

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA DE BOUMERDES



FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE CHIMIE  
Domaine : Science de la matière



Spécialité : Chimie de l'Environnement

Mémoire fin d'études en vue l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenue par :

**M<sup>lle</sup> ZIBANI MERIEM & M<sup>lle</sup> LOGHBI NOUR EL-IMANE**

Thème

**Caractérisation des émissions atmosphériques de  
Black Carbon et métaux lourd au site urbain**

Soutenu le 15/09/2021 devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> R. IRINISLIMANE-CHERGUI	MCB	UMBB	Présidente
M <sup>me</sup> L. BENSADALLAH	MCB	UMBB	Examinatrice
M <sup>me</sup> L. BOUNEMIA	MCB	CRNA	Promotrice
M <sup>me</sup> H. IRINISLIMANE	MCB	UMBB	Co-Promotrice

*Année universitaire : 2020/2021*

Quel air respirons-nous ? Chacun de nous respire 10 à 15 m<sup>3</sup> de l'air par jour, quelques 300000 m<sup>3</sup> au cours d'une vie ! Que se soit l'air des habitations, des lieux de travail, des villes ou l'air de la nature, il est toujours plus ou moins pollué. Quels effets cette pollution a-t-elle sur la santé de chacun et sur la santé publique ? D'où vient cette pollution ? Comment la connaître, la prévoir, la surveiller, la prévenir ?

Jean martin in santé et pollution de l'air

## *Remerciements*

*En premier lieu, nous remercions Dieu, le Tout puissant de nous avoir donné la santé, la patience et le courage pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement :*

*La directrice générale de CRNA M<sup>me</sup> Mokrani de nous avoir accepté de réaliser ce travail au CRNA.*

*Notre promotrice M<sup>me</sup>. BOUNEMIA LOUISA pour sa grande disponibilité, ses compétences technique et scientifique, sa patience et son soutien permanent qui nous ont permis de mener à bien notre étude.*

*Notre Co-promotrice M<sup>me</sup>. IRNISLIMANE.H pour leur disponibilité ainsi pour l'aide et le temps qu'elle nous a consacré.*

*M. TOUMERT de nous avoir aidé dans les analyses de l'XRF au niveau de Centre Recherche Nucléaire d'Alger et pour les informations, et les documents qu'ils nous a donnés.*

*Mme. Irnislimane. R pour avoir accepté de présider le Jury ainsi, pour sa gaité et sa remarquable pédagogie.*

*Mme. Bensaadallah. L pour avoir pris le temps de bien étudier et examiner notre mémoire.*

*Nous tenons à remercier particulièrement M. Ferroudj Nasseredine, M. Moulla, M<sup>me</sup>. MELZI ZAIDA, M. ARABI AZEDDIN, M<sup>me</sup>. BENAROUS SAMIHA.*

*Pour finir, nous aimerions remercier tous ceux qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin, et nous nous excusons auprès des personnes que nous avons pu oublier.*

*NOOR & MERIEM*

## *Dédicaces*

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, *Maman* que j'adore

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi *Mon père*.

Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

*A mes chères sœurs Amel, Saida, Hassina, Imene et Amira.* Au mot, ni aucun signe ne pourront d'écrire votre implication dans mon épanouissement. Que Dieu les protèges et leurs offre la chance et le bonheur

*A mes chers frères Mohamed abdesselam et Mouatez bellah* qui j'espère les voir réussir

*A mes beaux-frères Abdenour et Nasserredine* qui m'ont toujours aidé et encouragé,

*A mes adorables nièces et mes neveux Loudjaine, Dorsaf, Mohamed Alaedine, Ilyne* Ceux qui savent toujours apporter joie et bonheur.

*A mon binôme Nour El-imene* pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de projet.

*A la personne qui était toujours à mon côté,* qui m'a toujours aidé et encouragé, à toi *Walid*

*A mes aimables amies, et sœurs de cœur, Salwa, Manel, Roumaissa, Amina, Sabrina.*

*A ma deuxième famille en résidence universitaire Nour El-imene, Farida, Ania, Imene, Marwa, Youssra.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

*Meriem*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A mes très chers parents Mon père **M**essaoud et ma mère **F**arida  
**B**elamri.*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me  
soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes très chères sœurs :*

***O**umaima et **Y**oumna. Que Dieu les protège.*

*A mon cher :*

***A**min qui m'a supporté dans les moments difficiles.*

*A ma merveilleuse amie :*

***R**ania une sœur que la vie a oublié de me donner.*

*A **M**eriem :*

*Chère amie avant d'être binôme.*

*A tous mes amies sans exception.*

*Noor El-Imane*

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.1</b> : la composition volumétrique des différents composants de l'air sec.....	3
<b>Tableau I.1.2</b> : Principaux types de transport atmosphérique des polluants.....	7
<b>Tableau I.1.3</b> : Les normes fixées par la récente directive Européenne 21/05/2008.....	11
<b>Tableau I.1.4</b> : Les normes des particules en suspensions totale dans l'air .....	11
<b>Tableau I.1.5</b> : Les normes des matières particulaires de diamètre aérodynamique 10µm dans l'air.....	11
<b>Tableau I.1.6</b> : les normes des matières particulaires diamètre aérodynamique 2,5µm dans l'air.....	12
<b>Tableau I.1.7</b> : Valeurs limites de quelques métaux lourds tel qu'Arsenic, Cadmium, Plomb, Magnésium, Nickel, Mercure dans l'air.....	12
<b>Tableau II.1.1</b> : Impacts des métaux lourds sur la santé humaine.....	20

## Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Schéma de la variation de l'altitude, de la température et de la pression en fonction des couches de l'atmosphère.....	04
<b>Figure I.2 :</b> Influence de la taille sur la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire.....	10
<b>Figure II.1:</b> Le cheveu humain et les particules PM <sub>2,5</sub> et PM <sub>10</sub> .....	14
<b>Figure II.2:</b> les effets de carbone suie sur la santé.....	17
<b>Figure III.1 :</b> Cartographie du site d'échantillonnage au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (boulevard Frantz Fanon) .....	22
<b>Figure III.2 :</b> L'échantillonneur LVS kleinfiltergerat KFG .....	24
<b>Figure III.3 :</b> Filtre avant et apres collecte.....	24
<b>Figure III.4 :</b> la microbalance.....	24
<b>Figure III.5 :</b> Le dessiccateur.....	24
<b>Figure III.6 :</b> Réflectomètre de fumée.....	26
<b>Figure III.7 :</b> Dispositif expérimental (Amptek Ink) .....	29
<b>Figure III.8 :</b> Image du filtre sur la fenêtre de détection.....	30
<b>Figure III.9 :</b> Standard PT14.....	30
<b>Figure III.10 :</b> Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon par la technique ED-XRF.....	30
<b>Figure III.11 :</b> Exemple d'une rétro-trajectoire du 03/11/2020.....	32
<b>Figure IV.1 :</b> La variation de la concentration journalière des PM <sub>2,5</sub> .....	35
<b>FigureIV.2 :</b> variation saisonnière de la pollution par les PM <sub>2,5</sub> .....	36
<b>Figure IV.3 :</b> cartographie des quelques sources de pollution par rapport le point de mesure.....	37

<b>Figure IV.4 :</b> Evolution temporelle des variables météorologiques et des concentrations de PM <sub>2,5</sub> pendant la période de prélèvement.....	38
<b>Figure IV.5 :</b> La rose des vents pour la saison de l'automne.....	40
<b>Figure IV.6 :</b> La rose de vent de l'hiver.....	41
<b>Figure IV.7:</b> Retros-trajectoires de 16/11/2020 pendant 72 h.....	42
<b>Figure IV.8 :</b> Variation de Concentration du carbone noir présent dans le PM <sub>2,5</sub> .....	42
<b>Figure IV.9 :</b> Variation de concentration de BC en fonction des PM <sub>2,5</sub> .....	43
<b>Figure IV.10 :</b> Retro-trajectoire des particule PM <sub>2,5</sub> .....	44
<b>Figure IV.11 :</b> Répartition saisonnières les retros-trajectoires des PM <sub>2,5</sub> .....	45
<b>Figure IV.12 :</b> Clusters d'air annuelle (2020-2021) .....	45
<b>Figure IV.13 :</b> Dispersion de black carbon .....	46
<b>Figure IV.14 :</b> Répartition saisonnières les retros-trajectoires de black carbon .....	47
<b>Figure IV.15</b> Evolution des concentrations du (Mg, Si, Cl, K) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Magnésium, (b) teneurs en Silicium, (c) teneurs en Chlore, (d) teneurs en potassium.....	48
<b>Figure IV.16</b> Evolution des concentrations du (Cr, Mn, Ti, V) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Chrome, (b) teneurs en Manganèse, (c) teneurs en Titanium, (d) teneurs en Vanadium.....	49
<b>Figure IV.17 :</b> Evolution des concentrations du (Fe, Ni, Cu, Zn) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Fer, (b) teneurs en Nickel, (c) teneurs en Cuivre, (d) teneurs en Zinc.....	50



## Liste des abréviations

**OMS** : Organisation mondiale de la santé.

**PM** : Matière particulaire.

**PM<sub>10</sub>** : Matière particulaire de diamètre aérodynamique inférieur ou égale à 10  $\mu\text{m}$ .

**PM<sub>2,5</sub>** : Matière particulaire de diamètre aérodynamique inférieur ou égale à 2,5  $\mu\text{m}$ .

**PM<sub>0,1</sub>** : Matière particulaire de diamètre aérodynamique inférieur ou égale à 0,1  $\mu\text{m}$ .

**TSP** : Matière particulaire totale.

**BC** : Black carbon (carbone noir).

**EC** : Elementary Carbon (carbone élémentaire).

**HAP**: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

**ED-XRF**: Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry.

**HYSPLIT**: Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model.

**mph**: mille par heure.

# Sommaire

Remerciements .....	I
Dédicace .....	II
Liste des tableaux .....	IV
Liste des figures .....	V
Liste des abréviations .....	VII
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
 <b><i>Chapitre I : GENERALITE SUR L'ATMOSPHERE ET LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE</i></b>	
<b>I.1 Généralité sur la pollution atmosphérique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1 Origine de l'atmosphère.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.2 Composition chimique de l'atmosphère .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.3 Structure de l'atmosphère terrestre.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.4 Rôle de l'atmosphère.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Pollution atmosphérique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1 Sources de pollution atmosphériques.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.1 Sources naturelles .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.2 Sources anthropique.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2 Niveaux de pollution .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3 Principaux polluants atmosphériques .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.4 Indicateurs de la pollution atmosphérique.....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.5 Facteurs météorologiques régissant l'évolution des polluants dans l'air.....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.6 Conséquences de la pollution atmosphérique .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.7 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé et sur l'environnement .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.7.1 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine.....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.7.2 Effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement.....</b>	<b>10</b>

<b>I.2.8 Normes de la qualité de l'air</b> .....	10
--	----

## **Chapitre II : MATIERES PARTICULAIRES**

<b>II.1 Matières particulaires</b> .....	13
<b>II.1.1 Définition des particules « PMx »</b> .....	13
<b>II.1.2 Effets des particules</b> .....	15
<b>II.1.3 Carbone noir et son impact sur la pollution de l'air</b> .....	16
<b>II.1.3.1 Carbone noir</b> .....	16
<b>II.1.3.2 Sources de carbone suie</b> .....	16
<b>II.1.3.3 Impact sur le climat</b> .....	16
<b>II.1.3.4 Impact sur la santé humaine</b> .....	17
<b>II.2 Métaux lourds</b> .....	18
<b>II.2.1 Origine des métaux lourds</b> .....	18
<b>II.2.2 Impact des métaux lourds</b> .....	19
<b>II.2.2.1 Impact des métaux lourds sur l'environnement</b> .....	19
<b>II.2.2.2 Impact des métaux lourds sur l'homme</b> .....	19
<b>II.2.2.3 Toxicité</b> .....	20

## **Chapitre III : MATERIELS ET METHODES**

<b>III.1 Description du site de prélèvement</b> .....	22
<b>III.1.1 site échantillonnage</b> .....	22
<b>III.2 Echantillonnage et équipements de prélèvement</b> .....	23
<b>III.2.1 Echantillonneur LVS kleinfiltergerät KFG</b> .....	23
<b>III.2.2 Détermination des teneurs en (PM-2,5)</b> .....	25
<b>III.3 Techniques optiques de microanalyses</b> .....	25
<b>III.3.1 Réflectomètre pour taches de fumée de black carbon « Smoke Stain Reflectometer »</b> .....	25
<b>III.3.1.1 Description</b> .....	26
<b>III.3.1.2 Mode d'emploi</b> .....	26
<b>III.3.1.3 Mode de conditionnement</b> .....	26

III.3.1.4 Expression des résultats.....	27
III.3.2 Spectrométrie de fluorescence X .....	27
III.3.2.1 Introduction .....	27
III.3.2.2 Principe .....	28
III.3.2.3 Analyse par les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF) .....	28
III.3.2.4 Dispositif expérimental .....	29
III .3.2.5 Procédure d'analyse .....	30
III.4 Modèle d'identification de la pollution à l'échelle locale et régionale .....	31
III 4.1Hysplit.....	31
III.4.1.1 Principe du fonctionnement .....	31

## **Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSION**

IV.1Variation des PM <sub>2,5</sub> .....	35
IV .2 Pollution saisonnière par PM <sub>2,5</sub> .....	36
IV.3 Influence des facteurs météorologiques.....	37
IV. 3.1 Influence de la température.....	38
IV.3.2 Influence de l'humidité.....	39
IV.3.3 Influence de précipitation.....	39
IV.3.4 Influence de la vitesse du vent.....	39
IV.3.5 La rose des vents (Wind rose).....	40
IV.3.6 Etude des teneurs en Carbone noir (Black carbon) dans le PM <sub>2,5</sub> .....	42
IV.4 Corrélation entre Le carbone noir et les PM <sub>2,5</sub> .....	43
IV.5 Détermination des sources de pollution atmosphérique .....	43
IV.6 Etude des teneurs en métaux lourds dans l'air.....	48
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>52</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>55</b>



**INTRODUCTION  
GENENERALE**

## **Introduction générale**

Il se trouve dans l'atmosphère un mélange convenable d'oxygène et d'azote, mais suivant l'endroit de la surface où il vit l'être humain, il respire en outre, inévitablement, divers gaz, vapeurs et aérosols, de composition et de concentrations variables, dont les uns sont physiologiquement inertes et dont les autres provoquent des réactions allant de la gêne légère à l'intoxication grave.

La pollution atmosphérique est devenue un problème d'intérêt général avec l'avènement de la technologie, elle résulte de la présence dans l'air de substances à l'état gazeux ou particulaire, qui sont gênantes pour l'homme, directement ou par suite de leurs effets nocifs sur les animaux, la végétation.

La pollution atmosphérique peut être d'origine anthropique, engendrées essentiellement par les combustions des ressources naturelles fossiles comme le gaz, pétrole, charbon ou de la biomasse et par d'autres produits volatils [1].

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. L'échantillonnage est également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations sur la qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé humaine et les écosystèmes.

En Algérie, l'absence de données sur l'état de la pollution de l'air causée par les particules en suspension, en particulier les niveaux de métaux lourds qu'elles transportent, rend ce problème plus ardu pour les instances publiques.

Ces particules fines véhiculent principalement des imbrulés et matières carbonés issus de processus de combustion, des éléments minéraux liés à l'érosion des sols et à la remise en suspension des particules déposées ainsi que divers métaux lourds toxiques tels que le Pb, Cu, Ni, Cr, etc... [2]. Qui jouent sans doute un rôle important dans la toxicité de l'aérosol.

C'est dans ce contexte et en continuité des travaux qui s'effectuent entre le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) et le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement sur caractérisation des émissions atmosphériques de Black carbon et métaux lourds au site urbain, que nous nous proposons dans ce travail d'étudier les niveaux de pollution par les particules fines et plus particulièrement par les métaux lourds au niveau de

sites urbains d'Alger à forte densité de population exposée directement aux sources émettrices de pollution.

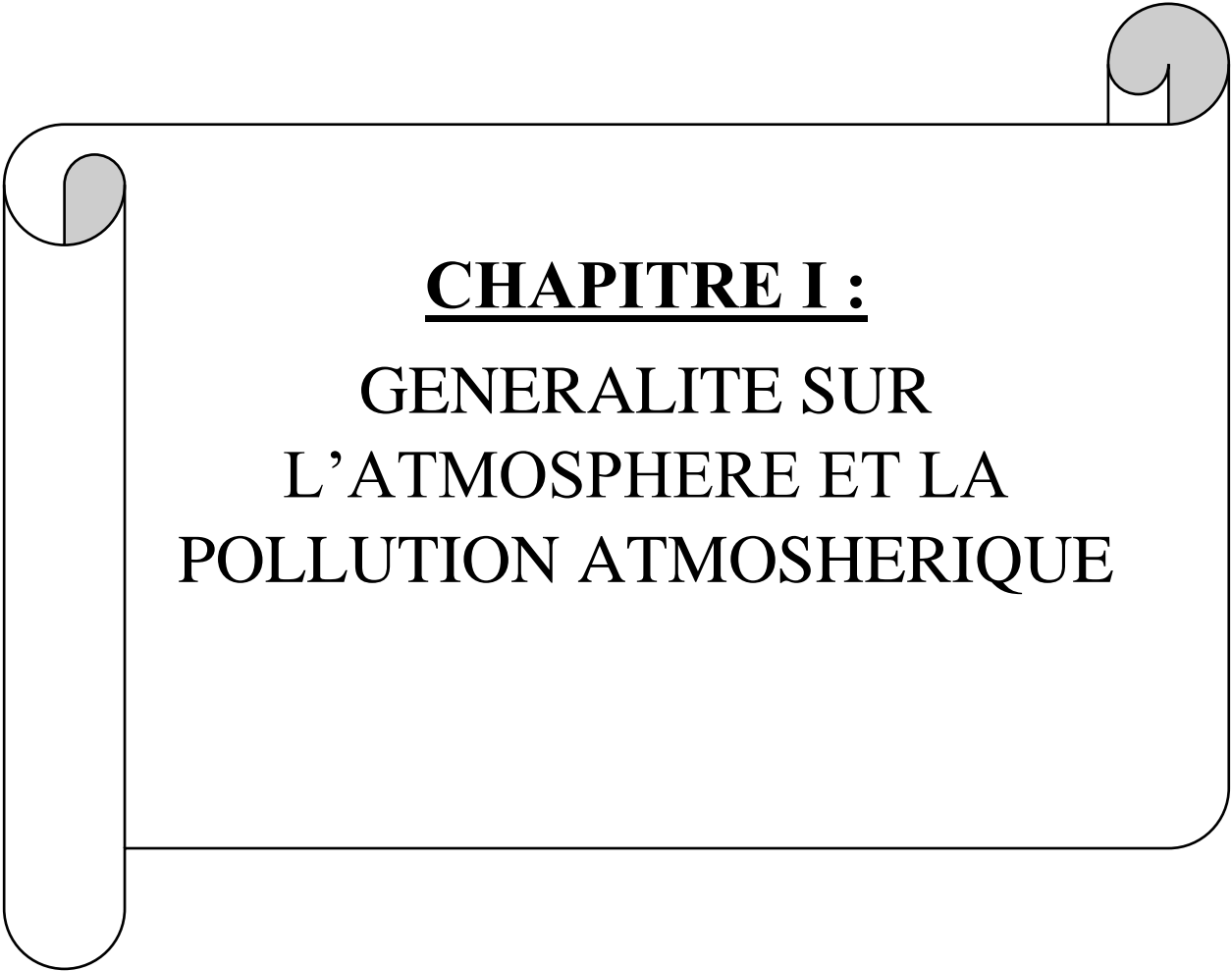
A cet effet, nous avons procédé au plan suivant : le manuscrit s'articule autour de deux parties essentielles représentées par quatre chapitres.

➤ La première partie, c'est la partie bibliographique qui se divise en deux chapitres. Le premier est un rappel sur l'atmosphère, la pollution atmosphérique et le deuxième c'est des définitions sur les matières particulaires et les métaux lourds qui se trouvent dans l'atmosphère avec leurs effets et les normes.

➤ La deuxième partie, c'est la partie expérimentale qui comportera aussi deux chapitres :  
- Matériel et méthodes utilisés lors de nos manipulations ; Prélèvement, échantillonnage et analyse, L'utilisation de la technique d'analyse spectrométrie à dispersion en énergie (ED-XRF, Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry)

- Résultats et discussions ; utilisation du modèle Hysplit avec quelques exemples de dispersions des particules dans l'air et l'étude en se basant sur ce logiciel pour la modélisation de la pollution atmosphérique.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale où sont récapitulés les principaux résultats obtenus avec des perspectives.



**CHAPITRE I :**  
**GENERALITE SUR**  
**L'ATMOSPHERE ET LA**  
**POLLUTION ATMOSHERIQUE**



## 1. Généralité sur l'atmosphère

L'atmosphère est la pellicule d'air qui entoure notre planète, d'une épaisseur de 1000km environ et qui permet la respiration biologique et le cycle de l'eau [3].

### 1.1 Origine de l'atmosphère

A mesure que la terre se refroidit. D'énormes quantités de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et de gaz carbonique furent expulsées du centre de la terre vers l'extérieur, cela constitua la première atmosphère de la terre. Cette atmosphère, agissant comme une serre, permit de réduire la perte de chaleur de la terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie. Sa température se situait probablement entre 15 et 30°C. Ensuite, il y a environ 4,5 milliards d'années, la vapeur d'eau s'est condensée pour former les océans, le gaz carbonique se combina à des minéraux et fut absorbé par les océans et il fut utilisé par les premiers êtres vivants ; l'azote est resté dans l'atmosphère parce que cet élément réagit peu avec les autres éléments. Il y a 3 milliards d'années, l'atmosphère contenait encore peu d'oxygène [3].

Des réactions chimiques compliquées entre le méthane, l'ammoniac, l'eau et le rayonnement solaire donnèrent naissance à une couche d'ozone. C'est la force d'attraction de la terre qui retient l'atmosphère autour du globe.

### 1.2 Composition chimique de l'atmosphère

L'air est un élément primordial à la vie. Il est composé principalement de 78,08% d'azote (N<sub>2</sub>), de 20,95% d'oxygène (O<sub>2</sub>), 0,93% d'argon (Ar), 0,04% de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), il comporte aussi des traces d'autres éléments chimiques [4]. La densité de l'air se modifie uniquement sur hauteurs. Les quantités de gaz à l'unité de volume d'air et les proportions de ceux-ci restent constantes, il en est de même en fonction de temps et de l'espace [5].

**Tableau I.1** : La composition volumétrique des différents composants de l'air sec [5].

Éléments (Gaz)	Symbole chimique	Pourcentage dans l'air
Azote	N <sub>2</sub>	78,08
Dioxygène	O <sub>2</sub>	20,95
Argon	Ar	0,934
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	382.10 <sup>-4</sup>
Néon	Ne	18,18.10 <sup>-4</sup>
Hélium	He	5,24 .10 <sup>-4</sup>
Krypton	Kr	1,14.10 <sup>-4</sup>
Méthane	CH <sub>4</sub>	1,7 .10 <sup>-4</sup>
Xénon	Xe	0,087.10 <sup>-4</sup>
Dihydrogène	H <sub>2</sub>	0,5. 10 <sup>-4</sup>
Ozone	O <sub>3</sub>	1,10 <sup>-4</sup>
Monoxyde d'azote	NO	5,10 <sup>-4</sup>

### 1.3 Structure de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches concentriques et superposées en partant de la surface du sol, leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température qui augmente ou diminue avec l'altitude selon les couches [3].

- **Troposphère :** C'est la couche dans laquelle nous vivons. C'est aussi la plus basse et la plus dense. Sa température décroît de  $60^{\circ}\text{C}$  par kilomètre d'altitude. C'est à ce niveau que volent les avions de ligne et qu'interviennent les phénomènes météorologiques : vent, formation des nuages, pluie, neige... La limite supérieure de la troposphère se nomme la tropopause [6].

- **Stratosphère :** La stratosphère se situe 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 (UV) qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant [5].

- **Mésosphère :** Est au-dessus de stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre  $-80^{\circ}\text{C}$  à une altitude d'environ 80 Km. Les poussiérisées 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 apparait sous la forme « d'étoiles filantes » [5].

- **Thermosphère :** La température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ  $100^{\circ}\text{C}$ . 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 [5].

- **Exosphère :** C'est la couche la plus élevée de l'atmosphère. Elle se dissipe peu à peu dans l'espace inter planétaire et l'air devient extrêmement rare [6].

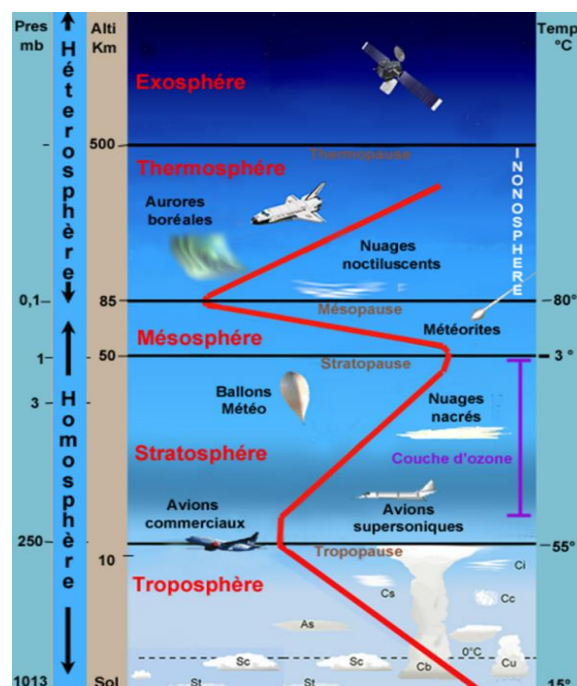


Figure I.1 : Schéma de la variation de l'altitude, de la température et de la pression en fonction des couches de l'atmosphère [6]

## 1.4 Rôle de l'atmosphère

L'atmosphère joue plusieurs rôles : elle nous fournit l'air que nous respirons, ses gaz retiennent la chaleur dont bénéficie la terre et sa couche d'ozone protectrice nous sert d'écran contre le rayonnement solaire nocif. Elle sert également de réservoir pour les substances naturelles ainsi que les émissions qui découlent de l'activité humaine. Dans cet « entrepôt », il se produit des actions et des réactions physiques et chimiques, dont la plupart peuvent altérer nos systèmes climatiques ou météorologiques [7, 8].

## 2. Pollution atmosphérique

La pollution de l'air ou pollution atmosphérique se définit comme étant toute modification de l'atmosphère ambiante apparaissant sous formes, soit gazeuse par la présence de gaz nouveaux ou par l'augmentation de concentration de certains gaz, soit plus rarement liquide causée par les aérosols ou le brouillard. Plusieurs définitions ont été données au terme « pollution atmosphérique » [6].

Selon la communauté économique européenne, en 1967, il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer une gêne [9].

En Algérie, la pollution atmosphérique est définie dans l'article 3 de la loi 03/10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. La pollution de l'atmosphère c'est l'introduction de toute substance dans l'air ou dans l'atmosphère provoquée par l'émanation de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides susceptibles de porter préjudice ou de créer des risques au cadre de vie, à la santé ou à la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agroalimentaires, à la conservation et des monuments ou au caractère des sites [10].

### 2.1 Sources de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est issue de deux sources principales :

#### 2.1.1 Sources naturelles

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

- **Eruptions volcaniques :** Les éruptions volcaniques peuvent injecter dans l'atmosphère de très grande quantité de gaz et de particules. Ces produits peuvent atteindre la stratosphère et leur séjour moyen varie de quatre à deux ans.

Par exemple : l'éruption du Pinatubo (Philippines), en 1991, a libéré 12 millions de tonnes de poussières volcaniques et 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) [9]. Ces particules ont la propriété de diminuer le rayonnement solaire à la surface du sol, et donc d'entraîner une baisse de la température ambiante [11].

- **Pollen** : Les grains de pollen sont portés grâce à l'action des insectes et du vent, ils peuvent aussi pénétrer dans nos voies respiratoires et provoques des réactions allergiques, parfois violentes, chez les sujets sensibles [11].
  - **Les algues**, à la surface des océans, émettent du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S).
  - Les zones humides, les marais ou la végétation se décompose, les rizières, les tourbières ou les lacs peu profonds produisent du méthane (CH<sub>4</sub>), qui est un puissant gaz à effet de serre.
    - L'érosion éolienne introduit de nombreuses particules dans l'atmosphère.
    - **Les plantes et les arbres** émettent des hydrocarbures comme l'isoprène. Ces gaz interviennent dans la formation de l'ozone [9].

### 2.1.2 Sources anthropiques

L'expansion de l'activité humaine a un impact important à une échelle planétaire. Des études ont montré que la pollution par les particules est coupable d'une manière considérable, de la présence renforcée de la fraction granulométrique PM<sub>2,5</sub> [12] qui transportent des espèces toxiques et atteignent sérieusement la santé humaine. Les principales sources anthropiques sont les suivantes :

- **Trafic automobile** : C'est une source de pollution atmosphérique plus diffuse constituée d'une multitude d'émetteurs mobiles, donc elle est plus difficile à maîtriser. Les polluants émis correspondent aux constituants des carburants (hydrocarbures), aux additifs et impuretés qu'ils contiennent. Par exemple est ajouté comme antidétonant à l'essence [13, 14].
  - **Industries** : La plupart des branches industrielles sont génératrices de particules dans l'air. Les concentrations les plus élevées de particules dans l'air se rencontrent aux voisinages des installations industrielles. Tell que l'industrie : thermoénergétique, sidérurgique, la métallurgie des métaux non ferreux, des matériaux de construction, et l'industrie des produits chimiques [15].
    - **Incinération des déchets** : D'importantes quantités de produits usagés (boites de conserve, piles, batteries, métaux...). Finissent dans les décharges. Leur incinération engendre l'émission, dans l'atmosphère, d'importantes quantités de particules dont des métaux lourds tels que le Zn, Fe, Cd, Hg, Pb, ... [16].

## 2.2 Niveaux de pollution

### ➤ Pollution à l'échelle locale

Dans les agglomérations urbaines ou encore dans les sites industriels, les émissions sont importantes et les concentrations en polluants primaires vont atteindre des valeurs élevées, en particulier lors des situations défavorables à la dilution. Les situations les plus favorables pour l'accumulation de ces polluants vont se rencontrer en hiver lors des situations de haute pression atmosphérique (anticycloniques) souvent accompagnées de brouillard ou de nuages bas [17].

### ➤ Pollution à l'échelle régionale

La pollution atmosphérique se manifeste aussi à l'échelle régionale.

Les niveaux de concentration ne sont pas aussi élevés que localement. La pollution à ce niveau ne connaît pas de frontières en pays et on l'appelle pollution transfrontière. Elle provoque des effets spectaculaires comme l'acidification des eaux de surface et le dépérissement des forêts [17].

### ➤ Pollution à l'échelle planétaire

Elle affecte toute la planète et ses répercutions sont plus spectaculaires et plus médiatisées. Les plus connues sont la destruction de couche d'ozone dans la stratosphère et les modifications climatiques due à l'effet de la serre. Le tableau I.2 résume les principaux types de transport atmosphérique des polluants [17].

**Tableau I.2 :** Principaux types de transport atmosphérique des polluants [18].

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

## 2.3 Principaux polluants atmosphériques

Les polluants sont des éléments d'origine naturel ou anthropique, à l'état solide, liquide ou gazeux, contenus dans l'atmosphère et qui ne font pas parties de la composition normale de l'air ou qui y sont présents en quantité anormale [19], tels que les poussières, le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le monoxyde de carbone (CO), les métaux lourds (Pb, Fe, Al, Cl.), les composés organiques volatils (COV), le fluor (F)...etc.

Sont venus s'ajouter progressivement à d'autres substances telles que les gaz à effet de serre : le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O, les CFC, HFC, PFC et SF<sub>6</sub> et d'autres substances telles que l'ozone (O<sub>3</sub>) etc... [20].

Sans négligé que l'air que nous respirons est radioactif comme tout ce qui nous entoure, les principaux polluants radioactifs de l'air sont : le radon avec ses trois isotopes 219, 220, 222, le tritium, le krypton 85 et le carbone 14 [21].

## 2.4 Indicateurs de la pollution atmosphérique

Les indicateurs de la pollution atmosphérique sont : NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, métaux lourd (pb), COV, les poussières, auxquels viennent s'ajouter d'autres substances telles que les gaz à effet de serre : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC, et autres oxydants photochimiques tels que l'ozone [22].

## 2.5 Facteurs météorologiques régissant l'évolution des polluants dans l'air

- **Vent**

Le vent tend à disperser les polluants atmosphériques. Plus le vent est fort plus la vitesse de propagation sera importante, donc le vent est un facteur essentiel qui explique la distribution des émissions dans l'air [8].

- **Température**

La température de l'air diminue généralement avec l'altitude (1°C pour 100 m d'altitude) ce qui favorise la dispersion des polluants [23]. Elle joue un rôle très important pour la détermination du degré de stabilité de l'atmosphère ainsi que pour la dispersion verticale de la pollution. Elle agit sur la chimie des polluants : le froid diminue la volatilité de certains gaz tandis que la chaleur estivale est nécessaire à la formation photochimique de l'ozone [24].

- **Humidité**

L'humidité, non seulement de l'atmosphère, mais aussi du sol, influence les concentrations des polluants. Elle joue un rôle clé dans la formation de certains polluants comme l'acide sulfurique (brouillard acide) et leur élimination (dépôt humide). L'humidité intervient également dans les effets des polluants (détérioration des matériaux par corrosion, augmentation de la sensibilité de certains végétaux avec l'humidité, ...). Le taux d'humidité varie avec le milieu (rural, urbain, ...), suite à différents facteurs (évapotranspiration des plantes, vapeur rejetée par les combustions d'origine anthropique [24].

- **Précipitation**

La pluie lave l'atmosphère des particules et des gaz, pour ensuite les déposer sur le sol et dans l'eau ; les précipitations permettent 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>) [25].

- **Pression atmosphérique**

Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (haute pression) ou la stabilité de l'air ne permet pas dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution [26].

## 2.6 Conséquences de la pollution atmosphérique

### 2.6.1 A l'échelle régionale

- **Smog**

Le terme smog signifie clairement la conjonction des fumées (Smoke) et de brouillard (Fog). Il cumulait trois effets : des conditions météorologiques d'inversion, une couche chaude surmonte des couches plus froides près du sol et y confine les polluants qui s'accumulaient, des quantités élevées de dioxyde de soufre et de poussières issues notamment des installations de combustion du charbon, et une forte humidité atmosphérique [27].

#### ➤ Pluies acides

Les pluies acides font parties des polluants secondaires, et leurs principaux précurseurs sont le SO<sub>2</sub> et le NO<sub>x</sub>. L'oxydation du SO<sub>2</sub> et du NO<sub>x</sub> et leurs transformations en acide sulfurique et nitrique dans la phase aqueuse (dépôt humide) et en sulfates et nitrates dans la phase sèche (dépôt sec) avaient commencé à augmenter fortement [28].

Ces catalyseurs (OH<sup>-</sup>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) sont essentiellement à l'origine de l'augmentation du pouvoir oxydant de l'atmosphère (pollution photochimique) et des concentrations en composés organiques volatiles [28].

### 2.6.2 A l'échelle planétaire

#### ➤ Effet de serre

L'énergie solaire réchauffe la surface de la planète, qui renvoie une partie de ce rayonnement vers l'extérieur. Tandis qu'une partie de cette chaleur est librement relâchée dans l'espace, une certaine proportion est piégée dans les hautes couches de l'atmosphère par des gaz dit à effet de serre. Ce qui a pour conséquence de réchauffer la troposphère. De fait, sans ce phénomène, toute vie sur terre serait impossible [29].

Les gaz à effet de serre dont les plus importants sont la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), le protoxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) absorbent le rayonnement infrarouge émis par la terre et réchauffent l'atmosphère. C'est l'augmentation des gazes à effet de serre liée à l'activité humaine en particulier l'augmentation du CO<sub>2</sub> qui provoque le réchauffement du climat [30].

## 2.7 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé et sur l'environnement

Les modifications apportées par l'homme à son environnement, particulièrement les activités industrielles, autoroutières, urbaines et les pratiques agricoles se traduisent par des pollutions diverses et des perturbations de l'équilibre naturel. Celles-ci peuvent ensuite se réfléchir sur la santé des populations et sur la qualité de l'environnement.

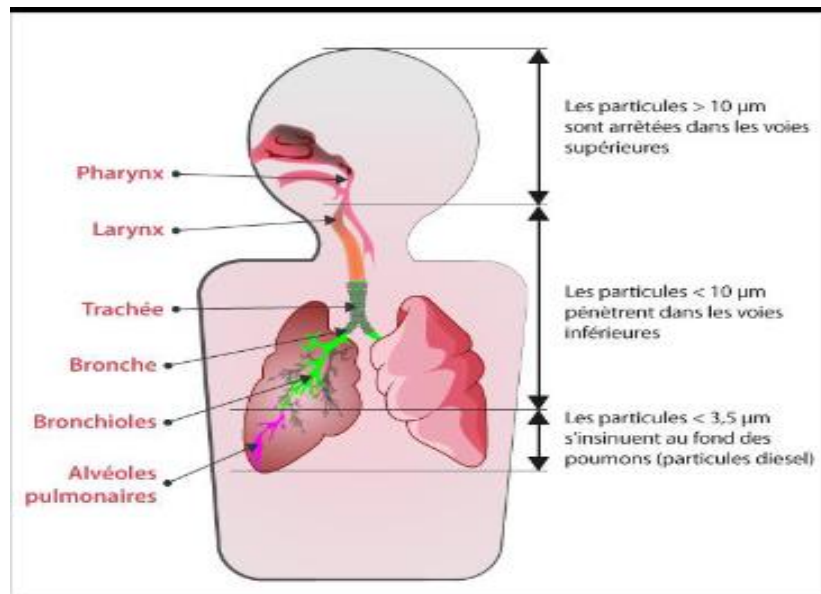
### 2.7.1 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine

Selon l'OMS, la pollution de l'air peut avoir divers effets à court et à long terme sur la santé. La pollution de l'air en milieu urbain accroît le risque de maladies respiratoires aiguës (pneumonie) et chroniques (cancer du poumon) ainsi que de maladies cardio-vasculaires [31].

Une des propriétés les plus dangereuses des poussières est de fixer des molécules gazeuses irritantes ou toxiques présentes dans l'atmosphère (des métaux lourds, des hydrocarbures). Ainsi, les particules peuvent avoir des conséquences importantes sur la santé humaine et être

responsables de maladies pulmonaires chroniques de type asthme, bronchites, emphysèmes (les alvéoles pulmonaires perdent de leur élasticité et se rompent) et pleurésies (inflammation de la plèvre, la membrane qui enveloppe chacun de nos poumons) [32].

Ces effets (irritations des voies respiratoires et/ou altérations de la fonction respiratoire) s'observent même à des concentrations relativement basses. Certaines particules ont même des propriétés mutagènes et cancérogènes [32].



**Figure I.2 :** Influence de la taille sur la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire [33].

### 2.7.2 Effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement

L'air pollué, flottant à la surface de la terre, est emporté par le vent et la pluie. Les nuages et les températures élevées contribuent également à disperser la pollution pour atteindre de très grandes distances depuis son point d'origine.

La pollution de l'air a un impact majeur sur le processus d'évolution des plantes en empêchant la photosynthèse dans de nombreux cas, avec de graves conséquences sur la purification de l'air que nous respirons.

L'accumulation de gaz dans l'atmosphère génère des problèmes environnementaux : pluie acides, diminution de la couche d'ozone, réchauffement climatique, effet de serre... la concentration de ces gaz dans l'atmosphère, principalement le dioxyde de Carbone ( $\text{CO}_2$ ), augmente en moyenne de 1% par an. Ce phénomène est dû aux propriétés que possèdent certains gaz (dioxyde de Carbone, méthane, oxyde nitreux, ozone chlorofluorocarbones) d'emprisonner la chaleur du soleil dans l'atmosphère, l'empêchant de retourner dans l'espace après avoir été réfléchi par la terre [32].

## 2.8 Normes de la qualité de l'air



La définition d'un niveau de la qualité de l'air fixé par les autorités comme devant être respecté. Pour un polluant donné, elle est définie en fonction de deux paramètres :

- ❖ Une donnée quantitative (une concentration en général).
- ❖ Un support temporel correspondant à une durée d'intégration de la donnée quantitative.

L'établissement de ces normes est la base réglementaire d'une politique de gestion de la qualité de l'air [34].

### 2.8.1 Normes de quelque gaz présente dans l'air

Le tableau suivant : représente les normes fixées par la récente directive européenne 21/05/2008 [35], pour quelque gaz présentent dans l'air.

**Tableau I.3** : Les normes fixées par la récente directive européenne 21/05/2008 [35].

	SO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Valeur limite horaire	350	200	/	/
Valeur limite journalière	125	/	/	/
Seuil d'alerte	500	400	240	/
Valeur limite annuelle	/	40	/	10
Valeur cible (sur 8 heures)	/		120	/
Seuil d'information (sur 1 heure)	/		180	/

### 2.8.2 Normes des particules en suspension dans l'air

Les tableaux suivants accordent les différentes normes relatives aux concentrations moyennes représente : les normes des TSP dans l'air, les normes PM<sub>10</sub> dans l'air, les normes des PM<sub>2,5</sub> dans l'air et les valeurs limites de quelques métaux lourds dans l'air [36].

**Tableau I.4** : Les normes des particules en suspensions totale dans l'air.

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

**Tableau I.5** : Les normes des matières particulères de diamètre aérodynamique 10 $\mu\text{m}$  dans l'air.

PM <sub>10</sub>	Valeur limite annuelle µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite journalière µg/m <sup>3</sup>	Références
Etat Unis d'Amérique	50	150	[37]
Californie	20	50	[37]
OMS	35	50	[38]

**Tableau I.6 :** les normes des matières particulaires diamètre aérodynamique 2,5µm dans l'air.

PM <sub>10</sub>	Valeur limite annuelle µg/m <sup>3</sup>	Valeur limite journalière µg/m <sup>3</sup>	Références
Etat Unis d'Amérique	15	65	[37]
Californie	12	/	[37]
OMS	20	25	[38]

L'organisation mondiale de santé et l'Union Européen n'ont établi des normes que pour certains métaux lourds qui paraissent très toxiques. Le tableau suivant donne les valeurs limites de leur concentration dans l'air [36].

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

Métal	OMS (µg/m <sup>3</sup> )	Directive européenne (µg/m <sup>3</sup> )
As	/	0,006
Cd	0,005	0,005
Mn	1	/
Ni	0,02	0,02
Pb	0,5	0,9
Hg	1	/



**CHAPITRE II :**  
**MATIERES PARTICULAIRES**

## 1. Matières particulaires

Les pics de pollution se caractérisent par une augmentation des concentrations en oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>), monoxyde de carbone (CO), benzène et particules fines et très fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>). Ces polluants peuvent occasionner des problèmes pour la santé. Ils surviennent surtout en période hivernale.

Parmi les polluants cités, les particules fines en suspension dans l'air ambiant sont probablement le polluant le plus critique en termes de santé.

De nombreuses études menées dans le monde entier ont signalé des associations entre les PM et divers effets sur la santé, notamment la mortalité prématurée. La plupart de ces études étaient axées sur les PM<sub>2,5</sub> ou les PM<sub>10</sub> [39, 34].

### 1.1 Définition des particules « PMx »

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 ambiant ou déposée sur une surface et susceptible de se mettre en suspension. Ce terme recouvre une vaste gamme de tailles de compositions physico-chimiques différentes [40].

La diversité des aérosols particuliers, est le résultat premier de la multiplicité des sources. Elle est définie selon la composition chimique, la forme, la granulométrie, la densité, mais aussi selon la concentration en nombre ou en masse.

Afin de mieux percevoir le comportement aérodynamique des particules, l'organisation mondiale de la santé (OMS) prend en compte la notion de diamètre aérodynamique appelé « taille particulaire », qui est un facteur important de classification d'un point de vue toxicologues, on utilise couramment les expressions suivantes [41] :

❖ **Les aérosols** : Les aérosols particuliers se définissent par la suspension dans l'air de fines particules solides ou liquide ou encore les deux dans phase gazeuse. Ces particules ont un diamètre inférieur à 100 µm. Les aérosols sont présents au niveau de la couche troposphérique de l'atmosphère et y séjournent longtemps à cause de la faible vitesse de chute des particules les constituant. Ce qui explique l'exposition proche et chronique de l'homme à ce phénomène [42].

❖ **Diamètre aérodynamique** : Comme les particules en suspension dans l'air peuvent présenter des formes et des densités variables, il n'est pas facile de leur donner un diamètre. Aérodynamique est une grandeur qui se prête à la description d'une série de processus. Il correspond au diamètre qu'une particule sphérique d'une densité de 1g/cm<sup>3</sup> devrait avoir pour présenter la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée [37].

❖ **TSP (Total Suspended Particules)** : Ces particules de diamètre inférieur à 30-40 µm séjournent longtemps dans l'atmosphère et sont en général captées par le segment extra thoracique (elles sont arrêtées au niveau de la bouche et de nez) [19].

❖ **PM (Particulates Matter)** : PM c'est une abréviation anglaise de « Particulates matter » et qui signifie matière particulaire [43].

a) **Particules grosses PM<sub>10</sub>** : Les PM<sub>10</sub> sont les particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égale à 10µm. Cette classe de particules peut pénétrer dans le système respiratoire humain. [44]

b) **Particules fines PM<sub>2,5</sub>** : Elles représentent les particules fines en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2,5µm. Ces particules sont plus dangereuses dans la mesure où ils pénètrent plus profondément dans les poumons et peuvent atteindre la région alvéolaire. [43]

c) **Particules ultrafines PM<sub>0,1</sub>** : Les particules ultrafines sont les particules dont le diamètre aérodynamique inférieur à 0,1 µm. Leur taille inférieure aux structure cellulaires leurs confère des propriétés de pénétration au niveau spécifique [45]. Celles-ci sont également dénommées nanoparticules bien que cette dernière dénomination soit plutôt réservée aux particules manufacturées à l'échelle nanométrique (moins de 100 nm) [46].

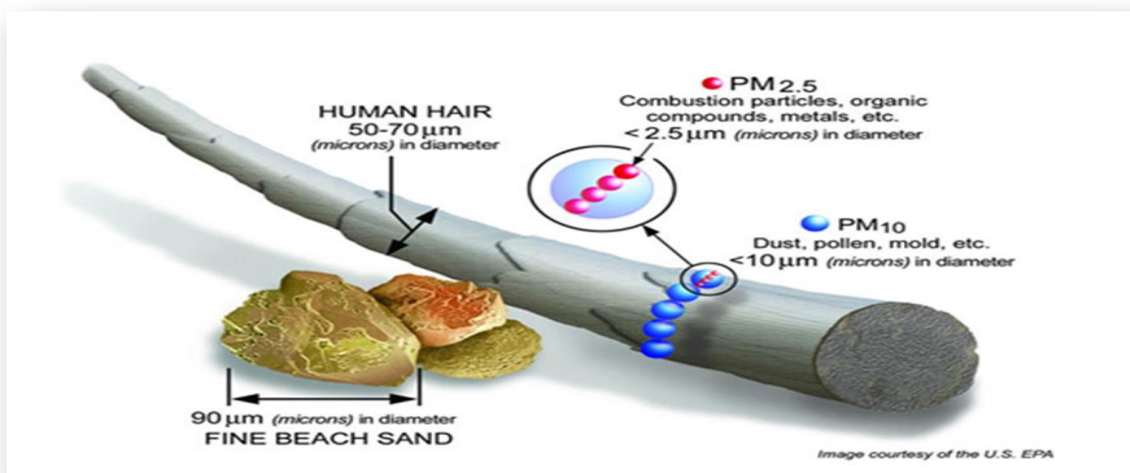


Figure II.1 : Le cheveu humain et les particules PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>

❖ **Poussières (dust)** : Les poussières sont faites de particules solides inférieures à 75µm, les plus grosses retombent près de la source d'émission [47].

❖ **Fumées noires** : Les fumées noires représentent les particules majoritairement composées de carbone et dont le diamètre aérodynamique inférieur à 5µm [48].

❖ **Brouillard et brume** : Le brouillard et la brume sont des suspensions de gouttelettes liquides de diamètre aérodynamique supérieur à 1µm dans l'air. Pour des conditions de visibilité de 1-2 km on appelle cette suspension brume et pour des conditions de visibilité inférieure à 1 km on appelle cette suspension brouillard [49].

❖ **Suies** : Les suies sont des particules solides essentiellement composés de carbone et éventuellement d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, elles possèdent une structure proche de celle du graphite. Elles sont produites dans les systèmes de combustion et de pyrolyse et sont ordinairement très fines [50].

❖ **Cendres volantes** : Les cendres volantes sont des particules solides carbonées résiduelles, qu'on retrouve dans les gaz résultant de la combustion, évidemment leur composition varie d'un combustible à un autre [50].

## 1.2 Effets des particules

### ➤ Effets sur la santé

Les grosses particules ( $d > 10\mu\text{m}$ ), principalement d'origine naturelle, n'ont qu'un faible impact sur la santé, elles se déposent très rapidement sur le sol ou elles sont arrêtées au niveau du nez ou avalées. L'évaluation de leurs émissions et de leur concentration paraît moins utile pour la protection de la santé.

Les particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ) et très fines ( $\text{PM}_{2,5}$ ) pénètrent, quant à elles, plus ou moins profondément dans le système respiratoire selon leur taille. Les particules de la fraction ( $d < 2,5\mu\text{m}$ ) peuvent pénétrer plus profondément et les plus petites peuvent être acheminées jusque dans les alvéoles pulmonaires [51], où il y a passage de substances toxiques voire dangereuses vers la circulation sanguine.

Les fractions thoracique ( $< \text{PM}_{2,5}$ ) et alvéolaire ( $< \text{PM}_1$ ) des particules sont responsables de l'irritation des voies respiratoires, de l'altération de la fonction respiratoire surtout chez l'enfant et les personnes âgées [52]. De l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des crises d'asthmes chez des sujets asthmatiques [52], de problèmes cardio-vasculaires, d'une augmentation de décès prématurés, d'une diminution de l'espérance de vie.

Leurs effets sur la santé dépendent : d'une part, de leur granulométrie : elles pénètrent d'autant plus profondément dans l'appareil respiratoire que leur diamètre est faible [53]. Et d'autre part, de leur composition chimique elles peuvent en effet contenir des produits toxiques, tels que des métaux et des hydrocarbures aromatiques [54, 55].

### ➤ Effets sur le climat

Les poussières ont aussi un impact non négligeable sur le climat [56]. Elles ont un effet direct sur le bilan radiatif de la terre : certaines particules comme les particules de carbone absorbent le rayonnement solaire entraînant un réchauffement local de l'air alors que d'autres particules réfléchissent la lumière impliquant un refroidissement. Ces particules peuvent agir également de manière indirecte sur le climat : la formation des gouttelettes d'eau contenues dans les nuages à besoin d'un noyau de condensation que constituent les particules [57].

Une augmentation de la quantité de particules dans l'air ambiant aurait pour conséquence l'augmentation du nombre de gouttelettes d'eau dans l'atmosphère et donc de la nébulosité entraînant un refroidissement au niveau du sol. De plus, la présence de particules dans l'atmosphère augmente la quantité du rayonnement solaire diffus au détriment du rayonnement solaire direct, ce qui influence la photosynthèse.

Il est difficile actuellement de dire quel est l'effet global des particules sur le climat du fait des effets antagonistes de ces particules.

### ➤ Effets sur l'environnement

En milieu urbain, les dépôts de particules dégradent le patrimoine immobilier, dont le patrimoine architectural historique, en causant altération et dégâts esthétiques qui entraînent des frais de nettoyage et d'entretiens considérables. Il est cependant difficile de chiffrer les dégâts dus aux particules étant donné que celles-ci sont généralement associées à des

nuisances par d'autres polluants : SO<sub>2</sub> pluie acide. Les particules fines peuvent être absorbées par les plantes ou se déposer sur le sol [58]. Leur degré de toxicité dépend de leur composition chimique et de leur éventuelle association à d'autres polluants. Ces particules peuvent par conséquent porter atteinte à la biosphère, directement ou via la chaîne alimentaire qui est liée aux organismes pollués.

### 1.3 Carbone noir et son impact sur la pollution de l'air atmosphérique

#### 1.3.1 Carbone noir

Le Black carbon (BC), également nommé « carbone suie », est un polluant de l'air émis lors de réactions de combustion. Il s'agit de particules primaires avec un diamètre compris entre 20 et 150nm. Le BC est également appelé carbone élémentaire, forme donc une sous-catégorie des PM<sub>2,5</sub>, c'est une fraction non volatile des particules. Émis dans l'atmosphère par la combustion incomplète de sources telles que les moteurs diesel, la combustion de biomasse et la pyrolyse de matières biologiques au cours des processus de combustion.

#### 1.3.2 Sources de carbone suie

La principale source de noir de carbone en milieu urbain serait due aux émissions des véhicules de transport [59]. Le BC appartient à la grande famille des particules, groupe de nature chimique hétérogène, composé d'espèces ioniques (sels), de poussières minérales ou d'espèces carbonées. Deux propriétés principales le caractérisent :

- C'est un composé constitué de carbone dont la couleur noire absorbe le rayonnement lumineux.

- Le carbone suie mesurée est un type de particules, produit par les combustions incomplètes de combustibles d'origine fossile et bio-massique, débarrassé de sa fraction organique [60].

Ses principales sources sont les moteurs à combustion (diesel essentiellement), la combustion résidentielle de bois et de charbon, les centrales électriques, l'utilisation de fioul lourd ou du charbon, la combustion de déchets agricoles, ainsi que les incendies de forêt et de végétation. Il appartient aux particules fines PM<sub>2,5</sub>, mais se retrouve principalement dans la partie la plus petite de celles-ci, les PM<sub>1</sub>. Par ces deux caractéristiques, chimiques et physiques, le carbone suie permet de mieux comprendre les comportements de la pollution particulaire liée aux sources de combustion.

#### 1.3.3 Impact sur le climat

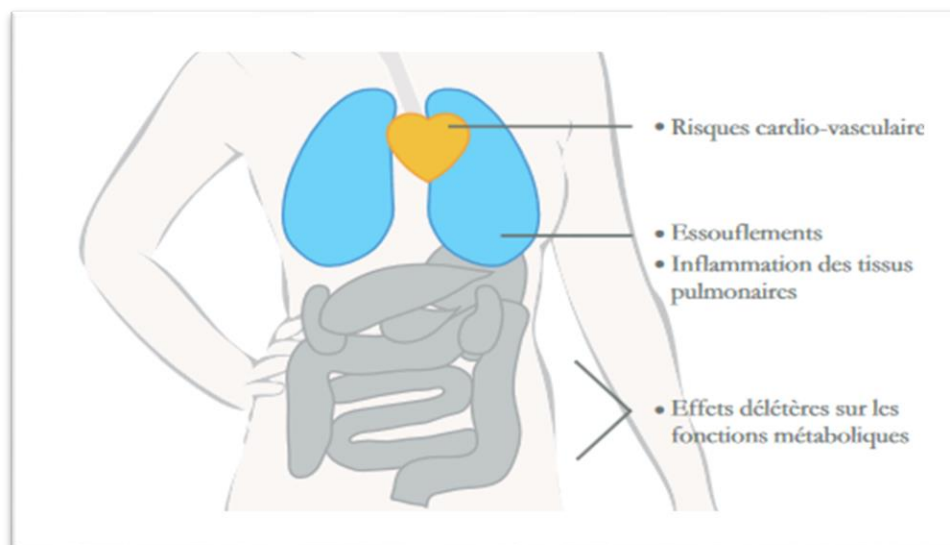
Le carbone noir est un agent de forçage climatique (forçage radiatif) qui est la différence entre l'insolation absorbée par la terre et l'énergie renvoyée dans l'espace. Le noir carbone réchauffe la terre en absorbant la lumière solaire et en chauffant l'atmosphère donc il impose un impact climatique par un effet direct en absorbant la lumière du soleil et réduisant l'albédo planétaire en suspension dans l'atmosphère. Et d'une manière indirecte lorsqu'il interagit avec les nuages. Donc l'absorption de lumière solaire, avec un réchauffement notable, n'est significative que pour les particules de couleur foncée telles que celles composées essentiellement de suies, et pour les particules de cendres des volcans [61].

### 1.3.4 Impact sur la santé humaine

Le carbone suie est la composante carbonée élémentaire de nature particulaire produite par les processus de combustion. De par ses faibles dimensions, il présente les mêmes capacités que les particules fines et ultrafines à pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire et à s'y déposer.

La taille de ces particules est également favorable à leur passage dans le sang à travers la paroi alvéolaire, favorisant les risques cardiovasculaires. Mais si le carbone suie pose problème par ses propriétés physiques qui lui permettent l'accès au poumon profond, ce sont surtout les propriétés chimiques des fractions organique et métallique associées à celui-ci qui posent question.

Lorsqu'on mesure le carbone suie, ces fractions ne sont en effet pas prises en compte ; or à la présence de carbone suie s'associe toujours celle de carbone organique produit lors des processus de combustion incomplète. En effet, cette composante contient des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des quinones à la toxicité reconnue. Le carbone suie peut également être le vecteur de métaux lourds et de métaux de transition (fer, cuivre...) qui sont susceptibles de générer des radicaux libres. Ces molécules chimiques très instables et réactives provoquent des dommages aux macromolécules biologiques avec des conséquences sur certaines fonctions métaboliques du corps humain [60].



**Figure II.2 :** Les effets de carbone suie sur la santé



## 2. Métaux lourds

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser [62]. Ils peuvent se trouver dans l'air, l'eau et le sol [63].

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme : tout métal ayant une densité supérieure à 5 g/cm et ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium ( $Z=11$ ) [63, 64].

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) [62].

### 2.1 Origine des métaux lourds

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement, cette contamination a plusieurs origines tels que la combustion de fossiles, l'industrie, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle, les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc... [65].

**1) Arsenic (As) :** Provient, d'une part, de traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd et d'autre part, dans certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, de métaux non ferreux ou la métallurgie du fer.

**2) Cadmium (Cd) :** Pour sa part est émis par la production de Zinc et l'incinération de déchets essentiellement. La combustion à partir des combustibles minéraux solides, du fioul lourd et de la biomasse engendre une part significative des émissions.

**3) Chrome (Cr) :** Provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies.

**4) Mercure (Hg) :** Emis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers. Hospitaliers et industriels. Les actions préventives ont permis de diminuer les émissions de mercure de façon notable au cours des dernières années.

**5) Nickel (Ni)** est émis essentiellement par la combustion du fioul lourd qui contient de traces de ce métal.

**6) Plomb (Pb)** est émis principalement par le trafic automobile, les autres sources de plomb sont la première et la seconde fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc...

## 2.3 Impact des métaux lourds

### 2.3.1 Impact des métaux lourds sur l'environnement

➤ **Contamination des sols :** Les métaux peuvent être soit émis d'une source fixe dans les roches et les sédiments, soit mobile.

Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement, mais lorsque les conditions changent de telle manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes.

➤ **Contamination de l'air :** Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes on trouve de nombreux éléments dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines.

➤ **Contamination de l'eau :** Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes : les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, les anciennes décharges, l'utilisation de substances dangereuses pour l'eau, la navigation, etc... [66].

### 2.3.2 Impact des métaux lourds sur l'homme

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

Les métaux lourds dans l'air peuvent se trouver principalement sous deux formes : soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatils ou dont la pression de vapeur saturante est élevée (c'est le cas du mercure même à température ambiante), soit sous forme de composés métalliques solides, déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion (aérosols), (c'est le cas du plomb sur les particules formées dans les moteurs à explosion et le cas de tous les métaux sur les particules formées dans les incinérateurs d'ordures ménagères), les métaux peuvent pénétrer dans les voies aériennes supérieures lors d'une inhalation normale et si la taille des particules le permet, atteindre les alvéoles pulmonaires, véritables échangeurs air/sang d'où ils diffusent (gradient de concentration) dans le torrent circulatoire et sont solubilisés dans le sang de la personne exposée. Présents dans la circulation sanguine, les métaux peuvent alors atteindre tous les organes, ce qui fait de la voie respiratoire une voie de contamination très efficace [63].

### 2.3.3 Toxicité

Tous les métaux lourds en concentration anormale ont des effets nocifs sur le métabolisme cellulaire de l'organisme humain. Leur toxicité est cependant certaine [67].

Le tableau II.1.1 représente les effets de certains métaux lourds sur la santé humaine

**Tableau II.1** : Impacts des métaux lourds sur la santé humaine [66].

Elément	Toxicité/forme la plus toxique	Effets	
		Chroniques : Exposition peu intense de longue durée	Aigus : Exposition intense de courte durée
<b>As</b>	Formes inorganique	Cancérogène, lésions peu intenses de longue durée	Irritations des muqueuses, troubles digestives et circulatoires, lésions de la peau
<b>Cd</b>	Formes inorganiques (Chlorure et oxyde de cadmium)	Potentiellement cancérogène ostéoporose, lésion du rein	Troubles digestifs, pulmonaires et rénaux
<b>Cr</b>	Formes inorganiques (Toxique de Chrome)	Effets cancérogènes (poumon), lésion du rein, Troubles respiratoires et gastro-intestinaux	Irritations des muqueuses respiratoires
<b>Hg</b>	Méthylmercure	Troubles neurologiques et du comportement, tremblements	Troubles neurologiques et digestifs, irritations des voies respiratoires, lésions de rein
<b>Ni</b>	Toxicité assez rare, forme organique	Cancérogène, asthme, rhinites chroniques	Troubles respiratoires, digestifs et cutanés
<b>Pb</b>	Forme organique	Potentiellement Cancérogène, plombémie convulsions, troubles neurologiques et du comportement	Troubles neurologiques (enfants plus sensibles), digestifs et rénaux

En plus des effets sur la santé humaine, les métaux lourds altèrent aussi l'environnement. Dans ce qui suit quelques perturbations de l'environnement dues à certains métaux lourds [68].

***Cadmium***

- Perturbation de l'écosystème forestier (décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments).
- Chez les mammifères, il entraîne l'anémie, la diminution de la matière organique, croissance avec des lésions du foie et des reins.
- Chez les poissons, faible concentration d'hémoglobines dans le sang et perte de calcium.

***Mercur***

- Le mercure méthylé a un effet neurologique sur le comportement de la méso et macrofaune, diminue la reproduction chez les oiseaux et les mammifères.

***Plomb***

- Effet neurologiques (plomb méthylé) sur le comportement (méso et macrofaune)
- Inhibition de l'activité microbienne dans la décomposition de la matière organique.

***Zinc***

- Perturbe l'écosystème forestier (décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments).



**CHAPITRE III :**  
**MATERIELS ET METHODES**

Afin d'évaluer la pollution de l'air dans un environnement qui semble ne pas être contaminé, dans ce chapitre, nous décrivons brièvement le site du prélèvement, les procédures d'échantillonnage utilisées et les échantillons collectés. Ainsi que les techniques nucléaires utilisées pour décrire les caractéristiques des échantillons de matières particulaires PM<sub>2,5</sub> prélevés au niveau du centre urbain à Alger centre.

## 1. Description du site de prélèvement

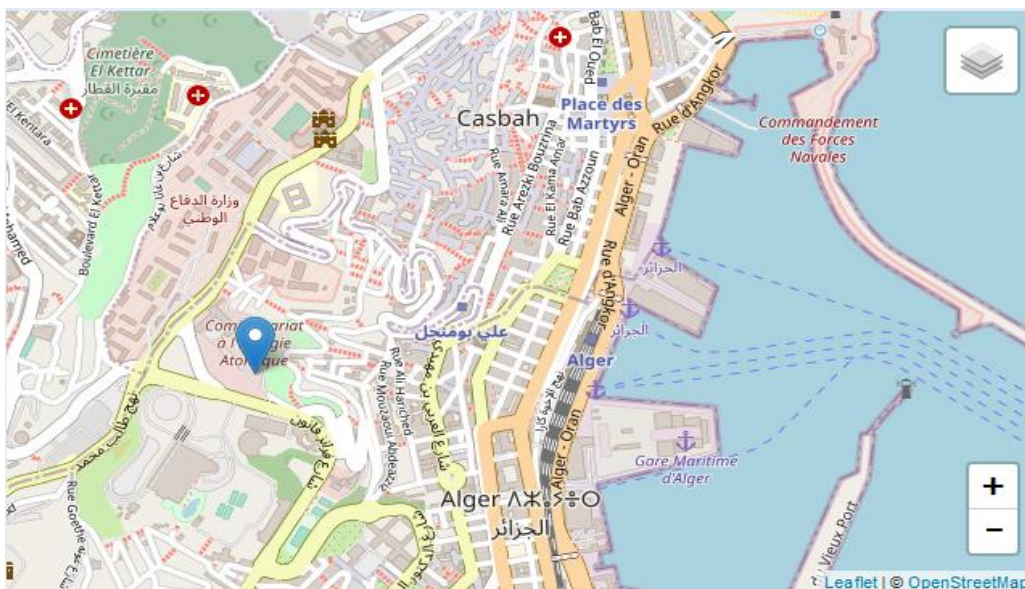
Pour estimer les niveaux de pollution par catégorie de taille de particules, nous avons choisi un site appartenant à la classification « Urbain » selon la classification européenne, loin des principales autoroutes et unités industrielles émettrices de particules. Ce site présente les niveaux moyens de pollution auxquels peuvent être exposées les populations urbaines qui y résident [37].

### 1.1 Site d'échantillonnage

La zone de prélèvement est localisée à l'intérieur du Centre de Recherche Nucléaire situé centre d'Alger boulevard Frantz Fanon (CRNA)

- Sur ce site, la station d'échantillonnage est placée sur la terrasse du poste de garde à l'entrée du centre
- Au poste de mesure nous avons une vue dégagée sur le golfe d'Alger (port, autoroute, etc..). L'emplacement est bien aéré dans toutes les directions.
- Les données géographiques et l'image satellite (**Figure III.1**) du site sont obtenues à travers GoogleEarth (Latitude 36°77'81" Nord ; Longitude 3°05'32" Est).

Selon la classification européenne, notre site du prélèvement est classé parmi les stations urbaines en Algérie, cette zone d'étude est à proximité d'une forte concentration de population et de trafic routier, et diverses activités industrielles et portuaires.



**Figure III.1** : Cartographie du site d'échantillonnage au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (boulevard Frantz Fanon)

## 2. Echantillonnage et équipements de prélèvement

Les échantillons ont été recueillis au niveau du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger centre où un système d'échantillonneur LVS kleinfiltergerät KFG a été appliquée, la prise des prélèvements été effectuée 02 fois par semaine pendant 12 h, pour une durée de 30 semaines

### 2.1 Echantillonneur LVS kleinfiltergerät KFG

L'échantillonneur à faible volume LVS / LVS6-RV (**Figure III.2**) sert à déterminer la concentration de particules en suspension (SPM), à l'extérieur comme à l'intérieur. Les particules prélevées sur le filtre peuvent être évaluées par gravimétrie et analysées en ce qui concerne les composants de la poussière, par exemple les métaux, les anions ou les HAP, ainsi que la radioactivité.

L'échantillon d'air est aspiré à l'aide d'une pompe à vide. Le débit d'air est mesuré par une plaque à orifice installée entre le filtre et la pompe à vide. L'air prélevé s'écoule de la pompe à travers un séparateur vers la sortie [69].

#### ➤ Caractéristiques

- Débit volumétrique contrôlé : 2.3-2.7-3.0 m<sup>3</sup>/h
- Ecart par rapport au point de consigne : < 2%
- Durée d'échantillonnage : Min 1 h – Max 168 h
- Source d'énergie : 230 V, 50/60 Hz
- Puissance requise : Environ. 300 VA
- Diamètre du filtre : 47 et 50 mm
- Diamètre de la surface du filtre échantillonné : Environ 40 mm [69].

La matière particulaire PM<sub>2,5</sub> est collecté sur la surface des filtres de type polycarbonates et de 47 mm de diamètre et de porosité 0,4µm, par le biais de la tête de préleveur l'air est aspiré dans les conditions d'échantillonnage bien déterminés.

Figure III.2 montre l'échantillonneur (LVS kleinfiltergerät) qui a un support où on place les filtres.

Les filtres vierges (vides) (**Figure III.3**) sont pesés à l'aide d'une microbalance de type Sartorius (±0,001mg), bien calibrée et nettoyée, puis insérés dans les portes échantillons à l'aide d'une pincette de laboratoire bien nettoyée, afin d'éviter toute contamination après leur retrait.

Après la collecte et pour la pesée de la matière obtenue, les filtres sont récupérés minutieusement et pesés à l'aide de la même microbalance (**Figure III.4**), puis mis dans une boîte de pétri codifiée à son nom (EA360TBA, EA361TBA,) ils seront analysés ultérieurement [5].



Figure III.2 : L'échantillonneur LVS kleinfiltergerät KFG

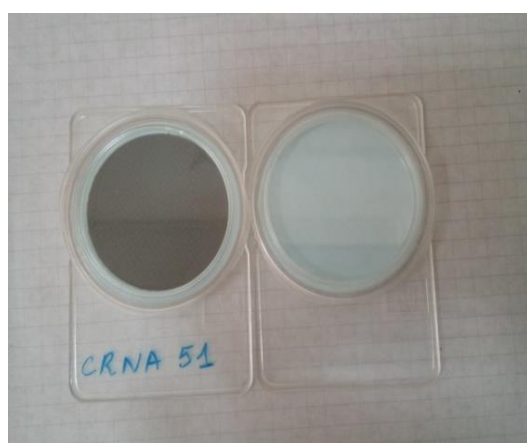


Figure III.3 : Filtre avant et après collecte



Figure III.4 : la microbalance



Figure III.5 : Le dessiccateur



## 2.2 Détermination des teneurs en PM<sub>2,5</sub>

Pour pouvoir calculer la concentration en particules exprimée en µg/m<sup>3</sup> il faut connaître le poids accumulé, la durée d'échantillonnage et le débit d'air moyen à partir duquel le volume moyen est utilisé. Tout au long de la période d'échantillonnage, nous avons essayé d'enregistrer tous les observations qui pourraient affecter les résultats, afin de donner une bonne explication. Les concentrations des matières particulaires sont obtenues par le rapport suivant :

$$C(PM_{2,5}) = \frac{\Delta m}{V} = \frac{\text{masse}(\text{filtre pollué}) - \text{masse}(\text{filtre vierge})}{V(\text{volume d'air aspiré})} \quad (III.1)$$

## 3. Techniques Optiques de microanalyses

### 3.1 Réflectomètre pour taches de fumée de black carbon « Smoke Stain Reflectometer »

La loi sur la qualité de l'air a donné un nouvel élan à la demande d'un instrument peu coûteux qui aiderait les autorités locales à lutter contre les particules nocives sur l'atmosphère. L'utilisation d'un réflectomètre photoélectrique afin d'éviter toute contamination et obtenir des résultats précis et fiables. C'est en accord avec leurs suggestions que le réflectomètre pour taches de fumée a été conçu [70].

#### 3.1.1 Description

Le réflectomètre, SSR « Smoke Stain Reflectometer » (réflectomètre aux taches de fumées) de type EEL43M est constitué :

- D'une tête de mesure : la lumière d'une lampe en tungstène traverse l'orifice de la photocellule annulaire pour projeter une tache bien définie sur l'échantillon afin de la renvoyée vers la photocellule.
- D'une unité de mesure : un fil de la tête de mesure est connecté à l'unité d'affichage sur laquelle les valeurs de 0 à 100.0 sont indiquées.
- D'un standard : un standard blanc/gris, avec sa valeur de réflectance fournie avec chaque instrument [70].



Figure III.6 : Réflectomètre de fumée

### 3.1.2 Mode d'emploi

Un papier filtre propre est placé sur l'étalon blanc avec le masque détectable par-dessus. La tête de mesure est ensuite placée sur le masque détectable et la commande de sensibilité est réglée pour donner une lecture de 100,0 (Calibration). Une fois les paramètres de référence obtenus, le papier propre est remplacé par un échantillon pollué. Avec la tête à nouveau en position, la nouvelle lecture est notée. Ce processus est répété pour chaque tache. Un contrôle de linéarité de l'instrument est facilement réalisable. Le masque et la tête de mesure sont placés sur l'étalon blanc et le contrôle de sensibilité est ajusté pour produire une lecture de 100. Ils sont ensuite transformés en étalon gris et la nouvelle lecture est prise. Cela devrait être dans les limites données pour la plaque standard dans le manuel du fabricant (34,0 E 0,5) [70].

### 3.1.3 Mode de conditionnement

Afin d'obtenir des résultats comparables et fiables, tous les filtres de  $PM_{2,5}$  sont déposés dans des boîtes de pétri étanches, qui sont par la suite stockées dans des dessiccateurs à température ambiante. Des précautions doivent être prises pour prévenir tout type de contamination [70].

### 3.1.4 Expression des résultats

Pour calculer la concentration massique de carbone élémentaire dans l'atmosphère en ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

❖ **Model de Cohen, utilisation du coefficient d'absorption massique**

**A. Déterminer la densité surfacique D (ou ECR ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), en utilisant l'équation suivante :**

$$ECR(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \left( \frac{100}{2F\varepsilon} \right) \text{Ln} \left( \frac{R_0}{R} \right) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$\varepsilon$  : est le coefficient d'absorption massique pour ECR ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) à une longueur d'onde donnée  
 F : est un facteur de correction de l'ordre de 1,00 pour tenir compte du fait que les sulfates, les nitrates et d'autres facteurs possibles comme l'ombrage et le chargement du filtre ont été ignorés

$R_0$  et R : sont respectivement les mesures d'intensité avant et après réflexion à une longueur d'onde donnée.

Maenhaut (1998) définit une expression équivalente expérimentalement déterminée pour ECR en utilisant des mesures de réflectance de la lumière blanche sur des filtres Nucleopore de 47 mm avec  $\varepsilon = 5,27 \text{ m}^2/\text{g}$  et  $F = 1,00$ .

**B. Avec le volume d'air aspiré (V) et la zone de collecte du filtre (A) Connue.**

La concentration en masse peut être facilement déterminée en utilisant l'équation suivante) [70] :

$$M = \frac{D \times A}{V} \quad (\text{III.3})$$

Où :

M : la concentration massique de BC dans l'atmosphère ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

D : la densité surfacique des particules sur le filtre ( $\mu\text{g}/\text{cm}$ ).

A : la surface de collecte du filtre (cm).

V : le volume d'air aspiré ( $\text{m}^3$ ).

## 3.2 Spectrométrie de fluorescence X

### 3.2.1 Introduction

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm jusqu'à quelques %, avec des résultats précis et surtout reproductibles. [71].

### 3.2.2 Principe

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique [71].

En spectrométrie de fluorescence X, les sources de rayonnements X habituellement utilisées sont les tubes à rayons X ou les sources radioactives (surtout pour les appareils portables mais qui tendent à disparaître avec le développement des mini-tubes). Du fait de leur énergie importante, les photons X émis par un tube ont la capacité d'arracher des électrons situés sur les couches proches du noyau des atomes. L'atome alors ionisé va tendre à revenir à l'état d'équilibre.

Pour l'analyse du rayonnement de fluorescence X émis par l'échantillon, il existe deux grands types d'appareillage : les spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF, Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry) et les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF, Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry) [71].

Dans notre cas, on a utilisé la méthode d'analyse citée en dessus (ED -XRF).

### 3.2.3 Analyse par les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF)

Ces spectromètres utilisent la sensibilité de détecteurs à l'énergie des photons X émis par les atomes qui constituent l'échantillon à analyser. Il s'agit de détecteurs du type semi-conducteur (classiquement des détecteurs Si (Li) silicium dopé au lithium) ou de détecteurs au silicium à diffusion (Silicon Drift Detector, SDD) connectés à un amplificateur. Les photons X qui pénètrent dans le détecteur vont provoquer des ionisations dans le semi-conducteur, les paires électrons/trous vont migrer sous l'effet du champ électrique de polarisation et provoquer des impulsions de courant dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie du photon.

Le détecteur convertit les photons X en charge électrique et l'amplificateur transforme le signal en impulsion électrique. Plus le photon X incident aura une énergie élevée, plus il créera de défauts dans le semi-conducteur et plus l'amplitude de l'impulsion électrique sera grande. Ainsi l'amplitude des impulsions est directement proportionnelle à l'énergie du photon X pénétrant dans le détecteur. L'énergie des photons X incidents étant caractéristique des atomes constitutifs de l'échantillon, on pourra utiliser la hauteur des impulsions pour connaître la nature de ces atomes. Plus la concentration d'un élément est élevée, plus l'appareil captera de photons X ayant la même énergie ou la même hauteur d'impulsion. Pour établir la concentration des éléments présents dans un échantillon, il faut compter le nombre d'impulsions de même hauteur.

### 3.2.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (AmptekInk) qui se trouve au niveau du laboratoire (ED-XRF) dans le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) (**Figure III.7**) se compose d'une source de rayons X, d'un support d'échantillon, d'un système dispersif et d'un détecteur. Lors de l'irradiation, le spectre d'énergie des rayons X émis par les différents éléments de l'échantillon est mesuré à l'aide de détecteur sous les conditions opératoires suivantes :

Intensité ;  $I = 25 \mu\text{A}$ .

Excitation ;  $E = 30 \text{KV}$ .

Temps ;  $t = 300 \text{ s} \cong 5 \text{ min}$ .



**Figure III.7** : Dispositif expérimental (Amptek Ink) [72]

Pour une analyse quantitative l'intensité de la raie caractéristique d'un élément présent dans un échantillon est proportionnelle à sa concentration.

La méthode quantitative relative (méthode des standards externes) a été retenue dans ce travail. La concentration de l'élément x est obtenue d'après l'expression suivante :

$$\frac{I_{x.ech}}{I_{x.std}} = \frac{m_{x.ech}}{m_{x.std}} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$I_{x.ech(net)} = I_{x.ech} - I_{blanc} \quad \text{Et} \quad I_{x.std(net)} = I_{x.std} - I_{blanc}.$$

Où :

$X_{ech}$  : l'intensité de l'élément x dans l'échantillon.

$I_{x, \text{std}}$  : l'intensité de l'élément x dans le standard.  
 $m_{x, \text{ech}}$  : la masse de l'élément x dans l'échantillon.  
 $m_{x, \text{std}}$  : la masse de l'élément x dans le standard.

### 3.2.5 Procédure d'analyse

L'objectif de notre travail est l'étude quantitative de la pollution atmosphérique par les métaux lourds liée aux  $PM_{2.5}$  récoltées au niveau du Centre de Recherche Nucléaire Alger CRNA. L'analyse a été réalisée par la technique de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF).

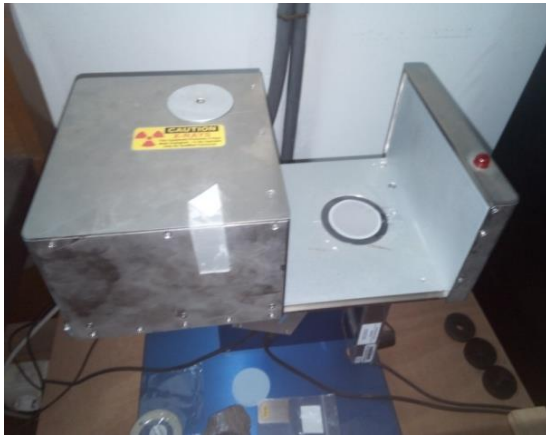


Figure III.8 : Image du filtre sur la fenêtre de détection

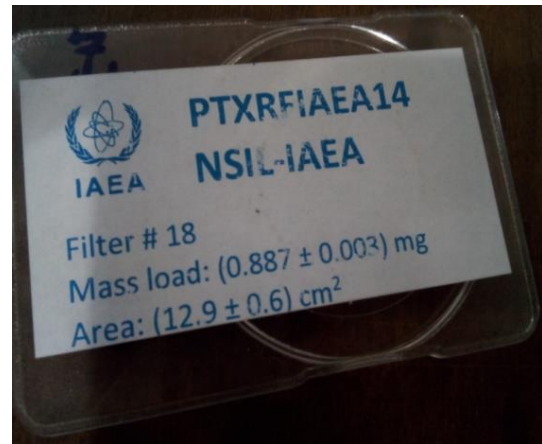


Figure III.9 : Standard PT14

Les spectres obtenus par la technique ED-XRF analyse  $PM_{2.5}$  identifient les éléments contenus dans les échantillons analysés. Les intensités des pics (Figure III.10) permettent de quantifier les concentrations des éléments.

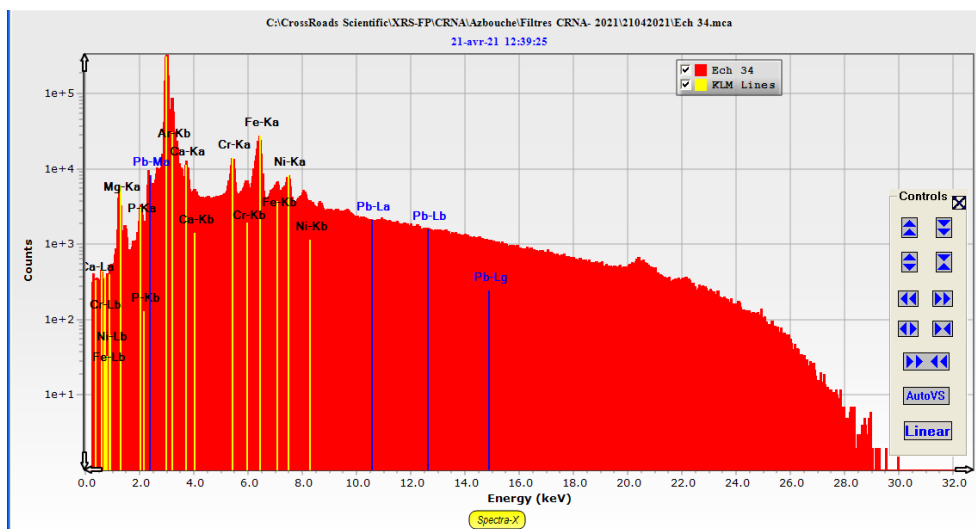


Figure III.10 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon par la technique ED-XRF

## 4. Modèle d'identification de la pollution à l'échelle locale et régionale

### 4.1 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model)

Le modèle hybride de trajectoire intégrée lagrangienne à particule unique (HYSPLIT) est un système complet permettant de calculer des trajectoires simples de parcelles d'air, ainsi que des simulations complexes de transport, de dispersion, de transformation chimique et de dépôt.

HYSPLIT continue d'être l'un des modèles de transport et de dispersions atmosphériques les plus utilisés dans la communauté des sciences atmosphériques. Une application courante est l'analyse de la trajectoire arrière pour déterminer l'origine des masses d'air et établir les relations source-récepteur.

HYSPLIT a également été utilisé dans une variété de simulations décrivant le transport atmosphérique, la dispersion et le dépôt de polluants et de matières dangereuses. Parmi les exemples d'applications, citons le suivi et la prévision des rejets de matières radioactives, de la fumée des feux de forêt, de la poussière soulevée par le vent, des polluants provenant de diverses sources d'émission fixes et mobiles, des allergènes et des cendres volcaniques [73].

#### 4.1.1 Principe de fonctionnement

La méthode de calcul du modèle est un hybride entre l'approche lagrangienne, qui utilise un cadre de référence mobile pour les calculs d'advection et de diffusion lorsque les trajectoires ou les parcelles d'air se déplacent à partir de leur emplacement initial, et la méthodologie eulérienne, qui utilise une grille tridimensionnelle fixe comme cadre de référence pour calculer les concentrations atmosphériques de polluants (le nom du modèle, qui n'est plus un acronyme, reflétait à l'origine cette approche de calcul hybride). HYSPLIT a évolué pendant plus de 30 ans, passant de l'estimation de trajectoires simples simplifiées basées sur des observations par radiosondage à un système prenant en compte de multiples polluants en interaction, transportés, dispersés et déposés sur des échelles locales à mondiales.

La dispersion d'un polluant est calculée en supposant une dispersion par bouffées ou par particules. Dans le modèle par bouffées, les bouffées s'étendent jusqu'à ce qu'elles dépassent la taille de la cellule de la grille météorologique (horizontalement ou verticalement), puis se divisent en plusieurs nouvelles bouffées, chacune avec sa part de la masse de polluant. Dans le modèle de particules, un nombre fixe de particules est advecté dans le domaine du modèle par le champ de vent moyen et propagé par une composante turbulente. La configuration par défaut du modèle suppose une distribution tridimensionnelle des particules (horizontale et verticale) [73]. La figure III.11, montre un exemple d'une rétro-trajectoire.

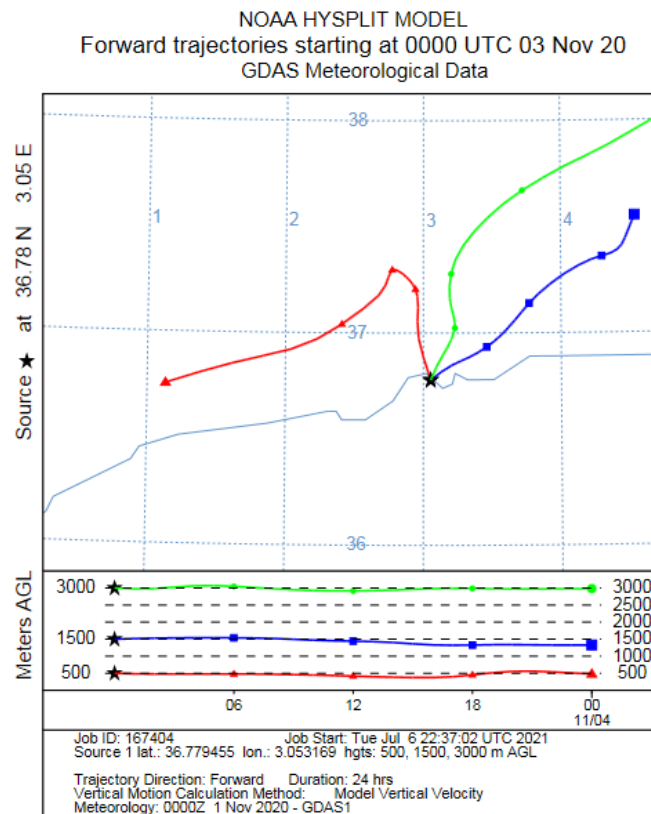


Figure III. 11 : Exemple d’une rétro-trajectoire le jour de 03/11/2020





**CHAPITRE IV :**  
***RESULTATS ET DISCUSSION***

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus relatifs à la pollution atmosphérique par les  $PM_{2,5}$  et le carbone noir ainsi que les métaux lourds.

La campagne d'échantillonnage de  $PM_{2,5}$  est effectuée du 03 novembre 2020 au 28 mai 2021 à raison de deux prélèvements par semaine pendant 12 heures chacun. Les 60 échantillons de  $PM_{2,5}$  collectés du site urbain du CRNA, sont pesés et analysés. Les filtres chargés sont de couleur noire à cause de plusieurs sources de pollution. La mesure des particules est principalement basée sur les calculs de concentration massique en  $PM_{2,5}$ , conformément aux recommandations de la directive européenne [74].

Les résultats de notre étude sont présentés dans ce chapitre, ils sont aux teneurs en  $PM_{2,5}$  dans l'air pour la période d'échantillonnage considéré, leurs variations en fonction des facteurs météorologiques, et les concentrations de carbone noir et des métaux lourds qui sont présents dans ces derniers.

### 1. Variation des $PM_{2,5}$

Les  $PM_{2,5}$  représentent les particules fines en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à  $2,5\mu m$  (voir Chapitre 2) [43]. Ces particules sont plus dangereuses, ils ont une valeur journalière restrictive, designer par l'OMS est égale à  $25\mu g/m^3$ . Les mesures menées au niveau du CRNA (Figure IV.1).

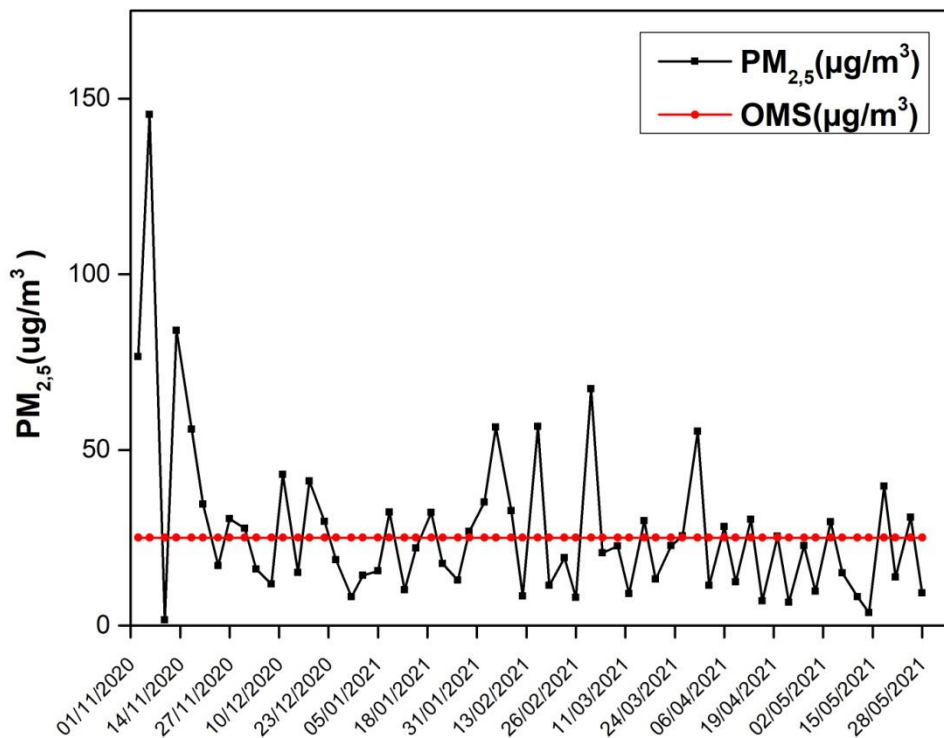


Figure IV.1 Variation de la concentration journalière des  $PM_{2,5}$

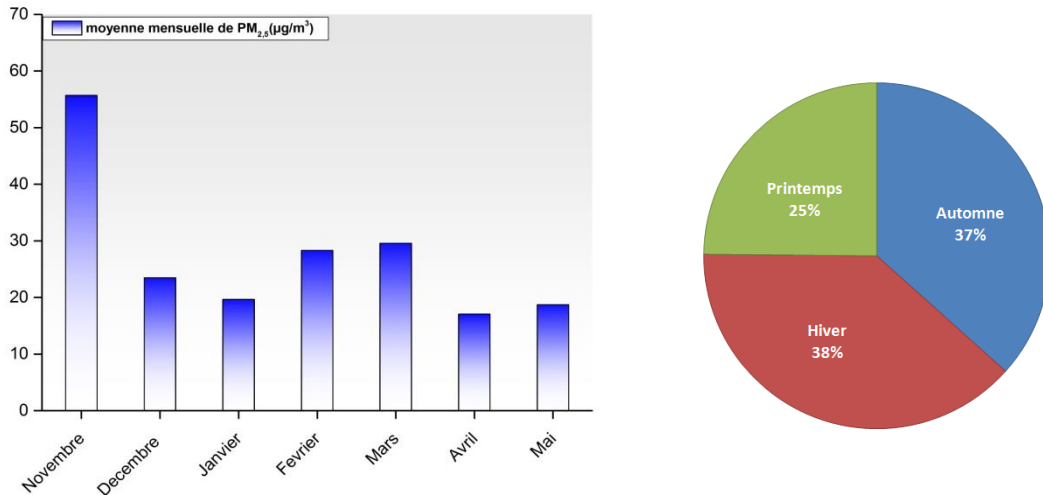
La Figure IV.1 représente l'évolution temporelle des concentrations journalière des particules  $PM_{2,5}$  pour la période du 03 novembre 2020 au 28 mai 2021. La concentration de  $PM_{2,5}$  varie entre  $145,40\mu g/m^3$  et  $3,66\mu g/m^3$  avec une moyenne de  $27,30\mu g/m^3$ .

Les résultats montrent deux pics importants de pollution et qui dépassent la valeur guide de protection de la santé recommandée par l’OMS ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) par une valeur maximale de  $145,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $84,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  marquées pour les deux jours respectivement le 06/11/2020 et 13/11/2020. Les autres sept pics sont repartis comme suivant :

- Deux pics en automne
- Trois pics en hiver
- Deux pics en printemps

## 2. Pollution saisonnière par $\text{PM}_{2,5}$

La pollution atmosphérique a tendance à varier selon chaque saison et différents mécanismes d’émission et de transports de polluants se manifestent avec les activités effectuées (industrie, transport, chauffage résidentiel et agriculture). En outre, suivant les caractéristiques météorologiques saisonnières et les phénomènes naturels (incendie de forêt, chaleur, lumière, pluie, mouvement de vent) [74], la pollution par les  $\text{PM}_{2,5}$  varie de la manière suivante :



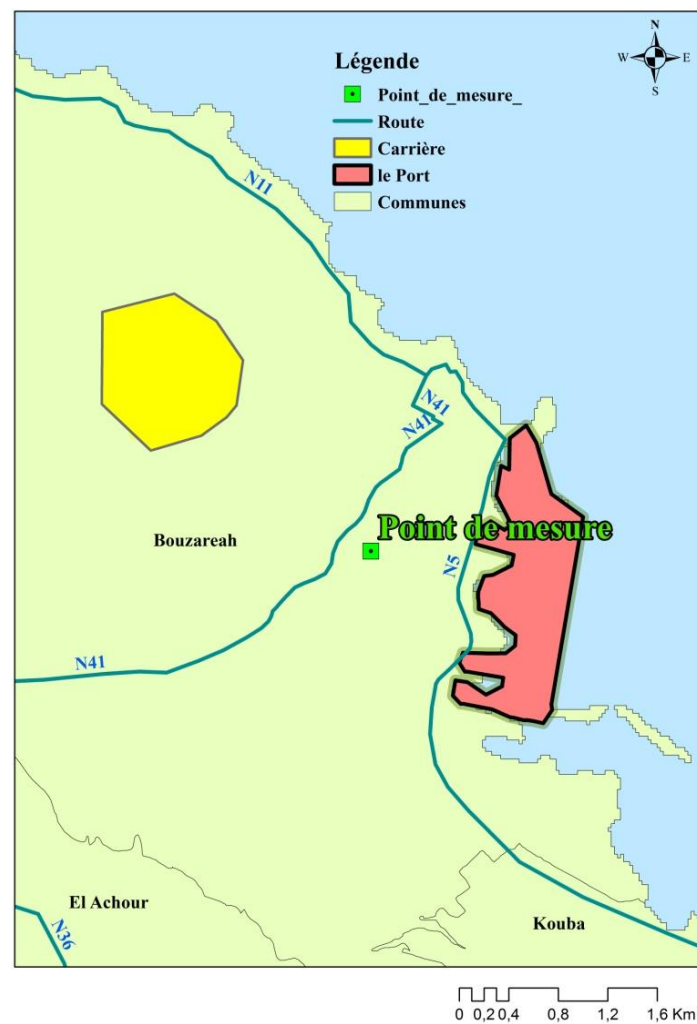
**Figure IV.2** variation saisonnière de la pollution par les  $\text{PM}_{2,5}$

La figure IV.2 exprime la variation saisonnière de la teneur en  $\text{PM}_{2,5}$  durant la période d’échantillonnage pour les trois saisons d’Automne 2020, d’Hiver et de Printemps 2021.

Les résultats montrent que le pourcentage des  $\text{PM}_{2,5}$  augmente en hiver (38%) et l’automne 37% et diminue en printemps (25%). On avait enregistré plus de pollution en mois de Novembre avec une moyenne mensuelle de  $55,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  où on a enregistré deux énormes pics dépassant la valeur limite préconisée par l’OMS.

Tout d’abord, on a constaté que la pollution n’est pas toujours la même. En automne-hiver, l’une des principales sources de pollution d’air est le chauffage. Lorsque de nombreuses habitations se mettent à chauffer, notamment à l’aide de cheminées, poêles à bois ou autres chaudières au fuel ainsi que le trafic routier et marin qui s’accroît dans cette période.

Comme montre la figure IV.3 quelques sources de pollution à proximité de la zone d’étude participent à la pollution de l’air. Il s’agit de la carrière, le port d’Alger et le trafic routier dense.

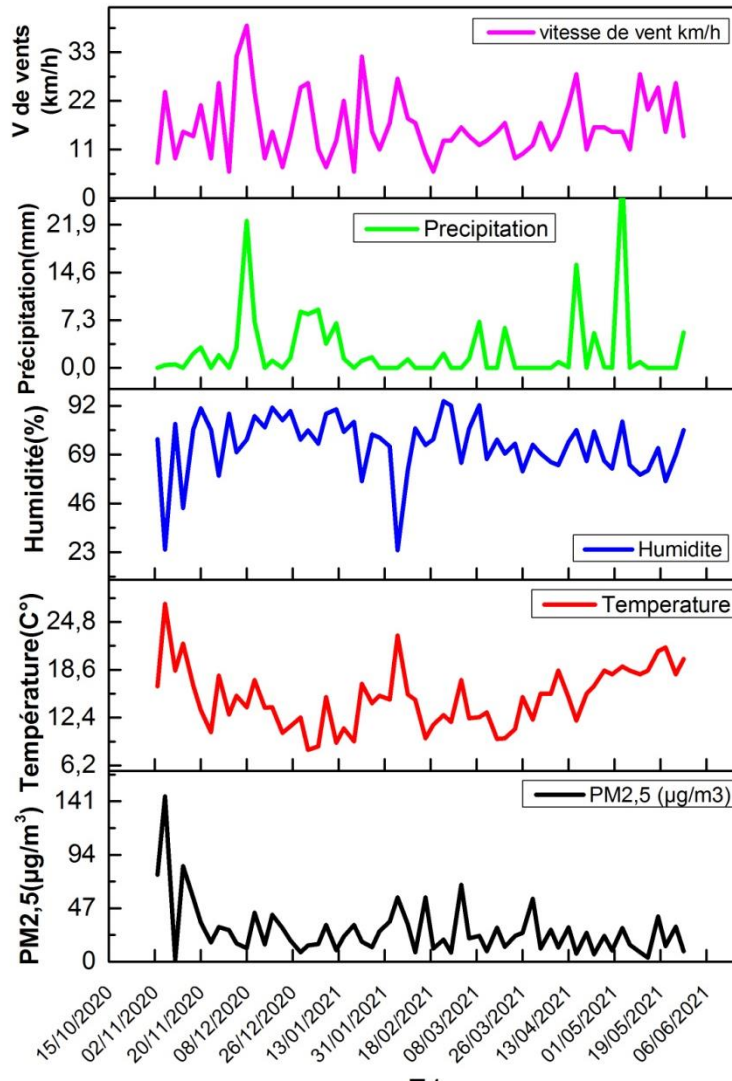


**Figure IV.3** Cartographie de quelques sources de pollution par rapport à la zone de mesure.

### 3. Influence des facteurs météorologiques

Plusieurs facteurs météorologiques influencent la dispersion et l'accumulation des polluants dans l'atmosphère, il existe un fort facteur saisonnier dans les variables météorologiques pour normaliser les niveaux de qualité de l'air.

Les données météorologiques journalières ont été fournies par la station météo de DAR El-Beida Alger Algérie. Parmi celles-ci, ont été retenues les moyennes journalières : de la température (en degré Celsius), de l'humidité relative (en pourcentage de vapeur d'eau), de précipitation (en millimètres) et de la vitesse de vent (en kilomètre par heure).



**Figure IV.4** Evolution temporelle des variables météorologiques et des concentrations de PM<sub>2,5</sub> pendant la période de prélèvement.

La figure IV.4 représente une variabilité quotidienne des concentrations de particules PM<sub>2,5</sub>, marquée par l’influence de la température, l’humidité, la précipitation et la vitesse du vent, durant la période du 03 novembre 2020 au 28 mai 2021.

### 3.1 Influence de la température

D’après la figure IV.4 on observe une corrélation entre la température et les concentrations de PM<sub>2,5</sub>. La plus haute température est 27°C avec une concentration de PM<sub>2,5</sub> est égale à 145,40 µg/m<sup>3</sup> cette dernière caractérise l’énorme pic enregistré pour la journée de 06/11/2020, et la plus basse température est de 8°C avec une concentration de 14,23 µg/m<sup>3</sup>. On constate que la concentration en PM<sub>2,5</sub> est tributaire à la température, l’augmentation de cette dernière fait croître la pollution par la matière particulaire.

En effet, la température peut affecter la formation des particules ; ainsi, la température élevée peut favoriser la réaction photochimique. Cependant, l’augmentation de la température dans les jours suivant les pics enregistrés s’explique par la participation des particules fines au bilan radiatif sol-atmosphère.

Les particules d'aérosol jouent un rôle complexe sur le bilan radiatif de l'atmosphère. En effet, elles diffusent et absorbent une partie du rayonnement solaire, l'absorption se produisant principalement dans la partie infrarouge. Ceci entraîne une rétrodiffusion vers l'espace et un refroidissement de la planète. Par ailleurs, les particules absorbent aussi une fraction du rayonnement infrarouge, ce qui se traduit par une contribution à l'effet de serre avec réchauffement de la basse atmosphère. Les effets combinés de ces deux mécanismes dépendent des caractéristiques de l'aérosol atmosphérique mais aussi des propriétés du sol et de son coefficient de réflexion du rayonnement solaire. C'est une des raisons pour lesquelles il est difficile aujourd'hui de chiffrer avec précision les effets des particules sur le bilan radiatif de la planète. Il est généralement admis que les particules d'origine anthropique freinent l'augmentation de la température due aux gaz à effet de serre [75].

### 3.2. Influence de l'humidité

L'humidité est un paramètre qui peut avoir une influence non négligeable sur la qualité de l'air. 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 [76].

Le taux d'humidité durant la période d'étude varie entre 94% et 24%, le pourcentage minimal a été observé le 06/11/2020 où on avait le plus énorme pic, et l'humidité maximale a été noté le 23/02/2021. D'après la figure IV.4 les pics de pollution par les  $PM_{2,5}$  enregistrés durant la période d'étude sont tributaires à la diminution du pourcentage d'humidité.

Lorsque l'humidité est suffisamment élevée, les particules deviennent trop lourdes pour rester dans l'air. Il se produit alors un dépôt sec ; les particules tombent sur le sol. On constate que le taux d'humidité réduit la pollution atmosphérique et que ce facteur est important dans la variation des concentrations en matières particulaires.

### 3.3. Influence de précipitation

La période de prélèvement a connu 13 jours de pluie, la précipitation est inversement proportionnelle à la teneur en  $PM_{2,5}$ , ce qui signifie que la concentration de  $PM_{2,5}$  diminue avec l'augmentation des précipitations avec une valeur maximale de 29,6 mm.

On peut dire que la précipitation peut diminuer efficacement les concentrations massiques de  $PM_{2,5}$ . Et qu'il y a un phénomène de lessivage qui a tendance à réduire les niveaux des concentrations des polluants.

### 3.4. Influence de la vitesse du vent

L'étude des variations de la vitesse du vent en fonction des teneurs en  $PM_{2,5}$  sur la figure IV.4 nous montre que la vitesse du vent varie entre 39 km/h et 6 km/h avec une moyenne de 16 km/h. La vitesse maximale a été observé le 08/12/2020 qu'était un jour pluvieux. Les teneurs les plus basses ont été observés les jours de vent violents, bien entendu, les teneurs les plus élevées semblent être associées aux jours de vent faible.

En effet, si le vent est souvent un allié dans la dispersion des particules et des polluants, il peut provoquer l'effet inverse en déplaçant des masses d'air polluées parfois sur des centaines de kilomètres.

Nous avons donc introduit le mouvement du vent pendant les saisons des pics les plus importants pour le  $PM_{2.5}$ .

### 3.5. La rose des vents (Wind rose)

Une méthode efficace pour comprendre mieux l'effet du vent sur la pollution particulaire représenté par une figure indiquant les points cardinaux : nord, sud, est, ouest et les orientations intermédiaires, jusqu'à 32 directions. La rose des vents sert comme un outil pour afficher graphiquement la vitesse, la fréquence et la direction du vent à un endroit particulier sur une période de temps bien déterminée. La schématisation de la rose du vent est faite par la conception de plusieurs cercles dont chacun représente différente vitesse de l'air formant un diagramme [77].

Le tracé de la rose des vents est effectué juste pour les saisons (Automne, et l'Hiver) où nous avons enregistré les pics de pollution par les  $PM_{2.5}$ . Pour le diagramme de la rose des vents réalisé pour notre site du prélèvement, les données météorologiques ont été relevé de la station météo de DAR El -Beida Alger Algérie.

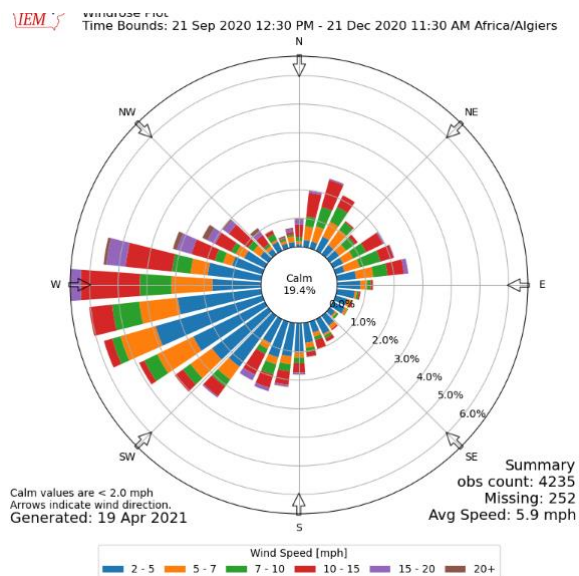
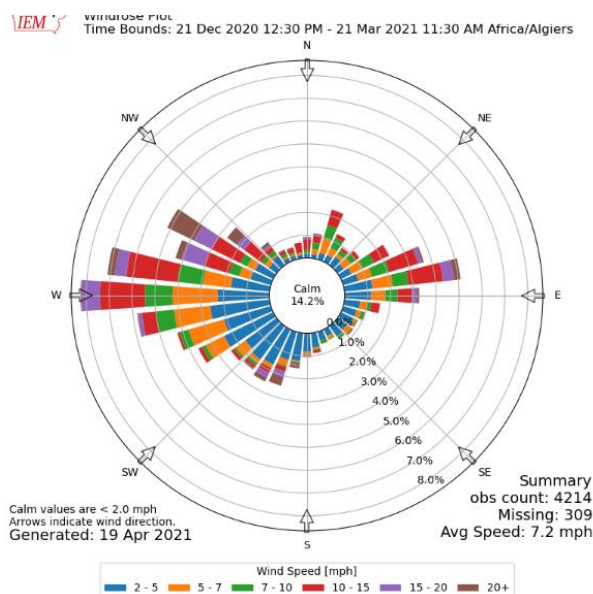


Figure IV.5 La rose des vents pour la saison de l'automne

On voit sur la figure IV.5 la rose des vents de la ville d'Alger du 21 septembre 2020 au 21 décembre 2020. Un mouvement de vent modéré avec une vitesse moyenne de 5,9 mph. Premièrement une vague modérée provenant du sud et se dirige directement vers le centre de la ville d'Alger avec une fréquence qui atteint les 6% du temps, la vitesse maximale de ce côté de vent touche les 15 mph. Une seconde vague provenant du Nord à l'Est le vent souffle à une fréquence de 2,5% avec une vitesse qui atteint les 15 mph.



**Figure IV.6.** La rose des vents de l'hiver

La rose des vents (figure IV.6), établie à partir des données de la station météo DAR-Beida Alger pour la saison d'Hiver allant du 21 décembre 2020 au 21 mars montre principalement un mouvement de vent modérer avec une vitesse moyenne de 7,2 mph.

Une vague modérée provenant du sud avec une fréquence de 8,5% sa vitesse moyenne de 15 mph. Un faible mouvement des vents provenant du Nord au Est avec une fréquence de 6% sa vitesse moyenne 20 mph.

D'après les deux roses des vents, on constate que la forte vitesse des vents est issue de l'Ouest et influe l'accumulation de la matière particulaire  $PM_{2,5}$ . Le résultat trouvé peut être vérifié par les retro-trajectoires obtenues par le modèle HYSPLIT, comme le montre la figure IV.7 Dans la présente étude, nous avons utilisé le modèle Hysplit-4 pour caractériser l'origine des masses d'air arrivant sur notre site d'étude. Les rétro-trajectoires (backward) ont été calculées pour trois altitudes de 500, 1500 et 3000 m au-dessus du niveau du sol, avec un temps de 72 h avant la date de prélèvement pour le taux des émissions des  $PM_{2,5}$  le plus élevés enregistré le 16/11/2020.



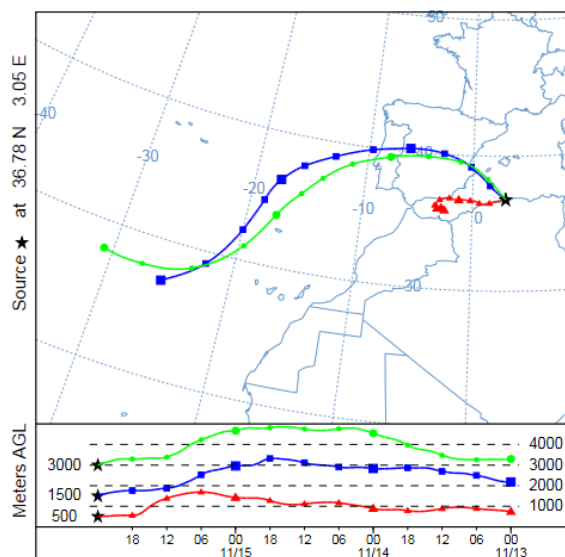


Figure IV.7 Retro-trajectoires de 16/11/2020 pendant 72 h.

#### 4. Etude des teneurs en carbone noir dans le PM<sub>2,5</sub>

Le carbone noir appartient à la grande famille des particules, groupe de nature chimique hétérogène, composé d'espèces ioniques (sels), de poussières minérales ou d'espèces carbonées [60]. Il réchauffe la terre en absorbant la lumière solaire et en chauffant l'atmosphère donc il impose un impact climatique par un effet direct en absorbant la lumière du soleil et réduisant l'albédo planétaire en suspension dans l'atmosphère (voir le chapitre 02) [61].

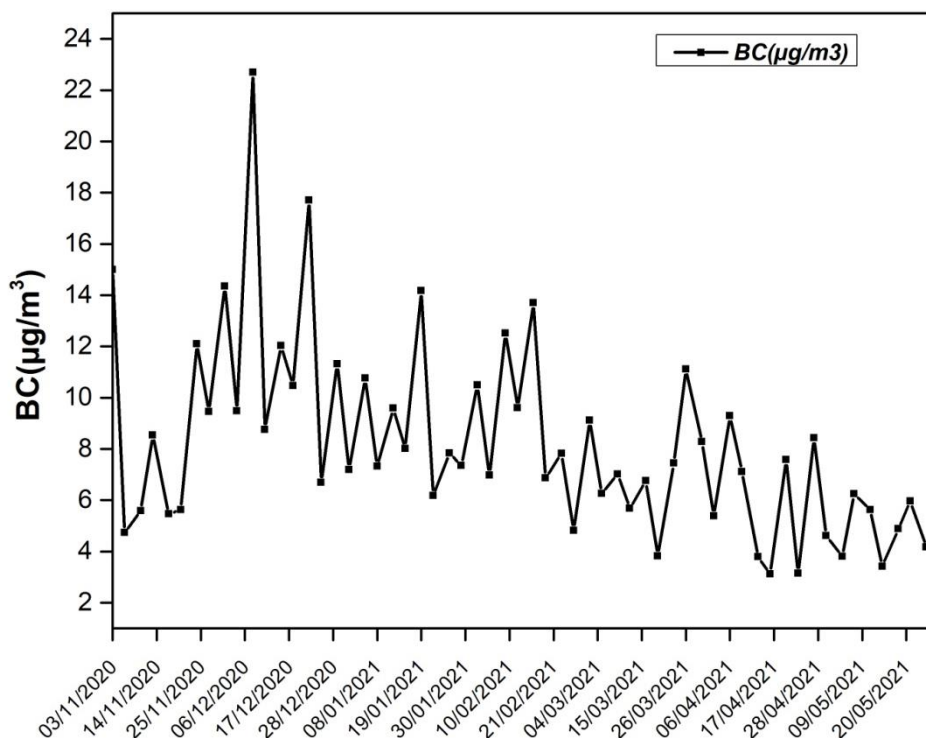


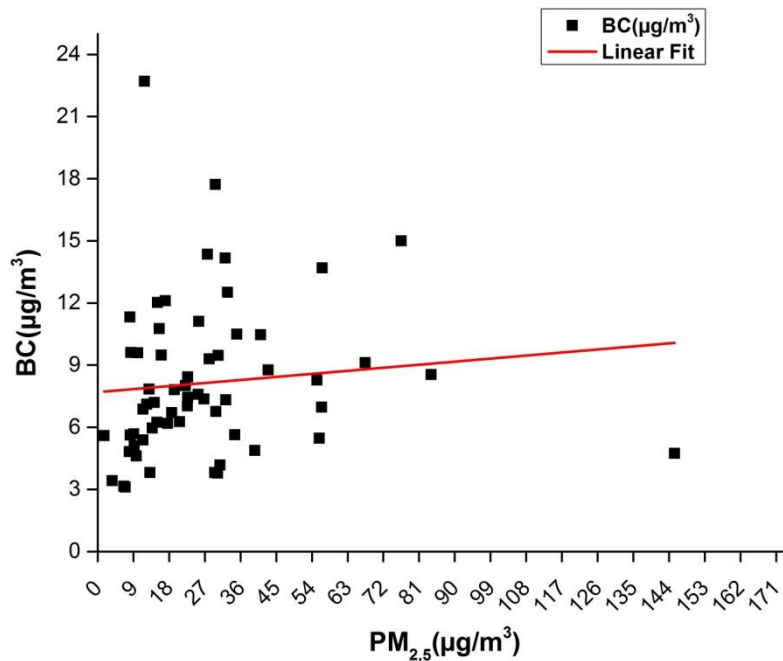
Figure IV.8 Variation de concentration du carbone noir présent dans le PM<sub>2,5</sub>

La figure IV.8 représente la variation de la concentration du carbone noir contenu dans les  $PM_{2,5}$  durant la période de prélèvement du 03/11/2020 au 28/05/2021. Elle varie entre  $22,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $3,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une moyenne de  $9,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces teneurs sont liées aux valeurs des réflectances obtenues du réflectomètre. On remarque lorsque la réflectance est élevée, la concentration du carbone noir augmente.

Le carbone noir n'a pas une valeur limite désignée par l'OMS, et à cause de ce risque important sur la santé humaine (cancer, affections cardiovasculaires, etc.) La concentration du BC doit être le plus faible possible ou nulle car il pénètre profondément dans les poumons.

**4.1. Corrélation entre le carbone noir et les  $PM_{2,5}$**

Afin de voir l'influence du BC sur les  $PM_{2,5}$  ou vice versa, nous avons trouvé outil à reporter sur la figure IV.9 la variation de BC en fonction des  $PM_{2,5}$ . Les résultats montrent qu'il n'y a pas une corrélation entre le black carbon et la matière particulaire.

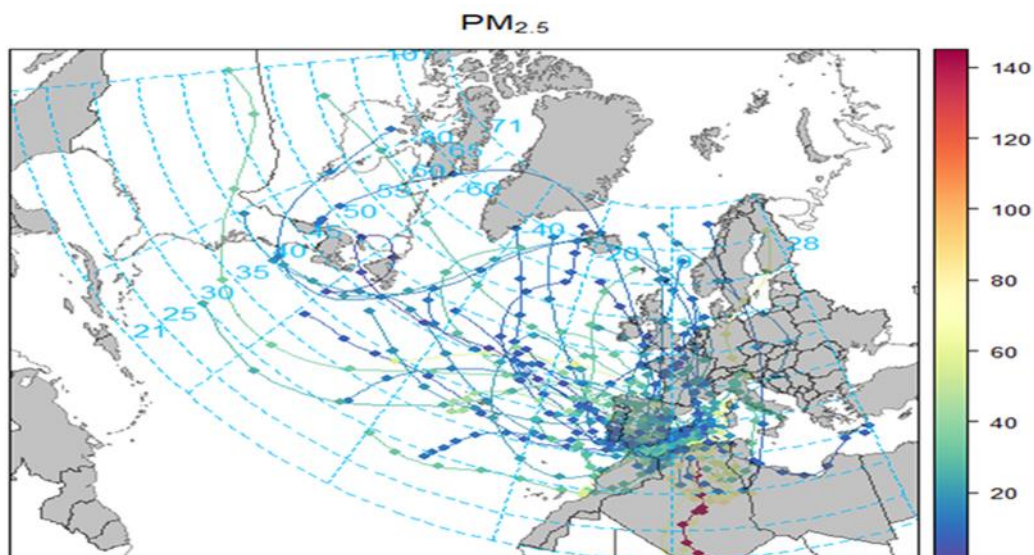


**Figure IV.9** Variation de concentration de BC en fonction des  $PM_{2,5}$ .

## 5. Détermination des sources de pollution atmosphérique

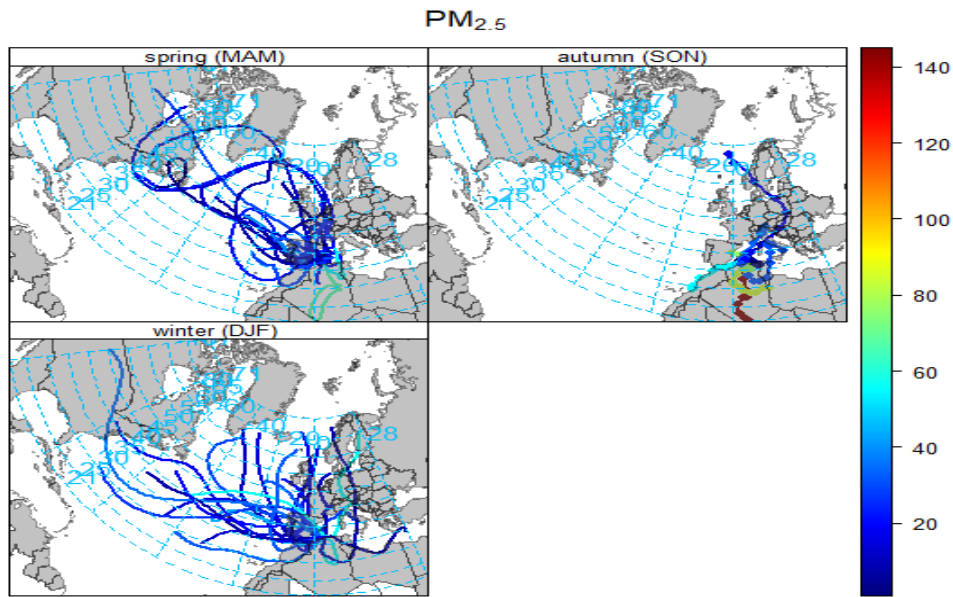
Open-air est développé pour l'analyse des données de mesure de la pollution de l'air mais qui est également d'une utilisation plus générale dans les sciences de l'atmosphère. L'ensemble comprend de nombreux outils pour importer et manipuler des données et entreprendre un large éventail d'analyses pour améliorer la compréhension des données sur la pollution atmosphérique [78].

Dans cette étude, nous avons utilisé le logiciel technique « Openair » pour lequel, nous avons collecté les données météorologiques de la station météo de « DAR El-Beida Alger, Algérie » et les trajectoires rétrogrades des masses d'air déjà collectées par le modèle Hysplite où nous avons identifié le site de prélèvement [79]. Le modèle Hysplite nous a permis d'obtenir les masses d'air chargées en particules ainsi que leur trajectoire au cours de la période d'étude du 6 novembre 2020 au 28 mai 2021.



**Figure IV.10:** retro-trajectoire des particule  $PM_{2,5}$

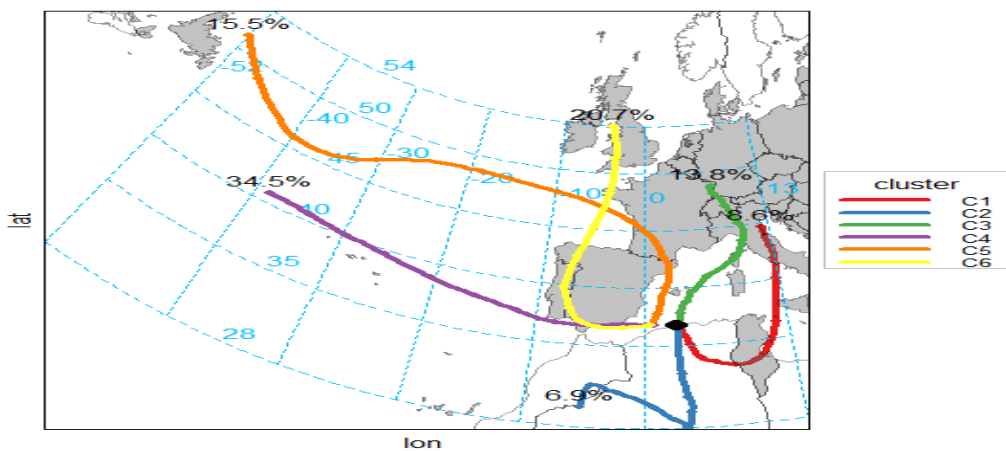
Les retros-trajectoires (figure IV.10) montrent une panoplie de sources de la matière particulaire  $PM_{2,5}$  pour la période d'étude que ce soit locale ou régionale. Pour la source locale, les masses d'air chargées de  $PM_{2,5}$  qui prennent 120 heures depuis le Sud la wilaya de Tamanrasset passant par différentes wilayas pour arriver au site d'échantillonnage du centre urbain d'Alger. Cette source est très concentrée par les  $PM_{2,5}$  et montrée dans la figure par la couleur rouge. Les autres sources participant à la pollution par les  $PM_{2,5}$  sont de différentes couleurs 04 sources différentes de 20 à 60  $\mu g/m^3$  d'un mouvement turbulent du nord et le nord-ouest, ces trajectoires nous ont venu de différentes régions du monde majoritairement de l'océan atlantique, de la mer méditerranéenne et les cote européenne 140  $\mu g/m^3$  d'un mouvement linaire venant de l'orient.



**Figure IV.11** : Répartition saisonnière et les retros-trajectoires des PM<sub>2,5</sub>

La répartition saisonnière donnée par la figure IV.11 montre un mouvement de longues trajectoires en printemps venue principalement de Nord-ouest de l’Ouest et du Sud-ouest. On voit que le mouvement des trajectoires est réduit en automne par rapport au printemps et à l’hiver mais garde toujours la même origine et direction en entreposant les résultats avec les pics de concentration des PM<sub>2,5</sub> enregistrés au site d’échantillonnage de CRNA, on constate que les épisodes de pollution enregistrés en automne sont indépendants de la pollution régionale, par conséquent on constate que le faible mouvement d’air favorise l’accroissement de la pollution par les PM<sub>2,5</sub> locale[80].

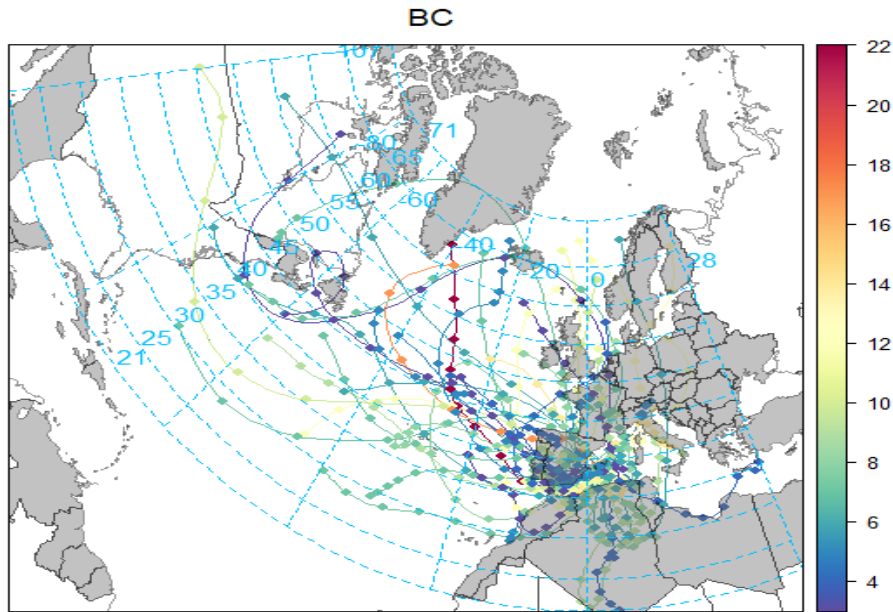
La fonction trajCluster utilisée par le logiciel open-air permet d'effectuer une analyse de cluster sur les rétro-trajectoires pour regrouper les origines de masse d'air similaires, comme la montre la figure IV.12 suivantes :



**Figure IV.12** : clusters d’air annuel (2020-2021)

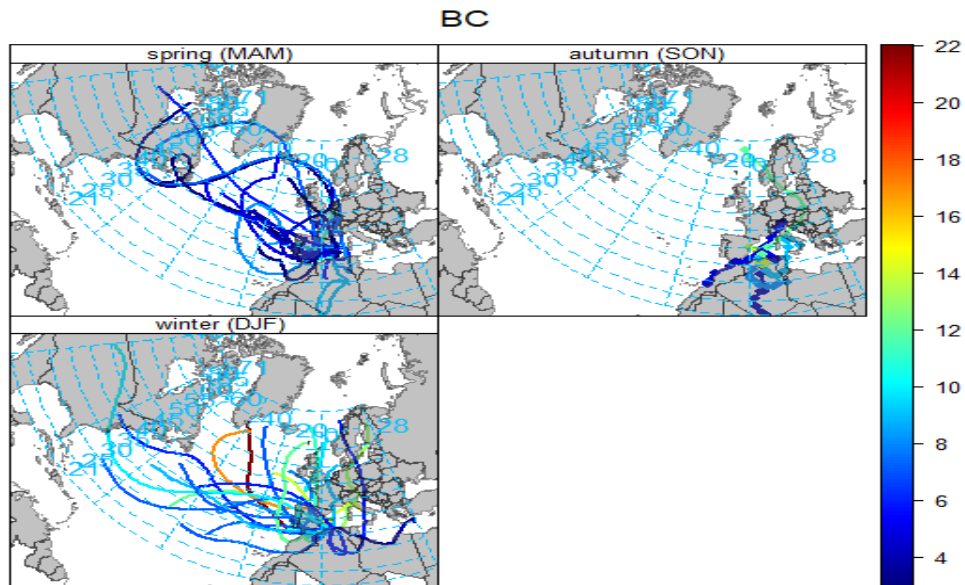
Cluster : masse d’air

L'origine des particules fines  $PM_{2.5}$  qui s'accablent dans l'atmosphère et se dirigent vers la zone de prélèvement durant la période d'étude allant du 6 novembre 2020 au 28 mai 2021 est présentée sur la figure IV.12. On observe 06 clusters qui sont répartis au tour du site du CRNA et sur une altitude de 500 m. Les clusters ont une focalisation hétérogène dont la dominante est celle représentée par la couleur mauve du côté Nord-ouest et Ouest suivis par la masse d'air représentée par la couleur jaune étendu tout au long de la mer méditerranéenne jusqu'à le Nord. Les trois autres clusters de couleur verte, bleu et rouge sont de taille moins importante provenant de quatre points du monde, du Sud avec un pourcentage de 6,9 %, Nord, Nord-ouest et Ouest est représentée par la couleur verte tandis que le cluster de couleur rouge représente celle provenant du Nord-est et l'Est.



**Figure IV.13:** Dispersion de black carbon

La figure IV.13 illustre les retros-trajectoires de la période d'étude du black carbon. Les images montrent la dispersion de la pollution de l'air par le black carbon est localisée par cinq sources avec des concentrations différentes de 4 - 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  représentée par un mouvement d'air turbulent provenant du Nord et Nord-ouest, ces masses d'air sont d'origine différent, de l'océan Atlantique, de la mer Méditerranéenne et les côtés européens. Pour la pollution locale par le BC, l'origine de cette dernière est caractérisée par les masses d'air provenant du Nord et Nord-est avec des concentrations variantes de 8 à 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et du Sud Algérien avec une concentration qui varie de 4 à 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Une autre masse d'air pollué par le BC est représentée par un mouvement linéaire provenant de l'Orient et dont la concentration en BC est comprise entre 16 et 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

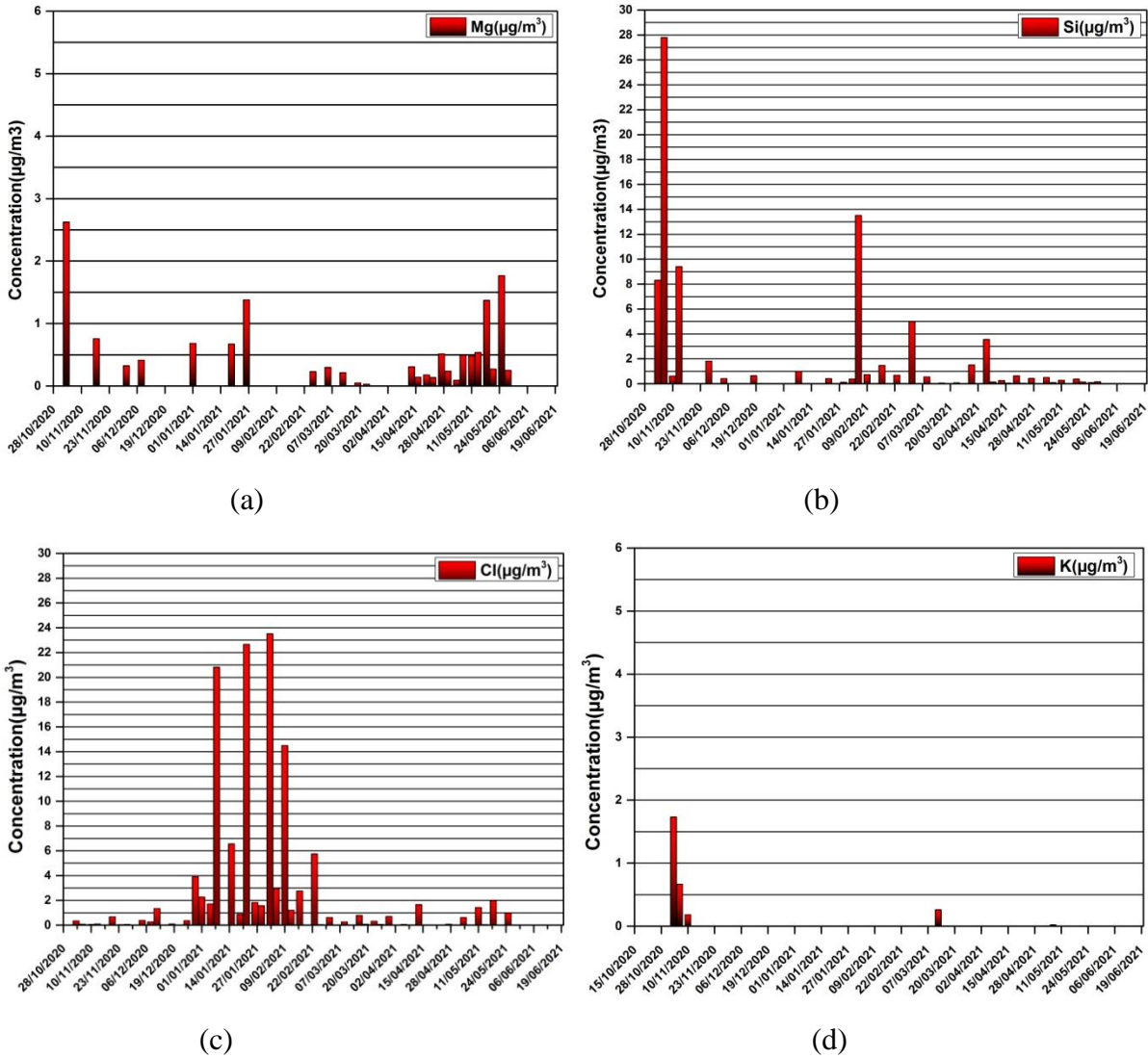


**Figure IV.14:** Répartition saisonnière des retros-trajectoires de black carbon

La figure IV.14 fait paraître la répartition saisonnière du black carbon donnée par les retros-trajectoires. Les résultats montrent un mouvement de longues trajectoires provenant principalement du Nord-ouest, de l'ouest et du Sud-ouest. Le mouvement des trajectoires est plus important en hiver qu'en automne et printemps. L'origine et la direction du vent sont les mêmes. En entreposant les résultats trouvés avec les pics de concentration de carbone noir enregistré au site d'étude du CRNA, on constate que les épisodes de pollution locale enregistrés en automne sont indépendants de la pollution régionale, par conséquent on constate que le faible mouvement d'air favorise l'accroissement de la pollution locale par le carbone noir.

### 6. Etude des teneurs en métaux lourds dans l'air

L'analyse qualitative des échantillons de PM<sub>2,5</sub> effectuée par la technique ED-XRF a révélé la présence de 22 éléments Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr et Pb. Toutefois, nous avons quantifié que cette série d'éléments Mg, Si, Cl, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn. Les intensités des autres éléments sont inférieurs de la limite de quantification. La variation des concentrations de chaque métal contenu dans la matière particulaire PM<sub>2,5</sub> est illustrée dans les figures ci-dessous :



**Figure IV.15 :** Evolution des concentrations du (Mg, Si, Cl et K) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Magnésium, (b) teneurs en Silicium, (c) teneurs en Chlore, (d) teneurs en potassium.

La figure IV.15 présente :

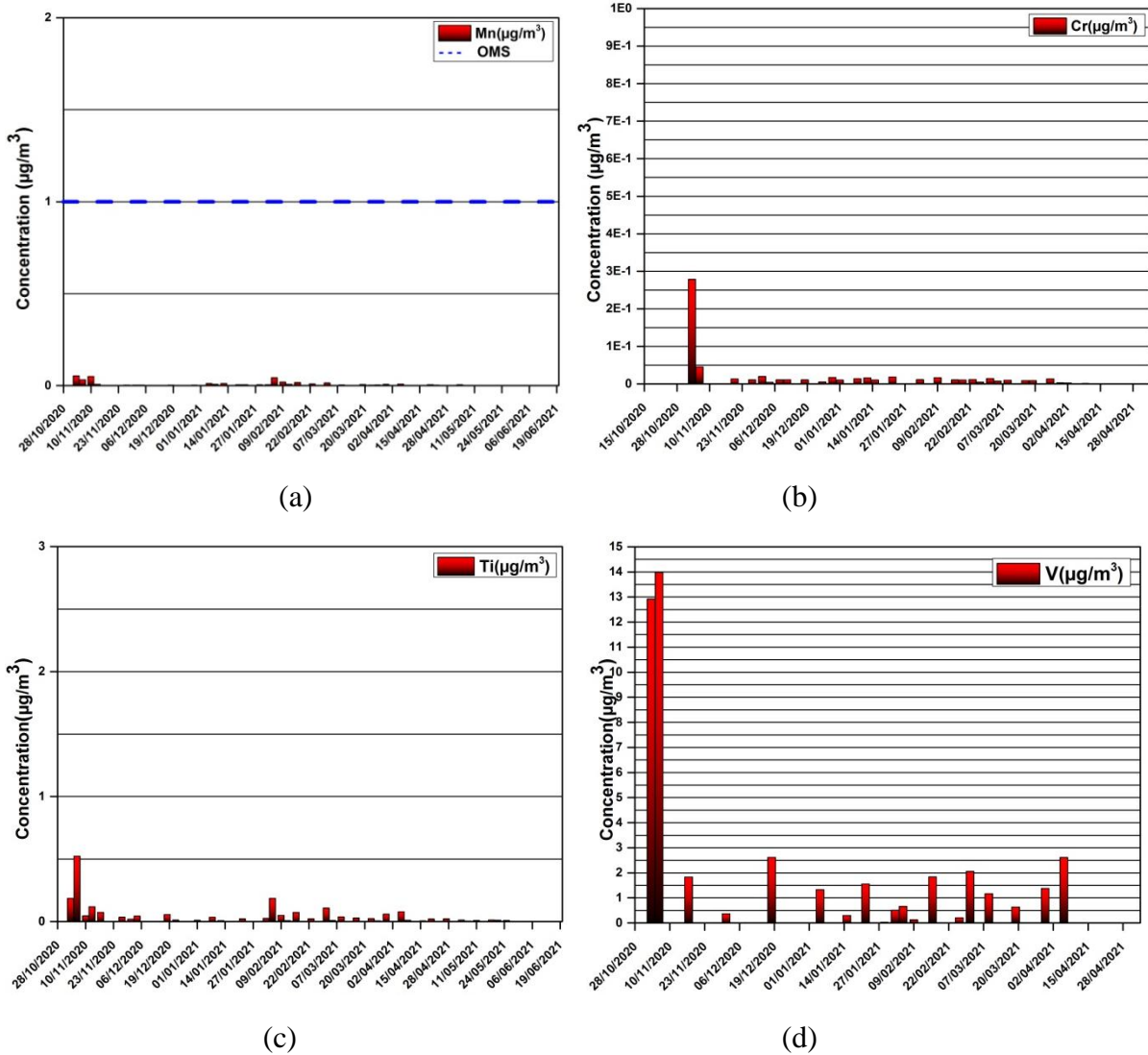
(a) Le magnésium a été détecté dans la majorité des filtres analysés en fraction PM<sub>2,5</sub>. Les teneurs en magnésium sont faibles, elles varient de 0,02 µg/m<sup>3</sup> à 2,62 µg/m<sup>3</sup>. La principale source de cet élément est la croûte terrestre.

(b) Les teneurs en silicium varient entre 0,003 µg/m<sup>3</sup> et 27,7.10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup>. La présence de silicium dans l'air s'explique par la proximité du site d'étude de la cimenterie de Beb El-

Oued. Son existence est principalement liée aux lubrifiants, plaquette de freins et les moteurs des véhicules [81].

(c) Les concentrations en chlore varient de  $0,002 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les émissions du chlore peuvent provenir de l'industrie manufacturière (industrie pharmaceutique, industrie alimentaire, fabrication de meubles, industrie automobile, etc.).

(d) Le Potassium a été détecté juste dans cinq filtres avec des très faibles concentrations. La présence de ce métal dans l'air s'explique par la proximité du site d'étude de la mer.



**Figure IV.16** Evolution des concentrations du (Cr, Mn, Ti et V) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Chrome, (b) teneurs en Manganèse, (c) teneurs en Titanium, (d) teneurs en Vanadium.

Figure IV.16 représente :

(a) Les concentrations du chrome varient dans l'intervalle de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces valeurs sont sensiblement élevées mais l'absence de norme de ce métal nous empêche d'évaluer les niveaux de pollution. 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

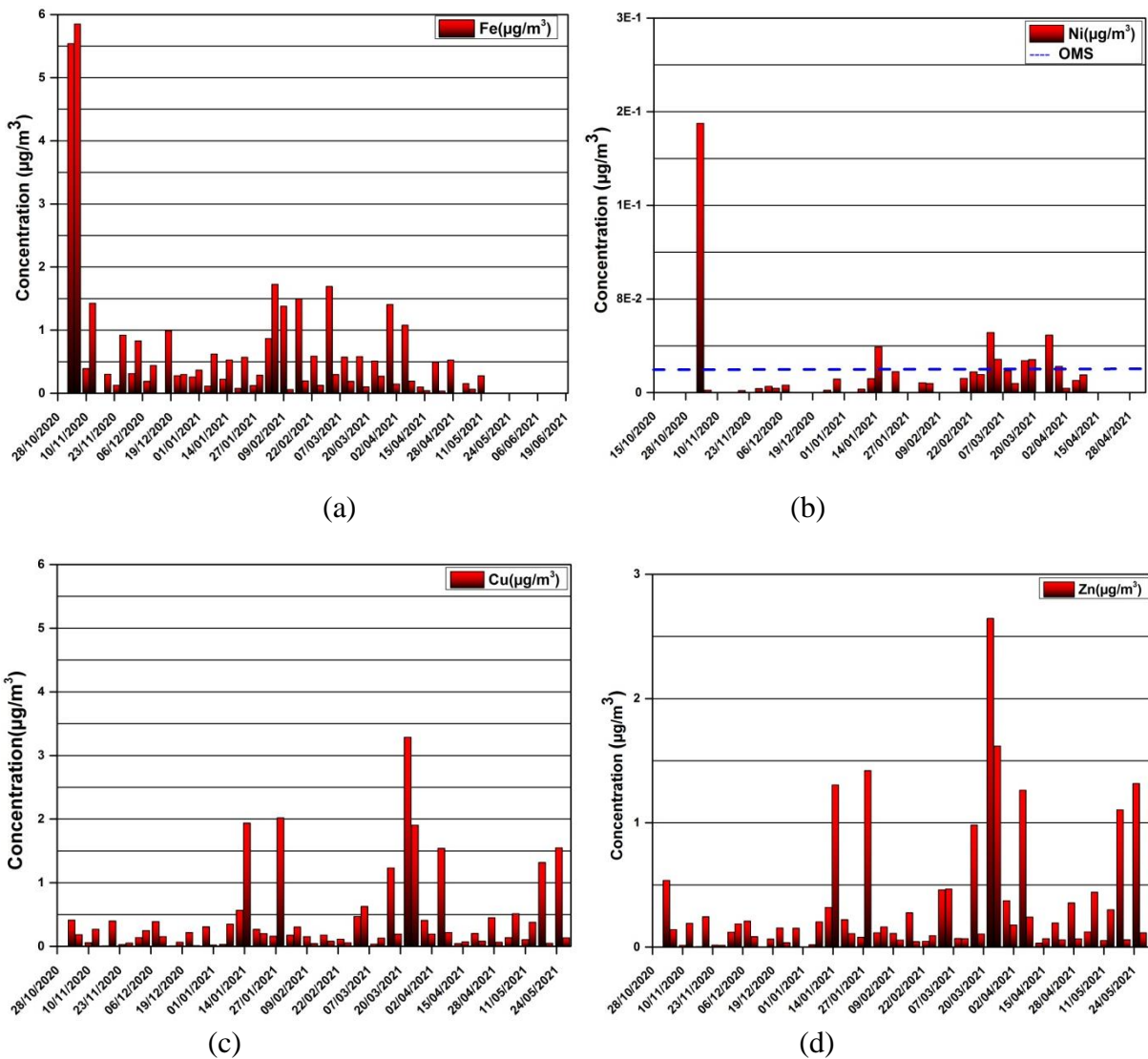


Chrome devient très toxique et portera sans doute atteinte à la santé humaine et les êtres vivants.

(b) Les teneurs en manganèse varient entre  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le manganèse a une valeur limite recommandée par l’OMS ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), on observe que les concentrations ne dépassent pas cette valeur. La présence de cet élément dans l’air peut être due probablement au trafic routier.

(c) Les concentrations de titanium varient dans l’intervalle de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $0,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il appartient aux éléments présents dans les alliages, appliqués dans la production de moteurs d’avions.

(d) Les teneurs en vanadium varient de  $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $13,9 \cdot 10^{-8} \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La valeur maximale a été observée le 06/11/2020, le jour qu’on avait le plus énorme pic de pollution. On peut dire que les effluents des usines sont la source la plus importante de vanadium.



**Figure IV.17** Evolution des concentrations du (Fe, Ni, Cu et Zn) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Fer, (b) teneurs en Nickel, (c) teneurs en Cuivre, (d) teneurs en

Zinc.

La figure IV.17 représente :

(a) Les teneurs en fer changent dans une gamme de  $0,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $5,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la valeur maximale a été observée le 06/11/2020 où on avait enregistré le plus énorme pic. La présence de ce métal dans l'air est principalement due aux émissions provenant de l'industrie du fer et de l'acier ou les incinérateurs des déchets ainsi que l'abrasion des freins des véhicules et proximité du site d'échantillonnage au station ferroviaire.

(b) Les teneurs du nickel varient de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces valeurs montrent un niveau élevé de concentrations qui dépassent la valeur limite de l'OMS ( $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Le nickel est caractérisé y à la pollution due aux moteurs diesel. Donc on peut dire que l'intensité du trafic urbain sur le site d'échantillonnage est la principale source.

(c) Les concentrations de cuivre présentent dans les  $\text{PM}_{2,5}$  varient de  $0,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $3,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La présence de ce métal dans l'air dans la majorité des échantillons en  $\text{PM}_{2,5}$  s'explique par les conditions météorologiques et la proximité des sources d'émission.

(d) Les concentrations de zinc détectés dans les  $\text{PM}_{2,5}$  varient de  $3,32 \cdot 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $2,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , On ne peut pas dire que ces teneurs sont élevées ou non puisque malgré son effet toxique, il n'existe aucune norme spécifique pour cet élément afin de juger de sa limite et de sa présence dans l'air.

Les analyses des métaux lourds présentés dans les matières particulaires nous a permis de déduire quelques sources importantes tels que les émissions des véhicules (rejets d'échappement, de batteries, de gènes-alliage, de pneus, plaquettes de freins, disques d'embrayages, etc. ...), les embruns marins et l'industrie.

La présence ou l'absence de pluie, la vitesse du vent et l'humidité contrôlent la teneur en métaux lourds dans l'air. Les concentrations d'éléments tels que le nickel dépassent généralement les normes de l'OMS, ces concentrations doivent être surveillées au fil du temps car ils peuvent avoir des effets chroniques sur la santé humaine.

Les oligo-éléments tels que le fer, le zinc et le chrome sont essentiels au métabolisme des organismes. Toutefois, ils peuvent devenir toxiques en quantités importantes pour le corps et s'y accumuler.



# **CONCLUSION GENERALE**

La pollution de l'air ambiant extérieur dépend des sources d'émission locales mais aussi de la diffusion et du transport des polluants, conduisant à une distribution très irrégulière de ceux-ci. La pollution de l'air constitue aujourd'hui un problème environnemental très complexe à l'échelle locale et planétaire. En effet, la quantification de la pollution atmosphérique est possible par la matière particulaire PM<sub>2,5</sub> où les polluants atmosphériques émis de diverses sources (trafic routier, industries, etc..).

La pollution de l'air par la matière particulaire de fraction fine PM<sub>2,5</sub> 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. L'objectif de notre étude menée au centre de recherche nucléaire d'Alger qui se caractérise par un trafic routier dense est de connaître le niveau de pollution par la matière particulaire PM<sub>2,5</sub>, d'identifier certains facteurs qui l'influencent notamment la météorologie, d'évaluer ainsi le niveau du carbone noir contenu dans les particules, de déterminer les sources de pollution à l'échelle local et régional, et enfin d'évaluer le taux de métaux lourds (Pb, Fe, Mn, Zn, Cd, Br, Cu...) existants dans les particules de PM<sub>2,5</sub>. Cette étude repose également sur l'analyse des filtres en utilisant les deux techniques telles que : la fluorescence des rayons X « ED-XRF » pour le dosage quantitatif des métaux lourds et l'appareil de réflectomètre pour les tâches de fumée de black carbon.

La pollution atmosphérique par la matière particulaire atteint des niveaux inquiétants pendant la période d'étude et les résultats montrent que les teneurs sont très élevées comparativement aux normes. La concentration de PM<sub>2,5</sub> varie entre 3,66 et 145,40 µg/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 27,30 µg/m<sup>3</sup>. Nous avons enregistré plusieurs pics dépassant la valeur guide recommandée par l'OMS (25 µg/m<sup>3</sup>). Le principal pic avec une concentration de 145,40 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub> pour la date de 06/11/2020 et un autre avec une concentration de 84,01 µg/m<sup>3</sup> qui a marqué la journée de 13/11/2020 et sept autres pics de pollution par les PM<sub>2,5</sub> répartis dans les trois saisons : deux pics en automne ; trois pics en hiver et deux pics en printemps. La pollution par le black carbon contenu dans les PM<sub>2,5</sub> pendant la période d'étude varie entre 22,70 µg/m<sup>3</sup> et 3,11 µg/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 9,22 µg/m<sup>3</sup>, ces teneurs en BC indiquant l'effet du trafic routier intense. Le carbone noir n'a pas une valeur limite désignée par l'OMS, et à cause de ces effets néfastes pour la santé humaine, la concentration en BC doit être la plus faible possible.

L'analyse des filtres par la technique d'analyse (ED-XRF) a révélé la présence des métaux lourds tels que : Mg, Si, Cl, K, Cr, Mn, Ti, V, Fe, Ni, Cu et Zn. Les résultats obtenus ont été comparés aux normes préconisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Toutes les concentrations obtenues sont au-dessous des valeurs fixées par OMS, sauf le Ni qui dépasse la norme de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces concentrations montrent que l'air respiré au niveau d'Alger centre est pollué par le Ni.

Les quatre éléments Zn, Cu et le Fe sont détectés dans tous les filtres, avec des valeurs importantes donc ce sont des éléments majeurs.

Les oligo-éléments tels que Fe, Zn et Cr sont essentiels au métabolisme des organismes. Toutefois, ils peuvent devenir toxiques en quantités importantes pour le corps et s'y accumuler.

Il est important de recueillir les données climatiques enregistrées dans la zone d'étude pendant la période d'échantillonnage car elles jouent un rôle efficace dans les concentrations variables de polluants atmosphériques. Comme les fluctuations météorologiques affectent les changements dans les charges de particules  $\text{PM}_{2,5}$ , on a constaté que la température peut affecter la formation des particules. Les températures plus élevées ont une influence sur l'activation des réactions photochimiques. La matière particulaire  $\text{PM}_{2,5}$  provoque une augmentation de la température car elle participe au bilan radiatif terrestre par l'absorbance des rayons solaire. Cette propriété revient à l'existence du carbone noir parmi les composés des  $\text{PM}_{2,5}$ . Ainsi que l'influence de la vitesse du vent a un double effet, une faible vitesse provoque une accumulation et une vitesse du vent élevée peut affecter la dispersion des polluants, par contre, les précipitations et l'humidité peuvent réduire efficacement les concentrations massiques de  $\text{PM}_{2,5}$ .

Pour identifier les sources de pollution à l'échelle locale et régionale et leur origine, l'analyse des rétros-trajectoires par le modèle Hysplit de la masse d'air responsable des plus fortes concentrations des  $\text{PM}_{2,5}$  enregistrées durant la campagne de prélèvement a été effectuée. Les résultats ont révélé que l'émission à l'échelle locale provoque seule une énorme source de pollution par les  $\text{PM}_{2,5}$ , l'émission à l'échelle régionale n'est pas négligeable d'où la détection de quatre sources de pollution.

Le programme Open-air nous a permis de déceler que la répartition saisonnière de PM<sub>2,5</sub> est hétérogène et qu'il y a plus de pollutions en hiver et en automne qu'en printemps, cela revient au taux de l'activité humaine et aux paramètres météorologique favorable.

Les résultats trouvés provoquent un risque pour la santé humaine et l'environnement d'où l'urgence d'agir devient nécessaire et des mesures doivent être pris pour réduire les niveaux de pollution par les particules fines. Afin d'améliorer graduellement la situation, nous proposons quelques perspectives :

- ✓ Faire des études et des mesures de la qualité de l'air dans différentes zones polluées à différentes périodes de l'année pour cumuler des informations complètes sur l'évolution de la pollution de l'air en Algérie.
- ✓ Eviter l'utilisation des essences plombées et encourager l'usage du GPL, moins polluant.
- ✓ Procéder à une approche pour alerter le publique sur la qualité de l'air et aux dépassements des limites réglementaires.
- ✓ Exiger à l'industrie l'intégration des filtres de tamisage au niveau des cheminées de leurs rejets.
- ✓ Interdire la construction d'incinérateurs dans les zones urbaines.
- ✓ Taxer les pollueurs.
- ✓ Veiller à ce que les normes algériennes en matière de qualité de l'air soient respectées.



**Liste des références  
bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] RAHAL, F. (2015). *Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique, le cas de la région d'Alger*. Université Mohamed Boudiaf Oran.
- [2] BOUTONNET, F. (2003-2004). *Etude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre*.
- [3] *Formation, structure et composition de l'atmosphère, Fédération française de la montagne et l'escalade*. (2000).
- [4] ZAIMI, R. (2018-2019). *Evaluation de la qualité de l'air par les particules fines  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  et les métaux lourds associés au niveau du centre urbain CPMC-CHU Mustapha, Mémoire de master*, Université Saad Dahleb Blida.
- [5] YAHIAOUI, F. (2010). *Etude de la pollution atmosphérique par fraction des matières particulaires  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  dans le site d'Alger centre*. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes.
- [6] GUEZOUL, M. (2011). *Détermination des paramètres caractéristiques de la turbidité de l'atmosphère  $\alpha$  et  $\beta$  d'ÅNGSTRÖM en utilisant les modèles de transfert radiatifs*. Université Mentouri, Constantine.
- [7] ALICE FANNY. (2000). *L'atmosphère terrestre*.
- [8] MASCLET, P. (2005). *Pollution atmosphérique, cause, solution, perspective*.
- [9] ELICHEGARY, C. (2008). *La pollution de l'air : source effets, prévention*. Edition DUNOD, pp 1-40.
- [10] OUCHER, N. (2011). *Les polluants indicateurs de pollution atmosphérique et leurs techniques de prélèvements dans l'air ambiant*. Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, N° 21 2011. Alger
- [11] MATEI, B. (1974). *Pollution et protection de l'atmosphère*. Édition Eyrolles Paris 1974, p57-58.
- [12] *Le chauffage résidentiel au bois –Sommaire des résultats obtenus de 1999 à 2002*. (2005).
- [13] AOUDIA, M. T. (2004). *Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement RNE* (2003).
- [14] BOUACIDE, Z. *Contribution à l'évaluation de la pollution atmosphérique dans le grand Alger*. Thèse ENP
- [15] KERCHICH, Y. (2003). *Evaluation de la pollution de l'air par les particules fines  $PM_{10}$  et métaux lourds*. Thèse de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.



- [16] BADJ, S. (2005). *Evaluation de pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger*. Thèse ENP.
- [17] HACEN, S. HADDADI, A, (2008-2009). *Evaluation de pollution atmosphérique par les métaux lourds dans deux sites urbains d'Alger : Bab El Oued et sidi M'hamed, mémoire de master*, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouezou.
- [18] RAMADE, F. (1992). *Précis d'écotoxicologie*. Edition MASSON, p22
- [19] *Pics de pollution en Region Wallonne*. (2008).
- [20] LEHOUT, R. (2017). *Evaluation de la pollution de l'air outdoor au niveau du site d'Alger Centre*. Université Houari Boumediene, Alger
- [21] BELAIDI, S., & BENSID, M. (2017). *Contrôle de l'air par analyse des particules en suspension et les bioindicateurs au niveau de la forêt de Bâinem*. Université Houari Boumediene, Alger.
- [22] BOURAHILA, M., & REBIA, Y. (2006/2007). *Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules en suspension dans la ville de tizi Ouezou*.
- [23] LEFEVRE, R., & AUSSET, P. (2001). *Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti : la pierre et le verre*.
- [24] WEXLER, H. *Météorologie et pollution de l'air*. Retrieved from <https://www.atmosud.org/article/lair-et-la-meteo>.
- [25] ZENATA, K. (2008). *La pollution urbaine dans la wilaya d'Oran*. Université d'Oran.
- [26] LOUADAH, H. (2016). *Mesure et estimation de la pollution d'origine automobile dans la ville de Bejaia*. Université A. MIRA –Bejaia.
- [27] NGO, C & REGERT, A. (2004). *Déchets et pollution (impact sur l'environnement et sante)*. Edition DUNOD, p82.
- [28] TASSIN, B & THEVENOT, D. *Pluie et l'environnement*, p25.
- [29] FRED PEARCE. (2008). *Le réchauffement climatique une nouvelle ère sur terre*. Edition 2008 p25-34.
- [30] DUCROUX, R. & JEAN, P. (2004). *L'effet de serre*. Edition 2004, P14-25.
- [31] *Effets sur la santé de la pollution de l'air en milieu urbain*. (2019). Retrieved from [https://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/health\\_impacts/fr/](https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/fr/).
- [32] *Les conséquences de la pollution de l'air*. (2019). Retrieved from <https://www.ompe.org/les-consequences-de-la-pollution-de-lair/>.
- [33] ALLAIN, Y. M., ROCHE, N., & HUCHON, G. (2010). *Pollution atmosphérique, facteur de risque des BPCO*.

- [34] GACIA, J. & COLOSIO, T. (2001). *Les indices de qualité de l'air (usages et comparaison internationales)*. Edition 2001, p1, p31-32
- [35] Directive Européenne (Ref.2008/50/CE) du 21 mai 2008.
- [36] BOULABRAOUAT. F., & AKACHA. L. (2007). *Analyse des métaux lourds par SAA et XRF en milieu atmosphérique urbain : cas de Bab El Oued et Tizou-Ouzou*. Thèse de doctorat 2007
- [37] BERKOUKI, N. (2009). *Caractérisation de la pollution de l'air par les particules fines et des métaux lourds associés, en milieu urbain à Alger centre*. Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger. Thèse de doctorat.
- [38] RASOAZANANY ELISE, O ANDRIAMAHENINA NJAKA, N HARINOELY, MANOVANTSOATSIFERANA RAVOSON HERINIRINA, N RANDRIAMANIVO LUCIENNE, V., & ANDRIAMBOLOLONA, RAOELINA RAMAHERISON, H. (2008). *Microparticules et santé humaine : matières particulaires, éléments-traces métalliques et carbone noir dans les aérosols prélevés à Andravoahangy-Antananarivo, Madagascar*. Retrieved from [instn@moov.mg](mailto:instn@moov.mg).
- [39] EUGENE KIM, PHILIP K. HOPKE. (2006). *Characterization of fine particle sources in the Great Smoky Mountains area*. Science of the Total Environment, Vol 368, p 81-794
- [40] *La qualité de l'air en France « bilan et perspective » 1996-2000*.
- [41] BETROUNI, Y. (2010). *Pollution de l'air par les particules fines en milieu urbain à Bouzareah Alger*. Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger
- [42] SCHMAUS, A. (1920). *Die Chemie des Nobels, der Wolken und des Regens, Die Umschau*.
- [43] CHANG, O. M. C., & ENGLAND, G. C. (2005). *Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems*.
- [44] COURT, M. (2007). *Les particules fines, aussi visibles que dangereuses* (le Figaro).
- [45] DONALDSON, K., & STONE, V. (2003). *Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles*.
- [46] SCHAUMANN, F., BORM, P., HERBRICH, A., KNOCH, J., PITZ, M., SCHINS, R., & KRUG, N. (2004). *Metal-rich ambient particles (particulate matter 2,5) cause airway inflammation in healthy subjects*. Journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology, 01 Nov 2006, 36(11):1469-1479
- [47] RAHMANI, Y., & MOUADA, A. (2015). *Evaluation de la pollution de l'air indoor dans une salle de travail au niveau de l'hôpital universitaire de Beni messous (C.H.U Beni messous)*. Mémoire de master, Université BOUGARA Mohamed, Boumerdes.

- [48] BLANCHARAD, O., DEL GRATTA, F., DURIF, M., FREJAFON, E., & LE BIHAN, O. (2004). *Exposition par inhalation aux aérosols : Principes et méthodes de mesures.*
- [49] CITEPA, S. (2001). *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques En France – Séries sectorielles et analyses étendues.*
- [50] BORM, P., ROBBINS, D., HAUBOLD, S., KUHLBUSCH, T., FISSAN, H., DONALDSON, K., SCHINS, R., STONE, V., KREYLING, W., LADEMANN, J., & OBERDORSTER. (2006). *The potential risks of nanomaterials: a review carried out for ECETOC*
- [51] NEMMAR, A., HOET, P.H., DINSDALE, D., VERMYLEN, J. (2003). *Diesel experimental peripheral thrombosis.* Circulation.
- [52] Fiche détaillée BPCO.[http://sante.annuaire4you.com/site-BPCO-bronchopneumopathie-chronique-obstructive-capital-souffle\\_228\\_5202](http://sante.annuaire4you.com/site-BPCO-bronchopneumopathie-chronique-obstructive-capital-souffle_228_5202)
- [53] Mesure de PM<sub>2,5</sub> sur l'agglomération de CHAMBERY L'Air de L'Ain et des Pays de Savoie 430, Rue de Belle Eau - Z.I des Landiers Nord – 73000 CHAMBERY. (2008).
- [54] Ontario : *Particules en suspension, Qualité de l'air*, Ministère de l'Environnement et de l'Energie, Canada, (2000).
- [55] MAGDELAINE, C. (2001-2002). *Les particules de diamètre supérieures 2,5 microns, Les particules atmosphériques.*
- [56] IMRE, S., MAENHAUT, W., ZEMPLÉN-PAPP, E., & ZARAY, G. (2001). *Comprehensive characterization of atmospheric aerosols in Budapest, Hungary: physicochemical properties of inorganic species.* Atmospheric Environment N° 35, p4367-4378.
- [57] ELICHEGARY, C. (1990). *Aérosols et visibilité, Aérosols et climat, pollution Atmosphérique*, janvier-Mars, pp.7-9.
- [58] FIALA, J. (2000). *Qualité de l'air en milieu urbain*, Naturopa, N°94, p10.
- [59] MILLER, K., SISCOVICK, D., SHEPPARD, L., SHEPHERD, K., SULLIVAN, J., ANDERSON, G., & AL. (2007). *Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women.* New England Journal of Medicine, 356(5), p447–458.
- [60] AIRPARIF. (2014). *Le carbone suie : enjeu présent et futur.* Airparif actu
- [61] ANENBERG, S., SCHWARTZ, J., SHINDELL, D., AMANN, M., FALUVEGI, G., KLIMONT, Z., & RAMANATHAN, V. (2012). *La qualité de l'air et les avantages pour la santé dans le monde de l'atténuation des changements climatiques à court terme grâce à des mesures de contrôle des émissions de méthane et de carbone noir.* Environ Health Perspect, 120 (6), p831–839.

- [62] BLIEFERT, C., & PARRAUD, R. (1997). *Chimie de l'environnement, air, eau, sol, déchet*, France 1997.
- [63] *Les métaux lourds*, Bio contact, décembre 2002.
- [64] DI BENEDETTO, M. *Méthode d'analyse et de caractérisation*. Techniques de l'ingénieur.
- [65] *Source de pollution*, le rapport CTEPA, France 2007.
- [66] GOMBERT. S & AL. (2005). *Pollution atmosphérique par les métaux*. Edition EDP Sciences, p9-13.
- [67] MARTIN, J. (1988). *Santé et pollution de l'air*. 1<sup>ère</sup> édition, Edition presses polytechniques Remandes.
- [68] ADEME (1997). *Retombés atmosphériques de métaux en France*. Edition Adame.
- [69] Manuel de l'échantillonneur LVS kleinfiltergerät KFG
- [70] *protocole de mesure du black carbone, Procédure opératoire pour la détermination de la concentration en carbone élémentaire en utilisant la méthode de réflectance (2016)*.
- [71] THIRION-MERLE, V. (2016). *Spectrométrie de fluorescence X*. Editions 2016.
- [72] Amptek Experimenter's XRF Kit. (2016).
- [73] [www.arl.noaa.gov/hysplit](http://www.arl.noaa.gov/hysplit)
- [74] AOUDIA, M. T. (2004). Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement (RNE 2003).
- [75] FONTAN, J. (2021). *Les particules polluantes de l'air : de quoi s'agit-il*, *Encyclopédie de l'Environnement*.  
<https://www.encyclopedieenvironnement.org/air/particules-polluantes-air/>.
- [76] 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.
- [77] OSCAR, P., ABRAHAM, O., ROBERT, B., NAXIELI, S., HARRY, A., KAREN, C., VALTER, B., & ALL. (2009). *Atmospheric black carbon concentrations in Mexico*, Atmospheric Research. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/atmosres](http://www.elsevier.com/locate/atmosres).
- [78] CARSLAW, D. C., & ROPKINS, K. (2012). *Openair—an R package for air quality data analysis*. Environmental Modelling & Software, 27, p52-61.
- [89] Air resources laboratory Hysplit. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- [80] LI, ZHAOXIN DAI., XIAOLI, LIU., & PENGDA, WU. (2020). Chinese academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China.
- [81] 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.

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو وصف وتقييم تلوث الغلاف الجوي بالجسيمات الدقيقة PM<sub>2.5</sub>، في موقع حضري يقع في وسط الجزائر و ذلك بأخذ العينات على مدار عام واحد (2020/2021) و باستخدام جهاز أخذ عينات الهواء من نوع LVS kleinfILTERgerät لمدة لا تقل 12 ساعة من أجل تحديد التلوث بالجسيمات والكربون الأسود على مستوى منطقة الدراسة ومن ناحية أخرى التعرف على مصادر التلوث سواء على المستوى المحلي أو الإقليمي. أظهرت النتائج أن تركيزات PM<sub>2.5</sub> تختلف على التوالي من 3.66 ميكروغرام /م<sup>3</sup> إلى 145,40 ميكروغرام / م<sup>3</sup> متجاوز بذلك المعايير التي حددتها المنظمة العالمية للصحة. بالنسبة للكربون الأسود فإن تركيزه بين يتراوح 3.11 و 22.70 ميكروغرام / م<sup>3</sup> وهذه النتيجة تشير إلى تأثير حركة المرور الكثيفة في منطقة الدراسة كما أنه تبين ان العوامل المناخية لها تأثير في تحميل الجسيمات. أظهرت الدراسة أن درجة الحرارة والرطوبة وحركة الرياح لها تأثير على جزيئات PM<sub>2.5</sub>. باستعمال نموذج Hysplit اكتشفنا وجود انتشار مركز للجسيمات على مستوى النطاق المحلي ، اما بالنسبة للنطاق الإقليمي اكتشفنا 04 مصدر للتلوث.

**الكلمات المفتاحية :** التلوث الجوي ، التلوث الحضري ، الجسيمات الدقيقة ، الجسيمات الدقيقة ، الكربون الأسود ، المعادن الثقيلة، Hysplit.

## Résumé

L'étude porte sur la caractérisation et l'évaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines PM<sub>2.5</sub>, dans un site urbain qui est localisée à l'intérieur du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, boulevard Frantz Fanon (CRNA). Les prélèvements sont effectués durant une période d'une année (2020/2021), moyennant par un échantillonneur d'air du type LVS kleinfILTERgerät avec un temps d'échantillonnage de 12 heures et ceci afin de quantifier la pollution du point de vue charge aérosol, le carbone noir et métaux lourds au niveau de la zone d'étude et d'autre part, identifier les sources de pollution à l'échelle locale et régionale. L'analyse des filtres par la technique d'analyse (ED-XRF) relève la présence des métaux lourds (Mg, Si, Cl, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn). Les résultats ont montré que les concentrations en PM<sub>2.5</sub> varient respectivement de 145,40 µg/m<sup>3</sup> et 3,66 µg/m<sup>3</sup> avec un dépassement des normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). La charge du carbone noire varie entre 22,70 µg/m<sup>3</sup> et 3,11 µg/m<sup>3</sup> indiquant l'effet du trafic routier intense. Les fluctuations météorologiques semblent agir sur la variation des charges de la matière particulaire. L'étude d'impact de quelques paramètres météorologiques ont montré que la température, l'humidité la précipitation et le mouvement du vent ont des effets pertinents sur les particules PM<sub>2.5</sub>. Le modèle hybride de trajectoire intégrée lagrangienne à particule unique (Hysplit) a permis de montrer la dispersion à l'échelle locale provoquant seule une énorme pollution, l'impact de cette dernière à l'échelle régionale n'est pas négligeable d'où nous avons détecté 04 source de pollution régionale.

**Mots-clefs :** pollution atmosphérique, pollution urbaine, aérosol, particules fines, particules fines, carbone noir, métaux lourds, Hysplit.

## Abstract

The objective of this study relates to the characterization and assessment of air pollution by fine particles PM<sub>2.5</sub>, in an urban site which is located in Algiers. Samples are taken over a period of one year (2020/2021), using an air sampler calling type LVS kleinfILTERgerät and with a sampling time of 12 hours, in order to quantify the pollution by the particulate matter and black carbon in the study area. In the other hand, identifying the sources of pollution at the local and regional level. The results showed that the concentrations of PM<sub>2.5</sub> vary in the interval from 3.66 µg/m<sup>3</sup> and 145.40 µg/m<sup>3</sup> with an exceeding of the standards set by the World Organization of Health (WHO). The load of black carbon varies between 22.70 to 3.11 µg/m<sup>3</sup> indicating the effect of heavy road traffic. Weather fluctuations appear to affect variation in the loading of particulate matter. The impact study of some meteorological parameters has shown that temperature, humidity and wind movement have relevant effects on PM<sub>2.5</sub> particles. The Hysplit model made it possible to show the dispersion at the local scale causing only an enormous pollution. The impact of this pollution at the regional scale is not negligible from where we detected 04 sources of regional pollution.

**Keywords:** atmospheric pollution, urban pollution, aerosol, fine particles, fine particles, black carbon, heavy metals, Hysplit.

