

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

**Bioaccumulation des HAP
atmosphérique par le chou frisé à Bejaïa**

Présenté par :

AZZOUG Yousra & MERZOUG Anissa

Soutenu le : 13/09/2023

Devant le jury composé de :

Mme. Chelli-Tabti D.
Mme. BENAÏSSA F.
Melle. DIAFA.

MCB
MCA
MCB

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2022/2023

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

**Bioaccumulation des HAP
atmosphérique par le chou frisé à Bejaïa**

Présenté par :

AZZOUG Yousra & MERZOUG Anissa

Soutenu le : 13/09/2023

Devant le jury composé de :

Mme. Chelli-Tabti D.
Mme. BENAÏSSA F.
Melle. DIAFA.

MCB
MCA
MCB

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout Puissant et Miséricordieux de nous avoir donné la santé, la patience et la volonté pour réaliser ce mémoire.

À l'heure où nous apportons la touche finale à ce mémoire, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de réaliser ce Mémoire:

Nos chaleureux remerciements à notre promotrice de mémoire, madame Benaïssa Fatima (Enseignante à l'université de Béjaïa) pour ses précieux conseils et orientations qu'elle nous a prodigué tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à :

- ❖ Madame Chelli-Tabti Dalila, enseignante à l'université de Béjaïa, de nous avoir honoré et avoir accepté de présider et d'examiner notre travail. Nous le remercions de nous avoir accordé de son précieux temps
- ❖ Madame Diaf Assia, enseignante à l'université de Béjaïa, d'avoir accepté d'examiner notre travail ainsi que pour son soutien moral.

Nous remercions infiniment le responsable de la pépinière (SNC maison de l'agriculture ZIZI et CIE) monsieur (Benalloua Omar) pour sa gentillesse et sa patience avec nous.

Nous remercions aussi tous les directeurs des primaires; Boukhiam (Chahid Amiri Hocine), Ighil Ouazoug (Bouaakaz), Iheddaden, Gare routière (Chahid Boucherba Slimane), Centre-ville (Khaldounia), Sidi Ahmed (Chouhada Ouzbiha), Daouadji (Chouhada Ouarouf) et Aamriw (Boulahoune Mohand) et le directeur de SEM Port (Ibn Toumert) pour avoir accepté de poser nos échantillons dans leurs établissements respectifs et de mettre à notre disposition le matériel nécessaire pour garder et suivre nos pots.

Merci à madame Bourfis Nassima et madame Ferhoume Fatiha, enseignantes à l'université de Bouira, pour leur suivi au niveau de laboratoire pédagogique de la faculté SNV à Bouira.

Merci à madame Haddadou Louiza, doctorante au laboratoire 3BS de l'université de Béjaïa, pour sa collaboration et sa gentillesse

Nos remerciements les plus sincères sont adressés à nos enseignants, qui ont contribué à notre formation à l'université de Béjaïa et à la grande famille de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents Hachemi et Bedjaoui Saliha

A mes grandes mères et mes grands pères

A mes chers frères Sofiane et Rédha

A mes chers sœurs Samia, Souad et Ikram

Aux petits anges de la famille Anfel et Djaouad

A ma cher camarade AZZOUQ YOUSRA

A toutes ma famille, mes proches et mes chers amis

ANISSA MERZOUQ

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que aujourd'hui ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation :

À la femme qui nous a donné son amour et sa vie sans contrepartie et qui m'a encouragé. à toi, ma chère mère Djamaa, je regrette profondément que tu sois décédée si rapidement avant d'avoir pu bénéficier des fruits de ton travail investi en nous. Pour tu sois fier de moi. Que Dieu vous fasse parmi les gens du Paradis, que Dieu vous fasse miséricorde.

A mon très cher père Chaaban Azzoug

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension. Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A mon cher frère Youssef

À tous les moments d'enfance que j'ai passés avec toi, mon frère. Que Dieu vous fasse parmi les gens du Paradis, que Dieu vous fasse miséricorde.

A mes belles sœurs Sabiha, Naima, Souad, Afafe et leurs maris, nous espérons que nos liens fraternels se renforceront et perdureront encore.

À mes nièces et neveux dieu vous protège

Amacher binôme Anissa Merzoug

A mes proches amies vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble

Yousra Azzoug

Sommaire

Remerciements
Dédicace
Liste des abréviations
Liste des figures
Liste des tableaux

Introduction	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	3
I. Pollution atmosphérique	3
I.1. Définition de pollution atmosphérique.....	3
I.2. Différentes échelles de la pollution	3
I.3. Facteurs intervenant dans la dispersion des polluants.....	4
I.4. Source de la pollution atmosphérique	6
I.5. Principaux polluants	7
I.6. Types des polluants atmosphériques	8
II. Pollution atmosphérique par les HAP	8
II.1. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	8
II.2. Propriétés physico-chimiques des HAP	8
II. 3. Sources des HAP.....	9
II.4. Dispersion des HAP dans l'environnement	10
II.5. Toxicité des HAP	11
II.6. Relations entre les HAP et les particules en suspension (PM)	12
II.7. Extraction des HAP.....	12
III. Biosurveillance de la qualité de l'air	15
III.1. Définition la biosurveillance.....	15
III.2. Concepts de la biosurveillance	15
III.3. Stratégies de la biosurveillance	17
III.4. Biosurveillance végétale des HAP atmosphériques	18
III.5. Biosurveillance par les plantes supérieures	19
Chapitre II:Matériel et Méthodes	20
1. Description de la zone d'étude	20
1.1. Situation Géographique	20
1.2. Relief	20

1.3. Climat	21
1.4. Facteurs climatiques	21
2. Matériel biologique/ Chou frisé (<i>Brassica oleracea</i>)	22
3. Sites d'échantillonnage	25
4. Préparation des échantillons	27
6. Analyse statistique	36
Chapitre III :Résultats et Discussion	37
I. Paramètres de pollution.....	36
I.1. Evaluation de l'accumulation des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) par <i>Brassica oleracea</i>	36
I.2. Evaluation de l'accumulation des poussières (PM) par <i>Brassica oleracea</i>	37
II. Paramètres physiologiques	38
2.2. Dosage de la proline	42
III. Analyse encomposante principale (ACP).....	43
IV. Discussion.....	45
Conclusion.....	48
Bibliographie	Erreur ! Signet non défini.
Annexes	59
Résumé	63

Chl : Chlorophylle

CO : Monoxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatiles

HAP : Hydrocarbures Aromatiques polycycliques

MAE : Extraction assistée par microondes

MASE : Extraction par solvant assistée par membrane

Max : Valeur maximale

MF : Matière Fraiche

Min : Valeur minimale

NAP : Naphtalène

NO₂:Dioxyde d'azote

NO_x: Oxydes d'azote

PM : Matière Particulaire

Pro: Proline

PYR: Pyrène

SFE: Extraction par fluide supercritique

SO₂ : Dioxyde de soufre

SPE: Extraction sur phase solide

USEPA: Agence de protection de l'environnement des Etats Unis

Figure 1. Différentes échelles de pollution atmosphérique	4
Figure 2. Présentation des 16 HAP classés prioritaires par l'USEPA.....	10
Figure 3. Localisation des stations d'échantillonnage au niveau de Béjaïa ville (Google Earth).....	26
Figure 4. Illustration représente le développement de la plante pendant un mois	27
Figure 5. Schéma de protocole expérimental pour l'extraction des HAP par Soxhlet.....	29
Figure 6. Extraction des HAP par l'appareil Soxhlet (model : behrotest).....	29
Figure 7. Schéma de protocole expérimental pour le dosage des poussières accumulées sur les surfaces foliaire.....	30
Figure 8. Extraction de la poussière et de cire de <i>Brassica oleracea</i> par chloroforme.....	31
Figure 9. Schéma de protocole expérimental de dosage de la chlorophylle.....	32
Figure 10. Extrait de la chlorophylle de <i>Brassica oleracea</i>	33
Figure 11. Protocole expérimental pour le dosage de la proline.....	33
Figure 12. Séparation des deux phases : inférieure contenant la proline et supérieure dépourvu d'elle.....	34
Figure 13. Variation des concentrations moyennes des HAP (ng/g MF) accumulés par le chou frisé (<i>Brassica oleracea</i>) en fonction des stations dans la ville de Béjaïa.....	36
Figure 14. Variations des concentrations moyennes des poussières (PM) en ($\mu\text{g/g}$ MF) accumulés par <i>Brassica oleracea</i> en fonction des stations dans la région de Béjaïa ville....	38
Figure 15. Variation des concentrations moyennes de la chlorophylle a ($\mu\text{g/g}$ MF) en fonction des stations d'échantillon chez <i>Brassica oleracea</i> dans la région de Béjaïa ville.	39
Figure 16. Variation des concentrations moyennes de la chlorophylle b ($\mu\text{g/g}$ MF) en fonction des stations d'échantillonnage chez <i>Brassica oleracea</i> dans la ville de Béjaïa.	40
Figure 17. Variation des concentrations moyennes de chlorophylle ab ($\mu\text{g/g}$ MF) accumulés par le chou frisé (<i>Brassica oleracea</i>) en fonction des stations dans la région de la ville Béjaïa	42
Figure 18. Variation des concentrations moyennes de proline ($\mu\text{g/g}$ MF) accumulés par le chou frisé (<i>Brassica oleracea</i>) en fonction des stations dans la ville de Béjaïa	43
Figure 19. Cercle de corrélation des polluants atmosphériques (HAP et PM) avec les paramètres physiologiques (proline et chlorophylle a ; b et ab) mesurés sur le chou frisé (<i>Brassica oleracea</i>) dans la région de Béjaïa ville.....	44
Figure 20. Distribution des individus de l'ACP	45

Tableau 1. Principaux polluants atmosphériques : origines et effets.....	07
Tableau 2. Comparaison des techniques d'extraction	14
Tableau 3. Avantages et limites de la biosurveillance active et passive	18
Tableau 4. Températures minimales, maximales et mensuelles moyennes exprimées en degrés Celsius (°C) dans la localité de Bejaia (station sise à l'aéroport)	21
Tableau 5. Précipitations mensuelles (P) de la région de Bejaïa durant la période 2008-2018.	22
Tableau 6. Composition nutritionnelle du chou par 100g de partie comestible.....	24
Tableau 7. Stations choisies pour l'étude.....	25
Tableau 8. Corrélacion des paramètres mesurés avec les deux axes de cercle de corrélacion	44

Introduction

La pollution atmosphérique est devenue en quelques décennies un des problèmes majeurs de notre société. Par la nature et l'étendue de son impact, le rejet d'un grand nombre de polluants dans l'atmosphère représente une grave menace pour la santé humaine mais aussi elle touche tout l'écosystème (l'air, le sol, les végétaux et l'eau) (**Gérinet al., 2003**). Les changements de la composition atmosphérique observés aujourd'hui et induits par l'activité humaine sont rapides puisqu'ils ont été initiés par l'avènement de l'ère industrielle (**Giec, 2001**).

En Algérie et selon le ministère de l'Environnement (2010), le secteur des transports occupe le premier rang en termes d'émissions des polluants atmosphériques avec 51 %, suivi de l'industrie avec 47,25 % (**Abdeldjouad, 2014**). La plupart des polluants sont liés directement ou indirectement au trafic automobile (**Aouragh, 2015**).

On retrouve les polluants dans l'atmosphère sous différentes formes particulière ou gazeuse, organiques (Polluants organiques persistants (POP), La polychlorobiphényles(PCB) et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ou inorganiques (les métaux)(**Fernández et al., 2005**).

Parmi les composés toxiques majoritairement issus de l'activité humaine, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ont trouvé une place privilégiée dans la problématique de la pollution de l'air. Ils font partie des Polluants Organiques Persistants (POP). Les HAP occupent une place centrale par leurs propriétés cancérigènes et mutagènes (**Abdel-Shafy et al., 2015**).

Les HAP peuvent être formés naturellement par des réactions à basse température et à haute pression de la matière organique et constituent dans ce cas des hydrocarbures de pétrole (**Joner et al., 2004**). Les HAP d'origine atmosphérique se retrouvent partout dans le sol et les végétaux et peuvent contaminer les animaux et les hommes par transfert dans la chaîne alimentaire (**Srogi, 2007**).

Les mesures des émissions atmosphériques des HAP nécessitent un échantillonnage à long terme sur un grand nombre de sites d'échantillonnage. De telles mesures utilisant des équipements techniques ont été peu nombreuses, principalement en raison des coûts élevés et du manque de techniques suffisamment sensibles (**Puckett, 1988**).

Au fil des années, la biosurveillance s'imposé comme un complément intéressant des techniques traditionnelles de mesure de la qualité de l'air (**Benard et al., 2004**). Depuis les premières études biologiques sur la qualité de l'air (**Swieboda et Kalembe, 1978**), plusieurs

végétaux sensibles ont été développés pour la surveillance de divers polluants : dioxyde de soufre (SO₂) par les lichens (**Hawksworth et Rose, 1970**), Ozone (O₃) par le tabac (**Garrec et Livertoux, 1997**), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par le chou (**Kipopoulou et al., 1999**).

L'utilisation des bioindicateurs, bio accumulateurs et certains végétaux supérieurs, peut fournir des indications très intéressantes quant à la qualité et les caractéristiques du milieu naturel. Ils permettent également de mettre en évidence, aussi précocement que possible, les modifications naturelles ou provoquées (**Blandin., 1986**).

Dans ce contexte et dans le cadre de ce mémoire de master, nous avons choisi le chou frisé (*Brassica oleracea*) qui est parmi les végétaux supérieurs bioindicateurs de la qualité de l'air, pour l'utiliser pour la première fois dans la ville de Béjaïa, comme bioaccumulateur des HAP atmosphériques.

En plus de l'objectif principal qui est de mesurer les concentrations des HAP accumulés par *Brassica oleracea* dans la ville de Béjaïa, les autres objectifs de cette étude sont de contribuer à une meilleure connaissance :

- ✓ de l'état des lieux par la quantification des poussières déposées sur les feuilles de l'espèce choisie (*Brassica oleracea*).
- ✓ l'estimation de la teneur en paramètres physiologiques et morphologiques pour les entreprendre comme indicateurs de pollution atmosphérique.

Ces objectifs sont développés dans ce mémoire qui s'articule en trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre a été consacré à une "**synthèse bibliographique**" qui vise à donner un aperçu sur la pollution atmosphérique par les hydrocarbures et leurs effets, suivie d'une étude sur la généralité sur la biosurveillance végétale.
- ❖ Le deuxième chapitre "**Matériel et Méthodes**", nous présenterons dans un premier temps la zone d'étude tout en précisant le choix des sites d'échantillonnage et dans un autre temps le protocole expérimental globale avec toutes les techniques analytiques utilisées dans cette étude.
- ❖ Le troisième chapitre "**Résultats et discussion**" s'attache aux résultats avec leurs traitements statistiques obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I.

Synthèse bibliographique

I. Pollution atmosphérique

I.1. Définition de la pollution atmosphérique

Définition selon la communauté économique européenne en 1967 : la pollution de l'air existe quand « la présence d'une substance étrangère, ou une variation importante dans la proportion de ses constituants, est susceptible de provoquer un effet nuisible ou de créer une gêne (Quénel et al., 2003).

L'autre définition selon la loi française sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 30 décembre 1996 : " C'est l'introduction par l'homme, directement ou indirectement dans l'atmosphère et les clos, de substance ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, et à provoquer des nuisances olfactives excessives" (Elichegaray, 2008).

Selon le journal officiel de la loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable en Algérie, la pollution atmosphérique est définie comme "une introduction de toute substance dans l'air ou l'atmosphère provoquée par l'émanation de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides susceptibles de porter préjudice ou de créer des risques au cadre de vie" (Journal officiel Algérien , 2003).

I.2. Différentes échelles de la pollution

Du fait de leur dispersion par les vents et des processus physicochimiques auxquels les polluants sont soumis, la pollution atmosphérique n'a pas de frontières (Philippe, 2004). Ainsi trois types d'échelle sont couramment distingués: Échelle local, échelle régionale et échelle globale.

Il n'existe pas vraiment de délimitation nette entre ces échelles car il existe un lien d'engendrement entre elles (fig.01). Par conséquent, cette classification reste relative mais utile pour la connaissance des priorités, pour le choix des méthodes, pour la modélisation et l'appréciation des résultats (Anthony, 2003).

I.2.1. Échelle locale

L'échelle locale ou pollution de proximité ; concerne les zones qui se situent à proximité des sources (industriels, automobile, chauffage...) et est engendrée par les activités humaines (Philippe, 2004). L'impact des divers polluants est direct sur la santé des hommes et des animaux, sur la végétation et sur les matériaux. (Pison, 2005). La procédure courante

d'observation à cette échelle repose sur des échantillonnages au niveau du sol par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air (Anthony, 2003).

I.2.2. Échelle régionale

La pollution à l'échelle régionale est la pollution à moyenne ou à longue distance. Elle concerne les zones où des phénomènes secondaires apparaissent, tels que les pluies acides ayant un impact non négligeable sur les forêts, les écosystèmes aquatiques ou la production d'ozone dans les basses couches atmosphériques, pollution photochimique (Duché, 2014).

I.2.3. Échelle globale

À cette échelle, les études s'intéressent à de très vastes régions où les effets des polluants les plus stables chimiquement agissent sur l'ensemble de la planète : diminution de la couche d'ozone à haute altitude ou encore augmentation de l'effet de serre qui pourrait provoquer des changements climatiques importants (Anthony, 2003).

À cette échelle, le lieu d'émission importe peu : tous les composés émis vont s'accumuler dans l'atmosphère et y persister pendant plusieurs dizaines voire centaines d'années en participant aux impacts planétaires (Lacour, 2009).

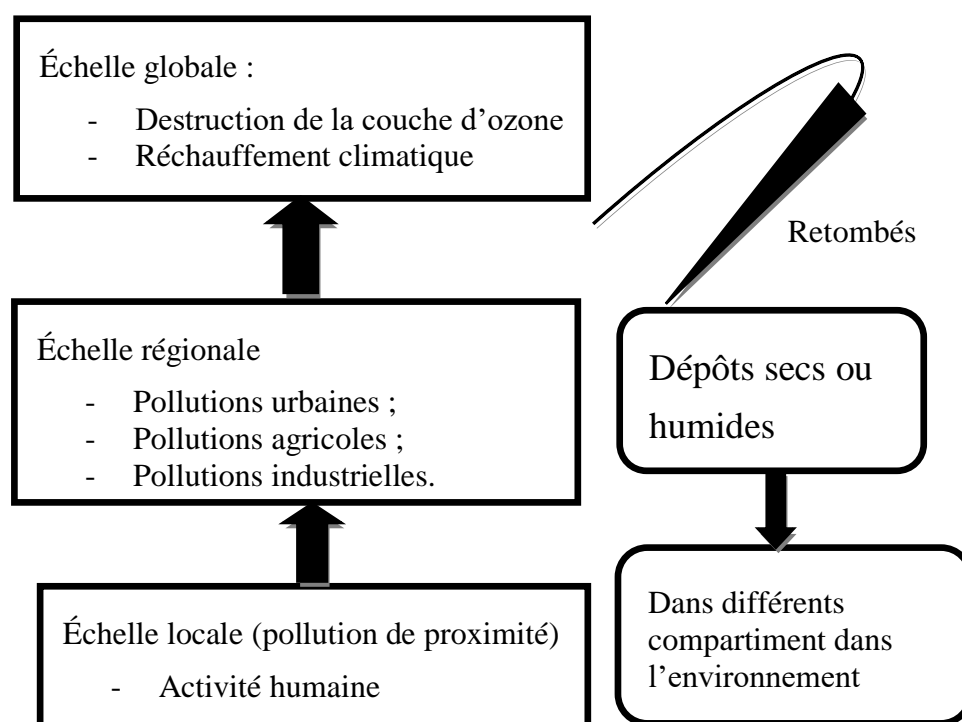


Figure 01. Différentes échelles de pollution atmosphérique

I.3. Facteurs intervenant dans la dispersion des polluants

La dispersion des polluants dans l'atmosphère peut être influencée par des facteurs météorologiques ainsi que des facteurs topographiques (Guelle et Emmanuel, 1998).

I.3.1. Facteurs météorologiques

Les mouvements atmosphériques contribuent à la dispersion des polluants. La météorologie est donc un paramètre qui influence fortement la qualité de l'air par plusieurs facteurs (vent ; température ; humidité ; précipitations) (**Diaf et al., 2003**).

I.3.1.1. Vent

Le vent est un facteur de transport des polluants. Il est responsable de leur dispersion horizontale. Sa vitesse augmente généralement avec l'altitude, plus le vent est fort, plus le niveau de pollution dans la ville est faible, le balayage des émissions est important. En revanche, le vent léger favorise l'accumulation locale des polluants (**Maizi, 2006**).

I.3.1.2. Température

Le gradient vertical de température est utilisé pour définir la stabilité de l'atmosphère. Si la température décroît trop rapidement, l'atmosphère est instable, ce qui favorise la dispersion des polluants (**Malbreil, 1997**).

I.3.1.3. Précipitations

Ce facteur météorologique est bénéfique pour l'abaissement des niveaux de pollution. Elles contribuent à abaisser le niveau de pollution grâce aux gouttes d'eau qui captent les impuretés atmosphériques (**Popescu, 1998**). Les pluies plaquent les particules au sol et peuvent dissoudre certains polluants. Elles contribuent au lavage ou lessivage de l'air (**Viala, 1998**).

I.3.1.4. Humidité

La présence de vapeurs d'eau dans l'atmosphère est considérée comme un facteur favorable qui joue un rôle clé dans la formation de certains polluants comme l'acide sulfurique et leur élimination (dépôts humides) (**Malbreil, 1997**).

I.3.2. Facteurs topographiques

Il s'agit d'obstacles (relief, les constructions) qui modifient le régime des vents. La direction des vents sera déviée autour des obstacles. Le vent pourra suivre des trajectoires préférentielles (Vallée...). La vitesse aussi est modifiée (plus élevée au sommet des ondulations du terrain et plus faible au fond de celles-ci) (**Guelle et Emmanuel, 1998**).

I.4. Source de la pollution atmosphérique

Les sources principales de pollution de l'air sont réparties en sources naturelles et en sources anthropiques (dues aux activités humaines). Les origines et les effets des polluants sont indiqués dans le (tab.01).

I.4.1. Sources naturelles

Selon (**Xavier, 2018**), les sources naturelles proviennent de l'abrasion des sols (érosion), des embruns marins, des éruptions volcaniques, des feux de forêt et de processus biologiques. L'activité volcanique libère de grandes quantités de cendres, de soufre et d'oxydes de carbone dans l'air (**D'Amato et al., 2016**).

I.4.2. Sources anthropiques

Les polluants trouvés dans l'atmosphère dérivent de sources anthropiques multiples qu'on a regroupé en deux principales sources : sources fixes et sources mobiles (**Manisalidis et al., 2020**).

I.4.2.1. Trafic routier

Le trafic routier est constamment considéré comme une source majeure et souvent la source principale de pollution atmosphérique dans les villes, soit sous la forme de poussière routière ou de polluants émis par les moteurs à combustion (**Environmental Protection Agency 2011**) (**Tétreault, 2016**).

Parmi les polluants engendrés directement par l'automobile ou ceux qui y sont dérivés après réaction chimique dans l'atmosphère on trouve : CO₂, CO, NO_x, O₃, O₂, NH₃, N₂O, PM, COV et métaux (plomb, cadmium, zinc...) (**Shorhani, 2014**).

I.4.2.2. Source fixe

Les polluants des sources fixes proviennent des chaudières industrielles, du chauffage domestiques, des bâtiments et de centrales thermiques. Ces sources donnent naissance à des polluants très variés, tant en nature qu'en proportion (**Manisalidis et al., 2020**).

En plus de ces sources, il existe également des sources agricoles responsables de la libération de nombreux polluants dans l'air, notamment en raison de l'application d'engrais chimiques et de pesticides (**Shorhani, 2014**).

I.5. Principaux polluants

Selon leur processus de formation, les polluants atmosphériques sont divisés en deux catégories : les polluants primaires ; les polluants secondaires (**Plocoste, 2013**).

I.5.1. Polluants primaires

Les polluants primaires sont des polluants directement issus des sources de pollution. Pourtant certains d'entre eux comme le dioxyde d'azote (NO_2) peuvent procéder par réactions chimiques. Parmi ces différents polluants: les oxydes d'azote (NO_x) ; le dioxyde de soufre (SO_2) ; le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) ; les particules en suspension. Les origines et les effets de ces polluants indiqués dans le (tab.01).

I.5.2. Polluants secondaires

Ce sont des polluants qui se forment par réaction chimique entre polluants primaires dans l'atmosphère. Le polluant le plus célèbre et le plus toxique est l'ozone troposphérique O_3 . Les origines et les effets de chaque polluant sont indiqués dans le (tab.01).

Tableau 1. Principaux polluants atmosphériques : origines et effets

Polluant	Origine	Pollutions générées	Effets sur la santé	Effet sur l'environnement
Monoxyde de carbone (CO)	Combustion incomplète des combustibles et carburants, transport	contribue essentiellement à la formation de l'ozone	se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang. Intoxication à fortes teneurs	Participe au mécanisme de formation de l'ozone troposphérique
Oxydes d'azote (NOx)	Industrie, proviennent des véhicules et toute forme de combustion	interviennent dans la formation d'ozone. Ils contribuent au phénomène des pluies acides	pénètrent dans des voies respiratoires.	précurseur d'ozone troposphérique, pluies acides, dérive de l'effet de serre, destruction de la couche d'ozone
dioxyde de soufre (SO2)	combustion de combustibles fossiles contenant du soufre, du fioul et du charbon	contribue des pluies acides et à la dégradation des pierres et des matériaux	Irritations des muqueuses de la peau et de voie respiratoire (toux et gêne respiratoire)	dégradation des matériaux. Contribue des pluies acides peut avoir des effets néfastes sur la végétation des sols.
Composés organiques volatils (COV)	d'hydrocarbures (automobiles...), des composés organiques (combustion incomplète..), des solvants (peinture...)	formation d'ozone dans la basse atmosphère	irritation et à une diminution de la capacité respiratoire, mutagènes et cancérigènes (benzène et toluène)	formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique
Particules en Suspension	Combustion, chauffage, incinération, véhicules....	transporter des composés toxiques dans les voies respiratoires (sulfates, métaux, hydrocarbures,...).	irriter les voies respiratoires. mutagènes et cancérogènes: c'est le cas de HAP	Contribuent aux salissures sur les bâtiments. provoquer une réduction de la croissance et des nécroses chez les végétaux.
Ozone (O ₃)	polluant secondaire. formé indirectement par l'action de soleil (UV)		irritations oculaires, céphalées, problèmes ORL	perturber la photosynthèse. dégradation des matériaux. contribue l'effet de serre.

I.6. Types des polluants atmosphériques

I.6.1. Polluants organiques

Les composés organiques sont principalement caractérisés par des molécules contenant du carbone, de l'hydrogène et d'autres éléments appelés hétéroatomes (oxygène, azote, soufre, phosphore, chlore, etc.) (Jullien, 2014).

La présence d'hétéroatomes au sein de groupes aux propriétés physico-chimiques spécifiques confère aux substances organiques des fonctions spécifiques et permet de les regrouper en familles (Hydrocarbures aliphatiques (alcanes, alcènes), les hydrocarbures aromatiques monocycliques (benzène, toluène, xylène), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Hydrocarbures halogénés (solvants chlorés, chlorobenzène, PCB, etc.) et les hydrocarbures oxygénés (acides, esters, aldéhydes, alcools) ... (Jullien, 2014).

I.6.2. Polluants inorganiques

Les minéraux formés de tous les éléments chimiques (environ une centaine), bien qu'ils soient divers, ne forment qu'un nombre beaucoup plus limité de composés, et leur poids moléculaire est encore limité. Ces composés peuvent être divisés en deux groupes selon leur polarité :

- Anions polaires négatifs, principalement : chlorure, phosphate, cyanure...
- Les cations polarisés positivement, aujourd'hui souvent assimilés aux familles de métaux lourds comme le plomb, le mercure, le cadmium (Jullien, 2014).

II. Pollution atmosphérique par les HAP

II.1. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les HAP sont des composés chimiques constitués d'un ensemble de carbone et d'hydrogène, qui comprend plusieurs cycles benzéniques (noyaux aromatiques). Ce sont émis par les processus de combustion incomplète de la matière organique. Ces composés sont étudiés en raison de leurs propriétés, leur toxicité et leur persistance dans l'environnement. Ils sont détectés dans tous les compartiments environnementaux (Golly, 2014).

II.2. Propriétés physico-chimiques des HAP

Les propriétés physico-chimiques de ces molécules organiques, dictent leur comportement et leur distribution dans l'environnement (Cresbo, 2009). Les HAP sont des composés non polaire, hydrophobes, stables, persistants et ayant une faible volatilité. Ces tendances s'accroissent lorsque la masse molaire augmente (Cincinelli et al., 2003).

Les propriétés physico-chimiques des HAP varient selon leur poids moléculaire et selon l'arrangement stérique des cycles aromatiques. Ils sont classés schématiquement en HAP légers (< 4 cycles), en HAP intermédiaires (4 cycles) et en HAP lourds (> 4 cycles). En général, leur solubilité et leur volatilité diminuent, tandis que leur hydrophobicité augmente avec leur poids moléculaire. Les HAP plus lourds sont peu ou très peu volatils : ces composés sont donc plus sorbes sur les particules atmosphériques (**Dabestani, 1999**).

Parmi ces HAP, 16 sont couramment analysés dans les différentes composantes de l'environnement, selon les recommandations de l'Agence Américaine de l'Environnement (US EPA) (Fig.2).

II. 3. Sources des HAP

Les sources des HAP sont caractérisées par des processus de combustion incomplète des matières organiques. Elles sont soit des sources anthropiques (industrielles, domestiques, mobiles), soit des sources naturelles.

II. 3.1. Sources industrielles

Les principales activités industrielles émettant des HAP sont : la production d'aluminium (électrolyse à haute température de l'alumine, extraite de la bauxite) ; les activités liées à l'utilisation du charbon et du pétrole, au traitement du bois, à l'incinération des déchets, les cimenteries, métallurgies et aciéries et toute forme d'industries liées à la production de l'énergie (**Guillon A. , 2011**).

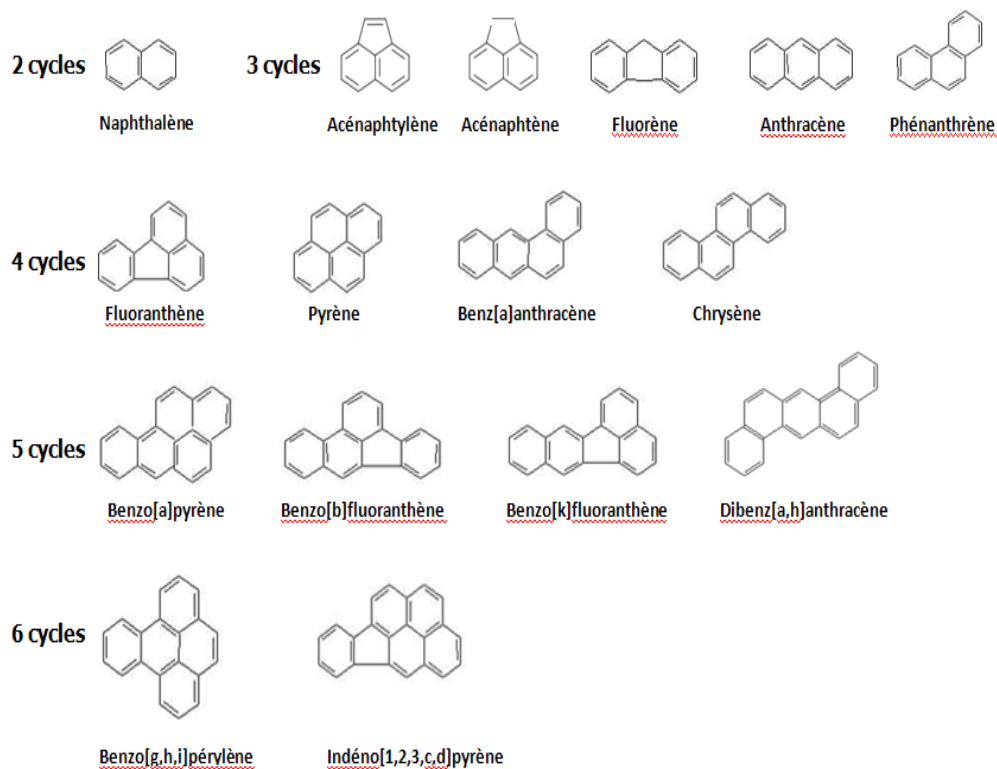


Figure 2. Présentation des 16 HAP classés prioritaires par l'USEPA

II.3.2. Sources mobiles

Ce sont les émissions liées au transport : voitures, avions, trains, bateaux, etc. Les automobiles sont les sources les plus importantes de HAP dans les zones urbaines (Garziandia et al., 2000).

II.3.3. Sources naturelles

Les émissions des HAP sont rejetées dans l'atmosphère par des sources naturelles dus à des événements accidentels tels que des incendies de forêts et des explosions volcaniques mais aussi des processus biologiques (pollens, virus...) (Garziandia et al., 2000).

II.4. Dispersion des HAP dans l'environnement

Les HAP de faible poids moléculaire, plus volatils, prédominent la phase gazeuse. Le transport de particules sur lesquelles les HAP lourds sont préférentiellement adsorbés, constitue la voie principale de leur dispersion dans l'environnement.

Les HAP les plus volatils arrivent au contact de la plante principalement au niveau de sa cuticule tandis que les autres se concentrent dans les sols et les sédiments des cours d'eau (Simonich., 1995). Leur présence dans la phase particulaire atmosphérique peut résulter de deux processus :

- La condensation, qui a lieu lorsque la pression de vapeur saturante est dépassée à des concentrations très élevées, donc généralement lors du refroidissement consécutif à l'émission (**Van vaeck et al., 1984 ; Marr et al., 2006**).

- La sorption (adsorption + absorption), c'est-à-dire l'association de molécules gazeuses avec tout corps à l'état condensé (solide ou liquide), qui a lieu à des niveaux de concentrations largement en delà des pressions de vapeur saturante (**Pankow, 1994 ; Goss et Eisenreich, 1997**).

II.5. Toxicité des HAP

II.5.1. Impacts des HAP sur la santé

Les impacts des HAP sur la santé humaine dépendent de leur degré d'absorption, de la façon dont ils sont exposés et de la durée d'exposition. Les humains peuvent être exposés par inhalation, ingestion ou contact direct avec la peau (**Surchump, 2017**).

Plusieurs études ont établi un lien entre les concentrations des HAP et divers cancers chez l'homme, tels que les cancers du scrotum, de l'œsophage, de l'estomac, de la vessie et des poumons (**Bostti, 2007 ; Chen, 2008 ; Gaertner, 2002 ; Mastrangelo, 1996**). Cependant, il est difficile d'attribuer la survenue de ces cancers aux seuls HAP car les individus atteints sont souvent exposés à un mélange de polluants. De plus, certains HAP sont aussi suspectés de modifier l'activité du système endocrinien (**Marie et al., 2013**).

II.5.2. Impacts sur l'Environnement

Les HAP se présentent souvent sous la forme de mélanges dont la composition dépend de la matière brute et des conditions de combustion (Dupuy, 2014). Les HAP sont des molécules pouvant être non biodégradables, ce qui leur confère des capacités de persistance dans l'environnement (**Guillon., 2011 ; Xavier, 2018**).

II.5.3. Impact sur les végétaux

Les végétaux répondent à la pollution par les hydrocarbures à différentes échelles : tissulaire, subcellulaire ou moléculaire jusqu'à l'organisme entier ainsi qu'à l'échelle collective populationnelle et communautaire (**Khelil, 2016**). Par ailleurs, Les HAP peuvent s'accumuler sur la surface des feuilles et dans la cire cuticulaire ou diffuser à l'intérieur de la plante (**Dan-badjo, 2007**).

Les modifications morphologiques végétatives et florales, les nécroses, les effets sur les stomates et leur ouverture, l'action sur la photosynthèse, la respiration et le transfert des

assimilâtes, les perturbations métaboliques, la mise en place de systèmes de défense physique et biochimique, le stress oxydatif, les actions et la perturbation de la reproduction sont parmi les impacts, des HAP sur les végétaux, identifiés et cités par Fabure (Fabure., 2009).

II.6. Relations entre les HAP et les particules en suspension (PM)

Les aérosols regroupent les particules solides et liquides en suspension dans une phase gazeuse. Ils présentent une grande diversité tant de par leurs origines, leurs sources d'émission, que de par leurs propriétés physico-chimiques. Ils sont souvent vecteurs des composés toxiques pour l'homme et son environnement tels que les HAP (Merabet, 2021).

Les HAP peuvent être adsorbés à la surface des particules atmosphériques (Guillon., 2011).

Selon Mathé les diamètres des particules d'aérosols varient entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. À partir de leurs diamètres aérodynamiques, les aérosols se classent comme suit (Mathé *et al.*, 1998) : Particule PM₁₀ (ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm), particule PM_{2,5} (dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm, particule PM₁ (dont diamètre aérodynamique inférieur à 1 µm).

C'est à la classe de PM₁ qu'appartiennent les particules Diesel riche en HAP. Ces particules sont issues de la conversion à partir de la phase gazeuse, d'effluents de combustion, de vapeurs organiques ou métalliques décondensées (processus de nucléation, condensation et coagulation), atteignent en plus grand nombre les alvéoles pulmonaires (Mathé *et al.*, 1998).

II.7. Extraction des HAP

L'extraction est la première étape pour une identification précise et une analyse ultérieure des HAP atmosphériques dans l'environnement (Mukhopadhyay, 2020). Le but de l'extraction est de séparer les HAP de leur support de prélèvement et de les transférer dans le solvant utilisé pour les analyser (Mathieu, 2006).

Les méthodes d'extraction conventionnelles telles que l'extraction Soxhlet et les ultrasons sont les méthodes courantes de choix; considérant que des méthodes d'extraction alternatives telles que l'extraction à l'aide de fluides supercritiques et sous-critiques (extraction à l'eau chaude sous pression) et l'extraction par solvant assistée par membrane (MASE) sont également utilisées, qui impliquent différents solvants organiques pour un meilleur rendement d'extraction (Eskilsson et Bjorklund, 2000 ; Barreca *et al.*, 2014).

La technique d'extraction en phase solide (SPE) est principalement utilisée pour le nettoyage des extraits (Tab.2). Des techniques d'extraction modifiées avec une consommation faible ou nulle de solvant ont également été développées pour obtenir une efficacité

d'extraction améliorée, notamment la microextraction à une seule goutte, la microextraction en phase solide à fibre froide (Szulejko et al., 2014). La désorption thermique est plus spécifique à l'analyse (GC-MS) (Brussol, 1999 ; Liang et Pankow, 1996 ; Rounds et Pankow, 1993 ; Storey et al., 1995).

Il existe de nombreuses méthodes d'extraction qui sont indiquées dans le (Tab.2). Dans le présent travail, nous nous intéresserons qu'à une seule de ces méthodes et qui est : l'extraction au Soxhlet.

II.7.1. Extraction au Soxhlet(ES)

L'extraction au Soxhlet, considérée comme la méthode de référence, permet de réaliser des extractions continues solide-liquide à l'aide de cycles de vaporisation-condensation du solvant.

Généralement des solvants non ou faiblement polaires tels que le cyclohexane ou un mélange de solvants de polarités différentes (hexane-acétone) sont utilisés. Cette technique est couramment pratiquée pour l'extraction des HAP particulaires piégés sur filtres (Pineiro-Iglesias et al., 2004; Dallarosa et al., 2005; Galarneau et al., 2006; Lin et al., 2006; Yang et al., 2006) et des HAP gazeux piégés sur des cartouches de cellulose (pour soxhlet) (Dachs et al., 2000; Peters et al., 2000; Fernandez et al., 2002).

Cette méthode présente l'avantage d'être simple d'utilisation et efficace. Toutefois, une extraction nécessite généralement une grande quantité de solvant (100 à 250 ml) et l'extraction des HAP dure entre 4 et 24 heures (Mukhopadhyay, 2020).

Tableau 2. Comparaison des techniques d'extraction (Giergielewicz-Mozajska et al., 2001 ; Mukhopadhyay, 2020)

Technique d'extraction	Temps d'extraction	Taille de l'échantillon	Solvant	Avantages	Inconvénients
Agitation mécanique	6 - 12 h	10 g	Hexane, hexane:acétone, toluène, t-butanol, 2-propanol.	Simple ; économique ; facile à manier	Faible sélectivité ; temps de contact long ; larges variations.
Soxhlet	4 - 24 h	1 - 30 g	Hexane, toluene, hexane:acetone (1:1), diethylether, cyclohexane, acetone	Aucune filtration requise	Temps d'extraction long ; grand volume de solvant ; étapes de nettoyage nécessaires.
Sonication	10 - 60 min	1 - 30g	Grand volume de solvant ; extractions répétées ; étapes de nettoyage nécessaires	Extractions multiples	Grand volume de solvant ; extractions répétées ; étapes de nettoyage nécessaires.
SFE	30 min-2 h	1 - 5 g	Fluides supercritiques (ex. CO ₂ à l'état supercritique)	Faible volume de solvant ; sélectif ; pas de nettoyage	Haute pression et température ; corrosion de la cuve d'extraction
SPE	30 min	5g	Hexane, méthanol, acétate d'éthyle, alcool isopropylique, chlorure de méthylène.	Taux d'extraction élevés ; faible volume de solvant ; moins de temps	Plusieurs étapes requises lors de l'extraction pour le développement de la méthode.
MASE	30 - 60 min	0.05 - 50 ng	Cyclohexane, méthanol, acétate d'éthyle, DCM, éther diisopropylique	Simple, rapide; pas de nettoyage ; réutilisation des membranes après nettoyage	Extraction non exhaustive ; étouffement des pores de la membrane par d'autres composés HMW
MAE	10 -20 min	1 - 10 g	Hexane, DCM, acétonitrile, acétone, hexane:acétone (1:1)	Rapide avec plusieurs extractions ; faible volume de solvant	Nettoyage nécessaire ; exigence de solvant absorbant les micro-ondes ; temps supplémentaire pour le refroidissement du navire

III. Biosurveillance de la qualité de l'air

La biosurveillance de la qualité de l'air est une approche complémentaire à des méthodes de mesures physiques et chimiques qui se concentre sur les effets des polluants dans les conditions d'exposition rencontrées dans les écosystèmes. En réponse aux nouvelles caractéristiques de la pollution atmosphérique, la biosurveillance offre des outils d'observation utile de plus en plus précoces. Ce domaine permet de communiquer avec le grand public tout en s'appuyant sur des études scientifiques (**Elichergaray, 2008**).

III.1. Définition de la biosurveillance

La biosurveillance a été définie par Garrec comme l'utilisation des réponses d'un organisme ou d'un groupe d'organismes à tous les niveaux de l'organisation biologique (moléculaire ; biochimique ; cellulaire ; physique ; tissulaire ; morphologique ; écologique) pour prédire et/ou révéler les changements environnementaux et suivre l'évolution (**Garrec, 2002**).

Un ensemble de techniques connues sous le nom de biosurveillance sont basées sur le suivi des variations fonctionnelles des êtres vivants (**markert, 2003**).

III.2. Concepts de la biosurveillance

La biosurveillance consiste à mettre en évidence une altération de l'environnement à travers les réponses des organismes qui y vivent (**castell, 2017**). En 2002, Garrec et Van Haluwyn ont défini quatre dimensions liées à cela : les biomarqueurs, les bioindicateurs, les biointégrateurs et bioaccumulateurs.

III.2.1. Biomarqueurs

Les biomarqueurs ne sont pas visibles à l'œil nu. Il s'agit de l'utilisation de paramètres biologiques à une échelle sous-individuelle (par exemple, l'activation des gènes, la synthèse enzymatique, etc.) indiquant la réponse physiologique de l'organisme à son environnement (**Garrec, 2002**).

Selon le marqueur ciblé, il peut s'agir d'une méthode quantitative ou qualitative. Son but est de suivre les changements moléculaires, cellulaires, biochimiques ou physiologiques. L'utilisation de biomarqueurs repose par exemple sur le suivi de la fluorescence de la chlorophylle, de l'activité photosynthétique (**Catalyud et Barreno, 2004 ; Crous et al., 2006**), des dosages d'enzymes (**Rai et Agrawal, 2008**).

Des études de génotoxicité basées sur le test des comètes réalisées sur les feuilles des végétaux, ont été utilisées pour évaluer le caractère génotoxique des polluants de l'air (Monarca *et al.*, 2001 ; Sadowska *et al.*, 1994).

III.2.2. Bioindicateurs

La bioindication est considérée comme toute observation de réponses biologiques au niveau d'un individu (réponse morphologique, physiologique ou comportementale) ou d'une communauté d'individus (changements structurels) suite à un stress environnemental (Garrec, 2002).

Cette méthode concerne seulement les végétaux dits "sensibles". Il s'agit par exemple de l'apparition de nécroses foliaires (Silva *et al.*, 2012) ou la modification de la croissance racinaire (Manier *et al.*, 2009).

III.2.3. Biointégrateurs

La biointégration permet d'évaluer les effets à long terme sur les communautés par l'étude de la densité et de la diversité spécifique de populations au sein d'écosystèmes. Les organismes sentinelles utilisés sont généralement les végétaux supérieurs, les bryophytes et les lichens (Thimonier *et al.*, 1994 ; Takahashi et Miyajima, 2010).

III.2.4. Bioaccumulateurs

Les bioindicateurs d'accumulation ou bio-accumulateurs, ont la propriété d'accumuler des polluants par dépôt, adsorption, absorption, migration. Cette propriété sera notamment recherchée pour des polluants toxiques à l'état de trace dans le compartiment atmosphérique.

Il s'agit d'utiliser les organismes qui ont la capacité de stocker les polluants dans leurs tissus par des mécanismes de transfert et/ou fixation. Le bio accumulateur sert ici de matrice de dosage de différents polluants. Il doit répondre aux spécifications suivantes:

- accumuler le(s) polluant(s) et ce, sans disparaître;
- fournir suffisamment de tissus pour l'analyse;
- avoir un facteur de concentration suffisant pour pouvoir être analysé directement sans pré-concentration;
- présenter une concentration tissulaire du polluant représentative du niveau de contamination de l'environnement (Conti *et al.*, 2001).

Les polluants les plus fréquemment recherchés sont des composés peu dégradables et/ou ayant un fort coefficient de partage octanol/eau, et qui s'accumulent dans les graisses,

tels que les métaux ou les polluants organiques persistants (HAP, dioxines, furanes, certains pesticides...).

III.3.Stratégies de la biosurveillance

La biosurveillance peut s'effectuer à partir de prélèvements d'organismes déjà présents dans le milieu (biosurveillance passive) ou bien elle peut nécessiter une transplantation d'échantillons à un endroit précis (biosurveillance active). Le (Tab.3) présente la comparaison entre les deux stratégies de la biosurveillance.

III.3.1.Biosurveillance passive (*in situ*)

Selon (Conti et Cecchetti., 2001), cette méthode comprend à utiliser les organismes déjà présents sur le site. Elle a l'avantage d'être rapide (tab.3). 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.

III.3.2. Biosurveillance active

Cette approche s'appelle aussi « méthode des transplants ». Il s'agit de cultiver des végétaux présélectionnés et de les exposer dans la zone à étudier. Cette méthode peut être utilisée lorsque la méthode *in situ* n'est pas envisageable (absence d'organismes correspondant aux critères de l'étude) (Ceburnis et Valiulis, 1999).

La transplantation est une technique expérimentale où les organismes utilisés pour l'étude sont transférés d'un environnement non pollué vers un site pollué ou pressenti de l'être. Cette alternative à la façon *in situ* permet de palier aux problèmes suivants :

- ✓ L'absence d'espèces utilisables dans la zone d'étude (niveau de pollution trop élevé, manque d'habitats du fait de l'urbanisation ou de l'industrialisation).
- ✓ La dure répartition d'une espèce qui ne permet pas un échantillonnage représentatif de la zone d'étude (Conti et Cecchetti, 2001).

Cependant cette technique nécessite plus de temps que la biosurveillance passive (Ceburnis et Valiulis, 1999).

Tableau 3. Avantages et limites de la biosurveillance active et passive (**modifiée d'après Oikari, 2006 et Besse et al., 2012**)

	Biosurveillance active (transplant)	Biosurveillance passive (in situ)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de l'échantillonnage. - Calibration des individus utilisés (âge, sexe, taille). - Connaissance sur les antécédents de la population d'origine. - Suppression des impacts liés au prélèvement. - Standardisation possible pour une espèce modèle donnée. - Conditions d'exposition connues. 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de mise en œuvre. - Cout plus faible. - Intégration de la contamination sur le long terme (chronique). - Existence de programmes à large échelle (mieux dans les milieux urbains)
Limites	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts élevés (temps, matériel). - Choix plus limité de l'espèce modèle. - Facteurs confondants (température, physico-chimie, saison ...). 	<ul style="list-style-type: none"> - Impossibilité de calibrer les individus échantillonnés (âge, sexe, taille). - Incertitudes liées à la mobilité des individus et au temps réel d'exposition dans le milieu. - Capacité d'adaptation des individus lors d'une exposition chronique.

III.4. Biosurveillance végétale des HAP atmosphériques

Dans la biosurveillance végétale des HAP atmosphérique, toutes les parties du végétale sont utilisables. Très souvent, des aiguilles et des feuilles d'arbres sont utilisées car elles sont facilement disponibles. Elles permettent des comparaisons temporelles et spatiales (régionales) (**Amigo et al., 2011**), internationales (**Ratola et al., 2012**) et intercontinentales (**Hwang et al., 2003**) de la pollution atmosphérique par les HAP

La végétation joue un rôle important dans le piégeage des HAP atmosphériques. Ces molécules peuvent être adsorbées sur les feuilles en raison de leur structure riche en lipides, de la présence de membranes épicuticulaires et de cire. Les HAP peuvent également être absorbés par les stomates des feuilles (**Simonich et Hites, 1994; Belis et al., 2009; De Nicola et al., 2011**).

Des études de biosurveillance végétale des HAP atmosphériques sont menées à l'aide d'une variété de matrices végétales : des lichens (Augusto et al., 2010; Yang et al., 2013), des mousses et des plantes supérieures (Wenzel et al., 1998 ;Holoubek et al., 2007 ; Oishi, 2013 ; Foan et al., 2015).

III.5. Biosurveillance par les plantes supérieures

Les plantes vascularisées (supérieurs) établissent un réseau entre l'eau, le sol et l'air et présentent un fonctionnement physiologique complexe. Celui-ci exige l'acquisition d'éléments indispensables au développement de la plante et une organisation interne permettant de répondre à ces besoins et aux contraintes environnementales, ce sont des organismes autotrophes qui participent à la photosynthèse (Dupuy, 2014).

La diversité végétale offre un large panel d'organismes vasculaires (plantes herbacées, feuilles et écorces d'arbres, choux...) utilisables dans la biosurveillance. Ces organismes sont employés spécifiquement ou non pour un grand nombre de polluant parmi ces polluants on peut citer les HAP (Benard et al., 2004).

Plusieurs végétaux sensibles ont été utilisés pour la surveillance de plusieurs polluants depuis les premières études biologiques sur la qualité de l'air (Swieboda, 1978) comme : radionucléides par les lichens (Ellis, 1987), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par le chou (Kipopoulou et al., 1999).

Chapitre II.

Matériel et Méthodes

1. Description de la zone d'étude

1.1. Situation Géographique

La ville de Béjaïa se présente au centre de la façade méditerranéenne de l'Afrique du Nord. Elle se situe au nord-est de l'Algérie à 230 km à l'est de la capitale Alger (**Ikni, 2018**). Elle est le chef-lieu de la wilaya de Béjaïa et de la daïra de Béjaïa, en Kabylie. Elle se situe à l'extrême Ouest d'une baie formée par le cap Cavallo à l'Est, le cap Carbon à l'Ouest et la mer au sud, accrochée au flanc du mont Gouraya au nord et nord-ouest. Elle est d'une superficie de 120.22 km² (**source : annuaire statistique de la wilaya de bejaia**).

La ville de Béjaïa, née du nord par le mont Gouraya, qui est le point culminant, descendant vers les quartiers des hauteurs de la ville, en sillonnant le bois sacré qui mène vers la plaine, représentant le centre de la ville. Elle s'étale aussi sur les nouveaux quartiers périphériques, qui se délimitent à l'Ouest par Ighil Lborj, au Sud-est par Bir slam et à l'Est par Sidi Ali Labhar (**source : annuaire statistique de la wilaya de bejaia**).

1.2. Relief

Le relief de Béjaïa est caractérisé par la prédominance des montagnes avec des pentes dépassant souvent 25% et des altitudes variant entre le niveau de la mer et 1000 m, dont 50% ne dépassent pas 600 m. Elle est enserrée entre deux versants plus ou moins escarpés, au pied desquelles la plaine paraît délimitée d'un côté et de l'autre de sa longueur par les deux routes Bejaïa, Amizour (**Azegagh, 2006**).

On peut distinguer trois ensembles de reliefs :

- **Le complexe montagneux** : s'étend sur 75% de l'ensemble du territoire de la wilaya de Bejaia. Il est formé des chaînes des Babors séparé par la vallée de la Soummam.
- **L'ensemble des piémonts**: une morphologie ondulée constitue d'une succession de collines. Cela semble moins hasardeux et constitue une situation intermédiaire entre la plaine et la montagne.
- **L'ensemble des plaines** : contenant des plaines de la vallée de la Soummam, qui se présentent comme un tronçon sinueux de 80 kilomètres de long sur une largeur maximale de 4 kilomètres, et des plaines côtières qui isolent la mer de la montagne Babor. Elles se présentent comme une bande étroite qui s'étende de l'embouchure d'oued Soummam à celui d'Oued Agrioun soit une trentaine de kilomètres (**Messafri, 2018**).

1.3. Climat

La région de Béjaïa se situe à proximité de la mer. Elle jouit d'un climat méditerranéen, avec des précipitations forte et irrégulières avec un été plutôt chaud et humide. Elle est considérée comme l'une des régions les plus pluvieuses d'Algérie (**Bendadouche, 2014**).

Le climat des régions montagneuses se caractérise par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et froid, la température atteint parfois 0°C et moins, ce qui s'accompagne de neige (**Mokhtari et Zouaghi, 2017**).

1.4. Facteurs climatiques

Appartenant au domaine méditerranéen, le climat de la wilaya de Béjaïa varie d'une zone à une autre. La zone littorale et la vallée de la Soummam jouissent d'un climat pluvieux et doux en hiver, sec et chaud en été. La température atteint parfois 0 °C, voire moins en hiver (**annuaire statistique de Béjaïa, 2015**).

Les données climatiques exploitées dans la présente étude proviennent de la station météorologique sise à l'aéroport de la ville de Béjaïa et couvrent une période de 30 ans allant de 1991-2021 (**d'après le site : fr.climate-data.org**)

1.4.1. Températures

Les températures moyennes mensuelles oscillent entre 10,1 et 25°C. Les minimas vont de 7,44 (février) à 21,4 °C (Août), les maximales entre 13,8 (Janvier) à 28,9 °C (Août) (voir tab.4).

Tableau 4. Températures minimales, maximales et mensuelles moyennes exprimées en degrés Celsius (°C) dans la localité de Béjaïa (station sise à l'aéroport) (1991-2021) (**d'après le site : fr.climate-data.org**)

	Mois											
T(°C)	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Max	13,8	13,9	16,4	18,5	21,3	25,2	28,3	28,9	25,8	23,2	17,9	14,8
Min	7,2	6,8	8,7	10,9	13,9	17,6	20,7	21,4	19,1	16,3	11,5	8,5
Moy	10,1	10,1	12,4	14,6	17,7	21,5	24,6	25	22,2	19,4	14,3	11,3

1.4.2. Précipitations

Le cumul annuel des précipitations enregistrées durant la période d'étude dans la localité de Bejaia atteint 739 mm et les cumuls mensuels sont consignés dans le (Tab.5) (d'après le site : fr.climate-data.org)

Tableau 5. Précipitations mensuelles (P) de la région de Bejaïa durant la période 1991-2021.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P(mm)	93	78	79	75	58	18	5	16	64	76	86	91	739

1.4.3. Vents

La vitesse horaire moyenne du vent à Bejaia connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 4.9 mois, s'étendant du 28 octobre au 25 mars, avec une vitesse moyenne des vents supérieurs à 12,3 km/h.

1.4.4. Humidité

La localité côtière de Bejaia 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 le plus lourd est Mai avec un climat de 78% du temps (d'après le site : fr.climate-data.org)

1.4.5. Synthèse climatique

Les différents facteurs climatiques n'agissent pas indépendamment les uns des autres. Pour tenir compte de cela, divers indices ont été créés et les plus employés font usage de la température (T) et de la pluviosité (P) qui sont les facteurs les plus importants et les mieux connus (Dajoz, 1985).

2. Matériel biologique/ Chou frisé (*Brassica oleracea*)

2.1. Origines et Caractéristiques des Brassicacées

Les brassicacées sont probablement apparues depuis plus de 50 millions d'années (Koch *et al.*, 2003). Leur dispersion dans le monde s'est faite à travers les contaminations des lots de semences de céréales (Sauer, 1993 ; Radulescu *et al.*, 2013).

Le chou est, à l'origine, une plante sauvage cultivée sur les terres occidentales qui s'est répandue dans les terres de la Méditerranée. De nos jours, les brassicacées sont cultivées dans la plupart des régions du monde, plus particulièrement dans les zones tempérées de l'hémisphère nord, du bassin méditerranéen, à l'Asie centrale (Stevens, 2001).

En Algérie, les cultures de brassicacées (chou vert et chou-fleur) sont réparties dans les régions centrales humides et subhumides du pays. Une superficie de 3.178 ha est destinée à ces spéculations (**Anonyme, 2005**).

Les brassicacées, anciennement nommées crucifères, constituent une importante famille des plantes dicotylédones, aussi bien par le nombre d'espèces qu'elles regroupent que par son importance économique (**Al-Shehbaz et al., 2006**). Le chou (*Brassica oleracea* L., 1753) est une espèce de plantes de la famille des Brassicacées (ou crucifères), originaire du Sud-Ouest de l'Europe. Plantes généralement bisannuelles, leurs feuilles comestibles peuvent ou non former une tête compacte ou « pomme » (**Éric, 2020**).

Le chou de Milan (à feuilles gaufrées ou cloquées) dit chou frisé (*Brassica oleracea*), peut être utilisé comme agent de surveillance active des polluants organiques grâce à son grand rapport surface/volume et de sa haute teneur en lipides cubiculaires. Ces deux caractéristiques font du chou frisé une plante très adaptés à l'adsorption des micropolluants organiques atmosphériques (**Franzaring et al., 1992**).

Cette plante a été utilisée dans la bioaccumulation des HAP, pour la première fois en 1986, dans la région de Francfort (**Franzaring et al., 1992**). L'auteur a pu identifier de grandes différences dans les émissions des HAP accumulées par l'espèce témoin chou frisé (*Brassica oleracea*).

Depuis, d'autres études sur la surveillance des HAP atmosphériques par le chou frisé (*Brassica oleracea*) ont été réalisées (**Franzaring et al., 1992 ; Klumpp et al., 2004**).

2.2.Écologie de l'espèce

Les Brassicacées se développent dans la plupart des types de sols à savoir le sable du littoral, les roches calcaires, les zones instables et anthropoïdes (**Julve, 2017**).

L'espèce *Brassica oleracea* affiche particulièrement une grande diversité (**Talekar et Shelton, 1993**). À cet effet, les formes sont sélectionnées pour évoluer les méristèmes végétatifs de l'apex (chou) ou les feuilles axillaires (chou de Bruxelles), et avoir des formes avec une prolifération des méristèmes floraux (chou-fleur) ou des boutons floraux (brocoli) (**Paterson et al., 2006**).

Le chou cultivé, légume volumineux (hors choux de Bruxelles et quelques variétés plus petites) fait partie des cultures à plus fort rendement (jusqu'à 160 tonnes par hectare en conditions idéales), mais compte tenu de ses importants besoins en azote, il a tendance à

épuiser les sols et ne doit être cultivé sur la même parcelle qu'une fois tous les 5 ans (Bloch-Dano, 2008).

2.3. Importance nutritionnelle du chou

Le chou est un légume dont les feuilles sont riches en minéraux et en vitamines. Par ailleurs, le chou détient des vertus antiscorbutiques, antitoxiques et une action cicatrisante (Messegue, 1972).

À cet effet, il est utilisé dans le cas de certaines atteintes profondes telles que les varices, les ulcères, les tumeurs etc. Cependant, sa composition nutritionnelle (Tab.6), s'avère aussi intéressante en éléments essentiels.

Il s'avère que ce type de chou riche en eau (contient 90.1 g/100g) et en protéines, en acides aminés, en pigment, en éléments minéraux et en fibres alimentaires (FA) (Tab.6).

Tableau 6. Composition nutritionnelle du chou par 100g de partie comestible (Holland et al., 1991).

Élément	Eau	Énergie	Protéines	Lipides	Glucides	FA
Teneur	90,1 g	26 kcals	1,7 g	0,4 g	4,1 g	2,9 g

2.4. Choix et classification de la plante (*Brassica oleracea*)

Brassica oleracea (chou frisé), et le matériel végétal utilisé dans les différentes expérimentations. Il a été choisi pour de nombreuses raisons. Tout d'abord grâce à sa croissance lente et sa culture facile. Puis, ses feuilles présentent une grande surface propice aux dépôts des polluants de l'air. De plus, ses feuilles sont recouvertes d'une cuticule épaisse riche en cires favorisant l'accumulation des composés hydrophobes comme les HAP.

Au-delà de l'aspect bibliographique, le chou frisé présente beaucoup de caractéristiques lui permettant d'être utilisé pour cette étude.

Selon Gladis et Hammer (2003), *Brassica oleracea* fait partie de la classification donnée dans la Fiche technique suivante:

Règne	Plantae
Sous-règne	Viridiplantae
Division	Tracheophyta

Classe	Equisetopsida
Sous-classe	Magnoliidae
Ordre	Brassicales
Famille	Brassicaceae
Genre	Brassica
Espèce	<i>Brassica oleracea L.</i>

3. Sites d'échantillonnage

Pour l'exposition des échantillons, nous avons choisi dix stations à travers la ville de Bejaia. L'emplacement de ces stations était délimité à partir d'un maillage de notre zone d'étude comme le montre la carte géographique de la (Fig.3). Cette méthode d'échantillonnage est convenable à la biosurveillance de la pollution atmosphérique urbaine (Garrec et Van Haluwyn, 1981).

Nous avons détaillé les caractéristiques de chaque station de l'étude (Tab.7) avec notamment la catégorie paysagère où se trouve la station mais également la contamination potentielle individuelle à chaque station.

Tableau 7. Stations choisies pour l'étude

Stations	Altitude (m)	Longitude	Latitude	Type d'exposition
Targa Ouzemour	17.79	5.040656°	36.750410°	Suburbaine
Aamriw	14.80	5.060671°	36.756193°	Urbaine
Daouadji	29.55	5.061602°	36.750761°	Urbaine
Sidi Ahmed	71.96	5.067134°	36.759612°	Suburbaine
Port	3.31	5.087208°	36.754628°	Industrielle
Centre-ville	35.21	5.082838°	36.754168°	Urbaine
Gare routière	6.99	5.064385°	36.738719°	Industrielle
Ighil Ouazoug	38.11	5.053646°	36.729977°	Urbaine
Iheddaden	29.01	5.044027°	36.738735°	Urbaine
Boukhiana	128.02	5.015132°	36.746333°	Suburbaine
Pépinière	21.40	5.05449°	36.745254°	Témoin

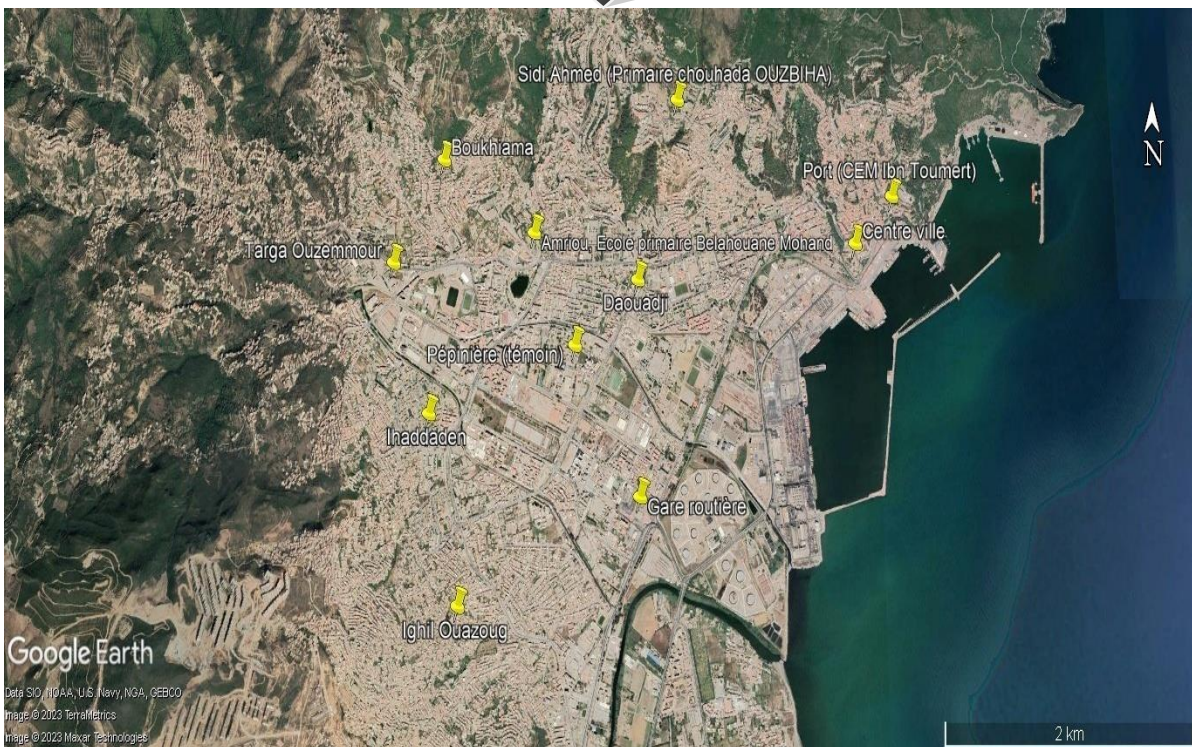


Figure 3. Localisation des stations d'échantillonnage au niveau de Béjaïa ville (Google Earth) (2023).

Toutes les stations se situent à une altitude qui ne dépasse pas 40 m à part les deux stations de Boukhama et Sidi Ahmed qui sont à 128.02 m et à 71.96 m d'altitude.

4. Préparation des échantillons

Le développement des plants de chou a été réalisé par nous-mêmes et avec soin pour s'assurer que les échantillons ont tous subi les mêmes conditions de croissances. C'est pour ainsi obtenir des échantillons homogènes.

4.1. Développement des plants de chou au niveau de la pépinière

Avant leur exposition, une population homogène de 30 plants de chou a été développée suivant les étapes mentionnées dans la (Fig.4).

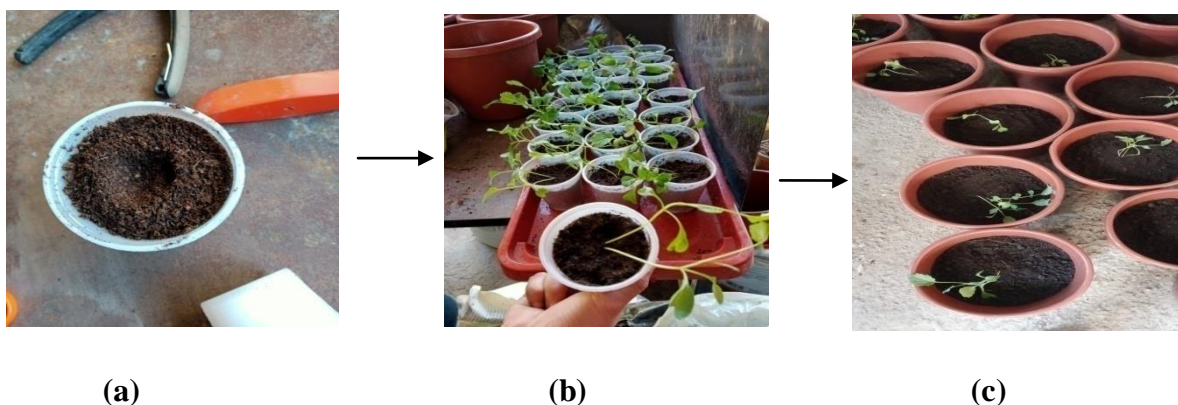


Figure 4. Illustration représente le développement de la plante pendant un mois

Les échantillons ont été tous semés en même temps (12/02/2023) et cultivés en serre à l'abri des contaminations pour une période de deux mois.

Tout d'abord, trois graines de chou frisé ont été semées dans chaque gobelet contenant 50g de terreau. Les graines germées sont restées pendant un mois (jusqu'au 14/03/2023) dans leurs gobelets et ont subi une irrigation régulière.

Au bout de ce mois et après avoir atteints une croissance de 10 cm, les plants ont été ensuite déplacés vers des pots qui contiennent 200g de terreau. En effet, on n'a pas eu 100% de germination (trois plants ne sont pas germés)

En fin, vers le 12/04/2023, les plants ont été transportés dans leurs milieux d'exposition à raison de trois pots pour chaque station.

4.2. Exposition des plants de chou

Après une période de croissance et une autre d'adaptation aux pots d'exposition, les plants de chou ont été installés sur des tables pour éviter les ravageurs (surtout les limaces) au niveau des dix stations de notre étude. Au moment de l'exposition des plants, le 12 avril

2023 à Bejaïa, la journée a été ensoleillée avec des températures (T°) qui variait aux alentours de 25°C (les mêmes conditions que celles de la serre).

En parallèle, trois pots de chou témoin ont été conservés sous serre, en guise de référence. Les choux ont été exposés pendant deux mois.

À la fin de leur exposition (le 01/06/2023), les parties aériennes des échantillons ont été récoltées dans des sachets en papiers puis transportées au laboratoire dans une glacière.

Depuis et pendant toute la période de travail de laboratoire, les échantillons ont été conservés au réfrigérateur à une température de 4°C , sachant que cette température n'altère pas la composition des feuilles en HAP.

5. Travail au laboratoire

La grande partie des travaux de laboratoire de notre étude, était réalisée au niveau de laboratoire Biomathématique, Biophysiques, Biochimie and Scientométrie (L3BS)

L'ensemble du matériel et les différents réactifs utilisés sont présentés dans l'annexe 2. Cependant l'extraction des HAP a été réalisée au niveau de laboratoire pédagogique de la faculté SNV de Bouira.

5.1. Protocole d'extraction des HAP

Pour l'extraction des HAP de nos échantillons de *Brassica oleracea*, nous avons opté pour l'extraction au Soxhlet qui est une technique qui ne demande aucune filtration du mélange, ce qui réduit le contact avec les solvants.

Nous avons utilisé l'appareil de Soxhlet du model (behrotest), disponible au niveau de la faculté de SNV de Bouira pour la détermination des quantités de HAP dans les 30 échantillons de notre étude. Le protocole expérimental est donné en (Fig.5).

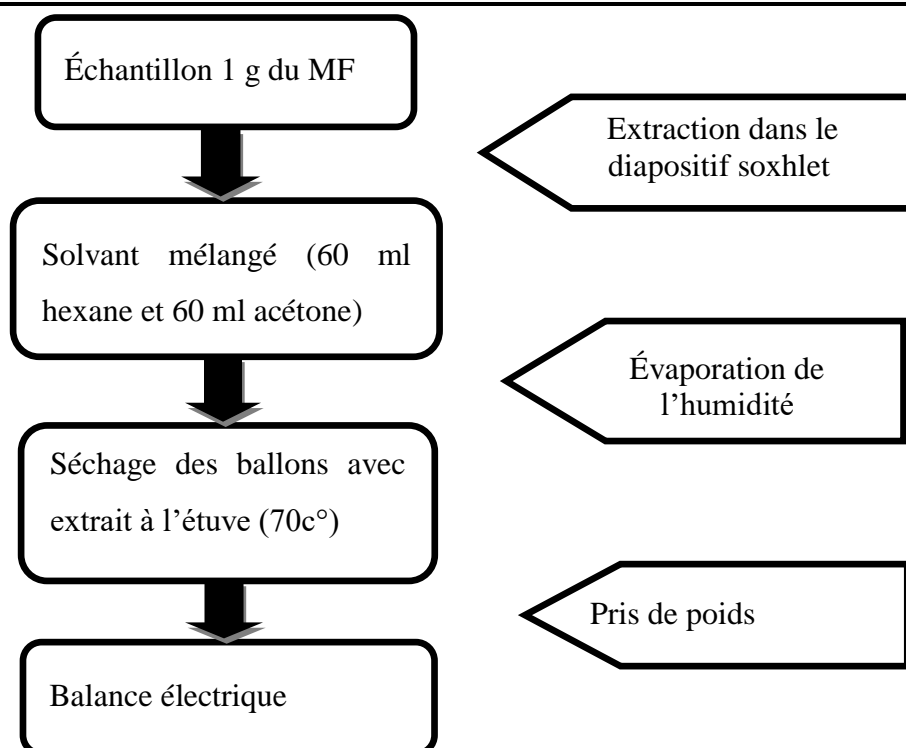


Figure 5. Schéma de protocole expérimental pour l'extraction des HAP par Soxhlet

Avant de passer à l'extraction, 1g de la matière fraîche de chaque échantillon, a été pesé mis dans une cartouche en cellulose et un mélange du solvant (60ml d'hexane + 60ml d'acétone) a été versé dans un ballon vide qui est déjà pesé.

Une fois trois cartouches sont montées sur leurs ballons, ils sont placés dans l'extracteur Soxhlet sous la hotte, à une température de 70C° (Fig.6).

Pendant l'extraction nous avons surveillé le solvant remonté dans les cartouches jusqu'à l'obtention d'une couleur transparent pour le récupérer les extraits. En même temps et pendant l'extraction, nous vérifions le bon fonctionnement de la pompe de l'eau pour assurer le refroidissement du dispositif.

À la fin de l'extraction qui est faits au bout de 3-4 heures, les ballons sont récupérés avec leurs extraits, puis sont mis à l'étuve pour le séchage. Une fois séchés les ballons sont pesés.



Figure 6.Extraction des HAP par l'appareil Soxhlet (model : behrotest)

Les concentrations en hydrocarbures totaux sont déterminées de manière indirecte selon la formule suivante :

$$P(\text{HCT}) = (\text{Pcp} - \text{Pcv} / \text{Pe}) * 10^{-6} \quad (1)$$

P (HCT): poids des hydrocarbures totaux en $\mu\text{g/g}$

Pcp : poids du creuset plein

Pcv : poids du creuset vide

Pe : poids de l'échantillon

5.2. Dosage des poussières et des cires

Les techniques de lavage des feuilles s'insèrent dans l'étude du pouvoir de fixation-rétention des poussières par les plantes et sont indispensables pour le dosage d'éléments structuraux. Afin de mesurer l'importance des dépôts superficiels, parmi les différentes techniques de lavage, nous avons utilisé celle de Stenbock-Farmer (1978) (Fig.7).

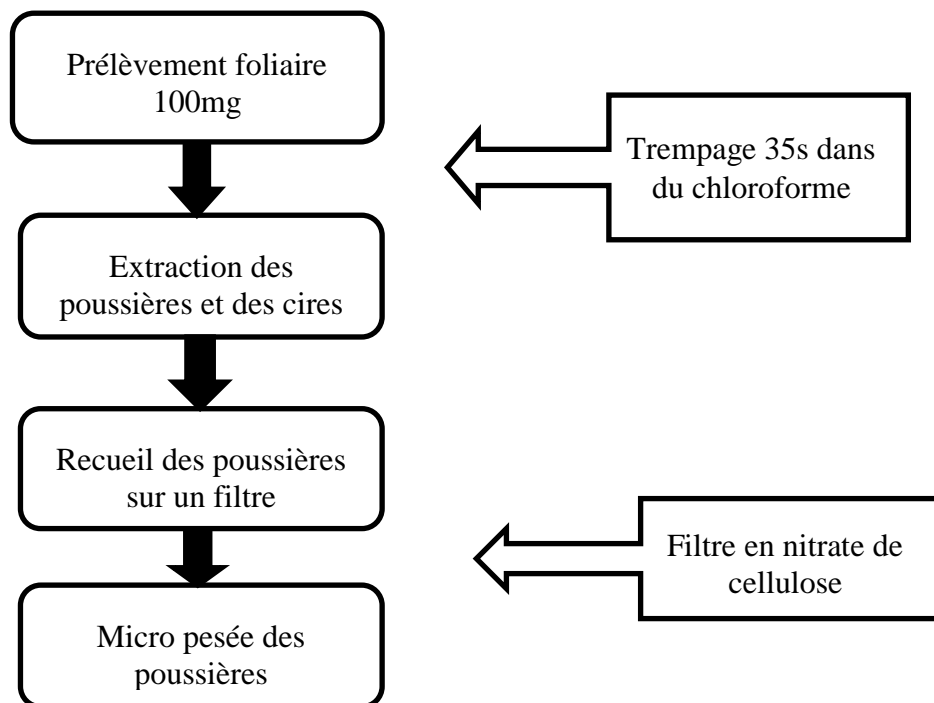


Figure 7. Schéma de protocole expérimental pour le dosage des poussières accumulées sur les surfaces foliaire

Dans un bécher, on a mis 100mg de matière fraîche (MF) de *Brassica oleracea*, coupée en petit morceaux. Ensuite on a versé 10ml du chloroforme dans chaque échantillon de chou pendant 35 secondes (Fig.8).



Figure 8. Extraction de la poussière et de cire de *Brassica oleracea* par chloroforme

Juste après, on a filtré l'extrait sur un papier filtre (en nitrate de cellulose) et on l'a laissé avec les autres extraits à l'air libre jusqu'au séchage. Enfin on les a pesés pour déterminer les poids des filtrats.

5.3. Dosage de la chlorophylle

Afin d'évaluer l'effet de la pollution sur la photosynthèse et notamment sur la chlorophylle des feuilles de notre plante (*Brassica oleracea*), nous avons décidé de doser la chlorophylle a et b selon la méthode établie par (RAO et BLANC, 1965 ; Khelil 2016) et illustrée par la (Fig.9).

Pour le dosage de la chlorophylle dans nos échantillons de *Brassica oleracea*, on a utilisé 0.225 g de matière fraîche. Cette quantité est mélangée à 10 ml d'acétone 80% (20 ml d'eau distillé + 80ml d'acétone) et à une pincée de carbonate de calcium.

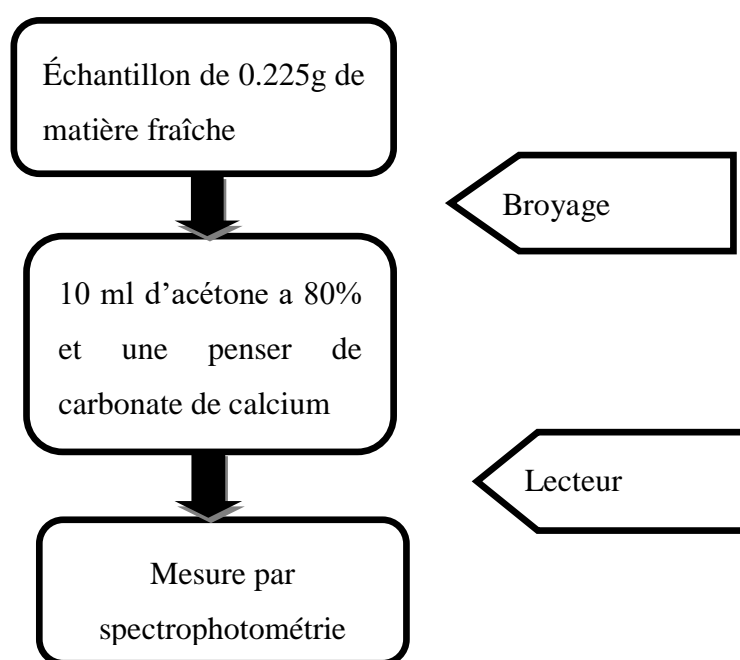


Figure 9. Schéma de protocole expérimental de dosage de la chlorophylle

Après broyage total, au mortier, la solution a été versée dans un tube à essai couvert d'un papier aluminium (afin d'éviter l'oxydation de la chlorophylle) (Fig.10).

En fin, l'échantillon est passé dans la centrifugeuse avec les autres tubes issus de la même manière.

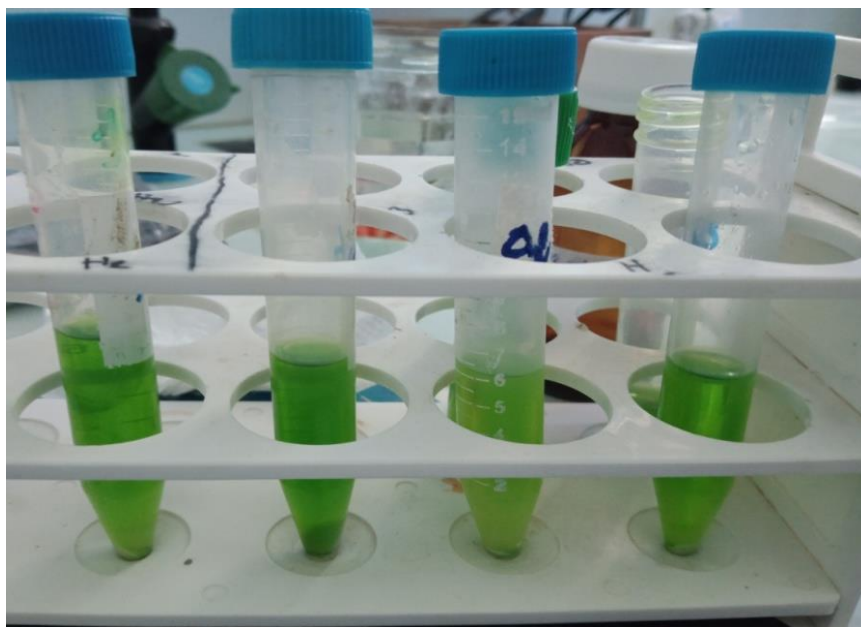


Figure 10. Extrait de la chlorophylle de *Brassica oleracea*

Le dosage a été fait par le prélèvement de la solution dans la cuve à spectrophotomètre, la lecture a été faite aux deux longueurs d'ondes ($\lambda_1=645$ nm et $\lambda_2=663$ nm) après étalonnage de l'appareil avec la solution témoin d'acétone à 80%.

Le calcul des valeurs de la chlorophylle a été fait grâce aux formules suivantes :

$$\text{Chl a: } 12.7 (\text{DO } 663) - 2.69 (\text{DO } 645) \text{ (Arnon, 1949)} \quad (2)$$

$$\text{Chl b: } 22.9 (\text{DO}645) - 4.86(\text{DO } 663) \quad (3)$$

$$\text{Chl a+ b: } 8.02 (\text{DO } 645) + 20.20 (\text{DO } 663) \text{ (Brown et White Head, 1986)} \quad (4)$$

5.4. Dosage de la proline

La proline est l'un des vingt principaux acides aminés qui entrent dans la constitution des protéines. La proline est facilement oxydée par la ninhydrine. Dans notre travail, son dosage a été réalisé selon la méthode de (Troll et Lindsley, 1955), modifiée par Monneveux et Nemmar(1986).

Le schéma en (Fig.11), résume et explique dans le protocole expérimental pour le dosage de la proline à partir de 100 mg de matière fraîche.

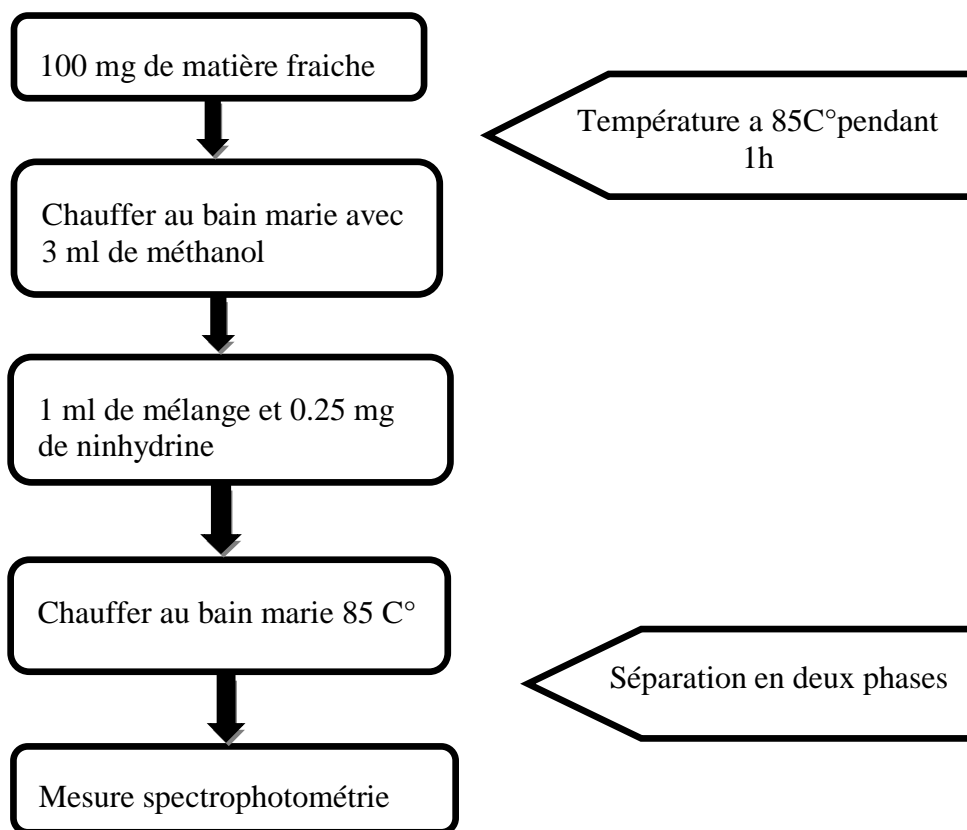


Figure 11.Protocole expérimental pour le dosage de la proline.

Pour le dosage de la proline, 100 mg de matière fraîche de notre chou a été mis dans des tubes à essai contenant 3 ml de méthanol à 80%. Le tout est ensuite chauffé à 85°C dans un bain-marie pendant 1h. Les tubes sont recouverts de papier aluminium pendant le chauffage pour éviter la volatilisation de l'alcool.)

Après refroidissement ; on a prélevé 1ml d'extrait auquel on a ajouté :

- 1 ml d'acide acétique (CH_3COOH) ;
- 1 ml de mélange contenant : 120 ml d'eau distillée ; 300 ml d'acide acétique ; 80 ml d'acide orthophosphorique ; 25 mg de ninhydrine ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_4$).

La solution obtenue est portée à ébullition pendant 1h à 100°C, le temps qu'elle devienne rouge (Fig.12).

Après refroidissement, 5 ml de toluène sont rajoutés à la solution qui est agitée. Deux phases se séparent (une phase supérieure transparente sans proline et une phase inférieure à la couleur rouge contient la proline) (Fig.12).

Après avoir éliminé la phase supérieure, la phase inférieure est récupérée pour la lecture.

Nous avons déterminé la densité optique (Do) à l'aide d'un spectrophotomètre (type 20D) sur une longueur d'onde de 528nm préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue.

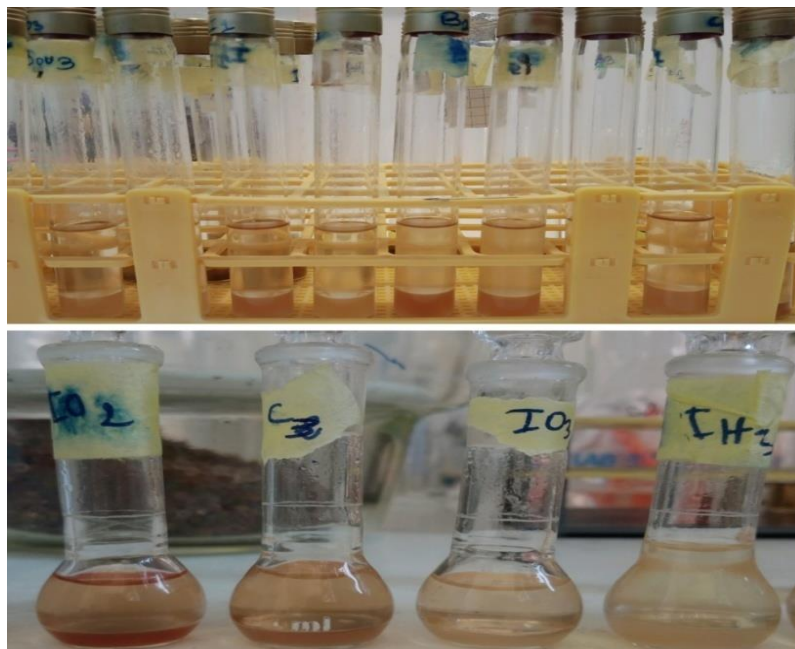


Figure 12. Séparation des deux phases : inférieure contenant la proline et supérieure dépourvu d'elle.

Nous n'avons pas réussi à tracer notre courbe d'étalonnage car la proline pure qu'on a utilisée est probablement périmée. Nous avons donc utilisé la courbe d'étalonnage présentée en (Annexe 03) et qui est obtenue grâce à un mélange (acide acétique, eau distillée, acide orthophosphorique et ninhydrine).

$$Y = 0.06468 X + 0.03695 \quad (5)$$

Cette courbe est utilisée pour déterminer les teneurs en proline dans les feuilles des plantes.

6. Analyse statistique

Les données obtenues pour chaque paramètre, ont été interprétées statistiquement plusieurs niveaux.

Nous avons d'abord traité nos données avec les statistiques descriptives en utilisant le logiciel Excel. Cette analyse a englobé les différents calculs des paramètres statistiques (moyennes, médianes, écart-types ...), et la représentation graphique des résultats avec des diagrammes réalisés à bases des moyennes et des barres d'erreurs qui présentent les écarts types.

Puis et pour comparer les moyennes des différents paramètres mesurés sur nos échantillons de *Brassica oleracea* (concentrations en HAP, les poussières, la chlorophylle et la proline), nous avons appliqué le test paramétrique pour plusieurs échantillons indépendants qui est l'Analyse de la variance (ANOVA). Ceci, après avoir vérifié que les distributions étaient normales et l'homogénéité des variances était respectée.

Cette analyse statistique est réalisée avec le logiciel : STATISTICA 8. La normalité et l'homogénéité des séries à comparer sont vérifiées à chaque fois. Le test de Shapiro-Wilk's est utilisé pour tester la normalité et celui de Bartlett pour l'homogénéité. Si les deux conditions sont vérifiées, une comparaison multiple des moyennes est effectuée par un test paramétrique d'analyse de variances (ANOVA) suivi d'un classement des moyennes de Tukey.

En fin et pour déterminer les relations entre les variations des marqueurs biologiques et les paramètres d'exposition, nous avons appliqué une méthode statistique multi variée qui est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode qui permet l'étude des corrélations entre les différentes variables numériques (**Dagnelie, 1999**) était réalisé avec le logicielle R, version 3.3 (**Core Team, 2016**).

Chapitre III.

Résultats et Discussion

Dans cette partie nous avons présenté les travaux réalisés sur l'accumulation des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ainsi que les résultats obtenus concernant l'évaluation de l'accumulation des poussières (PM) et les d'autre paramètres physiologiques (chlorophylle et proline) mesurés.

I. Paramètres de pollution

I.1. Evaluation de l'accumulation des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) par *Brassica oleracea*

Le diagramme de la (Fig.13) montre clairement l'existence d'une différence de variation des concentrations moyennes des HAP accumulés par *Brassica oleracea* selon les stations d'exposition de la plante. Ainsi, la concentration moyenne maximale de $(80 \pm 10 \text{ ng/g})$ qui est enregistrée au niveau de la station d'Aamriw est 6 fois supérieure à celle de la station témoin qui représente la concentration moyenne la plus basse et qui est estimée à $(13 \pm 5 \text{ ng/g})$.

Les concentrations moyennes des HAP, calculées pour les stations (Centre-ville, Port, Sidi Ahmed et Gare routière), varient entre (47 et 63 ng/g) et sont assez similaires entre elles.

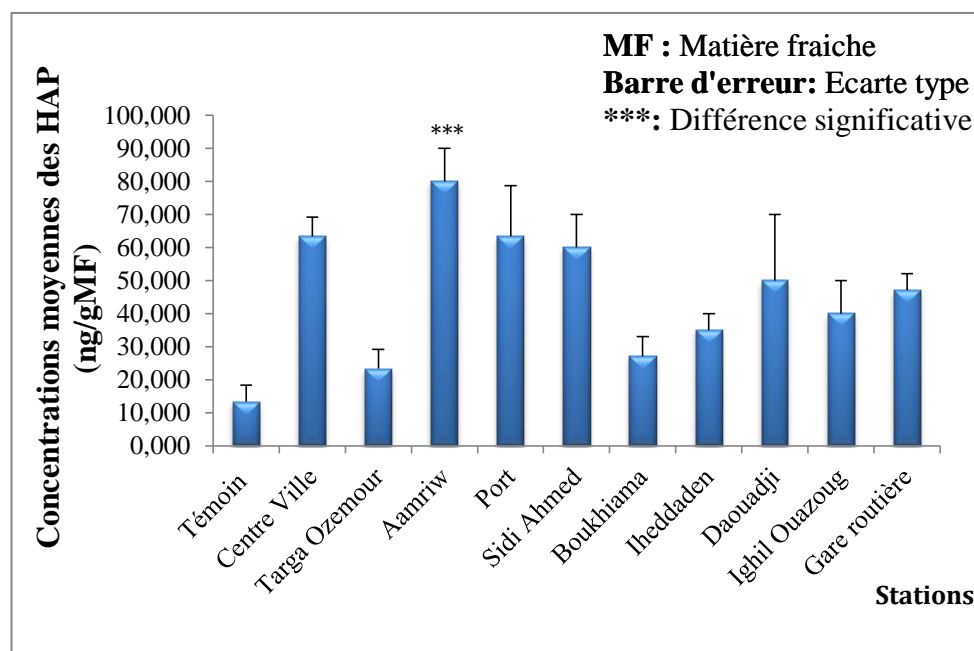


Figure 13. Variation des concentrations moyennes des HAP (ng/g MF) accumulés par le chou frisé (*Brassica oleracea*) en fonction des stations dans la ville de Béjaïa.

Aussi les autres stations d'Iheddaden, Ighil Ouazoug, Boukhiana, Daouadji et de Targa Ouzemour, montrent leurs concentrations moyennes similaires qui y sont calculées varient entre (23 et 35 ng/g).

Le test d'homogénéité de Bartlett a donné une p-value de l'ordre de (0,995), et que le test de la normalité de Shapiro (**Annexe 04**) a donnée des p-value supérieure à 0.05 pour toutes les stations, ce qui montre que les valeurs de toutes les stations suivent la loi normale, donc on a réalisé le test de ANOVA qui permet de mettre en évidence un effet hautement significatif des stations sur l'accumulation des HAP (P-value=0,0000*** et F= 20,978).

Pour compléter le test de l'ANOVA, on a utilisé le test de Tukey qui indique des différences hautement significative entre la station témoin et les stations: Centre-ville ; Aamriw ; port ; sidi Ahmed et Gare routière, qui sont respectivement de ; 0,000206 ; 0.000201 ; 0.000206 ; 0.000218 ; 0.002616.

I.2.Evaluation de l'accumulation des poussières (PM)par *Brassica oleracea*

La (Fig.14) représente les variations des concentrations moyennes des poussières (PM) accumulés par le chou frisé (*Brassica oleracea*) de chaque station échantillonnée.

D'après le diagramme de la figure ci-dessous, on constate que la concentration moyenne minimale de l'ordre de $290 \pm 25.16 \mu\text{g/g}$, est enregistrée au niveau de la station témoin et que la concentration moyenne maximale de l'ordre de $739 \pm 18.027 \mu\text{g/g}$, est enregistrée au niveau de la station Gare routière.

D'autres concentrations moyennes convergentes de $(357 \pm 66.30) \mu\text{g/g}$, $(412,67 \pm 124.428) \mu\text{g/g}$, $(488,67 \pm 226.61) \mu\text{g/g}$, $(505 \pm 78.619) \mu\text{g/g}$, $(664 \pm 9.643) \mu\text{g/g}$, $(695,67 \pm 46.758) \mu\text{g/g}$, $(698 \pm 94.429) \mu\text{g/g}$, $(699,33 \pm 52.814) \mu\text{g/g}$ et $(719,33 \pm 43.844) \mu\text{g/g}$ ont été enregistrées successivement dans les stations (Targa Ouzemour, Iheddaden, Ighil Ouazoug, Daouadji, Aamriw, Boukhiana, Port, Sidi Ahmed, et Centre-ville).

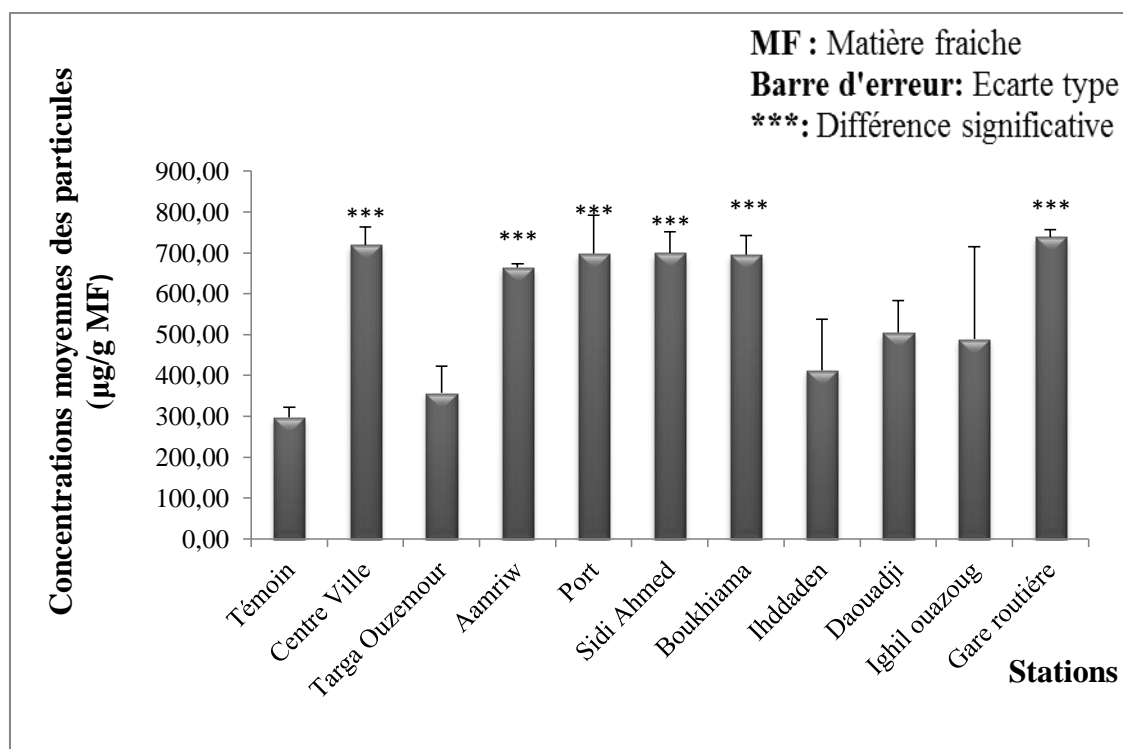


Figure 14. Variations des concentrations moyennes des poussières (PM) en ($\mu\text{g/g MF}$) accumulés par *Brassica oleracea* en fonction des stations dans la région de Béjaïa ville.

Puisque le test d'homogénéité de Bartlett a donné une p-value de l'ordre de ($p=0,021$) et que le test de la normalité de Shapiro (**annexe 04**) a montré que toutes les valeurs des PM de station suivent la loi normale.

Après l'application du test ANOVA (convenable à ces conditions), nous avons obtenu un résultat avec une différence hautement significative entre les ($p < 0.00000$).

Par la suite, l'application du test de Tukey a donné des différences significatives entre le témoin et les stations (Centre-ville, Aamriw, Port, Sidi Ahmed, Boukhiana et Gare routière). Les p-values affichées sont successivement de l'ordre de (0.0013 ; 0.0017 ; 0.0027 ; 0.0025 ; 0.0029 ; 0.00075).

II. Paramètres physiologiques

II.1. Dosage de la chlorophylle

Le dosage de la chlorophylle (Chl a, Chl b et Chl ab) a été effectuée sur les feuilles de *Brassica oleracea*.

II.1.1. Dosage de la chlorophylle a (Chl a) chez *Brassica oleracea*

La (Fig.15) montre les concentrations de la chlorophylle (a) varie en fonction des stations d'échantillonnage. On a observé des faibles concentrations en chlorophylle (a) chez les dix (10) stations de Béjaïa ville par rapport à la station témoin. D'après le diagramme de la figure 16, la concentration moyenne minimale et qui est de l'ordre de ($1,2 \pm \mu\text{g/g MF}$) est enregistrée au niveau de la station Gare routière.

Les autres concentrations moyennes ($1,5 \pm 1.164$) $\mu\text{g/g MF}$ à Targa Ouzemour, $1,69 \pm 0.610$ $\mu\text{g/g MF}$ à Boukhiana, ($1,96 \pm 0.324$) $\mu\text{g/g MF}$ à Aamriw, ($2,06 \pm 0.247$) $\mu\text{g/g MF}$ à Iheddaden, ($2,11 \pm 0.919$) $\mu\text{g/g MF}$ à Sidi Ahmed, ($2,60 \pm 0.243$) $\mu\text{g/g MF}$ à la station de Port, ($2,65 \pm 0.066$) $\mu\text{g/g MF}$ à la station de Centre-ville, ($3,05 \pm 0.331$) $\mu\text{g/g MF}$ à Daouadji et (3.077 ± 0.644) $\mu\text{g/g MF}$ à Ighil Ouazoug restent toutes inférieures à (4.8 ± 0.256) $\mu\text{g/g MF}$ qui est la moyenne maximale enregistrée au niveau de la station Témoin.

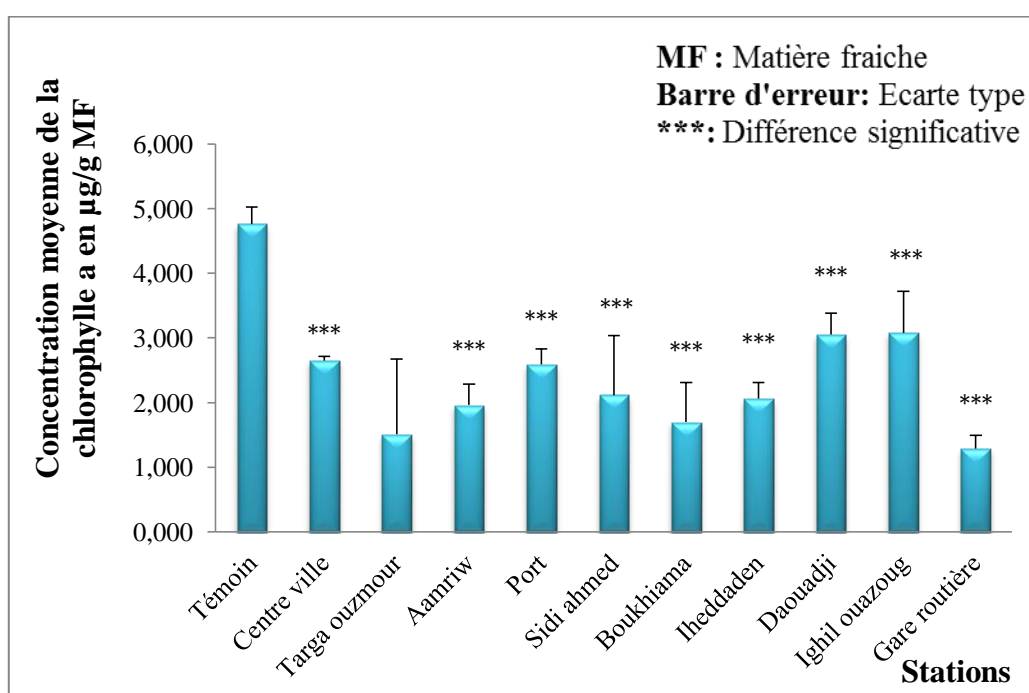


Figure 15. Variation des concentrations moyennes de la chlorophylle a ($\mu\text{g/g MF}$) en fonction des stations d'échantillon chez *Brassica oleracea* dans la région de Béjaïa ville.

Le test d'homogénéité de Bartlett, appliquées sur les valeurs de la chlorophylle a (Chla), a donné une p-value de l'ordre de 0.1304. Le test de la normalité de Shapiro (annexe 04) a donnée des p-value supérieures à 0.05 pour toutes les stations. Ce qui signifie que les valeurs de toutes les stations ne suivent pas la loi normale.

Le test d'ANOVA a donné des différences hautement significatives ($p < 0.0000$) **** entre les concentrations de la chlorophylle a selon les stations d'exposition de nos plants de chou frisé.

Selon le test de Tukey, la concentration moyenne de la Chla calculée à partir des valeurs enregistrées au niveau de la station témoin qui montre des différences significatives avec toutes les autres stations (centre-ville, Targa Ouzemour, Port, Sidi Ahmed, Boukhiana, Iheddaden, Daouadji et Ighil Ouazoug) avec des p-value qui sont successivement de l'ordre de (0,0021 ; 0,000193 ; 0,0016 ; 0,00026 ; 0,000196 ; 0,00024 ; 0,0019 et 0,021).

II.1.2 Dosage de la chlorophylle b (Chl b) chez *Brassica oleracea*

De même que pour la chlorophylle a, on a observé de faibles concentrations en chlorophylle b dans les dix (10) stations d'échantillonnage par rapport à la station témoin.

D'après le diagramme de la (Fig.16), la valeur minimale de (0.564 ± 0.058) $\mu\text{g/g MF}$ est enregistrée simultanément au niveau de la station Gare routière alors que la valeur maximale (2.80 ± 0.175) $\mu\text{g/g MF}$ est enregistrée au niveau de la station Témoin.

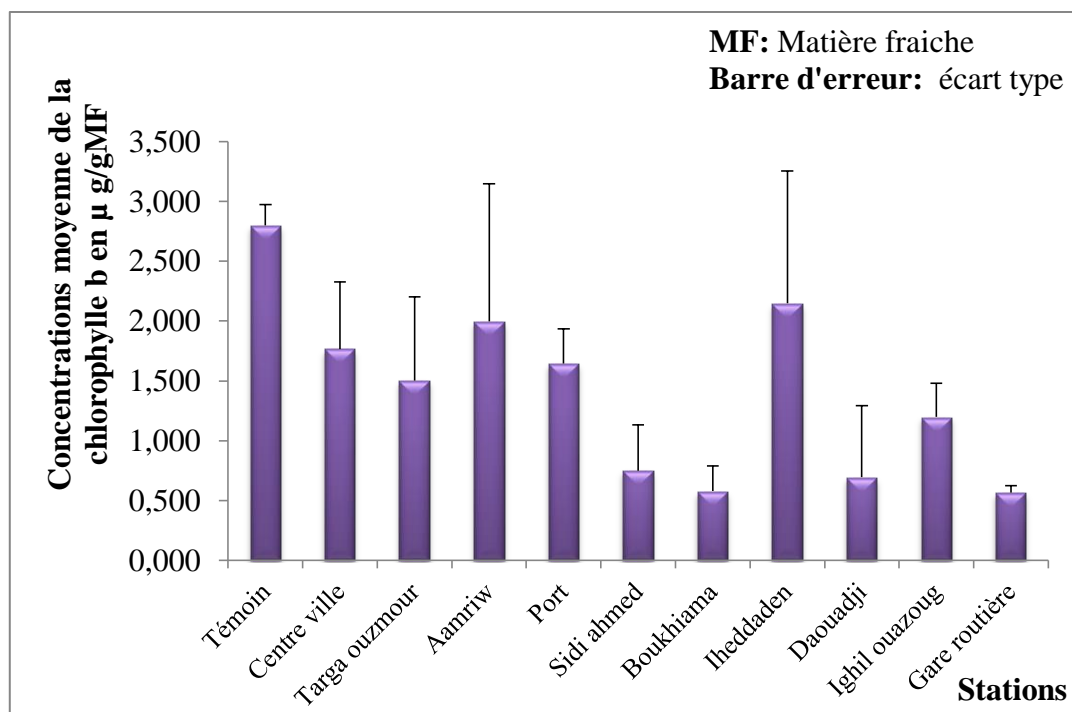


Figure 16. Variation des concentrations moyennes de la chlorophylle b ($\mu\text{g/g MF}$) en fonction des stations d'échantillonnage chez *Brassica oleracea* dans la ville de Béjaïa.

Après avoir appliqué le test de Bartlett sur nos données qui a confirmé l'homogénéité des variances avec une $p=0,0024$, nous avons opté pour le test de Kruskal Wallis et ne pas le

test de l'ANOVA car il s'est avéré que la distribution des valeurs de certaines stations. Elles ont avec le test de Shapiro, ces stations ont affiché des p-value inférieures à 0.05

Le test de Kruskal Wallis a donné des différences non significatives ($p=0,056$) de la chlorophylle b. Donc on n'a pas poussé l'analyse avec le test de Tukey.

2.1.3. Dosage de la chlorophylle ab chez *Brassica oleracea*

D'après la (Fig.17) ci-dessous, les résultats obtenus du dosage de la chlorophylle ab indiquent des variations bien distinctes entre les stations. En effet, la moyenne maximale est enregistrée au niveau de la station témoins. On a remarqué que le teneur de la chlorophylle (ab) suit la même tendance que la chlorophylle (a) et (b).

Nous constatons que les teneurs de la chlorophylle (ab) enregistrées au niveau des sites d'exposition de nos plants de chou, sont toutes inférieures par rapport au témoin qui présente la teneur la plus élevée ($9,630 \pm 0.623 \mu\text{g/g}$).

En effet, d'autres valeurs plus au moins élevées sont enregistrées aux niveaux des stations : Ighil Ouazoug, Daouadji, Centre-ville et Port qui sont successivement de ($6,230 \pm 1.317 \mu\text{g/g}$) ; ($5,900 \pm 0.470 \mu\text{g/g}$) ; ($5,780 \pm 0.317 \mu\text{g/g}$) ; ($5,603 \pm 0.454 \mu\text{g/g}$).

D'autres valeurs plus au moins basses, ont été enregistrées aux niveaux des stations : Iheddaden ; Aamriw ; Sidi Ahmed ; Boukhiamia ; Targa Ouzemour et Gare routière et qui sont respectivement de ($4,928 \pm 0.482 \mu\text{g/g}$) ; ($4,663 \pm 0.310 \mu\text{g/g}$) ; ($4,237 \pm 1.875 \mu\text{g/g}$) ; ($3,388 \pm 1.219 \mu\text{g/g}$) ; ($3.286 \pm 2.340 \mu\text{g/g}$) et ($2,639 \pm 0.397 \mu\text{g/g}$).

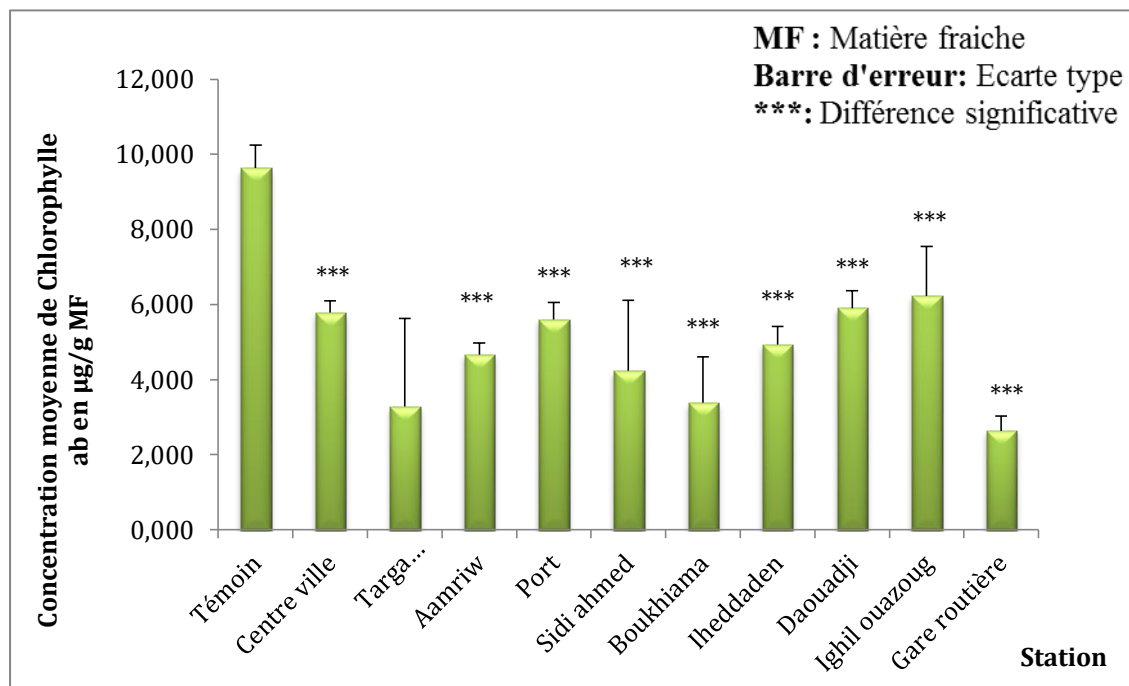


Figure 17. Variation des concentrations moyennes de chlorophylle ab ($\mu\text{g/g}$ MF) accumulés par le chou frisé (*Brassica oleracea*) en fonction des stations dans la région de la ville Béjaïa

Ces résultats trouvent leur confirmation dans le test de l'ANOVA qui a donné un effet très hautement significatif de ($P\text{-value} = 0,00002^{***}$ et $F = 8,2117$).

Comme d'habitude et avant d'appliquer ce test statistique paramétrique de l'ANOVA, nous avons d'abord vérifié les conditions de son application. Nous avons ainsi appliqué le test d'homogénéité de Bartlett qui a donné une p-value de l'ordre de 0,044 et le test de normalité de Shapiro-Wilk's (**Annexe 04**) qui a donnée des p-values supérieure à 0,05 pour toutes les stations ce que montre que les valeurs de toutes les stations suivent la loi normale.

En poursuivant l'analyse avec le test de Tukey, nous avons obtenu des différences significatives entre la station témoin et toutes les autres stations ($p\text{-value}$ toujours $< 0,05$).

2.2. Dosage de la proline

Les résultats de la teneur en proline chez *Brassica oleracea*, illustrés par la (Fig.18), montrent une légère variation entre les différentes stations. Mais il reste que la station du témoin marque la concentration moyenne la plus basse (4.395 ± 0.058 ng/g).

Des valeurs un plus élevées sont enregistrées au niveau des stations suivantes : Boukhiana ; Sidi Ahmed ; Iheddaden et Centre-ville. Elles sont respectivement de (9.576 ± 0.293 ng/g) ; (9.093 ± 0.526 ng/g) ; (8.630 ± 0.584 ng/g) ; (7.838 ± 1.588 ng/g).

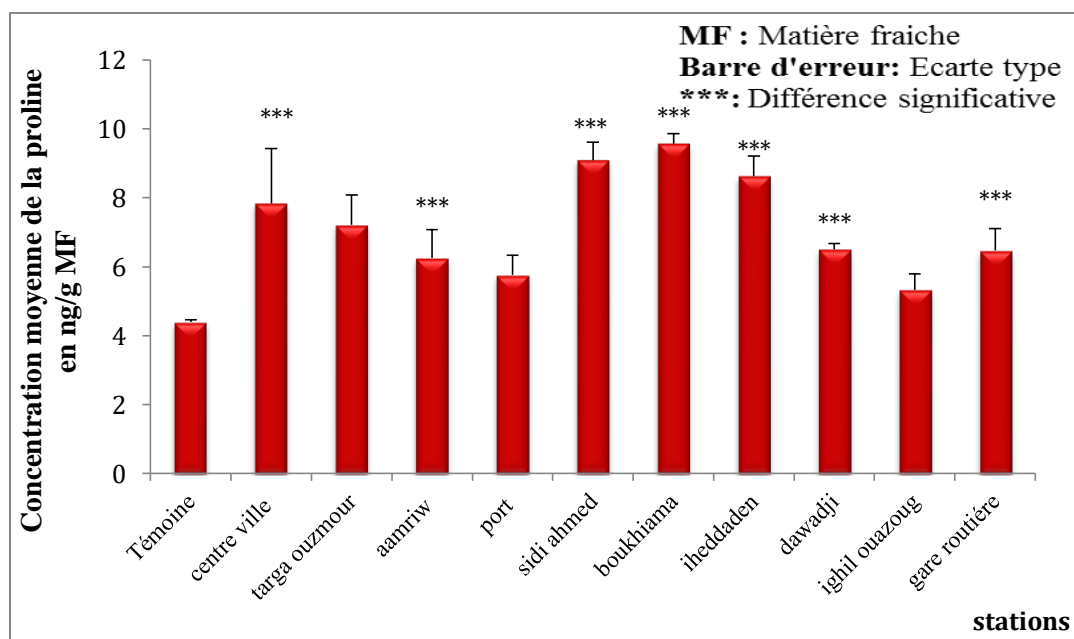


Figure 18. Variation des concentrations moyennes de proline ($\mu\text{g/g}$ MF) accumulés par le chou frisé (*Brassica oleracea*) en fonction des stations dans la ville de Béjaïa

Le test d'homogénéité de Bartlett a donné une p-value de l'ordre de 0,13 et le test de la normalité de Shapiro (**Annexe 04**) a donnée des p-value supérieure à 0,05 pour toutes les stations. Ce qui montre que les valeurs de toutes les stations suivent la loi normale. Donc on a réalisé le test d'ANOVA.

L'ANOVA appliquée sur les données de la proline de nos échantillons a donné un résultat très hautement significatif ($F= 17,096$ et $p\text{-value} < 0,001$).

Dans ce cas de dosage de la proline, le test de Tukey a montré des différences significatives entre la station Témoin et les stations : Centre-ville, Aamriw, Sidi Ahmed, Daouadji et Gare routière avec des p-values qui successivement de l'ordre de (0.000206 ; 0.020052 ; 0.000201 ; 0.006933 ; 0.008341).

III. Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse de Composante Principale a été effectuée sur les onze stations d'étude pour les six paramètres étudiés. Cela pour mettre en évidence les relations existantes entre les différentes paramètres (HAP, PM, Proline et Chlorophylle a ; b et ab) à l'aide d'un cercle de corrélation (Fig.19)

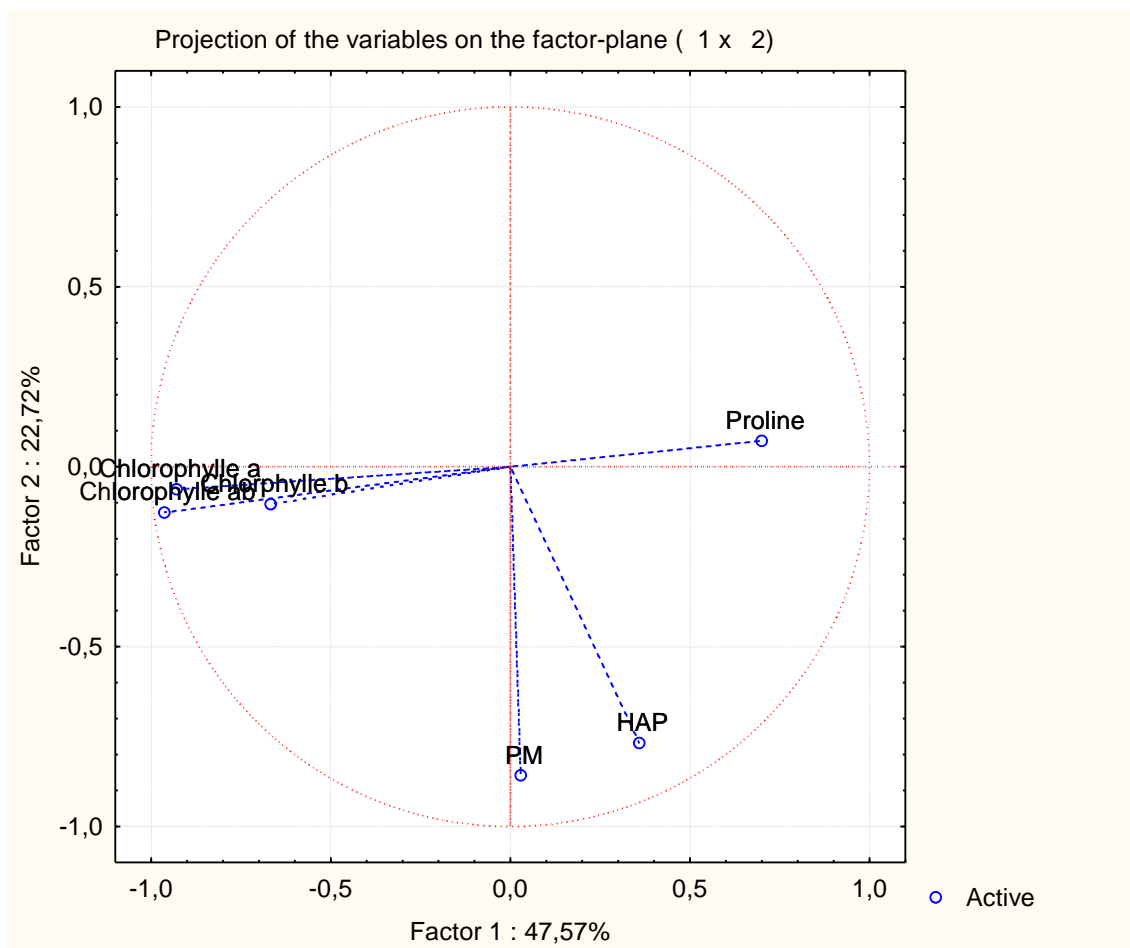


Figure 19. Cercle de corrélation des polluants atmosphériques (HAP et PM) avec les paramètres physiologiques (proline et chlorophylle a ; b et ab) mesurés sur le chou frisé (*Brassica oleracea*) dans la région de Béjaïa ville.

Les deux axes de cette analyse permettent d’expliquer 70.29% de l’information. Le premier axe contribuant avec 47.57% et le deuxième avec 22.72% (Fig.19).

Le premier axe d’ACP principale qui contient (47.57%) est corrélé négativement avec les paramètres de la chlorophylle : Chl a ($r=-0,924959$), Chl b ($r=-0,673457$) et Chl ab ($r=-0,964313$).

Il est par contre corrélé positivement avec les variables suivantes : PM ($r= -0,007151$), HAP ($r= 0,234541$) et proline ($r= 0,715906$) (Tab. 8).

Tableau 8. Corrélation des paramètres mesurés avec les deux axes de cercle de corrélation

Paramètre	Factor 1	Factor 2
PM	0,030	-0,86
HAP	0,36	-0,77

Pro	0,70	0,07
Chl a	-0,93	-0,062
Chl b	-0,67	-0,10
Chl ab	-0,96	-0,13

Concernant le deuxième axe, il explique à lui seul 22.72% de la variation totale. Cet axe présente une corrélation négative avec les variables (PM, HAP, Chl a, Chl b et Chl ab) avec les coefficients de corrélation qui sont successivement de l'ordre de (-0.86 ; -0.77 ; -0.06 ; -0.10 ; -0.13). Il est par contre corrélé positivement avec le variable suivent : pro (r = 0.07) (Tab.8).

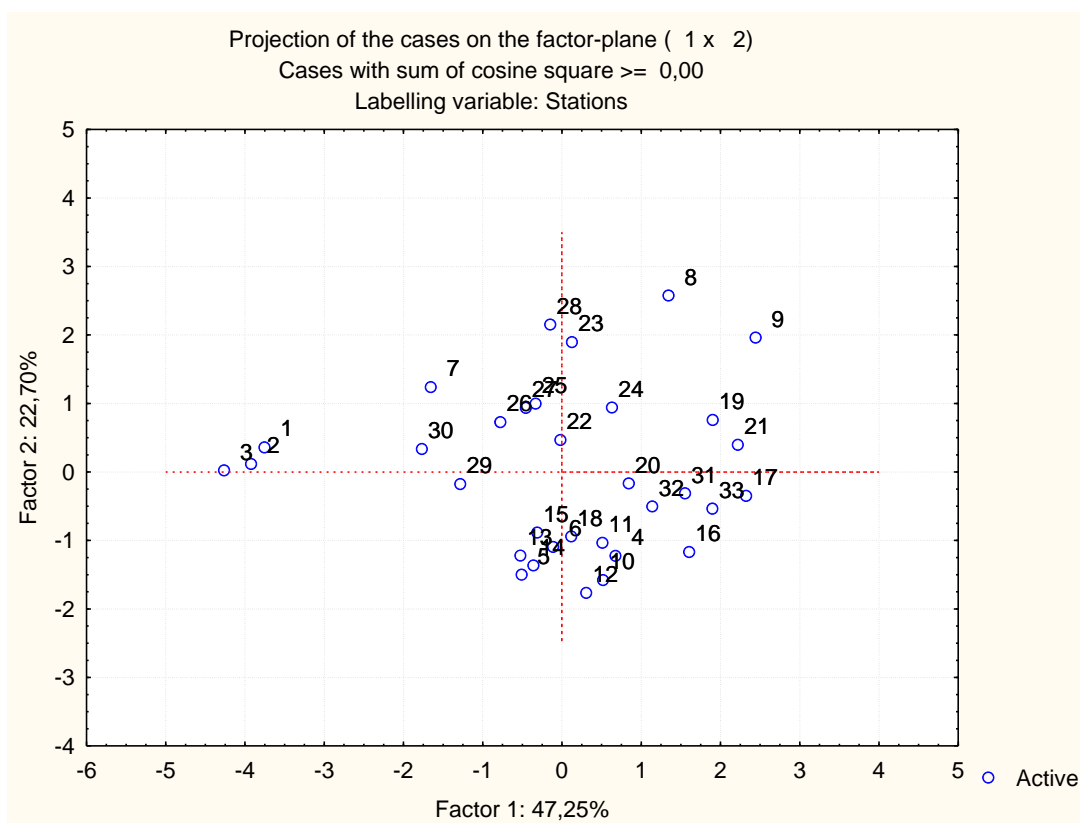


Figure 20. Distribution des individus de l'ACP

Selon la distribution des individus des 11 stations (Fig.20), on remarque clairement que les individus (1,2 et 3) de la station « Témoin » forment un nuage de points à part. Ce qui confirme les résultats précédents trouvés par le test de l'ANOVA ; l'existence de différences significatives entre les stations et le témoin et cela par rapport à tous les paramètres sauf la chlorophylle b.

Les prélèvements (7, 8 et 9) de la station «Targa Ouzemour» sont différents, parce que les échantillons ont été ravagés par les chenilles.

Discussion

Les résultats obtenus à partir des études réalisées sur la bioaccumulation de la pollution atmosphérique des HAPs et les PM par le chou frisé (*Brassica oleracea*) au niveau des onze stations dans la région de Béjaïa ville. Ont démontré des teneurs importantes en HAP et PM accumulées. Par ailleurs, ces résultats ont dégagé des différences significatives à très hautement significatives entre les stations sur l'accumulation des polluants.

Les teneurs en HAP enregistrées dans les différentes stations de Béjaïa ville sont très variables. Elles sont généralement élevées par rapport à la teneur enregistrée dans la station Témoin.

On constate que l'accumulation des HAP est forte dans les stations (Aamriw, centre-ville, Port, Sidi Ahmed et Gare routière) en raison de ces localisations à proximité des zones industrielles et des axes routiers à fort trafic automobile, qui sont donc représentées comme des sites urbains et suburbains.

Les teneurs des HAPs accumulés par *Brassica oleracea* sont compris entre (13 et 80 ng/g). Nos valeurs sont assez similaires aux résultats obtenus dans les programmes de biosurveillance ceux de (Franzaring et al., 1992), qui ont des teneurs respectivement variées entre (0.05 et 100 ng/g), au niveau des zones partiellement industrialisées.

Les teneurs des PM les plus élevées sont enregistrées au niveau des stations gare routière, centre ville, port, sidi ahmed, boukhiamia et aamriw en raison de ces proximités des zones industrielles (pour gare routière, port et centre ville) et des zones urbaines qui sont à proximité des axes routiers.

La perturbation de l'environnement touche en premier lieu les caractères morphologiques et physiologiques du végétal. Pour cela on a étudié les paramètres physiologiques (la chlorophylle a, b, ab et la proline).

La teneur en chlorophylle est le critère le plus utilisé pour quantifier l'état général de la plante, c'est un excellent biomarqueur de pollution (Tripathi et Tripathi, 1999).

D'une manière globale la chlorophylle (a), la chlorophylle (b) et la chlorophylle (ab) suivent la même tendance. Toutes fois, nous avons constaté une diminution de la chlorophylle dans toutes les stations variées entre (0.56 et 6.23 µg/g) par rapport à la teneur enregistrée dans la station Témoin qui varie entre (2.80 et 9.63 µg/g). Ceci est probablement dû à un déséquilibre du mécanisme photosynthétique engendré par les émissions de poussière et gaz.

Selon Erne et Lannoye (1991), l'altération de l'état physiologique des plantes, causée par des conditions défavorables de l'environnement, se reflète rapidement au niveau des signaux lumineux et thermiques émis par les feuilles (**Benterrouche., 2006**).

Le métabolisme de la chlorophylle est certainement le processus biochimique le plus visible chez les végétaux. Sa biosynthèse laisse apparaître la couleur verte des plantes ; tandis que sa dégradation se manifeste par la perte du pigment (**Folly, 2000**).

Le taux de la proline enregistré chez *Brassica oleracea* est plus élevé qui sont varié entre (4,39 et 9,57 ng/g) dans toutes les stations par rapport à la teneur enregistré dans la station Témoin en raison des dommages et de stress provoqués par les polluants (HAP et PM).

Cette augmentation du taux de proline peut être expliquée selon (**Lagadic et al., 1997 ; Ober et Sharp, 1994**), par un effet de stress chez la plante, ce dernier augmente en fonction du temps de l'exposition et de la concentration des polluants, ce qui confirme l'importance de la proline dans la révélation d'un état de stress et de perturbation.

L'élévation de la teneur en proline au niveau des stations est due à une contrainte environnementale. Effectivement, cet acide aminé est synthétisée lorsque le végétale est en stress en appliquant par conséquence une perturbation de son métabolisme, et notamment le métabolisme des acides aminés libres dont la proline constitue un marqueur de résistance des plantes aux contraintes environnementale (**Delauney et Verma., 1993 cité par et Bouchoukh., 2010 et Ben Rejeb et al., 2012**).

Notre étude nous a permis de constater que l'espèce, comme l'analyse de la variance vient de le montrer (différence très hautement significatif), représentent une variation avec une augmentation de la teneur de ce paramètre, ceci est dû probablement à une réponse d'une contrainte environnementale.

Conclusion

Le but de notre travail est basé essentiellement sur l'évaluation de la pollution atmosphérique qui représente aujourd'hui un facteur majeur de dégradation de l'environnement et qui affecte l'ensemble de la planète. En effet, la biosurveillance est une approche nécessaire pour l'identification et la quantification des polluants atmosphériques associés soit au trafic routier soit aux activités industrielles dans la ville de Bejaïa à l'aide d'une espèce végétale qui est le chou frisé *Brassica oleracea*.

La pollution atmosphérique cause un stress entraînant aux perturbations des caractéristiques physiologiques du végétal touché. C'est pour cette raison on s'est focalisé au cours de cette étude sur le suivi de polluants organiques HAP, poussières (PM) et de l'état physiologiques à travers la mesure des variations quantitatives de différents paramètres qui sont principalement la teneur en chlorophylle (a, b et ab) et la proline.

Les polluants atmosphériques peuvent pénétrer majoritairement dans les feuilles. En effet, ils résultent des changements qui se diffèrent d'une station à l'autre.

Les résultats obtenus montrent que :

La bioaccumulation de la pollution atmosphérique par les HAP et les PM d'origine automobile ou industrielle et leurs impacts sur la végétation ont montré des concentrations importantes en HAP (13 à 80 ng/g) et PM (290 à 739 µg/g) accumulés par le chou frisé.

Les teneurs en chlorophylle chez le chou frisé ont tendance à diminuer dans les sites fortement pollués (0,564 à 5,9 µg/g) à cause de la perturbation du processus photosynthétique ainsi que la dégradation de la matière fraîche. Alors que, la teneur en proline a tendance à augmenter (7,838 ng/g) à cause du l'équilibre métabolique perturbé de celle-ci par les conditions défavorables du milieu.

La variation spatiale entre les différentes stations était prouvée par le test de l'ANOVA qui a donné une différence significative à très hautement significative pour les quantités accumulées des HAP ($F= 18,9648$, $p\text{-value}= 0,000000$) et des PM ($F=6,385$, $p\text{-value}= 0,000147$).

De même, les concentrations des paramètres physiologiques à part celle de la chlorophylle b, ont toutes montré des variations spatiales ; la chlorophylle a ($F= 10,0349$, $p\text{-value}= 0,000004$), chlorophylle b ($F= 2,22596$, $p\text{-value}=0,056594$), chlorophylle ab ($F= 8,2117$, $p\text{-value}= 0,000022$), et la proline ($F= 20,417$, $p\text{-value}= 0,000000$).

En plus le témoin a toujours montré des différences significatives avec les autres stations.

Le test de l'ACP (analyse de composante principale) a mis en évidence des corrélations spatiales entre les paramètres physiologiques (Chl a, Chl b, Chl ab et la proline) et la quantité des HAP et des PM accumulés.

La chlorophylle ab est corrélée positivement avec chlorophylle a ($r=0,96$) et la chlorophylle b ($r=0,63$) et négativement avec la proline ($r=-0,53$), les HAP ($r=-0,5$) et les PM ($r=-0,49$). Les HAP corrélaient positivement avec les PM ($r=0,54$).

Au cours des travaux réalisés pour l'obtention de ce modeste travail, plusieurs obstacles ont été rencontrés, d'abord sur le plan matériel :

- Malgré que notre faculté détienne de deux appareils Soxhlet, nous en n'avions pas l'accès pour absence de la hotte.
- Nous n'avions pas pu obtenir les données météorologiques actuelles de leur source (station météorologique de Béjaïa) malgré qu'on nous ait accordées notre demande au départ.
- Manques de matériel de laboratoire et quantités des réactifs insuffisantes.

Et puis le temps court qui nous a été accordé est une autre contrainte qui n'a pas permis de travailler dans des bonnes conditions.

Au terme de ce travail qui a traité le sujet de la pollution atmosphérique dans la ville de Béjaïa, nous pouvons conclure que le secteur du transport accentue ce phénomène qui exerce à son tour des effets négatifs sur les paramètres physiologiques des végétaux. Ainsi que, la biosurveillance reste une méthode d'évaluation très utile, simple et moins coûteuse pour faire face à ce danger.

Pour les prochaines recherches nous proposons les perspectives suivantes :

- Utiliser d'autres espèces ou d'autres organes de plantes.
- Augmenter le nombre des campagnes de prélèvement et les stations.
- Étudier d'autres paramètres biologiques.
- Il serait intéressant de prendre des zones de référence 100 % sans trafic routier pour que la comparaison des résultats nous porte plus d'information.
- Il sera aussi intéressant de prendre des zones de références à un pourcentage très élevé pour que la comparaison des résultats puisse nous donner plus d'information.
- Faire des études dans la période hivernale pour étudier les effets saisonniers de cette pollution.

- Élargir l'espace d'étude toute en impliquant d'autre régions pourquoi pas d'autre wilaya.
- Faire une autre étude complémentaire visant les polluants inorganiques (métaux lourds) au niveau des mêmes sites.
- En fin, il est insuffisant de quantifier les HAP et les poussières, pour cette raison, on propose de faire leur caractérisation chimique.

- Abdel-Shafy H.I., Mansour M. (2015). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt. J. Petrol.* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>).
- Abdessemed., S. (2009). Comportement des semis du Cèdre de l'Atlas en conditions de stress thermique. Mémoire de Magistère. Université de Constantine, 112-140p.
- Amigo, J. R. (2011). Study of geographical trends of polycyclic aromatic hydrocarbons using pine needles. *Atmos. Environ.* 45, 5988–5996.
- Anonyme, S. (2005). OEPP Organisation Européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes. Directives sur la bonne pratique phytosanitaire légumes du genre brassica. P2.
- Anthony, U. (2003). Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources. Thèse doctorat d' Université Paris 7 – Denis Diderot : 9-13.
- Aouragh, L (2015). Etude de la qualité de l'air urbain au niveau de la ville de Batna: cas du transport routier. Thèse de doctorat Batna. Univ de Ourgla. 128p.
- Augusto, S. M. (2010). Lichens as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: A comparison with soil, air and pine needles. *Environ. Pollut.* 158, 483–489.
- Azegagh A. (2006). Etude de l'herpétofaune dans les zones humides de la basse vallée de la Soummam (Béjaia, centre nord-est algérien). Mém. Ing d'Etat en Ecologie et Environnement, Univ. A-Mira de Béjaia, Algérie, 79p.
- Baroudi, F. (2020). Etude comparative de trois biomoniteurs (conifère, escargot et miel) pour évaluer la variabilité spatio-temporelle de polluants organiques dans l'atmosphère au Liban. thèse de Doctorat. Univ. de Strasbourg. Chimie Analytique. 236p
- Barreca, S. M. (2014). Polychlorinated biphenyls in sediments from Sicilian coastal area (Scoglitti) using automated soxhlet, GC-MS, and principal component analysis. *Polycycl. Aromat. Comp.* 34, 237-262. .
- Belis, C. (2009). A comparison of Alpine emissions to forest soil and spruce needle loads for persistent organic pollutants (POPs): Persistent Organic Pollutants in Mountainous Areas. *Environ. Pollut.*, 157, 3185–3191.
- Bénard., a. (2004). Utilisation d'une technique de biosurveillance pour évaluer les retombées de métaux lourds. Lille.
- Bendadouche, H. (2014). Une méthodologie de cartographie des zones potentiellement instables. application à la région de Béjaia, Algérie. bejaia. 19p
- Benhachem, F., Harrache, Dj., Naffrechoux, E. (2014). Caractérisation et étude du transfert des HAP en milieu karstique de moyenne montagne : Cas de la forêt d'Hafir –Tlemcen (Ouest algérien). 8p
- Benterrouche, I. (2006). Réponses écophysiologicals d'essences forestières urbaines soumises à une fertilisation avec les boues d'épuration, 82-86.
- Besse, J. (2012). Caged *Gammarus fossarum* (Crustacea) as a robust tool for the characterization of bioavailable contamination levels in continental waters: Towards the

- determination of threshold values. *Water Research* 47, 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012>.
- Blandin, p. (1986). Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bulletin d'écologie*, Tome 17, n°4. Travail réalisé dans le cadre des activités de l'association "Atelier vert de la forêt de Fontainebleau". *Contrat du Ministère de l'Environnement*, 82-160.
- Bloch-Dano, E. (2008). *La fabuleuse histoire des légumes*. Agrées de lettres modernes. édition. Grasset.former library book. 37-3381.
- Bohan, D. Next-Generation Global Biomonitoring: Large-scale, Automated Reconstruction of Ecological Networks. *Trends in Ecology & Evolution* 32, 477–487.
- Bostti, B. L. (2007). occupational exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons, and respiratory and urinary tract cancers: a quantitative review to 2005. *Ann oncol* . 18(3):431-46.
- Bouchoukh., I. (2010). Comportement écophysiological de deux Chénopodiacées des genres *Atriplex* et *Spinacia* soumises au stress salin.112p.
- Bouebdelli, T. (2020). Contribution à l'étude de dispersion des principaux polluants atmosphériques à Tunis. Doctoral dissertation . Univ de Tunis el Manar.112p
- Castell, J-F. (2017). Biosurveillance de la qualité de l'air.UMR écosys. INRA-AgroParisTech. Présentation. 16p.
- Chen, T. W. (2008). Assessing inhalatory and dermal exposures and their resultant health-risks for workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contained in oil mists in a fastener manufacturing industry. *Environment international*. 34(7):971-5.
- Cresbo, A. (2009). Présence et sources des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans le bassin d'arcachon.Thèse de Doctorat de Géochimie et écotoxicologie.Univ de Bordeaux.458p
- Crous KI, V. K. (2006). Physiological responses to cumulative ozone uptake in two white clover (*Trifolium repens* L. cv. Regal) clones with different ozone sensitivity. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3): 169-179.
- Dabestani, R. I. (1999). A Compilation of Physical, Spectroscopic and Photophysical Properties of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Photochemistry and Photobiology* 70 (1), 10-34.
- Dagnelie, P. (1999). *Statistique théorique et appliquée. Tome2 : inférence statistique à une et à deux dimensions*. Bruxelles-Université de Boeck et Larcier, 659p.
- Dan-badjo, T. (2007). Modalité de contamination du ray-grass par les éléments du groupe platine et les hydrocarbures aromatique polycycliques à proximité des voies routières. Thèse de doctorat.Lorraine, Sciences Agronomiques, 137p.
- De Nicola, F. C. (2011). Biomonitoring of PAHs by using *Quercus ilex* leaves: Source diagnostic and toxicity assessment. *Atmos. Environ.* 45, 1428–1433.
- De Nicola, F. M. (2005). Temporal variations in PAH concentrations in *Quercus ilex* L. (holm oak) leaves in an urban area. *Chemosphere* 61, 432–440.
- Diaf N. (2003). Paramètres Influençant la Dispersion des Polluants Gazeux. Laboratoire De Matériaux & Energies renouvelables.Faculté des sciences. Univ. de Tlemcen. 139-142.
- Duché, S. (2014). La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques. Thèse de doctorat, géographie- dynamique des milieux et risques, Université Paris-Diderot - Paris VII, Français, 226p.

- Dupuy, J. (2014). Interactions entre les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les plantes supérieures : prélèvement et réponses toxiques. thèse de doctorat. Univ de Lorraine. 250p.
- Elichegaray, C. (2008). la pollution de l'air : sources, effet, prévention. Dunod. 211p
- Ellis, K. (1987). Dynamic-model for radionuclide uptake in lichen. Journal of Environmental Radioactivity activity. 5: 185-208.
- Emmanuel., G. (1998). Etat de l'air pour l'étude des impacts des transports routiers a proximité des autoroutes .Ed. ADEME 144p.
- Éric, B. (2020). Petite et grande histoire des légumes« Carnets de sciences ». Quæ, coll.« Carnets de sciences ».
- Eskilsson, C. B. (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. J. Chromatogr. A 902, 227-250.
- Fabure, J. (2009). Étude de l'accumulation et des effets des composés organiques volatils (BTEX) chez les bryophytes. Thèse de doctorat. Univ. de Lille nord de France. 295p
- Fernández, P. C. (2005). Persistent organic pollutants in remote freshwater. Research article. Départ. of envi.chemistry. Jordi Girona 18-26, E-08034.
- Fernandez, P. J. (2002). "Atmospheric gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in high mountain regions of Europe." Environmental Science & Technology 36: 1162-1168.
- Foan, L. (2015). Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: Comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study. Chemosphere 119, 452–458.
- Folly, P. (2000). Catabolisme de la chlorophylle b : Structures, mécanismes et synthèses. Thèse de doctorat. Univ. Fribourg (Suisse), 185p.
- Franzaring, J., Bierl, R., & Ruthsatz, B. (1992). Active biological monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons using kale (*Brassica oleracea*) as a monitor-species. Chemosphere. 827-834p
- Gaertner, T. (2002). Risk of bladder cancer in foundry workers: a meta-analysis. occupational and environmental medicine. 59(10):655-63.
- Garrec, J. (2008). Biosurveillance Végétale de la qualité de l'air. Paris: Lavoisier: Ed : TEC & DOC. 117p.
- Garrec, j. (2002). biosurveillance végétale de la qualité de l'air. paris: la voisier.
- Garziandia, E., Bocquet, M., Marliere, M et Lacroix, G. (2000). Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans l'air ambiant (HAP). France 52p
- Giec, P. (2001). Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques, rapport d'évaluation. 216p
- Giergielewicz-Mozajska, H. D. (2001). Accelerated solvent extraction (ASE) in the analysis of environmental solid samples some aspects of theory and practice. Crit. Rev. Anal. Chem. 31, 149-165.
- Golly, B. (2014). Étude des sources et de la dynamique atmosphérique de polluants organiques particuliers en vallées alpines : apport de nouveaux traceurs organiques aux modèles récepteurs., thèse du doctorat en chimie, de l'université de Grenoble. France 267p.

- Guillon., A. (2011). Étude de la composition isotopique moléculaire (d13C) comme traceur de source qualitatif et quantitatif des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) particulaires dans l'atmosphère. thèse du doctorat en Chimie Analytique et Environnement. L'université Bordeaux I. 374p
- Hodzic, A.E. (2006). Aerosol chemical and optical properties over the Paris area within ESQUIF project. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6, 3257-3280.
- Holoubek, I. K. (2007). Trends in background levels of persistent organic pollutants at Kosetice observatory, Czech Republic.2) Part II. Aquatic and terrestrial environments 1996-2005. *J. Environ. Monit. JEM*. 9, 564–571.
- Horvath, H.E. (1996). the size distribution and composition of the atmospheric aerosol at a rural and nearby urban location. *J. Aerosol Sci.* 27, 417-435.
- Hwang, H. (2003). Concentrations and source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in pine needles from Korea, Mexico, and United States. *Atmos. Environ.* 37, 2259–2267.
- Ikni.k. (2018). Etude sur l'évolution du tissu urbain historique de la ville deBejaia (Algerie). Vaulx-en-Velin, France. 13p
- Joner., E. H. (2004). Priming Effects on PAH Degradation and Ecotoxicity During a Phytoremediation Experiment. *Environmental Pollution* 128(3): 429-435.
- Journal officiel Algérien . (2003). 8p
- Jullien, D. (2014). La recherche des polluants dans les sols. Paris.France. pp. 19-28. (ineris-00972101).
- Julve, Ph. (2017). Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France. Version : 09 février 2017. <http://www.tela-botanica.org>.
- Khelil, R. (2016). bioindication et bioaccumulation: deux modèles biologiques pour la détection de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures dans la région de ouargla. Diplôme de doctorat des sciences. agro sah. Univ de Ourgla. 205p.
- Khelil, R. (2004). Utilisation des lichens comme bio inducteurs de la pollution atmosphérique dans la région de Hassi Messaoud .Thèse Magistère .agro .sah. Univ de Ouargla. 115p.
- Kipopoulou A. M., M. E. (1999). Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environmental Pollution*. 106: 369-380.
- Klumpp A., W. G.-P. (2009). Airborne trace element pollution in 11 European cities assessed by exposure of standardised ryegrass cultures. *Atmosph. Envir.*, 43, 329-339.
- Klumpp, A., Klumpp, G., & Wolfgang, A. (2004). Urban air quality in Europe – results of three years of standardised biomonitoring studies .
- Korichi, S.D. Le système défensif de la ville de Bejaia, essai de restitution à travers les sources historiques, archivistique, et archéologiques.36p
- Kulshrestha, S. M. (2009). Metal concentration of PM2.5 and PM10 particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India. *Sci. Total Environ.*407, 6196-6204.
- Lacour, S. (2009). Cours de pollution atmosphérique. Inventaires d'émissions rapport de recherche. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CEREAs: Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique, 35p.

- Lin, Y.-C. W.-J.-C. (2006). "PAH emissions and energy efficiency of palm-biodiesel blends fueled on diesel generator." *Atmospheric Environment* 40(21): 3930-3940.
- Maatoug, M., AIT Hammou, M et Sarmoum, M. (2011). Intérêt de la biosurveillance végétale de la pollution atmosphérique pour les pays en émergence. Exemple de l'Algérie. 71p
- Maizi, N. (2006). Jumelage des bioindicateurs végétaux: *Xanthoria parietina* et *Funaria hygrometrica* aux réseaux de surveillance et de contrôle de la qualité de l'air Sama Safia dans la région de Annaba. Mémoire de Magister, Université d'Annaba, 176p.
- Malbreil, N. (1997). La pollution en bordure d'autoroute et son impact sur la végétation, Université de Metz, DESS Ressources Naturelles et Environnement.
- Manier N, D. A. (2009). Comparison between new wild plant *Trifolium repens* and *Vicia faba* on their sensitivity in detecting the genotoxic potential of heavy metal solutions and heavy metal-contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 202 (1-4): 343-352.
- Manisalidis, I. S. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health* 8-14.
- Marie., R. (2013). Recherches préliminaires sur la mise en place d'une biosurveillance végétale de la pollution atmosphérique en zone industrielle complexe: applications du ray-grass dans la zone industrialo-portuaire de Dunkerque. Lille. 387-400 p
- Markert, B.B. (2003). *bioindicators & biomonitoring: principles, concepts, and applications*. Elsevier. Amsterdam, 997p.
- Mastrangelo, F. M. (1996). Polycyclic aromatic hydrocarbons and cancer in man. *Environmental Health Perspectives*. 104(11):1166-70.
- Mathé, H. G. (1998). La mesure des particules en suspension dans l'air ambiant : Applications dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air. École des Mines de Douai, Département Chimie et Environnement. 19p
- Mathieu, G. (2006). Etude des artefacts de prélèvement et de la distribution gaz-particules des HAP. Océan, Atmosphère. Université de Provence - Aix-Marseille I. France. 54p
- Merabet, H. (2021). Composition minérale et organique des aérosols naturels et anthropiques et leur distribution de taille dans l'atmosphère. Thèse de doctorat. Génie de l'environnement, Algérie. 176p
- Messafri, L. (2018). Contribution à l'étude des grands feux dans la wilaya de Bejaia. Mémoire de Master, Université Mouloude Mammeri de Tizi ouzou. 63p.
- Miyajima., T. &. (2010). Effects of roads on alpine and subalpine plant species distribution along an altitudinal gradient on Mount Norikura, central, Japan. *Journal of Plant Research*, 123: 741-749.
- Mouaïci, K. (2002). Étude de quelques sources de polluants atmosphériques dans la région de Bejaia. Mémoire de fin d'étude de cycle d'écologie et environnement option : pathologie des écosystèmes, Université Abderrahmane de Bejaia, 49p.
- Moussaoui, k. e. (2014). Le rôle des collectivités territoriales dans le développement local à l'ère des réformes en Algérie. Le cas des communes de Bejaia. 26p
- Mukhopadhyay, D. D. (2020). A critical review on plant biomonitoring for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air through solvent extraction techniques. (R. Ebinghaus, Éd.) 21p

- Oikari, A. (2006). Caging techniques for field exposures of fish to chemical contaminants. *Aquatic Toxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2006.03.010>, 78, 370–381.
- Oishi, Y. (2013). Comparison of Pine Needles and Mosses as Bio-Indicators for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *J. Environ. Prot.* 04, 106–113. doi:10.4236/jep.2013.48-1013.
- Osornio-Vargas, S. (2011). In vitro biological effects of airborne PM2.5 and PM10 from a semi-desert city on the Mexico-US border. *Chemosphere*. 46,279-288.
- Pandey, S. K.-H. (2011). A review of techniques for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in air. *TrAC Trends Anal. Chem. (Reference Ed.)* 30, 1716-1739.
- Peters, A. J. (2000). "A comparison of high volume and diffusion denuder samplers for measuring semivolatile organic compounds in the atmosphere." *Environmental Science & Technology* 34: 5001-5006.
- Philip, S. e. (2014). Global Chemical Composition of Ambient Fine Particulate Matter for Exposure Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 48, 13060-13068.
- Philippe, C. (2004). Analyse de la pollution atmosphérique aux échelles locale et régionale. Modélisation spatiale et temporelle à l'aide d'une méthode de scénarii épisodiques, thèse du doctorat en énergétique de l'INSA de Rouen. 223P.
- Pineiro-Iglesias, M. (2004). "Assessment of methodologies for airborne BaP analysis." *Science of The Total Environment* 334-335: 377-384.
- Pison, I. (2005). Modélisation inverse pour l'optimisation des sources primaires de pollution atmosphérique à l'échelle régionale. Paris, Chimie de la pollution atmosphérique et physique de l'environnement. 175p.
- Plocoste, T. (2013). Etude de la dispersion nocturne de polluants atmosphériques issus d'une décharge d'ordures ménagères mise en évidence d'un îlot de chaleur urbain. Doctoral dissertation, Antilles-Guyane . ILOT, France 238p.
- Popescu, M. B. (1998). Analyses et traitement physicochimique des rejets atmosphériques industriels, émissions, fumées, odeurs et poussières, Edition: Masson : 12- 20.
- Putaud, J.E. (2004). A European aerosol phenomenology-2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment*. 38, 2579-2595.
- Querol, X. e. (2009). Variability in regional background aerosols within the Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 9, 4575-4591.
- Radulescu, S. P. (2013). Heavy metal accumulation and translocation in different part of *Brassica oleracea L.* Romanian journal of Physics, 58, 137-1354.
- Rai, R. (2008). Evaluation of physiological and biochemical responses of two rice (*Oryza sativa L.*) cultivars to ambient air pollution using open top chambers at a rural site in India. *Science of the Total Environment*, 407 (1): 679-691.
- Ravinda K., L. B. (2004). Platinum group elements in the environment and their health risk. *Sci Total Environ.*, 318,1-43.
- Rzepka-Cuny M.A., & C. (2011). Preliminary researches on the use of an air biomonitoring network using plants in a complex industrial zone: application of ray-grass in Dunkerque, *Acta Botanica Gallica*, 158, 387-400.
- Sauer, J. D. (1993). Historical geography of crop plants - a select roster. CRC Press, Boca Raton, Florida. Article journals.121-128.

- Shorhani. (2014). Modélisation de l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement. Thèse de doctorat de l'université Paris-Est. Paris, France 186p.
- Silva DT, M. S. (2012). Relationship between ozone, meteorological conditions, gas exchange and leaf injury in *Nicotiana tabacum* Bel-W3 in a sub-tropical region. *Atmospheric Environment*, 60: 211-216.
- Simonich, S. H. (1994). Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. *Nature* 370, 49–51.
- Simonich., H. (1995). Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environ. Sci. Technol.* 29:2905-2914.
- Srogi, K. (2007). Monitoring of Environmental Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Review. *Environmental Chemistry Letters* 5(4): 169-195.
- Stevens, .. (2001). Angiosperm Phylogeny Website. Version 7, May 2006 3 Suerbaum S, Achtman M, 1999. Evolution of *Helicobacter pylori*: the role of recombination. *Trends in Microbiology* 7, 182-184.
- Surchump, A. (2017). Emissions potentielles de polluants organiques persistants à partir du milieu urbain et par les activités de traitement des déchets : impact sur la qualité de l'air au voisinage des sources. Thèse de doctorat. Univ. pierre de marie curie- Paris. P325
- Swieboda M., K. A. (1978). The lichen *Parmelia physodes* (L.) Ach. as indicator for determination of the degree of atmospheric air pollution in the area contaminated by fluorine and sulphur dioxide emission *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 47: 25-40.
- Szulejko, J. K. (2014). Review of progress in solvent-extraction techniques for the determination of polyaromatic hydrocarbons as airborne pollutants. *Trends Anal. Chem.* 61, 40-48.
- Tétréault, L.F. (2016). Asthme infantile et polluants du trafic routier. Thèse de doctorat; université Montréal. 230p
- Thimonier A, D. J. (1994). Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. *New Phytologist*, 126: 533-9.
- Thripathi, A. T. (1999). Change in some physiological and biochemical characters in *Albizia lebbek* as bioindicateurs of heavy metal toxicity. *J. Environ. Biol.* 93-98.
- Truhaut.R. (1963). Aperçus sur les risques de cancérisation pouvant résulter de la pollution de l'air des villes. France. 22 p
- Turpin, B. (2000). Measuring and simulating particulate organics in the atmosphere: problems and prospects. *Atmospheric Environment*. 34, 2983-3013.
- Weeks, J. W. (1995). The value of biomarkers for ecological risk assessment : academic toys or legislative tools? *Appl. Soil Ecol.*, 2, 215-216.
- Wenzel, K. H. (1998). Accelerated Solvent Extraction of Semivolatile Organic Compounds from Biomonitoring Samples of Pine Needles and Mosses. *Anal. Chem.* 70, 4827–4835.
- Xavier, L. (2018). Pollution atmosphérique dans la vallée de l'Arc (Maurienne, Savoie) : Nouvelles approches en biosurveillance végétale. Univ. Henri Poincaré - Nancy. 318p.
- Yamasaki, H. K. (1982). "Effect of ambient temperature on aspects of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons." *Environmental Science & Technology* 16(4):189-194.

Yang, B. L. (2017). PAHs uptake and translocation in *Cinnamomum camphora* leaves from Shanghai, China. *Sci. Total Environ.* 574, 358-368.

Yang, R. Z. (2013). Altitudinal and Spatial Signature of Persistent Organic Pollutants in Soil, Lichen, Conifer Needles, and Bark of the Southeast Tibetan Plateau: Implications for Sources and Environmental Cycling. *Environ. Sci. Technol.* 47, 12736–12743. doi:10.1021/es40356.

Zouagui, M. K. (2017). Contribution au suivi des pressions anthropiques de la wilaya de Bejaïa. Mémoire master des sciences de la nature et de la vie, Univ de Bejaïa. p 35.

<https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/bejaia/bejaia-3597/>. Consulté le 03/05/2023 par le site fr.climate-data.org.

Annexes

Annexe 1. Procédure expérimentale

En vue d'atteindre l'objectif de la présente étude, nous avons adopté un plan de travail assez cohérent qui est représenté par le schéma suivant.

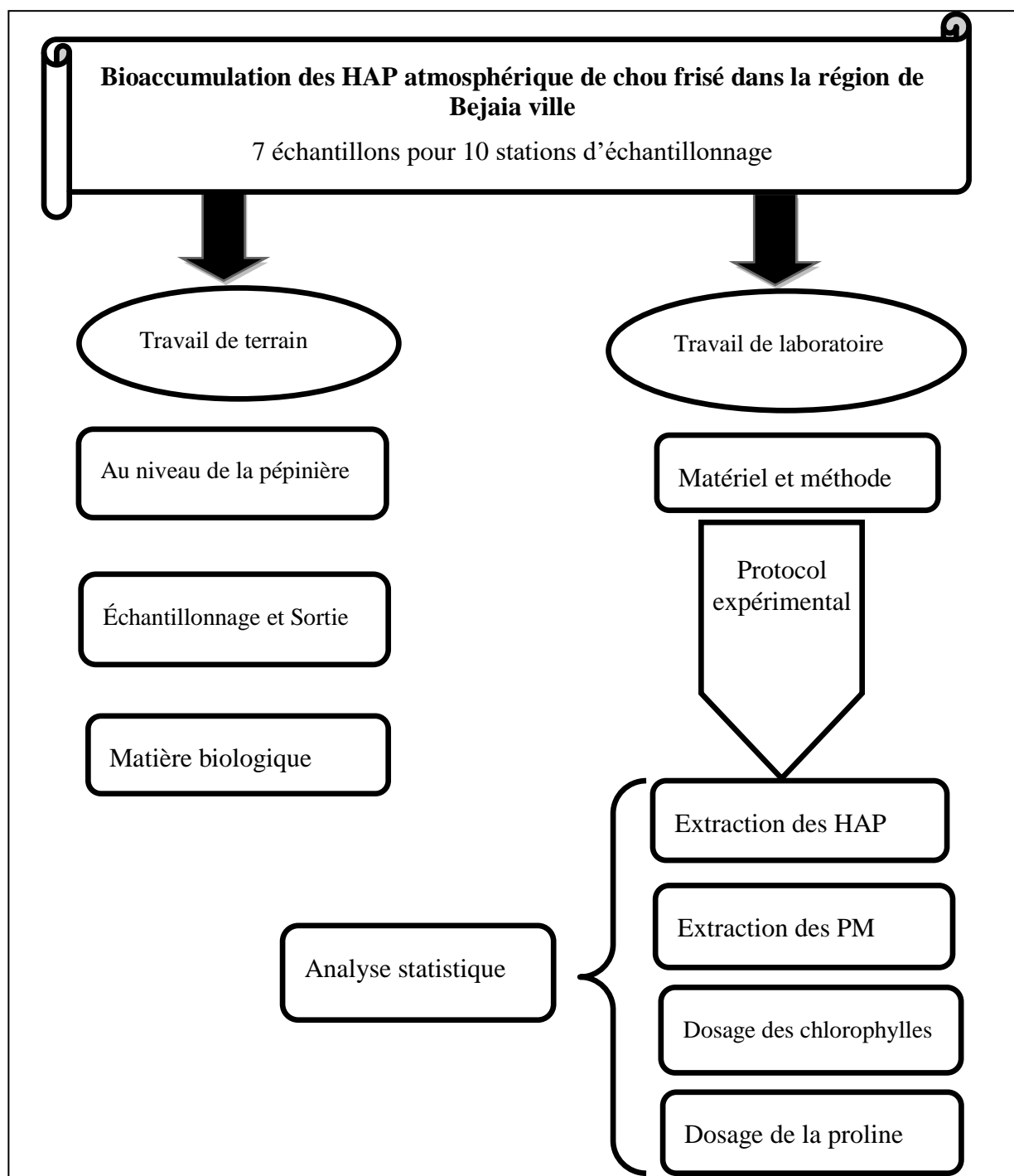


Diagramme expérimental de l'étude de bioaccumulation des HAP à Béjaïa (2023)

Annexes 2. Matériel de laboratoire utilisé dans la présente étude

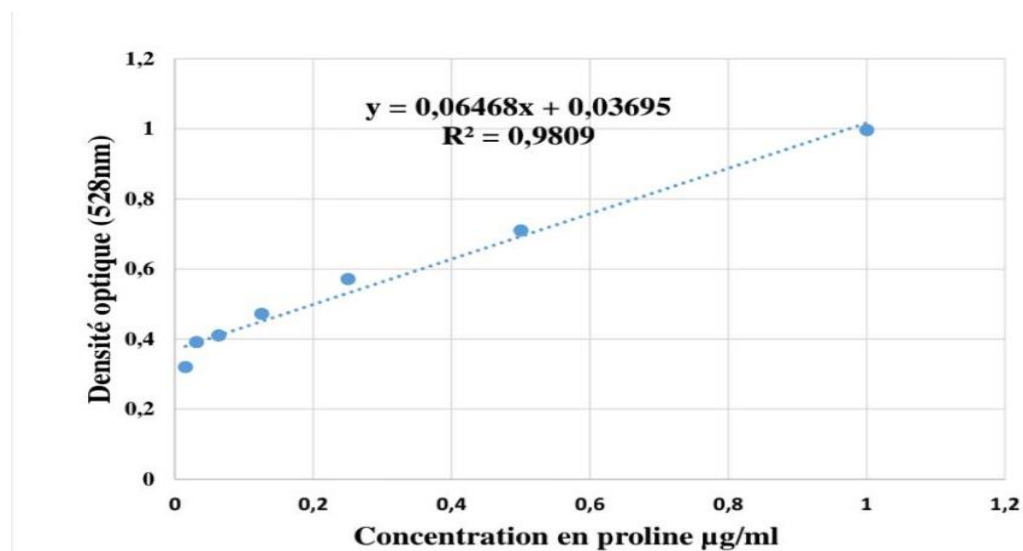
Au niveau de laboratoire nous avons utilisé :

- Matière fraîche (MF) (chou frisé),
- Balance électrique, l'étuve,
- Papier à filtre,
- Verreries de différentes tailles,
- Tubes a essais
- Fioles jaugées
- Béchers,
- Appareil de Soxhlet du model (behrotest),
- Cartouches en cellulose,
- Spectrophotomètre
- Centrifugeuse
- Micro-spatule, une micropipette,
- Entonnoir,
- Éprouvette,
- Ciseaux
- Mortier.

Réactifs, avec leurs quantités, utilisées pour chaque dosage des paramètres choisis dans notre étude.

Paramètre de dosage	Réactifs	Quantité
HAP	Hexane	60 ml
	Acétone	60 ml
Poussière	Chloroforme	10 ml
Chlorophylle	Acétone	80 ml
	Carbonate de Calcium	Penser
	Eau distillé	20 ml
Proline	Méthanol	3ml
	Acide Acétique	30ml
	Acide ortho phosphorique	2.5 ml
	Ninhydrine	25 mg
	Toluène	5 ml

Annexe 03. Courbe d'étalonnage de la proline.



Annexe 04. Résultats de test de normalité (Shapiro) de chaque station des paramètres étudié.

Test de normalité (Shapiro)	HAP		PM		Chl. A		Chl. b		Chl. Ab		Pro	
	W	P	W	P	W	P	W	P	W	P	W	P
Témoin	0.75	0.05	0.93	0.48	0.88	0.34	0.93	0.49	0.95	0.57	0.99	0.84
Centre-ville	0.75	0.05	0.98	0.76	0.98	0.75	0.84	0.20	0.94	0.52	0.84	0.22
Targa Ouzemour	0.75	0.05	0.93	0.49	0.98	0.73	0.79	0.09	0.94	0.51	0.88	0.32
Aamriw	1	0.99	0.74	0.02	0.85	0.15	0.75	0.02	0.91	0.40	0.86	0.28
Port	0.96	0.64	0.86	0.26	0.98	0.73	0.92	0.46	0.75	0.05	0.89	0.35
Sidi Ahmed	1	0.99	0.97	0.66	0.99	0.94	0.99	0.91	0.99	0.93	0.97	0.65
Boukhiam a	0.75	0.05	0.93	0.47	0.92	0.46	0.92	0.46	0.92	0.46	0.87	0.29
Iheddaden	1	0.99	0.76	0.02	0.93	0.51	0.83	0.19	0.86	0.28	0.92	0.46
Daouadji	1	0.99	0.89	0.37	0.98	0.70	0.91	0.42	0.91	0.43	0.97	0.66
Ighil Ouazoug	0.75	0.05	0.99	0.85	0.96	0.62	0.99	0.84	0.97	0.68	0.86	0.29
Gare routière	0.75	0.05	0.94	0.5	0.96	0.65	0.82	0.17	0.98	0.76	0.88	0.31

Résumé

La pollution de l'air constitue un facteur de risque environnemental majeur pour les êtres vivants. La protection contre de tels risques nécessite une surveillance et un contrôle de la pollution atmosphérique.

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'accumulation de la pollution atmosphérique due aux Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par transplantation du chou frisé dans la ville de Béjaïa.

Dans ce contexte, dix stations ont été choisies dans la ville de Béjaïa, pour placer des plants de chou frisé (*Brassica oleracea*), préalablement préparés durant deux mois (Mars-Avril) dans les mêmes conditions de culture, de repiquage et de développement. Après deux mois de leur exposition (Mai- Juin), les plants ont été récupérés et les polluants atmosphériques captés par leurs feuilles ont été quantifiés. En parallèle, la chlorophylle et la proline des feuilles des mêmes plants de chou ont été dosés pour mesurer les effets de ces polluants sur la physiologie de la plante.

Les résultats ont montré une variation spatiale entre les différentes stations. Les concentrations de HAP accumulées dans notre chou varient entre 13 ± 5 ng/g à 80 ± 10 ng/g et présentent des différences significatives ($p=0,017$).

Pour tous les paramètres, à part la chlorophylle b, les concentrations moyennes calculées au niveau de la station « Témoin » ont montré des différences significatives avec ceux des dix autres stations. On peut conclure alors que ces stations caractérisées par une forte activité industrielle et automobile sont à grand risque de pollution.

Mots-clés : Pollution atmosphérique, HAP, PM, Biosurveillance, Bioaccumulateurs, *Brassica oleracea*, pollution urbaine.

Abstract

Air pollution constitutes a major environmental risk factor for living beings. Protection against such risk requires air pollution monitoring and control.

The aim of our study was to assess the accumulation of air pollution due to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by transplantation of kale plants in the city of Béjaïa.

In this context, ten stations were chosen in the city of Béjaïa, to place kale plants (*Brassica oleracea*), previously prepared for two months (from March to April) under the same conditions of cultivation, transplanting and development.

After two months of their exposure (May-June), the plants were collected and the atmospheric pollutants captured by their leaves were quantified.

In parallel, chlorophyll and proline content in leaves of same plants were dosed to measure the effects of these pollutants on the physiology of the plants.

The results showed a spatial variation between the different stations. The concentrations of PAH accumulated in our kale vary between 13 ± 5 ng/g to 80 ± 10 ng/g and show significant differences ($p=0.017$).

For all the parameters, except for chlorophyll b, the average concentrations calculated at the "Control" station, showed significant differences with those of the ten other stations.

Then, it can be concluded that these stations that are characterized by strong industrial and automotive activity are at a high risk of pollution.

Keywords: Air pollution, PAH, PM, Biomonitoring, Bioaccumulators, *Brassica oleracea*, urban pollution.