

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI-LAGHOUAT  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Spécialité : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences écologiques

Option : Ecologie végétale et environnement

*Mémoire*

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

**Thème**

Evaluation de la tolérance à la pollution atmosphérique de  
quelques végétaux urbains de la ville de Laghouat

**Présenté par :** Amel Hiba BENCHERIF

**Devant le jury**

- **Président :** Dr. Soufyane BENSOUILAH
- **Rapporteur :** Dr. Mohammed Abdelmadjid BOUMEDDIENE
- **Examineur :** Dr. Fayssal GHOUGALI
- **Examineur :** Dr. Ibtissam SOUFFI

Année Universitaire : 2024/2025

# Remerciements

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*

*Mes remerciements les plus sincères vont à mon encadrant, **Dr. BOUMEDDIENE Mohamed Abdelmadjid**, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury de notre soutenance d'avoir accepté d'examiner ce travail, notamment professeure **Dr Soufyane BENSOUILAH** en sa qualité de président, **Dr Fayssal GHOUGALI** en sa qualité d'examineur et **Dr Ibtissam SOUFFI** en sa qualité d'examinatrice.*

*Je souhaite également remercier l'équipe pédagogique du **Département des sciences biologiques** à l'Université de **Université Ammar Telidji – Laghouat**, ainsi que le personnel du laboratoire pour leur soutien logistique et scientifique ainsi à l'ensemble des étudiantes et étudiants de ma promo pour leur aide précieuse et leur encouragement.*

*Enfin, j'exprime ma reconnaissance à ma famille pour son soutien moral tout au long de mon parcours universitaire.*

# Dédicace

**À** ma chère famille,

*Pour votre amour, votre soutien inconditionnel et vos encouragements tout au long de  
mon parcours universitaire.*

*Ce mémoire vous est dédié avec toute ma gratitude.*

**À** mes parents,

*Pour vos sacrifices, votre patience et votre confiance en moi.*

*Ce travail est le fruit de votre éducation et de votre soutien constant.*

**À** mes amis,

*Merci pour votre présence, vos encouragements et les moments de joie partagés.*

*Votre amitié a été une source de motivation précieuse.*

**À** mon encadrant,

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour votre encadrement, vos conseils  
avisés et votre disponibilité tout au long de cette recherche.*

**À** tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire,

**Recevez ici l'expression de ma sincère gratitude.**

## Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	IX
Liste des abréviations.....	X
Résumé .....	XII
المخلص :.....	Erreur ! Signet non défini.
Abstract:.....	XIII
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I.....	5
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I. Pollution Atmosphérique .....	6
1. Définition.....	6
2. Évolution Historique de la Pollution Atmosphérique .....	6
2.1. Origines Anciennes.....	6
2.2. Ère Industrielle.....	6
2.3. Développement Juridique.....	7
2.4. Période Contemporaine .....	7
2.5. Période d'après-guerre et développements technologiques.....	7
2.6. Législations nationales pionnières.....	7
➤ Royaume-Uni .....	Erreur ! Signet non défini.
➤ États-Unis.....	8
➤ Initiatives européennes.....	8
2.7. Conférences internationales et accords mondiaux .....	8
➤ Conférence de Stockholm (1972).....	9
➤ Protection de la couche d'ozone .....	9
➤ Changement climatique .....	9
2.8. Objectifs du Millénaire .....	9
2.9. Normes sanitaires internationales.....	10
2.10. Ère contemporaine : COVID-19 et conflits.....	10
2.11. Impact des conflits armés .....	10
2.12. Perspectives critiques et enjeux contemporains .....	10
3. Sources et Origines de la Pollution Atmosphérique .....	11

3.1. Sources Naturelles .....	11
3.2. Sources Anthropiques .....	11
4.Situation en Algérie .....	11
5. Quelques polluants atmosphériques :.....	13
6. Impacts de la Pollution Atmosphérique :.....	15
6.1. Impacts Écologiques : .....	15
6.1.1. Pollution Atmosphérique et Changement Climatique :.....	15
6.1.2. Pluies Acides : .....	16
6.1.3. Impact sur la Pollinisation :.....	17
6.1.4. Impact sur la biodiversité :.....	18
6.1.5. Lésions Foliaires .....	19
6.1.6. Impact de la pollution atmosphérique sur l'agriculture :.....	19
6.2. Impacts sur la Santé Humaine .....	20
6.2.1. Mortalité.....	20
6.2.2. Morbidités : .....	21
7. Mesure de la Pollution Atmosphérique .....	22
7. 1. Méthodes de Mesure de la Pollution Atmosphérique.....	22
7.1.1. Echantillonnage actif et l'échantillonnage passif : .....	23
7.1.2. Mesure en temps réel : .....	23
7.1.3. Mesure par Figure rie satellitaire :.....	24
7.1.4. Utilisation des bio-indicateurs :.....	24
I.3. Végétaux supérieurs : .....	27
II. Parties végétales utilisées en bio-indication :.....	27
II.1. Feuilles : .....	27
II.2. Ecorce des arbres : .....	28
3. Indice de la Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) :.....	28
7.2. Mesure de la pollution atmosphérique en Algérie :.....	30
II. Généralité sur les espèces étudiées : .....	34
1. <i>Ficus microcarpa</i> (Le Laurier d'Inde/فيكس) :.....	34
1.1. Description botanique .....	34
1.2. Ecologie de l'espèce : .....	35
1.3. Comportement face à la pollution atmosphérique :.....	35
2. <i>Nerium oleander</i> (Le Laurier rose/الدفلى) : .....	36
2.1. Description botanique :.....	36
2.2. Ecologie de l'espèce :.....	38
2.3. Comportement de l'espèce avec la pollution atmosphérique :.....	38

3. <i>Eucalyptus globulus</i> (Legommier bleu/ كاليبتوس) :	38
3.1. Description botanique :	38
3.2. Ecologie de l'espèce :	40
3.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	40
4. <i>Bougainvillea glabra</i> (Le petit bougainvillier/الجهنمية) :	40
4.1. Description botanique	40
4.2. Ecologie de l'espèce :	42
4.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	42
5. <i>Cynodon dactylon</i> (Le chiendent pied-de-poule/العشب) :	42
5.1. Description botanique	42
5.2. Ecologie de l'espèce :	43
5.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	44
6. <i>Rosmarinus officinalis</i> (Le romarin/اكليل الجبل) :	44
6.1. Description botanique	44
6.2. Ecologie de l'espèce :	46
6.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	46
7. <i>Peganum Harmala</i> (rue sauvage/الحرمل) :	46
7.1. Description botanique :	46
7.2. Ecologie de l'espèce :	47
7.3. Comportement de l'espèce avec la pollution atmosphérique :	48
8. <i>Phoenix dactylifera</i> (Le palmier dattier/النخلة) :	48
8.1. Description botanique	48
8.2. Ecologie de l'espèce :	49
8.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	50
9. <i>Zizyphus lotus</i> (Le jujubier/السدر) :	50
9.1. Description botanique :	50
9.2. Ecologie de l'espèce :	51
9.3. Comportement de l'espèce à la pollution atmosphérique :	52
10. <i>Lonicera japonica</i> (Le chèvrefeuille du japon/سلطان الغابة) :	52
10.1. Description botanique	52
10.2. Ecologie de l'espèce :	54
10.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :	54
CHAPITRE II.....	55
MATERIEL ET METHODES.....	55
I. Présentation de la zone d'étude :	56
1.Position géographique :	56

---

<b>2. Géologie et géomorphologie :</b> .....	<b>56</b>
2.1. Reliefs : .....	57
2.2. Hautes surfaces (Glacis et Terrasses) : .....	57
2.3. Dépressions (Dayas) : .....	57
<b>3. Pédologie :</b> .....	<b>57</b>
<b>5. Climat et bioclimat :</b> .....	<b>59</b>
5.1. Températures : .....	59
5.2. Précipitations : .....	59
5.3. Régimes saisonniers : .....	60
5.4. Paramètres bioclimatiques : .....	60
<b>6. Faune :</b> .....	<b>61</b>
<b>7. Flore :</b> .....	<b>61</b>
<b>II. Choix Du site d'étude :</b> .....	<b>62</b>
<b>III. Traitement des échantillons :</b> .....	<b>63</b>
1. Calcule de l'APTI : .....	64
1.1. Acide ascorbique : .....	64
1.2. Chlorophylle totale : .....	65
1.3. Le Potentiel hydrogène pH : .....	66
1.4. Teneur relative en eau : .....	66
2. Tests statistiques : .....	67
<b>CHAPITRE III</b> .....	<b>68</b>
<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS</b> .....	<b>68</b>
1.1. L'acide ascorbique .....	69
1.2. Chlorophylle totale .....	71
1.3. Le Potentiel hydrogène (pH) : .....	73
1.4. La teneur en eau relative (TRE) : .....	75
1.5. L'indice de la tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) : .....	77
1.5.1. L'analyse en composantes principales (ACP) : .....	79
1.5.2. La classification hiérarchique (HCA) : .....	80
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>83</b>
Conclusion .....	84
Perspectives .....	85
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>86</b>
Références électroniques .....	100

Liste des figures

Figure 1 . Dynamique entre les émissions atmosphériques et les changements .....	16
Figure 2 . Impact des pluies acides sur les feuilles. ....	17
Figure 3 . L’impact de la pollution atmosphérique sur la dynamique.....	18
Figure 4 . Quelques formes des blessures foliaires .....	19
Figure 5 . Carte des décès attribué à la pollution atmosphériques par 100 000 .....	21
Figure 6 . méthodes de la mesure de la pollution atmosphérique et leur intérêt.....	23
Figure 7 . Carte de la pollution atmosphérique en NO2 en 2018 par Figure rie satellitaire. ...	24
Figure 8 . <i>Xanthoria parietina</i> , lichens épiphytes utilisé la bio-indication.....	26
Figure 9 . <i>Funaria hygrometrica</i> , une mousse utilisée pour la bio-indication dela pollution atmosphérique. ....	26
Figure 10 .Photo prise de <i>Ficus microcarpa</i> dans la ville de Laghouat. ....	34
Figure 11 . Photo prise de <i>Nerium oleander</i> dans la ville de Laghouat. ....	37
Figure 12.Photo prise de <i>Eucalyptus globulus</i> dans la ville de Laghouat.....	39
Figure 13 .Photo prise de <i>Bougainvillea glabra</i> dans la ville de Laghouat. ....	41
Figure 14 .Photo prise de <i>Cynodon dactylon</i> dans la ville de Laghouat. ....	42
Figure 15.Photo prise de <i>Rosmarinus officinalis</i> dans la ville de Laghouat. ....	45
Figure 16 . Photo prise de <i>Peganum Harmala</i> dans la ville de Laghouat.....	47
Figure 17 . Photo prise de <i>Phoenix dactylifera</i> dans la ville de Laghouat.....	49
Figure 18 . Photo prise de <i>Zizyphus lotus</i> dans la ville de Laghouat .....	51
Figure 19 . Photo prise de <i>Lonicera japonica</i> dans la ville de Laghouat. ....	53
Figure 20. Carte de situation géographique de la wilaya de Laghouat .....	56
Figure 21 . Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Laghouat.....	59
Figure 22. Le diagramme ombrothermique de la région de Laghouat. ....	6060
Figure 23. L’étage bioclimatique pour la région de Laghouat.....	61
Figure 24 . La station d’étude sur la carte de la wilaya .....	63
Figure 25. Le stockage des feuilles collectées .....	64
Figure 26 . L’extraction de l’acide ascorbique.....	65
Figure 27. L’extraction de la chlorophylle.....	66
Figure 28 . La détermination du pH du filtrat des feuilles. ....	66
Figure 29. La détermination de la teneur relative en eau des feuilles.....	67
Figure 30. Evolution d’acide ascorbique des espèces étudiées.....	70
Figure 31 . Evolution du chlorophylle totale des espèces étudiées.....	72

Figure 32 . Evolution du pH des espèces étudiées. ....	74
Figure 33 . Evolution du TRE des espèces étudiées. ....	76
Figure 34 . Evolution d'APTI des espèces étudiées. ....	78
Figure 35 . Analyse en Composantes Principales (ACP).....	81
Figure 36 . Cassification Hiérarchique (HCA).....	82

## Liste des tableaux

Tableau 1. proportions des émissions brutes de GES de l'Algérie .....	12
Tableau 2. Quelques polluants atmosphériques, leurs sources et leurs.....	13
Tableau 3. Résumé de quelques études portées sur l'utilisation des bio-indicateurs pour l'estimation de la pollution atmosphérique en Algérie. ....	32
Tableau 4. La superficie (ha) des différentes formations végétales dans la wilaya de Laghouat .....	61

## Liste des abréviations

AA : Acide ascorbique.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

AQA : Acte de la Qualité de l'Air.

CAA : Clean Air Act (Loi de la protection de l'air).

Chl T : chlorophylle totale

COV : Composés Organiques Volatiles.

COVNM : Composés Organiques Volatiles Non Méthyliques.

DAEU : Département de l'Agriculture des Etats Unies (USDA en anglais).

DRO : Dérivés Réactifs de l'Oxygène.

GES : Gaz à Effets de Serre. HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

HCA : Cassification Hiérarchique.

APTI : Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique.

LII : Indice de Blessure des Feuilles (Leaf Injury Index).

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

PCB : Polychlorobiphényle.

pH : Potentiel Hydrogène.

PM : Particulate Matter (particules en suspension)

SIG : Système d'Information Géographique.

TFP : Total Factor Productivity (Facteur de Productivité Totale).

TRE : Teneur Relative en Eau.

UE : Union Européenne.

RWC : Relative water content



### Résumé

La pollution de l'air est l'un des problèmes environnementaux mondiaux les plus importants, car ses répercussions affectent directement la santé humaine et les écosystèmes. Cependant, les études et la documentation sur ce phénomène sont encore très limitées dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. Cette étude représente une contribution scientifique à l'étude de la pollution de l'air en Algérie en général, et dans la région de Laghouat en particulier, puisque ce travail vise à déterminer l'impact de la pollution de l'air sur la végétation locale.

Ce mémoire vise à évaluer la tolérance à la pollution atmosphérique de plusieurs espèces végétales urbaines (*Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon*, *Bougainvillea glabra*, *Eucalyptus globulus*, *Nerium oleander*, *Ficus microcarpa*, *Rosmarinus officinalis*, *Lonicera japonica*, *Peganum harmala* et *Zizyphus lotus*) exposées au trafic routier dans la ville de Laghouat.

Pour ce faire, différents paramètres biochimiques et physiologiques (acide ascorbique, chlorophylle totale, pH foliaire et teneur relative en eau) ont été mesurés et intégrés dans le calcul de l'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI). Les résultats révèlent une variabilité interspécifique significative, avec des indices de tolérance allant de 13,67 pour *Phoenix dactylifera* à 7,67 pour *Zizyphus lotus*. Les espèces présentant les valeurs d'APTI les plus élevées se distinguent par une meilleure adaptation à la pollution atmosphérique urbaine, tandis que les espèces les plus sensibles peuvent servir de bio-indicateurs de la qualité de l'air.

Cette étude confirme que l'APTI, basé sur des paramètres physiologiques intégrateurs, est un outil pertinent pour classer les espèces selon leur tolérance ou leur sensibilité à la pollution atmosphérique. Les résultats obtenus à Laghouat apportent une contribution originale à la connaissance de la réponse des plantes urbaines à la pollution dans les zones arides d'Algérie et peuvent guider la sélection d'espèces adaptées pour la gestion durable des espaces verts urbains.

### Mots-clés :

Pollution atmosphérique, bio-indicateurs, tolérance, acide ascorbique, chlorophylle totale, pH, teneur en eau, indice de tolérance à la pollution atmosphérique, Laghouat.

**الملخص:**

يعتبر تلوث الهواء من أهم المشاكل البيئية العالمية، حيث أن تداعياته تؤثر بشكل مباشر على صحة الإنسان والنظم البيئية. ومع ذلك، لا تزال الدراسات والتوثيق حول هذه الظاهرة محدودة للغاية في البلدان النامية مثل الجزائر. تمثل هذه الدراسة مساهمة علمية في دراسة تلوث الهواء في الجزائر بشكل عام، وفي منطقة الأغواط بشكل خاص، حيث تهدف إلى تحديد تأثير تلوث الهواء على الغطاء النباتي المحلي.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مدى تحمل العديد من أنواع النباتات الحضرية (*Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon*, *Bougainvillea glabra*, *Eucalyptus globulus*, *Nerium oleander*, *Ficus microcarpa*, *Rosmarinus officinalis*, *Lonicera japonica*, *Peganum harmala* et *Zizyphus lotus*) لتلوث الهواء في مدينة الأغواط.

تم قياس مختلف المؤشرات الكيميائية الحيوية والفسيوولوجية (حمض الأسكوربيك، والكلوروفيل الكلي، الرقم الهيدروجيني، والمحتوى المائي النسبي) وتم دمجها في حساب مؤشر تحمل تلوث الهواء (APTI) وكشفت النتائج عن وجود تباين كبير بين الأنواع، حيث تراوحت مؤشرات التحمل من 13.67 في *Phoenix dactylifera* إلى 7.67 في *Zizyphus lotus*. كانت الأنواع ذات القيم الأعلى لمؤشر تحمل الهواء في المناطق الحضرية أفضل تكيفًا مع تلوث الهواء في المناطق الحضرية.

**الكلمات المفتاحية:**

تلوث الهواء، المؤشرات الحيوية، التحمل، حامض الاسكوربيك، الكلوروفيل الكلي، الرقم الهيدروجيني، المحتوى المائي، مؤشر تحمل تلوث الهواء.

**Abstract:**

Air pollution is one of the most important global environmental issues, as its repercussions directly affect human health and ecosystems. However, studies and documentation on this phenomenon are still very limited in developing countries such as Algeria. This study represents a scientific contribution to the study of air pollution in Algeria in general, and in Laghouat region in particular, as it aims to determine the impact of air pollution on local vegetation.

This study aims to assess the tolerance of several urban plant species (*Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon*, *Bougainvillea glabra*, *Eucalyptus globulus*, *Nerium oleander*, *Ficus microcarpa*, *Rosmarinus officinalis*, *Lonicera japonica*, *Peganum harmala* and *Zizyphus lotus*) to air pollution in the city of Laghouat.

Various biochemical and physiological parameters (ascorbic acid, total chlorophyll, pH, and relative water content) were measured. They were integrated into the calculation of the Air Pollution Tolerance Index (APTI). The results revealed significant variation among species, with tolerance indices ranging from 13.67 in *Phoenix dactylifera* to 7.67 in *Zizyphus lotus*. Species with higher values of urban air tolerance index were better adapted to urban air pollution.

**Keywords :**

Air pollution, bio-indicators, tolerance, ascorbic acid, total chlorophyll, pH, water content, air pollution tolerance index.

# **INTRODUCTION**

## **INTRODUCTION**

Au cours des dernières décennies, la pollution atmosphérique s'est imposée comme un enjeu sanitaire majeur à l'échelle planétaire, particulièrement accentué par l'intensification de ce phénomène dans les centres urbains mondiaux(OMS2016).Les données récentes de l'Organisation Mondiale de la Santé révèlent une situation alarmante avec 6,7 millions de décès prématurés annuels attribuables à la pollution de l'air extérieur, auxquels s'ajoutent 3,8 millions de décès causés par la pollution de l'air intérieur des habitations(2022), le continent africain présente un bilan particulièrement préoccupant avec un total de 977 000 décès liés à la pollution atmosphérique, répartis entre 639 000 décès dus à la pollution intérieure et 338 000 décès causés par la pollution de l'air ambiant(2023), dans le contexte national algérien, les statistiques de 2019 font état de 17 295 décès imputables à la pollution atmosphérique extérieure et de 667 décès liés à la pollution de l'air intérieur, illustrant l'ampleur de cette problématique sanitaire sur le territoire national .

ce contexte alarmant, les écosystèmes urbains subissent des pressions considérables, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les conditions climatiques extrêmes amplifient les effets délétères des polluants atmosphériques Les végétaux sont en première ligne face aux pollutions atmosphériques car ils vivent fixés et constituent la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres ,la nature et l'importance de l'impact des polluants atmosphériques sur les végétaux dépendent des caractéristiques physiologiques et biochimiques du végétal touché, ainsi que des propriétés du ou des polluants rencontrés ,les perturbations physiologiques des plantes sont variées et observables selon la nature du polluant, sur des zones plus ou moins étendues qui vont de l'échelle locale jusqu'à l'ensemble de la planète ( Garrec,2019).

L'Algérie, et plus spécifiquement la ville de Laghouat, illustre parfaitement cette problématique complexe. Située à 400 kilomètres au sud d'Alger, au cœur de l'Atlas saharien, Laghouat présente un climat aride caractérisé par des températures extrêmes et de faibles précipitations. Cette ville, surnommée "la porte du désert", connaît une urbanisation croissante qui s'accompagne inévitablement d'une augmentation des émissions polluantes. Les données récentes révèlent que la pollution atmosphérique en Algérie a causé environ 2500 décès par an, principalement due aux émissions de gaz toxiques liées au trafic urbain. (APS.2019)

La pollution atmosphérique constitue toute modification de la composition naturelle de l'air par l'introduction de substances nocives - appelées polluants - qui exercent des effets délétères sur la santé humaine et les écosystèmes (WHO ,2025).

Cette altération de la qualité de l'air résulte de multiples sources d'émission, incluant les phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques, les incendies de forêt et les tempêtes de poussière, ainsi que les activités anthropiques qui ont connu une intensification majeure depuis l'avènement de l'industrialisation (OMS ,2022)

D'un point de vue écologique, la pollution atmosphérique engendre des conséquences dramatiques qui se manifestent par une érosion accélérée de la biodiversité, caractérisée par la diminution du nombre d'espèces, la disparition d'espèces animales et végétales, ainsi que par l'homogénéisation et la modification des compositions spécifiques des écosystèmes (AIRPARIF,2025). Le changement climatique, alimenté par les émissions de gaz à effet de serre issus de la combustion des énergies fossiles, constitue désormais la principale menace pour la biodiversité mondiale, avec des projections indiquant qu'au-delà de 1,5°C de réchauffement, la moitié des espèces évaluées perdront plus de 30% de leur population, de leur aire de répartition ou de leur habitat favorable (GIEC, 2021).

La pollution atmosphérique constitue un facteur déterminant dans le déclin observé des populations de pollinisateurs, notamment par l'altération des signaux visuels, des cycles phénologiques et de la composition spécifique des écosystèmes paysagers (Duque et al, 2024),dans les processus de formation et d'intensification des précipitations acides (Singh et Agrawal, 2008),ainsi que dans la diminution significative de la productivité agricole mondiale et de ses taux de croissance (Sillmann et al, 2021).

En matière de santé publique, la pollution atmosphérique représente un fléau sanitaire majeur responsable de décès prématurés et d'une gamme étendue de pathologies cardiovasculaires, incluant les maladies cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux, les anomalies de la coagulation sanguine et diverses affections cutanées (Sillmann et al, 2021).

Les maladies non transmissibles, notamment les pathologies cardiovasculaires, représentent près de 90% du fardeau sanitaire attribuable à la pollution atmosphérique (UNICEF, 2024).

Les effets sur la santé mentale, le bien-être psychologique et les fonctions cognitives constituent un domaine d'investigation scientifique en expansion rapide, avec des preuves

croissantes d'associations significatives entre l'exposition à la pollution atmosphérique et les troubles mentaux (EEA, 2025).

Les végétaux constituent des outils de bioindication privilégiés pour l'évaluation de la pollution atmosphérique (Feder, 1978).

Leur capacité à absorber les polluants gazeux par leurs stomates et à capturer les particules fines sur leurs surfaces foliaires en fait des filtres naturels essentiels pour l'amélioration de la qualité de l'air urbain (Garrec, 2019).

Les recherches contemporaines démontrent que les plantes réagissent à la pollution atmosphérique par la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui déclenchent des mécanismes de défense antioxydants. Ces mécanismes incluent la synthèse d'acide ascorbique, l'accumulation de proline, l'activation d'enzymes détoxifiantes comme les peroxydases, et la production de composés phénoliques (Dadkhah-Aghdash et al, 2022)

L'efficacité de ces systèmes de défense varie considérablement selon les espèces végétales, déterminant ainsi leur niveau de tolérance à la pollution. (Pillai ,2022)

Les polluants atmosphériques gazeux pénètrent dans les plantes par l'intermédiaire des stomates des feuilles alors que les polluants particulaires sont captés par le micro-relief des surfaces foliaires. La phytotoxicité des polluants atmosphériques dépend de leur nature chimique, induisant un stress oxydatif dans la plante avec production de radicaux libres et de dérivés réactifs de l'oxygène qui provoquent des dégâts dans la feuille. (Garrec, 2019)

L'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) représente un outil scientifique robuste développé pour quantifier la capacité des espèces végétales à résister aux stress polluants (Pillai, 2022). Cet indice, basé sur quatre paramètres biochimiques fondamentaux - le contenu en acide ascorbique, la teneur totale en chlorophylle, le pH de l'extrait foliaire et la teneur relative en eau qui permet de classer les plantes selon leur sensibilité ou leur tolérance à la pollution.

Les recherches conduites en zones arides ont démontré que certaines espèces présentent des valeurs APTI élevées, les classant comme espèces tolérantes (Stevens et al ,2020).

Les arbres ayant un indice de tolérance plus élevé sont tolérants à la pollution atmosphérique et peuvent être utilisés comme source de contrôle de la pollution atmosphérique, tandis que les arbres ayant un indice de tolérance moindre peuvent être

utilisés comme indicateur pour connaître le taux de pollution atmosphérique (Dadkhah-Aghdash et al, 2022).

Une carence notable dans le suivi et la collecte systématique des données sur la pollution atmosphérique persiste dans de nombreux pays en développement, comme l'a souligné l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2016). En Algérie, les recherches existantes sur l'état de la pollution de l'air reposent sur une diversité de méthodes, notamment la surveillance directe à l'aide d'échantillonnage de l'air (Baghedaoui *et al.*, 2004), l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) pour la cartographie et l'analyse spatiale de la pollution (Rahal *et al.*, 2018), ainsi que l'utilisation de bio-indicateurs végétaux pour évaluer l'impact des polluants sur les écosystèmes (Fadel *et al.*, 2005 ; Fadel *et al.*, 2011 ; Omar *et al.*, 2015 ; Merabti *et al.*, 2018). Certains travaux récents ont également combiné la bio-indication avec des mesures instrumentales in situ afin d'obtenir une évaluation plus complète et précise de la qualité de l'air (Maizi *et al.*, 2012).

Plus récemment, des études internationales ont confirmé que la couverture des données sur la pollution atmosphérique demeure très hétérogène en Afrique du Nord, où moins de 10 % des villes disposent de systèmes de suivi conformes aux standards internationaux (WHO, 2023 ; Mage *et al.*, 2024). En Algérie, les concentrations de particules fines (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) dépassent régulièrement les seuils recommandés par l'OMS, en particulier dans les zones urbaines soumises à de fortes pressions anthropiques telles que le trafic routier et l'activité industrielle (Schwela, 2024 ; Sonwani et Gadi, 2022). La biosurveillance végétale, grâce à ses avantages en termes de coût et d'intégration spatiale, est de plus en plus reconnue comme un outil complémentaire essentiel pour pallier l'insuffisance des réseaux de surveillance classiques (Khellaf et Amrani, 2011 ; Castell, 2017).

Dans un contexte d'urbanisation rapide à Laghouat et d'augmentation de la pollution atmosphérique, cette étude évalue la tolérance de différentes espèces végétales locales à l'aide de l'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI). L'analyse des paramètres biochimiques (pH foliaire, teneur en eau, chlorophylle, acide ascorbique) permet de comparer leur résistance aux polluants et de mieux comprendre les mécanismes physiologiques impliqués. Cette approche intégrée facilite le classement des espèces selon leur tolérance et propose des perspectives pour l'utilisation de certaines d'entre elles comme bio-indicateurs de la qualité de l'air ou pour l'aménagement d'espaces verts adaptés à Laghouat.

**CHAPITRE I**  
**SYNTHESE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I. Pollution Atmosphérique :**

### **1. Définition :**

La pollution atmosphérique, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (2021), se définit par la présence dans l'air de substances, de contaminants ou de polluants à des concentrations qui compromettent la santé humaine et son bien-être, ou qui engendrent d'autres formes de nuisances environnementales.

Selon la législation algérienne, la pollution atmosphérique constitue l'introduction de toute substance dans l'air ou l'atmosphère, causée par l'émission de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides (Journal Officiel, 2003).

### **2. Évolution Historique de la Pollution Atmosphérique :**

#### **2.1. Origines Anciennes :**

La pollution atmosphérique n'est pas un phénomène récent (Mosley, 2014). Les preuves de cette pollution se manifestent à travers les impacts observés dans les tissus pulmonaires momifiés (Pabst et Hofer, 1998). Même dans les civilisations anciennes, les activités 'nuisibles' engendraient des conséquences visibles à l'échelle locale, marquées par des odeurs désagréables et le noircissement du marbre des constructions (Wexler, 2014). La perception et la conceptualisation de l'air 'sain' et 'propre' ainsi que son association avec le bien-être et le maintien d'une bonne santé ont été abordées par les Romains, mettant en lumière la conscience humaine ancienne sur cette problématique (Baker, 2018).

#### **2.2. Ère Industrielle :**

L'utilisation du charbon constituait la pierre angulaire de l'industrialisation en Angleterre, puis dans le nord de l'Europe et aux États-Unis. La production de charbon a considérablement augmenté, passant de 10 millions de tonnes en 1800 à 780 millions de tonnes en 1900, favorisant une croissance économique importante (Brimblecombe et Bowler, 1992 ; Mosley, 2014). Cette évolution a eu pour conséquence une altération du paysage et un impact considérable sur la santé humaine et l'environnement.

Le charbon fut donc reconnu comme source de pollution par les citoyens, et des efforts de lutte furent dispensés par des associations composées de professionnels de la classe moyenne et de non-conformistes qui diffusaient des connaissances sanitaires au public, tout

en insistant sur l'importance d'un air sain pour la santé physique et mentale (Thorsheim, 2006).

### **2.3. Développement Juridique :**

Sur le plan juridique, le Manchester Police Act de 1806-1808 conférait aux autorités policières le pouvoir d'imposer des restrictions sur les émissions de fumées. En 1816, une loi locale relative à la pollution de l'air fut adoptée à Birmingham. Ces lois locales sur le contrôle des émissions évoluèrent progressivement en mesures répressives, aboutissant en 1818 à la création des commissions parlementaires (Akatsu, 2015).

### **2.4. Période Contemporaine :**

Après la Première Guerre mondiale, la science s'intéressa aux impacts des gaz de combat et aux processus de diffusion des substances dans l'atmosphère, notamment avec les travaux d'Owens (1918), Richardson (1920), Lettau (1931), Ashworth (1933), et Sherlock et Stalker (1940) Heidorn, (1978).

L'un des premiers contentieux internationaux concernant la pollution atmosphérique fut le différend Trail Smelter entre les États-Unis et le Canada (1938-1941) concernant les polluants transfrontaliers. Ce différend aboutit à l'établissement du principe du « Pollueur-Payeur » et à l'assurance qu'aucun État n'a le droit de causer des dommages environnementaux à un autre (ICOJ, 1941).

### **2.5. Période d'après-guerre et développements technologiques :**

Les recherches dans le domaine de la pollution atmosphérique ont connu un ralentissement significatif durant la Seconde Guerre mondiale. L'avènement de l'ère atomique et les progrès technologiques informatiques de l'après-guerre ont toutefois permis d'approfondir considérablement l'étude de la dispersion des polluants atmosphériques (Heidorn, 1978).

### **2.6. Législations nationales pionnières :**

#### **➤ Royaume-Uni :**

Le Royaume-Uni a adopté en 1956 le "Clean Air Act", une législation ambitieuse visant à réduire de 80% les émissions de fumées sur une période de 10 à 15 ans (Cayton, 1960).

➤ **États-Unis :**

Les États-Unis ont initié leur démarche législative dès 1955 avec l'adoption par le Congrès américain de l'Acte de Contrôle de la Pollution Atmosphérique, marquant la première reconnaissance fédérale de la pollution atmosphérique comme enjeu national et établissant un financement pour la recherche scientifique. En 1963, le Clean Air Act (CAA) américain fut promulgué, privilégiant l'éducation et la sensibilisation plutôt que la réduction directe des concentrations polluantes.

Cette législation a fait l'objet de plusieurs amendements successifs : l'Acte de Contrôle de la Pollution Atmosphérique automobile en 1965, l'Acte de la Qualité de l'Air (AQA) en 1967, les amendements de l'Acte de l'Air Pur de 1970 et 1977. L'amendement de 1990 a spécifiquement ciblé la réduction des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) des centrales électriques, suivi d'une seconde phase imposant des réductions plus strictes, complétée par des plans d'action étatiques pour la qualité de l'air (Kuklinska *et al.*, 2015).

➤ **Initiatives européennes :**

L'Union européenne a élaboré l'une des premières législations relatives à la qualité de l'air avec la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance, ratifiée à Genève en 1979. Cette convention établit des limitations d'émissions pour divers polluants : SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, composés organiques volatils (COVs), polluants organiques persistants (POPs), métaux lourds et particules en suspension (UNECE, 1979).

En 1996, l'UE a adopté la directive sur l'évaluation et le contrôle de la pollution atmosphérique, définissant des critères de qualité de l'air et des plans d'action pour limiter l'impact sanitaire et environnemental des polluants. Cette directive a été complétée par des textes spécifiques : concentrations de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et NO en 1999, CO et benzène en 2000, ozone en 2002, arsenic, cadmium, nickel et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en 2004, et un plan d'action thématique en 2005 (Kuklinska *et al.*, 2015).

## **2.7. Conférences internationales et accords mondiaux :**

À l'échelle mondiale, de nombreuses conférences ont été organisées pour aborder les questions environnementales, notamment la Conférence de Stockholm de 1972, qui a coïncidé avec une prise de conscience environnementale croissante et l'émergence de l'activisme écologique des années 1960 et 1970 (Epstein, 1995). Cette conférence historique de Stockholm a marqué le premier dialogue international sur l'impact de la croissance

économique sur la pollution environnementale, incluant la pollution atmosphérique, comme l'énoncent les principes 2 et 6, ainsi que la nécessité d'établir un plan d'action pour remédier à cette situation (ONU, 1973).

La Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone, adoptée en 1985, a souligné l'importance cruciale de mettre en place des législations pour sa conservation, de promouvoir la recherche scientifique et de favoriser l'échange des connaissances accumulées sur cette problématique (ONU, 1985). Cette convention a été complétée par le Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone en 1987, qui visait à évaluer et à réduire la production des substances nuisibles à la couche d'ozone (ONU, 1987).

➤ **Conférence de Stockholm (1972) :**

La Conférence de Stockholm de 1972 a coïncidé avec l'émergence de l'activisme environnemental des années 1960-1970 (Epstein, 1995). Elle constitue le premier dialogue international sur l'impact de la croissance économique sur la pollution environnementale, incluant la pollution atmosphérique, comme l'énoncent les principes 2 et 6, et la nécessité d'établir un plan d'action correctif (ONU, 1973).

➤ **Protection de la couche d'ozone :**

La Convention de Vienne de 1985 sur la protection de la couche d'ozone a souligné l'importance de mettre en place des législations protectrices, de promouvoir la recherche scientifique et de favoriser l'échange de connaissances (ONU, 1985). Le Protocole de Montréal de 1987 relatif aux substances appauvrissant la couche d'ozone a établi des objectifs d'évaluation et de réduction de la production de substances nocives (ONU, 1987).

➤ **Changement climatique :**

La Convention de Rio de 1992, également appelée "Sommet de la Terre", a abordé le changement climatique et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) (ONU, 1992). Le Protocole de Kyoto de 1997 a fixé des objectifs de réduction des émissions gazeuses pour les pays signataires (ONU, 1998).

## **2.8. Objectifs du Millénaire :**

En 2000, la Conférence des Nations Unies pour le Développement et l'Environnement à New York a établi les Objectifs du Millénaire, réabordant le réchauffement climatique (Titre V-B) et soulignant la gravité du phénomène. La conférence a mis en évidence l'augmentation

des températures observées et estimé une hausse potentielle de 1,2° à 3,5°C au cours du siècle, insistant sur la nécessité d'actions pour réduire les émissions de GES (ONU, 2000).

### **2.9. Normes sanitaires internationales :**

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a établi en 2000 des critères de qualité de l'air en Europe, basés sur les concentrations d'exposition tolérables pour différents polluants (OMS, 2000). Ces critères ont été actualisés mondialement en 2021 pour les particules en suspension (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et le monoxyde de carbone (CO), soulignant la nécessité d'évaluation et de surveillance de ces polluants (OMS, 2021). Plusieurs publications de l'OMS ont également documenté l'exposition des populations à la pollution atmosphérique (WHO, 2016) et l'impact sanitaire des polluants (OMS, 2019 ; OMS, 2021 ; OMS, 2022).

### **2.10. Ère contemporaine : COVID-19 et conflits :**

La propagation du virus COVID-19 en 2020 et l'identification d'une corrélation entre la mortalité liée à l'infection et les concentrations de polluants atmosphériques ont marqué le début d'une nouvelle ère de recherche. Deux problématiques principales ont émergé : l'impact de la pollution atmosphérique sur la transmission virale et l'aggravation des symptômes (Conticin *et al.*, 2020 ; Travaglio *et al.*, 2021), ainsi que le lien potentiel entre les mesures de confinement et l'amélioration de la qualité de l'air par la réduction des concentrations polluantes (He *et al.*, 2020 ; Venter *et al.*, 2020 ; Huang *et al.*, 2022).

### **2.11. Impact des conflits armés :**

Les conflits politiques et les guerres exercent un impact significatif sur l'environnement (Leaning, 2000 ; Palczewska, 2022), notamment sur la qualité de l'air. La guerre en Ukraine a ainsi entraîné une augmentation des concentrations de polluants atmosphériques (SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub>) dans les zones de conflit (Zalakeviciute *et al.*, 2022). Les bombardements sur Gaza ont également provoqué une pollution accrue due à l'utilisation de plus de 2100 explosifs entre le 7 et le 25 octobre 2023, aux gaz létaux et au phosphore blanc, impactant considérablement la qualité de l'air (Buheji et Al-Muhannadi, 2023).

### **2.12. Perspectives critiques et enjeux contemporains**

Plusieurs auteurs considèrent la destruction des écosystèmes et les injustices environnementales comme des stratégies de domination visant à détruire les ressources

naturelles (air, eau, sol, faune et flore, particulièrement les espèces autochtones), menaçant les populations et effaçant leur patrimoine naturel (Washington *et al.*, 2006). Les concepts relatifs aux injustices environnementales et leurs liens avec la pollution atmosphérique et la destruction environnementale constituent des domaines de recherche et de réflexion à approfondir, particulièrement dans le contexte actuel.

### 3. Sources et Origines de la Pollution Atmosphérique

Les sources de pollution atmosphérique sont variées, et les proportions de contribution de chaque source varient selon le pays et la région considérée ainsi que le polluant en question (Holman, 1999).

Les Sources de la pollution de l'air peuvent être classées de la manière suivante selon Choudhary et Garg (2013) :

#### 3.1. Sources Naturelles

Les sources naturelles de polluants atmosphériques incluent :

- La poussière issue des zones ayant peu ou pas de végétation et l'érosion éolienne
- Le méthane résultant de la digestion des animaux, notamment le cheptel
- La désintégration de l'uranium dans la croûte terrestre libérant le radon
- Les feux et incendies de forêts
- L'activité volcanique libérant le sulfure, les chlorures et les particules de cendre
- L'émission des COVs par la végétation durant les températures chaudes, qui interagissent avec les polluants primaires pour former les polluants secondaires

#### 3.2. Sources Anthropiques :

Les sources anthropiques comprennent :

- Sources stationnaires** : centrales électriques industrielles, usines, incinérateurs de déchets, combustion traditionnelle de la biomasse
- Sources mobiles** : automobiles, aéronefs et navires
- Agriculture et aménagement forestier** : génération de produits chimiques, poussière et combustion contrôlée
- Utilisation domestique** : peinture, vernis, produits cosmétiques
- Décharges publiques**
- Industrie militaire** : utilisation d'armes nucléaires, gaz toxiques et fusées

#### 4.Situation en Algérie:

En Algérie, les sources de pollution atmosphérique proviennent principalement des secteurs du transport, du traitement des déchets par incinération et de l'industrie. Ce dernier constitue l'une des causes majeures, en raison de l'utilisation d'unités dépourvues de systèmes antipollution ou dont l'efficacité épuratoire ne répond pas aux normes de protection environnementale.

Les 12 principales cimenteries émettent environ 4569 tonnes de NO<sub>x</sub>, 1 million de tonnes de SO<sub>2</sub>, 1269 tonnes de CO et 464 tonnes de COVNM, auxquelles s'ajoutent les émissions provenant de la combustion par les raffineries de pétrole (Nejjari *et al.*, 2003).

Selon Chettah (2019), le secteur du transport (majoritairement les voitures) constitue la première source de pollution atmosphérique en Algérie depuis 1971, avec des émissions de CH<sub>4</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, et les COVNM en augmentation entre 1994 et 2000 avec une contribution aux émissions totales de CO<sub>2</sub> pouvant atteindre 46% en 2015. Ceci est liée au fait que 85% des déplacements en Algérie, ainsi que 90% du volume des échanges de marchandises sont assurés par des moyens de transport routiers qui consomment presque exclusivement des hydrocarbures.

D'après le rapport de synthèse élaboré par Ministère de l'Environnement et des énergies renouvelables pour la Conférence des Nations Unies pour le Changement Climatique en 2023 (Tableau1), le taux des émissions brutes de GES de l'Algérie en 2020 est représenté par l'industrie de l'énergie (la combustion surtout), suivi par les affectations des terres, les procédés industriels et l'utilisation des produits, et les déchets.

**Tableau 1.** Proportions des émissions brutes de GES de l'Algérie en 2020 (kt CO<sub>2</sub>eq) (Unfccc ;2023).

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	HFCs	SF <sub>6</sub>	Totale	%
<b>Energie</b>	156.546	22.323	803	NO	NO	179.671	81,5
<b>Combustion</b>	148.183	287	776	NO	NO	149.246	67,7
<b>Fugitives</b>	8.362	22.035	27	NO	NO	30.424	13,8
<b>Procédés industriels et utilisation des produits</b>	10.878	6	39	1,206	36	12,166	5,5

<b>Agriculture, Forêt, et Autres affectations de terre</b>	NE	12.434	7,142	NO	NO	19.575	8,9
<b>Déchets</b>	409	7.922	801	NO	NO	9.132	4,1
<b>Total</b>	167.833	42.685	8.785	1.206	36	220.545	100,0
<b>%</b>	76.1	19,4	4,0	0,5	0,0		

### 5. Quelques polluants atmosphériques :

**Tableau 2.** Quelques polluants atmosphériques, leurs sources et leurs impacts sur la santé humaine.

<b>Polluant</b>	<b>Source</b>	<b>Impact sur la santé humaine</b>	<b>Références</b>
Poussière / particules en suspension	La combustion, les activités industrielles, le trafic routier, les activités minières, les éruptions volcaniques et les feux des forêts.	Inflammation respiratoire, allergies, maladies cardio-vasculaires et mortalité, risques des mutations génétiques, perturbation du système nerveux.	(An et al, 2018) (Mukherjee et Agrawal, 2017)
Composés organiques volatils	Les activités volcaniques, la combustion, l'utilisation des solvants, les émissions des véhicules, et le raffinage du pétrole.	Irritations des voies respiratoires, irritations cutanées, anémie aplasique, lésions hépatiques et rénales, leucémie aigüe myéloblastique.	(Hanif et al, 2021)
Polluants organiques persistants (Dioxines,	Les feux de forêts, les épurations volcaniques, la production des	Problèmes de développement, inflammation respiratoires, mutations	(OMS, 2021) (Otlés et Yildiz, 2003) (Qing Li et al, 2006)

BCP, Organochloré, HAP...)	pesticides et herbicides, l'incinération des déchets médicinales, et la chaîne alimentaire par bioaccumulation.	génétiques, cancers, maladies cardiaques, augmentation des risques des diabètes, perturbation des fonctions hépatiques, impacts sur la reproduction, le développement et du système endocrinien.	
Métaux lourds (plomb, mercure, nickel, arsenic, cadmium, etc.)	La bioaccumulation, les activités volcaniques, l'incinération des déchets, le plombage, les batteries, la combustion du charbon.	Maladies gastro- intestinales, troubles des fonctions hépatiques et rénales, maladies abdominales, problèmes du système nerveux, problèmes	(Jyothi, 2020)
NOx	La combustion de la biomasse/des combustibles fossiles, l'utilisation des fertilisants et les activités agricoles.	NOx	(OMS, 2000)
CO	Les processus industriels, le tabagisme, la combustion du gaz/charbon/biomasse, l'incinération des déchets, les feux des forêts, et l'oxydation des carburants/CH <sub>4</sub> .	Hypoxie tissulaire, troubles neurologiques, décès cardio- vasculaires, infarctus du myocarde et d'autres troubles cardiaques.	(OMS, 2000) (Badr et Probert, 1994)

SO <sub>2</sub>	Les activités volcaniques, la biodégradation, la combustion du charbon, les activités industrielles, les émissions de véhicules.	Maladies et troubles respiratoires, décès, irritation de la peau.	(OMS, 2000) (Ahmed et Sharma, 2014)
O <sub>3</sub>	Formé dans l'atmosphère suite à des réactions chimiques impliquant NO <sub>2</sub> , VOC et les rayons ultraviolet	Inflammations respiratoires, aggravation des maladies pulmonaires/altération des fonctions pulmonaires, réduction des fonctions respiratoires, maladies cardiaques, décès.	(OMS, 2000) (Nuvolone et al, 2018)

## 6. Impacts de la Pollution Atmosphérique :

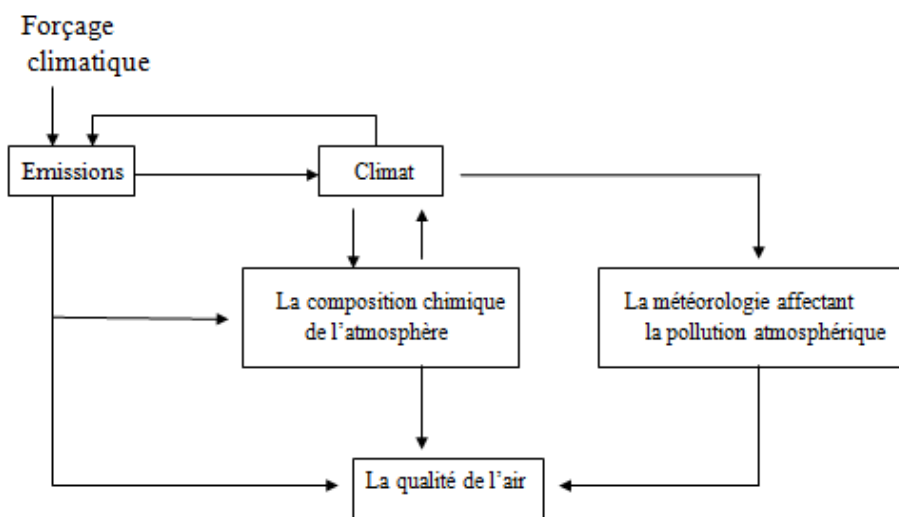
### 6.1. Impacts Écologiques :

#### 6.1.1. Pollution Atmosphérique et Changement Climatique :

La pollution atmosphérique et le changement climatique, bien que souvent perçus comme des phénomènes distincts, sont en réalité étroitement interdépendants. Les émissions de polluants atmosphériques libèrent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ainsi que d'autres gaz à effet de serre (GES), impactant simultanément la qualité de l'air et le climat. Ces émissions contribuent à l'élévation des températures globales et à la diminution des précipitations.

Inversement, les changements climatiques influencent la pollution atmosphérique en la générant ou en l'amplifiant, ce qui détériore davantage la qualité de l'air (Fiore *et al.*, 2015). Le réchauffement climatique affecte également l'agriculture en réduisant les rendements, avec une baisse globale de la productivité agricole estimée entre 3 % et 18 % d'ici 2080, et une diminution plus marquée, de 10 % à 25 %, dans les pays en développement (Mahato, 2014).

Par ailleurs, il entraîne l'extinction d'espèces, modifie leur phénologie, leurs interactions écologiques, ainsi que leurs aires de répartition, ce qui contribue à l'altération des écosystèmes (Reid, 2006).



**Figure 1.** Dynamique entre les émissions atmosphériques et les changements Climatiques (Jacob et Winner, 2008).

### 6.1.2. Pluies Acides :

Les pluies acides désignent toute forme de précipitation dont le pH est inférieur à 5,6. Elles résultent de la transformation atmosphérique de polluants tels que les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ), qui, en se combinant à l'humidité de l'air, sont incorporés aux précipitations et retombent sous forme de pluies acides. Ces phénomènes sont également désignés sous le terme de « dépôts acides » (de l'anglais « acid depositions »), lesquels se présentent sous deux formes : les dépôts liquides (pluie, neige, brouillard) et les dépôts secs, constitués de particules et de gaz acides transportés par le vent, qui se déposent sur les surfaces et sont ensuite lessivés lors des précipitations, contribuant ainsi à l'augmentation de l'acidité des eaux de pluie (Fatima *et al.*, 2020).

Les impacts des pluies acides sont multiples : elles provoquent une diminution de la fertilité des sols et de la diversité microbienne, une baisse de la productivité agricole, ainsi qu'une acidification des milieux aquatiques, entraînant un déclin de la biodiversité et une modification de la dynamique des écosystèmes aquatiques (Singh et Agrawal, 2008).

Par ailleurs, les pluies acides peuvent causer des lésions foliaires, telles que le blanchissement ou l'apparition de nécroses brunes sur les feuilles, dont la gravité dépend de la durée d'exposition et du niveau d'acidité des précipitations (Nouchi, 1993).

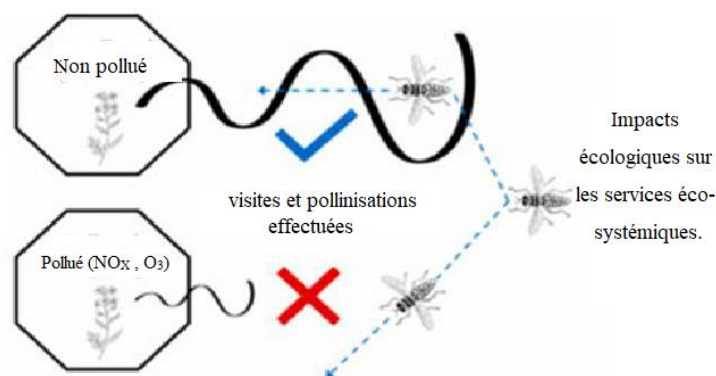


**Figure 2.** Impact des pluies acides sur les feuilles.

### **6.1.3. Impact sur la Pollinisation :**

La pollution atmosphérique perturbe la synchronisation phénologique entre les plantes et leurs pollinisateurs, compromettant ainsi l'équilibre de cette interaction essentielle. La présence de polluants dans l'air est susceptible de modifier la temporalité de ce cycle (voir Figure 3) ainsi que sa durée, en altérant les caractéristiques physiologiques des fleurs. Ces altérations affectent la stimulation visuelle et olfactive des pollinisateurs, ce qui impacte leur perception, leur capacité de détection, leur mémorisation et leur orientation vers la fleur (Duque et Dewenter, 2024).

Chez les insectes, en particulier chez les abeilles, l'exposition aux polluants atmosphériques nuit aux capacités cognitives, se manifestant notamment par une réduction de l'extension du proboscis, un comportement crucial pour la pollinisation (Leonard *et al.*, 2019). En conséquence, on observe une diminution de la fréquence de pollinisation et du nombre de fleurs visitées dans les zones où la qualité de l'air est dégradée (Ryalls *et al.*, 2022).



**Figure 3.** L’impact de la pollution atmosphérique sur la dynamique plante-pollinisateur (Duque et Dewenter, 2024).

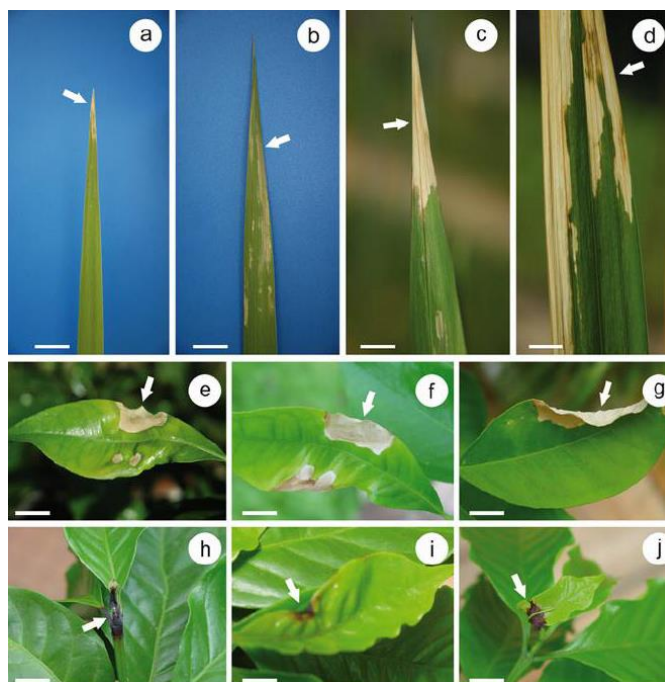
#### 6.1.4. Impact sur la biodiversité :

La pollution atmosphérique exerce un impact majeur sur la biodiversité, affectant aussi bien la faune terrestre qu’aquatique. Cette influence peut être directe, par inhalation des polluants, ou indirecte, via la chaîne trophique ou par des modifications de l’habitat, telles que l’acidification des milieux aquatiques pour les organismes qui y vivent. Les conséquences se manifestent soit de manière aiguë, par des mortalités, soit de façon chronique, à travers des morbidités, des lésions, des troubles de la reproduction ou des altérations du comportement. Les effets physiologiques tels que mortalité, morbidité, bioaccumulation ou variations des taux de croissance induisent des perturbations écologiques, notamment la diminution des populations, de la densité, de la biodiversité spécifique et une modification des dynamiques de compétition (Newman *et al.*, 1992).

Les espèces végétales sont généralement particulièrement vulnérables à la pollution atmosphérique : environ 398 espèces de plantes supérieures, 305 espèces de champignons et 238 espèces de lichens sont concernées. Cette sensibilité est d’autant plus marquée chez les végétaux inférieurs, tels que les lichens, les champignons et les bryophytes. La pollution atmosphérique entraîne une réduction des effectifs pour la majorité des espèces, une homogénéisation des communautés et une baisse globale de la biodiversité, accompagnées de modifications des interactions écologiques, des fonctions physiologiques et des habitats (Dudley et Stolon, 1996). Mishra et Sahu (2021) ont confirmé expérimentalement ces effets, montrant que les sites pollués présentent une diminution de la biomasse herbacée et de l’hétérogénéité spécifique. De plus, les individus présents dans ces milieux affichent des lésions foliaires et des phénomènes de décoloration attribués à la pollution de l’air.

### 6.1.5. Lésions Foliaires :

La notion de blessure foliaire visible fait référence à toute altération morphologique observable sur la feuille, généralement quantifiée par le pourcentage de la surface foliaire affectée par des nécroses, des chloroses ou d'autres formes de décoloration (Heath,1980). Lorsqu'elles sont exposées à la pollution atmosphérique, notamment au dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), les feuilles présentent des lésions caractéristiques, accompagnées d'une diminution de leur pH et d'une augmentation de la synthèse et de l'accumulation de composés phénoliques, ce qui se manifeste par l'apparition de taches foncées sur le limbe (Pawar *et al.*, 2010). L'ozone atmosphérique est également un facteur important dans l'apparition de blessures foliaires, avec des symptômes allant de décolorations brunes, noirâtres, mauves ou jaune pâle à des chloroses, selon l'espèce végétale concernée (Feng *et al.*, 2014). Par ailleurs, la pollution générée par le trafic routier a été identifiée comme un facteur aggravant, favorisant l'apparition de pigmentations, de chloroses et de nécroses foliaires, ainsi que des modifications morphologiques des feuilles, notamment une variation du rapport longueur/largeur (Nandy *et al.*, 2014).



**Figure 4.** Quelques formes des blessures foliaires (Mesquita et al, 2011).

### 6.1.6. Impact de la pollution atmosphérique sur l'agriculture :

La pollution atmosphérique exerce un impact notable sur l'agriculture, principalement par la diminution des rendements. Il a été démontré que l'ozone troposphérique ( $\text{O}_3$ ) réduit significativement la productivité de cultures majeures telles que le coton, le riz et le blé

(Mahmood *et al.*, 2020). Selon Mills *et al.* (2018), la baisse annuelle des rendements peut être estimée à 12,4 % pour le soja, 7,1 % pour le blé, 6,1 % pour le maïs et 4,4 % pour le riz. Par ailleurs, la pollution atmosphérique pourrait être responsable d'une réduction de la productivité agricole supérieure à celle induite par le changement climatique, notamment en affectant la physiologie des espèces cultivées, l'exposition à la lumière, l'accès aux ressources hydriques et la disponibilité de la luminosité (Sillmann *et al.*, 2021).

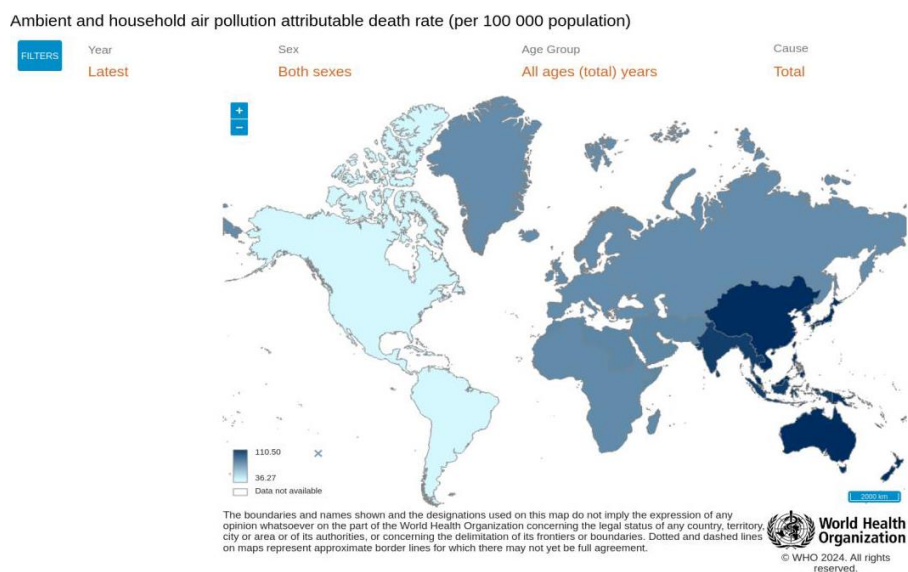
Le facteur de productivité agricole totale (TFP) constitue un indicateur clé pour évaluer la performance et la durabilité des systèmes agricoles (Melfou *et al.*, 2007). Des recherches récentes montrent que la pollution atmosphérique peut entraîner une diminution du TFP mondial de 0,104 % et 0,207 % respectivement pour chaque augmentation de 1 % des concentrations de PM<sub>2,5</sub> et d'O<sub>3</sub> (Dong & Wang, 2023).

## **6.2. Impacts sur la Santé Humaine :**

### **6.2.1. Mortalité :**

La pollution atmosphérique constitue l'une des principales causes de mortalité à l'échelle mondiale. Selon le rapport Global Burden of Disease (2019), parmi 87 facteurs de risque de décès analysés dans 204 pays, la pollution de l'air a été classée au quatrième rang, représentant 11,3 % (soit 2,92 millions) des décès chez les femmes et 12,2 % (soit 3,75 millions) chez les hommes (Murray *et al.*, 2020).

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a estimé dans son guide sur la santé et l'environnement publié en 2022 que la pollution de l'air ambiant était responsable de 4,2 millions de décès, tandis que la pollution de l'air intérieur des habitations causait 3,8 millions de décès, soit un total de 8 millions de décès attribués à la pollution atmosphérique à l'échelle mondiale (OMS, 2022). Par ailleurs, les données de l'OMS pour l'année 2019 (voir Figure 3) indiquent qu'en Algérie, environ 17 295 décès étaient imputables à la pollution de l'air ambiant et 667 décès à la pollution intérieure (OMS, 2019).



**Figure 5.** Carte des décès attribué à la pollution atmosphériques par 100 000 personnes en 2019 (via OMS-OSM).

### 6.2.2. Morbidités :

La pollution atmosphérique représente un facteur majeur de morbidité, notamment en ce qui concerne les pathologies cardiovasculaires (Bourdrel *et al.*, 2017). Elle est associée à diverses affections, telles que les inflammations pulmonaires, les arythmies, les cardiopathies ischémiques et d'autres formes de cardiomyopathies (Meo et Suraya, 2015). Par ailleurs, la pollution de l'air a également des effets délétères sur la santé cutanée, étant impliquée dans la formation de radicaux libres, l'apparition d'inflammations et l'altération de la microflore cutanée (Mancebo et Wang, 2015).

Le lien entre pollution atmosphérique et santé mentale a également été largement documenté. Plusieurs études ont mis en évidence une corrélation entre l'exposition aux polluants atmosphériques et l'augmentation des hospitalisations psychiatriques, ainsi que le développement ou l'aggravation de troubles tels que la schizophrénie, la dépression, l'anxiété, les troubles de l'attention et l'autisme. Ces effets seraient attribués à la neurotoxicité et aux perturbations hormonales induites par la pollution (Buoli *et al.*, 2018). Toutefois, cet impact n'est pas uniforme : il varie selon le niveau d'éducation, le revenu et la situation socio-économique, affectant particulièrement les pays développés où la sensibilisation aux enjeux environnementaux est plus marquée (Hu *et al.*, 2021).

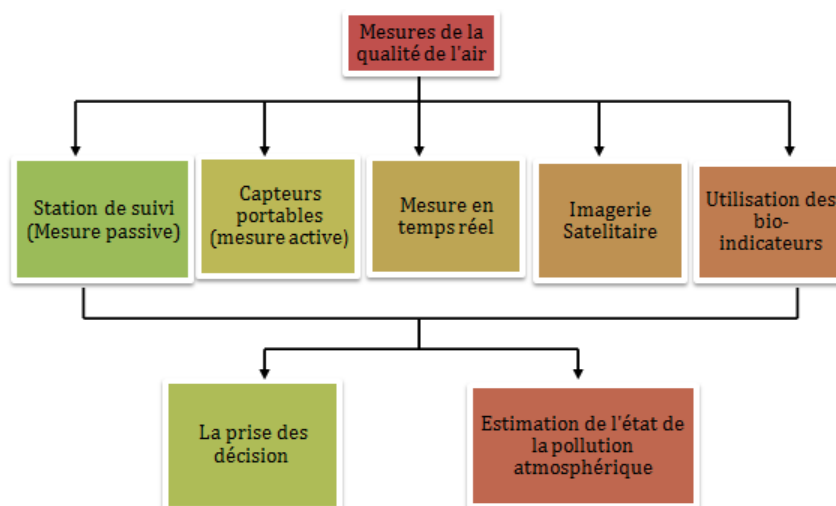
En Algérie, la littérature disponible met en avant l'étude de Nejari *et al.* (2003), qui rapporte qu'une enquête menée entre 1990 et 1991 auprès de 600 travailleurs a révélé une

prévalence nettement plus élevée de bronchite chronique chez les employés des industries sidérurgique et des engrais phosphatés et azotés (10,3 %) par rapport aux témoins exerçant dans des environnements non industriels (3,4 %). À Annaba, où la population est exposée aux émissions du complexe sidérurgique d'El Hadjar et de l'usine chimique Asmidal, le nombre d'asthmatiques est estimé à 50 000, dont 42 % ont été hospitalisés au moins une fois. En 2009, une étude sur l'impact de l'industrie cimentière a mis en évidence une altération des paramètres sanguins chez les individus exposés, en lien avec la pollution atmosphérique (Aouimeur *et al.*, 2009). Par ailleurs, l'impact des métaux lourds, notamment le plomb, sur le faible poids de naissance a également été étudié, avec une association entre l'exposition au tabac, aux polluants atmosphériques et le risque de faible poids à la naissance (Moussaoui, 2020).

## **7. Mesure de la Pollution Atmosphérique :**

### **7. 1. Méthodes de Mesure de la Pollution Atmosphérique :**

L'évaluation de la pollution atmosphérique constitue un outil fondamental pour caractériser la qualité de l'air et élaborer des stratégies efficaces de lutte contre ce phénomène. Elle repose sur la compréhension approfondie du comportement des différents polluants atmosphériques ainsi que de leurs caractéristiques, notamment leurs sources, leur chimie et leurs dynamiques spatio-temporelles (Sokhi *et al.*, 2022). Cette démarche permet également d'estimer globalement l'impact de la pollution de l'air sur la santé humaine dans divers contextes environnementaux et socio-économiques, et de réaliser les analyses épidémiologiques nécessaires. Par ailleurs, l'évaluation de la pollution atmosphérique est essentielle pour l'établissement de standards de qualité de l'air, facilitant ainsi la prise de décision en matière de politiques de santé publique et de gestion environnementale (OMS, 2021).



**Figure 6.** Méthodes de la mesure de la pollution atmosphérique et leur intérêt

### 7.1.1. Echantillonnage actif et l'échantillonnage passif :

L'échantillonnage actif et passif de l'air constituent deux méthodes couramment employées pour l'analyse de la qualité atmosphérique. Ces approches reposent sur le prélèvement d'échantillons d'air, suivi d'étapes de prétraitement, de séparation et de détection des différents polluants afin d'en déterminer les concentrations et d'étudier leur comportement. L'échantillonnage actif se distingue par sa capacité à fournir des données en continu sur une période réduite, généralement à partir d'un site fixe. À l'inverse, l'échantillonnage passif utilise des dispositifs compacts et moins onéreux, offrant une grande flexibilité d'observation et une résolution spatiale accrue. Ces appareils, souvent portables (fixés sur des sacs à dos ou des véhicules), permettent la réalisation de mesures en divers points géoréférencés, simulant ainsi les déplacements de la population (Xie *et al.*, 2017 ; Huang *et al.*, 2018).

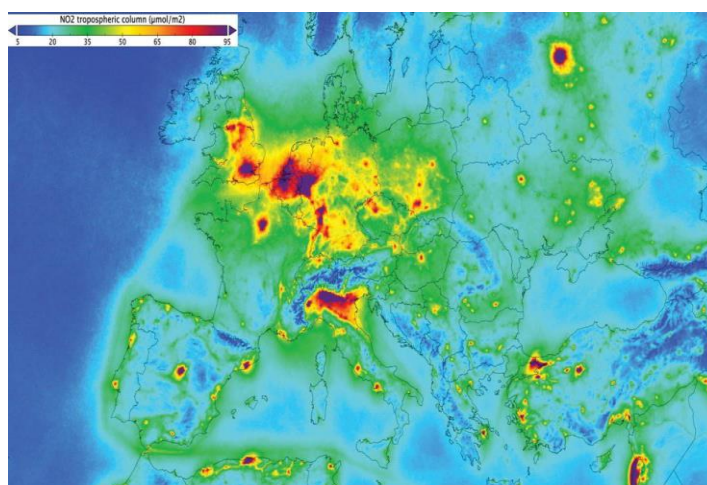
### 7.1.2. Mesure en temps réel :

Les mesures en temps réel offrent la possibilité d'accéder à des données sur la qualité de l'air à un instant précis, ce qui permet d'analyser et d'identifier la concentration des polluants sur des échelles spatio-temporelles étendues. Ces mesures sont particulièrement utiles pour l'analyse et l'évaluation des sites, ainsi que pour l'élaboration de cartes de pollution, facilitant ainsi l'accès du public à des informations actualisées sur leur environnement et contribuant à la sensibilisation (Devarakonda *et al.*, 2013).

Ce type de dispositif repose sur la collecte de données relatives à la qualité de l'air ambiant, mais aussi à celle de l'air intérieur, sachant que la population passe environ 90 % de son temps à l'intérieur des habitations. De nombreux auteurs proposent différents systèmes de suivi des concentrations de polluants atmosphériques (Benammar *et al.*, 2018). Toutefois, la majorité de ces systèmes s'appuie sur une architecture IoT (Internet des objets), composée d'un ensemble d'appareils interconnectés capables d'échanger des données sans intervention humaine. Ces systèmes reposent généralement sur un capteur ou un ensemble de capteurs, la connectivité, le traitement automatisé des données et une interface utilisateur dédiée (Moharana *et al.*, 2020).

### 7.1.3. Mesure par Figure rie satellitaire :

L'utilisation des satellites constitue un atout majeur pour l'optimisation de la localisation et du suivi des points de surveillance de la qualité de l'air. Grâce à l'Figure rie satellitaire, il est possible d'obtenir un recouvrement spatial beaucoup plus large, à l'échelle régionale voire mondiale, permettant ainsi de détecter les pics de concentration des polluants, d'analyser les gradients de pollution et de suivre les déplacements de ces substances dans l'atmosphère. Les résultats obtenus par cette méthode se distinguent par leur précision et leur représentativité, offrant une vision globale et détaillée qui complète avantageusement les données issues des réseaux de surveillance classiques (Yu *et al.*, 2018).



According to the Air Quality in Europe report published in 2018 by the European Environment Agency (EEA), 19 EU Member States recorded nitrogen dioxide concentration above the annual permissible limit. Imagery from Sentinel-5P

**Figure 7.** Carte de la pollution atmosphérique en NO2 en 2018 par Figure satellitaire.

### 7.1.4. Utilisation des bio-indicateurs :

L'utilisation des bio-indicateurs représente une approche à la fois efficace et économique pour l'évaluation de la pollution atmosphérique. Cette méthode repose sur

l'observation des plantes ou des animaux et sur leur capacité à manifester des modifications physiologiques, morphologiques ou comportementales en réponse aux variations des polluants présents dans l'air. Les bio-indicateurs permettent ainsi de détecter les effets d'une exposition brève à la pollution, sur des périodes allant de quelques heures à plusieurs semaines, mais aussi de mettre en évidence les conséquences de l'exposition chronique, qui se traduisent par une accumulation progressive des impacts sur les systèmes biologiques, parfois sur plusieurs mois, années, voire décennies (Takano *et al.*, 2024).

### 1) Types des bio-indicateurs :

#### - Lichens :

Les lichens sont utilisés comme bio-indicateurs depuis 1966 en raison de leur grande sensibilité aux divers facteurs environnementaux. Plusieurs paramètres physiologiques servent à évaluer l'impact des dégradations environnementales sur ces organismes, notamment la photosynthèse, la teneur en chlorophylle et sa dégradation, la réduction de la production d'ATP, ainsi que les variations du taux de respiration. L'approche méthodologique consiste donc à réaliser des évaluations périodiques des variations physiologiques, des modifications morphologiques, ou encore à mesurer la bioaccumulation des polluants au niveau des thalles (Conti et Cecchetti, 2001).

L'indice de pureté atmosphérique (IPA) repose sur le principe que les modifications observées au sein des communautés de lichens sont corrélées aux variations de la pollution atmosphérique. Cet indice permet ainsi d'estimer le niveau de pureté de l'air, en se basant sur la fréquence, le nombre et la tolérance des espèces de lichens présentes sur un site donné. La formule la plus couramment utilisée est  $IAP = \sum Fi$ , où  $Fi$  représente la fréquence de chaque espèce par maille. Avec un taux de précision de 97 %, les résultats obtenus sont ensuite classés selon des catégories prédéfinies afin d'être interprétés (Conti et Cecchetti, 2001).

**Classe A** :  $0 \leq IPA \leq 12,5$  très forte pollution

**Classe B** :  $12.5 \leq IPA \leq 25$  forte pollution

**Classe C** :  $25 < IPA \leq 37.5$  pollution modérée

**Classe D** :  $37.5 < IPA \leq 50$  faible pollution

**Classe E** :  $IPA > 50$  très faible pollution



**Figure 8.** *Xanthoria parietina*, lichens épiphytes utilisé dans la bio-indication de la pollution atmosphérique.

**- Mousses :**

La surveillance de la pollution atmosphérique à l'aide des mousses s'est considérablement développée depuis les années 1970 (Bargali, 2016). En raison de leur forte dépendance à l'atmosphère et de leur capacité à accumuler les éléments présents dans l'air, les mousses sont utilisées comme bio-indicateurs passifs pour l'évaluation de l'accumulation des substances toxiques atmosphériques. Cette évaluation repose généralement sur l'analyse des concentrations d'éléments dans les tissus de ces bryophytes (Bargali, 2016 ; Barandovski *et al.*, 2024). L'approche peut consister soit en la transplantation de mousses, soit en l'utilisation de mousses indigènes ou en croissance naturelle. Ces méthodes permettent d'identifier les points chauds de pollution, de cartographier la distribution spatiale des polluants et de suivre l'évolution de cette distribution dans le temps (Takano *et al.*, 2024).



**Figure 9.** *Funaria hygrometrica*, une mousse utilisée pour la bio-indication de la pollution atmosphérique.

### I.3. Végétaux supérieurs :

La variabilité, la distribution spatiale et la diversité des réponses des plantes supérieures aux facteurs environnementaux, y compris aux polluants atmosphériques, justifient leur utilisation comme bio-indicateurs, bien que leur précision soit généralement inférieure à celle des lichens et des mousses (Takano *et al.*, 2024).

La bio-indication basée sur les plantes supérieures repose principalement sur l'observation des feuilles, qui constituent le premier organe en contact avec les polluants. L'évaluation des blessures foliaires visibles s'appuie sur des critères tels que la gravité, la fréquence et l'indice de blessure foliaire (LII). Par ailleurs, l'analyse des modifications biochimiques et physiologiques des cellules, ainsi que des variations de biomasse, permet de compléter le diagnostic de la réponse des végétaux à la pollution atmosphérique. On distingue la biosurveillance active, qui consiste à transplanter des espèces dans un site d'étude et à observer les changements au fil du temps, et la biosurveillance passive, qui s'intéresse à l'accumulation des métaux lourds dans les tissus végétaux (Nakazato *et al.*, 2018).

Les végétaux présentent des comportements variés face aux polluants, ce qui permet de multiplier les types d'observations. Par exemple, *Nicotiana tabacum* L. et *Trifolium repens* L. sont utilisés comme bio-indicateurs de l'ozone, tandis que *Lactuca sativa* L. sert d'indicateur pour les éléments traces, les résultats obtenus étant en corrélation avec ceux des appareils de mesure en termes de présence et de concentration des polluants (Nali *et al.*, 2004). L'analyse des aiguilles de conifères constitue également une méthode efficace pour la détection des éléments traces dans l'environnement (Korčeková *et al.*, 2015).

## II. Parties végétales utilisées en bio-indication :

### II.1. Feuilles :

L'utilisation des feuilles comme outil de bio-indication permet de réaliser des analyses élémentaires par spectrométrie, afin d'identifier les éléments présents dans leurs tissus (Molnár *et al.*, 2020), ainsi que des analyses quantitatives des variations des pigments photosynthétiques en réponse à différents polluants atmosphériques (Tripathu et Gautam, 2007). Dans les environnements pollués, on observe fréquemment une diminution du taux de chlorophylle (Shingade *et al.*, 2018), phénomène attribué au remplacement de l'ion  $Mg^{2+}$  par deux atomes d'hydrogène dans la chlorophylle a, et à la suppression d'un groupement phénol dans la chlorophylle b (Tripathu et Gautam, 2007 ; Joshi et Swami, 2009).

Les stomates constituent également un indicateur pertinent. Les analyses histologiques et anatomiques montrent que les polluants atmosphériques, en particulier l'ozone (O<sub>3</sub>), affectent ces structures, qui sont les premiers points de contact du tissu foliaire avec l'air ambiant et jouent un rôle clé dans la régulation des échanges gazeux entre la plante et son environnement. La pollution atmosphérique modifie la distribution et la morphologie des stomates (Cozea *et al.*, 2018), se traduisant souvent par une augmentation de leur densité, des déformations et une réduction de leur taille (Dimitrova et Yurukova, 2005 ; Verma & Singh, 2006).

On distingue également l'indice stomatique (Is), défini par la formule  $Is = (S / (E + S)) \times 100$ , où S représente le nombre de stomates par unité de surface et E le nombre de cellules épidermiques sur la même unité. La densité stomatique (Ds) correspond à la moyenne du nombre de stomates comptés par unité de surface, généralement exprimée en mm<sup>2</sup> (Diop *et al.*, 2008).

## II.2. Ecorce des arbres :

L'écorce est couramment utilisée comme bio-indicateur des polluants atmosphériques, en raison de sa partie morte qui retient efficacement les éléments présents dans l'air avec lesquels elle entre en contact. La capacité de captation des polluants par l'écorce dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'espèce arboricole concernée, du degré de porosité et de la présence de fissures à la surface de l'écorce ((Santos et al, 2021). Chez certaines espèces, bien que les caractéristiques varient, la concentration en métaux lourds demeure nettement plus élevée dans les écorces prélevées en zones polluées (Alatou et Sahli, 2019). Outre les métaux lourds, les écorces sont également employées pour la bio-indication des polluants organiques, grâce à leur teneur en lipides qui favorise l'accumulation de ces substances, ainsi que pour d'autres polluants inorganiques tels que le SO<sub>2</sub>, par l'analyse de l'acidification de l'écorce (Chrabąszcz et Mróz, 2017).

## 3. Indice de la Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) :

L'indice de tolérance à la pollution atmosphérique (APTI), ou Air Pollution Tolerance Index (APTI) en anglais, est un indicateur empirique développé par Singh et Rao (1983) permettant d'évaluer la capacité des plantes à tolérer la pollution de l'air. Cet indice intègre quatre paramètres biochimiques majeurs : la teneur en acide ascorbique, la teneur totale en chlorophylle, la teneur relative en eau et le pH foliaire. L'APTI reflète ainsi la tolérance

globale d'une espèce végétale face aux stress induits par les polluants atmosphériques et se calcule selon la formule suivante :

$$APTI = \frac{A(T + P) + R}{10}$$

Dont :

A : La teneur en acide ascorbique (mg/g).

T : La teneur en chlorophylle (mg/g).

P : Le pH de l'extrait des feuilles.

R : La teneur relative en eau (%).

La classification des végétaux selon leur APTI (Flowers et al, 2007) :

-Sensibles :  $APTI < 12$

-Intermédiaires :  $13 < APTI < 20$

-Tolérantes :  $APTI > 20$

L'acide ascorbique joue un rôle essentiel en tant qu'antioxydant, contribuant à la résistance des plantes face à divers facteurs environnementaux, dont la pollution atmosphérique. Il protège notamment les enzymes impliquées dans la photosynthèse contre l'inactivation. L'efficacité de l'acide ascorbique dépend du pH : sa concentration diminue lorsque le pH est faible, ce qui rend les plantes plus sensibles à la pollution atmosphérique dans ces conditions.

La teneur relative en eau est liée à la perméabilité cellulaire ; une perméabilité accrue peut entraîner une perte d'eau et de nutriments dissous, provoquant ainsi une sénescence prématurée des feuilles. Quant à la teneur en chlorophylle, elle reflète l'activité photosynthétique, la croissance et le développement de la biomasse végétale. Le stress induit par les polluants atmosphériques peut déclencher des réactions photochimiques telles que l'oxydation, la réduction et la formation de phéophytine, entraînant des modifications morphologiques et physiologiques chez la plante (Sharma *et al.*, 2017).

Singh et Rao (1983) ont ainsi développé l'indice de tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) sur la base des altérations biochimiques observées sur quatre paramètres sensibles à la pollution : la teneur relative en eau selon (Farooq et Beg, 1980 ; Rao,

1979), la teneur en acide ascorbique (Keller et Schwager, 1977), la teneur en chlorophylle (Bell & Mudd, 1976) et le pH foliaire (Chaudhary et Rao, 1977). Leur objectif était de quantifier le degré de sensibilité ou de tolérance des plantes à la pollution atmosphérique (Singh *et al.*, 1991).

L'APTI permet ainsi d'apprécier la variabilité de la susceptibilité des plantes à la pollution de l'air et de distinguer les espèces sensibles des espèces tolérantes (Singh *et al.*, 1991). Cet indice est largement utilisé dans de nombreux domaines de recherche, notamment pour la surveillance et la bio-indication de la pollution atmosphérique, ainsi que pour la planification des plantations urbaines (Panda *et al.*, 2018).

## 7.2. Mesure de la pollution atmosphérique en Algérie :

La littérature scientifique disponible sur la thématique met en évidence la diversité des méthodes utilisées pour la mesure et la détection de la pollution atmosphérique. Parmi celles-ci, l'utilisation des bio-indicateurs s'impose comme l'approche la plus courante, en raison de sa simplicité, de sa disponibilité et de son coût relativement faible (Takano *et al.*, 2024). Cette tendance se retrouve également dans les travaux menés en Algérie. Par exemple, Alioua *et al.* (2008) ont étudié l'accumulation spatio-temporelle du mercure dans la région de Azzaba en utilisant trois espèces de plantes supérieures (*Olea europaea*, *Cupressus sempervirens* et *Casuarina equisetifolia*) ainsi que deux lichens (*Xanthoria parietina* et *Ceratonia siliqua*) par transplantation, afin de comparer les taux d'accumulation entre ces espèces. L'usage des lichens est fréquent, comme l'illustre l'application de *Xanthoria parietina* pour évaluer la bioaccumulation des hydrocarbures dans le pôle électrochimique de Skikda (Fadel *et al.*, 2005).

L'indice de pureté atmosphérique (IPA), fondé sur la diversité floristique des lichens, a été employé pour classer les stations de la wilaya de Skikda selon leur niveau de pollution, à partir de 39 espèces inventoriées, et pour élaborer une échelle de résistance des espèces à la pollution de l'air (Fadel *et al.*, 2012). De même, l'IPA a été utilisé à l'est d'Alger, calculé à partir de 24 espèces recensées, confirmant l'association entre la répartition des lichens et la pollution atmosphérique, et permettant de classer les espèces selon leur degré de résistance (Merabti *et al.*, 2018).

Par ailleurs, *Xanthoria parietina* et *Funaria hygrometrica* ont été transplantées dans deux stations fortement exposées au SO<sub>2</sub> dans la wilaya d'Annaba, en complément des

données issues des stations de mesure. L'étude des paramètres biologiques de ces espèces a montré que *Xanthoria parietina* possède une capacité de bio-indication et de bioaccumulation supérieure à celle de *Funaria hygrometrica* (Maizi *et al.*, 2010). Ghennam *et al.* (2017) ont combiné l'indice de pureté atmosphérique avec l'indice d'impact humain afin de démontrer leurs interactions, en intégrant la bio-indication dans un système d'information géographique pour documenter la qualité de l'air.

D'autres végétaux ont également été utilisés, tels que la mousse *Bryum argenteum* pour la mesure de la pollution au plomb par transplantation (Omar *et al.*, 2015), ou encore des plantes supérieures comme le rosier (*Rosa odorata*), en étudiant différents paramètres physiologiques (potentiel hydrique, concentration en chlorophylle, taux de germination, longueur des tubes polliniques) affectés par la pollution atmosphérique, ce qui confirme l'intérêt de cette espèce en bio-indication (Tlili *et al.*, 2009). Les arbres, notamment *Eucalyptus cladocalyx* et *Cupressus sempervirens* var. *fastigiata*, ont aussi été employés pour la bio-indication de la pollution par les métaux lourds, en analysant les feuilles et les écorces (Alatou & Sahli, 2019).

En complément des méthodes biologiques, des approches non-biologiques ont également été adoptées : par exemple, des mesures *in situ* ont permis de quantifier la pollution au plomb à Alger, révélant des dépassements fréquents des seuils recommandés par l'OMS, principalement attribués au trafic routier (Boughedaoui, 2004). Par ailleurs, les réseaux de surveillance de la pollution atmosphérique à Annaba ont fourni des données précieuses pour les études épidémiologiques (Fadel *et al.*, 2012). L'intégration des systèmes d'information géographique a également permis d'estimer les émissions polluantes issues du trafic routier à l'échelle de l'agglomération d'Oran (Rahal *et al.*, 2018).

Parmi les travaux récents, il convient de souligner l'apport pionnier de l'étude de Allali (2024), qui constitue la première application en Algérie de l'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) sur des espèces végétales locales. Cette recherche menée dans la région de Laghouat, a évalué l'impact de la pollution atmosphérique sur quatre espèces : *Eucalyptus globulus*, *Nerium oleander*, *Zizyphus lotus* et *Peganum harmala*, en comparant deux sites contrastés (Hassi R'mel, site potentiellement pollué, et Aflou, site moins pollué). L'approche méthodologique reposait sur la mesure et la comparaison de paramètres biochimiques et physiologiques (acide ascorbique, chlorophylle totale, pH, teneur relative en eau), intégrés dans le calcul de l'APTI.

En résumé, la littérature algérienne sur l'utilisation des bio-indicateurs pour l'analyse de la pollution atmosphérique met en avant une diversité d'approches et d'espèces étudiées, comme synthétisé dans le (Tableau 3).

**Tableau 3.** Résumé de quelques études portées sur l'utilisation des bio-indicateurs pour l'estimation de la pollution atmosphérique en Algérie.

Auteur(s)	Titre	Espèce (s) utilisé
Fadel et al, 2005.	Bio-indication de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures totaux du complexe pétrochimique de Skikda (nord-est algérien) à l'aide d'une espèce lichénique épiphyte <i>Xanthoria parietina</i> .	<i>Xanthoria parietina</i> .
Alioua et al, 2008.	Detection et Etude de la Pollution Mercurielle à L'aide des Bioindicateurs Dans la Region de Azzaba (Algerie Orientale)	<i>Olea europea</i> , <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Xanthoria parietina</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> .
Tlili et al, 2009.	Effets de la pollution atmosphérique sur les feuilles et le pollen de <i>Rosa odorata</i> dans la région de Annaba (Confrontation avec les données de SAMA SAFIA)	<i>Rosa odorata</i> .
Fadel et al, 2011.	Essai d'une cartographie de la qualité de l'air d'une ville industrielle du nord-est algérien l'utilisation de la bio-indication lichénique.	Espèces lichéniques (diversité).
Maizi et al, 2012.	Jumelage des bio-indicateurs et d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air pour la détection de la	<i>Xanthoria parietina</i> , <i>Funaria hygrometrica</i> .

	pollution par le SO <sub>2</sub> dans la région de Annaba (Algérie).	
Khelil et al, 2015.	Effet de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures sur le lichen <i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th (Teloschistaceae) dans la zone de Hassi Messaoud (Sahara septentrional algérien).	<i>Xanthoria parietina.</i>
Omar et al, 2015.	Bioaccumulation de la pollution plombique d'origine routière au moyen d'une mousse ( <i>Bryum argenteum</i> ) dans la ville de Tiaret (Algérie) : classes de pollution et cartographie.	<i>Bryum argenteum.</i>
Merabti et al, 2018	Inventaire des lichens de la région Est d'Alger et leurs utilisations comme bio-indicateurs de la pollution atmosphérique	Espèces lichéneuses (diversité).
Alatou et Sahli, 2019.	Utilisations des feuilles et écorces des arbres d'un site contaminé et un site non-contaminé pour l'indication de la pollution métallique.	<i>Eucalyptus cladocalyx,</i> <i>Cupressus sempervirens var. fastigiata</i>
Boumakhleb et al, 2020.	Les lichens pour la bio-indication de la pollution atmosphérique : Résultats de la région du nord de l'Afrique	Espèces lichéneuses (diversité).
Belguidoum et al, 2022.	Biosurveillance de la pollution atmosphérique par la biodiversité lichénique dans la zone urbaine de Sétif, Algérie	Espèces lichéniques (diversité).

Allali ,2024.	Impact de la pollution atmosphérique sur quelques espèces végétale dans la région de Laghouat.	<i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Nerium oleander</i> , <i>Zizyphus lotus</i> et <i>Peganum harmala</i> .
---------------	--	---

## II. Généralité sur les espèces étudiées :

### 1. *Ficus microcarpa* (Le Laurier d'Inde/فيكس) :

#### 1.1. Description botanique

*Ficus microcarpa*, également connu sous les noms de laurier d'Inde, banian de Malaisie ou ficus ginseng, appartient au genre *Ficus* et à la famille des Moracées. C'est un grand arbre tropical qui peut atteindre 25 à 30 mètres de hauteur dans son milieu naturel, avec un tronc massif souvent formé par la fusion de nombreuses racines aériennes, qui peuvent descendre des branches et s'enraciner dans le sol, formant parfois plusieurs troncs ou des « racines-piliers ». Les feuilles, persistantes, sont ovales à elliptiques, coriaces, glabres (sans poils), vert vif et lustrées, mesurant généralement de 3 à 12 cm de long et de 2 à 9 cm de large, avec 5 à 9 paires de nervures latérales principales (Corner, 1965 ; Starr *et al.*, 2003 ; PIER, 2014).



**Figure 10.** Photo prise de *Ficus microcarpa* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae  
**Sous-règne :** Tracheobionta  
**Super-division :** Spermatophyta  
**Division :** Magnoliophyta  
**Classe :** Magnoliopsida  
**Sous-Classe :** Hamamelididae  
**Ordre :** Urticales  
**Famille :** Moraceae  
**Genre :** Ficus  
**Espèce :** *Ficus microcarpa*

### 1.2. Ecologie de l'espèce :

*Ficus microcarpa* est une espèce tropicale et subtropicale originaire d'Asie tropicale, du sud de la Chine, de Taïwan, des îles du Pacifique occidental et de l'Australie (CANBR, 2010). La température idéale pour cette espèce est comprise entre 15°C et 30°C, avec une tolérance minimale autour de 5°C Elle nécessite un climat chaud et une atmosphère humide (PIER, 2014). *Ficus microcarpa* se développe généralement à basse altitude et dans des zones climatiques tropicales ou tempérées (Starr *et al.*, 2003). Par exemple, dans le Queensland en Australie, on la trouve dans les forêts tropicales humides entre 0 et 400 mètres d'altitude (CANBR, 2010).

En Algérie, *Ficus microcarpa* est une espèce introduite principalement dans les milieux urbains où elle colonise les murs, balcons, trottoirs et espaces verts, notamment dans le nord-est du pays (Sakhraoui, 2022).

### 1.3. Comportement face à la pollution atmosphérique :

*Ficus microcarpa* se distingue par une tolérance élevée à la pollution atmosphérique urbaine. Les études utilisant l'indice de tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) montrent que ce genre est reconnu pour sa résistance modérée à forte aux polluants, même si *F. microcarpa* est moins étudié que *Ficus benjamina* ou *Ficus elastica*, cette dernière étant

particulièrement tolérante (Bhattacharya *et al.*, 2013; Krishnaveni *et al.*, 2013; Kumari et Deswal, 2017; Patel & Kumar, 2018). Cette espèce possède également une excellente capacité de phytoremédiation : elle accumule efficacement divers métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Hg) dans ses tissus, ce qui en fait un outil précieux pour la dépollution et la biosurveillance de la qualité de l'air en milieu urbain (Li *et al.*, 2017; Azhar *et al.*, 2024; Mohamed *et al.*, 2022; Sghaier *et al.*, 2021). *Ficus microcarpa* est largement utilisé en aménagement urbain pour sa robustesse et sa capacité à améliorer la qualité de l'air, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, grâce à ses propriétés dépolluantes reconnues dans de nombreuses études, y compris celles menées par la NASA (Wolverton *et al.*, 1989 ; Godish & Guindon, 1989 ; Sripriya et Santhosh, 2022).

## **2. *Nerium oleander* (Le Laurier rose/الدفلى) :**

### **2.1. Description botanique :**

La nomenclature binominale *Nerium oleander* a été établie par Carl Von Linné, avec l'épithète '*oleander*' dérive du Latin '*Olea*' signifiant 'olivier' et du mot grec 'dendron' qui veut dire 'arbre ou arbustes', attribué à la ressemblance entre l'olivier et le laurier (Pagen, 1987). *Neirum oleander* est un arbuste au branches lisses, avec des feuilles lancéolées étroites dans les deux bouts et dont les dimensions sont d'environ 10-15 x 1-2cm, coriacées épaisses, à nervure principale assez évident et un pétiole de 5 à 7,5cm de longueur. Les fleurs peuvent être roses, blanches, rouges, à pédoncule et un pédicelle poilu et une petite bractée et une corolle de 1,8cm de longueur, poilu à l'intérieur et étroite, formée de cinq pétales tordus avec des extrémités rondes, le stigmate est divisé en deux lobes et le fruit a les dimensions suivantes 12-20cm x 7mm. *N.oleander* est Caractérisé par les propriétés pharmacologiques ainsi que la toxicité (Al-Snafi, 2020).



**Figure 11.** Photo prise de *Nerium oleander* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliopsida

**Sous-Classe :** Asteridae

**Ordre :** Gentianales

**Famille :** Apocynaceae

**Genre :** *Nerium*

**Espèce :** *Nerium oleander*

## 2.2. Ecologie de l'espèce :

Selon Hammiche et al (2013) *Nerium Oleander* est originaire du bassin méditerranéen. Par ailleurs, Ebrahimi et al (2018) considèrent que le subcontinent indo-pakistanaïse comme probable région d'origine à partir de laquelle *N.oleander* s'est distribué dans d'autres régions géographiques. Le laurier est adapté à la sécheresse et croît à l'état spontané dans les zones tempérées du globe. Au Sahara il se trouve dans les bords des points d'eau et au niveau des nappes ou il indique la présence d'eau à faible profondeur (Hammiche et al, 2013). Le nom 'Nerium' vient du mot grec qui veut dire 'humide' indiquant ainsi son association avec les zones humides (Ayouaz et al, 2023). *N.oleander* est souvent cultivé et transplanté (Ebrahimi et al, 2018) tant qu'une plante ornementale trouvée dans les espaces verts, les jardins, et à côté des routes (Ayouaz et al, 2023).

## 2.3. Comportement de l'espèce avec la pollution atmosphérique :

*Nerium oleander* est considéré pour la bio-surveillance de la pollution atmosphérique notamment en métaux lourds due à sa capacité de bioaccumulation (Aksoy et Öztürk, 1997 ; Espinosa et Oliva, 2006), les feuilles de cette plante peuvent servir également pour la bio-indication des hydrocarbures aromatiques polycycliques en déterminant leur concentration (Culotta et al, 2005). En termes de la tolérance à la pollution atmosphérique, *Nerium oleander* est considéré comme « faiblement tolérante » or « sensible » (Geetha et Raja, 2023) à moyennement sensible (Zenna et al, 2019).

## 3. *Eucalyptus globulus* (Legommier bleu/ كاليبتوس) :

### 3.1. Description botanique :

*L'eucalyptus globulus* fait partie du genre *eucalyptus* qui appartient à la famille des myrtacées et inclut plus de 500 espèces dont la majorité est endémique dans l'Australie (Teketay, 2000).

*Eucalyptys globulus* est un arbre sempervirent d'une taille moyenne mais pouvant atteindre jusqu'à 70m d hauteur and un diamètre entre 1 à 2m. Le tronc est droit, formant une nouvelle couche d'écorce annuellement augmentant ainsi le diamètre du tronc. Le système racinaire pivotant peut atteindre jusqu'à 3m, la fleur est caractérisée par de nombreuses étamines blanches au lieu des pétales visibles, et le fruit apparaît en automne et en hiver sous forme d'une capsule boisée. *L'eucalyptus golobulus* est utilisé dans la médecine traditionnelle

australienne par les aborigènes pour le traitement des blessures, des infections fongiques et pour réduire la fièvre et la médecine chinoise, grecque, européenne et ayurvédique. La littérature moderne reconnaît le potentiel pharmaceutique des huiles essentielles de cette espèce notamment pour le traitement des toux et difficultés respiratoires ainsi que ses activités antibactériennes, antivirales, anti-inflammatoires, antioxydantes...etc. (Hayat et al, 2015).



**Figure 12.** Photo prise de *Eucalyptus globulus* dans la ville de Laghouat  
(Cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Sous règne :** Tracheobionta

**Super division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliophyta

**Sous-Classe :** Roide

**Ordre :** Myrtales

**Famille :** Myrtaceae

**Genre :** Eucalyptus

**Espèce :** *Eucalyptus globulus*

### 3.2. Ecologie de l'espèce :

Le gommier bleu généralement croit dans les climats méditerranéens où la saison humide est en hiver, mais il se trouve également dans les régions avec des climats dont la saison humide est en été tel que l'Argentine et l'Ethiopie (Burns, 1990). Les températures varient entre 3-22 à 21-40°C mais jamais inférieure à -5°C, les précipitations annuelles moyennes varient de 250 à 25000 mm et supportent une grande variété des sols avec des ressources en eau limitées, capable de supporter les sols acides avec un optimum de pH variant entre 5,5 à 6,5 (Hayat et al, 2015).

### 3.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :

Face aux polluants atmosphériques, les espèces d'*Eucalyptus* adjacents aux villes industrielles risquent l'apparition des blessures foliaires et la réduction des pigments photosynthétiques (Azzazy, 2016). L'altération de l'accroissement foliaire, la physiologie 'pigments', et les caractéristiques anatomiques d'*Eucalyptus globulus* causée par les émissions atmosphériques et son potentiel à utiliser en bio-indication a été démontré par El-Khatib et al (2016). Cependant, *Eucalyptus globulus* est considéré comme l'espèce d'eucalyptus 'hyper résistante' à l'ozone (Monk et Murray, 1995). En termes des métaux lourds, E.globulus est utilisé en phyto-épuration des métaux lourds grâce à sa capacité de tolérance aux métaux lourds, cette espèce stocke les métaux dans les racines ce qui justifie leur usage pour la bio-surveillance de la pollution de l'air par les métaux tel que le Cadmium, le Plomb et le cuivre (El-Khatib et al, 2020).

## 4. *Bougainvillea glabra*(Le petit bougainvillier/الجهنمية) :

### 4.1. Description botanique

*Bougainvillea glabra* Choisy, appelée communément « fleur de papier », est une liane arbustive vivace de la famille des Nyctaginaceae, originaire d'Amérique du Sud. Cette espèce peut atteindre 1 à 7 mètres de hauteur, avec des branches munies d'épines courbées de 5 à 15 mm. Les feuilles sont simples, alternes, vert foncé, lustrées sur la face supérieure, pubescentes en dessous, et mesurent jusqu'à 10 cm de long. Les fleurs petites (0,4 cm de diamètre), sont regroupées par trois et entourées de bractées papyracées vivement colorées (pourpre, rose,

rouge, jaune ou blanche) qui confèrent à la plante son aspect décoratif. Le fruit est un akène sec, allongé, à graine unique. (Ornelas García,2023).



**Figure 13.** Photo prise de *Bougainvillea glabra* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliopsida

**Sous-Classe :** Caryophyllidae

**Ordre :** Caryophyllales

**Famille :** Nyctaginaceae

**Genre :** Bougainvillea

**Espèce :** *Bougainvillea glabra*

#### 4.2. Ecologie de l'espèce :

*Bougainvillea glabra* prospère dans les climats chauds, semi-arides à tropicaux, et tolère la sécheresse ainsi que les sols pauvres, acides et bien drainés. Elle supporte des températures élevées (jusqu'à 38–40 °C) et des nuits fraîches, ce qui explique sa popularité dans les jardins urbains et paysagers (Ornelas García, 2023). Sa floraison est favorisée par une exposition en plein soleil et une relative sécheresse du sol. Les bractées colorées jouent un rôle écologique important en attirant les pollinisateurs, favorisant ainsi la reproduction et la dispersion des graines (Sadowska et Bartosz, 2021).

#### 4.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :

*Bougainvillea glabra* est reconnue pour sa tolérance à la pollution atmosphérique urbaine et industrielle. Des études ont montré que ses feuilles exposées à des particules polluantes ne présentent pas de dommages cuticulaires majeurs, ce qui suggère un rôle de mitigation de la pollution particulaire en milieu urbain (Kulshreshtha *et al.*, 2009). Sa présence contribue donc à l'amélioration de la qualité de l'air urbain, tout en maintenant la biodiversité grâce à l'attraction des pollinisateurs.

### 5. *Cynodon dactylon* (Le chiendent pied-de-poule/العشب) :

#### 5.1. Description botanique

*Cynodon dactylon* connu sous le nom de chiendent pied-de-poule ou herbe des Bermudes, est une graminée vivace de la famille des Poaceae. Il se caractérise par des tiges fines et rampantes (stolons et rhizomes) qui s'enracinent aux nœuds, formant un tapis dense. Les feuilles, linéaires et étroites, mesurent généralement 2 à 10 cm de long et 1,25 à 3 mm de large. Les inflorescences sont composées de 2 à 6 épillets divergents, rappelant la forme d'un pied de poule. La floraison peut se produire toute l'année dans les climats favorables (Jayashree *et al.*, 2019).



**Figure 14.** Photo prise de *Cynodon dactylon* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Liliopsida

**Sous-Classe :** Commelinidae

**Ordre :** Cyperales

**Famille :** Poaceae

**Genre :** Cynodon

**Espèce :** *Cynodon dactylon*

## 5.2. Ecologie de l'espèce :

*Cynodon dactylon* est largement distribué dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées du monde. Il pousse dans une grande variété de sols, y compris les sols pauvres, acides ou alcalins, et tolère bien la sécheresse grâce à son système racinaire profond. Cette espèce préfère le plein soleil et montre une grande résistance au piétinement, ce qui explique

son usage fréquent comme gazon ou plante de couverture. Elle est également capable de croître dans des sols salins ou pollués, et sa croissance débute dès que la température dépasse 15°C, avec un optimum entre 24°C et 37°C (Raimi & Isichei, 2015).

### 5.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :

*Cynodon dactylon* est reconnu pour sa robustesse et sa capacité à coloniser des sols perturbés, y compris ceux contaminés par des hydrocarbures ou des métaux lourds. Des études ont montré que cette espèce peut accumuler et tolérer des concentrations importantes de polluants dans ses tissus, aussi bien au niveau des racines que des parties aériennes, ce qui en fait une excellente candidate pour la phytoremédiation des sols pollués (Raimi et Isichei, 2015 ; Jayashree *et al.*, 2019 ; AJACR, 2021). Les facteurs de bioaccumulation et de translocation sont souvent supérieurs à 1 pour certains éléments comme le fer, indiquant une bonne capacité de phytoextraction (Jayashree *et al.*, 2019).

## 6. *Rosmarinus officinalis* (Le romarin/الكليل الجبل) :

### 6.1. Description botanique

Le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) est un arbrisseau vivace, aromatique, de la famille des Lamiacées, atteignant 0,5 à 2 m de hauteur. Il possède des feuilles persistantes, linéaires, coriaces, vert foncé sur le dessus, blanchâtres et tomenteuses en dessous, et des fleurs bleu pâle à violettes regroupées en grappes (Raskovic *et al.*, 2014 ; Boulebeghal, 2022).



**Figure 1 .** Photo prise de *Rosmarinus officinalis* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliopsida

**Sous-Classe :** Asteridae

**Ordre :** Lamiales

**Famille :** Lamiaceae

**Genre :** Rosmarinus

**Espèce :** *Rosmarinus officinalis*

## 6.2. Ecologie de l'espèce :

Originnaire du bassin méditerranéen, le romarin préfère les sols bien drainés, sablonneux ou rocailleux, et supporte la sécheresse, la chaleur, et des pH compris entre 4,5 et 8,3. Il tolère des températures basses mais craint l'humidité stagnante (Boulebeghal, 2022).

## 6.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :

Des travaux universitaires et des articles scientifiques ont montré que le romarin possède une capacité à tolérer et accumuler certains métaux lourds (plomb, cadmium, zinc, nickel) dans ses tissus, ce qui en fait une plante intéressante pour la phytostabilisation et la biosurveillance des sols pollués. Son métabolisme secondaire (phénols, flavonoïdes, glutathion) s'adapte en réponse à la pollution, renforçant sa tolérance aux stress métalliques (Kiliç *et al.*, 2018 ; Boulebeghal, 2022).

## 7. *Peganum Harmala* (rue sauvage/ الحرمل) :

### 7.1. Description botanique :

Le *peganum harmala* est une pérenne, il s'agit d'un arbuste de 0,3 à 0,8m de hauteur avec des racines qui peuvent atteindre jusqu'à 5-6m de profondeur dans les sols xériques, les feuilles sont arrangées d'une façon alternative sur des rameaux rigides. Les fleurs apparaissent à la fin du printemps entre avril et juin, le fruit est sec et déhiscent sous forme d'une capsule constituée par trois carpelles et contient environ 50 graines, une plante mature peut produire entre 1000 et 25000 graines par an (Nedjimi, 2019).



**Figure 2 .** Photo prise de *Peganum Harmala* dans la ville de Laghouat (cliché original).  
D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous règne :** Tracheobionta

**Super division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliopsida

**Sous-classe :** Rosidae

**Ordre :** Sapindales

**Famille :** Zygophyllaceae

**Genre :** Peganum

**Espèce :** *Peganum harmala*

## 7.2. Ecologie de l'espèce :

*P.harmala* une plante indigène de l'Est de la région méditerranéenne et croit spontanément dans les conditions semi-arides et elle est utilisée comme une plante médicinale pour la phytothérapie traditionnelle est la pharmacie moderne, ainsi que d'autre usages culturelles et spirituelles (Moloudizargari et al, 2013).

### 7.3. Comportement de l'espèce avec la pollution atmosphérique :

La documentation concernant la tolérance de l'espèce à la pollution atmosphérique est restreinte. Cependant, d'autres facteurs ont été examinés. La tolérance aux métaux lourds a été analysée, révélant que la germination de *P. harmala* pourrait être plus résistante à certains éléments (Zn) qu'à d'autres (Cd) (Nedjimi, 2019). Cette espèce est capable de survivre dans des environnements contaminés par le Ni et le Cu, bien qu'elle ne soit pas un hyper-accumulateur de ces éléments, ce qui justifie son utilisation potentielle pour le contrôle de l'érosion et la stabilisation des sols dans ces sites (Lu et al, 2009). *Peganum harmala* est affecté par la température, la luminosité, la salinité et la sécheresse, montrant une adaptation à la sécheresse et une toxicité réduite en présence de salinité neutre par rapport à la salinité alcaline, selon Li et al. (2023). D'autres chercheurs ont constaté que l'espèce peut se rétablir rapidement après un léger déficit hydrique, influencée par la durée du stress, ce qui explique sa capacité à survivre dans des climats arides (Abbott *et al.*, 2008).

## 8. *Phoenix dactylifera* (Le palmier dattier/النخلة) :

### 8.1. Description botanique

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est une espèce monocotylédone dioïque de la famille des Arecaceae et l'un des premiers arbres fruitiers cultivés au monde (Ben Amor, 2021). Il est l'arbre de base du système oasien constituant des agrosystèmes spécifiques avec une diversité agrobiologique importante. Il se présente sous forme d'un grand palmier pouvant atteindre 15 à 30 mètres de hauteur, avec un tronc (stipe) cylindrique et robuste, surmonté d'une couronne de 100 à 120 feuilles pennées, longues de 4 à 7 mètres. Les feuilles, appelées palmes, sont insérées en hélice et divisées en lanières étroites et coriaces. Le système racinaire est fasciculé, sans ramification, et peut atteindre plus de 20 mètres de profondeur, ce qui confère à l'espèce une grande résistance à la sécheresse. Le dattier est dioïque : les fleurs mâles et femelles sont portées par des individus différents. Les inflorescences sont enveloppées d'une grande spathe membraneuse. Le fruit, la datte, est une baie charnue contenant un noyau allongé, et subit plusieurs stades de maturation (khalal, bser, rotab, tmar) (El Hadrami 1998 ; Djouhri et Bencheikh, 2022 ; Atliliet Boutheldja, 2018).



**Figure 3 .** Photo prise de *Phoenix dactylifera* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Liliopsida

**Sous-Classe :** Arecidae

**Ordre :** Arecales

**Famille :** Arecaceae

**Genre :** Phoenix

**Espèce :** *Phoenix dactylifera*

## 8.2. Ecologie de l'espèce :

*Phoenix dactylifera* est une espèce typique des régions arides et semi-arides, cultivée principalement dans les oasis du Sahara, du Moyen-Orient et d'Asie centrale. Il tolère des températures élevées (jusqu'à 50 °C), mais son activité végétative commence à partir de 7 à

10 °C. Le dattier nécessite un fort ensoleillement, une faible humidité de l'air et une pluviométrie annuelle très faible, mais il requiert des ressources hydriques suffisantes au niveau racinaire, souvent assurées par une nappe phréatique affleurante ou l'irrigation. Il pousse sur une grande diversité de sols, des sables presque purs aux sols argileux, mais préfère les sols bien drainés, légèrement alcalins, riches en matières organiques et tolère une salinité modérée à élevée (Djoughri et Bencheikh,2022). En Algérie, il est largement cultivé dans toutes les régions situées sous l'Atlas saharien, occupant plus de 160 000 hectares et représentant une ressource stratégique pour les populations sahariennes(ddd,2020).

### 8.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :

Le palmier dattier montre une bonne tolérance aux conditions environnementales difficiles, notamment la sécheresse, la salinité et certains polluants. Des études menées en contexte urbain et périurbain ont montré que *Phoenix dactylifera* peut survivre et croître dans des sols modérément contaminés par des éléments traces métalliques (ETM), notamment le plomb, le cadmium et le zinc, grâce à son système racinaire profond et à sa capacité d'exclure ou de limiter la translocation des métaux vers les parties aériennes. Le dattier est parfois utilisé en phytostabilisation pour limiter la dispersion des métaux lourds dans les sols pollués, car il contribue à fixer les sols et à limiter l'érosion éolienne ou hydrique dans les zones dégradées. Cependant, il n'est pas considéré comme un hyperaccumulateur : la majorité des métaux absorbés restent confinés dans les racines, limitant ainsi leur entrée dans la chaîne alimentaire (Atliliet Boutheldja, 2018).

## 9. *Zizyphus lotus* (Le jujubier/السدر) :

### 9.1. Description botanique :

*Zizyphus lotus* est une plante frutescente très ramifiée avec une hauteur entre 1,3 à 2,2 m, avec des rameaux blancs grisâtres recourbés vers le bas et couverts par des épines par paires droites ou recourbées. Les feuilles du jujubier sont des petites feuilles faiblement rigides, glabres et obtuses, crénelées, et à trois nervures de 7-9mm de large et 9-13mm de long et avec un pétiole court. Les fleurs sont soit solitaires ou groupées avec un pédicelle unique et court, avec un calice en forme d'entonnoir. La corolle est petite et formé de cinq pétales avec cinq étamines et deux styles courts. Les fruits sont des drupes petites et rondes et recouverts d'une pulpe semi-charnue riche en sucre et s'assèche vite (Ghedira, 2013).



**Figure 4** .Photo prise de *Zizyphus lotus* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous règne :** Tracheobionta

**Super division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliophyta

**Sous-Classe :** Rosidae

**Ordre :** Rhamnales

**Famille :** Rhamnaceae

**Genre :** *Zizyphus*

**Espèce :** *Zizyphus lotus*

## 9.2. Ecologie de l'espèce :

Le jujubier croit généralement dans les régions aride et semi-arides et se trouve dans différents pays asiatiques (Chine, Iran, Corée du sud) et européens (Chypre, Espagne, Grèce,

Italie). En Afrique *Zizyphus lotus* est fréquent dans la région méditerranéenne notamment en Algérie, le Maroc, la Tunisie et la Lybie. Le jujubier est utilisé comme plante médicinale dans la phytothérapie traditionnelle et ses fruits sont consommés par les populations locales, les activités pharmacologiques de *Z.lotus* sont confirmés par de nombreuses études (Abdoul-Azize, 2016).

### 9.3. Comportement de l'espèce à la pollution atmosphérique :

Selon El-Soul et al (2017) le *Zizyphus lotus* est considéré tolérant à la pollution atmosphérique et la sécheresse grâce à sa capacité d'adaptation morphologique et anatomique qui réduit l'apparition des blessures foliaires et la perte de la teneur en eau, le jujubier est également susceptible d'accumuler les métaux lourds à partir du sol ce qui lui donne un potentiel usage en bio-indication (Zheng et al, 2018).

## 10. *Lonicera japonica* (Le chèvrefeuille du Japon/ سلطان الغابة) :

### 10.1. Description botanique

Le chèvrefeuille du Japon (*Lonicera japonica*) est une liane arbustive vivace de la famille des Caprifoliacées, originaire d'Asie de l'Est (Chine, Corée, Japon). Cette espèce grimpante peut atteindre pouvant atteindre 10m de haut. Ses tiges sont creuses et son écorce brun rougeâtre. Ses feuilles généralement persistantes sont ovales lancéolées, entières ou pennatilobées à pennatipartites mesurent 4 à 8cm de long. Ses fleurs sont tubulaires blanches à jaunâtres de 2,5 à 5cm de long. Elles sont groupées par 2 sur un pédicelle 4 fois plus court que les fleurs. Corolle blanche, puis rose et enfin jaune. Ses fruits, sous forme de baies sont brun foncé à noires et soudés à la base (Gunder ,2023).



**Figure 5 .** Photo prise de *Lonicera japonica* dans la ville de Laghouat (cliché original).

D'après la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (DAEU) la classification est comme suit :

**Règne :** Plantae

**Sous-règne :** Tracheobionta

**Super-division :** Spermatophyta

**Division :** Magnoliophyta

**Classe :** Magnoliopsida

**Sous-Classe :** Asteridae

**Ordre :** Dipsacales

**Famille :** Caprifoliaceae

**Genre :** *Lonicera*

**Espèce :** *Lonicera japonica*

**10.2. Ecologie de l'espèce :**

*Lonicera japonica* est une espèce très vigoureuse, capable de croître dans une grande diversité de milieux : forêts, lisières, haies, fourrés, rives, talus routiers, de la plaine jusqu'à la montagne (jusqu'à 1 120 m d'altitude). Elle préfère les climats tempérés à subtropicaux, supporte le plein soleil comme la mi-ombre, et colonise rapidement les milieux ouverts ou perturbés. Sa croissance rapide et sa capacité à se disséminer par graines (principalement par les oiseaux) expliquent son caractère envahissant dans de nombreuses régions du monde, où elle concurrence la flore locale et perturbe la régénération forestière (Gunder ,2023)

**10.3. Comportement de l'espèce face à la pollution atmosphérique :**

Des études récentes confirment que *Lonicera japonica* possède une forte tolérance aux stress environnementaux, notamment à la pollution par les métaux lourds, et se comporte comme un hyperaccumulateur de cadmium (Cd). Sa biomasse racinaire et aérienne peut accumuler des concentrations de Cd bien supérieures à 100 mg/kg de matière sèche, seuil défini pour les plantes hyperaccumulatrices, tout en maintenant une croissance et une activité photosynthétique normales.

De plus, il a été démontré que l'application d'un champ électrique modéré augmente encore la capacité d'accumulation et de translocation du Cd par la plante, améliorant ainsi son efficacité en phytoremédiation des sols contaminés par ce métal. *Lonicera japonica* montre également une bonne résistance à d'autres polluants, ce qui la rend adaptée à la dépollution de milieux urbains ou industriels. (Liu et al ;2022)

**CHAPITRE II**  
**MATERIEL ET**  
**METHODES**



-la plateforme saharienne au sud, formée par un ensemble de plateaux subtalaires (Hmada et Reg) qui présentent des structures, des positions et une nature des roches diversifiées.

Les paysages géomorphologiques de la wilaya de Laghouat sont typiques des régions arides et sont caractérisés par :

### 2.1. Reliefs :

On distingue trois formes de reliefs dans la wilaya de Laghouat :

-**Montagnes:** représentées par les monts du Djebel Amour avec des altitudes entre 800 et 1720m.

-**Piémonts :** A largeur réduite, orientés d'Ouest en Est, se trouvent en bas de l'Atlas Saharien et aux vallées des oueds Dj'di, oued Atar et Oued M'zi.

-**Surfaces subhorizontales :** Formées pratiquement d'un plateau plus ou moins ondulé dans les régions d'El Houita, Hassi Delaa et Hassi R'mel.

### 2.2. Hautes surfaces (Glacis et Terrasses) :

Ces reliefs se présentent sous forme de surface d'érosion en pente douce qui se développe dans les régions arides aux pieds des reliefs et représentent l'ensemble des glacis, des terrasses, des chenaux d'oueds alluvionnés et des zones d'épandages et de débordements.

### 2.3. Dépressions (Dayas) :

Les dayas sont des dépressions de fermées aux bords, à faible inclinaison et avec des formes grossièrement circulaires - des fois elliptiques - dont le diamètre peut dépasser quelques centaines de mètres. Les dayas sont caractérisées par la présence de *Pistacia atlantica* au sud de Laghouat où elles couvrent environs 2% de la surface des parcours.

### 3. Pédologie :

La région de Laghouat se distingue principalement par trois grands ensembles : les piémonts de l'Atlas Saharien, le plain alluvial d'Oued M'zi et le plateau à charge caillouteuse en surface. Les sols sont en générale à faible profondeurs, avec des roches mères à formations marneuses et calcaires qui montre la richesse de ces soles par des sels solubles et en calcaire (Kaddouri, 2021).

Les sols marqués par une texture légère. Au sud, ces sols sont le plus souvent sableux et dunaires, qui deviennent encore plus légers et prennent des textures sableuses à sablo-

limoneuse. Les sols peu évolués d'apport alluvial proviennent d'Oued M'zi. Au Nord, dans les bas-fonds, les sols sont plus structurés et plus lourds avec présence de proportions d'argile (Maghni, 2017).

#### 4. Hydrographie :

Les ressources en eaux superficielles sont localisées dans l'Atlas Saharien leur faible importance est liée à l'irrégularité du régime pluviométrique et à la forte évaporation.

Les principaux Oued sont : Oued M'zi, Oued Touil et Oued Medsous.

Le réseau hydraulique de la wilaya est caractérisé par les données suivantes :

-163 réservoirs avec une capacité de stockage 86 435 m<sup>3</sup>.

-06 retenues collinaires avec une capacité de stockage de 4.432 Hm<sup>3</sup>.

-570 forages sont affectés pour :

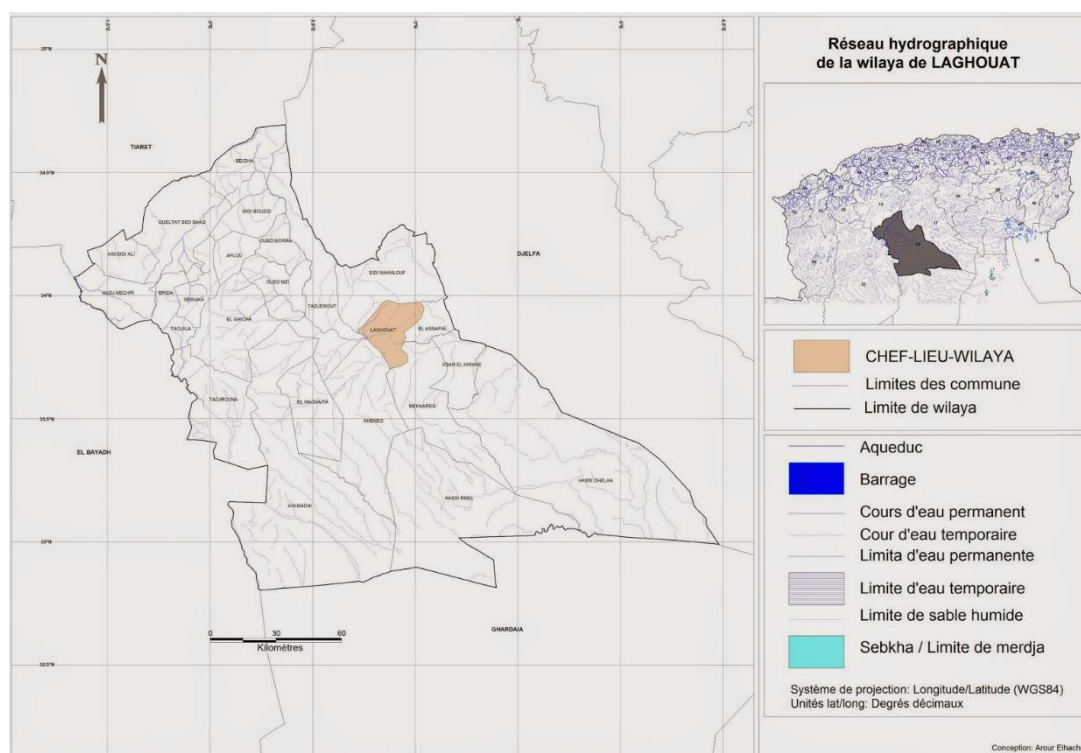
- l'alimentation en eau potable: 2 462 L/s.

-les besoins du secteur industriel : 206 L/s.

-les besoins du secteur agricole : 6 044L/s.

-Ces sources totalisent d'une capacité de : 4.93 Hm<sup>3</sup>.

-Pour l'alimentation en eau potable presque toutes les zones de la wilaya reçoivent une dotation moyenne réelle de 132 L/j habitants, et le taux de raccordement au réseau est de 95% ; ce réseau est long de 1 026Km avec une capacité de stockage : 86435 m<sup>3</sup> et 93 757 foyers sont raccordés à ce réseau (MICLAT,2025).



**Figure 21.** Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Laghouat

## 5. Climat et bioclimat :

L'étude de Amrani (2021) s'appuie sur les données de l'Office National de la Météorologie (ONM) enregistrées entre 2005 et 2014 dans la région de Laghouat.

La wilaya de Laghouat se situe à la transition entre une zone climatique méditerranéenne au nord et une zone désertique au sud.

### 5.1. Températures :

Le mois de janvier est le plus froid dans la wilaya, les températures sont comprises entre  $+2,3^{\circ}\text{C}$  et  $1,48^{\circ}\text{C}$  à Laghouat. Par contre juillet est le mois le plus chaud avec des moyennes de températures maximales (M) allant de  $34,37^{\circ}\text{C}$  à Aflou à  $39,74^{\circ}\text{C}$  à Laghouat.

### 5.2. Précipitations :

La moyenne des précipitations entre 2005 et 2014 à Laghouat varie de 163,05 mm, avec une diminution accentuée des précipitations attribuée à la sécheresse qui dure parfois de plusieurs années consécutives, avec une diminution moyenne de 7 à 14%. La variabilité annuelle des précipitations annuelle est importante, estimée à 25%

La période pluvieuse dans la wilaya est de septembre à mars avec un maximum pluviométrique est observé pendant l'automne durant le mois de septembre (30,54 mm) et un minimum au cours de la période estivale.

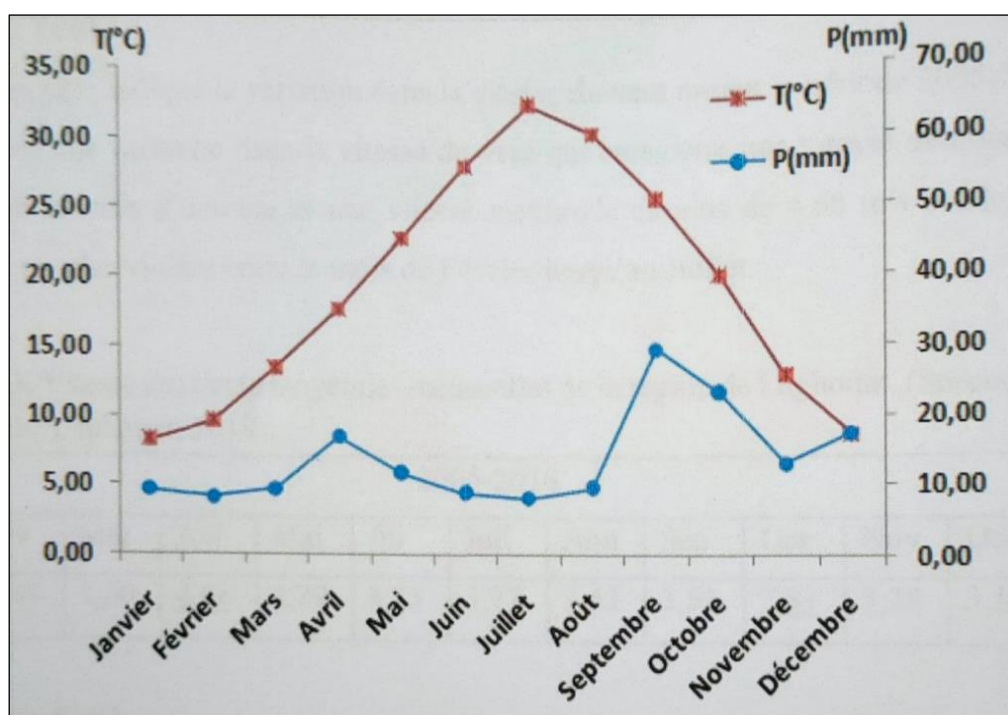
### 5.3. Régimes saisonniers :

Au niveau de la région de Laghouat, le régime saisonnier n'a connu aucun changement au cours du temps : il reste de type Automne, Printemps, Hiver, Été

### 5.4. Paramètres bioclimatiques :

**a. Indice de De Martone :** L'indice de De Martone indique le climat subaride n'a pas changer depuis 1913.

**b. La saison sèche :** La saison à Laghouat avec une durée dure pratiquement toute l'année (12 mois).



**Figure 22.** Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de la région de Laghouat de 1996 à 2024. (Source Boumeddiene, 2024)

**c. Climagramme d'Emberger :** Laghouat était classé dans l'étage bioclimatique aride inférieur (1946) et elle s'est allée à un étage bioclimatique saharien durant la même période.

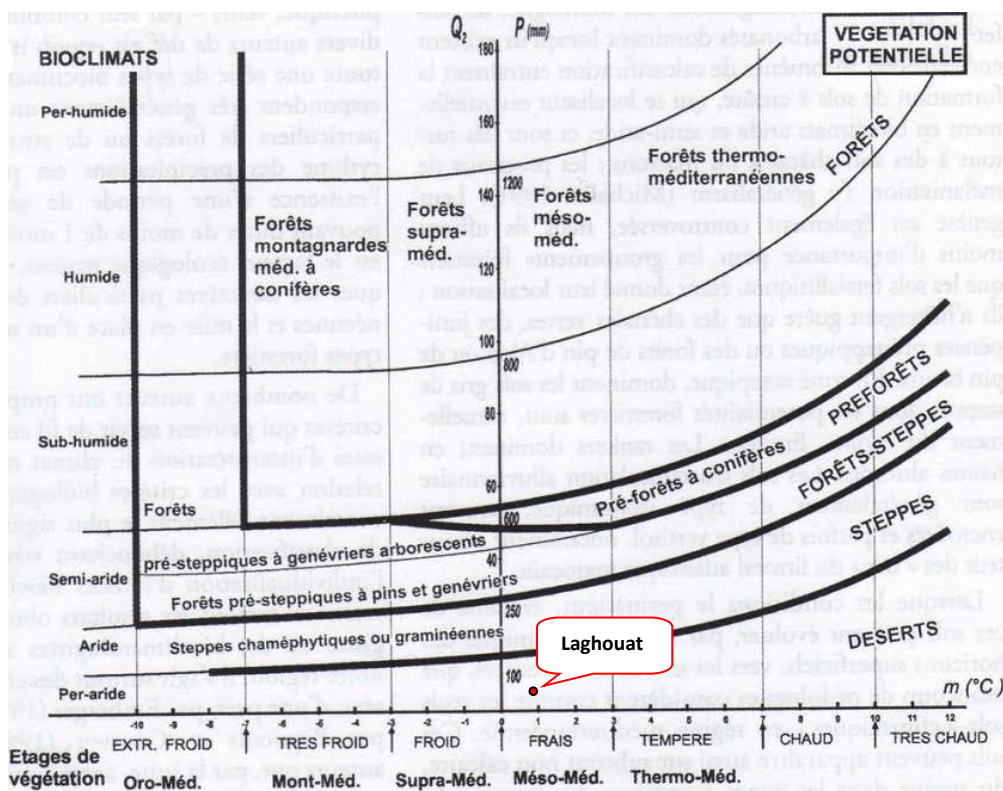


Figure 23. Le climagramme d'Emberger de la région de Laghouat.

## 6. Faune :

Selon Kaddouri (2021), la région de Laghouat abrite une faune très riche et diversifiée, composée principalement d'espèces sahariennes et steppiques. Les mammifères, les mammifères comportent 17 ordres et 35 espèces, parmi eux on trouve notamment le hérisson du désert (*Hemiechinus aethiopicus*), espèce emblématique de la région, mais aussi la gazelle de Cuvier, le fennec, le chat sauvage et d'autres petits carnivores et rongeurs. L'avifaune comprend des espèces migratrices telles que la cigogne blanche (*Ciconia ciconia*), ainsi qu'un cortège d'oiseaux adaptés aux milieux arides. L'entomofaune est également remarquable, avec 13 ordres et 76 espèces d'insectes recensés, dominés par les hyménoptères (notamment les fourmis comme *Tapinoma nigerrimum*, *Messor arenarius*, *Cataglyphis bicolor*), les coléoptères (*Anthicus bifasciatus*, *Zophosis sp.*, *Dermestidae sp.*), les orthoptères, les diptères, ainsi que des arachnides et quelques crustacés terrestres.

## 7. Flore :

La région de Laghouat comprend à la fois une zone semi-aride et une zone aride, chacune étant caractérisée par une végétation (Tableau 4) et une flore spécifique.

La végétation forestière et matorral est trouvée dans la zone semi-aride surtout sur les reliefs de l'Atlas Saharien. Le *Quercus ilex* en mélange avec le genévrier rouge *Juniperus furbinata* ainsi que d'autre espèces tel que *Pinus halepensis*, *Juniperus oxycedrus*,

*Rosmarinus tournefortii*, *Cistus villosus*, *Dactylis glomerata*, *Thymus ciliatus*, *Helianthemum rubellum*, *Sedum sediform*, *Globularia alypum*, *Avena sterilis*, *Ferula communis*, *Brachypodium distachyum*, et *Quercus rotundifolia*. Les dépressions alluvionnaires ou Dayas supportent *Pistacia atlantica* et *Zizyphus lotus*.

La flore de la région de Laghouat est typiquement steppique qui se trouve dans les zones semi-arides et arides, dominée par des graminées comme *Stipa tenacissima* (alfa) et *Lygeum spartum*, des armoises (*Artemisia herba-alba*, *Artemisia campestris*), des chamephytes vivaces (*Astragalus armatus*, *Thymelaea microphylla*) et un cortège d'espèces annuelles adaptées à l'aridité. On y recense 83 espèces réparties en 24 familles, principalement les Asteraceae, Fabaceae, Brassicaceae, Poaceae et Amaranthaceae, qui représentent plus de 60 % de la flore.

La limite inférieure de la zone aride est marquée par un accroissement des effectifs des espèces saharo-arabiques dont leurs taux passent de 20 à 40 % et une diminution de 76 à 59 % des espèces méditerranéo-steppiques en comparaison à la partie méridionale de la zone aride, accompagné par la diffusion du couvert végétal sur les regs et les glacis d'érosion (Amrani, 2021).

**Tableau 4.** La superficie (ha) des différentes formations végétales dans la wilaya de Laghouat (MICLAT, 2025 / \* Salemkour et al, 2013)

Formation végétale	Superficie (ha)
Nappes alfatières ( <u>Alfa</u> )	122 633
Forêts + Jeune Reboisement	66 400
Maquis	25 400
Vides labourables	939
Parcours	1 082 292 *
Terres improductives	5650 *
Taux de boisement de 3,7 %	

## II. Choix Du site d'étude :

### La ville de Laghouat :

Située au centre-nord de la wilaya du même nom, sur les Hauts Plateaux, à environ 400 km au sud d'Alger. (Coordonnées : 33° 48' N, 2° 52' E) (Figure 24).

Les prélèvements ont été réalisés à proximité des axes routiers afin d'évaluer l'impact direct de la pollution atmosphérique générée par le trafic automobile sur la flore locale. Cette approche vise à étudier l'influence des polluants atmosphériques, tels que les particules fines et les gaz d'échappement et aussi la poussière, sur la qualité des habitats environnementaux et la santé des plantes sélectionnées.



Figure 24. La station d'étude sur la carte de la wilaya (via Google Maps).

### III. Traitement des échantillons :

Le travail porte sur dix espèces : *Nerium oleander*, *Eucalyptus globulus*, *Rosmarinus officinalis*, *Ficus microcarpa*, *Cynodon dactylon*, *Zizyphus lotus*, *Peganum harmala*, *Lonicera japonica*, *Bougainvillea glabra* et *Phoenix dactylifera*. Les feuilles des dix espèces étudiées sont collectées de trois individus sélectionnés par échantillonnage subjectif pour le site de la ville de Laghouat le 03 mai 2025.

Les feuilles collectées dans des sacs polyéthylène et stockées dans une glacière immédiatement après leur échantillonnage et mises dans un réfrigérateur dans une température de 4°C pendant une nuit (Figure 25). Avant de les transporter en laboratoire pour effectuer les analyses des paramètres biochimiques et physiologiques.



**Figure 25.** Le stockage des feuilles collectées (cliché original).

### 1. Calcule de l'APTI :

L'APTI permet de décrire la sensibilité d'une espèce vis-à-vis la pollution de l'air en utilisant un ensemble de paramètres biochimiques impliqués dans la réponse de la plante aux changements de la qualité de l'air. On utilise la formule développée par Singh and Rao (1983):

$$APTI = \frac{A(T + P) + R}{10}$$

Dont : A : Concentration de l'acide ascorbique (mg/g) ; T : la teneur de la chlorophylle (mg),  
P : le pH, R : la teneur relative en eau (%).

La classification des végétaux selon leur APTI (Flowers et al, 2007) :

-Sensibles :  $APTI < 12$

-Intermédiaires :  $13 < APTI < 20$

-Tolérantes :  $APTI > 20$

#### 1.1. Acide ascorbique :

La mesure de l'acide ascorbique a été faite selon la méthode décrite par (Bajaj et Kaur, 1981).

La méthode consiste à broyer 1g du tissu foliaire et de le mettre dans un tube à essai. Ensuite, on ajoute 4ml de solution d'extraction d'acide oxalique (0.25g) et (0.375g) EDTA dilué dans 50 ml de l'eau distillée dans le tube, suivi par 1ml d'acide orthophosphorique, 1ml d'acide sulfurique (5%), 2ml ammonium molybdate (5%), et 3ml de l'eau distillée. La solution est laissée pendant 15 minutes pour l'extraction avant de mesurer son absorbance

avec un spectromètre avec une longueur d'onde de 760nm. La concentration de l'acide ascorbique a été obtenue à partir de la courbe d'étalonnage.



**Figure 26.** L'extraction de l'acide ascorbique (cliché original).

### 1.2. Chlorophylle totale :

La teneur en chlorophylle a été mesurée en utilisant la méthode décrite par Arnon (1949), 1g des feuilles ont été coupées, écrasées puis mises dans 10 ml de la solution d'acétone (80%) et laissé dans l'obscurité pendant une nuit. L'extrait obtenu est ensuite centrifugé à 2500 tpm pour 10 minutes, et la concentration est mesurée avec un spectromètre en utilisant des longueurs d'ondes de 645 et 663 nm et calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{Chlorophylle a} = \frac{(12,7 \times D_x 663 - 2,69 \times D_x 645) \times V}{1000 \times P}$$

$$\text{Chlorophylle b} = \frac{(22,9 \times D_x 645 - 4,68 \times D_x 663) \times V}{1000 \times P}$$

$$\text{Totale} = \text{Chlorophylle a} + \text{Chlorophylle b}$$

Dont :  $D_x$  : absorbance de l'extrait à longueur d'onde  $X$ nm ;  $V$  : volume de la solution de la chlorophylle (ml) ;  $P$  : poids du tissu foliaire extrait.



Figure 6. L'extraction de la chlorophylle (cliché original).

### 1.3. Le Potentiel hydrogène pH :

Le pH a été mesuré en broyant 2g de la feuille et l'homogénéisant dans 25ml de l'eau déminéralisée, suivi par une filtration et utilisation de pH mètre pour mesurer le pH (Figure 28) du filtrat (Shrestha et al ,2021).



Figure 28. La détermination du pH du filtrat des feuilles (cliché original).

### 1.4. Teneur relative en eau :

La teneur relative en eau a été obtenue en utilisant la méthode décrite par (Barrs et Weatherley, 1962), le poids des feuilles fraîches a été mesuré avec une balance avant leur immersion dans l'eau distillée pendant une nuit pour mesurer le poids turgide des feuilles, les échantillons sont ensuite séchés en tapotant avec du papier absorbant pour les mettre dans l'étuve à 70°C pendant une nuit. Le pourcentage de la teneur relative en eau est calculé par la formule suivante :

$$\text{TRE} = \frac{\text{PF} - \text{PS}}{\text{PT} - \text{PS}} \times 100$$

Dont : PF : Poids frais, PS : poids sec, PT : poids turgide.



**Figure 7.** La détermination de la teneur relative en eau des feuilles (cliché original).

## 2. Tests statistiques :

Pour interpréter les résultats, une analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué afin d'évaluer la significativité des différences entre les paramètres étudiés chez les espèces végétales étudiées.

En complément, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée pour visualiser la structuration globale des variables et leurs relations, tandis que la classification hiérarchique ascendante (HCA) a permis d'identifier des groupes d'espèces selon leur profil de tolérance à la pollution atmosphérique.

**CHAPITRE III**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

## 1. Résultats et Discussion

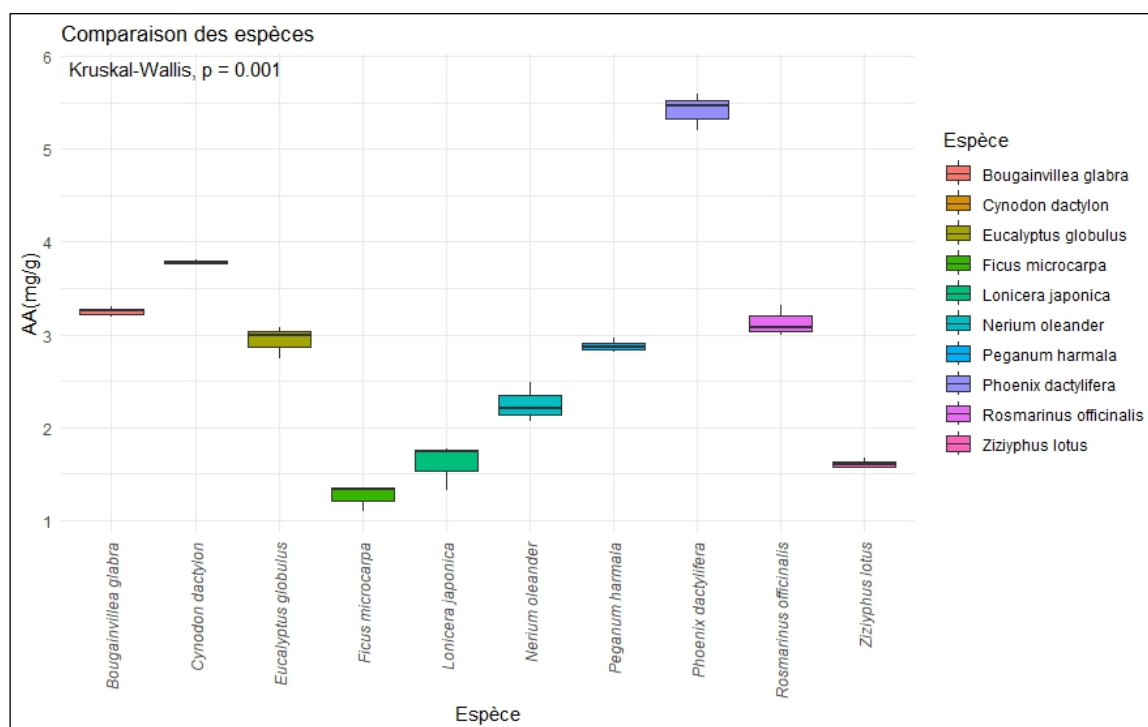
### 1.1. L'acide ascorbique

Le test de Kruskal-Wallis ( $p = 0.001$ ) révèle une différence significative entre les valeurs de l'acide ascorbique des différentes espèces végétales (fig. 30).

*Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon*, *Bougainvillea glabra* et *Rosmarinus officinalis*, présentent les teneurs en acide ascorbique les plus importantes (supérieure à 3 mg/g), ce qui les rend particulièrement résilientes face à la pollution atmosphérique (López-Mosquera *et al.*, 2017). Cette efficacité est confirmée par d'autres travaux montrant que des extraits riches en acide ascorbique ou en polyphénols possèdent une excellente capacité à neutraliser les radicaux libres (Ziadi, 2023 ; Habibou *et al.*, 2019) (fig.30).

*Eucalyptus globulus*, *Peganum harmala* et *Nerium oleander*, montrent une teneur en acide ascorbique modérée (~2-3 mg/g), elles révèlent une réponse intermédiaire au stress oxydatif causé par la pollution. Ces plantes sont capables de maintenir une certaine réponse antioxydante, mais leur capacité à gérer des niveaux de pollution plus élevés peut être limitée (Xie *et al.*, 2020 ; Mhamdi *et al.*, 2014) (Fig. 30).

Les valeurs les moins importantes ont été notées chez *Lonicera japonica*, *Ziziphus lotus* et *Ficus microcarpa*, avec une teneur inférieure à 2 mg/g, elles semblent être moins capables de neutraliser les radicaux libres générés par les polluants atmosphériques. Ces plantes ont une capacité antioxydante limitée, ce qui les rend plus sensibles au stress oxydatif et moins capables de faire face à des environnements pollués (Mano *et al.*, 2016 ; Abcha, 2020) (Fig. 30).



**Figure 2 .** Analyse comparative de la teneur en AA chez les différentes espèces étudiées.

La teneur en l'acide ascorbique est un indicateur clé de la capacité des plantes à lutter contre le stress oxydatif causé par les polluants atmosphériques tels que le  $\text{SO}_2$ , les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ). Plusieurs études soulignent que l'acide ascorbique, principal antioxydant végétal, joue un rôle fondamental dans la neutralisation des radicaux libres et la protection des cellules végétales (Tanaka *et al.*, 1982 ; Chaudhary & Rao, 1977 ; Rao, 1979). L'acide ascorbique fournit donc une tolérance aux espèces en conditions de stress et sa concentration augmente sous ces conditions. Les espèces présentant des niveaux élevés d'acide ascorbique sont suspectées d'être les plus tolérantes aux effets de la pollution atmosphérique (Shrestha et al, 2021).

Les résultats montrent que des espèces comme *Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon*, *Bougainvillea glabra* et *Rosmarinus officinalis* avec une teneur en acide ascorbique élevée sont mieux adaptées aux environnements pollués grâce à leurs mécanismes antioxydants puissants. En revanche, des espèces comme *Lonicera japonica*, *Zizyphus lotus* et *Ficus microcarpa*, avec une teneur en acide ascorbique faible, sont moins capables de neutraliser les radicaux libres et plus vulnérables au stress oxydatif causé par les polluants atmosphériques.

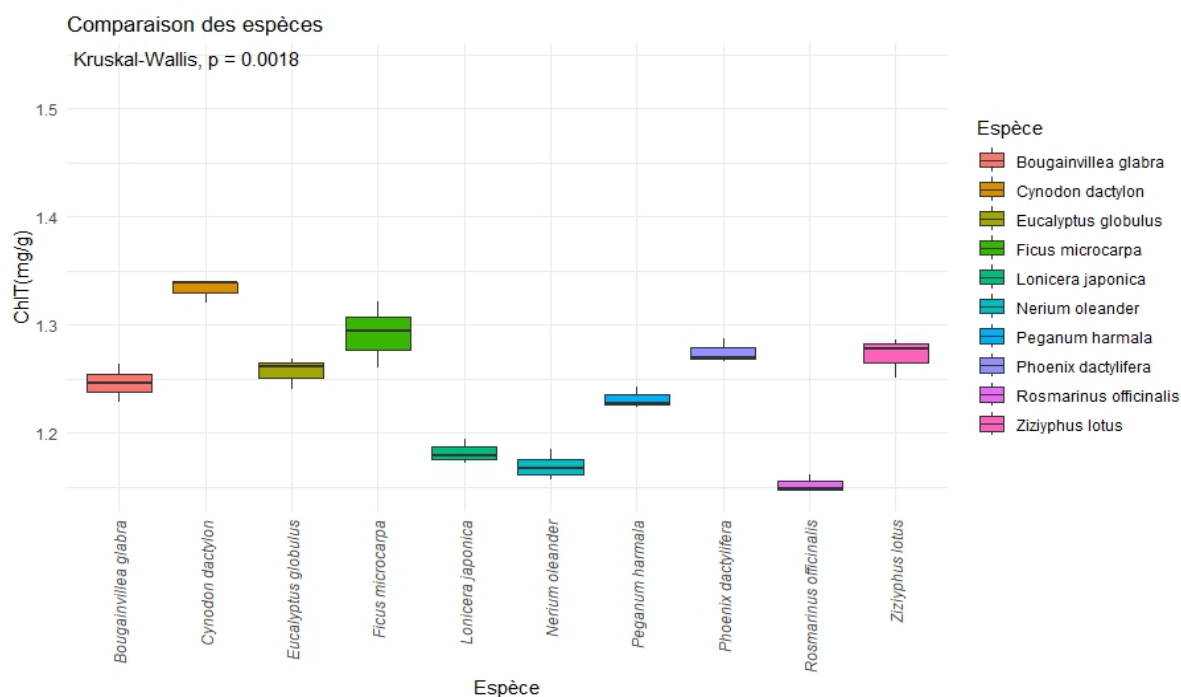
## 1.2. Chlorophylle totale

Le test de Kruskal-Wallis ( $p = 0.0018$ ) confirme une différence significative de la teneur en chlorophylle totale entre les espèces étudiées, soulignant son rôle crucial dans la photosynthèse et comme indicateur du stress oxydatif causé par la pollution (Björn *et al.*, 2009 ; Cai *et al.*, 2021 ; Rai, 2016 ; Tripathi & Gautam, 2005) (Fig. 31).

Les espèces telles que *Cynodon dactylon* et *Ficus microcarpa*, qui présentent une teneur en chlorophylle totale supérieure à 1,3 mg/g, affichent une résilience élevée et une réponse photosynthétique accrue face à la pollution atmosphérique. Leur teneur élevée en chlorophylle leur permet de maintenir une activité photosynthétique efficace malgré la présence de polluants comme l'ozone ( $O_3$ ) et les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) (López-Mosquera *et al.*, 2017) (Fig. 31).

Certaines espèces, telles que *Ziziphus lotus*, *Phoenix dactylifera*, *Eucalyptus globulus*, *Bougainvillea glabra* et *Peganum harmala*, présentent une teneur modérée en chlorophylle totale (entre 1,2 et 1,3 mg/g). Ces plantes montrent une réponse intermédiaire au stress oxydatif causé par la pollution et peuvent maintenir une certaine activité photosynthétique. Cependant, leur capacité à gérer des niveaux de pollution plus élevés peut être limitée (Xie *et al.*, 2020) (Fig. 31).

Enfin, *Lonicera japonica*, *Nerium oleander* et *Rosmarinus officinalis*, qui présentent une teneur faible en chlorophylle totale ( $< 1,2$  mg/g), affichent une vulnérabilité accrue et une réduction marquée de leur activité photosynthétique. Ces plantes semblent moins capables de maintenir une activité photosynthétique efficace sous des niveaux élevés de pollution atmosphérique (Mano *et al.*, 2016) (Fig. 31).



**Figure 31.** Analyse comparative de la teneur en Chl T chez les différentes espèces étudiées.

La chlorophylle est un pigment essentiel à la photosynthèse, composé d'un noyau porphyrine, d'un atome de magnésium et d'une queue hydrocarbonée. Elle existe sous plusieurs formes (a, b, c, d, e) ayant des propriétés d'absorption lumineuse spécifiques, la chlorophylle a étant la plus répandue et centrale pour la capture de l'énergie solaire (Björn *et al.*, 2009 ; Durrett & Welti, 2021 ; Cai *et al.*, 2021). Sa teneur varie selon l'espèce, l'environnement et le niveau de pollution. Sa diminution peut être due à des dommages aux chloroplastes, à la dégradation en phaeophytine ou à inhibition de sa biosynthèse (Rai, 2016). L'augmentation de la température foliaire liée à la pollution peut aussi altérer la synthèse et la stabilité de la chlorophylle (Joshi & Swami, 2009). Plus la concentration en polluants atmosphériques est forte, plus la réduction en chlorophylle est marquée (Rai *et al.*, 2013). Les plantes à forte teneur en chlorophylle sont généralement plus tolérantes à la pollution (Singh *et al.*, 1991).

Les résultats montrent que des espèces comme *Bougainvillea glabra* et *Cynodon dactylon*, avec une teneur en chlorophylle totale (Chlorophylle totale) élevée, sont capables de maintenir une photosynthèse efficace et une résilience élevée face à la pollution atmosphérique. Une teneur élevée en chlorophylle permet à ces plantes de neutraliser le stress oxydatif induit par des polluants tels que l'ozone (O<sub>3</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), favorisant ainsi leur survie et leur adaptation en milieu urbain. En revanche, des espèces comme

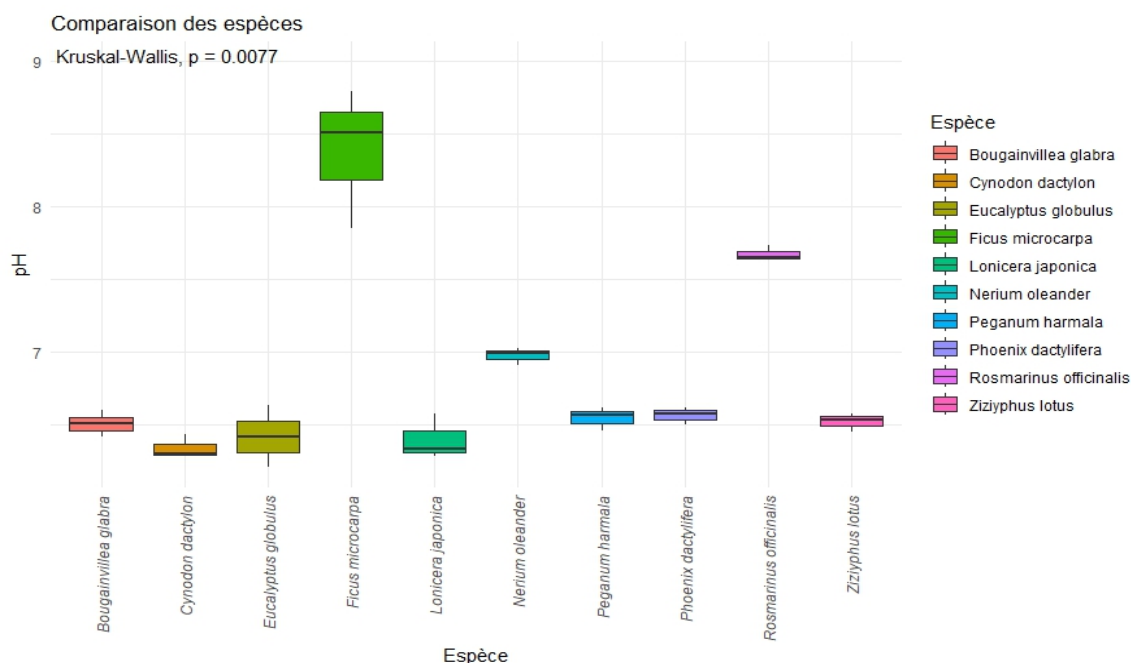
*Ziziphus lotus* et *Ficus microcarpa*, avec un Chlorophylle totale faible, montrent une capacité réduite à neutraliser le stress oxydatif et à faire face aux effets délétères de la pollution.

### 1.3. Le Potentiel hydrogène (pH) :

Le test de Kruskal-Wallis ( $p = 0,0077$ ) montre une différence significative entre les valeurs du pH des différentes espèces végétales étudiées (fig. 32).

Parmi les espèces étudiées, *Ficus microcarpa* présente le pH foliaire le plus élevé (8,38), ce qui traduit une résilience remarquable face à la pollution atmosphérique (Hussein *et al.*, 2019). Ce pH très alcalin pourrait constituer une réponse adaptative permettant à la plante de neutraliser certains effets délétères des polluants en maintenant la stabilité de ses processus physiologiques. *Rosmarinus officinalis* (pH 7,67) montre également une bonne tolérance aux conditions polluées, favorisant l'optimisation de l'absorption des nutriments et le maintien des mécanismes de défense (Hussein *et al.*, 2019) (fig. 32).

D'autres espèces, telles que *Nerium oleander* (pH 6,98) (Xie *et al.*, 2020), *Phoenix dactylifera* (pH 6,57), *Peganum harmala* (pH 6,55), *Ziziphus lotus* (pH 6,52), *Bougainvillea glabra* (pH 6,51) (Verma *et al.*, 2006), *Eucalyptus globulus* (pH 6,42), *Lonicera japonica* (pH 6,40) et *Cynodon dactylon* (pH 6,34), présentent un pH foliaire modérément acide à acide (Mano *et al.*, 2016) (fig. 32). Cette acidité relative peut rendre ces espèces plus sensibles aux effets des polluants atmosphériques, car un pH bas peut perturber l'absorption des nutriments et accentuer le stress oxydatif (Abed *et al.*, 2013 ; Raie, 2016). Toutefois, certaines de ces espèces pourraient compenser par des stratégies de défense alternatives, telles que l'accumulation de métabolites secondaires ou l'activation de systèmes antioxydants (Scholz et Reck, 1977 ; Singh *et al.*, 1991).



**Figure 3 .** Analyse comparative du pH chez les différentes espèces étudiées.

Le pH foliaire peut jouer un rôle déterminant dans la résilience des plantes face à la pollution atmosphérique. Le pH influence directement le métabolisme des plantes, la disponibilité des nutriments et la réponse au stress oxydatif, souvent provoqué par des polluants comme les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ) (Rai et Panda, 2014 ; Karmakar *et al.*, 2021)

Les espèces présentant un pH foliaire élevé semblent mieux tolérer la pollution, car un environnement cellulaire alcalin favorise l'absorption des nutriments et l'activation des enzymes de détoxification (Singh *et al.*, 1991 ; Karmakar *et al.*, 2021). À l'inverse, un pH acide peut perturber l'absorption des métaux lourds et rendre la plante plus vulnérable au stress environnemental (Rai, 2016 ; Abed *et al.*, 2013).

Nos résultats sont en accord avec ceux d'Abed *et al.* (2013), Rai *et al.* (2013), Rai et Panda (2014) et Karmakar et Padhy (2019), qui ont également observé une diminution du pH foliaire en présence de polluants acides. Selon Scholz et Reck (1977) et Singh *et al.* (1991), la réduction du pH est particulièrement marquée chez les espèces sensibles, tandis que des valeurs de pH supérieures ou égales à 7 sont généralement associées à une meilleure tolérance à la pollution atmosphérique (Karmakar *et al.*, 2021).

En résumé, *Ficus microcarpa* se distingue par son pH foliaire élevé, ce qui lui permet de maintenir une photosynthèse efficace et une grande résilience face à la pollution. À

l'inverse, des espèces comme *Eucalyptus globulus*, *Bougainvillea glabra* et *Cynodon dactylon*, avec un pH plus acide, semblent moins adaptées à des environnements fortement pollués, bien que leur tolérance puisse également dépendre d'autres mécanismes physiologiques.

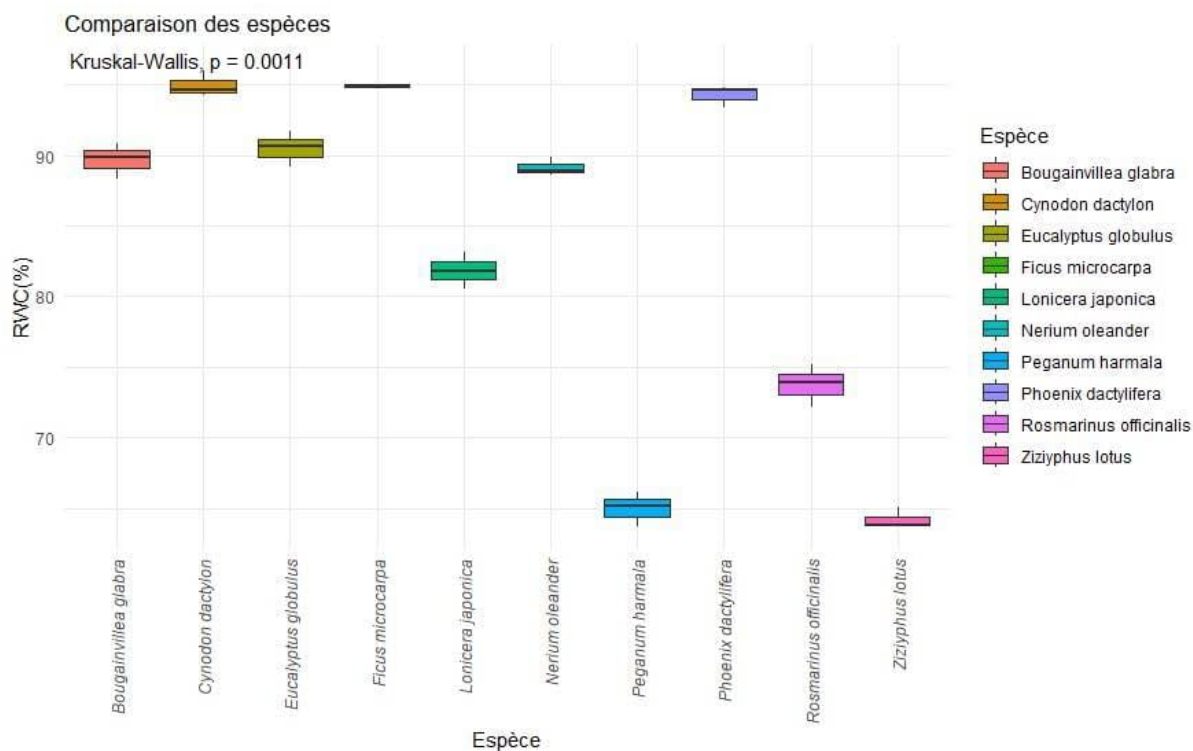
#### 1.4. La teneur en eau relative (TRE) :

Le test de Kruskal-Wallis ( $p = 0.0011$ ) révèle une différence significative entre les valeurs de la TRE des différentes espèces végétales étudiées (fig. 33).

*Cynodon dactylon*, *Ficus microcarpa*, *Phoenix dactylifera* et *Bougainvillea glabra* montrent une TRE supérieure à 89 %, se distinguent par une résilience élevée face à la pollution atmosphérique. Un TRE très élevé leur permet de maintenir efficacement leur métabolisme, d'assurer une photosynthèse optimale et de mieux résister aux conditions de stress causées par la pollution de l'air (López-Mosquera *et al.*, 2017) (fig. 33).

Des espèces comme *Eucalyptus globulus* et *Nerium oleander* qui présentent également une TRE élevée (entre 89 % et 90 %) disposent d'une bonne capacité d'adaptation au stress hydrique et à la pollution atmosphérique (Mhamdi *et al.*, 2014) (fig. 33).

*Lonicera japonica* affiche une TRE relativement modérée (81,81 %), ce qui montre une capacité intermédiaire à gérer le stress environnemental : elle parvient à s'adapter, mais sa capacité à maintenir l'intégrité cellulaire est plus limitée que celle des espèces à TRE élevée (Xie *et al.*, 2020). Enfin, les espèces telles que *Rosmarinus officinalis*, *Peganum harmala* et *Ziziphus lotus*, qui présentent une TRE faible (inférieure à 75 %), sont plus vulnérables au stress hydrique et oxydatif (Mano *et al.*, 2016) (fig. 33). Leur capacité à faire face aux effets de la pollution atmosphérique est réduite, une TRE faible est généralement associée à une dégradation cellulaire plus rapide sous stress (Rai, 2016 ; Gholami *et al.*, 2016).



**Figure 33.** Analyse comparative de la TRE chez les différentes espèces étudiées.

La teneur relative en eau (TRE) est un indicateur clé du maintien des fonctions physiologiques des plantes, même en cas de stress dû à la pollution atmosphérique, favorisant ainsi leur résistance (Rai, 2016). Selon Zhang et al. (2015), la TRE peut varier entre des valeurs aussi élevées que 98 % et peut être réduite jusqu'à 30-40 % selon l'espèce, cette variabilité étant largement attribuée à l'impact des polluants atmosphériques. Les particules fines déposées sur les feuilles influencent les taux de transpiration (Pandey, 2016) en augmentant la perméabilité cellulaire, ce qui provoque la perte d'eau et de nutriments dissous et peut entraîner une sénescence prématurée des feuilles (Rai, 2016). Par ailleurs, la poussière peut réduire la transpiration par le blocage des stomates ; les particules de poussière causent également des blessures foliaires, un phénomène suspecté d'être associé à la réduction de la TRE (Javanmard, 2019). Le climat urbain, caractérisé par l'élévation de la température, la modification de l'humidité et l'imperméabilisation des sols, influence fortement la disponibilité en eau et la capacité des plantes à maintenir leur équilibre hydrique (Hamdani *et al.*, 2019).

Une TRE élevée est essentielle pour maintenir l'intégrité cellulaire et la photosynthèse, et permet aux plantes de mieux résister au stress oxydatif induit par la pollution atmosphérique (Rai, 2016 ; Shrestha *et al.*, 2021). Les plantes avec une TRE élevée sont mieux équipées pour maintenir leur métabolisme, leur stabilité hydrique, et leur réponse au

stress environnemental. Inversement, une TRE faible peut être le signe d'une réduction de la tolérance des plantes à la pollution atmosphérique, car cela limite leur réponse au stress hydrique et leur capacité à se défendre contre les radicaux libres (Pandey, 2016 ; Javanmard, 2019).

Une diminution de la TRE est généralement associée à une réduction du potentiel photosynthétique, pouvant même entraîner l'arrêt de la photosynthèse dans des conditions extrêmes (Shrestha *et al.*, 2021). Ainsi, la TRE s'affirme comme un indicateur pertinent de la tolérance des espèces à la fois à la pollution atmosphérique et à la sécheresse (Gholami *et al.*, 2016 ; Singh *et al.*, 1991). Toutefois, il convient de noter que la variabilité de la TRE peut également dépendre de facteurs tels que la période d'échantillonnage, le microclimat, l'éclairement solaire, la température, l'humidité et la salinité du sol (Ksenzhek & Volkov, 1998).

*Bougainvillea glabra*, *Cynodon dactylon*, *Ficus microcarpa* et *Phoenix dactylifera* présentent une TRE très élevée, ce qui leur permet de maintenir une photosynthèse efficace et une grande résilience face à la pollution atmosphérique. À l'inverse, des espèces telles que *Rosmarinus officinalis*, *Peganum harmala* et *Ziziphus lotus*, avec une TRE faible, se révèlent plus sensibles aux effets des polluants et moins aptes à réguler l'humidité cellulaire, ce qui limite leur capacité d'adaptation au stress environnemental.

### 1.5. L'indice de la tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) :

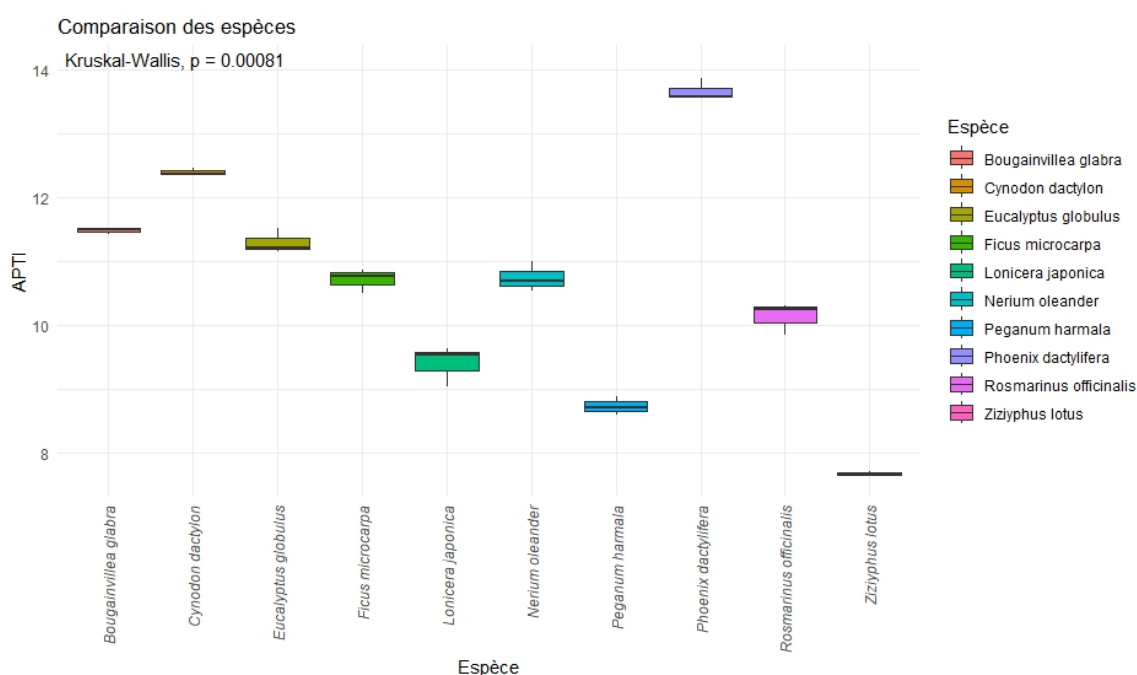
Le test de Kruskal-Wallis ( $p = 0.00081$ ) indique une différence significative entre les valeurs de l'indice de tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) des différentes espèces végétales (fig.34), suggérant que certaines plantes sont plus tolérantes à la pollution atmosphérique que d'autres.

Parmi les espèces étudiées, *Phoenix dactylifera* (13,67), *Cynodon dactylon* (12,40), *Bougainvillea glabra* (11,49) et *Eucalyptus globulus* (11,30) affichent un APTI élevé ( $> 11$ ), ce qui traduit une tolérance relativement forte à la pollution atmosphérique. Ces plantes disposent d'un système antioxydant efficace, d'une résilience élevée face au stress oxydatif et sont capables de maintenir une croissance saine malgré la présence de polluants dans l'air (López-Mosquera *et al.*, 2017) (fig. 34).

*Ficus microcarpa* (10,71), *Rosmarinus officinalis* (10,14), *Nerium oleander* (10,75) et *Lonicera japonica* (9,41) présentent un APTI modéré (entre 9 et 11), ce qui indique une

tolérance intermédiaire à la pollution. Ces plantes montrent une capacité modérée à résister au stress environnemental, mais leur croissance et leur développement peuvent être affectés par une pollution plus sévère (Xie *et al.*, 2020) (fig. 34).

En revanche, *Peganum harmala* (8,74) et *Zizyphus lotus* (7,67) présentent un APTI faible (< 9), ce qui traduit une résilience limitée face à la pollution atmosphérique. Ces espèces sont moins capables de neutraliser les radicaux libres et présentent des stratégies de défense moins efficaces face aux polluants (Mano *et al.*, 2016) (fig. 34).



**Figure 34.** Analyse comparative de l'APTI chez les différentes espèces étudiées.

L'APTI est un indicateur composite de la capacité d'une plante à résister à des environnements pollués. Cet indice intègre plusieurs facteurs physiologiques, tels que la teneur en acide ascorbique, la teneur en chlorophylle totale, le pH foliaire et la teneur relative en eau, pour évaluer la réponse des plantes au stress environnemental induit par les polluants comme les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et l'ozone (O<sub>3</sub>) (Singh *et al.*, 1991 ; Rai *et al.*, 2013).

L'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) est un outil reconnu pour évaluer la capacité des plantes à résister à la pollution urbaine : une valeur élevée indique une meilleure tolérance aux polluants comme le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub> et l'ozone (Singh *et al.*, 1991). Dans la ville de Laghouat, *Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon* et *Bougainvillea glabra* présentent les indices les plus élevés, traduisant une grande adaptabilité à la pollution, tandis

que *Zizyphus lotus* et *Peganum harmala* affichent les valeurs les plus faibles, signalant une sensibilité accrue au stress oxydatif et aux effets de la pollution. Ces résultats, sont en accord avec la littérature (Giri *et al.*, 2013 ; Rai *et al.*, 2013 ; Correa-Ochoa *et al.*, 2022), qui confirment que l'APTI, permet de classer rapidement les espèces selon leur tolérance ou leur sensibilité à la pollution. Ainsi, il est recommandé de privilégier les espèces à APTI élevé pour la plantation urbaine et d'utiliser celles à faible APTI comme bio-indicateurs pour le suivi de la qualité de l'air (Shrestha *et al.*, 2021).

Selon la classification de Flowers *et al.* (2007), les espèces végétales peuvent être réparties en trois groupes en fonction de leur indice de tolérance à la pollution atmosphérique (APTI) : espèces sensibles ( $APTI < 12$ ), espèces intermédiaires ( $13 < APTI < 20$ ) et espèces tolérantes ( $APTI > 20$ ). Sur la base de nos résultats, aucune des espèces étudiées n'atteint le seuil de tolérance élevé ( $APTI > 20$ ).

Selon la classification de Flowers *et al.* établis en 2007. La flore locale analysée présente globalement une sensibilité relative à la pollution atmosphérique avec un  $APTI < 12$ , exception faite pour *Phoenix dactylifera* qui affiche une valeur d' $APTI > 12$  qui la range dans la catégorie présentant une sensibilité intermédiaire.

La différence entre les valeurs plus ou moins importantes de l'APTI rapportées dans des pays très industrialisés comme l'Inde et les valeurs plus faibles obtenues dans la région de Laghouat s'explique principalement par un niveau de pollution atmosphérique beaucoup plus élevé dans les zones industrielles ou urbaines d'Inde, ce qui pousse les plantes à développer des mécanismes de tolérance plus marqués, alors qu'à Laghouat, la pollution est moins prononcée et les espèces locales restent globalement plus sensibles.

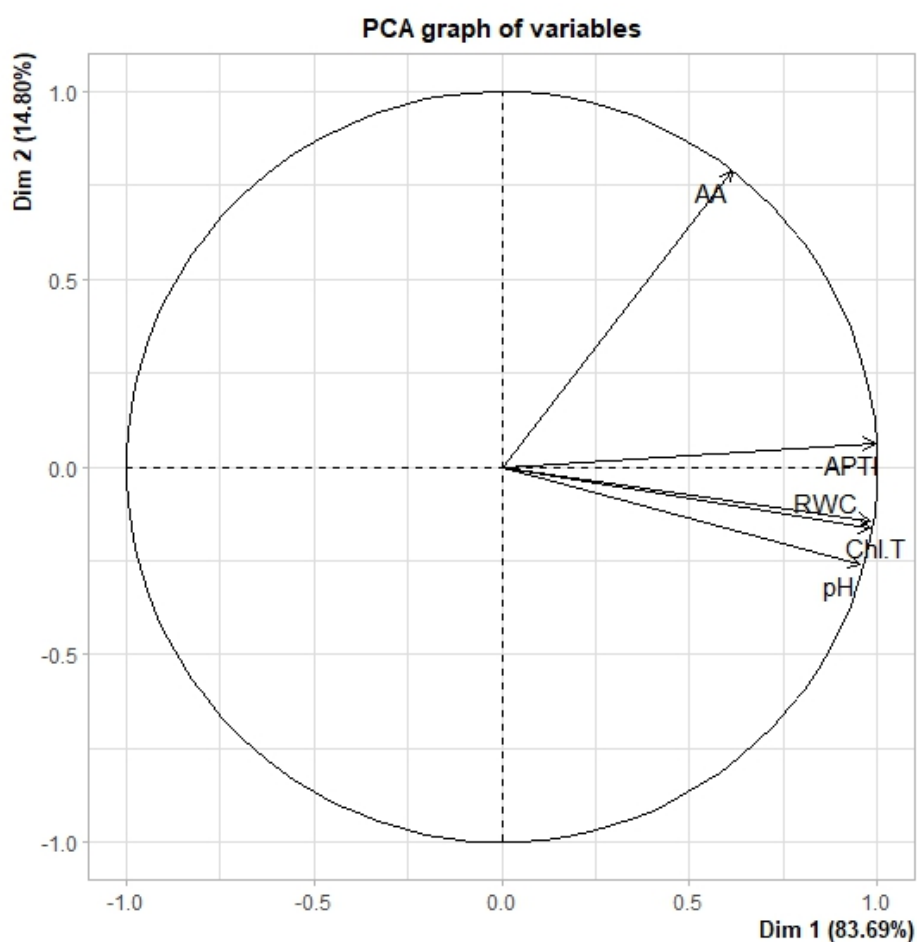
De point de vue pollution atmosphérique, l'Algérie se classe au 78e rang mondial ( $13,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), contre la 3e place pour l'Inde ( $54,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ; les valeurs de l'APTI sont fonction du degré de la pollution atmosphérique (Airvisual, 2023).

### 1.5.1. L'analyse en composantes principales (ACP) :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de visualiser la structure des relations entre les quatre variables constitutives de l'APTI. La première dimension (Dim 1, 83,69 %) est fortement corrélée avec APTI, TRE, pH et Chl.T, indiquant que ces paramètres évoluent conjointement. La deuxième dimension (Dim 2, 14,80 %) est dominée par la teneur en acide ascorbique (AA) (fig. 35). Ce résultat illustre le principe fondamental de l'ACP, qui

consiste à transformer des variables initialement corrélées en composantes principales, afin de résumer l'information et de réduire la dimensionnalité des données.

Bien qu'incluse dans le calcul de l'APTI, l'AA exprime une variabilité propre, suggérant que certaines espèces possèdent une réponse métabolique complémentaire la pollution atmosphérique. Le cercle des corrélations obtenu par l'ACP permet de visualiser ces relations et de confirmer la robustesse du modèle APTI, car les variables qui le composent sont fortement corrélées entre elles sur l'axe principal. (Jolliffe, 1986 ; Sow, 2020).



**Figure 35.** Analyse en Composantes Principales (ACP).

### 1.5.2. La classification hiérarchique (HCA) :

La classification hiérarchique ascendante (HCA), illustrée par le dendrogramme, met en évidence quatre grands groupes de plantes selon leur tolérance à la pollution atmosphérique (fig. 36) :

Groupe tolérant : *Phoenix dactylifera*, *Bougainvillea glabra*, *Cynodon dactylon*. Ces espèces sont associées à des valeurs élevées d'APTI, indiquant une forte capacité à résister au stress

polluant, conformément aux critères de Singh et Rao (1991) et des études récentes sur l'APTI (Devkota *et al.*, 2022 ; Asif *et al.*, 2024).

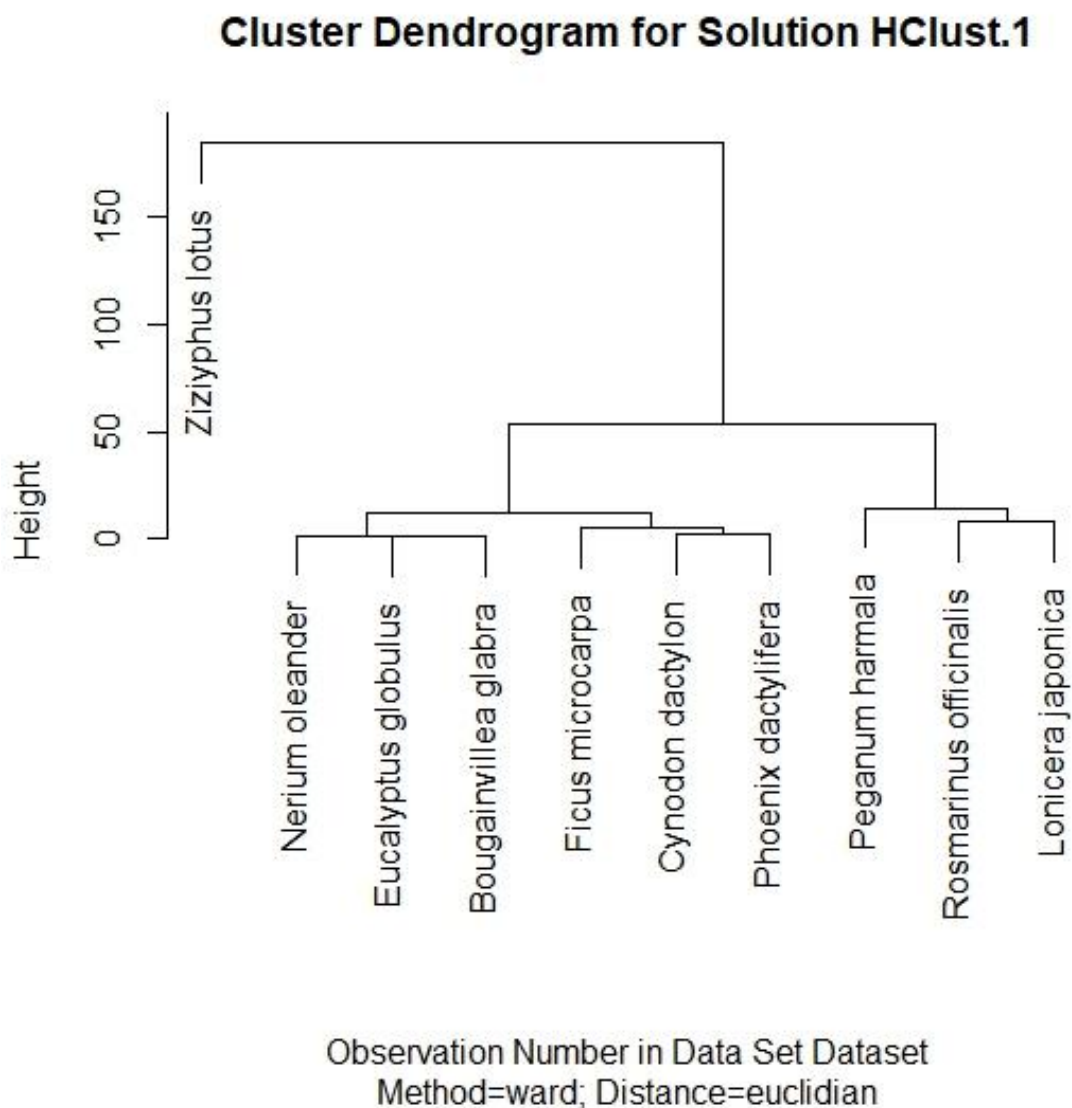
Groupe intermédiaire : *Eucalyptus globulus*, *Ficus microcarpa*, *Nerium oleander*. Ces espèces présentent une tolérance modérée, typique des valeurs intermédiaires d'APTI, comme le montrent les classifications établies dans la littérature (Singh *et al.*, 1991 ; Devkota *et al.*, 2022).

Groupe potentiellement métabolique : *Peganum harmala*, *Rosmarinus officinalis*, *Lonicera japonica*. Ces espèces, bien que présentant un APTI limité, sont reconnues pour leur richesse en métabolites secondaires antioxydants, suggérant des mécanismes de défense spécifiques non entièrement captés par l'APTI seul (Rais *et al.*, 2017).

*Ziziphus lotus* : Cette espèce apparaît isolée et atypique dans la classification, ce qui peut refléter soit une vulnérabilité particulière à certains polluants, soit un mode de défense métabolique très différent (Bui *et al.*, 2023 ; Rais *et al.*, 2017). Des études spécifiques sur *Ziziphus lotus* montrent une grande variabilité de ses réponses biochimiques selon les conditions de stress, notamment par l'accumulation d'osmolytes comme la proline et les sucres solubles, ce qui pourrait expliquer sa position isolée dans le dendrogramme (Rais *et al.*, 2017).

Le profil isolé de *Ziziphus lotus*, confirmé par l'HCA et les valeurs d'APTI, souligne l'importance de compléter l'indice APTI par des analyses biochimiques spécifiques pour mieux comprendre les stratégies de tolérance ou de sensibilité de certaines espèces (Singh *et al.*, 1991 ; Rais *et al.*, 2017).

Il est important de signaler que les sujets de *Ziziphus lotus* à partir desquels nous avons pris nos échantillons de feuilles sont tous de jeune et ne dépassant pas les 70 cm de hauteur, et que cette espèce ne pousse pas habituellement dans le milieu urbain de Laghouat.



**Figure 36.** Classification Hiérarchique (HCA) des différentes espèces étudiées.

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

### Conclusion

Cette étude visait à évaluer la tolérance de 10 espèces végétales urbaines exposées à la pollution de l'air à Laghouat, en Algérie, en utilisant des paramètres biochimiques et physiologiques intégrés dans l'Indice de Tolérance à la Pollution de l'Air (APTI). Les analyses statistiques, y compris les tests de Kruskal-Wallis, ont confirmé des différences significatives entre les espèces pour tous les paramètres mesurés, indiquant une variabilité interspécifique dans leur réponse à la pollution de l'air. *Phoenix dactylifera*, *Cynodon dactylon* et *Bougainvillea glabra* ont affiché le plus haut indice de tolérance, indiquant une forte capacité à s'adapter à la pollution urbaine. *Ziziphus lotus* et *Peganum harmala* ont affiché les valeurs les plus basses, indiquant une sensibilité accrue.

L'analyse détaillée a montré que les espèces avec une teneur en acide ascorbique élevée, une teneur en chlorophylle élevée et une résistance significative au stress oxydatif tremblant étaient mieux équipées pour résister au stress des polluants. Inversement, une faible AA, une teneur réduite en chlorophylle, un pH foliaire acide et un faible stress oxydatif tremblant étaient associés à une sensibilité accrue à la pollution.

L'Analyse en Composants Principales (ACP) a confirmé la cohérence des paramètres constitutifs de l'APTI, avec une forte corrélation entre la teneur en eau, le pH, la teneur totale en chlorophylle et l'indice global. L'activité antioxydante a exprimé une variabilité unique, suggérant l'importance de l'analyser comme un paramètre autonome.

La Classification Hiérarchique Ascendante (HCA) distingue quatre groupes écophysiologiques : un groupe hautement tolérant (*Phoenix dactylifera*, *Bougainvillea glabra*, *Cynodon dactylon*), un groupe intermédiaire (*Eucalyptus globulus*, *Ficus microcarpa*, *Nerium oleander*), un groupe à potentiel métabolique (*Peganum harmala*, *Rosmarinus officinalis*, *Lonicera japonica*) et un groupe isolé (*Ziziphus lotus*), soulignant la diversité des stratégies adaptatives.

Les résultats confirment l'importance de l'APTI en tant qu'outil de sélection pour la végétation urbaine et la gestion durable des espaces verts. Les espèces à APTI élevé sont recommandées pour la plantation urbaine et l'amélioration de la qualité de l'air, tandis que les espèces à APTI faible, comme *Ziziphus lotus*, peuvent servir de bio-indicateurs pour le suivi de la pollution de l'air. L'étude souligne la pertinence de l'APTI dans les conditions

### Perspectives

Les résultats obtenus laissent entrevoir de nombreuses perspectives qui méritent d'être approfondies afin de consolider et d'élargir les connaissances acquises :

- Il serait pertinent de généraliser ce type d'étude à l'ensemble de la flore urbaine de la région de Laghouat, afin de mieux comprendre et d'identifier les réponses des différentes espèces à la pollution atmosphérique.
- L'utilisation potentielle des espèces autochtones les plus tolérantes pourrait être valorisée dans les programmes d'aménagement urbain, dans une optique d'amélioration de la qualité de l'air et de gestion durable des espaces verts.
- Des recherches complémentaires devraient être menées en utilisant des méthodes de prélèvement direct des polluants atmosphériques pour permettre une évaluation précise, qualitative et quantitative de la pollution, et établir des corrélations robustes entre la bio-indication végétale et les mesures physico-chimiques de l'air.
- Par ailleurs, il serait intéressant d'approfondir l'étude des mécanismes de tolérance chez certaines espèces, en particulier celles qui présentent un profil atypique ou isolé, comme *Ziziphus lotus*, à travers des approches histologiques et métabolomiques.
- Enfin, l'intégration des résultats de l'Indice de Tolérance à la Pollution Atmosphérique (APTI) dans les stratégies locales de verdissement et de développement urbain durable pourrait servir de référence pour d'autres villes sahariennes et semi-arides confrontées à la pollution atmosphérique.

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

- Abcha, I.** (2020). Étude du potentiel biopharmaceutique et nutraceutique de deux plantes médicinales et comestibles de la Tunisie : *Rhus tripartita* L. et *Zizyphus lotus* L. [Thèse de doctorat, INAT].
- Abdoul-Azize, S.** (2016). Potential benefits of jujube (*Zizyphus Lotus* L.) bioactive compounds for nutrition and health. *Journal of nutrition and metabolism*.
- Abed, E. A., Amini, H., Samadi, N., Kar, S., Hoodaji, M., Shirvani, M., & Porsakhi, K.** (2013). Assesment of air pollution tolerance index of higher plants suitable for green belt development in east of Esfahan city, Iran.
- AIRPARIF : L'Observatoire de l'Air en Île-de-France.** (2025). Pollution de l'air et érosion de la biodiversité - Etat des connaissances
- Akatsu, M.** (2015). The problem of air pollution during the Industrial Revolution: A reconsideration of the enactment of the Smoke Nuisance Abatement Act of 1821. *Economic history of energy and environment*, 85-109.
- Aksoy, A., & Öztürk, M. A.** (1997). *Nerium oleander* L. as a biomonitor of lead and other heavy metal pollution in Mediterranean environments. *Science of the Total Environment*, 205(2-3), 145-150.
- Alatou, H., & Sahli, L.** (2019). Using tree leaves and barks collected from contaminated and uncontaminated areas as indicators of air metallic pollution. *International journal of phytoremediation*, 21(10), 985-997.
- Alatou, H., & Sahli, L.** (2019). Using tree leaves and barks collected from contaminated and uncontaminated areas as indicators of air metallic pollution. *International journal of phytoremediation*, 21(10), 985-997.
- Algérie Presse Service.** (2019). La pollution de l'air est principalement due aux émissions de gaz provenant du trafic urbain en Algerie. <https://www.aps.dz/ar/sante-science-technologie/72115-2019-06-11-07-59-20>.
- Al-Snafi, A. E.** (2020). Bioactive ingredients and pharmacological effects of *Nerium oleander*. *IOSR Journal of Pharmacy*, 10(9), 19-32.
- Amrani, O.** (2021). Étude floristique et nutritive, spatiotemporelles des principales plantes vivaces des parcours steppiques, naturels et aménagés, de la région de Laghouat (Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques), universite kasdi merbah-ouargla.
- Aouimeur, M., Goudjil, T., Rouabhia, A., & Hamiri, M.** (2009). Studies of changes of some blood parameters among workers of cement of El Ma El Abiod Tebessa Algeria. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 1(2), 58-71.
- Asian Journal of Applied Chemistry Research.** (2021). Phytoremediation potentials of *Cynodon dactylon* on heavy metal contaminated soils. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 9(3), 25-36. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2021/v9i330216>
- Asif, Z., Ma, W.** (2024). Assessing the air pollution tolerance index of urban plantation: A case study conducted along high-traffic roadways. *Atmosphere*, 15(6), 659.
- Atlili, K., & Boutheldja, T.** (2018). La biodiversité de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) dans la région d'Ouargla (Cas du Chott). Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla. [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29323/1/ATLILI-BOUTHELDJA\\_compressed.pdf](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29323/1/ATLILI-BOUTHELDJA_compressed.pdf).
- Ayouaz, S., Arab, R., Mouhoubi, K., & Madani, K.** (2023). *Nerium oleander* Lin: A Review of Chemical, Pharmacological and Traditional uses. *Journal ISSN*, 2766, 2276.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Azhar, U., Ahmad, H., Shafeeq-Ur-Rahman, Khan, H. A., Tahir, M., Ahmad, I., & Adnan, M. (2024). Comparative assessment of phytoremediation potential of four *Ficus* spp. under semi-arid environmental conditions. *Cellular and Molecular Biology*, 70(8), 145-157.
- Baghedaoui, B., Boudoukha, A., & Bouguerra, M. L. (2004). Surveillance de la qualité de l'air dans la région d'Alger. *Pollution Atmosphérique*, (183), 53-61.
- Baker, P. (2018). Identifying the connection between Roman conceptions of 'Pure Air' and physical and mental health in Pompeian gardens (c.150 BC–AD 79): a multi-sensory approach to ancient medicine. *World Archaeology*, 50(3), 404–417
- Barandovski, L. Stafilov, T. Šajn, R. Bačeva Andonovska, K. Frontasyeva, M. Zinicovska, I. (2024). Assessment of Atmospheric Deposition of Potentially Toxic Elements in Macedonia Using a Moss Biomonitoring Technique. *Sustainability* 2024, 16, 748.
- Bargagli, R. (2016). Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of the Total Environment*, 572, 216-231.
- Ben Amor, A. (2021). Évaluation du pouvoir d'accumulation des polluants par quelques espèces végétales originaires du milieu oasien de Gabes [these de doctorat]. Institut des Régions Arides, Médnine.
- Benammar, M., Abdaoui, A., Ahmad, S. H., Touati, F., & Kadri, A. (2018). A modular IoT platform for real-time indoor air quality monitoring. *Sensors*, 18(2), 581.
- Bhattacharya, T., Kriplani, L., & Chakraborty, S. (2013). Seasonal variation in air pollution tolerance index of various plant species of Baroda city. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 3(2), 199-208.
- Björn, L. O., Papageorgiou, G. C., Blankenship, R. E., & Govindjee. (2009). A viewpoint: Why chlorophyll a? *Photosynthesis Research*, 99(2), 85– 98. doi:10.1007/s11120-008-9395-x
- Boughedaoui, M., Kerbachi, R., Kessali, D., & Joumard, R. (2004). Mesure de la pollution plombifère dans l'air ambiant d'Alger. *Pollution Atmosphérique*, 46(181), 105- 112.
- Boulebeghal, M. (2022). « *Rosmarinus officinalis* : screening phytochimique et activité antibactérienne d'une plante médicinale très abondante et utilisée pour ses divers effets thérapeutiques en Algérie. » Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- Bourdrel, T., Bind, M. A., Bejot, Y., Morel, O., & Argacha, J. F. (2017). Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of cardiovascular diseases*, 110(11), 634- 642.
- Brimblecombe P., & Bowler C. (1992) The History of Air Pollution in York, England, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 42:12, 1562-1566, DOI:10.1080/10473289.1992.10467098.
- Buheji, M., & Al-Muhannadi, K. (2023). Mitigating Risks of Environmental Impacts on Gaza-Review of Precautions & Solutions post (2023 War). *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 14(7), 15-47.
- Buoli, M., Grassi, S., Caldiroli, A., Carnevali, G. S., Mucci, F., Iodice, S., ... & Bollati, V. (2018). Is there a link between air pollution and mental disorders? *Environment international*, 118, 154-168.
- Burns, R. M. (1990). *Silvics of north America* (No. 654). US Department of Agriculture, Forest Service. (P 299).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cai, J.-Q., Liu, X.-M., Gao, Z.-J., Li, L.-L., & Wang, H. (2021). *Chlorophylls derivatives: Photophysical properties, assemblies, nanostructures and biomedical applications. Materials Today*, 45, 77–92.
- Castell, J.-F. (2017). Biosurveillance végétale de la qualité de l'air [Présentation]. DRIEAT Île-de-France [https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/presentation\\_biosurveillance\\_inra\\_05-10-2017.pdf](https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/presentation_biosurveillance_inra_05-10-2017.pdf).
- Cayton, S. (1960). The Practical Application of the Clean Air Act. *Royal Society of Health Journal*, 80(3), 157-162.
- Centre for Australian National Biodiversity Research. (2010). *Ficus microcarpa* distribution and habitat requirements. Australian National Biodiversity Research Centre.
- Chettah S.E. (2019) Le secteur des transports routiers : premier pollueur atmosphérique et un des gros énergivores en Algérie... la transition énergétique comme urgence.
- Choudhary, M. P., & Garg, V. (2013). Causes, consequences and control of air pollution. In All India seminar on methodologies for air pollution control, held at MNIT.
- Chrabańczak, M., & Mróz, L. (2017). Tree Bark, a valuable source of information on air quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(3).
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review. *Environmental pollution*, 114(3), 471-492.
- Conticini, E., Frediani, B., & Caro, D. (2020). Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environmental pollution*, 261, 114465.
- Corner, E. J. H. (1965). Check-list of *Ficus* in Asia and Australasia with keys to identification. *The Gardens' Bulletin Singapore*, 21, 1-186.
- Correa-Ochoa, M., Mejia-Sepulveda, J., Saldarriaga-Molina, J., Castro-Jiménez, C., & Aguiar-Gil, D. (2022). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of six plant species, in an urban tropical valley: Medellín, Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Cozea, A., Bucur, E., Lehr, C. B., Pascu, L. F., & Tanase, G. (2018). Aspects regarding the use of some species of plants as bioindicators in air quality assessment.
- Dadkhah-Aghdash H, Rasouli M, Rasouli K, Salimi A. (2022). Detection of urban trees sensitivity to air pollution using physiological and biochemical leaf traits in Tehran, Iran. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9470701/>
- Devarakonda, S., Sevusu, P., Liu, H., Liu, R., Iftode, L., & Nath, B. (2013). Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. In Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD international workshop on urban computing (pp. 1-8).
- Devkota, A., Sapkota, S., Dhyani, S. (2022). Assessing the Air Pollution Tolerance Index and Anticipated Performance Index of Roadside Plant Species for Biomonitoring Environmental Health. *Pollution Research*, 41(3), 1–10.
- Dimitrova, I., & Yurukova, L. (2005). Bioindication of anthropogenic pollution with *Plantago lanceolata* (Plantaginaceae): metal accumulation, morphological and stomatal leaf characteristics. *Phytologia Balcanica*, 11(1), 89-96.
- Diop, D., Noba, K., Sambou, B., Mbaye, M. S., Kane, A., & Ba, A. T. (2008). Sur les caractères micro-morphologiques du limbe de la feuille de 23 espèces du genre *Ficus* L. (Moraceae). *Webbia*, 63(2), 175-186.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Djoughri, S., & Bencheikh, S. (2022).** Généralité sur le palmier dattier et les dattes. Université d'Ouargla. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28785/1/DJOUHRI-BENCHEIKH.pdf>.
- doc-developpement-durable.org. (2020).** *Phoenix dactylifera* - Fiche technique. [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Fruitiers/FICHES\\_ARBRES/Palmier-dattier/Phoenix-dactylifera.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Fruitiers/FICHES_ARBRES/Palmier-dattier/Phoenix-dactylifera.pdf).
- Dong, D., & Wang, J. (2023).** Air pollution as a substantial threat to the improvement of agricultural total factor productivity: Global evidence. *Environment International*, 173, 107842.
- Dudley, N., & Stolton, S. (1996).** Air pollution and biodiversity: a review. Bristol: Montpellier.
- Duque, L., Steffan-Dewenter, I. 2024.** Air pollution: a threat to insect pollination. *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Durrett, T. P., & Welti, R. (2021).** The tail of chlorophyll: Fates for phytol. *Journal of Biological Chemistry*, 296.
- Ebrahimi, F., Ghorbani Nohooji, M., & Miri, S. M. (2018).** Agronomic and pharmacological aspects of *Nerium oleander*: an important medicinal plant. In The first national congress and international fair of medicinal plants and strategies for Persian medicine that affect diabetes (pp. 9-11).
- El Hadrami, I., El Bellaj, M., El Idrissi, A., J'Aiti, F., El Jaafari, S., & Daayf, F. (1998).** Biotechnologies végétales et amélioration du palmierdattier (*Phoenix dactylifera L.*), pivot de l'agriculture oasienne marocaine. *Cahiers Agricultures*, 7, 463-468. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/download/30125/29885/0>
- El-Khatib, A. A., El-Shanawany, A. A., & El-Amery, E. M. (2016).** Urban tree leaf as bio-indicator for air pollution around superphosphate fertilizers plant, Upper Egypt. *Journal of Ecology of Health & Environment*, 4(2), 95-101.
- El-Soul, M., Mlitan, A., Elgubbi, H., & Alborokey, S. (2017).** Crackers Dust and its Impact on Some Plants In Sassu Valley, Misurata Region, Libya. In The First Annual Conference on Theories and Applications of Basic and Biosciences. Sebتمبر.
- Epstein, B. (1995).** Grassroots environmentalism and strategies for social change. *New Political Science*, 16(1), 1-24.
- Fadel, D., Djamaï R., Laïfa, A., Benslama, M., & Boughambouz, I. (2005).** Bioindication de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures totaux du complexe pétrochimique de Skikda (nord-est algérien) à l'aide d'une espèce lichénique épiphyte *Xanthoria parietina*. *Revue Ecologie & Environnement*, (ISSN : 1112-5888).
- Fadel, D., Djamai, R., & Laifa, A. (2011).** Essai d'une cartographie de la qualité de l'air d'une ville industrielle du nord-est algérien par l'utilisation de la bio-indication lichénique. In Séminaire international « Villes&Santé ».
- Fadel, D., Djamaï, R., Laïfa, A., Benslama, M., & Boughambouz, I. (2005).** Bioindication de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures totaux du complexe pétrochimique de Skikda (nord-est algérien) à l'aide d'une espèce lichénique épiphyte *Xanthoria parietina*. *Revue Ecologie & Environnement*, (ISSN: 1112-5888).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fatima, F., Fatima, N., Amjad, T., Anjum, A., Afzal, T., Riaz, J., & Razzaq, H.** (2020).5. A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 10(1), 301-310.
- Feder, W. A.** (1978). Plants as bioassay systems for monitoring atmospheric pollutants. *Environmental Health Perspectives*, 27, 139-147  
<https://doi.org/10.1289/ehp.7827139>.
- Feng, Z., Sun, J., Wan, W., Hu, E., & Calatayud, V.** (2014). Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China. *Environmental pollution*, 193, 296-301.
- Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M.** (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645-685.
- FlowersMD, FiscusEL, BurkeyKO, BookerFL, DuboisJ-JB.**(2007). Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in sensitivity to ozone. *EnvironExpBot*61(2):190–198.<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.009>.
- Garrec Jean-Pierre.** (2019). Quel est l'impact des polluants de l'air sur la végétation ? Laboratoire Pollution Atmosphérique, INRA, Centre de Recherches de Nancy, France.<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation/> Duque, Laura and Steffan-Dewenter, Ingolf : Air pollution : a threat to insect pollination. *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Geetha M., Raja G.** (2023). Assessment of Biophysiological Response of Plants Grown In Urban Area, *International Journal of Advance and Applied Research. Assessment*, 10(5).
- Ghedira, K.** (2013). *Zizyphus lotus* (L.) Desf.(Rhamnaceae): jujubier sauvage. *Phytothérapie*, 11(3), 149-153.
- Ghennam, K., & Abdoun, F.** (2017). Biosurveillance par SIG de la qualité de l'air d'une cité méditerranéenne (Alger), diversité lichénique, indice de pureté atmosphérique (IPA) et indice d'impact humain (IIH). *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 72(2), 134-146.
- Gholami, A., Mojiri, A., & Amini, H.** (2016). Investigation of the Air Pollution Tolerance Index (APTI) using some plant species in Ahvaz region. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 26(2).
- Giri, S., Shrivastava, D., Deshmukh, K., & Dubey, P.** (2013). Effect of air pollution on chlorophyll content of leaves. *Current Agriculture Research Journal*, 1(2), 93-98.
- Godish, T., & Guindon, C.** (1989). *A study of interior landscape plants for indoor air pollution abatement: An interim report*. NASA Technical Memorandum 108061
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).** (2021). Effets du changement climatique en Afrique de l'ouest. Dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC.
- Gunder, C.** (2023). *Chèvrefeuille du Japon Lonicera japonica Thunb., 1784 : fiche action flore*. Conservatoire d'espaces naturels de Lorraine / EEE Grand Est. [https://www.eee-grandest.fr/app/uploads/2023/03/Lonicera\\_japonica\\_VF.pdf](https://www.eee-grandest.fr/app/uploads/2023/03/Lonicera_japonica_VF.pdf).
- Hamdani, M., Krichen, K., & Chaieb, M.** (2019). Predicting leaf trait variability as a functional descriptor of the effect of climate change in three perennial grasses. *Diversity*, 11(12), 233.
- Hammiche, V., Merad, R., & Azzouz, M.** (2013). Laurier rose. *Collection Phytothérapie Pratique*, 157–166. doi :1 0.1007/978-2-8178-0375-3\_22

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hayat, U., Jilani, M. I., Rehman, R., & Nadeem, F. (2015). A Review on *Eucalyptus globulus*: A new perspective in therapeutics. *Int. J. Chem. Biochem. Sci*, 8, 85-91.
- He, G., Pan, Y., & Tanaka, T. (2020). The short-term impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in China. *Nature sustainability*, 3(12), 1005-1011.
- Heath, R. L. (1980). Initial events in injury to plants by air pollutants. *Annual review of plant physiology*, 31(1), 395-431.
- Heidorn, K. C. (1978). A chronology of important events in the history of air pollution meteorology to 1970. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59(12), 1589-1597.
- Holman, C. (1999). *Sources of Air Pollution. Air Pollution and Health*, 115– 148. doi:10.1016/b978-012352335-8/50083-1
- Huang, C., Shan, W., & Xiao, H. (2018). Recent advances in passive air sampling of volatile organic compounds. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(3), 602-622.
- Huang, L., Xie, R., & Yang, G. (2022). The impact of lockdown on air pollution: Evidence from an instrument. *China Economic Review*, 71, 101731.
- Hussein, H. S., Ghoneim, A. H., El-Basyoni, I. (2019). Antioxidant enzymes as an adaptive response to oxidative stress in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.017>
- International Court of Justice. Registry, & United Nations. Legal Department. (1948). Recueil Des Sentences Arbitrales (Vol. 10). UN.
- Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric environment*, 43(1), 51-63.
- Javanmard, Z., Kouchaksaraei Tabari, M., Bahrami, H., Hosseini, S. M., Sanavi, S. A. M. M., & Struve, D. (2019). Dust collection potential and air pollution tolerance indices in some young plant species in arid regions of Iran. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(6), 558.
- Jayashree, P. R., Geetha, D. H., Kokila, R., & Suryavalmathy, R. (2019). Phytoremediation potential of *Cynodon dactylon* Pers. *ScieXplore: International Journal of Research in Science*, 6(2), 42-48.
- Jolliffe, I. T. (1986). *Principal Component Analysis*. Springer.
- Joshi, P. C., & Swami, A. (2009). Air pollution induced changes in the photosynthetic pigments of selected plant species. *Journal of Environmental Biology*, 30(2), 295-298.
- Journal Officiel de la République Algérienne. N°43, 20 Joumada El Oula 1424- 20 Juillet 2003. [En Ligne], Consulté le 20/03/2025 sur : <https://droit.mjustice.dz/sites/default/files/loi-03-10-fr.pdf>.
- Kaddouri, M. A. (2021). *Ecologie trophique du hérisson du désert Hemiechinus aethiopicus ehrenberg 1833 (mammalia: erinaceidae) dans la région de Laghouat (Doctoral dissertation)*.
- Karmakar, D., Deb, K., & Padhy, P. K. (2021). Ecophysiological responses of tree species due to air pollution for biomonitoring of environmental health in urban area. *Urban Climate*, 35, 100741.
- Khellaf, R., Amrani, A. (2011). Intérêt de la biosurveillance végétale de la pollution atmosphérique pour les pays en émergence. Exemple de l'Algérie. *Pollution Atmosphérique*.
- Kiliç, H., Eren, A., & Köleli, N. (2018). Potential of *Rosmarinus officinalis* for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium. *YYU J AGR SCI*, 28(özel sayı), 1-6.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Korčeková, R., Gregušková, E., Kmet'ová, M., & Janiga, M.** (2015). In situ monitoring of air pollutants in the Ružomberok area - vascular plants as indicators. *Oecologia Montana*, 24(2), 50-59.
- Krishnaveni, M., Amsavalli, L., Chandrasekar, R., Durairaj, S., & Madhiyan, P.** (2013). Air pollution tolerance index of plants at Coimbatore city, Tamil Nadu, India. *International Journal of Environmental Sciences*, 4(3), 373-384.
- Kuklinska, K., Wolska, L., & Namiesnik, J.** (2015). Air quality policy in the US and the EU—a review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(1), 129-137.
- Kumari, S., & Deswal, S.** (2017). Air pollution tolerance index of some common plants: A comparative study. *Research Journal of Environmental Sciences*, 11(1), 23-27.
- Leaning, J.** (2000). Environment and health: 5. Impact of war. *CMAJ*, 163(9), 1157-1161.
- Li, J., Wang, X., Chen, Y., & Zhang, M.** (2017). Heavy metal remediation with *Ficus microcarpa* through phytoremediation: A real scale experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 143, 98-104.
- Liu Z, Chen Q, Lin M, Chen M, Zhao C, Lu Q, Meng X.** (2022). Electric Field-Enhanced Cadmium Accumulation and Photosynthesis in a Woody Ornamental Hyperaccumulator-*Lonicera japonica* Thunb. *Plants (Basel)*. 11(8) :1040. doi: 10.3390/plants11081040.
- López-Mosquera, M. E., Paz-Ferreiro, J., Rocco, M., Fernández-López, M.** (2017). Chlorophyll fluorescence as an indicator of environmental stress in plants. *Environmental Pollution*, 220, 1134–1143. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.054>
- Mahato, A.** (2014). Climate change and its impact on agriculture. *International journal of scientific and research publications*, 4(4), 1-6.
- Mahmood, F., Khokhar, M. F., & Mahmood, Z.** (2020). Examining the relationship of tropospheric ozone and climate change on crop productivity using the multivariate panel data techniques. *Journal of environmental management*, 272, 111024 : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111024>.
- Maizi, Naila., Alioua, Amel, et Tahar, Ali.** (2012) Jumelage des bio-indicateurs et d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air pour la détection de la pollution par le SO<sub>2</sub> dans la région de Annaba (Algérie).
- Maizi, Naila., Alioua, Amel, et Tahar, Ali.** (2012) Jumelage des bio-indicateurs et d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air pour la détection de la pollution par le SO<sub>2</sub> dans la région de Annaba (Algérie). BASE, 2012.
- Mancebo, S. E., & Wang, S. Q.** (2015). Recognizing the impact of ambient air pollution on skin health. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 29(12), 2326-2332.
- Mano, H., Tanaka, K., & Wada, M.** (2016). Alternative defense mechanisms to air pollutants in plants: Role of secondary metabolites. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01103>
- Melfou, K., Theocharopoulos, A., & Papanagiotou, E.** (2007). Total factor productivity and sustainable agricultural development. *Economics and rural development*, 3(1), 32-38.
- Meo, S. A., & Suraya, F.** (2015). Effect of environmental air pollution on cardiovascular diseases. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, 19(24).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Merabti, K., Rebbas, K., Beddiar, A., Ait Hammou, M., & Boutabia, L. (2018). Inventaire des lichens de la région Est d'Alger et leurs utilisations comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique. *Revue Ecologie-Environnement* (14), 1112-5888.
- Merabti, K., Rebbas, K., Beddiar, A., Ait Hammou, M., & Boutabia, L. (2018). Inventaire des lichens de la région Est d'Alger et leurs utilisations comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique. *Revue Ecologie-Environnement* (14), 1112-5888.
- Mhamdi, A., Noctor, G., Lelarge-Trouverie, C. (2014). The metabolomics of oxidative stress. *Phytochemistry*, 112, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.06.00612>
- Mills, G., Sharps, K., Simpson, D., Pleijel, H., Frei, M., Burkey, K., ... & Agrawal, M. (2018). Closing the global ozone yield gap: Quantification and cobenefits for multistress tolerance. *Global Change Biology*, 24(10), 4869-4893.
- Mishra, M., & Sahu, N. C. (2021). Air Pollution: A Threat to Biodiversity. *International Journal of Environmental Sciences*, 7(2).
- Mohamed, A. A., Ali, S. I., & El-Baz, F. K. (2022). Monitoring of air pollutants using plants and co-located soil-Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18918-18932.
- Moharana, B. K., Anand, P., Kumar, S., & Kodali, P. (2020). Development of an IoTbased real-time air quality monitoring device. *International conference on communication and signal processing* (ICCSP) (pp. 191-194).
- Mohd. Farooq, Akbar Masood, M.U. Beg. (1985). Effect of acute exposure of sulphur dioxide on the metabolism of *Holoptelea integrifolia* plants *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*. Volume 39, Issue 3. Pages 197-205. ISSN 0143-1471. [https://doi.org/10.1016/0143-1471\(85\)90096-0](https://doi.org/10.1016/0143-1471(85)90096-0).
- Molnár, V. É., Tózsér, D., Szabó, S., Tóthmérész, B., & Simon, E. (2020). Use of leaves as bioindicator to assess air pollution based on composite proxy measure (APTI), dust amount and elemental concentration of metals. *Plants*, 9(12), 1743.
- Moloudizargari, M., Mikaili, P., Aghajanshakeri, S., Asghari, M., & Shayegh, J. (2013). Pharmacological and therapeutic effects of *Peganum harmala* and its main alkaloids. *Pharmacognosy Reviews*, 7(14), 199. doi:10.4103/0973-7847.120524
- Mosley, S. (2014). Environmental history of air pollution and protection. In *The basic environmental history* (pp. 143-169). Cham: Springer International Publishing.
- Moussaoui, F. (2020). Etude épidémiologique et impact du plomb sur le risque de faible poids de naissance dans la région de Sidi Bel Abbés (Doctoral dissertation).
- Murray, C. J., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., ... & Borzouei, S. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The lancet*, 396(10258), 1223-1249.
- Nakazato, R. K., Esposito, M. P., Cardoso-Gustavson, P., Bulbovas, P., Pedroso, A. N. V., de Assis, P. I. L. S., & Domingos, M. (2018). Efficiency of biomonitoring methods applying tropical bioindicator plants for assessing the phytotoxicity of the air pollutants in SE, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 19323-19337.
- Nali, C., Crocicchi, L., & Lorenzini, G. (2004). Plants as indicators of urban air pollution (ozone and trace elements) in Pisa, Italy. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(7), 636-645.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Nandy, A., Talapatra, S. N., Bhattacharjee, P., Chaudhuri, P., & Mukhopadhyay, A. (2014). Assessment of morphological damages of leaves of selected plant species due to vehicular air pollution, Kolkata, India. *International Letters of Natural Sciences*, 4.
- Nedjimi, B. (2019). Germination characteristics of *Peganum harmala* L. (Nitrariaceae) subjected to heavy metals: implications for the use in polluted dryland restoration. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-019-02600-3
- Nejjari, C., Filleul, L., Zidouni, N., Laid, Y., Atek, M., El Meziane, A., & Tessier, J. F. (2003). La pollution atmosphérique, un nouveau risque respiratoire pour les villes du sud. *Int J Tuberc Lung Dis*, 7(3), 223-231.
- Newman, J. R., Schreiber, R. K., & Novakova, E. (1992). Air Pollution Effects on Terrestrial and Aquatic Animals. *Air Pollution Effects on Biodiversity*, 177–233. doi:10.1007/978-1-4615-3538-6\_10.
- of toxic heavy metals from growth soils into jujube and persimmon of China. *Environmental Science and Pollution Research*. doi :10.1007/s11356-018-2959-1
- Omar, Y., M'hamed, M., Nadera, A., Amine, H., & Mokhtar, A. (2015). Bioaccumulation de la pollution plombique d'origine routiere au moyen d'une mousse (bryum argenteum) dans la ville de tiaret (Algérie) : classes de pollution et cartographie. *European Scientific Journal*, ESJ, 11(8).
- Omar, Y., M'hamed, M., Nadera, A., Amine, H., & Mokhtar, A. (2015). Bioaccumulation de la pollution plombique d'origine routiere au moyen d'une mousse (bryum argenteum) dans la ville de tiaret (Algérie) : classes de pollution et cartographie. *European Scientific Journal*, ESJ, 11(8).
- OMS. (2023) Pollution atmosphérique : le tueur invisible.
- Ornelas García, I. G., Guerrero Barrera, A. L., Avelar González, F. J., Chávez Vela, N. A., & Gutiérrez Montiel, D. (2023). *Bougainvillea glabra* Choisy (Nyctinaginacea): review of phytochemistry and antimicrobial potential. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1276514. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1276514>.
- Pabst, M. A., & Hofer, F. (1998). Deposits of different origin in the lungs of the 5,300-year-old Tyrolean Iceman. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 107(1), 1-12.
- Pagen, F. J. J. (1987). *Oleanders; Nerium L. and the Oleander cultivars*. Series of revisions of Apocynaceae XX (No. 87-2). Wageningen Agricultural University.
- Palczewska, M. (2022). Environmental Impact of Wars and Armed Conflicts. In *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION* (Vol. 28, No. 1, pp.100-104).
- Panda, L. L., Aggarwal, R. K., & Bhardwaj, D. R. (2018). A review on air pollution tolerance index (APTI) and anticipated performance index (API). *Current World Environment*, 13(1), 55.
- Pandey AK, Pandey M, Tripathi BD (2016) Assessment of air pollution tolerance index of some plants to develop vertical gardens near street canyons of a polluted tropical city. *Ecotoxicol Environ Safe* 134:358–364. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.028>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Pawar, K., Dube, B., Maheshwari, R., & Bafna, A.** (2010). Biochemical aspects of air pollution induced injury symptoms of some common ornamental road side plants. *Int J Biol Med Res*, 1(4), 291-294.
- PIER (Pacific Island Ecosystems at Risk).** (2014). *Ficus microcarpa* (Indian laurel tree) species profile. University of Hawaii.
- Pillai, P. & Jyoti Nivas College Autonomous.** (2022). Air Pollution Tolerance Index (APTI) : An Important Determinant for the Development of Green Space in Bengaluru City. Dans *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)* (Vol. 11–11, Numéro 09)<https://www.ijert.org/research/air-pollution-tolerance-index-apti-an-important-determinant-for-the-development-of-green-space-in-bengaluru-city-IJERTV11IS090099.pdf>.
- Rahal, F., Hadjou, Z., Blond, N., & Aguejdad, R.** (2018). Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie. *Cybergeo:European Journal of Geography*.
- Rahal, F., Hadjou, Z., Blond, N., & Aguejdad, R.** (2018). Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Rai, P. K.** (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and environmental safety*, 129, 120-136.
- Rai, P. K., & Panda, L. L.** (2014). Dust capturing potential and air pollution tolerance index (APTI) of some road side tree vegetation in Aizawl, Mizoram, India: an Indo-Burma hot spot region. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7, 93-101.
- Rai, P. K., Panda, L. L., Chutia, B. M., & Singh, M. M.** (2013). Comparative assessment of air pollution tolerance index (APTI) in the industrial (Rourkela) and non-industrial area (Aizawl) of India: An ecomanagement approach. *African journal of environmental science and technology*, 7(10), 944-948.
- Raimi, I. O., & Isichei, A. O.** (2015). Bioaccumulation potential of *Cynodon dactylon*Linn. in crude oil contaminated soil. *Journal of Tropical Biology and Conservation*, 12, 89-99.
- Rais, C., El Ghadraoui, L., El Housni, S.** (2017). Adaptation physiologique et biochimique de *Ziziphus lotus* L. en conditions arides. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(5), 1626–1633.
- Rao, D. N.** (1977). Use of plants as indicators and monitor of sulphur dioxide pollution. *Chemical Age of India* 28, 665-672.
- Raskovic, A., Milanovic, I., Pavlovic, N.** (2014). Antioxidant activity of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) essential oil and its hepatoprotective potential. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 14, 225.
- Reid, H.** (2006) Climate Change and Biodiversity in Europe. *Conservation and Society* 4(1): p 84-101, Jan–Mar 2006.
- Ryalls, J. M., Langford, B., Mullinger, N. J., Bromfield, L. M., Nemitz, E., Pfrang, C., & Girling, R. D.** (2022). Anthropogenic air pollutants reduce insect-mediated pollination services. *Environmental Pollution*, 297, 118847.
- Sakhraoui, N., Verloove, F., & Hadeif, A.** (2022). First record of *Ficus microcarpa* L. f. (Moraceae) in Algeria. *Hacquetia*, 21(2), 347-354. <https://doi.org/10.2478/hacq-2022-0008>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Salemkour, N., Benchouk, K., Nouasria, D., Kherief, N., & Belhamra, M. (2013). Effets de la mise en repos sur les caractéristiques floristiques et pastorale des parcours steppiques de la région de Laghouat (Algérie). *Journal Algérien des Régions Arides*.
- Santos, E. C, Maihara, V. A, Genezini, F. A, Saikia, M. (2021) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, Centro do Reator de Pesquisas, CEP 05508-000, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brazil. A study on tree bark samples for atmospheric pollution monitoring. Dans *BJRS BRAZILIAN JOURNAL OF RADIATION SCIENCES* (p. 01-17) [Journal-article].
- Scholz, F., & Reck, S. (1977). Effects of acids on forest trees as measured by titration in vitro, inheritance of buffering capacity in *Picea abies*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 8, 41-45.
- Schwela, D. (2024). Particulate matter pollution and health impacts in six North African cities. *Emerging Results of Development Studies*, 3(1), e350.
- Sghaier, D. B., Duarte, A. C., Bankaji, I., Duarte, R. M., & Freitas, A. C. (2021). *Ficus retusa* L. as possible indicator of air metallic pollution in urban areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 9727-9738.
- Sharma, B., Bhardwaj, S. K., Kaur, L., & Sharma, A. (2017). Evaluation of air pollution tolerance index (APTI) as a tool to monitor pollution and green belt development: A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1637-1643.
- Shingade P, Paspohe B, Dokhe S, Gavali P., (2018). Effect of Pollution on Chlorophyll Content in Plants from Urban Locality. *Indian Journal of Applied Research*, Volume-8, Issue-2.
- Shrestha, S., Baral, B., Dhital, N. B., & Yang, H. H. (2021). Assessing Air Pollution Tolerance of Plant Species in Vegetation Traffic Barriers in Kathmandu Valley, Nepal. *Sustainable Environment Research*, 31, Article No. 3.
- Sillmann, J., Aunan, K., Emberson, L., Büker, P., Van Oort, B., O'Neill, C., & Brisebois, A. (2021). Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environmental Research Letters*, 16(9), 093004.
- Singh A, Agrawal M. (2008). Acid rain and its ecological consequences. *J Environ Biol*. 2008 Jan;29(1):15-24. Article: Sillmann, Jana, Aunan, Kristin, Emberson. (2021). Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environmental Research Letters*. 093004.
- Singh, S. K. and Rao, D. N. (1983). Evaluation of plants for their tolerance to air pollution. In *Proceedings of the Symposium on Air Pollution Control*, November, pp. 218-224.
- Singh, S. K., Rao, D. N., Agrawal, M., Pandey, J., & Naryan, D. (1991). Air pollution tolerance index of plants. *Journal of Environmental Management*, 32(1), 45-55.
- Sivaraman, A. K., Sivaranjini, V., & Anupriya, S. (2024). *Cynodon dactylon* – A review of pharmacological activities. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Research*, 30(8), 138-143.
- Sokhi, R. S., Moussiopoulos, N., Baklanov, A., Bartzis, J., Coll, I., Finardi, S., ... & Kukkonen, J. (2022). Advances in air quality research—current and emerging challenges. *Atmospheric chemistry and physics*, 22(7), 4615-4703.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sonwani, S., Gadi, R.** (2022). Urban greenery for air pollution control: A meta-analysis of current practice, progress, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 42965–42981.
- Sow, A. M.** (2020). Université du québec mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières comme exigence partielle de la maîtrise en sciences appliquées. Université du Québec à Trois-Rivières
- Sripriya, R., & Santhosh, G.** (2022). Impact of air-purifying plants on the reduction of volatile organic compounds in the indoor hot desert climate. *Frontiers in Built Environment*, 7, 803516.
- Starr, F., Starr, K., & Loope, L.** (2003). *Ficus microcarpa* - Indian laurel. United States Geological Survey - Biological Resources Division.
- Stevens CJ, Bell JNB, Brimblecombe P, Clark CM, Dise NB, Fowler D, Lovett GM, Wolseley PA.** (2020). The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation. 2 30;378(2183):20190317:<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9584617/>.
- Takano, A. P. C., Rybak, J., & Veras, M. M.** (2024) Bioindicators and human biomarkers as alternative approaches for cost-effective assessment of air pollution exposure. *Frontiers in Environmental Engineering*, 3, 1346863.
- Teketay, D.** (2000). Facts and experiences on Eucalypts in Ethiopia and elsewhere: Ground for making life informed decisions. *Walia*, 2000(21), 25-46.
- Thorsheim, P.** (2006). Inventing pollution: coal, smoke, and culture in Britain since 1800. *Ohio University Press*.
- Tlili, N., Aimeur, N., Boughediri, L., Tahhar, A., & Chaoui, F.** (2009). Effets de la pollution atmosphérique sur les feuilles et le pollen de *rosa odorata* dans la région de Annaba (Confrontation avec les données de SAMA SAFIA). *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, 20, 22-30.
- Travaglio, M., Yu, Y., Popovic, R., Selley, L., Leal, N. S., & Martins, L. M.** (2021). Links between air pollution and COVID-19 in England. *Environmental pollution*, 268, 115859.
- Tripathi, A. K., & Gautam, M.** (2007). Biochemical parameters of plants as indicators of air pollution. *Journal of environmental biology*, 28(1), 127.
- Unfccc** (2023), Premier rapport biennal actualisé de l'Algérie à la convention cadre des nations unies sur le changement climatiques – Octobre,2023.
- Unfccc** (2023), Premier rapport biennal actualisé de l'Algérie à la convention cadre des nations unies sur le changement climatiques – Octobre,2023
- Unies, N** (2000). Nous, les peuples : le rôle des Nations Unies au XXIe siècle Rapport du Secrétaire général. New York, Etats-Unis.
- Unies, N.** (1973), Rapport de la conférence des nations sur l'environnement ; Stockholm 5-16 Juin 1972.
- Unies, N.** (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. New York, 9.
- Unies, N.** (1998). Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Kyoto, Japon.
- United Nation 'Treaty Collection'**, VOL-2; Chapter XXVII. Environment 2. Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. Vienna, 22 March 1985 [En Ligne], consulté le 18/04/2025.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- United Nation 'Treaty Collection', VOL-2 ; Chapter XXVII. Environment, 2. a). Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Montreal, 16 September 1987[En Ligne], consulté le 18/04/2025.
- United Nations Children's Fund.(2025).<https://knowledge.unicef.org/CEED/resource/state-global-air-report-2024>.
- United Nations Economic Commission for Europe. (1979). Convention on long-range transboundary air pollution.
- Venter, Z. S., Aunan, K., Chowdhury, S., & Lelieveld, J. (2020). COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(32), 18984-18990.
- Verma, A., Singh, S. N. (2006). Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120(1-3), 585-602. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-7>
- Washington, S. H., Goodall, H., & Rosier, P. C. (Eds.). (2006). Echoes from the poisoned well: Global memories of environmental injustice. Lexington Books.
- Wexler, P. (2014). History of toxicology and environmental health: toxicology in antiquity II. Academic Press.
- World Health Organization (2021) WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization.
- Wolverton, B. C., Johnson, A., & Bounds, K. (1989). *Interior landscape plants for indoor air -pollution abatement*. NASA Stennis Space Center.
- World Health Organization (2016). A global Assessment of Exposure and Burden of Disease. *World Health Organization: Geneva, Switzerland*, 360.
- World Health Organization. (2000). Air quality guidelines for Europe. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- World Health Organization. (2014). WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion. World Health Organization.
- World Health Organization. (2021). Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution.
- World Health Organization. (2022). Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment (No. WHO/HEP/ECH/EHD/22.01): Chapter 2: Air Pollution. World Health Organization. –
- Xie, H., Wang, J., Shi, S. (2020). Metabolic responses of plants to abiotic stress and tolerance mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.025>.
- Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R. T., ... & Philips, W. (2017). A review of urban air pollution monitoring and exposure assessment methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 389.
- Y., & Lamb, B. (2022). War impact on air quality in Ukraine. *Sustainability*, 14(21), 13832.
- Yu, T., Wang, W., Ciren, P., & Sun, R. (2018). An assessment of air-quality monitoring station locations based on satellite observations. *International journal of remote sensing*, 39(20), 6463-6478.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Zalakeviciute, R., Mejia, D., Alvarez, H., Bermeo, X., Bonilla-Bedoya, S., Rybarczyk, Zenna, F. G., Taha, L. S., & Shahin, S. M. (2019). Evaluation of some Japanese's garden plant species for its tolerance to air Pollution b. Comparison of different species of the family Grown in different parts of the garden. *Egyptian journal of agricultural Research*, 97(4), 727-743.
- Zhang, T., Yu, L. X., Zheng, P., Li, Y., Rivera, M., Main, D., & Greene, S. L. (2015). Identification of loci associated with drought resistance traits in heterozygous autotetraploid alfalfa (*Medicago sativa* L.) using genome-wide association studies with genotyping by sequencing. *PLoS one*, 10(9), e0138931.
- Zheng, Y., Shen, D., Wu, S., Han, Y., Li, S., Tang, F., Liu, Y. (2018). *Uptake effects*
- Ziadi, L. (2023). Évaluation de l'activité antioxydante et anti-inflammatoire d'une espèce du genre *Linum*. [Mémoire de Master, Université Frère Mentouri Constantine 1].

## Références électroniques

La base de données de 'Organisation Mondiale de la Santé (Observatoire de la Santé Mondiale), consulté de 03.04. 2025 : <https://www.who.int/fr>

(MICLAT) Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire, monographie de Laghouat, consulté le 12/04/2025 sur :

<https://interieur.gov.dz/Monographie/index.php?wil=3>

(EEA) European environment agency. (2025). <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/impact-of-air-pollution-on-mental-health-signal->

(Figure 1) L'impact des pluies acides les feuilles sur :

[https://www.routard.com/photos/costa\\_rica/1457967volcan\\_poas\\_feuilles\\_brulees\\_par\\_les\\_pluies\\_acide.htm](https://www.routard.com/photos/costa_rica/1457967volcan_poas_feuilles_brulees_par_les_pluies_acide.htm)

(Figure 4) *Xanthoria parietin*, lichen épiphytes utilisé pour la bio-indication de la pollution atmosphérique, sur : <https://www.gbif.org/occurrence/4847340938>

(Figure 5) : *Funaria hygrometrica*, une mousse utilisée pour la bio-indication de la pollution atmosphérique, sur : <https://www.gbif.org/occurrence/4519289549>

(Figure 5) Carte de la pollution atmosphérique en NO<sub>2</sub> en 2018 par Figure satellite, sur : <https://www.copernicus.eu/fr/node/8167>

(Figure 6) (Carte de situation géographique de la wilaya de Laghouat sur :

<https://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueLAGHOUAT.html>

(Figure 7) Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Laghouat sur : <https://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2015/01/reseau-hydrographique-LAGHOUAT.html>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Nerium oleander*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/NEOL>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Ziziphus lotus*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/ZILO>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Phoenix dactylifera*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/PHDA4>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Rosmarinus officinalis*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/ROOF>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Peganum harmala*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/PEGAN>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Eucalyptus globulus*, consulté le 04.05.2024 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/EUGL>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Cynodon dactylon*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/CYDA>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Bougainvillea glabra*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/BOGL4>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Ficus microcarpa*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/FIMI2>

USDA, base de données systématique : la classification botanique de *Lonicera japonica*, consulté le 04.05.2025 : <https://plants.sc.egov.usda.gov/plant-profile/LOJA>