



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE  
ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة الشاذلي بن جديد- الطارف  
UNIVERSITÉ CHADLI BENDJEDID D'EL-TARF



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de BIOLOGIE

Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Toxicologie Fondamentale et Appliquée

*THEME*

**INTEGRITE MEMBRANAIRE DES CELLULES DES THALLES DE  
LICHENS BIOINDICATEURS DE POLLUTION METALLIQUE**

*Par :*

*Hamdaoui Takwa et Zroug Abir*

Sous la Direction de : M. BOUMEDRIS Zineddine Grade MCB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

Devant le jury

President: M. BELABED Bellal

Grade MAB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

Examineur : Mme GHEID Samira

Grade MCB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

*Année Universitaire : 2019- 2020*

## *Remerciements*

*Nous remercierons Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la capacité d'effectuer ce travail.*

*\*\*\*\*\**

*Nous commençons tout d'abord, par remercier Monsieur Boumedris Zine Eddine. Nous sommes vraiment chanceuses de vous avoir comme promoteur, nous vous remercions vivement pour toutes les heures, les jours et les mois que vous avez passé avec patience extrême à nous diriger et corriger ce manuscrit.*

*Nous vous remercions pour vos conseils et encouragements.*

*Veillez trouver ici toutes nos sentiments de respect. Nos remerciements sont adressés également aux membres du Jury qui ont pris sur leur temps et ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail :*

*Nous tenons à exprimer notre très grande considération, et notre profond respect à Belabed Bellal, qui nous 'a fait l'honneur de présider ce Jury malgré toutes ses responsabilités et ses nombreuses occupations. Nous vous remercions pour votre modestie mais aussi pour votre partage du savoir, un grand merci pour tout ce que nous avons appris grâce à vous au cours de mes années à Chadli Bendjedid.*

*Nous remercions vivement Ghaid Samira d'avoir eu l'amabilité de bien vouloir examiner ce travail, mais aussi pour tous ses efforts avec nous tout au long de notre cursus à Chadli Bendjedid.*

*Que tous ceux qui ont été impliqués de près ou de loin dans la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude : sans votre contribution, il nous aurait été impossible de mené bien ce projet.*

*Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenue.*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers parents a*

*Ali et Hanifa qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes grandes admirations, mes considérations et mes sincères affections pour vous.*

*-pour mes chères frères : Yousef, Khaled.*

*-pour mes chères sœurs : Meriem, Doaa, Kadil.*

*-pour mes très chères amies : Manel, Romaysa, Ilham*

*-pour mon fiancé Oymen*

*À mon chère ami, mon binôme, Takwa. Qui m'a supporté durant cette année. Et chez qui j'ai trouvé l'entente dont j'avais besoin.*

*À toutes la promotion des 2 Emme année master toxicologie fondamentale et appliquer : 2019-2020.*

*Abir*

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire :

À Ma tendre Mère Amel : Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

À Mon très cher Père Mour eddine : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

Ma grande mère pour tous les sacrifices, l'amour, la tendresse ; le soutien, et les prières tout au long mes études je T'aime énormément.

À mon cher frère : Dhia Eddine.

À mes sœurs : Riheb et son mari Badis, Iora

À mes très chers amis : Chaima, Marwa, Abir

Takwa

# Résumé

La région d'Annaba (Est de l'Algérie) est soumise depuis longtemps à un problème aigue de pollution atmosphérique urbaine et industrielle qui résulte de la combinaison de différentes sources telles que : les complexes et unités industrielles, une forte urbanisation et un trafic routier intense.

Le trafic routier y est responsable de la plus grande part des rejets de polluants dans l'atmosphère, bien plus que les autres sources d'émissions, contribuant ainsi à une dégradation de la qualité de l'air, qui est confirmée par les mesures des concentrations des polluants dans la région d'Annaba .

Le but de cette étude était d'identifier chez le lichen *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale, des bio marqueurs du stress oxydants et la perméabilité membranaire qui pourraient fournir des indications de stress dû à la pollution de l'air. Par leurs caractéristiques physiologiques, les lichens s'avèrent très efficaces pour répondre à cette problématique, notamment leur capacité à accumuler les contaminants en l'occurrence les éléments traces métalliques.

Les premiers signes de stress ont été détectés par une diminution significative de la teneur relative en eau des plantes traitées par rapport à celle du témoin. En suite, par l'augmentation très hautement significative des taux de fuite des électrolytes et des concentrations du MDA, et aussi l'augmentation des concentrations du H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> des sites pollués.

**Mots -clés :** Pollution atmosphérique, lichens, bio marqueurs, stress oxydatif, perméabilité membranaire

# Abstract

The region of Annaba (eastern Algeria) has long been subject to an acute problem of urban and industrial air pollution which is the combination of different sources such as: industrial complexes and units, high urbanization and heavy road traffic.

Road traffic is responsible for the largest share of pollutant discharges into the atmosphere, much more than other sources of emissions, thus contributing to a deterioration in air quality, which is confirmed by measurements of concentrations of pollutants in the Annaba region.

The aim of this study was to identify in the lichen *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale, biomarkers of oxidative stress and membrane permeability which could provide indications of stress due to air pollution., lichens are very effective in responding to this problem, in particular their ability to accumulate contaminants, in this case trace metal elements.

The first signs of stress were detected by a significant decrease in the relative water content of the treated plants compared to that of the control. As a result, by the very highly significant increase in electrolyte leakage rates and MDA concentrations, and also in site-to-site H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations.

**Key-words:** Air pollution, lichens, bio markers, oxidative stress, membrane permeability

## الملخص:

لطالما تعرضت منطقة عنابة (شرق الجزائر) لمشكلة حادة من تلوث الهواء في المناطق الحضرية والصناعية وهي مزيج من مصادر مختلفة مثل: المجمعات والوحدات الصناعية، والتوسع العمراني المرتفع، وحركة المرور الكثيفة على الطرق.

تعتبر حركة المرور على الطرق مسؤولة عن غالبية تصريفات الملوثات في الغلاف الجوي، أكثر بكثير من مصادر الانبعاثات الأخرى، مما يساهم في تدهور جودة الهواء، وهذا ما تؤكدته قياسات التركيزات من الملوثات في منطقة عنابة.

كان الهدف من هذه الدراسة هو التعرف على المؤشرات الحيوية للإجهاد التأكسدي ونفاذية الغشاء في الاشنة *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale والتي يمكن أن توفر مؤشرات على الإجهاد الناجم عن تلوث الهواء. من خلال خصائصها الفسيولوجية، تعتبر الأشنات فعالة جداً في الاستجابة لهذه المشكلة، ولا سيما قدرتها على تراكم الملوثات، وفي هذه الحالة اثار العناصر المعدنية.

تم الكشف عن العلامات الأولى للإجهاد من خلال انخفاض معنوي في المحتوى المائي النسبي للنباتات المعالجة مقارنة بالمجموعة الضابطة. نتيجة لذلك، من خلال الزيادة الكبيرة للغاية في معدلات تسرب الشوارد وتركيزات MDA، وكذلك في تركيزات  $H_2O_2$  من موقع إلى موقع.

الكلمات المفتاحية: تلوث الهواء، الأشنات، المؤشرات الحيوية، الإجهاد التأكسدي، نفاذية الأغشية.

# Table de matières

**Remerciement**

**List des tableaux**

**List des figures**

**Liste des abréviations**

**Résumé**

Introduction.....1-2

## **Synthèse bibliographiques**

### **Chapitre 01 : généralité sur la pollution atmosphérique**

1. Définition de la pollution atmosphérique.....3

2. Les polluants atmosphérique et leurs sources.....3

2.1. Les polluants primaires.....4

2.2. Les polluantes secondaires.....6

3. La dispersion des polluantes atmosphérique.....6

4 .Les effets des déférentes substances polluantes.....7

4.1.Impact sur l'environnement.....7

4.1.1. Effets sur l'environnement au niveau local et régional.....8

4.1.2 .Effets sur l'environnement au niveau planétaire.....9

4.2. Impact sur la santé.....10

4.3. Impact sur les matériaux .....11

4.4. Impacts sur les végétaux.....11

## **Chapitre 02 : Généralité sur les lichens**

1. Définition.....	13
2. Les partenaires de la symbiose lichenique et leur rôle.....	13
3. principaux types de thalles.....	14
4. Structures du thalle.....	16
5. La Reproduction des lichens.....	17
6. La physiologie des lichens.....	18
7. L'écologie des lichens.....	19
8. Modification de la végétation lichénique en réponse aux changements de la pollution atmosphérique.....	21
9. Rôles et usages des lichens.....	23

## **Chapitre 03 : La biosurveillance de la qualité de l'air**

1. notions de biosurveillance.....	25
2. Méthodes de mesure de la pollution atmosphérique .....	25
2.1. Méthodes physicochimique .....	26
2.2. Méthodes biologique.....	26
3. Relation entre les végétaux et la pollution .....	27
4. Définitions .....	28
4.1. la bioindication.....	28
4.2 Les bioessais.....	28
4.3. la bioestimation.....	28
4.4. La biomonitoring.....	28

4.5. La bioaccumulation.....	28
5.Lichens et bioaccumulation.....	29
6.Les différents méthodes utilisent les lichens comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique.....	30

## **Matériel et méthodes**

1. Présentation de la zone d'étude.....	32
2. Modèle biologique .....	33
3. Méthode de transplantation .....	33
4. Analyse de la perméabilité membranaire .....	34
4.1. La teneur relative en eau (TRE).....	34
4.2. Taux de fuite des électrolytes.....	35
4.3. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde(MDA).....	35
5. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	36
6. Analyse statistique.....	36

## **Résultats et Discussion**

<b>1. Résultats.....</b>	<b>37</b>
1.1. Analyse de la perméabilité membranaire.....	37
1.1.1. La teneur relative en eau (TRE).....	37
1.1.2. Taux de fuite des électrolytes.....	38
1.1.3. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde(MDA).....	38
1.1.4. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	39

<b>2. Discussion</b> .....	40
<b>Conclusion générale</b> .....	44
<b>Références bibliographique</b> .....	46

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
01	Les principaux types de thalles(ACFJ Association pour la Connaissance de la Flore du Jura) (8 septembre 2012) : Journée à la découverte des lichens	15
02	Coupe morphologique d'un thalle.	16
03	Localisation géographique de la région d'étude (Annaba) et le témoin Kala) (Source : Ali Ahmed, 2007).	32
04	<i>Flavoparmelia caperata</i>	33
05	Teneur relative en eau	37
06	Taux de fuite des électrolytes	38
07	Mesure de la synthèse du Malondialdéhyde (MDA)	38
08	Mesure de la synthèse du peroxyde d'hydrogène (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	39

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 01</b>	les caractéristiques essentielles qui privilégient les lichens par rapport aux autres végétaux (Déruelle S.,Lallemant R., 1983)	24
<b>Tableau 02</b>	Sites de transplantation	34

### Introduction

La pollution de l'air est aujourd'hui certaine en Algérie. La plus importante source reste le transport routier et plus particulièrement le trafic urbain qui est en constante croissance dans les grandes agglomérations. Cette source est dynamique et difficile à appréhender tant à l'échelle unitaire (véhicule) qu'à l'échelle des flux. La part du transport routier dans l'émission de polluants urbains reste prépondérante, malgré une baisse des émissions, obtenue récemment après d'importants efforts technologiques et législatifs sur certains polluants régulièrement suivis. Les raisons sont essentiellement dues aux comportements d'achat et l'usage de l'automobile (Belhadj, 2009).

La région d'Annaba est en butte à un problème aigu de pollution atmosphérique urbaine et industrielle générée par différentes sources (unités industrielles, urbanisation anarchique, développement des voies de communication et extension du parc automobile) engendrant des rejets de polluants non contrôlés (Rahali, 2002).

En Algérie, la détection et la mesure de la pollution atmosphérique sont à l'ordre du jour. En effet, il y a plus de deux décennies que les autorités publiques ont pris conscience des problèmes liés à l'environnement. En effet la surveillance de la qualité de l'air, généralement assurée par des réseaux de capteurs physico-chimiques donnant des valeurs numériques, se heurte rapidement à la faible représentativité de l'échantillon, à des difficultés analytiques en raison de la présence fréquente de faibles teneurs, aux coûts et à la maintenance des appareils de mesure physicochimiques.

Une alternative consiste alors à avoir recours à des techniques intégratives de mesure capables d'apprécier la contamination du milieu, c'est-à-dire à des méthodes basées directement sur l'observation et l'étude des réactions d'organismes vivants exposés aux épisodes de pollution. Ces méthodes de bio indication ou, plus précisément, de bio surveillance s'appuient sur l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, cellulaire, tissulaire, biochimique, physiologique, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre l'évolution. La mesure des teneurs en polluants dans des végétaux sensibles permet de détecter la dégradation de la qualité de l'air avant que celle-ci n'affecte sévèrement le biotope (Maatoug et al., 2007).

## Introduction générale

---

Les lichens sont des organismes particulièrement bien adaptés pour l'étude des polluants atmosphériques gazeux et particulaires. Ils doivent cette efficacité à leurs particularités anatomiques et leurs caractéristiques physiologiques. Ils seront de ce fait sensibles aux retombées des polluants présents à la fois dans les dépôts secs et dans les dépôts humides (Garrec, Van Haluwyn, 2002). Ce constat a incité les chercheurs à utiliser les lichens de diverses manières.

La transplantation de lichens est une technique largement utilisée pour déterminer les dépôts atmosphériques d'éléments traces (Sloof, 1995) et les réponses physiologiques dans des zones polluées (Boonpragob et Nash, 1991).

Dans le même contexte se résume l'objectif de notre travail qui est l'étude de la réponse d'un lichen foliacé prélevé de la forêt de Bougous, *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale, et exposé au stress causé par la pollution atmosphérique au niveau de six stations de transplantations, et cela à travers un dosage de paramètres physiologiques et biochimiques.

Le présent manuscrit est structuré en trois parties. Après l'introduction générale, la Première partie, « **synthèse bibliographique** » donnant des notions générales sur la pollution atmosphérique, concept de bio indication et la monographie d'espèce étudiée. La deuxième partie, « **Matériel et Méthodes** » qui décrit les méthodes et les différents protocoles utilisés dans cette étude. Quant au troisième partie, « **Résultats et Discussion** » s'attache aux résultats obtenus et leurs discussions. Et enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et qui présente les perspectives de travail.

### **1. Définition de la pollution atmosphérique :**

Ce qui Constitue une pollution atmosphérique, c'est l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives (Laure, 1996).

En effet, quand le terme de pollution est pris à son sens le plus large, il englobe toute action par laquelle l'homme dégrade la nature.

La pollution atmosphérique découle des modifications de la composition chimique de l'air, sous l'effet des activités humaines. Elle peut se manifester depuis l'échelle urbaine et locale jusqu'à l'échelle planétaire et les risques liés à ces changements ne sont pas de même nature selon l'échelle spatio-temporelle concernée. Les changements de la composition chimique de l'air à l'échelle planétaire se manifestent notamment par un accroissement des teneurs en gaz à effet de serre tels que le gaz carbonique ou le méthane, et génèrent principalement un risque de modification majeure du climat de la planète. En revanche, les pollutions locales, en milieu industriel ou urbain par exemple, présentent surtout des risques pour la santé humaine du fait des teneurs en polluants tels que les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les particules, qu'on peut alors rencontrer. D'autres formes de pollution se manifestent également aux échelles intermédiaires, notamment sous forme de pollutions acido-oxydantes, et peuvent affecter les écosystèmes. (Belhadj ,2014)

### **2. Les polluants atmosphériques et leurs sources :**

Ils peuvent être divisées en 2 catégories : les sources anthropiques et les sources biogéniques (Arquès, 1998). Par définition, une source anthropique est une source de pollution liée à l'activité humaine ; elle se subdivise en 3 catégories : secteur industriel, secteur résidentiel et transport. Les sources biogéniques sont les sources associées aux émissions d'origines naturelles liées à la biosphère (ORS, décembre 2007). L'agriculture est également une source de pollution majeure avec en particulier les engrais azotés ou encore l'élevage des animaux à l'origine de pollution par le méthane (produit par leur système digestif), et par l'ammoniac (issu de la transformation de l'urée). Enfin, on intègre également dans les sources biogéniques les phénomènes naturels comme les nuages de cendres associées aux éruptions volcaniques (Arquès, 1998).

## 2.1 Les polluants primaires

Les polluants peuvent être classés comme primaires ou secondaires. Par définition, les polluants primaires sont ceux qui proviennent directement d'une source polluante identifiée, tels que le monoxyde de carbone provenant des processus de combustion et présent dans les gaz d'échappement des voitures, le dioxyde de soufre provenant de l'industrie (Mayer, 1999). Les polluants secondaires ne sont pas émis directement par des sources connues et identifiées. Au contraire, ils se forment dans l'air à la suite de réactions mettant en jeu les composés émis par les sources primaires, notamment lors d'épisodes météorologique particuliers. Un exemple majeur de polluant secondaire est l'ozone troposphérique, un des nombreux polluants secondaires qui forment le smog photochimique, mais on peut citer aussi les NPA (nitrates de peroxy acétyle) ou encore les COV (composé organiques volatiles) dits « COV secondaires ».

**-Le monoxyde de carbone (CO) :** il résulte de la combustion incomplète des combustibles fossiles (charbons, fuels, ...). Ce gaz est toxique (pour les êtres vivants) et peut causer des asphyxies mortelles à hautes concentrations.

**-Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) :** ce gaz est produit naturellement par les volcans, il peut également être produit par différents procédés industriels comme les industries métallurgiques et les raffineries de pétrole. Ce gaz, toxique pour tous les êtres vivants, aide à la création des particules (aérosols sulfuriques) qui empêchent les rayons solaires d'atteindre la terre, ainsi il joue un rôle de refroidissant de la planète (Pascal, 2009). Conformément aux directives européennes, une surveillance des principales installations industrielles a été mise en place au cours des années 80 et la mise en œuvre de disposition de réduction à la source a permis une baisse drastique des émissions du SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

**-Les oxydes d'azote (NOX) :** ils comprennent notamment le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Ce sont des gaz fortement toxiques qui résultent de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène à température élevée, phénomène qui se produit généralement lors des processus de combustion en particulier dans les moteurs à combustion interne et les centrales thermiques (Arquès, 1998).

C'est dans les zones ayant une forte circulation automobile que nous observons de fortes concentrations en NO et NO<sub>2</sub>. De plus, NO peut réagir avec l'oxygène de l'air pour se transformer en NO<sub>2</sub>.

**-Les composés organiques volatiles (COV) :** leur définition est spécifiée dans la Directive Européenne 2008/50/CE. Il s'agit des « composés organiques provenant de sources anthropiques et biogènes, autres que le méthane, capables de produire des oxydants photochimiques par réaction avec des oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire ». Une autre définition a été introduite par la directive 1999/13/CE : « tout composé organique, contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène halogène, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques, ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières ». L'émission anthropique des COV dans l'atmosphère provient de différentes sources, comme la combustion incomplète dans des moteurs ou des centrales thermiques, l'évaporation de produits raffinés, l'usage de solvants dans l'industrie, les peintures...

**-Les particules en suspension :** ces particules (notées « PM » en anglais pour « Particulate Matter ») sont d'une manière générale les fines particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Ces particules sont définies dans la directive 1999/30/CE comme « les particules passant dans un orifice d'entrée calibré avec un rendement de séparation de 50% pour un diamètre aérodynamique de 10  $\mu\text{m}$  (cas des PM 10) ou de 2,5  $\mu\text{m}$  (cas des PM 2,5) ». Ces particules proviennent de sources naturelles comme les éruptions volcaniques, la végétation (pollens...), les incendies de forêts... ou de sources anthropiques comme les émissions industrielles, la combustion des fossiles combustibles... On distingue 4 types de particules (C.E., 2008) :

-PM 10 particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10  $\mu\text{m}$  ;

-PM 2.5 dont le diamètre est inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ , appelées « particules fines » ;

-PM 1 dont le diamètre est inférieur à 1,0  $\mu\text{m}$ , appelées « particules très fines » ;

-PM 0,1 dont le diamètre est inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ , appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules. Toutes ces particules sont dangereuses tant pour la santé des êtres humains, que pour la végétation. Par contre, seules les particules PM10 et PM2.5 sont réglementées et ciblées par les Directives Européennes. L'augmentation des concentrations en particules dans l'air est corrélée avec l'augmentation des maladies cardiovasculaires, des allergies, des cancers du poumon, ce qui conduit à une diminution de l'espérance de vie (Pascal, 2009).

**-Le Méthane** : ce gaz n'est pas réglementé en tant que polluant dans l'atmosphère par les Directives Européennes, mais peut être un bon traceur de certaines pollutions anthropiques. On le trouve à l'état naturel produit par des organismes vivants. Il constitue l'essentiel du gaz naturel qui est exploité comme combustible fossile. Il est l'un des principaux gaz à effet de serre et a un rôle important dans le réchauffement climatique. Depuis l'ère industrielle, la concentration de méthane n'a cessé d'augmenter dans l'atmosphère. Elle est passée de 700 ppbv au début du 19ème siècle à 1750 ppbv aujourd'hui en raison de l'augmentation des activités humaines liées à l'industrialisation et à l'urbanisation.

## 2.2. Les polluants secondaires

Ce sont les polluants présents dans l'atmosphère qui se forment à la suite de réactions mettant en jeu les composés émis par des sources primaires ou encore qui ne proviennent pas d'une source directement polluante. Leur présence dans l'atmosphère est difficile à réguler car leur existence ne provient pas directement des activités anthropiques.

**-L'Ozone** : dans la basse atmosphère et sous des conditions climatiques particulières (comme une augmentation de l'irradiation solaire), en zone urbaine, les émissions de précurseurs sont importantes : les hydrocarbures et les oxydes d'azote sont donc présents en grande quantité. Beaucoup d'ozone se formera mais, celui-ci réagira très vite, une fois formé, avec le monoxyde d'azote dont l'apport est constant. L'ozone sera donc en partie consommé au niveau des agglomérations et généralement présent en faible quantité.

Comme pour tous les polluants secondaires, il est difficile de limiter la production d'ozone à partir de la mise en œuvre de limitations des émissions. Bien que la concentration globale des autres polluants dans l'atmosphère tende à baisser, celle de l'ozone reste intacte ou parfois subit de légères augmentations au cours des dernières années. (El barakeh, 2012)

## I.3. La dispersion des polluants atmosphériques :

Les masses d'air sont les principaux vecteurs de circulation des polluants. Leur circulation est sous l'influence :

✚ **de la topographie**: le relief naturel mais aussi celui de l'urbanisation ;

✚ **de la situation géographique**: sous l'effet du rayonnement solaire, la terre se réchauffera plus vite que la mer dans l'après-midi et en fin de journée. Le phénomène de brise de mer (ascension de l'air chaud au-dessus des terres, création de zone de convergence au-

dessus de la côte) est ainsi créé. De même, une brise de terre est engendrée la nuit et tôt le matin, quand la terre se refroidit plus vite que la mer ;

 **des conditions météorologiques :**

-**L'ensoleillement** : la température agit sur la chimie des éléments. L'action des rayons ultraviolets favorise la pollution d'origine photochimique tandis que le froid diminue la volatilité de certains gaz.

-**L'humidité** : favorise certaines réactions chimiques telles que la formation d'acides comme ( $\text{HNO}_2$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

-**L'inversion thermique** : En situation normale, la température décroît avec l'altitude et l'air chaud contenant les polluants au niveau du sol, se déplace verticalement. (Belhadj ,2014)

### 3. Les effets des différentes substances polluantes :

Bien que la concentration des polluants soit très faible dans l'atmosphère, ces substances ont des conséquences préjudiciables sur la santé humaine, l'environnement, les biens matériels (Lacour, 2001)

#### 3.1. Impact sur l'environnement :

Les végétaux subissent les agressions de la pollution atmosphérique de manière continue. Les atteintes peuvent être perceptibles et se traduisent par des nécroses sur les feuilles, des chloroses (dégradation de la chlorophylle provoquant un jaunissement des feuilles ou des aiguilles qui se détachent par la suite), une réduction du nombre de fleurs ou même par un décollement de l'épiderme foliaire.

Elles peuvent aussi se manifester de façon plus diffuse en exerçant sur la végétation un ralentissement de la photosynthèse et de la croissance, entraînant au niveau des cultures une perte de rendement. Les végétaux sont aussi attaqués par les dépôts acides au sol qui fragilisent les racines. L'acidification des sols facilite le lessivage d'éléments minéraux qui ne sont plus disponibles pour les plantes. Elle modifie le recyclage de la matière organique en perturbant les microorganismes du sol. Ces microorganismes participant à la formation d'humus sont détruits et la litière non dégradée s'accumule, diminuant ainsi la vitesse de recyclage des éléments nutritifs minéraux. La végétation s'en retrouve affaiblie et se développe mal. Les végétaux étant les maillons importants des écosystèmes en tant que producteurs de matière organique, une atteinte de la végétation a des conséquences sur l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème,

y compris sur les communautés animales. Bien entendu, les polluants peuvent avoir des effets directs sur les animaux comme par exemple des pesticides sur les oiseaux (Schutz, 1995).

### 3.1.1. Effets sur l'environnement au niveau local et régional :

Les conséquences de la pollution sur le bâti et sur la végétation sont les principaux effets qui sont relevés. Ces aspects sont cependant peu traités. Les effets de la pollution sur les végétaux peuvent se faire sentir localement mais aussi à une échelle plus grande, notamment à propos des pluies acides : les feuilles de plants de tabac par exemple réagissent aux polluants présents dans l'air, notamment à l'ozone ; « les oxydes d'azotes sont aussi responsables des pluies acides ».

#### A. Les pluies acides :

Les pluies acides sont un terme utilisé pour décrire toute forme de précipitation acide (pluies, neige, grêles, brouillard). Le dioxyde de soufre et les dioxydes d'azote sont les principales causes de pluies acides. Ces polluants s'oxydent dans l'air pour former de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ou des sels. On les retrouve dans les nuages et les précipitations parfois à des milliers de kilomètres de leur point d'émissions, (pollution transfrontière à longue distance). Ceci concourt à des dépôts acides et à l'acidification accrue des pluies par rapport à celles résultant de la seule présence de gaz carbonique dans l'air, ce qui fait que le pH « naturel » d'une pluie est toujours acide, de l'ordre de 5,6.

D'autres polluants peuvent contribuer aux pluies acides, notamment l'acide chlorhydrique émis par incinération de certains déchets plastiques, ou l'ammoniac des activités agricoles. Les pluies acides modifient les équilibres chimiques des milieux récepteurs, en particulier lorsque ceux-ci sont déjà acides. Ceci peut se répercuter par des atteintes sur la faune et la flore aquatique, des carences nutritives engendrent des chutes de rendement et des lésions visibles chez les végétaux, ainsi que des jaunissements et la défoliation des arbres (Beyer *et al*, 1990).

#### B. L'eutrophisation :

L'eutrophisation est due à un apport excessif en nutriments et matières organiques biodégradables issus de l'activité humaine. Elle s'observe surtout dans les milieux aquatiques dont les eaux sont peu renouvelées. Stimulées par un rapport substantiel en certains nutriments

dont principalement le phosphore et l'azote, le phytoplancton et certaines plantes aquatiques croissent et se multiplient de manière excessive, ce qui conduit, lorsqu'elles se décomposent, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques biodégradables. Les bactéries, qui dégradent cette matière organique, prolifèrent à leur tour, en appauvrissant de plus en plus l'oxygène de l'eau (Ramade, 2002).

### **3.1.2. Effets sur l'environnement au niveau planétaire :**

#### **A. L'effet de serre**

En ce qui concerne l'effet de serre, les documents analysés abordent plusieurs aspects : le risque planétaire en lui-même puis ses différentes conséquences, le réchauffement de la Terre, la hausse du niveau des mers, les surprises climatiques et les effets collatéraux.

Planète en danger ? « Allons-nous tuer la Terre ? », telle est la question... Pour certains, oui, « il y a péril en la demeure ». D'autres doutent encore : il faut encore attendre : « toutes les questions scientifiques ne sont pas résolues ». La première conséquence de l'effet de serre, c'est le réchauffement de la planète. Le mécanisme du réchauffement est indispensable à la vie sur Terre mais il est gravement amplifié par l'Homme. Les différents indicateurs sont les concentrations dans l'atmosphère des différents gaz à effet de serre et l'évolution de la température au fil des années. Les premiers signes probables sont les températures exceptionnelles, les pluies abondantes, la fonte de tel ou tel glacier (Lacour, 2001).

#### **B. Changements climatiques :**

Après la hausse du niveau des mers, l'effet de serre est accusé de modifier les climats, à différents degrés. La modification des climats locaux voire la recrudescence des événements climatiques violents est suspectée. La question qui est sur toutes les lèvres est alors la suivante : quels sont les liens entre les récents caprices de la météo, et l'effet de serre ? L'effet de serre est suspecté de provoquer la hausse du niveau des mers et des modifications climatiques, parfois radicales et violentes. Ces événements s'accompagnent d'autres phénomènes, regroupés sous le terme « effets collatéraux » : risques sanitaires, répercussions économiques, modifications des modes de vie et perturbation des écosystèmes et diminution de la couche d'ozone. (Belhadj ,2014)

#### **C. Le trou dans la couche d'ozone :**

La couche d'ozone localisée dans la stratosphère filtre à l'extérieur, les rayonnements dans la partie ultra-violet (UV) du spectre qui est préjudiciable aux cellules. Sans ozone, la vie sur terre ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui. Bien que les phénomènes naturels puissent causer la perte provisoire de l'ozone, le chlore et le brome libérés des composés synthétiques tels que les CFCs sont maintenant considérés comme cause principale de cet amincissement, les émissions de CFCs représentent environ 80% de l'amincissement total de l'ozone stratosphérique. (Belhadj,2014)

### 3.2. Impact sur la santé :

Les polluants atmosphériques pénètrent dans l'organisme par 3 voies possibles :

- ✚ Les voies respiratoires : par inhalation (voie principale). De nombreuses enquêtes épidémiologiques et tests toxicologiques montrent que les atteintes respiratoires (irritation des muqueuses des voies aériennes et augmentation de certaines pathologies comme l'asthme, bronchiolites, allergies...) sont plus fréquentes dans les zones de forte pollution atmosphérique. La majorité des gaz atteint les alvéoles pulmonaires. Les particules, quant à elles, y pénètrent plus ou moins selon leur taille.
- ✚ La voie digestive : par ingestion d'aliments contaminés par retombées des polluants sur le sol et dans l'eau. (Dioxines issues de certains processus de combustion que l'on retrouve dans le lait de vaches, pesticides, métaux lourds).
- ✚ Les voies cutanées (mode marginal de pénétration) : concerne quelques toxiques (ex : insecticides) pouvant traverser la peau pour pénétrer dans l'organisme et provoquer des pathologies.

L'analyse des effets à court terme de la pollution atmosphérique a permis d'observer que les niveaux actuels avaient encore un effet décelable par l'épidémiologie. Ainsi, les études menées dans ce domaine ont permis d'observer un impact significatif des polluants atmosphériques urbains sur la mortalité, en particulier pour cause cardiaque et respiratoire (Pope et Dockery, 2006).

Quel que soit l'indicateur, la relation est linéaire et il n'a pas été observé de seuil en dessous duquel il n'existerait pas d'effet décelable sur la mortalité au sein d'une population. D'autre part, certaines études américaines de cohortes s'attachant aux effets à long terme de la pollution (notamment pour les particules en suspension) montrent que l'impact sanitaire de ces

polluants n'est pas limité au seul effet à court terme. Ces études ont en effet observé un impact significatif de la pollution particulaire sur l'espérance de vie (Künzli *et al*, 2005).

### **3.3. Impact sur les matériaux :**

Les matériaux sont essentiellement affectés par la pollution acide (surtout liées au SO<sub>2</sub>) qui entraîne une dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles. Il s'agit bien souvent de la décomposition de certaines pierres calcaires sous l'effet des acides. Les particules interviennent plutôt sur les aspects de salissures des bâtiments. La pollution atmosphérique met en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façade ou de restauration des monuments. (Belhadj,2014)

### **3.4 Impact Sur les végétaux :**

#### **A. Effets sur les végétaux supérieurs :**

De fortes concentrations de certains polluants peuvent conduire à des nécroses visibles sur les plantes. La pollution de l'air peut également entraîner une réduction de la croissance des plantes, même sans dommages visibles (par exemple l'ozone peut provoquer une baisse de la production agricole de céréales comme le blé ou une résistance amoindrie des plantes à certains agents infectieux. Aussi les phénomènes de pluies acides qui, en liaison avec d'autres facteurs (sécheresse, parasites...) entraînent le dépérissement des forêts et la dégradation des sols. Le dioxyde de soufre (formation d'acide sulfurique) et l'oxyde d'azote (formation d'acide nitrique) sont liés directement à la formation des pluies acides tandis que l'ozone altère la physiologie des arbres forestiers.

#### **B. Effets sur les végétaux inférieurs :**

##### **Sur les bryophytes :**

Les bryophytes, et les mousses en particulier tirent l'essentiel de leur nourriture de l'air et des nutriments apportés par l'eau, par la pluie ou les dépôts de particules et aérosols. De nombreuses bryophytes sont vulnérables à l'acidification de l'air, à sa pollution et l'eutrophisation des milieux. Elles jouent à ce titre un rôle important dans l'épuration de l'air, mais aussi en matière d'accumulation de certains polluants (métaux lourds et radionucléides notamment). Ce sont aussi des organismes pionniers important dans les processus de résilience écologique.

**Sur les lichens :**

L'influence de la qualité de l'air sur la flore lichéneuse est un facteur écologique primordial sur leur développement, à la grande différence des plantes supérieures qui se nourrissent d'oligoéléments présents dans la terre, et s'y réfugient en hiver. Ainsi les lichens stockent toutes ces microparticules (plomb, fluor, métaux lourds, radioactivité...) et grâce à leur longévité remarquable, puisqu'ils peuvent être plus que centenaires, ils sont considérés comme d'excellents bioaccumulateurs. Ces particularités et surtout leurs sensibilités différentes suivant les espèces sont à l'origine de méthodes d'évaluation de la pollution. En fonction de leur présence ou absence, de leur croissance et de leur développement, de leur abondance en quantité et en espèces, ces bio indicateurs nous renseignent sur le degré de pollution des zones étudiées. (Gaci,2014).

**1. Définition :**

Un lichen est une structure autonome, le thalle lichénique, résultant de l'association symbiotique entre deux catégories de partenaires :

Le partenaire fongique, hétérotrophe, appelé mycosymbiote, pratiquement toujours un champignon ascomycète, qui représente plus de 90 % de la biomasse lichénique, dont les hyphes microscopiques enchevêtrées emprisonnent le partenaire chlorophyllien, autotrophe, appelé photo symbiote, qui est une algue verte (phycosymbiote) ou une cyanobactérie (cyanosymbiote) (Coste, 2011).

**2. Les partenaires de la symbiose lichénique et leur rôle :****2.1. Le mycosymbiote : le champignon**

Le champignon est un organisme thallophyte, Eucaryote, dépourvu de chlorophylle, dépourvu de vaisseaux conducteurs et se reproduisant à l'aide de spores. La paroi contient de la callose, de l'hémicellulose et de la chitine (voisine de la chitine des insectes) ; on y trouve également du mannitol, de l'arabitol et des glucides assurant une pression osmotique élevée ce qui limite la dessiccation du thalle.

Ce mycosymbiote protège les cellules algales contre la dessiccation et l'excès de lumière. Les hyphes en relation directe avec l'atmosphère et le substrat captent l'eau et les sels minéraux. Le champignon des lichens est en général un ascomycète, rarement un basidiomycète exceptionnellement un autre champignon (Collombet, 1989).

**2.2. Le phycosymbiote : l'algue**

L'algue est un organisme eucaryote se présentant sous forme de petites cellules sphériques isolées ou en colonies. Elle est pourvue de chloroplastes contenant la chlorophylle pouvant utiliser l'énergie solaire pour élaborer certains de constituants organiques à partir de CO<sub>2</sub> atmosphérique, de l'eau et des sels minéraux fournis par le champignon. Dans la plupart des lichens, l'algue est une Chlorococcale appartenant au genre *Trebouxia*, elle se reproduit par bipartition ou par spores non flagellées ; en seconde position une Trentepohliale (genre *Trentepohlia*) contenant des pigments rouge orangé. (Coste, 2011).

### 2.3. Le cyanosymbiote : la cyanobactérie

La cyanobactérie est un organisme procaryote, sans noyau ni chloroplaste ; contenant des pigments assimilateurs vert bleuâtre (chlorophylle a et caroténoïdes associés à une protéine, la phycocyanine) et la cyanophycine comme réserve protidique. La reproduction, asexuée, se fait bipartition (pas de spores).

Les lichens sont des organismes pionniers colonisant tous les milieux terrestres, où ils recherchent des supports stables (roches, écorces, sol nu...). Ils participent à la formation progressive d'un sol et à l'installation des végétaux. En effet, l'association lichénique apporte des propriétés qu'on ne trouve pas chez l'un ou l'autre des partenaires :

- La reviviscence : la capacité de passer rapidement, réversiblement et répétitivement de l'état sec à l'état hydraté ;
- Un pouvoir lithogène : qui leur permet de s'installer en pionnier sur des substrats difficiles ;
- La résistance aux températures extrêmes : l'assimilation peut encore être active à - 40 °C ;
- L'originalité des voies métaboliques avec l'élaboration de substances spécifiques, les métabolites secondaires encore appelées acides lichéniques.

### 3. Principaux types de thalles :

L'appareil végétatif du lichen est un thalle (Thallophytes) ne présentant ni feuilles, ni tiges, ni racines ni appareil conducteur. Il est de forme variée et portent divers types d'organes reproducteurs. L'observation à l'œil nu ou à la loupe des lichens permet de distinguer plusieurs types morphologiques. (Coste,1989 ; Van-Haluwyn *et al.*,2009).

#### A. Les thalles crustacés :

Les lichens au thalle crustacé forment une croûte qui adhère au support sur toute la surface et ne peut en être détachée.

#### B. Les thalles squamuleux :

Ces espèces sont composées d'écailles ou de lobes plus ou moins adhérents au substrat, mais pouvant aisément s'en détacher.

#### C. Les thalles foliacés :

Ce type de lichens à la forme d'une feuille plus ou moins ramifiée, adhérente à son substrat, ou bien fixée au substrat par un crampon central unique.

#### D. Les thalles gélatineux :

Ils forment, lorsqu'ils sont hydratés, des lames gélatineuses plus ou moins découpées qui sont souvent confondues avec des algues ou cyanobactéries ; à l'état sec, ils perdent cet aspect

gélatineux, noirâtre (parfois aussi bleuâtre à cause de la pruine), et deviennent très faibles. Ce type de thalle est celui des collémacées (*Collema*, *Leptogium*, etc.).

### E. Les thalles complexes (ou composites)

Sont formés d'un thalle primaire plus ou moins foliacé, squamuleux ou crustacé, adhérent au substrat, sur lequel se développe un thalle secondaire dressé, podétions des *Cladonia* et pseudopodétions des *Stereocaulon*. Les pseudopodétions sont buissonnantes, recouverts d'écaillés à fonction assimilatrice (les phylloclades), alors que les podétions sont de formes très diverses : « tiges » simples plus ou moins pointues ou évasées en entonnoirs (ils sont dans ce dernier cas nommés scyphes), buissons plus ou moins denses et plus ou moins squamuleux.



**Thalle fruticuleux**

**Thalle complexe**



**Thalle crustacé**

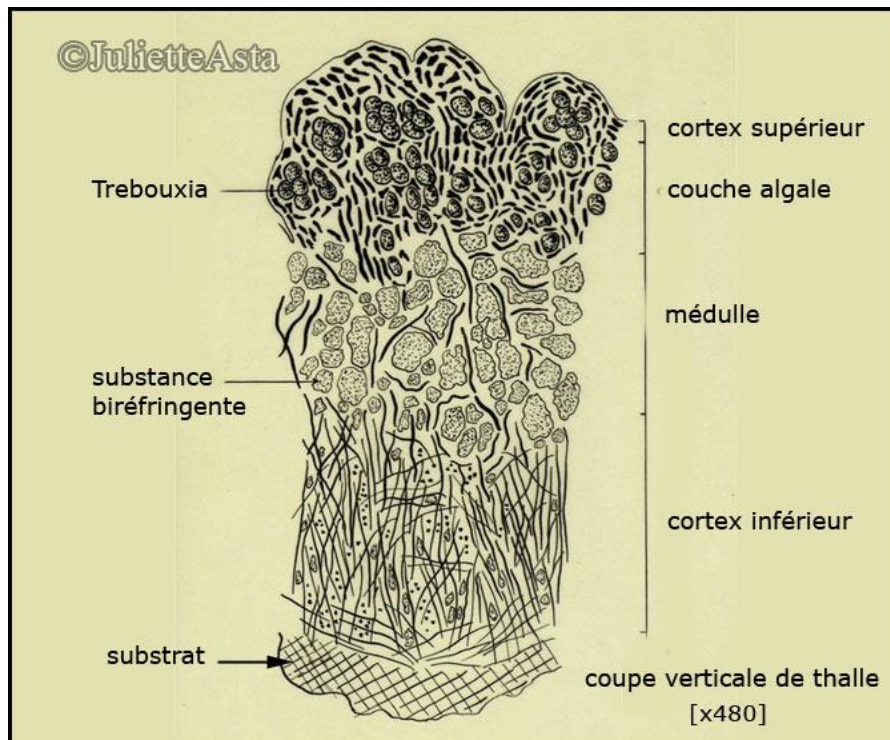
**Thalle foliacé**

**Figure 01** : Les principaux types de thalles (ACFJ Association pour la Connaissance de la Flore du Jura) (8 septembre 2012) : Journée à la découverte des lichens.

### II.4. Structure du thalle :

Le thalle est formé par un réseau de filaments nommés **hyphes** (ils sont comparables au mycélium des champignons). C'est au milieu d'un enchevêtrement de ces filaments que se

trouvent les algues. Au niveau de la partie inférieure du thalle, on observe un nouvel entrelacement de filaments servant à fixer le lichen à un support, ce sont les **rhizines**.



**Figure 02 :** Coupe morphologique d'un thalle.

#### A. Structure homéomère :

Elle est homogène dans toute l'épaisseur du thalle, cas des lichens gélatineux, principalement chez les Collema.

#### Structure hétéromère :

Elle révèle une stratification dans laquelle le mycobionte apparaît comme le constituant majeur, le photobionte restant en général localisé dans une seule zone, bien définie, du thalle. On distingue donc :

- Un cortex supérieur, une médulle et un cortex inférieur de nature fongique et une zone privilégiée occupée par le photobionte entre le cortex supérieur et la médulle (Boulard, 1990).  
Cependant, il existe deux types de structure hétéromère :

- **Structure radiée :**

Chez la plupart des lichens fruticuleux, elle est facilement identifiable sur une coupe transversale par sa couche algale (fermée) entourant la médulle et par la présence d'un seul cortex entourant la couche algale.

- **Structure stratifiée :**

Elle se rencontre chez la plupart des thalles foliacés, chez de rares lichens fruticuleux en lanières et quelques thalles crustacés.

On observe sur une coupe transversale, un cortex supérieur, une couche algale, une médulle et un cortex inférieur qui peut donner naissance à des rhizines (Clauzade et Roux, 1985).

## **5. La Reproduction des lichens :**

On constate dans le domaine de reproduction des lichens une grande inégalité entre les deux partenaires de symbiose puisque les organes de reproduction que l'on peut observer sur les lichens appartiennent tous au champignon et l'algue ne subit qu'une multiplication végétative à l'intérieur du thalle.

Le lichen a trois modes de reproduction : reproduction végétative, reproduction asexuée et reproduction sexuée. (Grube et Hawksworth, 2007).

### **A. La reproduction végétative :**

La reproduction végétative se fait par simple fragmentation du thalle : des organes végétatifs se détachent, sont emportés puis s'accroissent. Ces organes végétatifs sont soit des sorédies soit des isidies. (Sérusiaux *et al*, 2004).

### **B. Reproduction sexuée :**

Deux hyphes fongiques sexuellement différenciées fusionnent et donnent, à la surface du thalle, des structures en forme de boutons (**les apothécies**), ou de coupes plus ou moins fermées (**les périthèces**), dans lesquelles des cellules particulières (les asques) vont élaborer les ascospores, en général 8 spores par asque mais le nombre peut varier.

Après leur libération, ces spores issues d'une reproduction sexuée, germent et donnent des hyphes qui capturent des algues pour pouvoir redonner un nouveau thalle lichénique.

Entre les asques se trouvent des cellules stériles : les paraphyses, dont les extrémités renflées peuvent contenir des pigments responsables de la couleur de l'hyménium. (Sérusiaux *et al.*, 2004).

### **C. Reproduction asexuée :**

Le mycobionte produit, chez de nombreuses espèces, des « spores » sans faire intervenir de processus sexuel évident. Ces spores sont appelées des conidies (ou pycnospores) ; elles sont produites à l'extrémité d'hyphes de forme et de dimensions variables, appelées les conidiophores ; les organes qui les contiennent, généralement de petites outres, enfoncées dans

le thalle ou parfois sessiles sur celui-ci, sont appelés des pycnides. Les conidies sont toujours dispersées seules (c'est-à-dire sans le photo-bionte) et dès lors, pour reconstituer un thalle lichénisé, elles doivent obligatoirement retrouver leur partenaire algal. (Van Haluwyn et Lerond, 1993).

### **6. Physiologie des lichens :**

Du point de vue biochimique, les substances fondamentales des lichens sont communes à tous les êtres vivants : eau, substances organiques et substances minérale (Coste, 2008).

- **Physiologie de l'eau :**

La teneur en eau des lichens est très variable selon les fluctuations microclimatiques, les variations de teneur en eau sont plus grandes pour les lichens croissant sur des substrats exposés au soleil que pour ceux des stations ombragées (Friardi, 2012).

L'absorption de l'eau se produit surtout au niveau des ouvertures dans le cortex ou des structures arachnoïdes quand elles sont externes. Le stockage se fait dans les méats entre les éléments du thalle ainsi que dans les membranes qui gonflent. Mais c'est surtout au niveau de la zone médullaire que la teneur en eau est la plus forte. Le mécanisme de l'absorption et de la rétention de l'eau est essentiellement dû à des forces physiques ou aux caractères hygroscopiques des substances membranaires.

Les constituants membranaires sont différents pour l'algue et le champignon. Ce sont essentiellement la cellulose externe doublée par une couche interne de callose pour les algues. La membrane des hyphes de champignon est caractérisée par l'absence de cellulose et la présence constante de callose et de chitine. Les lichens possèdent également un équipement enzymatique et vitaminique. Les enzymes sont entre autres une lichénase et une maltase. Les vitamines sont produites par les deux symbiotes et jouent un rôle important dans le métabolisme. La vitamine C est produite en quantité appréciable avec d'autres vitamines du groupe B (biotine, riboflavine, acide folique...) (Coste, 2008).

### **7. L'écologie des lichens :**

Les lichens colonisent les milieux terrestres suffisamment stables et humides, et se rencontrent même dans certains milieux aquatiques ainsi on peut distinguer trois principaux types de peuplements :

- **Sur les rochers (les lichens saxicoles) :**

Les lichens qui colonisent les rochers sont très nombreux et diversifiés ; il est possible de distinguer des lichens calcifuges (sur terrains non calcaires) et d'autres calcicoles.

- **Sur le sol (les lichens terricoles) :**

Les lichens terricoles se trouvent sur le sol nu ou sur les mousses du sol ou des rochers. Dans des pelouses, landes, bois clairs. Un certain nombre d'entre eux vivent en saprophytes aux dépens de la matière organique présente dans le sol.

- **Sur les végétaux (les lichens épiphytes) :**

Colonisant les écorces de nombreux arbres et arbustes, les lichens corticoles sont très abondants et variés. Les essences, résineuses montrent une flore légèrement différente de celle notée sur les essences feuillues. D'autres groupements se rencontrent sur le bois mort (lichens lignicoles) ou sur les feuilles persistantes (lichens folicoles).

Les lichens sont des végétaux pionniers qui colonisent tous types de milieux terrestres. Ils se rencontrent sur tous les climats et toutes les latitudes, ils sont toutefois plus abondants au nord qu'au sud. La répartition des lichens est influencée par différents facteurs : l'eau, la lumière, la température et le substrat (Goujon, 2004).

**A. L'eau :** Selon Ozenda et Clauzade (1970), le problème de l'eau est très important et joue un rôle capital dans la répartition des lichens, notamment parce que le degré d'hydratation du thalle conditionne les fonctions vitales et qu'un même lichen peut passer très rapidement de l'état de vie active à celui de vie ralentie, suivant les variations de son hydratation (phénomène de reviviscence).

**B. La lumière :** Les lichens sont tous des végétaux héliophiles ; seule une minorité d'espèce, comprenant presque exclusivement des lichens à cyanophycées, préfèrent les habitats ombragés, par exemple sous couvert forestier. Pour tous les autres lichens, la richesse tant en espèces qu'en individus augmente avec la luminosité des stations, comme on l'observe pour les roches ou les troncs d'arbres isolés. Les lichens ont 4 à 10 fois moins de chlorophylle que les plantes à poids égal, c'est une nécessité pour eux d'avoir des exigences en lumière plus grandes (Ozenda et Clauzade, 1970).

**C. La température :** Nous considérons deux aspects de son action : d'une part l'effet sur l'intensité des fonctions métaboliques et d'autre part la résistance aux conditions extrêmes de température.

**D. L'action sur le métabolisme :** La photosynthèse varie de la même manière en fonction de la température, mais la courbe est nettement décalée vers les basses températures (Des Abbayes et al., 1978 et Serusiaux et al., 2004).

**E. La résistance aux températures extrêmes :**

Elle est tout à fait remarquable, surtout du côté des basses températures, de nombreuses espèces peuvent résister à l'état hydraté à un séjour de plusieurs jours à  $-75^{\circ}\text{C}$ , par contre la chaleur est moins supportée et un séjour à  $50^{\circ}\text{C}$  environ arrête rapidement les échanges gazeux d'une manière irréversible. Mais à l'état desséché la résistance est beaucoup plus considérable. Des échantillons ont résisté à  $-183^{\circ}\text{C}$  pendant 18 heures et d'autre part d'autres échantillons ont résisté plus de 30 minutes à une température égale à  $100^{\circ}\text{C}$  (Ozenda et Clauzade, 1970).

La capacité des lichens à grandir même dans des conditions climatiques extrêmes tient à leur biologie particulière. En tant qu'organismes poikilohydres, c'est-à-dire capables de supporter une humidité variable qui dépend des conditions du milieu, ils résistent aux périodes de sécheresse et aux températures très élevées car ils survivent en étant déshydratés grâce à une inhibition des processus métaboliques. Lorsqu'il pleut, le thalle des lichens absorbe rapidement des quantités largement supérieures à sa masse anhydre et le métabolisme est réactivé (Le gac *et al.*, 2006).

**-Autres facteurs atmosphériques :**

- **Le vent :**

Son action physiologique est indirecte et se fait par le biais d'une augmentation de la vitesse de dessiccation des thalles. Une action directe, mécanique, est la dispersion des fragments de lichens, jouant un rôle important dans la multiplication végétative du lichen (Ozenda et Clauzade, 1970).

- **Les pollutions chimiques :**

Les lichens sont extrêmement sensibles, beaucoup plus semble-t-il que les autres végétaux, aux impuretés contenues dans l'atmosphère et en particulier aux fumées et aux poussières industrielles et domestiques, ce qui les élimine des grandes villes et de leur périphérie mais permet en revanche de localiser ces zones de pollution (Ozenda et Clauzade, 1970).

Les lichens sont très diversifiés et leur sensibilité à divers polluants (ozone, métaux lourds, azote, etc.) est différente en fonction des espèces. Leur inventaire peut fournir une réponse très nuancée aux divers agents polluants se trouvant dans l'air ce qui implique une grande prudence dans l'interprétation des résultats. Ils ont un grand pouvoir d'accumulation. Ils accumulent de façon sélective des quantités très importantes de substances prélevées dans l'atmosphère comme le soufre, le plomb, le Fluor, les éléments radioactifs, etc. Cette propriété permet de les utiliser comme bioindicateurs d'une pollution spécifique.

La surface qu'ils exposent ne présente aucune protection, comme une cuticule cireuse, par exemple, mais au contraire absorbe de manière efficace non seulement les substances gazeuses nécessaires à leur survie (nutriments) mais aussi les polluants, sous forme de poussières ou de gaz qui leur sont associés, sans aucune possibilité de filtrage. De plus, ils vivent plusieurs années, sans renouvellement possible de leurs parties les plus exposées, ce qui aboutit à une concentration parfois considérable de certains polluants. La plupart des lichens, malgré la présence de mécanismes intrus de neutralisation des substances nocives ne peuvent cependant, survivre en atmosphère polluée. Leur activité métabolique est dépendante principalement du taux d'humidité : elle est optimale par temps humide et froid, et cesse par temps chaud et sec.

### **8. Modification de la végétation lichénique en réponse aux changements de la pollution atmosphérique (D'après Fiore-Donno, 1996).**

On distingue cinq zones de végétation lichénique soit :

1. Désert lichénique.
2. Ville et zone industrielle : zone à forte pollution due essentiellement au SO<sub>2</sub> qui réduit radicalement le nombre d'espèce fréquent ailleurs, produit une acidification secondaire des écorces, ces conditions favorisent la présence d'espèces acidophiles et réduisent celle d'espèces basophiles.
3. Auteur des villes, il existe une zone où coexistent la pollution due au SO<sub>2</sub> et l'effet fertilisant de la campagne environnante. Les espèces baso-nitrophiles résistantes à la pollution, fréquentes ailleurs, sont présentes, même si de manière réduite.
4. En s'éloignant des zones polluées, on trouve une situation intermédiaire, où apparaissent des espèces sensibles, mais des signes d'eutrophisation des écorces sont donnés par l'absence d'espèce qui ne supporte pas cette dernière.
5. Dans la zone la moins polluée, en plus des espèces citées auparavant, on trouve des espèces acidophiles. Il est à noter que les espèces crustacées, aux échanges faibles et à la croissance plus lente que les espèces foliacées et fruticuleuses, sont moins affectées par la pollution atmosphérique et résistent mieux à l'environnement industriel et urbain. Ainsi, lors d'une première observation de la flore lichénique d'un environnement, un premier diagnostic de la qualité de l'air peut être avancé en fonction des types de thalles majoritairement présents sur les troncs d'arbres.

- **Les facteurs liés au substratum :**

Selon Ozenda et Clauzade (1970), les lichens se développent dans des milieux très variés, sur les substrats naturels ou artificiels souvent inattendu comme les métaux, le verre, le cuivre, les os, le carton. Toute fois ils font défaut dans la mer.

- **Les facteurs biotiques :**

Ce sont essentiellement :

- la concurrence vitale s'exerçant entre les lichens eux même et aussi entre les lichens et les autres plantes.

- l'influence de la végétation de bryophytes et de plantes vasculaires qui modifie localement les conditions climatiques et substratiques, créant des microclimats et des microstations.

- l'action des animaux et principalement de l'homme, se manifestant surtout mécaniquement : Piétinement, fragmentation des thalles et chimiquement par l'enrichissement de l'atmosphère et du substrat en ammoniac, sels ammoniacaux, nitrate, phosphates (Ozenda et Clauzade, 1970).

**Sur les végétaux : les lichens épiphytes :**

Colonisant les écorces de nombreux arbres et arbustes, les lichens corticoles sont très abondants et variés. Les essences, résineuses montrent une flore légèrement différente de celle notée sur les essences feuillues. D'autres groupements se rencontrent sur le bois mort (lichens lignicoles) ou sur les feuilles persistantes (lichens folicoles).

**9. Rôles et usages des lichens :**

Les lichens ont été utilisés depuis l'Antiquité comme plantes médicinales et pour de multiples autres usages alimentaires ou artisanaux (Collombet , 1989).

**Usages Alimentaire :**

Dans l'écosystème, Les lichens s'insèrent dans les chaînes alimentaires sont une source importante de nourriture pour de nombreuses espèces, y compris parfois pour de grands mammifères et certaines chenilles de papillons nocturnes.

**Usages médicaux :**

Depuis toujours, les lichens sont utilisés en médecine traditionnelle dans toutes les sociétés humaines pour leur potentiel antibiotique. Ils sont également utilisés en homéopathie pour la fabrication de sirops et de pastilles.

**Usages industriels :**

Les huiles essentielles de certaines espèces de lichens sont utilisées pour la fabrication de parfums et pour la fabrication artisanale de teintures. D'autres utilisations telles que la

décoration des tables, la confection des maquettes (où ils représentent des arbres) et celle de couronnes funéraires sont courantes dans certains pays.

**La bio-indication :**

Du fait de leur sensibilité ou de leur capacité d'accumulation de polluants, les lichens sont des indicateurs de pollution utilisés pour la bio surveillance. Ils permettent d'étudier, la chimie et la stabilité des sols, la hauteur moyenne de l'enneigement (certaines espèces ne supportent pas l'humidité permanente due à la couverture nivale), et surtout le degré de pureté de l'atmosphère. Les lichens possèdent de nombreuses particularités biologiques et structurales qui en font des témoins fidèles de la pollution. N'ayant ni racine, ni tige, ni feuille, ni appareil conducteur, ils sont incapables d'effectuer une régulation hydrique. Ils sont soumis aux fluctuations du milieu et peuvent absorber et accumuler sans distinction des quantités très importantes de substances prélevées dans l'atmosphère (air, eau, poussières, substances et gaz dissous).

Contrairement aux plantes supérieures, ils sont dépourvus de moyens de lutte contre la pollution. Sans cuticule, ni stomate pour se protéger, les lichens absorbent les polluants en même temps que les éléments qui leur sont essentiels pour vivre.

Leur activité photosynthétique continue, leur taux de croissance très faible, leur grande longévité et leur productivité très faible font des lichens des espèces particulièrement sensibles utilisées dans la détection des pollutions (pollution acide, fluorée, métaux lourds, radioactivité...).

**Tableau 01 :** les caractéristiques essentielles qui privilégient les lichens par rapport aux autres végétaux. (Déruelle S., Lallemand R., 1983)

Végétaux	Lichens
L'eau et les sels minéraux sont puisés dans le sol.	L'eau et les minéraux proviennent exclusivement de l'air et de l'eau de pluie.
Feuilles recouvertes d'une cuticule protectrice et imperméable.	Pas de cuticule, contact direct avec l'atmosphère
Pas d'activité hivernale.	Actif toute l'année après la pluie
Stomates	Absence de système de régulation
Reproduction par graines protégées d'une enveloppe.	Reproduction par des structures aériennes en contact direct avec les polluants de l'air.

Croissance rapide

Croissance lente

## 1. Notion de bio-surveillance

La bio-surveillance est un ensemble de méthodes fondées sur l'observation des altérations fonctionnelles des êtres vivants (Markert *et al*, 2003). Elle a été définie par (Garrec et Va Haluwyn, 2002) comme l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes, pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre l'évolution. Elle utilise des êtres vivants, pour mettre en évidence les modifications de l'environnement dans lequel ils sont placés (Cuny, 2012), et fournit des informations sur la quantité de polluants ainsi que leurs effets sur les organismes qui ont été en contact avec les polluants. C'est un bon outil pédagogique pour visualiser l'action agressive d'un polluant sur l'environnement et un moyen d'aborder ses impacts sanitaires (Markert *et al*, 2003). Dans la pratique, se distinguent aujourd'hui deux principales approches de biosurveillance :

- l'approche dite de surveillance passive qui consiste à utiliser les matrices environnementales in situ (Merlen, 2015) (c'est-à-dire utiliser les organismes en place), qui consiste à récolter les individus naturellement présents sur la zone d'étude (Benard *et al*, 2004).

- l'approche dite de surveillance active ou méthode des transplants qui consiste à transférer l'indicateur d'un point à un autre et de mesurer ensuite les évolutions (Merlen, 2015). Elle peut être utilisée par exemple lorsque la méthode in situ n'est pas envisageable (absence d'organismes correspondant aux critères de l'étude). Cette dernière nécessite plus de temps. En effet, il faut laisser le temps aux transplants (organismes provenant d'une zone "saine") d'accumuler les polluants présents dans leur nouvel environnement, cette phase d'exposition pouvant être plus ou moins longue selon le type d'organismes choisi et le polluant étudié (Benard *et al*, 2004). La transplantation est une technique expérimentale où les organismes utilisés pour l'étude sont transférés d'un environnement non pollué (milieu dit "sain" : zone rurale...) vers un site pollué ou suspecté de l'être. L'avantage principal de la transplantation est qu'elle permet un total contrôle du temps d'exposition (Catinon, 2010).

## 2. Méthodes de mesure de la pollution atmosphérique :

Pour surveiller la qualité de l'air, des réseaux de capteurs sont couramment utilisés. Ils permettent de faire des mesures physico-chimiques et de donner une valeur numérique, sans pour autant indiquer avec certitude un effet toxique associé à ces valeurs numériques et leurs effets de synergie. La bio surveillance permet de combler cette lacune puisqu'il s'agit de « l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire,

biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre l'évolution ». On distingue deux types de méthodes de détection de la pollution de l'air : Les méthodes physicochimiques et les méthodes biologiques.

### **2.1. Méthodes physicochimiques :**

La présence simultanée des polluants sous formes gazeuses et particulaires, leurs concentrations sont généralement très faibles dans l'air ambiant ce qui fait que leurs échantillonnages soient compliqués. Car selon les auteurs (Jacobson et Weinstein, 1977 ; OMS 1985) : il importe d'appliquer une méthode de collecte qui permettent de séparer les deux formes quand on s'intéresse à une éventuelle atteinte de la végétation". C'est ainsi que les polluants gazeux comme les métaux sont plus toxiques pour les végétaux

### **2.2. Méthodes Biologiques :**

Comme nous l'avons signalé que le végétale peut être un détecteur de pollution. L'impact de la pollution atmosphérique sur la végétation est connu depuis plus d'un siècle. En effet, en 1991 un agronome Anglais (OLIVER) avait observé et expérimenté en serre les effets néfastes du smog Londonien sur les plantes, il constate qu'un brouillard dense chargé de substances chimiques rejeté par les cheminées des usines et des immeubles sur la même action sur l'organisme végétale que l'acide sulfurique étendu. En 1900, le Botaniste Breton (PICQUENARD) a démontré l'action des fumées sur les développements de la végétation cryptogamique, les Lichen en particulier. En 1917, (VANGIN) publia une étude détaillée sur les dégâts causés aux conifères par l'acide chlorhydrique né de la combinaison des produits chlorés de fumées industriels avec les gouttelettes d'eau du brouillard en haute Savoie (Lieutaghi, 1972). Depuis lors, des recherches dans ce domaine se sont multipliées et des nombreux Laboratoires s'occupent du Dépistage des substances chimiques nocives pour les végétaux dans l'air des villes et des complexes industriels, ainsi plusieurs scientifiques déterminent que les plantes très sensibles réagissant comme de véritable enregistreur de pollution (Lieutaghi, 1972), et que les dangers de la pollution peuvent être détectés par les indicateurs biologiques. Les arbres et les plantes herbacées sont utilisés non seulement pour l'observation des symptômes d'attaque qu'ils manifestent mais encore comme collecteurs de poussière (Ozenda, 1982).

## **3. Relation entre les végétaux et la pollution**

Les rapports entre les végétaux et les pollutions se présentent sous de nombreux aspects (Ozenda, 1982) :

- 1- Les végétaux peuvent être à l'origine de la pollution dans la mesure où ils provoquent des allergies dues à l'émission de pollens et spores ;
  - 2- Ils peuvent être considérés aussi comme des vecteurs des polluants lorsqu'ils sont consommés par les animaux (fourrage). À ce moment-là, ils peuvent constituer un danger pour ces êtres vivants (Lieutaghi et OMS 1985). Les végétaux à leur tour peuvent être "victimes " des pollutions. C'est ainsi qu'un certain nombre d'impuretés atmosphériques émises par les activités industrielles sont toxiques pour les plantes. Ces végétaux peuvent également subir des dégâts dus à une toxicité du sol ou des eaux de plus en plus évidente ;
  - 3- De nos jours, on utilise les végétaux pour détecter les faibles niveaux de contamination, et pour en mesurer ou apprécier les niveaux les plus élevés en délimitant les régions atteintes et les zones de pollution décroissante autour des centre d'émissions. On considère de ce fait les végétaux comme des indicateurs de pollution (Hellal *et al*, 2011) ;
  - 4- Même si ce domaine est moins connu que les trois sus citent. Les végétaux peuvent être utilisé comme des inhibiteurs des pollutions. Ils exercent en effet une action protectrice et régénératrice du milieu ambiant.
- 4-Estimation de la qualité de l'air à l'aide de certaines espèces végétales par les méthodes de Bioindication :

L'objectif de cette partie est de montrer les méthodes utilisées pour estimer la qualité de l'air à l'aide d'indicateurs biologiques. Après avoir défini les termes relatifs à ce genre d'étude, nous verrons comment mettre en œuvre de telles campagnes, en commençant par les bios essais, puis nous verrons comment la bio évaluation se fait par bioaccumulation. Enfin, nous étudierons la détermination d'indicateurs biologiques pour la mesure de la pollution atmosphérique.

#### **4. Définitions :**

##### **4.1. La Bio indication :**

Permet d'estimer la qualité de l'air grâce aux effets relevés sur les végétaux. Ce terme générique regroupe de nombreuses techniques. Ces techniques sont divisées en grandes catégories : au sens strict est une méthode d'observation des effets visibles de la pollution atmosphérique (taches sur les feuilles par exemple, mais aussi la présence ou l'absence d'espèces en fonction de leur toxicotolérance). Cette méthode ne permet pas de quantifier exactement le ou les polluants étudiés, mais permet de déterminer si une étude plus poussée (par analyse dans des bioaccumulateurs ou mesures directes) est nécessaire (Lorenzini, 1992) et si oui, où placer les capteurs. Les végétaux indicateurs ne réagissent généralement pas qu'à un ou des polluants(s), mais à leur environnement (sol, climat, etc.) qu'il faut prendre en compte.

##### **4.2. Les Bioessais :**

Ont pour objectif la détection des polluants et, si possible, la mesure de leurs teneurs (Blandin, 1986)

##### **4.3. La Bioestimation :**

Est une mise en relation de la présence d'espèces avec un niveau moyen de pollution (Van Haluwyn, 1993)

##### **4.4. Le Biomonitoring :**

Est un suivi dans le temps de l'état de la végétation. On distingue le biomonitoring passif qui est une analyse de l'évolution de la végétation naturelle, du biomonitoring actif où l'on transplante des végétaux élevés dans des conditions standardisées : même sol, irrigation régulière (Posthumus, 1983 ; ASTA, 1997).

##### **4.5. Bioaccumulation :**

La bioaccumulation consiste en un dosage de substances contenues dans le végétal étudié, ces substances n'entraînant pas le dépérissement du végétal (Garrec, 1996). Des polluants peuvent s'accumuler dans des organismes et atteindre même des concentrations élevées. Chez les végétaux, de nombreux organismes sont utilisés. Il s'agit des champignons,

des lichens, des mousses et de certains végétaux supérieurs : aiguilles de résineux, feuilles de caducifoliés, plantes sauvages et cultivées (Blandin, 1986). Nous ne traiterons pas des champignons, puisqu'ils permettent d'estimer la pollution dans les sols, et non dans l'air. (Hale et Lawry 1985).

### 5. Lichens et Bioaccumulation :

Outre les études menées à l'aide de transplants de lichens (Deruelle, 1981 ; Hale et Lawry, 1985 ; Semadi et Deruelle, 1993), il est possible de réaliser des dosages de métaux dans des lichens prélevés dans leur milieu naturel. Les travaux sur la pollution plombique dans les lichens sont souvent menés en bords de route, mais pas systématiquement. La méthode la plus couramment utilisée est le dosage dans les thalles de lichens prélevés sur le site d'étude. Parmi les indicateurs végétaux de la pollution atmosphérique, les lichens (constitués d'une symbiose entre une algue et un champignon formant un thalle lichénique) sont les plus connus et principalement les épiphytes (qui poussent sur d'autres végétaux) corticoles (sur les écorces). Ils tirent leur particularité d'une nutrition étroitement liée à l'atmosphère (les rhizines n'ont pratiquement qu'un rôle fixateur) et des propriétés suivantes :

- une activité continue indépendante des saisons ;
- un métabolisme lent associé à une grande longévité ;
- un grand pouvoir d'accumulation très peu sélectif ;
- une absence de moyens de lutte contre la pollution. Les lichens sont des plantes à thalle constituées d'un amas spongieux.

Il s'agit d'une association, à bénéfices réciproques, de deux plantes, une algue présente sous forme de cellules isolées et un champignon qui l'héberge dans son thalle. C'est une symbiose. Les lichens ont besoin d'un air de bonne qualité car ils ne disposent pas de protection comme les végétaux supérieurs. Leur métabolisme est actif tout au long de l'année, sans répit en hiver. Ils vivent plusieurs dizaines d'années.

Enfin, leur thalle, structure spongieuse et sans protection, les prédispose à accumuler toutes sortes de produits venant de l'extérieur : ce sont des bioaccumulateurs. Tous ces facteurs expliquent que les lichens sont très réceptifs aux modifications de leur environnement immédiat et en particulier très sensibles à la qualité de l'air (tous polluants confondus) (**Béguinot, 2010**).

L'exceptionnelle sensibilité des Lichens aux pollutions de l'air s'explique par le fait qu'ils vivent quasiment de « l'air du temps » et, plus précisément, que la « moitié » champignon des

Lichens « bénéficié » d'une capacité phénoménale d'absorption de tous les effluents et aérosols. Du coup, leur sensibilité à la pollution, graduée selon les espèces, fait des Lichens, des outils idéaux pour estimer commodément et économiquement les niveaux locaux de pollution atmosphériques ... (Van Haluwyn, 1993).

## 6. les différentes méthodes utilisant les lichens comme bio indicateurs de la pollution atmosphérique

Les lichens ont été très tôt désignés comme des bioindicateurs. Dès 1856, Grindon a pu attribuer le déclin de la flore lichénique du sud du Lancashire à une augmentation de la pollution atmosphérique mais c'est Nylander qui a reconnu, en 1866, que cette catégorie de végétaux représentait un bio indicateur pratique de la qualité de l'air de l'agglomération parisienne (Nylander, 1866).

Les lichens représentent, en effet un groupe végétal à part. Issus de la co-évolution de champignons et d'algues, ils possèdent des capacités de résistance et de reviviscence exceptionnelles. De plus, l'absence de cuticule facilite l'absorption des éléments aériens et la présence d'espaces intracellulaires dans la médulle piège les polluants particuliers dont les métaux et métaux lourds font partie. Les lichens sont donc des organismes bioaccumulateurs.

Enfin la partie algale peut présenter, chez certaines espèces, une tolérance importante aux contaminants conférant aux lichens une résistance à court terme élevée ou, au contraire, une sensibilité exacerbée (Dobson, 1992). Une exposition au SO<sub>2</sub> entraîne, par exemple, une diminution sensible de l'assimilation du CO<sub>2</sub> par la partie algale de *Evernia mesomorpha* Nyl. (Huebert *et al*, 1985).

Parmi les approches floristiques, deux catégories de méthodes sont discernables : **Les méthodes qualitatives** définissant une échelle de correspondance entre les lichens et le degré de pollution, **Les méthodes quantitatives** permettant de calculer un indice de pollution. La plus répandue des méthodes qualitatives est celle développée par Hawksworth et Rose en Grande-Bretagne au cours des années 1970 (Hawksworth and Rose, 1970). Basée sur des études relatives aux taux de SO<sub>2</sub>, elle prend en compte 80 espèces réparties en onze classes corrélées à différents taux de polluants permettant d'établir une échelle qualitative de qualité de l'air (Hawksworth and Rose, 1976). Les classes sont essentiellement caractérisées par des critères morphologiques tels que la tendance à la fructification et l'étalement, mais aussi statistiques comme l'apparition ou l'abondance d'espèces et enfin, l'acidité de l'écorce support qui peut

jouer le rôle de tampon lors d'épisodes de pollution acide (De Bakker, 1989 ; Vandobben and Terbraak, 1998). Il faut toutefois noter que l'utilisation répétée de cette technique a permis de mettre en évidence sa spécificité régionale. En effet, si les corrélations entre les espèces lichéniques définies par l'échelle et les taux de SO<sub>2</sub> restent valables en Grande-Bretagne, les études réalisées dans les pays voisins montrent qu'elles nécessitent un étalonnage préalable afin de prendre en compte la répartition naturelle de la flore en fonction de la climatologie locale. *Telohistes flavicans* (classe 10- Air "pur") est, totalement absente au nord de la France sans qu'il y ait pour autant d'exemple, avec les concentrations de SO<sub>2</sub> ou d'autres polluants. Cependant, ce type d'approche permet, après un étalonnage adapté, de mettre en évidence des variations spatiales de 10 µg/m<sup>3</sup> voire de 5 µg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> (Van Halluwyn and Lerond, 1993).

Une technique dérivée, développée par les mêmes auteurs, a vu le jour en 1987 (VanHalluwyn and Lerond, 1987). Elle applique les notions de phytosociologie développées par Guinochet en 1973. Elle cherche à montrer les liens entre les associations lichéniques et les niveaux de pollution soufrée. La détermination préalable des associations d'espèces permet alors d'adapter les relations établies lors des travaux réalisés en Angleterre à d'autres régions. D'autre part, l'étude des altérations de la communauté végétale apporte plus de renseignements que la prise en compte d'un individu isolé (Gaveriaux, 1996). Ce constat a permis de mettre au point les méthodes quantitatives fondamentalement basées sur l'évolution des associations de lichens dans un même écosystème. Les méthodes quantitatives ont été développées afin d'éviter l'emploi des méthodes phytosociologiques, et donc de simplifier l'utilisation des lichens. La méthode de Leblanc et de De Sloover, élaborée en 1970, est basée sur la fréquence d'apparition des espèces, elle débouche sur le calcul d'un index de pureté atmosphérique appelé I.A.P. (Index of Atmospheric Purity) (Leblanc and De Sloover, 1970 ; Loppi, 1996). Facile d'apparence à mettre en œuvre, il faut tout de même souligner que cette méthode de calcul est sensible aux variations de conditions écologiques. Il est donc nécessaire d'effectuer des relevés dans des conditions aussi semblables que possibles et sur des arbres isolés. Il est aussi recommandé de déterminer la fréquence relative globale des espèces afin de s'assurer que l'homogénéité entre les différentes stations sera respectée.

## 1. Présentation de la zone d'étude

- Localisation géographique d'Annaba et El Tarf

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 km<sup>2</sup>. (Figure 03)

La wilaya d'El Tarf est située à l'extrême Nord-est du pays, Elle est délimitée : au nord, par la mer Méditerranée ; à l'est, par la Tunisie ; au sud par la wilaya de Souk Ahras et au sud-est par la wilaya de Guelma et Ouest par la wilaya d'Annaba. La wilaya s'étend sur une superficie de 3 339 km<sup>2</sup>. (Figure 03)



**Figure 03** : Localisation géographique de la région d'étude (Annaba) et le témoin (El Kala) (Source : Ali Ahmed, 2007).

## 2. Modèle biologique

Le lichen présent sur les échantillons prélevés qui feront l'objet de notre étude est une espèce du genre *Parmelia*, notamment la *Flavoparmelia caperata*.

- *Flavoparmelia caperata*



<b>Royaume :</b>	Champignons
<b>Division :</b>	Ascomycota
<b>Classe :</b>	Lécanoromycètes
<b>Ordre :</b>	Lecanorales
<b>Famille :</b>	Parmeliaceae
<b>Genre :</b>	Flavoparmelia
<b>Espèce :</b>	<i>Flavoparmelia caperata</i>

Figure 04 : *Flavoparmelia caperata*

- **Description :**

Espèce surtout corticole, croissant sur les écorces plus ou moins acides et assez bien éclairées, principalement sur feuillus, rarement sur résineux, elle peut aussi se trouver sur des piquets de clôture, roches siliceuses, tuiles, etc.

La *Flavoparmeliacaperata*, est assez sensible au SO<sub>2</sub>, tolérant aux NO<sub>2</sub> et très sensible à l'ammoniac provenant de l'industrie ou de l'activité agricole.

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 *LobariaPulmonaria* dont la présence reflète une absence totale de pollution. (Lacoux , Angler , 2004 ; Signoret, 2001)

## 3.Méthode de transplantation :

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 02/03 /2020 au niveau des sept sites et a duré 03mois.

Nous avons réparti nos sites où les transplants ont été placés à proximité de quatre ronds-points, deux grandes industries et un site témoin. Tableau 02

**Tableau 02:** Sites de transplantation

Site	Localisation
Site 1	Témoin, se localise au niveau de la région de Bougous sur un tronc d'arbre
Site 2	Se localise au niveau du rond-point d'el Hattab
Site 3	Se localise au niveau du rond-point CHU Ibn Roched
Site 4	Se localise au niveau du rond-point Sidi Ibrahim
Site 5	Se localise au niveau du complexe d'el Hadjar
Site 6	Se localise au niveau du complexe Fertial
Site 7	Se localise dans le jardin du rond-point de Pont Blanc

#### 4. Analyse de la perméabilité membranaire

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

La teneur relative en eau (TRE) a été déterminée dans des disques de thalles frais d'un diamètre de 2 cm<sup>2</sup> ; les disques ont été pesés rapidement, puis la matière sèche des disques a été enregistrée après une déshydratation à 80 ° C pendant 48 heures. La teneur relative en eau a été calculée en plaçant les valeurs dans la formule suivante (Gong *et al.*, 2003) :

$$TRE = \frac{\text{Poids frais} - \text{poids sec}}{\text{poids frais}} \times 100$$

Le poids frais des thalles (la matière fraîche) a été déterminé avec une balance de précision, La biomasse exprimée en gramme. Chaque échantillon pesé est enveloppé dans du papier aluminium. Et après étuvage à 80 °C pendant 48 h jusqu'à l'obtention d'un poids sec (la matière sèche).

#### 4.2. Taux de fuite des électrolytes

Le taux de fuite des ions inorganiques à partir des thalles lichéniques ont été déterminés selon la méthode de (Dionisio-Sese *et al.*, 1998). Vingt disques de thalles ont été placés dans un tube contenant 10 ml d'eau déminéralisée bouillante et une première mesure de conductivité électrique (EC0) est prise à l'aide d'un conductimètre (Hanna professionnel HI9829). Ensuite le même contenu est chauffé dans un bain Marie à 50 et 60 °C pendant 25 min, une deuxième mesure de conductivité est réalisée (EC1). Plus tard, le contenu supporté de nouveau à ébullition à 100°C pendant 10 min et la conductivité électrique est de nouveau enregistrée (EC2). La fuite des électrolytes a été calculée en utilisant la formule :

$$\text{Fuite des électrolytes ( \% )} = \frac{(EC1-EC0)}{(EC2-EC0)} \times 100$$

#### 4.3. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde(MDA)

Les produits de peroxydation lipidique, qui réagissent avec le TBA (acide 2-thiobarbiturique) sont principalement le malondialdéhyde (MDA) et les hydroperoxydes (Buege *et al.* 1978). Le niveau de la peroxydation lipidique est déterminé selon la méthode de (Hodges *et al.*, 1999). Des échantillons frais de 0,5 g sont homogénéisés dans 4,0 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 1% et centrifugés à 10000 x g pendant 10min. Le surnageant est ajouté à 1 ml de TBA à 0,5% (p/v) préparé dans du TCA à 20%. Le mélange est chauffé dans un bain Marie à 100°C pendant 30 min. Ensuite, la réaction est stoppée en plaçant les tubes dans un bain de glace. Après une centrifugation de 10 000x g pendant 10 min, le surnageant est récupéré pour la mesure de l'absorbance par spectrophotomètre (Jenway 63000) à 532 nm, (**Figure 05**). La densité optique est corrigée par une lecture à 600 nm. La concentration de MDA est calculée en utilisant son coefficient d'extinction molaire ( $\epsilon = 155 \text{ Mm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

1).



**Figure 05 :** Spectrophotomètre (Jenway 63000).

### **5. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène( $H_2O_2$ )**

Les concentrations du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) dans les thalles sont mesurées selon la méthode de (Velikova *et al.* 2000). Les échantillons ont été homogénéisés dans du TCA à 0,1% (p/v) dans un bain de glace. L'extrait a été centrifugé à 12,000xg pendant 15 minutes, puis 0,5 ml du surnageant ont été ajoutés à 0,5 ml de tampon phosphate de potassium (10 mM, pH 7,0) et 1 ml de 1M KI. L'absorbance est lue à une longueur d'onde de 390nm.

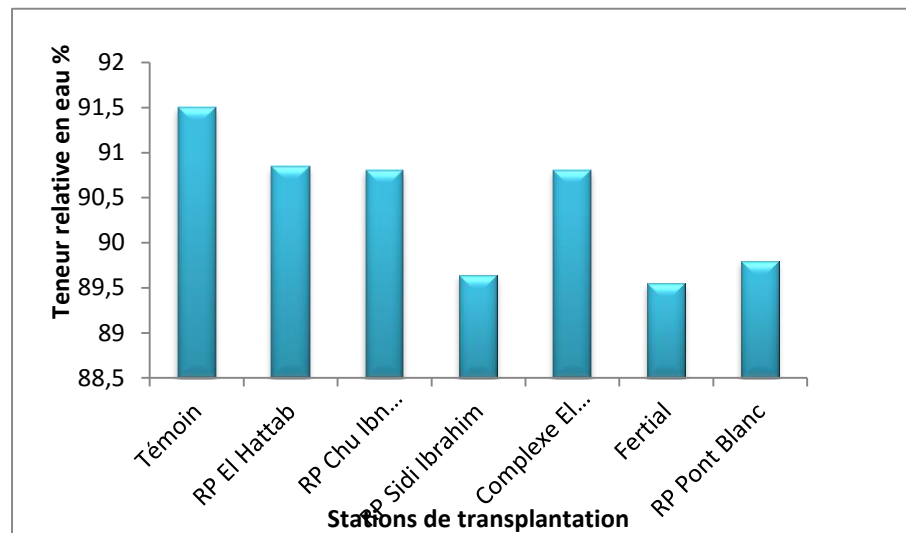
### **6. Analyse statistique**

L'analyse statistique effectuée dans notre étude est déterminée à l'aide du logiciel *Minitab* (version 16.0). Pour chaque dosage, trois répétitions ont été analysées (n=3). Les résultats correspondant aux moyennes de ces différentes mesures  $\pm$  l'erreur standard. Afin de tester la significativité des différences de moyennes pour chaque variable dépendante nous avons utilisé les analyses de variances uni-variées (ANOVA).

## 1. Résultats

### 1.1. Analyse de la perméabilité membranaire

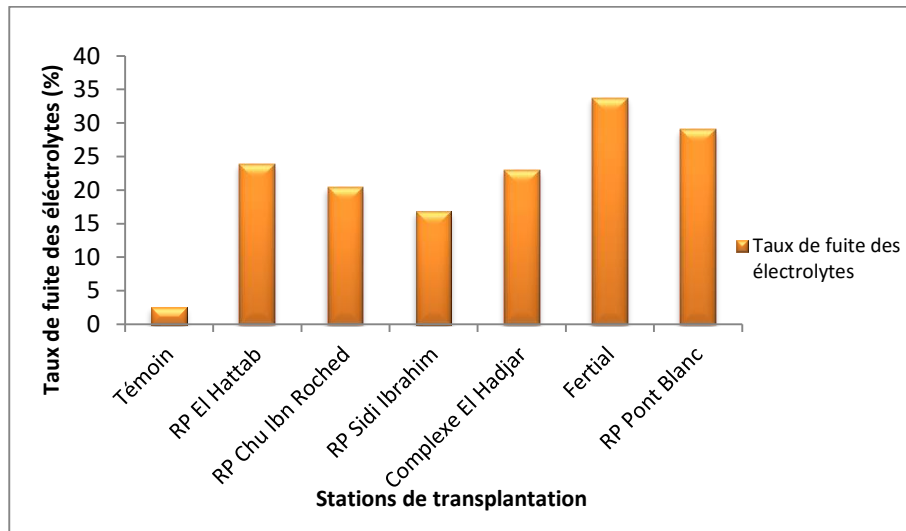
#### 1.1.1. La teneur relative en eau (TRE)



**Figure 05** : Teneur relative en eau

La figure 05 met en évidence les variations de la teneur relative en eau au niveau des thalles des échantillons transplantés. Les résultats montrent une diminution de la teneur relative en eau dans les thalles de toutes les stations par rapport à celle du témoin. Cette diminution a été remarquable dans les station RP Pont Blanc avec un pourcentage de 89.80 %, et RP Sidi Ibrahim avec un pourcentage de 89,64%, et enfin la station Fertial qui présente la teneur en eau la plus faible 89 ,55 %.

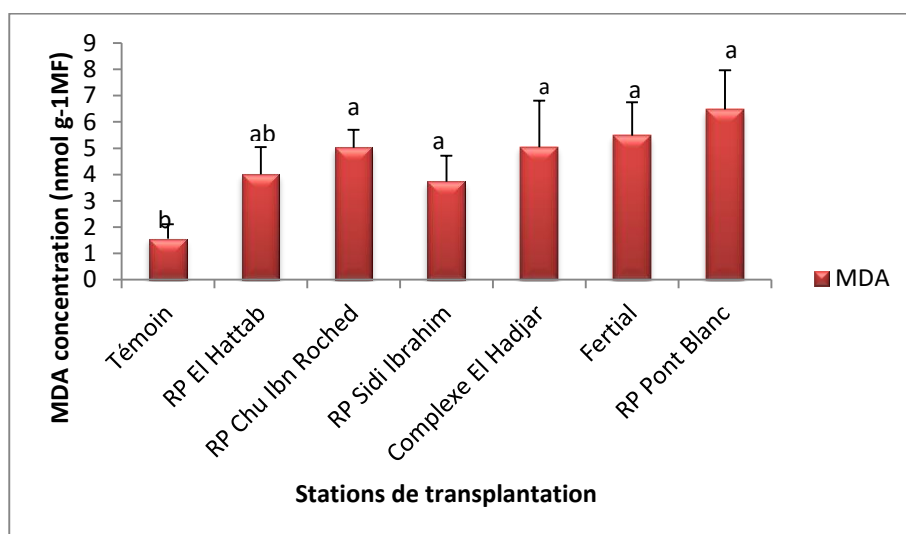
### 1.1.2. Taux de fuite des électrolytes



**Figure 06 :** Taux de fuite des électrolytes

La **figure 06** illustre les variations du taux de fuite des électrolytes. Nous remarquons selon nos résultats que les valeurs sont élevées au niveau des stations étudiées par rapport à celles du témoin qui présente un taux de 2.55%. En effet, les taux de fuite des électrolytes les plus élevés ont été observés au niveau des stations de Fertial et du pont blanc avec des valeurs de 33.71% et 29.07% respectivement.

### 1.1.3. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde (MDA)



**Figure 07 :** Mesure de la synthèse du Malondialdéhyde (MDA)

Les données sont présentées sous forme de moyenne de trois répétitions  $\pm$  ES pour chaque paramètre, Les mêmes lettres après les données indiquent qu'il n'y a pas de différence significative à un niveau de probabilité de 95% (test de Tukey).

La figure 07 représente les variations des teneurs en malondialdéhyde dans les transplants lichéniques. Nous observons une nette augmentation de la synthèse du malondialdéhyde dans toutes les stations de transplantation par rapport au témoin. Ainsi, le taux le plus élevé a été observé dans la station du rond-point pont blanc avec une valeur de 6.47 (nmol  $g^{-1}MF$ ) suivie de la station de Fertial avec une valeur de 5.48 (nmol  $g^{-1}MF$ ), et enfin le Complexe d'El Hadjar avec une valeur de 5.04 (nmol  $g^{-1}MF$ ).

Par ailleurs, l'analyse de la variance à un critère de classification (Anova) indique que la différence des variations de la synthèse du malondialdéhyde chez les transplants lichéniques est hautement significative ( $p \leq 0.01$ ).

#### 1.1.4. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ )

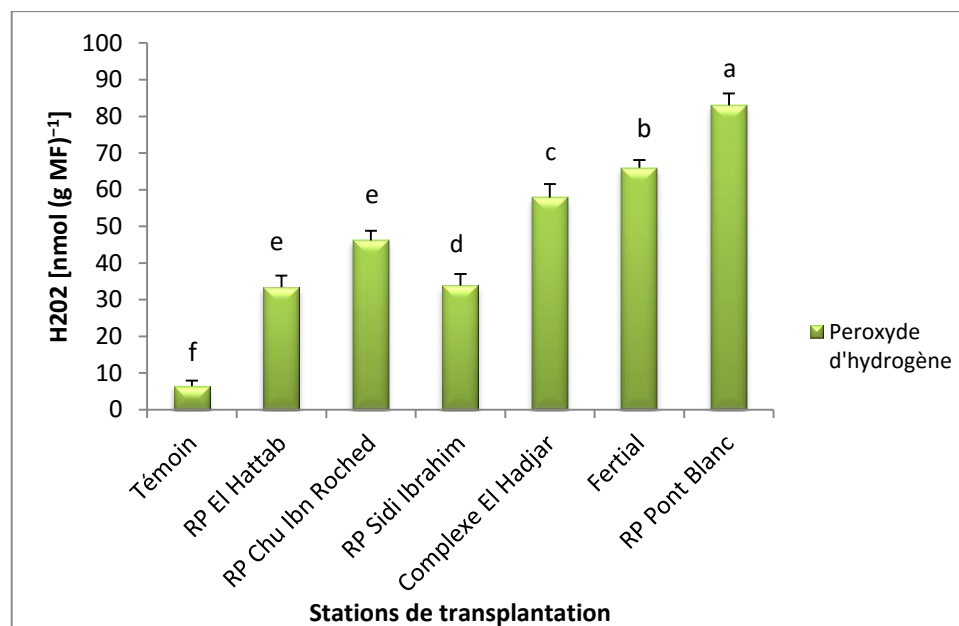


Figure 08 : Mesure de la synthèse du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ )

Les données sont présentées sous forme de moyenne de trois répétitions  $\pm$  ES pour chaque paramètre, Les mêmes lettres après les données indiquent qu'il n'y a pas de différence significative à un niveau de probabilité de 95% (test de Tukey).

**La figure 08** illustre les variations de la synthèse du peroxyde d'hydrogène au niveau des transplants lichéniques. Nous notons que la synthèse du peroxyde d'hydrogène est nettement plus élevée dans tous les stations de transplantation par rapport au témoin. Cette augmentation a été plus remarquable au niveau de la station du Rond-point Pont Blanc avec une valeur de  $82.97 \text{ n mol / (g MF)}^{-1}$  suivie des stations de Fertial et du complexe d'El Hadjar avec des valeurs de  $65.98 \text{ nmol (g MF)}^{-1}$  et  $57.86 \text{ nmol (g MF)}^{-1}$  respectivement.

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle que la différence des variations de la synthèse du peroxyde d'hydrogène chez les transplants lichéniques est très hautement significative ( $p \leq 0.001$ ).

## 2. Discussion

La détection et l'estimation de la pollution atmosphérique avec les lichens sont possibles dans la mesure où ces végétaux réunissent les conditions que l'on attend des indicateurs biologiques. (Steubing, 1982 ; Posthumus, 1983). Outre les qualités :

- ✓ De sensibilité remarquable à la pollution liée à un pouvoir exceptionnel d'accumuler rapidement les polluants d'origine atmosphérique ;
- ✓ de facilité d'utilisation due à leur activité continue et à leur longévité ;
- ✓ une grande densité de leur répartition géographique,
- ✓ une abondance des espèces ;
- ✓ les lichens possèdent la faculté de réagir rapidement à une baisse de la pollution grâce au mécanisme d'adsorption qui reflète quantitativement la diminution de la pollution (Déruelle, 1996).

Depuis déjà longtemps, les lichens sont utilisés comme des bio-indicateurs et bio-intégrateurs performants dans la détection de la pollution atmosphérique. Les lichens ne possèdent pas les structures lui permettant de limiter les conséquences de la pollution atmosphérique, leur disparition est considérée comme un signe de pollution (Gilbert, 1973).

De nombreuses études tant biogéographiques que biochimiques se sont succédées dans le monde, surtout depuis 1950, démontrant l'influence de l'aéro-pollution sur le développement des lichens (Lerond, 1984)

Trois mécanismes sont classiquement avancés en ce qui concerne l'absorption et l'accumulation d'éléments chimiques dans les lichens (Garty, 2001; Bargagli et Mikhailova,

2002) : le piégeage de particules contenant des éléments chimiques, l'accumulation cellulaire et l'absorption intracellulaire via des processus d'échanges d'ions.

Chez la plupart des lichens, les cycles de dessiccation et de réhydratation sont des facteurs physiologiques importants. Les effets de la teneur en eau dans les thalles de lichens sur la photosynthèse et la respiration ont été largement étudiés (Kranter et Lutzoni, 1999).

Dans notre travail la mesure de la teneur relative en eau des lichens nous renseigne sur la turgescence relative des tissus et figure parmi les critères d'évaluation de la tolérance au stress. Elle est liée à la capacité du végétal à maintenir un niveau d'hydratation des tissus qui soit à même de garantir la continuité de l'activité métabolique (Aoumeur, 2012). La diminution des teneurs en eau au niveau des lichens résulte de l'absence des stomates, en effet les lichens contrairement aux plantes supérieures, sont dépourvus de moyens de lutte contre la pollution. Sans cuticule, ni stomate pour se protéger, ou s'adapter au facteurs défavorables du milieu (Collombert, 1989).

Effectivement selon nos résultats nous avons observé une diminution importante des teneurs relatives en eau par rapport au témoin qui peut être expliqué par l'impact osmotique et toxique sur les lichens par l'induction d'un stress abiotique causé par la pollution. Ceci s'accorde avec les travaux de Toumi *et al.*, 2014 qui ont montré que chez deux variétés de colza (*Brassic napus* L.), la TRE a baissé considérablement au cours du temps d'expérimentation. La forte pression osmotique du milieu extérieur fait diminuer la teneur en eau chez la plante toute entière, entraînant une diminution de la mobilité des éléments nutritifs. Il y a aussi diminution du volume du milieu aqueux où se passent les réactions biochimiques qui assurent le meilleur développement de la plante. Les molécules d'eau participent directement à de nombreuses réactions biochimiques d'hydrolyse ou de condensation. L'eau est aussi une source d'éléments essentiels pour le métabolisme des végétaux. Sa décomposition fournit différents constituants nécessaires à la biosynthèse des molécules organiques.

Ces diminutions peuvent être dues à des dommages des tissus du matériel végétal (lichens) ce qui conduit à des flétrissements et des dessèchements des thalles ou bien une perte d'eau (Sharma, 2009 ; Maire de paris-pajot K, 1994). La pollution atmosphérique peut causer des dommages sur les végétaux et implique la diminution du poids frais et sec (Braun et Fluckiger, 1985)

Par ailleurs, nos résultats ont mis en évidence que le taux de fuite des électrolytes a montré une augmentation nette au niveau des lichens transplantés dans les zones polluées. Cette augmentation signifierait que le stress abiotique a affecté l'intégrité membranaire des lichens

stressés. Ceci s'accorde avec les travaux de Mesnoui, (2016) qui ont montré que chez les plantes de *Atriplex halimus* L. La perte d'électrolytes et la fuite d'ions à travers la membrane plasmique est une conséquence de la déstabilisation des membranes cellulaires. Dans cette étude le Cadmium induit une augmentation significative de la fuite des électrolytes.

Un des effets le plus direct au niveau cellulaire est l'altération de la perméabilité de la membrane cytoplasmique, qui peut causer une perte d'ions excessive (Wolterbeek, 2002) et qui peut avoir des effets sur les caractéristiques d'accumulation des éléments chimiques (Garty *et al.*, 1998). La déstabilisation membranaire indique une surproduction des radicaux libres qui aboutissent à la peroxydation des lipides (Li *et al.*, 2012). La surproduction des ERO cause une peroxydation des lipides qui conduit à la formation de produits de dégradation tel que les alcanes et les aldéhydes (malondialdéhyde) (Ferreat *et al.*., 2003).

Ainsi dans notre travail, nous avons noté une augmentation de la production du malondialdéhyde indiquant une peroxydation des lipides accrue. Il est bien connu que la peroxydation membranaire entraîne un déficit des fonctions membranaires (**Lagadicet *al.*, 1997**). Dans des conditions de stress abiotique, les lichens peuvent présenter des dommages significatifs sur les membranes cellulaires suite à l'exposition au SO<sub>2</sub> (Pearson et Henriksson, 1981; Fields et St. Clair, 1984; Grieset *al.*, 1995), au fluor, aux oxydes d'azotes, au peroxy acetyl nitrate (PAN) et aux éléments chimiques (Garty, 1993, 2001). De plus, des polluants atmosphériques tels que O<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> peuvent induire la peroxydation lipidique des membranes (Gonzalez et Pignata, 1994 ; Gonzalez *et al.*, 1996).

Les membranes cellulaires des lichens (essentiellement au niveau du champignon) ont un rôle important de liaison et de localisation d'éléments traces métalliques issus du piégeage de particules véhiculées dans l'atmosphère (Garty, 2001). Les phénomènes de séquestration, mobilisation et transformation des éléments chimiques et des metalloïdes coexistent au niveau extracellulaire et intracellulaire de façon étroite avec le métabolisme et la vitalité du lichen (Garty, 2001).

Une autre manifestation du stress abiotique causé par la pollution est la synthèse du peroxyde d'hydrogène qui joue un rôle important dans le transfert d'un signal durant le stress chez les lichens (Levine *et al.*, 1994). Cependant le H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est une molécule de signal, sa synthèse doit être contrôlée, vu sa réponse cellulaire spécifique (Neill *et al.*., 2002). Le peroxyde d'hydrogène joue le rôle d'une molécule signal qui alerte la cellule de la présence d'un stress environnemental (Souguir, 2009).

En outre, selon nos résultats, nous avons noté une nette augmentation de peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) chez les lichens transplantés dans les zones polluées par rapport au témoin.

Les résultats obtenus indiquent que les polluants provoquent une surproduction importante de la molécule d' $\text{H}_2\text{O}_2$ . L'augmentation de stress oxydant et des espèces chimiques actives de l'oxygène durant une exposition à un stress abiotique est connue chez les lichens. Aussi, de nombreuses études montrent des pertes d'éléments, en plus de  $\text{K}^+$ , suite à un stress oxydant dans le cas d'une exposition à une pollution. Ainsi, les changements biologiques provoqués par un stress oxydant pourraient affecter significativement les concentrations en éléments chimiques dans le thalle.

Les travaux de Alayat (2015), qui ont été fait sur l'effet du cadmium (Cd) sur la synthèse du peroxyde d'hydrogène chez les plantes du blé, indiquent que le cadmium provoque une surproduction importante de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , et induit une peroxydation lipidique. Autre étude sur la tomate (Mehallah *et al.*, 2019) montre que l'accumulation significative du peroxyde d'hydrogène suite à une exposition au Cd et pesticide, a été observée au niveau des feuilles.

### Conclusion

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types de bio marqueurs : biochimiques et physiologiques, mesurés au niveau d'une espèce lichénique *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale sensible à la pollution atmosphérique transplantée au niveau de différentes stations urbaines de la région d'Annaba.

D'après nos résultats le stress causé par la pollution atmosphérique engendre des désordres sur le développement des lichens étudiés. Ces altérations se manifestent à l'échelle des thalles entiers, par une diminution importante des teneurs relatives en eau. Ces diminutions peuvent être dues à des dommages des tissus du lichen ce qui conduit à des flétrissements et des dessèchements des thalles ou bien une perte en eau. Le stress peut causer des dommages sur les végétaux et implique la diminution du poids frais et sec.

D'une part les mesures de la stabilité de la membrane cellulaire et les fuites des électrolytes ont été largement utilisées pour étudier les effets du stress sur les végétaux. L'accumulation de ces ions métalliques dans les végétaux semble provoquer une altération de la membrane plasmique, qui peut causer une perte d'ions excessive. Ainsi dans notre travail, nous avons enregistré une importante accumulation de malondialdéhyde dans les transplants des stations polluées. Cette peroxydation lipidique membranaire semble être due aux effets indirects des polluants par les radicaux libres qu'ils engendrent.

D'autre part, nous avons noté une nette augmentation du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) chez les lichens transplantés dans les zones polluées. Ainsi la surproduction des ERO cause la peroxydation des lipides qui conduit à la formation de produits de dégradation qui affecte la perméabilité membranaire.

En conclusion, La ville d'Annaba souffre de pollution atmosphérique causée par l'activité humaine. Le choix de cette espèce la *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale témoigne bien du bon choix du bio-indicateur et confirme son pouvoir comme bio marqueur de stress oxydant. Aujourd'hui, l'usage de véhicules à moteur a considérablement augmenté en Algérie et le développement urbain et industriel a accéléré l'utilisation de ces véhicules. L'étude de la nocivité de certaines substances émises par les véhicules dans l'atmosphère est l'un des facteurs qui permet de ne pas nuire à la santé de la population et à son environnement car il n'est pas possible d'éviter la pollution mais de la réduire.

La lutte contre la pollution automobile nécessite surtout une approche à long terme, en appliquant le principe de précaution, et en maîtrisant plus, les déséquilibres causés par les automobiles en villes, il est possible de renforcer cette lutte par :

- Des restrictions de la circulation automobile afin de réduire les émissions ;
- Le renouvellement du parc automobile, sachant que les véhicules usés sont les plus polluants ;
- Des travaux sur l'amélioration des performances des moteurs et des carburants (carburants verts par exemple).
- Conversion des transports publics en véhicules électriques
- Créer un environnement et des endroits pour conduire des vélos.

## Les références bibliographiques

---

**Alayat A, 2015.** Etude de l'impact Toxicologique de certains Agents Chimiques sur la Qualité des céréales : cas du blé et de l'Org. Thèse de doctorat : Toxicologie. Université Badji Mokhtar. Annaba ,159p.

**Ali Ahmed M, 2007.** Evaluation de la pollution acide à l'aide de deux bioindicateurs : écorce de *Fraxinus ongutifolia* et lichen *Xanthorai parietina*. Impact sur la végétation .Thèse de doctorat : Biologie végétale .Université de Badji Mokhtar . Annaba.19p.

**Aoumeur H, 2012.** L'effet stressant du plomb sur la croissance du radis « *Raphanussativis L.* » Réponses physiologiques, biochimique et efficacité potentielle de phyto remédiation. Mémoire de Magister. Université d'Oran ,153p.

**Asta J, 1997.** Cours « Bioindicateurs et Bioévaluation », UFR de Biologie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 220 p.

**Bargagli R., Mikhailova L, 2002.** Accumulation of inorganic contaminants, in: Nimis, P.L., Scheidegger, C. et Wolseley, P.A. (eds.), Monitoring with lichens- Monitoring lichens, Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series, p. 65-84.

**Beguilot J, 2010.** Société d'histoire Naturelle du Creusot, Cours.

**Belhadj H, 2009.** Quantification de la pollution atmosphérique due au trafic routier à l'aide de certaines espèces végétales bioaccumulatrices du (Pb, Zn, Cu) dans le milieu urbain de Sidi Bel Abbés. Mémoire de magister. Université de Sidi Bel Abbés, 55p.

**Belhadj H, 2014.** Détection de la pollution atmosphérique à l'aide du lichen *Xanthoria parietina* (L.) bio-accumulateur d'éléments traces métalliques dans le centre urbain de la ville de Sidi Bel Abbes (Algérie occidentale). Thèse de doctorat : sciences de l'environnement. Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes ,18p.

**Benard A., Durif M., Lavrillou P., Vandamme L, (2004).** Utilisation d'une technique de bienveillance pour évaluer des retombées de métaux lourds, cas d'un site de seconde fusion du plomb. Rapport final, INERIS-DRC-04-55891, AIRE-N°0565-MDu/LVa: 7-66.

**Beyer W., Miller G., Simmers J,1990.** Trace Elements in Soil and Biota in Confined Disposal Facilities for Dredged Material. Environmental Pollution, 19-32 p.

**Blandin P, 1986.** Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. Bulletin d'Ecologie, 215-307 p.

**Boonpragob K et Nash T, 1991.** Physiological responses of the lichen *Ramalinamenziesii* Tayl. to the Los Angeles urban environment. *Environmental and Experimental Botany* 31 : 229-238.

**Boullard B, 1990.** *Guerre et paix dans le règne végétal*. Ed. Marketing, Paris, pp: 191-206.

**Braun S and Fluckiger W, 1985.** Increased population of the aphid pomi at a motorway: Part 3- the effect of exhaust gases. *Environmental Pollution* 39: 183-192.

**Brodo IM, 1961.** transplant experiments with coricolous lichens using a new technique. *Ecology*, n°42, p.838-841

**Brodo IM, 1961.** Des expériences de transplantations avec lichens coricolous en utilisant une nouvelle technique. *Ecology*, n°42, p.838-841.

**Buege JA., Aust SD, 1978.** Microsomal lipid, Peroxidation. *In: Flesicher, S., Packer, L, (Eds.), Methods in Enzymology*.52, 302-310.

**C.E. Directive du Conseil du 22 avril 1999** relative à la fixation de valeurs limites pour l'anydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. - [s.l.] : Conseil Européen, 1999.

**C.E. Directive Du Parlement Européen Et Du Conseil du 21 mai 2008** concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. - [s.l.] : Conseil Européen, 2008. - pp. 152/1 - 152/44.

**Catinon M, 2010.** Détermination de la pollution atmosphérique métallique : étude critique de l'utilisation des écorces d'arbres. Thèse, l'université de Grenoble 1, École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement, Laboratoire d'écologie Alpine UMR 5553, 207p

**Clauzade G and Roux C, 1985.** Likenojde Okcidenta Europo. Illustrita determin libro. *Bull. Soc. bot. Centre-Ouest*, n° spéc. 7, S.B.C.O., Edit. Royan. 893 + 2 p.

**Collombet C, 1989.** Lichen d'Islande et lichen Pulmonaire. Thèse de doctorat : pharmacie. Université Joseph FOURIER GRENOBLE I ,115 p.

**Coste C, 2008.** Inventaire raisonné des lichens et champignons lichénicoles de la commune de Saint-Just (Ille-et-Vilaine, Bretagne). Rapport d'étude non publié

## Les références bibliographiques

---

**Coste C, 2011.** Écologie et fonctionnement des communautés lichéniques saxico les hydrophiles. Thèse de doctorat : Écologie. Université Toulouse, 132 p.

**Cuny D, 2012.** Qualité de l'air : de l'échelle locale à l'échelle planétaire. Compréhension – implications. Journée scientifique bi-académique Académie nationale de Pharmacie et Académie des Technologies.

**De Bakker K, 1989.** Effects of ammonia emission on epiphytic lichen vegetation, ActaBoLNeerl, 38,317-342

**Déruelle S,1981.** Effets de la pollution automobile (plomb rejeté avec les gaz d'échappement) sur les lichens en Forêt de Fontainebleau, Effet de la pollution atmosphérique sur la végétation lichénique dans le bassin parisien, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Convention de Recherche n°79-15, 91- 106 p.

**Déruelle S, 1996.** La fiabilité des lichens comme bioindicateurs de la pollution plombique. Ecologie, t.27(4) :285-290.

**Déruelle S., Lallemand R, 1983 :** Les lichens témoins de la pollution, Université biologique, 108p

**Des abbayes H., Chadfaud M, 1978.** Précis de botaniques tome 1 végétaux inférieurs 2ème édition, Ed MASSON, Paris 500 p.

**Dionisio-SeseML., T obita S ,1998.** Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. plantSci, 135,1-9.

**Dobson L,1992.** Lichens: an illustrated guide., Edition no3, London , Richmond Publishing, 410 page.

**Escourrou G,1996.** Transports, contraintes climatiques et pollutions. Ed: Mobilité Spatiale, 172 p.

**Ferrat L., Pergent-Martini C et Roméo M, 2003.** Assessment of the use of biomarkers in aukatate plants for the evaluation of environment quality: Application to sea grasses.AquatieToxico .65:187-204.

**Fields R et Clair L, 1984.**The effects of SO<sub>2</sub> on photosynthesis and carbohydrate transfer in the two lichens: *Collema polycarpon* and *Parmelia chlorochroa*. American Journal of Botany 71 : 986-998.

**Fiore A, 1996.** Les lichens épiphytes comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique dans la région Genevevoise. Université de Genève, 105 p.

## Les références bibliographiques

---

**Friardi I, 2012.** **Phytochimie** des lichens du genre *Stereocaulon*: Etude particulière de *S.* thèse de doctorat : chimie .Université européenne de Bretagne.

**Gaci B, 2014.** Evaluation De la toxicité des polluants atmosphérique sue les lichens « *Xanthoria parietina* ». Mémoire de master. Université de Boumerdès.

**Garerc J, 1996.** Bioindication végétale de l'ozone dans l'agglomération nancéienne durant l'été. Revue : Pollution atmosphérique, 87 p.

**Garrec J., Van Haluwyn C, 2002.** Bio surveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications. Ed : Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 118 p.

**Garrec J.P., Van Haluwyn C, 2002.** Biosurveillance végétale de la qualité de l'air : concepts, méthodes et applications. Paris, Tec et Doc. 117 p

**Garty J, 2001.** Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application. *Critical Reviews in Plants Sciences*, 20, 309-371.

**Garty J, 2001.** Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application. *Critical Reviews in Plants Sciences* 20: 309-371.

**Garty J,1993.** Lichens as biomonitors for heavy metal pollution. In: Markert, B. (ed.), *Plants as Biomonitors, Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*, VCH, Weinheim, p. 193-263.

**Garty J., Kloog N et Cohen Y ,1998.** Integrity of lichen cell membranes en relation to concentration of airborne elements. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 34: 136-144.

**Gaveriaux J ,1996.** Les lichens et la bioindication de la qualité de l'air, *Bull. Soc. Bot. Nord Fr.*, 49,5-52.

**Gilbert O, 1973.** The effect of air borne fluorides. In *air pollution and lichens*. Athlonepress, London,123p.

**Gong JM., Lee DA and Schroederb JI, 2003.** Long -distance root-to-shoot transport of phytochelatins and cadmium in *Arabidopsis*. *Proc Natl AcadSci USA*, 100, 100118-10123.

**Gonzalez C et Pignata M, 1994.** The influence of air pollution on soluble proteins, chlorophyll degradation, MDA, sulphur and heavy metals in a transplanted lichen. *Chemistry and Ecology*. 9: 105-113.

**Gonzalez C., Casanovas S et Pignata M, 1996.** Biomonitoring of air pollutants from traffic and industries employing *Ramalinaecklonii* (Spreng.) Mey.andFlot in Cordoba, Argentina. *Environmental Pollution* 91 : 269-277.

**Goujon M, 2004.** Lichens et biosurveillance de la qualité de l'air. Publication de l'Agence régionale de l'environnement de Haute-Normandie : connaitre pour agir,4 p.

**Gries C., Sanz M et Nash III, 1995.**The effect of SO<sub>2</sub> fumigation on CO<sub>2</sub> gaz exchange, chlorophyll fluorescence and chlorophyll degradation in different lichen species from western North America.*Cryptogamic Botany* 5: 239-246.

**Grube M and Hawksworth D, 2007.**Trouble with lichen: the re-evaluation and reinterpretation of thallus form and fruit body types in the molecular era. *Mycological*

**Hale M., Lawry J, 1985.**Annual rate of lead accumulation in the lichen *Pseudo parmelia baltimorensis*. Ed: *The Bryologist*, 5-7 p.

**Hawksworth D and Rose F,1976.** Lichen as pollution monitors.,Edition n°1, London, Edward Arnold Publishers, 60 pages.

**Hellal B., Belhadj H., Ayad N., Maatoug M, 2011.** Quantification à l'aide de végétaux ligneux de la pollution atmosphérique dans le milieu urbain de Sidi Bel Abbés (Algérie Occidentale). 1ères journées nationales « contrôle et pollution » 22-23 mai 2011Centre Universitaire de Khenchela- Algérie.

**Hodges DM., DeLong JM., Forney CF and Prange RK, 1999.**Improving the thiobarbituricacide- reactive- substances assay for astimating lipid peroxidation in plant tissues containiinganthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 207,604-611.

**Huebert D., L'Hirondelle SJ and Addison PA,1985.** The effects of sulfirdioxyde on net CO<sub>2</sub> assimilation in the lichen *EverniamesomorphaNyl.*, *New Phytol.*, 100, 643-65

**Hugonie G., Arquès P, 1998.** La Pollution de l'air. In : *L'information géographique*, volume 62, n°3,139p.

**JackobsonL., WEISTEIN C, 1977.** Sampling and analysis of fluoride: methods for ambient air plant and animal tissues, water soil and foods. Ed: *Med* n°19, 79-87 p.

**Kranner I et Lutzoni F,1999.** Evolutionary consequences oftransition to a lichen symbiotic state and physiological adaptation to oxidative damage associated with

poikilohydry. In: Lerner, H.R. (ed.): Plant responses to environmental stresses: from phytohormones to genome reorganization, Marcel Dekker Inc., New York, p. 591-628.

**Kunzlin N., Jerett M., Mack WJ., Becherman B., Labree L., Gililand F., Thomas D., Peters J., Hodis HN,2005.** Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles, Environ Health Perspect.

**Lagadic L., Caquet Y., Amirad J.C., Ramade F., 1997.** Biomarqueurs en ecotoxicologie. Aspects fondamentaux. Masson(ed), Paris, France,419p.

**Lagadic L., Caquet T, Amiard JC et Ramade F ,1997.** Mécanismes de formations et effets des espèces réactives de l'oxygene. Biomarqueurs en écotoxicologie : Aspects fondamentaux .125-147.

**Laure, 1996.** La pollution atmosphérique. Rapport national, France, 21 p.

**Laurinet M,1991.** intérêt de l'étude des lichens comme bioindicateurs (pollution atmosphérique acide-métaux lourds).Application a la région de Saillat et Saint-Junien(Haute-VLacoux D.,Engler R, 2004.. *Lobariapulmonaria*(L.) Hoffm., un lichen à protéger. *Fiche des lichens de l'Association Mycologique et Botanique de l'Hérault et des Hauts Cantons (AMBHHC)*.

**Le gac E., Miralles BM., Brosseau L., De champeaux E,2006.** Les lichens : Structure, écologie et intérêt, Mem. Lic, Univ de Rennes 1 UFR SVE, 135 p.

**Leblanc F and De Sloover J.r, 1970.** Relations between industrialisation and distribution and growth of epiphytic lichen in Montreal, Can. J. Bot., 48,1485-1496

**Lerond M ,1984.** Utilisation des lichens pour la cartographie et le suivie de la pollution atmosphérique. Bull.Ecol.1(51) :7-11.

**Levine A., tenhaken R., Dixon R et Lamb,1994.** H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> from the oxidative burst orchestrates the plant hypersensitive disease resistance reponse. Cell 79:583-593.

**Li X., Zhao M., Guo L., Huang L, 2012.** Effect of cadmium on photosynthetic pigments, lipid peroxidation, antioxidants, and artemisinin in hydroponically grown *Artemisia annua*.J. Environ. Sci. (China) 24, 1511–8. doi :10.1016/S1001-0742(11)60920-0

**Lieutaghip, 1972.** L'environnement végétal flore végétation et civilisation, 317 p.

**Lorenzini G, 1992.** Plants as biomonitors of air quality, 47-63 p.

**Maatoug M., Hellal B., Dellal A., Ayad N., Bourbatach M, 2007.** Detection of air pollutants from road traffic by using the bio accumulative effect of flora species regarding some heavy metals (Pb, Zn, Cu). Ed : pollution atmosphérique n°196, 393 p

**Maire de paris-pajot K, 1994.** Effets de la pollution automobile sur les végétaux à proximité du périphérique de la ville de Paris. Direction des parcs, jardins et espaces verts. Rapport bibliographique et expérimental : 128p.

**Markert B., Breure M., Zeichmeister H,2003.** Bioindicators&biomonitors: principes, concepts, and applications. Elsevier.Amsterdam, 997p.

**Mayer H.** Air pollution in cities [Revue] // Atmospheric Environment. - 1999. - Vol. 33. - pp. 4029-4037.

**Mehallah H et Moralent R., 2019.** Les réponses de la tomate (*Solanumlycopersicum*L.) au stress induit par le cadmium et Decis 25 EC. Thèse de doctorat : biochimie. Université AbdelhamidIbnBadis- Mostaganem, P45.

**Merlen R, 2015.** La biosurveillance : outil de surveillance de l'impact sur l'environnement des émissions atmosphériques industrielles et d'évaluation des risques sanitaires. Pollution atmosphérique, N°226 : 1- 12.

**Mesnoua M, 2016.** Stress abiotiques sur *Atriplexhalimus* L : Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs et bioindicateurs. Thèse de doctorat : sciences agronomiques. Université Abdelhamid Ben Badis-Mostaganem ,81p.

**Neill SJ, Desikan R et Hanock J, 2002.** Hydrogene peroxide signaling. *Curopi Plant Bio* .5:388-395.

**Nylander W ,1866.** Les lichens du jardin du Luxembourg, *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 13,364-372.

**Nylander W, 1866.** Les lichens du Jardin du Luxembourg. *Bulletin de la Société botanique de France* 13 : 364- 372

**OMS,1985.** Organisation Mondiale de la Santé (Fluors et fluorites publié sous la triple égide du programme des nations unies pour l'environnement, 150 p.

**ORS Les composés organiques volatils (COV) [Rapport].** - Ile-de-France : Observatoire régional de santé d'Ile-de-France, décembre 2007.

## Les références bibliographiques

---

**Ozenda P and Clauzade G, 1970.** *Les lichens, étude biologique et flore illustrée.* Ed. Masson, Paris, 808 p.

**Parmentier C., Garrec J, 1994.** Impact de la pollution atmosphérique le long des routes et autoroutes sur la végétation environnante, Utilisation de la Bioindication végétale, Synthèse bibliographique, INRA Centre de Recherches Forestières de Nancy, Laboratoire d'Etude de la Pollution Atmosphérique, 84 p.

**Pascal L, 2009.** Effet à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité. [Revue] // Revue française d'allergologie Vol. 49.

**Pearson LC and Henriksson F, 1981.** Air pollution damage to cell membranes in lichens. II. Laboratory experiments. *The Bryologist* 84: 515-520.

**Pope CA., Dochery DW, 2006.** Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc.* 2006; 56(6):709-42 p.

**Posthumus A, 1992.** General philosophy for the use of plants as indicators and accumulators of air pollutants and as bio-monitors of their effects, 398 p.

**Posthumus A, 1983.** General philosophy for the use of plants as indicators and accumulators of air pollutants and as bio-monitors of their effects. In: Proc of the Vith World Congress on Air Quality. Paris, 16-20 May 1983, vol.2.p:555-561.

**Rahali M, 2002.** Cartographie de la pollution de la région d'Alger en utilisant un lichen *Xanthoria parietina* comme bio-accumulateur. *Pollution Atmosphérique*, n° 175, p. 421-432.

**Ramade, 2002.** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Paris : Dunod, 1075 p.

Research 111(9), pp1116-1132.

**Schutz M, 1995.** Environnement et pollution Comment mesurer ? Comment réagir ? Ed : Publitronec, Nieppe, 253 p..

**Semadi A., Déruelle S, 1993.** Détection de la pollution plombique à l'aide de transplants lichéniques dans la région d'Annaba (Algérie). Ed : Pollution Atmosphérique octobre/décembre, 86-102 p.

**Sérusiaux E., Diederich P et Lambinon J, 2004.** Les macrolichens de Belgique du Luxembourg et de nord de la France, *Ferrantia* 40, 192 p.

**Sharma S ,2009.** Study on impact of heavy metal accumulation in *Brachythecium populeum* (Hedw) B.S.G. *Ecological Indicators* 9: 807-811.

**Signoret J,2001.** Le lichen pulmonaire en Lorraine et des régions voisines, université de Metz. France. Disponible en ligne sur : [http://www.nature-en-lorraine.net/images/images\\_lobaria/lobaria.pdf](http://www.nature-en-lorraine.net/images/images_lobaria/lobaria.pdf)

**Sloof JE,1995.** Lichens as quantitative biomonitors for atmospheric trace-element deposition, using transplants. *Atmospheric Environment* 29 : 11-20.

**Souguir D, 2009.** Modifications métaboliques, moléculaires et génotoxicité induites par le cadmium chez (*Vicia faba*). Thèse de Doctorat. Université d'Auvergne Clermont Ferrand-II (France), Université de 7 Novembre A Carthage (Tunisie).

**Steubing L, 1982.** Problems of bioindication and the necessity of standardization. In *Monitoring of air pollutants by plants-Methods and problems*. Proc. of the international Workshop Osnabruck (F.R. G). Septembre 24-25, 1981, p: 19-24.

**Toumi M, Barris S & Aid F, 2014.** Effets des stress hydrique et osmotique sur l'accumulation de proline et de malondialdéhyde (MDA) chez deux variétés de colza (*Brassica napus* L.). *Section Sciences de la Vie*, n° 36, 17-24p.

**Van Halluwyn C and Lerond M, 1993.** Guide des lichens., Edition no1, Paris , Lechevalier, 344 pages.

**Velikova., Yordanov I and Edreva A, 2000.** Oxidative stress and some antioxidant systems in acidrain-treated bean plants- protective role of exogenous polyamines. *Plant.Sci*, 151,59-66.

**Wolterbee B, 2002.** Biomonitoring of trace element air pollution : principles, possibilities and perspectives. *Environmental Pollution* 120 : 11-21.

**Zaher Al Barakeh, 2012.** Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs - méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution... Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2012. Français.