

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences
Département de physique

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option : Physique Appliquée

Thème :

**Evaluation de la qualité de l'air par les particules fines
PM2.5 et PM10 et des métaux lourds associés au niveau du
centre urbain CPMC-CHU Mustapha**

Présenté par :

M^{lle}. ZAIMI Rimane

Soutenu le 18 / 07 / 2019 devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------|-------------|--------------|
| M ^{me} . L. BABA AHMED | Maître de conférences A | UNIV Blida1 | Présidente |
| M ^r . M. BELAMRI | Chercheur principal | CRNA | Encadreur |
| M ^{lle} . L. BOUNEMIA | Chercheur assistante | CRNA | Examinatrice |

Blida 1-2018/2019-

Remerciements

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

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur BELAMRI.M qui, en tant qu'encadreur au CRNA, nous a accueillis, pris en charge, et suivi durant toute la période de notre stage.

Aussi, nous tenons à remercier vivement :

+ Le chef du projet Mr. BELAMRI.M de nous avoir accepté de réaliser ce travail au sein de son équipe, et pour la confiance qu'il nous a accordée durant le stage.

+ M^{lle}. BOUNEMIA. L et M^{me} Sabine pour leurs disponibilité et pour leurs aides lors de la réalisation de ce travail.

+ Mr. TOUMERT de nous avoir aidé dans les analyses de l'XRF et pour les informations, et les documents qu'ils nous a donnés.

+ Mr. BOUKFOUSSA. K leur disponibilité et pour avoir pris le temps de bien étudier et examiner notre mémoire.

+ Madame L. BABA AHMED pour avoir accepté de présider le Jury ainsi, pour sa gaité et sa remarquable pédagogie.

Et enfin, merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher père ZAIMI Abdesslem, qui m'a toujours aidé et a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études et ma vie.

Ma chère mère ZITOUNI Latifa, que je ne cesse de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné. Elle a fait de moi la femme que je suis aujourd'hui.

Que Dieu les récompense pour tous ces bienfaits

Ma chère et adorable sœur Chiraz qui aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que je lui porte à elle.

*Mon cher futur mari LAAMAMRIA Nour el Islem avec mes vœux de réussite, de prospérité et de bonheur.
Je prie Dieu le tout puissant de préserver notre attachement mutuel, et d'exaucer tous nos rêves.*

Je passe aussi une sincère dédicace à ma moitié Sara et qu'à mes chères amies Chahrazed et Soundous.

Toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail, pour chacun qui m'a soutenu de près ou de loin, à tous ceux que j'ai omis de mentionner.

Rimane

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة خصائص تلوث الهواء الجزيئي الدقيق PM-2.5 و PM-10 في موقع حضري يقع في وسط الجزائر (CPMC-Mustapha Pasha-) بساحة أول ماي. تم أخذ العينات على مدار عام واحد (2017/2018)، بواسطة آلة أخذ العينات من الهواء من نوع **Gent Sampler** مع وقت جمع على مدار 24 ساعة. هذا من أجل قياس التلوث من وجهة نظر شحن الجسيمات، الكربون الأسود والمعادن الثقيلة على مستوى منطقة الدراسة. أظهرت النتائج أن تركيزات PM-2.5 تتراوح بين 4 ميكروغرام / م³ و 35 ميكروغرام / م³. PM-10 تتراوح بين 20 و 86 ميكروغرام / م³. يتراوح شحن الكربون الأسود بين 2 و 12 ميكروغرام / م³ مما يدل على تأثير حركة المرور على جودة الهواء.

كشفت تحليل المرشحات باستخدام تقنيات التحليل النووي (ED-XRF و WD-XRF و ICP) عن وجود معادن ثقيلة مثل: Cr و Ni و As و Pb و Mn و Fe و La و Zn و Mo و Sr و Al و Zr مع تركيزات تتجاوز في بعض الأحيان المعايير التي وضعتها منظمة الصحة العالمية (WHO). وأظهرت النتائج أيضاً وجود تأثير موسمي على مستويات التلوث بالجزيئات الدقيقة. تم قياس أعلى المستويات في مارس. لا يتعلق تأثير المناخ هذا فقط بـ PM-10، بل يمتد أيضاً إلى PM-2.5. أظهرت الدراسة الإحصائية أن الجسيمات التي تمت دراستها تتبع توزيعات ثنائية. تشير دراسة المعادن الثقيلة Fe و Pb و Cu و Mn إلى أن الرصاص في الأساس هو الذي يصل إلى مستويات عالية. بالجزيئات الدقيقة PM-10. توضح هذه الدراسة أنه في المناطق الحضرية، تلعب انبعاثات حركة المرور على الطرق دوراً مهماً في التلوث العالمي.

الكلمات المفتاحية: التلوث الجوي، التلوث الحضري، الجزيئات الدقيقة، PM-10، PM-2.5، المعادن الثقيلة، الرصاص.

Abstract:

This work focuses on the characterization of PM-2.5 and PM-10 fine particulate air pollution in an urban site that is located in central Algiers (CPMC-Mustapha Pasha-Place May 1). The samples were taken over one year (2017/2018), with a **Gent Sampler** type air sampler and with a 24-hour collection time. This is to quantify pollution from the point of view of aerosol load, black carbon and heavy metals at the level of the study area. The results showed that the PM-2.5 concentrations vary between 4 µg / m³ and 35 µg / m³. PM-10 varies between 20 and 86 µg / m³. The black carbon load varies between 2 and 12 µg / m³ indicating the effect of heavy road traffic.

The analysis of filters by nuclear analysis techniques (ED-XRF, WD-XRF and ICP) revealed the presence of heavy metals such as: Cr, Ni, As, Pb, Mn, Fe, La, Zn, Mo, Sr, Al, Zr with concentrations that sometimes exceed the standards set by the World Health Organization (WHO). The results also showed that there is a seasonal influence on pollution levels of fine particles. The highest levels were measured in March. This influence of the climate does not only concern PM-10, but also extends to PM-2.5.

The statistical study shows that the particles studied follow a bimodal distribution.

The study of Fe, Pb, Cu and Mn heavy metals shows that it is mainly lead that reaches high levels. This particulate lead is further concentrated in PM-10 particles. This study shows that in urban areas, road traffic emissions play an important role in global pollution.

Keywords: *Atmospheric pollution, urban pollution, fine particles, aerosols, PM-10, PM-2.5, heavy metals, lead.*

Résumé :

Ce travail porte sur la caractérisation de la pollution atmosphérique par les particules fines PM-2.5 et PM-10, dans un site urbain qui est localisé à Alger centre (CPMC-Mustapha pacha-place 1er Mai). Les prélèvements ont été effectués sur une année (2017/2018), moyennant un échantillonneur d'air de type **Gent Sampler** et avec un temps de collecte de 24 heures. Ceci afin de quantifier la pollution du point de vue charge aérosol, carbone noire et métaux lourds au niveau de la zone d'étude, Les résultats ont montré que les concentrations en PM-2.5 varient entre 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ceux des PM-10 varient entre 20 et 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La charge du carbone noire varie entre 2 et 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indiquant l'effet du trafic routier intense.

L'analyse des filtres par les techniques d'analyse nucléaires (**ED-XRF**, **WD-XRF** et **ICP**) a relevé la présence des métaux lourds tels que : Cr, Ni, As, Pb, Mn, Fe, La, Zn, Mo, Sr, Al, Zr avec des concentrations qui parfois dépassent les normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les résultats ont montré aussi qu'il existe une influence saisonnière sur les niveaux de pollution atteints par les particules fines. Les teneurs les plus élevées ont été mesurées en mois de mars. Cette influence du climat ne concerne pas uniquement les PM-10, mais s'étale également aux PM-2.5.

L'étude statistique montre que les particules étudiées suivent une distribution bimodale.

L'étude des métaux lourds Fe, Pb, Cu et Mn montre que c'est surtout le plomb qui atteint des taux élevés. Ce plomb particulaire est par ailleurs concentré dans les particules des PM-10.

Cette étude montre qu'en site urbain, les émissions du trafic routier prennent une place importante dans la pollution globale.

Mots-clefs : *Pollution atmosphérique, pollution urbaine, particules fines, aérosols, PM-10, PM-2.5, métaux lourds, plomb.*

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| Tableau I.1 : Composition de l'air sec..... | 03 |
| Tableau I.2 : Normes américaines et recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé pour les PM-10..... | 15 |
| Tableau I.3 : Normes américaines et recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé d'immission des PM-2,5..... | 16 |
| Tableau II.1 : Quelques sources d'excitation utilisées en fluorescence X..... | 34 |
| Tableau III.1 : Les charges des PM-2,5 au niveau du CPMC-Mustapha Pacha..... | 48 |
| Tableau III.2 : Les charges des PM-10 au niveau du CPMC-Mustapha Pacha..... | 50 |
| Tableau III.3 : Résultats de comparaison des éléments identifiés..... | 66 |
| Tableau III.4 : Teneurs en métaux lourds trouvés dans les filtres de la pollution atmosphérique..... | 67 |
| Tableau III.5 : Matrice de corrélation..... | 68 |

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| Figure I.1 : Proportion actuelle des gaz atmosphériques..... | 04 |
| Figure I.2 : Schéma de la variation de l'altitude, de la température et de la pression en fonction des couches de l'atmosphère..... | 05 |
| Figure I.3 : Le cheveu humain et les particules PM2.5 et PM10..... | 09 |
| Figure I.4 : Influence de la taille sur la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire..... | 14 |
| Figure II.1 : cartographie du site d'échantillonnage au niveau du CPMC-CHU Mustapha à Alger centre (place 1er Mai) | 22 |
| Figure II.1.1 : Le support d'échantillonneur..... | 24 |
| Figure II.1.2 : L'échantillonneur Gent Sampler..... | 24 |
| Figure II.1.3 : Le dessiccateur..... | 24 |
| Figure II.1.4 : Filtre avant et après collecte..... | 24 |
| Figure II.1.5 : La cassette de l'échantillonneur Gent Sampler..... | 25 |
| Figure II.2 : la microbalance..... | 25 |
| Figure II.2.1 : Réflectomètre de fumée..... | 26 |
| Figure II.3.1 : Rayons X et autres rayonnements électromagnétiques..... | 29 |
| Figure II.3.2 : Principe de l'interaction photoélectrique..... | 30 |
| Figure II.3.3.a : L'effet photoélectrique..... | 31 |
| Figure II.3.3.b : La diffusion inélastique (effet Compton) | 32 |
| Figure II.3.3.c : La diffusion élastique (Rayleigh) | 32 |
| Figure II.3.3.d : Création de paire..... | 33 |
| Figure II.4.1 : Dispositif expérimental (Amptek Ink) | 35 |
| Figure II.4.2 : Représentation schématique de la technique d'analyse par fluorescence X (EDXRF : dispersion d'énergie) | 36 |
| Figure II.4.3 : Spectromètre complet X-123 avec Super SDD (fenêtre 25 mm ² / 500 µm, 0,5 mil Be) et un tube à rayons X (USB Mini-X) | 36 |
| Figure II.4.4 : Image de la fenêtre de détection du dispositif expérimental..... | 36 |
| Figure II.4.5 : Cette photo montre les deux collimateurs (Mini-X), le bouchon de sécurité et le capot..... | 37 |
| Figure II.5 : Schéma illustrant l'effet de l'absorption de rayon X..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| Figure II.6 : Intensité relative à l'émission X en fonction de l'épaisseur de l'échantillon..... | 40 |
| Figure II.7 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon..... | 43 |
| Figure II.8.1 : Conception de base du spectromètre WD-XRF..... | 44 |
| Figure II.8.2 : spectromètre dispersif en longueur d'onde avec optique 2D et excitation directe..... | 44 |
| Figure II.8.3 : Spectromètre dispersif en longueur d'onde..... | 45 |
| Figure II.8.4 : Séparation des longueurs d'onde par diffraction sur un cristal..... | 45 |
| Figure II.8.5 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent par la technique (WD-XRF) de l'échantillon (CPMC6) | 46 |
| Figure II.9 : Une source à plasma d'argon..... | 47 |
| Figure III.1 : Evolution des teneurs en PM-2,5 et PM-10 collectées au CPMC-Mustapha.... | 51 |
| Figure III.2 : Comparaison entre la concentration des matières particulaires et la valeur guide d'OMS : (a) pour les (PM-2.5), (b) pour les PM-10..... | 52 |
| Figure III.3: Variation de la teneur en matière particulaires et de l'humidité pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10..... | 53 |
| Figure III.4 : Variation de la teneur en matière particulaires et de la précipitation pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10..... | 54 |
| Figure III.5 : Variation de la teneur en matière particulaires et de la vitesse de vent pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10..... | 54 |
| Figure III.6 : Variation de la teneur en matière particulaires et de la température moyenne pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10..... | 55 |
| Figure III.7 : Concentrations en carbone noir dans les deux fractions particulaires pendant la période d'échantillonnage..... | 56 |
| Figure III.8 : Evolution des concentrations du (Na, Cr, Mn, Fe) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Sodium, (b) teneurs en Chrome, (c) teneurs en Manganèse, (d) teneurs en Fer..... | 57 |
| Figure III.9 : Evolution des concentrations du (Ni, Zn, Mo, Sr) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Nickel, (b) teneurs en Zinc, (c) teneurs en Molybdène, (d) teneurs en Strontium..... | 59 |
| Figure III.10: Evolution des concentrations du (As, Pb, Zr, La) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Arsenic, (b) teneurs en Plomb, (c) teneurs en Zirconium, (d) teneurs en Lanthane..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| Figure III.11: Evolution des concentrations du (Br, V, Cu, Ag) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Brome, (b) teneurs en Vanadium, (c) teneurs en Cuivre, (d) teneurs en Argent..... | 62 |
| Figure III.12 : Facteur d'enrichissement calculé pour chaque élément en utilisant la concentration de l'Aluminium dans le matériau de référence : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10..... | 63 |
| Figure III.13 : Projections des variables réelles sur le premier plan principal..... | 69 |

Sommaire

| | |
|--------------------------|-----------|
| Introduction..... | 01 |
|--------------------------|-----------|

Chapitre I : Généralités sur la pollution atmosphérique.

| | |
|---|-----------|
| I.1 L'atmosphère..... | 03 |
| I.1.1 Définition..... | 03 |
| I.1.2 La composition chimique de l'atmosphère..... | 03 |
| I.1.3 Structure de l'atmosphère terrestre..... | 04 |
| I.2 Pollution atmosphérique..... | 06 |
| I.2.1 Définition..... | 06 |
| I.2.2 Les principaux polluants atmosphériques..... | 07 |
| I.2.3 Pollution de l'air par les particules fines..... | 07 |
| I.2.3.1 Définition..... | 07 |
| I.2.3.2 Nature et origine de la pollution atmosphérique..... | 10 |
| I.2.3.3 Sources de la pollution atmosphérique..... | 10 |
| I.2.3.3.1 Sources d'origine naturelle..... | 10 |
| I.2.3.3.2 Sources d'origine anthropogènes..... | 11 |
| I.3 Facteurs régissant l'évolution des polluants dans l'air..... | 12 |
| I.3.1 Facteurs météorologiques..... | 12 |
| I.3.1.1 Le vent..... | 12 |
| I.3.1.2 La température..... | 13 |
| I.3.1.3 L'humidité..... | 13 |
| I.3.1.4 Les précipitations..... | 13 |

| | |
|---|-----------|
| I.3.1.5 La pression atmosphérique..... | 13 |
| I.4 Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et sur l'environnement..... | 13 |
| I.4.1 Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine..... | 14 |
| I.4.2 Les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement..... | 15 |
| I.5 Ampleur de la pollution et comparaison avec les normes algériennes et internationales..... | 15 |
| I.6 La pollution atmosphérique par les métaux lourds..... | 16 |
| I.6.1 Définition..... | 16 |
| I.6.2 Sources d'émissions des métaux lourds..... | 19 |
| I.7 Le carbone noir et son impact sur la pollution de l'air atmosphérique..... | 20 |

Chapitre II : Matériels et méthodes.

| | |
|---|-----------|
| II.1 Description du site de prélèvement..... | 21 |
| II.2 L'échantillonnage et équipements de prélèvement..... | 22 |
| II.2.1 L'échantillonnage..... | 22 |
| II.2.1.1 L'échantillonneur (Gent Sampler) | 23 |
| II.2.2 Détermination des teneurs en (PM-2.5) et (PM-10) | 25 |
| II.3 Techniques nucléaires de microanalyses..... | 25 |
| II.3.1 Réflectomètre pour taches de fumée « Smoke Stain Reflectometer » | 25 |
| II.3.1.1 Description..... | 26 |
| II.3.1.2 Mode d'emploi..... | 27 |
| II.3.1.3 Mode de conditionnement..... | 27 |
| II.3.1.4 Expression des résultats..... | 27 |
| II.2 La fluorescence X à l'aide d'un générateur de rayons X (XRF)..... | 28 |
| II.2.1 Introduction..... | 28 |
| II.2.2 Définitions..... | 28 |
| II.2.3 Principe..... | 29 |
| II.2.4 Principe d'analyse par (XRF)..... | 31 |
| II.2.5 Interaction du rayonnement électromagnétique – matière..... | 31 |
| II.2.6 Analyse par spectromètre à dispersion en énergie (EDS)..... | 33 |
| II.2.6.1 Dispositif expérimental..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| II.2.6.1.1 Sources radioactives..... | 34 |
| II.2.6.1.2 Tube à rayons X..... | 34 |
| II.2.6.2 Analyse qualitative..... | 37 |
| II.2.6.3 Analyse quantitative..... | 37 |
| II.2.6.3.1 Méthode relative..... | 39 |
| II.2.6.4 Caractéristiques de la technique..... | 40 |
| II.2.6.5 Procédure d'analyse..... | 42 |
| II.3 Analyse par spectromètre à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF) | 43 |
| II.3.1 Introduction..... | 43 |
| II.3.2 Principe d'analyse par (Wavelength dispersive Spectrometry) | 43 |
| II.3.3 Dispositif expérimental..... | 44 |
| II.4 Spectrométrie d'émission atomique de plasma à couplage inductif (ICP-AES) | 46 |

Chapitre III : Résultats et interprétations.

| | |
|---|-----------|
| III. Résultantes et interprétations..... | 48 |
| III.1 Etude des teneurs en matières particulaires (PM-2,5 et PM-10) dans l'air..... | 48 |
| III.1.1 Etude des teneurs en (PM-2.5 et PM-10) en fonction des paramètres météorologiques..... | 52 |
| III.1.2 Etude des teneurs en black carbon dans les deux fractions (PM-2.5 et PM-10) | 55 |
| III.1.3 Etude des teneurs en métaux lourds dans l'air..... | 56 |
| III.2 Facteur d'enrichissement..... | 62 |
| III.3 Discussion des résultats..... | 64 |
| III.4 Etude comparative entre les techniques d'analyses nucléaires utilisées..... | 65 |
| III.5 Analyse comparative..... | 66 |
| III.6 Analyse en composantes principales..... | 67 |
| III.6.1 ACP pour les filtres de la pollution atmosphérique..... | 68 |
| | |
| Conclusion générale..... | 70 |

Références bibliographiques

Annexes



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Parmi les aspects négatifs de l'essor du développement que connaît tous les secteurs, la pollution de l'air par les agents anthropiques notamment par les particules en suspension en général et la fraction fine de ces particules en particulier les (PM_{2.5} et PM₁₀) qui sont des particules ayant un diamètre aérodynamique de l'ordre du micromètre et qui peuvent pénétrer notre appareil respiratoire en provoquant des maladies assez graves. Il est clair de nos jours que les particules fines ont une relation avec la présence des métaux toxiques dans l'air et affectent ainsi la santé humaine, particulièrement en milieu urbain et à proximité des zones industrielles. Ces dernières années, ce problème a pris une attention particulière qui a imposé à toutes les instances concernées l'obligation de procéder à un contrôle rigoureux par différents moyens de ces particules en suspensions dans l'air qui représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air.

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.

La pollution atmosphérique correspond à une modification de la concentration moyenne naturelle d'une espèce chimique gazeuse ou particulaire dans l'atmosphère et peut être d'origine biogénique dont les principales sources naturelles sont l'érosion éolienne, les feux, les émissions de gaz biogéniques des écosystèmes et les éruptions volcaniques.

Elle 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 l'évaporation dissolvante et autre produits volatils. [1]

Dans ce contexte, nos travaux s'inscrivent dans le cadre du projet d'étude du transport d'éléments polluants dans l'air par l'application des techniques nucléaires au niveau du Centre de recherche nucléaire d'Alger (CRNA). Ce travail permettra d'évaluer le niveau de la pollution atmosphérique ainsi que la qualité de l'air par les matières particulaires (PM-2.5 et PM-10) et les métaux lourds présents au niveau du site urbain (CPMC-Mustapha Pacha) d'Alger. Les techniques utilisées sont : la technique d'analyse au carbone noir, la spectrométrie à dispersion en énergie (ED-XRF, Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry) ; la spectrométrie à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF, *Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry*) et la Spectrométrie d'émission atomique de plasma à couplage inductif (ICP).

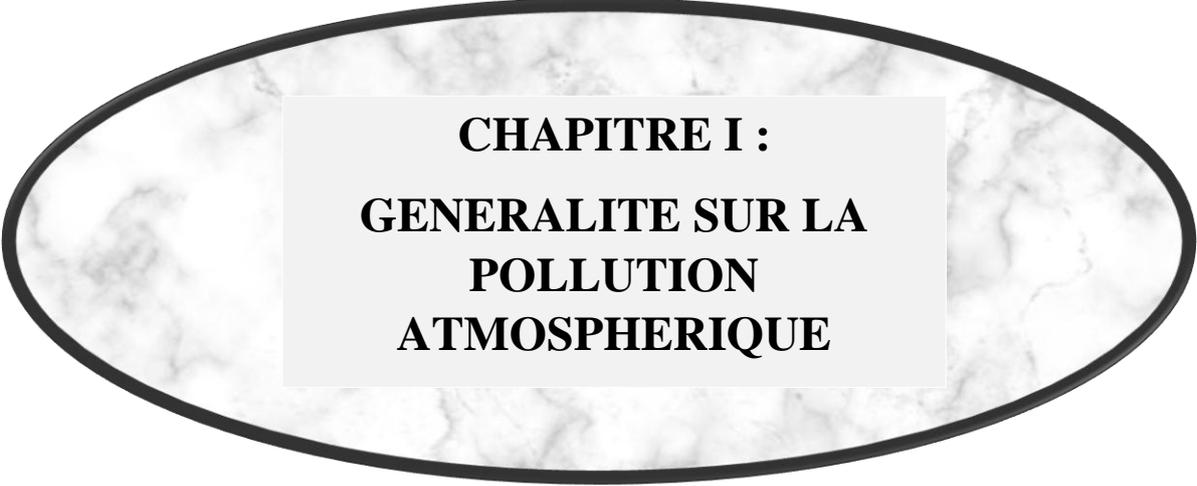
Introduction générale

Afin d'évaluer la qualité de l'air, il est nécessaire d'élaborer un plan de surveillance continue de la qualité et de la quantité des polluants atmosphériques et des facteurs responsables de ces émissions, ainsi que des paramètres régissant leur transfert et leur dépôt.

Dans le but d'étudier la pollution atmosphérique par fraction des matières particulaires PM-10 et PM-2.5 dans le site urbain, le centre Pierre-et-Marie-Curie-centre-hospitalo-universitaire Mustapha Pacha (CPMC-CHU Mustapha Pacha) à Alger centre, avec en plus la détermination des métaux lourds contenus dans les aérosols prélevés. A cet effet, Nous avons partagé ce travail, en trois chapitres :

Ce travail, a consisté entre autres de voir et d'expérimenter toute la procédure liée au contrôle de la pollution de l'air à savoir : l'échantillonnage, le conditionnement des filtres, la préparation des filtres pour l'analyse par différentes techniques d'analyses exploitées au cours de ce stage.

Le premier chapitre de ce mémoire est un rappel sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique ainsi qu'aux définitions des matières particulaires et les métaux lourds. Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit les différentes et principales méthodes de prélèvement et d'analyse des matières particulaires qui se trouvent dans le site étudié. Le dernier chapitre présente les résultats obtenus avec leurs interprétations et les comparaisons pour voir les liens et les correspondances existantes. Enfin, nous présenterons une conclusion générale avec des points de vue sur l'interprétation des résultats et des recommandations pour la prise en charge de ce problème de la pollution de l'air.



CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LA
POLLUTION
ATMOSPHERIQUE

I.1 L'atmosphère :**I.1.1 Définition :**

On appelle « atmosphère » l'enveloppe gazeuse qui entoure certains corps célestes comme, par exemple, la Terre, Vénus ou Mars. Les gaz sont maintenus autour de ces corps célestes par la force gravitationnelle qui les retient et les empêche de s'échapper vers l'espace. L'épaisseur de l'atmosphère est fluctuante, entre 350 et 800 km ; elle dépend en particulier de l'activité solaire ; l'épaisseur moyenne est d'environ 600 km. L'air atmosphérique contient un mélange de gaz dont la composition est pratiquement constante jusqu'à 85 Km d'altitude ou la concentration des éléments devient hétérogène [2]. L'atmosphère contient également une quantité variable d'humidité qui intervient dans la formation des nuages et des précipitations telles que la pluie, la neige, etc [3].

I.1.2 La composition chimique de l'atmosphère :

L'air est un élément primordial à la vie. Il est composé principalement de 78,08% d'azote(N₂), de 20,95% d'oxygène(O₂), 0,93 % d'argon (Ar), 0,04 % de dioxyde de carbone (CO₂), Il comporte aussi des traces d'autres éléments chimiques [2]. La densité de l'air se modifie uniquement sur les 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 du temps et de l'espace [3]. Le tableau suivant représente la composition volumétrique des différents composants de l'air sec.

Tableau I.1 : Composition de l'air sec. [3]

| Éléments (Gaz) | Symbole chimique | Pourcentage dans l'air |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Azote | N₂ | 78,08 |
| Dioxygène | O₂ | 20,95 |
| Argon | Ar | 0,934 |
| Dioxyde de carbone | CO₂ | 382.10⁻⁴ |
| Néon | Ne | 18,18.10⁻⁴ |
| Hélium | He | 5,24.10⁻⁴ |
| Krypton | Kr | 1,14.10⁻⁴ |
| Méthane | CH₄ | 1,7.10⁻⁴ |
| Monoxyde d'azote | NO | 5.10⁻⁴ |
| Dihydrogène | H₂ | 0,5.10⁻⁴ |
| Xénon | Xe | 0,087.10⁻⁴ |
| Ozone | O₃ | 1.10⁻⁶ |

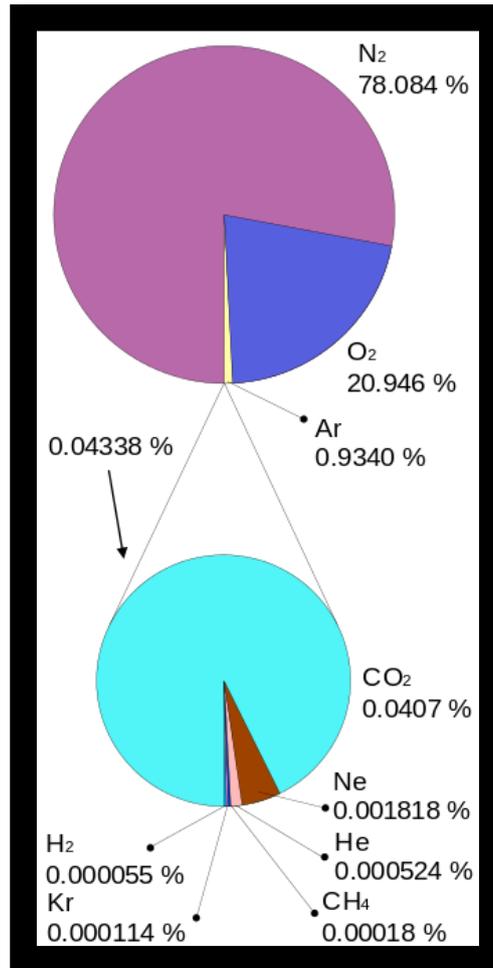


Figure I.1 : Proportion actuelle des gaz atmosphériques.

I.1.3 Structure de l'atmosphère terrestre :

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches d'importance variable : leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude. De bas en haut : (Figure I.2)

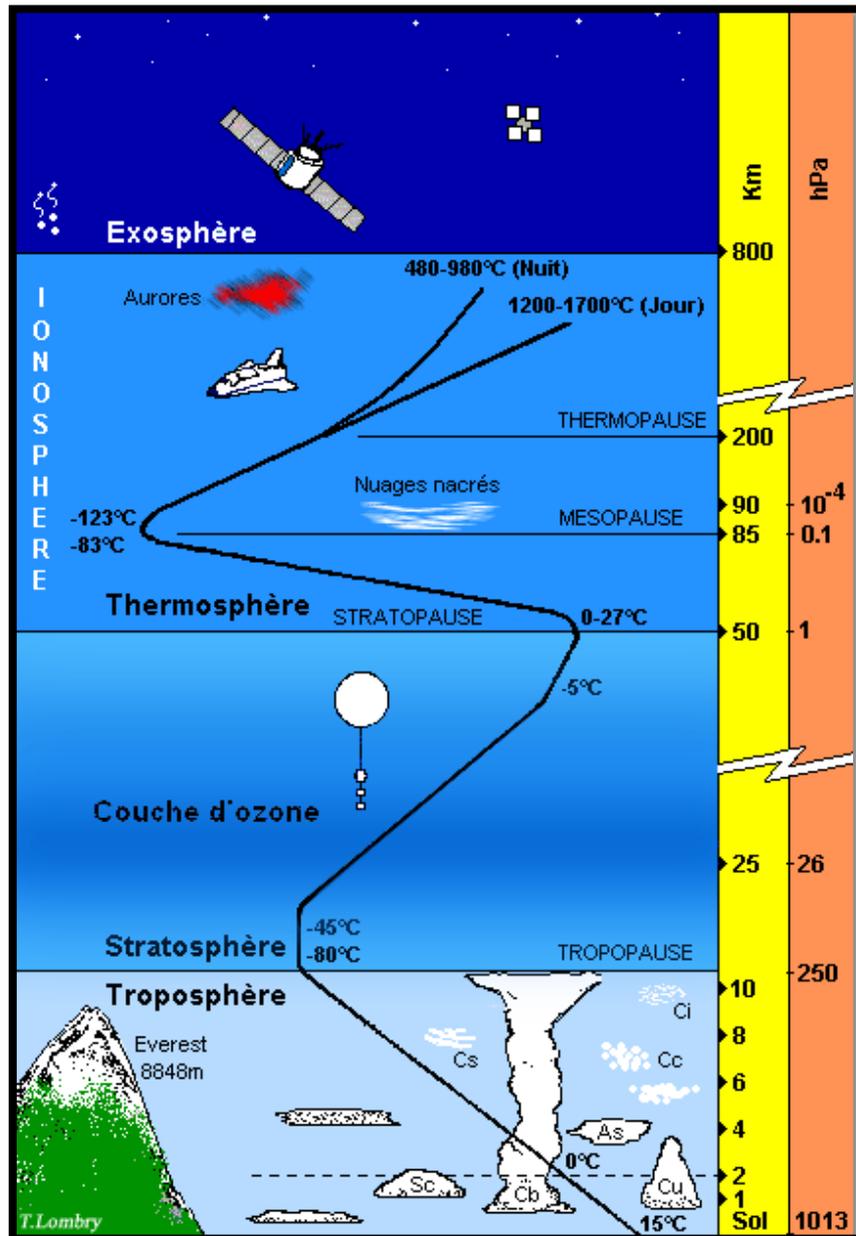


Figure I.2 : Schéma de la variation de l'altitude, de la température et de la pression en fonction des couches de l'atmosphère. [4]

- **Troposphère** : C'est la couche dans laquelle nous vivons. C'est aussi la plus basse et la plus dense. Sa température décroît de 6°C par kilomètre d'altitude. C'est à ce niveau que volent les avions de ligne et qu'interviennent les phénomènes météorologiques : vents, formation des nuages, pluie, neige.... La limite supérieure de la troposphère se nomme la tropopause [4].
- **La stratosphère** : La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie

sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires (UV) qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres. Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme. La stratopause sépare la stratosphère de la mésosphère [3].

- **La mésosphère :** Est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre -80°C à une altitude d'environ 80 km. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes » [3].
- **Thermosphère :** Dans cette couche se trouve la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes. La température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100°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. La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio). Ces ondes, émises par un émetteur, rebondissent sur l'ionosphère et sont renvoyées vers la Terre. Si elles sont retournées avec un certain angle, elles peuvent faire presque le tour du globe [3].
- **L'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 [4].

I.2 Pollution atmosphérique

I.2.1 Définition :

La pollution de l'air ou pollution atmosphérique se définit comme étant toute modification de l'atmosphère ambiante apparaissant sous trois formes, soit gazeuse par la présence de gaz nouveaux ou par l'augmentation de concentration de certains gaz, soit solide par la présence de poussières en suspension de taille plus ou moins grandes, soit plus rarement liquide causée par les aérosols ou le brouillard. Plusieurs définitions ont été données au terme « Pollution Atmosphérique » [4].

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (O.C.D.E) définit La pollution atmosphérique comme « l'introduction par l'homme directe ou indirecte de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables dénature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux systèmes écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement » [4].

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 des constructions et des monuments ou au caractère des sites » [5].

I.2.2 Les 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 [6] ; tels que les poussières, le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), 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 CO₂, le CH₄, le N₂O, les CFC, HFC, PFC et SF₆ et d'autres substances telles que l'ozone (O₃) ... etc [7]. 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 [8].

I.2.3 Pollution de l'air par les particules fines :

I.2.3.1 Définition :

Pour une meilleure approche de la pollution atmosphérique par des particules, il est nécessaire de distinguer entre les différents constituants de la phase particulaire, afin de mieux localiser, l'impact de chaque composant sur l'environnement.

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

Afin de mieux percevoir le comportement aérodynamique des particules, l'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 toxicologique. La complexité de la pollution de l'air par les particules se traduit par l'existence dans la littérature de plusieurs définitions. Selon que l'on soit physiciens, environnementalistes, ou toxicologues, on utilise couramment les expressions suivantes : [9]

❖ Les aérosols :

Les aérosols particuliers se définissent par la suspension dans l'air de fines particules solides ou liquide ou encore les deux dans une phase gazeuse. Ces particules ont un diamètre inférieur à 100 μm , suivant des conditions météorologiques bien définies ; au repos on retrouve des particules d'un diamètre de l'ordre de 10 μm et en cas de turbulence (vents forts, orage...) des particules de diamètre de l'ordre de 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 [10].

❖ 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. Le diamètre aérodynamique est une grandeur qui se prête à la description d'une série de processus. Il correspond au diamètre qu'une particule sphérique d'une densité de 1 g/cm^3 devrait avoir pour présenter la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée [11].

❖ TSP (Total suspended particles) :

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) [7].

❖ **PM (Particulate matter) :**

PM c'est une abréviation anglaise de « Particulate matter » et qui signifie matière particulaire [12].

a) **Les grosses particules PM-10 :**

Particules inhalables de diamètre inférieur à 10 μm , c'est-à-dire 6 à 8 fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu ou la taille d'une cellule [13].

b) **Particules fines PM-2.5 :**

Les particules fines sont les particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm . Cette fraction parcourt l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires [14].

c) **Particules ultrafines PM-0.1 :**

Les particules ultrafines sont les particules dont le diamètre aérodynamique inférieur à 0,1 μm . Leur taille inférieure aux structures cellulaires leurs confère des propriétés de pénétration au niveau spécifique [14]. 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) [15].

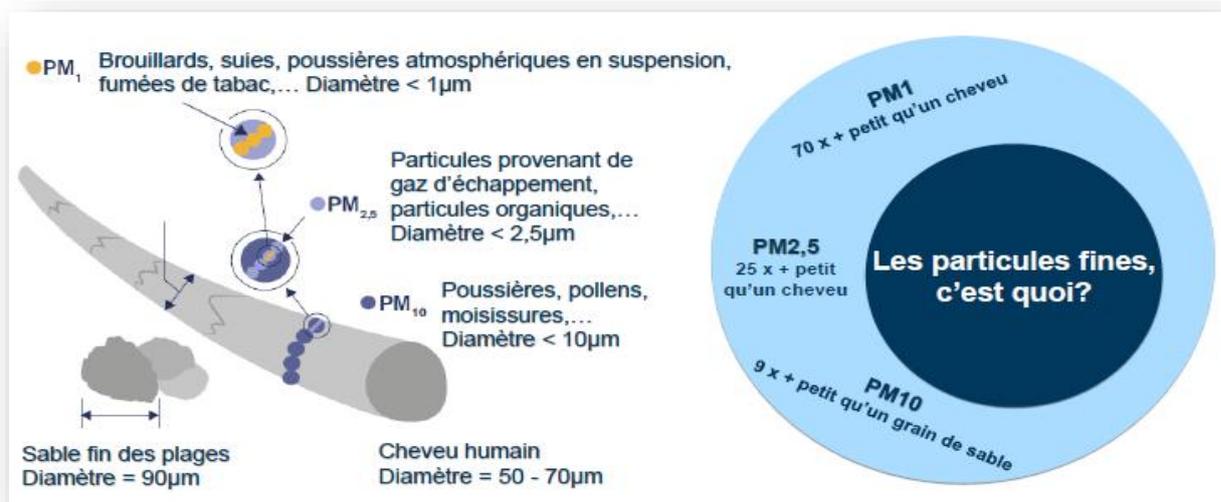


Figure I.3 : Le cheveu humain et les particules PM2.5 et PM10.

❖ **Les poussières (dust) :**

Les poussières sont faites de particules solides inférieures à 75 μm , les plus grosses retombent près de la source d'émission [16].

❖ **Les fumées noires :**

Les fumées noires représentent les particules majoritairement composées de carbone et dont le diamètre aérodynamique inférieur à 5 µm [17].

❖ 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 [18].

❖ Les 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 [19].

❖ Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules solides carbonés résiduels, qu'on retrouve dans les gaz résultant de la combustion, évidemment leur composition varie d'un combustible à un autre [19].

I.2.3.2 Nature et origine de la pollution atmosphérique :

D'origine naturelle ou anthropique, les substances émises peuvent être de nature physique (radioactivité, énergie...), chimiques (gaz, particules, aérosols...) ou biologiques (pollens, acariens, moisissures...). Cette première partie présente succinctement les sources de la pollution atmosphérique ayant directement ou indirectement un impact sur la santé et en se limitant aux rejets chimiques d'origine anthropique (hors gaz à effet de serre et hors semi-volatils comme les pesticides). Ces pollutions sont dites primaires lorsqu'elles s'échappent directement des pots d'échappements, des cheminées ou des surfaces agricoles, etc. Elles vont ensuite se disperser, se diluer, se transporter voire se transformer en d'autres composés dits « secondaires » comme l'ozone ou le nitrate d'ammonium [20].

I.2.3.3 Sources de la pollution atmosphérique :

I.2.3.3.1 Sources d'origine naturelle :

Parmi les sources naturelles on compte :

- **Les éruptions volcaniques :**

Les éruptions volcaniques peuvent injecter dans l'atmosphère de très grande quantité de gaz et de particules. Ces produits peuvent atteindre la stratosphère et leur séjour moyen varie de 4 mois à 2 ans. Elles libèrent essentiellement des poussières volcaniques et de dioxyde de soufre (SO₂) [21].

- Le Pollen :

Les grains de pollen, sont portés par les étamines (des organes floraux mâles transporteurs de sacs de pollen). Grâce à l'action des insectes et du vent, ils peuvent aussi pénétrer dans nos voies respiratoires et provoquer des réactions allergiques, parfois violentes, chez les sujets sensibles [22].

- L'érosion éolienne :

Les poussières des roches et des sols minéraux sont introduites dans l'air par effet d'érosion [22].

- Les feux de forêts [21]

- Les embruns

Les embruns sont le brouillard marin qui résulte des particules de (NaCl) par effet d'évaporation [23].

- La foudre

La foudre, résulte de grandes quantités d'oxyde d'azote (NO_x) par l'oxydation d'azote atmosphérique.

- Les algues

Les algues, à la surface des océans, émettent du sulfure d'hydrogène (H₂S)

- Les zones humides

Les zones humides, par exemple les lacs peu profonds produisent du méthane (CH₄), qui est un robuste gaz à effet de serre.

- Les plantes et les arbres

Les plantes et les arbres émettent des hydrocarbures comme l'isoprène (C₅H₈). Ces gaz Interviennent dans la formation de l'ozone (O₃) qui est un polluant des basses couches [21].

I.2.3.3.2 Sources d'origine anthropogènes :

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-2,5) [24] qui transportent des espèces toxiques et atteignent sérieusement la santé humaine.

Le marché automobile a débouché vers l'élévation du parc qui joue un rôle des plus importants dans l'exposition à de fortes teneurs polluantes dans le milieu urbain [25]. Les principales sources anthropogéniques sont les suivantes :

A) Le trafic motorisé :

Les particules fines nuisibles proviennent particulièrement du trafic motorisé on spécifie parmi ses sources :

- Les émissions à l'échappement (Les émissions polluantes de l'automobile sont des gaz ou vapeurs relâchés dans l'atmosphère à la suite de la combustion incomplète du moteur à essence).
- Les émissions hors échappement (pneus, embrayage, et plaquettes de freins).
- L'usure des routes (causé par le roulement des véhicules).

B) Procédés industriels :

Les sources les plus importantes sont attachées aux activités suivantes :

- L'industrie sidérurgique.
- Les matériaux de construction, cimenteries.
- L'utilisation de solvants et autres produits.

C) Traitement des déchets :

- Incinération d'ordures ménagères (Hg, Pb, Cd).
- Incinération des déchets industriels, des boues d'épuration et des déchets hospitaliers.
- Produits usagés (boîtes de conserve, piles, batteries, ...) [26].

I.3 Facteurs régissant l'évolution des polluants dans l'air :

I.3.1 Facteurs météorologiques :

I.3.1.1 Le vent :

En l'absence de relief, le vent tend à disperser les polluants atmosphériques. Plus le vent est fort plus la vitesse de propagation d'une pollution sera importante, donc le vent est un facteur essentiel qui explique la distribution des émissions polluantes dans l'air [27].

I.3.1.2 La 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 [28]. 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 [29].

I.3.1.3 L'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 [29]).

I.3.1.4 Les précipitations :

La pluie lave l'atmosphère des particules et des gaz, pour ensuite les déposer sur le sol et dans l'eau ; les précipitations sont habituellement associées à une atmosphère instable, qui 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 (SO₂) [30].

I.3.1.5 La 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 la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution [31].

I.4 Les 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.

I.4.1 Les 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, par exemple) et chroniques (cancer du poumon, par exemple) ainsi que de maladies cardio-vasculaires [32].

Les particules peuvent irriter les voies respiratoires inférieures et altérer la fonction respiratoire (surtout chez l’enfant, la femme enceinte et Les personnes âgées). Plus une particule est fine, plus sa toxicité potentielle est élevée. Les particules de taille inférieure à 10 μm (particules inhalables PM10) peuvent entrer dans les poumons mais sont retenues par les voies aériennes supérieures, tandis que les particules de taille inférieure à 2,5 μm pénètrent profondément dans l’appareil respiratoire et peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires.

Une des propriétés les plus dangereuses des poussières est de fixer des molécules gazeuses irritantes ou toxiques présentes dans l’atmosphère (i.e. des sulfates, 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).

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 [33].

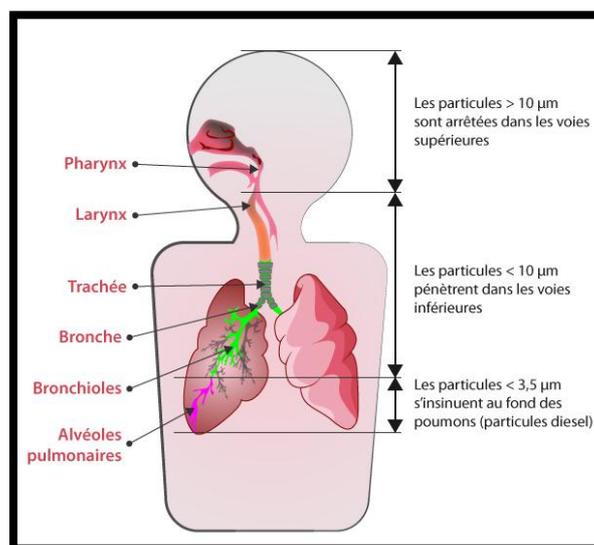


Figure I.4 : Influence de la taille sur la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire. [34]

I.4.2 Les 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 également des problèmes environnementaux aux conséquences tristement connues : pluies 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 (CO₂), **augmente en moyenne de 1% par an**. Ce phénomène est dû aux propriétés que possèdent certains gaz (dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux, ozone et chlorofluorocarbones) d’emprisonner la chaleur du soleil dans l’atmosphère, l’empêchant de retourner dans l’espace après avoir été réfléchi par la terre [33].

I.5 Ampleur de la pollution et comparaison avec les normes algériennes et internationales :

Les tableaux II et III accordent les différentes normes relatives aux concentrations moyennes annuelles ou journalières des PM-10 et PM-2,5.

Tableau I.2 : Normes américaines et recommandation de l’Organisation Mondiale de la Santé pour les PM-10.

| Pays et régions | Valeur limite annuelle (µg/m³) | Valeur limite journalière | Références |
|-----------------------------|--|----------------------------------|-------------------|
| Etat unis d’Amérique | 50 | 150 | [11] |
| Californie | 20 | 50 | [11] |
| OMS | 35 | 50 | [35] |

Tableau I.3 : Normes américaines et recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé d'émission des PM-2,5.

| Pays et régions | Valeur limite annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Valeur limite journalière | Références |
|-----------------------------|---|----------------------------------|-------------------|
| Etat unis d'Amérique | 15 | 65 | [11] |
| Californie | 12 | / | [11] |
| OMS | 20 | 25 | [35] |

Réglementation algérienne :

La législation algérienne définit des valeurs limites relatives aux émissions des particules fines en suspension (PM-10) comme suit [11] :

- Valeur limite 80 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) : Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques.
- Objectif qualité 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) : Un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée.

I.6 La pollution atmosphérique par les métaux lourds :

I.6.1 Définition :

Les métaux lourds (plomb (Pb), cadmium (Cd), Nickel (Ni)...) sont les éléments métalliques de masse volumique élevée (supérieure à $5\text{g}/\text{cm}^3$) présents naturellement à des quantités très faible dans l'eau, les sols et l'air. Ils sont particulièrement toxiques lorsqu'ils dépassent certaines concentrations. Par extension, d'autres éléments toxiques sont rattachés à cette catégorie comme le Zinc (Zn) qui est un métal toxique mais pas particulièrement lourd ou l'Arsenic (As) qui n'est pas un métal mais il est très nocif. C'est pourquoi, la réglementation regroupe ces éléments toxiques comme étant des « éléments traces ». Leur toxicité est indiquée dans les arrêtés, directives européennes, convention internationale : OMS, etc [36].

Donc d'un point de vue carrément scientifique, les métaux lourds peuvent être encore définis comme suit :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5
- Tout métal possédant un numéro atomique généralement supérieur à celui du Sodium ($Z=11$)
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques [37]

Il existe différents métaux lourds et chaque un de ces derniers possède des caractéristiques et un impact propre :

➤ **La pollution par le plomb (Pb) :**

Une source importante des émissions de plomb dans l'atmosphère est dû au transport car le plomb a été pendant longtemps additionné à l'essence du fait de son pouvoir antidétonant. De ce fait, il contamine souvent les terrains en bordures d'axes routiers. Le plomb est émis dans l'atmosphère par le traitement des minerais et des métaux pour ce qui concerne l'industrie et dans une moindre mesure depuis la commercialisation de carburants sans plomb, par les véhicules automobiles à essence. Dans ce dernier cas, le plomb est utilisé comme antidétonant sous la forme de plomb-tétraéthyle et de plomb tétraéthyle [38].

➤ **La pollution par le Cadmium (Cd) :**

Il provient principalement de l'incinération des déchets, ainsi que des processus industriels (métallurgie). Il a des effets sur le système respiratoire et digestif [39].

➤ **La pollution par l'Antimoine (Sb) :**

L'antimoine est un métalloïde de couleur grise métallique à deux niveaux d'oxydation (III et V). Il est utilisé comme retardateur de flamme, dans les semi-conducteurs et dans des alliages métalliques. Cet élément est dans l'environnement en brûlant du charbon, des activités minières ou métallurgiques.

Il est considéré comme cancérigène pour l'homme, affectant les organes des voies respiratoires, le tractus gastro-intestinal, les reins et le cœur [7].

➤ **La pollution par le Chrome (Cr) :**

Le chrome est un métal dur, gris blanc qui possède 3 états d'oxydation principaux (II, III et VI) et cinq états d'oxydation inhabituels (II, I, 0, IV et V). Le cas de la stabilité des conditions d'oxydation et de la toxicité du chrome dans le sol (le Cr (III) est plus stable

mais moins toxique que le chrome (VI)). Il est principalement utilisé dans la fabrication d'acier, d'autres alliages, de colorants et dans le traitement du cuir, du bois et de l'eau.

C'est un élément essentiel de l'homme car il maintient le métabolisme du glucose, sa nécessité n'a pas été démontrée pour les végétaux [39].

➤ **La pollution par le Cuivre (Cu) :**

Le cuivre est l'un des métaux les plus anciens connus en raison de sa présence dans l'état d'origine (par exemple, Ag, As, Au, Sb et Pb). Il est principalement utilisé individuellement ou sous forme d'alliages dans la fabrication de tôle (feuilles métalliques), de câbles électriques ou de conduites, il est très utilisé pour les conduites d'eau [40].

Le (Cu) est un oligo-élément, il est plus couramment étudié en relation avec les problèmes de carence pouvant être causés chez les végétaux, le bétail et l'homme, que pour sa nocivité [7].

➤ **La pollution par le Nickel (Ni) :**

Ce métal est gris en général, le (Ni) est ferromagnétique et possède de nombreuses propriétés communes avec le fer, que l'on trouve habituellement dans l'environnement dans le cas de l'oxydation (+ II) [40].

Le (Ni) est largement utilisé dans l'industrie car il confère aux alliages (tels que l'acier inoxydable) une solidité, résistance à la corrosion, et d'autres propriétés liées au comportement électrique, magnétique et thermique. Le Ni est un oligo-élément essentiel de base, mais à de très faibles teneurs [7].

➤ **La pollution par le Vanadium (V) :**

Le vanadium est un métal blanc, brillant, mou et ductile. Il présente une bonne résistance à la corrosion par les composés alcalins et par les acides chlorhydrique et sulfurique. Les états d'oxydation communs du vanadium sont (+II, +III, +IV et +V). La majorité du vanadium produit est employé en tant que Ferro-vanadium ou comme additif de l'acier (BUR, 2008) Le vanadium est classé carcinogène par la United States Environmental Protection Agency (USEPA) [7].

➤ **La pollution par le Zinc (Zn) :**

Le zinc est un métal, raisonnablement réactif, qui réagit avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde blanc imperméable. Généralement trouvé dans le cas de l'oxydation (II). Il est principalement extrait sous forme de sulfure (ZnS sphalérite) dont l'oxydation est généralement suivie d'une oxydation de la pyrite (FeS₂), ce qui crée un contexte acide favorable à la mise en solution de différents ETM. Le (Zn) est largement

utilisé pour la galvanisation de l'acier, mais aussi dans des produits cosmétiques (crèmes, shampoings), batteries, pigments et peintures [38].

➤ **La pollution par l'Arsenic (As) :**

L'arsenic est un métalloïde de couleur gris métallique, possédant deux états d'oxydation (III et V). Il est souvent associé aux activités minières et à la combustion de ressources organiques fossiles. Il a été utilisé en agriculture en tant que pesticide, en tant que durcisseur dans les cartouches de chasse, ou associé à Ga (Galium) ou In (Indium) pour former des matériaux supraconducteurs. C'est un élément non essentiel et un poison puissant dont la toxicité varie avec l'état d'oxydation ; les arsénites (III) sont plus toxiques et plus mobiles dans les sols que les arséniates (V) [38].

I.6.2 Sources d'émissions des métaux lourds :

Bien que la plupart des métaux soient naturellement présents à l'état de trace dans le contexte géochimique (sol, eau), des quantités plus au moins importantes sont émises dans l'air par les sources d'émission naturelles ou liées aux activités humaines.

Au niveau mondial, on estime que la part des émissions naturelles des composés métalliques émis dans l'atmosphère est au moins égale aux émissions dues aux activités humaines.

Les sources anthropogènes sont les suivantes :

- Combustion de combustibles fossiles (pétrole et charbon dans l'industrie, chauffage et transport (**As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn**)).
- L'extraction de minerais (**As, Fe, Ni, V**).
- Industrie du Fer et de l'acier (**Pb, Cd, Ni**) et des métaux non ferreux (**As, Cd**).
- La combustion des ordures ménagères (**Pb, Cd**).
- Engrais et pesticides.

Les sources naturelles sont les suivantes :

- Les volcans (**As, Ni, Hg, Zn**).
- Les érosions de la croûte terrestre (**Al, As, Cr, Fe, Ni, V**) les feux de forêts (**Zn**).
- Les émissions biogéniques issues de la végétation (**As, Cd, Cu, Pb, Zn**) [41].

I.7 Le carbone noir et son impact sur la pollution de l'air atmosphérique :

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 150 nanomètres (nm). Le (BC) forme donc une sous-catégorie des PM-2.5, à savoir les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm.

Le noir de carbone est une fraction non volatile des particules, également appelée carbone élémentaire. 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. La principale source de noir de carbone en milieu urbain serait due aux émissions des véhicules de transport [42].

En science du 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 [43].

A large, horizontally-oriented oval with a thick black border. The interior of the oval is filled with a grayscale marbled pattern, resembling natural stone or marble. The text is centered within this oval.

**CHAPITRE II :
MATERIELS ET
METHODES**

Alger est une grande ville de plus de cinq millions d'habitants. La ville connaît une forte élévation dans du parc et le trafic habituel en tous catégories. Plus d'un million de voitures arrivent à Alger avec plus de 1,2 million de voitures par jour. L'agriculture et l'industrie environnante connaissent des taux de croissance rapides qui contribuent à la pollution de l'environnement et à l'abaissement de la qualité de l'air.

Afin d'évaluer la pollution de l'air dans un environnement qui semble ne pas être contaminé, dans ce chapitre, nous décrirons brièvement le site de prélèvement, les procédures d'échantillonnage utilisées et les échantillons collectés. Ainsi que les techniques nucléaires de microanalyses utilisées pour décrire les caractéristiques des échantillons de matières particulaires PM-2.5 et PM-10 prélevés au niveau du centre urbain C.H.U-Mustapha-Pacha d'Alger.

II.1 Description du site de prélèvement :

Afin d'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 [11].

La zone de prélèvement ainsi retenue se situe à l'intérieur du C.H.U Mustapha Pacha au centre d'Alger du côté de la place de la Concorde Civile (place 1^{er} Mai).

Sur ce site, la station d'échantillonnage est située sur la terrasse du bâtiment du CPMC à une altitude d'environ 19 mètres du sol.

Au poste de mesure, nous avons une vue dégagée sur le golfe d'Alger (Tafourah, port, autoroute, etc.). L'emplacement est bien aéré dans toutes les directions.

Les données géographiques et l'image satellite (**figure. II.1**) du site sont obtenues à l'aide de GoogleEarth2019 :

Latitude : 36°45'43'' Nord

Longitude : 3°03'19'' Est

Altitude par rapport à la mer : 58 m.

Selon la classification européenne, notre site de prélèvement est classé parmi les stations urbaines en Algérie, cette zone est à proximité des différentes activités : une forte

concentration de population, une urbanisation rapide et diverses activités industrielles et portuaires.

Le site présente donc l'avantage de pouvoir effectuer des comparaisons inter-sites et inter-appareils de mesure.



Figure II.1 : cartographie du site d'échantillonnage au niveau du CPMC-CHU Mustapha à Alger centre (place 1er Mai).

II.2 L'échantillonnage et équipements de prélèvement :

II.2.1 L'échantillonnage :

Nos échantillons ont été recueillis au niveau du centre urbain CPMC- CHU Mustapha, dans la région d'Alger en 17/11/2018 où on a utilisé un système d'échantillonneur Gent Sampler. La durée de prélèvement est 24 heures en générale et d'une moyenne de 3 fois par semaine.

II.2.1.1 L'échantillonneur (Gent Sampler) :

Le système d'échantillonnage a conçu pour l'AIEA dans le cadre du contrat de recherche à l'institut des sciences nucléaires, université de Gent, Belgique.

L'échantillonneur de l'air (Gent Sampler) comporte :

- Unité de prélèvement.
- Unité de commande.
- Prélèvement simultané des PM-2.5 et PM-10.

L'avantage de ce système (**figure II.1.1** et **II.1.2**) est qu'il permet un contrôle dynamique du débit à (16 l / min) et de le maintenir quel que soit l'évolution de la perte de charge du système (c'est-à-dire l'augmentation de la charge d'aérosol sur le filtre). Il s'agit d'un échantillonnage (manuel), car il nécessite une intervention de l'opérateur pour la réalisation des filtres d'échantillonnage en séquentiellement.

Les échantillons à analyser par des techniques nucléaires sont des dépôts obtenus après aspiration d'air, déposés sur des filtres en polycarbonate de (47 mm) de diamètre et de porosité (0.4 μm et 8 μm) pour une période de temps bien déterminée.

La (**figure II.1.5**) montre la cassette de (Gent sampler) qui est le support où on place les deux filtres.

Les filtres vierges (vides) sont pesés à l'aide d'une microbalance de type (Mettler AE 163, $\pm 10^{-5}\text{g}$) (**figure II.2**), 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, les filtres sont récupérés minutieusement et pesés à l'aide de la même microbalance pour le pesage de la matière obtenue, puis mis dans une boîte de pétri codifiée à son nom (EA360TBA, EA361TBA, ...) ils seront analysés ultérieurement [**3**].

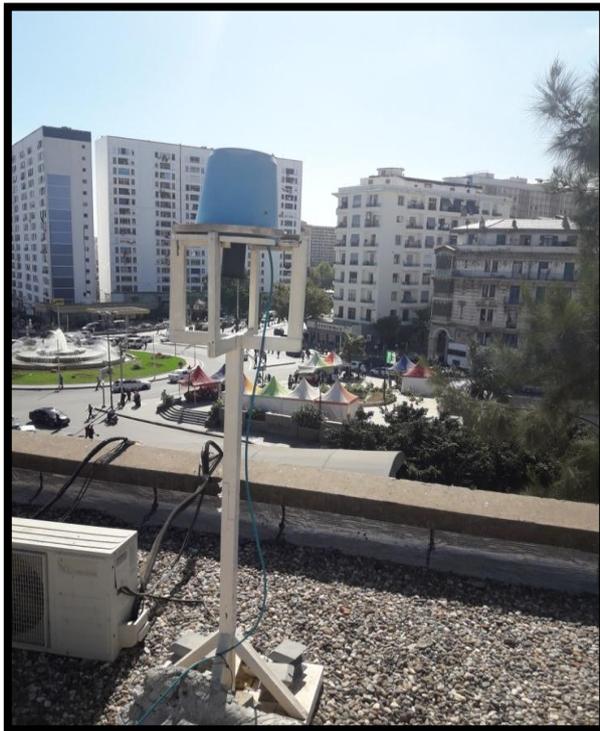


Figure II.1.1 : Le support d'échantillonneur.



Figure II.1.2 : L'échantillonneur Gent Sampler.

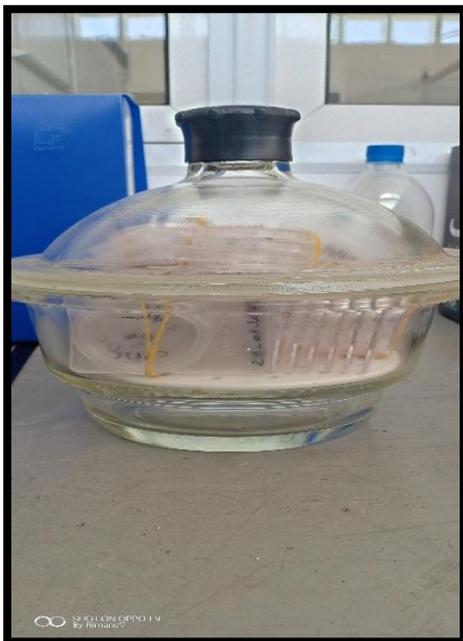
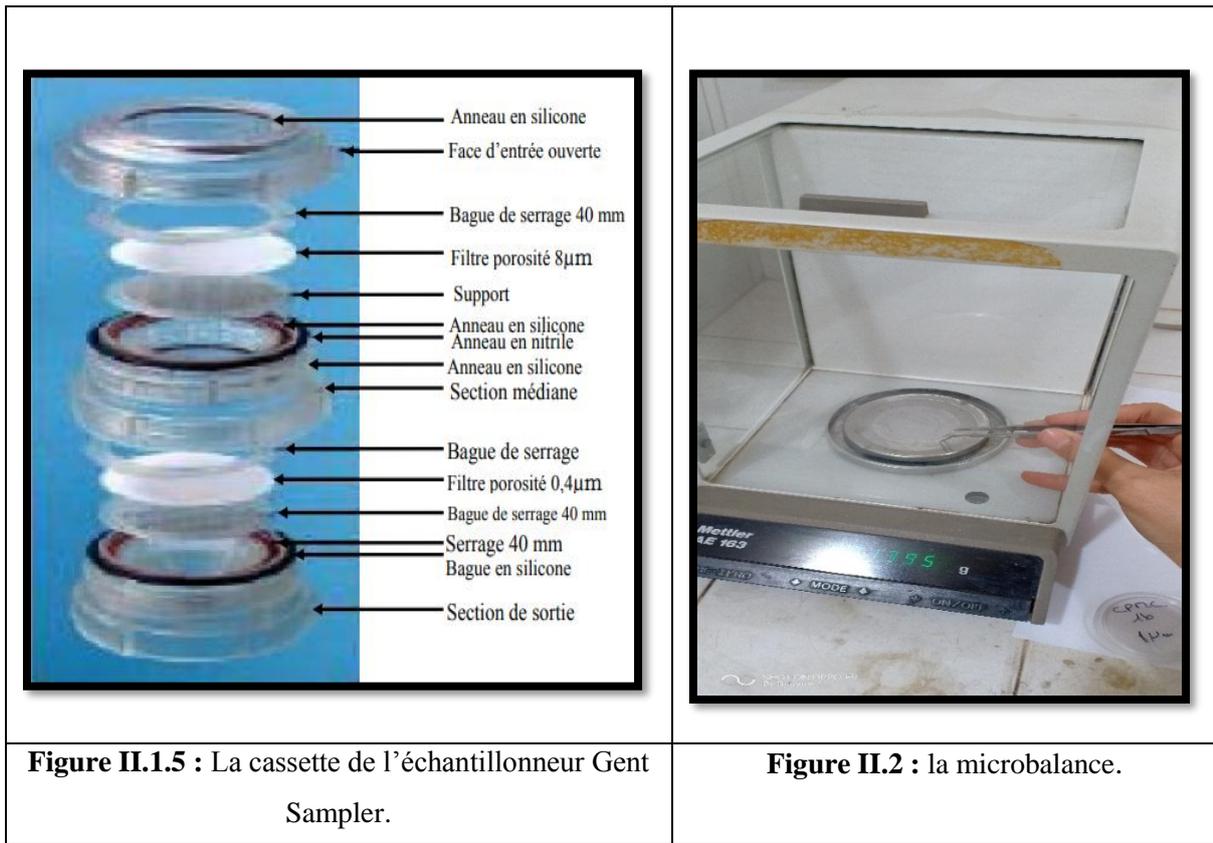


Figure II.1.3 : Le dessiccateur.



Figure II.1.4 : Filtre avant et après collecte.



II.2.2 Détermination des teneurs en (PM-2.5) et (PM-10) :

Connaître le poids accumulé, la durée d'échantillonnage et le débit d'air moyen à partir duquel le volume moyen est utilisé, permet de calculer la concentration en particules exprimée en $\mu\text{g} / \text{m}^3$.

Tout au long de la période d'échantillonnage, nous avons essayé d'enregistrer tous les commentaires qui pourraient affecter les résultats, afin de donner une bonne explication

Les concentrations des matières particulaires ont obtenue par le rapport suivant :

$$C (\text{PM}_{i=2.5, 10}) = \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{\text{masse (filtre pollué)} - \text{masse (filtre vierge)}}{V_f - V_i} = (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad \text{(II.1.a)}$$

II.3 Techniques nucléaires de microanalyses :

II.3.1 Réflectomètre pour taches de fumée « 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 le plan numérique dans l'atmosphère.

Le laboratoire Warren Spring du ministère du Commerce et de l'Industrie recommande l'utilisation d'un réflectomètre photoélectrique afin d'obtenir des résultats précis et fiables. C'est en accord avec leurs suggestions que le réflectomètre pour taches de fumée a été conçu. [44]

II.3.1.1 Description :

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

- D'une tête de mesure : La lumière d'une lampe au tungstène passe à travers 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 [44].



Figure II.2.1 : Réflectomètre de fumée.

II.3.1.2 Mode d'emploi :

Un papier 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 ($34,0 \pm 0,5$) [44].

II.1.3 Mode de conditionnement :

Afin d'obtenir des résultats comparables et fiables, tous les filtres PM-2.5 et PM-10 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 [44].

II.1.4 Expression des résultats :

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

Méthode 1 : 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 :

$$ECR(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \left(\frac{100}{2 F \varepsilon}\right) \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (\text{II.1.b})$$

Où :

ε est le coefficient d'absorption massique pour EC (m^2 / 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 échantillonné (V) et la zone de collecte du filtre (A) connue, la concentration en masse peut être facilement déterminée en utilisant l'équation suivante :

$$M = \frac{(D \times A)}{V} \quad (\text{II.1.c})$$

Où :

M est la concentration massique dans l'atmosphère ($\mu\text{g} / \text{m}^3$),

D est la densité surfacique des particules sur le filtre ($\mu\text{g} / \text{cm}^2$),

A est la surface de collecte du filtre (cm^2),

V = Est le volume d'air échantillonné (m^3).

- c) Les résultats sont exprimés en ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) [44].

II.2 La fluorescence X à l'aide d'un générateur de rayons X (XRF) :

II.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. [45]

II.2.2 Définitions :

Rayons X :

On appelle rayons X les radiations électromagnétiques comprises entre 0,1 et 50Å environ (les radiations électromagnétiques pouvant avoir une longueur d'onde variant entre 0.001Å et plusieurs kilomètres). Ces limites ne sont pas précises et les rayons X sont, en fait, plutôt définis par leur mode de production. Ils sont émis par le bombardement de la surface d'un solide par des rayons cathodiques qui sont des faisceaux d'électrons accélérés par des tensions variant entre 10^3 et 10^6 volts.

Le domaine des rayons X est limité du côté des grandes longueurs d'onde car l'absorption des rayons X par la matière augmente proportionnellement à la longueur d'onde. Ainsi ces rayons, dits rayons mous, deviennent très difficiles à utiliser et à détecter quand la longueur d'onde croît.

Du côté des petites longueurs d'onde, des sources à très haute tension deviennent nécessaires à la production des rayons X appelés rayons durs. La limitation est donc due aux difficultés techniques de réalisation.

Il y a bien entendu, une grande différence dans la production des rayons gamma et des rayons X. L'émission de rayons gamma est faite depuis le noyau de l'atome tandis que les rayons X viennent des processus qui se produisent dans les orbitales des électrons. [46]

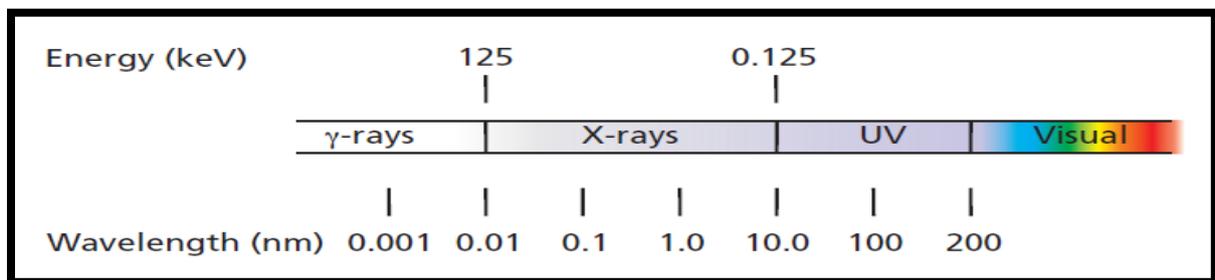


Figure II.3.1 : Rayons X et autres rayonnements électromagnétiques.

II.2.3 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. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. 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 [45], [47].

Selon le modèle de Bohr, les électrons constituant le cortège électronique des atomes sont situés sur des niveaux d'énergie bien définis, correspondant aux différentes couches (K, L, M, N, ...).

L'interaction des rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires avec la matière, engendre l'excitation atomique des couches profondes K, L, M.

Sous l'influence d'un rayonnement d'énergie suffisante, un électron du cortège électronique d'un atome, situé sur un niveau d'énergie profond (K, L, M), peut être arraché de la couche à laquelle il appartient, l'atome alors ionisé va tendre à revenir à l'état d'équilibre : un électron d'une couche plus externe va venir combler la lacune laissée par l'électron qui a été éjecté (**Fig. II.3.2**). Cette transition électronique s'accompagne d'une libération d'énergie sous forme d'un photon X d'énergie caractéristique de l'atome. C'est le phénomène de fluorescence X [45], [47].

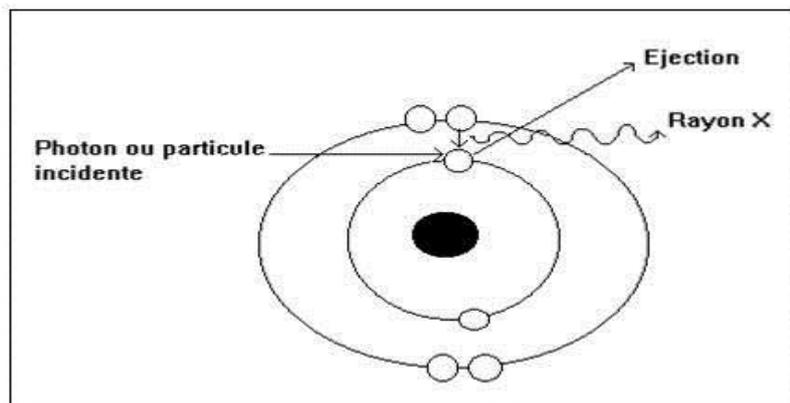


Figure II.3.2 : Principe de l'interaction photoélectrique.

Si la transition a lieu par exemple entre les couches K et L, l'énergie du rayonnement X émis est donnée par la relation suivante :

$$E_{x\text{-ray}} = E_K - E_L = h \nu \quad (\text{II.2})$$

Avec,

h : constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s,

ν : fréquence du rayon X,

E_K et E_L : niveau d'énergie des couches K et L [45], [47].

II.2.4 Principe d'analyse par (XRF) :

Le principe de l'analyse repose sur la comparaison de l'aire d'une raie X d'un élément d'un échantillon standard de concentration connue avec celle de la même raie X de l'élément de l'échantillon de concentration inconnue.

La mesure de l'énergie du rayonnement de fluorescence permet d'identifier les différents éléments (différentes raies X du spectre d'énergie) constituant l'échantillon irradié. Cette identification est appelée « **analyse qualitative** » [7].

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*) [45].

Le concept de base de tous les spectromètres est une source, un échantillon et un système de détection. La source irradie un échantillon et un détecteur mesure le rayonnement provenant de l'échantillon.

Dans notre cas, on a utilisé les deux méthodes d'analyses citées en dessus (ED - XRF et WD-XRF)

II.2.5 Interaction du rayonnement électromagnétique – matière :

Lorsqu'un rayonnement X primaire bombarde les atomes de la matière, différents types de rayonnement peuvent avoir lieu :

A) Effet photoélectrique :

Photon-électron liée

- Photon cède son énergie à un électron lié (absorption) **(a)**
 - Électron (photoélectron) éjecté hors de l'atome avec énergie cinétique T,
- Tel que $T = h\nu - E_b$ (E_b énergie de liaison) **(b)** [48].

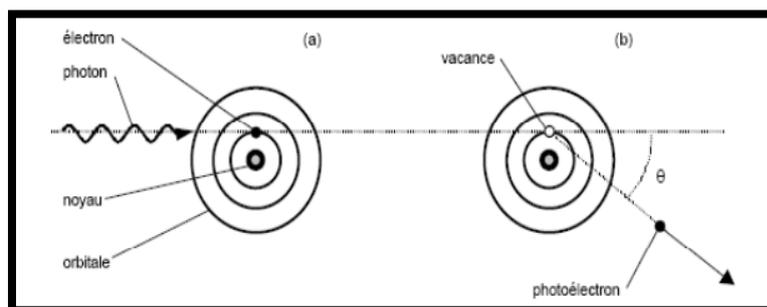


Figure II.3.3.a : L'effet photoélectrique.

B) Diffusion :

En physique, la diffusion désigne deux phénomènes distincts :

- Diffusion des ondes, propagation des ondes (notamment de la lumière) lorsque celles-ci rencontrent un obstacle.
- Diffusion des particules, interaction entre deux particules lorsque l'une est projetée sur l'autre [49].

C) 1 Diffusion inélastique (Effet Compton) :

- Photon incident entre en collision avec un électron peu lié (couche superficielle) (a)
- Électron recule avec énergie cinétique : $T = h\nu - h\nu'$
- Photon diffusé avec une énergie $h\nu' < h\nu$ (b).

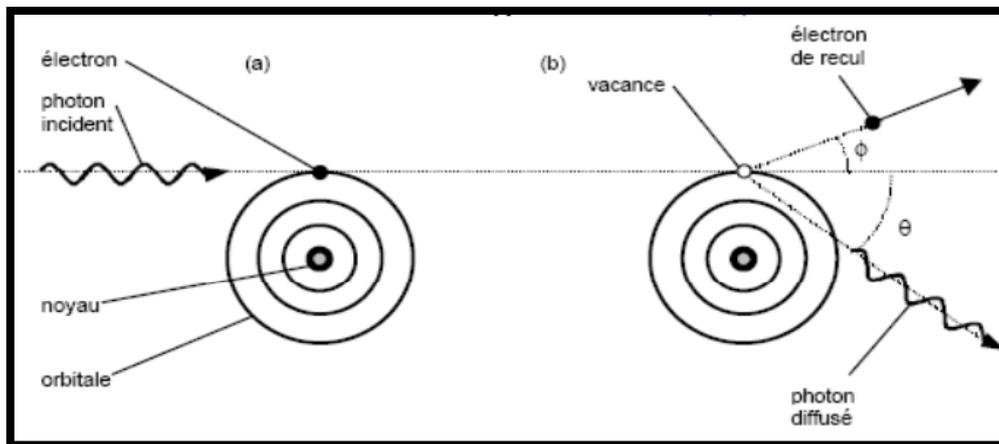


Figure II.3.3.b : La diffusion inélastique (effet Compton).

2 Diffusion élastique (Rayleigh) :

- Photon incident est dévié de sa trajectoire en conservant son énergie initiale. [48]

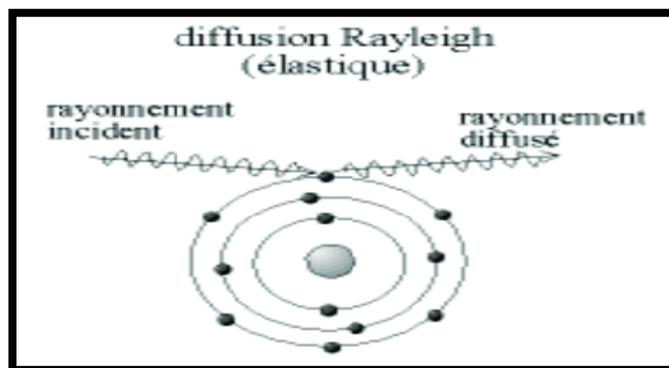


Figure II.3.3.c : La diffusion élastique (Rayleigh).

D) Effet de matérialisation (uniquement si $E > 1\,022\text{ eV}$) :

L'énergie du photon incident est totalement absorbée pour la création d'une paire électron-positon. Ce processus est suivi d'une annihilation dans laquelle le positon et un électron s'annihilent mutuellement en générant une paire de photons de 511 keV émis à 180° l'un de l'autre [50].

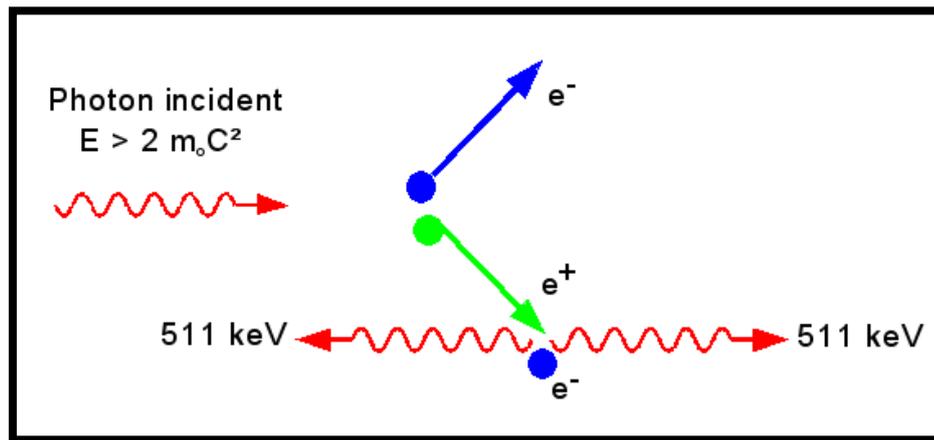


Figure II.3.3.d : Création de paire.

II.2.6 Analyse par spectromètre à dispersion en énergie (EDS) :

Ces spectromètres utilisent la sensibilité de détecteurs à l'énergie des photons X émis par les atomes qui constituent l'échantillon à analyser. Autrement dit, ils possèdent un détecteur capable de mesurer les différentes énergies du rayonnement caractéristique provenant directement de l'échantillon. Le détecteur peut séparer le rayonnement de l'échantillon en rayonnement provenant des éléments de l'échantillon. Cette séparation s'appelle la dispersion. Il s'agit de détecteurs de type semi-conducteur (classiquement des détecteurs **Si (Li)** silicium dopé au lithium) ou d'un détecteur 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. 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 [45].

II.2.6.1 Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental (**Amptek Ink**) (**figure II.4.1**) qui se trouve au niveau de laboratoire (EDXRF) dans le Centre de Recherche nucléaire d'Alger (**CRNA**) ; est composé d'une source d'excitation (tube à rayons X) et d'une chaîne de spectrométrie. Lors de l'irradiation, le spectre d'énergie des rayons X émis par les différents éléments de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un détecteur au silicium à diffusion (**SDD**) (**figure II.4.3**).

II.2.6.1.1 Sources radioactives :

Les sources radioactives sont généralement utilisées pour couvrir l'ensemble du spectre des rayons X. Pour obtenir une probabilité élevée d'émission de rayons X, l'énergie du rayonnement provenant de la source excitatrice doit être aussi proche que possible de celle des énergies de liaison des électrons des éléments à doser. Les propriétés des sources radioactives utilisées dans l'analyse par fluorescence X sont résumées dans le tableau suivant [7] :

Tableau II.1 : Quelques sources d'excitation utilisées en fluorescence X [51].

| Radio-isotope | Période | Désintégration | Rayonnement utile |
|----------------------|----------------|---|---|
| 55 Fe | 2.6 ans | 55Fe (c.e) 55Mn | Rayons X du Mn : 5.9 KeV |
| 109Cd | 453 j | 109Cd (c.e) 109Ag | Rayons X de Ag : 25 KeV |
| 57Co | 270 j | 57 Co (c.e) 57Fe | Rayons γ de 126 et 132 KeV |
| 241Am | 451 ans | 241Am(α) 237Np | Rayons γ de 59.6 KeV |

c.e : capture électronique

α : Désintégration alpha

II.2.6.1.2 Tube à rayons X :

La source usuelle des rayons X est le tube à rayons X ; appelé aussi « Tube de Coolidge », il produit un rayonnement provoqué par le freinage d'électrons ou *Bremsstrahlung* (terme

allemand utilisé à l'échelle internationale). C'est un tube à vide de type (BJ5296 / XRSource Mini-X, Ag / TB, 50KV), comportant deux électrodes :

- une cathode émettrice d'électrons
- une anode, ou anticathode, qui est une masse métallique (argent) portée à un potentiel positif de l'ordre de 50 kilovolts.

En effet, une tension électrique élevée est établie entre deux électrodes. Les électrons émis par la cathode sont ainsi accélérés et focalisés sur l'anode refroidie par une circulation d'eau. Ainsi, un faisceau de rayons X sort du tube par une fenêtre latérale ou frontale.

Le Mini-X est fourni avec deux collimateurs (figure II.4.5) pour faciliter son utilisation dans les applications XRF. Ils se composent d'un collimateur en laiton (Cu) avec des inserts en aluminium (Al) et d'un couvercle qui se visse dans le Mini-X. Les collimateurs ont des trous de 1 et 2 mm de diamètre. Un bouchon de sécurité en laiton est également fourni. Celui-ci, une fois installé, réduit le flux d'un tube en fonctionnement à moins de 25 $\mu\text{Sv} / \text{h}$; « Sv est l'unité utilisée pour donner une évaluation de l'impact des rayonnements sur l'homme » [45], [52], [53], [54].

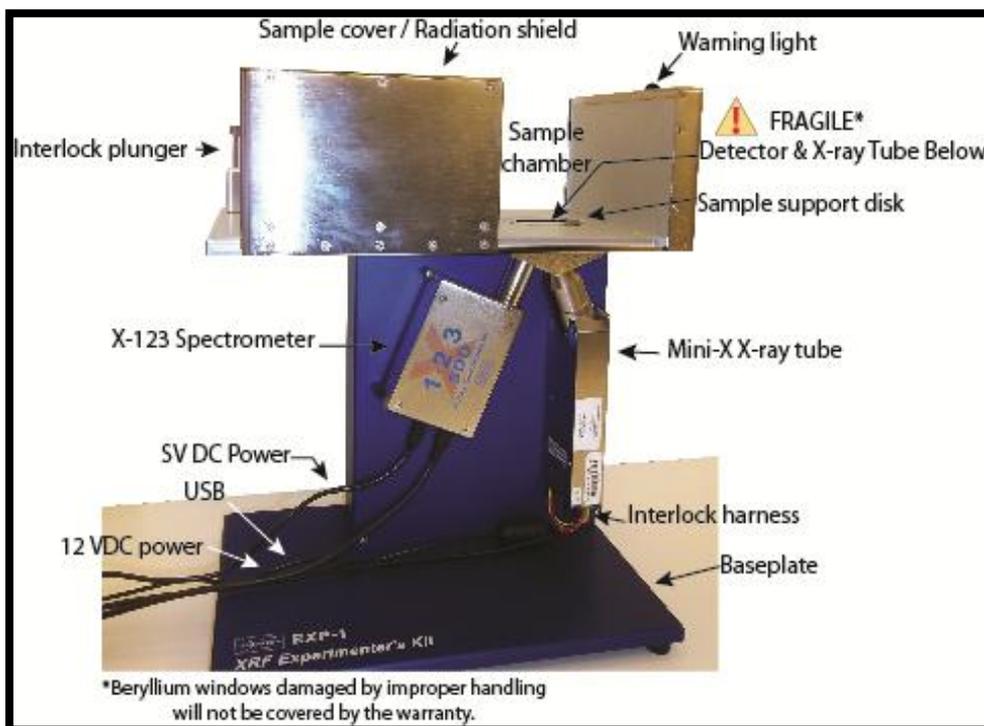


Figure II.4.1 : Dispositif expérimental (Amptek Ink). [55]

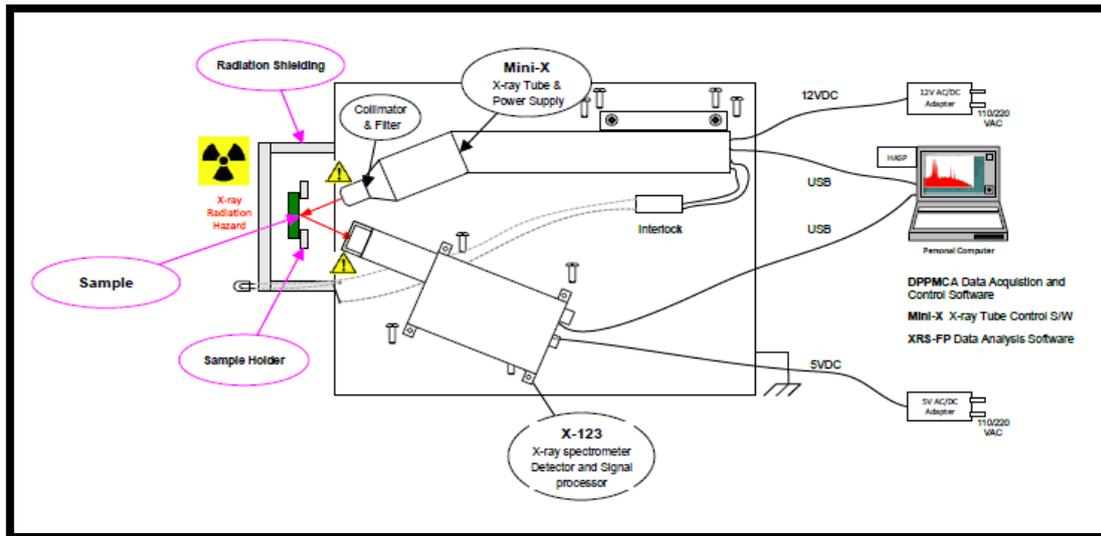


Figure II.4.2 : Représentation schématique de la technique d’analyse par fluorescence X (EDXRF : dispersion d’énergie). [55]



Figure II.4.3 : Spectromètre complet X-123 avec Super SDD (fenêtre 25 mm² / 500 µm, 0,5 mil Be) et un tube à rayons X (USB Mini-X).



Figure II.4.4 : Image de la fenêtre de détection du dispositif expérimental (Amptek Ink). [55]



Figure II.4.5 : Cette photo montre les deux collimateurs (Mini-X), le bouchon de sécurité et le capot.

II.2.6.2 Analyse qualitative :

Les énergies des raies sont données par la loi de Moseley qui exprime la proportionnalité entre l'énergie du rayon X émis par l'élément et le carré de son numéro atomique, selon la relation suivante :

$$h\nu = R h c (z - \sigma)^2 \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right]^2 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

σ : constante d'écran,

C : vitesse de la lumière = $2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$,

R : constante de Rydberg = $10\,973\,731,6 \text{ m}^{-1}$,

Z : numéro atomique,

n, p : nombre quantique correspondants au niveau d'énergie initial et final.

L'analyse qualitative ne présente pas en général de difficultés, la proportionnalité entre l'énergie du rayonnement X émis et le carré du numéro atomique nous permet d'identifier l'élément dans l'échantillon [56]

II.2.6.3 Analyse quantitative :

L'intensité de la raie caractéristique d'un élément i présent dans un échantillon est proportionnelle à sa concentration. S'il n'y a aucune interaction secondaire (interaction des X produits avec les éléments entourant l'élément i), l'intensité mesurée est donnée par :

$$I_i = K C_i \quad (\text{II.4})$$

Avec :

K : étant la sensibilité du dispositif expérimental.

C_i : Concentration de l'élément (*i*) dans l'échantillon.

La concentration (**C_i**) de l'élément (*i*) dans l'échantillon est proportionnelle à l'intensité (**I_i**).

La relation ci-dessus correspond à une situation idéale, elle est satisfaite uniquement dans le cas où il n'existe aucune interaction du rayonnement de fluorescence X émis avec la matrice qui correspond au milieu de l'échantillon qui entoure le point de l'émission du rayonnement.

En réalité l'intensité « **I_i** » est susceptible d'être modifiée par les effets de matrices (figure **II.5**), qui interviennent de trois façons :

→ Le rayonnement X primaire est absorbé le long du trajet pour arriver à l'endroit où se produit l'interaction recherchée ; c'est l'absorption primaire. Le rayonnement de fluorescence émis par l'élément auquel on s'intéresse est absorbé par les éléments de la matrice le long du trajet pour sortir de l'échantillon en direction du détecteur ; c'est l'absorption secondaire. L'ensemble de ces deux effets constitue l'effet d'absorption qui est le phénomène le plus gênant dans l'analyse quantitative [57].

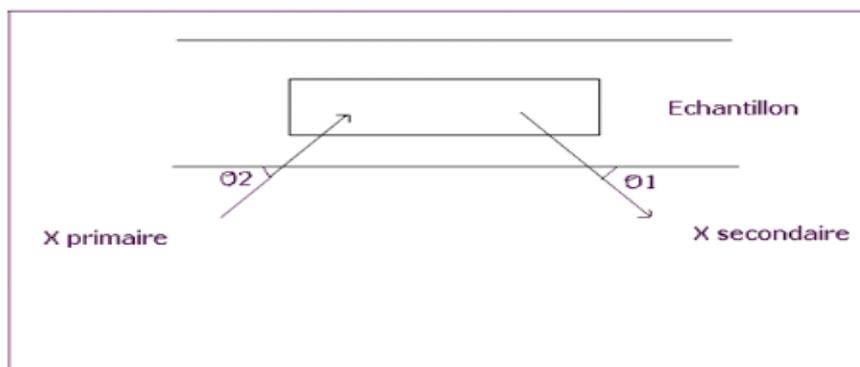


Figure II.5 : Schéma illustrant l'effet de l'absorption de rayon X. [56]

→ Si l'échantillon contient un ou plusieurs éléments de numéro atomique supérieur à celui de l'élément *i*, mais peu différent, le rayonnement de fluorescence de ces éléments peut induire à son tour la fluorescence de *i* ; contribuant ainsi à l'émission caractéristique de *i* ; Il y a donc renforcement ou accroissement du rayonnement mesuré [57].

→ En dehors des effets d'interactions fondamentales précédentes, la matrice peut intervenir par un effet de microabsorption (effet de texture) dû à l'inhomogénéité de l'échantillon.

Pour résoudre le problème des effets de matrice, il faut procéder à des corrections [57].

Parmi les méthodes de corrections utilisées, nous citons :

- Les méthodes quantitatives relatives,
- La méthode d'émission-transmission,
- La méthode des paramètres fondamentaux. [57]

La méthode quantitative relative (méthode des standards externes) a été retenue dans ce travail.

II.2.6.3.1 Méthode relative :

Méthodes des standards externes :

Le standard et l'échantillon doivent être de même nature et de concentrations connues, et sont irradiés et analysés dans les mêmes conditions expérimentales.

La comparaison des spectres expérimentaux permet de déterminer les concentrations des éléments dans l'échantillon.

La concentration de l'élément *i* est donnée selon l'expression suivante :

$$C_x = \frac{(I_{i.ech} - I_{i.bstd}) * m_{std}}{(I_{i.std} - I_{i.bstd}) * \Delta V} \quad \text{(II.5)}$$

Avec :

C_x : La concentration de l'élément *i* dans l'échantillon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),

I_{i.ech} : L'intensité de l'élément *i*,

I_{i.bstd} : L'intensité de l'élément *i* dans le blanc du standard,

I_{i.std} : L'intensité de l'élément *i* dans le standard,

m_{std} : La masse de l'élément *i* dans le standard (μg),

ΔV : Volume d'air aspiré pour chaque échantillon (m^3).

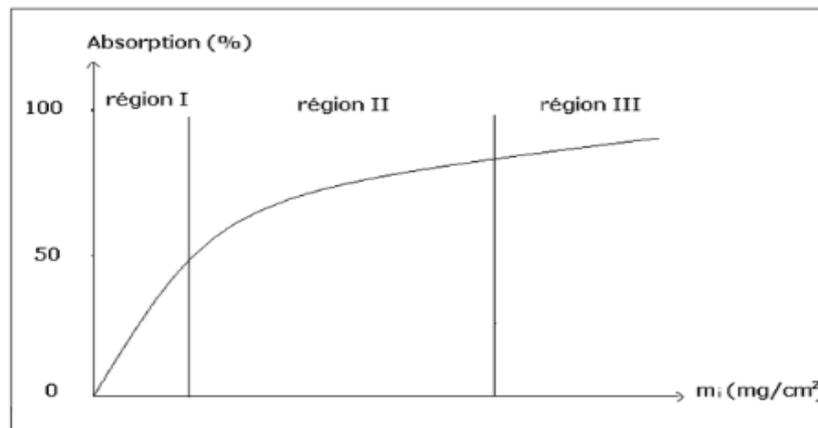


Figure II.6 : Intensité relative à l'émission X en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

La courbe de la figure II.6 montre la variation de l'intensité des rayons X émis en fonction de la masse sur la surface de l'échantillon irradié.

Les concentrations des éléments détectés sont déterminées à partir des aires X correspondantes. Le choix de la méthode de quantification dépend de l'épaisseur et de la nature de l'échantillon. La variation de l'intensité de la raie X relative à l'élément "i" à Analyser en fonction de l'épaisseur de l'échantillon permet de distinguer 3 zones (**Fig. II.6**) :

- **Région I (couche mince) :** Cas d'échantillon mince d'une épaisseur ($m < 0,1 \mu\text{m}$), les effets de matrice sont négligeables.
- **Région II (couche d'épaisseur intermédiaire) :** Cas d'échantillon moyennement épais d'une masse ($0.1 \mu\text{m} < m < 4.61 \mu\text{m}$), on utilise la méthode d'émission-Transmission.
- **Région III (couche épaisse) :** échantillon avec une épaisseur épaisse ($m \gg 4.61 \mu\text{m}$). On utilise la méthode des paramètres fondamentaux [57].

II.2.6.4 Caractéristiques de la technique :

La technique de fluorescence X est une méthode d'analyse rapide et non destructive. Cependant, certains inconvénients affectent sa sensibilité et la précision des mesures. On peut rappeler la présence de bruit de fond et l'atténuation des rayons X dans la matrice.

- **La sensibilité de la technique (XRF) :**

La sensibilité des éléments, est l'une des méthodes quantitatives qui sert à déterminer la sensibilité des lignes caractéristiques des étalons, en tenant compte de l'auto absorption dans

les étalons. Les sensibilités calculées sont ensuite utilisées pour déterminer les concentrations d'éléments dans des échantillons inconnus, en corrigeant à nouveau l'auto-absorption de l'échantillon. La composition de la matrice sombre doit être connue. Des échantillons intermédiaires épais et minces peuvent également être évalués, si leur densité aérienne est connue.

Si plus de 3 éléments standard sont trouvés, les valeurs de concentration des éléments de l'échantillon inconnu (non représentés par des standards) peuvent être interpolées et extrapolées. Les lignes $K\alpha$ et $L\alpha$ sont traitées indépendamment.

Il est supposé que le rayonnement d'excitation pour les étalons et les échantillons peut être représenté par une seule ligne de rayons X avec une énergie spécifiée [58].

La sensibilité d'un élément i est exprimée par la relation suivante :

$$S_i = \frac{I_i}{C_i} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

I_i : l'intensité de la raie X caractéristique de l'élément i (cps),

C_i : la concentration de l'élément i (ng).

- **Le bruit de fond et l'effet de matrice :**

En fluorescence X, l'intensité d'une raie X n'est pas toujours proportionnelle à la concentration de l'élément. Les autres atomes constituant l'échantillon modifient le signal par l'effet de matrice qui englobe deux phénomènes ; l'absorption et la fluorescence secondaire [7]. La diffusion Rayleigh est plus importante pour les éléments ayant un numéro atomique Z élevé alors que la diffusion Compton est plus importante pour les éléments de Z faible.

Ces deux phénomènes, la diffusion de Rayleigh et l'effet Compton, sont à l'origine du "Bruit de fond" du signal représenté par le fond continu des spectres [52].

- **Limite de détection (LLD) :**

L'expression "Lower Limit of Detection" (LLD) est souvent utilisée dans la littérature sur les rayons X pour représenter la plus petite quantité d'un élément dans un environnement donné. La limite de détection dépend de la source d'excitation employée et des conditions expérimentales dans lesquelles s'effectue l'analyse. Elle est de l'ordre de 10 ppm pour les

éléments tels que (Zn, Cu, Pb) et peut atteindre 100 ppm, voire 500 ppm pour les éléments légers.

$$LLD = \frac{3 \cdot \sqrt{BF}}{S_i} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

BF : La surface du bruit de fond,

S_i : La sensibilité d'un élément *i*.

- **Calcul d'erreurs :**

Les principales erreurs produites lors de l'analyse des métaux prélevés sur des filtres sont :

- L'erreur sur la masse de l'élément (Δm),
- L'erreur sur le volume d'air aspiré (ΔV),
- L'erreur sur l'intensité (ΔI),
- L'erreur sur la concentration de l'élément dans le standard (ΔC_{std}) [7]

En supposant que l'erreur sur le temps est nulle donc l'erreur pour la concentration finale (ΔC) des éléments se fait selon la formule suivante :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta C_{\text{std}}}{C_{\text{std}}} + \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{II.8})$$

II.2.6.5 Procédure d'analyse :

L'objectif de notre travail est l'étude qualitative et quantitative de la pollution atmosphérique par les métaux lourds liée aux PM-2.5 et PM-10 récoltées au niveau du CPMC Mustapha Pacha. L'analyse a été réalisée en utilisant la technique de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF).

Comme nous l'avons signalé plus tôt, Les métaux lourds Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co, et Cd du point de vue sanitaire ont une incidence importante, ont été analysés à l'aide de l'appareil Amptek Ink, un analyseur à XRF par énergie dispersive, contenant un tube à rayons X de type Mini-X (Anode - Argent) avec $K\alpha = 22.16 \text{ KeV}$ et $K\beta = 24.942 \text{ KeV}$, émettant des radiations quand l'appareil est allumé.

Les spectres obtenus par la (ED-XRF) permettent d'identifier les éléments contenus dans nos échantillons analysés. Les intensités des pics (**figure II.7**) permettent de quantifier les concentrations des éléments.

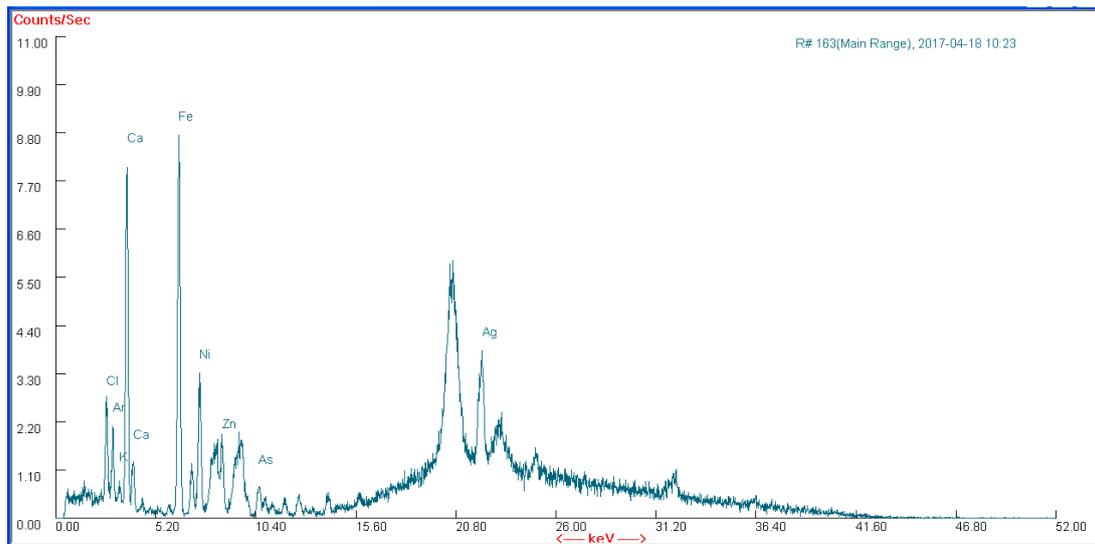


Figure II.7 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon.

II.3 Analyse par spectromètre à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF) :

II.3.1 Introduction :

Les spectromètres (WD-XRF) utilisent un cristal d'analyse pour disperser les différentes énergies. Tout le rayonnement provenant de l'échantillon tombe sur le cristal. Le cristal diffracte les différentes énergies dans différentes directions, à la manière d'un prisme qui disperse différentes couleurs dans différentes directions. Les sections suivantes donnent plus en détail une description de tous les composants individuels du spectromètre.

II.3.2 Principe d'analyse par (Wavelength dispersive Spectrometry):

Pour (WDS), le système de détection est constitué d'un ensemble de collimateurs, d'un cristal de diffraction et d'un détecteur.

Les rayons X provenant de l'échantillon tombent sur le cristal et le cristal diffracte (réfléchit) les rayons X avec différentes longueurs d'onde (énergies) dans différentes directions. En plaçant le détecteur à un certain angle (**figure II.8.1 et II.8.2**), l'intensité des rayons X d'une certaine longueur d'onde peut être mesurée [59].

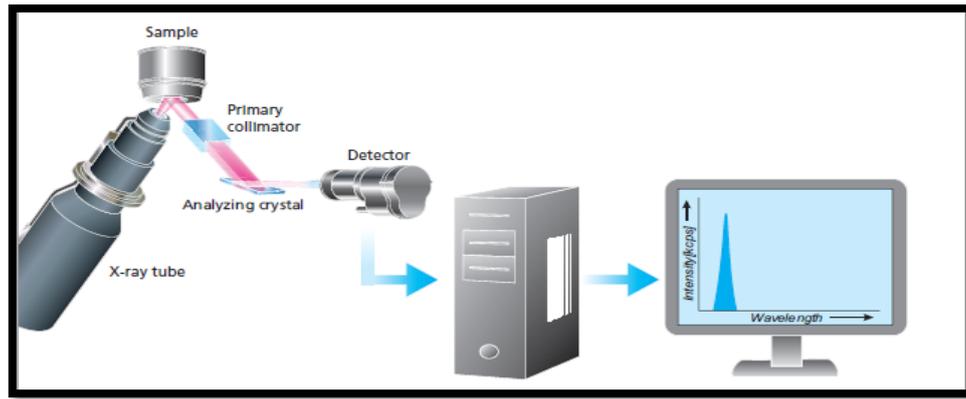


Figure II.8.1 : Conception de base du spectromètre WD-XRF.

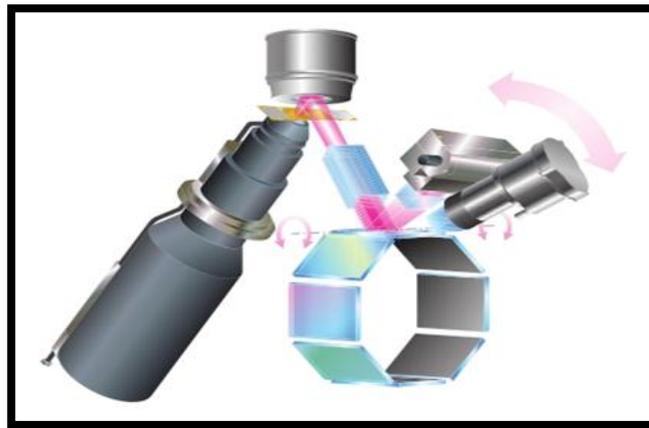


Figure II.8.2 : spectromètre dispersif en longueur d'onde avec optique 2D et excitation directe.

II.3.3 Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental de type (Panalytical Pw 2440. MagiX PRO Super Q vs 3) (**figure II.3.1**) qui se trouve au niveau de laboratoire (WDXRF) dans le Centre de Recherche nucléaire d'Alger (CRNA) ; est composé d'une source excitatrice (tube à rayons X : Rhodium (RH)) et d'une chaîne de spectrométrie contenant 8 cristaux, deux collimateurs, le premier : sélectionne les rayons émis par l'échantillon qui vont frapper le cristal, le deuxième : restreint la divergence des rayons qui proviennent du cristal (**figure II.8.3**) . Lors de l'irradiation, un compteur à flux gazeux sera mieux adapté pour de faibles énergies, et un compteur à scintillation sera mieux adapté pour de fortes énergies. Tout un système de refroidissement par eau désionisée, est utilisé pour le protéger de la hausse des températures.

On récolte alors l'intensité du signal en fonction de la déviation 2θ du faisceau. L'énergie ($h\nu$) des photons diffractés avec une déviation 2θ (**figure II.8.4**) est donnée par la loi de Bragg [60] :

$$2.d.\sin \theta = n.\lambda \quad (\text{II.9})$$

Avec :

λ = longueur d'onde du rayonnement X incident,

n = ordre de la réflexion (entier positif),

d = distance inter réticulaire du cristal analyseur,

θ = angle d'incidence du rayonnement X

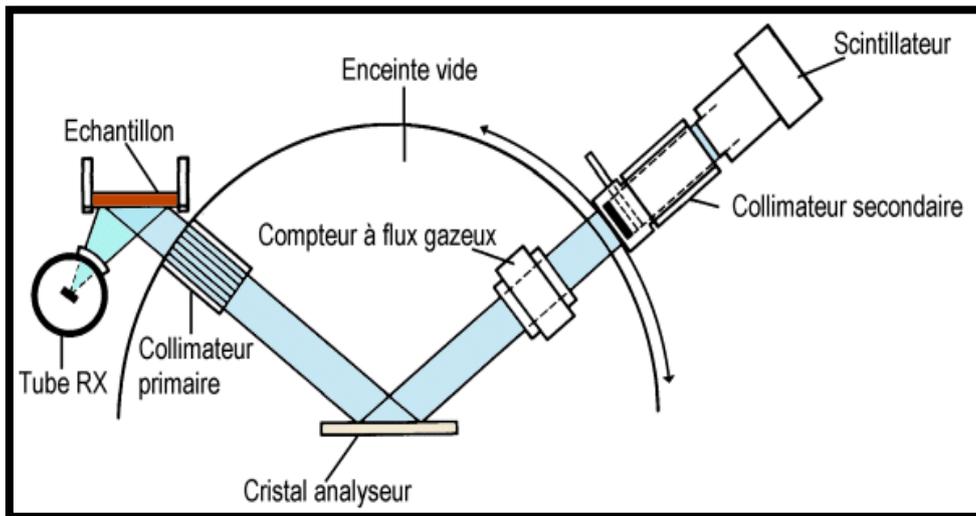


Figure II.8.3 : Spectromètre dispersif en longueur d'onde. [61]

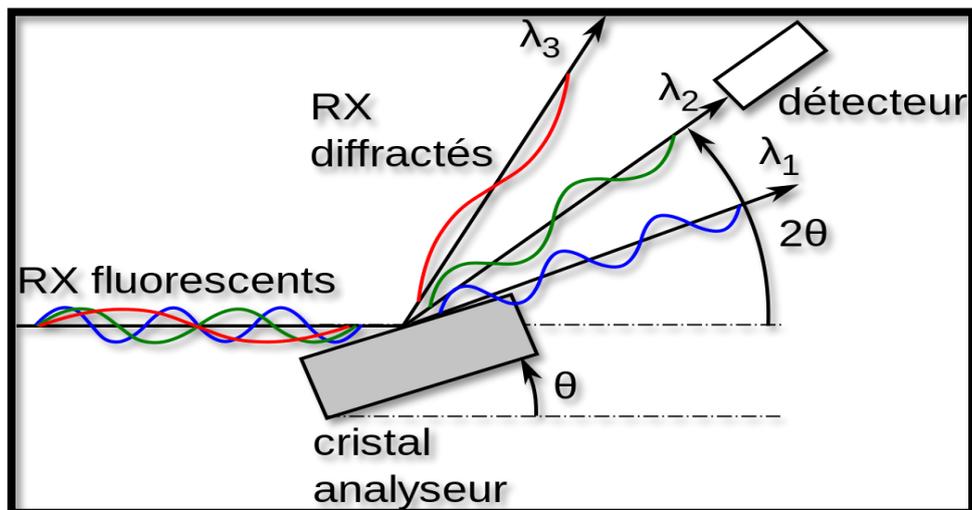


Figure II.8.4: Séparation des longueurs d'onde par diffraction sur un cristal. [62]

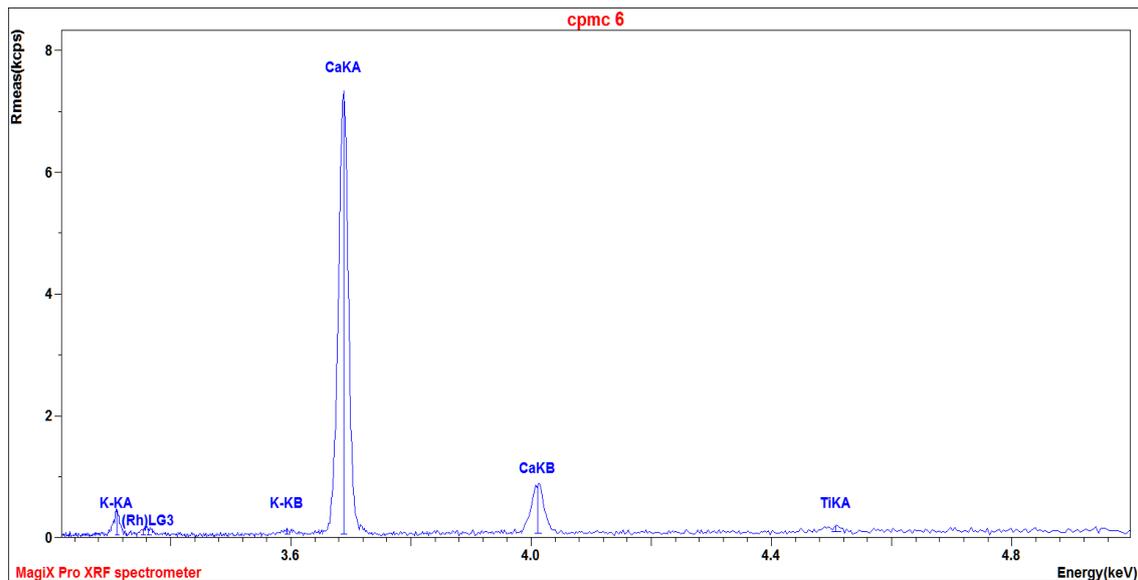


Figure II.8.5 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent par la technique (WD-XRF) de l'échantillon (CPMC6).

II.4 Spectrométrie d'émission atomique de plasma à couplage inductif (ICP-AES) :

L'ICP-AES, ou simplement l'ICP, est une technique d'analyse multi élémentaire qui va dissocier un échantillon en ses différents atomes et va les forcer à émettre à une longueur d'onde qui leur est caractéristique après les avoir excités. Ces atomes sont excités thermiquement par une source plasma à couplage inductif ; ici, un plasma d'argon. On utilise en sortie un monochromateur qui sépare les différentes longueurs d'onde, ainsi qu'un détecteur pour mesurer l'intensité des raies émises.

Le plasma est utilisé pour exciter les atomes. Une fois excité, un atome va revenir à son état fondamental en émettant de la lumière à une longueur d'onde caractéristique. Le monochromateur a comme fonction de diriger ces longueurs d'onde vers un détecteur. Une source plasma typique est schématisée par la (**Figure II.9**) [61] :

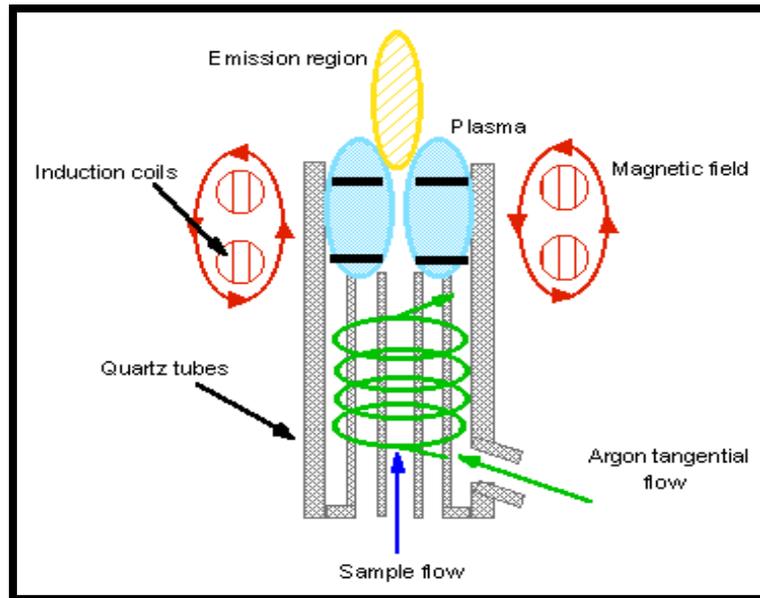
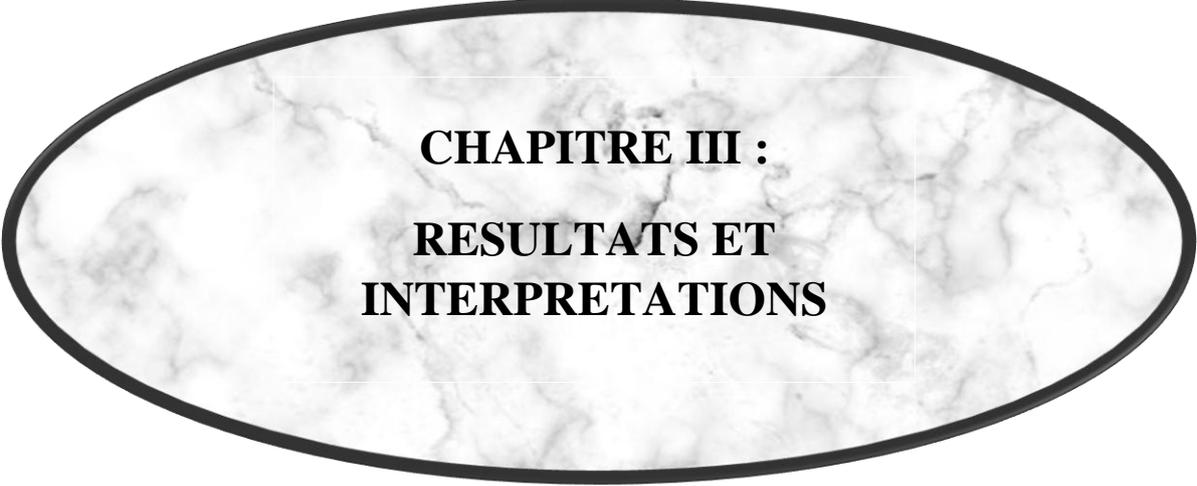


Figure II.9 : Une source à plasma d'argon. [60]

Le flux d'argon est représenté en vert et le flux d'échantillon est représenté en bleu. Initialement, l'argon passe dans le tube de quartz et est excité (ionisé) au bout de celui-ci par un champ magnétique créé par des bobines (en général à une fréquence de 30 MHz pour une puissance de 2 kW). On obtient un plasma (zone bleue), dont la température atteint 10000K.

L'échantillon quant à lui se présente la plupart du temps en solution, il faut donc le passer sous forme d'un aérosol à l'aide d'un nébuliseur [61].



CHAPITRE III :
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

III. Résultats et interprétations :

III.1 Etude des teneurs en matières particulaires (PM-2,5 et PM-10) dans l'air :

L'étude des niveaux de pollution par fraction des particules atmosphériques a été effectuée du 17 novembre 2017 au 18 mars 2018 à raison de trois échantillonnages par semaine pendant 24 heures chacun.

Chaque prélèvement compte deux fractions de particules les PM-2,5 et les PM-10 et on constate que les filtres pollués sont de couleur sombre, ce qui signifie que ces particules proviennent essentiellement par les émissions du trafic routier.

La mesure des particules est principalement basée sur les mesures de concentration en masse, conformément aux recommandations de la directive européenne. [25] La méthode de mesure présentée ici permet de donner la concentration de particules dans l'air en $\mu\text{g} / \text{m}^3$ quels que soient la taille, le nombre, ou la composition des particules.

Après avoir collecté les échantillons qui ont été échantillonnés, pesés et analysés, nous avons trouvé deux types de résultats : Les teneurs en (PM-2,5 et PM-10) dans l'air et les concentrations des métaux lourds qui sont présents dans ces derniers.

Les concentrations des PM-2,5 et PM-10 obtenus pendant la période d'échantillonnage avec la masse et le volume sont illustrées dans les deux tableaux (III.1 et III.2).

Les concentrations des (PM-2,5) varient entre 0,55 et 36,29 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ avec une moyenne de 8,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, par contre pour les (PM-10) leurs concentrations varient entre 4,35 et 93,88 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ avec une moyenne de 37,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau III.1 : Les charges des PM-2,5 au niveau du CPMC-Mustapha Pacha.

| Nombre d'échantillon | Jour | Code | ΔM (μg) | ΔV (m^3) | PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Valeur limite journalière | Objectif qualité |
|----------------------|------------|--------|------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|------------------|
| 1 | 17/11/2017 | CPMC3 | 650 | 19,43 | 36,29 | 25 | 20 |
| 2 | 19/11/2017 | CPMC5 | 220 | 19,09 | 12,50 | 25 | 20 |
| 3 | 22/11/2017 | CPMC7 | 160 | 20,14 | 8,62 | 25 | 20 |
| 4 | 24/11/2017 | CPMC9 | 110 | 9,89 | 12,07 | 25 | 20 |
| 5 | 26/11/2017 | CPMC11 | 110 | 28,87 | 4,13 | 25 | 20 |
| 6 | 01/12/2017 | CPMC15 | 100 | 20,08 | 5,40 | 25 | 20 |

| | | | | | | | |
|----|------------|---------|-----|-------|-------------|-----------|-----------|
| 7 | 03/12/2017 | CPMC17 | 190 | 39,69 | 5,19 | 25 | 20 |
| 8 | 08/12/2017 | CPMC21 | 150 | 20,47 | 7,95 | 25 | 20 |
| 9 | 10/12/2017 | CPMC23 | 100 | 20,30 | 5,34 | 25 | 20 |
| 10 | 13/12/2017 | CPMC25 | 280 | 18,73 | 16,22 | 25 | 20 |
| 11 | 15/12/2017 | CPMC27 | 120 | 20,57 | 6,33 | 25 | 20 |
| 12 | 17/12/2017 | CPMC29 | 130 | 19,83 | 7,11 | 25 | 20 |
| 13 | 20/12/2017 | CPMC31 | 110 | 20,60 | 5,79 | 25 | 20 |
| 14 | 27/12/2017 | CPMC37 | 60 | 20,56 | 3,17 | 25 | 20 |
| 15 | 29/12/2017 | CPMC39 | 110 | 20,26 | 5,89 | 25 | 20 |
| 16 | 31/12/2017 | CPMC41 | 100 | 18,84 | 5,76 | 25 | 20 |
| 17 | 03/01/2018 | CPMC43 | 170 | 19,89 | 9,27 | 25 | 20 |
| 18 | 05/01/2018 | CPMC45 | 320 | 19,61 | 17,70 | 25 | 20 |
| 19 | 07/01/2018 | CPMC47 | 180 | 20,25 | 9,64 | 25 | 20 |
| 20 | 14/01/2018 | CPMC53 | 90 | 19,18 | 5,09 | 25 | 20 |
| 21 | 17/01/2018 | CPMC55 | 210 | 18,93 | 12,03 | 25 | 20 |
| 22 | 19/01/2018 | CPMC57 | 210 | 19,79 | 11,51 | 25 | 20 |
| 23 | 21/01/2018 | CPMC59 | 210 | 20,01 | 11,38 | 25 | 20 |
| 24 | 24/01/2018 | CPMC61 | 250 | 18,89 | 14,36 | 25 | 20 |
| 25 | 26/01/2018 | CPMC63 | 120 | 20,19 | 6,45 | 25 | 20 |
| 26 | 28/01/2018 | CPMC65 | 100 | 20,37 | 5,32 | 25 | 20 |
| 27 | 04/02/2018 | CPMC71 | 90 | 19,22 | 5,08 | 25 | 20 |
| 28 | 11/02/2018 | CPMC77 | 160 | 20,57 | 8,43 | 25 | 20 |
| 29 | 14/02/2018 | CPMC79 | 60 | 20,04 | 3,25 | 25 | 20 |
| 30 | 18/02/2018 | CPMC83 | 70 | 19,64 | 3,87 | 25 | 20 |
| 31 | 21/02/2018 | CPMC85 | 60 | 20,08 | 3,24 | 25 | 20 |
| 32 | 23/02/2018 | CPMC87 | 240 | 19,83 | 13,13 | 25 | 20 |
| 33 | 28/02/2018 | CPMC91 | 120 | 20,08 | 6,48 | 25 | 20 |
| 34 | 02/03/2018 | CPMC93 | 170 | 20,00 | 9,22 | 25 | 20 |
| 35 | 07/03/2018 | CPMC97 | 10 | 19,64 | 0,55 | 25 | 20 |
| 36 | 11/03/2018 | CPMC101 | 40 | 19,95 | 2,17 | 25 | 20 |
| 37 | 14/03/2018 | CPMC103 | 230 | 19,76 | 12,62 | 25 | 20 |
| 38 | 16/03/2018 | CPMC105 | 180 | 19,88 | 9,05 | 25 | 20 |
| 39 | 18/03/2018 | CPMC107 | 70 | 19,78 | 3,54 | 25 | 20 |

Tableau III.2 : Les charges des PM-10 au niveau du CPMC-Mustapha Pacha.

| Nombre d'échantillon | Jour | Code | ΔM (μg) | ΔV (m³) | PM₁₀ (μg/m³) | Valeur limite journalière | Objectif qualité |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|---------------------------|---|----------------------------------|-------------------------|
| 1 | 17/11/2017 | CPMC4 | 800 | 19,43 | 80,96 | 50 | 35 |
| 2 | 19/11/2017 | CPMC6 | 940 | 19,09 | 65,90 | 50 | 35 |
| 3 | 22/11/2017 | CPMC8 | 740 | 20,14 | 48,47 | 50 | 35 |
| 4 | 24/11/2017 | CPMC10 | 550 | 9,89 | 72,40 | 50 | 35 |
| 5 | 26/11/2017 | CPMC12 | 690 | 28,87 | 30,05 | 50 | 35 |
| 6 | 01/12/2017 | CPMC16 | 30 | 20,08 | 4,35 | 50 | 35 |
| 7 | 03/12/2017 | CPMC18 | 350 | 39,69 | 19,63 | 50 | 35 |
| 8 | 08/12/2017 | CPMC22 | 130 | 20,47 | 14,90 | 50 | 35 |
| 9 | 10/12/2017 | CPMC24 | 260 | 20,30 | 19,68 | 50 | 35 |
| 10 | 13/12/2017 | CPMC26 | 490 | 18,73 | 43,14 | 50 | 35 |
| 11 | 15/12/2017 | CPMC28 | 70 | 20,57 | 10,25 | 50 | 35 |
| 12 | 17/12/2017 | CPMC30 | 920 | 19,83 | 57,17 | 50 | 35 |
| 13 | 20/12/2017 | CPMC32 | 190 | 20,60 | 15,81 | 50 | 35 |
| 14 | 27/12/2017 | CPMC38 | 300 | 20,56 | 19,04 | 50 | 35 |
| 15 | 29/12/2017 | CPMC40 | 290 | 20,26 | 21,85 | 50 | 35 |
| 16 | 31/12/2017 | CPMC42 | 1070 | 18,84 | 67,04 | 50 | 35 |
| 17 | 03/01/2018 | CPMC44 | 380 | 19,89 | 30,12 | 50 | 35 |
| 18 | 05/01/2018 | CPMC46 | 440 | 19,61 | 41,48 | 50 | 35 |
| 19 | 07/01/2018 | CPMC48 | 350 | 20,25 | 28,93 | 50 | 35 |
| 20 | 14/01/2018 | CPMC54 | 630 | 19,18 | 40,79 | 50 | 35 |
| 21 | 17/01/2018 | CPMC56 | 840 | 18,93 | 59,62 | 50 | 35 |
| 22 | 19/01/2018 | CPMC58 | 420 | 19,79 | 34,40 | 50 | 35 |
| 23 | 21/01/2018 | CPMC60 | 410 | 20,01 | 34,29 | 50 | 35 |
| 24 | 24/01/2018 | CPMC62 | 540 | 18,89 | 44,44 | 50 | 35 |
| 25 | 26/01/2018 | CPMC64 | 260 | 20,19 | 20,35 | 50 | 35 |
| 26 | 28/01/2018 | CPMC66 | 340 | 20,37 | 23,74 | 50 | 35 |
| 27 | 04/02/2018 | CPMC72 | 640 | 19,22 | 40,86 | 50 | 35 |
| 28 | 11/02/2018 | CPMC78 | 1330 | 20,57 | 78,77 | 50 | 35 |

| | | | | | | | |
|----|------------|---------|------|-------|--------------|-----------|-----------|
| 29 | 14/02/2018 | CPMC80 | 430 | 20,04 | 26,67 | 50 | 35 |
| 30 | 18/02/2018 | CPMC84 | 520 | 19,64 | 32,49 | 50 | 35 |
| 31 | 21/02/2018 | CPMC86 | 260 | 20,08 | 17,32 | 50 | 35 |
| 32 | 23/02/2018 | CPMC88 | 600 | 19,83 | 45,83 | 50 | 35 |
| 33 | 28/02/2018 | CPMC92 | 780 | 20,08 | 48,63 | 50 | 35 |
| 34 | 02/03/2018 | CPMC94 | 200 | 20,00 | 20,24 | 50 | 35 |
| 35 | 07/03/2018 | CPMC98 | 1690 | 19,64 | 93,88 | 50 | 35 |
| 36 | 11/03/2018 | CPMC102 | 380 | 19,95 | 22,85 | 50 | 35 |
| 37 | 14/03/2018 | CPMC104 | 460 | 19,76 | 37,79 | 50 | 35 |
| 38 | 16/03/2018 | CPMC106 | 200 | 19,88 | 20,78 | 50 | 35 |
| 39 | 18/03/2018 | CPMC108 | 220 | 19,78 | 15,86 | 50 | 35 |

→ La (figure III.1) montre que la teneur des PM-10 est toujours supérieurs à celle des PM-2,5. On observe que les PM-10 et PM-2,5 suivent un développement similaire. Cette similitude indique que ces particules atmosphériques ont en grande partie la même origine, la même source de pollution et que cette teneur élevée en PM-10 ne conduit pas automatiquement à une teneur plus élevée en PM-2,5. Ceci s'explique par le fait qu'une partie importante des PM-10 est constituée de particules grossières qui proviennent d'une autre source (émissions du trafic routier).

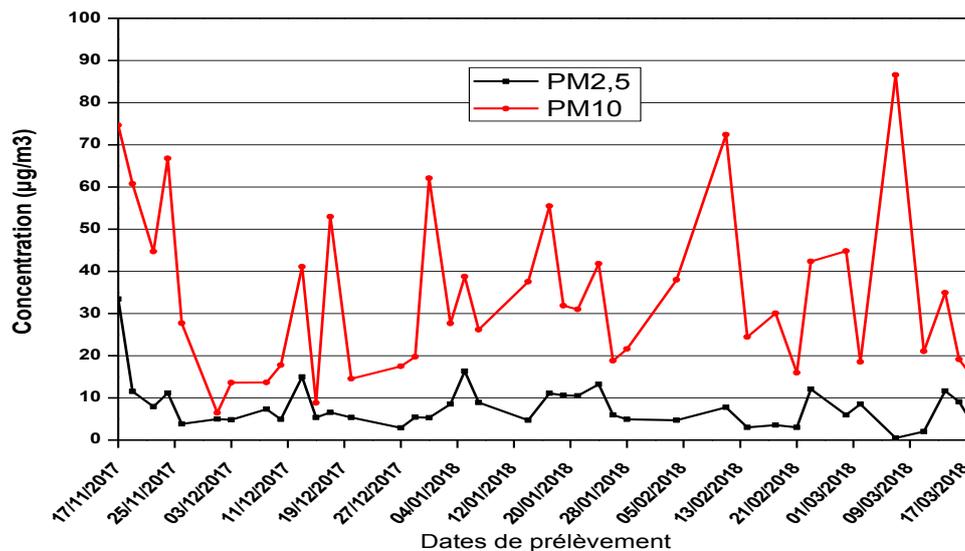


Figure III.1 : Evolution des teneurs en PM-2,5 et PM-10 collectées au CPMC-Mustapha.

→ La (figure III.2) indique que sur les 62 échantillons collectés, les concentrations des deux fractions particulaires sont réparties comme suit :

(a) pour les PM-2.5,

- 1 échantillon dépasse la valeur guide de protection de la santé préconisées par l’OMS ($25\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- 61 échantillons sont au-dessous de la valeur guide d’OMS (voir chapitre I ampleur de la pollution).

(b) pour les PM-10,

- 8 échantillons dépassent la valeur guide de protection de la santé recommandées par l’OMS ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- 54 échantillons sont au-dessous de la valeur guide d’OMS (voir chapitre I ampleur de la pollution).

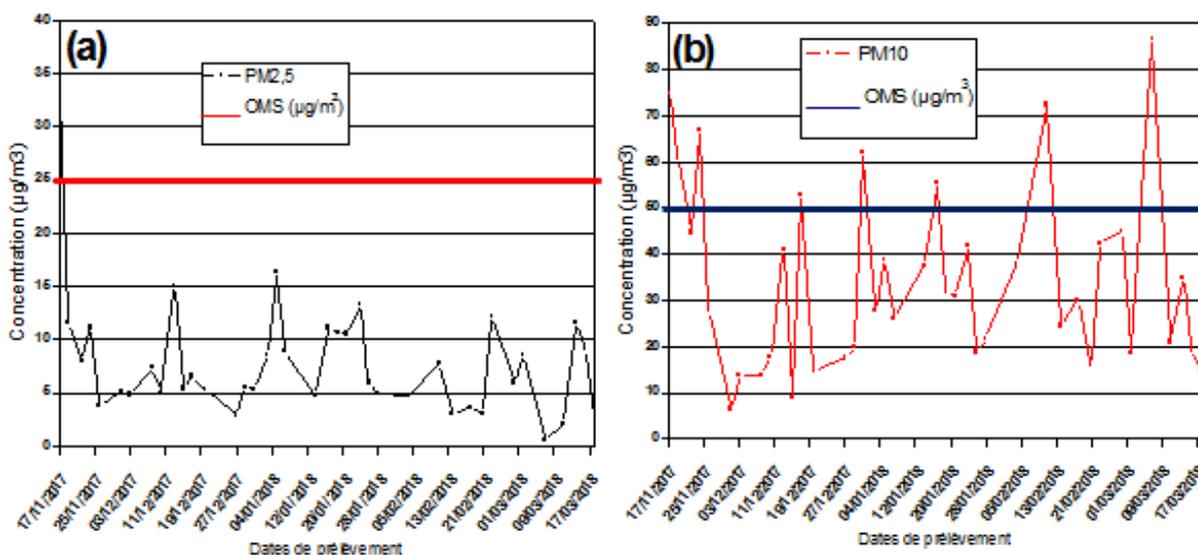


Figure III.2 : Comparaison entre la concentration des matières particulaires et la valeur guide d’OMS : (a) pour les (PM-2.5), (b) pour les PM-10.

III.1.1 Etude des teneurs en (PM-2.5 et PM-10) en fonction des paramètres météorologiques :

La météorologie joue un rôle important dans la répartition de la pollution atmosphérique.

En fait, il existe un fort facteur saisonnier dans les variables météorologiques pour normaliser les niveaux de qualité de l'air.

L'importance des facteurs météorologiques dans la phase de transport et la propagation du cycle de pollution atmosphérique ont été identifiées. Les facteurs météorologiques tels que l'humidité, la vitesse du vent, les précipitations et la température jouent tous un rôle important dans la détermination des niveaux de polluants pour un taux de rejet de polluant particulier.

- L'humidité** : L'humidité durant la période de collection étudiée varie entre 37 à 96%. L'humidité maximale a été observée le 10/12/2017 et l'humidité minimale a été notée le 22 et le 24/11/2017. Nous notons que le taux d'humidité réduit la pollution atmosphérique et que ce facteur est important dans la variation des concentrations en matières particulaires. La tendance générale constatée est que la variation des concentrations suit sensiblement l'allure de variation des taux d'humidités enregistrés durant la période de collections concernée par cette étude.

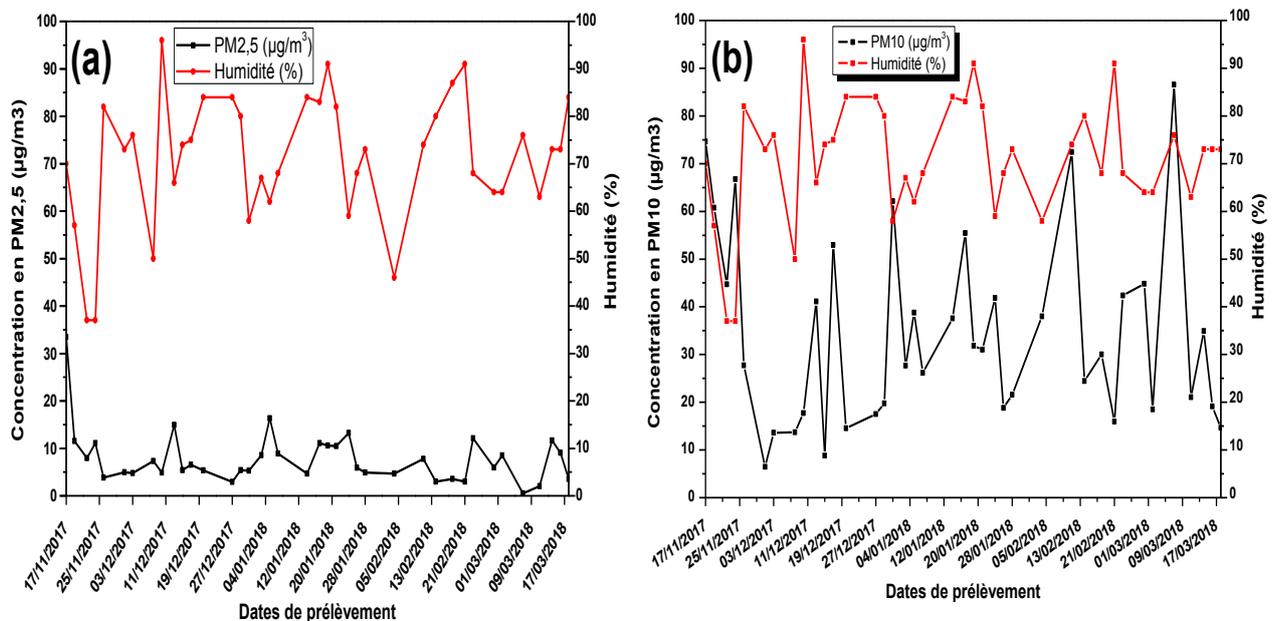


Figure III.3: Variation de la teneur en matière particulaires et de l'humidité pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10.

- Les Précipitations** : La période allant du 24/11/2017 au 18/03/2018 n'a connu que 19 jours de pluie. L'influence des précipitations en fonction des teneurs en PM-2.5 et PM-10 (illustrée en **figure III.4**) et la relation de corrélation directe entre les teneurs en matières particulaires et les précipitations met nettement en évidence la décroissance des teneurs durant ces 19 jours-là. On peut dire qu'il y a un phénomène de lessivage qui a tendance à réduire les niveaux des concentrations des polluants.

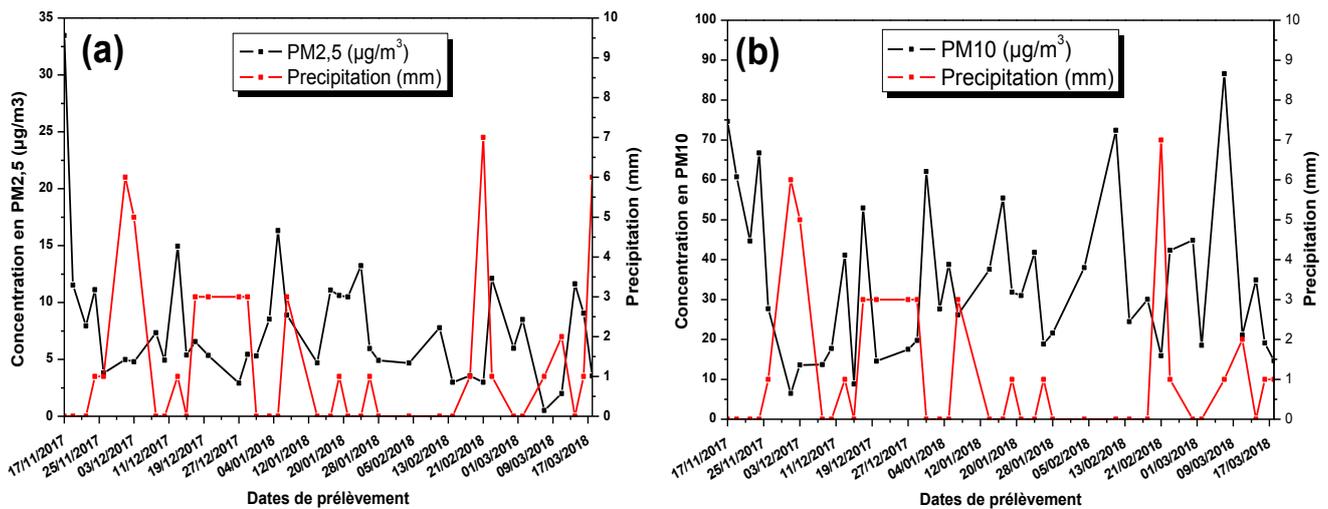


Figure III.4 : Variation de la teneur en matière particulaires et de la précipitation pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10.

- La vitesse de vent :** L'étude des variations de la vitesse du vent en fonction des teneurs en PM-2.5 et PM-10 est illustrée ci-dessous (**figure III.5**). La vitesse du vent varie entre 8 km/h et 31 km/h pendant la période de prélèvement. La vitesse minimale a été observée le 17 et 19/11/2017 et le 24/01/2018 par contre la vitesse maximale a été enregistrée le 27/12/2017. Les teneurs les plus basses ont été observés les jours de vents violents, bien entendu, les teneurs les plus élevées semblent être associées aux jours de vent faible.

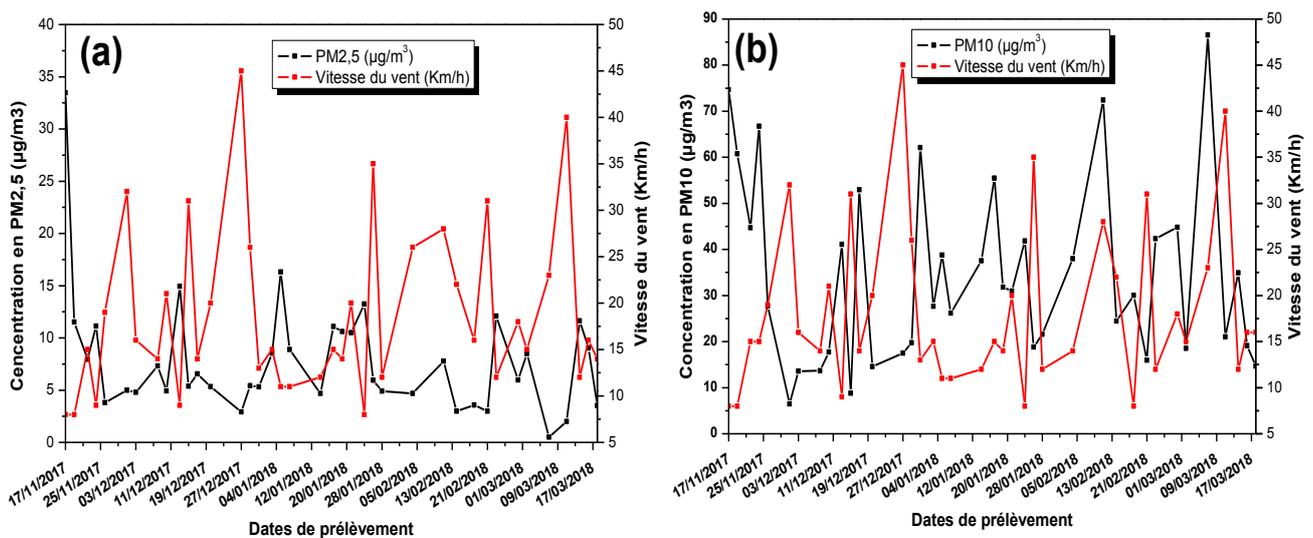


Figure III.5 : Variation de la teneur en matière particulaires et de la vitesse de vent pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10.

- La température :** La température atmosphérique moyenne varie entre 9°C et 19°C. Une température minimale de 9°C, a été enregistrée le 11 et le 23/02/2017 et une température maximale de 19°C, a été enregistrée le 24/11/2017 et le 28/02/2018. La température moyenne enregistrée pour les trois mois d'échantillonnage est de 13.63°C. L'étude de l'effet de la température sur les changements quotidiens des PM-2,5 et les PM-10 montre que la tendance suit sensiblement celle de la variation des températures pour les particules fines PM2.5 (**FigureIII-6**). Concernant la tendance de variation des particules fines PM10, on n'observe pas de relation apparente. Les concentrations des PM10 varient indépendamment de celle des températures.

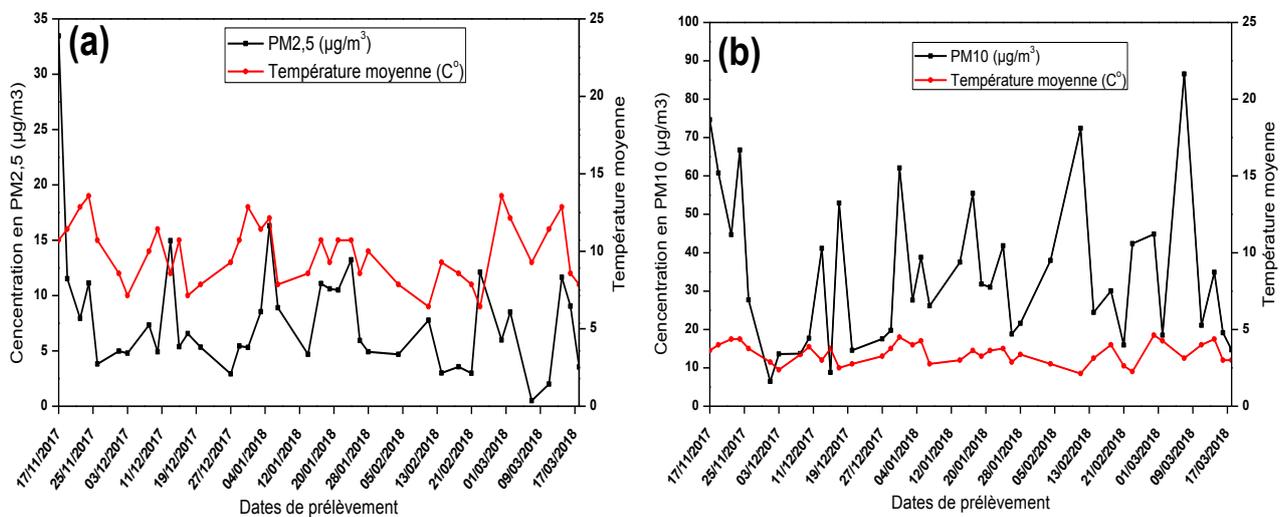


Figure III.6 : Variation de la teneur en matière particulaire et de la température moyenne pendant la période de prélèvement : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10.

III.1.2 Etude des teneurs en black carbon dans les deux fractions (PM-2.5 et PM-10) :

La première étape du calcul de la concentration ambiante de fumée noire consiste à mesurer l'obscurité des tâches de fumée provenant de l'échantillonneur. Ceci est réalisé à l'aide du réflectomètre photo-électrique (SSR).

Parmi les méthodes de mesures du carbone noir, nous a permet de calculer les teneurs en carbone noir pour les deux types de fractions atmosphériques. Nous avons obtenu des concentrations de carbone noir dans nos échantillons, comme indiqué dans la **figure III.7**.

La figure III.7, indique la variation en concentration du (black carbon) pour les PM-2.5 et les PM-10 durant la période d'échantillonnage étudiée. Elles varient entre 2,97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 8,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2.5 et entre 2.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 11.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10. Ces teneurs sont liées aux valeurs des réflectances obtenues du réflectomètre. On note que lorsque la réflectance est élevée, la valeur de la concentration du (black carbon) est également élevée.

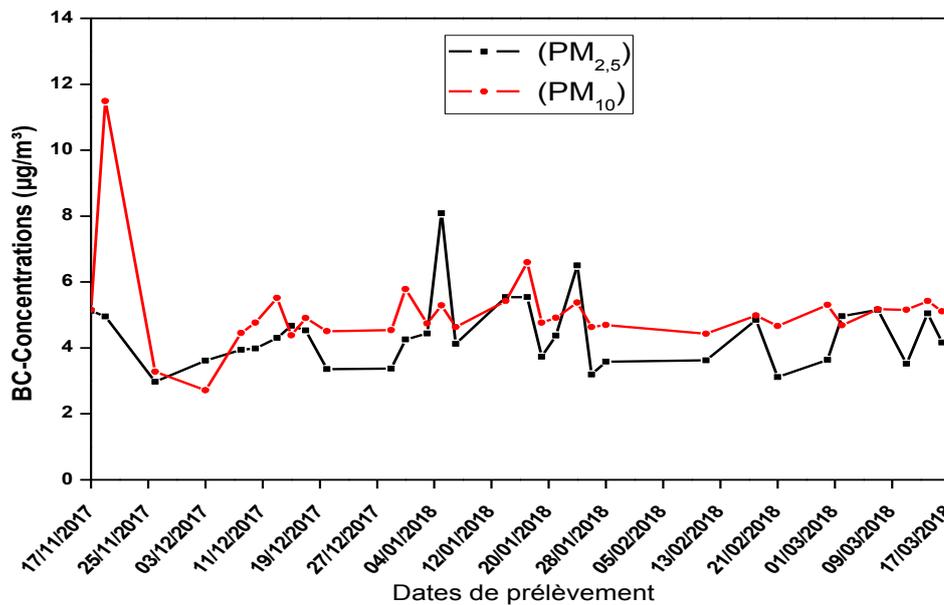


Figure III.7 : Concentrations en carbone noir dans les deux fractions particulaires pendant la période d'échantillonnage.

III.1.3 Etude des teneurs en métaux lourds dans l'air :

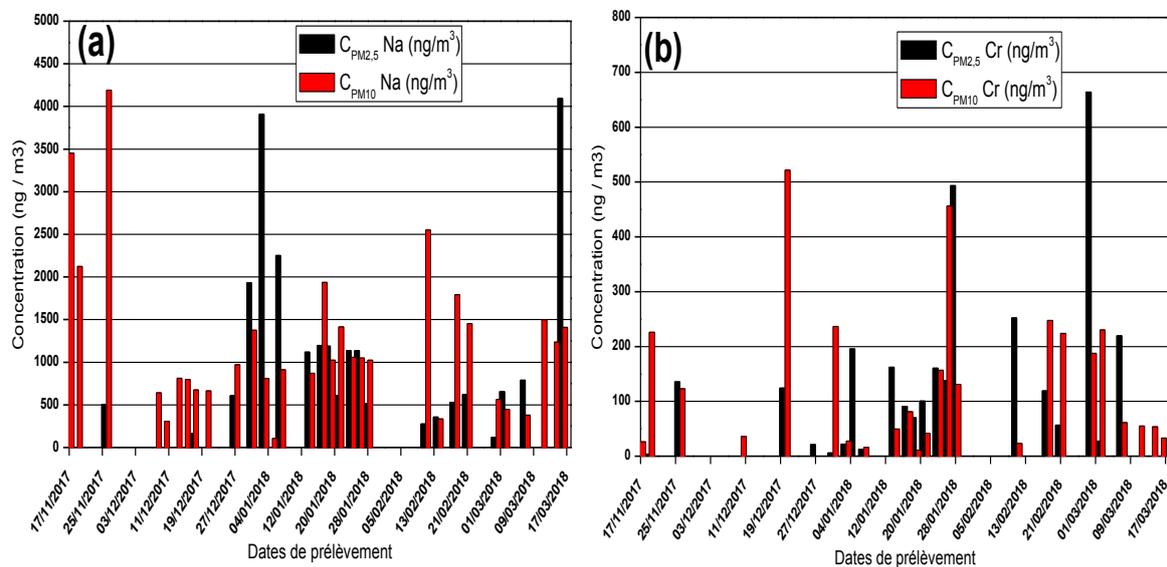
Une fois que les échantillons ont été analysés à l'aide de la technique ED-XRF et que les données ont été traitées qualitativement et quantitativement, nous avons obtenu les concentrations des différents métaux à effet toxique afin d'évaluer la qualité d'air de la zone d'étude, illustrées dans les figures ci-dessous (figure III.8 – III.11) :

La figure III.8 montre que :

- (a) Les concentrations du (Na) varient dans l'intervalle de 308 ng/m^3 à 4191 ng/m^3 . Pour les PM-10 et de 165 ng/m^3 à 4092 ng/m^3 pour les PM-2,5. Les teneurs en (Na) sont très importantes et cela s'explique par la proximité du site d'étude de la mer.

Donc, les embruns marins sont l'unique source de la présence de cet élément dans l'air. La présence ou l'absence de pluie, la vitesse du vent contrôlent la teneur en Sodium dans l'air.

- (b) Les concentrations du (Cr) varient dans l'intervalle de 0 ng/m³ à 664.18 ng/m³. Pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 521,48 ng/m³ pour les PM-10. L'absence de norme pour ce métal nous empêche d'évaluer les niveaux de pollution. Ces valeurs, nus porte à dire que ces niveaux sont sensiblement élevés. Diverses installations (usines) situées à proximité du site d'échantillonnage produisent peuvent être à l'origine des émissions du (Cr) dans l'air.
- (c) Les concentrations du (Mn) varient dans l'intervalle de 0 ng/m³ à 867,6 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 2578 ng/m³ pour les PM-10. La valeur maximale a été observée le 21/02/2018. Ces valeurs sont aussi élevées. Elle dénote de l'intensité du trafic qui est très probablement la source de ce polluant.
- (d) Les teneurs du (Fe) changent dans une large gamme. Elles sont de 0 ng/m³ à 19310,31 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 8566,92 ng/m³ pour les PM-10. Mais la présence de ce métal dans l'air avec ces concentrations est principalement due à l'abrasion des freins et on soupçonne aussi l'incinération des déchets ou certaines l'industrie métallique qui pourrait exister dans la proximité du site d'échantillonnage. Les facteurs météorologiques (vent, pluie, ...) ont aussi une certaine peuvent régir l'augmentation ou la diminution du (Fe) dans l'air.



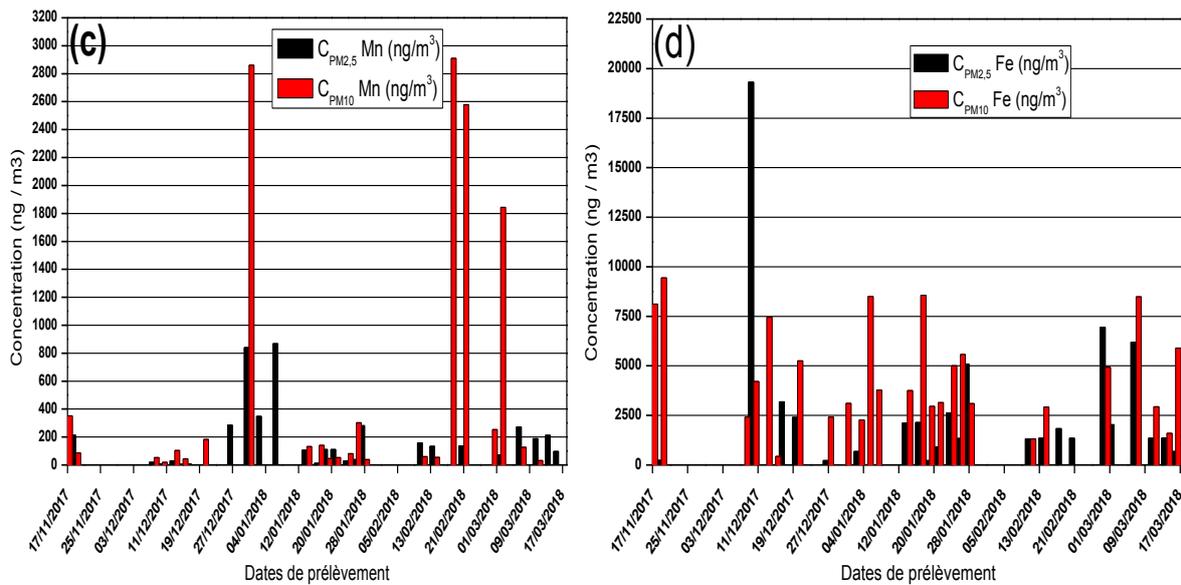


Figure III.8 : Evolution des concentrations du (Na, Cr, Mn, Fe) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Sodium, (b) teneurs en Chrome, (c) teneurs en Manganèse, (d) teneurs en Fer.

La figure III.9 présente :

- (a) Les teneurs du Nickel varient de 0 ng/m³ à 1182,78 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 521,64 ng/m³ pour les PM-10. Ces valeurs montrent un niveau élevé de concentrations qui dépassent largement la valeur limite de l'OMS (20ng/m³) qui ne peut être dissocié de l'intensité du trafic urbain sur le site d'échantillonnage. Le nickel est un métal caractéristique à la pollution due aux moteurs diesel.
- (b) Les concentrations du (Zn) sont élevées pendant la période d'échantillonnage. Elles varient de 0 ng/m³ à 1336,87 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 2696,82 ng/m³ pour les PM-10. Malgré son effet toxique à fortes doses, il n'existe aucune norme spécifique pour cet élément afin de juger de sa limite et de sa présence dans l'air.
- (c) Les concentrations en molybdène dans l'air oscillent de 0 ng/m³ à 158,51 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 0 ng/m³ à 220,66 ng/m³ pour les PM-10. Notons que la valeur maximale a été obtenue le 15/12/2017, Cette différence est due à la direction et à la force du vent qui était de 31 km / h le 15/12/2017.
- (d) D'après la Figure III.9, le Strontium, se trouve dans les deux fractions des particules atmosphériques. Les teneurs en (Sr) fluctuent entre 0ng/m³ et 400,17 ng/m³ pour les PM-2.5 et entre 5,11 ng/m³ et 569,99 ng/m³ pour les PM-10.

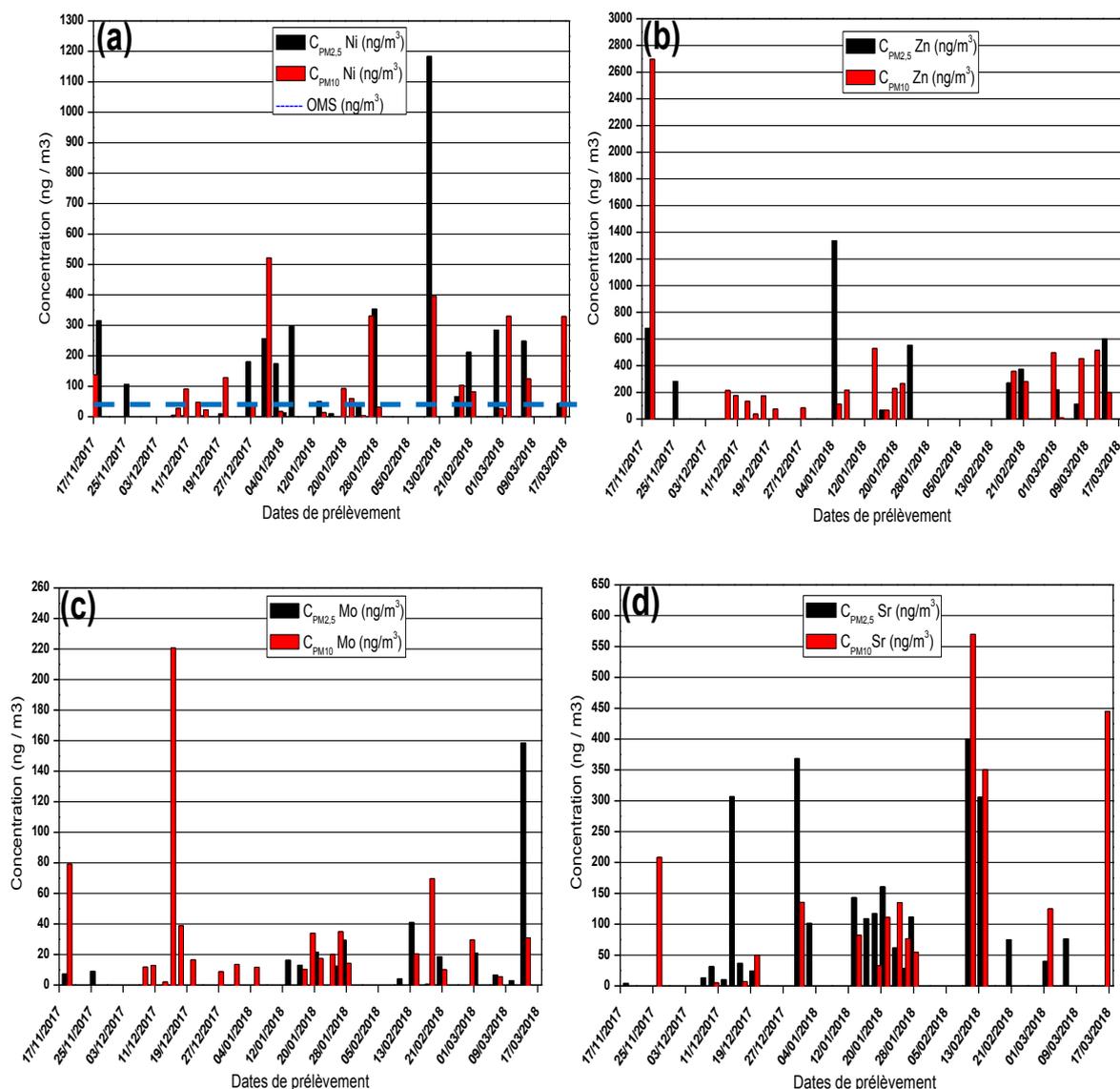


Figure III.9 : Evolution des concentrations du (Ni, Zn, Mo, Sr) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Nickel, (b) teneurs en Zinc, (c) teneurs en Molybdène, (d) teneurs en Strontium.

La figure III.10 indique que :

(a) Les concentrations en (As) varient de 0 à 19.66 ng/m³. Il est présent uniquement dans 3 échantillons des PM-2,5. Le pic maximum a été enregistré le 17/12/2017 avec une teneur de 19.66 ng/m³, donc elle dépasse la valeur limite (**6 ng/m³**) recommandée par l'OMS.

L'origine de ce métal est essentiellement la combustion de combustibles fossiles (Fioul) ainsi que l'incinération des déchets contenant l'Arsenic.

(b) Les teneurs en (Pb) varient de 0 ng/m³ à 2476,14 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 53,56 ng/m³ à 3562,05 ng/m³ pour les PM-10. Elles sont en dessus de la norme de l'OMS

(500 ng/m³), d'après les résultats obtenus on constate que la station d'étude (CPMC-Mustapha) est fortement polluée par le Plomb.

- (c) On remarque que cet élément est présent dans l'air avec des concentrations élevées, de 0 ng/m³ à 333,42 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 1.23 ng/m³ à 94,31 ng/m³ pour les PM-10. La valeur maximale étant enregistrée le 14/03/2018. Comme la plupart des métaux lourds, le zirconium n'est pas réglementé dans l'air par des seuils à respecter, qui empêchent toute conclusion.
- (d) La présence de ce métal dans l'air à des concentrations élevées dans la majorité des échantillons en PM-2.5 ; s'explique par les conditions météorologiques et la proximité des sources d'émission, au jour de prélèvement ainsi que la densité du trafic routier.

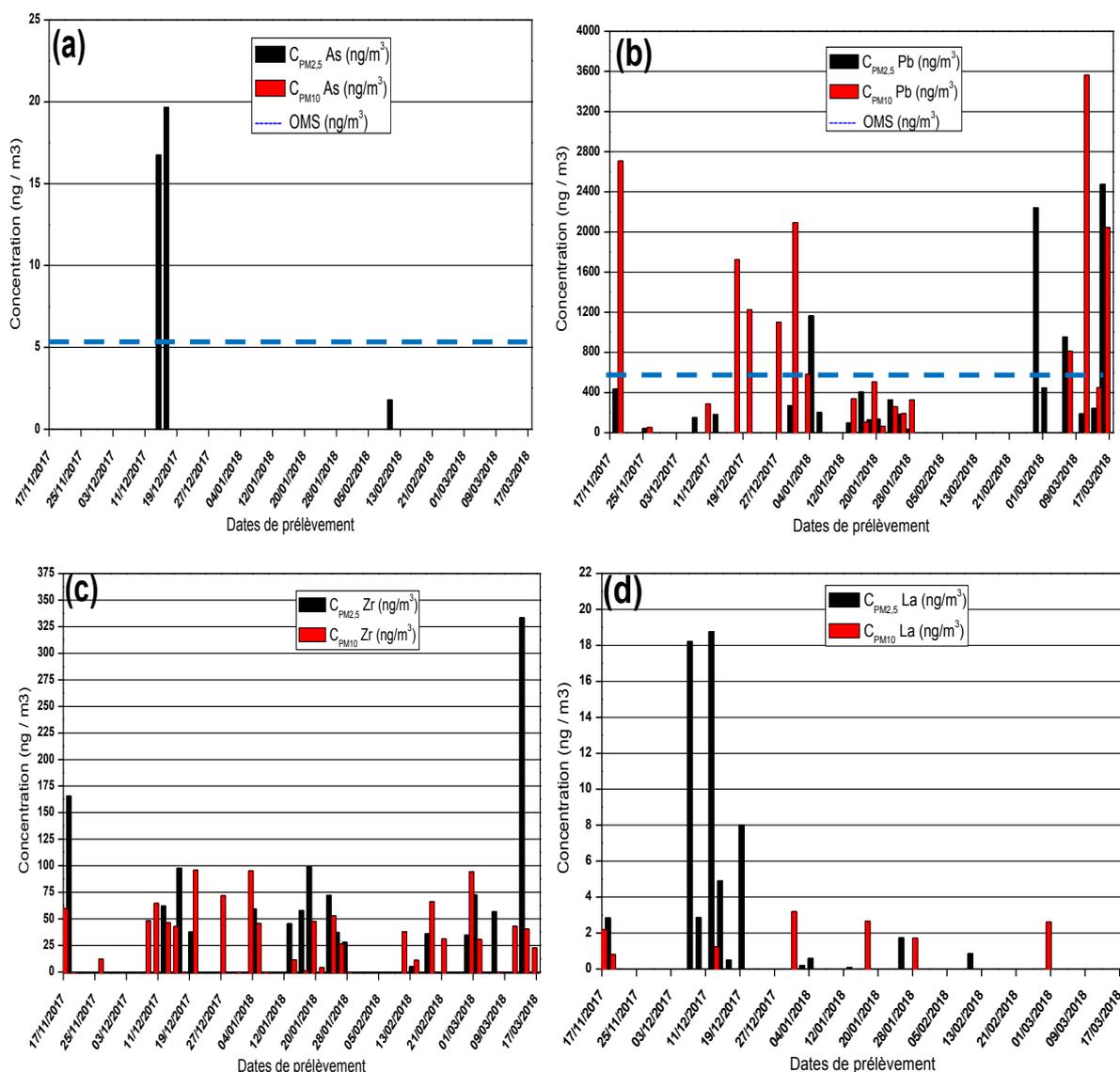


Figure III.10 : Evolution des concentrations du (As, Pb, Zr, La) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Arsenic, (b) teneurs en Plomb, (c) teneurs en Zirconium, (d) teneurs en Lanthane.

La figure III.11 montre que :

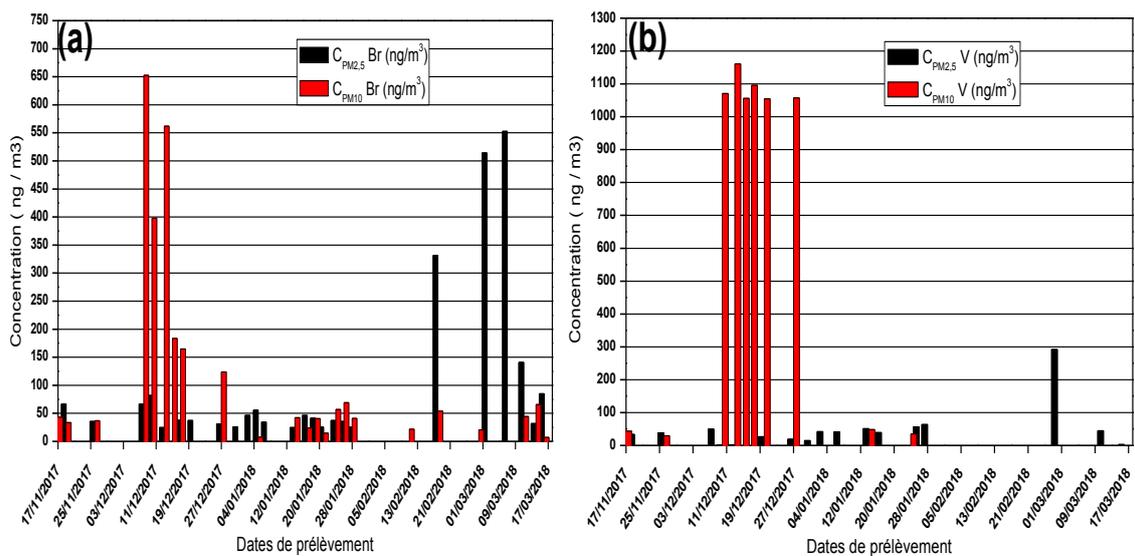
(a) Les teneurs en (Br) durant la période du prélèvement varient du 24.83 ng/m³ à 552,7 ng/m³ pour les PM-2.5 et de 7.07 ng/m³ à 652,51 ng/m³ pour les PM-10. Le trafic routier et la météorologie peuvent expliquer ces variations.

La valeur minimale (7.07 ng/m³) est obtenue le 16/03/2018, un jour de fin de semaine donc diminution du trafic routier ; tandis que la valeur maximale est celle du 08/12/2017, une journée ensoleillée avec un trafic routier conséquent et un vent faible.

(b) D'après cette figure (III.11), le Vanadium se trouve dans les PM-2.5 et les PM-10.

(c) La teneur en Cuivre varie entre 12,57 à 4261,34 ng/m³ dans les PM-2,5 et de 6.56 à 630,53 ng/m³ dans les PM-10, il est détecté surtout dans les PM-2,5.

(d) Pour l'argent l'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'une concentration typique dans l'air urbain ne devrait pas excéder (50 ng / m³) alors que la figure III.11 montre que toutes les teneurs en (Ag) dans les deux fractions PM-2.5 et PM-10 ne dépassent pas cette norme.



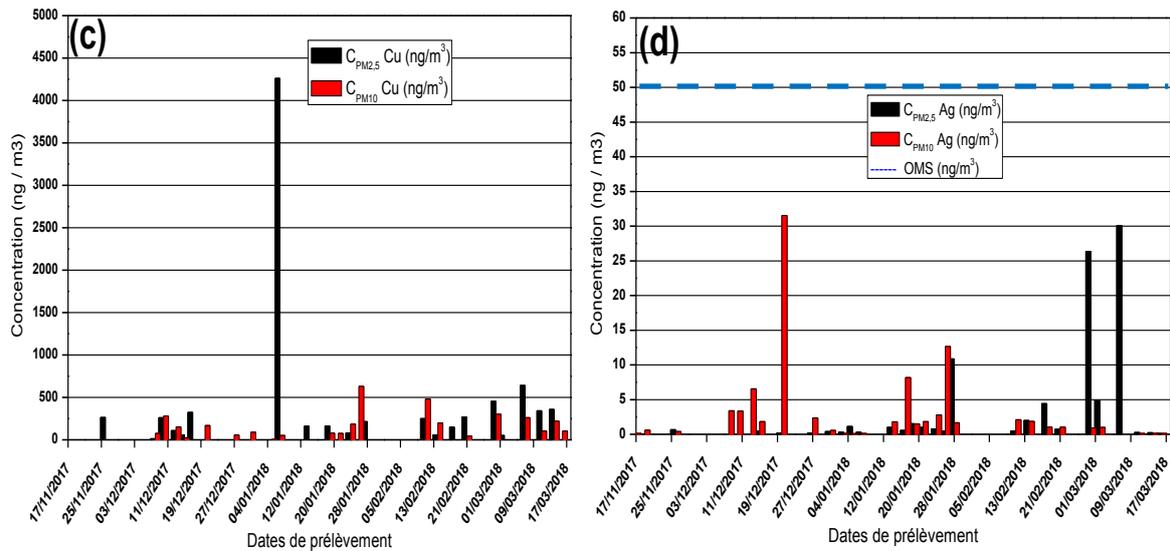


Figure III.11: Evolution des concentrations du (Br, V, Cu, Ag) en fonction de la date de prélèvement : (a) teneurs en Brome, (b) teneurs en Vanadium, (c) teneurs en Cuivre, (d) teneurs en Argent.

III.2 Facteur d'enrichissement :

Le facteur d'enrichissement fournit le nombre de fois qu'un élément est enrichi par rapport à l'abondance de cet élément dans la croûte terrestre. La détermination du facteur d'enrichissement (FE) permet de préciser l'origine des éléments inorganiques. Ceci nous permet dans le cas de l'étude de la pollution si le polluant est d'origine naturelle ou anthropogène. C'est-à-dire, dû à l'activité humaine qui a introduit ces éléments polluants dans la nature.

Généralement l'Aluminium (Al) est utilisé comme élément de référence en raison de l'absence de sources significatives de cet élément et il est reconnu mondialement comme concentration de référence dans les zones non polluées.

Le calcul du FE a été défini en rapportant la teneur d'un élément contaminant de l'échantillon à la concentration d'un élément réputé relativement immobile de cet échantillon, comparé avec le même rapport trouvé dans le matériau de référence [63].

$$FE = \frac{(M)ech/(Al)ech}{(M)RM/(Al)RM} \quad (III.1)$$

Où FE = facteur d'enrichissement,

[M]ech = concentration en métal M dans l'échantillon,

[Al] ech = concentration de l'Aluminium dans l'échantillon,

[M] RM = concentration du métal M dans le matériau de référence,

[Al] RM = concentration de l'Aluminium dans le matériau de référence.

Les valeurs du FE sont interprétées en fonction du niveau de contamination :

FE < 1, pas d'enrichissement ;

FE entre [1~3] : enrichissement faible.

FE entre [3~5] : enrichissement modéré.

FE entre [5~10] : enrichissement modéré à fort.

FE entre [10~25] : fort enrichissement.

FE entre [25~50] : très fort enrichissement.

FE > 50 : enrichissement extrême.

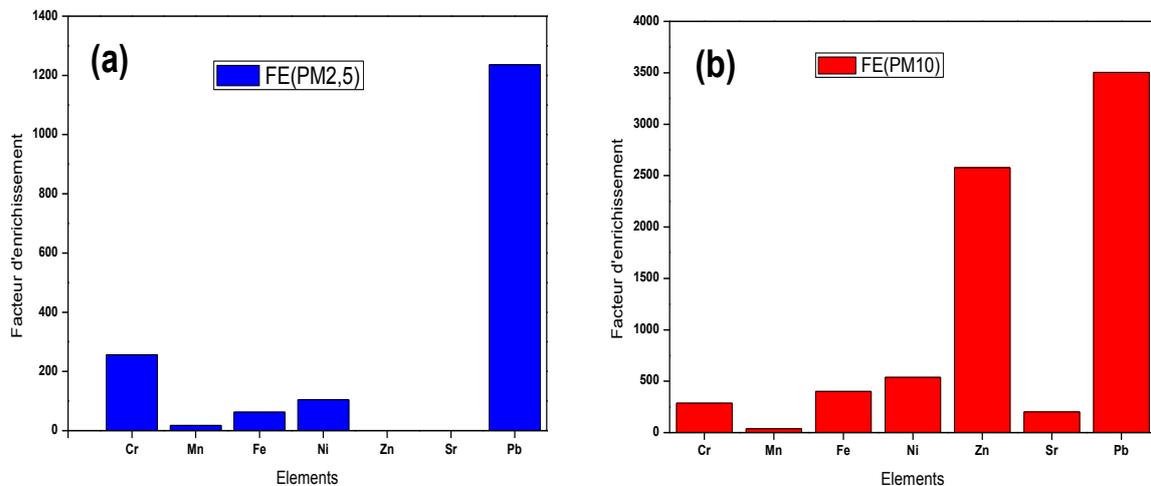


Figure III.12 : Facteur d'enrichissement calculé pour chaque élément en utilisant la concentration de l'Aluminium dans le matériau de référence : (a) pour les PM-2.5, (b) pour les PM-10.

Les figures **III.12**, présente les valeurs du facteur d'enrichissement de certains éléments pour les particules fines type PM-2.5 et PM-10. Des facteurs d'enrichissement supérieurs à 10 en Cr, Mn, Fe, Ni, Zn Sr et Pb indiquent l'origine humaine de ces éléments. Les sources potentielles de ces éléments dans les zones urbaines sont variées.

Il convient de noter que l'enrichissement le plus important est obtenu, supérieur à 1200 pour le plomb dans (PM-2.5) et à 3500 dans les PM-10, ce qui correspond à une pollution très accentuées. En effet, outre le trafic automobile, ces éléments peuvent également être libérés par la combustion de carburants fossiles, l'abrasion des freins, le port d'Alger et de nombreuses autres activités industrielles. Ces différentes émissions contribuent à la présence de ce polluant dans l'atmosphère.

III.3 Discussion des résultats :

Notre étude a prouvé la présence des matières particulaires et des métaux lourds dans l'air atmosphérique au niveau du CPMC-Mustapha (Alger-centre).

↳ **Les PM-2.5 et les PM-10 :**

Leur présence dans les concentrations atmosphériques dans le centre de l'Algérie est due aux émissions des véhicules, en particulier des moteurs diesel connus pour leur combustion incomplète du diesel.

L'effet des précipitations est important car de faibles concentrations des PM-2.5 et PM-10 ont été enregistrés lors des journées pluvieuses. Cette diminution peut être expliquée par les dépôts humides de toutes les particules en suspension et non par les réductions d'émissions.

L'augmentation de la température au cours de la journée favorise l'augmentation des concentrations journalières des PM-2.5 et PM-10, en asséchant le sol et en réduisant les sédiments humides en réduisant l'humidité relative de l'air.

La construction autour du site d'échantillonnage constitue un obstacle au mouvement du vent lorsque les matières particulaires sont dispersées d'où l'accentuation des dépôts d'aérosols d'où les fortes concentrations mesurées de beaucoup d'éléments métaux lourds.

↳ **Les Métaux lourds :**

Sur la base de l'analyse des métaux lourds dans nos échantillons pour les deux types de particules, nous avons pu obtenir des résultats assez riches :

Ainsi, on a constaté pour l'ensemble des éléments identifiés que plus de 55% des résultats soit 28 éléments détectés par ED-XRF ont été identifiés (22/28 éléments) : (Na, Mg, Al, P, Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Br, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Sb, Pb, Th et U). Aussi 70% des résultats soit 12 éléments sont obtenus c-à-d (12/28 éléments) : (Na, Ca, Cr, Mn, Fe, Co et Ni, Cu, Br, Zr, Ag et Sb) et 40% des résultats soit 26 éléments (26/28 éléments) : (Na, Mg, Al, P, Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Br, Rb, Sr, K, Ti, V, Zn, Zr, Mo, Ag, Sb, Pb, Th, U) ont été identifiés.

La présence de cette pollution par les métaux lourds s'explique par les émissions des voitures (rejets d'échappement, de batteries, de gents-alliage, de pneus, plaquettes de freins, disques d'embrayages, etc. ...) devenues ces dernières années, la première cause de pollution de l'air dans les zones urbaines.

Les émissions d'origine automobile sont une source majeure de présence des matières particulaires et des métaux lourds dans l'air d'Alger centre. La topographie de ce site favorise

la stagnation à long terme des polluants dans l'air, l'augmentation de la température moyenne et le faible échange de masses d'air avec l'environnement extérieur du centre d'Alger.

Il est difficile d'identifier les causes principales des différentes concentrations de métaux lourds enregistrées au cours de la journée d'échantillonnage.

L'arsenic un élément toxique présent a des concentrations assez sensibles. Les concentrations d'éléments tels que l'aluminium, le zirconium, le plomb, le strontium et le nickel dépassent généralement les normes de l'OMS. Alors, les degrés de ces concentrations doivent être surveillés au fil du temps car l'exposition à ces concentrations persistantes peut avoir des effets chroniques sur la santé humaine.

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

III.4 Etude comparative entre les techniques d'analyses nucléaires utilisées :

Dans notre travail, nous nous sommes basés principalement sur la technique d'analyse ED-XRF et ces résultats, mais nous avons effectué des analyses de quatre échantillons des deux types de fractions particulaires à l'aide de WD-XRF et d'ICP-AES dans le but de faire une étude comparative entre ces techniques pour pouvoir voir la capacité de chaque technique. Le tableau III-3, montre les résultats de comparaison des éléments identifiés par les techniques d'analyse ED-XRF, WD-XRF et ICP. La technique ED-XRF nous donne plus de résultats que les autres techniques : 28 éléments ont été détectés pour cette dernière, nous avons trouvé 24 éléments par la technique WD-XRF et 10 éléments ont été trouvés à cause des standards disponibles. Pour une étude de comparaison plus approfondie, il faudra procéder à la quantification de chaque élément en suivant scrupuleusement le protocole de mesure pour chaque technique et les conditions de mesures afin de pouvoir faire une inter-comparaison objective et fiable.

Tableau III.3 : Résultats de comparaison des éléments identifiés.

| Nombre d'élément | ED-XRF | | WD-XRF | | ICP-Aes | |
|------------------|--------|----|--------|----|---------|----|
| | Z | EL | Z | EL | Z | EL |
| 1 | 11 | Na | 11 | Na | 12 | Mg |
| 2 | 12 | Mg | 12 | Mg | 22 | Ti |
| 3 | 13 | Al | 13 | Al | 24 | Cr |
| 4 | 14 | Si | 14 | Si | 26 | Fe |
| 5 | 15 | P | 15 | P | 27 | Co |
| 6 | 16 | S | 16 | S | 29 | Cu |
| 7 | 19 | K | 17 | Cl | 30 | Zn |
| 8 | 20 | Ca | 19 | K | 40 | Zr |
| 9 | 22 | Ti | 20 | Ca | 42 | Mo |
| 10 | 23 | V | 22 | Ti | 82 | Pb |
| 11 | 24 | Cr | 24 | Cr | | |
| 12 | 25 | Mn | 25 | Mn | | |
| 13 | 26 | Fe | 26 | Fe | | |
| 14 | 27 | Co | 27 | Co | | |
| 15 | 28 | Ni | 28 | Ni | | |
| 16 | 29 | Cu | 29 | Cu | | |
| 17 | 30 | Zn | 30 | Zn | | |
| 18 | 35 | Br | 31 | Ga | | |
| 19 | 37 | Rb | 38 | Sr | | |
| 20 | 38 | Sr | 42 | Mo | | |
| 21 | 40 | Zr | 47 | Ag | | |
| 22 | 42 | Mo | 49 | In | | |
| 23 | 47 | Ag | 51 | Sb | | |
| 24 | 51 | Sb | 82 | Pb | | |
| 25 | 57 | La | | | | |
| 26 | 82 | Pb | | | | |
| 27 | 90 | Th | | | | |
| 28 | 92 | U | | | | |

III.5 Analyse comparative :

D'après le tableau III.4, Les concentrations moyennes des métaux lourds retrouvées à Alger Centre sont plus élevées par rapport à celles enregistrées dans la région du Lille et au Madagascar, particulièrement pour le Fer, le Plomb et le Zinc. Donc la provenance et la concentration des polluants varient d'un endroit à un autre en fonction de la densité de la population, type d'industrie, des normes environnementales en vigueur.

Tableau III.4 : Teneurs en métaux lourds trouvés dans les filtres de la pollution atmosphérique. [35], [64]

| <i>Lieu</i> | <i>Madagascar</i> | <i>France (Lille)</i> | <i>Notre étude</i> |
|-----------------|---|-----------------------|--------------------|
| | <i>2008</i> | <i>2000</i> | <i>2018</i> |
| <i>Éléments</i> | <i>Concentrations en (ng/m³)</i> | | |
| <i>Ti</i> | <i>90,59</i> | <i>/</i> | <i>164.85</i> |
| <i>Cr</i> | <i>9,70</i> | <i>/</i> | <i>158.67</i> |
| <i>Mn</i> | <i>19,86</i> | <i>21</i> | <i>55.03</i> |
| <i>Fe</i> | <i>918,94</i> | <i>/</i> | <i>3817.40</i> |
| <i>Ni</i> | <i>6,13</i> | <i>4.3</i> | <i>19.97</i> |
| <i>Cu</i> | <i>10,94</i> | <i>32</i> | <i>132.80</i> |
| <i>Zn</i> | <i>77,42</i> | <i>117.4</i> | <i>276.76</i> |
| <i>Br</i> | <i>6,31</i> | <i>/</i> | <i>46.99</i> |
| <i>Sr</i> | <i>6,45</i> | <i>/</i> | <i>98.03</i> |
| <i>Pb</i> | <i>17,23</i> | <i>60</i> | <i>294.48</i> |

III.6 Analyse en composantes principales :

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais), est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorrélatées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « Composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Il s'agit d'une approche à la fois géométrique [8].

Pour mener à bien nos travaux, nous avons effectué l'analyse en composantes principales (ACP), qui permet de mettre en évidence les similitudes ou les conflits entre variables et d'identifier les variables les plus étroitement liées. L'analyse statistique de la composante principale, au niveau du site d'étude, illustre la relation entre les éléments détectés dans les aérosols et leur distribution dans des groupes distincts.

III.6.1 ACP pour les filtres de la pollution atmosphérique :

Nous avons fait l'analyse par composante principale en utilisant le logiciel Statistique R. En introduisant des concentrations de métaux lourds dans différents échantillons et en fournissant plusieurs tableaux de calculs. Parmi ces tableaux, on a la matrice des corrélations.

La matrice de corrélation (Tableau III.5) montre que la corrélation entre les variables varie entre une faible et moyenne corrélation. Les valeurs des coefficients de corrélations varient d'une façon différente. On observe des valeurs négatives de corrélations signifiant que la présence de l'un implique la diminution de l'autre le cas du (Fe, Mg), (Br, Ni). Des valeurs de corrélations positives importantes (Pb, Cr) ; (Sb, Br) ; (Pb, Ag) ; (Zn, Fe) ; (Ag, Cr) ; (Ag, Mn) indiquant que la présence de l'un corrobore la présence de l'autre.

Tableau III.5 : Matrice de corrélation

| | Mg | V | Cr | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | Br | Mo | Ag | Sb | Pb |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mg | 1,000 | -0,135 | 0,360 | 0,440 | -0,258 | 0,047 | -0,083 | 0,017 | 0,172 | -0,169 | 0,367 | 0,223 | 0,415 |
| V | -0,135 | 1,000 | -0,062 | 0,186 | 0,012 | 0,343 | 0,805 | 0,021 | -0,141 | -0,074 | -0,098 | -0,110 | -0,008 |
| Cr | 0,360 | -0,062 | 1,000 | 0,718 | -0,049 | 0,108 | 0,128 | 0,099 | -0,191 | -0,115 | 0,532 | 0,190 | 0,695 |
| Mn | 0,440 | 0,186 | 0,718 | 1,000 | -0,160 | 0,313 | 0,384 | -0,030 | -0,028 | -0,077 | 0,690 | 0,236 | 0,631 |
| Fe | -0,258 | 0,012 | -0,049 | -0,160 | 1,000 | -0,017 | 0,305 | 0,605 | -0,028 | 0,035 | -0,001 | -0,154 | -0,069 |
| Ni | 0,047 | 0,343 | 0,108 | 0,313 | -0,017 | 1,000 | 0,399 | -0,145 | -0,294 | -0,073 | 0,022 | -0,165 | 0,099 |
| Cu | -0,083 | 0,805 | 0,128 | 0,384 | 0,305 | 0,399 | 1,000 | 0,178 | -0,089 | -0,111 | 0,178 | -0,042 | 0,055 |
| Zn | 0,017 | 0,021 | 0,099 | -0,030 | 0,605 | -0,145 | 0,178 | 1,000 | 0,007 | -0,027 | 0,076 | -0,022 | 0,060 |
| Br | 0,172 | -0,141 | -0,191 | -0,028 | -0,028 | -0,294 | -0,089 | 0,007 | 1,000 | -0,048 | 0,489 | 0,754 | 0,182 |
| Mo | -0,169 | -0,074 | -0,115 | -0,077 | 0,035 | -0,073 | -0,111 | -0,027 | -0,048 | 1,000 | -0,041 | -0,040 | -0,054 |
| Ag | 0,367 | -0,098 | 0,532 | 0,690 | -0,001 | 0,022 | 0,178 | 0,076 | 0,489 | -0,041 | 1,000 | 0,460 | 0,717 |
| Sb | 0,223 | -0,110 | 0,190 | 0,236 | -0,154 | -0,165 | -0,042 | -0,022 | 0,754 | -0,040 | 0,460 | 1,000 | 0,361 |
| Pb | 0,415 | -0,008 | 0,695 | 0,631 | -0,069 | 0,099 | 0,055 | 0,060 | 0,182 | -0,054 | 0,717 | 0,361 | 1,000 |

La figure III.13 représente les projections des nuages de points sur le premier plan principal. Les points éloignés entre eux correspondants à ces échantillons sont différents dans les concentrations des éléments dans cet échantillon et les points qui sont proches entre eux signifient que les échantillons possèdent presque le même ordre de grandeur des concentrations pour tous les éléments ; on dit qu'ils sont semblables. On peut conclure par cette figure qu'il existe quatre sources de pollution correspondante au regroupement d'éléments suivants : (Ag, Sb, Pb, Br) ; (Fe, V) ; (Zn, Ni, Cu) et (Mo, As, Mn, Ca) estimé à

être d'origine : Fumé de combustion dû au transport routier, Transport ferroviaire, Déchets ou d'activité portuaire. Ce qui confirme les résultats obtenus par l'ACP des filtres.

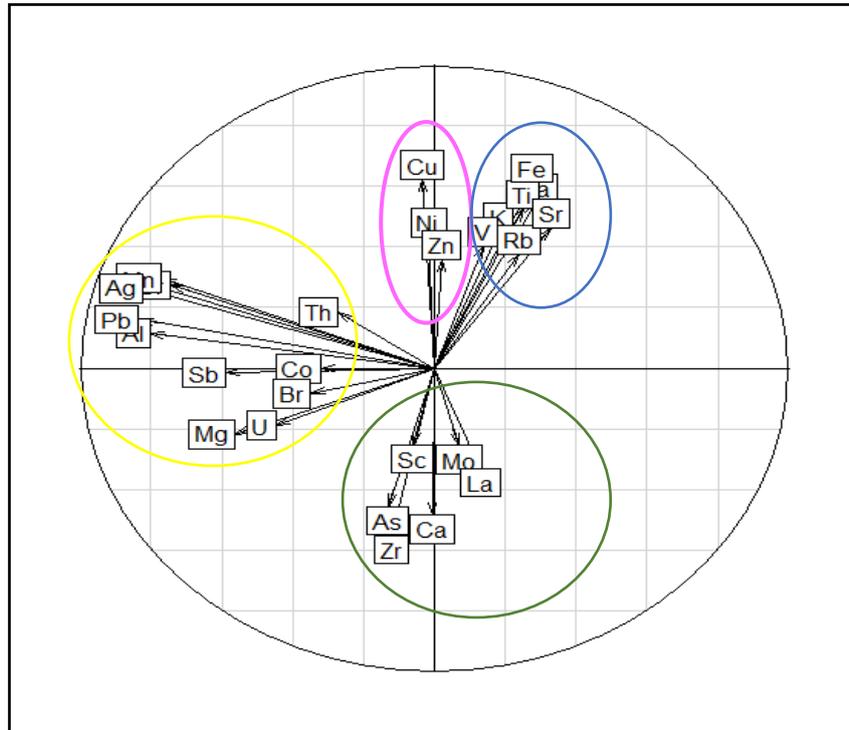


Figure III.13 : Projections des variables réelles sur le premier plan principal.

La remarque qu'on peut tirer de cette évaluation est que les résultats montrent un état critique de toxicité par métaux lourds, Ce qui rend la situation de la zone d'Alger alarmante et nécessite une intervention rapide dans le cadre de la protection d'environnement atmosphérique, et protection de l'être vivant.

Ce chapitre nous a permis d'évaluer le degré de pollution au niveau du (CPMC-CHU Mustapha pacha) en analysant les particules en suspension et les bio-indicateurs en les comparant à d'autres régions.

A large, horizontally-oriented oval with a black border, filled with a light-colored marbled pattern. The text is centered within this oval.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

L'étude que nous avons menée au Centre de recherches nucléaire d'Alger sur l'analyse des échantillons prélevés au cours d'une année, La partie concernée par l'étude est relative à 4 mois, du 17 novembre 2017 au 6 mars 2018, dans un site urbain (CPMC-CHU Mustafa Pacha) situé à 20 mètres du niveau de la terre. Elle nous a permis d'estimer le niveau de pollution par les particules (PM-2.5 et PM-10) et d'identifier certains facteurs qui l'influent notamment la météorologie et enfin à évaluer le taux des métaux lourds (Pb, Fe, Mn, Zn, Cd, Br, Cu ...) existants dans les différentes fractions granulométriques de ces particules.

Nous avons principalement bénéficié de la technique de spectrométrie par fluorescence-X(ED-XRF) pour analyser les filtres collectés, puis nous avons utilisé deux autres méthodes d'analyse (WD-XRF et ICP-AES) pour réaliser une étude comparative.

L'estimation des niveaux de pollution par les PM-2.5 et les PM-10 pendant la période d'étude montre que les teneurs sont relativement normales comparativement aux normes et aux valeurs trouvées dans d'autres études ; (PM-2.5 = 8.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et PM-10= 37.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ponctuellement, on relève des teneurs excessives en PM-10 qui dépassent les normes et recommandations de protection de la santé.

L'analyse des filtres par les techniques d'analyse nucléaires (*ED-XRF*, *WD-XRF* et *ICP*) a relevé la présence des métaux lourds tels que : Cr, Ni, As, Pb, Mn, Fe, La, Zn, Mo, Sr, Al, Zr avec des concentrations qui parfois dépassent les normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Les fluctuations météorologiques semblent agir sur les variations des charges dans les matières particulaires (PM-2.5 et PM-10), en particulier, la vitesse du vent et de la pluviométrie. Il est donc important de collecter les données climatiques enregistrées dans la zone d'étude au cours de la période d'échantillonnage car elles jouent un rôle important dans la variation des concentrations des polluants atmosphériques.

Pour les métaux lourds associés aux PM2.5 et aux PM-10, tous les métaux lourds réglementés (Cr, Ni, As, Pb) ont une concentration journalière moyenne allant bien au-delà de celles autorisées par la directive de l'OMS et / ou de l'UE. De fortes concentrations sont enregistrées pour le reste des métaux tel que (Mn, Fe, V, Zn, Mo, Sr, Al, Zr, Br, Co, Sb, Cd ...). Quoique, en l'absence de normes nationales et / ou internationales gérant leur présence dans l'air, il est difficile d'estimer le degré de pollution.

L'Arsenic n'est pas présent dans la plupart des filtres, il n'y a donc pas de pollution de l'air par (As) au niveau du CPMC-CHU Mustapha Pacha.

Conclusion générale

Nous avons fait aussi l'analyse par composante principale (ACP) comme étant une étude statistique, en introduisant les concentrations de métaux lourds dans différents échantillons et en fournissant plusieurs tableaux de calculs. Des valeurs de corrélation négatives ont été obtenues, ce qui signifie que la présence d'un signifie la réduction de l'autre (Fe, Mg), (Br, Ni). Des valeurs de corrélations positives importantes (Pb, Cr) ; (Sb, Br) ; (Pb, Ag) ; (Zn, Fe) ; (Ag, Cr) ; (Ag, Mn) indiquant que la présence de l'un corrobore la présence de l'autre.

De manière générale, sur ce site qui héberge des patients, les patients étant donc très vulnérables, la pollution des particules par l'air a une forte probabilité de dommages.

Comme l'impact de la circulation routière est évident, c'est à cette source que des mesures doivent être prises pour réduire les niveaux de pollution des particules fines.

Afin d'améliorer graduellement la situation, nous proposons quelques perspectives :

- ✓ Faire des études et les 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.

En fin de compte, il est de notre devoir aujourd'hui de garantir un environnement sain pour nous et pour les générations futures.

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] : La structure de l'atmosphère. (2019). Retrieved from <http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/le-fonctionnement-de-l-atmosphere/la-composition-de-l-atmosphere/la-structure-de-latmosphere>.
- [3] : Yahiaoui, F. (2010). *Etude de la pollution atmosphérique par fraction des matières particulaires PM10, PM2,5 dans le site d'Alger centre*. université M'Hamed Bougara, Boumerdes.
- [4] : GUEZOUL, M. (2011). *détermination des paramètres caractéristiques de la turbidité de l'atmosphère α et β d'ÅNGSTRÖM en utilisant les modèles de transfert radiatifs*. Université Mentouri, Constantine.
- [5] : OUCHER, N. (2011). *Les polluants indicateurs de pollution atmosphérique et leurs techniques de prélèvements dans l'air ambiant*. Alger.
- [6] : *Pics de pollution en Region Wallonne*. (2008).
- [7] : LEHOUT, R. (2017). *Evaluation de la pollution de l'air outdoor au niveau du site d'Alger Centre*. université Houari Boumediene, Alger.
- [8] : BELAIDI, S., & BENSID, M. (2017). *Contrôle de l'air par analyse des particules en suspension et les bio-indicateurs au niveau de la forêt de Bâinem*. université Houari Boumediene, Alger.
- [9] : BETROUNI, Y. (2010). *pollution de l'air par les particules fines en milieu urbain a bouzareah Alger*. Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger.
- [10] : SCHMAUS, A. (1920). *Die Chemie des Nobels, der Wolken und des Regens, Die Umschau*.
- [11] : BERKOUKI, N. (2009). *caracterisation de la pollution de l'air par les particules fines et des metaux lourds associes, en milieu urbain à Alger centre*. Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger.
- [12] : CHANG, O. M. C., & ENGLAND, G. C. (2005). *Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems*.

- [13] : COURT, M. (2007). *Les particules fines, aussi visibles que dangereuses* (le Figaro).
- [14]: DONALDSON, K., & STONE, V. (2003). *Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles*.
- [15]: 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*.
- [16] : 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)*. université BOUGARA Mohamed, Boumerdes.
- [17] : Blanchard, O., Del Gratta, F., Durif, M., Frejafon, E., & Le Bihan, O. (2004). « *Exposition par inhalation aux aérosols : Principes et méthodes de mesures* ».
- [18] : CITEPA, S. (2001). *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques En France – Séries sectorielles et analyses étendues*.
- [19]: 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*.
- [20] : Charpin, D., Pairon, J.-C., Annesi-Maesano, I., Caillaud, D., Blay, F. de, Dixsaut, G., ... (SPLF), pneumologie de langue française. (2016). *La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)*. 33, 484—508.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rmr.2016.04.002>.
- [21] : Elichegaray, C. (2008). *La pollution de l'air : sources, effets, prévention* (Dunod).
- [22] : Matei, B. (1974). *Pollution et protection de l'atmosphère*.
- [23] : C.T.P.Fontelle, Dang Leygonie, R. (1990). *Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission*.
- [24] : « *Le chauffage résidentiel au bois – Sommaire des résultats obtenus de 1999 à 2002* ». (2005).

- [25] : AOUDIA, M. T. (2004). « *Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement (RNE 2003)* ».
- [26] : « *Inventaire des émissions de particules primaires* ». (2001), « *Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom* ». (1999), Haentjens, C. (2007). *L'analyse des gaz d'échappement*.
- [27] : Masclet, P. (2005). *Pollution atmosphérique : Causes, conséquences, solutions, perspectives* (Ellipses).
- [28] : Lefèvre, R., & Ausset, P. (2001). « *Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti : la pierre et le verre* ».
- [29] : WEXLER, H. *Météorologie et pollution de l'air*. Retrieved from <https://www.atmosud.org/article/lair-et-la-meteo>.
- [30] : ZENATA, K. (2008). *La pollution urbaine dans la wilaya d'Oran*. université d'Oran.
- [31] : LOUADAH, H. (2016). *Mesure et estimation de la pollution d'origine automobile dans la ville de Bejaia*. Université A. MIRA – Bejaia.
- [32] : 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/.
- [33] : *les conséquences de la pollution de l'air*. (2019). Retrieved from <https://www.ompe.org/les-consequences-de-la-pollution-de-lair/>.
- [34] : Allain, Y.-M., Roche, N., & Huchon, G. (2010). *Pollution atmosphérique, facteur de risque des BPCO*.
- [35] : Rasoazanany Elise, O Andriamahenina Njaka, N Harinoely, Manovantsoatsiferana Ravoson Herinirina, N Randriamanivo Lucienne, V., & Andriambololona, Raelina 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.
- [36] : Amet, M S, Jonathan Dominici, F., Curriero, F. D., Coursac, I., & L.Zegger, S. (2000). , *The new england journal of Medicine, Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities. volume 343, 24*.
- [37] : *Air et polluants : Les polluants, Toulouse, France*. (2004). Retrieved from

www.oramip.org.

- [38] : BUR, T. (2008). : *Impact anthropique sur les éléments traces métalliques Dans les sols Agricoles de Midi-Pyrénées implication en termes de limites et de charges critiques.*
L’Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).
- [39] : BLIN, C., & Al. (2004). *Les micropolluants dans l’air.*
- [40] : MARCEL, & GIROUX, LOUISE DESCHAINES, R. C. (2006). *Les éléments traces métalliques leur accumulation dans les sols agricoles au Québec.*
- [41] : OULTAF, L., & RABIA, M. . (2012). *Quantification des poussières totales et particulaires et des métaux lourds par la technique d’Analyse par activation Neutronique au niveau du site d’Alger centre.* université UMMTZ.
- [42]: 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), 447–458.
- [43]: 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), 831–839.
- [44] : *Protocole de mesure du black carbon, Procédure opératoire pour la détermination de la concentration en carbone élémentaire en utilisant la méthode de réflectance.* (2016).
- [45]: Valérie Thirion-Merle. (2016). *Spectrométrie de fluorescence X* (Editions d).
- [46] : Ecole National des Mines de Saint-Etienne. *METHODES SPECTROMETRIQUES D’ANALYSE ET DE CARACTERISATION.* (juin 2019). Retrieved from https://www.academia.edu/5849937/Methodes_spectrometriques_danalyse_et_de_caracterisation.
- [47]: Van Grieken, R., & Markowicz, A. (1993). *Handbook of X-ray spectrometry.* New York: Marcel Dekker.
- [48] : Dusseau, L. (2009). *Interactions Rayonnements - Matière.*
- [49] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusion>.

- [50] : http://www.nucleide.org/Gamma_spectro/interactions.htm.
- [51] : Benamar, M. E. A. (2012). *Techniques Nucléaires de Microanalyses I*.
- [52] : BAYOULI, I. (2016). *Application de la spectrométrie de fluorescence x à l'analyse in situ des métaux dans les sols contaminés*. École de technologie supérieure université du québec.
- [53]: *Mini-X X-Ray Tube 50 kV USB Controlled*. Retrieved from www.amptek.com.
- [54] : « Unités ayant des noms spéciaux », Bureau international des poids et mesures (consulté le 29 janvier 2008).
- [55] : *Amptek Experimenter's XRF Kit*. (2016).
- [56] : SBARGOUD, A. (2009). *Diagnostic environnemental de la gare routière (pollution atmosphérique par TSP et métaux lourds)* (Université Mouloud MAMMARI TIZI-OUZOU). Retrieved from https://www.memoireonline.com/08/11/4675/m_Diagnostic-environnemental-de-la-gare-routiere-pollution-atmospherique-par-TSP-et-metaux-lourds6.html.
- [57] : Benamar, M. E. A. (2012). *Techniques nucléaires de microanalyses Baie D'Alger, entre pollution et enjeux sanitaires* (1.02.5349).
- [58]: T.P. Thinh and J. Leroux - "New basic empirical expression for computing tables of X-ray mass attenuation coefficients", *X-ray Spectrometry* **8**, 85 (1979).
- [59]: *THEORY OF XRF* (PANalytica). (2010). Retrieved from www.panalytical.com.
- [60] : Analyse dispersive en longueur d'onde. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_dispersive_en_longueur_d%27onde?veaction=edit§ion=5.
- [61] : Jérôme, L. (2003). *Analyse élémentaire d'échantillons minéraux d'intérêt atmosphérique*.
- [62] : Dang, C. (2006). *Analyse spectrale de rayons X par dispersion de longueur d'onde (WDS)*. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrométrie_de_fluorescence_des_rayons_X#/media/Fichier:Analyse_wdx.svg.
- [63]: KŁOS, A., Małgorzata, R., & WACŁAWEK, M. (2011). *Application of enrichment factor (ef) to the interpretation of results from the biomonitoring studies*. Retrieved from

aklos@uni.opole.pl.

[64]: Caron, S., Saison, J. Y., & Patrick, T. (2003). *Mesure des métaux lourds dans l'agglomération lilloise*. 127–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.1923>.

Annexes

| <i>Jour</i> | <i>Code</i> | | <i>T_{moy} (C°)</i> | <i>Humidité (%)</i> | <i>Précipitation (mm)</i> | <i>Vitesse du vent (Km/h)</i> | <i>Pression (hpa)</i> |
|-------------|-------------|---------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 17/11/2017 | CPMC3 | CPMC4 | 15 | 70 | 0 | 8 | 1021 |
| 19/11/2017 | CPMC5 | CPMC6 | 16 | 57 | 0 | 8 | 1022 |
| 26/11/2017 | CPMC11 | CPMC12 | 15 | 82 | 1 | 19 | 1028 |
| 08/12/2017 | CPMC21 | CPMC22 | 14 | 50 | 0 | 14 | 1030 |
| 10/12/2017 | CPMC23 | CPMC24 | 16 | 96 | 0 | 21 | 1024 |
| 13/12/2017 | CPMC25 | CPMC26 | 12 | 66 | 1 | 9 | 1027 |
| 15/12/2017 | CPMC27 | CPMC28 | 15 | 74 | 0 | 31 | 1018 |
| 17/12/2017 | CPMC29 | CPMC30 | 10 | 75 | 3 | 14 | 1030 |
| 20/12/2017 | CPMC31 | CPMC32 | 11 | 84 | 3 | 20 | 1029 |
| 27/12/2017 | CPMC37 | CPMC38 | 13 | 84 | 3 | 45 | 1015 |
| 29/12/2017 | CPMC39 | CPMC40 | 15 | 80 | 3 | 26 | 1026 |
| 31/12/2017 | CPMC41 | CPMC42 | 18 | 58 | 0 | 13 | 1027 |
| 03/01/2018 | CPMC43 | CPMC44 | 16 | 67 | 0 | 15 | 1030 |
| 05/01/2018 | CPMC45 | CPMC46 | 17 | 62 | 0 | 11 | 1021 |
| 07/01/2018 | CPMC47 | CPMC48 | 11 | 68 | 3 | 11 | 1007 |
| 14/01/2018 | CPMC53 | CPMC54 | 12 | 84 | 0 | 12 | 1020 |
| 17/01/2018 | CPMC55 | CPMC56 | 15 | 83 | 0 | 15 | 1025 |
| 19/01/2018 | CPMC57 | CPMC58 | 13 | 91 | 1 | 14 | 1020 |
| 21/01/2018 | CPMC59 | CPMC60 | 15 | 82 | 0 | 20 | 1027 |
| 24/01/2018 | CPMC61 | CPMC62 | 15 | 59 | 0 | 8 | 1028 |
| 26/01/2018 | CPMC63 | CPMC64 | 12 | 68 | 1 | 35 | 1022 |
| 28/01/2018 | CPMC65 | CPMC66 | 14 | 73 | 0 | 12 | 1033 |
| 11/02/2018 | CPMC77 | CPMC78 | 9 | 74 | 0 | 28 | 1022 |
| 14/02/2018 | CPMC79 | CPMC80 | 13 | 80 | 0 | 22 | 1022 |
| 18/02/2018 | CPMC83 | CPMC84 | 16 | 68 | 0 | 8 | 1026 |
| 21/02/2018 | CPMC85 | CPMC86 | 11 | 91 | 7 | 31 | 1011 |
| 23/02/2018 | CPMC87 | CPMC88 | 9 | 68 | 1 | 12 | 1007 |
| 28/02/2018 | CPMC91 | CPMC92 | 19 | 64 | 0 | 18 | 1008 |
| 02/03/2018 | CPMC93 | CPMC94 | 17 | 64 | 0 | 15 | 1008 |
| 07/03/2018 | CPMC97 | CPMC98 | 13 | 76 | 1 | 23 | 1014 |
| 11/03/2018 | CPMC101 | CPMC102 | 16 | 63 | 2 | 40 | 1013 |
| 14/03/2018 | CPMC103 | CPMC104 | 18 | 73 | 0 | 12 | 1018 |
| 16/03/2018 | CPMC105 | CPMC106 | 12 | 73 | 1 | 16 | 1008 |

| <i>Jour</i> | <i>Code</i> | D=ECR($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | A=Surface(cm^2) | $\Delta V = V_f - V_i$ | M=(D*A/ΔV) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------------|-------------|--|--|------------------------|--|
| 17/11/2017 | CPMC3 | 7,92 | 12,56 | 19,426 | 5,12 |
| 19/11/2017 | CPMC5 | 7,52 | 12,56 | 19,092 | 4,95 |
| 22/11/2017 | CPMC7 | 8,67 | 12,56 | 20,137 | 5,44 |
| 24/11/2017 | CPMC9 | 8,75 | 12,56 | 9,8877 | 5,50 |
| 26/11/2017 | CPMC11 | 6,84 | 12,56 | 28,8743 | 2,97 |

Annexes

| | | | | | |
|------------|---------|-------|-------|--------|------|
| 01/12/2017 | CPMC15 | 5,58 | 12,56 | 20,079 | 3,61 |
| 03/12/2017 | CPMC17 | 11,41 | 12,56 | 39,687 | 3,61 |
| 08/12/2017 | CPMC21 | 6,42 | 12,56 | 20,465 | 3,94 |
| 10/12/2017 | CPMC23 | 6,43 | 12,56 | 20,301 | 3,98 |
| 13/12/2017 | CPMC25 | 6,41 | 12,56 | 18,727 | 4,30 |
| 15/12/2017 | CPMC27 | 7,64 | 12,56 | 20,575 | 4,66 |
| 17/12/2017 | CPMC29 | 7,15 | 12,56 | 19,829 | 4,53 |
| 20/12/2017 | CPMC31 | 5,50 | 12,56 | 20,603 | 3,35 |
| 27/12/2017 | CPMC37 | 5,03 | 12,56 | 20,558 | 3,07 |
| 29/12/2017 | CPMC39 | 5,43 | 12,56 | 20,264 | 3,37 |
| 31/12/2017 | CPMC41 | 6,38 | 12,56 | 18,842 | 4,25 |
| 03/01/2018 | CPMC43 | 7,02 | 12,56 | 19,893 | 4,43 |
| 05/01/2018 | CPMC45 | 12,60 | 12,56 | 19,607 | 8,08 |
| 07/01/2018 | CPMC47 | 6,64 | 12,56 | 20,252 | 4,12 |
| 14/01/2018 | CPMC53 | 8,45 | 12,56 | 19,176 | 5,53 |
| 17/01/2018 | CPMC55 | 8,35 | 12,56 | 18,935 | 5,54 |
| 19/01/2018 | CPMC57 | 5,87 | 12,56 | 19,792 | 3,73 |
| 21/01/2018 | CPMC59 | 6,96 | 12,56 | 20,007 | 4,37 |
| 24/01/2018 | CPMC61 | 9,77 | 12,56 | 18,886 | 6,50 |
| 26/01/2018 | CPMC63 | 5,12 | 12,56 | 20,194 | 3,18 |
| 28/01/2018 | CPMC65 | 5,80 | 12,56 | 20,373 | 3,58 |
| 04/02/2018 | CPMC71 | 7,219 | 12,56 | 19,22 | 4,67 |
| 11/02/2018 | CPMC77 | 5,92 | 12,56 | 20,574 | 3,62 |
| 14/02/2018 | CPMC79 | 7,00 | 12,56 | 20,04 | 4,53 |
| 18/02/2018 | CPMC83 | 7,57 | 12,56 | 19,643 | 4,84 |
| 21/02/2018 | CPMC85 | 4,98 | 12,56 | 20,082 | 3,11 |
| 23/02/2018 | CPMC87 | 7,85 | 12,56 | 19,832 | 5,08 |
| 28/02/2018 | CPMC91 | 5,81 | 12,56 | 20,083 | 3,63 |
| 02/03/2018 | CPMC93 | 7,89 | 12,56 | 19,998 | 4,96 |
| 07/03/2018 | CPMC97 | 8,06 | 12,56 | 19,638 | 5,15 |
| 11/03/2018 | CPMC101 | 5,58 | 12,56 | 19,952 | 3,51 |
| 14/03/2018 | CPMC103 | 7,94 | 12,56 | 19,76 | 5,05 |
| 16/03/2018 | CPMC105 | 6,58 | 12,56 | 19,884 | 4,16 |

Annexes

| <i>Jour</i> | <i>Code</i> | D=ECR($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) | A=Surface(cm^2) | $\Delta V = V_f - V_i$ | M=(D*A/ ΔV) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------------|-------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| 17/11/2017 | CPMC4 | 7,97 | 12,56 | 19,426 | 5,15 |
| 19/11/2017 | CPMC6 | 9,04 | 12,56 | 19,092 | 11,48 |
| 22/11/2017 | CPMC8 | 9,04 | 12,56 | 20,137 | 5,78 |
| 24/11/2017 | CPMC10 | 7,71 | 12,56 | 9,8877 | 4,94 |
| 26/11/2017 | CPMC12 | 7,54 | 12,56 | 28,8743 | 3,28 |
| 01/12/2017 | CPMC16 | 7,97 | 12,56 | 20,079 | 5,10 |
| 03/12/2017 | CPMC18 | 8,58 | 12,56 | 39,687 | 2,72 |
| 08/12/2017 | CPMC22 | 7,25 | 12,56 | 20,465 | 4,45 |
| 10/12/2017 | CPMC24 | 7,70 | 12,56 | 20,301 | 4,76 |
| 13/12/2017 | CPMC26 | 8,22 | 12,56 | 18,727 | 5,51 |
| 15/12/2017 | CPMC28 | 7,17 | 12,56 | 20,575 | 4,38 |
| 17/12/2017 | CPMC30 | 7,74 | 12,56 | 19,829 | 4,90 |
| 20/12/2017 | CPMC32 | 7,40 | 12,56 | 20,603 | 4,51 |
| 27/12/2017 | CPMC38 | 7,35 | 12,56 | 20,558 | 4,70 |
| 29/12/2017 | CPMC40 | 9,49 | 12,56 | 20,264 | 4,54 |
| 31/12/2017 | CPMC42 | 8,67 | 12,56 | 18,842 | 5,78 |
| 03/01/2018 | CPMC44 | 7,50 | 12,56 | 19,893 | 4,74 |
| 05/01/2018 | CPMC46 | 8,25 | 12,56 | 19,607 | 5,29 |
| 07/01/2018 | CPMC48 | 7,46 | 12,56 | 20,252 | 4,63 |
| 14/01/2018 | CPMC54 | 8,27 | 12,56 | 19,176 | 5,42 |
| 17/01/2018 | CPMC56 | 9,94 | 12,56 | 18,935 | 6,60 |
| 19/01/2018 | CPMC58 | 7,50 | 12,56 | 19,792 | 4,76 |
| 21/01/2018 | CPMC60 | 7,83 | 12,56 | 20,007 | 4,92 |
| 24/01/2018 | CPMC62 | 8,07 | 12,56 | 18,886 | 5,37 |
| 26/01/2018 | CPMC64 | 7,44 | 12,56 | 20,194 | 4,63 |
| 28/01/2018 | CPMC66 | 7,61 | 12,56 | 20,373 | 4,70 |
| 04/02/2018 | CPMC72 | 7,22 | 12,56 | 19,22 | 4,46 |
| 11/02/2018 | CPMC78 | 7,25 | 12,56 | 20,574 | 4,43 |
| 14/02/2018 | CPMC80 | 7,57 | 12,56 | 20,04 | 4,75 |
| 18/02/2018 | CPMC84 | 7,79 | 12,56 | 19,643 | 4,99 |
| 21/02/2018 | CPMC86 | 7,45 | 12,56 | 20,082 | 4,66 |
| 23/02/2018 | CPMC88 | 8,41 | 12,56 | 19,832 | 5,38 |
| 28/02/2018 | CPMC92 | 8,48 | 12,56 | 20,083 | 5,31 |
| 02/03/2018 | CPMC94 | 7,46 | 12,56 | 19,998 | 4,69 |
| 07/03/2018 | CPMC98 | 8,08 | 12,56 | 19,638 | 5,17 |
| 11/03/2018 | CPMC102 | 8,19 | 12,56 | 19,952 | 5,16 |
| 14/03/2018 | CPMC104 | 8,53 | 12,56 | 19,76 | 5,42 |
| 16/03/2018 | CPMC106 | 8,08 | 12,56 | 19,884 | 5,11 |

Annexes

| <i>Jour</i> | <i>Code</i> | <i>Na</i> | <i>Mg</i> | <i>Al</i> | <i>Ca</i> | <i>V</i> | <i>Cr</i> | <i>Mn</i> | <i>Fe</i> | <i>Co</i> | <i>Ni</i> |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 17/11/2017 | CPMC3 | ND | 7884 | 8613 | 1020 | 53 | 186 | ND | ND | ND | 221 |
| 17/11/2017 | CPMC4 | 3744 | 5149 | 3884 | 1803 | 47 | 29 | 381 | 8805 | 8 | 149 |
| 19/11/2017 | CPMC5 | ND | ND | ND | 202 | 37 | 4 | 231 | 256 | ND | 342 |
| 19/11/2017 | CPMC6 | 2303 | 6876 | 10310 | 4727 | ND | 245 | 93 | 10239 | 23 | ND |
| 26/11/2017 | CPMC11 | 549 | 3464 | 2045 | 220 | 42 | 147 | ND | ND | ND | 115 |
| 26/11/2017 | CPMC12 | 4545 | 4727 | ND | 1553 | 31 | 133 | ND | ND | 9 | ND |
| 08/12/2017 | CPMC21 | ND | 13542 | ND | ND | 54 | ND | 21 | ND | 2 | 5 |
| 08/12/2017 | CPMC22 | 695 | 4378 | 80792 | 997 | ND | ND | 58 | 2627 | ND | 30 |
| 10/12/2017 | CPMC23 | ND | ND | ND | 531 | 1 | ND | 8 | 20944 | ND | 3 |
| 10/12/2017 | CPMC24 | 334 | 4876 | 79828 | 1896 | 1161 | 39 | 21 | 4574 | 2 | 99 |
| 13/12/2017 | CPMC25 | ND | ND | 20321 | 51 | 2 | ND | 32 | ND | ND | ND |
| 13/12/2017 | CPMC26 | 880 | 6231 | 73925 | 3349 | 1259 | ND | 112 | 8090 | ND | 51 |
| 15/12/2017 | CPMC27 | ND | ND | ND | 2170 | ND | ND | 5 | ND | 3 | 3 |
| 15/12/2017 | CPMC28 | 864 | 3292 | 88810 | 122 | 1146 | ND | 47 | 475 | 2 | 24 |
| 17/12/2017 | CPMC29 | 179 | 5832 | ND | 175 | ND | ND | 8 | 3451 | ND | ND |
| 17/12/2017 | CPMC30 | 734 | 3048 | 127721 | 1844 | 1189 | ND | ND | ND | ND | ND |
| 20/12/2017 | CPMC31 | ND | ND | ND | 682 | 29 | 135 | ND | 2609 | 4 | 10 |
| 20/12/2017 | CPMC32 | 722 | 6119 | 108115 | 364 | 1144 | 566 | 198 | 5693 | 6 | 140 |
| 27/12/2017 | CPMC37 | 660 | 862 | 1915 | ND | 20 | 23 | 308 | 238 | 5 | 196 |
| 27/12/2017 | CPMC38 | 1053 | 3953 | 90798 | 1301 | 1147 | ND | ND | 2615 | ND | 42 |
| 31/12/2017 | CPMC41 | 2093 | ND | 7138 | 204 | 16 | 6 | 912 | ND | 3 | 278 |
| 31/12/2017 | CPMC42 | 1493 | 5474 | 7835 | 3717 | ND | 257 | 3103 | 3372 | 10 | 566 |
| 03/01/2018 | CPMC43 | 4241 | ND | 989 | 310 | 46 | 24 | 378 | 737 | 10 | 188 |
| 03/01/2018 | CPMC44 | 877 | 1100 | 4453 | 1422 | ND | 30 | ND | 2457 | 8 | 19 |
| 05/01/2018 | CPMC45 | ND | 9034 | 2342 | 589 | ND | 212 | ND | ND | 15 | 14 |
| 05/01/2018 | CPMC46 | 115 | 3029 | 5354 | 1757 | ND | ND | ND | 9222 | 8 | ND |
| 07/01/2018 | CPMC47 | 2442 | 2984 | 4860 | 181 | 45 | 14 | 941 | ND | ND | 322 |
| 07/01/2018 | CPMC48 | 990 | 772 | 3078 | 1492 | ND | 18 | ND | 4102 | 5 | ND |
| 14/01/2018 | CPMC53 | 1214 | 3803 | 5646 | 301 | 55 | 176 | 115 | 2294 | 10 | 54 |
| 14/01/2018 | CPMC54 | 944 | 2934 | 2053 | 462 | 52 | 54 | 143 | 4078 | ND | 15 |
| 17/01/2018 | CPMC55 | 1297 | 3632 | 347 | 376 | 42 | 98 | 14 | 2323 | ND | 11 |
| 17/01/2018 | CPMC56 | 2100 | 3962 | 3985 | 3414 | ND | 88 | 153 | 9292 | ND | ND |
| 19/01/2018 | CPMC57 | 1290 | 2790 | ND | 49 | ND | 76 | 119 | 247 | 3 | ND |
| 19/01/2018 | CPMC58 | 1111 | 4106 | 5801 | 1215 | ND | 12 | 49 | 3210 | 7 | 100 |
| 21/01/2018 | CPMC59 | 662 | 1614 | ND | 163 | ND | 109 | 121 | 977 | 4 | ND |
| 21/01/2018 | CPMC60 | 1535 | 3229 | 1312 | 1818 | ND | 46 | 56 | 3420 | 7 | 64 |
| 24/01/2018 | CPMC61 | 1232 | 3807 | 347 | 397 | ND | 174 | 31 | 2846 | 2 | 40 |
| 24/01/2018 | CPMC62 | 1147 | 4634 | ND | 1722 | 38 | 170 | 88 | 5434 | 3 | 4 |
| 26/01/2018 | CPMC63 | 1233 | 2992 | 3574 | 152 | 61 | 149 | 43 | 1452 | ND | ND |
| 26/01/2018 | CPMC64 | 1136 | 3612 | ND | 953 | ND | 495 | 327 | 6050 | 5 | 359 |
| 28/01/2018 | CPMC65 | 555 | 6648 | 3704 | 85 | 69 | 535 | 306 | 5517 | 10 | 383 |
| 28/01/2018 | CPMC66 | 1111 | 3836 | 6602 | 1313 | ND | 142 | 42 | 3358 | ND | 34 |
| 11/02/2018 | CPMC77 | 299 | ND | 1435 | 215 | ND | 274 | 172 | 1425 | 16 | 1283 |
| 11/02/2018 | CPMC78 | 2765 | ND | 1595 | 608 | ND | 25 | 65 | 1425 | 8 | 430 |
| 14/02/2018 | CPMC79 | 387 | 208 | 982 | 250 | ND | ND | 145 | 1463 | 8 | ND |
| 14/02/2018 | CPMC80 | 581 | ND | ND | 1642 | ND | ND | 59 | 3170 | 5 | ND |
| 18/02/2018 | CPMC83 | 576 | 4137 | 59288 | 245 | ND | 129 | ND | 1990 | 1 | 71 |
| 18/02/2018 | CPMC84 | 1942 | 8646 | 8183 | 1998 | ND | 268 | 3156 | ND | 8 | 112 |

Annexes

| | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|------|------|--------|------|-----|-----|------|------|----|-----|
| 21/02/2018 | CPMC85 | 676 | 3476 | 35612 | 144 | ND | 61 | 147 | 1460 | 20 | 229 |
| 21/02/2018 | CPMC86 | 1577 | 4566 | 9311 | 1198 | ND | 243 | 2796 | ND | 7 | 88 |
| 28/02/2018 | CPMC91 | 129 | 8197 | 122839 | 575 | 317 | 720 | ND | 7544 | 9 | 308 |
| 28/02/2018 | CPMC92 | 612 | 7574 | 5717 | 3545 | ND | 203 | 275 | 5354 | 7 | 28 |
| 02/03/2018 | CPMC93 | 711 | 4428 | 104168 | 452 | ND | 30 | 78 | 2199 | ND | 4 |
| 02/03/2018 | CPMC94 | 485 | 4168 | 2789 | 1270 | ND | 250 | 2000 | ND | 7 | 358 |
| 07/03/2018 | CPMC97 | 856 | 5836 | 38589 | 69 | ND | 238 | 295 | 6719 | ND | 269 |
| 07/03/2018 | CPMC98 | 412 | ND | ND | 2861 | ND | 67 | 137 | 9208 | ND | 135 |
| 11/03/2018 | CPMC101 | ND | ND | ND | 183 | 48 | ND | 204 | 1470 | 6 | ND |
| 11/03/2018 | CPMC102 | 1734 | 627 | ND | 1234 | ND | 60 | 35 | 3184 | 5 | ND |
| 14/03/2018 | CPMC103 | ND | ND | ND | 370 | ND | ND | 231 | 1484 | ND | ND |
| 14/03/2018 | CPMC104 | 1341 | 1424 | 4317 | 876 | ND | 58 | ND | 1731 | 6 | ND |
| 16/03/2018 | CPMC105 | 4438 | 1834 | 2145 | 203 | 3 | ND | 105 | 737 | 11 | 47 |
| 16/03/2018 | CPMC106 | 1528 | 734 | 3960 | 1374 | ND | 36 | ND | 6390 | 10 | 357 |

| <i>Jour</i> | <i>Code</i> | <i>Cu</i> | <i>Zn</i> | <i>As</i> | <i>Br</i> | <i>Rb</i> | <i>Sr</i> | <i>Zr</i> | <i>Mo</i> | <i>Ag</i> | <i>Sb</i> | <i>Pb</i> |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 17/11/2017 | CPMC3 | 22 | 575 | ND | 51 | ND | ND | 290 | 5 | 1 | ND | ND |
| 17/11/2017 | CPMC4 | ND | ND | ND | 47 | 3 | ND | 65 | ND | ND | 163 | ND |
| 19/11/2017 | CPMC5 | ND | 736 | ND | 72 | ND | 5 | 180 | 8 | ND | ND | 472 |
| 19/11/2017 | CPMC6 | ND | 2925 | ND | 36 | 42 | ND | ND | 86 | 1 | 543 | 2927 |
| 26/11/2017 | CPMC11 | 285 | 305 | ND | 39 | ND | ND | ND | 10 | 1 | ND | 46 |
| 26/11/2017 | CPMC12 | ND | ND | ND | 40 | ND | 226 | 13 | ND | ND | ND | 57 |
| 08/12/2017 | CPMC21 | 14 | ND | ND | 72 | 20 | 14 | ND | ND | ND | 76 | 164 |
| 08/12/2017 | CPMC22 | 82 | 232 | ND | 708 | 24 | ND | 52 | 13 | 4 | ND | ND |
| 10/12/2017 | CPMC23 | 282 | ND | ND | 89 | ND | 34 | ND | ND | ND | 132 | ND |
| 10/12/2017 | CPMC24 | 302 | 192 | ND | 432 | ND | 6 | 70 | 14 | 4 | ND | 310 |
| 13/12/2017 | CPMC25 | 119 | ND | ND | 27 | 1 | 11 | 67 | ND | ND | 132 | 197 |
| 13/12/2017 | CPMC26 | 164 | 145 | ND | 609 | ND | ND | 50 | 2 | 7 | ND | ND |
| 15/12/2017 | CPMC27 | 61 | ND | 18 | ND | 16 | 332 | ND | ND | ND | 101 | ND |
| 15/12/2017 | CPMC28 | 27 | 41 | ND | 199 | 70 | ND | 47 | 239 | 2 | 10841 | ND |
| 17/12/2017 | CPMC29 | 352 | ND | 21 | 41 | ND | 40 | 106 | ND | ND | 107 | ND |
| 17/12/2017 | CPMC30 | ND | 188 | ND | 179 | ND | 8 | ND | 42 | ND | ND | 1870 |
| 20/12/2017 | CPMC31 | ND | ND | ND | 40 | 116 | 26 | 41 | ND | ND | 482 | ND |
| 20/12/2017 | CPMC32 | 183 | 82 | ND | ND | ND | 54 | 104 | 18 | 34 | 3271 | 1328 |
| 27/12/2017 | CPMC37 | ND | ND | ND | 34 | ND |
| 27/12/2017 | CPMC38 | 61 | 91 | ND | 134 | 1 | ND | 78 | 10 | 3 | 3809 | 1195 |
| 31/12/2017 | CPMC41 | ND | ND | ND | 28 | 5 | 400 | ND | ND | ND | ND | 293 |
| 31/12/2017 | CPMC42 | 96 | ND | ND | ND | 39 | 147 | ND | 15 | 1 | 1008 | 2271 |
| 03/01/2018 | CPMC43 | ND | ND | ND | 50 | ND | 110 | ND | ND | ND | ND | ND |
| 03/01/2018 | CPMC44 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 103 | ND | ND | 208 | 632 |
| 05/01/2018 | CPMC45 | ND | 1450 | ND | 60 | ND | ND | 64 | ND | 1 | ND | 1263 |
| 05/01/2018 | CPMC46 | 7 | 121 | ND | 8 | 37 | ND | 49 | 13 | ND | 582 | ND |
| 07/01/2018 | CPMC47 | 4622 | ND | ND | 37 | 8 | ND | ND | ND | ND | 7 | 219 |
| 07/01/2018 | CPMC48 | 55 | 234 | ND | ND | 32 | ND | ND | ND | ND | 333 | ND |

Annexes

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|------|
| 14/01/2018 | CPMC53 | 175 | ND | ND | 27 | 5 | 155 | 49 | 18 | 1 | 41 | 106 |
| 14/01/2018 | CPMC54 | ND | 574 | ND | 46 | 11 | 89 | 12 | ND | 2 | 87 | 368 |
| 17/01/2018 | CPMC55 | ND | 71 | ND | 50 | 30 | 118 | 63 | 14 | 1 | 3 | 439 |
| 17/01/2018 | CPMC56 | ND | 71 | ND | 26 | 22 | ND | 1 | 11 | 9 | 237 | 114 |
| 19/01/2018 | CPMC57 | 176 | ND | ND | 45 | 15 | 127 | 108 | ND | 2 | 10 | 138 |
| 19/01/2018 | CPMC58 | 85 | 248 | ND | 44 | 8 | 35 | 52 | 37 | 2 | 19 | 549 |
| 21/01/2018 | CPMC59 | ND | ND | ND | 28 | 16 | 174 | ND | 23 | 1 | ND | 146 |
| 21/01/2018 | CPMC60 | 84 | 288 | ND | 16 | ND | 121 | 4 | 19 | 2 | 110 | 70 |
| 24/01/2018 | CPMC61 | 89 | 600 | ND | 40 | ND | 67 | 78 | ND | 1 | 5 | 356 |
| 24/01/2018 | CPMC62 | 199 | ND | ND | 62 | ND | 146 | 57 | 22 | 3 | 106 | 282 |
| 26/01/2018 | CPMC63 | ND | ND | ND | 38 | 21 | 31 | 41 | 13 | 1 | 11 | 198 |
| 26/01/2018 | CPMC64 | 684 | ND | ND | 75 | 123 | 83 | 29 | 38 | 14 | 46 | 208 |
| 28/01/2018 | CPMC65 | 233 | ND | ND | 28 | ND | 121 | 30 | 32 | 12 | 22 | 37 |
| 28/01/2018 | CPMC66 | ND | ND | ND | 44 | ND | 59 | ND | 16 | 2 | 84 | 355 |
| 11/02/2018 | CPMC77 | 271 | ND | 2 | ND | 268 | 434 | ND | 4 | ND | 5 | ND |
| 11/02/2018 | CPMC78 | 522 | ND | ND | 23 | 64 | 618 | 41 | ND | 2 | ND | ND |
| 14/02/2018 | CPMC79 | 63 | ND | ND | ND | ND | 332 | 6 | 44 | 2 | 17 | ND |
| 14/02/2018 | CPMC80 | 216 | ND | ND | ND | ND | 380 | 12 | 22 | 2 | 130 | ND |
| 18/02/2018 | CPMC83 | 163 | 293 | ND | 360 | ND | ND | 39 | 1 | 5 | 13140 | ND |
| 18/02/2018 | CPMC84 | ND | 388 | ND | 59 | ND | ND | 72 | 75 | 1 | 193 | ND |
| 21/02/2018 | CPMC85 | 292 | 404 | ND | ND | ND | 81 | ND | 20 | 1 | ND | ND |
| 21/02/2018 | CPMC86 | 49 | 303 | ND | ND | 26 | ND | 34 | 11 | 1 | ND | ND |
| 28/02/2018 | CPMC91 | 493 | ND | ND | ND | 1 | ND | 38 | ND | 29 | 8072 | 2431 |
| 28/02/2018 | CPMC92 | 326 | 539 | ND | 22 | 28 | ND | 102 | 32 | 1 | 1394 | ND |
| 02/03/2018 | CPMC93 | 56 | 237 | ND | 558 | ND | 43 | 79 | 23 | 5 | 15416 | 486 |
| 02/03/2018 | CPMC94 | ND | 8 | ND | ND | 20 | 136 | 33 | ND | 1 | 212 | ND |
| 07/03/2018 | CPMC97 | 696 | 121 | ND | 599 | ND | 83 | 62 | 7 | 33 | 5163 | 1035 |
| 07/03/2018 | CPMC98 | 284 | 491 | ND | ND | 63 | ND | ND | 6 | ND | 169 | 883 |
| 11/03/2018 | CPMC101 | 371 | ND | ND | 153 | 40 | ND | ND | 3 | ND | ND | 207 |
| 11/03/2018 | CPMC102 | 112 | 560 | ND | 48 | 37 | ND | 47 | ND | ND | 131 | 3863 |
| 14/03/2018 | CPMC103 | 388 | 651 | ND | 34 | 37 | ND | 362 | 172 | ND | 46 | 263 |
| 14/03/2018 | CPMC104 | 240 | 214 | ND | 71 | 6 | ND | 44 | 34 | ND | 290 | 488 |
| 16/03/2018 | CPMC105 | ND | ND | ND | 92 | 35 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 16/03/2018 | CPMC106 | 112 | ND | ND | 8 | 37 | 482 | 25 | ND | ND | 224 | 2219 |

CPMC : Le nom d'échantillon du filtre après le prélèvement.

CPMC (x) : - Si x est impaire cela représente les PM2.5.

- Si x est paire cela représente les PM10.

ND : élément non déterminé.