

Evaluation de la contamination atmosphérique par les éléments chimiques inorganiques contenus dans les PM 10: Cas de la ville de KOLWEZI

[Assessment of atmospheric contamination by inorganic chemical elements contained in PM 10: Case of the city of KOLWEZI]

Patrick Mbweb Katshil¹ and Bavon Ndala Mbavu²

¹Commissariat General for Atomic Energy, Ministry of Scientific Research - Lubumbashi, RD Congo et Assistant à Institut Supérieur des Techniques Appliquées ISTA-KOLWEZI, RD Congo

²Assistant à Institut Supérieur des Techniques Appliquées ISTA-KOLWEZI, RD Congo

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The evaluation of atmospheric contamination by metallic trace elements in a given environment is carried out by several techniques and methods that can make it possible to retain certain inorganic and organic chemical elements that we find in our environment. This work allowed us to characterize the samples of aerosols collected from different places in the city of Kolwezi using the aerodynamic principle to sample them from a Dichotomous type device. During our research, we sampled twice a day; in the mornings and afternoons for a period of 2 hours per sampling.

As a result of industrial and artisanal mining activities releasing gaseous, liquid and solid waste into the environment associated with natural phenomena which at times concentrate contamination depending on the weather related to sudden climate change; we opted for a study based on the evaluation of atmospheric contamination by inorganic chemical elements contained in the PM 10 cases of the city of Kolwezi using portable X-ray fluorescence as a non-destructive analysis technique for aerosols fixed on the filter paper and as gravimetric sampling methods for collecting aerosols by impacting on filter paper.

After analyzing the filters, we noticed that all the districts of the city that were the subject of our study have an excessive concentration of air particles with a size of less than 10 microns.

The results obtained after the sampling work shows that the concentration of the particles sampled is 52 times greater than that published in 2012 by the WHO (i.e. 2623.524 micrograms/m³ in 2 hours of PM 10 particles which are greater than the limit value of the WHO, i.e. 50 microgram/m³). And after chemical analysis, we detected the following elements: Si, Mg, Al, Fe, Ca, Cu, Co, P, Zn, Cl, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, P, Col, K, Sb, Re, Mb, Cu.

KEYWORDS: sampling, contamination, inorganic chemical elements.

RESUME: L'évaluation de la contamination atmosphérique par les éléments Chimiques inorganiques dans un environnement donné s'effectue par plusieurs techniques et méthodes pouvant permettre de retenir certains éléments chimiques inorganiques et organiques que nous retrouvons dans notre milieu. Ce travail nous a permis de caractériser les échantillons des aérosols récoltés sur différents endroits de la ville de Kolwezi en utilisant le principe aérodynamique pour échantillonner à partir d'un appareil de type Dichotomous. Lors de nos recherches, nous avons effectué deux échantillonnages par jour; dans les avants et après-midis pour une durée de 2 heures par échantillonnage.

Suite aux activités minières industrielles et artisanales rejetant des déchets gazeux, liquides et solides dans l'environnement associé aux phénomènes naturels qui concentrent par moment la contamination suivant le temps liés au changement brusque du climat; nous avons opté pour une étude basée sur l'évaluation de la contamination atmosphérique par les éléments Chimiques inorganiques contenus dans les PM 10 (cas de la ville de Kolwezi) en utilisant la fluorescence-X portable comme

technique d'analyse non destructives des aérosols fixés sur le papier filtre et comme méthodes d'échantillonnage par gravimétrie permettant de récolter des aérosols par impactations sur un papier filtre.

Après analyses des filtres, nous avons remarqué que, tous les quartiers de la ville ayant fait objet de notre étude ont une concentration excessive des particules de l'air ayant une dimension inférieure à 10 microns.

Les résultats obtenus après les travaux d'échantillonnages montre que la concentration des particules échantillonnées est 52 fois plus grande que celle publiées en 2012 par l'OMS (soit 2623,524 microgramme/m³ en 2 heures des particules PM 10 qui soient supérieures à la valeur limite de l'OMS soit 50 microgramme/m³). Et après analyse chimique, nous avons chimiques détectés les éléments ci-après: Si, Mg, Al, Fe, Ca, Cu, Co, P, Zn, Cl, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, P, Col, K, Sb, Re, Mb, Cu.

MOTS-CLEFS: échantillonnage, contamination, éléments chimiques inorganiques.

1 INTRODUCTION

La connaissance de la contamination de l'environnement par les éléments Chimiques inorganiques s'est développée au cours du 20^e siècle afin d'expliquer le comportement des métaux, leurs impacts sur les écosystèmes et sur la santé humaine (ADEME, 1996). En RDC principalement dans la ville de Kolwezi, l'exploitation minière s'accroît de façon significative au fil du temps ce qui influence largement l'exploitation démographique.

Parmi les trois biotopes terrestres, l'atmosphère constitue un milieu éminemment complexe et fortement influencé par les activités humaines. Les phénomènes de contamination chimiques à petite, moyenne et grande échelle, sont assez bien documentés par FRESNEL BORIS A. CACHON en 2013 en termes d'émission, de transport et d'impacts. Des nombreuses études effectuées ces dernières années concernent les problèmes de contamination atmosphérique. En plus des polluants gazeux classiques (CO_x, SO₂, NO_x, Ozone), elles ont mis en évidence le rôle de la fraction particulière solide sur la santé humaine et sur l'ensemble des écosystèmes. Ces constatations ont amené l'union Européenne à inclure dans la liste des polluants à surveiller, les particules fines (PM₁₀, PM_{2,5}) et l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel (en plus du plomb).

Les polluants sont générés par les activités industrielles, mais aussi par l'incinération des déchets ménagers et par les trafics routiers.

La prise de conscience générale, au cours de ces dernières décennies, a motivé le développement des nouvelles technologies s'accordant à voir les émissions polluantes diminuées. Les métaux et les metalloïdes émis par les gaz d'échappement, les pneumatiques, l'usure mécanique, l'abrasion des huiles, l'exploitation minière, l'exploitation industrielle, le trafic routier, sont nombreux et se trouvent à de fortes concentrations dans l'environnement (VESCHAMBRE, 2006). Nous allons utiliser un échantillonneur de type dichotomous pour échantillonner les particules de matières de l'air et d'évaluer la contamination atmosphérique par les éléments Chimiques inorganiques contenus dans les PM 10; cas de la ville de Kolwezi.

Ce travail entrepris vise à acquérir une meilleure connaissance de la composition de l'atmosphère en zone minière de la ville cité ci-haut.

Cette étude a pour cadre la ville minière de Kolwezi et pour objet d'établir une référence de contamination atmosphérique des éléments chimiques.

Hormis, l'introduction et la conclusion, le présent travail est subdivisé en deux parties:

La première qui est essentiellement théorique, comprend deux chapitres qui parlent des généralités sur les particules de matière de l'air; suivi du deuxième chapitre qui définit les différentes parties de l'échantillonnage des particules de matière de l'air en se référant sur les processus d'échantillonnage des APM, de la pollution de l'air par les particules ainsi que de la construction de la rose de vents.

Quant à la deuxième partie qui porte sur les aspects pratiques du travail; elle comprend un chapitre qui parle du contexte d'étude.

2 GENERALITES SUR LES PARTICULES

2.1 DEFINITION ET PRINCIPALES SOURCES

2.1.1 DEFINITION

Les matières particulaires sont un indicateur indirect courant de la pollution de l'air. Elles affectent plus de personnes que n'importe quel autre polluant (WHO, 2022).

2.1.2 PRINCIPALES SOURCES

Si les particules d'un diamètre n'excédant pas 10 microns (\leq PM10) peuvent pénétrer et se loger profondément à l'intérieur des poumons, celles dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns (\leq PM 2,5) sont encore plus nocives pour la santé. Ces dernières peuvent franchir la barrière pulmonaire et entrer dans la circulation sanguine. L'exposition chronique aux particules contribue au risque de développer des maladies cardiovasculaires et respiratoires, et des cancers pulmonaires (WHO, 2022).

Les mesures de qualité de l'air sont généralement communiquées en termes de concentrations moyennes journalières ou annuelles de particules PM10 par mètre cube (m^3) d'air. Les mesures en routine de la qualité de l'air expriment d'ordinaire ces concentrations en microgrammes par mètre cube ($\mu g/m^3$).

Inversement, lorsque les concentrations de particules et de particules fines sont réduites, la mortalité associée baisse (en supposant que les autres facteurs restent inchangés). Ce constat permet aux décideurs de projeter les effets bénéfiques pour la santé de la population d'une réduction de la pollution atmosphérique particulaire (WHO, 2005).

Tous les composés ou éléments chimiques libérés dans l'atmosphère qui résultent principalement des activités humaines et qui peuvent causer des dommages chez les organismes vivants, sont considérés comme des polluants de l'air (Moriarty, 1999).

3 ECHANTILLONNAGE DE PARTICULES DES MATIERES DE L'AIR (APM)

3.1 PROCESSUS D'ECHANTILLONNAGE DES PARTICULES DE MATIERE DE L'AIR

Ils sont centrés sur les propriétés des aérosols. Les caractéristiques physiques et chimiques des particules sont souvent déterminées séparément. Les techniques physiques (mobilité électrique, comportement aérodynamique, diffusion de la lumière, etc.) permettent de déterminer la distribution en nombre des particules et donnent accès aux distributions en surface et en volume; la composition chimique est, quant à elle, déterminée suite à l'analyse de particules collectées. L'analyse chimique in situ est néanmoins réalisable avec la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplée à la microanalyse EDS (Energie Dispersive Spectrometry) (J. Prey, B.L. Van Drooge, A. Ripoll, T. Moreno, J. O. Grimalt, X. Querol, et al.; 2013).

Comment procéder pour l'échantillonnage des particules de la matière de l'air ?

Lors d'un prélèvement de particules, la conservation de l'intégrité de l'échantillon est essentielle. Néanmoins, il est difficile d'empêcher certaines modifications des caractéristiques de l'aérosol pendant l'échantillonnage à cause des facteurs suivants (M. Abdel-Salam, 2006):

- Inhomogénéité des concentrations de l'aérosol dans l'air;
- Dépôt des particules le long de la tête ou de la ligne d'échantillonnage (efficacité d'aspiration);
- Obstruction de la ligne d'échantillonnage par dépôt/agglomération de particules (cause de variations du débit de prélèvement);
- Réentrainement de l'aérosol échantillonné à cause du débit trop important;
- Evaporation/condensation des composés lors du transport dans la ligne d'échantillonnage. Dans le cas d'un impacteur à cascade, les phénomènes de rebond peuvent être limités par l'utilisation de substrats aux propriétés particulières. De plus, le support proposé doit pouvoir subir les traitements nécessaires (conservation, solvants pour l'extraction, résistance thermique, etc.) afin d'extraire les molécules à analyser (B. Temime, 2003).

La surface de collection, souvent un filtre, doit être suffisamment poreuse pour laisser circuler l'air tout en retenant l'aérosol avec une bonne efficacité. Lors de la collection des particules sur le filtre, différents mécanismes interviennent à

savoir, la diffusion, l'interception, l'impactation, la gravité ou l'interaction électrostatique (M. Abdel-salem, 2006). Ainsi, un bon filtre doit répondre aux critères ci-dessous (A. Robache, F. Mathe, J.C. Galloo, LSQA-EMD; 2001):

- Bonne capacité de rétention pour la classe granulométrique envisagée,
- Compatibilité du filtre avec les conditions de prélèvement et le traitement de l'échantillon,
- Faible perte de charge générée par le support dans le dispositif de prélèvement (colmatage),
- Inertie du filtre vis-à-vis des composés réactifs dans l'air.

3.2 POLLUTION PAR LES PARTICULES DE L'AIR

3.2.1 DÉFINITION

Les particules microscopiques sont omniprésentes dans notre environnement. Elles sont produites aussi bien par les processus naturels que par l'Homme et sont appelées aérosols. La définition scientifique du terme « aérosol » fait référence à des particules liquides ou solides en suspension dans un gaz porteur ou un mélange de (Seinfeld et Pandis, 2006), (Vincent, 1989).

Cependant, les termes « particules » et « aérosols » sont sensiblement différents. La notion d'aérosol inclut à la fois les particules et le gaz dans lequel elles se trouvent en suspension (Fontan, 2003). Dans la littérature, on emploie bien souvent ces deux termes indistinctement. Cependant, le terme « aérosol » faisant référence aux particules atmosphériques et à leur environnement gazeux, est plutôt utilisé par la communauté des chercheurs qui s'intéressent au climat et aux phénomènes dynamiques dans l'atmosphère. Les chercheurs qui étudient les niveaux de pollution et leur impact sur la santé, emploient plus souvent le terme « particules ». Cela s'explique essentiellement du fait que l'air associé aux particules, formant l'aérosol, est expiré par et n'est donc que le vecteur de transport des particules au sein de l'appareil respiratoire (Villenave et al., 2012).

3.3 CLASSIFICATIONS

Les particules atmosphériques, dont la taille peut varier de quelques nanomètres à quelques micromètres, peuvent être classées en différentes catégories, selon leurs processus de formation ou leurs tailles.

3.3.1 LE PROCESSUS DE FORMATION

Les particules atmosphériques peuvent être classées en aérosols primaires ou secondaires (d'Almeida et al., 1991). Les aérosols primaires sont émis directement dans l'atmosphère sous forme particulaire depuis les sources d'émission. La plupart du temps, ceux-ci sont d'origine naturelle telle que les sels marins, les débris volcaniques et également résultant de l'érosion des sols. Tandis que, les aérosols secondaires désignent les particules générées au sein même de l'atmosphère soit par le mode de conversion gaz-particules dû à la condensation des vapeurs d'origine naturelle ou anthropique, soit par l'évolution d'une particule primaire.

3.3.2 LA TAILLE

Une autre classification fréquemment utilisée s'appuie sur la distribution granulométrique des particules et donc sur leur diamètre (Whitby, 1977). Ce paramètre est important pour caractériser le pouvoir de pénétration des particules dans l'appareil respiratoire.

C'est la taille des particules qui gouverne leur transport dans l'air, leur élimination de l'atmosphère ainsi que leur déposition dans les voies respiratoires.

Selon leur granulométrie, (Whitby, 1977) a réparti les particules en deux groupes ci-dessous:

- **Les grosses particules** ($d_{ae} > 2,5 \mu\text{m}$): ce sont des particules générées par des procédés mécaniques. Elles proviennent de façon naturelle de l'érosion des sols, du pétilllement de la mer, des volcans ou sont introduites dans l'atmosphère de façon artificielle lors par exemple de la manipulation des matières premières (tas de minerais) sur les sites industriels.
- **Les particules fines** ($d_{ae} < 2,5 \mu\text{m}$): elles sont constituées de particules générées par l'activité industrielle et urbaine mais aussi de particules biogéniques. Cette classe de particules peut être divisée en un mode d'accumulation ($0,1 < d_{ae} < 2,5 \mu\text{m}$) et un mode de nucléation ($d_{ae} < 0,1 \mu\text{m}$), qualifiés respectivement de grandes particules et de noyaux d'Aitken (particules ultrafines). Les particules relatives au mode de nucléation proviennent des processus de condensation de vapeurs chaudes dans l'atmosphère. Ces particules représentent la part la plus importante en nombre d'aérosols, mais

aussi une masse peu importante en raison de leur taille extrêmement faible. Quant aux particules du mode d'accumulation, elles proviennent des conversions gaz-particules ainsi que de la croissance des particules précédentes sous l'effet de la coagulation ou de la condensation de vapeurs sur les particules existantes. Ce terme de mode d'accumulation est dû au fait que les procédés d'élimination sont les moins efficaces dans cette catégorie de taille d'aérosols, conduisant à l'accumulation des particules. Ces dernières représentent une part substantielle de la masse des particules.

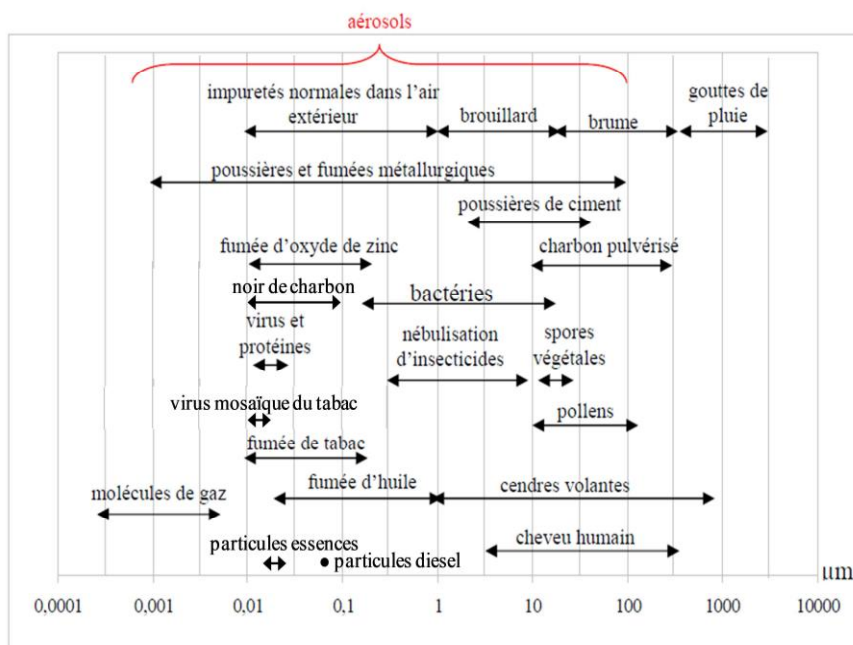


Fig. 1. diamètre aérodynamique des aérosols dans l'atmosphère (Source: adaptée de Lamy, 2004)

3.4 LA ROSE DES VENTS

3.4.1 DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT

C'est une représentation symbolique d'une étoile et non d'une fleur, par le nom donné de l'instrument. Elle est composée généralement de 32 divisions nommées les aires du vent pour indiquer la fréquence et la direction des vents dominants et ainsi s'orienter en mer. Chaque aire, nommé rhumb, est divisée en 11,15 degrés qui composent la quantité angulaire comprise entre les trente-deux aires de vent de la boussole. Les points cardinaux et collatéraux, représentés sur une plaque circulaire, figure l'horizon pour indiquer le nord et mettre en positionnement géographique. Entourée d'une division de 360 degrés, et pour chaque division en degré des points cardinaux majeurs de la rose des vents est de zéro degré pour le Nord, 90 degrés pour l'Est, 180 degrés pour le Sud et 270 degrés pour l'Ouest (Sylvain Levesque et Rimouski, 2017).

3.4.2 REPRESENTATION DE LA ROSE DES VENTS

Elle est souvent représentée sur les cartes marines anciennes pour indiquer les points cardinaux et les directions des vents. La rose des vents avait plusieurs lignes de cap qui s'entrecroisaient en divers points de la carte. Ces lignes donnaient les directions à prendre pour naviguer en mer. Cela aidait grandement les navigateurs pour aller à un point donné à un autre point donné géographiquement et en employant uniquement la boussole comme référence. Pour ce faire, le marin avec plusieurs années d'expérience en mer traçait une ligne droite qui unissait les ports d'origine et d'arrivée et prenaient le cap de la ligne parallèle et la plus proche à celle qu'il avait tracé. Alors le navire prenait ce dit cap jusqu'à en rencontrer une autre qui soit parallèle pour se rendre ainsi à sa destination. La rose des vents fut également représentée sur la base des sphères armillaires, cadrans solaires, théodolites et autres instruments comme parure et les mettre en positionnement géographique (Sylvain Levesque et Rimouski, 2017).

3.4.3 LE VENT DE LA VILLE DE KOLWEZI

La rose des vents était dessinée par des maîtres graveurs sur métal pour la représenter sous des formes d'une beauté très exotique tout en conservant en son intérieur, des dessins géométriques compliqués à réaliser comme une peinture unique d'un artiste.

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Kolwezi connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 6,1 mois, du 10 avril au 14 octobre, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 13,1 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Kolwezi est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 17,3 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 5,9 mois, du 14 octobre au 10 avril. Le mois le plus calme de l'année à Kolwezi est décembre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 9,1 kilomètres par heure.

La direction horaire moyenne principale du vent à Kolwezi varie au cours de l'année.

Le vent vient le plus souvent de l'est pendant 9,6 mois, du 27 février au 16 décembre, avec un pourcentage maximal de 95 % le 25 août. Le vent vient le plus souvent du nord pendant 1,7 semaine, du 16 décembre au 28 décembre, avec un pourcentage maximal de 34 % le 27 décembre. Le vent vient le plus souvent de l'ouest pendant 2,0 mois, du 28 décembre au 27 février, avec un pourcentage maximal de 37 % le 1 janvier.

Le pourcentage d'heures durant lesquelles la direction du vent moyen provient de chacun des quatre points cardinaux, excepté les heures au cours desquelles la vitesse du vent moyen est inférieure à 1,6 km/h. Les zones légèrement colorées au niveau des limites représentent le pourcentage d'heures passées dans les directions intermédiaires correspondantes (nord-est, sud-ouest et nord-ouest) (fr.weatherspark.com consulté le 14/06/2022 à 22H20'9").

4 DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE

Kolwezi est une ville minière qui a comme superficie de 213km² avec environ 510.643 habitants en 2021, chef-lieu de la province du Lualaba en République Démocratique du Congo. La ville est située au Sud-Est de la capital Kinshasa à 2070 km et à l'Ouest la ville de Likasi à 180 km, elle est également organisée en deux communes: la commune de Dilala à l'ouest et celle de Manika à l'Est. Nous avons choisi les zones le plus fréquentés pour faire notre échantillonnage et nous avons estimé que ces dites zones pouvaient recevoir une grande émission de particule fines; il s'agit des zones ci-dessous:

- Au niveau de la ville commerciale;
- Au niveau du quartier JOLIE-SITE- RVA;
- Au niveau du quartier MUTOSHI;
- Au niveau du quartier MALU;
- Au niveau du MWANGEJI.



Fig. 2. Carte de la ville de Kolwezi (source: Google maps)

4.1 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

4.1.1 MATERIELS ET METHODES

4.1.1.1 MATERIELS UTILISES

- Balance;
- Etuve;
- Dessiccateur;
- Dichotomous;
- XRF portable de marque Niton XL3t Ultra.

4.1.1.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Pour l'échantillonnage des particules de l'air, nous avons utilisé un appareil de type dichotomous; ce travail s'est fait pendant 5 jours dans les avant et après-midis. Cet appareil est capable d'échantillonner des particules de la taille inférieure à 10 et 2,5 micromètres (PM 10 et PM 2,5).

La campagne d'échantillonnage des particules de matière de l'air à visée 5 zones d'études de la ville de Kolwezi.

Nous avons Pesé le filtre à l'aide d'une balance analytique de précision puis séché à une température de 50°C pendant 10 minutes.

Après séchage, nous avons laissé refroidir ce dernier dans un dessiccateur pendant 5 minutes pour éviter qu'il absorbe l'humidité contenue dans l'air; ensuite, nous l'avons pesé et placé dans le porte filtre fixé sur l'appareil d'échantillonnage.

Pour démarrer, nous avons vérifié et fixé tous les paramètres liés aux conditions d'échantillonnage des particules de l'air que l'appareil nous a présenté; et d'autres ont été fixés par ce dernier en fonction des conditions climatiques enregistrés à l'aide d'une sonde connectée à cet appareil. Les paramètres que nous avons fixés sont les suivants: le volume des particules de l'air à échantillonner qui dépend du temps d'échantillonnage ou le temps d'échantillonnage qui dépend aussi du volume à échantillonner ainsi que la taille des particules à échantillonner. Après l'échantillonnage, nous avons récupéré le filtre, pesé et comparer le poids du filtre avant et après échantillonnage.

4.1.1.3 DONNEES METEOROLOGIQUES DES ZONES PRELEVEES SUR METEO KOLWEZI (WWW.METEOCITY.COM, 2022.)

a. Zone MALU

- Direction du vent: Est-Sud-Est;
- Vitesse du vent: 12 Km/h, rafales 25 Km/h.

b. Zone VILLE COMMERCIALE

- Direction du vent: Nord-Nord-Ouest;
- Vitesse du vent: 5 Km/h, rafales 16 Km/h.

c. Zone JOLIE AEROPORT

- Direction du vent: Nord-Nord-Ouest;
- Vitesse du vent: 8 Km/h, rafales 21 Km/h.

d. Zone MWANGEJI

- Direction du vent: Est-Sud-Est;
- Vitesse du vent: 12 Km/h, rafales 23 Km/h.

e. Zone Q. MUTOSHI

- Direction du vent: Est-Sud-Est;
- Vitesse du vent: 19 Km/h, rafales 35 Km/h

4.2 PRESENTATION DES RESULTATS

Après échantillonnages et d'analyses non destructives sur la Fluorescence-X portable de nos échantillons de filtres, nous avons obtenu les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous et comparés aux normes de l'OMS et UE:

Tableau 1. Normes directives de l'OMS et de l'UE concernant les PM2.5 et PM10 (Source: European Environment Agency, 2012)

Particules	OMS Moyenne Horaire	OMS Moyenne Annuelle	UE Moyenne Horaire	UE Moyenne Annuelle
PM 2,5	25 µg/m ³ (24 h)	10 µg/m ³		25 µg/m ³ 20 µg/m ³
PM 10	50 µg/m ³ (24 h)	20 µg/m ³	50 µg/m ³ (24 h)	40 µg/m ³

4.2.1 RESULTATS

4.2.1.1 RESULTATS D'ECHANTILLONNAGES DES PARTICULES DE L'AIR

Nous vous présentons dans les tableaux ci-dessous, les résultats d'échantillonnage des particules de l'air des différentes zones de notre étude:

La relation mathématique pour calculer la masse des particules déposées sur le filtre est:

- Humidité = poids du filtre avant étuvage en g – poids du filtre après étuvage (poids sec) en g
- Masse des particules = poids du filtre après échantillonnage en g - poids du filtre après étuvage (poids sec) en g
- Flux particules = masse des particules en µg / volume d'air échantillonnés en m³

Tableau 2. Résultats de la zone MALU

Code échantillon	Poids filtre avant étuvage(g)	Poids filtre après étuvage(g)	Différence de Poids (g)	Poids filtre après échantillonnage(g)	Masse des particules déposées sur le filtre(g)	Volume d' air échantillonné(m ³)
ECH 1	0,503	0,490	0,013	0,509	0,003	4,582
ECH 2	0,525	0,512	0,013	0,501	0,003	4,595

Tableau 3. Résultats de la zone VILLE COMMERCIALE

Code échantillon	Poids filtre avant étuvage(g)	Poids filtre après étuvage(g)	Différence de Poids (g)	Poids filtre après échantillonnage(g)	Masse des particules déposées sur le filtre(g)	Volume d' air échantillonné(m ³)
ECH 3	0,546	0,530	0,016	0,539	0,009	4,599
ECH 4	0,549	0,533	0,016	0,540	0,007	4,567

Tableau 4. Résultats de la zone JOLIE-SITE - R.V.A

Code échantillon	Poids filtre avant étuvage(g)	Poids filtre après étuvage(g)	Différence de Poids (g)	Poids filtre après échantillonnage(g)	Masse des particules déposées sur le filtre(g)	Volume d' air échantillonné(m ³)
ECH 5	0,500	0,490	0,01	0,502	0,012	4,589
ECH 6	0,513	0,503	0,01	0,515	0,012	4,574

Tableau 5. Résultats de la zone MWANGEJI

Code échantillon	Poids filtre avant étuvage(g)	Poids filtre après étuvage(g)	Différence de Poids (g)	Poids filtre après échantillonnage(g)	Masse des particules déposées sur le filtre(g)	Volume d' air échantillonné(m ³)
ECH 7	0,536	0,524	0,012	0,526	0,002	4,591
ECH 8	0,526	0,514	0,012	0,534	0,002	4,481

Tableau 6. Résultats de la zone Q. MUTOSHI

Code échantillon	Poids filtre avant étuvage(g)	Poids filtre après étuvage(g)	Différence de Poids (g)	Poids filtre après échantillonnage(g)	Masse des particules déposées sur le filtre(g)
ECH 9	0,566	0,555	0,011	0,559	0,004
ECH 10	0,555	0,504	0,011	0,545	0,001

Tableau 7. Résumé des résultats de la campagne d'échantillonnage

N°	Code	Zone d'échantillonnage	Norme ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Pendant 24h	Masse des particules déposées sur le filtre (μg) Pendant 2 h	Volume d' air échantillonnés(m^3)	Flux des particules échantillonnées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant 2 h
1	ECH 1	Q. MALU	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (En 2 h nous aurons 4,16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3000	4,582	654,736
2	ECH 2			3000	4,595	652,884
3	ECH 3	VILLE		9000	4,599	1956,947
4	ECH 4	COMMERCIALE		7000	4,567	1532,735
5	ECH 5	JOLIE-SITE -RVA		12000	4,589	2614,948
6	ECH 6			12000	4,574	2623,524
7	ECH 7	MWANGEJI		2000	4,591	435,635
8	ECH 8			2000	4,481	446,329
9	ECH 9	Q. MUTOSHI		4000	4,596	870,322
10	ECH 10			1000	4,526	220,946

4.2.1.2 RESULTATS DES ANALYSES NON DESTRUCTIVES PAR FLUORESCENCE-X PORTABLE

Tableau 8. Analyse des échantillons des filtres du 12/09/2022: avant-midi – quartier MALU

Eléments	ppm	Inc.
Mg	0,17	0,09
Al	706	207
Si	0,29	0,02
P	87	56
Cl	338	23
Ca	124	19
Ti	29	14
Fe	824	20
Co	16	4
Zn	43	3
Rb	4	1
Sr	4	1
Zr	6	1
Nb	5	1
Mo	7	1
Pd	3	2
Ag	5	2
Cd	8	3

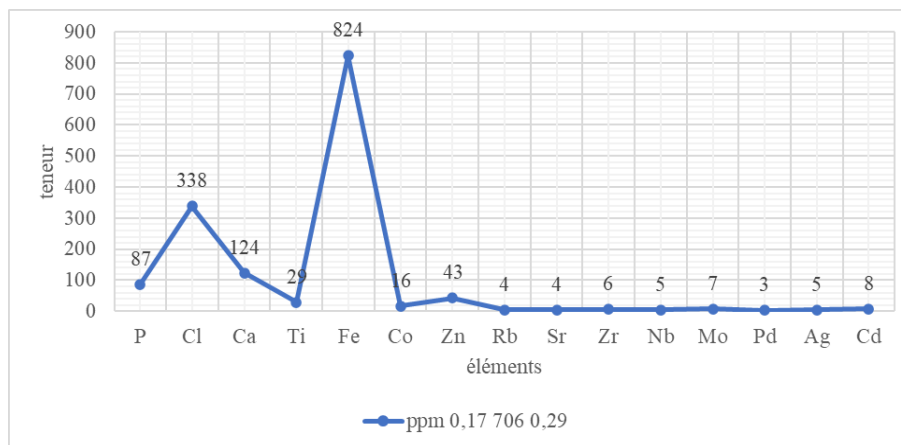


Fig. 3. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone MALU avant-midi

Tableau 9. Analyse des échantillons des filtres du 12/09/2022 après-midi – quartier MALU

Éléments	ppm	Inc.
P	168	62
Cl	249	23
Ca	93	14
Ti	25	10
Fe	767	22
Co	18	4
Zn	40	4
Rb	4	1
Sr	4	1
Nb	6	1
Zr	6	1
Mo	7	1
Pd	5	2
Ag	10	3
Cd	16	5
Mg	1226	885
Si	2514	167

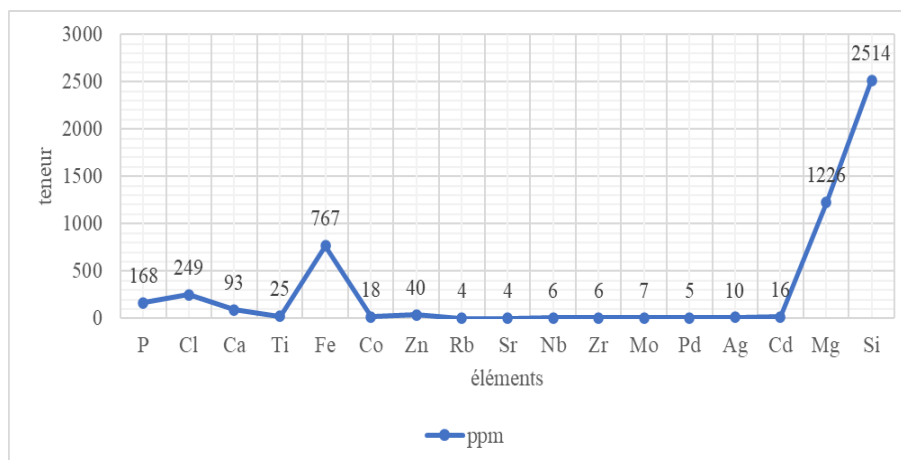
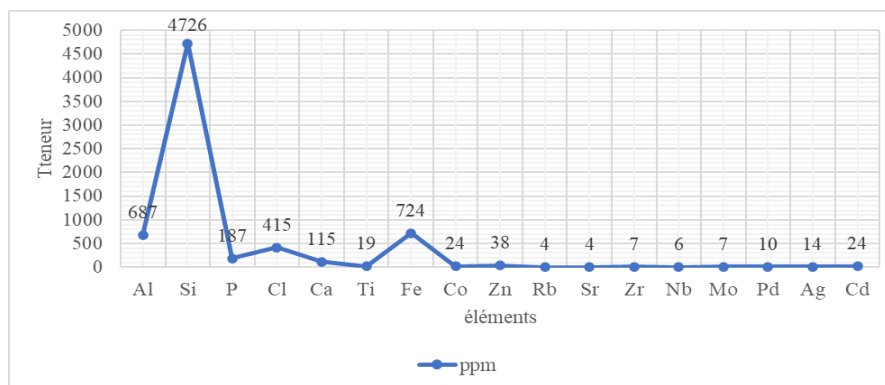


Fig. 4. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM de la zone MALU après-midi

Tableau 10. Analyse des échantillons des filtres du 13/09/2022 avant-midi – Ville Commerciale

Eléments	ppm	Inc.
Al	687	318
Si	4726	278
P	187	34
Cl	415	37
Ca	115	14
Ti	19	10
Fe	724	23
Co	24	5
Zn	38	4
Rb	4	1
Sr	4	1
Zr	7	1
Nb	6	1
Mo	7	1
Pd	10	4
Ag	14	5
Cd	24	6

**Fig. 5. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM de la zone Ville Commerciale - avant-midi****Tableau 11. Analyse des échantillons des filtres du 13/09/2022 après-midi – Ville Commerciale**

Eléments	ppm	Inc.
Al	616	230
P	102	66
Cl	290	26
Ca	130	16
Ti	19	12
Fe	718	22
Co	23	5
Zn	39	4
Rb	4	1
Sr	4	1
Zr	7	1
Nb	7	1
Mo	6	1
Pd	7	3
Ag	13	4
Cd	25	5
Si	2801	185

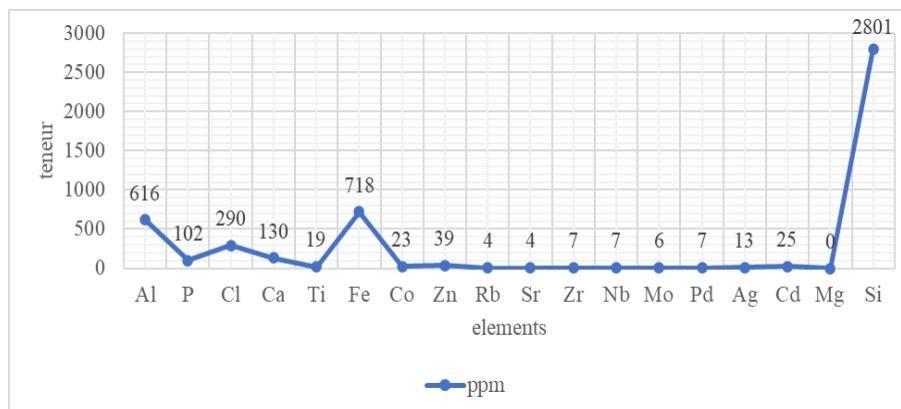


Fig. 6. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone ville Commerciale – après-midi

Tableau 12. Analyse des échantillons des filtres du 14/09/2022 avant-midi – Q. jolie-SITE –RVA

Eléments	ppm	Inc.
Mg	3579	928
Al	2862	254
Si	10900	300
Cl	289	21
K	9	41
Ca	500	24
Ti	173	16
Fe	1085	23
Co	17	4
Zn	43	3
Rb	4	1
Sr	4	1
Zr	7	1
Nb	6	1
Mo	7	1
Pd	6	2
Ag	8	3
Cd	18	4
Sb	10	6

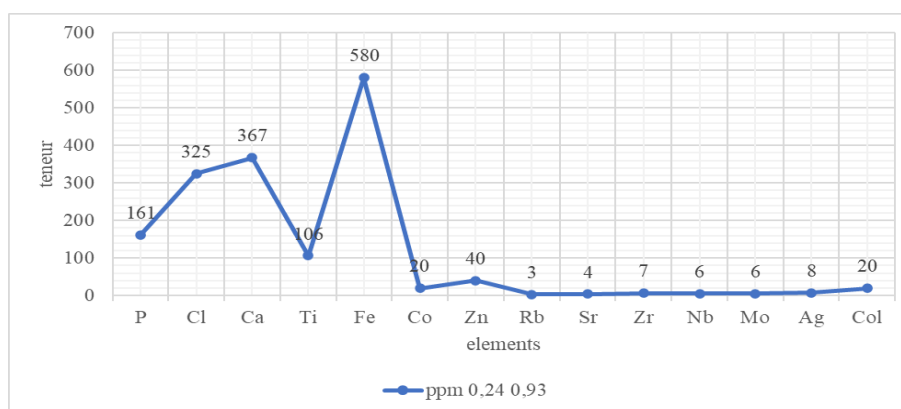


Fig. 7. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone Q. jolie-SITE -RVA - avant-midi

Tableau 13. Analyse des échantillons des filtres du 14/09/2022 après-midi – jolie-SITE –RVA

Eléments	ppm	Inc.
Mg	3102	1060
Al	0,24	0,03
Si	0,93	0,03
P	161	68
Cl	325	26
Ca	367	23
Ti	106	15
Fe	580	19
Co	20	4
Zn	40	3
Rb	3	1
Sr	4	1
Zr	7	1
Nb	6	1
Mo	6	1
Ag	8	3

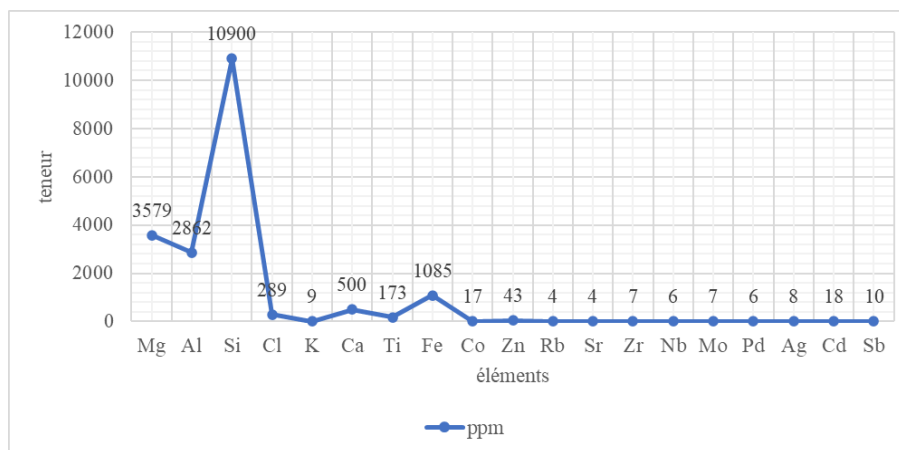


Fig. 8. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone Q, jolie-SITE -RVA – après-midi

Tableau 14. Analyse des échantillons des filtres du 15/09/2022 avant-midi – MWANGEJI

Eléments	ppm	Inc.
Mg	1245	994
Al	549	235
Si	3296	197
P	236	71
Cl	251	26
K	50	25
Ca	109	11
Ti	23	8
Fe	681	22
Co	27	5
Cu	3	5
Zn	37	4
Rr	4	2
Sr	4	1
Zr	6	1
Nb	7	1
Mb	7	1
Ag	7	3
Cd	9	4

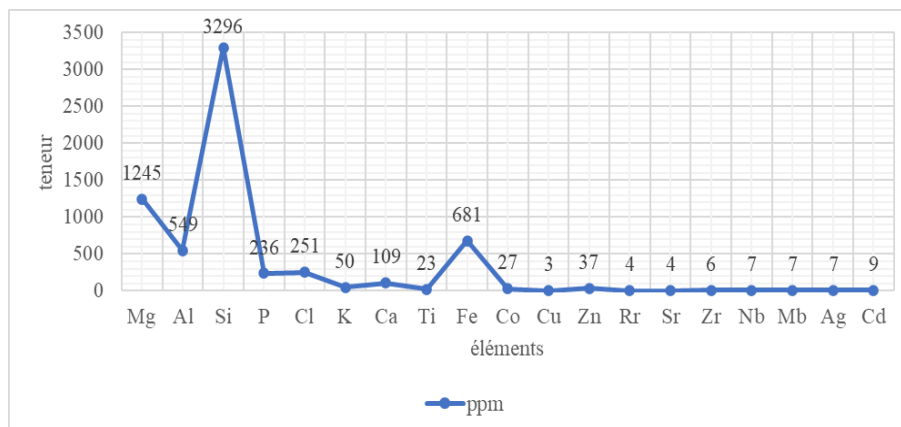


Fig. 9. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone MWANGEJI - avant-midi

Tableau 15. Analyse des échantillons des filtres du 15/09/2022 après-midi - MWANGEJI

Eléments	ppm	Inc.
Si	2142	141
Cl	208	20
Ca	94	13
Fe	709	21
Co	22	4
Zn	34	3
Rb	4	1
Sr	4	1
Nb	5	1
Mo	6	1

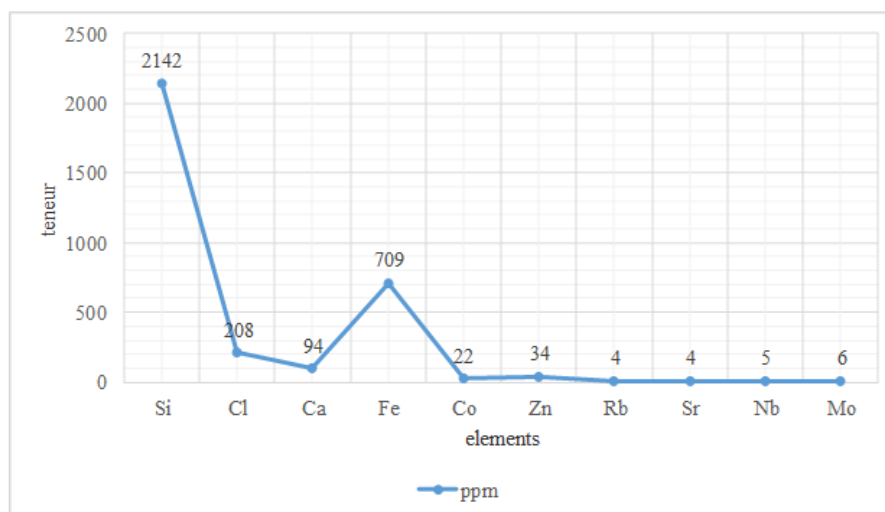


Fig. 10. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone MWANGEJI - après-midi

Tableau 16. Analyse des échantillons des filtres du 16/09/2022 avant-midi – Q. MUTOSHI

Eléments	ppm	Inc.
Si	3686	246
Cl	271	33
K	324	23
Ca	75	9
Ti	18	6
Fe	664	40
Co	32	9
Zn	25	6
Rb	31	1
Sr	4	1
Zr	6	2
Nb	7	2
Mo	7	2
Ag	7	4
Cd	9	5
Sb	9	9

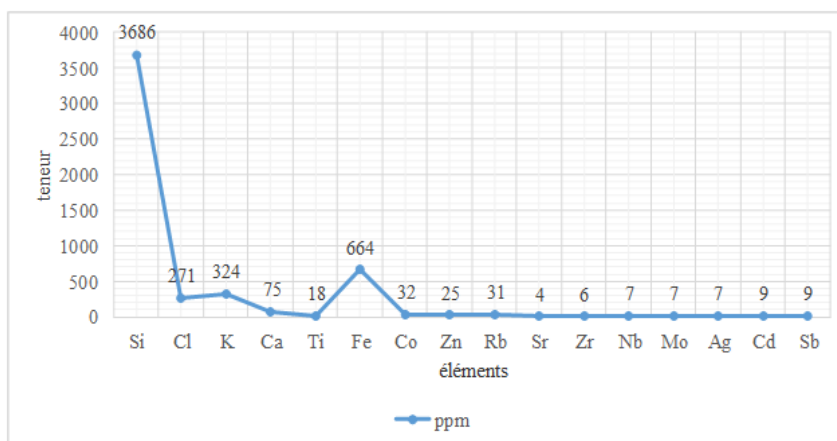


Fig. 11. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone Q. MUTOSHI - avant-midi

Tableau 17. Analyse des échantillons des filtres du 16/09/2022 après-midi – Q. MUTOSHI

Eléments	ppm	Inc.
Al	966	246
Si	3298	195
P	159	69
Cl	255	26
K	211	24
Ca	143	28
Ti	22	7
Fe	770	23
Co	20	5
Zn	33	4
Rb	5	1
Sr	4	1
Zr	6	1
Nb	4	1
Mo	7	1
Ag	8	3

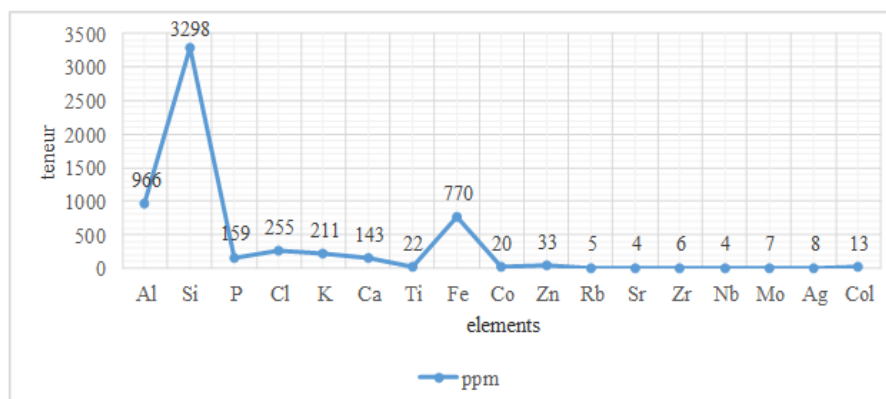


Fig. 12. Teneur en éléments chimiques détectés dans les APM dans la zone Q. MUTOSHI - après-midi

4.3 INTERPRETATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats présentés dans le tableau 7 ci-haut, montre que, les masses des particules de l'air déposées sur les filtres après échantillonnage sont très largement supérieures à la valeur seuil ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) publiée par l'Organisation Mondiale pour la Santé en sigle OMS;

Les figures 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 présentent des résultats d'analyses non destructives effectuées sur la fluorescence-X portable en vue de déterminer les éléments chimiques déposés sur le filtre et que nous retrouvons dans les airs de différentes zones d'habitations;

L'échantillonnage effectué dans les après-midis montre en général qu'il y a moins des particules dans les airs suite au faible mouvement du vent (atmosphère calme);

Les zones ayant fait objet de notre échantillonnage, ont une présence très excessive des éléments chimiques tels que: le Fer et le Silicium; et une forte concentration de Magnésium, a été constaté lors de l'analyse après échantillonnage de l'après-midi dans la zone de MALU lorsque nous comparons avec la norme de l'OMS;

La quantité et la qualité d'éléments chimiques échantillonnés dans différentes zones dépendent des conditions météorologiques de la ville (la direction du vent, la vitesse du vent, la température, pression, l'humidité de l'air);

Etant donné que L'Homme respire en moyenne 15 m^3 d'air par jour, et la zone d'échange gazeux de l'appareil respiratoire représente une superficie pouvant atteindre 100 m^2 . En effet, le poumon constitue ainsi l'interface la plus importante entre le milieu extérieur et l'organisme, ce qui lui confère un intérêt particulier en toxicologie. Par conséquent, cet appareil est une cible privilégiée pour les différents agents toxiques, les polluants gazeux et particulaires présents dans l'air que nous respirons. Cependant, on distingue deux régions fonctionnelles distinctes: les voies aériennes supérieures (la cavité nasale, le pharynx et le larynx pour les particules inférieures à $30 \mu\text{m}$) et les voies aériennes inférieures (la trachée, les bronches et les bronchioles pour les particules inférieures à $10 \mu\text{m}$; les alvéoles pulmonaires pour les particules inférieures à $2,5 \mu\text{m}$ et les tissus pulmonaires, la circulation pour les particules inférieures à $0,1 \mu\text{m}$) d'après (Bassart, 2006); nous constatons que, les résultats obtenus montrent que, la population de cette zone qui a fait objet de notre étude est exposée aux fortes concentrations des particules de l'air (APM) inférieure à $10 \mu\text{m}$ et risquent de contracter certaines maladies pulmonaires telles que: le cancer broncho-pulmonaire, l'activation métabolique, l'altération épigénétique et la génotoxicité.

En plus de la physiologie pulmonaire des patients (par exemple le motif de respiration et la géométrie du poumon), le dépôt des particules inhalées dépend de leurs propriétés physico-chimiques telles que: la forme, la charge, la densité, l'hygroscopie et surtout la taille qui est le facteur le plus important (Pilcer et Amighi, 2010). De plus, le débit d'inspiration joue également un rôle important dans ce dépôt (Dolovich, 2000);

En effet, les résultats présentés, permettent d'expliquer certains phénomènes physiologiques sur le dépôt des particules dans l'appareil respiratoire et peut se faire par cinq mécanismes qui sont:

- **L'impaction inertielle** (l'air inspiré change brusquement de direction à chaque bifurcation. L'impaction inertielle se produit donc lorsque les particules en suspension présentent une dynamique suffisante pour maintenir leurs trajectoires malgré les changements de direction du flux d'air, et par conséquent, entrent en collision avec les parois de

l'appareil respiratoire. Son effet augmente avec la taille et la densité des particules ainsi qu'avec la vitesse de l'air, donc elle augmente quand la respiration devient plus forte);

- **La sédimentation** (La sédimentation est un processus temps-dépendant durant lequel les particules se déposent sous l'influence de la gravité. L'effet de la sédimentation augmente avec la taille des particules, leur densité, ainsi que leur temps de résidence dans les voies respiratoires qui augmente quand la respiration se ralentit);
- **La diffusion** (La diffusion se produit lorsque la vitesse de l'air est presque nulle et lorsque les particules sont suffisamment petites pour subir un mouvement aléatoire due à des collisions avec les molécules de gaz. Ce processus, également appelé mouvement brownien, est corrélé à la taille des particules. A l'opposition des mécanismes d'impaction et de sédimentation, la déposition par diffusion est donc inversement proportionnelle à la taille des particules et elle est caractéristique surtout des particules ultrafines);
- **L'interception** (Ce phénomène se produit lorsque la particule dévier de son chemin, rencontre la paroi d'un conduit pulmonaire et se dépose);
- **L'interaction électrostatique** (Elle dépend des charges électrostatiques des particules atmosphériques. Deux mécanismes peuvent être à l'origine du dépôt des particules électriquement chargées: soit par attraction vers la surface par la charge image induite par la particule, ou bien par répulsion mutuelle des particules ayant la même charge et présentes en très grand nombre) (Carvalho et al., 2011);

Des nombreuses études épidémiologiques ont été menées afin d'explorer un éventuel lien entre l'exposition chronique aux particules atmosphériques et l'apparition des pathologies respiratoires dont le cancer broncho-pulmonaire tel qu'énuméré dans les lignes précédentes. Néanmoins, dans le cas de cette étude vu la proportion des particules échantillonnés présentés dans le tableau 7 ci-haut, nous rapprochons plus des mécanismes de toxicité pouvant être induits par des particules, qui pourraient influencer leur potentiel cancérigène, l'activation métabolique, l'altération épigénétique et la génotoxicité;

Ainsi, nous remarquons que certains Eléments en excès sont facteurs de plusieurs maladies bien qu'étant indispensable à l'organisme c'est le cas de:

- **Le Fer** favorise l'oxygénation du sang des cellules et des muscles mais en excès, lorsqu'il s'accumule dans certains organes cause souvent des lésions au foie (cirrhose, cancer), au cœur (insuffisance cardiaque) et au pancréas (diabète) et le Fer est important dans l'organisme;
- **Le Silicium** retarde le vieillissement et redonne de l'énergie à l'organisme qui devient plus efficace pour régénérer les os, cartilages, dents, ongles, cheveux, système veineux, mais en excès impacte négativement le cerveau et l'ensemble du système nerveux, mais il peut nous être aussi utile dans le cas où le silicium organique empêche l'organisme d'assimiler l'aluminium, ce qui fait mécaniquement baisser la toxicité;
- **Le Magnésium** contribue à contrebalancer l'activité du système nerveux, soutient également la production de sérotonine mais en excès peut causer des désagréments plus au moins graves; on parle de l'hypermagnésémie;
- **Le Chlore** permet tout comme le sodium, le métabolisme de l'eau et par conséquent la régulation de la rétention de l'eau dans le corps humain. Son excès dépend du dosage, son intoxication provoque des troubles digestifs impliquant des vomissements, des diarrhées et la déshydratation sur les parties humides du corps humain (aine, aisselles);
- **L'Aluminium** qui est tout d'abord toxique pour les cellules du cerveau et peut provoquer des encéphalopathies, ainsi que des troubles du psychisme et lorsqu'elle ingère d'une manière courante cause la sclérose en plaque, l'Alzheimer et la maladie de parkinson;
- **Le Calcium** intervient principalement dans la formation et la solidité des os en association avec la vitamine D. En excès provoque l'hypercalcémie ayant comme premiers symptômes la constipation, des nausées, des vomissements, des douleurs abdominales et une perte d'appétit. La diurèse peut être anormalement élevée, entraînant une déshydratation et une augmentation de la soif. Ces données sur les inconvénients et avantages de ces éléments chimiques sont publiées sur le site Google;

La teneur du cadmium dans le tableau 11 nous donne une valeur de 25 ppm ($25 \cdot 10^9 \text{ ng/m}^3$) tellement grande pour une contamination de l'air ambiante qui soit supérieur à 5 ng/m^3 d'après la directive n° 2004/107/CE du 15 décembre 2004 consulté sur le site <http://www.airparif.asso> le 30/09/2022;

Nous remarquons que, les éléments chimiques contenus dans les aérosols, peuvent provenir de différentes régions considérées comme zones d'origines de la pollution atmosphérique (donc la pollution atmosphérique peut avoir comme origine: locale, régionale, continentale et intercontinentale); par ailleurs, l'auteur HARRY WEXLER, SC.D. dit dans sa publication

éditée vers les années 1951; que les conditions météorologiques ne jouent qu'un rôle limité dans la lutte contre la pollution de l'air selon le document publié par WEXLER, H. (1951° Bull. Amer. Meteorol.soc., 32, 48);

Nous n'avons pas pu faire l'échantillonnage suivant les saisons climatiques de notre ville ou province à cause du temps. L'échantillonnage devrait se faire pendant toute la saison de pluie ainsi que toute la saison sèche à de temps différents pour nous permettre d'évaluer le niveau de pollution dans la ville à différentes saisons.

5 CONCLUSION

Le travail d'échantillonnage des particules de l'air qui a fait objet de notre recherche, nous a permis d'avoir une idée sur les masses d'aérosols échantillonnées contenues dans les airs pendant un temps bien défini ainsi que certains éléments chimiques et leurs concentrations en utilisant le spectromètre de fluorescence-X portable pour déterminer la qualité et quantité des particules contenues dans l'air que nous respirons dans certaines parties de la ville de Kolwezi. Cette technique non destructive d'analyse que nous avons opté, a permis de nous orienter sur la qualité et la quantité d'éléments chimiques détectés. Les résultats obtenus après les travaux d'échantillonnages montre que la concentrations des particules échantillonnées est 52 fois plus grande que celle publiées en 2012 par l'OMS (soit 2623,524 microgramme/m³ en 2 heures des particules PM 10 qui soient supérieures à la valeur limite de l'OMS soit 50 microgramme/m³) et ainsi que, les éléments chimiques détectés sur les papiers filtres sont les suivants: Si, Mg, Al, Fe, Ca, Cu, Co, P, Zn, Cl, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, P, K, Sb, Re, Mb, Cu.

Ces résultats obtenus montrent que, la population de cette zone qui a fait objet de notre étude est exposée aux fortes concentrations des particules de l'air (APM) inférieure à 10 µm et risquent de contracter certaines maladies pulmonaires telles que: le cancer broncho-pulmonaire, l'activation métabolique, l'altération épigénétique et la génotoxicité dues par un excès des particules de l'air inférieure à 10 microns (Ex: Les voies aériennes inférieures: la trachée, les bronches et les bronchioles affectés par les particules inférieures à 10 µm)

Eu égard aux résultats présentés après analyses chimiques, nous remarquons qu'il est important de mettre sur pied une bonne procédure d'analyse de ces papiers filtres contenant ces particules de matières pour permettre de donner avec toutes les précisions la qualité et la quantité d'éléments chimiques retenus sur ces derniers après échantillonnage des APM.

A cet effet, Nous proposons de:

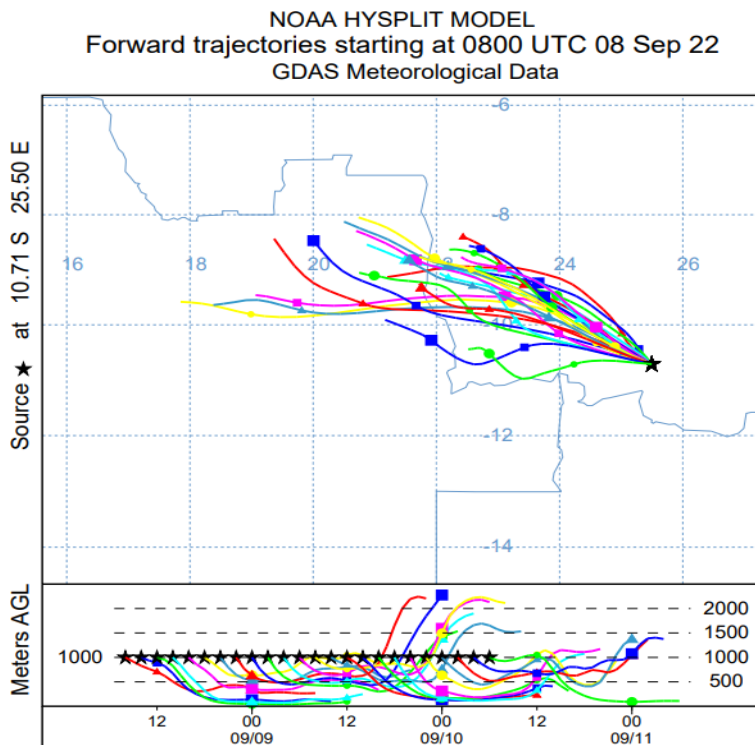
- Faire une étude sur la modélisation de la dispersion atmosphérique pour connaître en tout point de l'espace et à tout instant les concentrations en polluants, mais aussi d'estimer l'impact des polluants sur les écosystèmes, et utiliser le modèle HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*) pour l'étude des rétrotrajectoires des masses d'air telle que nous avons présenté dans les annexes I, II et III, qui montrent que la pollution est régionale en date du 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, et 18/09/2022, et elle est remarquée à une hauteur allant de 250 à 3500 mètres. Or, les instabilités sont influencées par les échanges mécaniques et thermiques entre le sol et l'air (frottement de l'air sur le sol, présence d'obstacles) dans la couche limite atmosphérique d'épaisseur de quelques centaines de mètre à 1 ou 2km au plus et d'autres instabilités sont liées aux conditions météorologiques à l'échelle planétaire (dépression, anticyclone), cet ouvrage a été publié par Moussiopoulos N, Berge E, Bøhler T et al. En 1996;
- D'analyser aussi par d'autres techniques instrumentales beaucoup plus poussées que la fluorescence-X portable telles que: la spectrométrie de masse à deux lasers, la microscopie électronique à balayage, la microscopie électronique à transmission, la spectrométrie à dispersion total d'énergie... etc. et mettre au point une procédure adaptée pour permettre de lire les types des papiers filtres (fibre organique pour lequel nous ne savons pas publier sa composition chimique) que nous avons utilisé.

REFERENCES

- [1] A. Robache, F. Mathe, J.C. Galloo, LSQA-EMD) 2001. Prelevements et analyse des métaux dans les particules en suspension dans l'air ambiant; consulté le 11/04/2022 à 9H00.
- [2] J. Prey, B.L. Van Drooge, A. Ripoll, T. Moreno, J. O. Grimalt, X. Querol, et al.) 2013. Une évaluation de la masse, de la concentration nimbée, de la composition chimique et des types de particules dans une cafeteria avant et après passage d'une loi anti-tabac consulté le 15/04/2022 à 18H20.
- [3] ADEME, 1996. La pollution atmosphérique; consulté le 12/02/2022 à 16H14.
- [4] B. Temime, 2003. Contribution à l'étude de la participation des HAPs entre les phases gazeuse et particules; consulté le 2/04/2022 à 21H30.

- [5] Bassart, E. (2006). Anatomie-Physiologie; consulté le 18/09/2022 à 19H29.
- [6] Carvalho, T., Peters, J., & Williams III, R. (2011). Influence de la taille des particules sur le dépôt pulmonaire régional – Quelles preuves existe-t-il ? consulté le 26/09/2022 à 22H58.
- [7] d'Almeida, G., Koepke, P., & Shettle, E. (1991).Aérosols atmosphériques, climatologie globale et caractéristiques radiatives. Virginie; consulté le 7/06/2022 à 8H8.
- [8] Dockery DW et al., 1993.Une association entre la pollution de l'air et la mortalité dans six villes américaines; consulté le 24/03/2022 à 22H10.
- [9] Dolovich, M. (2000). Influence du débit inspiratoire, de la taille des particules et du calibre des voies respiratoires sur l'administration de médicaments en aérosol dans les poumons; consulté le 20/09/2022 à 10H37.
- [10] European Environment Agency, 2012. EEA - Air quality in Europe - 2012 report; consulté le 15/06/2022 à 12H2.
- [11] Fontan, J., 2003. Les pollutions de l'air, les connaitre pour mieux le combattre; consulté le 5/06/2022 à 22H4.
- [12] FRESNEL BORIS A. CACHON, 2013.caracterisation physicochimique des matières particulaires d'origine urbaine et impact toxicologique sur des cellules épithéliales bronchitiques humaines; consulté le 03/03/2022 à 10H11.
- [13] <http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/dcret15122004>. Consulté le 30/09/2022 à 20H10.
- [14] <http://www.Google.com> Consulté le 30/09/2022 à 17H34.
- [15] <https://www.weatherspark.com>. Climat de Kolwezi; consulté le 14/06/2022 à 22H20.
- [16] Jerrett M, 2005. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles; consulté le 30/03/2022 à 18H18.
- [17] Lamy, P., 2004. Rapport d'étude. Nanomatériaux : Risques pour la santé et l'environnement. Centre de Recherche sur la Matière Divisée; consulté le 12/06/2022 à 18H2.
- [18] Laure J. Moriarty, 1999.L' étude des polluants dans les écosystèmes. 3^e Edition consulté le 05/04/2022 à 11H45.
- [19] M. Abdel-Salam, 2006. Echantillonnage des aérosols en milieu ambiant du travail; consulté le 25/04/2022 à 20H30.
- [20] Moussiopoulos N, Berge E, Bøhler T et al. (1996). Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. Report of the European Topic Centre on Air quality to the European Environment Agency.
- [21] Pilcer, G., & Amighi, K. (2010). Stratégie de formulation et utilisation d'excipients dans l'administration pulmonaire de médicaments; consulté le 19/06/2022 à 17H27.
- [22] Pope et al., 1995. La pollution atmosphérique particulaire en tant que prédicteur de la mortalité dans une étude prospective sur des adultes américains; consulté le 30/03/2022 à 10H09.
- [23] Seinfeld J. et Pandis, 2006. Chimie atmosphérique et physique; de la pollution de l'air au changement climatique. New York; consulté le 7/04/2022 à 7H09.
- [24] Sylvain Levesque et Rimouski, juin 2017. La rose de vents; consulté le 14/06/2022 à 19H50.
- [25] Villenave, A., Aymoz, G., Beekmann, M., Baeza-Squiban, A., et Colosio, J. (2012) Pollution atmosphérique; consulté le 5/06/2022 à 11H46.
- [26] Vincent J., 1989. Echantillonnage des aérosols, Science et pratique; consulté le 13/05/2022 à 20H17.
- [27] WEXLER, H. (1951) Bull. Amer. Meteorol.soc., 32, 48. Consulté le 30/09/2022 à 22H5.
- [28] Whitby, K. (1977). Caractérisation physique des aérosols. Méthodes et normes de mesure environnementale; consulté le 12/06/2022 à 9H21.
- [29] WHO, 2022. www.who.int; consulté le 17/03/2022 à 20H41.

ANNEXE I: EXEMPLE DE RETROTRAJECTOIRE MODELISE PAR HYSPLIT POUR LA VILLE DE KOLWEZI



ANNEXE II: EXEMPLE DE RETROTRAJECTOIRE MODELISE PAR HYSPLIT POUR LA VILLE DE KOLWEZI

