

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ CHEDLI BENDJIDID - EL TARF  
CHEDLI BENDJIDID – EL TARF UNIVERSITY



جامعة الشاذلي بن جديد – الطارف

Faculté : Sciences De La Nature Et La Vie  
Département : Biologie  
Filière : Sciences Biologiques  
Spécialité : Toxicologie Fondamentale Et Appliquée

### Mémoire de fin d'étude

en vue de l'obtention du diplôme de Master en toxicologie fondamentale et appliquée

**T h è m e :**

*Cartographie de la pollution de la plein ouest de  
l'agglomération d'Annaba*

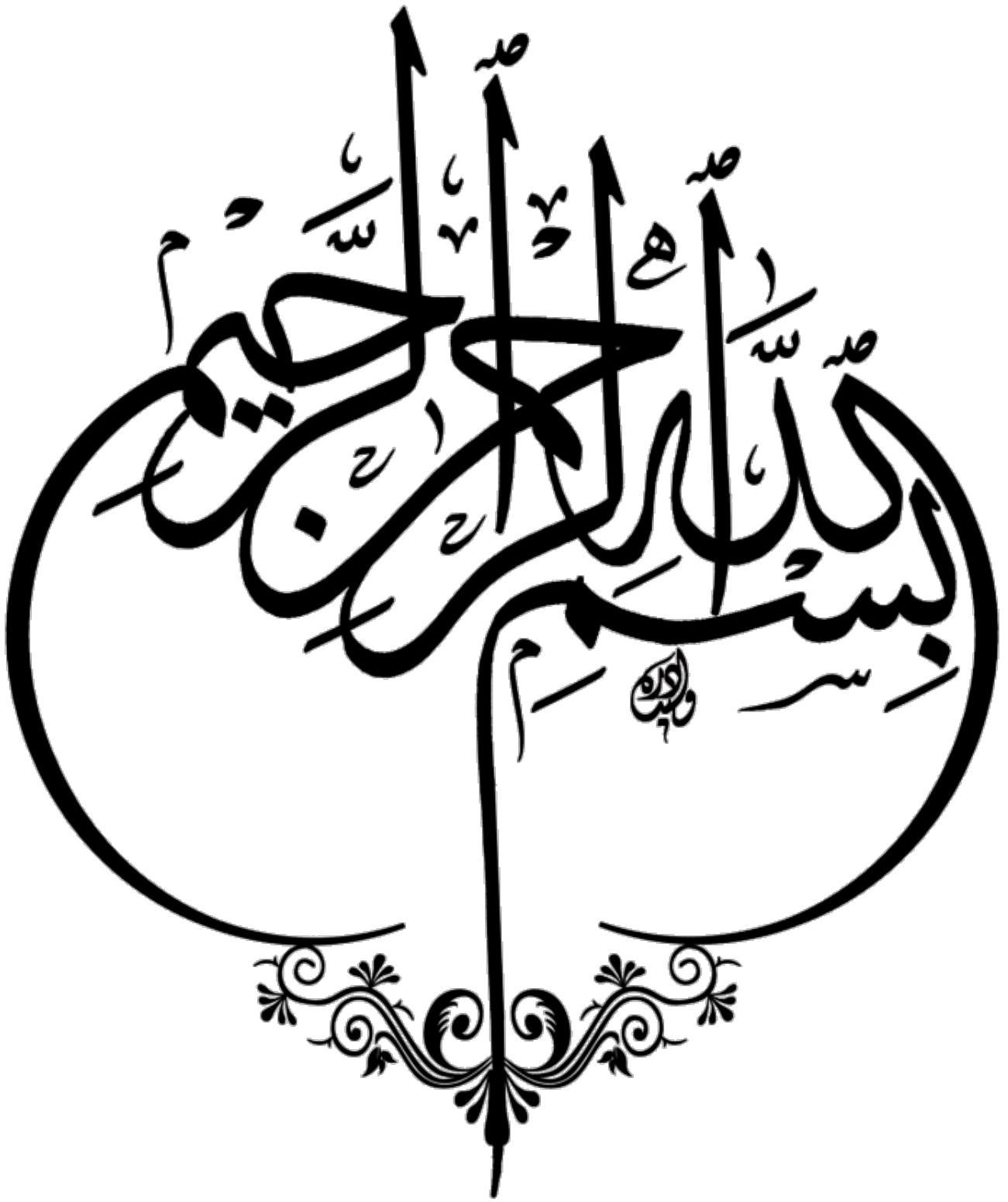
Présenté par : MEDACI Raja & MADI Amel

Le 26/06/2022

Devant le jury composé de :

Mme. Alayat Amel	Présidente	Grade : MCA	Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Mme. Atailia Amira	Examinatrice	Grade : MCB	Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Mr. BELABED Bellal	Promoteur	Grade : MAA	Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Mr. BOUMEDRISE Zineddine	Co-promoteur	Grade : MCA	Université Chadli Bendjedid El-Tarf

Année Universitaire : 2021/2022



# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord « ALLAH » qui nous a aidé et nous a donné la santé, la force, la patience, le courage durant ces longues années d'étude et l'opportunité de mener ce travail à terme.*

*Nous adressons nos sincères remerciements, notre grand respect et notre noble gratitude à notre encadrant : **Mr. BELABED Bellal** qui s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire ; Ainsi, pour la confiance qu'il nous a témoigné, pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à notre professeur : **Mr. BOUMEDRISE Zinedine** pour leur générosité, leur disponibilité tout au long de l'année, ainsi que pour leur aide et conseils lors de l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury **Mme Alayat Amel** et **Mme Atailia Amira** qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicace*

*À Dieu le Tout Puissant, le Très Miséricordieux, Que toute la gloire revienne à Allah qui par sa puissance et sa majesté, ma soutenu durant tout mon cycle et m'a donné le courage, la force et santé nécessaires pour la réalisation de ce travail.*

*En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail...*

*À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.*

*À ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*À Mes chères sœurs.*

*À Mes chers frères, et surtout mon petit frère Khir-Eddine que j'aime beaucoup, et je lui souhaite de réussir son Bac.*

*À mes chers neveux et nièces : Adem, Ayoub, et ma princesse Rahaf.*

*À mes proches amis : Fadila, Imen et bien sur ma binôme Raja.*

*À tous mes professeurs et à toute la promotion de Master-Toxicologie fondamentale et appliquée, je vous souhaite plus de succès et d'excellence.*

*Amel*

# Dédicace

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que Je dédie ce travail à :*

*Mon très cher père **Ahcene** : De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices, de sollicitudes, d'encouragement et de prières. J'espère que ce travail est le fruit de acharné et de vos effort. En ce jour, j'espère réaliser l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. **Allah** vous bénisse.*

*Ma très chère mère **Yamina** : La source de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoi que je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse **Allah** tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*Ma chère sœur **Aboura** que je l'aime beaucoup.*

*Mes chers frères **Hamza, Ramzi, Faisal, Abdelghani** et **Samir** : en témoignage de la fraternité, avec mes souhaits de bonheur de santé et de succès.*

*Tous les membres de Ma Famille.*

*Mes chères amies **AYA** et **AMEL** : je les remercie pour leur compréhension permanant tout au long de mes études universitaires, **Je vous aime toutes.***

*Tous mes professeurs, et tout personne compulse ce modeste travail.*

*Raja*

## Résumé

La région d'Annaba a un problème aigu de pollution atmosphérique urbaine et industrielle. Notre travail consiste à inventorier les lichens épiphytes dans l'agglomération d'Annaba, et de les utiliser comme des bioindicateurs pour l'estimation de la qualité de l'air.

Les relevés réalisés sur l'ensemble des 12 stations ont montrés une diversité des phorophytes pour les lichens épiphytes (5 phoropytes) et la principale espèce est *M. azedarach* L, et pour les lichens l'espèce *L. elaeoachroma* est dominante parmi les 21 espèces présentes.

L'estimation de la qualité de l'air est déterminée selon l'indice de la diversité lichénique (LDV), révèle la dominance de deux classes : des stations moyennement polluées et des stations extrêmement polluées.

Pour les valeurs de diversité d'indicateurs d'eutrophisation (LDVN), les stations avaient des degrés de pollution variables de faible à moyenne à un degré très élevé. La principale source de pollution incriminée est le trafic routier.

**Mots clés:** Annaba; LDV; LDVN; lichens épiphytes; pollution atmosphérique; qualité de l'air.

## **Abstract**

The Annaba region has an acute problem of urban and industrial air pollution. The present work consists in inventorying the epiphytic lichens in the agglomeration of Annaba, and to use them as bioindicators for the estimation of the air quality.

The surveys carried out on all 12 stations showed a diversity of phorophytes for epiphytic lichens (5 phorophytes) and the main species is *M. azedarach* L, and for lichens the species *L. elaeoachroma* is dominant among the 21 species present.

The estimation of air quality is determined according to the lichen diversity index (LDV), revealing the dominance of two classes: moderately polluted stations and extremely polluted stations.

For eutrophication indicator diversity values (LDVN), the stations had varying degrees of pollution from low to medium to very high. The main source of pollution complained of is road traffic

**Key words:** Annaba; air pollution; air quality; epiphytic lichens; LDV; LDVN.

## ملخص

تعاني منطقة عنابة من مشكلة حادة تتمثل في تلوث الهواء في المناطق الحضرية والصناعية. يتمثل عملنا الحالي في حصر الأشنات على مستوى الجهة الغربية لمدينة عنابة, واستخدامها كمؤشرات حيوية لتقدير جودة الهواء.

أظهر مجموع عمليات المسح التي أجريت في جميع المحطات الاثني عشر تنوعا في النباتات الحزازية (5 phoropytes) والنوع الرئيسي هو *M. azedarach L*, وبالنسبة للأشنات يسود النوع *L. elaeoachroma* بين 21 نوعا.

يتم تحديد تقدير جودة الهواء وفقا لمؤشر تنوع الأشنة (LDV), مما يكشف عن هيمنة فئتين : المحطات متوسطة التلوث والمحطات شديدة التلوث.

بالنسبة لقيم تنوع مؤشر *(LDVN) eutrophisation*, كانت للمحطات درجات متفاوتة من التلوث من منخفض إلى متوسط إلى مرتفع للغاية. المصدر الرئيسي للتلوث المشكومنه هو حركة المرور على الطرق.

**الكلمات المفتاحية :** أشنات نباتية ; تلوث الهواء ; جودة الهواء ; عنابة ; LDV ; LDVN .

## *Liste des figures*

	<b>Page</b>
Figure 01 : La structure du thalle	4
Figure 02 : Thalle squamuleux	7
Figure 03 : Thalle foliacé	7
Figure 04 : Thalle composite	7
Figure 05 : Thalle lépreux	7
Figure 06 : Thalle crustacé	7
Figure 07 : Thalle fruticuleux	7
Figure 08 : Thalle gélatineux	7
Figure 09 : Principaux organes de structure de fixation et de reproduction rencontrés chez les lichens	13
Figure 10 : Unités du complexe pétrochimique	54
Figure 11 : Application de la méthode IBLE	56
Figure 12 : Échelle d'évaluation des VDL	57
Figure 13 : Echelle d'évaluation de la qualité de l'air	58
Figure 14 : Localisation géographique de la région d'étude (Annaba)	61
Figure 15 : Placement de la grille d'observation	64
Figure 16 : Grille d'observation placée sur l'arbre	64
Figure 17 : Matériel utilisé sur le terrain	65
Figure 18 : Carte présentant les zones d'échantillonnage	69
Figure 19 : Carte présentant la position des points d'échantillonnage	69
Figure 20 : <i>Phycia aipolia</i>	70
Figure 21 : <i>Parmelia sulcata</i>	70
Figure 22 : <i>Physconia grisea</i>	70
Figure 23 : <i>Phycia adscendens</i>	70
Figure 24 : <i>Lecidella elaeachroma</i>	70
Figure 25 : <i>Arthopyrenia puntiformis</i>	70

Figure 26 : Coupe de thalle de <i>Abrothallus microspermus</i> (10×100)	71
Figure 27 : Coupe de thalle de <i>physconie grisea</i>	71
Figure 28 : Le spectre systématique des espèces lichéniques de l'agglomération d'Annaba	72
Figure 29 : Abondance relative des espèces selon le type de thalle	72
Figure 30 : Fréquences des espèces prélevées dans l'agglomération d'Annaba	73
Figure 31 : L'effet du trafic routier sur la distribution des lichens	74
Figure 32 : Fréquence relative de es différents types des phorophytes (en pourcentage)	76
Figure 33 : Distribution des phorophytes dans la zone d'étude	77
Figure 34 : Fréquence des lichens sur différents types de phorophytes	78
Figure 35 : fréquence des arbres échantillonnés en fonction de leur circonférence	79
Figure 36 : Distribution des arbres selon la circonférence	80
Figure 37 : Histogramme présente la richesse spécifique en lichens selon la circonférence de chaque phorophyte	80
Figure 38 : Carte du LDV	81
Figure 39 : Fréquence des lichens sur les différentes directions (Nord, Est, Ouest et Sud)	83
Figure 40 : Carte présentant l'indice LDVN	83
Figure 41 : Comparaison des valeurs du LDV et le LDVN	87
Figure 42 : Carte présentant l'indice de biodiversité Shannon-Weaver	88

## *Liste des tableaux*

	<b>Page</b>
Tableau 01 : Classification des espèces lichéniques en fonction du thalle	71
Tableau 02 : Exemple de calcul de LDV	75
Tableau 03 : Classification des stations selon l'échelle d'évaluation des VDL de Asta (2002)	82
Tableau 04 : Exemple de calcul de LDVN	85
Tableau 05 : Classification des stations selon l'indice de LDVN	86

## *Liste des Abréviations*

**I.P.A** : Indice de Pureté Atmosphérique

**I.P** : Indice de Poléotolérance

**IQA** : Indice de la Qualité de l' Air

**IBLE** : Indice Biologique de Lichens Epiphytes

**LBI** : Indice de Biodiversité des Lichens

**LDV** : Valeurs de la Diversité Lichénique

**LDVN** : Valeur de Diversité d'Indicateur d'Eutrophisation

**OMS** : Organisation Mondiale de Santé

**OMPE** : Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement.

**Ppb** : Part per billion

## *Table des matières*

**Résumés**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

**Introduction.....1**

### *Partie 1 : Synthèse bibliographique*

#### **Chapitre I : Les Lichens**

1	Définition des lichens :.....	4
2	Anatomie et structure des thalles .....	4
3	Morphologie :.....	5
4	Ecologie des lichens :.....	8
4.1	Les facteurs substratiques :.....	8
4.2	Les facteurs climatiques : .....	8
5	Physiologie des lichens :.....	9
5.1	l'eau-provenance, absorption et circulation :.....	9
5.2	Respiration et nutrition : .....	10
5.2.1	Respiration.....	10
5.2.2	Nutrition .....	10
6	Reproduction : .....	11
6.1	Reproduction végétative : .....	11
6.2	Reproduction asexuée : .....	12
6.3	Reproduction sexuée :.....	12
7	Importance des lichens : .....	13

#### **Chapitre II : La Biondication**

1	Définition .....	15
2	Principe .....	16

3	Les types de la bioindication .....	17
4	Espèces bioindicatrices .....	20
4.1	Définition .....	20
4.2	les espèces végétales .....	21
4.3	les espèces animales.....	23
4.4	Les microorganismes bioindicateurs.....	28
5	La biosurveillance .....	28
5.1	Définition .....	28
5.2	Biosurveillance par les lichens.....	29
5.3	Types de la biosurveillance.....	30
5.3.1	Biosurveillance active .....	30
5.3.2	Bio surveillance passive .....	30
5.4	Biosurveillance en Algérie.....	30
5.5	Avantages et limites de la biosurveillance :.....	31

### **Chapitre III : La Pollution Atmosphérique**

1	Définition:.....	32
2	L'échelle de la pollution atmosphérique : .....	32
3	Les sources de la Pollution Atmosphérique : .....	33
3.1	Origines naturelles .....	33
3.2	Origines accidentelles .....	34
3.3	Origines anthropique : .....	35
4	La pollution atmosphérique dans le monde :.....	36
5	La Pollution atmosphérique en Algérie :.....	37
6	L'impact de la pollution atmosphérique :.....	38
6.1	Impact sur la santé : .....	38
6.2	Impact sur l'environnement :.....	39

6.2.1	L'impact sur les végétaux : .....	40
6.2.1	L'impact sur les animaux : .....	40
6.3	Impact sur l'économie.....	41
7	Les moyens de contrôle /les solutions : .....	42

## **Chapitre IV : La Pollution Et Les Lichens**

1	Pollution et lichens : .....	45
1.1	Sensibilité des lichens à la pollution atmosphérique.....	45
1.1.1	Les effets du l'anhydride sulfureux(SO <sub>2</sub> ) sur les lichens : .....	47
1.1.2	Les Autres polluantes ayant une action sur les lichens .....	48
1.2	Pénétration des Polluants dans les lichens .....	48
1.3	Apports des lichens dans l'étude de polluants atmosphériques .....	49
2	Indicateurs licheniques et qualité de l'air .....	50
2.1	<i>Méthodes qualitatives</i> .....	50
2.1.1	Méthode de Hawksworth et Rose (1970) .....	50
2.1.2	La méthode de Van Haluwyn et Lerond (1993) .....	51
2.2	<i>Méthodes quantitatives</i> .....	51
2.2.1	l'I.P.A. (indice de pureté atmosphérique) : .....	52
2.2.2	l'indice de poléotolérance . .....	53
2.2.3	l'indice de biodiversité des lichens (LBI) .....	54
2.2.4	L'indice biologique de lichens épiphytes (IBLE) .....	55
2.2.5	Valeur de diversité lichénique (LDV) .....	57
2.2.6	L'Indice de la qualité de l'air (IQA) .....	58
2.2.7	La méthode de cartographie en réseau .....	58

## ***Partie 2 : Etude expérimentale***

### **Matériel et méthodes**

1	Présentation de la zone d'étude: .....	61
2	Echantillonnage.....	62
2.1.	Méthode utilisée pour évaluer la qualité de l'air :.....	62
2.2.	Choix des stations d'échantillonnage: .....	63
2.3.	Choix des arbres: .....	63
2.4.	Relevé sur le terrain:.....	64
2.5	Matériel utilisé sur le terrain.: .....	64
2.6	Préparation et conservation des échantillons:.....	65
3	Identification des lichens:.....	66
3.1	Technique de détermination des échantillons lichénique.....	66
3.2	Identification des lichens au laboratoire:.....	66

### **Résultats et discussions**

1	Echantillonnage : .....	69
2	Espèce identifiées :.....	69
3	Repartition des lichens selon le type de thalle:.....	71
4	Spectre systematique :.....	72
5	Spectre physiologique :.....	73
6	Frequence des especes lichéniques recensées dans la zone d'étude:.....	74
7	Calcul de LDV :.....	75
8	les différents relevés du LDV :.....	76
8.1	la proximité des axes routiers :.....	76
8.2	Le type de phorophytes :.....	77
8.2.1	Fréquence relative des phorophytes échantillonnés.....	77

8.2.2 Fréquence relative des lichens selon le type des phorophyte .....	79
8.3 La Circonférence :.....	80
9 Résultats de l'Indice de la diversité lichéniques(LDV).....	82
10 Calcule LDVN.....	85
11 Les variations de LDV et LDVN.....	88
12 l'indice de biodiversité shannon-weaver .....	88
<b>Conclusion.....</b>	<b>91</b>

## **Références bibliographiques**

# INTRODUCTION

## Introduction

Les phénomènes de pollution atmosphérique ont pris une importance croissante dans le monde produisant de nouvelles problématiques, principalement environnementales, puis sanitaires à l'échelle régionale et planétaire (**Nober *et al.*, 2003 ; Petkova *et al.*, 2013**).

Près de 91 % de la population mondiale est exposée dans ses lieux de vie à des seuils de pollution atmosphérique dépassant les recommandations de l'organisation mondiale de la santé. On assiste ces dernières années, dans ce contexte préoccupant, à un changement de paradigme concernant les mesures de la qualité de l'air qui est un sujet préoccupant en raison des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique (**OMS, 2021**).

En Algérie, les problèmes de pollution accumulés au fil des décennies passées sont à l'image de ces grandes villes dont le développement industriel, la circulation automobile et les déchets ménagers asphyxient leur environnement. Parmi les villes les plus polluées, on peut citer la ville d'Annaba (**Semadi, 1989**).

Annaba, est une ville côtière, industrielle caractérisée par une atmosphère très polluée à cause du trafic routier où le niveau de polluants dépasse largement les limites nationales et normes internationales (**Saihia et Dahech, 2017**). L'existence d'un parc automobile très important par rapport aux distances parcourues, plus certaines caractéristiques topographiques comme la proximité de la mer, l'existence des plans d'eau, la présence des hauteurs et leurs orientations. Des facteurs climatiques aussi (l'humidité relative toujours très élevée toute l'année et la direction des vents entraînant des mouvements d'air alternatifs brise de terre, brise de mer, contribuant à maintenir les polluants dessus la zone d'émission, ainsi qu'un brouillard naturellement fréquent à Annaba) qui créent un climat propice au développement de la pollution (**Bouregghda, 2004**).

Leur grande sensibilité des espèces dites « bioindicatrices » au changement atmosphérique nous permet de les utiliser comme afin d'évaluer la qualité de l'air. Donc, la bioindication s'est devenue un outil fiable et reconnu par les aménageurs et décideurs du monde entier pour estimer certains paramètres de l'environnement et en particulier celui de la qualité de l'air (**Gavériaux, 1998**).

Les lichens sont des organismes très sensibles aux polluants atmosphériques et de nombreuses espèces disparaissent lorsque la qualité de l'air se dégrade ; c'est la raison pour

laquelle ils sont utilisés en tant que bioindicateurs et bioaccumulateurs de la pollution atmosphérique (**Ait Hammou, 2014**).

Ces modestes « végétaux » sont considérés comme les pionniers de l'installation de la végétation car ils s'accommodent des conditions les plus contraignantes. Leur croissance varie fortement en fonction des facteurs de l'environnement. Ainsi, les lichens ne possèdent aucun moyen de défense contre les agressions du milieu. Cela leur confère une dépendance directe de l'atmosphère et un grand pouvoir d'accumulation qui s'ajoute à d'autres particularités structurales et physiologiques. Le recours à la biosurveillance de la pollution atmosphérique à l'aide des végétaux comme les lichens se révèle intéressant pour évaluer l'impact de la pollution sur les écosystèmes (**Carrega, 2010**).

Peu de travaux qui ont visé l'évaluation de la qualité de l'air de la ville d'Annaba, en utilisant les lichens comme bioindicateurs. Ce modeste travail a pour objectif de répondre à la problématique suivante : quelle est la vraie estimation de la qualité de l'air au niveau du plein ouest de la ville d'Annaba?

Afin de répondre à la problématique de cette étude, une cartographie de la pollution au niveau de l'ouest d'Annaba a été réalisée en se basant sur le LDV comme un indice de la qualité de l'air. Ce travail est divisé en deux volets, le premier est théorique introduisant la pollution, les lichens, l'effet de la pollution sur les lichens et les indices de la qualité de l'air à base de l'utilisation des lichens comme bioindicateurs. Le deuxième volet est pratique où des relevés ont été réalisés sur l'ensemble des stations de la zone d'étude visant la récolte des données sur la nature des lichens épiphytes et leurs phorophytes afin de calculer le LDV et le LDVN.

**SYNTHESE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

# Chapitre I : Les lichens

## 1. Définition des lichens

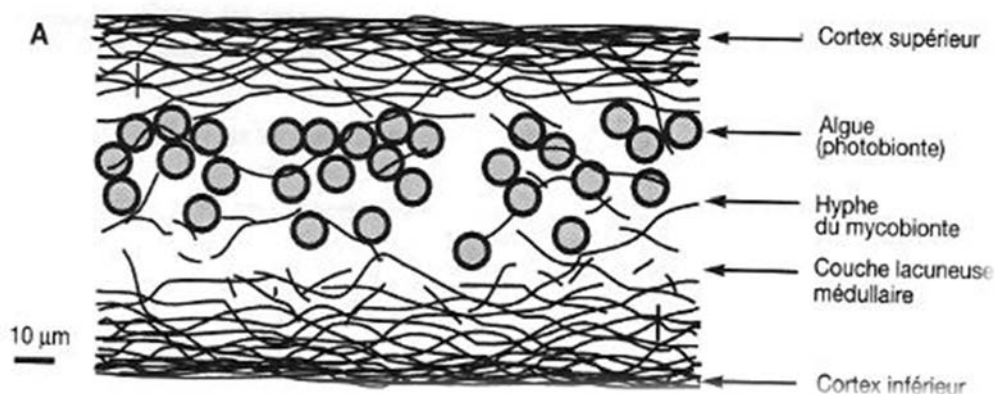
Un lichen est un organisme composite résultant de l'association entre deux êtres vivants : un champignon et une algue ou un champignon et une cyanobactérie. Chacun des deux partenaires tient un rôle important dans la survie de l'autre (**Debot, 1999**).

Le champignon est en bas, il analyse donc les supports par ses enzymes et assure à l'algue un milieu humide et les sels minéraux nécessaires, tandis que l'algue, qui est en haut, fournit au champignon les produits organiques par photosynthèse (**Robert, 2000**). Cette association étroite est à bénéfice réciproque entre ces deux êtres vivants se nomme symbiose (**Rose et Hawksworth, 1981**).

Les lichens génèrent un appareil végétatif composé à 90 % par le champignon, appelé « le thalle », qui se développe lentement à la surface d'une variété de supports ; ce champignon est responsable de la morphologie des lichens, c'est-à-dire de la forme du corps du lichen (**Hock et al., 2012**).

## 2. Anatomie et structure des thalles

Selon (**Flagey, 1883**), l'organe de la végétation dans les lichens est le thalle (**Figure 01**), qui présente des variations infinies en grandeur et en couleur. C'est les hyphes qui sont à l'origine de la morphologie du thalle et ils occupent près de 90 % de la biomasse totale du lichen (**Asta, 1994**). La forme d'un lichen est déterminée par le champignon, qui forme un tissu compact et filamenteux enveloppant d'innombrables algues unicellulaires appelées Gonidies ; celles-ci sont concentrées dans une partie bien précise du lichen (**Goujon, 2004**).



**Figure 01** : Structure du thalle (<https://www.vigienature-ecole.fr/node/136>)

Au point de vue structure anatomique, le thalle présente deux structures bien distinctes :

➤ **Structure homéomère**

Le thalle des lichens est dit homéomère quand l'algue y prédomine sur le champignon, ou quand les cellules d'algues et d'hyphes sont mêlées et réparties dans toute l'épaisseur du thalle aux mêmes proportions (chez les *Collema* par exemple) (Serge, 2005).

➤ **Structure hétéromère**

C'est-à-dire formé de couches anatomiquement différentes, tantôt superposées (structure stratifiée), tantôt concentriques (structure radiée) :

- ✓ *Structure hétéromère stratifiée* : Chez la plupart des thalles foliacés, chez un petit nombre de thalles fruticuleux principalement *Everniaprunastri* et chez quelques thalles crustacés, on observe sur une coupe transversale la succession suivante : cortex supérieur, couche gonidiale, médulle et cortex inférieur (Ozenda et Clauzade, 1970).
- ✓ *Structure hétéromère radiée* : chez la plupart des lichens fruticuleux, la couche gonidiale fait tout le tour de la section transversale, quelle que soit la forme arrondie, aplatie ou irrégulière. La partie la plus interne de la médulle peut disparaître en grande partie comme chez les *Alectoria* dont le thalle est plus ou moins creux, ou au contraire être formée comme chez les *Usnea* d'hyphes très serrés parallèles à l'axe et constituée un cordon axial.

### 3. Morphologie

Le thalle est l'appareil végétatif du lichen qui assure sa nutrition, sa survie et sa croissance ; Il présente une morphologie spécifique, différente de celle des algues et des champignons libres.

On peut distinguer plusieurs grands types de thalles (Gaveriaux, 1999) :

- **Thalles squamuleux** : Ils sont formés de petites squames ou écailles concaves ou convexes (Agnes, 2004). Les thalles squamuleux sont semblables pour épousseter (dépoussiéré) et couvrir des lichens d'une croûte en manquant d'un cortex inférieur. Ils sont constitués de petites squamules ou écailles, de plus de 1.5 mm, serrée les unes contre les autres, contiguës, plus ou moins imbriquées ou superposées, convexe,

concaves ou plates ; plus ou moins appliquées et fixée sur le substrat (**Trevor et al., 1994**) (**Figure 02**).

- ***Thalles foliacés*** : Forment des thalles en forme de lames ou de feuilles, ils sont faiblement appliqués au substrat et sont facilement détachables par endroits (**Figure 03**).
- ***Thalles composites***: Combinent le type foliacé ou squamuleux, au moins transitoirement, sous la forme de petites squamules et le type fruticuleux, sous la forme de petites branches dressées, creuses, ramifiées ou non et parfois de forme très caractéristique (**Emmanuel et al., 2004**) (**Figure 04**). Selon (**Ozenda et Clauzade, 1970**), les thalles composites sont spéciaux au *Cladonia*, ils comportent :
  - *Un thalle primaire crustacé* : squamuleux ou plus rarement foliacé, plus ou moins étalé sur le substrat.
  - *Un thalle secondaire fruticuleux* : Formé d'éléments appelés «podétions» se développant perpendiculairement au substrat, ramifié ou non, fréquemment en forme d'entonnoir
  - *Thalles filamenteux* : Ils sont formés par des filaments très fins, enchevêtrés. Ils ont l'aspect de coussinets laineux étalés sur le support. Ils sont en effet constitués par une algue verte filamenteuse appartenant au genre *Trentepohlia*, dont les filaments sont recouverts par une gaine d'hyphes (**Ozenda et Clauzade, 1970**).
- ***Thalles lépreux*** : Ils sont caractérisés par l'absence d'un cortex supérieur et inférieur, la médulle étant attachée directement au substrat de sorte que le lichen ne puisse pas être séparé de lui (**Trevor et al., 1994**). Selon (**Gaveriaux, 1999**), le thalle lépreux est un groupe plus en moins cohérent de granules (0,1-0,2 mm) constitués chacun d'un peloton d'hyphes associés à quelques cellules algales (**Figure 05**).
- ***Thalles crustacés*** : Forment des thalles ressemblant à des croûtes, ils adhèrent au support sur toute leur surface ; Ils ne peuvent en être détachés (**Figure 06**).
- ***Thalles fruticuleux*** : Présentent des formes barbues ou en lanière et sont fixés en un seul point au support (**Gaveriaux, 1999**) (**Figure 07**).
- ***Thalles gélatineux*** : Ils contiennent des cyanobactéries réparties dans toute l'épaisseur du thalle. A l'état sec ils sont noirs, coriaces et friables. En présence d'eau ils gonflent pour donner des masses gélatineuses (**Wirth, 1995**) (**Figure 8**).



**Figure 02:** Thalle squamuleux



**Figure 03 :** Thalle foliacé



**Figure 04 :** Thalle composite



**Figure 05 :** Thalle lépreux



**Figure 06 :** Thalle crustacé



**Figure 07 :** Thalle fruticuleux



**Figure 08 :** Thalle gélatineux

## 4. Ecologie des lichens

Chaque espèce de lichen a besoin pour se développer des conditions et des facteurs écologiques particuliers ; Ces derniers peuvent être regroupés en trois ensembles : les facteurs substratiques, climatiques et biologiques (**Kappen, 1993**).

### 4.1. Les facteurs substratiques

Les lichens se développent dans des milieux très variés et sur des substrats naturels ou artificiels en fonction de leurs caractéristiques propres. Ils colonisent tous les substrats possibles : terre, écorces, bois, feuilles coriaces, rochers siliceux, ou calcaires, vieux murs, verre, métaux, os, carton ...ou autre lichen. Il n'y a guère que dans la mer que les lichens font défaut. Dans tous les cas, l'air pur leur est indispensable, l'atmosphère polluée des villes et des zones industrielles les font disparaître (**Henry, 2008**).

### 4.2. Les facteurs climatiques

- **L'atmosphère** : constitue un ensemble de facteurs écologiques tout à fait important par le fait que les lichens en tirent une partie de l'eau, le gaz carbonique et les sels minéraux apportés par la pluie ou le vent.
- **L'eau** : Elle joue un rôle capital dans la répartition des lichens, notamment le degré d'hydratation du thalle qui conditionne les fonctions vitales. Il existe en fait une relation étroite entre l'apport hydrique nécessaire à l'activité physiologique du lichen et la nature de son photosymbiote. Ainsi, de la vapeur d'eau suffit aux lichens à algues vertes alors qu'un apport liquide est nécessaire aux lichens à cyanobactérie.
- **L'humidité** : C'est le facteur principal, mais le lichen reçoit cette humidité de l'atmosphère (aérohygrophile) ou du substratum (substrat hygrophile). Au premier groupe appartiennent de très nombreux fruticuleux ; dans le second on trouvera beaucoup de foliacés, de crustacés à hypothalle épais, spongieux, mais également des fruticuleux poussant en touffes serrées et dont l'ensemble forme un petit massif spongieux et ménage aussi un microclimat.
- **La température** : Les lichens supportent toutes les températures que l'on peut rencontrer dans les différentes régions du globe et il semble bien que ce soit par l'influence de la température sur l'humidité, beaucoup plus que par une action directe, que les espèces soient affectées par ce facteur. Aussi, il faut rappeler l'effet de la température sur l'intensité des fonctions métaboliques notamment la respiration et la photosynthèse (**Frey, 1970**).

On trouve même des lichens qui sont capables de coloniser des matières plastiques ou de vieux pneus. La diversité de ces exigences et les propriétés des différentes espèces de lichens telles que la reviviscence et la résistance aux températures extrêmes entraîne qu'ils soient répandus à travers presque toutes les régions du monde. On les trouve des zones les plus extrêmes (pôles, sommets des montagnes jusqu'à la limite des neiges éternelles, déserts rocheux,...), aux zones les plus communes (dans les bois, sur les murs, etc.). Par ailleurs, on peut considérer les lichens comme des espèces pionnières. Ils sont les premiers, avec les mousses, à coloniser des substrats nus tels que les roches (**Kappen, 1993**).

Pour les espèces saxicoles, le type de roche sur lequel elles poussent peut être important, les types de roche siliceuse (acide) et basique supportant chacun une gamme différente d'espèces. Le ruissellement de ces roches, ou du ciment ou du mortier, peut affecter la communauté de lichens située en dessous (**Kappen, 1993**).

Sur les arbres, le pH et l'absorption d'eau de l'écorce peuvent affecter la colonisation par les lichens. Les arbres à écorce les plus acides sont les mélèzes et les pins (jusqu'à pH 3,2), puis par ordre d'acidité réductrice bouleau, chêne (pH 3,8-5,8), sorbier des oiseleurs, aulne, hêtre, tilleul, frêne (pH 5,2-6,6), sureau, érable sycomore et champêtre, pommier, peuplier, saule et orme (pH 4,7-7,1). Le pH de l'écorce est affecté par la pollution et peut varier à différentes hauteurs dans l'arbre (**Kappen, 1993**).

## **5. Physiologie des lichens**

### **5.1. L'eau-provenance, absorption et circulation**

L'eau provient de l'humidité atmosphérique ou des précipitations et du substrat, la teneur en eau des lichens sera donc très variable selon les conditions environnantes et également selon l'espèce.

Le mécanisme de l'absorption de l'eau est très différent de celui qui existe chez les végétaux supérieurs. Il s'agit surtout d'une absorption par des phénomènes physique : capillarité et hygroscopicité des parois des hyphes, cette absorption se produit par toutes les parties du thalle, mais surtout au niveau des ouvertures du cortex.

La circulation de l'eau à l'intérieur des thalles est pratiquement inexistante, il n'y a presque pas de circulation ; on constate que l'eau présent dans le thalle est en très grande partie extracellulaire.

La pénétration de l'eau dans la cellule est au contraire un phénomène vital et semble très rapide et il a été constaté que même lorsque la teneur en eau du thalle s'abaisse, celle du cytoplasme reste assez élevée.

La perte de l'eau se produit également par des phénomènes physiques et il s'agit donc surtout de la perte d'eau extracellulaires, la résistance des lichens à la sécheresse est grande, de 2 à 3 moins en général, et même 6 moins pour certains (**Souchon, 1971**).

## **5.2. Respiration et nutrition**

### **5.2.1. Respiration**

L'intensité de la respiration est très faible (0.2 à 3 mg de CO<sub>2</sub> dégagé par gramme de poids sec et par heure). Ce taux varie avec la température et la teneur en eau du thalle. La couche algale a une respiration plus active que les couches fongiques et elle est vraiment la couche la plus active surtout sur le plan métabolique du complexe (**Trotet, 1968**).

### **5.2.2. Nutrition**

✓ **Nutrition minérale** : Les lichens prennent les éléments minéraux que l'eau atmosphérique dissout ou entraîne sous forme de suspension ; ces sels minéraux proviennent également de la poussière qui se dépose sur le lichen et son substrat, de même que de l'attaque mécanique et chimique de ce dernier par le lichen. Chaque espèce dispose d'un pouvoir de fixation propre vis-à-vis d'un même élément. Cette fixation aboutit à une accumulation du minéral, puisque le lichen ne perd pas de substance comme le font les végétaux supérieurs lorsqu'ils perdent leurs feuilles ou leur écorce. C'est en outre à cette faculté d'accumulation des lichens qu'il faut attribuer leur sensibilité aux agents de la pollution atmosphérique.

Les lichens sont souvent utilisés comme bio-indicateurs, très peu tolérants vis à vis de gaz toxiques tels que le dioxyde de soufre, ils disparaissent de ces zones polluées. La présence d'une grande variété d'espèces et leur abondance sont généralement indicatrices d'une bonne qualité de l'air (**Gombert et Asta, 2006**).

✓ **Nutrition azotée** : Quand l'algue est une cyanophycée, elle fixe l'azote atmosphérique ; dans les autres cas, le lichen s'alimentera en azote minérale (nitrates, nitrites ou sels d'ammonium) dissous ou entraîné par l'eau.

Certaines espèces dites nitrophiles, ont des besoins en azote très élevés ; comme les déjections animales et certains engrais contiennent une grande partie d'azote, ces lichens seront retrouvés dans des lieux fréquentés par les animaux et dans les terrains cultivés.

La synthèse des protides à partir des produits azotés est très lente, ce qui pourrait être par suite de la lenteur de la circulation, pouvant ainsi être la cause de la faible croissance et grande longévité des lichens.

✓ **Nutrition carbonée** : L'algue par son activité photosynthétique, assimile le carbone atmosphérique, cette assimilation est beaucoup plus faible que celle mesurée chez les végétaux supérieurs et chez les algues libres. Quand le lichen vit sur un végétal ou sur des débris organiques, la nutrition carbonée peut être assurée par le champignon qui n'a pas perdu ses facultés de parasitisme ou de saprophytisme.

Donc l'algue, grâce à sa chlorophylle, prépare par sa photosynthèse la nourriture nécessaire à la communauté et le champignon, tout en donnant sa forme au thalle, approvisionne l'algue en eau et en sels minéraux, et le protège contre la sécheresse et les fortes radiations lumineuses (**Honegger, 1991**).

## **6. Reproduction**

La reproduction des lichens se fait par plusieurs façons :

- *Par dissémination du complexe lichénique* : soit par bouturage de fragments de thalle, ou par émission de sorédies ou d'isidies.
- *Par la production de spores du champignon* : qui en germant ensuite donnent des hyphes qui capturent des algues. En revanche, les gonidies ne se multiplient que par voie asexuée (**Ozenda, 2000**).

### **6.1. Reproduction végétative**

Le complexe lichénique peut se disséminer, soit sous la forme de fragments de thalle (les lichens peuvent subsister longtemps à l'état sec, ils sont alors très cassants et leurs débris, dispersés par divers agents, vents, animaux, constituent autant de boutures) et dans chaque fragment, l'algue et le champignon sont présents, ce qui permet une reprise de croissance et la formation d'un nouveau thalle.

La reproduction végétative du lichen peut se faire par simple fragmentation du thalle, à la suite notamment de contraintes mécaniques (arrachement par le vent, piétinement par des

animaux ou autre). De nombreuses espèces terricoles se dispersent incontestablement de la sorte (**Serussiaux et al., 2004**).

Chez beaucoup d'espèces et c'est pour certaines d'entre elles, le seul mécanisme de reproduction connu, les deux partenaires organisent à cette fin des organes végétatifs. Ce sont les isidies ou les soralies (celles-ci produisant des sorédies). Les sorédies sont de petites granulations de 25 à 100 microns de diamètre formées par quelques gonidies entremêlées et entourées de filaments mycéliens. Elles sont libérées par interruption du cortex et ont une très grande importance dans la multiplication végétative des lichens (**Ozenda et clauzada, 1970**).

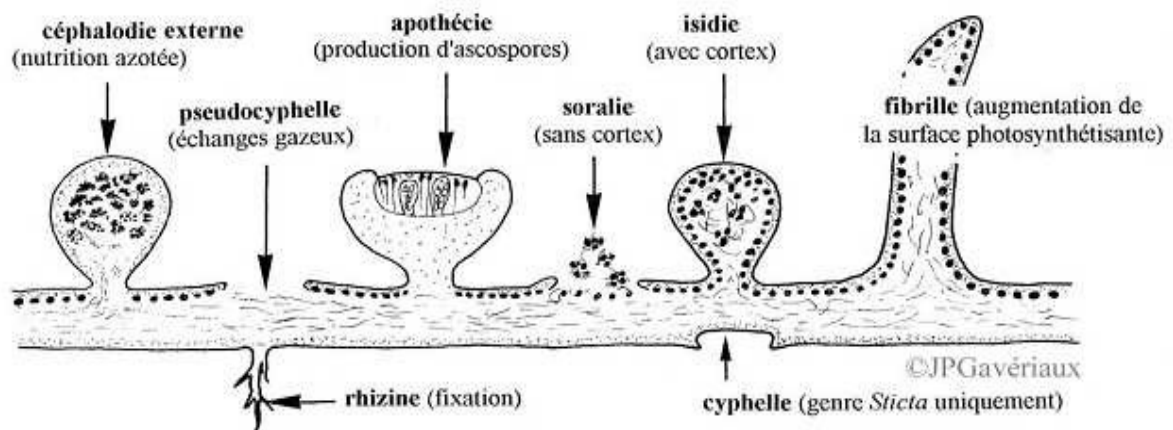
## **6.2. Reproduction asexuée**

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 formes 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. Bien qu'il soit parfois soupçonné que ces conidies interviennent dans les remaniements sexuels des chromosomes, cette théorie n'a jamais été démontrée et il est dès lors plus raisonnable de considérer qu'il s'agit là d'un mode de reproduction asexué du mycobionte. Pour certaines espèces, les conidies sont toujours dispersées seules (c'est-à-dire sans le photobionte) et dès lors pour reconstituer un thalle lichénisé, elles doivent obligatoirement retrouver leur partenaire algal (**Emmanuel et al., 2004**).

## **6.3. Reproduction sexuée**

La majorité des lichens sont des ascomycètes, les basidiomycètes sont moins représentés. L'organe contenant les asques est nommé l'ascocarpe ; Ces asques sont accompagnés de filaments stériles (les paraphyses) formant un ensemble appelé hyménium). Selon (**Serussiaux et al., 2004**), la fructification des lichens se fait par la dissémination de spores ; la spore ne contient que le partenaire fongique et une fois libérée doit obligatoirement trouver son algue ou sa cyanobactérie. On ne connaît pas de mycobionte se développant sans photobionte ; L'inverse n'est pas vrai, toutes les algues et cyanobactéries que l'on rencontre dans les lichens existent à l'état libre. Les spores contenues dans des asques (sac microscopique où se forment les spores) sont produites par les apothécies ou les périthèces qui se distinguent par leur aspect.

Les apothécies sont généralement en forme de disque ou de coupe plus ou moins étalés. Quand elles possèdent un bord de la même couleur que le thalle (bord thallin) on les appelle des apothécies lécanorines avec un bord de la même couleur que le disque (rebord propre) ce sont des apothécies lécidéines et biatorine s'il est d'une autre couleur plus claire. Les apothécies zéorines plus rares ont un double rebord (rebord propre puis vers l'extérieur bord thallin). Selon (Agnes, 2004), il est à noter que les apothécies peuvent, par rapport au thalle qui les porte, adopter différentes postures, y compris et à titre d'exemples singuliers celles d'être «en creux» à la face supérieure du thalle (*Solorina*) ou de se former à la face inférieure de l'extrémité des lobes, lesquels se redressent ensuite légèrement (*Nephroma*). Quand elles sont allongées, linéaires et ressemblant à de petit sillons, ou enfoncées dans le thalle (*Opegrapha*) elles sont appelées lirelles. Elles peuvent être droites, courbées, sinueuses, simples ou ramifiées. L'excipulum, souvent noir, peut être simple ou feuilleté (Legac *et al.*, 2006).



**Figure 09** : Principaux organes de structure de fixation et de reproduction rencontrés chez les lichens (Poelt, 1969)

## 7. L'importance des lichens

- Les lichens sont l'une des différentes sources de composés chimiques :
  - les médicaments : Les lichens utilisés depuis des siècles en médecine traditionnelle comme des anti-vomitifs, stomachiques, anti-inflammatoires...etc. (Wahyuono *et al.*, 1995). Ainsi ils possèdent des propriétés antibiotiques permettant de combattre le bacille de Koch (tuberculose) et des propriétés antibactériennes, notamment dans les infections intestinales (Podterob, 2008).

- Parfumerie : Plusieurs lichens fournissent des extraits à odeur persistante, utilisés dans l'industrie des parfums (**Joulain et Tabacchi, 2009**).
- Les lichens ont un rôle très particulier dans l'équilibre de l'écosystème.
- Ils agissent également pour briser les roches et les transformer en sol, et de cette façon, donc ils participent dans la fertilité du sol.
- Les lichens ont également la capacité de produire certains composés qui sont utilisés dans le traitement d'un grand nombre de tumeurs malignes ainsi que des tumeurs du sein, et traitent également de nombreuses plaies et maladies de la peau.
- Les lichens sont également utilisés pour d'autres usages, comme la nourriture pour les humains et aussi la nourriture pour certains animaux.
- Les lichens sont également utilisés dans le processus de détection de la pollution de l'environnement, car certaines espèces d'entre eux sont considérées comme très sensibles à toute pollution résultant du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Il existe également un grand nombre de lichens qui sont utilisés comme épices, qui sont ajoutés à un certain nombre d'aliments pour leur donner de la saveur (**Al-Kilani, 2014**)

## Chapitre II : La bioindication

### 1. Définition

La bioindication désigne l'évaluation de la qualité des milieux à l'aide des bioindicateurs c'est-à-dire d'organismes vivants connus pour leurs capacités à refléter l'état des écosystèmes et à identifier les problèmes et les risques encourus par ceux-ci (**Fränzle, 2003**).

Un bioindicateur est un organisme (espèce animale, végétale, fongique ou bactérienne) ou un groupe d'organismes qui contiennent une partie de l'information environnementale qui les entoure, et ce bioindicateur reflète l'état abiotique ou biotique de l'écosystème en représentant l'impact des changements environnementaux dans un écosystème, une communauté ou des écosystèmes ou en indiquant la diversité d'autres espèces. Les espèces bioindicatrices sont surtout exploitées dans les eaux retraitées pour détecter une pollution organique ou inorganique (**Levrel et Harold, 2007**).

Un indicateur biologique peut être autrement défini comme un paramètre mesurable présent dans un système biologique. On distingue habituellement trois types d'indicateurs biologiques: les indicateurs d'exposition, d'effet ou de sensibilité/réceptivité.

*Un bon bioindicateur doit présenter les caractéristiques suivantes :*

- Il doit être suffisamment (normalement ou anormalement) répandu sur le territoire concerné et y être relativement abondant, et si possible facilement détectable.
- Sauf dans le cas où l'on veut mesurer la mobilité d'espèces, il doit être le plus sédentaire possible pour refléter les conditions locales.
- Il doit avoir une taille rendant possible l'étude de ces différents tissus et de leurs composantes (muscles, os, organes dans le cas d'un animal...).
- Il doit tolérer les contaminants avec des effets sub-létaux.
- Il doit aussi survivre hors du milieu naturel et tolérer différentes conditions de laboratoires (pH, température...).
- Une relation entre la concentration en contaminants dans le milieu externe et la concentration dans l'organisme doit exister (**Van et al., 1993**).

## 2. Principe

Le principe est d'observer des effets biologiques ou éco systémiques, au niveau de l'individu et/ou de populations ou écosystèmes (à l'échelle de la biosphère ou de grands biomes éventuellement). Ces effets doivent être mesurables via l'observation de divers degrés d'altérations morphologiques, comportementales, tissulaires ou physiologiques (croissance et reproduction), conduisant dans les cas extrêmes à la mort de ces individus ou à la disparition d'une population (**Paoletti, 1999**).

L'expression « *bioindicateur* » est utilisée comme un terme agrégé faisant référence à toutes les sources de réactions biotiques et abiotiques aux changements écologiques. Au lieu de simplement fonctionner comme des indicateurs du changement naturel, les taxons sont utilisés pour montrer les impacts des changements naturels environnants ou des changements environnementaux. Ils sont utilisés pour détecter les changements dans l'environnement naturel ainsi que pour indiquer les impacts négatifs ou positifs. Ils peuvent également détecter des changements dans l'environnement dus à la présence de polluants qui peuvent affecter la biodiversité de l'environnement, ainsi que les espèces présentes dans celui-ci. L'état de l'environnement est surveillé efficacement par l'utilisation d'espèces bioindicatrices en raison de leur résistance à la variabilité écologique (**Walsh, 1978**).

Les lichens sont fréquemment utilisés pour surveiller la contamination de l'air. Les lichens et les bryophytes sont tous deux de puissants bioindicateurs de la qualité de l'air au motif qu'ils n'ont pas de racines, pas de peau d'ongle et acquièrent tous leurs suppléments dès leur introduction immédiate dans le climat. Leur rapport surface/volume élevé soutient en outre la théorie de leur utilisation comme bioindicateur, ou soutient leur capacité à capturer les contaminants de l'air (**Thakur et al., 2013**).

Les écologues sont également de grands utilisateurs de méthodes de bioindication. Les inventaires floristiques réalisés dans les forêts ou les prairies sont couplés à des analyses du milieu afin de comprendre le fonctionnement de l'écosystème. Il en est de même dans les cours d'eau où la qualité de l'eau et de l'habitat détermine en interaction, la richesse de la faune et de la flore. Les espèces bioindicatrices peuvent en effet livrer des informations sur l'écosystème (**Hunsaker, 1993**).

Aujourd'hui, les méthodes de bioindication appliquées à des niveaux d'organisation biologique allant de la molécule (notamment par le biais de biomarqueurs moléculaires) à la communauté écologique, permettent d'appréhender la qualité globale des milieux en réponse

à toute une gamme d'impacts : contamination toxique, modifications physiques de l'habitat, variation du régime hydraulique, eutrophisation, changement global du climat, etc. Véritables "baromètres vivants" de la qualité des milieux, les indicateurs biologiques sont devenus des outils incontournables pour gérer et suivre l'état des écosystèmes (Zannatul *et al.*, 2009).

### 3. Les types de la bioindication

Il existe actuellement différentes classifications des bioindicateurs ; Certains auteurs parlent des ces trois :

#### ❖ Bioindicateur de l'eau

Parmi les bioindicateurs de l'eau, on retrouve :

- **Les insectes** : Les invertébrés plécoptères tels que les mouches des pierres sont sensibles aux faibles concentrations d'oxygène dans l'eau, surtout quand elles sont jeunes, elles servent de bioindicateurs de la qualité de l'eau. Les espèces hémiptères, comme les corixidés, sont des bons indicateurs de la salinité des eaux thermales, ainsi que des substances tensioactives comme les détergents et les savons. Les trichoptères, qui vivent dans des eaux très propres, ainsi que les éphéméroptères sont également utilisés pour connaître la qualité de l'eau.
- **Les amphibiens** : des espèces de grenouilles et de salamandres sont d'excellents indicateurs de la qualité d'un écosystème, car elles sont très sensibles à la sécheresse ou la pollution. En raison de leurs peaux perméables, elles peuvent accumuler des substances toxiques comme des fongicides, des fertilisants pour la Terre et des insecticides.
- **Les poissons** : la présence de 5% d'espèces de poissons carnivores comme les piranhas (famille *Serrasalminidae*), indiquent un environnement aquatique sain. D'autres espèces comme les saumons et les truites (*Salmonidae*) et les bars (*Sciaenidae*) vivent dans des eaux à forte teneur en oxygène, ces espèces sont également des bioindicateurs de la qualité de l'eau (Romano, 2016).

#### ❖ Bioindicateur de l'air

Ce sont des espèces qui permettent d'évaluer l'état et la qualité de l'air, par exemple :

- **Lichens** : Ces organismes qui sont bien souvent confondus avec des plantes, sont le résultat de la symbiose entre un champignon et une algue photosynthétiseuse, ils sont utilisés comme bioindicateurs pour la détection d'hydrocarbures, d'acides et d'autres substances toxiques qui

se trouvent dans l'air et qui s'accumulent dans leurs tissus. Ces organismes sont utilisés comme bioindicateurs de l'air dans de très nombreux endroits du monde.

- **Abeilles** : Un autre exemple sont les abeilles ; ces animaux (et le miel qu'ils produisent) sont des bioindicateurs de la contamination de l'air urbaine, grâce à la structure de leurs pattes qui peuvent retenir les particules de l'air urbaine et de cette manière connaître l'existence d'agents toxiques comme les pesticides, les métaux lourds ainsi que la présence d'agents radioactifs.
- **Geckos** : Espèces de la famille *Diplodactylus* sont sensibles à la pollution de l'air au dioxyde de soufre et aux autres émissions de gaz des industries. La pollution de l'air affecte l'abondance et la fécondité des espèces comme *Diplodactylusconspicillatus* et *Rhynchoeduraornata* présentes en Australie (**Rainio, 2003**).

#### ❖ **Bioindicateur du sol**

Certains des meilleurs bioindicateurs du sol sont :

- **Collemboles** : ces petits invertébrés habitants des sols aident à évaluer la qualité des sols en détectant la présence d'hydrocarbures polluants. Leur abondance dans des zones contaminées par des produits tels que les pyrènes, le naphthalène et le chrysène, se voit affectée négativement. La même chose a été observée avec d'autres invertébrés comme les diptères, les araignées, les fourmis et d'autres insectes.
- **Champignons** : ces organismes qui font naturellement partie des sols, emmagasinent dans leurs tissus (comme les lichens) des substances radioactives qui affectent leur environnement. Comme il s'agit d'une source alimentaire pour l'être humain, détecter ces composants toxiques à temps est d'importance vitale, raison pour laquelle de nombreuses études se basent sur les champignons pour détecter ce type de pollution (**Uribe et al., 2010**).

En plus de la classification susmentionnée, de nombreux auteurs considèrent que le plus correct est de classer ainsi les différents types de bioindicateurs comme suite :

#### ❖ **Les bioindicateurs d'exposition**

Seront dans le cas d'une exposition humaine professionnelle la concentration du polluant (ou de son métabolite) dans un organe particulier. Par exemple, les dioxines seront recherchées dans les tissus adipeux, le plomb dans le sang, l'aluminium dans les os, le toluène dans l'air expiré, le mercure dans les cheveux, le benzène dans le sérum et les phénols dans l'urine (**ONEMA, 2013**).

### ❖ Les bioindicateurs de dommages

Peuvent être un composant endogène, une mesure de capacité fonctionnelle ou tout autre indice de l'état ou de l'équilibre de l'organisme ou de l'organe, modifié par une exposition. Certains indicateurs sont spécifiques d'un polluant donné ; beaucoup ne sont pas spécifiques. L'un des indicateurs de dommage le plus utilisé est l'inhibition des cholinestérases provoquée par certains pesticides (organophosphorés et carbamates). D'autres indicateurs sont induits par la présence du polluant. C'est le cas de l'induction de plusieurs enzymes de la famille des cytochromes P450 provoquée par la présence de certains solvants et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (ONEMA ,2013).

### ❖ Les bioindicateurs de sensibilité

Les bioindicateurs de sensibilité ou de réceptivité sont des indices qui permettent de déterminer si un sujet est particulièrement sensible à l'effet d'un xénobiotique ou d'un groupe de xénobiotiques. L'hypersensibilité peut être la conséquence d'un facteur héréditaire mais aussi être liée à l'environnement (pollution multiple...) ou encore être constitutionnelle (maladie antérieure ou chronique...) (ONEMA, 2013).

### ❖ Bioindicateur d'accumulation

Organisme (ou partie d'un organisme ou communauté d'organismes) qui accumule une ou plusieurs substances issues de son environnement, permettant ainsi d'évaluer son exposition (Hess *et al.*, 2006).

### ❖ Bioindicateur d'effet ou d'impact

Organisme (ou partie d'un organisme ou communauté d'organismes) qui permet de révéler des effets spécifiques ou non lors de l'exposition à une ou plusieurs substances issues de son environnement (issues d'épandages de déchets, des pratiques agricoles, de dépôts atmosphériques ou bien de contaminations industrielles) ou à d'autres stress anthropiques ou naturels (ex: tassement, changement d'usage, statut de la matière organique). Ces effets, proportionnels ou non à l'exposition, incluent des modifications morphologiques, histologiques ou cellulaires, métaboliques, de comportement ou de structure de populations (Hess *et al.*, 2006).

### ❖ **Bioindicateur environnemental**

Il s'agit d'une espèce ou d'un groupe d'espèces répondant de manière prévisible aux perturbations ou aux changements environnementaux (par exemple, sentinelles, détecteurs, exploiters, accumulateurs, organismes d'essai biologique). Un système d'indicateurs environnementaux est un ensemble d'indicateurs visant à diagnostiquer l'état de l'environnement pour l'élaboration de politiques environnementales (**Butterworth et al., 1998**).

### ❖ **Bioindicateur écologique**

Il s'agit d'une espèce connue pour être sensible à la pollution, à la fragmentation de l'habitat ou à d'autres stress. La réponse de l'indicateur est représentative de la communauté (**Butterworth et al., 1998**).

### ❖ **Bioindicateur de biodiversité**



La richesse spécifique d'un taxon indicateur est utilisée comme indicateur de la richesse spécifique d'une communauté. Cependant, la définition a été élargie aux «paramètres mesurables de la biodiversité », y compris par ex. richesse en espèces, endémisme, paramètres génétiques, paramètres spécifiques à la population et paramètres du paysage (**Butterworth et al., 1998**).

## **4. Espèces bioindicatrices:**


### **4.1. Définition**

Une espèce bioindicatrice est un organisme (animaux, des plantes ou des micro-organismes) dont la présence, l'absence ou l'abondance reflète une condition environnementale spécifique. Les espèces bioindicatrices peuvent signaler un changement dans l'état biologique d'un écosystème particulier ; par exemple, ils peuvent nous évaluer l'impact de la pollution sur un écosystème ou de la qualité de la gestion ou de la restauration d'un environnement dégradé. Les espèces indicatrices peuvent également fournir des signaux d'avertissement pour les changements à venir ou les déplacements d'un écosystème, comme le changement climatique (**Gérard, 2014**).


## 4.2. Les espèces végétales


<p><b>1. Les lichens</b></p>		<p>Pour détecter la pollution de l'air, les lichens sont susceptibles d'être utilisés comme bioindicateurs, en raison de leur sensibilité à différents facteurs environnementaux, il sont considérés comme les bioindicateurs les plus appropriés pour l'évaluation de la qualité de l'air au cours des 30 dernières années en fonction de leurs caractéristiques physiologiques, morphologiques et anatomiques spécifiques (<b>Battal et al., 2004</b>).</p>
<p><b>2. Liseron des haies</b> (<i>Calystegia sepium</i>)</p>		<p>Cette mauvaise herbe désigne une terre asphyxiée par trop de matière organique et d'eau, voire par le travail sur un sol détrempé. Les nitrates, le fer et l'aluminium prennent leur forme toxique. Ce terrain produit des aliments nocifs pour l'homme et les animaux. Engorgement en matière organique animale sur des sols frais et humides provoquant des anaérobioses complètes et la production de nitrites et de nitrates (<b>Gérard, 2005</b>).</p>



<p><b>3. <i>Mayaca fluviatilis</i></b></p>		<p>Est une plante indicatrice d'un manque de fer dans l'eau. Si une telle plante pousse bien, avec une bonne croissance et un bel aspect, elle indique que le taux de fer dans l'eau douce est bon ; cela a pour conséquence de préciser que toutes les autres plantes aquatiques devraient se trouver dans les meilleures conditions possibles sur ce paramètre (<b>Thakur et al., 2013</b>).</p>
<p><b>4. La renouée du Japon</b></p>		<p>Bioindicatrice de sols pollués aux métaux lourds, cette plante envahissante a été introduite en Europe d'abord comme plante fourragère, puis comme plante ornementale, Cette plante a connu un grand succès Grâce à un ensemble de mécanismes qui ont augmenté sa force concurrentielle. elle peut être considérée comme une espèce envahissante qui a actuellement la plus forte dynamique d'expansion .Au milieu du 20ème siècle, la renouée du Japon refait son apparition sans avoir été à nouveau introduite .Son milieu de vie d'origine correspond à un sol riche en fer et en nickel. En France, elle pousse dans les sols pollués par</p>



		toutes sortes de métaux lourds, notamment sur les anciennes voies ferrées ( <b>Gérard, 2005</b> ).
<b>5. Mouron blanc</b> ( <i>Stellaria media</i> )		Cette plante annuelle signale une terre bien équilibrée chimiquement, et suffisamment aéré pour permettre la vie du sol, nécessaire à un bon équilibre. C'est la légion d'honneur du potager. De l'air, du carbone, des nitrates, de la vie bactérienne, le sol est en bonne santé. C'est une des rares plantes indicatrices d'équilibre. ( <b>Gérard, 2005</b> ).

#### 4.3. Les espèces animales

<b>1. Les moules</b>		Ils indiquent la contamination et la santé globale du plan d'eau. Les moules d'eau douce (mulettes) et d'eau salée sont des espèces indicatrices appréciées car elles sont sessiles (fixées en un seul endroit). Leur "adresse fixe" combinée à leur alimentation par filtrage de l'eau les rendent extrêmement sensibles à la contamination, ou aux changements des conditions de leur environnement, telles que la température, les niveaux
----------------------	---	---

		d'oxygène et l'acidité ( <b>Hernández, 2010</b> ).
<p><b>2. Grunion</b> <i>Leuresthenius</i></p>		<p>Les chercheurs ont découvert que le succès du cycle de reproduction du grunion <i>Leuresthenius</i> est un bon indicateur de la santé écologique des plages de sable. Les grunions sont des poissons terriens que l'on trouve le long de la côte pacifique de la Californie et de la péninsule de Baja. Ces petits poissons vont sur le sable à marée haute après la pleine lune pour s'accoupler. Ils pondent leurs œufs au niveau de la marée haute et la plage sert de nurserie sablonneuse pour les œufs et les larves de grunion. Les grunions, comme espèce indicatrice ou poisson indicateur, sont particulièrement sensibles à l'impact humain sur les plages, comme le nettoyage des plages, le sable et le remblai importés. Des programmes collectent des données critiques sur les poissons et fournissent une image de la qualité de leur environnement (<b>Market et al., 2003</b>).</p>

<p><b>3. Les écrevisses</b></p>		<p>Sont un bioindicateur de la qualité de l'eau douce, car la variation de l'acidité de l'eau est source de stress pour l'espèce. La santé des coraux peut indiquer des phénomènes tels que la montée des eaux ou la fluctuation des températures, autant de signes du changement climatique (<b>Ochoa, 2014</b>).</p>
<p><b>4. La chouette tachetée</b></p>		<p>Est un bio-indicateur largement étudié par les scientifiques pour évaluer la santé globale des écosystèmes de forêt primaire et mesurer l'impact de l'activité humaine sur cet habitat, les chouettes installent leur nid au creux des arbres, dans les nids de rapaces abandonnés. Mais à mesure que l'exploitation forestière, l'agriculture et l'aménagement urbain accélèrent la déforestation de la région, les chouettes perdent ces lieux de nidification et leurs populations diminuent, en moyenne de 4 % par an.</p> <p>Ce déclin indique que les autres espèces de la forêt connaissent probablement une situation similaire, Réciproquement, une population prospère de chouettes</p>

		<p>tachetées indique qu'un écosystème est en bonne santé et capable de subvenir aux besoins d'une variété de plantes et d'animaux (<b>Estrada et al., 2014</b>).</p>
<p><b>5. Les amphibiens</b></p>		<p>Les amphibiens comme les grenouilles et les crapauds sont de solides bioindicateurs de la pollution. À travers leur peau perméable, ils absorbent l'oxygène... et les toxines. Par conséquent, ils sont très sensibles à la qualité de l'air et de l'eau. Ainsi, ce sont souvent les premiers animaux à souffrir de l'utilisation des pesticides dans leur écosystème ou à proximité. Les populations d'amphibiens ont fortement diminué dans diverses régions du monde alors que d'autres ont développé des malformations, comme des pattes supplémentaires à cause des pesticides (<b>Rainio et Niemelä, 2003</b>).</p>
<p><b>6. Les coléoptères</b></p>		<p>Les coléoptères ont été utilisés dans des études d'écologie urbaine, la classification des types d'habitat et l'évaluation de la qualité des sites.</p> <p>D'autres coléoptères de la famille des ténébrionidés sont des</p>

		<p>bioindicateurs du sol et donnent l'alerte sur la désertification, car ce sont des espèces qui sont adaptées aux environnements arides, ils sont donc utilisés pour identifier les zones qui pourraient souffrir d'une plus grande dégradation environnementale <b>(Romano, 2016)</b>.</p>
<p><b>7. Loutres</b></p>		<p>Ces animaux de la famille <i>Mustelidae</i> sont de bons indicateurs de l'état et de la qualité des fleuves et des lacs où ils vivent, car quand l'eau perd sa qualité de nutriments ainsi que sa richesse d'espèces, les loutres partent à la recherche d'un endroit où elles pourront survivre plus facilement. Présentement, leur présence est un indicateur clair de la bonne santé des eaux <b>(Estrada et al., 2014)</b>.</p>
<p><b>8. Les oiseaux</b></p>		<p>Des espèces aquatiques d'oiseaux ont été utilisées, dans des environnements humides, comme bioindicateurs de pollution par métaux lourds, comme le plomb, le cadmium et l'arsenic. En raison du fait que ces oiseaux vivent et se nourrissent dans ces endroits, ils consomment ces substances avec leur aliment <b>(Estrada et al., 2014)</b>.</p>

#### 4.4. Les microorganismes bioindicateurs

Les organismes indicateurs sont des microorganismes tels que des bactéries et des virus dans les plans d'eau, qui sont utilisés comme substitut pour évaluer la présence d'agents pathogènes dans cet environnement. Ces micro-organismes sont de préférence non pathogènes, n'ont pas ou peu de croissance dans l'eau et sont détectables de manière fiable à de faibles concentrations.

De nombreuses espèces sont totalement bénignes. Les espèces indicatrices sont principalement utilisées parce que les méthodes de test actuelles pour les agents pathogènes peuvent être coûteuses et longues, ce qui rend très inefficace le test de grands lots de produits ou d'échantillons environnementaux.

Les espèces indicatrices, d'autre part, peuvent être testées avec une relative facilité et agissent comme un système d'alerte précoce qui peut signaler des problèmes de contamination et la nécessité de tests de diagnostic supplémentaires (**Bartram *et al.*, 2003**).

##### *Exemple*

Les coliformes comme les entérobactéries ont un rôle en tant qu'organismes indicateurs d'une éventuelle contamination par des agents pathogènes. Les coliformes (bactérie *E. coli*) sont assez courants dans l'environnement, mais pour les industriels il est très important qu'il n'y a pas de niveaux très élevés de ce genre de bactéries dans leur installation de transformation des aliments, car la contamination fécale entraîne la possibilité de la présence d'autres agents pathogènes. Les tests de laboratoire peuvent déterminer une sorte de niveau de référence ou niveau normal de coliformes *E. coli* dans un environnement donné (**WHO, 2002**).

## 5. La biosurveillance

### 5.1. Définition

La biosurveillance peut être définie comme l'utilisation des propriétés d'un organisme ou d'une partie, pour obtenir des informations sur une certaine partie de la biosphère (**Sloof, 1993**).

C'est l'évaluation de la pollution à l'aide d'organismes vivants, le plus souvent des plants selon la définition proposée par (**Garrec et van, 2002**) ; La bio surveillance végétale de la

qualité de l'air est l'utilisation des réponses à tout le niveau d'organisme biologique d'un ou plusieurs organismes vivants, pour prévoir et ou révéler altération de l'environnement.

Elle peut être passive par prélèvement directe sur le terrain ou active en transplant le matériel biologique sur site. En fonction des niveaux de réaction des organismes, quatre concepts de biosurveillance ont été distingués :

- ✓ *Bio-intégration* : qui consiste en une analyse de la présence /absence d'espèces réputées sensibles ou tolérantes à divers polluants.
- ✓ *Bioaccumulation* : est la capacité de certains organismes à accumuler les polluants présents dans l'air.
- ✓ *Biomarquage* : est l'utilisation de marqueurs au niveau de la biologie structurale ou fonctionnelle indiquant une influence du milieu environnant sur les fonctions biologiques.
- ✓ *Bio-indication* : ce sont des organismes qui, exposés à une pollution, réagissent par l'apparition de symptômes et des perturbations de la croissance et du développement (**Agnan, 2013**).

## **5.2. Biosurveillance par les lichens**

Selon la définition de l'Association Internationale de Lichénologie, un lichen est l'association d'un champignon et d'un symbiote doué de photosynthèse qui résulte en un organisme végétatif stable ayant une structure spécifique (**Van et Asta, 2009**). Les spécialistes parlent de champignons lichénisés.

Avec plus de 2917 espèces différentes recensées en France par exemple, les lichens constituent un des groupes taxonomiques les moins bien connus de la région et même dans le monde. Ils sont capables de coloniser des milieux très variés (sols, bois, roches, ...etc.), jusqu'à des conditions extrêmes (altitude, climat, stress hydrique) dans lesquels aucun des deux partenaires de la symbiose ne n'accommoderaient isolément, ils jouent des rôles primordiaux pour les écosystèmes (**Roux, 2012**).

Parce qu'ils sont en contact direct et permanent avec l'atmosphère qui assure leur nutrition, certaines caractéristiques biologiques des lichens rendent ces organismes sensibles aux polluants atmosphériques, et ainsi, permettent leur utilisation en biosurveillance de la qualité de l'air. Contrairement aux plantes, ils n'ont ni cuticule, ni système racinaire, ni système d'excrétion et de régulation des échanges gazeux (stomates) et constituent des populations stables et pérennes. De plus leur longévité et leur activité biologique quasi-annuelle les transforment en organismes capables d'accumuler les contaminants atmosphériques et

d'intégrer toutes les variations de la qualité de l'air, ce qui est plus difficile avec des plantes (Chipon, 1994).

### **5.3. Types de la biosurveillance**

#### **5.3.1. Biosurveillance active**

La biosurveillance active enferme l'exposition d'espèces bien définies dans des conditions contrôlées (Čeburnis et Valiulis, 1999) et peut être divisée en méthodes de transplantation et les tests de laboratoire (Hoodaji *et al.*, 2012). Dans la procédure de transplantation, les organismes appropriés principalement les mousses et les lichens sont transportés des zones non polluées vers le site pollué considéré. Le temps d'exposition est donc bien défini. Cette technique initialement mise au point par (Brodo, 1961), elle est généralement appliquée pour tester les effets des polluants sur des bio moniteurs sensibles. La technique de transplantation est très appropriée aux réseaux de surveillance car l'influence des variables de confusion (structure du sol, éléments nutritifs, arrosage, environnement) peut être en grande partie exclue, mais la reproductibilité de cette technique ne semble pas très acceptable pour des paramètres tels que la concentration de l'air et le taux de dépôt (Čeburnis et Valiulis, 1999).

#### **5.3.2. Biosurveillance passive**

La bio surveillance passive fait référence à l'observation ou à la surveillance d'analyse chimique des plantes indigènes qui provenant de sites naturels in situ (Čeburnis et Valiulis, 1999). Ces plantes sont influencées par la pollution atmosphérique directement ou indirectement (par l'absorption du sol) au cours d'une longue période (Temmerman *et al.*, 2004). En général, la méthode de bio surveillance passive présente un inconvénient majeur : Tous les processus et toutes les sources agissent en même temps et il n'est pas possible de les séparer et d'en rechercher un en particulier. Dans cette méthode passive, la sélection des espèces (sensibles / non sensibles) doivent être facilement identifiables sur le terrain, largement répandues, doivent être facilement échantillonnés et cela tout au long de l'année pour permettre des suivis temporels (Cuny, 2012).

### **5.4. Biosurveillance en Algérie**

Le réseau de surveillance de l'air est généralement très limité aux pays en développement et dans de nombreux cas inexistant car la surveillance physico-chimique nécessite l'utilisation d'un équipement coûteux et d'un personnel qualifié (Temmerman *et al.*, 2001).

En Algérie, la surveillance de la pollution atmosphérique est difficile à établir en raison de l'absence du système de contrôle des émissions dans l'atmosphère, il n'y a généralement qu'un réseau de surveillance de l'air très limité dans certaines villes d'Algérie en particulier la ville d'Alger (**Maatoug et al., 2011**).

Cette contrainte a permis d'utiliser les organismes vivants dans la surveillance des polluants atmosphériques par la biosurveillance comme une technique de base (**Semadi et Tahar, 1995 ; Maatoug et al., 2012**). A partir des nombreux travaux scientifiques réalisés en Algérie, l'utilisation de la biosurveillance est devenue un complément séduisant des méthodes classiques de mesure de la qualité de l'air, qui est très utile dans les agglomérations urbaines telles que (Alger, Annaba...) pour identifier et quantifier la pollution atmosphérique au sein d'organismes sensibles (**Belhadj et al., 2015**).

### **5.5. Avantages et limites de la biosurveillance :**

Les principaux avantages qu'offre la bio surveillance sont (**Agnan, 2013**) :

- une approche globale : en étudiant la réponse biologique, l'ensemble des contaminants du milieu est pris en considération, en intégrant à la fois la dimension temporelle et la dimension spatiale, approche complémentaire aux capteurs physico-chimiques.
- une simplification méthodologique : la bio surveillance passive ne nécessite pas d'anticipation particulière puisque seule une récolte ou une observation sur le terrain au moment souhaité, facilitant l'accessibilité des données.

En revanche, ces outils posent un certain nombre de questions à ce jour non résolues qu'il est impératif d'établir dans ce type d'étude pour une meilleure compréhension de la démarche et une meilleure interprétation :

- l'absence de précision sur la représentativité spatiale : pollution locale ou pollution de fond ?
- l'absence de précision sur la représentativité temporelle : quelle intégration ?
- l'effet d'un polluant peut être masqué par le polluant dominant et/ou le plus néfaste : rôle des apports azotés.
- l'impossibilité de remonter à la concentration en polluant dans l'air.
- la difficulté de trouver du matériel biologique dans les zones les plus polluées (désert lichénique par ex.)

le manque de données sur les effets biologiques causés par les contaminants

## Chapitre III : La pollution atmosphérique

### 1. Définition

Selon la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de la France (1996), la pollution atmosphérique est définie comme : " 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 ".

D'une autre manière, la pollution atmosphérique est connue comme suite :

C'est un type de pollution déterminé par une modification de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes en concentrations et pendant des durées suffisantes pour produire un effet toxique sur l'environnement, comme la présence indésirable d'impuretés ou l'élévation "anormale" de la proportion de certains composants de l'atmosphère (**MEDDE, 2018**).

La pollution atmosphérique se distingue par la mesure des polluants (d'origine naturelle ou anthropique) : chimiques, biologiques ou physiques, qui peuvent avoir des conséquences néfastes pour la santé humaine, les organismes vivants, le climat ou les biens physiques (**Dreal, 2017**).

Pendant la période 1990-2016, la pollution de l'air était le cinquième facteur de risque pour la santé (après la malnutrition, les risques alimentaires, l'hypertension artérielle et le tabagisme). Elle provoque la mort prématurée de sept millions de personnes chaque année (**Jos et al., 2015**).

### 2. L'échelle de la pollution atmosphérique

On distingue trois échelles principales de la pollution atmosphérique :

- ❖ **Au niveau planétaire (global)** : La dégradation de la couche d'ozone à très haute altitude (stratosphère), observée depuis quelques années, diminue la protection contre les rayons solaires nocifs et augmente la fréquence d'apparition des mélanomes et autres cancers de la peau. Par ailleurs, l'accroissement de l'effet de serre, dû à

l'accumulation de certains gaz (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote...), est responsable du réchauffement climatique (**Pierre, 2009**).

- ❖ **Au niveau régional** : dépend du relief et de la météo ; ses effets peuvent se répandre sur des centaines de kilomètres et les pluies acides constituent un bon exemple. Lorsque les industries brûlent des combustibles fossiles (charbon, fuel...), des gaz s'échappent des cheminées comme les oxydes de soufre et d'azote. Si ces gaz sont relâchés par de grandes cheminées et restent suffisamment de temps dans l'atmosphère, ils se mélangent alors avec l'humidité de l'air pour former de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique. Lorsqu'il pleut, ce sont ces acides qui retombent sur le sol ; avec le déplacement de l'air, ces pluies acides sont transportées d'un pays à l'autre et les polluants n'ont donc pas de frontière (**Pierre, 2009**).
- ❖ **Au niveau local** : cette pollution est issue de l'industrie, des chauffages et de la circulation automobile ; elle se concentre sur et près des lieux des émissions. La pollution urbaine agit sur quelques kilomètres et son impact sur la santé dépend de la durée d'exposition, de l'état général et de l'âge des personnes concernées. (**Gil et al., 2005**).

Le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique Français (CITEPA) distingue quelques types de pollution de l'air :

- ✓ Effet de serre.
- ✓ Acidification.
- ✓ Eutrophisation.
- ✓ Pollution photochimique.
- ✓ Appauvrissement de l'ozone stratosphérique.

### **3. Les sources de la Pollution Atmosphérique**

#### **3.1. Origines naturelles**

- **Les éruptions volcaniques** : qui peuvent injecter de très grandes quantités de gaz dont l'oxyde de soufre et de particules (poussières polluantes) dans l'atmosphère, et diminuent le rayonnement solaire en entraînant une baisse de la température.
- **La foudre** : qui oxyde l'azote atmosphérique, produisant de grandes quantités d'oxydes d'azote (NOx) qui sont des irritants respiratoires.

- **La pression atmosphérique** : les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution.
- **Les vents** : qui transportent et introduisent de nombreuses particules dans l'atmosphère. L'érosion éolienne participe également à cette propagation de particules.
- **La température** : qui agit sur la chimie des polluants : le froid diminue la volatilité de certains gaz tandis que la chaleur estivale est nécessaire à la formation photochimique de l'ozone.
- **Le pollen** : dont les grains, produits sexuels mâles des fleurs des végétaux, sont portés par les étamines. Grâce à l'action des insectes et du vent, ils peuvent féconder d'autres fleurs de leur espèce ; mais ils peuvent aussi pénétrer dans nos voies respiratoires et provoquer des réactions allergiques parfois violentes.
- **Les algues** : à la surface des océans, qui émettent du sulfure d'hydrogène très connu pour son odeur et sa toxicité.
- **Les zones humides** : telles que les marais, les tourbières ou les lacs peu profonds qui produisent du méthane participant directement au phénomène d'accroissement de "l'effet de serre".
- **Les plantes** : émettant des hydrocarbures comme, par exemple, le pinène responsable de l'odeur des forêts de pins ...
- **l'ozone** : qui, au niveau troposphérique, devient un polluant toxique lorsque sa concentration augmente. Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant et épisodique dans l'apparition de pointes "pic" de pollution en périodes anticycloniques estivales (AEE, 2016).

### 3.2. Origines accidentelles

- Les incendies de forêts, bien souvent volontaires, qui restituent à l'atmosphère des quantités considérables de poussières et de dioxyde de carbone, participent ainsi à l'augmentation des gaz à effet de serre et par conséquent au réchauffement climatique.
- Les grandes catastrophes industrielles mondiales comme :
  - Seveso (Italie) 1976 : l'explosion d'un réacteur chimique disperse dans l'atmosphère du trichlorophénol ainsi qu'environ 2 kg de dioxine toxique. Cette dioxine a contaminé

plusieurs hectares aux alentours de l'usine et provoqué la mort de plusieurs centaines d'animaux domestiques.

- Bhopal (Inde) 1984 : Suite à une accumulation de négligences dans une usine chimique de fabrication de pesticides, 25 tonnes d'isocyanate de méthyle, produit qui doit être entreposé à l'état liquide à la température de 0°C, sont soumises à une montée de la température. Devenu gazeux ce polluant s'échappe rapidement dans l'atmosphère et la température extérieure combinée à un vent très faible favorise les retombées sur les quartiers environnants de Bhopal. Résultat, 2 500 personnes meurent dans leur sommeil et 170 000 sont intoxiquées, souffrant, entre autres, de graves troubles oculaires et respiratoires.
- Fukushima (Japon) 11 mars 2011 : Suite à une secousse sismique, Les réacteurs de la centrale nucléaire se sont donc retrouvés sans système de refroidissement. Par conséquence, une explosion d'hydrogènes s'est produite dans les réacteurs numéro 1, 3 et 4. Cette explosion a endommagée les bâtiments du réacteur, ce qui a entraîné l'émission de substances radioactives dans l'environnement. Ces évènements et l'éventration des réacteurs pour faire baisser la pression ont entraîné la dispersion de gaz et particules radioactifs qui ont contaminé la centrale, le Japon et maintenant toute la planète. Sur place, les niveaux de rayonnement sont tels que cela rend difficile toute intervention et que la santé des intervenants est en jeu. A proximité des réacteurs, un intervenant atteint sa limite de dose en une minute environ (**John et Neill, 2005**).

### **3.3. Origines anthropique**

Pendant des millénaires, les hommes ont vécu en harmonie avec la nature, utilisant les ressources qu'elle offrait tout en la respectant. Seuls des incendies ou des accidents de type volcanique pouvaient modifier la qualité de l'air. C'est à partir du XIXème siècle que cette qualité change avec le développement des industries, de l'urbanisation, des moyens de locomotion (train à vapeur, premières automobiles...) et l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole) polluent et perturbent la composition chimique de l'air. Tous les secteurs sont concernés :

- industriels (transports, chauffage, rejets, incinération des déchets, activités nucléaires, amiante).
- domestiques (voitures, chauffage, ventilation, tabagisme...etc.).
- agricoles (engrais azotés, pesticides, déforestation, déjections des animaux...etc.).
- politiques (activités militaires, armes atomiques et biologiques... etc.) (**CEREA, 2018**).

## 4. La Pollution Atmosphérique dans le monde

Pour la Chine, était en 2006 le premier pays du monde pour les émissions de dioxyde de soufre, qui ont progressé de 27 % entre 2000 et 2005. Le dioxyde de soufre est aussi un composant de la formation des pluies acides, nuisibles aux écosystèmes tels que les forêts et les lacs. Les émissions d'oxydes d'azote et de dioxyde de soufre sont 8 à 9 fois plus élevées que dans les pays développés. Les conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé des Chinois sont dramatiques : on estime qu'elle est responsable de 358 000 décès et 640 000 hospitalisations en 2004 (**OMS, 2010**).

En 2008, l'Association Médicale Canadienne estime que 700 000 Canadiens vont décéder prématurément des suites de maladies causées par la pollution atmosphérique au cours des deux décennies suivantes. Parmi eux, 21 000 devaient mourir en 2008 des suites de maladies pulmonaires ou cardiaques (**Pierre, 2009**).

La pollution atmosphérique s'aggrave presque partout dans le monde : les habitants de plus de 90 % des villes respirant un air pollué, toxique pour leur santé cardiovasculaire et respiratoire. En effet, entre 2010 et 2016, les concentrations des polluants de l'air se sont aggravées dans presque 70 % des villes du monde entier, notamment dans les pays à revenu faible et intermédiaire, selon des chiffres 2016 de la Banque Mondiale : La pollution atmosphérique est devenue le quatrième facteur de décès prématuré sur Terre (**Adrien, 2019**).

Selon une étude parue dans le magazine scientifique Lancet, en 2015, elle jugeait que la pollution de l'air aux particules très fines (PM<sub>2,5</sub>), au dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>, émis par les moteurs diesel) et à l'ozone (O<sub>3</sub>) était responsable de 518 000 décès prématurés dans 41 pays d'Europe (**CITEPA, 2015**).

En 2016, l'Agence Nationale de Santé Publique Française estime que la pollution de l'air est responsable de 48 000 morts par an en France (**Laetitia, 2016**).

En 2018, l'OMS évalue à sept millions le nombre de personnes qui meurent dans le monde parce qu'elles respirent un air trop chargé en particules fines, dont 4,2 millions de victimes de la pollution de l'air extérieur et 3,8 millions pour celle de l'air intérieur. Près de 91 % de la population mondiale est exposée quotidiennement à un air contenant de hauts niveaux de polluants.

Une étude parue en mars 2019 dans la revue de cardiologie Européen estime à 8,8 millions le nombre de morts prématurées chaque année dans le monde. Cette nouvelle évaluation est

deux fois plus élevée que les précédentes ; elle dépasse l'estimation de la mortalité due au tabac (**Elias *et al.*, 2020**).

En juillet 2020, l'Energy Institute de l'université de Chicago publie un rapport sur la perte d'espérance de vie due à la pollution de l'air. Il estime que l'espérance de vie des humains augmenterait de près de deux ans si tous les pays se conformaient aux directives de qualité de l'air édictées par l'Organisation Mondiale de la Santé (**Joël, 2020**).

## **5. La Pollution Atmosphérique en Algérie**

En Algérie, les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont devenus ces dernières années une préoccupation permanente pour les pouvoirs publique, les scientifiques et même la société civile (**Messaoudi et Ghogall, 2005**).

D'après l'OMS (2013), l'Algérie est parmi les pays africains les plus pollués. Outre les sources d'émission, les facteurs météorologiques et la topographie influencent largement les niveaux de pollution atmosphérique. Certains jours, les pics de pollution de l'air s'expliquent par le transport des polluants loin des sources d'émission et selon le ministère de l'environnement (2010), le secteur des transports occupe le premier rang en termes d'émissions des polluants atmosphériques avec 51 %.

Les données démographiques et épidémiologiques actuellement disponibles permettent d'évaluer l'importance de la morbidité respiratoire et son évolution prévisible due à la pollution. Selon des projections sur la situation épidémiologique en Algérie en 2010 (ministère de l'environnement), il est prévu que chaque année, 10 à 12 millions d'Algériens auront à consulter un médecin pour des maladies respiratoires liées à, ou aggravées par la pollution atmosphérique. Selon les prévisions de 2010, environ 300 000 algériens seront atteints de pneumonie et 700 000 d'asthme ; pour la bronchite chronique, 250 000 algériens souffriront de cette maladie, alors que pour le cancer bronchique primitif, ils seront de l'ordre de 3 600 (**Maatoug *et al.*, 2010**).

Le Dr. Youcef Laid du ministère de la santé, de la population et de la réforme hospitalière, a affirmé que la charge de morbidité liée à la pollution de l'air était de 24% à l'échelle mondiale ais avait atteint les 25% dans les pays en voie de développement dont l'Algérie qui enregistre chaque année 2.500 décès liés à la pollution de l'air dont la cause essentielle est les émanations automobiles en milieu urbain (**APS, 2019**).

Il a souligné que les personnes les plus vulnérables à la pollution de l'air sont ceux porteurs de maladies chroniques non transmissibles (le taux en Algérie va dépasser les 60%), ainsi que les personnes atteintes de maladies transmissibles (le taux compris entre 16 et 18%) ajoutant que la qualité de l'air doit impérativement être améliorée pour augmenter l'espérance de vie de cette population "vulnérable" (APS, 2019).

Le développement industriel a contribué largement à la dégradation de la qualité de l'air, notamment aux environs des grandes concentrations industrielles telles qu'Annaba, au nord-est de l'Algérie, qui est une ville côtière, industrielle et adossée à une montagne. Ce cadre géographique présente des conditions idéales pour une détérioration de la qualité de l'air, particulièrement en été quand les conditions atmosphériques stables prédominent. Dans cette agglomération, le niveau des polluants a dépassé de loin les limites nationales et les normes internationales (Saihia et Dahech, 2017). Le problème de la pollution atmosphérique dans la région d'Annaba a donné lieu à plusieurs études en biologie, chimie, géographie et climatologie. Plusieurs articles de presse ont signalé les nuisances environnementales causées par le complexe sidérurgique Arcelor Mittal, dans les localités de Sidi Amar, Bargouga et Derradji Rdjem (Hasnaoui, 2000).

Pour sa part, l'expert et chercheur Menouar Boughedaoui a souligné l'urgence d'agir rapidement contre les facteurs causant la pollution de l'air en Algérie ; relevant que cette pollution "énorme" existant ne contaminait pas seulement l'air mais aussi les eaux de surfaces, les sols, l'agriculture et peut même causer des problèmes de navigation aérienne. Il a, notamment appelé à la création d'un réseau de mesures de la qualité de l'air en se référant aux expériences acquises dans ce domaine dans les pays voisins à l'instar de la Tunisie. S'agissant des dispositions déjà prises par les différents secteurs de l'état pour atténuer les effets négatifs de la pollution de l'air (Bentouati et Bariteau, 2015).

## **6. L'impact de la pollution atmosphérique**

### **6.1. Impact sur la santé**

- La majeure partie des impacts de la pollution atmosphérique est sur la santé, elle cause des problèmes cardiovasculaires, des allergies, des crises d'asthme, des conjonctivites, des maladies des bronches, des cancers du poumon ou de la peau, des problèmes de vision, des maladies du sang et des problèmes dans le développement mental de l'enfant, entre autres. Les personnes les plus vulnérables sont les enfants, les personnes âgées, les femmes enceintes et les malades. (OMPE, 2013).

- D'après de nouvelles études, elle cause aussi les troubles de la reproduction, les troubles du développement de l'enfant, les affections neurologiques ou encore le diabète de type 2.
- Des effets à court-terme, qui surviennent dans les heures, jours ou semaines suivant l'exposition et se manifestent selon la vulnérabilité des personnes (nourrissons et enfants de moins de 5 ans, femmes enceintes, personnes âgées, personnes souffrant de pathologies chroniques, fumeurs, etc.) par des effets bénins (toux, hypersécrétion nasale, expectoration, essoufflement, irritation nasale des yeux et de la gorge, etc.)
- Des effets à long-terme qui résultent d'une exposition répétée ou continue tout au long de la vie à des niveaux inférieurs aux seuils d'information et d'alerte réglementaires (AEE, 2019).
- Chaque polluant n'aura pas les mêmes effets sur notre santé ; par exemple : le NO<sub>2</sub> (dioxyde d'azote) fait des irritations des bronches, aggrave les crises asthmatiques...etc. ; le SO<sub>2</sub> (dioxyde de soufre) fait des inflammations des bronches, essoufflement, toux (ADEME, 2020).

## 6.2. Impact sur l'environnement

Au-delà de son impact sanitaire direct, la pollution de l'air a des répercussions importantes sur les cultures agricoles, le fonctionnement général des écosystèmes ou encore sur les matériaux ainsi :

- Certains polluants comme l'ozone et les particules agissent sur le changement climatique : l'ozone en ayant tendance à réchauffer l'atmosphère, les aérosols en ayant tendance à la refroidir.
- Les pluies, neiges et brouillards deviennent, sous l'effet des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre, plus acides et altèrent les sols et les cours d'eau, venant ainsi engendrer un déséquilibre de l'écosystème.
- La pollution atmosphérique contribue au déclin de certaines populations pollinisatrices et impacte plus généralement la faune en affectant la capacité de certaines espèces à se reproduire ou à se nourrir.
- La pollution atmosphérique affecte les matériaux, en particulier la pierre, le ciment et le verre en induisant corrosion, noircissements et encroûtements (MTE, 2017).

### 6.2.1. L'impact sur les végétaux

- **Impact 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 comme la sécheresse et en présence des 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.
- **Impact sur les végétaux inférieurs** : 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.

### 6.2.2. L'impact sur les animaux

- Les animaux sont affectés par la pollution au même titre que les humains, soit directement, soit en mangeant des plantes sur lesquelles des polluants atmosphériques se sont déposés. Parmi les exemples bien connus figurent l'influence d'animaux tels que les vaches et les buffles avec des composés fluorés qui provoquent l'érosion des dents, l'émaciation des animaux et un manque de production de lait, qui se reflètent tous dans l'économie de l'homme lui-même. Les composés fluorés sont pollués à proximité des usines d'aluminium et des usines d'engrais phosphatés (**Kalaora, 1998**).
- Effets sur l'approvisionnement et la qualité alimentaire : un bon nombre de métaux lourds, de substances toxiques, de polluants organiques persistants et d'autres polluants

atmosphériques sont nocifs pour la faune en entrant dans la chaîne trophique et en réduisant l'approvisionnement et la qualité alimentaire (**Reza *et al.*, 2016**).

- Les taux de croissance et la capacité de reproduction des animaux sont réduits en raison d'une exposition constante à la pollution de l'air, et peuvent entraîner une réduction de la biodiversité à cause de cela. Les pesticides peuvent provoquer des mutations et des problèmes de fertilité, et cela a été démontré dans les organes reproducteurs des poissons, des crocodiles et des ours polaires (**Christophe *et al.*, 2004**).
- Les fumées toxiques provenant des usines, des voitures ou d'autres sources endommagent le développement des poumons des animaux, les conduisant à développer des maladies respiratoires telles que l'asthme à l'âge adulte.
- La pollution de l'air affecte également certains animaux au niveau cellulaire en causant des dommages à l'ADN, entraînant des mutations et des cellules cancéreuses.
- La pollution peut également provoquer des migrations forcées d'un grand nombre d'animaux et d'oiseaux, ce qui provoque un déséquilibre dans l'équilibre bioenvironnemental (**Michael, 2008**).

### **6.3. Impact sur l'économie**

- Affecte le secteur du tourisme, car il y aura moins d'activités qui alimentent l'économie par le tourisme.
- Elle affecte l'industrie de la pêche, où la présence d'algues résultant de la pollution tue la vie aquatique, et entraîne ainsi une grande perte dans l'économie.
- Affecte considérablement la dépréciation des biens immobiliers, car la valeur des biens immobiliers proches de la pollution diminue en raison des vues désagréables et des odeurs causées par la pollution.
- Annulation de vols à cause de non visibilité causée par les tempêtes de sable, ce qui provoque des pertes énormes sur le domaine du transport et des activités humaines.
- Absorption du rayonnement solaire et dépôt sur les surfaces des équipements de production d'énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques et miroirs solaires), ce qui diminue leur rendement et induit des pertes économiques non négligeables.
- Le coût annuel de la pollution atmosphérique estimé par la Banque mondiale et l'Institute for Health Metrics and Evaluation de l'Université de Washington, a été de 5110 Milliards de dollars en perte de bien-être, dont 2.2% du PIB des pays de la région MENA (**Garrec *et al.*, 2014**).

## 7. Les moyens de contrôle /Les solutions

Les processus naturels qui se produisent dans l'environnement étaient suffisants pour contrôler la pollution de l'air et limiter son impact, mais avec l'augmentation forte et constante des sources de pollution et de leur quantité, et la diversité des polluants atmosphériques, les processus naturels ne suffisent plus à purifier l'air. Il fallait une intervention humaine pour réduire ces polluants nocifs et cela a incité les scientifiques à la recherche des voies et des moyens afin de réduire le volume de polluants rejetés, contrôler la qualité de certains d'entre eux, les maîtriser et limiter leurs effets. Parmi les mesures à suivre, on cite :

- ✓ Suivre les mesures de précaution.
- ✓ Modification des caractéristiques des polluants avant leur émission.
- ✓ Éloigner les installations industrielles du centre des rassemblements humains.
- ✓ Mettre un terme à la consommation humaine déraisonnable, qui augmente la quantité de déchets, ce qui entraîne une augmentation des agents pathogènes dans l'atmosphère.
- ✓ Établir un contrôle sur les usines, en particulier celles concernées par la production de matériaux agricoles, car elles sont l'une des sources les plus répandues de pollution de l'air.
- ✓ Minimiser voire empêcher l'utilisation de pesticides.
- ✓ Surveiller l'utilisation de substances qui endommagent la couche d'ozone.
- ✓ Faites attention à la plantation d'arbres et d'espaces verts pour leur rôle dans la purification de l'air. Où certaines plantes se caractérisent par leur grande capacité à absorber certains polluants. Les forêts, les ceintures vertes et les zones boisées dans les villes et autour des zones industrielles jouent également un rôle important dans la purification de l'air des poussières en suspension soulevées par le vent.
- ✓ Travailler sur l'éducation des citoyens sur le danger des polluants et l'importance de préserver leur environnement et les avantages qu'ils tireront du contrôle et du contrôle de la pollution (Al Sarawi, 2016) ;
- ✓ Imposer des lois strictes pour protéger les forêts et les arbres contre les incendies excessifs, avec la nécessité de sanctions sévères pour quiconque conspire pour commettre cet acte.
- ✓ Recourir à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables : Le passage à l'utilisation d'énergies renouvelables, telles que : l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie géothermique comme alternative aux combustibles fossiles, est l'une des meilleures solutions utilisées pour éliminer la pollution de l'air.

- ✓ L'utilisation du gaz naturel à la place du charbon pour réduire la pollution qui en résulte.
- ✓ Activer le principe des bâtiments verts : en recourant à la mise en place de bâtiments respectueux de l'environnement et performants qui réduisent la consommation d'énergie, afin de réduire les émissions de carbone.
- ✓ Renforcement des efforts internationaux pour réduire le problème de la pollution de l'air, tels que : les directives de l'Union européenne sur la qualité de l'air, la convention MARPOL (2005), un accord international visant à prévenir la pollution de l'air marin par les navires.
- ✓ La stratégie frontalière sur la qualité de l'air entre les États-Unis d'Amérique et le Canada, et les deux pays ont mené à bien trois projets, dont la mise en place de sites pilotes dans l'air pour étudier les effets de l'air sur la santé humaine (**Ritchie et Roser, 2019**).
- ✓ Au niveau européen, des normes strictes de contrôle de la qualité de l'air ont été établies, le respect des normes établies et des mesures concrètes proposées dans les zones les plus sensibles.
- ✓ Pour contrer les émissions de polluants associées aux industries, l'État a mis en place des réglementations spécifiques. Depuis 1999, les entreprises les plus polluantes doivent payer une taxe générale sur les activités polluantes. C'est le principe du pollueur-payeur.

Il existe de nombreuses façons de réduire le degré de pollution de l'air résultant de sources fixes telles que les usines, les fours, les combustibles et les centrales électriques. Par exemple, une usine peut installer des équipements destinés à limiter la quantité de polluants qu'elle émet. Il peut également être converti en une méthode de fabrication ou de combustion de carburant, ce qui réduit la pollution de l'air ; l'usine pourrait également passer à des carburants plus purs. Dans certains cas, l'usine doit utiliser certaines de ces mesures pour réduire le degré de contamination.

Pour lutter contre la pollution des voitures et des camions, il faut changer le fonctionnement des moteurs et des composants du carburant et installer des dispositifs de contrôle de la pollution dans les véhicules. Les propriétaires d'usines et de raffineries travaillent dans tous ces domaines pour trouver des moyens appropriés de lutter contre la pollution (**Journal officiel de l'Union européenne, 2018**).

Étant donné que le trafic routier a un impact significatif sur la pollution de l'air, le vélo ou la marche doivent être préférés lorsque cela est possible, de préférence loin des routes encombrées. Dans le cas d'un long trajet, l'utilisation de la voiture ou des transports en commun reste une alternative. Et s'il est vraiment impossible de ne pas prendre sa voiture, nous ferons en sorte de laisser l'air circuler et d'adopter une conduite souple et moins polluante.

A la maison, on choisit des produits naturels pour la maison ou dans le jardin, aérer les pièces aux heures creuses et s'équiper d'un chauffage efficace et moins polluant. Bien sûr, une maison bien isolée réduira le besoin de chauffage (**Ferretti *et al.*, 2009**).

## Chapitre IV : La pollution et les lichens

### 1. Pollution et les lichens

#### 1.1. Sensibilité des lichens à la pollution atmosphérique

L'influence de la qualité de l'air sur la flore lichénique est un facteur écologique primordial sur leur développement, à la grande différence des plantes supérieures qui se nourrissent d'oligoéléments présents dans le sol, et s'y réfugient en hiver ; les lichens stockent toutes ces microparticules (plomb, fluor, métaux lourds, radioactivité...) grâce à leur longévité remarquable, puisqu'ils peuvent être plus que centenaires, ils sont considérés comme d'excellents bioaccumulateurs.

Selon **Ramade (1982)**, la sensibilité des lichens à la pollution atmosphérique résulte de l'écophysiologie très particulière de ces cryptogames qui vivent en épiphytes sur des substrats stériles ou pauvres en éléments nutritifs : roches ou écorces.

En raison de l'équilibre subtil et d'autant plus sensible à la perturbation établie entre les deux partenaires, et parce que ce sont des organismes dont la teneur en eau est variable, les lichens sont plus directement dépendant de leur qualité de l'air que les végétaux supérieurs ou les animaux. (**Krischbaum et Wirth, 1997**).

Les lichens sont, pour leur nutrition, entièrement dépendants de l'atmosphère qui leur apporte l'eau et les sels minéraux. A la suite d'une pluie, le champignon stocke l'eau dans ses hyphes et permet le fonctionnement des deux partenaires pendant un certain temps. Le lichen peut alors développer son thalle. En période de sécheresse, le lichen devient inactif, mais capable de survivre jusqu'à la prochaine pluie où il redeviendra actif (phénomène de reviviscence).

Les lichens sont particulièrement menacés car leur activité métabolique se poursuit également en hiver, lorsque les pollutions atmosphériques sont les plus aiguës du fait du peu de mouvement de l'air et du fonctionnement intense des appareils de chauffage (**Gaveriaux, 1996**).

Selon (**Geiser et al., 2009**), les effets de la pollution atmosphérique sur les lichens peuvent se traduire par la diminution de la fertilité et de la taille du thalle, la décoloration et déformation du thalle, la dégradation des pigments photosynthétiques, l'altération de la

photosynthèse et de la respiration, la mortalité des espèces sensibles.

**Déruelle (1983)** et **Rahali (2003)** soulignent que chez les lichens, les modifications physiologiques nécessitant une détection expérimentale sont plus précoces que les effets visibles (décoloration des thalles et nécroses).

D'après **Herben et Liska (2003)** on peut distinguer dans les milieux pollués :

- Les espèces poléotolérantes, ou résistantes qui peuvent se développer sur tout le gradient de la pollution et les parties moins polluées.
- Les espèces sensibles, qui se développent sur la partie non polluée.
- Les espèces poléophiles, qui se développent au niveau de la partie polluée seulement.

**Skye (2002)** distingue cinq zones concentriques à l'intérieur du périmètre urbain qui correspondent à des aires dans lesquelles la flore lichénique est de plus en plus abondante et variée :

↳ **La zone I**, celle des quartiers centraux, est un véritable désert pour les lichens. Elle est pratiquement dépourvue de ces cryptogames. Les troncs d'arbres des parcs sont recouverts par des algues qui sont substituées aux lichens.

↳ **La zone II**, renferme quelques lichens crustacés particulièrement résistants comme *Lecanora conzaeoides* et des espèces foliacées...*Hypogymnia physodes*, et dans une moindre mesure *Parmelia sulcata*.

↳ **La zone III**, dans laquelle la flore lichénique est encore rare, mais où l'on commence à observer quelques espèces de lichens fruticuleux comme *Cladonia conioraea*.

↳ **La zone IV**, où la flore est assez diversifiée et la couverture des troncs par des lichens épiphytes deviennent assez importante. On y rencontre un certain nombre d'espèces fruticuleuses comme *Ramalina farinacea*.

↳ **La zone V**, dans laquelle la pollution est faible ou nulle et où la flore lichénique est normale, tant au point de vue de la diversité spécifique que du nombre d'individus. Certaines espèces que l'on observe, comme *Baccidia luteola* et *Ramalina fraxinea*, peuvent être considérées comme indicatrices d'un air pur ou fort peu pollué. Dans cette

même zone, les espèces particulières aux aires contaminées, comme *Lecanora conizaeoides*, disparaissent complètement des arbres à feuilles caduques.

Quatre polluants font l'objet d'arrêtés préfectoraux, il s'agit, en plus du dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> et du dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>, de l'ozone O<sub>3</sub> et des particules PM10. Bien que ces 4 formes de pollution de l'air soient intrinsèquement liées, les lichens ne sont directement sensibles qu'aux deux premiers. Ils ne permettent donc de réaliser qu'une étude partielle de la pollution atmosphérique. Les retombées de dioxyde de soufre, gros polluant dans les années 1900 avec l'utilisation du charbon sont beaucoup moins importantes aujourd'hui (pot catalytique, filtration des rejets de fumée...). Par contre la pollution par le dioxyde d'azote en perpétuelle augmentation serait très intéressante à étudier à travers les lichens nitrophiles. Ils métabolisent les composés azotés pour se développer et proliférer, mais disparaissent quand la concentration est trop élevée. Une échelle de 1 à 9 a été éditée par Wirth en 1991 pour mesurer le taux d'azote dans l'air « Indice de nitrophile de Wirth » (Gaci, 2014).

### **1.1.1. Les effets du l'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>) sur les lichens**

Nombreux sont les polluants capables de produire une action néfaste sur les lichens. Cependant, de par son importance au point de vue quantitatif et du fait des nombreuses études expérimentales réalisées .le SO<sub>2</sub> est considéré comme témoin principale du niveau moyen de la pollution atmosphérique.

Pour étudier l'effet du SO<sub>2</sub> sur les lichens, de nombreuses techniques ont été utilisées en laboratoire et sur le terrain et parmi ces techniques on cite :

- ↳ L'expérience d'exposition des thalles au SO<sub>2</sub> par fumigation en laboratoire ou dans la nature et par immersion ;
- ↳ Technique de transplantation du lichen d'une zone rurale peu polluée ou non polluée à une zone urbaine très polluée.

Les lichens présentent une très forte sensibilité au SO<sub>2</sub>, puis qu'ils ne peuvent pas survivre à une concentration moyenne annuelle en SO<sub>2</sub> supérieure à 35 ppb (la concentration moyenne des grandes villes est de 100 ppb). Malheureusement les lichens dans les villes sont cibles de plusieurs changements comme : des atteintes morphologiques, soit une décoloration et une réduction du thalle, des nécroses périphériques et la plasmolyse des cellules algales ; des effets sur la physiologie des lichens par diminution de la respiration et la photosynthèse et par diminution de la reproduction et de la multiplication végétative.

Le SO<sub>2</sub> est particulièrement actif vis-à-vis des lichens. Il se dissout facilement dans l'eau atmosphérique, pénètre dans les thalles et agit sur le lichen en modifiant sa morphologie, sa physiologie (**Ozenda et Clauzade, 1970**).

Les lichens pris en compte disparaissent à des taux plus ou moins importants de SO<sub>2</sub>. En fonction de leur présence ou absence, de leur croissance et de leur développement, de leur abondance en quantité et en espèces, ces bioindicateurs nous renseignent sur le degré de pollution des zones étudiées. Pour information, aucun lichen ne se développe quand la concentration en SO<sub>2</sub> est supérieure à 150 µg/m<sup>3</sup> d'air (**Gaveriaux, 1996**).

### **1.1.2. Les Autres polluantes ayant une action sur les lichens**

Bien que les SO<sub>2</sub> soit le plus représentatif du niveau moyen de la pollution atmosphérique, il est à noter l'existence d'autres polluants qui font l'objet de recherches récentes.

- ✓ Fluor et fluorures volatils, émis par l'industrie .mais concernant pas notre région. (**Asta, 1980**).
- ✓ Eléments radioactifs, les lichens accumulent les éléments radioactifs artificiels produits par l'homme (explosions nucléaires, réacteurs nucléaires) les éléments les plus étudiés sont les césiums 137(137Cs) et le strontium (90Sr) qui sont les plus dangereux à long terme pour l'homme.
- ✓ Métaux lourds, ces métaux lourds ont une origine industrielle : cuivre(Cu), Zinc (Zn), Manganèse(Mn), cadmium (Cd), Fer (Fe), Mercure (Hg) Chrome (Cr). Cependant, le métal le plus étudié de par ses effets écotoxicologiques est le plomb (Pb) (**Deruelle, 1983**). Il provient de la combustion des essences car il est utilisé comme antidétonant sous forme de plomb tétrastyle Pb(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>), et de plomb tétraméthyl Pb(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>
- ✓ Engrais, l'utilisation des engrais modifie l'ensemble de la végétation lichénique en favorisation le développement des espèces nitrophiles ; Ces espèces recherchent les substances minérales solubles, comme l'azote, et leur développement est continuellement en expansion.

## **1.2. Pénétration des Polluants dans les lichens**

Selon **Garrec et Van Haluwyn (2002)**, la quasi-totalité des polluants gazeux pénètre au travers de toute la surface du thalle. La rétention des polluants particuliers est très spécifique aux lichens ; elle se fait soit par dépôts de surface (d'autant plus efficaces qu'il

existe des phénomènes de rugosité de surface), soit par piégeage des particules entre les filaments fongiques intrathallins (migration des particules de surface par gravitation au travers du cortex poreux ou entre les aréoles thallines). À terme, on assiste à une mise en solution partielle des métaux présents dans ces particules en raison de phénomènes chimiques (pH naturellement acide du thalle lichénique, acidité ambiante des zones polluées par SO<sub>2</sub>) et mécaniques (alternance de dilatation et de rétraction des thalles en raison de leur nature poïkilohydrique).

En ce qui concerne les cations solubles présents dans les dépôts humides ou issus de la solubilisation partielle des particules, ceux-ci peuvent être complexés par des acides organiques, les métabolites lichéniques ou des substances proches de la mélamine présentes dans les apothécies (organes de fructification).

Mais ils seront surtout adsorbés sur la paroi et la partie externe de la membrane plasmique des hyphes fongiques (et dans une moindre mesure des algues) par des phénomènes passifs, rapides et réversibles d'échanges ioniques. Une adsorption intracellulaire de certains éléments-traces métalliques tels que le cadmium, le cuivre, le nickel ou le zinc, peut se faire grâce à des mécanismes actifs mettant en œuvre des transporteurs membranaires. Les lichens accumulent également les anions (arsenates, phosphates, sulfites), mais les mécanismes d'absorption sont beaucoup moins connus que ceux concernant les cations. Les dérivés azotés tels que NH<sub>3</sub> (ou ions NH<sub>4</sub>) et nitrates peuvent se déposer à la surface du thalle par l'intermédiaire des dépôts secs et humides. NH<sub>3</sub> est généralement plus facilement absorbé que les nitrates. Les ions NH<sub>4</sub> se fixent dans un premier temps sur la paroi avant d'être transférés dans la cellule (Garrec et Van, 2002).

### **1.3. Apports des lichens dans l'étude des polluants atmosphériques**

Les lichens sont des organismes particulièrement bien adaptés pour l'étude de polluants atmosphériques aussi bien gazeux que particuliers. Ils doivent cette efficacité à leurs particularités anatomiques (structure végétative sous forme de thalle se traduisant par un ratio surface/volume très élevé, absence de cuticule cireuse, de stomates, de vaisseaux conducteurs, présence d'un cortex riche en mucilages et souvent poreux) et leurs caractéristiques physiologiques (nature poïkilohydrique, activité photosynthétique continue tout au long de l'année, croissance lente). Ils seront de ce fait soumis aux retombées des

polluants présents à la fois dans les dépôts secs et dans les dépôts humides (**Garrec et Van, 2002**).

L'utilisation des lichens comme témoins de la pollution est justifié par :

- L'activité continue des lichens durant toute l'année (photosynthèse non interrompue) ce qui les rend capables d'accumuler les substances sur une longue période.
- Lors de la pollution, la productivité des lichens réduite et attribuée a une quantité faible de chlorophylle qu'il contienne et ce qui limite leur pouvoir de récupération.
- Les lichens n'ont pas de racines ce que signifie que certaines espèces dépendent seulement de l'atmosphère qui est seule source des matières nutritives.
- Ils n'ont pas un système de contrôle des entrées et des sorties ni des stomates pour contrôler les échanges avec l'atmosphère.
- Lors de la sécheresse le lichen devient sec, inactif mais peut survivre jusqu'à la prochaine pluie pour devenir actif c'est le phénomène de reviviscence.
- Les lichens se différent des végétaux supérieurs, ils ne possèdent pas les structures qui peuvent leur permettre de limiter les conséquences de la pollution atmosphérique (**Guezzoul, 2002**).

## **2. Indicateurs lichéniques et qualité de l'air**

### **2.1. Méthodes qualitatives**

Basée sur les observations de la végétation lichénique au niveau des sites urbains où le niveau de la pollution acide a permis aux lichnologues d'établir les échelles de pollution en se référant au développement des lichens sur les troncs des arbres (**Gaveriaux, 1995**).

#### **2.1.1 Méthode de Hawksworth et Rose (1970)**

Dans cette méthode, environ 80 espèces sont classées en 11 zones de pollutions définies chacune par un ensemble d'espèces caractéristiques (zone 0 = absence de lichens ; très polluée, zone 10 = grande diversité des lichens ; air pur). Cette méthode a été très utilisée sur l'ensemble du territoire français dans de nombreux travaux entre les années 70 et 80 durant lesquelles le SO<sub>2</sub> était véritablement le traceur de la pollution atmosphérique.

Cette méthode, testée dans des lieux différents a permis de révéler le rôle de facteurs écologiques ou climatiques, la toxicotolérance d'une espèce lichénique variant d'une région à l'autre.

A la fin des années 80, la quantité de dioxyde de soufre atmosphérique a nettement diminué, les lichens ont commencé à faire leur réapparition (**Khalil, 2000**).

Cependant, parallèlement à la diminution du SO<sub>2</sub>, d'autres polluants atmosphériques ont augmenté : les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) liés au trafic automobile, les composés ammoniacaux en milieu rural liés aux activités agricoles, les composés organiques

La méthode d'Hawksworth et Rose ne pouvait plus être utilisée ; c'est à cette époque que prend naissance une approche basée, non plus sur les espèces lichéniques, mais sur l'observation des communautés d'espèces permettant d'établir une échelle d'éco-diagnostic, où les lichens apparaissent non plus comme indicateurs d'un seul polluant mais indicateurs de la qualité de l'air. Dans cette méthode, une trentaine d'espèces sont réparties en 7 zones partant de la zone A (qualité de l'air très médiocre) à la zone G (zone de très bonne qualité de l'air). Cette procédure a été appliquée dans la moitié nord de la France, dans la région lyonnaise (**Agnello et al., 2014**).

### **2.1.2 La méthode de Van Haluwyn et Lerond (1993)**

Cette méthode basée uniquement sur les associations lichéniques définies par des relevés phytosociologiques. Cette méthode permet d'apprécier le degré de pollution directement à partir d'observations sur le terrain et utilise une échelle de correspondance entre le taux de pollution et la diversité ainsi que l'abondance des espèces observées.

Les premières méthodes étaient basées sur l'observation des lichens sur le terrain (estimation du nombre d'espèces et pourcentage de recouvrement). Ont été mises au point ensuite des échelles de correspondance entre les espèces lichéniques et la teneur en SO<sub>2</sub> (**Van et Lerond, 1993**).

## **2.2. Méthodes quantitatives**

Ces méthodes sont basées sur le calcul d'un indice de pollution établi à partir d'une formule mathématique qui fait intervenir différents paramètres relatifs à la flore lichénique corticole (**Leblanc et Sloover, 1970**).

### 2.2.1. L'I.P.A. (indice de pureté atmosphérique)

La plus connue et préconisée par De Sloover (1964) qui est le plus utilisé dans le monde. Les valeurs de l'I.P.A. de toutes les stations sont reportées sur la carte et toutes les stations qui ont un indice voisin sont regroupées ensemble dans des zones d'isopollution. On peut avoir plusieurs zones d'isopollution où la végétation lichénique peut être rare, plutôt commune ou abondante et correspond au niveau de pollution : forte, moyenne ou plus au moins faible (Bargagli *et al.*, 1991).

Les auteurs utilisant l'I.P.A. ont souligné qu'il peut y avoir plusieurs approches pour délimiter les zones en complétant les informations du terrain concernant les dégâts et la régénération des espèces, grouper les données qui sont utilisées pour avoir un gradient logique de la pollution. Nous pouvons aussi délimiter les zones en fonction des caractères écologiques. (Clerc et Roh, 1980).

Le calcul de l'indice de pureté atmosphérique donné par la formule suivante :

$$IPA = (1/10) \sum Qi * Fi$$

Avec :

n : nombre d'espèces dans chaque station

Fi : abondance de chaque espèce

Qi : l'indice écologique de chaque espèce

Pour une espèce donnée il est déterminé en additionnant le nombre des espèces qui l'accompagnent présente dans tous les sites étudiés, puis en divisant ce total par le nombre de sites. Le produit Qi.Fi est divisé par 10 pour réduire la valeur de l'I.P.A. et faciliter l'établissement de la carte. Le coefficient (Fi) proposé par Deruelle (1978) représente à la fois le recouvrement et la fréquence, allant de 1 à 5 :

1 : espèce observée sur un arbre et à recouvrement inférieur à 5% ;

2 : espèce observée sur un arbre ou à recouvrement inférieur à 5% ;

3 : espèce observée sur moins de la moitié des arbres ;

4 : espèce observée sur plus de la moitié des arbres ou à recouvrement supérieur à 50 % sur quelques arbres ;

5 : espèce observée sur plus de la moitié des arbres et à recouvrement supérieur à 50 % sur la plupart des arbres. Nous avons calculé l'I.P.A. pour chaque station et les I.P.A. moyens des

stations incluses dans la même maille afin de réaliser la carte d'iso-pollution selon les classes proposées par **Conti et Cecchetti (2001)**.

Une classe d'I.P.A. de 0 a été rajoutée qui représente le désert lichénique (**Rahali, 2003**), les seules espèces qui s'y trouvent sont des espèces très résistantes à la pollution atmosphérique qu'on rencontre dans des îlots protégés (jardins publics) représentant un microclimat particulier (**Deruelle, 2015**).

Les faibles valeurs d'IAP identifient les zones à faible diversité d'espèces, tandis que les valeurs élevées d'IAP indiquent les zones à forte diversité d'espèces. Bien que les valeurs de l'IAP soient souvent interprétées comme des indicateurs de la pollution de l'air, des différences de richesse en espèces d'IAP ou de lichens peuvent également survenir en raison de la perturbation de l'habitat (**Agnello et al., 2014**).

La méthode IAP est utile pour découvrir les zones dans lesquelles les normes de qualité de l'air sont régulièrement dépassées, et de vastes zones peuvent être étudiées sans appareils ou équipements coûteux (**Maatoug et al., 2010**).

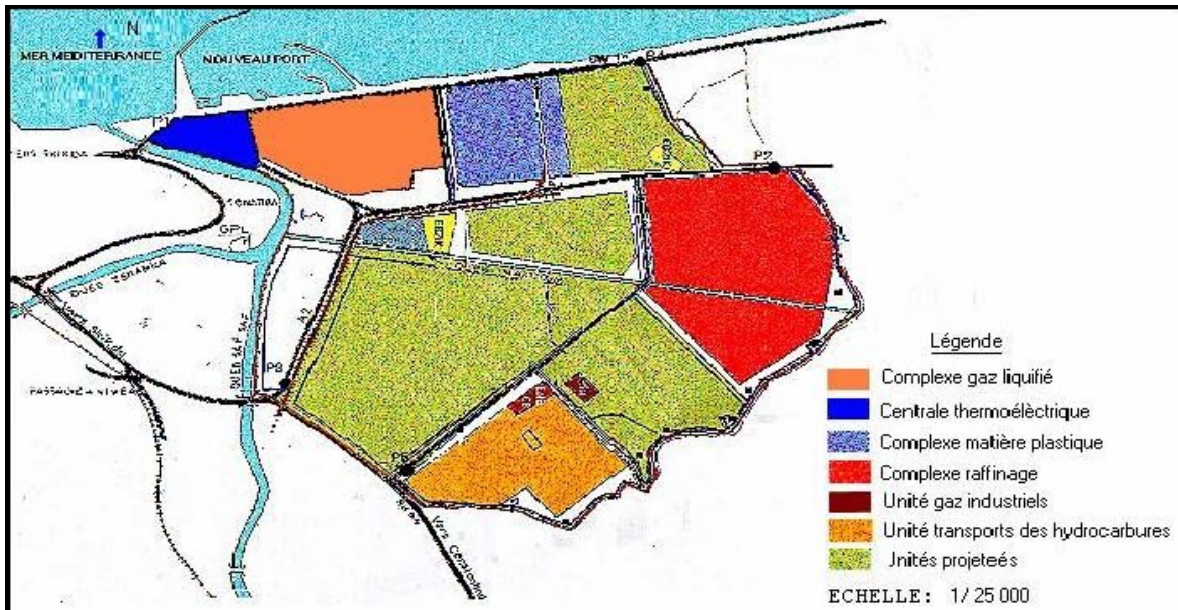
### 2.2.2. L'indice de poléotolérance

Selon (**Tiévant, 2001**) ce dernier consiste à examiner plusieurs arbres de différents âges et de différentes espèces. Pour cela quatre relevés sur chaque arbre ont été nécessaires. Deux ont été effectués sur la face exposée à la pollution dont un à la base et l'autre à une hauteur de 1 à 1,5 m au-dessus du sol ; les deux autres sur la face opposée.

#### Exemple d'étude :

- La technique de détermination de toutes les espèces recueillies, a été effectuée au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire, microscope pour les coupes du thalle, et Certains réactifs tels que la potasse (solution à 10%), lugol et paraphényle diamine.
- Nous avons choisi 07 zones d'échantillonnage en fonction de la rose des pollutions qui englobe notre région d'étude.
- La zone 1 est celle qui est la plus exposée aux divers polluants émanés de la grande zone industrielle (**Figure10**).
- Par contre la zone 7 la moins exposée à la pollution et comprend les massifs forestiers de grande plage et de l'oued Bibi.
- Les espèces lichéniques étaient réparties selon un gradient de pollution définit par :

- la réduction du nombre d'espèces.
- diminution du taux de recouvrement.



**Figure 10 : Unités du complexe pétrochimique (Inspection Environnement de Skikda, 1994)**

❖ *Calcul de l'indice de poléotolérance (I. P) :*

L'indice de poléotolérance est donné par la formule suivante :

$$I.P = \frac{\sum_{i=1}^n a_i * c_i}{C_i}$$

Avec :

n : nombre d'espèce.

a<sub>i</sub> : degré de poléotolérance d'une espèce donnée.

c<sub>i</sub> : degré de recouvrement d'une espèce donnée.

C<sub>i</sub> : degré de recouvrement total de l'ensemble des espèces des relevés.

**2.2.3. L'indice de biodiversité des lichens (LBI)**

Le Lichen Biodiversity Index est une méthode utilisée pour évaluer le niveau de pollution de l'air, publiée en mai 2001 par l'ANPA sous le titre "IBL - Indice di Biodiversità Lichenica", elle est basée sur la sensibilité des lichens vis-à-vis de certains produits de la combustion de combustibles fossiles, comme le NO<sub>x</sub> et le SO<sub>x</sub> ; dans des conditions défavorables, on peut observer une variation à l'intérieur de la communauté. (ANPA, 2001).

Cette méthode se base sur l'étude de lichens épiphytes qui colonisent les tilleuls et qui sont sensibles à NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub>, Elle consiste à observer les variations de leurs communautés (Asta *et al.*, 2002). Elle est calculée à l'aide d'une grille spéciale et d'une loupe qui permet d'évaluer la quantité et la diversité des thalles de lichens présents sur l'écorce des arbres échantillons. La présence et l'assiduité sont signalées sur une feuille d'enquête spéciale. (Khedim, 2014).

Les comptages de la diversité des lichens peuvent être considérés comme des estimations de la qualité de l'environnement : des valeurs élevées correspondent à de bonnes situations, tandis que des valeurs faibles indiquent une mauvaise qualité. Ces mesures dépendent principalement des deux principales réactions des communautés de lichens épiphytes à la pollution de l'air par les gaz phytotoxiques, notamment SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> : une réduction du nombre d'espèces et de leur couverture/fréquence (Nimis *et al.*, 2002).

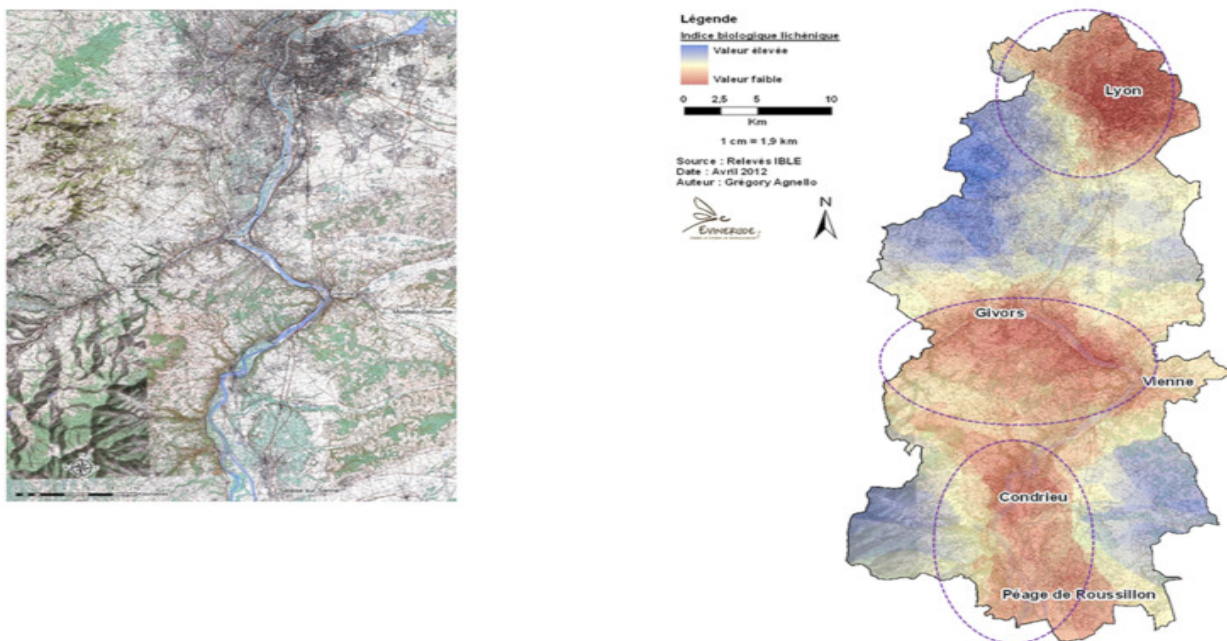
#### **2.2.4. L'indice biologique de lichens épiphytes (IBLE)**

Selon (Cuny *et al.*, 2003), Une norme AFNOR a été mise au point d'abord à l'échelle de la France puis à l'échelle européenne. Cette nouvelle méthodologie est basée sur un Indice Biologique Lichens Epiphytes (IBLE) calculé à partir de l'appréciation de la présence/absence, de la fréquence et du recouvrement des espèces.

Les indicateurs représentés, l'IBLE et la richesse spécifique totale, sont calculés à partir des données biologiques spécifiques, c'est-à-dire de la détermination de chaque espèce de lichens sur les sites d'observation.

*La richesse spécifique totale (R<sub>tot</sub>)* est une mesure de la biodiversité de nos sites de mesure ; elle désigne le nombre total d'espèces de lichens présentes dans une station donnée.

L'indice biologique de lichens épiphytes (IBLE) est un indice de biodiversité normalisé (AFNOR NF X43-903), effectué à partir de l'estimation de la fréquence de chaque espèce, qui donne une idée de l'hétérogénéité dans la station, et du recouvrement de chacune d'elles, c'est-à-dire la quantification de chacune d'elle dans un site. L'IBLE fournit donc une information synthétique et relative (sans unité, ni valeur maximale connue) sur la stabilité de la situation environnementale.



**Figure 11 :** Application de la méthode IBLE (Indice Biologique de Lichens Epiphytes) dans la région lyonnaise et le nord de la vallée du Rhône. Les valeurs de l'IBLE reflètent la qualité de l'air : les valeurs faibles correspondent à une qualité de l'air basse à médiocre, les valeurs fortes à une qualité de l'air moyenne à très bonne. On constate que la plus grande partie de la population se situe dans les secteurs où l'IBLE est le plus faible (**Asta, 1980**)

Initialement, au Lycée, la méthode utilisée était celle *Van Haluwyn et Lerond (1986)*, dans la continuité des travaux de *Gavériaux (1995)*. Celle-ci repose sur l'observation phytosociologique des groupements de lichens se développant sur les arbres. Cette méthode permet de distinguer 7 classes de qualité de l'air de A (flore lichénique pauvre avec un impact de la pollution atmosphérique fort) à G (flore lichénique diversifiée, impacts des polluants atmosphériques faibles).

L'intérêt pédagogique de cette méthode est la détermination des espèces lichéniques, même si une simple erreur de détermination par les élèves peut conduire à une erreur d'évaluation de la qualité de l'air.

Cette méthode permet surtout d'évaluer la qualité globale de l'air sur la zone étudiée. Son application dans le cadre d'études répétées au cours du temps a permis de mettre en évidence une modification de la nature de la pollution atmosphérique, liée à l'évolution de l'urbanisation et la désindustrialisation, qui ont également influé sur les méthodes d'évaluation de la qualité de l'air. Ainsi, l'observation de la flore lichénique a montré une

raréfaction des zones de mauvaise et très mauvaise qualité de l'air, avec la présence de lichens en zone urbaine et parfois à proximité des zones industrielles.

### 2.2.5. Valeur de diversité lichénique (LDV)

La valeur de diversité lichénique (LDV) est calculée pour chaque arbre de chaque site conformément à la norme NF EN 16413 :

$$LDVt = SFNt + SFEt + SFOt + SFSSt$$

LDVt : est la valeur de la diversité écologique pour un arbre t.

SF : correspond à la somme des fréquences d'occurrence de chaque lichen sur la face (SFnord, SFest, SFsud et SFouest) sur un arbre t. La valeur de la diversité lichénique d'un site d'échantillonnage se calcule en faisant la moyenne des valeurs calculées pour chaque arbre d'un même site.(Wirth *et al.*, 2010).

### 2.2.6. Indice de valeurs de la diversité lichénique (VDL) :

Calculé à partir du nombre de présence des espèces identifiées pour chaque arbre

$$VDL = \sum_{i=1}^{i=n} fi / n$$






VDL : la moyenne des sommes de présences des espèces sur les arbres échantillonnés:

*i* : espèces lichéniques;

*fi* : la somme des fréquences de tous les espèces *i* trouvées sur un arbre;

*n* : nombre d'arbres échantillonnés

Il s'agit donc de reporter sur un extrait de carte, de superficie définie, une échelle des codes de couleurs pour caractériser les différents niveaux de la diversité des lichens (**Figure 12**).

Divérsité	très faible		faible		modérée		élevée		très élevée	
Codes de couleur										
LDV	0	20	40	60	80	120				

**Figure 12** : Échelle d'évaluation des VDL (Asta *et al.*, 2002)

### 2.2.7. Valeur de diversité d'indicateur d'eutrophisation (LDVN)

Pour les valeurs de diversité d'indicateurs d'eutrophisation (LDVN pour lichen diversity value nitrophilous), il est nécessaire de savoir quels lichens sont jugés nitrophiles. Le calcul est ensuite le même que pour la LDV, mais il ne concerne que les espèces nitrophiles :

$$LDVN_t = SFN_t + SFE_t + SFO_t + SFS_t$$

LDVN<sub>t</sub> : est donc la valeur de la diversité des indicateurs d'eutrophisations pour un arbre.

SF : correspond à la somme des fréquences d'occurrence de chaque lichen nitrophile sur la face (SF<sub>nord</sub>, SF<sub>est</sub>, SF<sub>sud</sub>, SF<sub>ouest</sub>.) sur un arbre t. (Wirth *et al.*, 2010) .

### 2.2.8. L'Indice de la qualité de l'air (IQA)

Représente la somme des fréquences de chaque espèce trouvée sur chaque arbre. Cet indice est reporté sur une échelle représentée sous la forme d'une couleur, chaque couleur représente une classe de l'IQA (Kirschbaum et Wirth, 1997).

Plus l'indice obtenu est élevé, plus la pollution atmosphérique est faible, donc plus l'air est de bonne qualité.

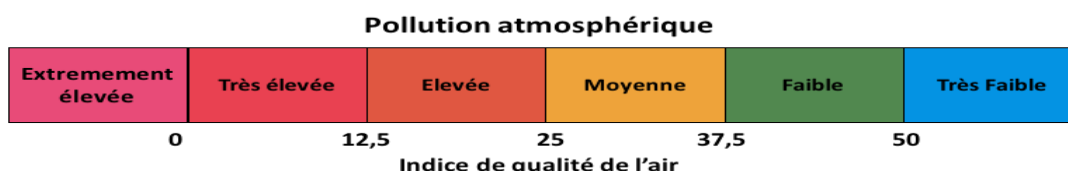


Figure 13 : Echelle d'évaluation de la qualité de l'air d'après (Kirschbaum et Wirth, 1997)

### 2.2.9. La méthode de cartographie en réseau

C'est une approche floristique basée sur la distribution géographique des espèces lichéniques. Cette méthode floristique ou méthode qualitative est basée essentiellement sur le recensement de la flore lichénique (Bedeneau, 1980).

Parmi les réactions des lichens utilisés pour cartographier la pollution de l'air, on peut citer :

- les altérations morphologiques.
- le dosage d'un polluant accumulé dans les thalles.

- la mesure de l'activité phosphatasique,
- les lésions du photosymbiote appréciées par microfluorométrie (**Kauppi, 1983**).
- l'augmentation de la perméabilité cellulaire (**Lasota et Turk, 1984**).
- les altérations cytologiques (**Takaoki et Mitani, 1986**)

**MATERIEL**  
**&**  
**METHODES**

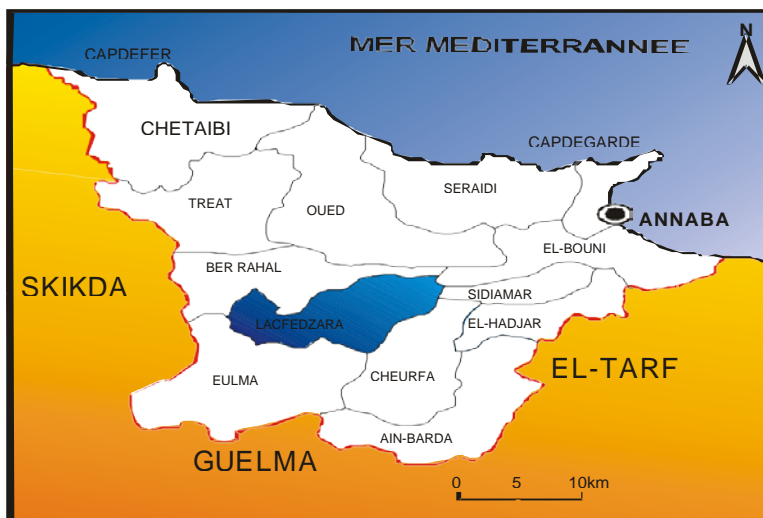
## Matériel et méthodes

### 1. Présentation de la zone d'étude

La ville de Annaba est située à l'Est de l'Algérie entre les latitudes (36 °30) Nord et (37 °30) Nord, et les longitudes (07 °20) Est et (08 °40) Est, avec 12 communes d'une superficie totale de 1411.98 Km<sup>2</sup>. Elle est limitée par la mer Méditerranée au Nord, la wilaya de Skikda à l'Ouest, celle de Guelma au Sud et El Tarf à l'Est.

La région est dotée d'un climat méditerranéen. Le total pluviométrique annuel moyen est de 613 mm et la température annuelle moyenne est d'environ 18°C (normales climatiques 19802009). Le climat est humide et doux en hiver (décembre-janvier-février), chaud et sec en été (juin-juillet-août) avec des températures moyennes de 12°C pour la saison froide et 23,5°C pour la saison chaude, et un total pluviométrique moyen respectivement de 263 et 25 mm

La population de la wilaya d'Annaba n'a cessé d'augmenter durant ces dernières années pour atteindre 650 000 habitants où on enregistre d'ailleurs une moyenne annuelle de croissance près de 1,01% et une répartition irrégulière de la population avec une variation de la densité d'une commune à une autre. L'axe Annaba - Sidi Amar et El Bouni représente les sites où la majorité de la population est concentré (44,65 % à Annaba, 20,04% à El Bouni et 12,80% à Sidi Amar). Les caractéristiques socioéconomiques (pôle commercial, industriel, universitaire et la qualité des services) sont des facteurs limitant de la distribution de la population.



**Figure 14:** Localisation géographique de la région d'étude (Annaba) (Office national de Météorologie Les Salines, Annaba)

## 2. Echantillonnage

### 2.1. Méthode utilisée pour évaluer la qualité de l'air

Plusieurs méthodes ont été décrites pour estimer la pollution de l'air à l'aide de la végétation lichénique épiphyte. Dans cette étude et afin de contribuer à l'évaluation de la pollution atmosphérique dans l'agglomération d'Annaba, capitale de l'industrie en Nord - Est algérien, Plusieurs méthode ont été utilisées :

- **L'indice de diversité lichénique (LDV)** : cette méthode est basée sur la fréquence spécifique à l'intérieur d'une grille d'échantillonnage, et calculée pour chaque arbre de chaque site (**Wirth et al., 2010**).
- **L'indice de diversité lichénique nitrophiles (LDVN)** : il est nécessaire de savoir quels lichens sont jugés nitrophiles. Le calcul est ensuite le même que pour la LDV, mais il ne concerne que les espèces nitrophiles (**Wirth et al., 2010**).
- **l'indice de biodiversité Shannon-Weaver** : permet d'exprimer la diversité spécifique d'un peuplement étudié. la diversité spécifique caractérise le nombre plus ou moins grand d'espèces présentes dans un peuplement. S'il est homogène (constitué d'une seule et même espèce), alors l'indice  $H' = 0$  (**Peet, 1994**).

✚ La formule :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$$

$H'$  : correspond à l'indice de Shannon, selon la formulation suivante :

$p_i$  : l'abondance proportionnelle ou pourcentage d'abondance d'une espèce présente ( $p_i = n_i/N$ ).

$n_i$  : le nombre d'individus dénombrés pour une espèce présente.

$N$  : le nombre total d'individus dénombrés, toute espèce confondue.

$S$  : le nombre total ou cardinal de la liste d'espèces présentes.

## **2.2. Choix des stations d'échantillonnage**

La sélection des stations d'échantillonnage est la première étape et nécessite, après repérage sur Google Maps, d'aller sur le terrain pour sélectionner les stations d'échantillonnage et les arbres.

Dans l'agglomération d'Annaba, on a opéré de telle manière à avoir des sites avec un degré de trafic routier variant de fort à faible et 12 stations ont été retenues.

Sur chaque station, 6 arbres doivent être éligibles à l'observation des lichens conformément à la norme NF EN 16413 (Biosurveillance de la qualité de l'air concernant les méthodes de prélèvements – incluant le choix du site de prélèvement – et de préparation des échantillons, les méthodes d'essais et la détermination d'indices biologiques).

Les stations de prélèvement ont été choisies de sorte que la totalité de la zone cible soit recouverte et selon la possibilité d'accès à ces sites, car plusieurs sites sont soit clôturés par des barrières en fer pour des raisons de sécurité ou soit que le terrain est très accidenté.

Les zones forestières ne sont pas favorables pour la détermination des lichens car les conditions de température, de vent, d'ensoleillement et d'humidité créent un microclimat distinct du reste du territoire d'étude.

## **2.3. Choix des arbres**

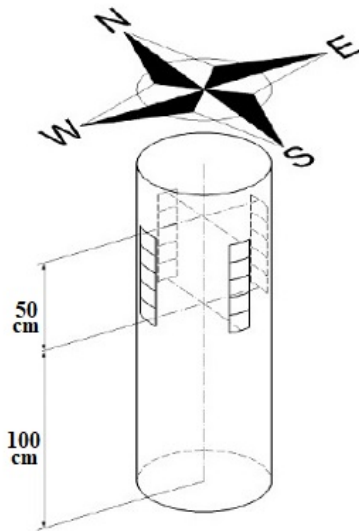
Le choix des arbres doit correspondre à des critères :

- Certains arbres sont à proscrire comme par exemple le platane, dont l'écorce est soumise à une forte desquamation ne laissant pas suffisamment le temps aux lichens de se mettre en place.
- le tronc ne doit pas avoir de plaies, de rainures, de bosses, etc.
- La circonférence du tronc doit être comprise entre 40 cm et 3 m à une hauteur de 130 cm.
- Ecorce non accidentée, non desquamant, présence limitée de mousse ou de lierre, etc
- La couverture des lichens doit être uniforme autour du tronc ; la sélection d'un arbre avec une face sans lichens impliquerait une sous-estimation de la diversité lichénique dans les résultats, ce qui laisserait indirectement entendre que la qualité de l'air est inférieure sur ce site.

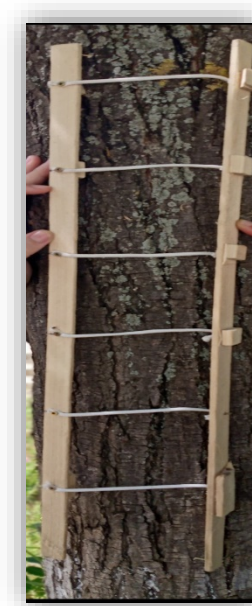
- Il faut aussi que les éléments limitant le développement des lichens soit les moins nombreux possible.

## 2.4. Relevé sur le terrain

L'échantillonnage est réalisé sur les 4 faces de l'arbre (4 points cardinaux) à l'aide d'une grille d'observation composée de 5 mailles de 10 cm x 10 cm et fixée sur le tronc d'arbre dans l'endroit où la présence des lichens est importante .



**Figure 15 :** Placement de la grille d'observation (AFNOR, 2014)



**Figure 16 :** Grille d'observation placée sur l'arbre (Madi & Medaci, 2022)

Le relevé se fait entre 1 m et 1,50 m (à partir du sol) ou plus haut, parce que la partie inférieure des troncs est soumise à des conditions différentes (proximité du sol voire de végétaux) et peut aussi être soumise à des apports azotés comme l'urine de chien qui vient totalement modifier la couverture lichénique.

La fréquence des lichens sur chaque arbre est déterminée par la somme des espèces. Le même protocole est réalisé pour chaque station d'étude.

## 2.5 Matériel utilisé sur le terrain

Les observations de terrain en lichénologie comme dans d'autres spécialités nécessitent un matériel spécifique. En effet, il est indispensable d'avoir :

- Des enveloppes pour la récolte des échantillons à déterminer au laboratoire.

- Un couteau , nécessaire dans la récolte des échantillons.
- Des loupes de différents grossissements (10X, 15X, 20X, 30X).
- Un décimètre pour estimer la circonférence de l'arbre.
- Un crayon.
- Des fiches de relevés, qui contiennent toutes les informations nécessaires pour le calcul des indices de diversité notamment (la date du prélèvement, les coordonnées géographiques, le numéro de l'arbre, sa circonférence, l'altitude...etc).
- Des guides d'identification des lichens.
- Un appareil photo et un appareil GPS (Global Positioning System) pour déterminer les coordonnées géographiques.
- Carte de la zone d'étude.
- Une grille de détection de 50 cm divisée en rectangles de 10 x 10 cm élastique pour la fixer sur le tronc à l'arbre.
- Boussole.

Toutefois les observations de terrain ne suffisent pas pour connaître avec certitude l'identité d'un lichen, le travail continu au laboratoire.



**Figure 17 : Matériel utilisé sur le terrain (Madi & Medaci, 2022)**

## 2.6. Préparation et conservation des échantillons

- Les espèces des lichens récoltés ont été soigneusement triées, emballées dans des enveloppes.

- Sur chaque enveloppe sont notés : le numéro de station, le numéro de l'arbre, le lieu, la date de récolte, ainsi que les coordonnées géographiques de la station.
- La conservation des espèces inventoriées à température ambiante pendant plusieurs jours jusqu'à l'identification au laboratoire.

### 3. Identification des lichens

#### 3.1. Technique de détermination des échantillons lichénique

- Le type de thalle : caractère qui permet de placer le lichen dans l'un des 7 types morphologiques suivants : lépreux, crustacés, squamuleux, foliacés, fruticuleux, composites ou gélatineux.
- La couleur du thalle : jaune, orangé, vert, vert bleu, brun ...
- La forme, la couleur et la localisation des divers organes portés par le thalle : organes non reproducteurs (poils, cils, fibrilles, rhizines, papilles, pseudocyphelles...) ou reproducteurs (soralies, isidies, apothécies ou périthèces) (**Ait Hammou *et al.*, 2013**).

Plusieurs ouvrages ont été consultés tels que :

- Le site web comme le site d'A.F.L (l'Association française de Lichénologie), le site ([https://www.discoverlife.org/mp/20q?guide=Lichens\\_USGA](https://www.discoverlife.org/mp/20q?guide=Lichens_USGA)).
- Livret de détermination « UCL-Scienceinfuse » de Anne Bauwens.
- « les lichens, étude biologique et flore illustrée » de **Ozenda et Clauzade(1970)**.
- « travaux des lichenologues Algériens : (**Touazi, 2007**) ; (**Alloua *et al.*, 2008**) ; (**Maizi *et al.*, 2010**) ; (**Rebbaset *al.*, 2011**) ; (**Ait hammouet *al.*, 2011**) ; (**Hassani et Djeddi, 2013**).

#### 3.2. Identification des lichens au laboratoire :

L'identification des échantillons lichéniques a été effectuée au niveau du laboratoire de parasitologie de la faculté des sciences de la nature et de la vie (Université Chadli Ben Djedid-El tarf).

Pour confirmer l'identification de l'espèce il est nécessaire de faire des observations complémentaires au laboratoire, tel que la morphologie des différents types de thalles.

Pour cela nous avons utilisé le matériel suivant : loupe binoculaire, Pissette d'eau, lames de bistouri pour faire des coupes et un microscope.

Les observations basées sur les caractéristiques morphologiques des thalles des lichens ne sont pas toujours concluantes pour l'identification. Il est souvent nécessaire de faire des tests chimiques avec certains réactifs, qui en contact avec le thalle donnent des colorations spécifiques. Parmi ces réactifs et produits on note :

- L'eau
- L'eau de Javel ou hypochlorite de sodium (noté C)
- La potasse ou hydroxyde de potassium (noté K)
- La paraphénylènediamine (noté P)

Les réactions colorées s'effectuent en déposant le réactif directement sur le thalle et sur le médulles préalablement mise à nue en rayant ou grattant le cortex supérieur.

- ✓ s'il n'y a aucune réaction, on note sur la fiche le signe « - » ;
- ✓ si la réaction est positive, on note le signe « + ».

Si avec les réactions chimiques on n'aboutit pas à l'identification exacte, nous serons appelés à procéder à une dernière manipulation qui consiste en une préparation microscopique basée sur une coupe de thalle nécessaire afin de déterminer les particularités des spores (forme, couleur, dimension, et cloisonnement) (**Ozenda et Clauzade, 1970**).

**RESULTATS**

**&**

**DISCUSSION**

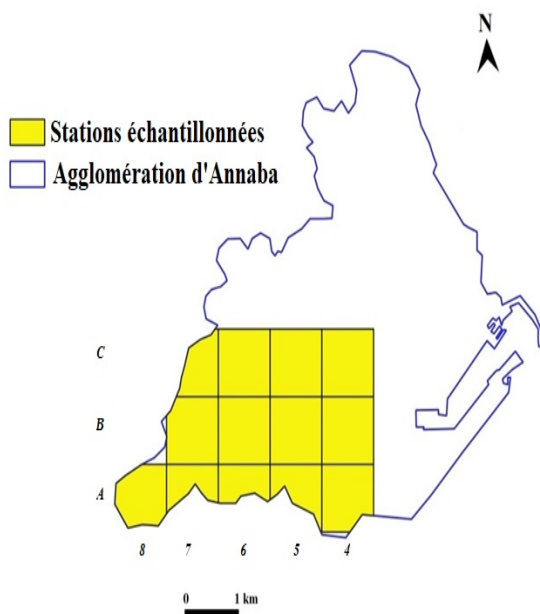
# Résultats et discussion

## 1. Echantillonnage

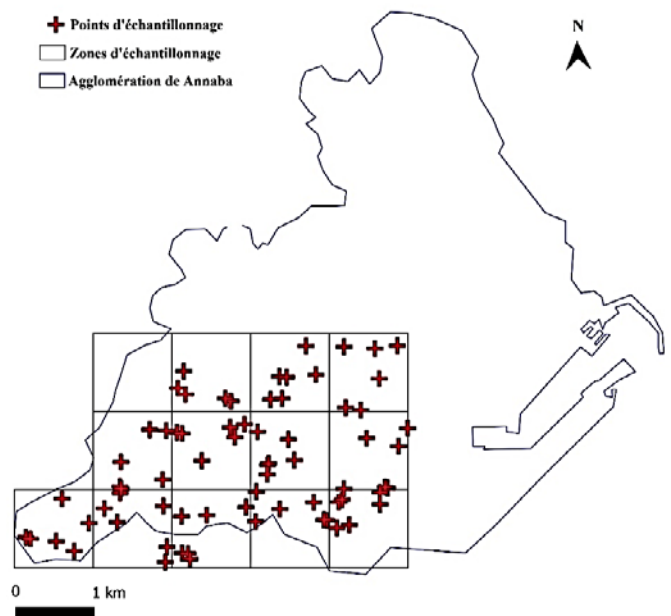
La zone d'étude a été divisée en plusieurs stations et chaque station est représentée sous forme de carré d'une superficie de 1km<sup>2</sup>. Cette zone est divisée horizontalement (A, B, C) et verticalement (4 à 8) afin de couvrir toute la zone cible.

La figure ci-dessous (**Figure 18**) représente la division de la zone d'étude en stations.

Il est à noter que la station C7 était dépourvue d'arbres qui répondent aux critères d'échantillonnage.



**Figure 18 :** Carte présentant les zones d'échantillonnage



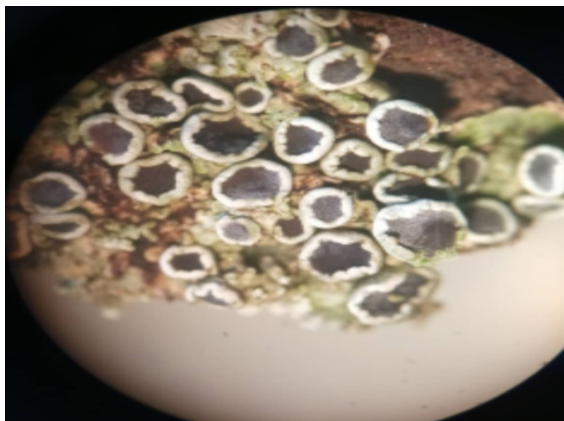
**Figure 19 :** Carte présentant la position des points d'échantillonnage

Suivant le protocole du LDV, l'échantillonnage doit être représentatif pour chaque station, de plus c'est une agglomération, donc la plupart des arbres sont à proximité des routes ; la figure ci-dessous (**Figure 19**) représente les différents points d'échantillonnage.

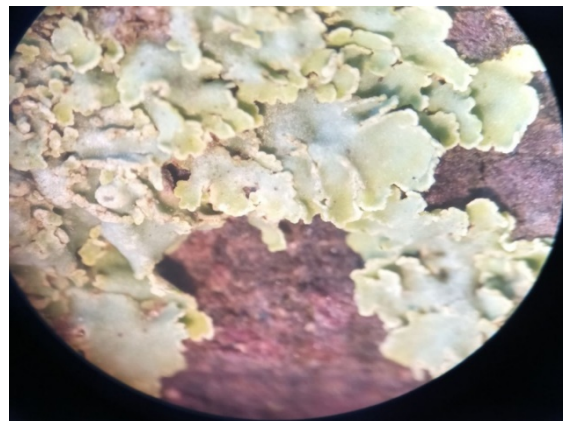
## 2. Espèces identifiées

L'étude de la flore lichénique de la zone d'étude qui visée essentiellement la pleine ouest de l'agglomération d'Annaba, a permis de révéler la présence de 20 taxons appartenant à 12 famille et une seule espèce n'a pas été identifiée.

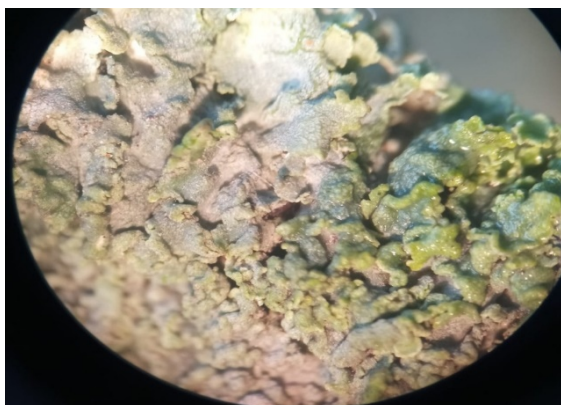
Ces espèces récoltées, conservées et identifiées ; ci-dessous quelques photos des espèces identifiées :



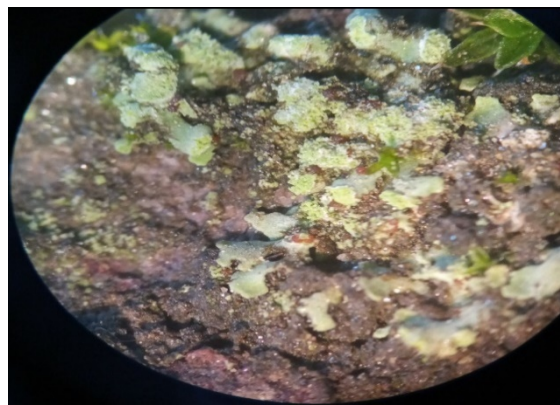
**Figure 20 :** *Physcia aipolia*  
(grossissements X10)



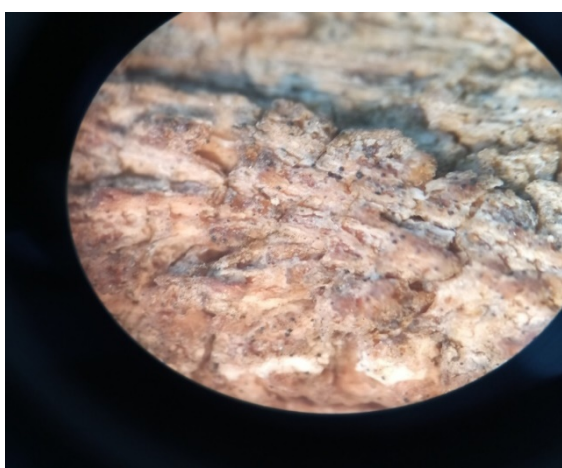
**Figure 21:** *Parmelia sulcata*



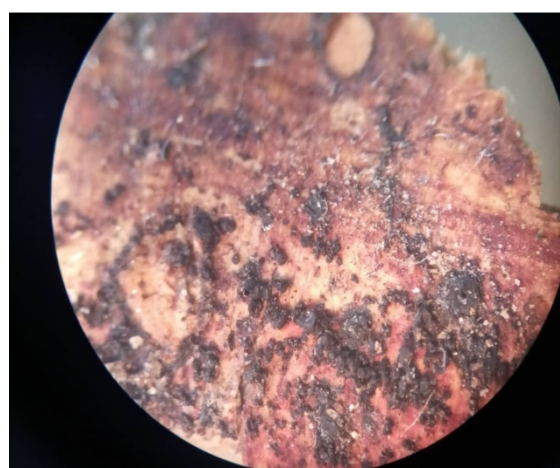
**Figure 22 :** *Physconia grisea*



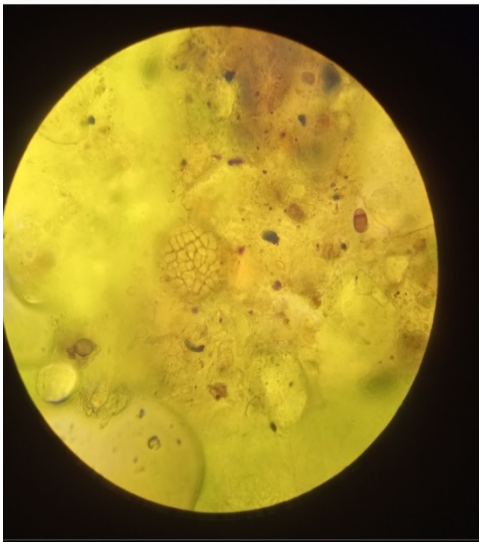
**Figure 23:** *Physcia adscendens*



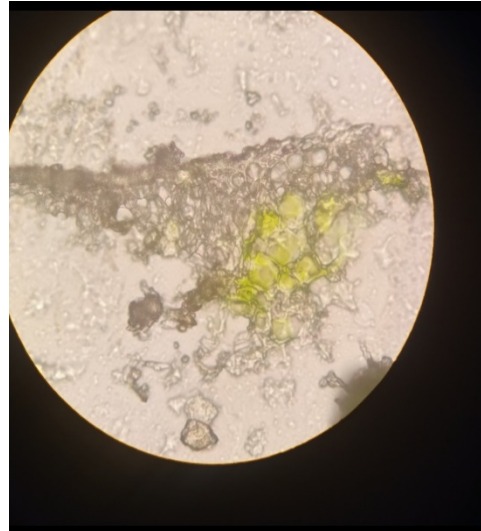
**Figure 24:** *Lecidella elaeachroma*



**Figure 25 :** *Arthopyrenia punctiformis*



**Figure 26 :** Coupe de thalle de *Abrothallus microspermus* (grossissements 10 X100)



**Figure 27 :** Coupe de thalle de *Physconia grisea*

### 3. Répartition des lichens selon le type de thalle

Sur les 72 phorophytes nous avons recensé 21 espèces de lichens épiphytes, dont la majorité sont des crustacés (13 espèces) et 08 espèces foliacée.

Le tableau ci-dessous représente les espèces lichéniques, leur type de thalle et leur taxonomie (famille) et ceci selon la classification de (Van Haluwyn et Lerond, 1986), (Tableau 1).

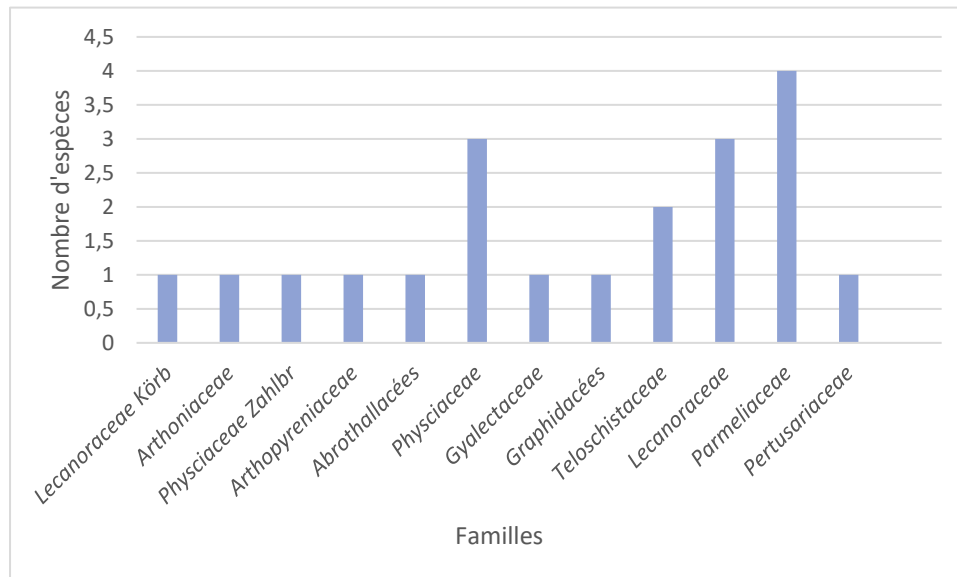
**Tableau 01 :** Classification des espèces lichéniques en fonction du thalle

Espèces	Thalle	Famille
<i>Lecidella elaeachroma</i>	Crustacés	<i>Lecanoraceae Körb</i>
<i>Arthonial</i>	Crustacés	<i>Arthoniaceae</i>
<i>Physconia grisea</i>	Foliacés	<i>Physciaceae Zahlbr</i>
<i>Arthopyrenia puntiformis</i>	Crustacés	<i>Arthopyreniaceae</i>
<i>Abrothallus microspermus</i>	Crustacés	<i>Abrothallacées</i>
<i>Physcia adscendens</i>	Foliacés	<i>Physciaceae</i>
<i>Physcia aipolia</i>	Foliacés	<i>Physciaceae</i>
<i>Gyalecta truncigena</i>	Crustacés	<i>Gyalectaceae</i>
<i>Graphis sp</i>	Crustacés	<i>Graphidacées</i>
Espèce non identifié	Crustacés	Non identifié

<i>Caloplaca sp</i>	Crustacés	<i>Teloschistaceae</i>
<i>Lecanora sp</i>	Crustacés	<i>Lecanoraceae</i>
<i>Lecanora intumescens</i>	Crustacés	<i>Lécanoracées</i>
<i>Parmelia sulcata</i>	Foliacés	<i>Parmeliaceae</i>
<i>Lécanore persimilis</i>	Crustacés	<i>Lécanoracées</i>
<i>Physodes d'hypogymnie</i>	Foliacés	<i>Parmeliacées</i>
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	Foliacés	<i>Physciaceae</i>
<i>Flavoparmelia caperata</i>	Foliacés	<i>Parméliacées</i>
<i>Pertusaria amara</i>	Crustacés	<i>Pertusariaceae</i>
<i>Parmelia sp</i>	Foliacés	<i>Parmeliaceae</i>
<i>Xanthoria elegans</i>	Crustacés	<i>Teloschistaceae</i>

#### 4. Spectre systématique

Les lichens recensés dans la zone d'étude se répartissent sur 12 familles. Le spectre systématique des espèces lichéniques rencontrées est représenté dans la **Figure 28**.



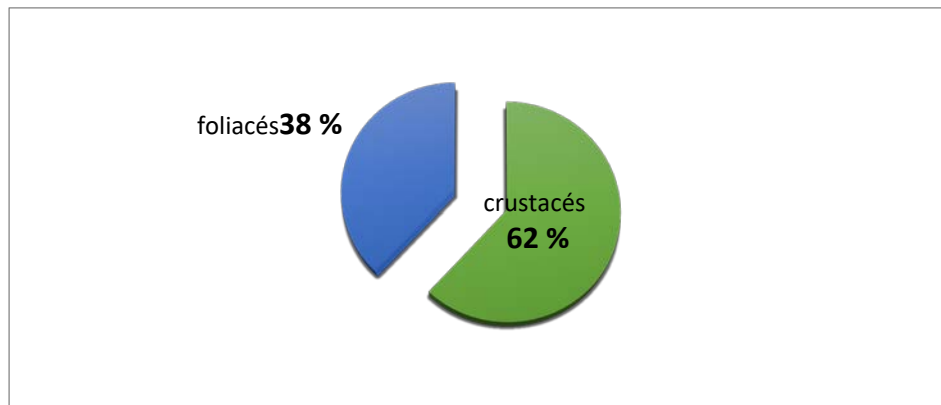
**Figure 28** : Le spectre systématique des espèces lichéniques de la zone d'étude

Nous relevons du spectre systématique la présence de 12 familles ; les *Parmeliaceae* représentent une importance quantitative avec 04 espèces *Parmelia sulcata*, *Physodes d'hypogymnie*, *Flavoparmelia caperata*, *Parmelia Sp*.

Les *Physciaceae*, les *Lecanoraceae* se retrouvent avec 03 espèces.

Les *Lecanoraceae*, *Körb*, les *Arthoniaceae*, les *Physciaceae Zahlbr*, les *Arthopyreniaceae*, les *Abrothallacées*, les *Gyalectaceae*, les *Graphidacées* et les *Pertusariaceae* représentées par une seule espèce pour chaque famille.

## 5. Spectre physiologique



**Figure 29** : Abondance relative des espèces selon le type du thalle

Il existe plusieurs types de thalles : thalles gélatineux, thalles crustacés, thalles foliacés, thalles fruticuleux, thalles lépreux, thalles squamuleux, thalles composites, thalles filamenteux (**Gaveriaux, 1999**).

Le spectre physiologique des espèces rencontrées lors de cette étude dans la zone cible, montre bien dominance des espèces à thalle crustacé avec 13 espèces recensées (62%), alors que les foliacés occupent la deuxième place avec un effectif de 8 espèces, constituant 38% de l'ensemble de la flore lichénique.

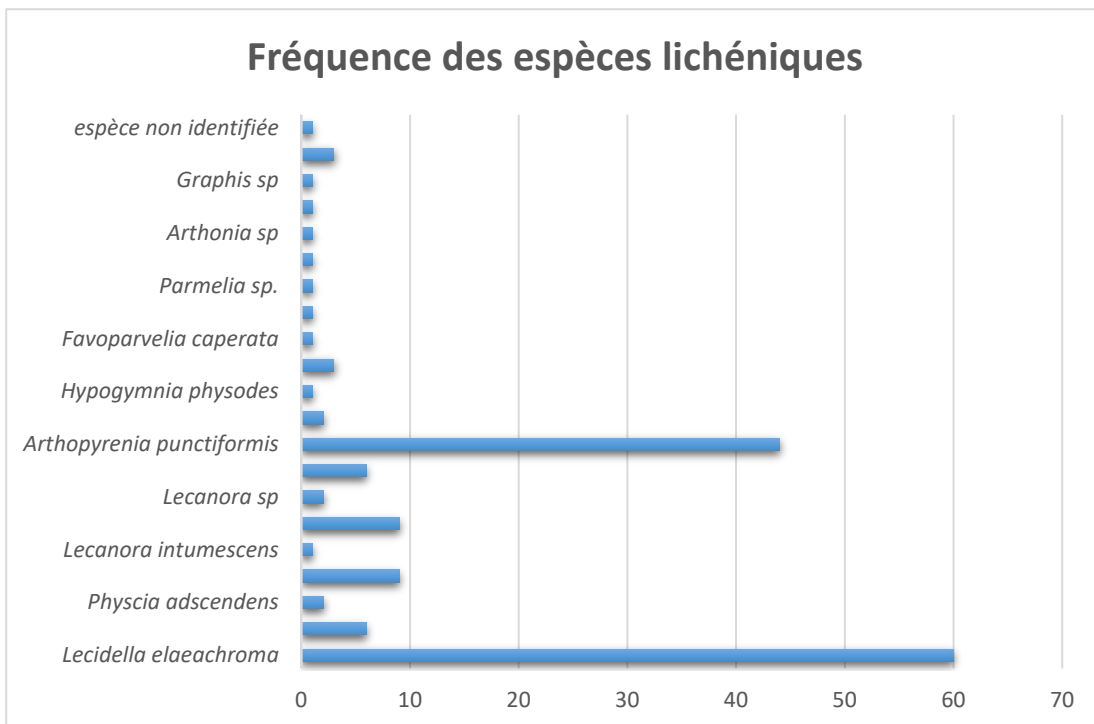
Ces résultats sur le type physiologique sont similaires à ceux de : (**Djellil, 1989**) dans la région d'Akfadou, (**Rahali, 2003**) à Alger et (**Rebbas et al., 2001**) dans le parc national de Gouraya.

Concernant les autres types de thalle, nous n'avons rencontré aucun autre type à part ces deux mentionnés précédemment.

## 6. Fréquence des espèces lichéniques recensées dans la zone d'étude

La **Figure 30** indique la dominance de l'espèce *Lecidella elaeochroma* retrouvée sur 60 phorophytes, suivi de *Arthopyrenia punctiformis* avec une présence sur 44 phorophytes. Nous expliquons cela soit par la nature de phorophytes : certains lichens préfèrent les troncs à écorces lisses, ou à écorces rugueuses sinon ils abritent les troncs des vieux arbres. donc sont des espèces plus résistantes à la pollution (**Fadel et al., 2012**).

En effet, certaines espèces de lichens tels que : *Parmelia sulcata*, *Physcia aipolia*, *Physconia grisea*... sont de faible densité, plusieurs paramètres peuvent être la cause de cette pauvreté lichénique dans l'espace. Parmi ceux-ci la pollution atmosphérique, l'extension de l'urbanisation, l'industrialisation qui peuvent affecter l'habitat de la végétation lichénique, en prenant en considération aussi la nature du substrat et le milieu dont ils vivent (**Brown et al., 1994**).



**Figure 30** : Fréquences des espèces prélevées dans la zone d'étude

Enfin, l'absence des autres espèces dans notre région d'étude peut se traduire déjà par les différences au niveau bioclimatique des étages auxquelles appartiennent les deux régions (Géomorphologie et microclimat). Elle peut s'expliquer aussi par la différence du taux de la pollution. Certains auteurs attribuent la disparition des lichens dans les villes aux conditions climatiques particulières telles une température élevée et surtout une humidité insuffisante, tandis que d'autres incriminent la pollution atmosphérique. **Barkman (1963)** a tenté d'expliquer la poléophobie des lichens à la fois par la sécheresse

et par la pollution atmosphérique (Rahali, 2003).

## 7. Calcule de LDV

**Tableau 02 : Exemple de calcul du LDV**

Date :08/3/2022	Lieu :																Station n° :A8								
Arbre n°/Circonférence	01 :75cm				02 :1,65cm				03 :2cm				04 :190				05 :181				06 :123				
Position	36,88520				36,8864				36,88637				36,886197				36,89001				36,887892				
	8								7								2								
	7,715220				7,7097				7,710210				7,713275				7,713827				7,716614				
Proximité des axes (m)	2m TF*				2m PF**				2m PF				2m PF				2m PF				2m TF				
Arbre	Populus alba L.				Juglans nigra L				Fraxinus excelsior L				Juglans nigra L.				Melia azedarac h L.				Morus nigra				
Espèces :	N	E	S	w	N	E	S	w	N	E	S	w	N	E	S	w	N	E	S	w	N	E	S	w	Frq
<i>Lecidella elaeoachroma</i>	5	5	3	5	5	5	3	5	5	5	3	5	5	5	3	5	5	5	3	5	0	0	0	0	15
<i>Arthonia 1</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16
<i>Physconia grisea</i>	0	0	0	0	2	2	0	2	4	3	1	2	4	2	0	2	5	3	0	2	0	0	0	0	5,6
<i>Physcia adscendens</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
<i>Physcia aipolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	0	0	0	0	1
<i>Abrothallus microspermus</i>	0	0	0	0	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	0	0	0	0	2
<i>Artjopyrenia punctiformis</i>	0	0	0	0	4	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	3	4	3	0	3	5
<b>Somme fréquence arbre</b>	6	5	3	5	1	1	3	1	1	9	4	8	9	7	3	7	1	1	3	1	4	3	0	3	26,33
					3	2		2	0								9	5	3						
<b>Diversité lichenique arbre</b>	18				40				31				26				50				10				29,16
<b>Somme Nord</b>	10,16																								
<b>Somme Est</b>	8,5																								
<b>Somme sud</b>	2,66																								
<b>Somme west</b>	8																								
<b>LDV</b>	25,16																								

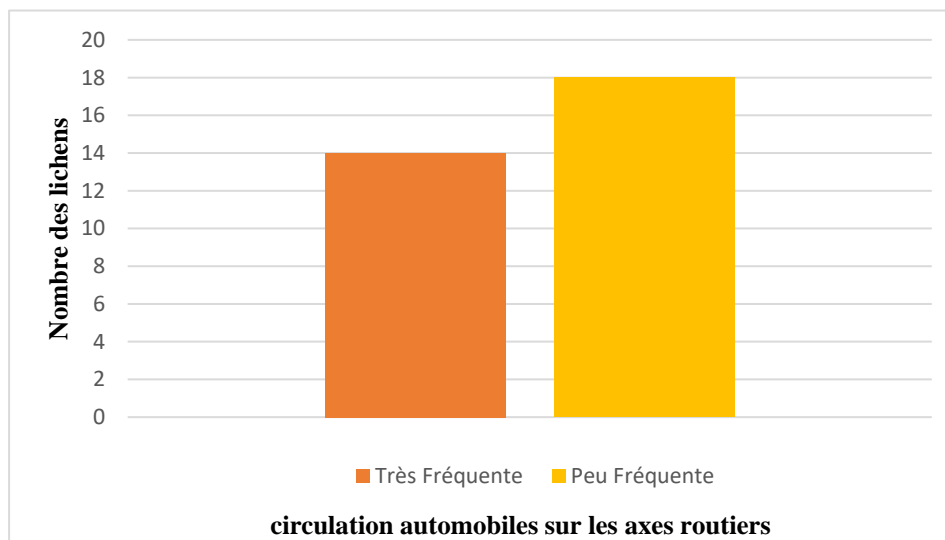
\* TF : Très fréquents , \*\*PF : Peu fréquents

## 8. Les différents relevés du LDV

Pour interpréter les valeurs du LDV, nous avons pris en considération un certain nombre de facteurs à savoir : la proximité des axes routiers, le type de phorophytes et la circonférence des phorophytes.

### 8.1. La proximité des axes routiers

La figure ci-dessous représente le nombre de lichens recensés en fonction de l'environnement adjacent des arbres échantillonnés ; où sur les relevés réalisés sur terrain, la fréquence de circulation a été mentionnée comme TF pour les routes à forte circulation automobile et PF pour les routes à faible circulation automobile.



**Figure 31 :** L'effet du trafic routier sur l'abondance des lichens

Selon le graphe, l'abondance des espèces lichéniques tends à se diminuer en se rapprochant des axes routier à forte fréquence de circulation automobiles et cela peut être expliqué par la faite que :

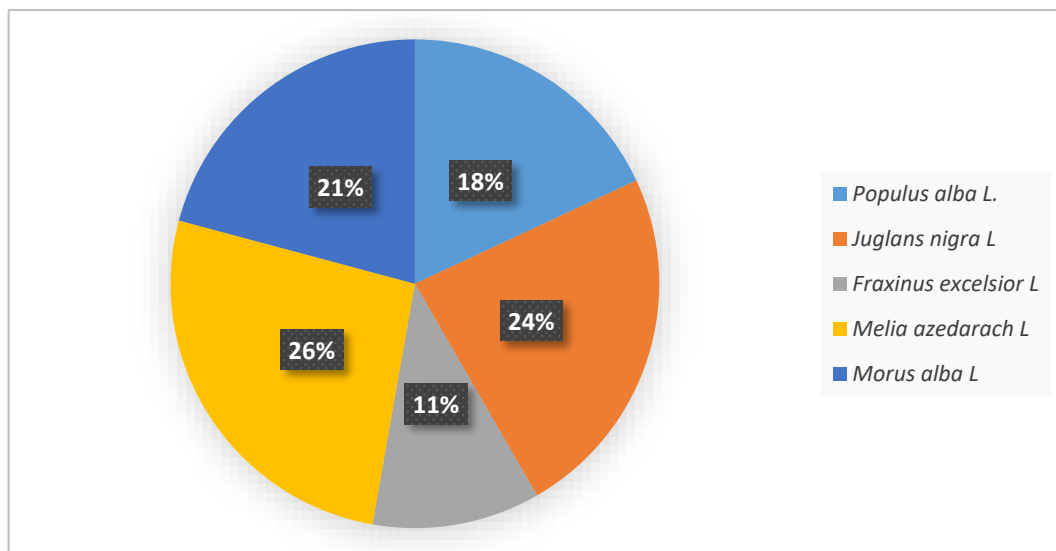
- ✓ Le trafic routier intense favorise la concentration des gaz d'échappement de ces véhicules (**Maizi, 2013**).
- ✓ l'existence d'un parc automobile très important par rapport aux distances parcourues et les déchets ménagers asphyxient l'environnement (**Saihia et Dahech, 2017**).
- ✓ L'existence de plusieurs usine tels que le complexe de fabrique d'engrais minéraux FERTIAL qui contamine l'atmosphère de la ville par des rejets de gaz très chargés en  $\text{NH}_3$ .

- ✓ En outre, l'usine d'ArcelorMittal, l'une des plus grandes usines sidérurgiques en Afrique, produit environ 1 million de tonnes par an. L'impact des polluants issus de cette usine sur l'entourage et l'écosystème est indéniable, Concernant les végétaux on observe la présence de certains polluants qui accentuent la diminution de la photosynthèse et causent des dégâts sur la végétation (Maizi, 2006).

## 8.2. Le type de phorophytes

### 8.2.1. Fréquence relative des phorophytes échantillonnés

Les phorophytes présents dans la zone d'étude, sélectionnées et représentées dans la Figure 32.



**Figure 32 :** Fréquence relative de es différents types des phorophytes (en pourcentage)

Dans la zones d'étude 05 espèces de phorophytes étaient largement présentes et aptes pour l'échantillonnage, il s'agit de : *Populus alba L.*, *Juglans nigra L.*, *Fraxinus excelsior L.*, *Melia azedarach L.* et *Morus alba L.*

Selon la figure 33 nous avons remarqué que l'espèce *Melia azedarach L.* présente presque dans toutes les stations et elle se présente comme le phorophyte principale (26%), par rapport à la totalité des arbres échantillonnés.

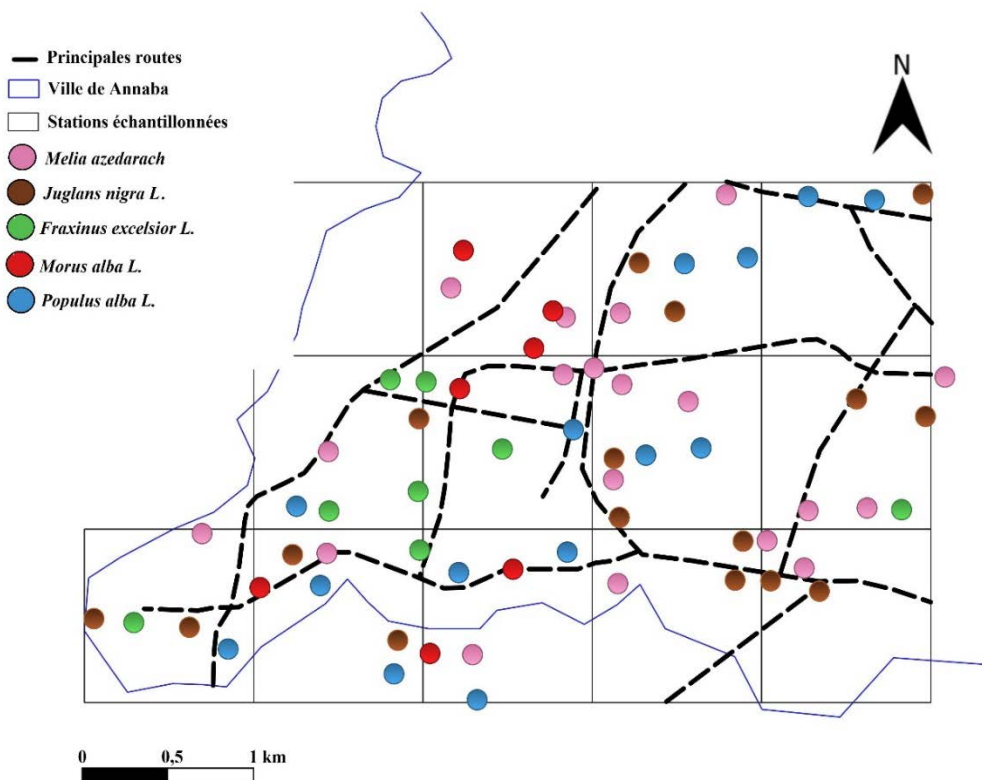
A partir de la carte qui représente la distribution des phorophytes sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 33), on observe que l'arbre *Melia azedarach L.* est concentré au centre de la zone d'étude parce que ce milieu est adapté à sa croissance et à sa reproduction, en plus de sa particularité de changer la chimie du sol (Nelson et Gil, 1996).

Cependant, dans les 03 stations (A5, B6, B7) *Melia azedarach L* est absent ; par ailleurs au niveau de 03 autres stations (B4, B5, C3) la présence cet arbre est faible. La présence limitée de cet arbre est dû aux caractéristiques de la station surtout la nature du sol.

Ensuite, le phorophytes *Juglans nigra L* est *Morus alba L* dont le pourcentage de présence dans les arbres échantillonnés est de 23% et 20% respectivement. *Juglans nigra L* est un arbre réparti dans le sud-est de le la pleine ouest de l'agglomération d'Annaba et cela est dû à plusieurs raisons, dont sa tolérance à l'humidité et son besoin de chaleur permanente, en plus qu'il préfère les sols nutritifs, poreux et calcaires (Becquey, 1997).

Enfin, *Populus alba L*, *Fraxinus excelsior L*, elles sont les espèces les moins fréquentes.

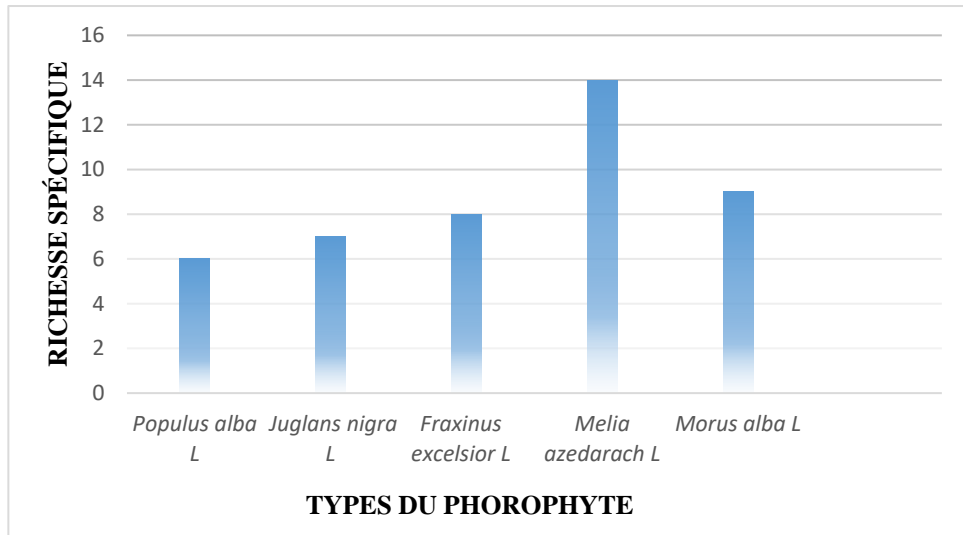
La carte ci-dessous (figure 33) représente la distribution des différents arbres échantillonnés sur la zone d'étude.



**Figure 33 :** Distribution des phorophytes dans la zone d'étude

### 8.2.2 Fréquence relative des lichens selon le type des phorophyte

Dans la zone d'étude, nous avons constaté que les lichens épiphytes existent sur tous les phorophytes mais avec des aspects quantitatif et qualitatif différents (**Figure 34**).



**Figure 34** : Fréquence des lichens sur différents types de phorophytes

Ainsi, nous constaté que le phorophytes *Melia azedarach* L contient le plus grand nombre d'espèces lichéniques, parce que cet arbre est très résistant aux insectes et autres agents pathogènes ; il préfère les sols humides et en même temps très tolérant à la sécheresse, il est aujourd'hui largement répandu dans les régions méditerranéennes (**Mickaël et al., 2009**).

Ensuite, *Morus alba* L, un où le nombre de lichens présents était 9 espèces de la totalité des espèces rencontrés dans la zone d'étude. En effet, d'autres phorophytes sont pauvres en lichens tels que *Populus alba* L avec 6 espèces, *Juglans nigra* L avec 7 espèce et *Fraxinus excelsior* L avec 8 espèces lichéniques.

**Bendaikha (2018)**, a recensé 13 espèces lichéniques présentes chez l'arbre *Morus alba*, 11 espèces chez *Populus alba* et 30 espèces sur *Fraxinus* ; ces différences sont essentiellement dues à la grandeur de la zone d'étude et à la sensibilité des lichens aux changements climatiques accélérés essentiellement par la pollution. Dans une autre étude (Etude de faisabilité de la mise en œuvre d'une méthode de biosurveillance suivant la norme NF EN 16413), ils n'ont trouvé que 4 espèces sur le phorophyte *Juglans*.

Il est à noter que le nombre de lichens vari d'un arbre à un autre et ceci est probablement dû à plusieurs facteurs comme le milieu qui soit naturel ou bien urbain, la circulation

automobile, les conditions situationnelles tels que l'altitude, l'humidité et la température et les exigences physico-chimique du substrat à savoir la texture de l' écorce et son pH.

### 8.3. La circonférence

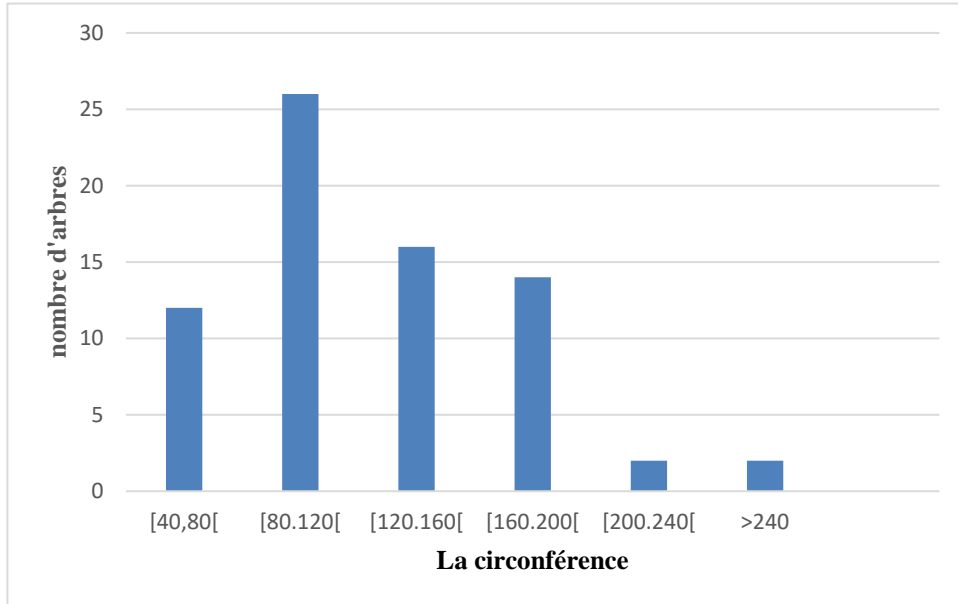
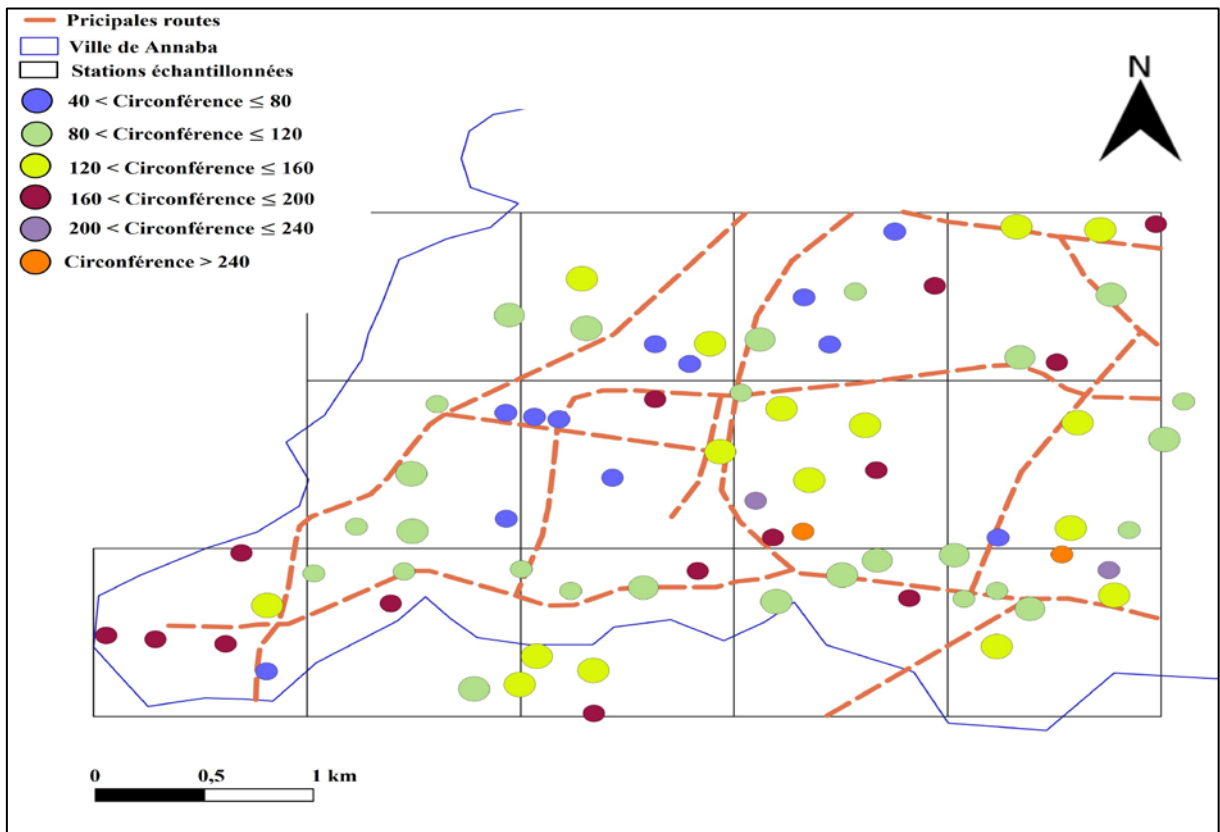
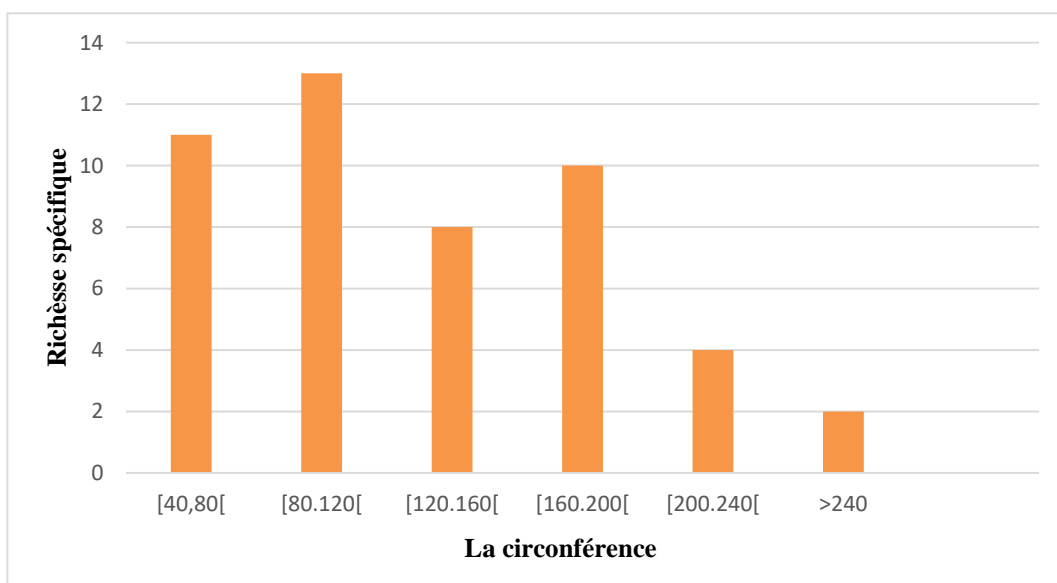


Figure 35 : Fréquence des arbres échantillonnés en fonction de leur circonférence



**Figure 36 :** Distribution des arbres selon la circonférence



**Figure 37 :** Histogramme présente la richesse spécifique en lichens selon la circonférence de chaque phorophyte

A partir des **Figures 35** et **37**, qui représentent respectivement la circonférence /nombre des arbre et la circonférence /nombre des lichens et la carte (**Figure 36**), nous avons remarqué le suivant :

- La circonférence de l'écorce et sa structure ont un effet sur la répartition des lichens sur le phorophyte ; et d'après les résultats observés surtout pour les intervalles [40-80[ , [80-120[, plus la circonférence est petite, plus le pH est élevé. L'acidité de l'écorce protège les arbres des bactéries et des insectes qui affectent la distribution des lichens (**Bates, 1992**).
- Pour l'intervalle de circonférence, [120-160[ , [160-200[ ; au cours du temps, l'écorce des arbres adsorbe et accumule divers contaminants (issus de déposition humide et sèche) , les métaux sont plus concentrés dans les couches superficielles de l'extérieur de l'écorce, par rapport aux couches internes de l'écorce. Et les teneurs peuvent aussi varier selon la hauteur le long de la tige ou du tronc (**Heichel et Hankin, 1972**).
- Par contre on observe que plus la circonférences des arbres est grand plus l'abondance des lichens diminue ou inexistante, cela est dû au fait que une diminution de l'acidité

de l'écorce est observée en fonction de l'âge, exprimé par l'augmentation de la circonférence des troncs (Becker *et al.*, 2019).

## 9. Résultats de l'Indice de la diversité lichénique (LDV)

Comme déjà mentionné dans la partie théorique (chapitre 3), les niveaux des polluants au niveau de l'agglomération d'Annaba a dépassé de loin les limites nationales et les normes internationales (Saihia et Dahech, 2017), ce qui vient d'être réaffirmé par les résultats du LDV des différentes stations de la zone cible.

Le problème de la pollution atmosphérique dans la région d'Annaba était le sujet d'étude de plusieurs travaux ciblant différents aspects, biologique, chimique et climatologique. Plusieurs articles de presse ont signalé les nuisances environnementales causées par le complexe sidérurgique Arcelor Mittal, dans la région d'Annaba et plus spécialement dans les localités de Sidi Amar, Bargouga et Derradji Rdjem (Hasnaoui, 2000).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 3, qui comporte le nombre des stations étudiées, outre le numéro de la station, l'indice (LDV), diversité des lichens, degré de pollution. Ces derniers sont obtenus en s'appuyant sur l'échelle d'évaluation des VDL.

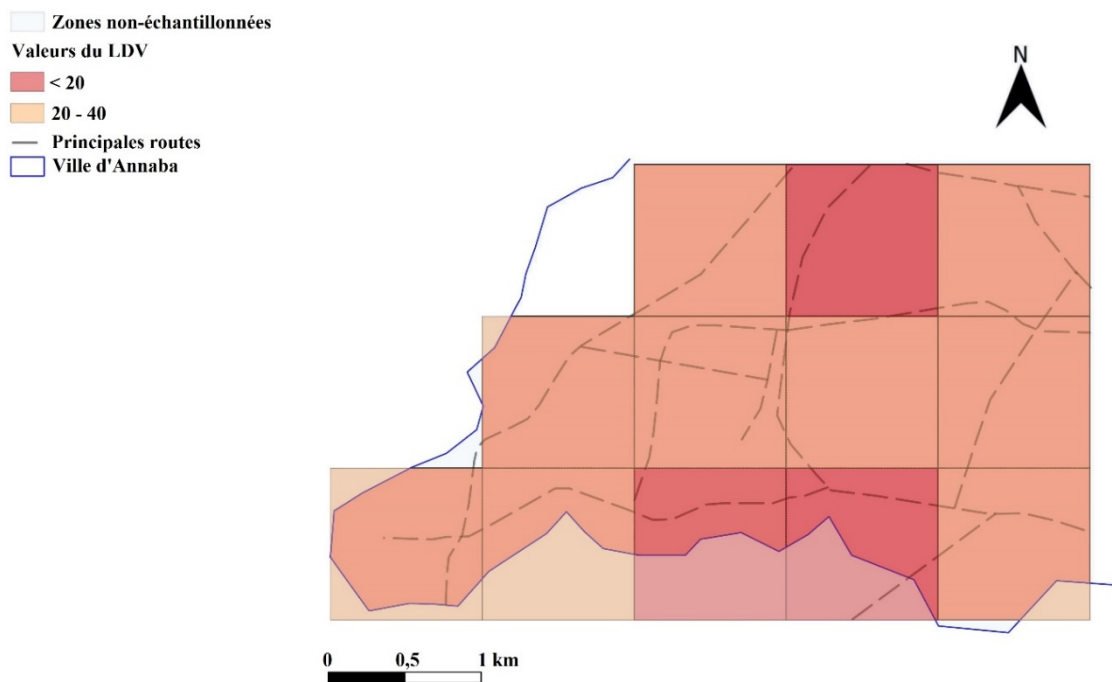
**Tableau 03 :** Classification des stations selon l'échelle d'évaluation des VDL (Asta, 2002)

Station	LDV	Diversité des lichens	Degré de pollution
A8	25,16	Faible	Assez fort
A7	32,5	Modérée	Moyenne
A6	20	Très faible	Extrêmement fort
A5	18,5	Très faible	Extrêmement fort
A4	29,33	Faible	Moyenne
B4	27	Faible	Moyenne
B5	34,16	Faible	Moyenne
B6	34	Faible	Moyenne
B7	20,33	Faible	Extrêmement fort
C4	39	modérée	Moyenne
C5	10,5	Très faible	Elevée

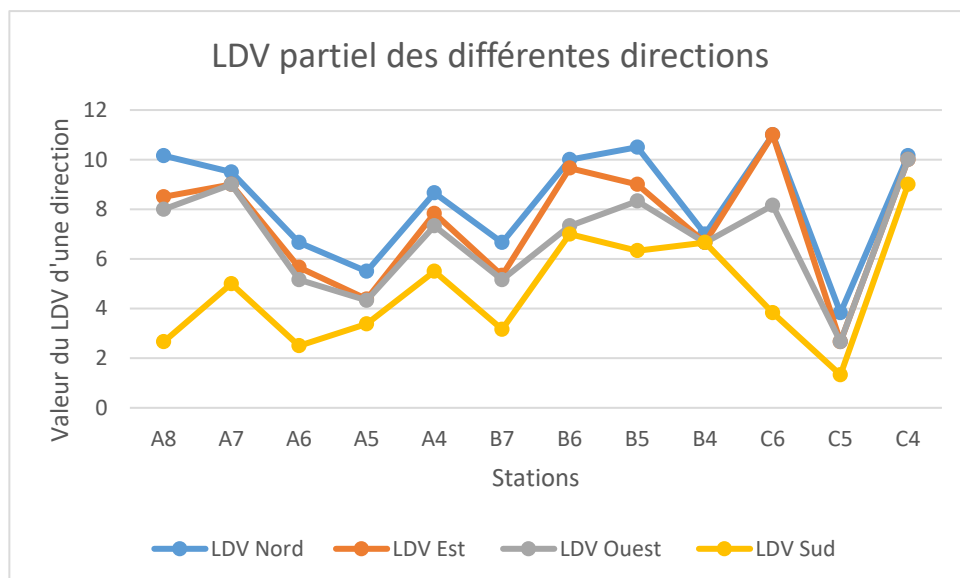
C6	34	Modérée	Moyenne
----	----	---------	---------

Les valeurs de l'Indice de la diversité lichénique varient entre 10,5 et 39 pour les 12 stations.

Selon l'échelle d'évaluation des LDV de **Asta (2002)**, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les station A7 B6 C4 C6, alors que les valeurs moyennes caractérisent les stations A4 B4, et les autre station leur degré de pollution est assez fort.



**Figure 38:** Carte du LDV



**Figure 39 :** Fréquence des lichens sur les différentes directions (Nord, Est, Ouest et Sud)

A partir de la figure 39 on peut observer que la grande diversité des lichens est concentrée sur la face nord de l'arbre, moyenne sur le côté Est et West, extrêmement faible sur le côté sud.

De ces résultats on peut conclure que les lichens se développent souvent sur la face nord du tronc des arbres ; c'est parce que les rayons du soleil frappent tout au long de la journée la face sud et faiblement les faces Est et Ouest et par conséquent, c'est le Nord qui reçoit moins d'insolation, donc de meilleures opportunités et conditions pour une bonne croissance des lichens sur cette face (**Feuerer et Hawksworth, 2007**).

Après avoir fait les différents calculs du LDV pour chaque station, les données ont été ensuite répertoriées et classées pour réaliser la carte de la pollution de notre zone d'étude basée sur les valeurs du LDV et ceci dans la figure n°38,

Selon la norme LDV, l'examen de la carte de pollution (Fig.38), a permis la caractérisation de 2 zones de pollution, une zone très polluée et une autre moins polluée.

On remarque une pollution extrêmement élevée et ceci dans les stations A6 ( qui représente la pleine ouest « les allemands » caractérisée par une habitation très dense), A5 (comportant la pénétrante O, l'une des principales pénétrantes de la ville d'Annaba ainsi que la rue Oued Ed Daheb, une rue de forte circulation automobile reliant le rond-point de Sidi Brahim et la pénétrante O) et C5 (comportant la pénétrante O et le Boulevard de l'Afrique) avec une diversité lichénique  $< 20$ . Ce qui mène à conclure que la qualité de l'air est dégradée dans ces stations.

La pollution dans ces stations peut être due essentiellement aux gaz d'échappements issus du trafic routier, le moteur développe ainsi plus de puissance, consomme plus de carburant et rejette plus de polluants entraînant une augmentation considérable des émissions ; surtout que ces stations sont connues par l'embouteillage et plus précisément durant les heures de pointes.

Le reste des stations est caractérisé par une pollution moyenne (LDV entre 20-40) qui domine la zone d'étude. Cela est dû au fait que certaines des zones que nous avons prises

avaient une source de pollution moyenne par rapport aux premières zones mentionnées précédemment, En plus de:

- ✓ la Température appropriée.
- ✓ le vent a une action directe, mécanique, qui joue un rôle dans la dissémination des fragments de thalle et des propagules de multiplication des lichens (**Horneck et al., 2004**).
- ✓ loin des axes routière et le trafic automobile.
- ✓ Loin des zones urbaines et industrielles.
- ✓ plus on monte en altitude plus le nombre d'espèces devient plus important (**Rahali, 2005**).

Enfin, Plus on s'éloigne du cœur dense des agglomérations plus le niveau de pollution diminue.

## 10. Calcule LDVN

Pour les valeurs de diversité d'indicateurs d'eutrophisation (LDVN), il est nécessaire de savoir que le calcul de cet indice ne s'appuie que sur lichens sont jugés nitrophiles (**wirth, 2010**). Il se calcule de la même manière que la LDV, mais il ne prend en compte que les espèces nitrophiles.

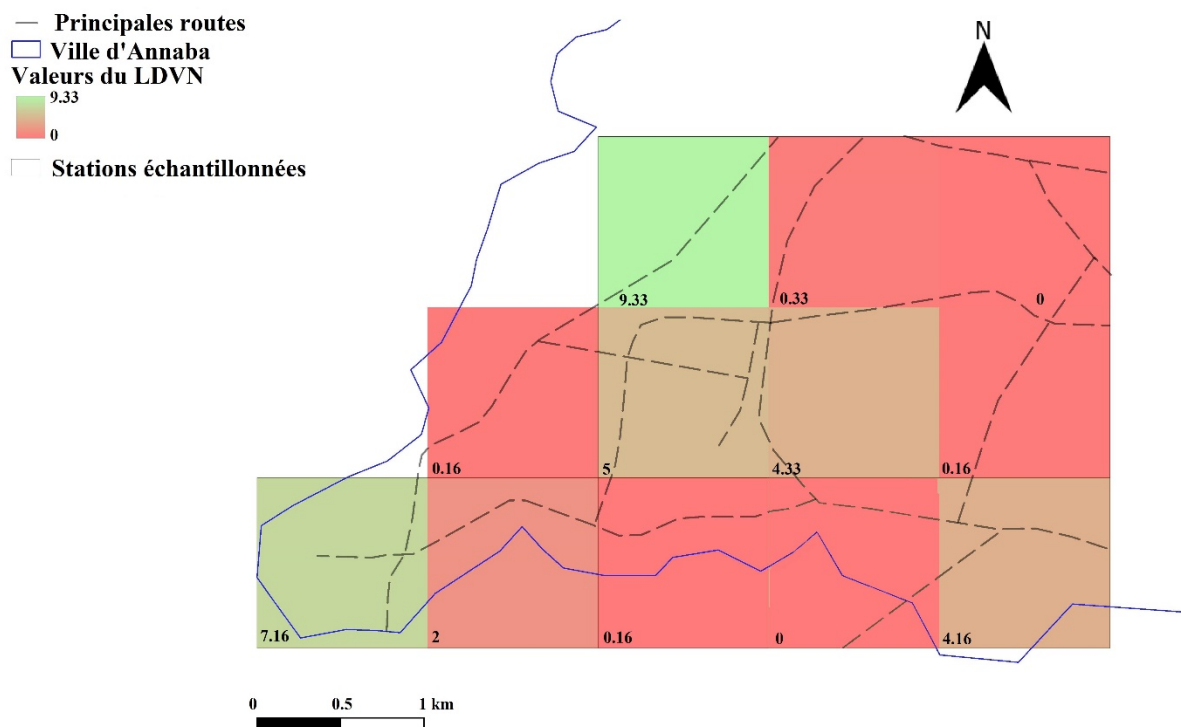
**Tableau 04 : Exemple de calcul de LDVN**

Station A8 /arbre 6	Nitrophile	Nord	Est	sud	Ouest	Abondance de lichen pour chaque espèce	Abondance de lichen pour chaque espèce nitrophile
<i>Lecidella elaeoachroma</i>	<b>NON</b>	25	25	15	25	90	
<i>Arthonia l</i>	<b>NON</b>	1	0	0	0	1	
<i>Physconia grisea</i>	<b>OUI</b>	15	10	1	8	34	34
<i>Physcia adscendens</i>	<b>OUI</b>	1	1	0	1	3	3
<i>Physcia aipolia</i>	<b>OUI</b>	3	2	0	1	6	6
<i>Abrothallus</i>	<b>NON</b>	4	4	0	4	12	

<i>microspermus</i>							
<i>Artopyrenia punctiformis</i>	<b>NON</b>	12	9	0	9	30	
						Valeur de la diversité lichénique :	Valeur de la diversité des indicateurs d'eutrophisation :
						29,33	7,16

**Tableau 05** : Classification des stations selon l'indice de LDVN

<b>Station</b>	<b>LDVN</b>	<b>Diversité des lichens</b>	<b>Degré de pollution</b>
A8	7,16	Moyenne	Moyenne
A7	2	Faible	Elevée
A6	0,16	Très faible	Elevée
A5	0	Très faible	Elevée
A4	4,16	Faible	Moyenne
B4	0,16	Très faible	Elevée
B5	4,33	Faible	Moyenne
B6	5	Moyenne	Moyenne
B7	0,16	Très faible	Elevée
C4	0	Très faible	Elevée
C5	0,33	Très faible	Elevée
C6	9,33	Moyenne	Moyenne



**Figure 40 :** Carte présentant l'indice LDVN

A partir de **Tableau 05** et la carte qui présente dans la figure 38 nous avons noté le suivant :

Après avoir fait les différents calculs du LDVN de chaque station ; la figure n°40, présente la carte de la pollution des différentes stations selon leur degré de pollution montrées par différentes couleurs à base du LDVN.

Les valeurs de LDVN varient entre 0 et 9,33, les faibles valeurs sont enregistrés dans les stations (A7 A6 A5 A4 B4 B7 C4 C5) et sont ainsi classés comme zones avec une mauvaise qualité de l'air.

Nous a vous remarqué que la station C6 (couleur vert), présente valeur de 9,33 du LDVN et elle est située dans le Nord-est de la zone d'étude ce qui montre bien que cette station a une grande diversité des lichens nitrophiles et par conséquent le degré de pollution de cette zone est moyenne.

Cependant, les deux stations A8 B6 présentent des valeurs de LDVN moyenne (7,16 5) respectivement, ils sont classés dans les zones caractérisées par une qualité d'air moyenne.

On note ainsi qu'il y a plusieurs facteurs influençant les valeurs de LDVN tels que : les activités agricoles, l'acidité de l'écorce, L'influence de la circulation routière, Le recouvrement des lichens nitrophiles diminue lorsque la pollution azotée est élevée.

## 11. Les variations de LDV et LDVN

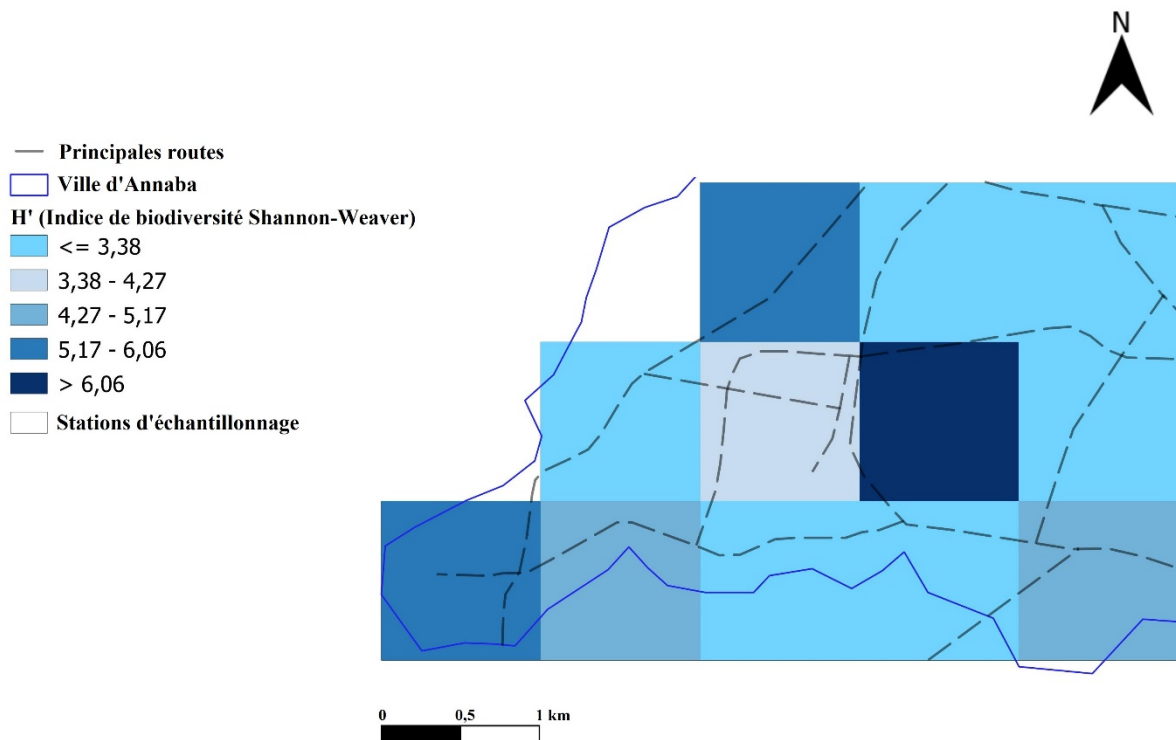


**Figure 41 :** Comparaison des valeurs du LDV et le LDVN

Les variations du LDVN ne sont pas spécialement liées à LDV.

Le calcul du ratio (LDVN/LDV) qui correspond au nombre de lichens nitrophiles sur le nombre de lichens totaux par site, Certains sites sont composés en majorité de lichens non nitrophiles tandis que d'autres sont presque exclusivement constitués de lichens nitrophiles.

## 12. l'indice de biodiversité Shannon-Weaver



**Figure 42:** Carte présentant l'indice de biodiversité Shannon-Weaver

Après avoir fait les différents calculs de l'indice de biodiversité Shannon-Weaver de chaque station et selon l'échelle de ce dernier on remarque que :

Indice de 3 à 4 : la diversité est moyenne donc la zone est modérément polluée.

Indice de 5 : la diversité est élevée, donc la qualité de l'aire de cette zone est bonne.

Ensuite, plus l'indice est élevé (supérieur à 6) plus la diversité est forte, donc la qualité de l'aire de cette zone est très bonne (**Frontier, 1983**).

Globalement, la diversité est influencée par plusieurs facteurs comme : fort courant, transport solide importante et abrasif, altitude des stations (**Kemka, 2004**).

# CONCLUSION

## Conclusion

Cette étude a porté sur l'évaluation et la cartographie de la pollution atmosphérique dans le plein ouest de l'agglomération d'Annaba en utilisant la flore lichénique comme bio-indicatrice de cette pollution. Un recensement de toute la flore lichénique de toutes les stations étudiées a été réalisé en reposant sur le protocole de l'indice de diversité des lichens (LDV).

Les résultats de ce recensement ont montré de manière évidente que nombre des lichens et leur taux de recouvrement sont étroitement liés au degré de la pollution atmosphérique. Les stations qui sont à proximité des grands axes routiers ont donné une faible valeur du LDV et donc une pollution atmosphérique très importante due essentiellement à la grande densité des trafics routiers dans ces stations.

La croissance de la circulation automobile diminue le couvert lichénique et mène vers sa disparition. Ainsi, les industries par leur dégagement de fumées et des particules fines sous forme de poussières, jouent un rôle très important dans cette disparition même dans la périphérie de la ville. Ainsi nous confirmons le rôle de la pollution automobile comme cause principale de la pollution dans les agglomérations.

Alors que plus on s'éloigne des zones polluées et de la circulation, plus la répartition des lichens est importante, par exemple les sites (A8, A7, A4, B4, B5, B6, C4, C6) le Degré de pollution dans ces zones est moyenne et par fois assez fort.

La ville d'Annaba et vu son emplacement comme ville côtière et être la plus industrialisée dans l'extrême Est de l'Algérie, est exposée à plusieurs types de pollution. Du point de vue pratique, nous avons réalisé une carte de la pollution atmosphérique globale de cette ville en utilisant la méthode de LDV. Cette carte peut donc répondre aux questions concernant le problème de pollution atmosphérique dans cette ville, et constitue certainement un outil d'aide pour les études épidémiologiques concernant l'impact de la pollution sur la santé publique (AIT HAMMOU, 2015).

Ensuite, Les lichens dépendent donc fortement de la qualité de l'air et sont généralement très sensibles à la pollution atmosphérique, notamment au dioxyde de soufre. De manière générale, plus l'air est pollué, moins grande est la variété d'espèces. La présence d'une grande variété de flore lichénique et son abondance témoignent généralement d'une bonne qualité de l'air (croissance plus ou moins rapide...). En outre, la sensibilité des lichens à la pollution

varie selon les espèces : certaines espèces souffrent de la présence de certains polluants (dioxyde de soufre, ammoniac...) tandis que d'autres résistent, par exemple, à la pollution par les oxydes d'azote (espèces nitrophiles, souvent de couleur grise ou orangée vive). En tant que bioindicateurs, les lichens présentent également l'avantage d'avoir une croissance continue, une grande longévité et d'être observables toute l'année et pratiquement partout (**Rahali, 2003**).

Enfin, nous pouvons souligner l'intérêt fondamental de ce travail avec un inventaire de la flore lichénique, et son intérêt pratique avec la cartographie de la pollution. En perspectives à cette étude on peut envisager d'une part d'utiliser ces résultats dans le cadre d'une cartographie à grande échelle (l'agglomération d'Annaba) et d'une autre part de considérer ces cartes comme référence à un travail de suivi de l'évolution de la flore lichénique et de différents niveaux de pollution pour les années à venir (**Déruelle, 1983**)

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

- Amer A. (2014).** Encyclopédie naturelle. Les lichens des Environs de Amman. Ed. Amman. 142P.
- Agnes F. (2004).** Observation biologique des lichens, Ed: Moissac. France, 172 P.
- Asta J., Letrouit M. A (1994).** Thallusmorphogenesis in some lichens. *Cryptogamic Botany*. 4 : 274-2.
- Agnan Y. (2013).** Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France : sources, mécanismes et facteurs d'influence. Doctorat de l'université de Toulouse. INP Toulouse. 306 P.
- Adrien L. (2019).** La pollution de l'air tue davantage que le tabac. *Les Échos*. 13 :178-183.
- APS (2019).** La pollution Atmosphérique en Algérie. Ed: Alger. 1- 22P.  
<https://doi.org/10.4267/climatologie.1367>
- AEE (2019).** L'impact de la pollution atmosphérique sur la santé. *Lichens and Lung cancer*. *Nature*. 387: 463-464.
- ADEME (2020).** Determination of metallic pollutants in atmospheric particles, wet deposition and epiphytic lichens in the Pyrenees mountains. 107 :1341-1344.
- Ahmad A. (2016).** Chimie de l'environnement. *Bulletin de la Société Botanique de France*. 54 : 442- 446. 173p.
- Asta J. (1980).** Les lichens et la pollution atmosphérique. *Bull. Ecol.* n°92. p 87-128.
- Agnello G., Catinon M., Ayrault S., Boudouma O., Asta J., Reynaud S., Tissut M. (2014).** Suivi de l'évolution de la pollution atmosphérique cumulée d'un secteur de la vallée du Rhône. *International Workshop. Air quality biomonitoring using plants and fungi*. Lille Nouveau Siècle Octobre. n°13. p14-23.
- Asta J., Erhardt W., Ferretti M., Forasier F., Kirschbaum U., Nimis P.L., Purvis W., Pirintsos S. (2002).** Mapping Lichen diversity as an indicator of environmental quality. *Monitoring with lichens-Monitoring lichens*. Kluwer. p 273-279.

**ANPA (2001).** Manuale IBL (Indice di Biodiversità à Lichenica).

[http://sira.arpat.toscana.it/sira/documenti/manuale\\_ibl](http://sira.arpat.toscana.it/sira/documenti/manuale_ibl) .Consulté le 06 May 2018

**AFNOR (2014).** Air ambiant – Biosurveillance à l’aide de lichens – Evaluation de la diversité delichensépiphytes. NF EN16413.

**Akka S., Azzi A. (2013).** Biosurveillance de la pollution atmosphérique par les lichens au niveau dujardind’essai duHamma : casdujardinanglais.Mémoiredemaster enécologieet enivrement USTHB. 48p.

**Ait Hammou M., Hadjadj Aoul S., Miara M.D., Zerrouki D. (2011).** Aspects taxonomiques des lichens du pin d’Alep (*Pinushalepensis*) et de cypres (*Cupressus sempervirens*) de la forêt de Guezoul (Tiaret, Algérie). *Revue Ecologie-Environnement*. 7-1- 14.

**Bartram J., Joseph A., Exner M., Fricker C. (2003).** Heterotrophic plate counts and drinking-water safety : The significance of HPCs for water quality and humanhealth. London. IWA Publishing (*WHO Emerging Issues in Water and InfectiousDiseaseSeries*).

**Battal P., Aslan A., Cakici A. (2004).** Effect of air pollutant sulfurdioxide on phytohormone levels in some lichens. *Fres. Environ. Bull.* n°13(5) : 436-440.

**Butterworth F., Gunatilaka A., Gonsebat T. (2000).** Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change. Vol. 2. 508 p.

**Bentouati A., Bariteau M. (2015).** Réflexion sur le dépérissement du cèdre de l’Atlas dans les Aurès (Algérie). *Forêt méditerranéenne*. Vol. XXVII : 317- 22.

**Bargagli R. (1998).** Traceelements in terrestrial plants. An ecophysiologicalapproch to biomonitoring and biorecovery. Springer. Berlin. p 180-206.

**Bargagli R., Gasparo D., Lazzarin A., Olivieri S., Tretiach M. (1991).** Lichens as indicators and monitors of atmospheric pollutants in N E. Italy : 40. Preliminary data on the integrated testing system. *Botanika Chronika*. 10 : 977 - 982.

**Bedeneau M. (1980).** Evolution des caractères morphologiques, anatomiques et biochimiques de quelques lichens subsistant en milieu forestier pollué. Thèse de doctorat. Université Orléans. 120 p.

**Becquey J. (1997).** Les noyers à bois. Collection "Les guides du sylviculteur". Institut pour le Développement Forestier. Paris. 144 p.

**Catesson A-M. Robert D. (2000).** Biologie végétale. Volume 2. Organisation végétative. Ed : Doin. 359 p.

**Clauzade G., Roux C. (1985).** Likenoj de Okcidenta Eŭropo. Ilustritadeterminlibro. Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest. 7 (Ed) BCO St-Sulpice-de-Royan. 893 p.

**CEREA (2018).** Laboratoire d'environnement atmosphérique. Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique.

**CITEPA (2015).** Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues Format SECTEN. 322 p.

**Cuny D. (2012).** La biosurveillance végétale et fongique de la pollution atmosphérique : concepts et applications. *Annales Pharmaceutiques Françaises*. N°70 :182—187.

**Clerc P., Roh P. (1980).** Les lichens, indicateurs biologiques de la pollution atmosphériques autour de la fabrique d'Aluminium de Martigny (Valais, Suisse). *Soc. Bot. Genève*, N°11 : 107-139.

**Cuny D., Van Haluwyn C., Davranche L. (2003).** Intégration de la bioindication de la qualité globale de l'air à l'aide des lichens épiphytes dans l'étude « Sentinelles de l'air ». Application au littoral dunkerquois et à l'agglomération lilloise. APPA Nord-pas-de-Calais. Faculté de Pharmacie de Lille. p59.

**Conti M.E., Cecchetti G. (2001).** Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment. *Environ. Pollut.* 114: 471-492.

**Chermat S. (2019).** Étude des lichens saxicoles de la steppe semi-aride de Djebel Zdim (Nord-Est de l'Algérie). Mémoire Magister. Univ setif,-Algérie. 38p.

**Debot L. (1999).** Arbres et arbrisseaux de Belgique et du nord de la France. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique. 269 p.

**Dreal (2017).** Auvergne-Rhône-Alpes. Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement.

**Despina G., Elias G., Andrea P., Jos L. (2018).** Estimating health and economic benefits of reductions in air pollution from agriculture. *Science of The Total Environment*. 99: 622-623.

**Deruelle S. (1983).** Ecologie des lichens du bassin parisien. Impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO<sub>2</sub>, Pb) et relation avec les facteurs climatiques. Thèse de Doctorat. Etat Sciences Nat. Univ. Paris. Vol 4. 360p.

**Deruelle S., Lallemand R. (1979).** Les lichens témoins de la pollution. Ed-Vuibert. Paris. 108P.

**Deruelle S. (2015).** Etude comparée de la sensibilité de trois méthodes d'estimation de la pollution atmosphérique, en utilisant les lichens comme indicateurs biologiques dans la région. 2: 81-112

**Déruelle S., Lallamant R. (1983).** Les lichens témoin de la pollution. Ed-Vuibert. Paris.108 P.

**Deruelle S. (1978).** Étude comparée de la sensibilité de trois méthodes d'estimation de la pollution atmosphérique, en utilisant les lichens comme indicateurs biologiques, dans la région de Nantes (Yvelines). *Rev. Bryol. Lichénol.* 44:429-441.

**Djellil S. (1989).** Etude de la flore lichenique du massif forestier d'Akfadou et Béni Ghobri. Mémoire de magister I.N.E.S. de Biologie. Université de TiziOuzou-Algérie. 108p.

**Emmanuel S., Diederich P., Lambion J. (2004).** Les macrolichens de Belgique du Luxembourg et du nord de la France. Clés de détermination. Musée national d'histoire naturelle. Luxembourg (Ed). 192 p.

**Estrada G, Soler-Tovar D (2014).** Les oiseaux comme bioindicateurs de la contamination par les métaux lourds dans les zones humides. *Ornithologie colombienne*.14p.

**Frey E. (1970).** Les lichens. Ed. (Ecologie des lichens), Payot Lausanne, Berne, 64 p.

**Emanuel P. (2009).** État d'art de l'étude de pollution atmosphérique. 33 : 130, p202- 210.

**Flagey C (1896).** Mise à jour de l'inventaire des lichens d'Algérie, *Revue Ecologie-Environnement* .10 : 1112-5888 ,139 p.

**Ferretti M, Udisfi R, Barbolani E (2009).** mineral nutrients and trace metals in tree rings of *Pinus* sp. *J. Anal. Chem.* n°347 : 467-70.

**Gaveriaux J.P .(1999).** Les lichens et la bioindication de la qualité de l'air. Presses du Centre régional de documentation pédagogique de l'Académie d'Amiens. 58 p.

**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.

**Gérard D .(2014).** L'encyclopédie des Plantes bio-indicatrices : Guide de diagnostic des sols Volumes 1, 2 et 3, Editions Promonature, (ISBN 978-2-9519258-7-8)

**Gil Y, Sinfort, C .(2005).** Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review ; *Atmospheric Environment*, Volume 39, Issue 28 : 5183-5193

**Garrec J.P, Van Haluwyn C .(2014).** Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications. Éditions Tec& Doc, Lavoisier, Paris .118 p

**Geuzzoul F.Z .(2002).** L'accumulation du plomb par une espèce lichénique (*Ramalinafarinacea*) et deux espèces de mousses (*Leucoconsciuroiudes* et *Brachytuciumvelutinum*). Thèse d'ingénieur d'état en écologie et environnement. Option : pathologies des écosystèmes. Université d'Annaba, 49p.

**Gaci B .(2014).** « Evaluation De la toxicité des polluants atmosphérique sue les lichens « *Xanthoriaparietina* », Mémoire de master Université de Boumerdès.42 : 463-464

**Gavériaux J.P .(1995).** Les lichens et la bioindication de la qualité de l'air - Guide technique à l'usage des professeurs des collèges et lycées, p52

**Gombert S ,Asta J, Seaward M.( 2004).** Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Science of the Total Environment*, 324 : 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.036>

**Gombert S ,Asta J .(2006).** Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France) .Seaward M.R.D. *Ecological indicators*.6 : 429-443.

**Hock M ,Tina M, Julie R .(2012).** Fungal Associations, *Springer Science*, 2012 (ISBN 978-3-662-07334-6), 318 p.

**Henry L .(2008).** professeur honoraire à la faculté des sciences de Rennes. Encyclopædia Universalis <https://www.universalis.fr/encyclopedie/lichens/>.60 :781-788.

**Henssen A .( 1963) .** Use of the aquatic lichen *Dermatocarpon luridum* as bioindicator of copper pollution: Accumulation and cellular distribution tests. *Environ. Pollut.* 3 : 455-461. <https://www.futura-science.com/plante/environnement-lichens-1900/>

**Hunsaker C.,T .(1993).** New concepts in environmental monitoring: the question of indicators. *The science of total environment*. Supplement : 77-95.

**Hess G, Bartel R, Leidner A, Rosenfeld K.M, Rubino M.J, Snider S.B, Ricketts H. (2006).** Effectiveness of Biodiversity Indicators Varies with Extent, Grain, and Region. *Biological Conservation*, n°132 : 448-457.

**Kappen L. (1993).** Plant activity under snow and ice, with particular reference to lichens. *Artic*, v. 46, n° 4 : 297-302.

**Hasnaoui-Tlili N .(2000).** Influence de la pollution atmosphérique globale sur certains caractères du pollen des arbres fruitiers de la famille des Rosacées dans la région d'Annaba, Mémoire de Magister, Univ. Annaba, 97p.

**Hawksworth D.L, Rose, F .(1970) .** Qualitative scale for estimation sulphur dioxide air pollution in Great Britain and Wales using epiphytic lichens. *Nature*, n°227 : 145-148.

**Honegger R .(1986) .** Ultra structural studies in lichens. I. Haustorial types and their frequencies in a range of lichens with the surface physiology of lichen with particular reference to carbohydrate transfer between symbionts. *Univ. Madrid* : 24-55.

**Jos L, Klaus K, Andrea P, Ulrich P, Mohammed F, Andreas D, Thomas M. ( 2019).** Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal* page 40- 20

**Joël C. (2020).** Pollution atmosphérique : quels sont les risques ? Publié le 27 juin 2020

**Khalil K. (2000).** Utilisation de bioindicateurs végétaux (Lichens et tabac) dans la détection de la pollution atmosphérique de la région lyonnaise. Thèse Université Grenoble. 284 p.

**Kirschbaum U, Wirth V .(1997 ).** Les lichens bioindicateur , les reconnaître, évaluer la qualité de l'air. EdUlmer, Paris, 128 p.

**Khedim R .(2014).** Étude de l'influence des facteurs du milieu sur la croissance et la production du liège de la suberaie du Parc national de Theniet El Had (Tissemsilt, Algérie). Vol. 342 (2019) .

**Kirschbaum U ,Wirth V .(1997).** Les lichens bio-indicateurs. Les reconnaître, évaluer la qualité de l'air. Paris : Eugen Ulmer. Class. Oxford 172.9 :425.

**Kauppi M .(1983).** Rôle of lichen as air pollution monitors. *Mem. Soc. Fauna. Fenn.*, 59 : 83-86.

**Levrel H .(2007).** *Quels indicateurs pour la gestion de la biodiversité [archive] ; Institut français de la biodiversité*. 99 p.

**Lallemant R, Joslain H, Houssay I, Cyprien A.,L .(1996).** The use of lichens for estimating ammonia air pollution in Western France. Université de Nantes, Nantes.

**Le Blanc S ,Sloover J .(1970).** Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian Journal of Botany*. n° 48 : 1485-1496.

**Laetitia V. (2016).** « La pollution de l'air est responsable de 9 % de la mortalité en France » sur *Le Monde*.

**Leblanc F, De Sloover J .(1970).** Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.*, n°48 : 1485-1496.

**Leblanc F, Rao D .(1973).** Evaluation of the pollution and drought hypotheses in relation to lichens and bryophytes in urban environments. *Bryologist*, n°76 : 1 – 19

**Lasota-Christ R , Turk R .(1984).** ANALYSES TAXONOMIQUE et ECOLOGIQUE des LICHENS de la REGION de TIARET p122-131

**LOPPIS S .(2004).** Mapping the effects of air pollution, nitrogen deposition, agriculture and dust by the diversity of epiphytic lichens in central Italy. Lichens in a changing pollution environment. *Engl. Nat. Res. Rep.*, 525: 37-41.

**Loppi S, Frati L, Paoli V, Bigagli, C, Rossetti C, Bruscoli , Corsini .(2004).** Biodiversity of epiphytic lichens and heavy metal contents of *Flavoparmelia caperata* thalli as indicators of temporal variations of air pollution in the town of Montecatini Terme (central Italy). *Science of the Total Environment*, 326 : 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.12.003>

- Markert B, Breure A, Zechmeister, H. G .(2003).** Bioindicators and biomonitors. Elsevier.
- Mejias E, Olivares L, Salas F ,Montenegro G .(2009).** Miel de abejas: un bioindicador natural de contaminación ambiental. Revista Agronomía y Forestal FAIF-PUC.n°37, p10-13.
- MEDDE (2018), Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Energie
- Maatoug M, Medkour K, Ait Hammou ,Hellal B .(2010).** Cartographie de la pollution atmosphérique par le plomb d'origine routière à l'aide de transplantation d'un lichen bio-accumulateur *Xanthoria parietina* dans la ville de Tiaret (Algérie). Pollution atmosphérique n°205 : 93-101.
- MTE, 2017.** Le ministère de la Transition écologique publie une étude évaluant l'impact carbone des mesures prises depuis 2017
- Matos P. J, Vieira B, Rocha C, Branquinho P. (2019).** Modeling the provision of air-quality regulation ecosystem service provided by urban spaces using lichens as ecological indicators. *Science of the Total Environment*, 665 : 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.023>.
- Madany I M, Ali S.M., Akhter M.S. 1990.** Assessment of lead in roadside vegetation in Bahrain. *Environment International* (16): 123- 126
- Nylander W .( 1866.).** Les lichens du Jardin du Luxembourg. Bulletin de la Société botanique de France, n°13 : 364-372
- Nelson, Gil .(1996).** "*Méliacées - Famille de l'acajou*". Les arbustes et les vignes boisées de Floride - Une référence et un guide de terrain . Pineapple Press Inc. p. 213.
- Ozenda P .(2000) .** Les végétaux. Organisation et diversité biologique. Éd. Dunod, Paris. 512 p.
- Ozenda P, Clauzade G .(1970).** Les lichens. Etude biologique et flore illustrée. Masson, Paris, 801 p.
- Ochoa E .(2014).** Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados. *CES Salud Pública*, n°5(1) : 59-69 .

**ONEMA (2013).** Bioindication : des outils pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques Perspectives en vue du 2e cycle DCE – Eaux de surface continentales, Synthèse des journées « DCE et bioindication » du séminaire « Méthodes d'évaluation de l'état des eaux – Situation et perspectives dans le contexte de la directive cadre sur l'eau », Paris 19 et 20 avril 2011, complétée des réflexions du groupe de travail DCE-ESC durant l'année 2012.

Paoletti M.G.(1999), Using bioindicators based on biodiversity to assess landscapes sustainability. *Agric Ecosyst Environ.* n°74 : 1–18. [doi: 10.1016/S0167-8809\(99\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00027-4).

**OMPE** (Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement) est une ONG française fondée en 2013 par Gilles Lazzarini, homme d'affaires et écologiste français.

**Pierre M .(2009).** Pollution intérieure, UFC-Que Choisir dénonce la passivité des pouvoirs publics 27/08/2009 10:24 (Par Pierre MELQUIOT) page 45-46.

**Pinho P., Augusto S., Máguas C., Pereira M.J., Soares A, Branquinho C. (2008).** Impact of neighbourhood land-cover in epiphytic lichen diversity : Analysis of multiple factors working at different spatial scales. *Environmental Pollution*, volume 151 : 414-422

**Rose D ,Hawksworth L .(1981).** Lichen recolonization in London's cleaner air. P 289-292.

**Roux C .(1984).** Premier aperçu de la flore et de la végétation lichéniques de la moyenne et haute vallée du Var. *Bull. Soc. linn. Prov*, 35 : 75-93.

**Roux C .(1987).** Principales substances lichéniques de quelques taxons décrits par Roux en collaboration avec d'autres auteurs). *Bull. Soc. linn. Prov.*, 38 : 269-275

**Romano L .(2016).** Bioindicadores de Contaminación Acuática en Peces Centro de Biopatología Acuática Universidad Bar- Ilan Tte. Gral J.D. Peron 2933 (1198), Buenos Aires (Argentina) Localización: AquaTIC: revista electrónica de acuicultura, ISSN-e 1578-4541, N°. 7, 1999, págs. 1-2

**Rainio J , Niemelä J .(2003).** *Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators.* *Biodiversity & Conservation*, Vol 12(3) : 487-506.

**Ramade F. (1982).** Précis d'écotoxicologie. Masson Eds. Paris, 300p.

**Ramade F.(2002).** Livre ELEMENTS D'ÉCOLOGIE - ÉCOLOGIE APPLIQUÉE Edité par DUNOD. PARIS – 2005 , Date de publication : 20050501

**Rusu A , Jones P Chimonides , Purvis L .(2006).** Biomonitoring using the lichen *Hypogymniaphysodes* and bark samples near Zlatna, Romania immediately following closure of a copper ore-processing plant. *Environmental Pollution*, 143 : 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.002>.

**Roux C .(2012).** Liste des lichens et champignons lichénicoles de France – Liste de la likenojkajnelikenigintajfungoj de Francio. *Bull. Soc. linn. Prov*, n° spécial 16, 220 p.

**Rebbas, K., Boutabia L., Touazi, Y., Gharzouli, R., Djellouli, Y, Alatou D. (2011).** Inventaire des lichens du parc national de Gouraya (Béjaïa, Algérie). *Phytothérapie*, 9, 4 : 225-233.

**Souchon C .(1971).** Les Lichens .(Collection Que-sais-je), Presses Universitaires de France éd. Paris VI, 194p.

**Serusiaux E., Diederich P et Lambinon J .(2004).** Les macrolichens de Belgique, du Luxembourg et du Nord de la France : Clés de détermination. Luxembourg : Travaux scientifiques de Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg. 192 p.

**Showman R .(1988).** Mapping air quality with lichens, the North American experience. Dans: Nash, T.H., III et V. Wirth (édit.). *Lichens, bryophytes and air quality*. Cramer, Berlin p. 67-89.

**TROTET G .(1968).** Précis de lichénologie Collection « faunes et flores actuelles » Boubée et Cie éd .paris VI, 194p.

**Trevor G., Bruce M.C., DEL M .(1994).** The Lichens of British Columbia (part1) British Columbia Ministry of Forest Research Program, 144 p.

**Tievant P .(2001).** Guide des lichens. 350 espèces de lichens d'Europe. Delachaux et Niestlé, 304 p.

**Thakur R.,K, Jindal R, Singh U.B, Ahluwalia B .(2013).** Plankton diversity and water quality assessment of three freshwater lakes of Mandi (Himachal Pradesh, India) with special reference to planktonic indicators. *Environ Monit Assess.* n°185(10) : 8355–8373. [doi: 10.1007/s10661-013-3178-3](https://doi.org/10.1007/s10661-013-3178-3)

**Tiévant P .(2001).** Guide des lichens (350 espèces). 304 p. Editeur : Delachaux Et Niestlé Collection : Les guides du naturaliste Date parution : 04/2001

**Takaoki T , Mitani K .(1986).** A new fumigation method for measuring the effects of sulphurdioxide on photosynthesis of bryophytes and lichens, *Lindbergia*, p60-66

**Treshow M. , Bell, J. N. B.(2002.).** Air pollution and plant life. Ed. John Wiley& Sons. Chichester, 2nd Ed, England. 467 p.

**Thormann M .(2006).** La diversité et le rôle des champignons dans les tourbières vus sous l'angle du cycle du carbone. *The forestrychronicle. Can. J. SoilSci* 86 : 281–293

**Van Haluwyn C, Asta J .(2012).** epifytische korstmossen en de eropvoorkomen de lichenicolefungi van het Brussels HoofdstedelijkGewest. Onderzoek in opdracht van Leefmilieu Brussel – BIM. Jardin botanique national de Belgique, 165 p

**Van Haluwyn C .(1974).** Contribution à l'étude des lichens épiphytes dans le nord de France application au problème de la pollution atmosphérique. Thèse de doctorat en pharmacie, Université de Lille, 176 p.

**Van Haluwyn C, Asta J .(2009).** Guide des lichens de France. Lichens des arbres. Edition Belin. 239 p.

**Van Haluwyn C, Lerond M .(1993).** Guide des lichens. Lechevalier, 376 p.

**Van Haluwyn C. (1994).** Niveaux de la qualité de l'air sur le littoral Calais-Dunkerque ; évaluation en fonction de la diversité lichénique, Rapport SPPPI du Littoral. p57-74.

**Van Haluwyn C ,Lerond M .(1986).** les Lichens etla qualité de l'air .Évolution méthodologique etlimites.Rapport final, Ministèredel'environnement .EdSRETI ,Paris.213p.

**Wirth V .(1995) .** Flechtenflora, VerlagUlmer. 580 p.

**Walsh G.,E .(1978).**Toxiceffects of pollutants on plankton. In: Butler GC, editor. Principles of ecotoxicology. New York (NY): Wiley. Chapter.n°12 : 257–274.

**WHO .(2002) .***Vibrio cholerae*. In: *Guidelines for drinking-water quality*, 2nd ed. *Addendum: Microbiological agents in drinking water*. Geneva, World Health Organization, pp. 119–142.

**Wirth H .(2010).** Ökologische Zeigerwerte von Flechtenerweiterte und aktualisierte Fassung- *Scripta Geobotanica* 18: 215–237

**WIRTH, V. (1995).** Flechtenflora. Bestimmung und ökologische Kennzeichnung der Flechten Südwest-deutschlands und angrenzender Gebiete. 661 S. 2. Aufl. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1995

**Yatawara M , Dayananda N .(2019.).** Use of corticolous lichens for the assessment of ambient air quality along rural-urban ecosystems of tropics: a study in Sri Lanka. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 :179. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7334-2>.

**Zannatul F, Muktadir A. (2009).** A review: potentiality of zooplankton as bioindicator. *Am J Appl Sci.* n°6(10) : 1815–1819. [doi: 10.3844/ajassp.2009.1815.1819](https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.1815.1819)