

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences Biologiques de l'Environnement  
Spécialité : Toxicologie Industrielle et Environnementale



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle  
En vue de l'obtention du diplôme

**MASTER**

*Thème*

**Estimation de la pollution atmosphérique  
métallique dans la région de Bejaïa en  
utilisant les écorces d'arbres**

Présenté par :

**CHENNIT Nadia & BERKANE Zahra**

Soutenu le : 15/09/2022

Devant le jury composé de :

Mme. CHELLI-TABTI D.

Mme. BENAÏSSA F.

Melle. MELLAHI D.

Melle. ABDELLI M.

MAA

MCA

Doctorante

MCB

Président

Encadreur

Co-Encadreur

Examineur

**Année universitaire : 2021/2022**

## Remerciements

*Nous remercions tout d'abord Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé la santé, le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail.*

*Nos sincères et vifs remerciements à notre promotrice Mme BENAÏSSA pour sa grande contribution, ses conseils précieux et son temps consacré pour le bon déroulement de notre travail.*

*Nos remerciements sont aussi exprimés à notre Co-promotrice Melle MELAHI pour son encadrement et son suivi.*

*Nous avons l'honneur de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à Mme CHELLI et Melle ABDELLI pour avoir consacré leur temps et d'avoir accepté de juger et examiner notre travail.*

*Nos humbles remerciements s'adressent au personnels de laboratoire 3BS pour leur hospitalité, aide et bon accueil.*

*Nos profonds remerciements vont au directeur du plateau technique physico-chimique CRAPC pour son accueil et son accord pour effectuer quelques analyses.*

*Nos remerciements sont adressés à tous ceux qui ont participé de près où de loin à la réussite de ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont toujours soutenue et pour leurs encouragements et leur soutien, que dieu vous protège, je vous aime.*

*À mes chers grands parents, à qui je souhaite une longue vie  
À mes chers sœurs et frères, que j'aime beaucoup je vous souhaite une  
vie pleine de réussite.*

*À mes chères amies, avec qui j'ai passé des moments inoubliables  
À ma camarade NADIA et sa famille*

*À toutes la promotion master II toxicologie industrielle et  
environnementale (2021/2022).*

*À tous ceux qui sont chers pour moi*

*ZAHRA*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents surtout à ma mère pour son indéfectible patience, ses sacrifices et son soutien au cours de mes longues études. Que dieu vous protège, je vous aime.*

*À mes chers frères, à ma sœur et à mes neveux que j'aime beaucoup je vous souhaite une vie pleine de réussite.*

*À mes chères amies, avec qui j'ai passé des moments inoubliables,  
Yasmina, Djidji, Ouzna et Nabila  
Sans oublier ma camarade Zahra.*

*À toutes la promotion master II toxicologie industrielle et  
environnementale (2021/2022).*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*NADIA*

# *Sommaire*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Liste des abréviations*

*Introduction*.....1

## *Partie Théorique*

### *Chapitre I : Pollution Atmosphérique Métallique*

1. pollution Atmosphérique.....	3
2. Sources de pollution .....	3
2.1. Pollution organique .....	4
2.2. Pollution Inorganique.....	4
3. Métaux lourds.....	4
3.1. Généralités.....	4
3.2. Classification.....	5
3.3. Sources des métaux lourds .....	5
3.3.1. Sources naturels.....	5
3.3.2. Sources anthropique.....	6
3.4. Répartition et devenir des métaux lourds dans l'air.....	7
3.5. Impacts des métaux lourds .....	8
3.5.1. Effets sur l'environnement.....	8
3.5.2. Effets sur la santé.....	8
4. Eléments traces étudiés (Zinc, Cuivre et Plomb).....	9
4.1. Plomb .....	9
4.1.1. Définition.....	9
4.1.2. Impacts.....	9

4.2. Cuivre .....	9
4.2.1. Définition.....	9
4.2.2. Impacts.....	10
4.3. Zinc.....	10
4.3.1. Définition.....	10
4.3.2. Impacts.....	10

## ***Chapitre II : Biosurveillance végétale de la qualité de l'air***

1. Définition de la bio-surveillance .....	12
2. Objectifs de la bio-surveillance.....	13
3. Bio indication .....	13
4. Bioaccumulation.....	14
5. Stratégies de mise en œuvre de la bio-surveillance.....	14
5.1. Approche passive .....	14
5.2. Approche active.....	15
6. Organismes vivants utilisés pour la bio-surveillance.....	16
6.1. Lichens .....	16
6.2. Mousses.....	16
6.3. Végétaux supérieurs .....	17
7. Métaux lourds et végétaux supérieurs.....	18

## ***Partie Pratique***

### ***Chapitre I : Matériel et Méthodes***

<b><i>1. Situation géographique de la zone d'étude : la ville de Bejaïa.....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>2. Climat de la ville de Bejaïa.....</i></b>	<b><i>20</i></b>
2.1. Températures .....	21

2.2. Pluviométrie .....	21
2.3. Vents.....	21
2.4. Humidité.....	21
2.5. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен .....	22
<b>3. Échantillonnage .....</b>	<b>22</b>
3.1. Espèce utilisée .....	24
3.2. Procédures d'échantillonnage.....	24
<b>4. Paramètres physiologiques étudiées .....</b>	<b>25</b>
4.1. Dosage de la chlorophylle .....	25
4.2. Dosage de la proline .....	27
<b>5. Paramètres de pollution particulaire .....</b>	<b>29</b>
5.1. Particules déposées sur les feuilles (PMF) .....	29
5.2. Particules déposées sur les troncs (PMT).....	30
6. Paramètres de pollution métallique .....	30
6.1. Broyage .....	30
6.2. Calcination .....	31
6.3. Spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA).....	32
6.4. Spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) .....	33
<b>7. Analyses statistiques des résultats.....</b>	<b>34</b>

## ***Chapitre II : Résultats et Discussion***

<b>1. Résultats.....</b>	<b>35</b>
<b>1.1. Paramètres physiologiques .....</b>	<b>35</b>
1.1.1. Chlorophylle.....	35
1.1.1.1. Chlorophylle (a) .....	36
1.1.1.2. Chlorophylle(b) .....	37

1.1.2. Proline .....	39
<b>1.2. Paramètres de pollution particulaire .....</b>	<b>41</b>
1.2.1. Particules déposées sur les feuilles (PMF) .....	41
1.2.2. Particules déposées sur les troncs (PMT) .....	43
<b>1.3. Paramètres de pollution métallique .....</b>	<b>45</b>
1.3.1. La Spéctrométrie de fluorescence des Rayon X (FRX) .....	46
1.3.2. La Spéctrophotométrie d’Absorption Atomique (SAA) .....	47
<b>1.4. Analyse en Composantes Principales (ACP).....</b>	<b>48</b>
<b>2. Discussion .....</b>	<b>49</b>
2.1. Paramètres physiologiques.....	49
2.2. Paramètres de pollution particulaire.....	50
2.3. Paramètres de pollution métallique.....	50
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>52</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>54</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>59</b>
<b>Résumés.....</b>	



## *Liste des figures*

<b>Figure 1.</b> Représentation schématique du cycle géochimique des métaux lourds dans l'environnement .....	6
<b>Figure 2.</b> Concept de la bio surveillance . .....	13
<b>Figure 3.</b> Carte géographique de la ville de Bejaia .....	20
<b>Figure 4.</b> Diagramme de Bagnouls et Gaussen de la région de Bejaïa. ....	22
<b>Figure 5.</b> Carte géographique montrant les sites de prélèvements effectués le 24 Mai 2022 à Bejaia.... ..	23
<b>Figure 6.</b> Schéma illustrant l'échantillonnage du dépôt de surface sur le tronc en place.....	24
<b>Figure 7.</b> Broyage de la matière fraîche en présence d'acétone .....	26
<b>Figure 8.</b> Récupération de surnageant obtenu de broyage des feuilles après centrifugation..	26
<b>Figure 9.</b> Tube contenus la matière fraîche et le méthanol 80%. .....	27
<b>Figure 10.</b> Tubes à essais dans le bain marie et après ajout de l'acide acétique et de la solution en proline.....	28
<b>Figure 11.</b> Tube contenus la solution après ébullition et l'extraction de la proline. ....	28
<b>Figure 12.</b> Séparation des deux phases de la solution et apparition de la proline en rouge. ...	29
<b>Figure 13.</b> Filtration de la matière fraîche après incubation dans le chloroforme.....	30
<b>Figure 14.</b> Séchage des écorces à l'étuve (a) et poudre d'écorces obtenue après broyage automatique. ....	31
<b>Figure 15.</b> Poudre de différentes stations dans des creusets de four à moufle.....	32
<b>Figure 16.</b> Appareil de Spectrophotométrie d'Absorption Atomique.....	33
<b>Figure 17.</b> Pression des échantillons avec le presseur (a) des pastilles (b). ....	33
<b>Figure 18.</b> Pastille prête à être lue par la FRX. ....	34
<b>Figure 19.</b> Variations de la concentration de la chlorophylle (a), (b) et (ab) en fonction des différentes stations dans la région urbaine de Bejaia (Mai 2022).....	35
<b>Figure 20.</b> Box plot de la distribution de la chlorophylle (a) selon les stations.....	37

<b>Figure 21.</b> Box plot de la distribution de la chlorophylle (b) selon les stations.....	38
<b>Figure 22.</b> Variation des concentrations de la proline ( $\mu\text{g/g MF}$ ) selon les différentes stations de la ville de Bejaia (Mai 2022).....	39
<b>Figure 23.</b> Box plot de la distribution de la proline en fonction les stations.....	41
<b>Figure 24.</b> Présentation des concentrations moyennes des matières en suspension à la surface des troncs d'arbres de peuplier dans la ville de Bejaia (Mai 2022).....	42
<b>Figure 25.</b> Box plot de la distribution des PMT.....	43
<b>Figure 26:</b> Présentation des concentrations moyennes des matières en suspension déposées à la surface des feuilles (Mai 2022). .....	44
<b>Figure 27.</b> Box-plot de la distribution des poids des PM ( $\mu\text{g/g MF}$ ), déposées sur les feuilles prélevées des stations d'étude (Mai 2022). .....	45
<b>Figure 28.</b> Distribution des éléments traces métalliques (Zn, Cu, Pb) en fonction des stations urbaine dans la région de Bejaia (Mai 2022). .....	46
<b>Figure 29.</b> Cercle de Corrélation illustre la distribution des éléments étudiés (Cu, Pb, Zn)...	47
<b>Figure 30.</b> Concentration en mg/l, des métaux lourds selon les stations dans la région de Bejaia (Mai 2022).....	48
<b>Figure 31.</b> Cercle de corrélation des paramètres physiologiques de chlorophylle et de proline avec les paramètres de la pollution (Zn, Cu, Pb et PM) mesuré sur le peuplier pour les huit stations dans la région de Bejaia (Mai 2022). .....	49

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau1.</b> Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement. ....	6
<b>Tableau2.</b> Principaux effets des métaux lourds.....	8
<b>Tableau3.</b> Effets néfastes du Plomb, du Cuivre et du Zinc sur l'homme, les animaux et les végétaux. ....	11
<b>Tableau4.</b> Différence entre l'approche passive et l'approche active .....	15
<b>Tableau5.</b> Températures maximales et minimales moyennes dans la ville de Bejaia. ....	21
<b>Tableau6.</b> Précipitations mensuelles (P) de la région de Bejaia. ....	21
<b>Tableau7.</b> Sites de prélèvements et leurs coordonnées géographiques.....	23
<b>Tableau8.</b> Présentation de quelques paramètres statistiques de position concernant la variation des concentrations de la chlorophylle (a) ( $\mu\text{g/gMF}$ ) en fonction des stations dans la région de Bejaia (Mai2022).....	36
<b>Tableau9.</b> Présentation de quelques paramètres statistiques de position concernant la variation des concentrations de la chlorophylle (b) ( $\mu\text{g/gMF}$ ) en fonction des stations dans la région de Bejaia (Mai 2022).....	38
<b>Tableau10.</b> Quelques paramètres statistiques descriptifs concernant les concentrations de la proline ( $\mu\text{g/g MF}$ ) selon les différentes stations de la ville de Bejaia (Mai 2022).....	40
<b>Tableau11.</b> Présentation de certains paramètres statistiques des concertations en PM $\mu\text{g/g MF}$ contenus dans le lavage des feuilles avec le chloroforme (Mai 2022).....	42
<b>Tableau12.</b> Présentation de certains paramètres statistiques des concertations en PM contenus dans le lavage des troncs (Mai 2022).....	44

## *Liste des abréviations*

**ACP:** Analyse en composantes principales

**ADN:** Acide Désoxyribonucléique

**ANOVA:** Analyse of variance (Analyse de la variance)

**Al:** Aluminium

**As:** Arsenic

**Ca:** Calcium

**Cd:** Cadmium

**Chl (a):** Chlorophylle (a)

**Chl (b):** Chlorophylle (b)

**Cm<sup>2</sup> :** Centimètre carré

**Co:** Cobalt

**Cr:** Chrome

**Cu:** Cuivre

**ETM:** élément trace métallique

**E.L :** éléments légers

**Fe:** Fer

**FRX:** spectroscopie à fluorescence X

**g:** gramme

**Hg:** Mercure

**K :** potassium

**L :** litre

**m :** mètre

**MF :** matière fraîche

**Mg :** milligramme

**ML** : métaux lourds

**Mn**: Manganèse

**Mo**: Molybdène

**Ni** : Nickel

**P** : phosphore

**Pb**: Plomb

**PM** : particule en suspension

**PMF** : particule en suspension sur les feuilles

**PMT** : particule en suspension de tronc d'arbre

**Rb** : Rubidium

**S** : Soufre

**SAA** : Spectrométrie d'Absorption Atomique

**Si** : Silicone

**Sn**: l'étain

**Sr**: strontium

**Ti**: Titane

**µg**: micro-gramme

**V**: Vanadium

**Zn**: zinc

# Introduction

Le compartiment atmosphérique, comme tout autre compartiment naturel tel que l'hydrosphère, la lithosphère ou la biosphère, participe au stockage et au transfert des éléments chimiques au sein des grands cycles biogéochimiques (**Pédro, 2007**). Depuis le début du siècle dernier, les émissions anthropiques vers le compartiment atmosphérique se sont intensifiées et diversifiées.

Selon (**Adriano, 1986 ; Gombert, 1989 ; Prasad & Hagemeyer, 1999; Bruno, 2008 ; Louise, 2009**). L'évolution des sociétés à travers le monde par la croissance démographique et le progrès industriel, a tracé le chemin pour l'apparition d'une préoccupation majeure et dangereuse dans le monde qu'est la dégradation de l'environnement. Les émissions de différentes substances chimiques organiques ou inorganiques dont les métaux lourds ; ces éléments sont émis dans l'air sous forme de fines particules ce qui rend les connaissances sur les risques sanitaires liés à leurs dispersion restent fragmentaires, les cycles biogéochimiques de ces contaminants sont notablement affectés par les activités humaines (**Prasad et al., 1999**). Les effets de ces éléments traces métalliques néfastes ont stimulé et encouragé l'amélioration des techniques et l'apparition de nouvelles approches qui visent à surveiller et limiter leurs conséquences.

Depuis la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle les organismes vivants sont connus pour témoigner des conditions environnementales selon leur sensibilité. Il s'agit de bio-surveillance ou surveillance biologique, en utilisant les espèces animales ou végétales les plus sensibles face aux polluants recherchés dans leur milieu environnant (Garrec). De nombreuses démarches de bio surveillance ont été menées sur des espèces sensibles de lichens et de mousses épiphytes qui ont largement contribué à améliorer les connaissances sur la contamination atmosphérique (**Ayrault, 2009**). Cependant l'utilisation des végétaux supérieurs dans la bio-surveillance est née en 1950 d'où un intérêt pour le dépôt d'écorces sur les troncs d'arbres est apparu, en utilisant de différentes espèces d'arbres (pin ; l'olivier ; hêtre ; bouleau ; peuplier ; arganier) et différentes méthodes d'analyses (approches passive ; approches actives) (**Catinon, 2011; Florence et al., 2012**).

Pour le cas de l'Algérie, des travaux scientifiques ont été réalisés pour déterminer les concentrations des substances chimiques nocives pour les végétaux des milieux urbains. Ainsi, plusieurs chercheurs ont démontré que les plantes et les animaux sensibles, peuvent être de véritables bio-indicateurs de pollution (**Khelil et al., 2006 ; Maizi et al., 2010; Omar et al., 2015 ; Berrayah et al., 2016**).

Dans le cadre de ce travail, l'étude a porté sur l'estimation de la qualité de l'air de Bejaïa en utilisant le peuplier comme espèces végétales bio indicatrice de la contamination aérienne en métaux lourds.

Dans ce contexte l'objectif de cette étude est:

- Quel est le niveau de contamination métallique atmosphérique dans les différentes régions de la ville de Bejaïa?

Cet objectif est développé dans ce mémoire qui s'articule sur deux parties :

► La partie théorique repose sur une "synthèse bibliographique" qui vise à donner un aperçu sur la pollution atmosphérique et le concept de bio-surveillance.

► La partie pratique est divisée en deux chapitres :

- "Matériel et Méthodes", décrit la zone d'étude à savoir la région de Bejaïa en donnant un aperçu sur sa situation géographique et sa climatologie. Elle expose ensuite l'intégralité des méthodes et des techniques utilisées au cours de cette étude, de l'échantillonnage à l'analyse pour atteindre les objectifs visés : préparation du matériel d'échantillonnage, le mode de prélèvement et les mesures au laboratoire.
- "Résultats et discussion" s'attache aux résultats obtenus et leurs traitements statistiques puis leur comparaison à d'autres résultats obtenus par d'autres études réalisées dans le même domaine à l'échelle nationale ou à l'échelle internationale.



# **Partie Théorique**

## **Chapitre I:**

### **Pollution Atmosphérique Métallique**

## 1. Pollution Atmosphérique

La pollution désigne toute contamination de l'environnement par des substances introduites soit naturellement ou par l'Homme, et qui provoque à son tour ; des perturbations ; des modifications dans les trois compartiments de l'environnement donc la dégradation de la santé de l'environnement et la santé humaine (**Déruelle & Lallemant, 1983**).

Une définition plus pertinente qui consiste à: « Constitue, une pollution, toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction de substance chimiques artificielles; toute perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation naturelle provoquée par l'introduction d'espèces exotiques invasives » est donnée par (**Ramade, 2007**).

La pollution atmosphérique est une altération de la composition naturelle de l'air, par l'émission de toute molécules (substances, composées) physiques, chimiques ou biologiques, qui peut être soit sous forme gazeuses soit comme particules dans l'atmosphère, et qui peut compromettre la santé humaine et nuire la végétation.

Cette pollution a des effets aussi bien à l'échelle locale (impact sur les écosystèmes, sur la santé) qu'à l'échelle régionale (transport de particules sur de longues distances, modification du régime des précipitations), et qu'à l'échelle mondiale (modification du climat) (**Magali, 2007**).

## 2. Sources de pollution

Les sources principales de la pollution atmosphérique peuvent être :

Soit d'origine naturelle comme les feux des forêts, des cultures qui contribuent à des émissions importantes d'imbrulés et de gaz ; les émissions de gaz des volcans et les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons qui provoquent des allergies.

Soit d'origine anthropique par de nombreux types d'installations industrielles comme par exemple :

- ✓ Les installations fixes de combustion : chauffages urbains et domestiques, chaudières industrielles et centrales électriques thermiques.
- ✓ Les transports.
- ✓ L'agriculture.

- ✓ Les fabrications industrielles : la sidérurgie, le stockage des produits pétrolières, la métallurgie de l'aluminium et les cimenteries.
- ✓ Incinération des déchets ménagers à l'air libre (**Berrayah, 2016**).

Selon la variabilité de la nature des polluants, la pollution atmosphérique peut être divisée en deux grands types :

### **2.1. Pollution Organique**

La pollution organique provoquée par des polluants principalement carboniques, certains sont souvent facilement biodégradables, d'autres persistants et qui provient des rejets domestiques (excréments, ordures ménagères), agricoles et industriels (**Gombert, 1989**).

### **2.2. Pollution Inorganique**

La pollution inorganique due à la contamination de l'environnement par des minéraux ou bien des composées métalliques qui se retrouvent à l'état naturel dans l'environnement principalement sous forme d'éléments traces, non biodégradable donc persistants et potentiellement toxiques à des faibles concentrations pour les organismes et pour l'Homme. Dans la présente étude on s'intéresse à la pollution atmosphérique inorganique (métallique) et la détermination de ses effets sur les végétaux supérieurs (**Gombert, 1989**).

## **3. Métaux lourds**

### **3.1. Généralités**

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds. On appelle métaux lourds tout élément métallique naturel dont la masse volumique dépasse 5 g/cm<sup>3</sup>, par exemple on a Cr (7,2), Co (8,9), Ni (8,7), Cu (8,9), Zn (7,1), Mo (10,2), Cd (8,6), Hg (13,5) et Pb (11,4) etc (**Hagemeyer, 1999**). Il existe environ 40 éléments qui entrent dans cette catégorie (**Zenk, 1996**). Ils sont naturellement présents dans la croûte terrestre, et dans tous les compartiments de l'environnement, mais généralement à l'état de traces (**Kalonda, 2015**). Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes. Il n'existe pas de définition internationalement reconnue, chaque discipline scientifique développant une approche propre (**Boukrah, 2008**).

- En chimie, les métaux lourds sont en général définis sur la base de propriétés spécifiques (poids moléculaire, capacité à former des cations polyvalents...).
- En science du sol (pédologie), il est convenu de parler "d'éléments trace métalliques" qui désignent des composés naturels présents à très faible concentration, formant les roches que l'on trouve dans la biosphère
- En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus graisseux) ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants.
- En nutrition alimentaire et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo-éléments considérés indispensables et essentiels à certains organismes dans leur nutrition, en particulier par leur action catalytique au niveau du métabolisme.
- Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome(Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn) et le zinc (Zn) (**Boukrah, 2008**).

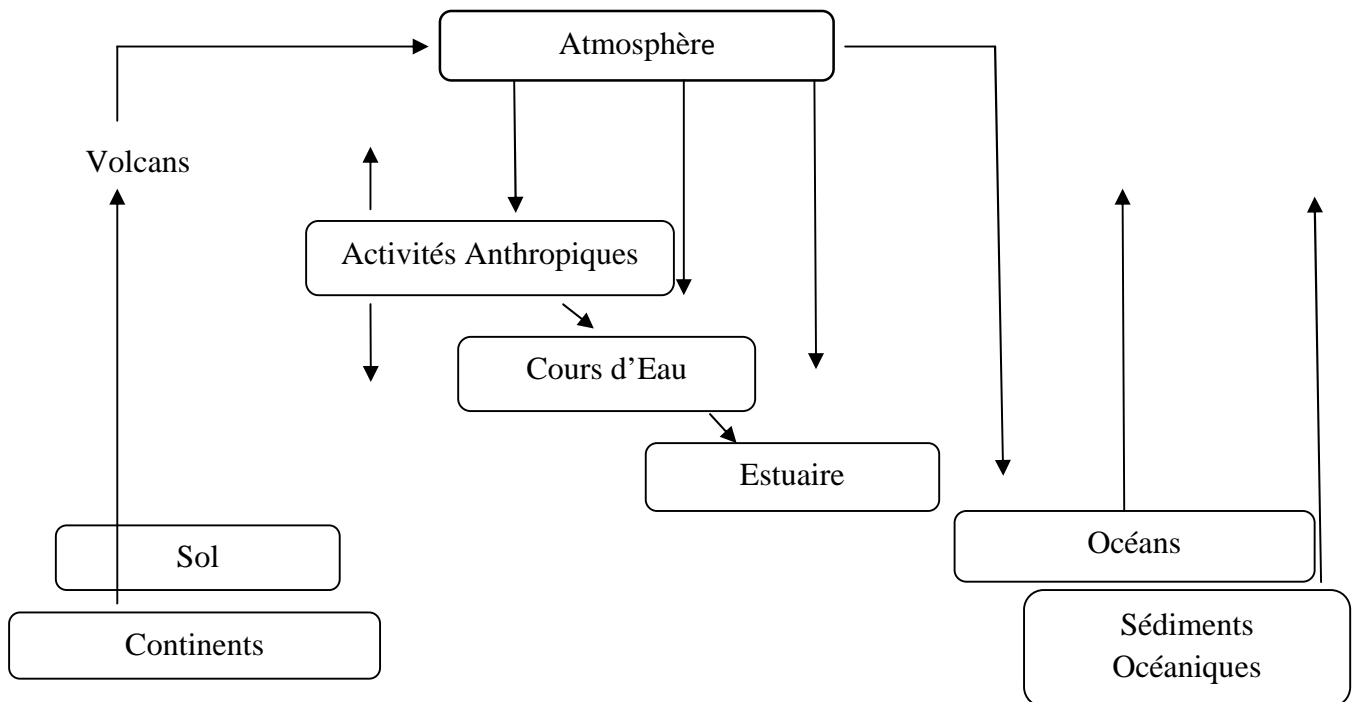
### 3.2. Classification

La classification en métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement " lourds " (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic par exemple). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation métaux lourds, l'appellation " éléments en traces métalliques " -ETM- ou par extension " éléments traces " (**Gerard, 2000**).

### 3.3. Sources des métaux lourds

#### 3.3.1. Sources naturelles

Les métaux lourds sont redistribués naturellement dans l'environnement par les processus biogéochimiques et géologiques (**Magali, 2007**). En règle générale, les métaux sont fixés dans les roches sous deux formes. Il y a d'une part, les oxydes et silicates, peu altérables en climat tempéré. Les oxydes sont libérés de la roche par érosion et transportés tels quels dans les sols et sédiments. Il y a d'autre part, les sulfures et carbonates, très altérables, qui seront attaqués chimiquement. Les métaux changeront de support. Une partie soluble sera évacuée avec l'eau, vers les sols, les sédiments ou la nappe phréatique. Une partie sera piégée dans les argiles et sédiments de ruisseau (**Gerard, 2000**).



**Figure 1.** Représentation schématique du cycle géochimique des métaux lourds dans l'environnement (Gerard, 2000).

### 3.3.2. Sources Anthropiques

Les éléments traces, avec toute leur importance, peuvent s'accumuler et devenir toxique dans l'environnement par les activités humaines telles que l'exploitation des mines (Kalonda, 2015). Le développement industriel, agricole et urbain a favorisé l'augmentation des polluants libérés dans l'atmosphère, le sol et l'eau. Les métaux provenant des activités humaines sont assez réactifs et entraînent des risques plus graves que les métaux d'origine naturelle. Les sources anthropogènes responsables des flux de métaux lourds sont : les activités pétrochimiques, le transport, l'énergie fossile et les déchets urbains (**tableau 1**) (Boukrah, 2008).

**Tableau 1.** Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement (Brignon et al., 2005) in (Boukrah, 2008).

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe

Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

### 3.4. Répartition et devenir des métaux lourds dans l'air

À part quelques émissions dans l'atmosphère sous forme de particules de poussière ou de vapeurs, les métaux lourds restent en grande partie dans les phases aquatiques et le sol de cette planète (**Zenk, 1996**).

Les métaux lourds se dispersent dans les hautes couches de l'atmosphère et retombent ailleurs, après un transport sur de très longues distances. On estime qu'une particule de mercure dans l'atmosphère reste un an dans celui-ci, avant de retomber. Les métaux lourds dans l'air peuvent se trouver principalement sous deux formes :

- soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatiles ou dont la pression de vapeur saturante est élevée;
- soit sous forme de composés métalliques solides, déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion. Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. Les métaux lourds sont transportés par des particules atmosphériques provenant de combustions à haute température, de fusions métallurgiques, véhicules. Les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant la taille de ces particules. Dans l'air ambiant, on trouve de

nombreux éléments, comme le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, etc., dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines (**Boukrah, 2008**).

### 3.5. Impacts des métaux lourds

#### 3.5.1. Effets sur l'environnement

Les métaux lourds sont dangereux pour l'environnement car, ils ne sont pas dégradables. Ils s'accumulent au cours de processus minéraux et biologiques, ils peuvent également être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus, et être accumulé dans les sols et l'eau (**Tizaoui, 2013**).

#### 3.5.2. Effets sur la santé

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport aux capacités d'assimilations de l'organisme.

Les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et mécanismes biologiques, provoquant des effets toxiques. Ils peuvent être absorbés sous la forme inorganique ou sous la forme organique. Pour certains éléments, comme l'arsenic et le cuivre, la forme inorganique est la plus toxique. Pour d'autres, comme Hg, Sn et Pb, les formes organiques sont les plus toxiques. La quantité de métaux absorbée par un homme influe directement sur sa santé. Elle peut présenter une toxicité aiguë ou une toxicité due à un effet cumulatif.

En fait, le risque sur la santé humaine est d'abord associé aux propriétés des métaux lourds à polluer les eaux, l'atmosphère, les aliments et les sols. Et dépendent également de l'état chimique de leur forme chimique, de leur concentration, du contexte environnemental, de la possibilité de passage dans la chaîne du vivant.

Certains éléments comme le cadmium, le mercure et le **plomb** ont été largement mis en évidence par des travaux antérieurs, ces derniers peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques et respiratoires (**Tableau 2**) (**Boukrah, 2008**).

**Tableau2.** Principaux effets des métaux lourds (**Ui, 1971**).

Eléments	Effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur le foie

Cr	Cancérogène sous forme de Cr (VI)
<b>Cu</b>	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aigue
Ni	Allergies de peau, maladie respiratoires possible cancérogène
<b>Pb</b>	Toxique
Se	Essentielle à faible doses, toxique à doses élevées
<b>Zn</b>	Toxique pour les végétaux à fortes teneurs

#### 4. Eléments traces étudiés (Zinc, Cuivre et Plomb)

Les métaux étudiés dans ce travail sont le plomb (**Pb**), le cuivre (**Cu**) et le zinc (**Zn**),

##### 4.1. Plomb

###### 4.1.1. Définition

Le Pb appartient au groupe IV A de la classification périodique des éléments. Les deux états d'oxydation Pb (II) et Pb (IV) sont stables mais la chimie environnementale de cet élément est dominée par l'ion  $Pb^{2+}$ . Le Pb est largement véhiculé par les particules atmosphériques submicroniques et s'accumule facilement dans les horizons de surfaces des sols et du fait de sa faible mobilité et n'est pas entraîné vers les horizons profonds. (La toxicité du Pb est reconnue depuis 2200 ans, depuis l'Empire Romain)(**Sammut, 2007**).

###### 4.1.2. Impacts

Les effets pathologiques d'une intoxication au **Pb** sont nombreux et peuvent être séparés en deux catégories : effets physiologiques et neurologiques. Les premiers produisent une augmentation de la tension artérielle et l'apparition de dommages vasculaires et intestinaux, ainsi que des troubles au niveau des reins (néphropathie saturnine). Chez l'enfant le plomb peut remplacer Ca dans les os, ce qui est facilement détectable à travers les radiographies. Enfin, des cas de stérilité ont été aussi détectés quand l'exposition a été prolongée au **Pb**. Finalement chez la femme quand elle est enceinte, **Pb** peut entraîner de très sérieux problèmes pour le fœtus (**Aranguren, 2008**).

##### 4.2. Cuivre

###### 4.2.1. Définition

Le cuivre, est l'un des métaux les plus importants pour l'homme, et largement répandu dans la nature, sa concentration moyenne dans la croûte terrestre serait comprise entre 45 et



70mg/kg selon les auteurs (**Baize, 1997**). Il appartient au groupe I-B du tableau périodique (Groupe 11).il est ductile et bon conducteur de chaleur et d'électricité (le deuxième après l'argent en termes de conductivité électrique) (**Adriano, 1986**). Et résiste à la corrosion de l'air et de l'eau mais est attaqué par les acides (**Lenoir, 2011**). On peut le trouver dans la nature soit sous forme libre dans la cuprite (88,8%) soit sous forme d'oxyde de sulfure. Il est particulièrement abondant dans les roches mafiques et intermédiaires (**Tizaoui, 2013**).

#### 4.2.2. Impacts

Le cuivre à faibles doses est un oligo-élément indispensable à la survie du corps humain, mais aussi, à dose plus élevée et sous ses formes oxydées, un puissant poison pour l'Homme, causant la maladie de Wilson, des perturbations physiologiques, des accidents cardiovasculaires, une baisse de fertilité (**Aranguren, 2008**).

### 4.3. Zinc

#### 4.3.1. Définition

Le **Zn** appartient au groupe II B de la classification périodique des éléments. C'est un oligo-élément présent naturellement dans la croûte terrestre. Son état d'oxydation est  $Zn^{2+}$ . Il est le moins nocif de ces trois éléments. Cependant, certains composés du Zn (chlorures ( $ZnCl_2$ ), sulfates ( $ZnSO_4$ ), acétate ( $(CH_3COO)_2 Zn \cdot 2H_2O$ ), nitrate ( $ZnNO_3$ )) sont plus toxiques que d'autres. En raison de leur solubilité, le taux d'absorption du **Zn** dépend de la taille des particules et de la solubilité des espèces porteuses et donc de sa spéciation (**Sammut, 2007**).

#### 4.3.2. Impacts

Le zinc est l'un des oligo-éléments les plus abondants chez l'homme (besoins 15 mg/jour) car il est essentiel pour la croissance et la survie du corps humain. Il est impliqué dans le fonctionnement de plus de 300 enzymes intervenant dans le métabolisme, et garant de la stabilité et de l'activité de certaines hormones peptidiques tel que l'insuline. L'incorporation du **Zn** en quantité trop importante peut entraîner un phénomène de toxicité ce qui entrainent des troubles physiologiques qui vont comprendre des nausées et des troubles gastro-intestinal dans le cas primaire, ensuite ils seront suivis de complications dans le système respiratoire ainsi que par des affections cutanées (**Tableau 3**) (**Aranguren, 2008**).

**Tableau3.** Effets néfastes du Plomb, du Cuivre et du Zinc sur l'homme, les animaux et les végétaux.

Métal	Forme	Effets Ecologique	Effets sur l'homme
Pb	En suspension Dissous $Pb^{2+}$	-Toxicité aigue dès 0,1mg/L chez les algues et poissons. -Effet sur la reproduction des poissons.	- Bioaccumulation -Saturnisme (atteinte neurophysiologique, troubles rénaux et cardio-vasculaires) - Hémato-pâtie
Cu	En suspension Dissous ( $Cu^+$ et $Cu^{2+}$ )	-Toxique à des doses inférieures à 1 mg/L. -Diminution de l'activité photosynthétique. -Altération des branchies des poissons, retard dans leur ponte.	- Gastro-entérites - Cirrhose de foie - Nécroses - Scléroses
Zn	Soluble $Zn^{2+}$ Forme colloïdale	-Toxicité aigue pour le milieu aquatique à partir de quelques mg/L. -Perturbe la croissance des végétaux par détérioration de l'appareil chlorophyllien	-Une atteinte du système nerveux - $ZnCl_2$ : irritation des muqueuses respiratoires et gastro-intestinales, ulcérations cutanées - $ZnO$ : eczémas, fièvres, lésions pulmonaires à forte dose.

**Chapitre II :**  
**Bio-surveillance Végétale de**  
**la qualité de l'Air**

Aujourd'hui la pollution atmosphérique représente l'un des problèmes réel et inquiétant aux quelles le monde est confronté due à l'évolution de l'industrie et la croissance urbaine rapide.

Pour cela une nouvelles méthodologie a émergée qu'on nomme la surveillance biologique ou la bio-surveillance, cette dernière se base sur l'aspect de certains êtres vivants animales ou végétales bio-indicatrices qui ont la capacité d'accumuler les polluants(contaminants) dans leur tissus, ce phénomène de bioaccumulation nous permet de savoir l'état de l'environnement en générale et la qualité de l'air en particulier, dans ce chapitre on s'intéresse a la bio surveillance végétales où on utilise des espèces bio accumulatrices telle que les mousses les lichens et les végétaux supérieurs.

### 1. Définition de la bio-surveillance

La bio-surveillance ou la surveillance biologique est définit comme : « l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre l'évolution » (**Garrec & Van Hallowyn, 2002**).

Donc, la bio-surveillance consiste à évaluer l'état de l'environnement par l'utilisation des êtres vivants qui ont le pouvoir de maître en évidence soit une altération, un changement, une dégradation ou bien l'évolution des milieux quelles résident.

La bio-surveillance, s'applique sur quatre niveaux de diagnostic environnemental (bio-intégration, bio-indication, bio-marquage et bioaccumulation) selon (**Garrec & Van Hallowyn, 2002**).

- **bio-intégration:** observation de changements structurels au niveau population/communauté en réponse à un stress environnemental sur la durée ; la bio-intégration peut être considérée comme de la bio-indication à un niveau supérieur (il y a en effet souvent confusion entre ces deux termes),
- **bio-indication :** observation des réponses biologiques (morphologique, physiologique, tissulaire...) d'un organisme vivant (*i. e.* au niveau individuel) exposé à un contaminant,
- **bio-marquage :** utilisation de marqueurs aux niveaux de la biologie structurelle ou fonctionnelle (enzyme, physiologie, génétique...) indiquant une influence du milieu environnant sur les fonctions biologiques,

- **bioaccumulation** : outre le mécanisme naturel par lequel une substance présente dans l'environnement s'accumule dans l'organisme (à ne pas confondre avec la bioamplification qui correspond à la concentration de ces substances d'un niveau trophique à l'autre), cette technique vise à déterminer les teneurs en éléments chimiques bio-accumulés depuis l'environnement (illustration de la qualité de l'environnement dans lequel croît cet organisme).

Le concept de la bio-surveillance se résume dans le schéma en (figure 3).

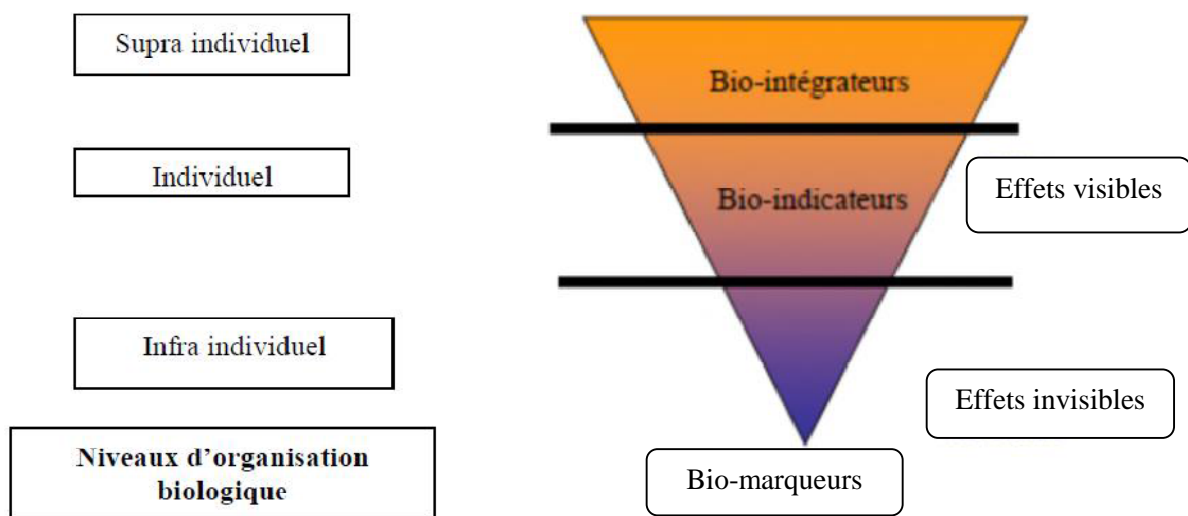


Figure 2. Concept de la bio surveillance (Cuny, 2012).

## 2. Objectifs de la bio-surveillance

Il est possible de distinguer différents objectifs globaux des études de bio-surveillance :

- suivi des distributions spatiales et temporelles des effets des polluants ;
- suivi de sources ponctuelles ;
- participation à des études d'évaluation des risques sanitaires
- information du grand public et aide à la décision dans les politiques publiques. (Cuny, 2012).

## 3. Bio indication

La bio indication est un aspect par le quelle l'état des milieux et les changements environnementaux se déterminent à l'aide des espèces bio-indicatrices sensibles liées a leurs milieux et qui ont la capacité d'agir à la pression quelles subit, qui peut être une modification de son comportement, alimentation, reproduction, modification morphologiques ou par sa

présence ou son absence ; ces altérations reflètent la situation des écosystèmes et les effets potentiel des polluants sur la santé de l'environnement.

Un bio-indicateur est défini par (**Blandin, 1986**) comme « Un indicateur biologique (ou bio-indicateur) est un organisme ou un ensemble d'organismes qui - par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques - permet, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un éco-complexe et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées ».

Les bio-indicateurs sont considérés comme des outils fiables pour la surveillance de la pollution environnementale (**Parmar, Rawtani, & Argawal, 2016**).

#### **4. Bioaccumulation**

La bioaccumulation est un caractère que possède certaines espèces végétales qui consiste à absorber et stocker les contaminants, qu'on peut calculer et estimer leurs quantités par dosage des différents polluants qui permet de donner un aperçu sur la qualité de l'air et les effets de cette pollution sur les populations.

La bioaccumulation consiste en un dosage de substances contenues dans le végétal étudié, ces substances n'entraînant pas le dépérissement du végétal (**Garrec, 1996**).

#### **5. Stratégies de mise en œuvre de la bio-surveillance**

La bio-surveillance concerne toute utilisation d'un organisme sensible à son milieu environnant pouvant faire état de ce dernier, soit par prélèvement direct depuis le milieu (bio-surveillance passive), soit à travers la transplantation d'échantillons (bio-surveillance active). (**Agnan, 2013**).

##### **5.1. Approche passive**

C'est une technique où on utilise pour la bio-surveillance des plantes natives qui existent déjà dans le milieu et qui ont subi une exposition durant une certaine durée

La méthode *in situ* ou bio-surveillance passive, utilise les organismes déjà présents sur le site (organismes indigènes). Elle a l'avantage d'être rapide. En effet, les végétaux ayant déjà été exposés aux polluants, il ne reste plus qu'à les collecter et à les analyser. On doit cependant veiller à ce qu'ils aient :

- Une distribution spatiale et une abondance suffisante pour être représentatifs de la zone étudiée,
- Une saisonnalité compatible avec les objectifs de la campagne de mesure,
- Un mode de collecte facile (**Berrayah, 2016**).

Pour des techniques de bio-surveillance passive, les espèces doivent être facilement identifiables sur le terrain et largement répandues, leur récolte ne devant pas mettre en danger les populations. (Cuny, 2012).

## 5.2. Approche active

Il est également possible d'utiliser la méthode active (utilisation de transplants d'espèces cultivées ou non). Elles nécessitent des cultures et des méthodologies de transplantations standardisées des organismes (Cuny, 2012).

La méthode des transplants ou bio-surveillance active, emploie des organismes dit transplanter. Elle peut être utilisée lorsque la méthode in situ n'est pas envisageable (absence d'organismes correspondant aux critères de l'étude). Cette dernière nécessite plus de temps (tableau 4).

En effet, il faut laisser le temps aux transplants (organismes provenant d'une zone « saine ») d'accumuler les polluants présents dans leur nouvel environnement. Cette phase d'exposition pouvant-être plus ou moins longue selon le type d'organismes choisi et le polluant étudié.

La transplantation est une technique expérimentale où les organismes utilisés pour l'étude sont transférés d'un environnement non pollué (milieu dit 'sain' ; zone rurale) vers un site pollué ou suspecté de l'être. Cette alternative à la méthode in situ permet de palier à certain problème comme :

- ✓ L'absence d'espèces utilisable dans la zone d'étude (niveau de pollution trop élevé, absence d'habitats fait de l'urbanisation ou de l'industrialisation),
- ✓ La mauvaise répartition d'une espèce qui ne permet pas un échantillonnage représentatif de la zone d'étude. (Berrayah, 2016).

**Tableau4.** Différence entre l'approche passive et l'approche active (Berrayah, 2016).

Approche passive	Approche active
Les résultats peuvent être obtenus en quelques jours.	Le temps d'exposition des transplants est plus long
Les niveaux accumulés sont habituellement au-dessus des limites de détection (temps d'exposition plus long).	Les concentrations accumulées peuvent être indétectables sur une période d'exposition trop courte.
Les résultats démontrent la pollution des années précédentes.	Les résultats illustrent la pollution pendant la période d'exposition.
Coûts liés aux transports vers les de prélèvement et aux analyses chimiques	Coûts supplémentaires relatifs aux matériaux et au temps de préparation des transplants avant exposition.
Les concentrations reflètent les influences d'autres facteurs tels que l'âge de la plante, la	Les concentrations des polluants dans les transplants peuvent être plus directement

teneur en métal du substrat et la contamination locale.	liées à la pollution atmosphérique.
Les plantes peuvent être soumises à un stress ou subir des changements morphologie/physiologie, qui affectent l'absorption (exposition à certains polluants sur le long terme)	Les transplants sont originaires d'environnement sain.

## 6. Organismes vivants utilisés pour la bio-surveillance

### 6.1. Lichens

Depuis 1867, il est connu que les lichens sont des végétaux symbiotique ; il ya donc deux partenaires d'une part une algue et d'autres part d'un champignon (qualifié de myco-symbiote) (**Déruelle & Lallemant, 1983**). Le champignon fournit l'eau et les sels minéraux ainsi qu'une protection à l'algue, qui est capable de synthétiser de la matière organique via la photosynthèse (**Benmmansour, 2021**).

Les lichens sont des thallophytes ; leur appareil végétatif est donc un thalle, ne présentant ni feuilles, ni tiges, ni racines, ni appareil conducteurs et constitue l'essentiel du lichen et porte les organes reproducteurs. On distingue plusieurs type de thalle : les Basidiolichens, les Thalles Complexes, les Thalles Gélatineux, les Thalles Crustacés, les Thalles Squamuleux, les foliacés et les fruticuleux (**Déruelle & Lallemant, 1983**). Ces deux derniers sont les plus utilisés dans le domaine de la recherche (**Bouteraa, 2014**).

Ces organismes sont pérennes, dépourvus de cuticule, de stomate et de racine ce qui les rend exclusivement dépendants de l'atmosphère pour leur nutrition. Selon (**Garty, 2001**). Les métaux lourds se déposent à la surface des lichens sous forme de particules sèches ou, lors de précipitation sous forme humide ces derniers seront absorbés sur toute la surface de l'organisme aux même temps que leurs éléments nécessaires, et seront accumulés dans leurs tissus ; les lichens sont des organismes sensibles à la pollution atmosphérique, et souvent utilisés dans la bio surveillance végétale et considéré comme les meilleurs espèces bio indicatrice qu'on utilise dans l'estimation de la qualité de l'air (**Rzepka & Cuny, 2008**).

### 6.2. Mousses

Les mousses font partie des bryophytes (du grec bruon=mousse), qui sont des cryptogames autotrophes non vasculaires avec deuxième plus grande conglomération parmi les plantes terrestres après les angiospermes (**Mishra et al., 2016**). Et près de 25 000 espèces étaient présentes dans le monde entier, dont 15000 espèces de vrai mousses, les bryopsidées (**Ozenda, 2006**)In (**Agnan, 2013**).



Elles poussent méticuleusement dans des conditions humides, c'est-à-dire, dans les endroits humides et ombragés tels que les forêts, la roche, le sable, le sol nu, l'écorce (mousses epiphytes) et la racine des arbres, les briques et les fissures des murs en béton. (**Vanderpoorten et Goffinet, 2009**). Selon (**Rusin, 2016**) ; Les mousses peuvent également se développer en dehors des conditions humides, dans des environnements aquatiques, désertiques et dans les climats polaires.

Les mousses sont des végétaux de forme thalloïde, possèdent des rhizoïdes qui permettent leur enracinement, parmi ses caractéristiques principales, la présence de fine couche de cuticule dépourvue de cires qui sert à l'absorption direct de l'eau et des nutriments, et le piégeage facile des polluants présent dans l'atmosphère (dépôts secs et humides) (**Rzepka & Cuny, 2008**). D'après cette propriété, ces organismes sont considérés comme un réservoir idéal des substances polluantes, et toujours qualifiés autant qu'un excellent bio indicateur de la pollution atmosphérique.

L'utilisation des mousses ne nécessite pas d'équipement coûteux et les concentrations élevées d'éléments dans les mousses permettent de simplifier des analyses et de réduire le problème de contamination (**Berg et al., 1995**).

### 6.3. Végétaux supérieurs

Les arbres jouent un rôle très important dans l'amélioration de la qualité de l'air par leurs habilité d'accumuler de nombreuses substances insalubre dont les métaux lourd qui se trouvent dans l'atmosphère se qui conduit à la réduction de la quantité des polluants dans ce dernier (**Rzepka & Cuny, 2008**).

Dans la plupart des cas les études de surveillance sont faites sur les feuilles, mais, c'est à partir de la mise en évidence de la relation entre l'acidité de l'écorce et la présence des lichens épiphytes sur les troncs et les branches des arbres (**Barkman, 1958**) In (**Catinon, 2010**). Et la corrélation entre cette acidité et les concentrations atmosphériques de SO<sub>2</sub> (**Staxang, 1969**) ; Que les études sur les écorces sont initiées.

Les écorces peuvent être utilisées seules comme bio-accumulateurs. Les substances polluantes se déposent sous forme de dépôts secs, et par impaction sous l'effet du vent. Les capacités d'accumulation varient en fonction de l'espèce d'arbre, l'épaisseur, la porosité et la rugosité de l'écorce. Chaque nouvelle couche constituant l'écorce est isolée par rapport à l'intérieur du tronc (**Rzepka et Cuny, 2008**).

On peut déduire que les arbres présentent un avantage non méprisables dans la bio-surveillance parce que elles persistent dans les conditions défavorables causées par les

activités anthropiques contrairement aux lichens et mousses, et toujours fixés et occupent une large distribution spatiotemporelle.

## 7. Métaux lourds et végétaux supérieurs

Les métaux sont disponibles pour les plantes dans l'air et l'eau, qui fonctionnent plus ou moins comme des milieux de transport pour ces éléments, ainsi que dans le sol et les sédiments, les plantes sont capables d'absorber les métaux de tous ces milieux, en fonction bien sûr de l'environnement de croissance. Ainsi, les plantes supérieures absorbent les métaux de l'eau ou de l'air par les pousses, et leurs racines absorbent les métaux du sol ou des sédiments, les métaux ont donc un temps de rétention plus court dans ces milieux cela dépend toutefois de l'élément en question ; par exemple, le **Pb** a un temps de rétention très court dans l'eau, alors que le **Zn** a un temps de rétention plus long. Par conséquent, le temps de rétention peut influencer la partie de la plante dans laquelle les métaux doivent être absorbés, ainsi que la distribution dans la plante est d'ordre : racines fibreuses > racines de stockage > tiges > feuilles (**Hagemeyer, 1999**).

Les plantes sont des organismes largement immobiles et, dans un environnement contaminé par les métaux, c'est généralement la racine d'une plante qui constitue le principal site de contact avec les ions métalliques(**Zenk, 1996**). Chez les arbres, la concentration de métaux lourds dans l'écorce est généralement plus élevée que dans le bois de la tige. Les différentes espèces accumulent des concentrations différentes d'un métal spécifique certains accumulent des quantités inhabituelles d'éléments métalliques(**Hagemeyer, 1999**).

Actuellement, la pollution mondiale par les métaux lourds (ML) est un grave problème environnemental. Les symptômes visibles du stress dû à la toxicité des métaux chez les plantes sont l'expression d'altérations préalables induites par les métaux au niveau structurel et ultra-structurel. Ces changements au niveau des cellules, des tissus et des organes résultent soit d'une interaction directe des métaux toxiques avec les composants structurels de ces sites, soit une conséquence plus indirecte de changements dans la transduction des signaux et/ou le métabolisme (**Hagemeyer, 1999**).

Le premier effet des métaux lourds observable chez les végétaux est une inhibition de la croissance, Celle-ci s'accompagne très souvent de nombreux autres indices de dysfonctionnement et altère une série de substrats biologiques importants, avec comme conséquence la modification des domaines fonctionnels des biomolécules, inhibition de l'activité enzymatique, perturbation du métabolisme végétal (notamment la photosynthèse et la respiration), oxydation de protéines, altération des membranes cellulaires via l'induction de

phénomènes de peroxydation lipidique, apparition de cassures au sein de l'ADN, pouvant conduire à la mort cellulaire (**Hagemeyer, 1999**).

# **Partie Pratique**

## **Chapitre I :**

### **Matériel et Méthodes**

## 1. Situation géographique de la zone d'étude : la ville de Bejaïa

La wilaya de Bejaïa se situe au nord-est de l'Algérie dans la région de la Kabylie à 200 km de la capitale, s'étend sur une superficie de «3328.5 km<sup>2</sup> » et sur une baie de 7km. Elle est divisée administrativement en 52 communes et 19 Daïras.

La ville de Bejaïa se situe dans la wilaya de Bejaïa à une distance de 230 km de l'est d'Alger et comme montré dans la carte géographique de la figure 3, elle est délimitée par :

- La mer méditerranéenne au Nord.
- La commune de Toudja au nord –ouest.
- La commune de Tala-Hamza au sud et au sud-ouest.
- La commune d'Oued-ghir à l'ouest.
- La commune de Boukhelifa au sud.

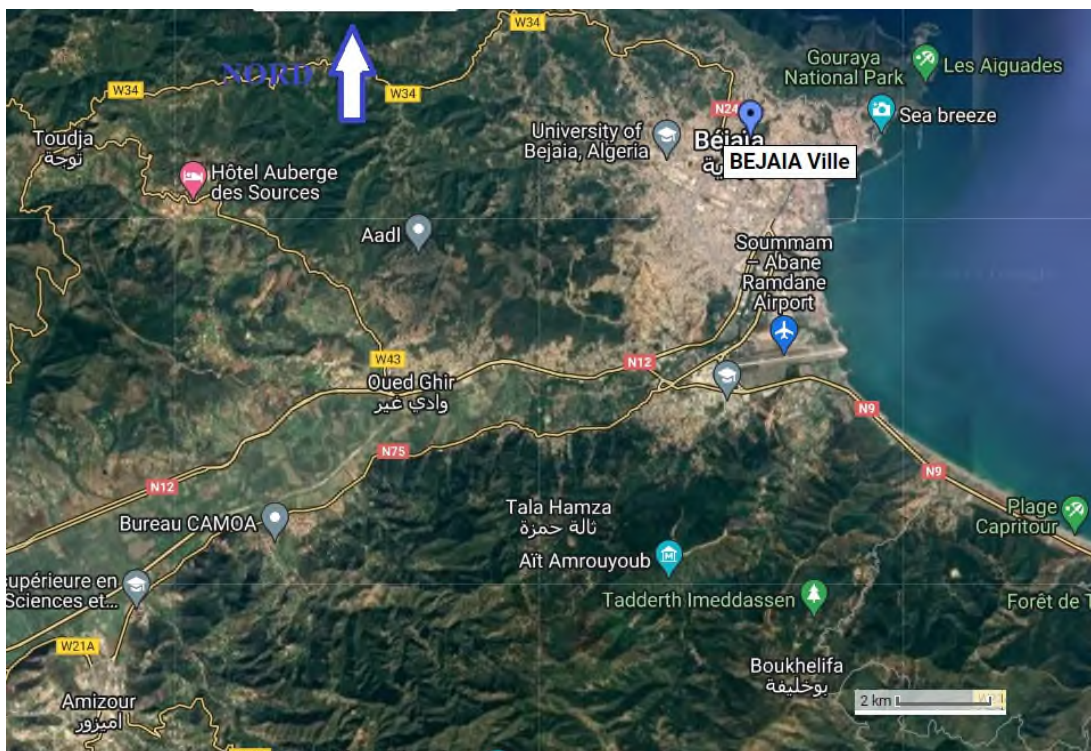


Figure 3. Carte géographique de la ville de Bejaïa (Pinmaps, 2022).

## 2. Climat de la ville de Bejaïa

Le climat de Bejaïa est méditerranéen, avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et ensoleillés. Bien que l'hiver soit doux mais de temps en temps il peut y avoir des irrptions d'air froid du Nord comme celui en janvier 2005 et février 2012, où il peut même neiger. Ce dernier est généralement fréquent dans les collines derrière la ville (<http://www.climatsetvoyages.com>).

Les données climatiques utilisées dans la présente étude proviennent de la station météorologique sise à l'aéroport de la ville de Bejaïa et couvrent une période de 10 ans allant de 2008 à 2018.

## 2.1. Températures

À Bejaïa, la température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de 11,69°C, celle du mois le plus chaud (août) est de 25,26 °C. Dans le tableau ci-dessous (**tableau 5**), les températures moyennes maximales, minimales de 2008-2018.

**Tableau5.**Températures maximales et minimales moyennes dans la ville de Bejaïa (**Station Météorologique de Bejaïa 2008-2018**).

T (°C)	jan	Fév.	mar.	Avril	Mai	Juin	juil.	Aout	sept	oct.	nov.	Déc.
Max	16,49	16,91	18,60	20,32	22,88	26,28	29,53	30,23	28,11	25,26	20,75	17,57
Min	7,44	7,54	9,02	10,84	10,84	17,65	20,39	21,21	19,04	15,75	11,73	8,68
Moy	11,96	12,22	13,81	15,58	18,42	22,22	24,96	25,72	23,57	20,50	16,24	8,12

## 2.2. Pluviométrie

À Bejaïa les précipitations totalisent 768,6 millimètres /an, elles sont donc à un niveau intermédiaire ; le mois le plus moins pluvieux (juillet) la quantité est de 6,3mm, et au mois le plus pluvieux (décembre) elles s'élèvent à 127,4mm, c'est ce que le (**tableau 6**) a rapporté

**Tableau6.**Précipitations mensuelles (P) de la région de Bejaïa (**Station Météorologique de Bejaïa 2008-2018**).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avril	mai	juin	Juil	aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
P(mm)	105,8	93,4	86,1	75,5	43,5	16,1	6,3	9,9	59	40,5	104,7	127,4	768,6

## 2.3. Vents

La vitesse horaire moyenne du vent à Bejaïa connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 5 mois, s'étendant du 28 octobre au 25 mars, avec une vitesse moyenne des vents supérieurs à 12,3 km/h ; le mois le plus venteux à Bejaïa est décembre avec 14,8 Kilomètre par heure, et le mois le plus calme c'est Juin avec 9,6km/h (**Station Météorologique de Bejaïa 2008-2018**).

## 2.4. Humidité

Bejaïa connaît des variations saisonnières extrêmes en ce qui concerne l'humidité perçue. La période la plus lourde de l'année dure 4.6 mois avec une sensation de lourdeur étouffante

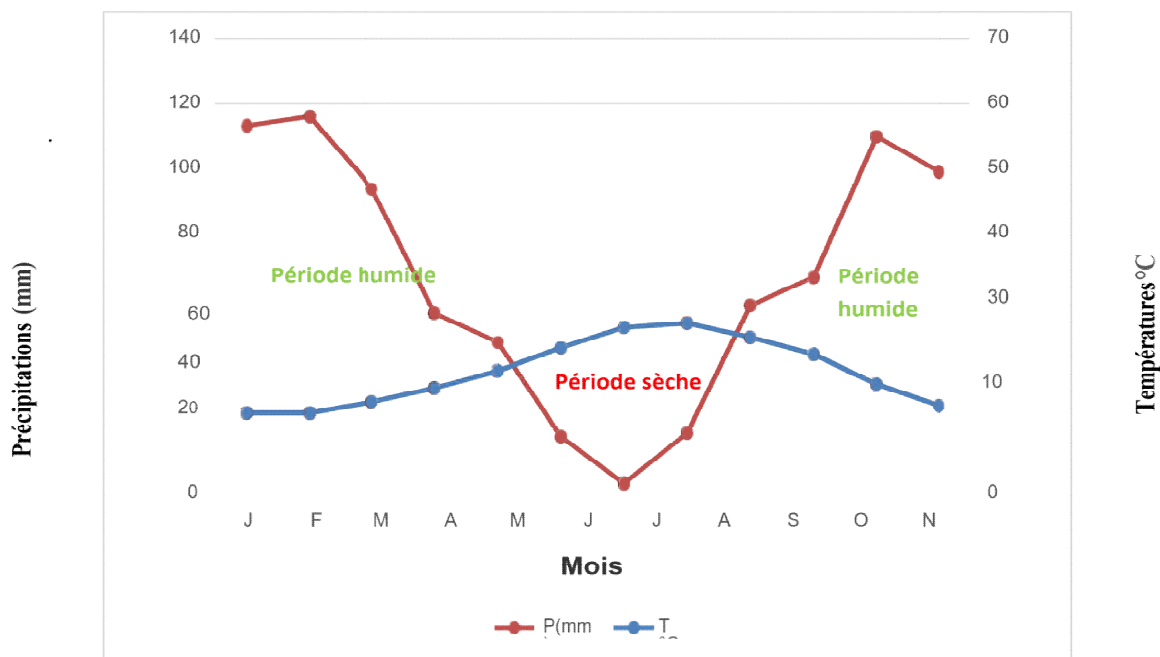
au moins 21% du temps, le mois ayant le plus grand nombre de jours lourds est aout avec 25,2 jours lourds et le jour le moins lourds est le 27 février ([fr.weatherspark.com](http://fr.weatherspark.com)).

## 2.5. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен (1957)

Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен est un outil graphique qui consiste à confronter deux paramètres majeurs du climat, la température et les précipitations, on considère un mois comme humide quand la courbe des précipitations dépasse celle de température.

D'après (Bagnouls et Gausсен, 1957): un mois est considéré comme sec lorsque le total des précipitations P, exprimé en mm, est égal ou inférieur au double de la température moyenne T, du mois, exprimée en degré centigrade.

Le diagramme ombrothermique de la ville de Bejaïa (**figure 4**), montre l'existence de trois périodes prolongées tout au long de la période (2008 - 2018) une période sèche qui dure quatre mois (de mai à août) et deux périodes humides, la première de mois de janvier à avril et la deuxième de septembre à décembre.



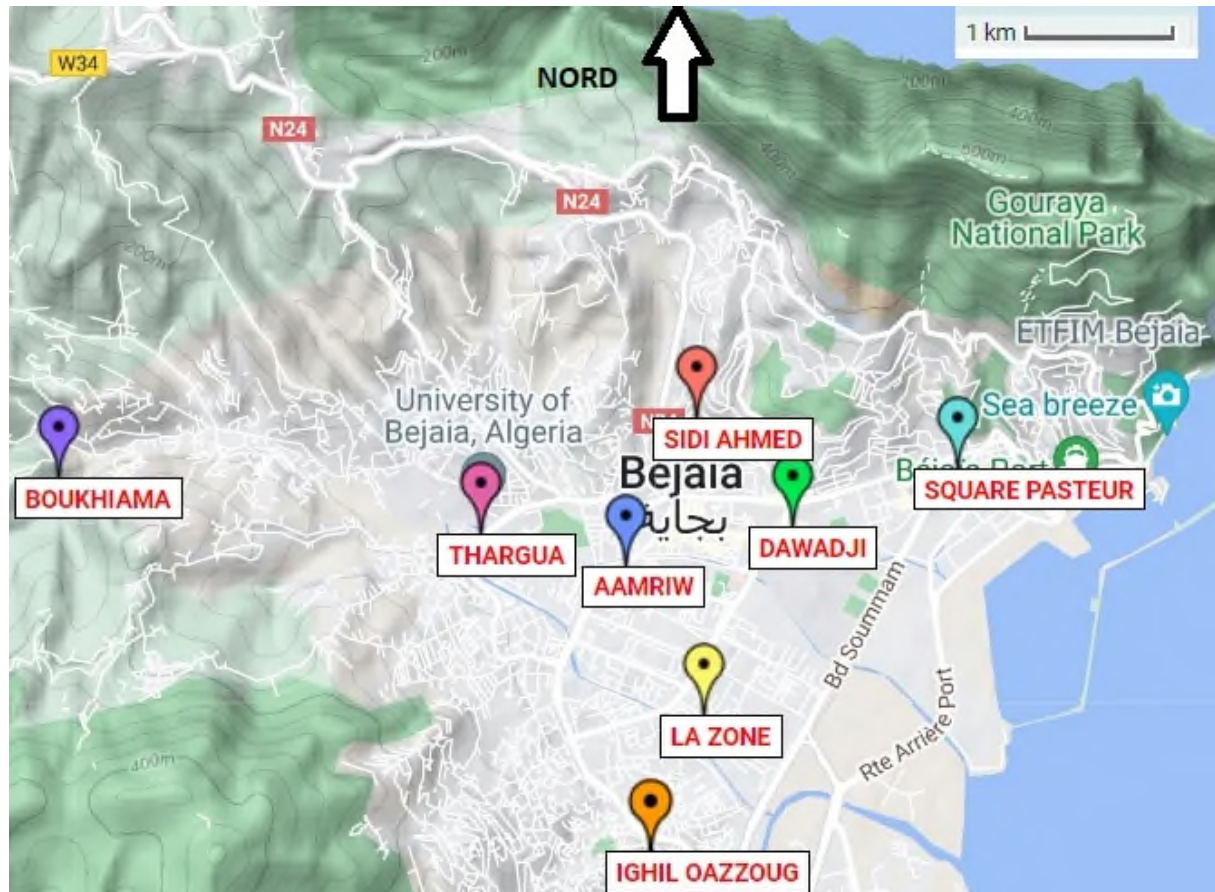
**Figure 4.** Diagramme de Bagnouls et Gausсен de la région de Bejaïa (2008-2018).

## 3. Échantillonnage

Notre sortie est faite le 24 mai 2022 après une période sans pluies de plus de 10 jours, dans la zone urbaine de Bejaia, où on a effectué un échantillonnage homogène au niveau de huit stations (AAMRIW, LAZONE, DAWADJI, TARGUA, SIDI-AHMED, SQUAR-PASTEUR,

IGHIL-OAZZOUG et BOUKHIAMA) où on a réalisé des prélèvements en milieu ouvert sur trois individus de peuplier (lavage de tronc d'arbre, récolte des feuilles et d'écorces).

L'échantillonnage est réalisé au niveau de huit stations différentes choisies par la disponibilité de l'espèce de peuplier et leur positionnement (**figure 5**).



**Figure 5.** Carte géographique montrant les sites de prélèvements (Pinmaps).

Les caractéristiques des sites d'échantillonnage sont présentées dans le (**tableau 7**).

**Tableau7 .** Sites de prélèvements et leurs coordonnées géographiques.

	Noms de la station	Type	Coordonnées géographiques
Station 1	AAMRIW	Urbaine	36°44'50N 5°03'06E
Station2	LA ZONE	Industrielle et urbaine	36°44'18N 5°03'27E
Station3	DAWADJI	Urbaine	36°44'59N5°03'51E
Station4	TARGUA	Urbaine	36°45'00N5°02'26E
Station5	SIDI-AHMED	Urbaine	36°45'23N5°03'25E
Station6	SQUAR-PASTEUR	Urbaine	36°45'12N5°04'37E
Station7	IGHIL-OAZOUG	Urbaine	36°43'47,8N5°03'14,1E
Station8	BOUKHIAMA	Urbaine	36°44'28N5°00'58E



### 3.1. Espèce utilisée

Le peuplier, genre *Populus*, appartient à la famille des Salicacées, qui fait partie de l'ordre des Salicales du groupe des Amentiflores. Ce groupe se range dans la sous classe des Monochlamidae, classe des Dicotylidoneae, sous division des Angiospermae, et division des Phanerogamae, il renferme 39 espèces groupées en 6 sections (El Haouzali, 2009).

Notre choix est fait sur ce végétale car cette espèce est considéré comme une plante ligneuse modèle et pionnière connue pour ses capacités de tolérance aux ETM (Yadav, 2010). Le peuplier a souvent fait l'objet d'études sur son potentiel de phyto-extraction car c'est une plante accumulatrice de zinc et cadmium, et aussi par rapport à son abondance dans notre région d'étude.

### 3.2. Procédure de l'échantillonnage

- **Lavage des troncs :** Le lavage est effectué sur les troncs d'arbres de peuplier à plus de 1,5m de sol afin de recueillir les matières en suspension déposées à la surface de ces écorces. Comme illustré dans le schéma de la (figure 6).



**Figure6.** Photo illustrant l'échantillonnage du dépôt de surface sur le tronc en place (prise par Nadia et Zahra, 2022)

- **Récolte d'écorces :** On a recueilli les écorces à l'aide d'une hache ou des ciseaux sur une surface rectangulaire de 60cm<sup>2</sup> à 1,5m du sol; ces derniers sont conservés dans des sachets en papier. Ensuite au laboratoire ces écorces ont subi un séchage à l'étuve et un broyage.

- Récolte des feuilles : Au même temps que la récolte des écorces, des feuilles d'arbres ont été aussi récoltées (éviter le prélèvement des feuilles dans des branches récentes), ces derniers sont conservés dans des sachets en papier (pour éviter l'oxydation de la chlorophylle), et dans un réfrigérateur à 4°C, dans le but de doser les paramètres physiologiques qui sont la chlorophylle et la proline, et même pour évaluer la quantité des matières en suspension contenue à la surface de la feuille (PMF).

#### 4. Paramètres physiologique étudiées

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes étapes suivies pour doser les paramètres physiologiques de la plante.

##### 4.1. Dosage de la chlorophylle

La chlorophylle est un pigment photosynthétique (assimilateur) le plus dominant chez les plantes vertes, Chez les végétaux supérieurs, on trouve 2 types de chlorophylle qui se différencient par leur structure moléculaire et leur mode d'absorption des ondes lumineuses :

- La chlorophylle *a* existe chez tous les végétaux, elle représente 75 % de la chlorophylle des plantes vertes.
- La chlorophylle *b* se trouve chez les Cormophytes (végétaux supérieurs) et les Chlorophycées (Algues vertes) (Berrayah, 2016).

La teneur en chlorophylles (*a+b*) est un indicateur important du stress chez les végétaux pour son rôle direct dans le processus photosynthétique de l'assimilation de la lumière et l'initiation dans le transport des électrons ainsi que sa bonne réponse aux stress (Rejzkova et al., 2005), (Zarco-Tejada et al., 2002). Tous les polluants atmosphériques déposés et retenus par le système foliaire sont transformés à l'intérieur de la plante et affectent sa respiration et sa photosynthèse (Carter et Spiering, 2002).

La chlorophylle est extraite en utilisant le protocole suivant:

- Peser 1g de la matière végétale fraîche (MF) (les feuilles d'arbres), le broyer en présence de 10 ml de l'acétone à 80% (80ml de l'acétone + 20 ml de l'eau distillée) (figure 7).



**Figure7.** Broyage de la matière fraîche en présence d'acétone (prise par Nadia et Zahra, 2022).

- Mettre le mélange dans des tubes à essai et les centrifugés pendant 15min à 4100 tours /min.
- Récupérer le surnageant par une micropipette, puis mesurer leurs absorbances à l'aide d'un spectrophotomètre à deux longueurs d'onde : 663nm puis à 645 nm, après avoir étalonné l'appareil par l'acétone 80% (**fig 8**).



**Figure 8.** Récupération de surnageant obtenu de broyage des feuilles après centrifugation (prise par Nadia et Zahra, 2022) .

- Pour déterminer les teneurs en chlorophylle (a) et (b) et (ab) il faut appliquer les formules suivantes :

Chl (a) = 12, 21 A663-2,81A645..... (2)

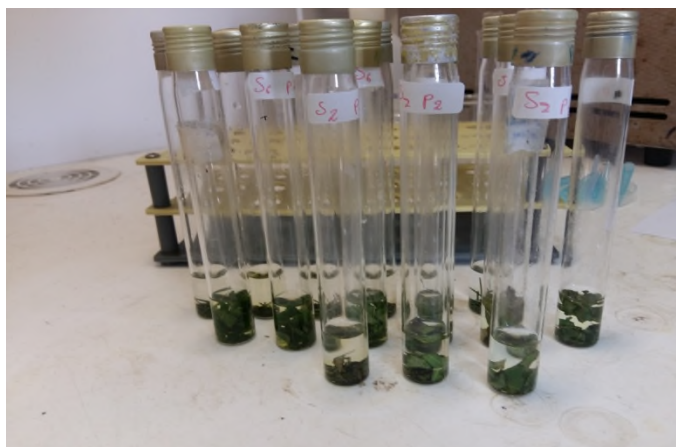
Chl(b) = 20,13A645-5,03A663..... (3)

C=Chl(a)+Chl(b)..... (4)

## 4.2. Dosage de la proline

La proline est l'un des solutés compatibles le plus fréquemment accumulé en réponse à des contraintes environnementales variées et joue un rôle important dans la tolérance des plantes (Bouteraa, 2014).

- Peser 100mg de la matière végétale fraîche coupés en petits morceaux (les feuilles d'arbres), les mettre dans des tubes à essais.
- Ajouter à ces derniers 3ml de méthanol à 80% (80ml de méthanol et 20ml de l'eau distillée) et les recouvrir par un papier aluminium pour éviter la volatilisation de l'alcool (**fig 9**).
- Chauffer ce mélange au bain marie à 85 C° pendant une heure.

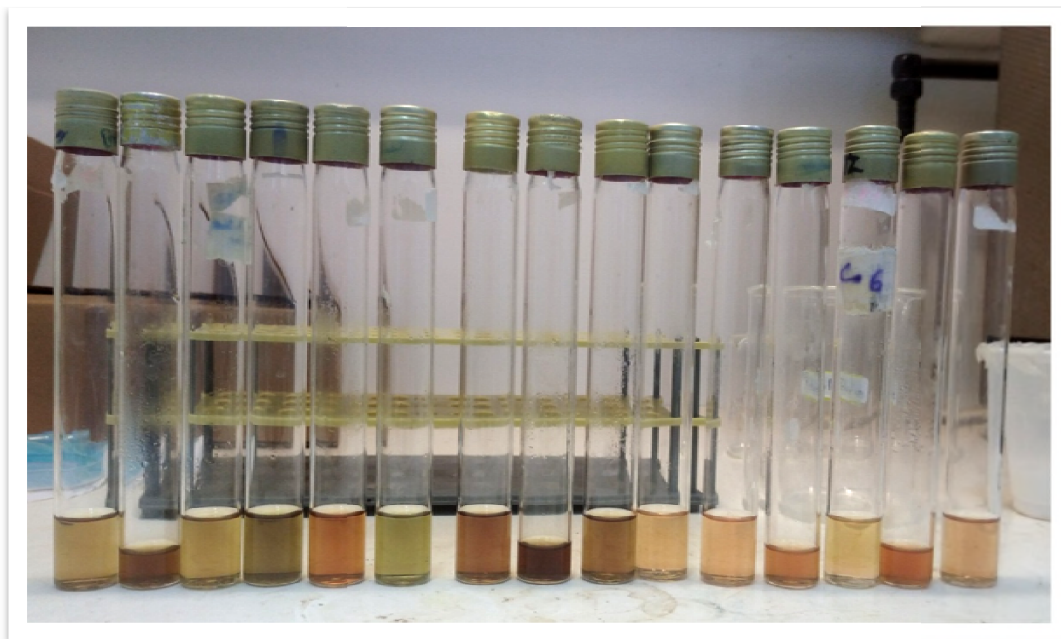


**Figure 9.** Tube contenant la matière fraîche et le méthanol 80% (prise par Nadia et Zahra, 2022).

- Après refroidissement, on a ajouté 1ml de l'acide acétique et 1ml d'un mélange contenant (60ml d'eau distillée, 0.12 mg de ninhydrine ( $C_9H_6O_4$ ), 120ml d'acide acétique et 40ml de l'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ )) sont ajoutés à 1ml de l'extrait de proline (**fig 10**); ces derniers seront chauffés à nouveau pendant 30min, le réchauffement change la couleur des échantillons progressivement vers le rouge (**fig 11**).



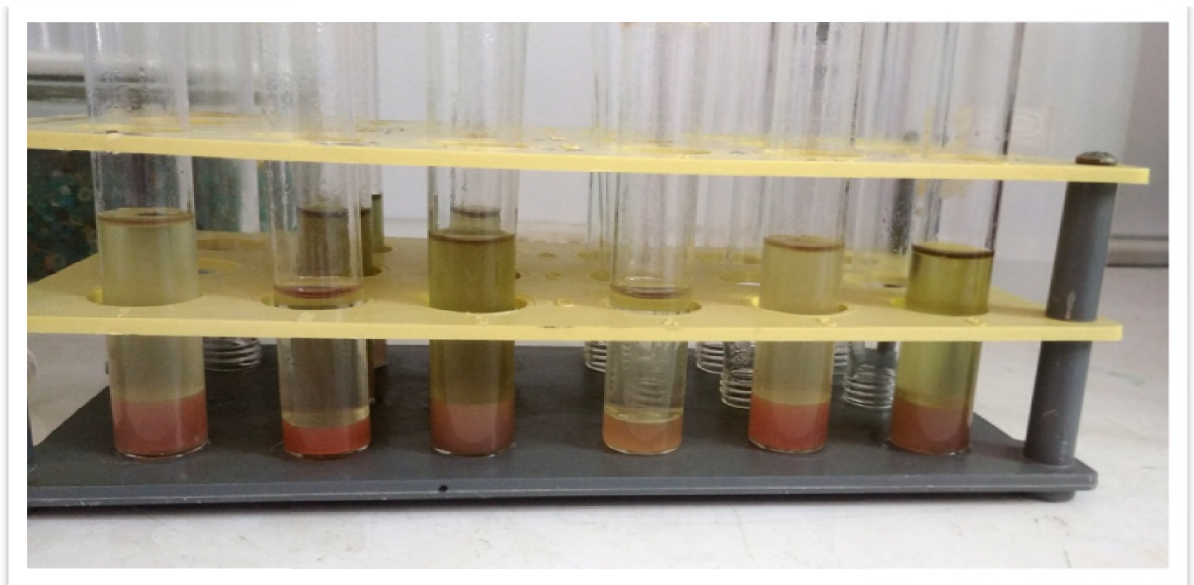
**Figure 10.** Tubes à essais après ajout de l'acide acétique et de la solution en proline (prise par Nadia et Zahra, 2022).



**Figure 11.** Tube contenant la solution après ébullition et l'extraction de la proline (prise par Nadia et Zahra, 2022).

- Après ébullition et refroidissement des tubes, on va ajouter pour chaque tube 5ml de toluène.
- Après agitation deux phases vont apparaître :
  - Une phase supérieure sans proline transparente.
  - Une phase inférieure avec proline colorée en rouge (**fig 12**).

- récupérer la phase inférieure qui contient la proline, puis la déshydratée par l'adjonction d'anhydride ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), puis mesurer leurs absorbance avec un spectrophotomètre à la longueur d'onde 528nm après étalonnage de l'appareil par le mélange (60ml d'eau distillée, 0.12 de ninhydrine ( $\text{C}_9\text{H}_6\text{O}_4$ ), 120ml d'acide acétique et 40ml d'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )).
- Les valeurs obtenues sont reportées sur la courbe d'étalonnage en (*annexe 1*) pour calculer les dosages de la proline par la formule suivante :
- $Y = 0,91742X + 0,0554$ ..... (5)
- X= la densité optique
- Y=concentration en proline ( $\mu\text{g} / \text{g}$ ).



**Figure 12.**Séparation des deux phases de la solution et apparition de la proline en rouge (prise par Nadia et Zahra, 2022).

## 5. Paramètres de pollution particulaire

Dans ce qui suit on va déterminer les quantités des particules en suspension déposées sur les feuilles (PMF) et les poussières accumulées dans les écorces de peuplier (PMT) et on va donner un aperçu sur les éléments traces métalliques contenue dans l'écorces d'arbres en utilisant de différentes techniques d'extraction et de dosage des métaux lourds : la SAA et FRX.

### 5.1. Particules déposées sur les feuilles (PMF)

Dans le but de trouver la quantité des PM contenues à la surface des feuilles on procède au protocole suivant :

- Peser 1g des feuilles d'arbre bien coupées, les mettre dans un bécher.
- ajouter 10ml de chloroforme le laisser pendant 30 seconde, puis les filtrer sur de papier filtre après avoir pesé leurs poids (**fig 13**).



**Figure 13.** Filtration de la matière fraîche après incubation dans le chloroforme (prise par Nadia et Zahra, 2022).

- Laisser ces échantillons sécher, puis peser leurs poids pour trouver le poids des PM contenues dans les feuilles.

## 5.2. Particules déposées sur le tronc d'arbre (PMT)

Le lavage est réalisé par un rinçage de la surface de tronc par 15ml de l'eau distillé à l'aide d'une brosse, l'eau est recueillie dans des flacons en téflon de 15ml, ces derniers vont subir une centrifugation de 15min à 8000rpm, après le surnageant sera évaporée et le culot séchée ; avant de les mettre dans l'étuve on doit d'abord pesés les tubes avant et après afin de trouver la différence qui est le poids des matières en suspension (PMT).

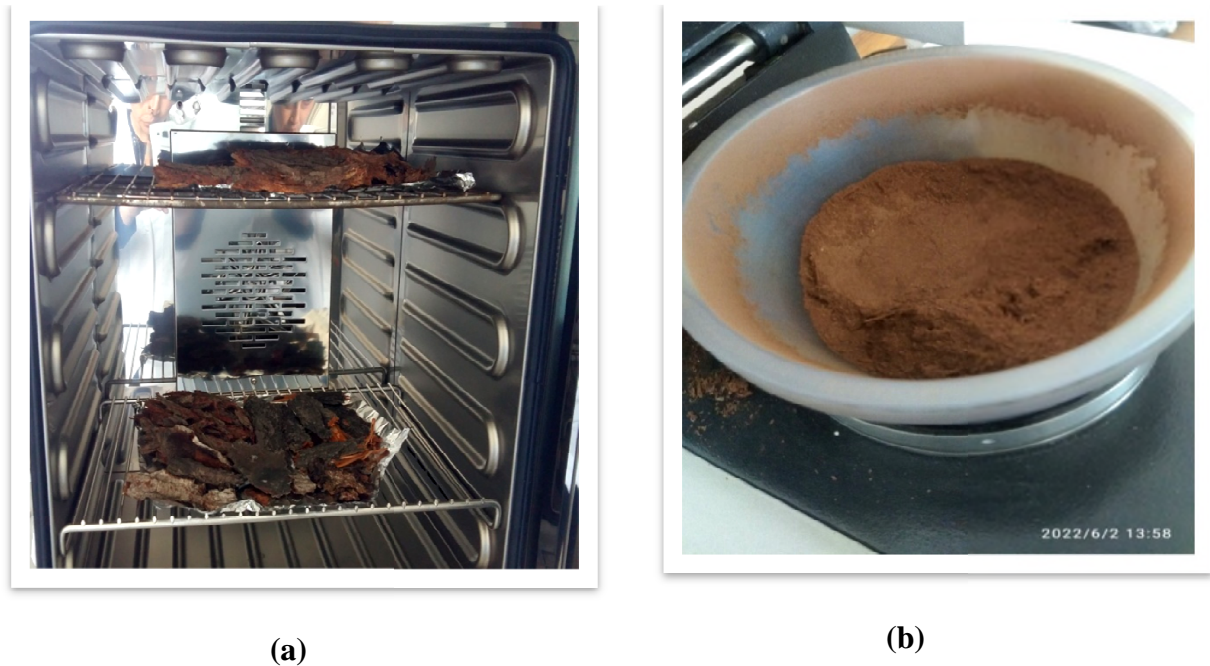
## 6. Paramètres de pollution métallique

Le dosage des métaux lourds dans les écorces d'arbre passe par plusieurs processus qui sont:

### 6.1. Broyage

Les écorces d'arbre recueillies sont séchées dans l'étuve à 100°C pendant 3h pour faciliter le broyage, ensuite coupés et broyés tout d'abord manuellement en utilisant le mortier et le pilon jusqu'à l'obtention d'écorce de taille réduite le plus possible. Les morceaux obtenus sont broyés encore une fois par un broyeur automatique pendant 10 minutes pour chaque échantillon (**fig14-a**), en fin la poudre obtenue est tamisée et récupérer dans des sachets (**fig 14-b**).

La moitié de cette poudre va passer au four à moufle pour subir une calcination puis le dosage des métaux lourds (Pb, Cu, Zn) par la SAA : spectrophotométrie d'absorption atomique au niveau de laboratoire des génies des procédés, et l'autre moitié sera utilisée dans la détection des différents éléments contenue dans l'écorce à l'aide de l'appareil de la FRX : spectrométrie de fluorescence des rayons X, au niveau du plateau technique physico-chimique.



**Figure 14.** Séchage des écorces à l'étuve (a) et poudre d'écorces obtenue après broyage automatique (prise par Nadia et Zahra, 2022).

## 6.2. Calcination

La perte au feu est une méthode où les échantillons se minéralisent et toutes la matière organique sera éliminée. La calcination se fait à laide d'un four à moufle où on met nos échantillons bien broyés dans des creusets (**fig 15**). Ces derniers entrent dans le four à moufle et seront exposés à une température très élevée.

La procédure continue par le passage des huit échantillons obtenues au four à moufle après avoir peser 5g de poudre d'écorce pour chaque échantillon pendant 5 heure à 550°C pour obtenir une décomposition thermique, le but est de trouver la quantité des minéraux (métaux lourds) accumulés dans les écorces d'arbres. La poudre devient des cendres qu'on va utiliser dans le dosage des ML.





**Figure 15.** Poudre de différentes stations dans des creusets de four à moufle (prise par Nadia et Zahra, 2022).

### 6.3. Spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA)

La SAA en (fig 16), est un appareil qu'on a utilisé pour doser les métaux lourds contenues dans nos échantillons calciné (cendres) avant de procéder à cette technique on a d'abord préparé les courbes d'étalonnage de Pb, de Zn et de Cu en allant de la concentration 1g/l jusqu'à 1mg/l (*annexe 2*).

Le travail est effectué en suivant le protocole ci-dessous :

- Peser 0,05 de cendre pour chaque échantillon, ajouter 2ml d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et 2 ml de HCl.
- Agiter ce mélange pendant 10min puis le mettre dans une micro-onde destiné au produit chimique pendant 10seconde répéter cette étape trois fois pour chaque échantillon.
- Après refroidissement on met les échantillons dans des tubes à essais.
- Faire passer les étalons en premier de 1mg/l  $\Rightarrow$  10mg/l puis les huit échantillons dans le spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme pour donner la courbe et les concentrations des métaux étudiés dans chaque station

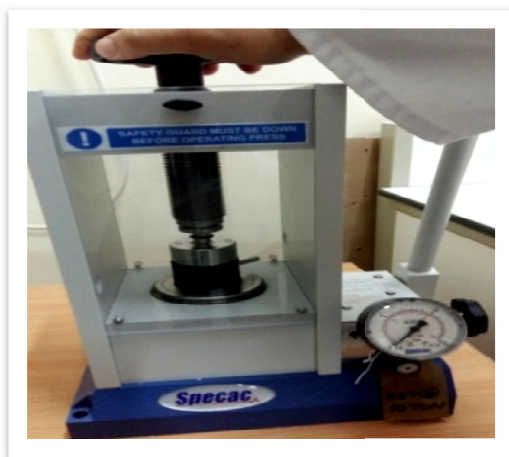


**Figure 16.** Appareil de Spectrophotométrie d’Absorption Atomique (prise par Nadia et Zahra, 2022).

La préparation des courbes d’étalonnage et des échantillons est faite au même jour que le passage dans la SAA, les résultats sont présentés sous forme de courbes.

#### 6.4. Spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX)

Spectrométrie de fluorescence des rayons X, est une technique d’analyses 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 (Kouadri, 2020). L’autre moitié de la poudre on va l’utiliser dans la FRX mais premièrement : il faut d’abords préparer les pastilles pour les huit stations et les compressés à l’aide d’un presseur pour avoir des pastilles ci- dessous (fig 17).



(a)



(b)

**Figure 17.** Pression des échantillons avec le presseur (a) des pastilles (b) (prise par Nadia et Zahra, 2022).

Ces pastilles sont prêtes à être utilisées par l'appareil FRX pour détecter les éléments contenus dans l'écorce notamment les métaux lourds recherchés par le bombardement de la pastille par un rayonnement issu d'une source de radioactive, l'analyse de spectre de rayonnement X va nous donner la composition élémentaire de l'échantillon ; le résultat sera affiché sur l'appareil directement (**fig 18**).



**Figure 18.** Pastille prête à être lue par la FRX (prise par Nadia et Zahra, 2022).

## 7. Analyses statistique des résultats

L'analyse statistique est réalisée à l'aide de deux logiciels différents, logiciel R version 3.3.3 (2017-03-06) et l'EXCEL STAT (2007). La dispersion des résultats obtenus sont réalisées par la technique ANOVA à un facteur, en utilisant le test de Shapiro et Wilk et le test de Bartlett (en raison de la vérification de la normalité et l'homogénéité des données), ou celui de Kruskal-Wallis selon la vérification des conditions d'application ; quand le test de la comparaison des moyennes affichait une différence significative, on poussait l'analyse avec le test de Tukey pour trouver les combinaisons (stations) qui ont provoqué la différence.

Pour effectuer l'analyse statistique descriptive des résultats, nous avons utilisé le logiciel Excel : les paramètres de position (moyenne, médiane, les valeurs maximales et minimales) et de dispersion (l'écart-type, l'erreur type, la variance).

Tous ces tests statistiques ont été perfectionnés avec le logiciel R version 3.3.3 (2017-03-06). Ce logiciel est aussi utilisé pour tracer les graphes de boîtes à moustaches (Box-plot) et pour appliquer la méthode de statistiques multi-variées adaptée pour les données quantitatives continues et qui est l'analyse en composantes principales (ACP).

# **Chapitre II :**

## **Résultats et Discussions**

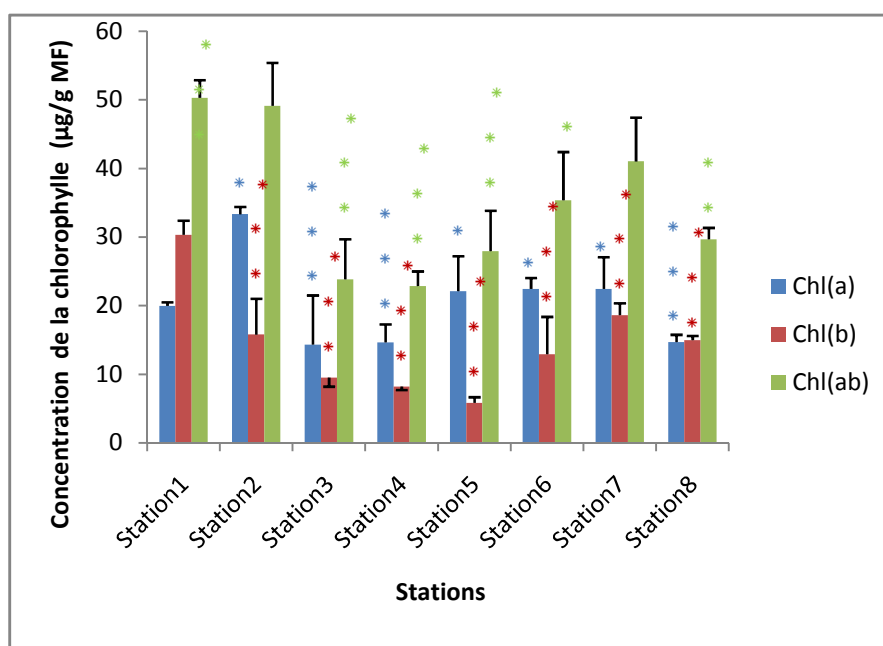
## 1. Résultats

### 1.1. Paramètres physiologiques

#### 1.1.1. Chlorophylle (ab)

Les résultats obtenus du dosage de la chlorophylle totale (**ab**) sont bien distincts et varient en fonction des stations selon la **figure 19**. En effet les moyennes maximales sont enregistrées au niveau des stations 1 et 2 sont respectivement de l'ordre de 51 et 49  $\mu\text{g/g MF}$ , et les valeurs minimales sont enregistrées au niveau des stations 3 et 4 et qui sont successivement de l'ordre de 23,84 et 22,86  $\mu\text{g/g MF}$ . Pour le reste des stations 5, 6, 7 et 8 leurs valeurs varient entre 28  $\mu\text{g/g MF}$  et 41  $\mu\text{g/g MF}$ .

Au niveau de toutes les stations, nous remarquons que la chlorophylle (**ab**) qui représente la somme de la chlorophylle (**a**) et la chlorophylle (**b**) est plus proche de la chlorophylle (**a**). Ainsi la quantité de la chlorophylle (**b**) fait en moyenne 50% de la chlorophylle (**a**) au niveau de la station 4, la chlorophylle (**a**) = 15  $\mu\text{g/g MF}$  tandis que la chlorophylle (**b**) = 7  $\mu\text{g/g MF}$ , et au niveau de la station 5, cette quantité (21  $\mu\text{g/g MF}$ ) fait même 4 fois plus que celle de la chlorophylle (**b**) qui est de 5  $\mu\text{g/g MF}$ .



**Figure 19.** Variations de la concentration de la chlorophylle (a), (b) et (ab) en fonction des différentes stations dans la région urbaine de Bejaia (Mai 2022).

Les concentrations moyennes en chlorophylle sont significativement différentes entre les huit stations. Ceci est prouvé par le test non paramétrique de Kruskal-Wallis appliqué à ce

paramètre physiologique et qui a donné une valeur ( $K= 17.79, p= 0.01$ ) pour la chlorophylle (a) et de ( $K = 19.37, p =0.007$ ) pour la chlorophylle (b) (*annexe 3, tableau 1*).

### 1.1.1.1. Chlorophylle (a)

Le **tableau (8)**, regroupe les paramètres de position (moyenne, médiane, maximum et minimum) et les paramètres de dispersion (l'erreur type, l'écart-type et la variance) calculés à partir des résultats obtenus.

Pour la concentration moyenne, nous remarquons que nos valeurs varient en fonction des stations. La valeur moyenne maximale de  $33.35 \mu\text{g/g MF}$  enregistrée au niveau de la station 2 fait alors le double de la valeur moyenne minimale ( $14.54 \mu\text{g/g MF}$ ) enregistrée au niveau de la station 4. Pour les six stations restantes, ces valeurs ne dépassent pas ( $22.44 \mu\text{g/g MF}$ ). Parallèlement, les valeurs médianes suivent la même tendance; ( $32.86 \mu\text{g/g MF}$ ) pour la valeur maximale enregistrée au niveau de la station 2 très proche de la moyenne et ( $14.35 \mu\text{g/g MF}$ ) au niveau de la station 4.

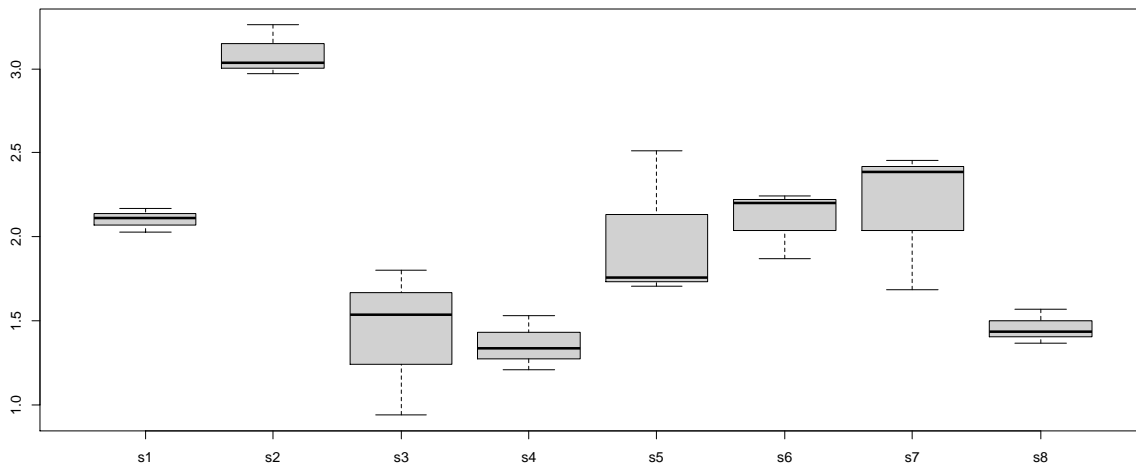
On observant les valeurs moyennes et médianes, nous pouvons dire que, ces deux paramètres sont superposés dans la plupart des stations, comme mentionné dans le tableau (8) et le graphe des boîtes à moustache (**fig 20**) ce qui signifie que les valeurs suivent la loi normale à l'exception des valeurs de la station 5 qui ont donné une moyenne de  $22,11 \mu\text{g/g MF}$  et médiane de  $19,25 \mu\text{g/g}$ .

**Tableau8.** Présentation de quelques paramètres statistiques de position concernant la variation des concentrations de la chlorophylle (a) ( $\mu\text{g/gMF}$ ) en fonction des stations dans la région de Bejaia (Mai2022).

	station1	station2	station3	station4	station5	statio6	statio7	statio8
Moyenne	19,96	33,35	15,03	14,54	22,11	22,44	22,43	14,68
Erreur-type	0,62	0,61	3,00	1,09	2,97	1,30	2,68	0,71
Médiane	20,39	32,86	16,43	14,35	19,25	23,10	24,80	14,26
Écart-type	1,08	1,05	5,20	1,88	5,14	2,25	4,65	1,22
Variance	1,17	1,11	27,08	3,54	26,39	5,08	21,60	1,50
Minimum	18,74	32,62	9,27	12,76	19,05	19,93	17,08	13,73
Maximum	20,76	34,55	19,39	16,51	28,04	24,29	25,41	16,06

Les valeurs, de l'écart- type et celles de l'erreur type, calculées concernant toutes les stations, sont toujours inférieures à leurs moyennes correspondantes, ce qui prouve que les valeurs enregistrées dans chaque station sont peu dispersées. Ainsi l'écart-type calculé dans la station 2 est 33 fois inférieur à sa moyenne et ce rapport est de 19 dans le cas de la station 1. La variance qui est le carré de l'écart-type reste toujours inférieure à la valeur moyenne des échantillons sauf dans le cas de la station 3et 5 où les deux variances qui sont successivement

de l'ordre de (27,08 et 26,39  $\mu\text{g/g MF}$ ) sont légèrement supérieures à leurs moyennes correspondantes (15,03 et 22,11  $\mu\text{g/g MF}$ ). Nous avons poussé l'analyse, et réalisées des boîtes à moustache par le logiciel **R (box plot)** pour confirmé la distribution de nos résultats obtenus.



**Figure 20.** Box plot de la distribution de la chlorophylle (a) selon les stations.

La figure (20) montre que la plus petite observation (échantillon minimum) est enregistrée au niveau de la station 3 et 4 (l'indice varié entre 8 et 17), et la plus grande observation (échantillon maximum) enregistré au niveau de la station 2 (l'indice varié entre 29 et 34).

En regardant la position des boîtes sur le graphe nous pouvons constater que la station 2 marque les valeurs les plus élevées (l'indice varié entre 29 et 34  $\mu\text{g/g MF}$ ).

En considérant la taille des boîtes on peut clairement déduire que les valeurs des stations 1, 2, 4, et 8 sont les peu dispersées.

Dans le cas des stations 3, 5, 6 et 7, les moustaches ne sont pas parfaitement symétriques.

### 1.1.1.2. Chlorophylle(b)

Le tableau (9) décrit les mêmes paramètres que le tableau (8), les valeurs de la moyenne et la médiane varient (30.35 et 5.84  $\mu\text{g/g MF}$ ), (29.98 et 6.28  $\mu\text{g/g MF}$ ) respectivement, les valeurs de la médiane sont très proches des valeurs de la moyenne dont 9.97  $\mu\text{g/g MF}$  enregistrées au niveau de la station 3 pour la moyenne, et 9.39  $\mu\text{g/g MF}$  enregistrées pour la médiane au niveau de la même station (3), et une valeur de 5.84  $\mu\text{g/g MF}$  enregistrées pour la moyenne au niveau de la station 5 et une valeur de 6.28  $\mu\text{g/g MF}$  enregistrées pour la médiane aussi au niveau de la même station (5).

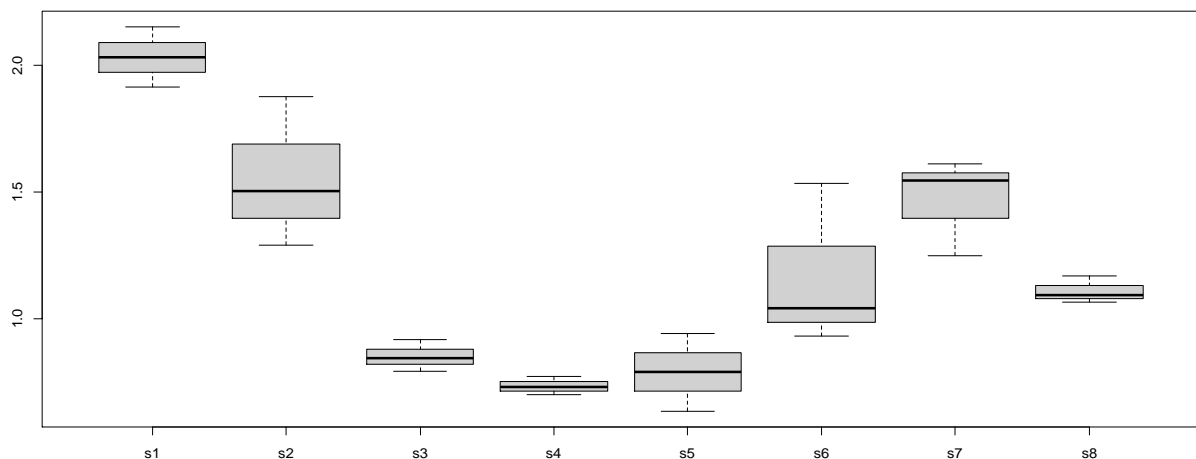
**Tableau9.** Présentation de quelques paramètres statistiques de position concernant la variation des concentrations de la chlorophylle (b) ( $\mu\text{g/gMF}$ ) en fonction des stations dans la région de Bejaia (Mai 2022).

	station1	station2	station3	station4	station5	station6	station7	station8
Moyenne	30,35	15,80	9,97	7,94	5,84	12,92	18,61	15,00
Erreur-type	1,51	3,01	0,64	0,36	0,86	3,52	1,01	0,68
Médiane	29,98	14,96	9,39	7,86	6,28	11,52	19,09	14,57
Écart-type	2,62	5,21	1,11	0,62	1,49	6,09	1,76	1,18
Variance	6,86	27,16	1,23	0,39	2,22	37,07	3,09	1,39
Minimum	27,93	11,05	9,26	7,35	4,18	7,65	16,66	14,10
Maximum	33,13	21,38	11,24	8,59	7,06	19,59	20,08	16,34

Les valeurs de l'écart-type pour la chlorophylle (b) varient entre  $6.09 \mu\text{g/g MF}$  comme une valeur maximale enregistrées au niveau de la station 6, et  $0.62 \mu\text{g/g MF}$  comme valeur minimale enregistrées au niveau de la station 4. et les valeurs de l'erreur -type suit toujours les valeurs de l'écart -type.

Comme les résultats de la chlorophylle (a), ceux de la chlorophylle (b) sont symétriques et suivent la loi normale.

Nous avons poussé l'analyse, encore une fois et nous avons réalisé un box plot pour la chlorophylle (b).



**Figure 21.** Box plot de la distribution de la chlorophylle (b) selon les stations.

Le graphe (fig 21) montre que dans le cas de la station 1, la distribution est élevée par rapport aux autres stations (l'indice varie entre (19 et 22) (médiane =20), dans le cas des stations 3,4 et 8 la forme générale de la boîte à moustache est identique à celle de la station 1, mais la distribution est moins importante. Pour l'asymétrie, nous observons que dans toutes



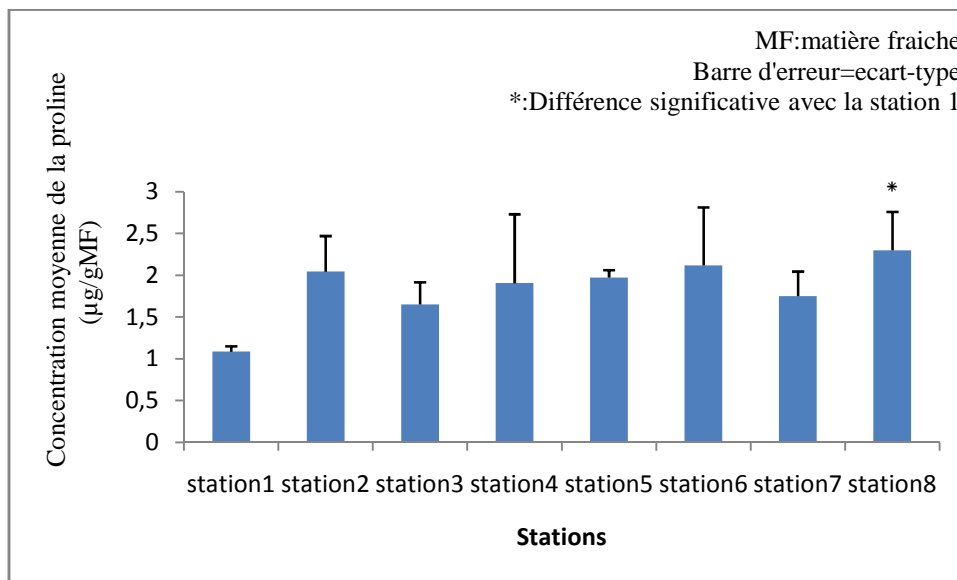
les stations les observations sont positivement asymétriques, dont les moustaches supérieures sont bien plus longue que les moustaches inférieures, sauf pour la station 7 où les observations sont négativement asymétriques (moustaches inférieures étant bien plus longue que les moustaches supérieures).

Dans le cas des stations 2,5, 6 et 7 les dispersions des observations sont plus importantes que le reste des stations.

En combinant toutes ces analyses appliquées sur les résultats de la chlorophylle totale, nous pouvons déduire que les stations présentent des valeurs similaires entre les différentes stations ce qui est expliqué par le fait que ces dernières sont toutes situées dans des milieux urbains et subissent les mêmes conditions de l'environnement.

### 1.1.2. Proline

Les résultats du dosage de la proline chez le peuplier, sont illustrés dans la **figure (22)**. Ces résultats montrent que les niveaux de la proline, sont élevés dans toutes les stations. La valeur moyenne maximale de  $2.3\mu\text{g/g MF}$  est ainsi enregistrée au niveau de la station 8, et la valeur moyenne minimale de  $1.1\mu\text{g/g MF}$  est enregistrée au niveau de la station 1, alors que les autres stations ont enregistré des valeurs qui varient entre ( $1.6\mu\text{g/g MF}$  et  $2.2\mu\text{g/g MF}$ ).



**Figure 22.** Variation des concentrations de la proline ( $\mu\text{g/g MF}$ ) selon les différentes stations de la ville de Bejaia (Mai 2022).

Toujours à partir de la **figure (22)** nous remarquons que les moyennes des différentes stations sont proches entre elles, exception pour la station 1 qui montre une valeur visiblement inférieure au reste des stations. Cela est infirmé par le test de Tukey qui a donné que la station 1 est la seule station qui montre vraiment des différences significatives avec la station2 (p-

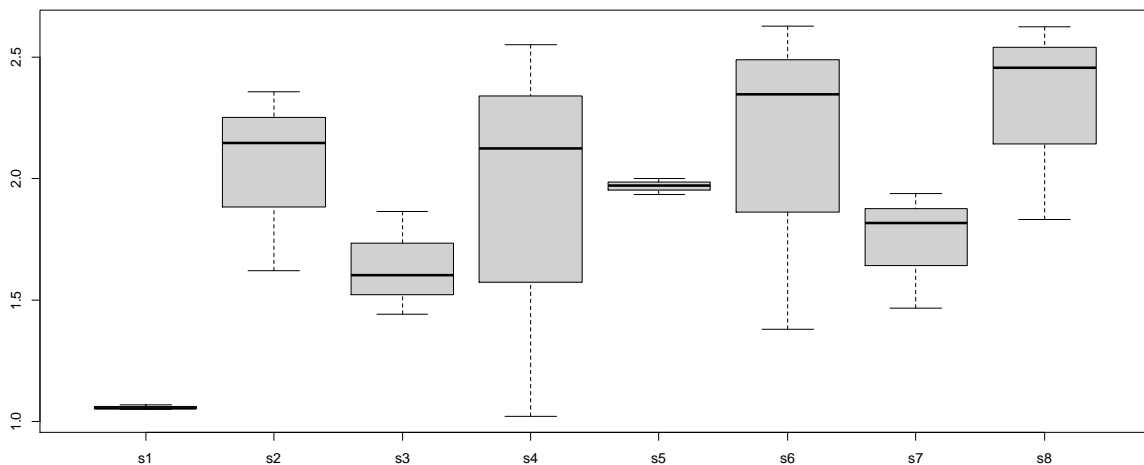
value=0,028, station5 (p-value=0,039), Station6 (p-value=0,019) et station8 (p-value=0,008) (*annexe 4, tableau 1*).

Avant d'appliquer le test de Tukey, le teste statistique de l'ANOVA a donné la valeur et  $p=0.008$ . Concernant les paramètres de dispersion (écart-type et erreur-type), le **tableau (10)** nous montre que les valeurs sont très proches, comme par exemple au niveau de la station 5 l'écart-type enregistré est de  $0.3\mu\text{g/g MF}$  et l'erreur-type enregistre  $0.2\mu\text{g/g MF}$ . Donc nos échantillons sont moins dispersés.

**Tableau10.** Quelques paramètres statistiques descriptifs concernant les concentrations de la proline ( $\mu\text{g/g MF}$ ) selon les différentes stations de la ville de Bejaia (Mai 2022).

	Station1	Station2	Station3	Station4	Station5	Station6	Station7	Station8
Moyenne	1,06	2,04	1,64	1,90	1,97	2,12	1,74	2,30
Erreur-type	0,01	0,22	0,12	0,46	0,02	0,38	0,14	0,24
Médiane	1,06	2,15	1,61	2,13	1,97	2,35	1,82	2,46
Écart-type	0,01	0,38	0,21	0,79	0,03	0,66	0,25	0,42
Variance	0,00	0,14	0,05	0,62	0,00	0,43	0,06	0,17
Minimum	1,05	1,62	1,44	1,02	1,94	1,38	1,47	1,83
Maximum	1,07	2,36	1,87	2,55	2,00	2,63	1,94	2,62

En effet la dispersion des valeurs de chacune des huit stations sont symétrique et suivent la loi normale selon les résultats de teste de Shapiro (*annexe 4, tableau 2*) et les variances des différentes stations sont homogène selon les résultats de test de Bartlett (*annexe 4, tableau3*). Les valeurs médianes de la proline des différentes stations varient entre  $2.46\mu\text{g/g MF}$  et  $1.06\mu\text{g/g MF}$  **tableau (10)**. Nous remarquons que ces médianes et les moyennes calculées pour la proline représentent presque les mêmes valeurs dans le cas de toutes les stations. Ainsi, la valeur moyenne de  $1.97\mu\text{g/g MF}$  enregistrée au niveau de la station 5 est elle même sa médiane. Même observation pour la station 1 dont la valeur moyenne et la médiane est la même et qui est de l'ordre de  $1.06\mu\text{g/g MF}$ .



**Figure 23.** Box plot de la distribution de la proline en fonction des stations.

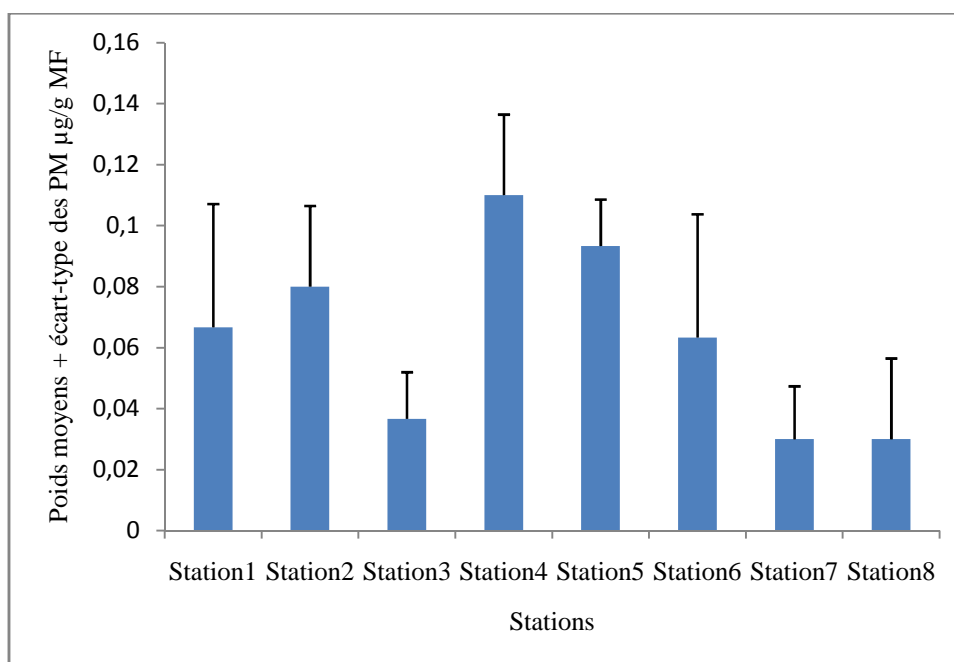
La **figure (23)**, représente une boîte à moustache illustrant la dispersion de la proline en fonction des stations. Ce graphique montre que c'est la station 2 qui enregistre la dispersion la plus élevée avec un indice qui varie entre 10 et 26. Par contre la station 5 enregistre une dispersion des échantillons, la moins élevée avec un indice qui varie entre 20 et 21.

La distribution des échantillons dans le cas des stations 2, 3, 4, 6, 7 et 8 est élevée et les observations sont négativement asymétriques. Par contre les valeurs de deux stations 1 et 5 montrent de faibles dispersions autour de la médiane.

## 1.2. Paramètre de pollution particulière

### 1.2.1. Particules déposées sur les feuilles (PMF)

Les résultats des particules en suspension déposées sur les feuilles d'arbres récoltées, illustrés dans la **figure (24)** montrent que les valeurs moyennes varient entre  $0,11\mu\text{g/g}$  et  $0,03\mu\text{g/g}$  MF. Nous remarquons que la valeur maximale est trois fois plus que la valeur moyenne minimale, tandis que les valeurs moyennes dans les autres stations ne dépassent pas  $0,093\mu\text{g/g}$ .



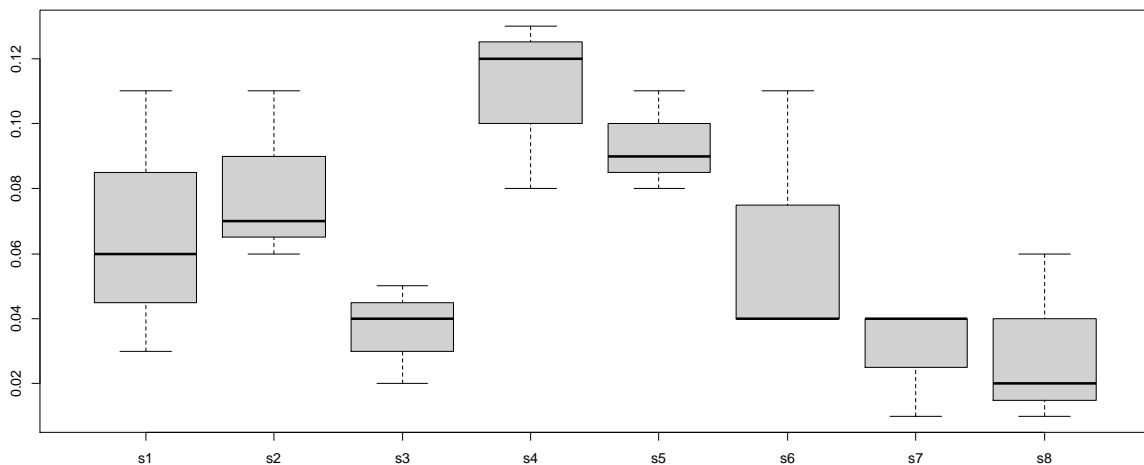
**Figure 24:** Présentation des concentrations moyennes des matières en suspension déposées à la surface des feuilles (Mai 2022).

Le **tableau (11)** montre que les valeurs moyennes et les valeurs médianes varient dans le même sens et elles sont très proches au sein de la même station. La valeur médiane maximale de  $0,12\mu\text{g/g}$  est calculée au niveau de la station 4 et une valeur médiane minimale de  $0,02\mu\text{g/g}$  est calculée dans la station 8. C'était la même observation dans le cas ses valeurs moyennes citées dans le paragraphe précédent.

**Tableau 11.** Présentation de certains paramètres statistiques des concertations en PM  $\mu\text{g/g}$  MF contenus dans le lavage des feuilles avec le chloroforme (Mai 2022).

	Station1	Station2	Station3	Station4	Station5	Station6	Station7	Station8
Moyenne	0,066	0,08	0,036	0,11	0,093	0,063	0,03	0,03
Erreur-type	0,023	0,015	0,008	0,015	0,008	0,023	0,01	0,015
Médiane	0,06	0,07	0,04	0,12	0,09	0,04	0,04	0,02
Écart-type	0,040	0,026	0,015	0,026	0,015	0,04	0,017	0,026
Variance	0,001	0,0007	0,003	0,0007	0,0002	0,001	0,0003	0,0007
Minimum	0,03	0,06	0,02	0,08	0,08	0,04	0,01	0,01
Maximum	0,11	0,11	0,05	0,13	0,11	0,11	0,04	0,06

En regardant le paramètre de dispersion de l'écart type, on remarque que les valeurs trouvées pour toutes les stations sont inférieures à leurs moyennes correspondantes, ce qui veut dire que les valeurs des poids de PM déposées sur les feuilles des prélèvements de chaque station sont peu dispersées.



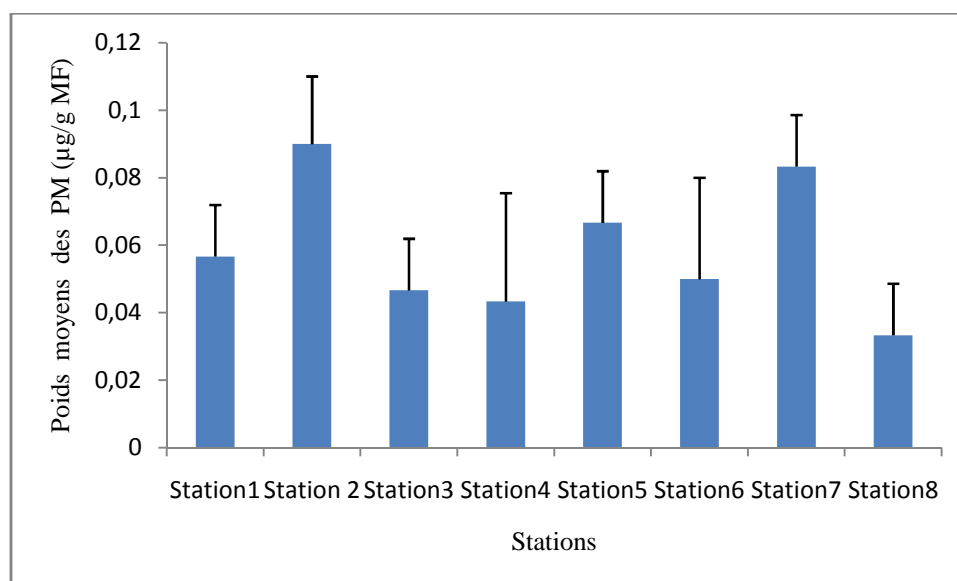
**Figure 25.** Box-plot de la distribution des poids des PM ( $\mu\text{g/g MF}$ ), déposées sur les feuilles prélevées des stations d'étude (Mai 2022).

Dans la **figure (25)**, nous remarquons que la plus petite observation (échantillon minimum) enregistré au niveau de la station 4 (l'indice varié entre 0.08 et 0.13), et la plus grande observation (échantillon maximum) enregistré au niveau de la station 8 (l'indice varié entre 0.01 et 0.06). Nous observons que la majorité des stations respectent la ligne de séparation sur la médiane et toutes les stations représentent une dispersion hautement significative entre les échantillons sauf pour les stations 6 et 7.

Dans le cas des stations 1, 2, 5 et 8, les moustaches supérieures étant bien plus longue que les moustaches inférieures, donc les observations sont positivement asymétriques, par contre dans le cas des stations 3 et 4 les moustaches inférieures sont plus longues que les moustaches supérieures donc les observations sont négativement asymétriques.

### 1.2.2. Particules déposées sur les troncs (PMT)

Les résultats de lavage des troncs d'arbre présentés dans la **figure (26)**, montrent que les plus grandes valeurs moyennes des matières en suspension contenues à la surface de l'écorce sont enregistrées au niveau des stations 2 et 5 avec les valeurs de  $0,09 \mu\text{g/g}$  et  $0,05 \mu\text{g/g}$  et la plus faible valeur est enregistrée dans la station 8 et qui est de  $0,033 \mu\text{g/g}$ ; tandis que les valeurs moyennes dans les autres stations ne dépassent pas  $0,083 \mu\text{g/g}$ .



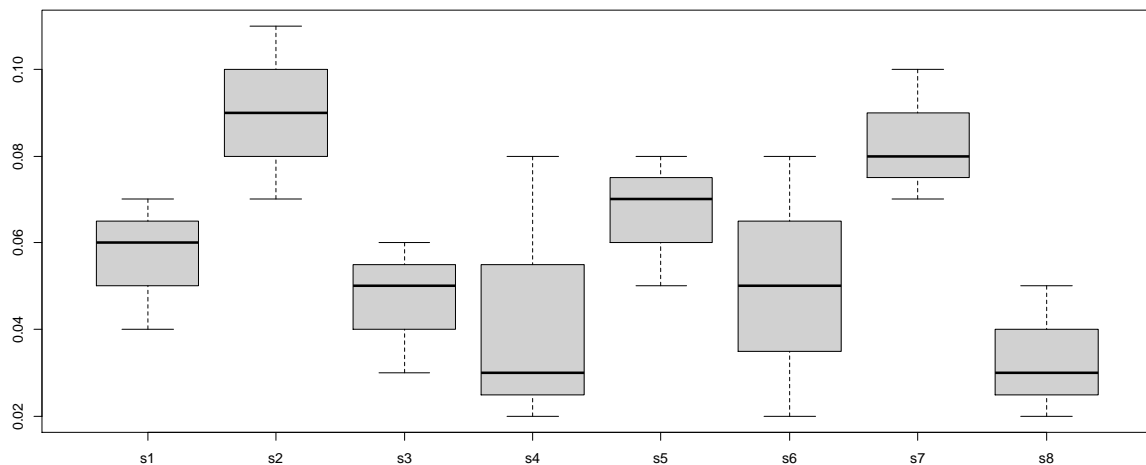
**Figure 26.**Présentation des concentrations moyennes des matières en suspension à la surface des troncs d'arbres de peuplier dans la ville de Bejaia (Mai 2022).

Le **tableau (12)** montre que les valeurs moyennes et les valeurs médianes varient dans le même sens et elles sont très proches entre elles. La valeur médiane maximale de  $0,09\mu\text{g/g}$  et la valeur médiane minimale de  $0,03\mu\text{g/g}$  sont successivement calculées pour les stations 2 et station 8.

**Tableau 12.** Présentation de certains paramètres statistiques des concertations en PM contenus dans le lavage des troncs (Mai 2022).

	Station1	Station2	Station3	Station4	Station5	Station6	Station7	Station8
Moyenne	0,056	0,09	0,046	0,043	0,066	0,05	0,083	0,033
Erreur-type	0,008	0,011	0,008	0,018	0,008	0,017	0,008	0,008
Médiane	0,06	0,09	0,05	0,03	0,07	0,05	0,08	0,03
Écart-type	0,015	0,02	0,015	0,032	0,015	0,03	0,015	0,015
Variance	0,0002	0,0004	0,0002	0,0010	0,0002	0,0009	0,0002	0,0002
Minimum	0,04	0,07	0,03	0,02	0,05	0,02	0,07	0,02
Maximum	0,07	0,11	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,05

On prenant en considération les paramètres de dispersion : l'écart-types et l'erreur-type on peut déduire que les valeurs de chaque station sont peu dispersées.



**Figure 27.**Box plot de la distribution des PMT.

La **figure (27)** nous montre la plus petite observation (échantillon minimum) enregistré au niveau de la station 8 (l'indice varié entre 0.02 et 0.05), et la plus grande observation (échantillon maximum) enregistré au niveau de la station 2 (l'indice varié entre 0.07 et 0.12). Dans le cas de la mesure de position, nous observons que toutes les stations respectent la ligne de séparation sur la médiane et toutes les stations représentent une dispersion hautement significative entre les échantillons.

Dans le cas des stations 2, 4, 7 et 8, les moustaches supérieures étant bien plus longue que les moustaches inférieures. Donc les observations sont positivement asymétriques, par contre dans le cas des stations 1, 3, 5, les moustaches inférieures sont plus longue que les moustache supérieures donc les observations sont négativement asymétriques, pour la station 6 les moustaches inférieures et supérieures sont identiques, donc les observations sont symétriques.

### 1.3. Paramètres des polluants métalliques

Pour mettre en évidence l'existence d'une accumulation des métaux lourds étudiés dans les échantillons collectés au niveau de la région du Bejaia, nous nous sommes appuyés sur deux techniques analytiques ; la Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) qui nous a permis de quantifier les éléments métalliques en solutions préparées (*annexe 5*) et la spectrométrie de Fluorescence des Rayons X (FRX) qui nous a aidés dans la détermination de la composition chimique de nos échantillons (écorces broyées). Le présent travail se base sur ces deux techniques en particulier.

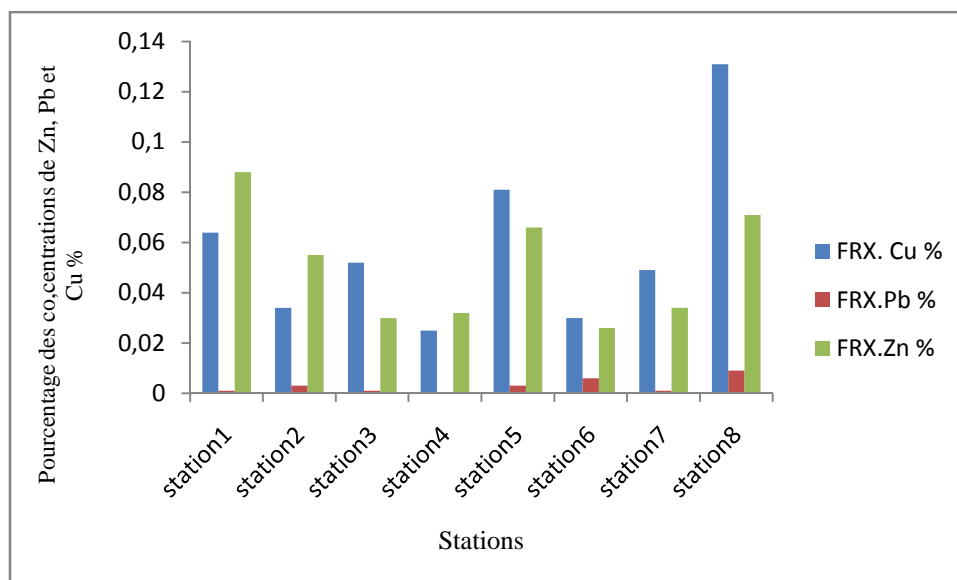
### 1.3.1. Spectrométrie de fluorescence des Rayons X (FRX)

Pour avoir une idée sur les éléments métalliques présents dans nos échantillons, nous avons utilisé la technique de FRX. L'appareil a donné les quantités en termes de pourcentages des différents éléments présents dans chaque échantillon (E.L, Si, S, Ca, Mn, Cu, Rb, Pb, P, K, Al, Ti, Fe, Zn, Sr, V) (*annexe 6*) et parmi ces éléments traces accumulés dans nos échantillons nous avons choisi seulement le cuivre, le plomb et le zinc car le nombre nous a été limité dans notre commande à la SAA.

Dans la **figure (28)**, nous observons que le Cuivre et le Zinc sont présents dans les huit stations. Par contre l'élément Plomb est présent uniquement au niveau des stations 2, 5, 6, et 8 avec une variable concentrations, et absent au niveau des quatre autres stations (1, 3, 4 et 7).

La valeur maximale enregistrée pour l'élément du **Cuivre** est de 0.13% au niveau de la station 8, par contre la valeur minimale est de 0.025 % enregistré au niveau de la station 4. Pour le **Zinc** les valeurs varient entre 0.09% comme valeur maximale enregistrée au niveau de la station 1 et 0.03% comme valeur minimale enregistrée au niveau de la station 6.

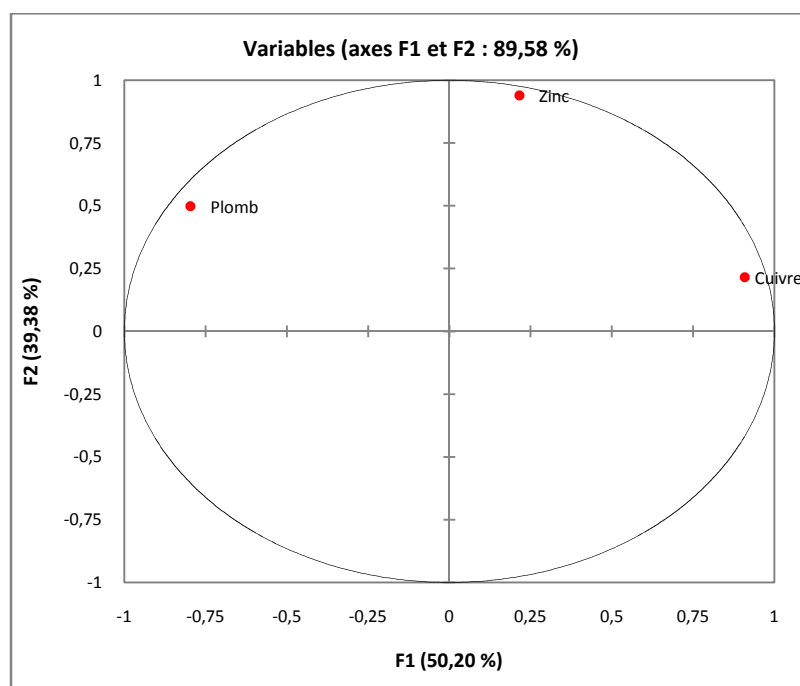
Les valeurs du **Plomb** sont trop faibles presque nulle, la station 8 enregistre le plus grand pourcentage et qui est de 0.01% et les stations 2 et 5 enregistre des valeurs inférieures à 0.005 %.



**Figure 28.** Distribution des éléments traces métalliques (Zn, Cu, Pb) en fonction des stations urbaine dans la région de Bejaia (Mai 2022).

Selon cette figure, nous remarquons qu'il existe une relation entre la présence du Cuivre et du Zinc, mais cela est rejeté par l'application de l'ACP par le logiciel XLSTAT qui a donné un facteur de corrélation  $r=0,3$ .





**Figure 29.** Cercle de Corrélation illustre la distribution des éléments étudiés (Cu, Pb, Zn).

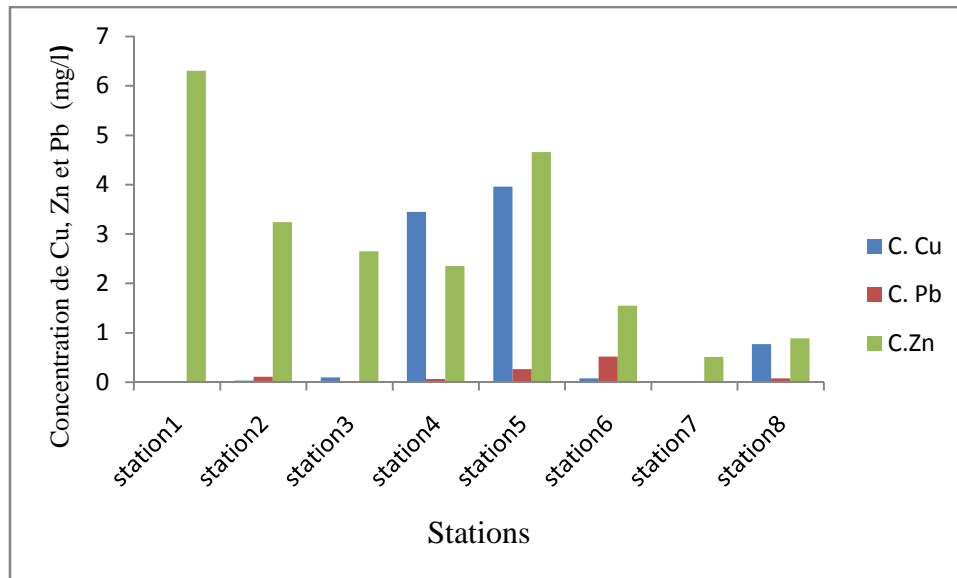
Selon la **figure (29)**, nous pouvons constater que les points « cuivre » et « zinc » et « plomb » sont très proches de cercle de corrélation, et donc très bien représentés. L'angle formé par les deux points « zinc » et « plomb » indique que les valeurs de ces deux éléments varient indépendamment entre elles.

### 1.3.2. Spectrophotométrie d'Absorption Atomique (SAA)

Concernant la bioaccumulation du **Zinc** par les écorces de peuplier, les résultats obtenus en **figure(30)**, montrent que les valeurs enregistrées fluctuent en fonction des sites de prélèvement. Par ailleurs, nous enregistrons une augmentation au niveau des différents sites étudiés, la valeur maximale accumulée est de 6.5 mg/l au niveau de la station 1 tandis que la valeur minimale de 0.5 mg/l est trouvée au niveau de la station 7.

Par contre pour la bioaccumulation du **Cuivre**, les stations 4 et 5 ont enregistré respectivement des valeurs maximales de 3.5 mg/l et 4 mg/l. La station 8 a enregistré une valeur de 1 mg/l et les deux stations 3 et 6 ont enregistré presque la même valeur de 0.1 mg/l. Tandis que le reste des stations (1,2 et 7) n'ont enregistré aucune valeur d'accumulation.

Concernant le plomb, de manière générale il y'a pas une véritable accumulation. Nous avons enregistré des valeurs plutôt faibles au niveau des seules stations 2, 5,6 et 8 dont les valeurs accumulées sont respectivement de 0.1, 0.3, 0.5 et 0.1 mg/l.



**Figure 30.** Concentration en mg/l, des métaux lourds selon les stations dans la région de Bejaia (Mai 2022).

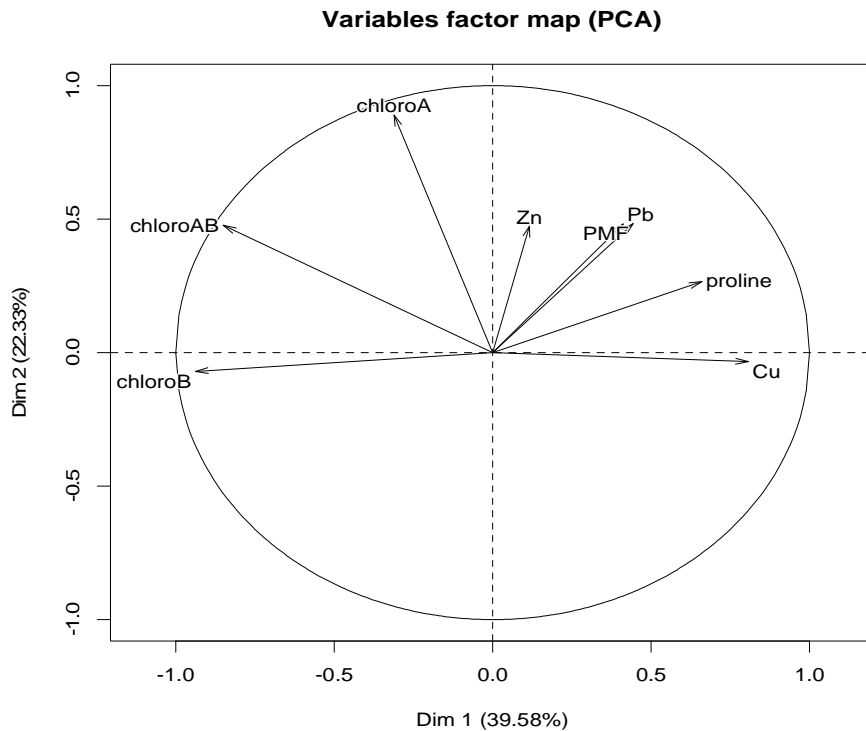
#### 1.4. Analyse en composantes principales (ACP)

Pour faire sortir les différents liens qui existent entre les différents paramètres étudiés au niveau des huit stations choisies, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode statistique multi-variée, adaptée pour l'analyse des données numériques concernant plusieurs variables qui est l'analyse en composantes principale (ACP). À cette fin, nous avons utilisé le logiciel R version 3.3.3 (2017-03-06).

À partir des sorties de notre logiciel, nous avons obtenu le cercle de corrélation en **figure (31)**.

D'après ce cercle, nous remarquons que les deux axes principaux à eux seuls contiennent 61,91% de l'information sur la variation totale d'un ensemble de cinq variables (Zn, Pb, Cu, PM, Chl (a), Chl(b) et Chl (ab)).

Notre ACP, montre une corrélation entre les trois paramètres de chlorophylle. Ainsi, le tableau de corrélation obtenu par l'ACP appliquée à ces paramètres, donne un coefficient de corrélation de ( $r=0,71$ ,  $p=0.000$ ) entre la chlorophylle a et la chlorophylle totale. Entre cette dernière et la chlorophylle (b), ce coefficient est de l'ordre de ( $r=0,81$ ,  $p=0.000$ ) (*annexe 7*). Cela est expliqué par le faite que la chlorophylle totale est composée pour sa majorité de la chlorophylle (a), comme indiqué dans la littérature.



*chloroA : chlorophylle a, chloroB : chlorophylle b, chloroAB : chlorophylle ab,  
PMF : Particules déposées sur les feuilles.*

**Figure 31.** Cercle de corrélation des paramètres physiologiques de chlorophylle et de proline avec les paramètres de la pollution (Zn, Cu, Pb et PM) mesuré sur le peuplier pour les huit stations dans la région de Bejaia (Mai 2022).

En revanche les paramètres proline, PMF, Cu, Zn et Pb traduit une proximité et une corrélation positive entre eux et une corrélation négative avec la chlorophylle totale.

## 2. Discussion

### 2.1. Paramètres physiologiques

- En évaluant les résultats de dosage de la chlorophylle, on remarque que la valeur de 51  $\mu\text{g/g}$  MF et qui est enregistrée au niveau de la station 1 qui est la station d'AAMRIW (une zone urbaine) est légèrement élevée par rapport aux autres qui varient entre 35,36 et 49,14  $\mu\text{g/g}$  MF; cela est expliqué par les conditions environnementales ; (**Chen et al., 2019**) ont déjà montré que le stress abiotiques et les facteurs de stress environnementaux provoquent des changements dans appareil photosynthétique à différents niveaux métaboliques. Et qui reste inférieure aux normes 68  $\mu\text{g/g}$  MF) trouvées par (**Dellaa, 2018**).
- Concernant les résultats de la proline, on remarque que les valeurs sont élevées dans toutes les stations surtout dans la station 8 (BOUKHIAMA) avec un taux de

2,3 $\mu\text{g/g}$  MF qui marque la plus grande valeur. Comme la proline est un acide aminé synthétisé lors du stress et constitue un marqueur de résistance des plantes, donc on peut dire que les huit stations subissent des contraintes environnementales (Delauney et Verma, 1993) in (Berrayah, 2016).

## 2.2. Paramètres de Pollution particulaire

Les arbres et les plantes herbacées sont utilisés, non seulement pour l'observation des symptômes d'attaque qu'ils manifestent, mais encore comme collecteurs de poussière (Maatoug et al., 2007). Pour cela on s'est appuyé sur deux techniques d'extraction des particules en suspension qui sont les particules déposées sur les feuilles PMF et celles accumulées sur les troncs d'arbres PMT.

Selon les valeurs des particules PMT on remarque que la grande valeur de 0,11 $\mu\text{g/g}$  est trouvée au niveau de la station 2 (LA ZONE). Les valeurs des autres stations varient entre 0,09 et 0,033  $\mu\text{g/g}$ .

Pour les particules PMF la valeur la plus élevée (0,11 $\mu\text{g/g}$ ) est enregistrée au niveau de la station 4 (TARGUA). Ce résultat confirme l'idée des retombées atmosphériques résultant probablement d'un dépôt, et que la pollution est sans frontières et ses effets se manifeste à l'échelle planétaire (Adriano, 1986). Ces résultats montrent que nos arbres sont influencés par la pollution atmosphérique urbaine.

## 2.3. Paramètres des polluants métalliques

D'après la détection élémentaire de Spectrométrie de fluorescence des rayons X, on remarque que le zinc et le cuivre sont présent dans toutes les stations et les pourcentages les plus élevés sont respectivement de l'ordre de 0,08 et 0,13% tandis que le plomb est présent seulement dans les stations suivantes 2(LA ZONE), 5(SIDI-AHMED), 6(SQUART-PASTEUR) et 8(BOUKHIMA) avec une valeur de 0,07% marquer dans la station 8(BOUKHIAMA). Cette omniprésence de Cu et de Zn est expliquée par leur même origine du sol.

Les résultats obtenus par la spectrophotométrie d'absorption atomique concernant le cuivre montrent que cet élément est présent seulement dans 5 stations (Station 2(LA ZONE), 4(TARGUA), 5(SIDI-AHMED), 6(SQUART-PASTEUR) et 8(BOUKHIAMA)), et la valeur la plus élevée et qui est de l'ordre de 3,96 mg/l est enregistré au niveau de la station 5(SIDI-AHMED). Cette valeur reste inférieure à la norme donnée par (Adriano.D.C, 1986) et qui varie entre 5 à 20 mg/l, chez plantes supérieures. Ce même auteur explique que la valeur

inférieure à 4mg/l est considéré comme déficient pour la plante et celle supérieures à 20 mg/l est toxique. On peut déduire que le sol est pauvre en cuivre parce que la phyto-toxicité de cuivre peut être prédite par sa concentration dans le sol (Ayrault, 2009).

À propos du plomb, la SAA a détecté sa présence avec de faibles concentrations dans cinq stations (2, 4, 5, 6 et 8). Ainsi la concentration la plus élevée et qui est obtenue au niveau de la station 6(SQUART-PASTEUR) qui est de l'ordre de 0,5mg/l est inférieure à la norme donnée par (Adriano, 1986) et qui varie de 1 à 30 mg/l((Shin al., 2007) ;(Szopa et al., 1973)), ont rapporté que les concentrations en plomb dans l'écorce dépendent essentiellement de celles de l'atmosphère, donc on peut dire que les taux de plomb qui viennent du trafic routier ne dépassent pas les normes réglementaires des rejets atmosphériques.

Pour le zinc on remarque sa présence dans toutes les stations, cela peut s'expliquer par son importance pour la survie des êtres vivants car il est considéré comme étant un oligo-élément ; la valeur maximale est enregistrée dans la station 1(TARGUA) avec une concentration de 6,30pmm très inférieure à la norme qui varie entre 25 à 150 mg/l, toujours selon (Adriano, 1986) la plantes qui contient une concentration inférieure à 20 mg/l peuvent être suspectées de carence de zinc.

# **Conclusion et Perspectives**

Depuis le développement de secteur industriel et agricole et de transports, la quantité des polluants émis dans l'atmosphère est intensifié et diversifier, ce qui rend la pollution atmosphérique l'un des problèmes majeurs et inquiétant dans le monde. Pour cela on peut dire que la bio-surveillance végétale constitue l'un des outils les plus essentiels dans la surveillance de la qualité de l'air

Durant notre étude et selon nos résultats, on a constaté que les taux des métaux Cu, Pb et Zn accumulés par les écorces d'arbre sont inférieur à la norme internationale avec des valeurs de (0,5 ; 3,96 et 6,30 mg /l respectivement. Pour les particules en suspension disposés sur les feuilles et le tronc d'arbre présente des différences entre les stations ce que nous a permet de confirmé le concept des retombés atmosphériques.

Pour les paramètres physiologique les résultats présentent des valeurs similaires entre les différentes stations ce qui est expliqué par le fait que ces dernières sont toutes situées dans des milieux urbains et subissent les mêmes conditions de l'environnement.

À partir de tous les résultats obtenus au cours de notre travail mais particulièrement ceux obtenus sur les trois éléments métallique (Cu ; Zn et Pb), on peut conclure que la qualité de l'air de la ville n'est pas aussi médiocre. Cependant il reste à confirmer et compléter ce travail qui, comme d'autres travaux scientifiques, ne manque pas de lacunes.

Durant toute la période d'étude et la préparation de ce modeste travail, on a rencontré plusieurs obstacles soit sur le terrain ou dans le laboratoire à cause des conditions climatiques et manque de moyens, de matériels et produits qui nous ont empêchés effectuer un bon échantillonnage et de réaliser notre étude dans les bonnes conditions.

La bio-surveillance de la qualité de l'environnement notamment la qualité de l'air et l'estimation de la quantité des polluants est nécessaire et très importante pour limiter leur ampleur et lutter contre ce phénomène et pour limiter leur risque sur le plan sanitaire et environnemental

En perspective, il serait intéressant :

- d'étaler la période d'étude et de la bio-surveillance de la pollution atmosphérique de la région de Bejaïa.
- d'agrandir le nombre de prélèvements et d'effectuer un échantillonnage sur plusieurs régions de la wilaya de Bejaïa.

- de prendre en considération d'autres éléments traces métalliques pour limiter leurs effets sur l'environnement et la santé humaine.
- Elargir l'espace d'étude toute en impliquant d'autre wilaya.



# **Références Bibliographiques**

### Bibliographies

- Adriano.D.C. (1986). *Trace Elements in the Environment*. New York: Springer Verlag.
- Agnan, Y. (2013). Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France: sources, mécanismes et facteurs d'influence. *thèse de doctorat* .
- Aranguren, M. M. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. *These de doctorat* .
- Ayrault, S. (2009). Complementarity of analytical tools in biomonitoring studies. *Radioanal Nucl Chem* , 281, 131–136.
- Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie* , 193-220.
- Baize, D. (1997). *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols*. France: INRA.
- Barkman, J. (1958). Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. *Van Gorcum, Assen* , 628P.
- Benmamsour, E. h. (2021). Caractérisation de la pollution atmosphérique par la bioindication. (*thèse de doctorat*) .
- Berg, T., Royset, O., & Steinnes, E. (1995). Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies. *Atmospheric environment*, 29(3) , 353-360.
- Berrayah, M. (2016). Biosurveillance de la qualité de l'air à l'aide des lichens et de mousses dans le groupement urbain de Tlemcen. (*Thèse de doctorat*) .
- Berrayah, M., Maatoug, M., Azzaoui, M., & Diallo, O. (2016). biosurveillance de la qualité de l'air d'un milieu urbain par des mousses et des lichens cas de la ville de Tlemcen. *European scientific journal* , 12 (9), 151-163.
- Blandin, P. (1986). Bio-indicateur et diagnostic des systèmes écologiques. *Bull-Ecd* , 4-17p.
- Boukrah, H. (2008). Etude comparative de l'absorption des ions plomb sur différents absorbants. *Université de 20 août 1955 Skikda* .
- Bouteraa, M. (2014). utilisation des végétaux pour l'évaluation de la pollution atmosphérique le long de l'autoroute Est-Ouest dans la région de Constantine. (*diplôme de magister*) .
- Brignon, J., Malherbe, L., & Soleille, S. (2005). Les substances dangereuses prioritaires de la directive cadre sur l'eau. *fiches de données technicoéconomiques* .

- Bruno, S. (2008). *Pollution atmosphérique: des processus à la modélisation*. Springer-Verlag France Paris.
- Carter, G., & Spiering, B. (2002). Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *environmental quality*, 31(5), 1424-1432.
- Catinon, M. A. (2011). Atmospheric inorganic contaminants and their distribution inside stem tissues of *Fraxinus excelsior*. *atmospheric environment*, 45, 1102-1109.
- Catinon, M. (2010). Détermination de la pollution atmosphérique métallique : étude critique de l'utilisation des écorces d'arbres. (*Thèse de Doctorat*) . Université Joseph-Fourier-Grenoble 1.
- Chen, Y., Wu, N., Zhang, Z.-W., Yuan, M., & Yuan, S. (2019). Perspective of monitoring heavy metals by moss visible chlorophyll fluorescence parameters. *frontiers in plant science*, 10 (35), 1-7.
- Cuny, D. (2012). la biosurveillance végétale et fongique de la pollution atmosphérique: concepts et applications. *Annales pharmaceutiques françaises*, 70 (04), 182-187. ELSEVIER MASSON.
- Delauney, A., & Verma, D. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant J*, 4, 215-223.
- Dellaa, Y. (2018). Réponses écotoxicologiques aux stress abiotiques induits par une pollution atmosphérique particulaire chez *Pinus halepensis* Mill. et *Cupressus sempervirens* L. *thèse de doctorat*.
- Déruelle, S., & Lallemand, R. (1983). *les lichens témoins de la pollution*. Imprimerie Laboureur et Cie Paris.
- El Haouzali, H. (2009). Deroulage de peuplier: effets cultivars et stations sur la qualité des produits dérivés. *Thèse de doctorat*.
- Florence, G., Pitter, S., Majid, L., & René, B. (2012). Atmospheric pollution in an urban environment by tree bark biomonitoring – Part I: Trace element analysis. *Chemosphere*, 86, 1013-1019.
- Garrec, J. P. (1996). bioindication végétale de l'ozone dans l'agglomération nancéenne durant l'été. *Pollution atmosphérique*, 87 P.
- Garrec, J. P., & Van Hallowyn, C. (2002). *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air*. Paris: Tec & Doc.
- Garty, J. (2001). Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens : theory and application. *Critical reviews in plant sciences*, 20 (4), 309-371.

- Gerard, E. (2000). Caractérisation du cadmium phytodisponible des sols par méthodes isotopiques. *Thèse de doctorat* .
- Gombert, S. (1989). *Pollution atmosphérique par les métaux lourds: biosurveillance des retombées*. EDP Sciences/ADEME.
- Hagemeyer, M. P. (1999). *Heavy Metal Stress in Plants: from molecules to ecosystems*. New York: Springer-Verlag .
- Kalonda, E. A. (2015, Décembre 31). Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées couramment dans quelques zones minières de la province du Katanga. *Journal of Applied Biosciences* 96:9049\_9054 .
- Kalonda.D, T. B. (2016). Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées dans quelques zones minières de la province du Katanga. *Journal of Applied Biosciences* .
- Khelil, R., & Alioua, A. (2006). utilisation des lichens comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique dans la région de Hassi Messaoud. *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur* , 1 (1), 29-33.
- Kouadri, L. (2020). Evaluation des métaux lourds aux moyen de la technique XRF: application à l'étude de la pollution atmosphérique. *thèse de doctorat* .
- Lenoir, T. (2011). Mécanismes de rétention du cuivre dans les sols :Evaluation statistique des approches macroscopiques et spectroscopiques. *Thèse de doctorat* .
- Louise, S. M. (2009). *La pollution de l'air intérieur: sources,effets sanitaires,ventilation*. L'usine nouvelle DuNod,Paris.
- Maatoug, M., Benchaaben, H., & Dellal, A. (2007). Détection de la pollution de l'air d'origine routières par certaines espèces végétales bioaccumulatrices de quelques métaux lourds (Pb, Zn, Cu). *POLLUTION ATMOSPHERIQUE* (196), 385-394.
- Magali.S. (2007). Spéciation du Cadmium,du Plomb et du Zinc dans les Poussières d'Emissions Atmosphériques d'Origine Sederurgique. *Thèse de Doctorat* .
- Maizi, N., Alioua, A., Tahar, A., & Semadi, F. (2010). Utilisation des végétaux inférieurs comme bio indicateurs de la pollution plombique d'origine automobile dans la région de Annaba. *Mater. Environ. Sci.* , 1 (4), 251-266.
- Mishra, M., Dash, P., Alam, A., Sahoo, S., & Das, R. (2016). Current status of diversity and distribution of bryophytes of Odisha. *Plant Sci today* (3), pp. 186-194.
- Omar, y., Maatoug, M., Ayad, N., Hachemi, A., & Amirat, M. (2015). Bioaccumulation de la pollution plombique d'origine routière au moyen d'une mousse (BRYUM ARGENTEUM) dans la ville de Tiaret. *European scientific journal* , 11, 105-120.

- Ozenda, P. (2006). *Les végétaux : organisation et diversité biologique*. Dunod.
- Parmar, T. K., Rawtani, D., & Argawal, Y. (2016). Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in life science* , pp. 110-118.
- Pédro, G. (2007). *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*. EDP Sciences .484 p.
- Prasad, M., & Hagemeyer, J. (1999). *Heavy metal stress in plants:from molecules to ecosystem*. Springer-Verlag ,BerlinheidelbergGmbh.
- Ramade, F. (2007). *Introduction à l'écotoxicologie :fondements et applications*. Lavoisier,Paris: TEC/DOC.
- Rejzkova.A, Patkova.L, Eva.S, & Helena.L. (2005). The effects of abiotic stresses on carbohydrate status of olive shoots (*olea europea L.*) under in vitro conditions. *Plant Physiology* , 174-184.
- Rusin, L. (2016). Metagenomics and biodevesity of sphagnum bogs. *molecular biology* , 50(5), 645-648.
- Rzepka, M.-A., & Cuny, D. (2008). Biosurveillance végétale et fongique des ETM atmosphériques. *Air Pur* (75), pp. 66-79.
- Sammut, M. (2007). Spéciation du cadmium,du plomb et du zinc dans les poussières d'émissions atmosphérique d'origine sidérurgique. *Thèse de Doctorat* . Université Paul Cézanne.
- Shin, E., Karthikeyan, K., & Tshabalala, M. (2007). Adsorption mechanism of cadmium on juniper bark and wood. *Bioresource Technology* , 98, 588-594.
- Staxang, B. (1969). Acidification of Bark of some deciduous trees. *Oikos* , 20 (2), 224-230p.
- Szopa, P., Ginnesea, M., & Pierce, J. (1973). Distribution of lead within xylem of trees exposed to airborne lead compounds . *wood Sci* , 72-77.
- Tizaoui, K. (2013). Elimination des métaux lourds en solution aqueuse par des argiles Algériennes. *Mémoire de magister* .
- Ui, J. (1971). Mercury in the Adriatic. *Mar Pollut Bull* , 56 (8).
- Vanderpoorten, A., & Goffinet, B. (2009). Introduction to bryophytes. *Cumbridge University Press* . Cambridge.
- Yadav, s. (2010). Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany* , 76, 167-179.

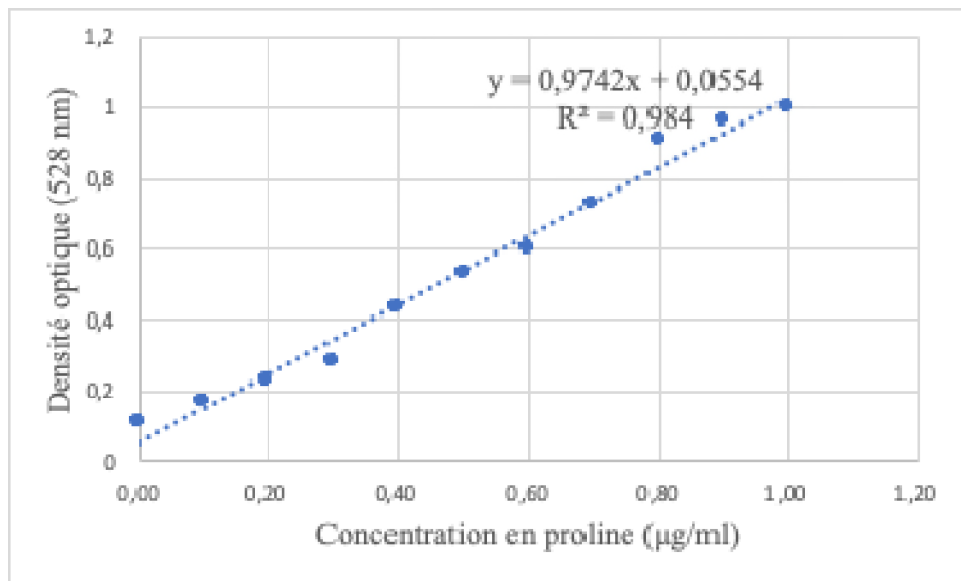
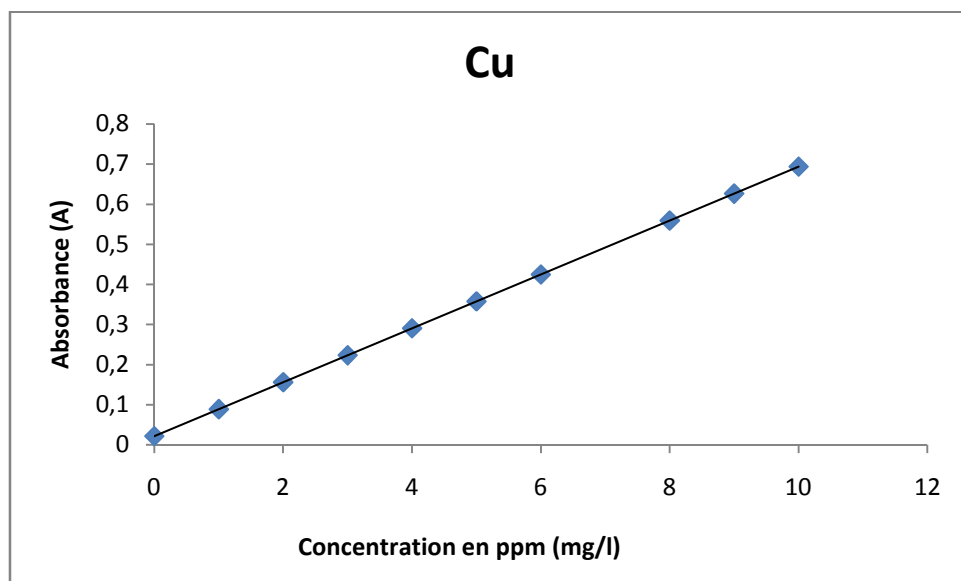
Zarco-Tejada, P., Miller, J., Mohammed, G., Noland, T., & Sampson, P. (2002). Vegetation stress detection through chlorophyll a+b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *J. Environ. Qual*, 31, 1433-1441.

Zenk, M. H. (1996). Heavy metal detoxification in higher plants. p. 22p.

## Références numériques

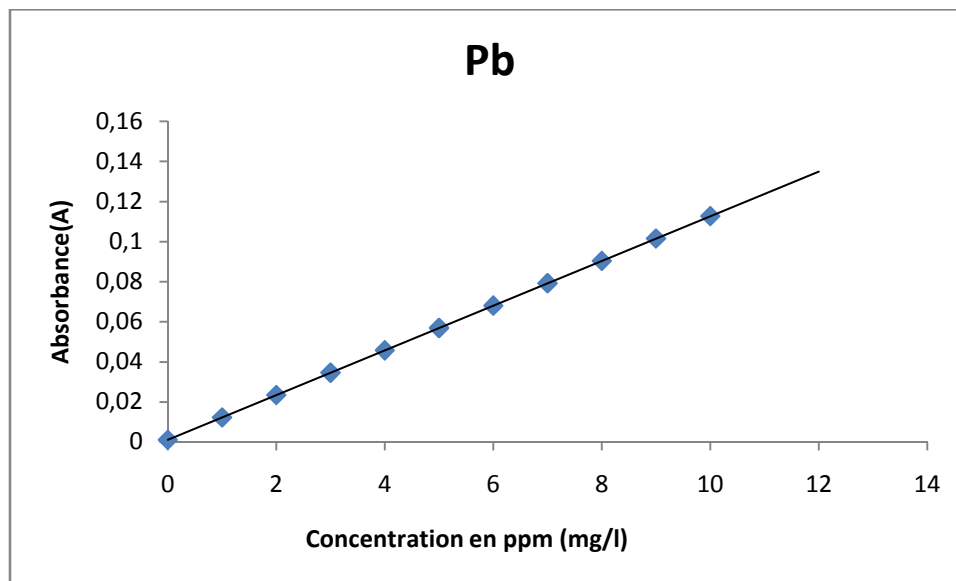
- <http://www.climatsetvoyages.com>
- <http://www.fr.weatherspark.com>

# **Annexes**

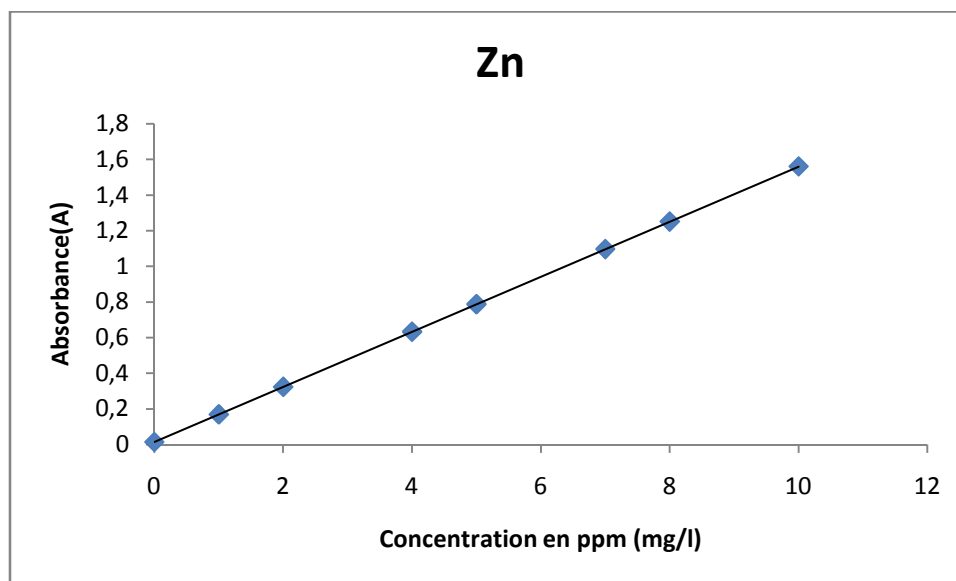
**Annexe 1 :** Courbe d'étalonnage de la proline**Annexe 2:** Courbes d'étalonnage des métaux étudiés (Cuivre, Plomb et Zinc)

Courbe d'étalonnage pour le Cuivre





Courbe d'étalonnage pour le Plomb



Courbe d'étalonnage pour le Zinc

**Annexe 3 : La chlorophylle**

	Chlorophylle (a)	Chlorophylle(b)
p-value	0.01297	0.007095
Chi-2	17.787	19.373

Tableau 1 : Test de Kruskal –Wallis de la chlorophylle

station	Station1	Station2	Station3	Station4	Station5	Station6	Station7	Station8
Chl(a)		0.02895	0.000250	0.000250	0.013166	0.016682	0.016542	0.000234
Chl(b)		0.0008	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.006	0.0005
Chl(ab)			0.0002	0.0002	0.0006	0.02		0.001

**Tableau 2 : post-hoc pour la chlorophylle**

**Annexe 4 : La proline**

	Station2	Station5	Station6	Station8
p-value	0,028	0,039	0,019	0,008

**Tableau 1 : les p- value**

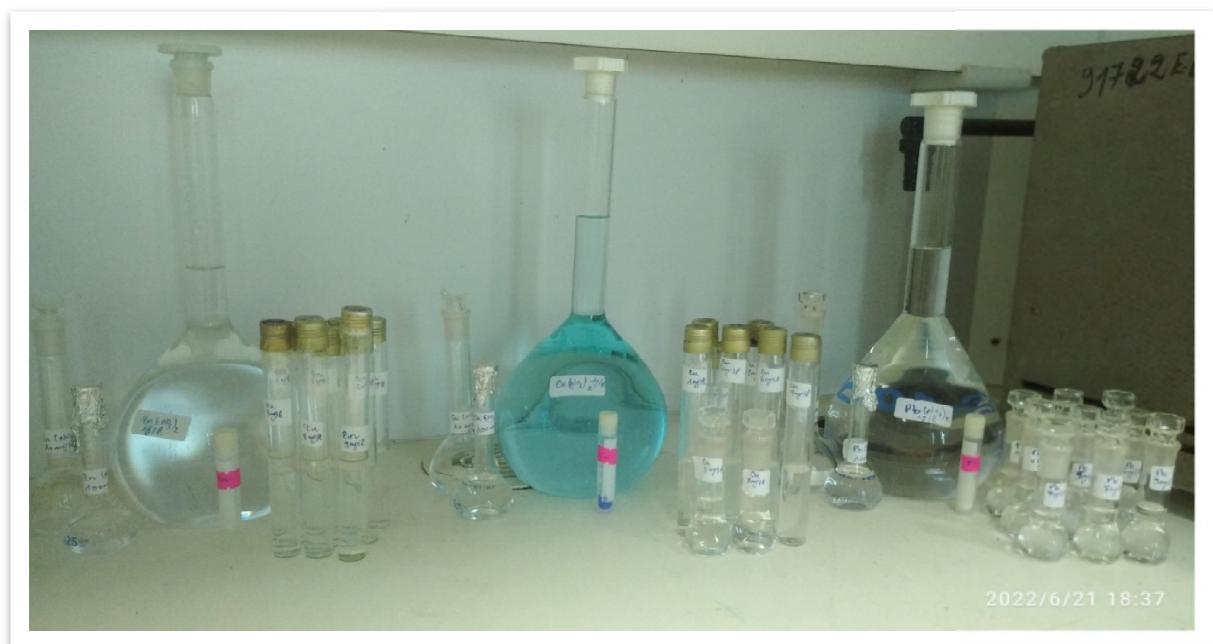
Stations	Station1	Station2	Station3	Station4	Station5	Station6	Station7	Station8
p-value	$2.2 \cdot 10^{-16}$	0.5203	0.7592	0.5288	1	0.4218	0.4412	0.3785
W	0.75	0.93822	0.98419	0.94035	1	0.91112	0.91618	0.89779

**Tableau 2 : test de shapiro (normalité)**

Bartlett		Kruskal-wallis	
X <sub>2</sub>	24.6	X <sub>2</sub>	10.379
P-value	0.0008932	P-value	0.1681

**Tableau 3 : test de Bartlett (homogénéité)**

**Annexe 5:** Photo illustrant les différentes solutions de courbes d'étalonnages préparées (prise par Nadia et Zahra, 2022)



## Annexe 6 : Exemple des résultats obtenus par le FRX (station 5 : SIDI-AHMED)

<b>E.L</b> 92,26% <small>+/-0,000%</small> Léger	<b>Al</b> 0,784% <small>+/-0,024%</small> Aluminium
<b>Si</b> 1,25% <small>+/-0,014%</small> Silicon	<b>P</b> 0,052% <small>+/-0,003%</small> Phosphorus
<b>S</b> 0,131% <small>+/-0,002%</small> Sulfur	<b>K</b> 0,304% <small>+/-0,002%</small> Potassium
<b>Ca</b> 4,66% <small>+/-0,007%</small> Calcium	<b>Ti</b> 0,037% <small>+/-0,006%</small> Titanium
<b>Mn</b> 0,012% <small>+/-0,001%</small> Manganese	<b>Fe</b> 0,349% <small>+/-0,005%</small> Iron
<b>Cu</b> 0,081% <small>+/-0,002%</small> Copper	<b>Zn</b> 0,066% <small>+/-0,001%</small> Zinc
<b>Rb</b> 0,001% <small>+/-0,000%</small> Rubidium	<b>Sr</b> 0,012% <small>+/-0,000%</small> Strontium
<b>Pb</b> 0,003% <small>+/-0,000%</small> Lead	

## Annexe 7 : Matrice de corrélation

Proline	1.09	2.05	1.65	1.90	2.09	2.11	1.75	2.30
Chl(a)	19.96	33.35	14.33	14.63	22.11	22.44	22.43	14.68
Chl(b)	30.35	15.80	10.32	8.23	5.85	12.92	18.61	15
Chl(ab)	50.31	49.14	24.65	22.86	27.95	35.36	41.04	29.68
PMF	0.07	0.08	0.04	0.11	0.09	0.06	0.03	0.03
Cu	0	0.04	0.09	3.45	3.96	0.08	0	0.77
Pb	0	0.11	0	0.07	0.27	0.52	0.01	0.08
Zn	1.05	3.23	2.64	2.35	0.77	1.55	0.50	0.88

## Résumé

La bio-surveillance complète les méthodes de mesures automatiques dans les régions où la qualité de l'air est surveillée continuellement par des stations de mesures et dans les régions dépourvues de ces équipements, L'objectif de notre travail est d'estimer et d'évaluer la qualité de l'air dans la zone urbaine de Bejaïa qui est dépourvue de tout appareil de mesure de la pollution atmosphérique, en utilisant les écorces de peuplier comme bio-indicateur.

Pour atteindre notre but, nous avons suivi l'approche passive de bio-surveillance végétale, nous avons choisi huit stations à travers la ville de Bejaïa pour effectué notre échantillonnage d'écorce d'arbre pour déterminer le taux des métaux lourds : le plomb, zinc et le cuivre, qui y sont accumulés par la spectrophotométrie d'absorption atomique et la spectrométrie de fluorescence X. En parallèle et pour chaque station, nous avons pris trois prélèvements de feuilles des mêmes arbres pour doser les paramètres physiologique (la chlorophylle et la proline). Ceci est dans le but d'estimer l'effet de la pollution atmosphérique métallique sur ces derniers.

Les résultats obtenus révèlent des teneurs en zinc, Plomb et Cuivre de l'ordre de (6,30 mg/l), (0,5mg/l) et (3,96mg/l) respectivement, qui sont inférieure aux normes internationales. Le test ACP montre une corrélation positive entre (proline, PMF, Zn, Pb et Cu) et une corrélation négative avec la chlorophylle Tous les paramètres ont montré une variation similaire entre les différentes stations, ce qui est expliqué par leur même nature urbaine.

**Mots clés :** pollution atmosphérique, bio-surveillance, qualité de l'air, bio-indication, métaux lourds, accumulation.

## Abstract

Bio-monitoring complements automatic measurement methods in areas where air quality is continuously monitored by measurement stations and in areas without such equipment. The objective of our work is to estimate and evaluate the air quality in the urban area of Bejaïa, which is devoid of any air pollution measurement equipment, using poplar bark as a bio-indicator.

To achieve our goal, we followed the passive approach of plant biomonitoring, we chose eight stations across the city of Bejaïa to carry out our sampling of tree bark to determine the level of heavy metals: lead, zinc and copper, which are accumulated there by atomic absorption spectrophotometry and X-ray fluorescence spectrometry. In parallel and for each station, we took three samples of leaves of the same trees to determine the physiological parameters (chlorophyll and proline). This is done in order to estimate the effect of metallic air pollution on them.

The results obtained reveal zinc, lead and copper contents of the order of (6.30 mg/l), (0.5mg/l) and (3.96mg/l) respectively, which are lower than the international standards. The PCA test shows a positive correlation between (proline, PMF, Zn, Pb and Cu) and a negative correlation with chlorophyll

All the parameters showed a similar variation between the different stations, which is explained by their same urban nature.

**Keywords:** air pollution, biomonitoring, air quality, bio-indication, heavy metals, accumulation.

## ملخص

تكمّل المراقبة الحيوية طرق القياس الأوتوماتيكية في المناطق التي يتم فيها مراقبة جودة الهواء بشكل مستمر من قبل محطات القياس وفي المناطق التي لا توجد بها مثل هذه المعدات. والهدف من عملنا هو تقدير وتقييم جودة الهواء في منطقة بجاية الحضرية الخالية من أي جهاز لقياس التلوث الجوي ، باستخدام لحاء الحور كمؤشر بيولوجي.

لتحقيق هدفنا ، اتبعنا النهج السلبي للمراقبة الحيوية للنبات ، اخترنا ثماني محطات في جميع أنحاء مدينة بجاية لإجراء أخذ عينات من لحاء الشجر لتحديد مستوى المعادن الثقيلة: الرصاص والزنك والنحاس ، والتي يتم تراكمها هناك عن طريق القياس الطيفي للامتصاص الذري وقياس الطيف الفلوري للأشعة السينية وبالتوازي ولكل محطة أخذنا ثلاث عينات من الأوراق من نفس الأشجار لقياس المعلمات الفسيولوجية (البيخضورو البرولين). هذا في هدف تقدير تأثير تلوث الهواء المعدني عليها.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها محتوى الزنك والرصاص والنحاس بحوالي (6.30 مجم / لتر) و (0.5 مجم / لتر) و (3.96 مجم / لتر) على التوالي ، وهي أقل من المعايير الدولية. يُظهر اختبار تفاعل المتسلسل لتحليل المكونات الرئيسية ارتباطًا إيجابيًا بين (البرولين ، PMF ، الزنك ، الرصاص والنحاس) وعلاقة سلبية مع الكلوروفيل أظهرت جميع المعلمات تباينًا مشابهًا بين المحطات المختلفة، وهو ما يفسر بنفس طبيعتها الحضرية.

**الكلمات المفتاحية:** تلوث الهواء ، المراقبة الحيوية ، جودة الهواء ، المؤشرات الحيوية ، المعادن الثقيلة ، التراكم.