



Mémoire de Fin d'Études

Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master 2 Recherche

« Toxicologie Fondamentale et appliquée »

THÈME

*Etude de l'effet de la pollution atmosphérique sur des lichens
Indigènes transplantés dans l'agglomération d'Annaba*

Soutenu le : 02/07/2023

Présenté Par : Melle Farés Nada

Devant le jury composé de :

Dr. ALAYAT Amel

Dr. DJABALI Nacera

Dr. Boumedris Zineddine

MCA Présidente

Prof. Examinatrice

MCA Promoteur

UCBET

UCBET

UCBET

Année universitaire 2022 – 2023

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir aidés à mener bien notre travail de recherche

Je voudrais tout d'abord remercier mon encadrent de mémoire Monsieur Boumedris Zineddine, pour son précieux encadrement, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de ce projet. Sa passion pour la recherche et son expertise ont été d'une grande inspiration et ont grandement enrichi mon travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury Mme Alayat A (MCA à l'université de Chadli Bendjedid – El Tarf) et Mme Djabali N (Professeur à l'université de Chadli Bendjedid – E Tarf) d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes enseignants et mes encadrants au sein de l'Université Chadli Bendjedid El Tarf. Leurs connaissances approfondies, leur engagement et leur enthousiasme ont été des sources d'inspiration et ont contribué à ma formation académique.

Je tiens également à remercier mes parents, mon frère, ma famille et mes amis pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements et leur compréhension tout au long de cette aventure. Leur présence et leur amour ont été une source de motivation et de réconfort précieux.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien et vos encouragements ont été d'une valeur inestimable.

Merci encore à tous ceux qui ont été impliqués dans ce projet. Votre contribution a été inestimable et a largement contribué à la réussite de ce mémoire de Master.

Dédicace

C'est avec une immense gratitude et une profonde émotion que je dédie ce mémoire à vous, mes êtres chers. Votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible et votre présence constante ont été mes plus grandes sources de motivation tout au long de ce parcours académique.

À mes chers parents, vous êtes les piliers de ma vie. Votre dévouement, votre encouragement et vos sacrifices ont été les fondations solides sur lesquelles j'ai pu construire ma réussite. Votre amour incommensurable m'a donné la confiance nécessaire pour poursuivre mes rêves et réaliser mes ambitions. Votre soutien sans faille m'a permis de surmonter les obstacles et de persévérer dans les moments difficiles. Je vous suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi.

À ma chère mère, Tes mots d'encouragement ont toujours été ma force, ton amour inconditionnel ma boussole, tu as toujours été fierté de moi et tu as tout le temps cru en moi et à mes compétences. Tu as consacré ta vie à notre bonheur, sacrifiant tant de choses pour nous voir grandir et réussir. Cette dédicace est un témoignage de ma gratitude éternelle envers toi. Tu es la meilleure des mères, et je suis fier de t'avoir à mes côtés. Je t'aime infiniment.

À mon cher frère, tu as été mon compagnon de route tout au long de ce parcours académique. Tes encouragements, tes conseils avisés et ta présence reconfortante ont été d'une valeur inestimable. Nous avons partagé les hauts et les bas, les joies et les défis, et je suis fière de pouvoir dire que tu es mon frère. Ta confiance en moi m'a poussé à me dépasser et à atteindre mes objectifs. Ta présence a été une source de motivation constante et une inspiration pour aller de l'avant.

Au membre de ma famille qui mon soutenue et on crut on moi, à mes précieuses amies, Rachâ ,Hejer ,Yasmine et Bicho merci d'être toujours là pour moi dans le meilleur comme dans le pire , merci

Nada

Sommaire

المخلص

Abstract	
Résumé	
Introduction générale	11
I. Partie théorique	12
Chapitre 1 : pollution de l'air.....	12
1. Définition	12
2. Les sources de la pollution atmosphérique.....	12
3. Principaux polluants atmosphériques.....	13
a) Monoxyde de carbone CO	14
b) L'oxyde d'azote	14
c) Les particules en suspension	15
d) Dioxyde de soufre SO ₂	16
e) Les composés organiques volatiles COV.....	17
f) L'ozone	18
Chapitre 2 : biosurveillance	20
1. Définition	20
2. Principes de la biosurveillance.....	20
2.1. Approche de la biosurveillance	20
a) La biosurveillance passive	20
b) La biosurveillance active	20
2.2. Concept de la biosurveillance	21
a) La bioindicateur	21
b) Le biomarqueur	21
c) La biointégration	22
d) La bioaccumulation	22
3. Biosurveillance dans les zones urbaines	22
Chapitre 3 : les lichens	24

1. Définition	24
2. Morphologie d'un lichen	25
2.1. Structure lichénique	25
2.2. Diffèrent type de thalle.....	27
3. Reproduction	28
3.1. Reproduction sexuée.....	28
3.2. Reproduction asexuée.....	28
4. Usages des lichens	29
a) Usage médicinal	29
b) Usage alimentaire	29
c) Usage industriel	29
5. Lichens comme bioindicateur	29
II. Partie pratique	31
Chapitre 1 : Matériels et méthodes.....	31
1. Objectifs de l'étude	31
2. Localisation de la zone des prélèvements des échantillons lichéniques	31
3. Présentation de la zone d'étude.....	31
4. Méthodologie d'échantillonnage.....	31
4.1. Technique de dosage de pigment chlorophylliens et des caroténoïdes.....	33
4.2. Technique de dosage de protéines totales.....	33
4.3. Technique de dosage de l'activité Catalase (CAT).....	34
5. Observations sous binoculaire et coupes histologiques selon Ozanda et Clausade 1970.....	34
Chapitre 2 : Résultats.....	35
1. Résultats des coupes histologiques.....	35
1.1. Témoin.....	35
1.2. Elysa	37
1.3. Sidi issa	38
1.4. 8 Mars	40
1.5. Saint cloud	42
2. Résultats des dosages d'échantillons	44

2.1. Résultat du dosage de la chlorophylle	44
2.2. Résultat du dosage des Caroténoïdes	46
2.3. Résultat du dosage des protéines	46
2.4. Résultat du dosage de la catalase	47
Chapitre 3 : Discussion	48
Conclusion	51
Références bibliographiques	52

Listes de figures

Figure 1 : structure d'un lichen en coupe transversale	25
Figure 2 : structure interne d'un lichen	27
Figure 3 : Structures de reproduction sexuée chez les lichens : apothécies (à gauche) , lirelles (au centre) et périthèces (à droite)	28
Figure 4 : structures de reproduction asexuée chez les lichens : soralies (à gauche) et isidies (à droite)	28
Figure 5 : <i>Flavoparmelia caperata</i>	32
Figure 6 : Observation visuelle de nos transplants	35
Figure 7: Observation à la loupe sous binoculaire de nos transplants	35
Figure 8 : observation sous microscope x10 du témoin	36
Figure 9 : observation sous microscope x20du témoin	36
Figure 10 : observation des transplants a l'œil nu zone Elyza.....	37
Figure 11 : observation sous binoculaire zone Elyza.....	37
Figure 12 : observation sous microscope x10 zone Elyza.....	38
Figure 13: observation sous microscope x20zone Elyza.....	38
Figure 14 : observation du transplant a l'œil nu zone de Sidi issa	38
Figure 15 : observation sous binoculaire zone de Sidi issa.....	39
Figure 16 : observation sous microscope x 10 zone de Sidi issa.....	39
Figure 17 : observation sous microscope x 20 zone de Sidi issa.....	40
Figure 18 : observation du transplant a l'œil nu zone 8 Mars	40
Figure 19 : observation sous binoculaire zone du 8 Mars	41
Figure 20 : observation sous microscope x 10 zone du 8 Mars.....	41
Figure 21 : observation sous microscope x 20 zone du 8 Mars.....	42
Figure 22 : observation a l'œil nu zone Saint cloud	42
Figure 23 : observation sous binoculaire zone Saint cloud	43

Figure 24 : observation sous microscope x 10 zone Saint cloud	43
Figure 25 : observation sous microscope x 20 zone Saint cloud	44
Figure26 : Variations spatiales des moyennes du taux de la chlorophylle (a) de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	44
Figure 27 : Variations spatiales des moyennes du taux de la chlorophylle (b) de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	45
Figure 28 : Variations spatiales des moyennes du taux de la Chlorophylle (a+b) de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	45
Figure 29 : variations spatiales des moyennes du taux de la Caroténoïde de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	46
Figure 30 : Variations spatiales des moyennes du taux de la protéine de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	46
Figure 31 : Variations spatiales des moyennes du taux de la catalase de la <i>Flavoparmelia caperata</i>	47

Listes des tableaux

Tableau 1 : principaux types de thalle lichénique (nom, photo, caractéristiques de leur thalle et de leur relation avec le substrat). (Source : J.Astra2021).....	27
---	----

عملي يركز على استخدام الحزازات كمؤشرات لتلوث الهواء، وتحديدًا في تقييم التوتر التأكسدي المرتبط بهذا التلوث. لقد استخدمنا طريقة مراقبة الحياة النباتية باستخدام نقل الحزازات، والتي تتضمن نقل الحزازات إلى المناطق الملوثة لتقييم جودة الهواء.

في دراستي، قمنا بقياس العديد من المعايير المتعلقة بالتوتر التأكسدي، مثل مستويات الكاتالاز، البروتينات، الكلوروفيل، والكاروتينويدات، وأجرينا ملاحظات مورفوسبيولوجية. تم استخدام هذه المعايير لتقييم تأثير التلوث الجوي على الحزازات وقدرتها على تكون مؤشرات موثوقة لجودة الهواء.

أظهرت نتائج عملي أن تلوث الهواء يسبب توتراً تأكسدياً في الحزازات، مما يؤدي إلى تقلبات في مستويات الكاتالاز، البروتينات، الكلوروفيل، والكاروتينويدات. يمكن أن تؤثر هذه التعديلات على صحة ونشاط الحزازات، فضلاً عن قدرتها على تعكس جودة الهواء المحيط بدقة.

باختصار، يسלט عملي الضوء على تأثير تلوث الهواء على التوتر التأكسدي في الحزازات المستخدمة في مراقبة البيئة. تم استخدام قياسات الكاتالاز، البروتينات، الكلوروفيل، والكاروتينويدات، بالإضافة إلى الملاحظات المورفوسبيولوجية، لتقييم هذه التأثيرات. تسهم هذه النتائج في فهم أفضل لمدى موثوقية الحزازات كمؤشرات لجودة الهواء في ظل التوتر التأكسدي الناجم عن تلوث الهواء.

Abstract :

My work focuses on the use of lichens as indicators of air pollution, specifically in assessing the associated oxidative stress. We employed the method of lichen transplant bioindication, which involves transplanting lichens in to polluted areas to evaluate air quality.

In my study, we measured several parameters related to oxidative stress, such as catalase levels, proteins, chlorophyll, carotenoids, and conducted morpho-physiological observations. These parameters were used to assess the effects of air pollution on lichens and their ability to serve as reliable indicators of air quality.

The results of my work demonstrated that air pollution induces oxidative stress in lichens, resulting in fluctuations in catalase levels, proteins, chlorophyll, and carotenoids. These modifications can impact the health and vitality of lichens, as well as their ability to accurately reflect the surrounding air quality.

In summary, my work highlights the effect of air pollution on oxidative stress in lichens used in bioindication. Catalase, protein, chlorophyll, and carotenoid measurements, along with morpho-physiological observations, were employed to assess these effects. These findings contribute to a better understanding of the reliability of lichens as indicators of air quality in the presence of oxidative stress induced by air pollution.

Résumé :

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à la pollution atmosphérique urbaine, et en particulier le stress oxydant engendré par cette dernière. Pour cela nous avons utilisé la méthode de la biosurveillance par transplant lichénique, qui consiste à transplanter des lichens indigènes dans des zones polluées pour évaluer la qualité de l'air ainsi que le stress induit par cette pollution.

De ce fait, après récolte de nos échantillons nous avons mesuré plusieurs paramètres liés au stress oxydant, tels que les niveaux de la catalase, des protéines totales, des pigments de la chlorophylle et des caroténoïdes ainsi que des observations morpho-physiologiques ont été ajoutés à notre protocole de travail.

Les résultats obtenus ont montré que la pollution atmosphérique a induit un stress oxydant chez les lichens, qui se sont traduit par des fluctuations des niveaux de la catalase, des protéines, des chlorophylles et des caroténoïdes. Ces modifications et altérations observées recèlent des propriétés particulières de nos transplants, effectivement les mécanismes de défense enclenchés sont une preuve que les lichens sont d'excellents indicateurs de la qualité de l'air.

Introduction générale

La pollution atmosphérique est un problème majeur dans les milieux urbains, dont les conséquences sont néfastes sur la santé humaine et l'environnement (**Paoli L ,2015**). Les lichens, en tant qu'organismes sensibles aux variations de leur environnement (**Nash III ,2008**), sont utilisés dans la biosurveillance pour évaluer la qualité de l'air (**Nimis, 2013**). Cependant, la pollution atmosphérique peut provoquer un stress oxydant chez les lichens (**Giordani P, 2012**), ce qui affecte leurs santés et leurs capacités à interagir avec leur environnement.

Le stress oxydant est une conséquence directe de l'exposition des organismes vivants aux polluants atmosphériques. Comprendre les mécanismes de stress oxydant chez les lichens transplantés en milieu urbain pollué permettra d'améliorer la fiabilité de leurs utilisations en tant qu'indicateurs de la pollution atmosphérique (**Santamaria, 2012**).

Dans ce contexte notre objectif principal a été d'évaluer le stress oxydant chez les lichens transplantés en milieu urbain pollué. Et cela dans le but de comprendre comment les lichens réagissent face au stress oxydant engendré par la pollution atmosphérique et comment cela peut influencer leur capacité en tant qu'indicateurs de la qualité de l'air en milieu urbain (**Giordani P, 2004**).

La méthodologie de cette recherche comprendra la collecte de données sur le terrain dans des zones urbaines présentant différents niveaux de pollution atmosphérique, ainsi que des analyses en laboratoire pour évaluer le stress oxydant chez les lichens transplantés. Des techniques de caractérisation du stress oxydant, telles que le dosage de la protéine et le catalase, dosage de la chlorophylle et le caroténoïde, seront utilisées.

Nous avons donc subdivisé notre travail en deux parties la première aura comme objectif la mise en évidence des contextes, les objectifs et la justification de la recherche. Et cela en exposant une revue de littérature approfondie sur les lichens, la biosurveillance et la pollution atmosphérique. La deuxième partie aura comme objectif de détailler les méthodes utilisées, les résultats et leurs discussions et les conclusions.

I. Partie Théorique

Chapitre 1 : pollution de l'air

1. Définition

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est une altération de la qualité de l'air qui peut être caractérisée par la mesure de la présence de polluants chimiques, biologiques et/ou physiques dans l'air, ayant des effets néfastes préjudiciables sur la santé humaine, les biens biologiques, climatiques ou sur les matériaux.

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) définit la pollution comme ces termes : « L'introduction directe ou indirecte par l'homme dans l'atmosphère et les espaces clos de substances ayant des conséquences entraînant des effets néfastes, telles que nuisibles à la santé humaine, nuisibles aux ressources biologiques et aux écosystèmes, affectant le changement climatique, endommageant les produits matériels, causant des nuisances olfactives » ; Elle peut être classée selon divers critères: l'origine (primaire, secondaire), la nature (gazeuse, particulaire) ou encore le lieu (environnement extérieur ou intérieur) (**Delphine Praud, 2022**)

Les polluants les plus souvent rencontrés sont le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (dont le benzo(a)pyrène, composé hautement cancérigène), les composés organiques volatils (notamment le benzène), les oxydes d'azote (NO_x), les matières particulaires (PM) etc. Les niveaux les plus élevés de pollution de l'air ambiant sont enregistrés dans les régions de la Méditerranée orientale et de l'Asie du Sud-Est, avec des niveaux annuels moyens dépassant souvent plus de 5 fois les limites fixées par l'OMS (10 µg/m³ pour les PM_{2,5} et 20 µg/m³ pour les PM₁₀). Ce sont ensuite les villes à revenu faible ou intermédiaire d'Afrique et du Pacifique occidental qui sont les plus touchées (**OMS, 2018a**)

2. Les sources de la pollution atmosphérique

Dans notre environnement, nous pouvons identifier plusieurs sources de pollution de l'air, qui peuvent être divisées en deux catégories :

- **Sources naturelles** : Ces sources sont associées à des phénomènes naturels et comprennent :

- **Activités volcaniques** : Les volcans peuvent émettre divers polluants, tels que le dioxyde de soufre (SO₂), les cendres volcaniques et les particules fines.
- **Incendies de forêt** : Les feux de forêt libèrent d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO₂) et de particules dans l'atmosphère
- **Émissions biogéniques** : Certains organismes vivants, comme les plantes et les algues, produisent des composés organiques volatils (COV) qui peuvent réagir avec d'autres polluants atmosphériques et contribuer à la pollution. (**Crutzen, 1990 ; Jacob, 2009 ; Monks, 2015**)
- **Sources anthropiques** : Ces sources sont liées aux activités humaines et peuvent être classées en deux sous-groupes :
 - **Sources fixes ou sources ponctuelles** : Il s'agit d'installations industrielles, de centrales électriques, de raffineries, de cheminées d'usines, etc. Ces sources émettent directement des polluants atmosphériques provenant de la combustion des combustibles fossiles, de l'utilisation de produits chimiques, etc.
 - **Sources mobiles** : Il s'agit principalement du trafic automobile, du trafic aérien, du transport maritime, des machines agricoles, etc. Les véhicules et les engins de transport brûlent des carburants et émettent des polluants tels que les oxydes d'azote (NO_x), les particules fines, le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures. (**Lelieveld, 2015 ; Zhang, 2017 ; Cohen, 2017**)

3. Principaux polluants atmosphériques :

Un polluant, d'origine anthropique ou naturelle, peut se présenter à l'état solide, liquide ou gazeux. Suivant un critère de toxicité, de spécificité de sources et de la pollution générée, les principaux polluants atmosphériques se classent dans deux grandes familles bien distinctes : les polluants primaires (SO₂, PS, NO_x, COV, CO) et les polluants secondaires (O₃). Les polluants primaires sont directement issus des sources de pollution alors que les polluants secondaires résultent des phénomènes de dispersion et de transformation photochimique dans l'environnement. (**Seinfeld, 2016**).

a) Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz sans couleur, inodore, toxique avec une diffusivité très rapide. Il disparaît rapidement dès qu'il s'éloigne de sa source d'émission. Cela tient au fait que le CO a une densité voisine à celle de l'air (**Escourrou, 1996**)

- **Origines** : le monoxyde de carbone provient de la combustion incomplète des combustibles et carburants. « Lors de sa combustion, le carbone est d'abord oxydé en gaz carbonique (CO₂). Si nous ajoutons à cette molécule un nouvel atome de carbone dans certaines conditions de température et de pression, il y aurait une formation de deux molécules de monoxyde de carbone (CO). S'il y a suffisamment d'oxygène en présence, le monoxyde s'oxyderait à nouveau en dioxyde de carbone. (**Schütz Michaël, 1995**)
- **Pollutions générées** : le monoxyde de carbone contribue essentiellement à la formation de l'ozone
- **Effets sur la santé** : le monoxyde de carbone se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. A des taux importants et à des doses répétées, il peut être à l'origine d'intoxication chronique avec céphalées, vertiges, asthénie et vomissements. En cas d'exposition très élevée et prolongée, il peut être mortel ou laisser des séquelles neuropsychiques irréversibles.
- **Effet sur l'environnement** : le monoxyde de carbone intervient en tant que précurseur dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique. (**Schütz Michaël, 1995**)

b) Oxydes d'azote NO_x

L'oxyde nitrique (NO) est un gaz inodore et incolore qui est produit pendant la brûlure à hautes températures du carburant à l'intérieur, par exemple, des voitures et d'autres véhicules routiers, des radiateurs et des cuisinières. Une fois mélangé avec l'air, il se combine rapidement avec de l'oxygène, formant le dioxyde d'azote (NO₂). La plupart du dioxyde d'azote dans l'atmosphère est formé par l'oxydation de l'oxyde nitrique (NO) de cette façon, bien qu'une partie soit émise directement de la source. Il est également présent dans la fumée du tabac. Il s'agit d'un gaz brun rougeâtre, ininflammable, avec une odeur discernable. Dans des concentrations importantes, il est fortement toxique et peut endommager sérieusement les poumons avec un effet retardé. Le dioxyde d'azote est un oxydant fort qui réagit dans le ciel pour former de l'acide nitrique corrosif et des nitrates organiques toxiques. Il joue également un rôle important dans les réactions atmosphériques qui produisent l'ozone au niveau du sol. (**Malbreil Nathalie, 1997**)

- **Origines** : les oxydes d'azote proviennent surtout des véhicules (environ 75%) et des installations de combustion telle que les centrales énergétiques. Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) font l'objet d'une surveillance attentive dans les centres urbains. Nous trouvons des techniques comme l'utilisation de pot catalytique dans les véhicules qui contribue à une diminution de leur émission. Néanmoins, les concentrations dans l'air ne diminuent jamais compte tenu de l'âge et la forte augmentation du trafic automobile.
- **Pollutions générées** : les oxydes d'azote NO_x interviennent dans le processus de la formation d'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent aussi au phénomène des pluies acides.
- **Effets sur la santé** : les oxydes d'azote pénètrent dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Le dioxyde d'azote, par exemple, peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et chez les enfants, à partir d'une dose de 200 µg/m³ (microgrammes par m³ d'air).
- **Effet sur l'environnement** : Les NO_x interviennent dans le processus de la formation de l'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides. Les dépôts azotés issus des émissions d'oxydes d'azote peuvent aggraver les problèmes nutritionnels des peuplements de végétaux sensibles. Les NO_x, en présence de divers autres constituants et du rayonnement solaire énergétique ultraviolet constituent, en tant que précurseurs, une source importante de pollution photochimique et d'ozone troposphérique. (Malbreil Nathalie ,1997)

c) Les particules en suspension

Les particules en suspension sont un mélange complexe de substances organiques et inorganiques présentes dans l'atmosphère dans des phases liquides et solides. Les particules brutes se composent de deux types de particules : les grosses particules qui ont un diamètre plus grand que 2,5 µm et les fines particules qui disposent d'un diamètre inférieur à 2,5 µm. Les grosses particules contiennent habituellement des matériaux provenant de la croûte terrestre et de la poussière des véhicules routiers et des industries. Les particules fines contiennent les aérosols secondairement formés, les particules de combustion et les vapeurs organiques et métalliques recondensées. Le composant acide des particules en suspension dans l'air se présente souvent en tant que fines particules. Une autre distinction qui peut être faite est de classer les particules en suspension en tant que primaires ou secondaires. Les particules en suspension primaires sont celles émises directement dans l'atmosphère, tandis que les particules

en suspension secondaires sont celles constituées par des réactions impliquant d'autres polluants. (Malbreil Nathalie ,1997)

- **Origines** : les particules en suspension constituent un complexe de substances organiques ou minérales. Elles peuvent être d'origine naturelle (volcan) ou anthropique (combustion industrielle ou de chauffage, incinération, véhicules...). Nous distinguons les particules "fines" provenant des fumées des moteurs "diesel" ou de vapeurs industrielles recondensées et les grosses particules provenant des chaussées ou d'effluents industriels (combustion et procédés).
- **Pollutions générées** : Les particules les plus fines peuvent transporter des composés toxiques dans les voies respiratoires (sulfates, métaux lourds, hydrocarbures,). Elles potentialisent ainsi les effets des polluants acides, dioxyde de soufre et acide sulfurique.
- **Effets sur la santé** : Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines, à des concentrations relativement basses, peuvent irriter les voies respiratoires ou altérer la fonction respiratoire surtout chez l'enfant. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes : c'est le cas de certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).
- **Effet sur l'environnement** : Les particules en suspension sont à l'origine de salissure sur les bâtiments. D'autre part, elles ont une influence sur la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. Elles tendent à réduire la visibilité et peuvent provoquer une réduction de la croissance et des nécroses chez les végétaux. (Malbreil Nathalie ,1997)

d) Le dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz sans couleur et ininflammable avec une odeur pénétrante qui irrite les yeux et les voies respiratoires. Il réagit sur la surface d'une variété de particules en suspension solides. Il est soluble dans l'eau et peut être oxydé dans les gouttelettes d'eau portées par le vent. Les sources les plus communes du dioxyde de soufre incluent la combustion des combustibles fossiles, la fonte, la fabrication d'acide sulfurique, la conversion de la pulpe de bois en papier, l'incinération des ordures et la production du soufre élémentaire. Le charbon brûlant est la plus grande source synthétique du dioxyde de soufre représentant environ 50% des émissions globales annuelles, avec la brûlure du pétrole représentant 25-30% en plus. Les volcans sont la source naturelle la plus commune du dioxyde de soufre. (Malbreil Nathalie ,1997)

- **Origines** : le dioxyde de soufre (SO_2) provient essentiellement de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre, du fioul et du charbon. Compte tenu du développement du nucléaire, de l'utilisation des combustibles moins chargés en soufre et des systèmes de dépollution des cheminées d'évacuation des fumées, des économies d'énergie, les concentrations ambiantes ont diminué de plus de 50 % depuis 15 ans.
- **Pollutions générées** : En présence d'humidité, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation des pierres et des matériaux de certaines constructions.
- **Effets sur la santé** : le dioxyde de soufre (SO_2) est un gaz irritant. Le mélange acidoparticulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets broncho-spastiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux et gêne respiratoire) et altérer la fonction respiratoire chez l'enfant (baisse de la capacité respiratoire, excès de toux ou de crise d'asthme).
- **Effet sur l'environnement** : En présence d'humidité, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation des matériaux de certaines constructions. La formation des dépôts acides (pluies acides) peut avoir des effets néfastes sur la végétation et changer les caractéristiques des sols.

Lorsque ces derniers sont déjà très pauvres, ils entraînent des pertes importantes de cations aggravant ainsi les difficultés d'alimentation en magnésium et en calcium des végétaux. (Malbreil Nathalie ,1997)

e) Les composés organiques volatils COV

Les composés organiques volatils (hydrocarbures, solvants...) proviennent notamment des sources mobiles et des procédés industriels tels que le raffinage du pétrole, le dégraissage des métaux, l'application de peintures et de vernis, l'imprimerie, etc. Ils constituent une famille de polluants d'une forte diversité et d'une grande complexité. Ils se différencient des hydrocarbures par le fait qu'ils comportent, en plus des atomes de carbone et d'hydrogène (constituants uniques des hydrocarbures), d'autres atomes divers et variés (chlore, oxygène, soufre, azote...).

- **Origines** : les origines des composés organiques volatils COV sont multiples. Il s'agit d'hydrocarbures (émis par évaporation des bacs de stockage pétroliers, remplissage des réservoirs automobiles...), des composés organiques (provenant des procédés industriels ou de la combustion incomplète des combustibles), des solvants (émis lors

de l'application des peintures, des encres, le nettoyage des surfaces métalliques et des vêtements), de composés organiques émis par l'agriculture et par le milieu naturel.

- **Pollutions générées** : les composés organiques volatils interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse atmosphère.
- **Effets sur la santé** : Les effets des composés organiques volatils sont très divers, ils vont de la simple gêne olfactive à une irritation (aldéhydes), à une diminution de la capacité respiratoire jusqu'aux risques d'effets mutagènes et cancérigènes (benzène et toluène).
- **Effet sur l'environnement** : Les COV au même titre que les NO_x et CO interviennent en tant que précurseurs dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique. (Malbreil Nathalie, 1997)

f) L'ozone

L'ozone (O₃) est la forme triatomique de l'oxygène moléculaire (O₂). C'est un gaz toxique bleuâtre et instable, avec une odeur piquante, trouvé naturellement dans l'atmosphère, en particulier dans la stratosphère, 19 à 30 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre où il forme la couche d'ozone. À ces altitudes, l'ozone filtre les rayons ultraviolets (UV) entrant dans l'atmosphère. Cependant, près du niveau du sol, il peut altérer la fonction des poumons et peut causer des irritations de l'appareil respiratoire. La concentration d'ozone est en relation directe avec l'ensoleillement (UV). Les concentrations sont donc les plus importantes en période estivale (de mai à septembre) et l'après-midi. Pendant la nuit, la production est stoppée et l'ozone produit dans la journée est piégé ou détruit par la végétation

Lorsque nous parlons de l'ozone, il s'agit donc de la pollution photochimique qui est définie comme un ensemble de phénomènes complexes conduisant à la formation d'ozone et d'autres composés oxydants (peroxyde d'hydrogène, aldéhydes, peroxyde acétyl nitré ou PAN) à partir de polluants primaires (appelés précurseurs) en présence d'énergie apportée par le rayonnement Ultra-Violet (UV) solaire. Ces phénomènes ont lieu dans les couches d'air proche du sol et dans la troposphère libre. L'ozone formé à ce niveau est qualifié de "mauvais ozone" en raison de ses effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux.

- **Origines** : L'ozone au niveau du sol est formé indirectement par l'action de la lumière du soleil sur les composés organiques volatils en présence du dioxyde d'azote. Il s'agit donc d'un polluant secondaire. Il n'y a aucune émission synthétique directe de l'ozone à l'atmosphère.

- **Effets sur la santé** : Gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre aisément jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il peut ainsi entraîner des irritations du nez, des yeux et de la gorge, des altérations de la fonction pulmonaire, des essoufflements et des toux et il accroît les crises d'asthme.
- **Effet sur l'environnement** : L'ozone peut perturber l'activité photosynthétique des végétaux, altérer leur résistance, diminuer la productivité des cultures et provoquer des lésions caractéristiques. L'ozone contribue aussi à l'effet de serre et accélère la dégradation des matériaux tels que le caoutchouc (craquelures). (**Malbreil Nathalie, 1997**)

Chapitre 2 : La Biosurveillance

1. Définition

La biosurveillance est définie comme « l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre son évolution ».

Il s'agit d'une évaluation de la pollution à l'aide d'organismes vivants, généralement des plantes. La biosurveillance repose sur l'utilisation d'indicateurs biologiques. Ces organismes sont exposés à la contamination. Ils nous renseignent à quel point l'environnement (atmosphère, eau, sol, etc.) est pollué par leur présence ou leur absence, voire des symptômes d'intoxication. L'indicateur biologique le plus connu est le lichen, mais tous les organismes sont plus ou moins sensibles à la pollution. La biosurveillance peut également s'appuyer sur des bioaccumulateurs, qui renseignent sur les niveaux de substances polluantes. Les lichens, ainsi que les mousses et de nombreux autres organismes végétaux ou animaux comme les vers de terre, sont d'excellents bioaccumulateurs. (Arehn, 2013)

2. Les principes de la biosurveillance

2.1. Les approches de la biosurveillance

- a) **Biosurveillance passive**: également appelées méthodes intégrée ou in situ : Cette méthode est basée sur l'observation d'organismes naturellement présents dans le milieu étudié. Il est principalement utilisé pour observer les effets à long terme, en tenant compte des conditions écologiques et climatiques (Van Haluwyn, 1998).
- b) **La biosurveillance active** : est une méthode basée sur l'introduction dans des sites de recherche d'organismes cultivés dans des conditions contrôlées (par exemple en serre) ou obtenus à partir de lieux contrôlés (par exemple la technique de transplantation de lichens non cultivés) (Leblond *et al*, 2014). Des méthodes de laboratoire dans des conditions entièrement contrôlées en termes de développement et d'exposition sont également possibles. Principalement utilisé pour observer les effets à court terme dans des conditions d'exposition spécifiques (Cuny *et al*, 2008).

La principale limite de la biosurveillance réside dans la nature biologique de l'indicateur, puisqu'elle dépend de la présence de l'organisme étudié en quantité suffisante, de sa sensibilité à d'autres facteurs (biotiques ou abiotiques) ou encore de sa compétitivité par rapport à d'autres organismes ou espèces. Ainsi des facteurs écologiques peuvent avoir un impact suffisant pour conduire à une mauvaise estimation des effets des polluants étudiés (**Cuny, 2012**)

2.2. Les concepts de la biosurveillance

Qu'elle soit passive (prélèvement direct sur le terrain) ou active (matériel biologique transplanté sur site), la biosurveillance peut être réalisée à différentes échelles, elle englobe quatre concepts

a) Le bioindicateur

Un bioindicateur se situe au niveau individuel. Elle se fonde sur l'observation des effets cliniques et visibles des pollutions sur un organisme. Ces effets sont observables au niveau morphologique, tissulaire ou physiologique. Il s'agit par exemple de l'apparition de nécroses foliaires (**Silva et al, 2012**) ou la modification de la croissance racinaire (**Manier et al, 2009**). Un indicateur biologique est un organisme dont la présence, l'absence ou l'abondance reflète la qualité du milieu. Par rapport aux mesures physico-chimiques, les indicateurs biologiques offrent une méthode peu coûteuse et rapide pour évaluer l'impact des ions environnementaux perturbateurs sur les écosystèmes. De nombreux taxons ont été utilisés comme indicateurs biologiques, couvrant la plupart des milieux terrestres et aquatiques. L'utilité d'un indicateur biologique dépend de la précision des informations environnementales qu'il fournit. Les indicateurs biologiques les plus couramment utilisés semblent avoir idéalement les caractéristiques suivantes :

- Apporter une réponse continue à diverses variables, propriétés et intensités de pression
- Largement distribué mais pas très mobile pour s'adapter aux conditions locales
- Mesure économique des identifiants.

b) Le biomarqueur

C'est un changement observable mesurable au niveau moléculaire cellulaire, physiologique et biochimique, il révèle une exposition passée une personne possède au moins un produit chimique caractéristique d'un polluant (**Lagadic et al ,1997**)

Les biomarqueurs caractérisent les effets précoces, invisibles et spécifiques du stress au niveau individuel. Les derniers concepts dans le domaine de la biosurveillance végétal sont encore

largement en développement, l'utilisation de biomarqueurs basés par exemple sur la fluorescence de la chlorophylle, l'activité photosynthétique (Catalyud & Barreno, 2004) (Crous *et al*, 2006), les dosages enzymatiques (Rai & Agrawal, 2008), l'intégrité membranaire ou le suivi de la génotoxicité (Rzepka *et al*, 2011 ; Misik *et al*, 2011)

c) **La biointégration**

Permet d'évaluer les effets à long terme sur les communautés par l'étude de la densité et de la diversité spécifique de populations au sein d'un écosystème. Les organismes sentinelles utilisés sont généralement des végétaux. (Thimonier *et al* 1994 ; Takahashi & Miyajima 2010)

d) **La bioaccumulation**

La bioaccumulation fait référence à l'accumulation de polluants dans les tissus végétaux ou fongiques, qui sont ensuite utilisés comme matrice pour le dosage de divers polluants. Ce phénomène d'accumulation en surface et/ou à l'intérieur intègre des paramètres du milieu environnemental (disponibilité environnementale des polluants) et des composantes physiologiques et métaboliques de l'organisme (transplantation). Dans ce cas, les concentrations tissulaires reflètent l'imprégnation du milieu et correspondent à la fraction biodisponible qui reste finalement dans l'organisme. Ces grandeurs ne sont donc pas directement des grandeurs ambiantes. C'est une méthode largement utilisée aujourd'hui pour étudier l'imprégnation des polluants dans l'environnement et suivre leur évolution temporelle et spatiale. (Larsen *et al*, 2007 ; Cloquet *et al*, 2009 ; Gerdol *et al*, 2014)

3. Biosurveillance dans les zones urbaines avec des lichens

L'idée d'observer les effets de la pollution atmosphérique sur le compartiment végétal remonte à plusieurs siècles, avec la description de dégâts foliaires en 1661 par J. Evelyn, suite à la contamination de l'air par la combustion du charbon (Treshow & Bell, 2002). Mais le véritable concept de la biosurveillance végétale et fongique de la qualité de l'air date de la fin du XIX^e siècle où Nylander propose d'utiliser les lichens comme « hygiomètres » de la qualité de l'air, après avoir constaté la progressive disparition des colonies à l'approche des villes, comme à Paris (Nylander, 1866). Depuis, la biosurveillance est employée pour répondre à différents objectifs, que ce soit l'analyse des distributions spatiales et temporelles des impacts des polluants ou l'identification et le suivi de sources ponctuelles de contamination. Elle est également de plus en plus intégrée aux méthodologies d'évaluations des risques sanitaires et

écologiques et constitue un outil d'information du grand public et d'aide à la décision dans les autorités publiques (Cuny, 2012).

Les méthodes physico-chimiques de surveillance de la qualité des milieux mesurent les concentrations de composants présents dans l'environnement, permettant par la suite leur comparaison à des valeurs réglementaires. Cependant, ces techniques n'apportent pas d'information directe sur les effets des polluants sur les organismes. Quelles que soient les évolutions technologiques des systèmes de métrologie, la biosurveillance (basée sur des modèles fongiques ou végétaux) demeurera toujours la seule approche capable d'évaluer des effets biologiques d'une altération de l'environnement (Van Haluwyn *et al*, 2011). La biosurveillance et ses différents concepts ont été formalisés par Garrec & Van Haluwyn 2002. Ces approches consistent à observer et mesurer de façon globale la réponse des organismes aux contaminants et intègre les effets du mélange des composés présents dans l'environnement, mais aussi les caractéristiques écologiques et climatiques du territoire (Van Haluwyn, 1998).

Les environnements artificiels tels que les villes ou les zones industrielles sont des cibles de choix pour la biosurveillance des lichens. Bien que moins fréquents qu'en forêt, les lichens se retrouvent sur les arbres urbains pour évaluer la qualité de l'air dans ces conditions. Quoique leur sensibilité à la pollution atmosphérique limite leur développement, Les lichens sont utilisés depuis des décennies dans la recherche scientifique sur la bioaccumulation pour mesurer les concentrations de métaux (plomb, cuivre, zinc) à proximité de sources locales (incinérateurs de déchets, usines, mines). Dans les cas où la présence spontanée des lichens ne suffit pas à réaliser toutes ces mesures, des expériences de transplantation (biosurveillance active) ont également été réalisées. Les observations linéaires loin de la source montrent ses effets locaux, la teneur en métal diminuant fortement avec la distance (Munzi *et al*, 2016 ; Adamo *et al*, 2015)

Chapitre 3 : les lichens

1. Définition

Un lichen est un végétale inférieure formé par l'union symbiotique d'un partenaire fongique (champignon) et d'un organisme photosynthétique (photobionte) (**Raven *et al*, 2003**). Le lichen pousse sur les murs, les roches, les arbres, etc. Il pousse rapidement et vit longtemps, il se met dans un état de dormance lorsqu'il n'a pas assez d'eau et recommence à pousser lorsqu'il a suffisamment d'eau. Le lichen peut survivre à des conditions extrêmes de chaleur et de froid, mais pas aux vapeurs ni la fumée car ils n'ont pas de stomates ou de cuticules pour réguler les échanges d'air, de sorte que ces organismes peuvent s'intégrer au fil du temps jusqu'aux effets de la pollution de l'air.

Les lichens sont considérés comme le résultat d'une association symbiotique d'un champignon et d'une algue. Plus précisément le terme "algues" indique soit une Cyanobacteriae ou un Chlorophyceae, le champignon est habituellement un ascomycète, mais en de rares occasions, il peut être soit un Basidiomycètes ou un Phycomycètes.

Dans cette association, l'algue est la partie qui s'occupe de la formation des éléments nutritifs, étant donné qu'il contient de la chlorophylle, tandis que le champignon fournit à l'algue de l'eau et les minéraux. (**Grube, 2015**)

➤ Photobios

Du grec photo = lumière, bios = vie, également connu sous le nom de phycosymbionte.

Les photobiontes peut être une algue verte, une cyanobactérie ou les deux. Les cyanobactéries et les algues fixent l'azote et le carbone, ce dernier est fourni grâce à la photosynthèse (**Deruelle et Lallemand, 1983**).

➤ mycobios

Du grec, myco = champignon ; bios = vie, aussi appelé mycosymbionte.

Presque tous les champignons de lichen appartiennent aux Ascomycètes ou plus de basidiomycètes supérieurs (**Ozenda, 2000**), Les champignons occupe généralement environ 90% du thalle et ont des fonctions de protection et de drainage. Ils ont la capacité de stocker l'eau dans la membrane et de la transférer vers algues (**Gonjion, 2004**).

➤ Relation nutritionnelle

La symbiose des lichens repose sur la complémentarité métabolique entre les algues autotrophes et les champignons hétérotrophes. Les algues synthétisent leurs propres composés organiques, dont certains sont fournis au champignon sous forme de glucides solubles. En retour, les champignons récupèrent l'eau sous forme liquide (pluie, brouillard...) ou gazeuse (air ambiant). Cette eau apporte les sels minéraux (macro et micronutriments) et les vitamines nécessaires à la croissance photobiologique. La nutrition azotée est apportée par différentes sources selon la nature des partenaires algaux. Chez les cyanobactéries, les photobiontes sont capables de fixer l'azote atmosphérique, répondant ainsi à la demande en azote de la communauté. En revanche, les lichens verts dépendent de leur environnement pour les composés azotés. (Kraner ,2019)

2. Morphologie d'un lichen

2.1. Structure lichénique

La structure lichénique est constituée de trois zones horizontales (Figure 1) :
(Rikkinen J, 2017) (Nash III *et al* ,2008) (Ahmadjian *et al* ,2001)

- **Zone cortex supérieur**, formé par un réseau très serré d'hyphes fongiques et contenant les pigments lichéniques
- **Zone médullaire**, formée par un réseau d'hyphes moins dense et abritant les cellules algales
- **Zone cortex inférieur**, constitué d'un réseau serré d'hyphes et pouvant dans certains cas donner naissance à des rhizines, assurant l'ancrage du lichen à son substrat

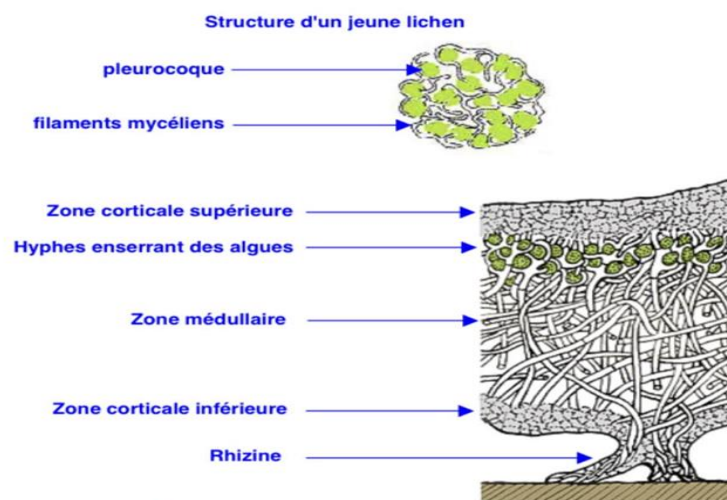


Figure 1 : Structure d'un lichen en coupe transversale (Masson, 2014)

- **Organe porté par le thalle** : (figure 2) (Lange *et al*, 2005 ; Honegger, 2008)
- **Soralia** : Ce sont des organes poudreux ou granuleux constitués d'algues et de filaments mycéliens, drainés par les déchirures de la masse algale. Leur couleur est généralement différente de celle du champignon. Leur transport par le vent ou les insectes permet à l'espèce de se propager sur de longues distances
 - **Isidies** : Ce sont des organes en forme de petits bourgeons composés d'algues et de mycélium. Ils sont généralement de la même couleur que le champignon car ils sont recouverts de cortex. Ces petites excroissances peuvent être facilement détachées et propagées sur le substrat voisin.
 - **Apothécies** : Ce sont des organes mycéliens en forme de coupe qui existent à la surface des bactéries et ont une fonction reproductrice
 - **Périthèces** : Il s'agit des organes mycéliens en forme d'outre de dépressions de peau de vin incrustés dans le thalle et qui présentent la même fonction de reproduction que les asques
 - **Cil** : Organe filiforme disposé sur les bords du thalle dont la fonction est d'augmenter la surface du lichen
 - **Rhizine** : Organe qui permet la fixation du thalle au substrat
 - **Poil** : Organe très fin (en principe visible à la loupe) correspondant à un long prolongement d'un filament mycélien du cortex, à peine visible à l'œil nu.
 - **Céphalodies** : Présence dans certains lichens à algues vertes de cyanobactéries qui constituent des excroissances à la surface du thalle.
 - **Fibrille** : Ramification filamenteuse pouvant atteindre 1 cm de long et de même couleur que le thalle.
 - **Papille** : Présence entre les fibrilles du genre *Usnea* de petites protubérances.
 - **Cyphelle** : Présence sur le cortex inférieur de dépression à contour arrondi où la médulle est à nue. Les pseudocyphelles ont un contour plus flou.
 - **Veines** : Présence à la face inférieure d'un thalle, de saillies allongées disposées plus ou moins en réseau et portant parfois des rhizines ou un duvet dense appelé tomentu

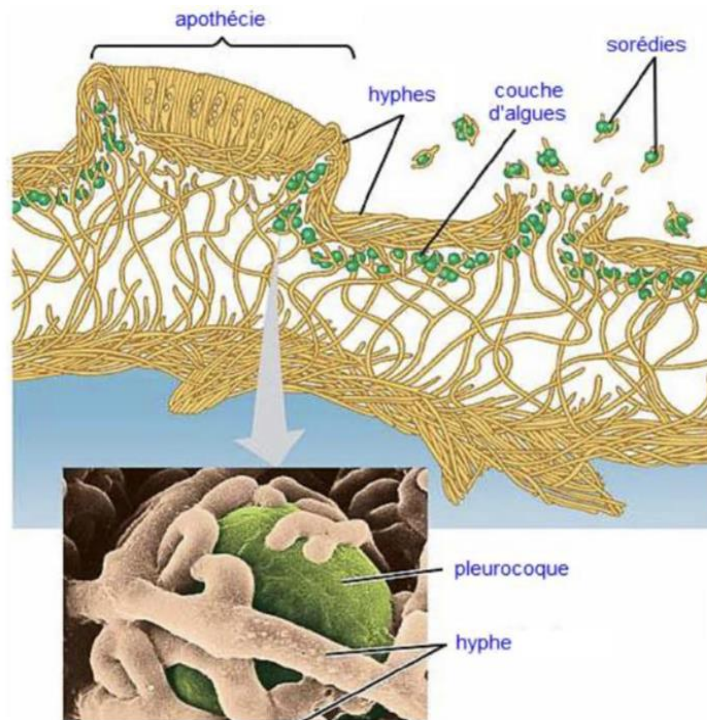


Figure 2 : Structure interne d'un lichen (Masson, 2014)

2.2. Différent type de lichen :

Les lichens sont classés selon la nature du substrat on peut les classer comme suit: (tableau 1)

<i>Xanthoria parietina</i>	<i>Usnea florida</i>	<i>Lecanora concolor</i>	<i>Bagliettoa cazzae</i>	<i>Lethargium cristatum</i>	<i>Squamaria cartilaginea</i>	<i>Cladonia polydactyla</i>	<i>Lepraria membranacea</i>
Thalle en forme de feuille (foliacé) Se détache facilement du substrat	Thalle fruticuleux plus ou moins ramifié et pendante Surface de contact réduite avec le substrat	Thalle en forme de croûte (crustacé) Ne peut être détaché qu'à l'aide d'un marteau et d'un burin	Thalle en forme de croûte (crustacé) Ne peut être détaché qu'à l'aide d'un marteau et d'un burin	Thalle solide, noir et cassant à l'état sec Deviens gélatineux sous l'action de la pluie	Thalle squamuleux. Formé de petites écailles (ou squamules) imbriquées comme les tuiles d'un toit	Complexe : - thalle primaire très adhérent au substrat - thalle secondaire dressé (ou podétion) en forme de trompette ou de tiges	Thalle lépreux, à l'aspect farineux
Fixé sur les écorces des arbres isolés riches en poussières	Surtout sur troncs et branches des feuillus en forêts humides ou sur arbres isolés	Encroûtant, adhère aux rochers siliceux d'altitude	Encroûtant, fréquent sur parois calcaires ensoleillées du midi	Fixé sur des rochers calcaires	Recherche les rochers ou les sols calcaires. Commun dans le midi.	Sur bois pourri, à la base des troncs moussus, recherche l'humidité et la lumière	Sur escarpements rocheux siliceux ombragés et en atmosphère humide, parfois sur sol ou mousse

Tableau 1 : Principaux types de thalle lichénique (nom, photo, caractéristiques de leur thalle et de leur relation avec le substrat). (Asta, 2019)

3. Reproduction des lichens

3.1. Reproduction sexuée

La reproduction sexuée implique des partenaires fongiques uniquement par la production de spores méiotiques (Milen et Lebel, 2000). Après épandage sur un substrat adapté, les spores germent pour former des hyphes et piéger des cellules d'algues compatibles. Le plus souvent, la reproduction sexuée implique un asque, une structure en forme de corne présente à la surface de la bactérie. L'aspect général des asques et la morphologie des spores sont des critères très utiles. D'autres structures moins courantes (calice, asque, etc.) peuvent également être impliquées (Ozenda, 2006).



Figure 3 : Structures de reproduction sexuée chez les lichens : apothécies (à gauche), lirelles (au centre) et périthèces (à droite) (Agnan, 2021)

3.2. Reproduction asexuée

Le deuxième mode de reproduction est la reproduction asexuée qui fait intervenir deux structures spécialisées : la soralie (amas poudreux libérant des sorédies) et les isidies (produit des frondes). Les sorédies et les isidies sont constituées de deux partenaires (mycélium et gonidies). Ces fragments de lichen se déplacent avec le vent et dans des conditions favorables peuvent coloniser de nouveaux milieux. (Raven *et al* 2003, Serusiaux *et al*, 2004).



Figure 4 : Structures de reproduction asexuée chez les lichens : soralies (à gauche) et isidies (à droite) (Agnan, 2021)

4. Usage des lichens

Les lichens omniprésents ont suscité un grand intérêt. Bien que leur métabolisme est faible, ils jouent un rôle important dans la nature, ils ont été utilisé dans de nombreux domaines depuis l'Antiquité (**Ozenda, 2000**)

a) Usage médicinal

Le principal intérêt médical des lichens semble être la possibilité d'extraction antibiotique.

- *Usnea* est utilisé pour l'extraction de l'acide usnique qui est actif contre une vingtaine de bactéries.
- *Ramalina reticulata* est utilisé pour obtenir une substance antibactérienne, elle est active contre plusieurs bactéries (**Ozenda ,2000**).

b) Usage alimentaire

Certains lichens contiennent des macromolécules de lichénine qui se décomposent en glucose lors de la digestion, ils peuvent être utilisés comme aliments pour animaux :

- *Cladonia rangiferina* ; qui fournit réellement la base de la nourriture du renne.
- *Cetraria islandica* ; utilisé pour l'alimentation des porcs, des chevaux et des vaches dans les pays nordiques (**Ozenda et Clauzade ,1970**)

c) Usage industriel

- Extraction industrielle de produits de parfumerie.
- Production manuelle de matières colorantes.
- le mucilage
- Glucose et alcool (**Ozenda, 2000**)

5. Lichens comme bioindicateur :

Les lichens n'ont pas de système de contrôle d'accès, Il n'y a pas de pores pour contrôler la communication avec l'atmosphère. De même, ils n'ont pas de structures leur permettant de limiter les effets de la pollution atmosphère (**Deruelle, 1984**).

Parce qu'ils absorbent l'humidité de l'air, les lichens concentrent les substances les contaminants qui s'y trouvent, comme les métaux lourds, le plomb, le fluor ou le dioxyde de soufre. Ils sont plus ou moins sensibles à la pollution de l'air, Cela fait de ces organismes d'excellents "indicateurs biologiques" (**Bourdial, 2000**).

De plus, leur longévité, leur activité métabolique continue, leur dépendance à l'environnement apport atmosphérique et sa croissance lente, les lichens sont très sensibles aux changements de composition de l'air et donc à la pollution atmosphérique.

Pour la même raison, ils offrent la possibilité de surveiller la contamination de la pollution sur une grande période. Les lichens intègre principalement les données globales relatives à la charge de l'atmosphère en effluents acides (**Gonjion, 2004**).

II. Partie pratique

Chapitre 1 : Matériels et méthodes

1. Objectifs de l'étude

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude des effets de la pollution atmosphérique sur une espèce lichénique (*Flavoparmelia caperata*) bioindicateur de la qualité de l'air, et cela par le dosage des différents biomarqueurs du stress (chlorophylle, caroténoïdes, protéines, catalase)

2. Localisation de la zone des prélèvements des échantillons lichéniques

Le choix de notre station témoin et des prélèvements des transplants où se développent naturellement notre espèce s'est porté sur le parc national d'El Kala « PNEK » faisant partis des sites RAMSAR et plus précisément au niveau la forêt de Bougous zone non polluée abritant une espèce foliacée *Lobaria pulmonaria* indicatrice de continuité forestière (Slimani *et al*, 2013).

3. Présentation de la zone d'étude

➤ Localisation géographique d'Annaba

La wilaya d'Annaba est située à l'Est de l'Algérie, entre les latitudes 36°53'59" Nord et les longitudes 7°46'00" Est. Elle est bordée au Nord par la mer méditerranée, à l'Est par la wilaya d'El Tarf, au Sud par la wilaya de Guelma et Ouest par la wilaya de Skikda. Elle couvre une superficie de 1411, 98 km².

4. Méthodologie d'échantillonnage

Pour le prélèvement de nos échantillons, nous avons choisi un site à priori sain et qui n'est pas sous l'effet de pollutions anthropiques, la forêt de Bougous incluse dans le parc national d'El Kala et pour plus d'assurance nous les avons prélevés sur des arbres abritant aussi l'espèce *Lobaria Pulmonaria* dont la présence reflète une absence totale de pollution. (Lacoux et Angler, 2004 ; Signoret, 2001)

➤ Méthode de transplantation



Royaume: Champignons
Division: *Ascomycota*
Classe: *Lécanoromycètes*
Ordre: *Lecanorales*
Famille: *Parmeliaceae*
Genre: *Flavoparmelia*
Espèce: *Flavoparmelia caperata*

Figure 5 : *Flavoparmelia caperata*

La technique de « transplants de lichens » mise au point par **Brodo (1961)** consiste à prélever des échantillons dans une station de référence non contaminée et à les installer dans le site à étudier. Il est important que les lichens subissent le moins de perturbations possibles au cours du prélèvement et, pour cette raison, on prélève généralement le lichen avec son support (fragment d'écorce ou branche).

Pour notre cas, nous avons choisi de transplanter des branches recouvertes de thalles que nous avons fixé à l'aide d'une ficelle à une hauteur de 1.5 mètre du sol sur divers supports, la transplantation a eu lieu le 04 /01/2023 au niveau de cinq zones dans une durée de 02 mois.

Nous avons réparti nos sites où les transplants ont été placés, en fonction de la concentration de la pollution atmosphérique dans la région d'Annaba et cela en nous référant à une étude antérieure dont le but était de cartographier la pollution atmosphérique de l'agglomération d'Annaba.

- Zone 1 : Elysa
- Zone 2 : Sidi Aissa
- Zone 3 : 8 mars
- Zone 4 : Saint Cloud
- Zone 5 : Bougous (témoin)

4.1. Technique de dosage de pigment chlorophylliens et des caroténoïdes

Nous avons utilisé pour l'extraction de la chlorophylle la méthode établie par (Arnon, 1949). Les échantillons de feuilles (0,5 g) ont été broyés dans 10 mL d'acétone à 85 %. Les débris cellulaires ont ensuite été éliminés après une centrifugation de 3000 rpm pendant 10 min et le surnageant a été récupéré. L'absorbance des échantillons a été déterminée à 645, 663 et 470 nm au spectrophotomètre UV-visible, modèle BioMate 3. Les teneurs en pigments ont été calculées en $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ selon les équations suivantes (Lichtenthaler et Wellburn, 1983) :

chlorophylle a :	$\text{Chl a} = 12,21 \text{ DO}_{663} - 2,81 \text{ DO}_{645}$
chlorophylle b :	$\text{Chl b} = 20,13 \text{ DO}_{645} - 5,03 \text{ DO}_{663}$
chlorophylles totales :	$\text{Chla+b} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$
caroténoïdes totaux (xanthophylles + β -carotènes) :	$\text{Car} = (1000 \text{ DO}_{470} - 3,27 \text{ Chl a} - 104 \text{ Chl b}) / 229$

➤ Préparation de l'extrait enzymatique

La méthode adoptée afin d'obtenir l'extrait enzymatique du végétal est celle de (Loggini *et al*,1999).

Après 02 mois nos transplants et les échantillons témoins ont été récoltés et broyés à froid à l'aide d'un mortier dans tampon phosphate (5ml NaK, pH=7,8) à raison de 1ml du tampon pour 1g de matière fraîche. L'homogénat est ensuite filtré à l'aide d'une toile adéquate avant de procéder à une centrifugation à froid à 12000xg pendant 20 mn (centrifugeuse sigma 3-16K). Le surnageant obtenu sera utilisé comme extrait pour la détermination des différents extraits enzymatiques.

4.2. Technique de dosage de protéines totales

Les protéines ont été quantifiées selon la méthode de (Bradford, 1976), utilisant le Bleu Brillant de Coomassie (G 250, Merck) comme réactif et l'albumine sérum de bœuf (BSA, Sigma) comme protéine standard.

Pour un volume de 3ml, le mélange réactionnel contient : 200 μl d'extrait d'enzymatique brut et 2 ml du réactif Bleu Brillant de Coomassie. Les absorbances sont lues à une longueur d'onde de 595 nm.

4.3. Technique de dosage de l'activité Catalase (CAT)

L'activité de la catalase (CAT) est réalisée suivant la méthode de (Cakmak al Horst, 1991). La décroissance de l'absorbance est enregistrée pendant trois minutes par un spectrophotomètre (JENWAY 63000) pour une longueur d'onde de 240 nm et un coefficient d'extinction molaire $\varepsilon = 39400 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Pour un volume final de 3ml, le mélange réactionnel contient : 100 μl d'extrait d'enzymatique brut, 50 μl de peroxyde $\text{H}_2 \text{O}_2$ à 0,3% et 2850 μl du tampon phosphate (50Mm, Ph=7,2). L'étalonnage de l'appareil se fait en l'absence de l'extrait d'enzymatique. La réaction est déclenchée par l'addition d'eau oxygénée. L'activité catalase est exprimée en nmol /min /mg de protéine.

- Quantification des mesures spectrophotométriques :

La formule suivante est utilisée dans la quantification des différentes mesures Spectrophotométriques suite aux dosages enzymatiques de l'APX et CAT (Servais, 2004).

$$Act. = \frac{\Delta A \cdot V_t}{\varepsilon \cdot \Delta t \cdot V_e \cdot p}$$

Act: Activité enzymatique en nmole/min/mg de Protéines.

ε : Coefficient d'extinction linéique molaire en M.

ΔA : Différence moyenne de l'absorbance.

V_t : Volume total du mélange réactionnel en ml.

V_e : Volume de l'extrait enzymatique en ml.

L : Largeur de la cuve de mesure en cm.

P : Teneur en protéine en mg/g.

T : Temps de lecture.

- **L'étude statistique :**

On a effectué trois répétitions dans chaque concentration pour qu'on puisse calculer l'écart type.

5. Observations sous binoculaire et coupes histologiques selon Ozanda et Clausade 1970

L'étude morphologique a été faite par observation des différentes parties du thalle sous la loupe binoculaire, par la suite des coupes histologiques très fines des thalles ont été observées sous microscope à grossissement.

Chapitre 2 : Résultats et interprétation

1. Résultats des coupes histologiques

1.1. Témoin



Figure 6 : Observation visuelle de nos transplants (Fares N, 2023)

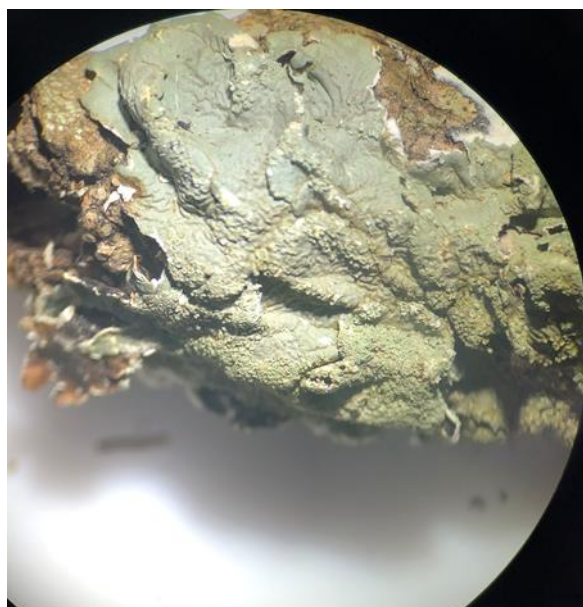
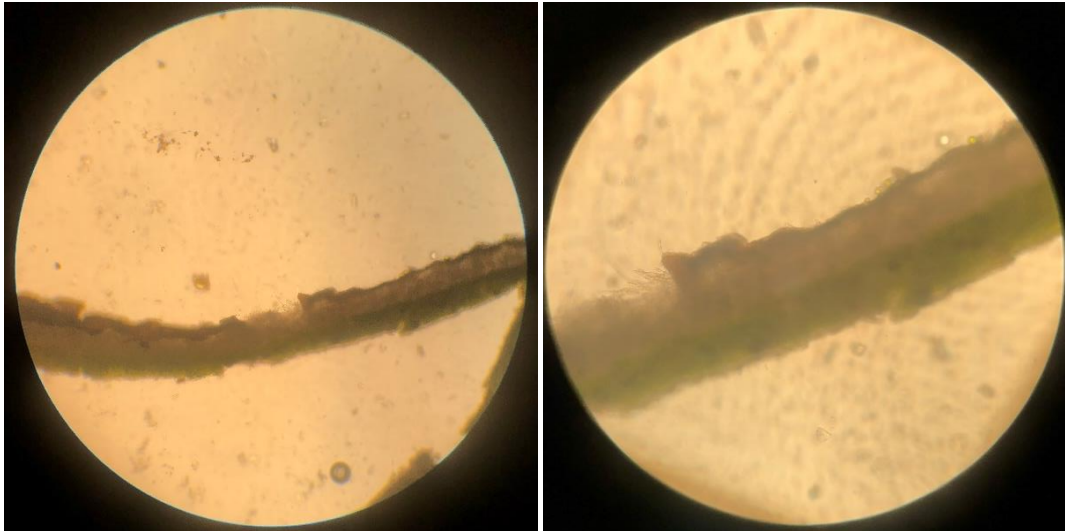


Figure 7: Observation à la loupe de nos transplants (Fares N, 2023)

Le thalle foliacé est généralement de grande taille, vert-jaunâtre (coloration naturel), facile à décrocher de son support et son centre tend à se détacher naturellement avec le temps. La face supérieure est plus ou moins irrégulièrement ridée. La face inférieure est noire sauf au niveau des bords des lobes où elle est bruneclaire sur quelques millimètres.



**Figure 8: Observation sous microscope x10 Figure 9 : Observation sous microscope x 20
(Fares N, 2023)**

Les figures 8 et 9 représente les observations sous microscope a grossissent x10 et de la coupe histologique de nos échantillons de lichens témoins, nous avons pu observer différentes structures distinctes. En périphérie, nous avons observé des hyphes incolores du champignon formant un réseau dense de filaments entrelacés, constituant ainsi une couche protectrice connue sous le nom de zone corticale.

En progressant vers l'intérieur de la coupe, nous avons pu observer des hyphes non enchevêtrés, entourant de manière sporadique les cellules verdâtres de l'algue. Juste en dessous de cette couche, se trouve la zone médullaire, constituée exclusivement d'un tissu d'hyphes.

1.2. Elysa

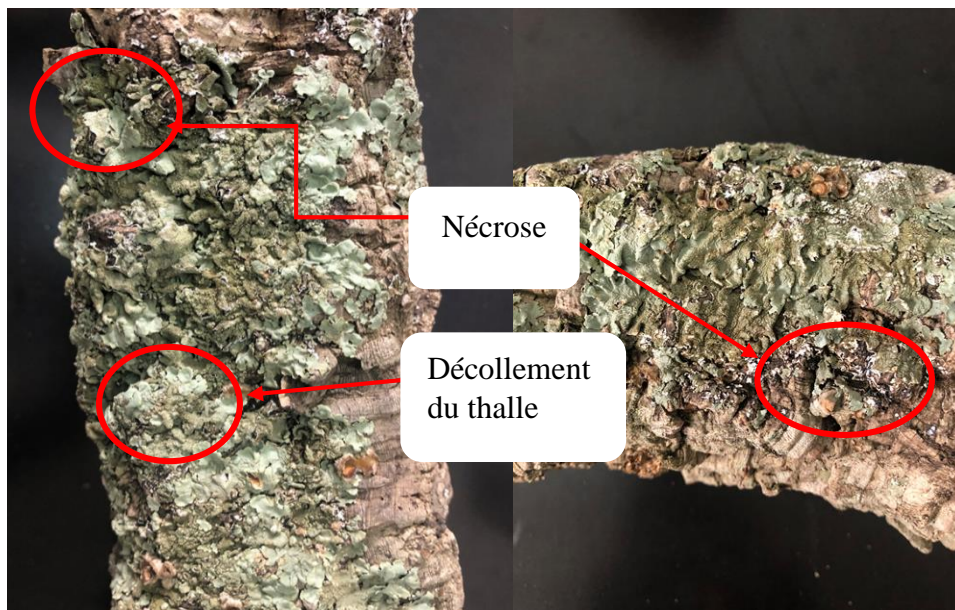


Figure10 : Observation des transplants a l'œil nu (Fares N, 2023)



Figure 11 : Observation sous binoculaire (Fares N, 2023)

Les figures 10 et 11 représentent respectivement l'observation de nos transplants à l'œil nu sur support et à travers une loupe binoculaire, où on peut observer : un décollement des thalles et des chloroses entraînant un brunissement du thalle.

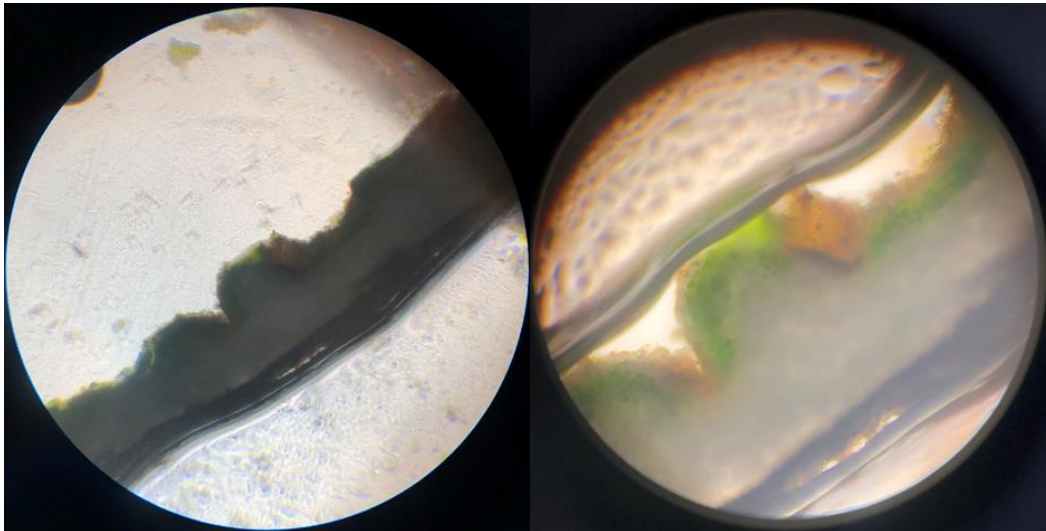


Figure 12: Observation sous microscope x10 Figure 13: Observation sous microscope x20
(Fares N, 2023)

Les figures 12 et 13 représentent une coupe histologique de nos transplants aux grossissements x10 et x20, où on observe : une absence des rhizines, et un brunissement des gonidies.

1.3. Sidi issa

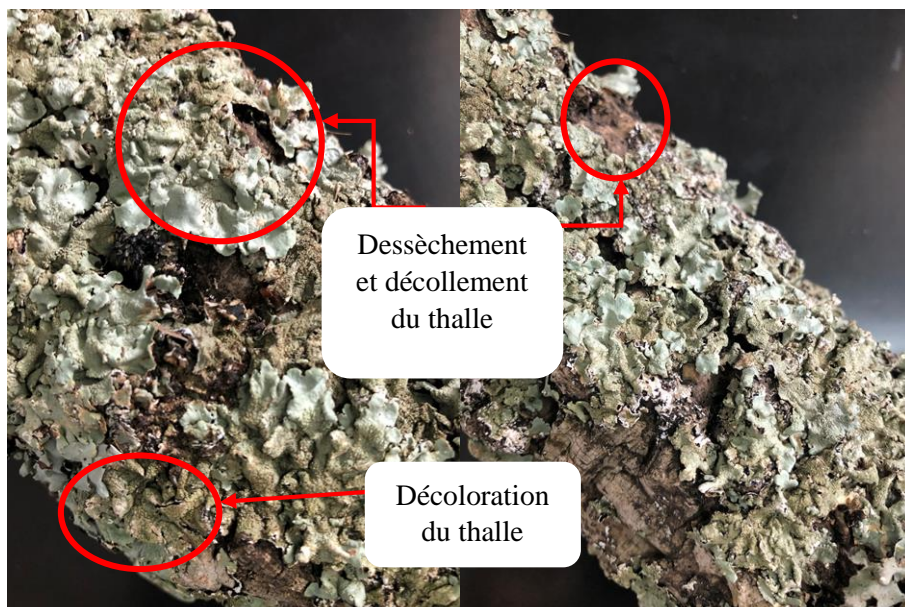


Figure 14: Observation du transplant a l'œil nu (Fares N, 2023)

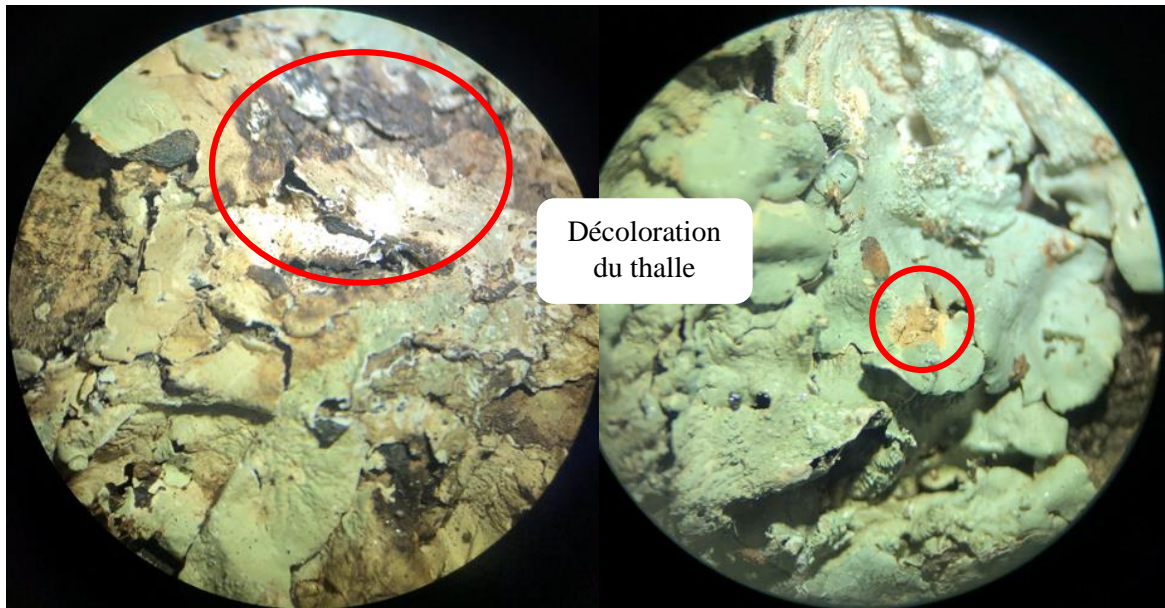


Figure 15 : Observation sous binoculaire (Fares N, 2023)

Les figures 14 et 15 représentent nos transplants à travers une loupe binoculaire et à l'œil nu sur support, où on peut observer : un décollement des thalles et une chlorose entraînant la perte de la couleur verdâtre.

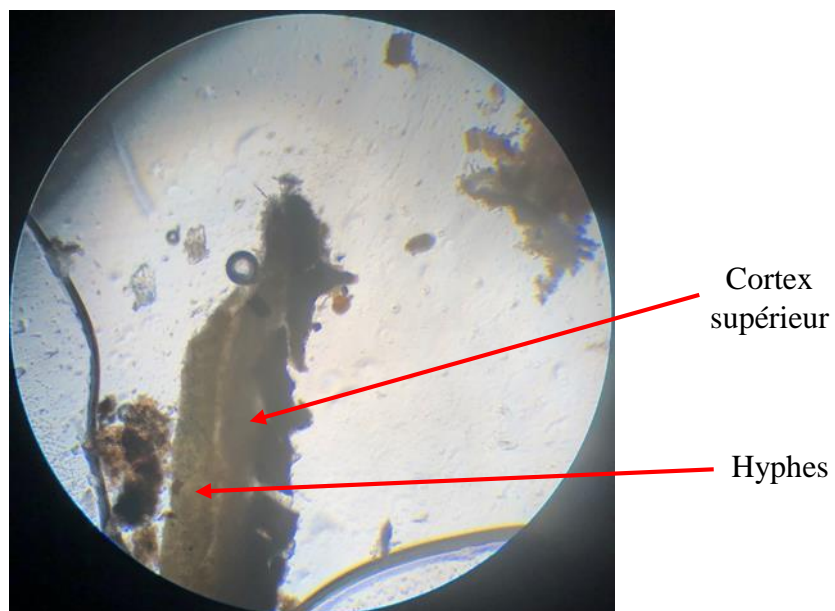


Figure 16 : Observation sous microscope x 10 (Fares N, 2023)

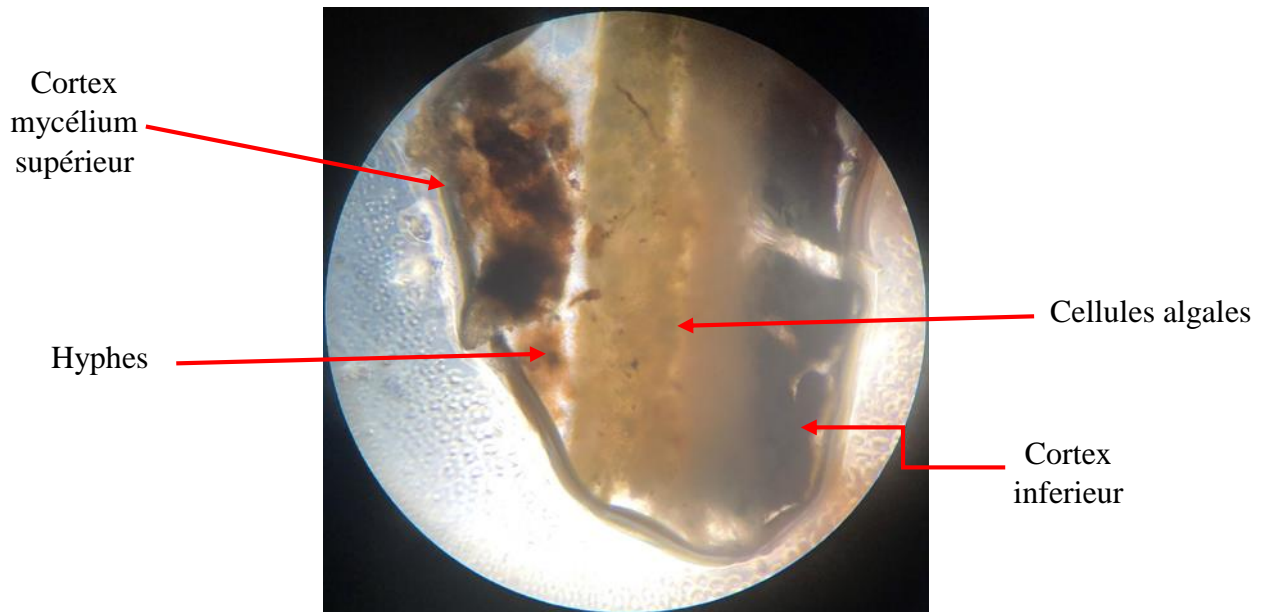


Figure 17: Observation sous microscope x 20 (Fares N, 2023)

Les figures 16 et 17 ci-dessus représente une observation sur microscope des coupes histologiques de nos transplants aux grossissements x10 et x20, on observe une apparition de nécroses d'ailleurs on ne parvient pas à faire la différence entre les zones corticales et médullaire

1.4. 8 Mars

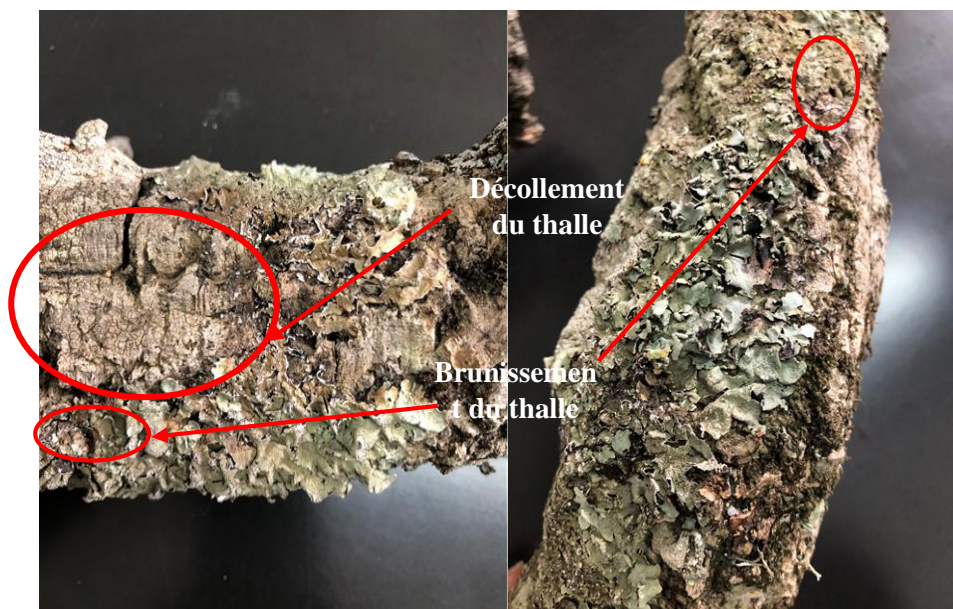


Figure 18: Observation du transplant a l'œil nu (Fares N, 2023)

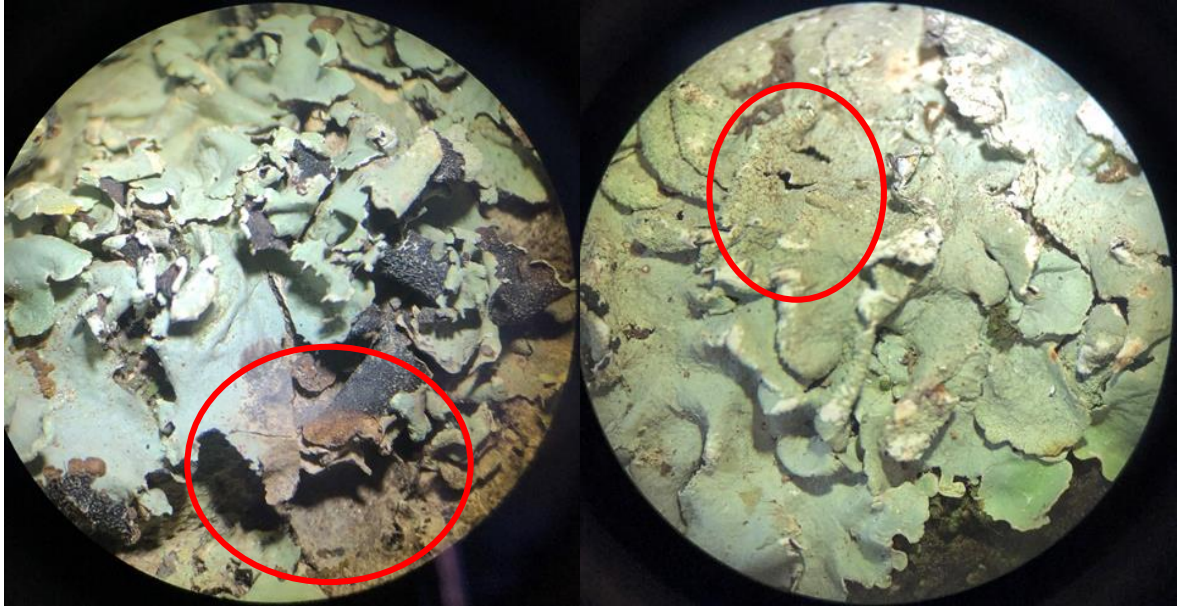


Figure 19 : Observation sous binoculaire (Fares N, 2023)

Dans les figures ci-dessus 18 et 19, les transplants de la zone du 8 Mars présentent les mêmes perturbations observables à la loupe et à l'œil nu que les zones précédentes (celles de l'Elysa, Sidi aissa, Saint Cloud) avec une accentuation du décollement et du brunissement des thalles

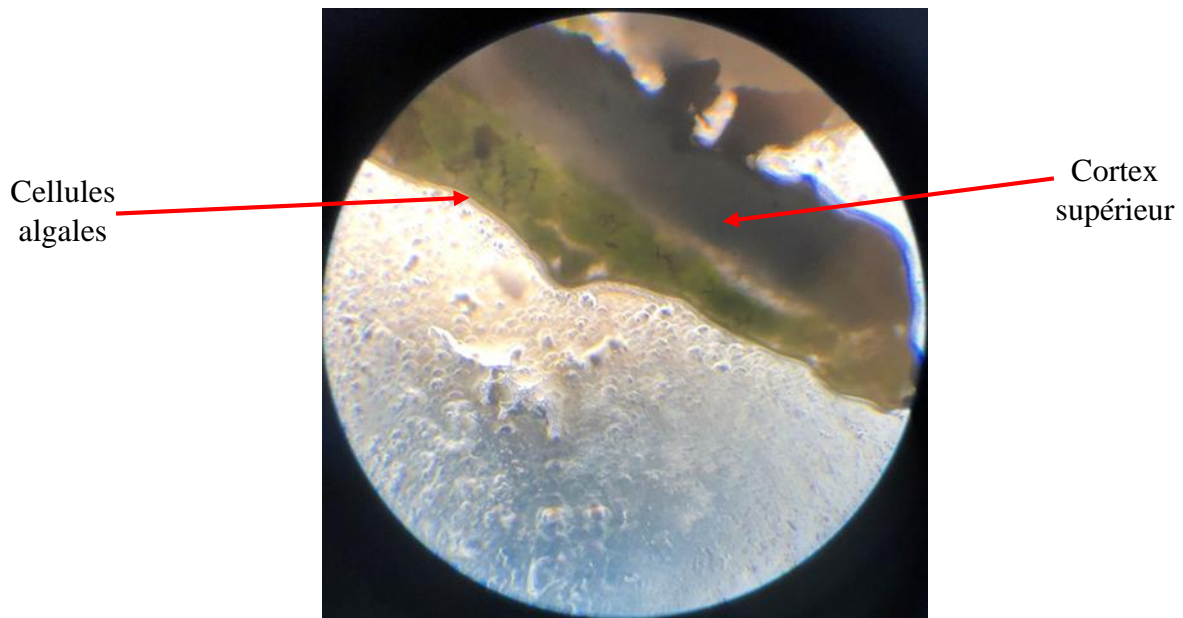


Figure 20: Observation sous microscope x 10 (Fares N, 2023)

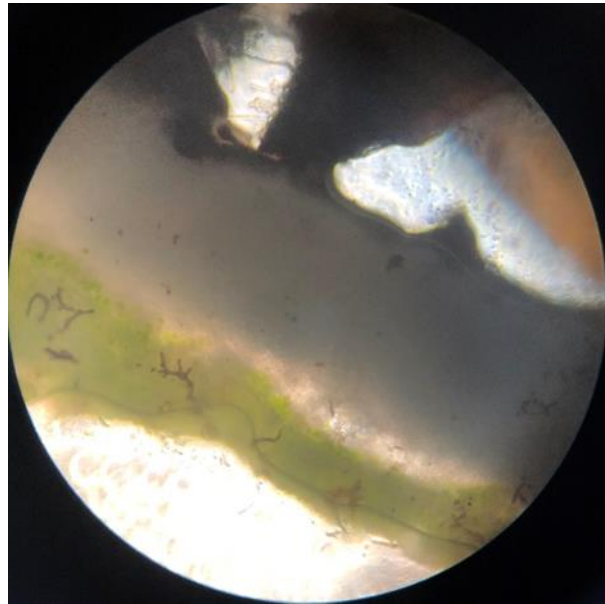


Figure21 : Observation sous microscope x 20 (Fares N, 2023)

Les figures 20 et 21 montres des coupes histologiques microscope où on observe une présence des rhizines ainsi une légère nécrose des gonidies.

1.5. Saint cloud

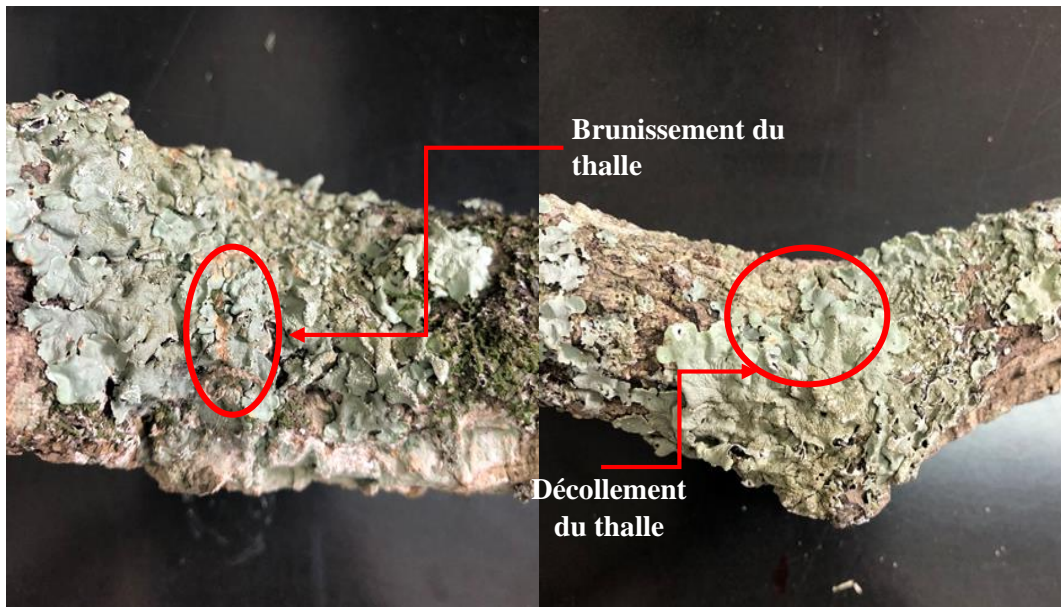


Figure 22: Observation a l'œil nu (Fares N, 2023)

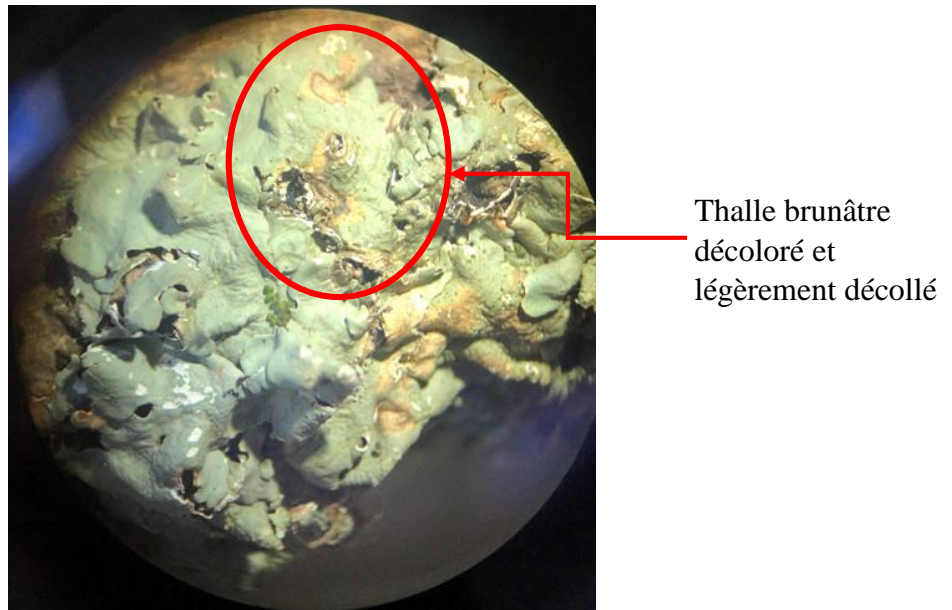


Figure 23 : Observation sous binoculaire (Fares N, 2023)

Dans les figures ci-dessus 22 et 23, nos transplants de la zone de Saint Cloud présentent les mêmes perturbations observables à la loupe et à l'œil nu que dans les zones précédentes notamment la chlorose qui accentue le brunissement et les thalles décollés de leurs supports.

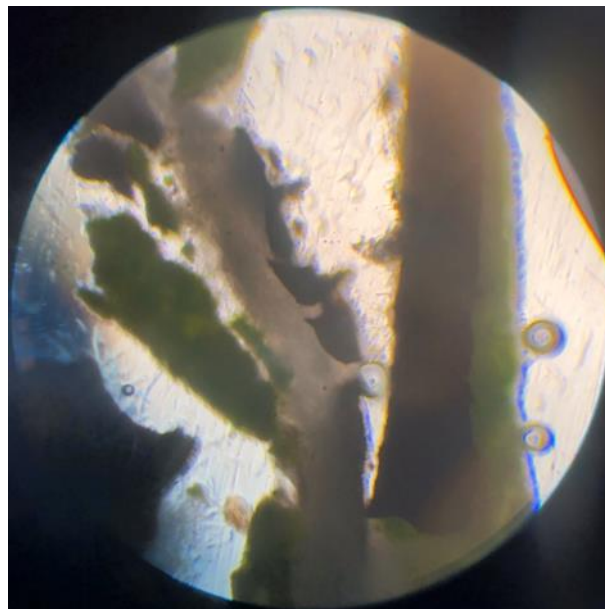


Figure 24: observation sous microscope x 10 (Fares N, 2023)

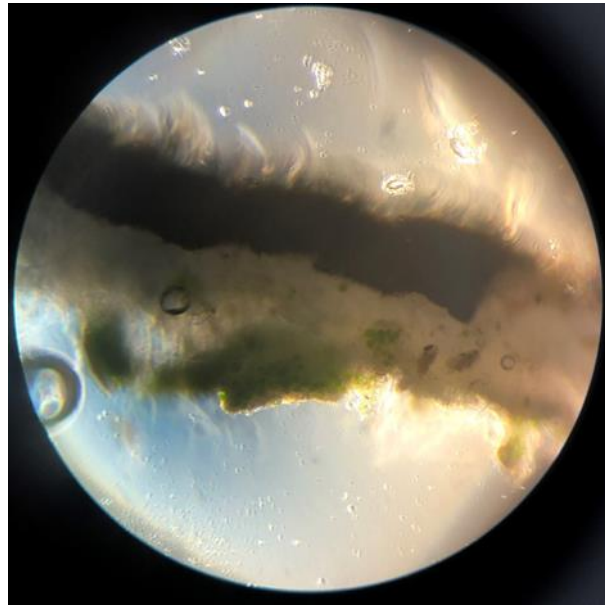


Figure 25 : Observation sous microscope x 20 (Fares N, 2023)

Les figures 24 et 25 représentent des coupes histologiques au microscope. On observe une rareté des rhizines, ainsi qu'une nécrose des gonidies, ainsi qu'une cassure au niveau des hyphes.

2. Résultats des dosages d'échantillons

2.1. Résultat du dosage de la chlorophylle

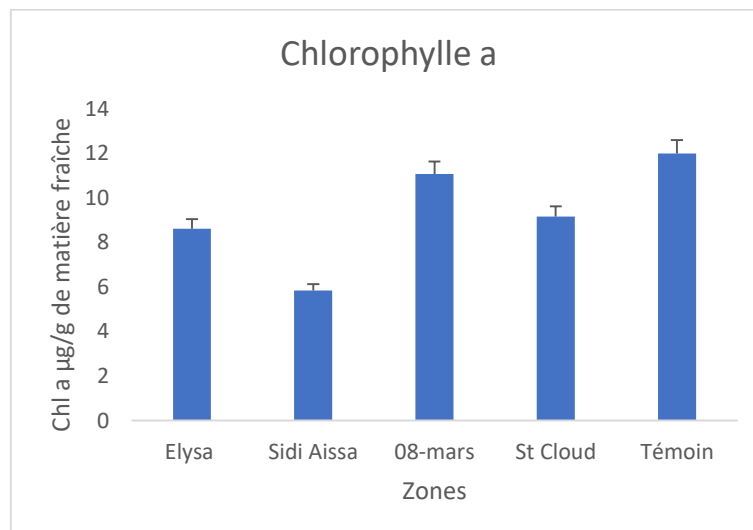


Figure 26 : Variations spatiales des moyennes du taux de la chlorophylle (a) de la *Flavoparmelia caperata*

Nous enregistrons selon la figure 26 le taux de la Chlorophylle a le plus élevé dans la zone de Bougous (témoin) avec une valeur moyenne de (11,9866 µg / g MF), de même pour la zone de 8 mars où la synthèse de la chlorophylle a se rapproche à celle du témoin avec une valeur de (11,0747 µg / g MF), par contre au niveau des autres zones on observe une fluctuation des valeurs qui semblent plus faibles par rapport au témoin.

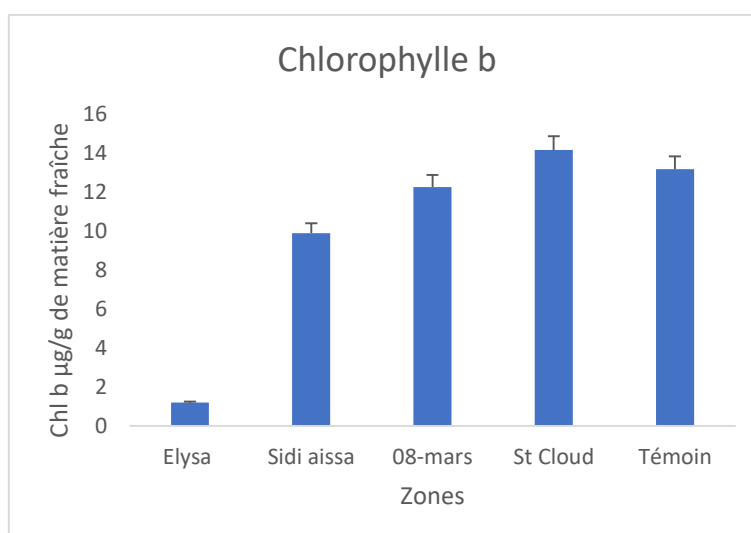


Figure 27 : Variations spatiales des moyennes du taux de la chlorophylle (b) de la *Flavoparmelia caperata*

D'après la figure 27, nous avons enregistré le taux de chlorophylle b le plus élevé avec une valeur moyenne de (14,1454 µg / g MF) dans la zone de Saint cloud par rapport au témoin (13,1680 µg / g MF), dans la zone de l'Elysa on a observé une diminution de la synthèse de la chlorophylle b et cela par rapport au témoin avec une valeur de (11,1895 µg / g MF)

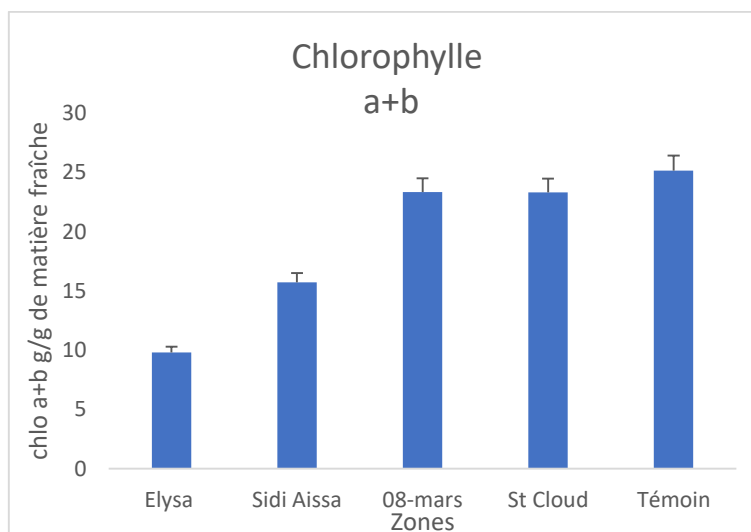


Figure 28 : Variations spatiales des moyennes du taux de la Chlorophylle (a+b) de la *Flavoparmelia caperata*

La figure 28 montre que la chlorophylle (a+b) suit la même tendance que celle de la chlorophylle a et b. où en remarque une diminution des teneurs en chlorophylle des transplants de toutes les zones par rapport au témoin (25,1546 µg / g MF) sauf pour les stations de St Cloud et du 08 Mars qui se rapproche au témoin.

2.2. Résultat du dosage des caroténoïdes

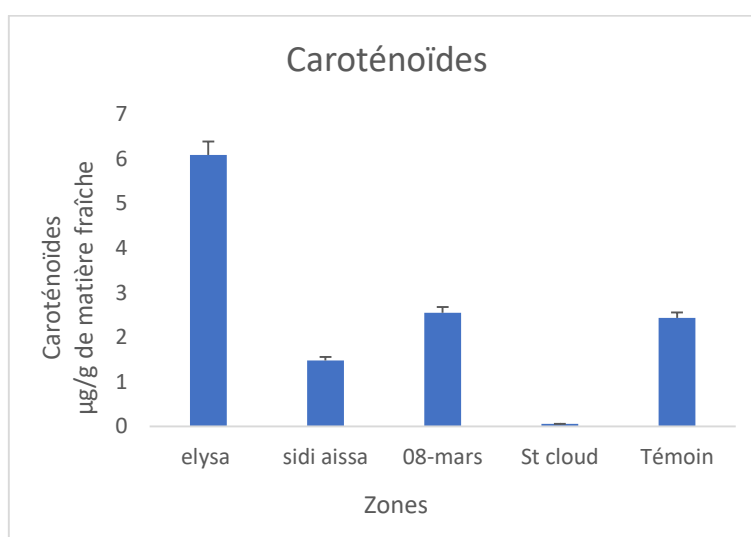


Figure 29: variations spatiales des moyennes du taux de la Caroténoïde de la *Flavoparmelia caperata*

On observe dans la figure 29 une perturbation de la synthèse des caroténoïdes, la zone de l'Elysa (6,0922 µg / g MF) où on a enregistré la valeur la plus élevée vis-à-vis des autres zones, la zone de Saint Cloud à noter la valeur plus faible (0,0565 µg / g MF)

2.3. Résultat du dosage des protéines

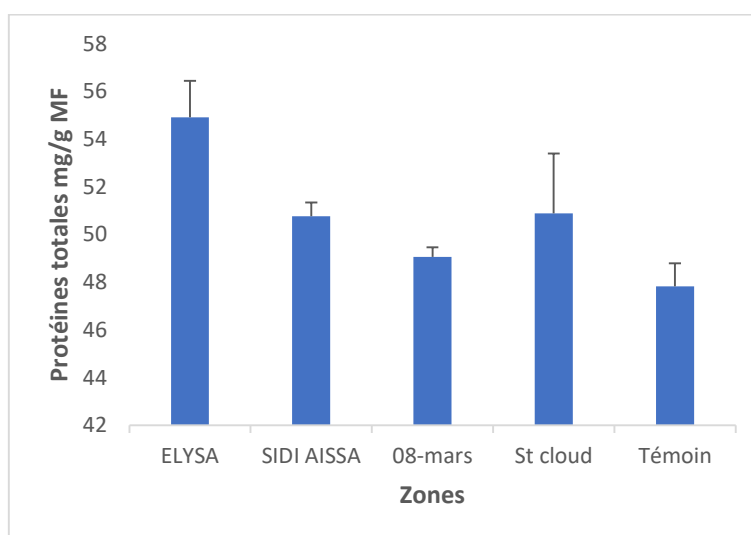


Figure 30 : Variations spatiales des moyennes du taux de la protéine de la *Flavoparmelia caperata*

Nous enregistrons selon la figure 30 le taux des protéines totales le plus élevé dans la zone de l'Elysa avec une valeur moyenne de (54,9147 µg / g MF), tant dis que le témoin détient la

valeur la plus basse ($47,8217 \mu\text{g} / \text{g MF}$) au niveau des autres zones on observe une fluctuation des valeurs qui semblent plus élevées par rapport au témoin

2.4. Résultat du dosage de la catalase

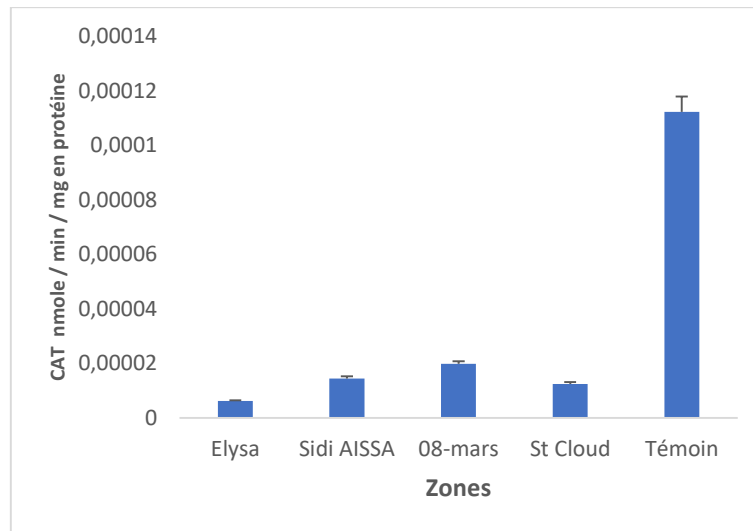


Figure 31 : Variations spatiales des moyennes du taux de la catalase de la *Flavoparmelia caperata*

La figure 29 représente les taux de la catalase au niveau des différentes stations, où on remarque que la zone témoin Bougous a enregistré le taux le plus élevé ($0,00011 \text{ nmole} / \text{min} / \text{mg en protéine}$) par rapport aux autres zones dont l'activité catalase semble faible.

Chapitre 3 : Discussion

La zone d'étude sélectionnée est une source indiscutable de polluants atmosphériques en raison de la présence permanente d'hydrocarbures provenant de la circulation des véhicules. Les émissions polluantes dépendent non seulement des caractéristiques spécifiques des véhicules en circulation, mais aussi du type de carburant qu'ils utilisent. Par exemple, dans une voiture à essence, si la combustion est complète, tout le carburant est converti en CO₂ et H₂O. Mais en réalité ce n'est pas complet, les véhicules émettent aussi du soufre et du monoxyde d'azote (**Masclat p. 2005**). Dans ce contexte le but de notre étude était d'évaluer les effets de la pollution atmosphérique urbaine sur les lichens en se concentrant sur certains paramètres spécifiques tels que la chlorophylle, les caroténoïdes, les protéines et la catalase.

Les lichens sont souvent utilisés comme bioindicateurs de la qualité de l'air en raison de leur sensibilité aux changements environnementaux, y compris la pollution atmosphérique. En étudiant les variations des paramètres mentionnés ci-dessus, l'étude visait à identifier l'impact de la pollution atmosphérique sur les lichens et à fournir des informations sur leur capacité d'adaptation et de survie dans des environnements urbains pollués.

Les résultats obtenus dans notre étude confirment les observations déjà rapportées par plusieurs travaux (**Farkas et al, 2017 ; Paoli et al, 2010 ; Santrorufu et al, 2016**) et fournissent des informations supplémentaires sur les réponses des lichens à la pollution atmosphérique, y compris des études similaires portant sur les chlorophylles, les caroténoïdes, les protéines et les enzymes (**Munzi et al, 2011 ; Nimis et al, 2003 ; Giordani et al, 2017**)

Dans certains cas, la dégradation de la chlorophylle est généralement en relation avec l'intensité de la pollution (**Balaguer & Manrique, 1991**) en effet dans notre travail la diminution des taux des teneurs en **chlorophylle a, b et (a+b)** dans les lichens transplantés dans les zones urbaines polluées (**Loppi S et al, 2003**) est plus remarquable que celle du témoin (**Fuhrer et al, 1997 ; Lombardozzi et al, 2012 ; Tripathi et al, 2008**). Certains polluants, tels que les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV), peuvent interagir avec les chlorophylles et perturber leur fonctionnement normal (**Markert B et al, 2009**), entraînant ainsi une diminution de la photosynthèse et de la production de pigments photosynthétiques. (**Solhaug et al, 2006**).

De plus, les polluants atmosphériques peuvent provoquer un stress oxydatif dans les cellules des lichens. Le stress oxydatif est caractérisé par une production excessive de radicaux libres, tels que les espèces réactives de l'oxygène (ROS), qui peuvent endommager les molécules

biologiques, y compris les chlorophylles. Cela peut entraîner une dégradation et une diminution du taux des teneurs en chlorophylle dans les lichens exposés à la pollution atmosphérique.

Les caroténoïdes quant à eux jouent un rôle important dans la protection contre le stress oxydatif. Ils sont bénéfiques comme des antioxydants, agie comme des piègeurs à radicaux libres, neutralisant les espèces réactives de l'oxygène produites lors de l'exposition à la pollution atmosphérique et protégeant les cellules contre les dommages oxydatifs (**Loppi et al, 2019 ; Augusto et al, 2018 ; Giordani et al, 2017**). L'augmentation du taux de caroténoïdes peut être une réponse adaptative des lichens pour contrer les effets néfastes de la pollution atmosphérique dont on a observé au niveau de la station de l'Elysa

Cependant, la diminution du taux de caroténoïdes dans la zone de Saint Cloud peut indiquer une perturbation de la synthèse de ces pigments, probablement en raison de l'exposition à des polluants spécifiques ou de conditions environnementales défavorables. Les polluants atmosphériques peuvent affecter les voies métaboliques responsables de la synthèse des caroténoïdes, entraînant une diminution de leur production dans les lichens exposés à la pollution. (**Demmig-Adams et al, 2006**)

Les protéines attaquées par des radicaux verront leurs taux augmenter, ceci a été observé au niveau de la zone de l'Elysa et cela par rapport aux autres stations dans les teneurs en protéines sont moins élevées, cette fluctuation des teneurs en protéines semble être une réponse adaptative des lichens pour faire face au stress renforcé par la pollution atmosphérique. En effet les protéines sont impliquées dans de nombreux processus cellulaires, y compris la défense contre le stress environnemental. (**Farkas et al, 2018 ; Backor et al, 2018 ; Santorufo et al, 2014**)

Les polluants atmosphériques peuvent induire le stress cellulaire, ce qui peut entraîner une augmentation de la synthèse de protéines dans les lichens. Les protéines produites en réponse au stress peuvent avoir des fonctions de détoxification, de réparation de l'ADN endommagé et de protection contre les espèces réactives de l'oxygène (ROS) produites lors du stress oxydatif, ainsi que dans la modulation des voies de signalisation cellulaire en réponse au stress environnemental (**Paoletti et al, 2018**)

Les éléments du système antioxydant et particulièrement la catalase, sont connus par leur implication contre le stress oxydatif (**Khosravinejad et al, 2008**). En outre, la catalase constitue une enzyme majeure dans la détoxification du peroxyde d'hydrogène, un composé potentiellement toxique produit lors de réactions d'oxydation

La pollution atmosphérique peut générer des espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les cellules des lichens, entraînant une augmentation de la production du peroxyde d'hydrogène. Les catalases sont nécessaires dans la dégradation du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène, ainsi que les dommages oxydatifs (**Fargašová, 2014**).

Une augmentation de l'activité des catalases dans la zone témoin Bougous peut indiquer une réponse adaptative des lichens à un environnement moins pollué, où la production de ROS est minimale. Les autres zones ayant des fluctuations de catalase peuvent présenter la variabilité de l'exposition aux polluants atmosphériques et la capacité des lichens à s'adapter à ces conditions. Il est important de noter que la fluctuation dans les taux de catalase peut également être intégrée par d'autres facteurs environnementaux, tels que la disponibilité des nutriments, la luminosité, l'humidité, etc. (**Bungau, 2020 ; Singh, 2017**)

D'après les **observations morphologiques** effectuées au niveau des zones de transplantations on observe une décoloration ainsi qu'un décollement voir même une restriction de leurs tailles. Ainsi plusieurs auteurs (**Sigal et Nash, 1983 ; De Wit, 1983**) ont décrit les mêmes observations et ont reliés ces phénomène par la présence d'une pollution intense.

D'après les **coupes histologiques** nous avons pus constater un nombre faible en rhizine, ce qui explique le décollement du thalle, étant donné que ses derniers sont responsable de sa fixation. (**Masson, 2014**)

Par ailleurs dans nos transplants nous avons remarqués une nette décoloration des thalles ainsi qu'une diminution du nombre des gonidies par rapport au témoin et cela est un témoignage de la perte de sa vivacité. Effectivement selon **Wetmore, 1985** l'ensemble du thalle meurt peu après que les cellules algales sont endommagées.

Conclusion

Au cours de notre étude, nous avons utilisé des transplants lichéniques pour évaluer les effets de la pollution atmosphérique sur leur morfo-physiologie. Nous avons mesuré les niveaux de chlorophylle, des caroténoïdes, des protéines et l'activité de la catalase afin d'évaluer le stress oxydant chez les lichens.

Les résultats obtenus à partir de notre travail a permis de révéler des changements significatifs dans les lichens transplantés exposés à la pollution atmosphérique. La diminution de la pigmentation de la chlorophylle et des caroténoïdes indique un stress oxydant dû à la présence de polluants atmosphériques. De plus, nous avons observé une augmentation des niveaux de protéines, ce qui suggère une réponse adaptative des lichens au stress oxydant. Enfin, l'activité de la catalase a augmenté, démontrant la réponse des lichens au stress oxydant provoqué par la pollution atmosphérique.

Ces résultats confirment l'impact de la pollution atmosphérique sur la morfo-physiologie des lichens en milieu urbain. Les mesures de la chlorophylle, des caroténoïdes, des protéines et de la catalase offrent des informations précieuses sur la qualité de l'air dans les zones urbaines. Cependant, il est important de noter que d'autres marqueurs et analyses complémentaires peuvent également être utilisés pour évaluer le stress oxydant chez les lichens, permettant ainsi d'obtenir une vision plus complète de l'impact de la pollution atmosphérique sur ces organismes.

Malgré ces limites, cette étude ouvre des perspectives prometteuses pour la biosurveillance de la pollution atmosphérique en milieu urbain. Les mesures de la chlorophylle, des caroténoïdes, des protéines et de la catalase peuvent être utilisées comme des outils fiables pour évaluer le stress oxydant chez les lichens transplantés. Ces informations sont essentielles pour la surveillance de la qualité de l'air en milieu urbain et peuvent contribuer à la prise de décisions en matière de gestion de la pollution atmosphérique.

Références bibliographiques

- Adamo, P., Crisafulli, P., Giordano, S., Minganti, V. (2015). An integrated approach to evaluate the effects of air pollution and climate on historical buildings by means of active and passive bioindicators. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(17), 12822-12835.
- Agnan, Y. (2013). Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France: sources, mécanismes et facteurs d'influence. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 306p.
- Ahmadjian, V., Jacobs, J. B. (Eds.). (2001). *The lichen symbiosis*. John Wiley & Sons.
- Augusto, S., Máguas, C., Matos, P., Branquinho, C., Máguas, C., Soares, A. (2018). Effects of air pollution on lichen photosynthesis and respiration: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 237, 575-583.
- Bačkor, M., Mikeš, V., Goga, M., Repčák, M., Hauptvogel, P. (2018). Effects of air pollution on protein expression in lichens: Insights from proteomic studies. *Frontiers in Plant Science*, 9, 165.
- Balaguer, L., & Manrique, E. (1991). Interaction between sulfur dioxide and nitrate in some lichens. *Environmental and Experimental Botany*, 31, 223-227.
- Bourdial, M. (2000). *La flore et la faune*. Masson.
- Bungau, S., Behl, T., Tit, D. M., Vesa, C. M., Grumezescu, A. M. (2020). Reactive Oxygen Species and Their Role in Cellular Oxidative Damage in Lichens. *Biomolecules*, 10(1), 110. doi: 10.3390/biom10010110
- Catalyud, A., Barreno, E. (2004). Response to ozone in two lettuce varieties on chlorophyll a fluorescence, photosynthetic pigments and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42, 549-555.
- Cloquet, C., De Muynck, D., Signoret, J., Vanhaecke, F. (2009). Urban/peri-urban aerosol survey by determination of the concentration and isotopic composition of Pb collected by transplanted lichen *Hypogymnia physodes*. *Environmental Science and Technology*, 43(3), 623-629.
- Cloquet, C., DeMuynck, D., Signoret, J., Vanhaecke, F. (2009). Urban/peri-urban aerosol survey by determination of the concentration and isotopic composition of Pb collected by transplanted lichen *Hypogymnia physodes*. *Environmental Science and Technology*, 43(3), 623-629.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Feigin, V. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918.
- Crous, K. I., Vandermeiren, K., Ceulemans, R. (2006). Physiological responses to cumulative ozone uptake in two white clover (*Trifolium repens* L. cv. Regal) clones with different ozone sensitivity. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3), 169-179.
- Crutzen, P. J., Andreae, M. O. (1990). Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250(4988), 1669-1678.
- Cuny, D. (2012). La biosurveillance végétale et fongique de la pollution atmosphérique : concepts et applications. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, 70, 182-187.
- Cuny, D., Rzepka, M. A., Van Haluwyn, C. (2008). Introduction à la biosurveillance végétale et fongique de la qualité de l'air, concept et intérêt. *Spectra Analyse*, 264, 31-35.

- De Wit, T. (1983). The effect of air pollution on the histology of lichens. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 5(3), 187-202.
- Demmig-Adams, B., Adams, W. W. (2006). Photoprotection in an ecological context: the remarkable complexity of thermal energy dissipation. *New Phytologist*, 172(1), 11-21.
- Deruelle, R., Lallemand, R. (1983). Les lichens témoins de la pollution (pp. 4-71).
- Deruelle, S. (1984). L'utilisation des lichens pour la détection de la pollution par le plomb. *Bulletin d'écologie*, Masson ; Paris.
- Escourrou, G. (1996). Contraintes climatiques & pollutions. Thèse. Paris.
- Fargašová, A. (2014). Antioxidant defense system and oxidative stress markers in lichens *Parmelia sulcata* and *Evernia prunastri* exposed to air pollution. *Ecological Indicators*, 36, 471-477.
- Farkas, E., Belák, A., Gombos, M., Vincze, É. (2017). Effets de la pollution de l'air sur les lichens: Réponses biochimiques, morphologiques et physiologiques. *Pollution de l'environnement*, 230, 200-211.
- Farkas, E., Cseh, E., Nagy, V., Várnai, V., Papp, I., Máthé, C. (2018). Proteomic responses of lichens to environmental stressors: A review. *Environmental Pollution*, 237, 207-221.
- Figure 1 : structure d'un lichen en coupe transversale (<http://www.arctic.uoguelph.ca/cpl/organisms/plants/terrestrial/lichens/basicmorph.htm>)
- Figure 2 : structure interne d'un lichen (J-C MASSON - IFE - avril 2014 Structure d'un jeune lichen <http://www.arctic.uoguelph.ca/cpl/organisms/plants/terrestrial/lichens/basicmorph.htm>)
- Figure 3 et 4 Agnan, Y. (2021). Structures de reproduction sexuée et asexuée chez les lichens *Revue de Biogéochimie de l'Environnement*, 12(3), 45-56.
- Garrec, J-P., Van Haluwyn, C. (2002). *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air*. Tec & Doc, Paris.
- Gerdol, R., Marchesini, R., Iacumin, P., Brancaleoni, L. (2014). Monitoring temporal trends of air pollution in an urban area using mosses and lichens as biomonitors. *Chemosphere*, 108, 388-395.
- Gerdol, R., Marchesini, R., Iacumin, P., Brancaleoni, L. (2014). Monitoring temporal trends of air pollution in an urban area using mosses and lichens as biomonitors. *Chemosphere*, 108, 388-395.
- Giordani, P., Brunialti, G., Bacaro, G. (2012). Use of Lichens as Environmental Quality Indicators: A Review. *Ecological Indicators*, 23, 221-232.
- Giordani, P., Brunialti, G., Modenesi, P. (2004). Bioindication of air pollution by trace element concentrations in *Parmelia caperata* (L.) Ach. from the London area (UK). *Environmental Pollution*, 127(1), 91-99.
- Giordani, P., Incerti, G., Nascimbene, J., & Nimis, P. L. (2017). Réponses des lichens à la pollution de l'air: un examen. *Pollution de l'environnement*, 225, 435-454.
- Giordani, P., Incerti, G., Rizzi, G. (2017). Responses of lichens to air pollution: A review. *Environmental Pollution*, 225, 435-454.
- Gonjion, M. (2004). Publication de l'agence régionale de l'environnement ; Rouen (p. 4).
- Grube, M., Cernava, T., Sohns, U. (Eds.). (2015). *Symbioses and stress: joint-ventures in biology*. Springer.
- Honegger, R. (2008). Functional aspects of the lichen symbiosis. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 1-25.

- Jacob, D. J., Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63.
- Khosravinejad, F., Heydari, R., Farboodnia, T. (2008). Antioxidant responses of two barley varieties to saline stress. *Research Journal of Biological Sciences*, 3, 486-490.
- Kranner, I., & Beckett, R. (Eds.). (2019). *Ecological interactions of lichens*. Springer.
- Lagadic, L., Caquet, T., Amiard, J. C. (1997). Biomarqueurs en écotoxicologie: principes et définitions. In Lagadic, L., Caquet, T., Amiard, J. C., Ramade, F. (Eds.), *Biomarqueurs en écotoxicologie - Aspects fondamentaux* (pp. 1-9). Masson, Paris.
- Lange, O. L., Büdel, B., Meyer, A., Zellner, H. (2005). Ecophysiology of biological soil crusts: helpful facts and impressive physiological feats. *Botanica Acta*, 118(2), 171-188.
- Larsen, R. S., Bell, J. N. B., James, P. W., Chimonides, P. J., Rumsey, F. J., Tremper, A., Purvis, O. W. (2007). Lichen and bryophyte distribution on oak in relation to air pollution and bark acidity. *Environmental Pollution*, 146, 332-340.
- Larsen, R. S., Bell, J. N. B., James, P. W., Chimonides, P. J., Rumsey, F. J., Tremper, A., Purvis, O. W. (2007). Lichen and bryophyte distribution on oak in London in relation to air pollution and bark acidity. *Environmental Pollution*, 146, 332-340.
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371.
- Loppi, S., Frati, L., Paoli, L., Di Nuzzo, L., Sorbo, S., Munzi, S. (2019). Biosurveillance of air pollution by lichens in urban environments: New perspectives and future challenges. *Environmental Pollution*, 251, 622-631.
- Malbreil, N. (1997). *La pollution en bordure d'autoroute et son impact sur la végétation*. DESS Ressources Naturelles et Environnement, Université de Metz.
- Manier, N., Deram, A., Lecurieux, F., Marzin, D. (2009). Comparison between new wild plant *Trifolium repens* and *Vicia faba* on their sensitivity in detecting the genotoxic potential of heavy metal solutions and heavy metal-contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 202(1-4), 343-352.
- Markert, B., Wünschmann, S., Fränzle, S., Wrensch, J. (2009). Biological responses to atmospheric nitrogen deposition in woodland ecosystems—Results from the European NitroEurope Integrated Project. *Environmental Pollution*, 157(6), 1731-1733.
- Masclet, P. (2005). *Pollution atmosphérique (causes, conséquences, solutions, perspective)*. Ellipses.
- Masson, D. (2014). *Les Lichens: Biologie, écologie, classifications et clés de détermination*. Belin.
- Milen Jet ebel, T. (2000). *Royal botanic*. Maloine, Paris (pp. 7-8).
- Misík, M., Ma, T. H., Nersesyan, A., Monarca, S., Kim, J. K., Knasmueller, S. (2011). Micronucleus assays with *Tradescantia* pollen tetrads: an update. *Mutagenesis*, 26(1), 215-221.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Young, P. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973.
- Munzi, S., Cruz, C., Correia, O., Branquinho, C. (2016). Lichens as ecological indicators in urban areas: beyond the effects of pollutants. *Journal of Applied Ecology*, 53(6), 1350-1357.
- Munzi, S., Pisani, T., Loppi, S., Giordani, P. (2011). Réponses physiologiques et chimiques chez le lichen *Xanthoria parietina* (L.) Th. Pr. exposés aux composés azotés. *Pollution de l'environnement*, 159(1), 120-126.

- Nash III, T. H. (2008). *Lichen Biology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Nash III, T. H. (2008). *Lichen biology*. Cambridge University Press.
- Nimis, P. L., Scheidegger, C., Wolseley, P. A. (Eds.). (2013). *Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens*. Springer.
- Nimis, P. L., Scheidegger, C., Wolseley, P. A. (2003). Surveillance de la diversité des lichens en Europe: L'importance d'un échantillonnage standardisé. *Surveillance et évaluation environnementales*, 81(1-3), 337-346.
- Nylander, W. (1866). Les lichens du Jardin du Luxembourg. *Bulletin de la Société botanique de France*, 13, 364-372.
- Ozenda, P. (2000). *Les végétaux : organisation et diversité biologique*. Dunod, Paris, 2ème édition (pp. 191-192, ISBN 2-7298-9).
- Ozenda, P. (2006). *Les végétaux (Organisation et diversité biologique)*. Dunod, Paris (p. 169).
- Ozenda, P., Clauzade, G. (1970). *Les lichens, étude biologique et flore illustrée*. Masson, Paris, 808 p.
- Paoletti, E., Bardelli, T., Paoli, L., Rocchini, D., Bruschi, P., Ferretti, M. (2018). Pollution atmosphérique et lichens: examen des réponses écologiques et approche pour évaluer la tolérance aux polluants atmosphériques. *Indicateurs écologiques*, 94, 371-379.
- Paoli, L., Munzi, S., Guttová, A., Loppi, S. (2015). Sensitivity of Lichens to Air Pollution: New Insights from the Application of Ozone Biomonitoring Approach. *Environmental Pollution*, 196, 155-162.
- Paoli, L., Munzi, S., Guttová, A., Loppi, S. (2010). Réponse biochimique du lichen *Parmelia sulcata* à un gradient de pollution métallique. *Pollution de l'environnement*, 158(1), 55-62.
- Praud, D., Boulanger, G., Mandin, C., & Kirchner, S. (2022). Pollution de l'air intérieur : état des connaissances. Mise à jour le 02 sept. 2022. (Informations fournies par Delphine Praud, Guillaume Boulanger, Corinne Mandin, Séverine Kirchner)
- Rai, R., Agrawal, M. (2008). Evaluation of physiological and biochemical responses of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to ambient air pollution using open top chambers at a rural site in India. *Science of the Total Environment*, 407(1), 679-691.
- Raven, P., EverR, Eichhorn, S. (2003). *Biologie végétale*. boecbk (pp. 944, ISBN 2-7445-0102-6).
- Rikkinen, J. (2017). What is a lichen? An outline of lichenology. In *Lichen Biology* (pp. 3-19). Springer, Cham.
- Rzepka, M. A., Cuny, D. (2011). Recherches préliminaires sur la mise en place d'une biosurveillance végétale de la pollution atmosphérique en zone industrielle complexe : applications du ray-grass dans la zone industrialoportuaire de Dunkerque. *Acta Botanica Gallica*, 158(3), 387-400.
- Santamaria, J. M., Barreno, E., García-Breijo, F. J., et al. (2012). Ecophysiological Traits of Lichens for Biomonitoring Air Pollution. In *Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles* (pp. 295-314).
- Santorufo, L., Caser, M., Petriccione, M., Capuozzo, C. (2014). Proteomic analysis of the lichen *Physcia adscendens* exposed to cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 102, 109-116.
- Santorufo, L., Maisto, G., Iovieno, P., Castaldo Cobianchi, R. (2016). Réponses physiologiques et biochimiques du lichen *Xanthoria parietina* aux conditions urbaines: nouveaux biomarqueurs pour la surveillance de la pollution atmosphérique. *Indicateurs écologiques*, 67, 502-511.
- Schutz, M. (1995). *Environnement et pollution - Comment mesurer ? Comment réagir ?*.

- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Serusiaux, E., Diederich, P., Lambinon, J. (2004). Les macrolichens de Belgique, du Luxembourg du nord de la France. *Ferrantia* 40, 192 p.
- Sigal, L. L., Nash, T. H. (1983). Observations on lichen histology in relation to pollution injury. *The Bryologist*, 86(4), 343-352.
- Silva, D. T., Meirelles, S. T., Moraes, R. M. (2012). Relationship between ozone, meteorological conditions, gas exchange, and leaf injury in *Nicotiana tabacum* Bel-W3 in a sub-tropical region. *Atmospheric Environment*, 60, 211-216.
- Singh, S., Kumari, S., Chauhan, A., Kumar, R., Agrawal, M. (2017). Oxidative stress and antioxidant defense mechanism in relation to pollution and plant adaptation. In: Tripathi, B.D., Gaur, J.P. (eds) *Ecotoxicology and Stress Responses in Plants*. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-58445-7_6
- Solhaug, K. A., Gauslaa, Y., Yemets, O. A., Bilay, V. I., & Solhaug, K. A. (2006). Changes in chlorophyll fluorescence, spectral characteristics and pigment concentrations in the lichen *Hypogymnia physodes* due to long-term exposure to air pollution. *Environmental Pollution*, 143(3), 468-478.
- Tableau 1 :ASTA Juliette (21 août 2019), Les lichens, organismes pionniers surprenants, Encyclopédie de l'environnement, Consulté le 17 juin 2023 [ISSN 2555-0950 en ligne] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/fr/life/lichens-organismes-pionniers/>
- Takahashi, T., Miyajima, Y. (2010). Effects of roads on alpine and subalpine plant species distribution along an altitudinal gradient on Mount Norikura, central, Japan. *Journal of Plant Research*, 123, 741-749.
- Thimonier, A., Dupouey, J. L., Bost, F., Becker, M. (1994). Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. *New Phytologist*, 126, 533-539.
- Van Haluwyn, C. (1998). La bioindication: applications dans notre région. *Air Pur*, 55, 23-25.
- Van Haluwyn, C., Cuny, D., Garrec, J-P. (2011). Introduction générale - Définitions, concepts et enjeux généraux de la biosurveillance de la qualité de l'air. *Pollution Atmosphérique*, Numéro spécial, 7-13.
- Wetmore, C.M. (1985). *Lichens: Their Structure and Identification*. University of Washington Press.
- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S. J., Zhao, H., Geng, G., He, K. (2017). Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 543(7647), 705-709.



People's Democratic Republic of Algeria
 Ministry of Higher Education and Scientific Research
 University of Bouira
 Faculty of Natural and Life Sciences and Earth Sciences



*International Seminar on Bioresources and Sustainable Development BDD
 3rd and 4th May, 2023*

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

The scientific committee of the international seminar on Bioresources and Sustainable Development (BDD 2023), organized on 3rd and 4th May 2023, at the national center of sport and leisure, Tiflida (Algeria), attests that:

Mr/Mrs : BOUMEDRIS Zineddine Presented a Poster communication,
 entitled : Characterization of urban air pollution using lichen bioindication

Co-authors : Fares nadda, Alayyat amel, Belahed bellal

The President of the seminar

Dr.MAHMOUD MOHAMED AMIN
 Président du Séminaire



The Dean

كلية علوم الطبقة والحياة
 وعلوم الأرض
 ووقائع فاعلية

