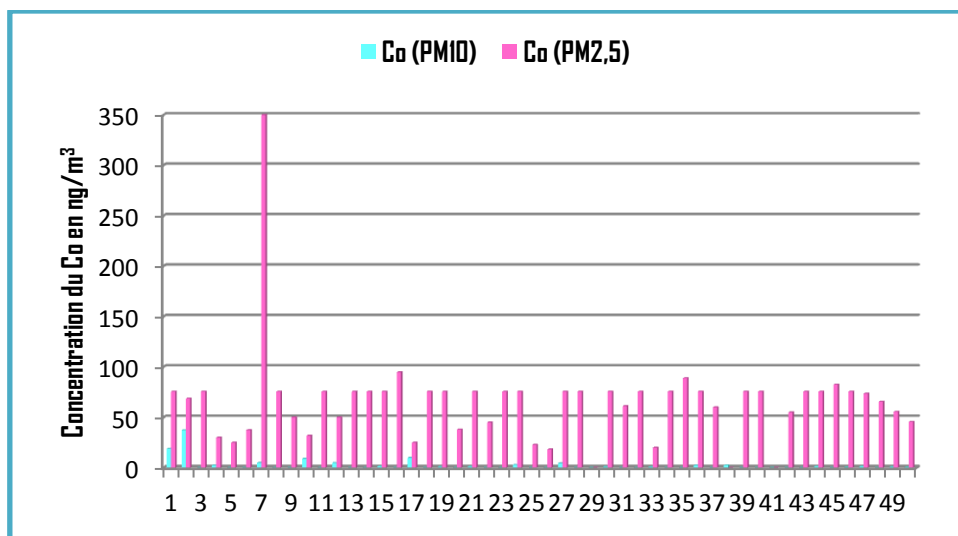


Figure IV.20 Evolution de la concentration du Co pour les PM 2.5 et PM10

Pour le Cobalt, on observe plus de collection sur la fraction PM2.5. La concentration moyenne obtenue est de  $46.11 \text{ ng/m}^3$ .

### Le Nickel :

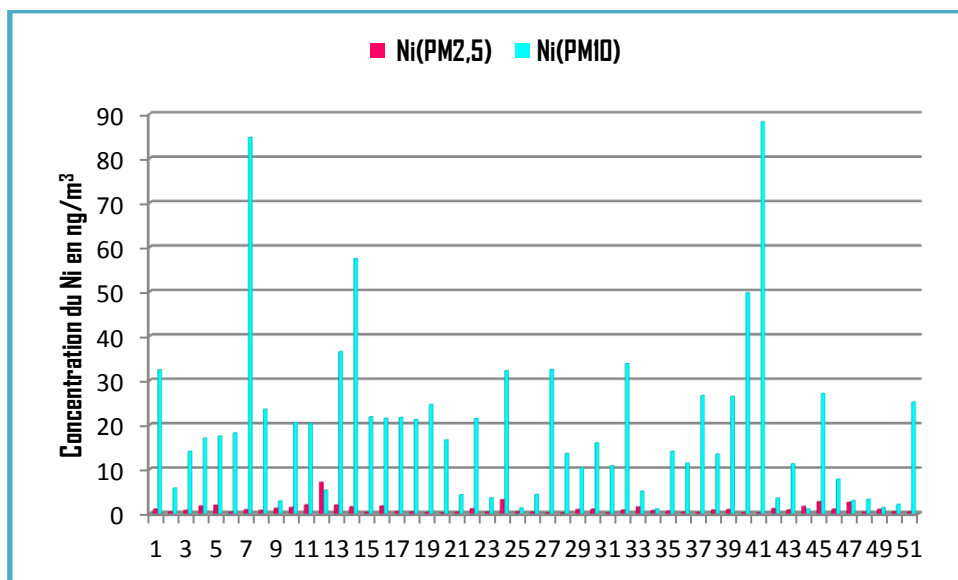


Figure IV.21 Evolution de la concentration du Ni pour les PM2.5 et PM10

Les teneurs moyennes en nickel sont respectivement  $1.09$  et  $19.23 \text{ ng/m}^3$  pour les PM2.5 et PM10. Ces concentrations sont beaucoup plus faibles que celles enregistrées au niveau d'un site à Kenitra au Ma-

## Chapitre IV : Résultats et discussions

roc (166 ng/m<sup>3</sup> (PM2.5)-449 ng/m<sup>3</sup> (PM10)) et plus élevée qu'à Dar Esaalam (Tanzanie) (1 ng/m<sup>3</sup> (PM2.5)-2 ng/m<sup>3</sup> (PM10)) [138]. La valeur guide est 20 ng/m<sup>3</sup>.

### ▪ Le Cuivre :

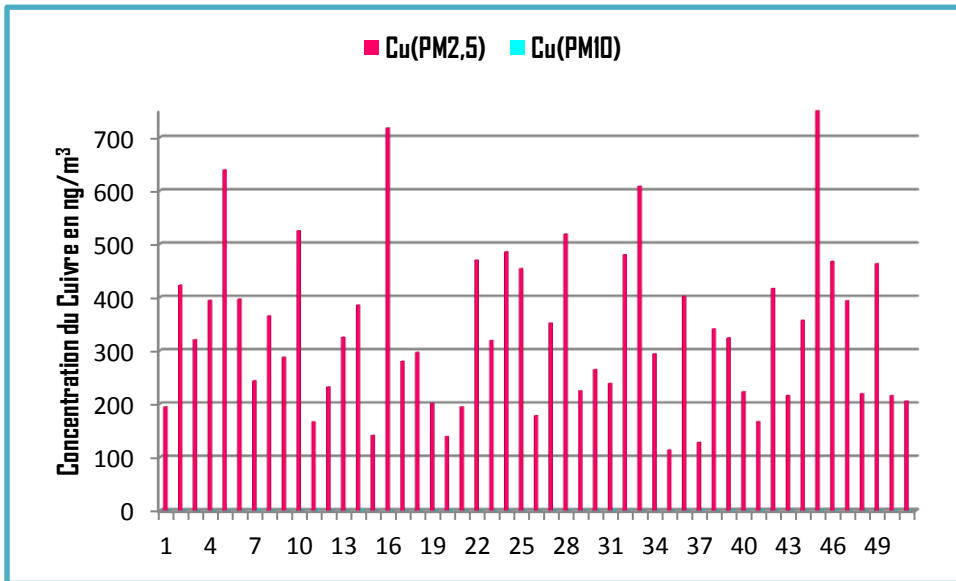


Figure IV.22 Evolution de la concentration du Cu pour les PM2.5 et PM10

Les concentrations du cuivre sont très importantes dans la fraction PM2.5. La teneur moyenne obtenue est de 336.57 ng/m<sup>3</sup>, elle est relativement élevée par rapport à celle mesurée au niveau de Kenitra (Maroc) qui était 263 ng/m<sup>3</sup> et celle enregistrée à Dar Es Salam en Tanzanie (1 ng/m<sup>3</sup>).

### ▪ Le Zinc :

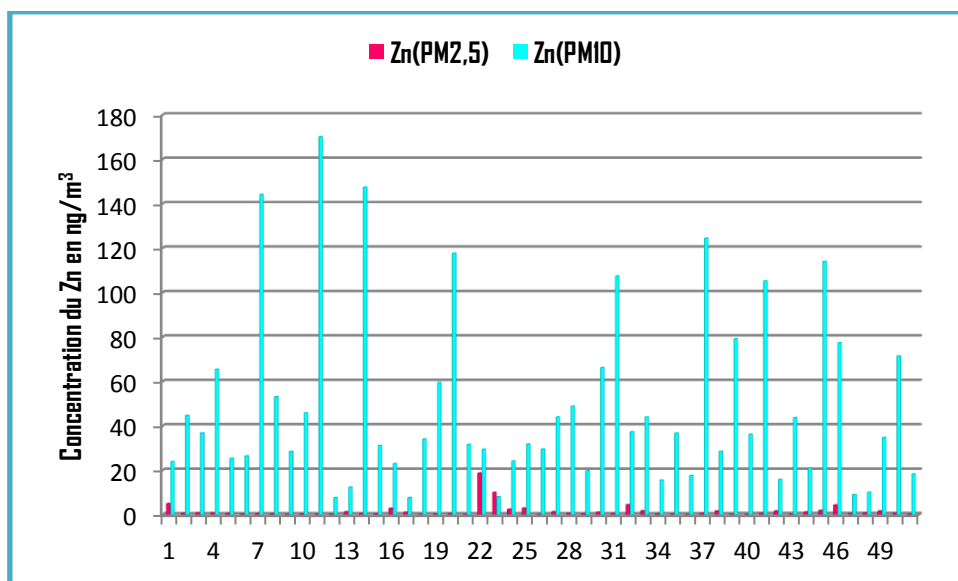


Figure IV.23 Evolution de la concentration du Zn pour les PM2.5 et PM10

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Le zinc est mieux capté par la fraction PM10. La concentration moyenne est  $53.11 \text{ ng/m}^3$ . A titre de comparaison, cette valeur reste nettement inférieure à celles enregistrée à Zouaghi dans la ville de Constantine ( $1290 \text{ ng/m}^3$ ), en Tanzanie ( $370 \text{ ng/m}^3$ ), et au Maroc ( $2205 \text{ ng/m}^3$ ).

### ▪ Le Plomb :

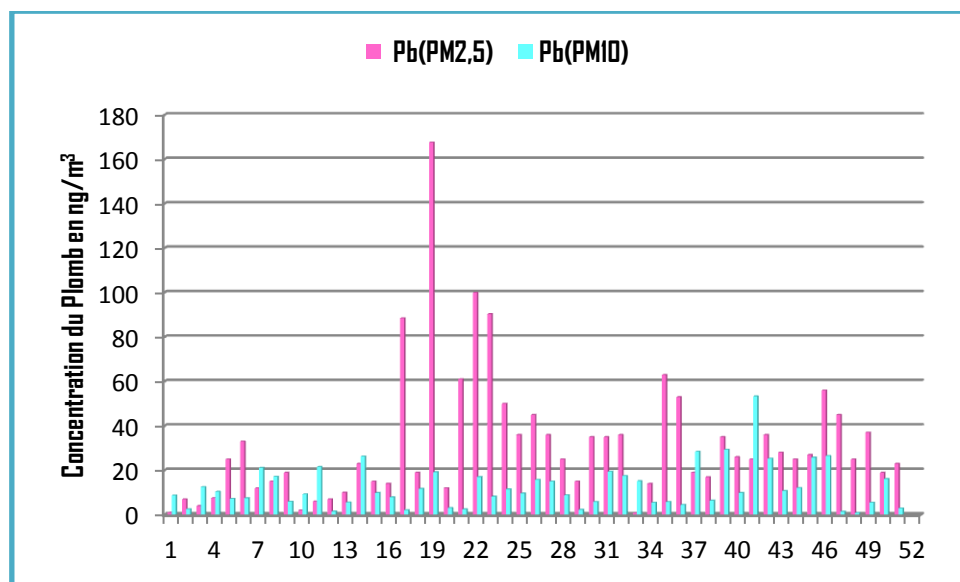


Figure IV.24 Evolution de la concentration du Pb pour les PM2.5 et PM10

Le plomb a été détecté dans la majorité des filtres analysés que se soit en fraction PM2.5 ou en fraction PM10. Les teneurs moyennes enregistrées sont  $11.97$  et  $89.13 \text{ ng/m}^3$  respectivement dans les PM10 et PM2.5. Ces concentrations en plomb détectées dans l'air d'Alger sont inférieures à celles obtenues au Maroc ( $267 \text{ ng/m}^3$  (PM10)- $342 \text{ ng/m}^3$  (PM2.5)) [127], à l'Egypte ( $4800$  (PM10)- $1600$  (PM2.5)  $\text{ng/m}^3$ ) [126], à Nairobi (Kenya  $610 \text{ ng/m}^3$  (PM10)) [138] et à Constantine ( $790$  (PM10)- $440$  (PM2.5)  $\text{ng/m}^3$ ) [134]. Le trafic est à l'origine des niveaux observés de Pb qui est encore utilisé dans le carburant essence en Algérie.

### Le Cadmium :

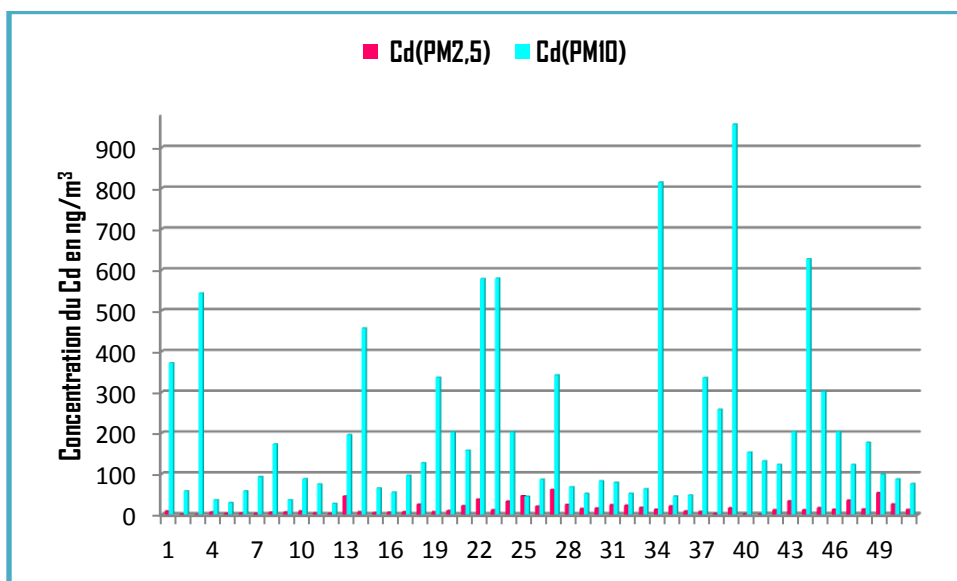


Figure IV.25 Evolution de la concentration du Cd pour les PM2.5 et PM10.

Le cadmium se concentre plus dans les filtres à fraction PM10 avec des concentrations variant de 27.5 ng/m<sup>3</sup> à environ 957.03 ng/m<sup>3</sup>. Ces teneurs en cadmium sont relativement supérieures à ceux trouvés au Maroc (4 ng/m<sup>3</sup>) et à Zouaghi dans la ville de Constantine (60 ng/m<sup>3</sup>).

### Le Magnésium :

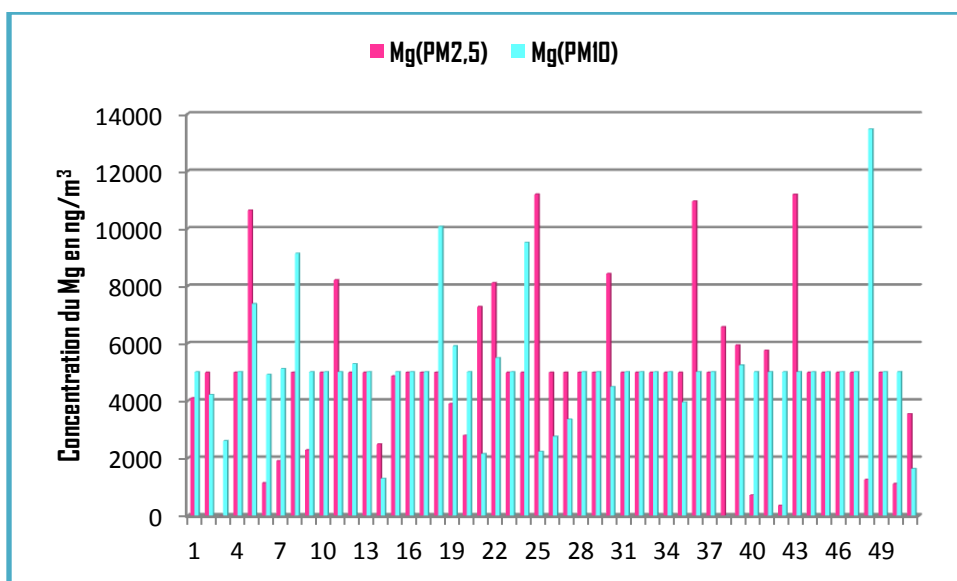


Figure IV.26 Evolution de la concentration du Mg pour les PM2.5 et PM10

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Le magnésium Mg a été détecté dans tous les filtres a fraction PM10 et PM2.5 pratiquement au même niveau de concentration. Ces teneurs enregistrées en magnésium sont nettement supérieur à ceux trouvées au site Zouaghi de Constantine 1330 et 600 ng/m<sup>3</sup> respectivement pour les PM10 et PM2.5.

### ▪ Le Vanadium et Antimoine :

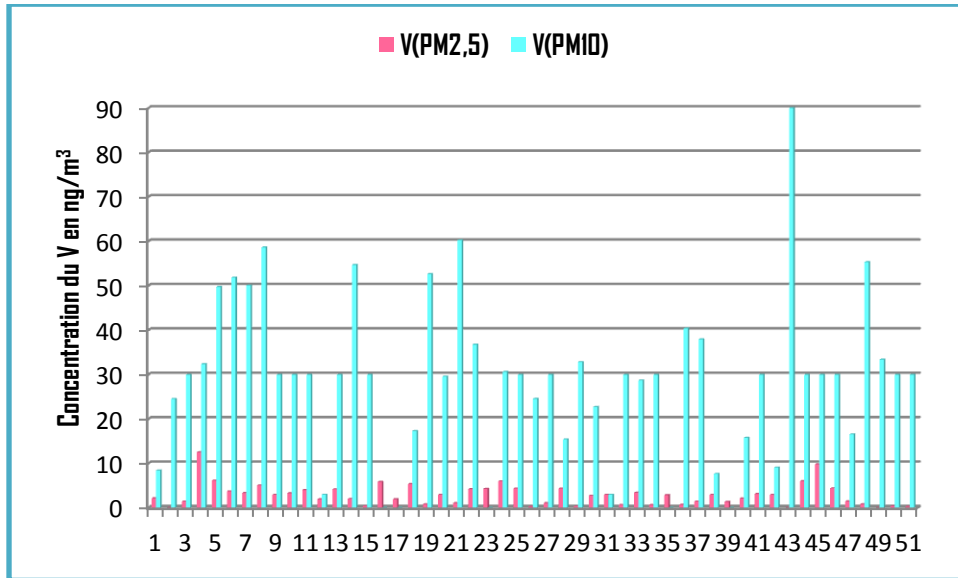


Figure IV.27 Evolution de la concentration du V pour les PM2.5 et PM10

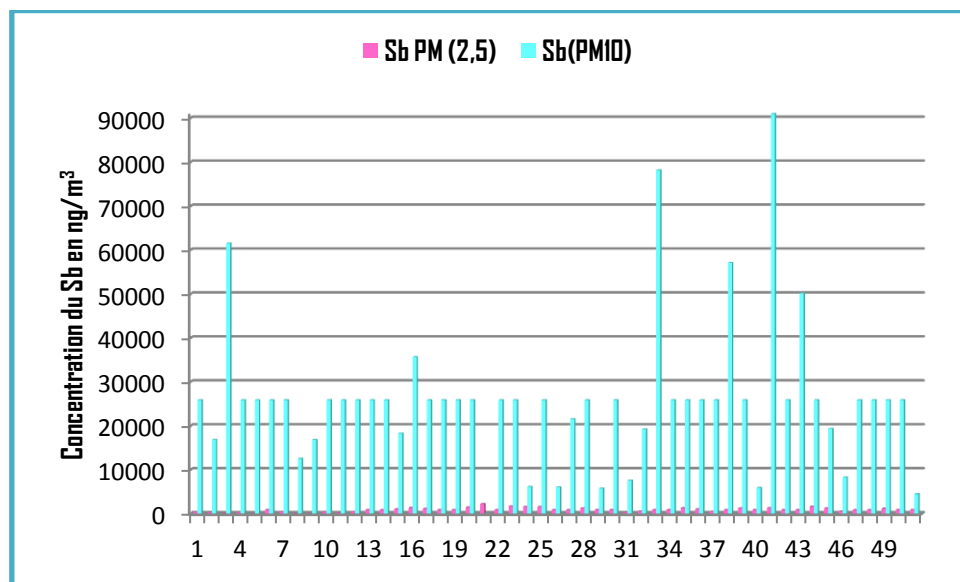


Figure IV.28 Evolution de la concentration du Sb pour les PM2.5 et PM10

Le V et Sb sont mieux captés dans les filtres PM10 où on observe les concentrations les plus intenses.



## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.5: Concentrations des métaux lourds associés aux particules fines et grossières (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) à Alger et dans d'autres sites.**

Elements concentration(ng/m <sup>3</sup> )	PM 2.5	PM 10	Site (Traffic)	Author
Cr	0.31	0.88	Alger centre	Le présent travail
	–	–	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	84	219	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	–	–	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	–	1	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	–	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Mn	29	8	Alger centre	Le présent travail
	–	–	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	23	43	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	–	–	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	2	16	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	–	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Fe	13	281	Alger centre	Le présent travail
	610	2360	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	1936	3079	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	500	4300	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	31	610	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	3800	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Co	46.11	0.93	Alger centre	Le présent travail
	–	–	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	–	–	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	–	–		Abu-Allaban et al.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

	–	–	Cairo (Egypt.)	(2007)
	–	–	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	–	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Ni	1.09	19.23	Alger centre	Le présent travail
	–	–	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	166	499	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	–	–	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	1	2	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	–	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Zn	1.5	53.11	Alger centre	Le présent travail
	–	–	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	100	1070	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	1413	2205	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	–	–	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	24	370	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Pb	89	11	Alger centre	Le présent travail
	440	790	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	342	267	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
	1600	4800	Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al. (2007)
	39	58	Dar ES Salaam (Tanzania)	Mkoma et al. (2009)
	–	610	Nairobi(Kenya)	Odhiambo et al. (2010)
Cu	336	2.80	Alger centre	Le présent travail
	220	510	Zouaghi (Constantine)	Ahmed et al.2015
	263	272	Kenitra(Maroc)	Mustapha et al. (2009)
			Cairo (Egypt.)	Abu-Allaban et al.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

	– 2 –	– 6 –	Dar ES Salaam (Tanzania)  Nairobi(Kenya)	(2007) Mkoma et al. (2009)  Odhiambo et al. (2010)
Cd	16  30  2 – – –	198  60  4 – – –	Alger centre  Zouaghi (Constantine)  Kenitra(Maroc)  Cairo (Egypt.)  Dar ES Salaam (Tanzania)  Nairobi(Kenya)	Le présent travail  Ahmed et al.2015 Mustapha et al. (2009)  Abu-Allaban et al. (2007)  Mkoma et al. (2009)  Odhiambo et al. (2010)
Mg	4993  600 – – – –	5013  1330 – – – –	Alger centre  Zouaghi (Constantine)  Kenitra(Maroc)  Cairo (Egypt.)  Dar ES Salaam (Tanzania)  Nairobi(Kenya)	Le Présent travail  Ahmed et al.2015 Mustapha et al. (2009)  Abu-Allaban et al. (2007)  Mkoma et al. (2009)  Odhiambo et al. (2010)

On peut attribuer la variation de la concentration des particules durant la période d'étude à :

- La variation de la densité du trafic : le trafic routier est la principale source de l'augmentation des teneurs atmosphériques en particules dans notre site, sachant que la densité de la circulation à Alger centre n'est plus à démontrer. Cette pollution est due aux émissions de véhicules, en particulier ceux à moteur diesel connues par leur combustion incomplète de gasoil, dérèglement de l'injection et absence de filtre à air.
- les conditions météorologiques qui jouent un rôle très important dans la dispersion des polluants tel que :

## Chapitre IV : Résultats et discussions

- 1- La vitesse du vent.
- 2- L'influence des précipitations est significative, les basses concentrations sont enregistrées lors des journées pluvieuses et humides.
- 3- L'augmentation de la température pendant la journée favorise l'augmentation des concentrations journalières expliquées par la diminution de l'humidité relative de l'air.

### IV.4 Corrélation des résultats avec les paramètres météorologiques :

Les paramètres météorologiques qui influent sur la dispersion des polluants sont la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, le taux d'humidité, la température ainsi que les précipitations. Le changement des paramètres physiques de l'air conduit à la modification de sa densité. Un taux plus élevé de l'humidité influe sensiblement sur l'augmentation de la densité de l'air qui gêne la dispersion des particules en suspensions porteuses des polluants d'origines naturelles et anthropiques. Le vent constitue un moyen important dans le transport et la dispersion des polluants, cette dispersion dépend de la vitesse et la direction du vent, ainsi si le vent est très faible (calme), la dispersion est très limitée, dans le cas de fortes vitesses, la dispersion est importante [19].

La position de la station de collection des échantillons par rapport à la direction du vent et la source émettrice des polluants est importante, en effet on ne peut rien collecter si le vent chasse les polluants loin du dispositif d'échantillonnage. Donc il faut veiller à un choix adéquat de l'emplacement du dispositif d'échantillonnage [43].

La période d'échantillonnage qui s'est étalée du 18/06/2009 au 27/12/2009 a été caractérisée par :

- Une humidité relative moyennement élevée avec des valeurs comprises entre 25% et 80% (la moyenne est de l'ordre de 56 %).
- Une température saisonnière relativement élevée variant entre 10 °C et 33 °C avec une moyenne de 23°C.
- Un manque de précipitation, plus de 90 % du temps sec (pas d'effet de lessivage de l'atmosphère).
- Des vents moyennement fort ayant sévi durant cette période de prélèvement avec des vitesses allant de 1.13 m/s à 8.8 m/s avec une moyenne de 3.5 m/s (phénomène de remise en suspension des particules déposées sur le sol). Ces conditions sont à l'origine des concentrations enregistrées.

Les corrélations entre les métaux lourds, métaux lourds et les paramètres météorologiques mesurées au niveau du site Frantz Fanon sont illustrés dans les tableaux ci-dessous.

#### ▪ Matrice de corrélation entre métaux lourds :

Afin d'établir des relations entre les métaux et de vérifier les similarités de la source des métaux dans l'air de la ville d'Alger, une matrice de corrélation a été réalisée. Les relations entre les éléments analysés ont été testés en utilisant le coefficient de Pearson avec une signification statistique fixé à  $p < 0,05$  (Tableau IV.6).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.6 : Matrice de corrélation entre métaux lourds**

variables	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Mg	V	Sb
<b>Cr</b>	1	0,487	0,466	-0,109	0,190	0,407	0,368	-0,053	0,234	0,276	0,169	0,106
<b>Mn</b>	0,487	1	<u>0,980</u>	<u>-0,686</u>	0,379	<u>0,730</u>	<u>0,823</u>	0,005	<u>0,680</u>	0,239	0,169	0,106
<b>Fe</b>	0,466	<u>0,980</u>	1	<u>-0,750</u>	0,327	<u>0,698</u>	<u>0,850</u>	-0,082	<u>0,687</u>	0,202	0,314	0,081
<b>Co</b>	-0,109	<u>-0,686</u>	<u>-0,750</u>	1	-0,129	<u>-0,504</u>	<u>-0,609</u>	0,019	-0,485	-0,037	-0,296	-0,195
<b>Ni</b>	0,190	0,379	0,327	-0,129	1	0,347	0,318	-0,021	0,334	0,097	0,148	-0,148
<b>Cu</b>	0,407	<u>0,730</u>	<u>0,698</u>	<u>-0,504</u>	0,347	1	<u>0,610</u>	0,160	<u>0,563</u>	0,436	0,147	0,022
<b>Zn</b>	0,368	<u>0,823</u>	<u>0,850</u>	<u>-0,609</u>	0,318	<u>0,610</u>	1	-0,036	<u>0,661</u>	0,174	0,284	-0,060
<b>Cd</b>	-0,053	0,005	-0,082	0,019	-0,021	0,160	-0,036	1	0,070	0,360	-0,222	0,061
<b>Pb</b>	0,234	<u>0,680</u>	<u>0,687</u>	-0,485	0,334	<u>0,563</u>	<u>0,661</u>	0,070	1	0,332	0,211	0,172
<b>Mg</b>	0,276	0,239	0,202	-0,037	0,097	0,436	0,174	0,360	0,332	1	-0,275	-0,022
<b>V</b>	0,169	0,309	0,314	-0,296	0,148	0,147	0,284	-0,222	0,211	-0,275	1	0,088
<b>Sb</b>	0,106	0,089	0,081	-0,195	-0,148	0,022	-0,060	0,061	0,172	-0,022	0,088	1

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Selon les coefficients de corrélations présentés dans le tableau IV.6, une corrélation positive significative existe entre les métaux lourds les plus contaminants Mn, Fe, Cu, Zn, Pb. Cette forte corrélation indique que ces éléments sont émis par la même source ou par des sources différentes avec le même taux. Nous observons des valeurs négatives de corrélations entre Co et les éléments : Fe, Mn, Cu, Zn signifiant que la présence de l'un implique la diminution de l'autre.

Une faible corrélation a été observée entre Cr, V, Mg et les autres éléments analysés. Le Cd présente une relation faible avec le Mg ( $r = 0,332$ ). L'antimoine paraît totalement indépendant vis-à-vis des autres éléments, ce qui indique que cet élément provient d'une source différente.

### ▪ Corrélation avec les paramètres météorologiques :

La matrice de corrélation (tableau IV.7) montre que la corrélation entre les variables est faible. En effet, on remarque qu'il existe une corrélation positive entre la température et les éléments Fe, Mn. Un temps chaud tend à privilégier les perturbations verticales et la dispersion des particules fines qui se dégagent des gaz d'échappement, en altitude. Inversement, le froid contribue à la stabilisation des couches inférieures de l'atmosphère et à la rétention de ces particules au niveau du sol. Une corrélation négative a été observée entre le Fe, Mn, Pb, Zn, Cu et la pression atmosphérique, aussi entre le Pb et l'humidité. Il n'y a pas de corrélation entre Sb, V et les facteurs météorologiques. Aucune corrélation n'a été observée entre les précipitations, le vent et les métaux analysés.

**Tableau IV.7 : Corrélation entre métaux lourds et les paramètres météorologiques**

Variabes	Humidité (%)	Précipitation (mm)	Pression (hPa)	Température	Vent (km/h)
Cr	-0,162	-0,074	-0,215	0,177	-0,276
Mn	-0,333	-0,213	<b>-0,435</b>	<b>0,462</b>	0,020
Fe	-0,351	-0,202	<b>-0,445</b>	<b>0,425</b>	0,010
Co	<b>0,409</b>	0,054	0,325	-0,153	-0,278
Ni	-0,229	-0,100	-0,065	0,169	0,129
Cu	-0,363	-0,038	<b>-0,422</b>	0,209	0,107
Zn	-0,348	-0,182	<b>-0,434</b>	0,289	-0,029
Cd	-0,121	-0,007	-0,110	-0,073	0,049
Pb	<b>-0,561</b>	-0,066	<b>-0,450</b>	0,148	-0,165
Mg	-0,128	-0,189	-0,169	0,218	0,013
V	-0,209	-0,182	-0,063	0,319	-0,110
Sb	0,078	-0,197	-0,008	-0,237	0,127

### IV.5. Analyses statistiques des résultats :

Le but de l'utilisation des modèles statistiques appliqués à des échantillons environnementaux est la détermination du :

- Nombre des sources influençant le site de mesure.
- la composition chimique de ces sources.
- la contribution relative de ces sources dans chaque échantillon collecté.

Le point de départ est une matrice des données correspondant aux compositions chimiques élémentaires de nombreux échantillons prélevés sur le site appelé site récepteur [121].

#### IV.5.1 Identification de sources à l'aide de l'analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale est une technique de réduction des données multi variées. Son objectif principal est de réduire la dimensionnalité d'un ensemble de donnée complexe, avec peu de perte d'information. L'analyse en composante principale est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'analyse des données en sciences de l'environnement. Elle a été appliquée dans des études sur la qualité de l'air [139-142] ainsi que dans des compartiments du sol et des sédiments [143,144].

Le but de cette technique est de projeter les variables d'origine dans un nouveau référentiel, qui maximise la variance. Les nouvelles variables, appelées composantes principales (CPs) ou facteurs, sont extraites par ordre décroissant d'importance. De cette manière, la CP avec une variance plus élevée est projeté dans le premier axe, le second CP sur le deuxième axe et ainsi de suite. Les nouvelles variables, qui ne sont pas corrélées, représentent donc une combinaison linéaire particulière des variables d'origine [145].

L'analyse ACP peut être réalisée en mode R ou Q. Dans l'analyse en mode R, l'association entre les variables est l'adresse, tandis que l'analyse en mode Q se focalise sur la relation entre les observations. Deux méthodes peuvent être mises en œuvre pour estimer les composantes principales: la décomposition des valeurs propres ou la décomposition des valeurs singulières.

L'analyse en composante principale est une technique sensible aux données; un prétraitement des données est souvent nécessaire pour obtenir un ensemble de données plus adapté à son application [146]. L'aspect négatif du prétraitement des données est que différentes transformations peuvent influencer les résultats de l'ACP et l'interprétation des données [147].

Une structure de données composées des variables avec des plages numériques différentes peut produire des PC incorrectes, car la variable avec la plus grande variance aura une influence majeure sur les résultats [146].

### IV.5.2. Algorithme

Étant donné un ensemble de données à  $n$  variables, le but de l'analyse en composante principale est d'identifier autant de  $n$  nouvelles variables, appelées composantes principales (CPs), qui sont une combinaison linéaire des variables d'origine. L'objectif est alors de réduire la dimensionnalité de l'ensemble de données en ne considérant que les premiers PCs significatifs.

### IV.5.3. Décomposition d'un vecteur propre (EVD)

Étant donné une matrice carrée générique  $A$ , les valeurs propres et les vecteurs propres sont un vecteur scalaire ( $\lambda$ ) et un vecteur non nul ( $v$ ), de sorte qu'ils satisfont à l'équation dite équation des valeurs propres [148].

$$\mathbf{A}v = \lambda v \quad \text{IV.1}$$

Soit  $X$  l'ensemble de données avec  $n$  variables (par exemple, mesures chimiques) et  $m$  échantillons. Étant donné une transformation linéaire  $P$ , un changement de base pourrait être exprimé par l'équation suivante:

$$\mathbf{P}X = Y \quad \text{IV.2}$$

La décomposition du vecteur propre EVD (Eigen vector decomposition) est basée sur le calcul de la matrice de covariance, exprimée par l'équation suivante:

$$\mathbf{C}_X = \frac{1}{n} \mathbf{X}\mathbf{X}^T \quad \text{IV.3}$$

Les éléments de la matrice de covariance mesurent la covariance entre toutes les paires de mesures possibles. Il s'agit d'une matrice carrée symétrique.

Le nouveau système de référence, exprimé par les CPs extraits, peut être identifié par la matrice  $Y$  (changement de base). La matrice de covariance  $C_Y$  pour le nouveau système de référence peut être calculée de façon similaire au cas  $X$  (équation IV.3).

Puisque l'objectif de la résolution de l'ACP est de maximiser la variance des CPs, avec des CPs non corrélés, tous les termes hors diagonale dans  $C_Y$  devraient être nuls ( $C_Y$  doit être une matrice diagonale). Pour diagonaliser  $C_Y$ , l'ACP suppose que tous les vecteurs de base sont orthonormés ( $P$  est une matrice orthonormale).

De cette manière, le problème se résume dans la détermination d'une matrice orthonormale,  $P$  (équation IV.2), telle que  $C_Y$  est diagonale. En d'autres termes, réécrire  $C_Y$ :

$$\mathbf{C}_Y = \frac{1}{n} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T = \frac{1}{n} (\mathbf{P}\mathbf{X})(\mathbf{P}\mathbf{X})^T = \mathbf{P} \left( \frac{1}{n} \mathbf{X}\mathbf{X}^T \right) \mathbf{P}^T = \mathbf{P}\mathbf{C}_X\mathbf{P}^T$$

$$\mathbf{C}_Y\mathbf{P} = \mathbf{C}_X\mathbf{P} \quad \text{IV.4}$$

Le but de l'ACP devient de déterminer les vecteurs propres et les valeurs propres de la matrice de covariance  $X$ . De cette manière, les composantes principales de la matrice  $X$  sont définies par  $P$  (vecteurs propres de  $C_X$ ) et les éléments diagonaux de la matrice  $C_Y$  (valeurs propres de  $C_X$ ) correspondent à la variance expliquée par chaque composante principale.



### IV.5.4 Décomposition de la valeur singulière

Comparée à EVD, la décomposition en valeur singulière (SVD) est une méthode plus robuste et plus précise. La décomposition en valeurs singulières est généralement la méthode préférée pour l'exactitude numérique et la stabilité [148]. SVD est une technique de factorisation matricielle permettant de décomposer une matrice générique  $n \times m$   $A$  en trois matrices:

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \mathbf{U}_{m \times m} \mathbf{S}_{m \times n} \mathbf{V}_{n \times n}^T \quad \text{IV.5}$$

Où  $\mathbf{U}$  et  $\mathbf{V}$  sont des matrices orthonormales ( $\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$ ) et  $\mathbf{S}$  est une matrice diagonale non carrée.

Pour relier ACP à SVD à partir de la matrice de données originale  $\mathbf{X}$ , nous définissons une nouvelle matrice  $\mathbf{Y}$  donnée par:

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\sqrt{n}} \mathbf{X}^T \quad \text{IV.6}$$

En construisant  $\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T$  nous obtenons la matrice de covariance de  $\mathbf{X}$ , et calculant la SVD de  $\mathbf{Y}$  nous obtenons :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{IV.7}$$

En multipliant par la matrice de transposition  $\mathbf{Y}^T$  (étant  $\mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{I}$ ) nous obtenons :

$$\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T = (\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T) (\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T)^T = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^T \mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T \quad \text{IV.8}$$

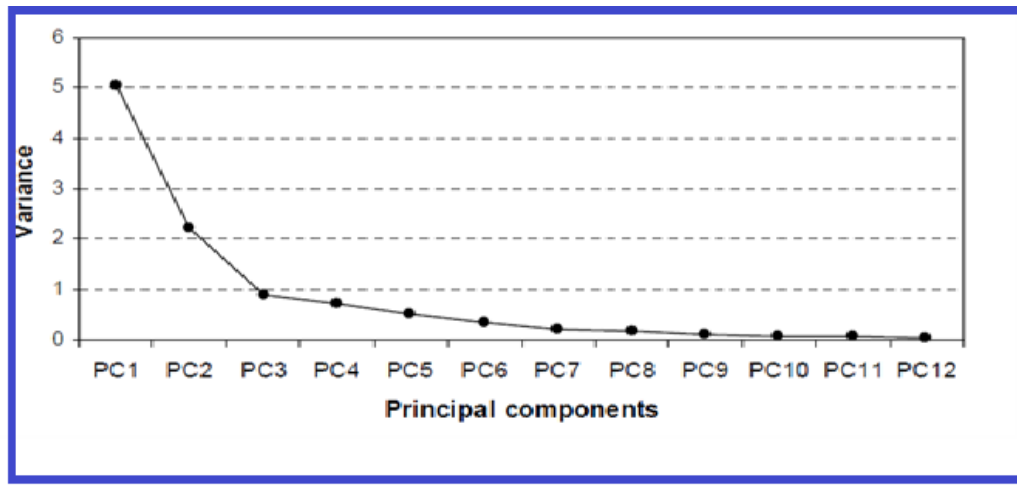
Avec  $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{\Sigma}\mathbf{\Sigma}^T$ . Les colonnes de la matrice  $\mathbf{U}$  contiennent les vecteurs propres de  $\mathbf{Y}^T \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}$ . Donc les colonnes de  $\mathbf{U}$  sont les composantes principales de  $\mathbf{X}$ .

En ne sélectionnant que les composants les plus importants (ceux ayant des valeurs propres plus élevées).

### IV.5.5 Estimer le nombre de CP

Trois méthodes principales sont généralement utilisées pour sélectionner le nombre approprié de composants principaux. Les deux premières méthodes sont basées sur le tracé d'éboulis, le tracé des valeurs propres par rapport aux CPs correspondants (figure IV.29). Il illustre le taux de variation de l'amplitude des valeurs propres pour le CP. Les méthodes utilisées pour estimer le nombre de CP sont décrites ci-dessous:

1. En examinant le tracé d'éboulis (scree plot), la courbe a tendance à diminuer rapidement pour les premiers CPs jusqu'à ce qu'elle atteigne un «coude». Le nombre de composants à sélectionner est donné par le numéro de CP au point de coude (**Figure IV.29**);
2. A partir du tracé d'éboulis, seuls les CPs ayant une valeur propre (variance) supérieure à 1 sont retenus. Cette méthode est généralement appelée critère de Kaiser;
3. La dernière méthode est basée sur la variance cumulative.



**Figure IV.29** Exemple de tracé d'éboulis pour ACP. Les valeurs propres, représentant la variance, sont tracées dans l'axe des ordonnées.

### IV.5.6 Interprétation des données

Dans de nombreux logiciels statistiques, les vecteurs propres sont convertis en coefficient de corrélation entre les CPs et les variables d'origine; cependant, la matrice de sortie est appelée "chargement", ce qui peut être des vecteurs propres ou des coefficients de corrélation.

Une corrélation élevée entre CP1 et une variable indique que la variable est associée à la variation maximale dans le jeu de données. Plus qu'une seule variable pourrait avoir une forte corrélation avec PC1, expliquant son origine (pollution ou source naturelle, processus chimique, et ainsi de suite). Si une variable ne correspond à aucune composante principale, cela suggère généralement que la variable a peu ou pas de contribution à la variation de l'ensemble de données. Par conséquent, l'ACP peut souvent indiquer quelles variables sont importantes et lesquelles peuvent avoir peu de conséquences[149].

Les facteurs ne sont pas facilement interprétables tels quels : il est nécessaire que les facteurs subissent une rotation qui a pour effet de maximiser ou minimiser certains « *loadings* ».

### IV.5.7 Rotations

En ACP, une rotation générique est une transformation linéaire des mesures d'origine. En effet, les rotations sont généralement appliquées après l'application d'ACP afin d'obtenir un schéma plus clair des chargements. Les stratégies de rotation typiques sont varimax, quartimax et equamax.

La rotation la plus utilisée dans les études environnementales est la rotation VARIMAX proposée par Kaiser (1985). Dans ce cas, l'objectif est de trouver une rotation qui maximise la variance des premiers PCs extraits.

Cependant, l'utilisation de la rotation après l'application d'ACP est discutable. Un certain nombre d'inconvénients ont été soulignés dans Jolliffe (2002) et Preacher (2003) [150,151]:

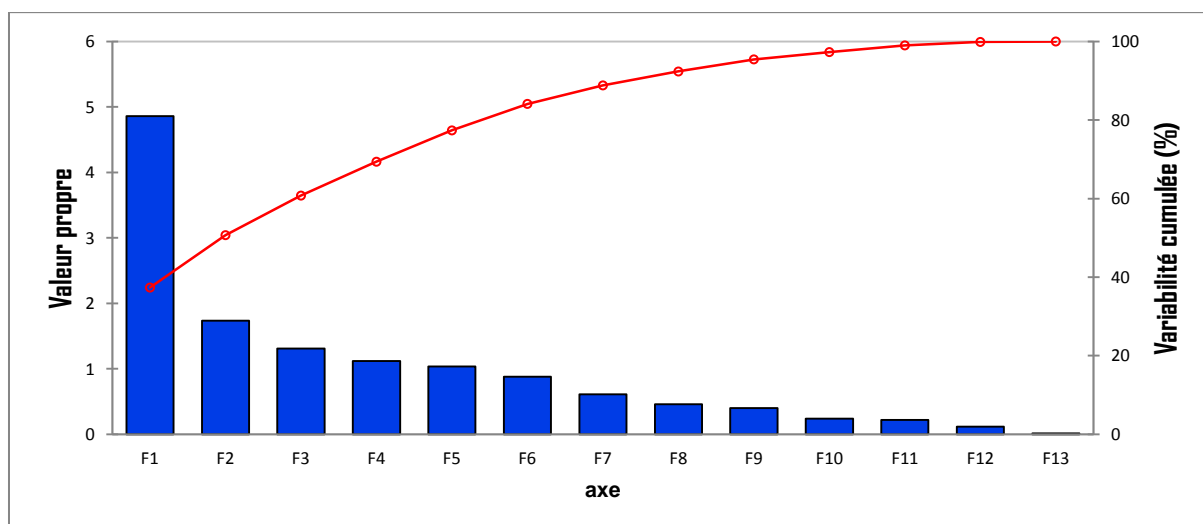
- Une critère de rotation doit être défini et généralement le choix de la méthode Varimax est dû aux critères par défaut des logiciels statistiques. Différentes rotations peuvent produire des résultats différents;
- En utilisant des rotations, la variance totale dans le sous-espace pivoté déterminée par les premiers PC reste inchangée. Avec ou sans rotations, les composants principaux sont de toute façon déterminés en visant la variance maximale. La variance n'est répartie différemment qu'après les rotations, mais de cette manière, l'information réalisée par les composants dominants peut être perdue;
- Les résultats obtenus après la rotation dépendent du nombre de premiers PC formant le sous-espace;

Dans la présente étude, L'analyse en composantes principales avec rotation varimax et rétention des composants principaux ayant des valeurs propres supérieures à 1 a été utilisée pour identifier les principaux éléments associés aux différentes sources de PM10 et PM2.5. Le pourcentage de la variance expliqué par chaque facteur significatif a été calculé. Les tableaux IV.8 et IV.9 montrent les résultats des chargements des facteurs avec une rotation varimax, ainsi que les valeurs propres.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableau IV.8** Valeurs de l'analyse en composante principale pour les PM10

Composants principaux					
Eléments	F1	F2	F3	F4	F5
Cr	<b>0,577</b>	0,310	-0,018	-0,379	0,344
Mn	<b>0,921</b>	0,097	-0,102	0,280	0,047
Fe	<b>0,928</b>	0,127	-0,116	0,266	-0,057
Co	-0,576	<b>0,542</b>	0,202	-0,188	0,358
Ni	<b>0,509</b>	0,225	<b>0,473</b>	-0,403	-0,006
Cu	<b>0,812</b>	-0,193	0,110	-0,028	0,261
Zn	<b>0,863</b>	0,084	0,077	0,140	-0,158
Cd	0,014	-0,456	0,236	-0,038	<b>0,577</b>
Pb	<b>0,755</b>	-0,029	0,307	-0,315	-0,185



**Figure. IV.30 : Courbe des valeurs propres en fonction des facteurs Fi (PM10)**

Les résultats obtenus indiquent qu'il y avait cinq composantes principales (CP) avec des valeurs propres supérieures à 1, et que ces 5 facteurs expliquent 77,36 % de la variance totale. La première composante principale explique 37,36% de la variance totale et est principalement composée des éléments contenus dans la croûte terrestre : Fe et Mn, donc F1 est représentatif d'une source terrigène (poussières du sol)[152]. La deuxième composante principale est constituée du Co, représentant 50,70% de la variance totale, la source majeure de cet élément est la combustion du carburant. Dans la composante principale 3, le nickel a la valeur la plus élevée, représentant 60,77% de la variance totale. L'axe F5 est corrélé avec le cadmium (0,577) représentant 77,36 % de la variance totale. Ces trois facteurs (F2, F3, et F5) sont identifiés comme facteurs d'émission anthropique.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

La figure IV.31 représente le pourcentage de la contribution des variables dans les axes factoriels. On peut noter que les éléments comme le Mn, Fe, Cu, Zn, pb contribuent en grande partie dans l'axe F1, le Cobalt contribue dans l'axe F2, le Ni dans l'axe F3 et le Cd dans l'axe F5. Du point de vue qualité de représentation des variables par l'axe factoriel, on observe une bonne représentativité du Mn, Fe, Cu, Zn pour l'axe F1 ; Cd pour l'axe F5.

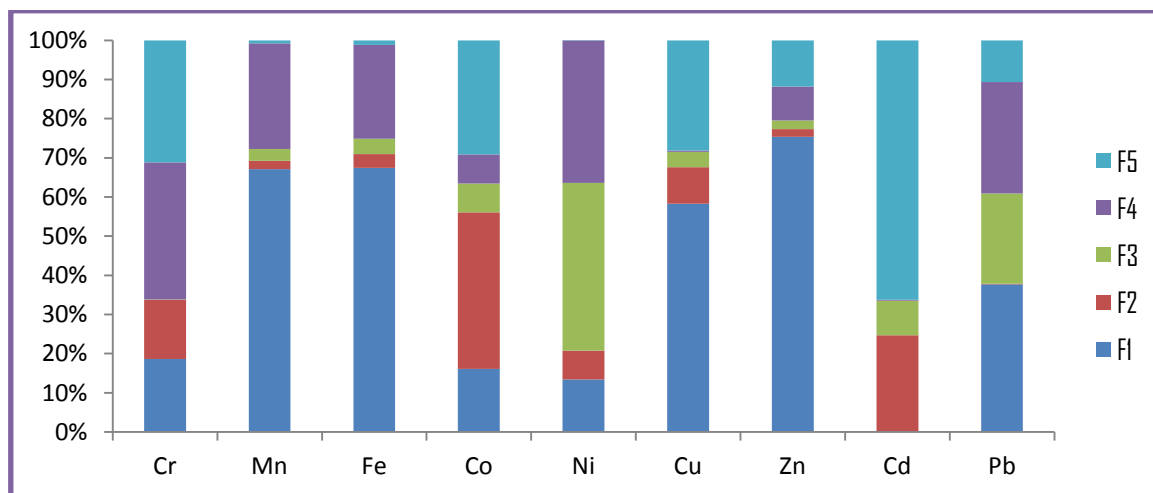


Figure IV.31 Contributions des variables (%) (PM10)

Cinq facteurs, ont été extraits à partir des données des PM2.5, expliquent environ 62.39 % de la variance totale (Tableau IV.9).

Tableau IV.9 Valeurs de l'analyse en composantes principales pour les PM 2.5

Eléments	Composants principaux				
	F1	F2	F3	F4	F5
Cr	-0,009	-0,139	-0,363	<b>0,537</b>	0,497
Mn	<b>0,571</b>	0,310	<b>0,513</b>	-0,063	-0,155
Fe	<b>0,837</b>	0,241	-0,256	0,017	-0,122
Co	0,057	0,036	-0,026	<b>0,517</b>	-0,491
Ni	<b>0,668</b>	-0,342	-0,126	0,218	0,264
Cu	<b>0,798</b>	-0,122	0,075	0,086	0,261
Zn	0,299	0,216	<b>0,740</b>	0,053	0,266
Cd	-0,245	0,216	0,034	-0,313	<b>0,557</b>
Pb	-0,320	<b>0,506</b>	-0,059	0,083	0,249

## Chapitre IV : Résultats et discussions

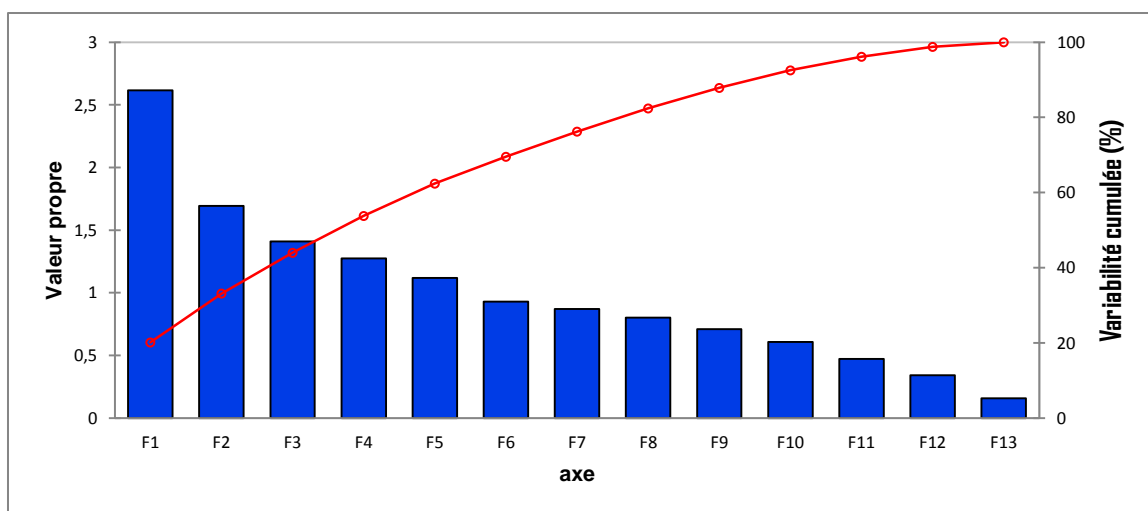


Figure. IV.32 : Courbe des valeurs propres en fonction des facteurs Fi (PM2.5)

F1 est fortement corrélé au fer, donc ce facteur est associé à une source terrigène.

F2 est associé aux Pb et représente donc une source de combustion qui comprend les émissions des véhicules.

F3 est fortement corrélé au Zn et représente donc les éléments d'origine automobile (Carburant).

F4 est corrélé avec Cr et Co. l'usure des pneus des véhicules est une source majeure de ces métaux.

Le facteur F5 est principalement lié au Cd et est associé donc aux composés émis par le trafic routier (les gaz d'échappement des véhicules, l'usure des pneus, des pièces mécaniques et des lubrifiants).

Du point de vue qualité de représentation des variables par les axes factoriels (**Figure IV.33**), on observe une bonne représentativité du Fe, Cu pour l'axe F1, Pb pour l'axe F2, Zn pour l'axe F3 et Cd pour l'axe F5.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

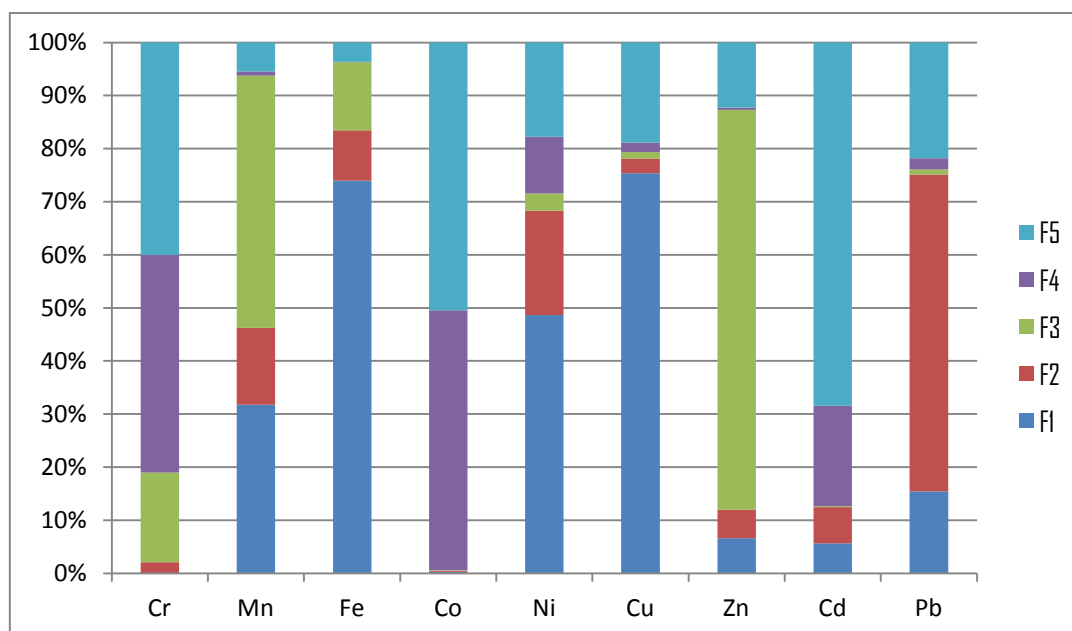


Figure IV.33 Contributions des variables (%) (PM2.5)

D'après les résultats obtenus, on peut dire que les gaz d'échappements des véhicules et la resuspension des sols sont la principale source de pollution par les particules dans le site étudié.

### IV.6 Caractérisation des masses d'air arrivant au site à l'aide du model de simulation HYSPLIT:

Les analyses des trajectoires sont couramment utilisées dans les études sur la qualité de l'air pour apprécier l'origine des masses d'air avant d'arriver en un point données ,ou les trajectoires probables que les parcelles d'air prendraient, à partir d'une source ponctuelle. Les retro-trajectoires de masses d'air constituent un outil largement utilisé en chimie atmosphérique. Elles sont définies comme le parcours le plus probable d'une masse d'air avant d'arriver à un point donné dans une certaine période de temps et à une altitude donnée au départ ou à l'arrivée. Divers outils ont été développés pour la modélisation et l'analyse des phénomènes de transport atmosphérique, Parmi eux, le modèle HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangiens Integrated Trajectory).

#### ▪ Description du modèle HYSPLIT :

Le modèle HYSPLIT est un système entier pour le calcul des trajets simples de parcelles d'air, aussi pour des complexes simulations de transport, de transformation chimique, de dispersion,et de dépôt des polluants particulaires ou gazeux. HYSPLIT poursuit d'être un des modèles de transport et de dispersion atmosphérique les plus abondamment utilisés dans les sciencesatmosphériques[152].HYSPLIT a été mis au point au laboratoire des ressources atmosphériques(ARL) en 1982 grâce à une collabora-

## Chapitre IV : Résultats et discussions

tion entre le NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et le bureau australien de météorologie.

Le model Hysplit utilise une méthode de calcul basé sur l'hybridation entre les approches eulérienne et lagrangienne.

### → **Model Lagrangien :**

Son principe est la simulation des variations de la composition chimique d'une masse d'air quand elle est diffusée dans l'atmosphère. Dans ce model on calcule les concentrations par addition de la contribution de chaque polluant « bouffée » qui subit la diffusion ou l'advection via la cellule de la grille représentée par sa trajectoire.

### → **Modèle eulérien :**

Le champ modélisé est définie dans l'espace. Ce domaine est généralement discrétisé en cellules (maille), et on simule les variations de la composition chimique dans ces cellules différentes. L'évolution des concentrations en fonction du temps est simulée par ce modèle sur tout l'espace (domaine) considéré. Le modèle calcule les concentrations pour chaque cellule de la grille par utilisations de l'intégration des flux de polluants à chaque interface de cellule de la grille a cause d'advection et de diffusion.

Les concentrations sont calculées sur une grille fixe alors que les calculs de diffusion et d'advection sont effectués dans un cadre lagrangien. HYSPLIT a évolué pour plus de 30 ans, dés l'estimation de trajectoires faciles simplifiées fondée sur des remarques par radiosonde jusqu'à un système qui pris en considération des polluants variés en interaction transportés, dispersés et déposés sur des échelles locales à globales [154].

Le modèle utilise des données météorologiques maillée sur l'une des trois projections cartographiques appropriées (Lambert, Polar et Mercator). Le modèle de dispersion exige des domaines de données météorologiques qui peuvent être acquis depuis la sorties des modèles d'archives (Archives trajectoires) ou de prévision (Forcast trajectories). Pour l'entrée du modèle HYSPLIT, les données doivent être formatées. En plus, l'existence d'un système d'interpolation interne de coordonnées dans la structure profonde du modèle lui donne l'aptitude d'utiliser divers sources de données météorologiques et de les ajuster à sa grille interne [155].

Le modèle HYSPLIT peut calculer les trajectoires des particules qui se situe à une certaine altitude, et cela jusqu'à trois différentes altitudes. L'avantage de ce modèle demeure dans son usage facile et simple : il est constitué d'une interface graphique et d'une routine qui calcule les trajectoires sur un mois entier. Les équations de modélisation de l'atmosphère sont transformé en un ensemble d'algorithmes exprimés en codes Fortran, pour constituer le système logiciel HYSPLIT qui s'exécute en exploitant les sorties maillés d'une archive ou d'un modèle de données météorologiques prévues. La version courante du modèle HYSPLIT (version 4.9) est utilisée à travers une interface graphique (GUI) et 3 autres applications pré-installables sur les systèmes: Windows, Linux ou bien Mac OS [156].



## Chapitre IV : Résultats et discussions

Dans la présente étude, nous avons utilisé le model Hysplit-4 pour caractériser l'origine des masses d'air arrivant sur notre site, c.à.d. essayer de poursuivre les particules polluantes à travers un temps déterminé dans l'espace. Les trajectoires (backward et forward) ont été calculées pour une altitude de 500 m au dessus du niveau du sol, avec un temps de 48 h avant et après la date de prélèvement pour le taux des émissions des PM10 le plus élevés enregistré le 13 juillet 2009 durant la période d'échantillonnage et avec Alger centre comme zone source. Les résultats obtenus ainsi que les cartes des trajectoires sont illustrés dans les figures. IV.34 et IV.35.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

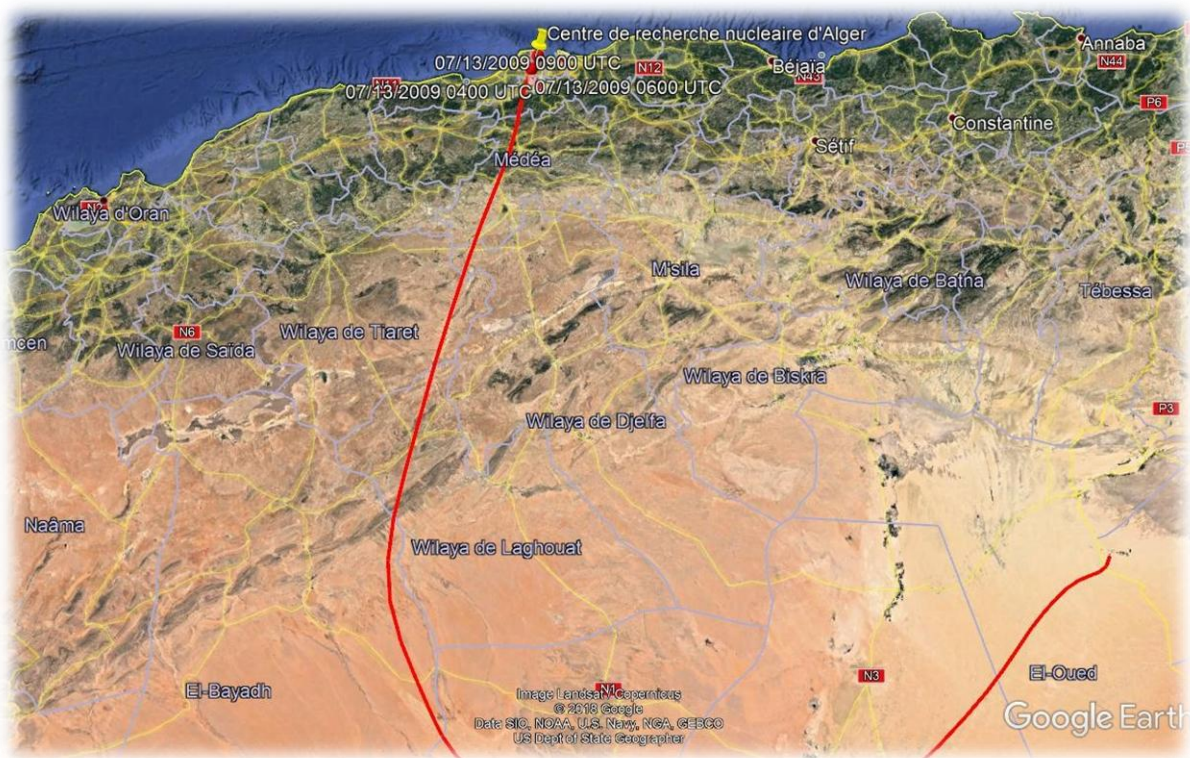
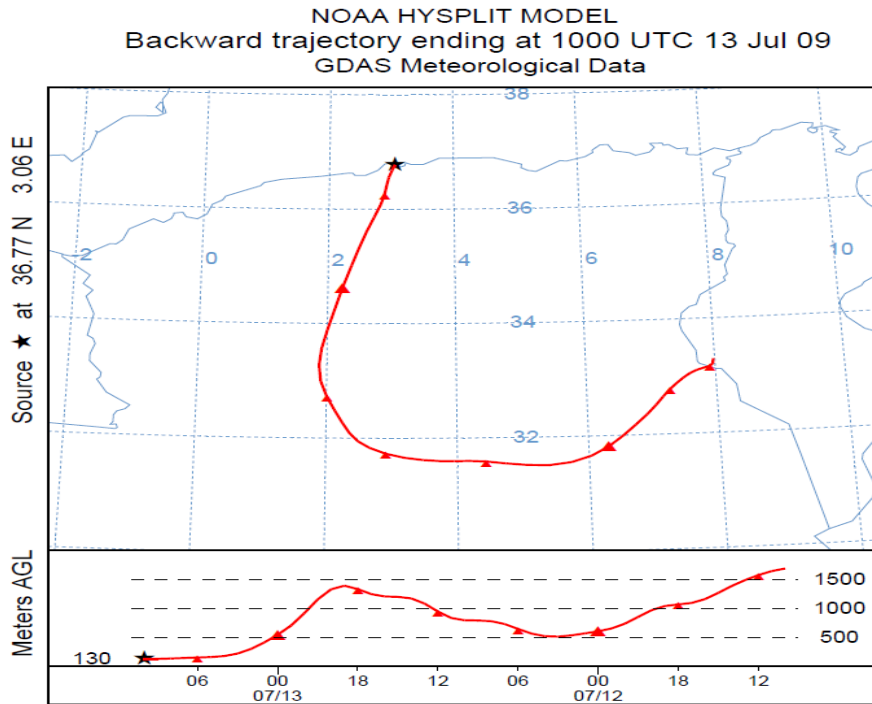


Figure IV.34 Trajectoires des particules polluantes avant 48 h d'arriver du centre Urbain d'Alger centre.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Dans la figure IV.34 apparaissent les masses d'air chargées de PM10 qui prennent 48 heures depuis la wilaya d'El Oued en passant par Hassi R'mel et Ghardaïa pour arriver au site d'échantillonnage du centre urbain d'Alger. Donc, nous pouvons conclure que la principale source de ces particules est le désert du Sahara, qui transporte des poussières riches en éléments terrigènes tel que le fer qui a présenté une forte teneur ( $1624\text{ng/m}^3$ ) en cette date. Nous pensons que ces particules sont entraînées vers le poste de mesure à travers le vent, tel qu'un vent fort ( $9\text{m/s}$ ) ayant sévi le 13/07/2009.

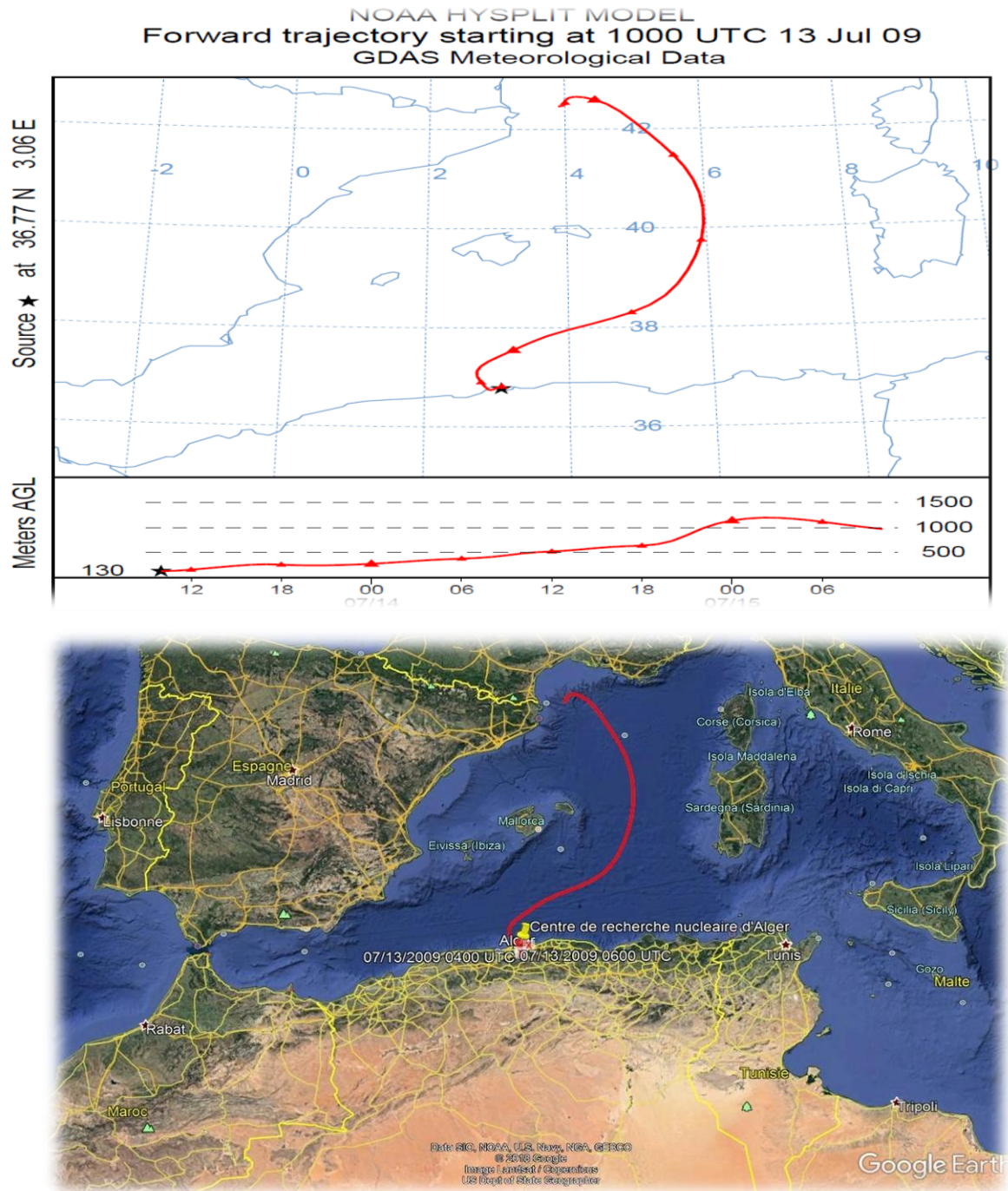


Figure IV.35 Trajectoires des particules polluantes après 48 h du centre urbain d'Alger centre.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

La figure **IV.35**, représente la trajectoire prédictive des particules à partir du centre urbain d'Alger pour une durée de temps de 48 heures, à partir du jour du prélèvement. Cette figure montre que le panache de ces dernières atteint le golfe de Lion (France) en passant par les îles de Baléares.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

La pollution de l'air par les particules en suspension en général et la fraction fine a constitué l'objet d'une attention particulière. De part leur finesse et les interactions qu'elles subissent, elles séjournent longtemps dans l'atmosphère et contribuent fortement à la dégradation de la qualité de l'air. Ce travail nous a permis de connaître les niveaux des particules totales en suspension, PM10, PM2.5 et de quelques métaux lourds qui leur sont associés dans le site Frantz Fanon qui se caractérise par un trafic routier dense à Alger centre.

Les résultats obtenus montrent que la pollution atmosphérique par les particules en suspension atteint des niveaux excessifs. La teneur moyenne obtenue s'élève à  $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum atteint étant égale à  $105\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nous avons constaté que la concentration moyenne journalière ( $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) des TSP dans l'air dépasse légèrement la valeur cible ( $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) recommandée par la réglementation algérienne pour le contrôle de la qualité de l'air. Par ailleurs les mesures de certains métaux lourds associés aux TSP montrent que ces particules véhiculent une pollution excessive par les métaux lourds à caractère toxique. Les concentrations des éléments métalliques Ni, Cd, Cr et Co mesurés étaient de  $185\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $729\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $9\text{ng}/\text{m}^3$  et  $23\text{ng}/\text{m}^3$  respectivement. Ces résultats sont très élevées comparées aux normes internationales (valeurs guides de l'OMS, normes européennes, normes américaines) rapportées dans la littérature.

La quantification des PM10 et des PM2,5 a révélé des concentrations légèrement supérieures aux normes internationales. Les concentrations moyennes de PM10 et de PM2,5 enregistrée au cours de la période d'étude étaient respectivement de 29,28 et  $10,22\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les paramètres météorologique (vent, pluie..) ont joué un rôle très important dans la dispersion des différents polluants de l'atmosphère. L'ensemble des métaux lourds ont atteint leur plus forte concentration durant la période estivale.

L'analyse des résultats par ACP (Analyse en composante principale) et le calcul du FE (facteur d'enrichissement) ont montré que la majorité des polluants en aérosol proviennent du trafic routier qui est leur principale source d'émission ainsi que le phénomène de resuspension du sol (érosion éolienne). Cette source de pollution est toujours préoccupante parce que le nombre de véhicules sur nos routes et autoroutes augmente dangereusement au fil des ans, ces véhicules consomment beaucoup de carburant (essence et diesel) qui sont par conséquent très polluants.

Pour identifier les sources externes et leur origine, l'analyse des rétro-trajectoires par le model Hysplit 4 de la masse d'air responsable des plus fortes concentrations des PM10 enregistrées durant la période de prélèvement a été effectuée. Les résultats ont révélé que le désert du Sahara algérienne est la principale source de ces particules.

## Conclusion générale

Comme peu de travaux ont été menés dans ce domaine dans notre pays, il existe un manque cruel de données concernant la pollution de l'air qui demande un travail durable et de grande ampleur avec des moyens adéquats. Ainsi, pour améliorer la dégradation de la qualité de l'air nous proposons les recommandations suivantes :

- éviter de construire les incinérateurs dans les zones urbanisées ou bien d'équiper les incinérateurs par un filtre pour minimiser la pollution atmosphérique.
- La Mise en place d'une réglementation imposant la présence d'un catalyseur sur tout véhicule nouvellement importé avec une meilleure offre de l'essence sans plomb.
- éviter l'utilisation de l'essence plombée et encourager la bicarburation de l'essence GPL, GNL.
- La gestion de transport avec réduction des points de congestion et multiplication de transports commun.
- Elaborer des modèles adéquats afin de cibler les sources d'émissions et de déterminer leur contributions respectives.
- Installer les stations de surveillance de la qualité de l'air au niveau des centres urbains à densité importante, ce qui aide à suivre en temps réel d'éventuels épisodes de pollution.

- [1] OMS (2005). Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air: particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre : Synthèses de l'évaluation des risques. Organisation mondiale de la santé, 06.02.
- [2] Meredith B., David H., Aadika S., Jennifer S., Richard F. (2010). The world's worst polluted places. Report, Blacksmith Institute.
- [3] WHO (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution. World health organization.
- [4] Aubier M. (1998). Allergie respiratoire et pollution atmosphérique. *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique*, 38, 499-503.
- [5] Dockery W., Pope CA., Xu X., Spengler JD., Ware JH., Fay ME., Ferris BG., Speizer FE. (1993). An association between air pollution and Mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759.
- [6] CNRS (1998). Expertise collective : diesel et santé. Centre national de la recherche scientifique, Paris, 245 p.
- [7] Christine P. (2011). Polluants atmosphériques organiques particuliers en Rhône-Alpes: Caractérisation chimique et sources d'émissions. Thèse de doctorat, université de Grenoble, France.
- [8] Melquiades FL., Appoloni CR. (2004). Application of XRF and field portable XRF for environmental analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 262, 533-541.
- [9] Hou X., Jones BT. (2000). Field instrumentation in atomic spectroscopy. *Microchemical Journal*, 66, 115-145.
- [10] Kerbachi R., Boughedaoui M., Koutai N., Lakki T. (1998). La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. *Journal Pollution Atmosphérique*, 89-101.
- [11] Kerbachi R., Boughedaoui M., Joumard R. (1999). Aromatic hydrocarbons in the ambient air of Algiers. *Int. Symp. « Transport and Air Pollution »*, Graz, Austria, May-June.
- [12] Benmedjahed M. (2008). Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf et son impact sur l'environnement. Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen, Algérie.
- [13] Kebir M. (2011). Etude et analyse des données météorologiques, en particulier le Vent dans la région d'Adrar. Mémoire de Master en physique, université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Algérie.



- [14] Kasbadji N. (2006). Évaluation du gisement énergétique éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse de doctorat, université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Algérie.
- [15] Facon S. (2016). Composition de l'air : Chimie en 4<sup>ème</sup>, Physique-Chimie du Bois d'Aulne.
- [16] Davenport SJ., Morgis GG. (1954). Air Pollution: A Bibliography, report. Washington D.C.
- [17] Ghislaine G. (2001). Evolution de la qualité de l'air à Paris en 2000. Conseil départemental d'hygiène de Paris, Séance du 23 mars.
- [18] Chambers LA. (1968). Classification and extent of air pollution problems. Ed. Academic press, New York.
- [19] Deletraz G., Paul E. (1998). State of the art for the study of transportation impacts in the vicinity of roads and highways. Rapport intermédiaire, université Josef Fourier- université de Pau et des pays de l'Adour, France.
- [20] Degobert P. (1992). Automobile et pollution atmosphérique. Ed. Technip, Paris.
- [21] Usher C., Michel A., Grassian V. (2003). Reactions on mineral dust. Chemical Reviews, 103, 4883-4939.
- [22] MacIntyre F. (1974). The top millimeter of the ocean. Scientific American, 230, 62-69.
- [23] Mireille B. (2014). Étude des particules fines et ultrafines en suspension dans l'air au Liban : caractérisation physicochimique et évaluation des effets toxicologiques sur des cellules pulmonaires humaines BEAS-2B, Toxicologie. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences et de Technologie, Liban.
- [24] Miquel G. (2001). Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Assemblée Nationale Française, Paris, 2979, 366.
- [25] Pierre M. (2000). Pollution Atmosphérique : Causes, conséquences et solutions. Ed. Ellipses, Paris, 213p.
- [26] Chaboun F. (2007). Evaluation de la pollution atmosphérique par les métaux lourds en milieu urbain : cas de Bab El oued. Mémoire Ingénieur d'état, université de Boumerdes, Algérie.
- [27] Rahal F. (2015). Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique. Le cas de la région d'Alger. Thèse de doctorat en science, Université Mohammed Boudiaf, Oran, Algérie.
- [28] Pollution atmosphérique : Données épidémiologiques. Santé publique France, 2016 [consulté le 02/02/201] Disponible sur: <http://www.santepubliquefrance.fr/Actualites/pollution-atmospherique>.

- [29] Bouziani M. (2010). Introduction à la santé environnementale. Ed. Dar El Gharb, ORAN, p273-302.
- [30] Deletraz G. (2002). Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Biriadou (Pyrénées). Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France.
- [31] Gérard M. (1996). Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Revue la météorologie, 8,13.
- [32] Laurence LC. (2006). Élimination des particules. Technique de l'ingénieur, réf G1710 v1.
- [33] Norme NF EN 12341 (2008). Air ambiant - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2.5 de matière particulaire en suspension. Directive concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.
- [34] Norme NF EN 481 (1993). Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air.
- [35] Jawad EH. (2008). Contribution expérimentale et numérique à l'étude de la remise en suspension des particules par l'activité humaine. Thèse de doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, Tanger, Maroc.
- [36] INRS. (2015). Principes généraux de ventilation. Guide pratique de ventilation N°0, ED 695, France.
- [37] Thomas C. (2017). Les particules diesel: impact sur la santé et moyens de lutte en France. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France.
- [38] Juli R., Cepag W. (2007). Pollution de l'air : Quel impact sur la santé. Rapport analytique sur l'état de l'environnement, RISE, p65.
- [39] Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environmental Health Perspectives, 113, 823–839.
- [40] Wilfried E., Thomas D., Uta WB., Jan F. (2008). Variabilité spatio-temporelle de la concentration atmosphérique des particules à Berlin. Journal de l'association internationale de climatologie, 5, 2413-5380.
- [41] OMS (2005). La pollution par les particules atmosphériques ; ses effets sur la santé. Aide mémoire EURO/04/05, Berlin, Rome, Copenhague 14 avril 2005.
- [42] Pope CA., Burnett RT., Thun MJ., Calle EE., Krewski D., Ito K., Thurston GD. (2002). Lung cancer, cardio pulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. Journal of the American Medical Association, 287, 1132-1141.

- [43] Belamri M. (2010). Contribution à l'étude et à la modélisation de la pollution atmosphérique urbaine par les métaux lourds. Thèse de doctorat, université de Boumerdes, Algérie.
- [44] Jose R., Peralta VM., Laura L., Mahesh N. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The international journal of biochemistry and Cell Biology*, 41, 1665-1677.
- [45] Masclat P. Cachier H. (1998). L'aérosol atmosphérique, caractéristiques physico chimiques. *Analisis Magazine*, 26, 11-17.
- [46] Chazette P. (2004). Aérosol anthropique : impact climatique et environnemental. *Techniques de l'ingénieur*, Extrait de la collection 10, RE 21-1 à 11.
- [47] Lefèvre R., Ausset P. (2001). Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti: La pierre et le verre. *Pollution Atmosphérique*, 172, 571-588.
- [48] Seraghni N. (2007). Mesure de la pollution particulaire et métallique dans l'air au niveau de trois sites urbains de la ville de Constantine. Mémoire de magister, université de Constantine, Algérie.
- [49] Journal officiel de la république Algérienne (JORA), décret n°77-974 du 19 aout 1977, relatif aux informations à fournir au sujet des déchets générateurs de nuisances, Article 3.
- [50] Gilles L. (2004). Notions de toxicologie. Ed revue et augmenté, ISBN 2-551-22538-8
- [51] Biney C., Amuzu AT., Calamari D., Kaba N., Mbome IL. (1994). Etude des métaux lourds. *Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain*, 25, 129p.
- [52] Oosthuizen MA., John J., Somerset V. (2010). Mercury exposure in a low income community in South Africa. *South African Medical Journal*, 100, 366-371.
- [53] OCDE (1996). Prévention et contrôle de la pollution. Rapport sur la Phase 1 du projet sur les transports écologiquement viables. Organisation de coopération et de développement économiques Paris, 96, 136.
- [54] Nora S. (2013). Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes. Mémoire de Magister, Université Souk-Ahras, Algérie.
- [55] Nadine F., Abdelkrim Z., Hélène S., Grégoire F., Mathilde P., Bénédicte B., Perrine D. (2009). Etude d'imprégnation par les dioxines des populations vivant à proximité d'usines d'incinération d'ordures ménagères Saint-Maurice, France. Rapport d'étude, 228 p.
- [56] Derwich E., Benziane Z., Benaabidate L. (2008). Etude de la qualité métallique des eaux souterraines situées au voisinage des eaux usées dans le bassin versant du moyen Sebou : Maroc. *Journal de l'eau et de l'environnement*, 15, 79-85.

- [57] Boutonnet F. (2000). Etude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre, France. Rapport de stage, Université d'Orléans.
- [58] Peter R. (2007). Predicting the global distribution of arsenic pollution in groundwater: The Geography of a Global Problem. International conference, royal geographical society, London.
- [59] Hoet P. (2015). Chrome et composés. EMC-Pathologie professionnelle et de l'environnement 10,1-11.
- [60] Anses. (2017). Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel : Evaluation des indicateurs biologiques d'exposition et recommandation de valeurs biologiques pour le Chrome VI et ses composés. Rapport d'expertise collective, Maisons-Alfort, 95p.
- [61] Recommandations canadiennes pour la qualité des sols: Le cuivre dans l'environnement. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Septembre 2001.
- [62] Bencharif MF. (2012). Mesures de PM10 et de leur teneurs métalliques dans la ville de Constantine. Mémoire de magistère, université de Constantine, Algérie.
- [63] Lioy PJ., Joan M. (1987). Toxic air pollution. Ed. Lewis publishers, Chelsea, Michigan, 294 pp.
- [64] Beltzer M. (1976). Non sulfate particulate emissions from catalyst cars. Society of Automotive Engineers (SAE), 85,198-208.
- [65] Guibert JC., Martin B. (1987). Carburants et moteurs. Ed. Technip, Paris, 903p.
- [66] Johnson JH. (1988). Automotive emissions: in Air pollution, the automobile and public health. Washington, DC: La presse des académies nationales, 39-75.
- [67] Joumard R. (1982). Effets des polluants atmosphériques sur la santé. Rapport INREST, 23, 114.
- [68] Harry P., Caubet A., Durand G., Mathieu C., Marionneau J., Mauras Y., Allain P. (1989). Intoxications aiguës par inhalation de chlorures de zinc et d'aluminium. Journal of clinical and experimental toxicology, 9,359.
- [69] Journal officiel de la république Algérienne JORA (2006). Décret exécutif définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, n° 06-02 du 7 janvier 2006.
- [70] I.N.S.P (2007). Bilan des données de pollution par les poussières (PM<sub>10</sub>) au niveau d'Alger de 2001 à 2006. Institut National de Santé Publique, Unité Santé-Environnement, Alger, 27 p.
- [71] Zenata K. (2007). La pollution urbaine dans la wilaya d'Oran. Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie.

- [72] Barnea M., Ursu P. (1974). Pollution et protection de l'atmosphère. Ed. Eyrolles, Paris.
- [73] La dispersion des polluants. ARIA Technologies, 2018 [consulté le 04 mars 2018]. Disponible sur : [http://www.aria.fr/pollutant\\_dispersal.php](http://www.aria.fr/pollutant_dispersal.php).
- [74] Aouissi N. (2011). Impact de la pollution atmosphérique générée par le transport sur la santé publique, un essai écotoxicologique sur le blé dur (*Triticum durum*, Desf), Cas de la région d'Annaba, Mémoire de Magister, Université Annaba, Algérie.
- [75] Ung A., Ranchin T., Wald L., Weber C., Hirsch J., Perron G., Kleinpeter J. (2002). Cartographie de la pollution de l'air: une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques, Application à la ville de Strasbourg. Journées Cassini 2002 du GDR CASSINI-SIGMA, 19-20 septembre.
- [76] Mathé F., Houdret JL., Galloo JC., Guillermo R. (1998). La mesure des particules en suspension dans l'air ambiant : Applications dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air, *Analisis Magazine*, 9, 26.
- [77] Mohamed B., Khaled B. (2009). Contribution to the air pollution evaluation by heavy metals in Alger: Bab El Oued zone. *Pollution atmosphérique*, 202, 193-200.
- [78] AIRPARIF. (2008). Surveillance de la qualité de l'air en Ile-de France : Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air, Association de surveillance de la qualité de l'air en Île-de-France.
- [79] Sbagoud A., Brahim A. (2009). Diagnostic environnemental de la gare routière de Tizi-Ouzou : détection de la pollution métallique d'origine Automobile. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie, université Tizi Ouzou, Algérie.
- [80] AIRPARF. (2006). La qualité de l'air dans le département de Seine-Saint-Denis : Emission et concentration des principaux polluants, Association de Surveillance de la Qualité de l'Air en Île-de-France.
- [81] Quisefit JP., Gaudichet A. (1998). Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyse inorganique. *Analisis Magazine*, 26, 21-27.
- [82] Rabai Y., Bourahla M. (2006). Evaluation de la Pollution Atmosphérique par les Particules en Suspension (TSP) dans la ville de Tizi-Ouzou. Mémoire de fin d'Etude TS en Protection de l'Environnement, Centre de Formation Professionnelle Ouagnoune, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [83] Okawa K. (1999). Analyse des échantillons atmosphériques. Rapport, Centre de Recherche Nucléaire, Alger, 32p.
- [84] Hinds WC. (1982). *Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Wiley-Interscience, New York, 442 p.

- [85] Avino P., Capannesi G., Rosada A. (2008). Heavy metal determination in atmospheric particulate matter by instrumental neutron activation analysis. *Microchemical Journal*, 88, 97–106.
- [86] Cohen D. (1996). Elemental analysis by PIXE and other IBA techniques and their application to fingerprinting of atmospheric fine particle pollution. *Nuclear Instrumentation And Methods (NIM)* 109, 18-226.
- [87] Peter B. (2010). *Theory of XRF: Getting acquainted with the principles*. Ed. PANalytical B.V, ISBN: 90-9016758-7.
- [88] Moseley HG (1913). The high frequency spectra of the elements. Part I. *Philosophical Magazine*, 26, 1024-1034.
- [89] Moseley HG (1914). The high frequency Spectra of the elements. Part II. *Philosophical Magazine*, 27, 703-713.
- [90] Hevesy G., Alexander E. (1932). Intensity ratio of fluorescent X ray lines. *Nature*, 129, 315.
- [91] Haïfa BA. (2014). Etude de la fluorescence X: Développement dans Geant4 de nouveaux modèles de sections efficaces pour la simulation PIXE: Applications biologiques et archéologiques. Thèse de doctorat en physique, Université el Manar, Tunisie.
- [92] Amandine P. (2008). Evaluation de la toxicité des spécimens naturalisés. Ed. la lettre de l'OCIM, p4-9.
- [93] Evans RD. (1968). X-ray and gamma ray interactions. In *Radiation dosimetry*, Vol.1, Chap 3, Academic Press, USA.
- [94] Danté CR. (2007). Détection et caractérisation par rayons X des éléments traces dans les fruits et légumes. Thèse de doctorat en électronique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [95] Jenkins R., Gould RW., Gedcke D. (1995). *Quantitative X-ray Spectrometry*. Ed. Marcel Dekker, New York, 484p.
- [96] Basbas G. (1973). Universal cross sections for K-Shell ionization by heavy charged particles. *Physical Review A*, 7, 983-1001.
- [97] Lewis CW. (1972) Projectile Z dependence of K X-Ray emission induced by Alpha particles and neutrons. *Physical Review A*, 5, 1773-1784.
- [98] Benamar MA. (1999). Applications des techniques nucléaires de microanalyse à l'étude de la pollution du milieu marin et au dosage du sélénium dans les produits alimentaires. Thèse de doctorat d'état, université Houari Boumediene, Alger.

- [99] Leroux J., Thinh TP. (1977). Revised tables of X-ray attenuation coefficients. Report Corporation Scientifique Claisse Inc, Quebec, 46 p.
- [100] Tchanchane A., Benamar MA., Tobbeche S. (1996). Quantitative schemes in energy dispersive X-ray fluorescence implemented in the AXIL package. E.D.X.R.F conference, Lisbonne, Portugal.
- [101] Markowicz A., Haselberger N., El Hassan S., Sewando M. (1992). Accuracy of the emission-transmission method applied in XRF analysis of intermediate thickness samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 158, 409- 41.
- [102] Philip Q. (2015). Quantification de minéraux dans les comprimés pharmaceutiques de multivitamines par XRF et LIBS. Mémoire de maîtrise en Génie pharmaceutique, université de Sherbrooke, Canada.
- [103] Madani SZ., Amina TT. (2009). La mobilité urbaine dans l'agglomération d'Alger : évolutions et perspectives. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- [104] Mohammed B., Tahar B., Thomas T. (2018). La dépendance automobile à Alger: entre efficacité du système automobile et précarité du système de transport. *Revue Recherche Transports Sécurité (RTS), IFSTTAR*, 26p.
- [105] Muraour P. (1954). Contribution du massif de granodiorite de Ménerville (Algérie) à l'élaboration des formations sédimentaires environnantes. *Bulletin de la société géologique de France*, 34, 15.
- [106] Louis D., Francis B., Etienne R. (2007). Les roches éruptives des environs de Ménerville (Algérie): Étude pétrographique. Mémoire de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, Université de Harvard, 142 p.
- [107] Boughedaoui M., Kerbach R., Joumard R. (2004). Mesure de la pollution plombifère dans l'air ambiant d'Alger. *Journal Pollution Atmosphérique*, 121, 105-111.
- [108] ONS (2012). L'Algérie en quelques chiffres : Résultats : 2009-2011. Office National des Statistiques, Edition N° 42, 74p.
- [109] Larbi A. (2001). La couverture sanitaire de la wilaya d'Alger. *Le guide de la médecine et de la santé au Maghreb*, 46p.
- [110] Roger D. (1996). Précis d'Ecologie. 6<sup>ème</sup> Ed. Dunod, Paris, 551p.
- [111] Alain L., Robert S. (1996). Eléments de Biogéographie et d'Ecologie. 2<sup>ème</sup> Ed. Nathan, Paris, 318p.

- [112] Bulletin météo à Alger. Historique météo, 2009 [consulté le 02/05/2016]. Disponible sur : <https://www.historique-meteo.net/afrique/algerie/alger/2009/12/>
- [113] Seltzer P., Lasserre A., Grandjean A., Auberty R. (1946). Le climat de l'Algérie. Ed. La Typo-litho et J. Carbonel réunies, Alger, 212-219.
- [114] Merzouk NK. (1999). Carte des Vents de l'Algérie : Résultats Préliminaires. Revue des énergies renouvelables: Valorisation, 209-214.
- [115] Hamel K. (2013). Science pour l'architecture, confort thermique. Cours master1, Université de Biskra, Algérie, P48.
- [116] Khanfouci M. (2005). Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma. Mémoire Magister, Université de Batna, Algérie, 249p.
- [117] Station météorologique d'Alger (Alger port) .Météo-temps réel, 2009 [Consulté le 22/04/2016]. Disponible sur : <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/alger-port/60369.html>
- [118] Robert MP., Susan FS., Zeisler R. (1996). Protection de l'environnement: techniques analytiques nucléaires pour la surveillance et l'étude de la pollution atmosphérique. Bulletin AIEA, N° 2.
- [119] Spectromètres Epsilon 3x. PANalytical. [Consulté le 05/09/2016]. Disponible sur <http://www.analytical.ru/epsilon3xl.pdf>.
- [120] Mounia T. (2011). Techniques analytiques au CNESTEN et leurs applications dans les domaines de l'environnement, la géochimie et le patrimoine : Cas de la fluorescence des rayons X. Journées de formation « Techniques d'analyses physico-chimiques », Meknès, 3-11 juin.
- [121] Ezaz A., Hyun KI., Zang HO., SangKeun S. (2015). Long-term trend of airborne particulate matter in Seoul, Korea from 2004 to 2013. Atmospheric environment, 101, 125-133.
- [122] Parmentier C., Garrec JP. (1994). Impact de la pollution atmosphérique le long des routes et autoroutes sur la végétation environnante : Utilisation de la bio-indication végétale. Synthèse bibliographique, Centre de Recherches Forestières de Nancy, France.
- [123] CalEPA (1996). Determination of chronic toxicity reference exposure levels. California Environmental Protection Agency.
- [124] Sutherland R. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology, 39, 611-627.
- [125] Mason B. (1966). Principles of Geochemistry. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley and Sons.



- [126] Ali Khodja H., Belaala A., Demmane DW., Habbas B., Boumagoura N. (2008). Air quality and deposition of trace elements in Didouche Mourad, Algeria. *Environnemental Monitoring Assessment*, 138, 219-31.
- [127] Mustapha Z., Yves N., Moussa B., Fouad B (2009). Atmospheric particulate pollution in Kenitra (Morocco). *Pollution atmosphérique*, 203, 313-324.
- [128] Hassan S., El-Abssawy A., Abdel-Maksoud A., Abdou M., Khoder M. (2013). Seasonal behaviors and Weekdays/Weekends differences in elemental composition of atmospheric aerosols in Cairo, Egypt. *Aerosol and Air Quality Research*; 13, 1552–1562.
- [129] Yatkin S., Bayram A. (2008). Determination of major natural and anthropogenic sources profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment*, 71, 685-96.
- [130] Grau S., Tornell A., Bayo J. (2000). Particulate matter and heavy metals in the atmospheric aerosol from Cartagena, Spain. *Atmospheric Environment*, 34, 5161-5167.
- [131] Busheina IS., Kammashi M., Etoriki AM. (2017). Assessment and Measurement of Atmospheric Pollution (Particulate Matter) Around Zawiya City-Libya. *Environmental and Analytical Toxicology*, 7, 473.
- [132] Aoudia M., Boukadoum A. (2005). Qualité de l'air – Surveillance- Données descriptives. Réseau de surveillance de la qualité de l'air en zone urbaine, cas de l'agglomération d'Alger. *Pollution Atmosphérique*, 186, 247-254.
- [133] Kerbachi R., Oucher N., Berkouki N., Demri B., Boughedaoui, M., Joumard R. (2009). Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger. Colloque international, Environnement et transports dans des contextes différents, Ghardaïa, Algérie.
- [134] Terrouche A., Ali-Khodja H., Kemmouche A. (2015). Identification of sources of atmospheric particulate matter and trace metals in Constantine, Algeria. *Air Quality and Atmospheric Health*, 4, 1-16.
- [135] Imed G., Ahmed R., Moncef K., Monem K., Kathouar JH., Khaled M., Mohamed LM., Jean H. (2006). Impact sanitaire des variations quotidiennes de la pollution atmosphérique urbaine, étude de faisabilité dans la ville de Sfax (Tunisie). *Environnement, Risques et Santé* 5, 467-475
- [136] Abu-Allaban M., Lowenthal DH., Gertler AW., Labib M. (2007). Sources of PM10 and PM2.5 in Cairo's ambient air. *Environmental Monitoring and Assessment*, 133, 417-425.
- [137] Handler M., Puls C., Zbiral J., Marr I., Puxbaum H., Limbeck A. (2008). Size and composition of particulate emissions from motor vehicles in the Kaisermühlentunnel, Vienna. *Atmospheric Environment*, 42, 2173–2186.

- [138] Mkoma SL., Maenhaut W., Chi X, Wang W, Raes N. (2009). Characterization of PM10 atmospheric aerosols for the wet season 2005 at two sites in East Africa. *Atmospheric Environment*, 43, 631-9.
- [139] Yu TY., Chang L.(2000). Selection of the scenarios of ozone pollution at southern Taiwan area utilizing principal component analysis. *Atmospheric Environment*, 34, 4499-4509.
- [140] Motelay MA., Ollivon D., Garban B., Chevreuil M.(2003). Polycyclic aromatic hydrocarbons in bulk deposition at a suburban site: assessment by principal component analysis of the influence of meteorological parameters. *Atmospheric Environment*, 37, 3135-3146.
- [141] Pires JM., Sousa SV., Pereira MC., Alvim FM., Martins FG. (2008). Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis – part I: SO<sub>2</sub> and PM10. *Atmospheric Environment*, 42, 1249–1260.
- [142] Chang CC., Wang JL., Lung SC., Liu SC., Shiu CJ. (2009). Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis. *Atmospheric Environment*, 43, 1771-1778.
- [143] Critto A., Carlon C., Marcomini A. (2003). Characterization of contaminated soil and groundwater surrounding an illegal land fill (S. Giuliano, Venice, Italy) by principal components analysis and kriging. *Environmental Pollution*, 122, 235-244.
- [144] Loska K., Wiechuła D. (2003). Application of principle component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 51, 723-733.
- [145] Davis JC. (2002). *Statistics and data analysis in geology*. 3<sup>rd</sup> Edi. John Wiley and Sons, New York.
- [146] Reimann C., Filzmoser P., Garrett RG. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied geochemistry*, 17, 185-206.
- [147] Reid MK., Spencer KL. (2009). Use of principal component analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment. *Environmental Pollution*, 157, 2275-2281.
- [148] Unonius L., Paatero P. (1990). Use of singular value decomposition for analyzing repetitive measurements. *Computer Physics Communications*, 59, 225-243.
- [149] Tauler R., Peré TE., Lacorte S., Barcelo D. (2004). *Chemometrics Modeling of Environmental Data*. Chemical and Environmental Research, Spain.
- [150] Joliffe IT.(2002). *Principal Component Analysis*. 2<sup>nd</sup>Ed. Springer series in statistics.

ISBN 0-387-95442-2.

[151] Preacher KJ., MacCallum RC. (2003). Repairing Tom Swift's electric factor analysis machine. *Understanding Statistics*, 2, 13-43.

[152] Pastuszka JS., Wioletta RK., Elwira ZZ. (2010). Characterization of PM10 and PM2.5 and associated heavy metals at the crossroads and urban background site in Zabrze, Upper Silesia, Poland, during the smog episodes. *Environmental Monitoring Assessment*, 168, 613–627.

[153] Cheick K., Cheick D., Abdramane B. (2017). Simulation de la dispersion des aérosols des feux de biomasse dans la boucle du Baoule au Mali par le model Hysplit. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 6, 180-190.

[154] Stein AF., Draxler R., Rolph GD., Stunder Bj., Cohen MD., Ngan F.(2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059-2077.

[155] Draxler R., Hess GD.(1997). Description of the HYSPLIT4 modeling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224.Ed.Silver spring, Maryland.

[156] Draxler RR. (2018). HYSPLIT4 user's guide. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230.Ed. Silver Spring, Maryland.

## الملخص:

يتناول هذا العمل دراسة تلوث الهواء في منطقة فرانتز فانون في وسط مدينة الجزائر العاصمة من خلال قياس مستوى الجسيمات السابحة في الهواء TSP , PM10 , PM2.5 والعناصر المعدنية الثقيلة الموجودة فيها (ETM) (Fe , Mn , Pb , Co , Ni , Cr , Cd , Zn , Cu.....) باستخدام تقنية مطيافية الأشعة السينية الومضية (XRF) ، خلال الفترة الممتدة من يناير إلى ديسمبر 2009. أظهرت النتائج وجود مستويات عالية من الجسيمات السابحة الكلية والدقيقة (PM10 و PM2.5) خلال فترة الصيف مقارنة بالفترات الأخرى. تركيز بعض المعادن (الكروم, الكوبالت, الكاديوم والنيكل..) كان أعلى بكثير من المعايير المسموح بها دوليا ، ويرجع ذلك أساسا إلى حركة المرور الكثيفة التي تعتبر المسؤول الأكبر في معظم ملوثات الهواء مقارنة بمصادر الانبعاثات الأخرى والى الظروف المناخية. تم استخدام تقنية التحليل في مركبات أساسية (ACP) و عامل الإثراء FE لتحديد المصادر الرئيسية لملوثات الهواء في المنطقة. كما تم أيضا حساب المسارات والمسار الرجعي باستخدام نموذج HYSPLIT لمعرفة أصل الكتل الهوائية.

**الكلمات المفتاحية** الجسيمات السابحة , PM10 , PM2.5 , المعادن الثقيلة , حركة المرور , XRF , عامل إثراء

## Résumé :

Le présent travail porte sur l'étude de la pollution de l'air dans la région Frantz Fanon à Alger centre par les particules totales en suspension (TSP) , matières particulaires (PM10, PM2.5) et éléments traces métalliques associés à eux (ETM) (Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Cr, Cd, Zn, Cu.....) en utilisant la technique de spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF) pour l'analyse des échantillons de l'environnement, Pendant la période qui s'est étalé du Janvier à Décembre 2009.

Un échantillonneur d'air à faible volume (LVS) de type Gent a été utilisé pour collecter les particules.

Les résultats révèlent des niveaux élevés pour les poussières en suspension totales, PM10 et PM2.5 pendant la période estival.

Les concentrations en certains métaux (Cr, Ni, Co, Cd) sont très supérieures aux normes, dues principalement au trafic routier intense qui est responsable de la plus grande partie des rejets polluants dans l'atmosphère, beaucoup plus que les autres sources d'émissions, contribuant ainsi à la détérioration de la qualité de l'air ,et aux conditions météorologiques . L'analyse en composantes principales (ACP) et les facteurs d'enrichissements ont été utilisés pour identifier les principales sources des polluants atmosphériques dans la région. Les trajectoires et rétro-trajectoire ont été calculées à l'aide du modél HYSPLIT afin de caractériser l'origine des masses d'air.

## Mots clé :

Particules en suspension, PM10, PM2.5, Métaux lourds, Trafic routier, XRF, Facteur d'enrichissement

## Abstract:

The present work deals with the study of air pollution at Frantz Fanon region in Algiers center by total suspended particulates TSP, particulates matters (PM10, PM2.5) and metallic trace elements associated with them (ETM) (Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Cr, Cd, Zn, Cu.....), using the technique of X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) for the analysis of environmental samples, during the period from January to December 2009.

A Gent low-volume air sampler (LVS) was used to collect the particles. The results show higher levels for TSP; PM10 and PM2.5 during the summer period. Concentrations of some metals (Cr, Ni, Co, Cd) are much higher than standards, mainly due to weather conditions and heavy road traffic which is responsible for most of the air pollutants, much more than other sources of emissions, thus contributing to the deterioration of air quality. Principal components analysis (ACP) and enrichments factors were used to identify the main sources of air pollutants in the region. The trajectories and retro-trajectory were calculated using the HYSPLIT model to characterize the origin of the air masses.

## Keywords:

Suspended Particulate, PM10, PM2.5, Heavy metals, Road traffic, XRF, Enrichment factor