CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG À L'AIDE DE BIOINDICATEURS

PAR

PAUL DIEDERICH

1. INTRODUCTION

Depuis la révolution industrielle la pollution de notre environnement, et en particulier la pollution atmosphérique, a augmenté régulièrement.

Ce n'est que depuis quelques décennies que les hommes ont commencé à s'intéresser véritablement à ce problème, et ils ont reconnu que de sérieux dangers menaçaient leur santé. C'est pourquoi de grandes campagnes ont été lancées pour lutter contre la pollution atmosphérique, et actuellement les premiers résultats se font déjà remarquer.

Dans une première étape il faut détecter les pollutions et en chercher leurs sources, puis on essaye de les réduire dans la mesure du possible.

Au Grand-Duché de Luxembourg on mesure depuis 1972 le dioxyde de soufre (SO_2) et la fumée noire sur un réseau de 12 stations semi-automatiques. Ces stations se répartissent sur les villes de Luxembourg, Esch-sur-Alzette, Dudelange, Differdange, Pétange, Rodange, Steinfort, Diekirch et Grevenmacher. On connaît ainsi très bien l'état de pollution de nos plus grandes agglomérations, mais on ignore cependant l'influence des émissions du bassin minier ou de la ville de Luxembourg sur les campagnes. Comme les installations de mesure sont très coûteuses, il devient presque impossible d'élargir le réseau pour connaître la pollution atmosphérique dans tout notre pays.

Depuis quelques dizaines d'années, les écologistes ont eu l'idée de cartographier la pollution de l'air à l'aide de bioindicateurs.

---

* 93, route de Luxembourg, Lorentzweiler, G.-D. de Luxembourg.

On connaît en effet depuis longtemps les effets néfastes de la pollution atmosphérique sur les lichens épiphytiques : Dès que l'on se rapproche du centre d'une ville, le nombre d'espèces de lichens, mais également leur abondance et leur fertilité, diminue rapidement. Ceci est dû d'une part à des substances toxiques contenues dans l'atmosphère (p. ex. SO_2, HF, O_3, etc.), d'autre part à la sécheresse de l'air qui existe dans les villes (DOMRÖS, 1967).

Ces observations ont conduit déjà plusieurs auteurs à distinguer dans les grandes villes entre un désert lichénique dépourvu de tout lichen, une à trois zones de combat, où les premiers lichens apparaissent, et la zone périphérique de la ville, qui montre une végétation lichénique normale (DOMRÖS, 1966; MÄGDEFRAU, 1960).

En même temps on a essayé de déterminer le degré de sensibilité de chaque espèce, et on a trouvé que les lichens les plus sensibles à l'air urbaine sont les espèces fruticuleuses, tandis que certaines espèces de forme crustacée ou lépreuse sont très tolérantes à l'égard des polluants.

La tentative de cartographier la pollution atmosphérique sur de grandes surfaces à l'aide de lichens épiphytiques est cependant une idée toute récente. Plusieurs essais ont déjà été faits dans diverses régions : Angleterre (GILBERT, 1965; HAWKSWORTH et ROSE, 1970), le nord de la France (DELZENNE-VAN HALUWYN, 1973), les environs de Gand (INSERENTANT et MARGOT, 1963), Limbourg (Belgique) (BARKMAN, 1963). Certains auteurs ont utilisé avec succès d'autres bioindicateurs tels que les bryophytes (TAODA, 1972; DÜLL, 1974),les algues ou les champignons épiphytiques. Parfois même des plantes vasculaires ont donné d'excellents renseignements sur les polluants de l'air.

Plusieurs méthodes ont été exposées pour étudier les relations entre la pollution atmosphérique et la végétation épiphytique (DÜLL, 1974; DE SLOOVER, 1964, 1967 et 1971; DE SLOOVER et LEBLANC, 1970; LEBLANC et DE SLOOVER, 1970), mais aucune ne semble parfaite.

Dans ce travail je vais essayer de cartographier la pollution atmosphérique dans la partie sud du Grand-Duché de Luxembourg (Bon-Pays) à l'aide de lichens en utilisant des méthodes semblables à celles données par DÜLL (1974) et DE SLOOVER (1964, 1967, 1971) et de préciser par des méthodes partiellement nouvelles la préférence spécifique des lichens à l'égard des différentes zones de pollution.

2. MÉTHODES UTILISÉES POUR CARTOGRAPHIER LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Les premières méthodes utilisées pour cartographier la pollution de l'air étaient les suivantes : 1° On notait le recouvrement de la végétation épiphytique en chaque station (DOMRÖS, 1966), 2° On comptait en chaque localité le nombre d'espèces de lichens ou de bryophytes présents (BARKMAN, 1963); HAWKSWORTH, ROSE et COPPINS, 1973).

La première méthode est cependant désavantageuse parce que certains lichens crustacés (surtout *Lecanora conyzaeoides*) sont mieux développés dans les villes, où elles n'ont pas à supporter la concurrence d'autres espèces. De plus le degré de recouvrement dépend considérablement de l'âge et du diamètre du phorophyte (= arbre portant des épiphytes) (MARGOT, 1965).

La deuxième méthode fournit déjà de meilleurs résultats, mais elle ne nous renseigne ni sur l'abondance, ni sur le degré de sensibilité de chaque espèce.

D'autres auteurs ont fait des cartes de répartition de certaines espèces autour des sources de pollution et ont ainsi pu délimiter plusieurs zones de pollution atmosphérique (SKYE, 1968; GILBERT, 1970; ROSE, 1973; MORGAN-HUWS et HAYNE, 1973; HAWKSWORTH, ROSE et COPPINS, 1973; DELZENNE - VAN HALUWYN, 1973).

Une dernière méthode, introduite par DE SLOOVER (1964) consiste à réunir pour chaque station le nombre d'espèces, la sensibilité et l'abondance spécifique en une seule expression : l'indice de pureté atmosphérique (Index of Air Purity : I.A.P.).

Cette expression s'écrit : $\text{I.A.P.} = \frac{n}{100} (\Sigma_1^n Q \times f)$,
où n est le nombre d'espèces,
f la fréquence, et
Q l'indice écologique de chaque espèce.

L'indice écologique (= indice de poléophobie), donné par BARKMAN en 1958, est un chiffre allant de 1 à 12 qui caractérise la sensibilité spécifique de la plupart des algues et lichens épiphytiques de nos régions à la pollution atmosphérique. L'indice écologique 1 désigne l'épiphyte le plus toxitolérant (l'algue *Protococcus viridis)*, tandis que l'indice 12 est réservé aux lichens les plus toxiphobes *(Usnea* div. sp., *Alectoria jubata)*.

En 1967 DE SLOOVER a proposé un nouveau terme, destiné à remplacer l'indice écologique : le cortège moyen spécifique. Il exprime le nombre moyen d'espèces de lichens entourant une espèce dans toutes ses stations et est basé sur l'observation que le nombre de lichens épi-

phytiques par relevé augmente si la pollution de l'air diminue. Comme le cortège moyen spécifique varie souvent considérablement d'une zone climatique à l'autre, il doit être calculé pour chaque région séparément.

L'I.A.P., légèrement modifié par De Sloover et Leblanc (1970) devient donc : I.A.P. $= \frac{1}{10} (\Sigma_1^n Q \times f)$, où Q signifie désormais «cortège moyen spécifique».

La somme $\Sigma_1^n Q \times f$ étant déjà proportionnelle au nombre d'espèces, il n'est plus nécessaire de la multiplier encore une fois par n, comme De Sloover l'a proposé en 1964.

Contrairement il ne faut en aucun cas diviser cette somme par n (méthode employée par Düll, 1974), car alors un nombre élevé d'espèces entraînerait une diminution de l'indice de pureté atmosphérique.

Pour cartographier la pollution, il faut calculer l'I.A.P. sur un nombre assez élevé de stations réparties sur toute la région à étudier, et puis distinguer entre plusieurs zones suivant la valeur de l'I.A.P. En comparant les résultats ainsi obtenus avec des cartes montrant la concentration moyenne de l'air en SO_2, on peut prédire finalement à l'aide de la végétation épiphytique seule les valeurs probables de la concentration en émissions contenues dans l'atmosphère.

3. CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

a) La distribution des lichens

Plusieurs espèces de lichens sont réparties presque uniformément dans une partie du Bon-Pays, tandis qu'elles manquent complètement dans d'autres régions. Comme les variations climatiques ne sont pas importantes d'une région à l'autre et que les stations étudiées sont toutes choisies sous des conditions semblables, on peut supposer que cette distribution inégale soit due au moins partiellement à la pollution atmosphérique.

Parmi les lichens les plus fréquents on peut distinguer entre quatre groupes principaux, dont voici des exemples caractéristiques pour chacun :

– *Physcia dubia* (figure 1) est présent même dans des villes comme Luxembourg, Esch-sur-Alzette, Differdange, Kayl ou Rumelange. On le rencontre très souvent dans le bassin minier ou dans la partie sud-est du Grand-Duché, tandis qu'à une exception près, il manque dans tous mes relevés notés au nord de la Ville de Luxembourg.

Physcia dubia semble être une espèce toxitolérante et peut-être même toxiphile, car elle n'existe pour ainsi dire nullement dans les campagnes.

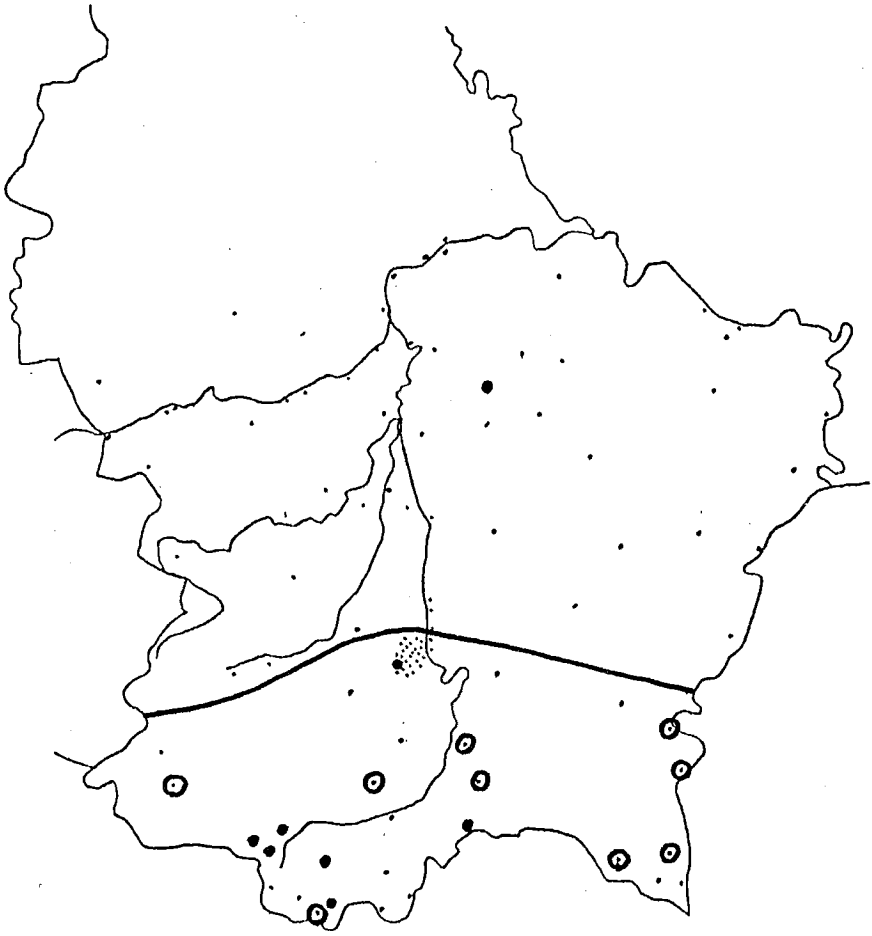


Figure 1 : Distribution de *Physcia dubia*

- absent
- ● recouvrement : 0–25%
- ʘ recouvrement : 25–100%

– *Xanthoria parietina* (figure 2) est très fréquent sur tout le territoire, mais manque cependant dans les villes de Luxembourg, Dudelange, Differdange, Esch-sur-Alzette, Pétange, Kayl et Rumelange).

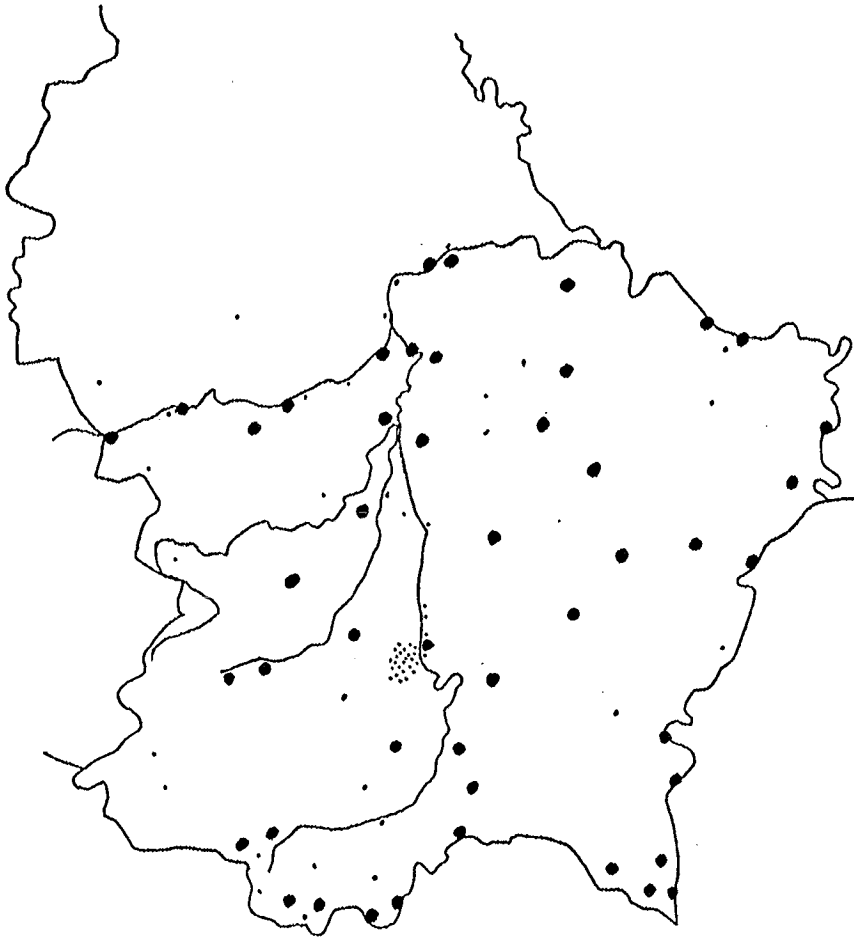


Figure 2 : Distribution de *Xanthoria parietina*
· absent
● présent

– *Evernia prunastri* (figure 3) manque dans le sud-ouest du pays et ne devient abondant et bien-développé que dans le nord-ouest.

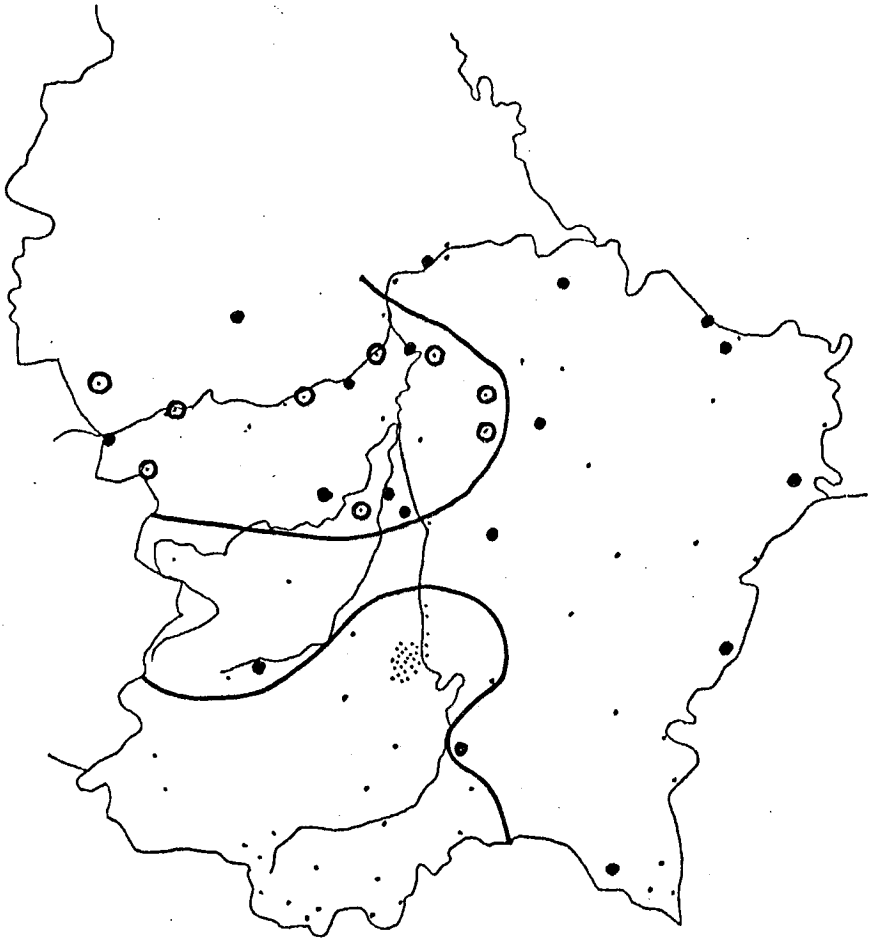


Figure 3 : Distribution de *Evernia prunastri*

· absent
● recouvrement : 0–25%
⊙ recouvrement : 25–100%

– *Anaptychia ciliaris* (figure 4) existe uniquement dans la partie nord du Bon-Pays et fuit toutes les régions urbaines ou industrialisées.

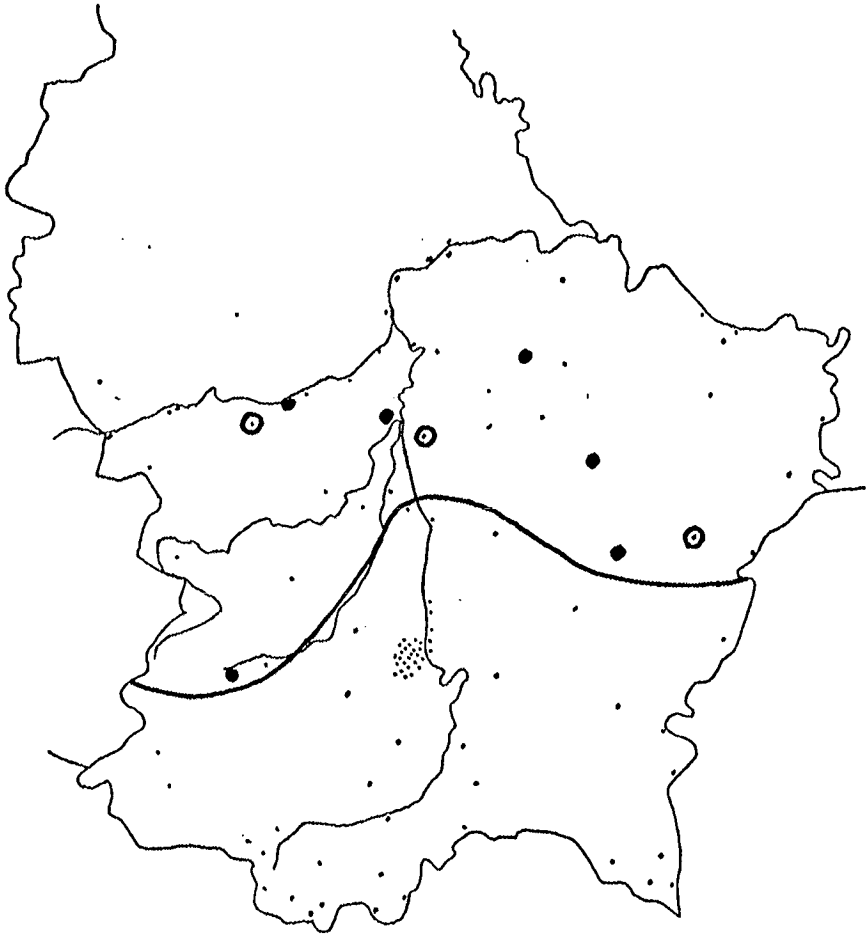


Figure 4 : Distribution de *Anaptychia ciliaris*
· absent
● recouvrement : 0–25%
Θ recouvrement : 25–100%.

b) Le nombre d'espèces de macrolichens par station

La figure 5 montre pour chaque station étudiée le nombre d'espèces de lichens foliacés ou fruticuleux présents.

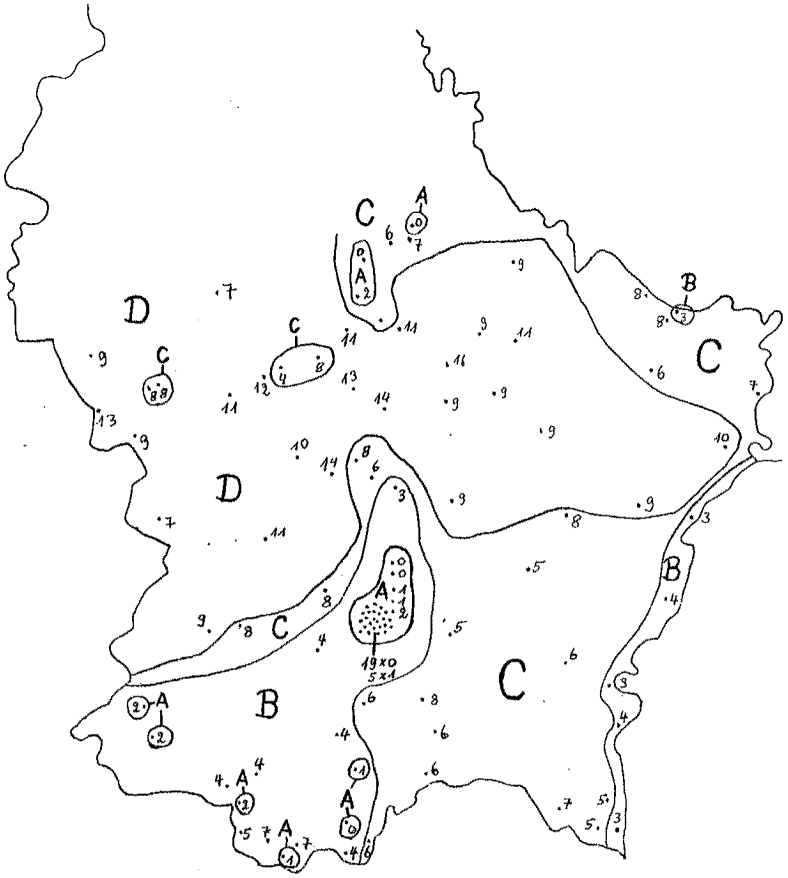


Figure 5 : Nombre d'espèces de macrolichens par station.

Zone A: 0– 2 espèces
Zone B: 3– 4 espèces
Zone C: 5– 8 espèces
Zone D: 9–16 espèces

On peut distinguer selon le nombre d'espèces par relevé entre quatre zones bien distinctes :

— Zone A : 0–2 espèces.
Il s'agit des villes de Luxembourg, Pétange, Differdange, Esch-sur-

Alzette, Dudelange, Rumelange, Bettembourg, Ettelbruck et Diekirch.

— Zone B : 3–4 espèces.
On trouve cette zone dans le bassin minier, dans les vallées de l'Alzette et de la Moselle, ainsi que dans la ville d'Echternach.

— Zone C : 5–8 espèces.
Cette zone est présente dans le sud-est du pays, dans la vallée de la Sûre et à certains endroits de la vallée de l'Attert.

— Zone D : 9–16 espèces.
C'est la zone des régions rurales où l'air est peu pollué. On la trouve dans toute la partie nord du Bon-Pays à l'exception des grandes vallées.

c) L'indice de pureté atmosphérique

J'ai analysé la végétation lichénique sur un réseau de 106 stations réparties dans tout le Bon-Pays. Comme les stations doivent être toutes homologues et présenter un microclimat semblable, j'ai choisi toujours des arbres isolés, sauf dans les villes, où j'ai analysé parfois des arbres se trouvant au bord d'un parc. De plus j'ai pris dans la mesure du possible uniquement des arbres ayant un diamètre de 40 à 50 cm au moins.

Parmi les phorophytes, il y a différentes essences qui ne portent que très rarement des épiphytes (p. ex. *Fagus sylvatica, Platanus hybrida, Picea abies, Pinus* spp.). D'autres essences (p. ex. *Quercus robur)* sont parfois recouvertes d'une végétation lichénique très dense, mais peuvent dans certains cas être dépourvues de tout lichen, sans que la pollution atmosphérique ou le climat ne semblent en être la cause. Certains phorophytes enfin portent le plus souvent des lichens et se prêtent ainsi très bien à l'étude de la pollution atmosphérique : *Fraxinus excelsior, Populus X canadensis, Tilia* spp., *Pyrus communis.*

J'ai noté pour chaque relevé le nombre de phorophytes analysés (au maximum 5) et leur(s) espèce(s). Les abréviations suivantes ont été utilisées :

A : *Acer* spp.
AE : *Aesculus hippocastanum*
F : *Fraxinus excelsior*
FA : *Fagus sylvatica*
M : *Malus domestica*
P : *Populus X canadensis*
PA : *Prunus avium*
PL : *Platanus hybrida*

PY : *Pyrus communis*
Q : *Quercus robur* ou *Q. petraea*
S : *Salix* ssp.
T : *Tilia* ssp.

Parmi les épiphytes présents j'ai noté tous les lichens foliacés et fruticuleux à l'exception des Cladonia qui sont le plus souvent réduits au thalle primaire et sont alors très difficiles à déterminer.

Dans les relevés plus pauvres en macrolichens (les zones 1 et 2 qui seront décrites plus loin), j'ai considéré en outre les lichens crustacés ou lépreux *Lecanora cfr. conyzaeoides* et *Lepraria aeruginosa* et l'algue *Protococcus viridis*.

Pour chaque espèce j'ai noté la fréquence (f) de la manière suivante :

5 recouvrement de 75 à 100% de la surface
4 recouvrement de 50 à 75% de la surface
3 recouvrement de 25 à 50% de la surface
2 recouvrement de 1 à 25% de la surface
1 recouvrement inférieur à 1% de la surface

Puisque la végétation épiphytique n'est généralement bien développé que sur un seul côté du tronc, j'ai noté le recouvrement uniquement sur ce côté-là. De plus j'ai choisi pour chaque lichen l'(les) arbre(s), où ils ont été le mieux développés. Il arrive ainsi souvent que deux ou plusieurs espèces ont un recouvrement supérieur à 50% dans un seul relevé *.

Pour calculer l'I.A.P., j'ai choisi la formule suivante :

I.A.P. = $\sum_1^n Q \times f$, où n est le nombre d'espèces, f la fréquence et Q l'indice écologique donné par BARKMAN (1958). Je n'ai pas employé le cortège moyen spécifique proposé par DE SLOOVER (1967), parce qu'il est difficile de le calculer pour les espèces peu fréquentes.

Selon la valeur de l'I.A.P., j'ai distingué entre les 5 zones de pollution atmosphérique suivantes :

Zone	I.A.P.
1	0–25
2	25–75
3	75–125
4	125–175
5	>175

* Il ne faut pas confondre les relevés de cette étude avec des relevés phytosociologiques qui doivent être faits sur un seul arbre à végétation épiphytique homogène et non pas sur plusieurs arbres, sur lesquels différentes associations peuvent se présenter.

La zone 1 présente les 3 types suivants :

1A Désert lichénique

1B Absence de macrolichens, mais présence de lichens crustacés ou lépreux

1C Présence de macrolichens

La figure 7 montre la répartition des 5 zones au Bon-Pays. On peut faire les observations suivantes :

1) Dans les vallées la végétation épiphytique est souvent mal développée (p. ex. les vallées de la Moselle, de la Sûre ou de l'Alzette). Cette pauvreté en lichens s'accentue si la vallée est plus profonde (p. ex. la vallée de l'Attert entre Bœvange et Bissen). On peut en conclure que l'air y soit plus pollué qu'ailleurs, mais il ne faut cependant pas négliger que d'autres facteurs comme la sécheresse de l'air pourraient jouer un rôle.

2) Les émissions du bassin minier et de la ville de Luxembourg sont si importantes qu'elles sont perceptibles encore sur une distance de 5 à 10 km.

3) Les effets des émissions sont plus importants dans les directions N-NE et S-SW que vers l'est et l'ouest. On note une analogie avec les directions principales des vents de l'hiver (saison où la pollution atmosphérique est la plus prononcée) (figure 6).

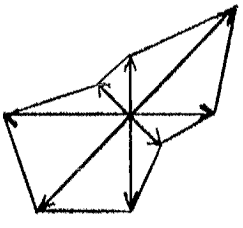


Figure 6 : Fréquences des directions du vent à la station météorologique du Findel. Moyennes des mois d'octobre à mars de la période 1949–1968.
(D'après FABER, 1971)

4) La figure 7 affirme assez bien les résultats obtenus en considérant uniquement le nombre d'espèces par relevé (figure 5).

5) De même les limites de la distribution de *Physcia dubia, Xanthoria parietina, Evernia prunastri* et *Anaptychia ciliaris* (figures 1, 2, 3 et 4) correspondent plus ou moins aux limites des 5 zones de pollution atmosphérique.

Dans la ville de Luxembourg (figure 8) seule la classe 1 est présente. J'ai noté l'absence totale de lichens épiphytiques dans le quartier de la gare, ainsi qu'à une station se trouvant à Belair. A cause de la rareté de vieux arbres dans certains quartiers de la ville, il est guère possible de tracer les limites d'un désert lichénique . La zone 1 B occupe la plus grande partie de la ville (p. ex. Limpertsberg, la vallée de la Pétrusse, la

région périphérique des zones habitées), tandis que la zone 1 C se trouve uniquement dans le parc de la ville de Luxembourg, dans la vallée de l'Alzette (p. ex. Pfaffenthal, Sichenhaff) et à la périphérie de la ville (p. ex. à l'ouest de Hollerich).

On peut supposer que dans les quartiers comprenant beaucoup de verdure (p. ex. Limpertsberg), l'air est moins pollué que dans les quartiers où cette verdure manque. (p. ex. le quartier de la gare).

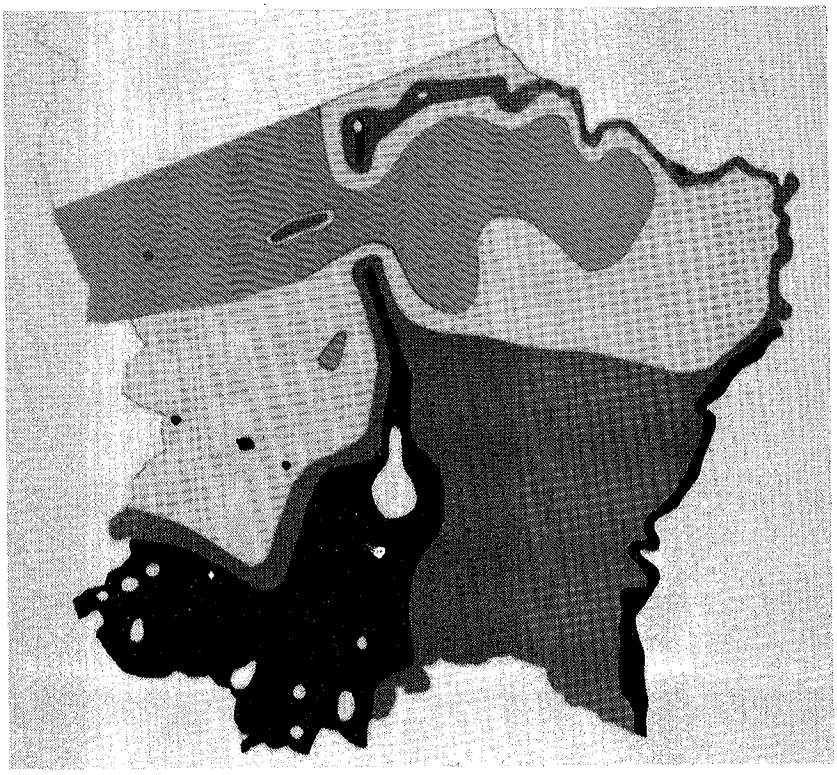


Figure 7 : Répartition des 5 zones de pollution atmosphérique au Bon-Pays

zone 1
zone 2
zone 3
zone 4
zone 5

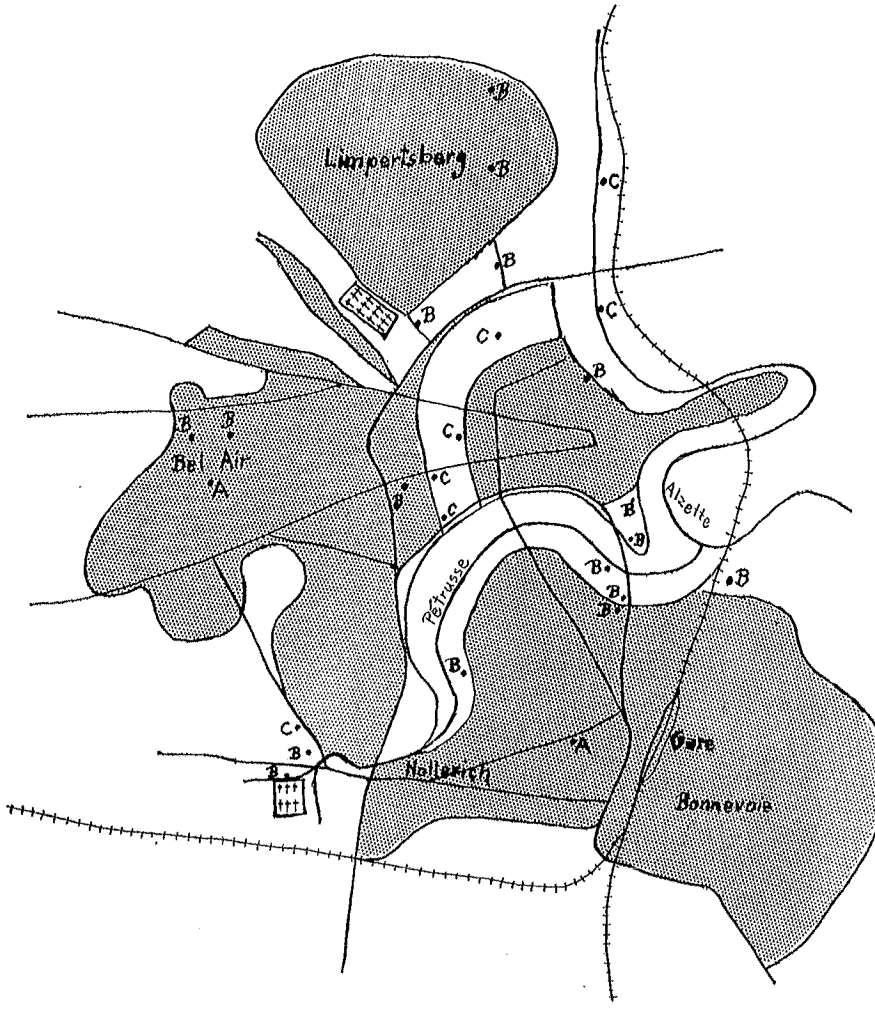


Figure 8 : Répartition des zones 1 A, 1 B et 1 C dans la ville de Luxembourg.

RELEVÉS DES ZONES 1 ET 2 : LÉGENDE

Zone 1 A

71) Luxembourg-Belair : Place de Liège (14. 8. 78)
65) Beggen; bord de l'Alzette près de la station d'épuration (10. 8. 78)
67) Luxembourg; école près de la Place de Strasbourg (14. 8. 78)
59) Diekirch, près du pont (9. 8. 78)

Zone 1 B

61) Ettelbruck, près de l'église (9. 8. 78)
68) Luxembourg-Hollerich : Rue de l'Abattoir (14. 8. 78)
79) Cimetière de Hollerich (14. 8. 78)
17) Dudelange, près de l'église (24. 7. 78)
74) Luxembourg, Boulevard Joseph II (14. 8. 78)
73) Luxembourg, Avenue des Archiducs (14. 8. 78)
46) Luxembourg, près des Archives de l'Etat (7. 8. 78)
99) Luxembourg, Rue de Prague (sous le Viaduc) (21. 8. 78)
72) Luxembourg-Belair, Avenue Gaston Diderich, près de l'église de Belair (14. 8. 78)
98) Luxembourg, Boulevard de la Pétrusse, près du Viaduc (21. 8. 78)
107) Luxembourg, Square Robert Brasseur, près de la Place du Théâtre (21. 8. 78)
35) Dommeldange, rue des Hauts-Fourneaux (2. 8. 78)
45) Luxembourg, parc au nord-est du Viaduc (7. 8. 78)
102) Luxembourg, Avenue Pasteur, bord du Champ de Foire (21. 8. 78)
103) Luxembourg-Limpertsberg, près du Lycée de garçons (21.8. 78)
104) Luxembourg-Limpertsberg, Square Edouard André (21. 8. 78)
105) Luxembourg, Avenue de la Faïencerie, près du Champ de Foire (21. 8. 78)
77) Luxembourg, près du Laboratoire (16. 8. 78)
66) Luxembourg, parc entre la Rue d'Anvers el le Boulevard de la Pétrusse (14. 8. 78)
100) Luxembourg, vallée de la Pétrusse sous le Viaduc (21. 8. 78)

Zone 1 C

21) Esch-sur-Alzette, derrière l'Hôtel de Ville (24. 7. 78)
19) Rumelange, près de l'Ecole (24. 7. 78)
23) Pétange, derrière l'Hôtel de Ville (24. 7. 78)
14) Bettembourg, près de l'église (24. 7. 78)
69) Luxembourg-Hollerich, au nord de l'abattoir (14. 7. 78)
32) Sichenhaff, bord de l'Alzette (près du cimetière) (2. 8. 78)
33) Dommeldange, Raspert, bord de l'Alzette (2. 8. 78)
101) Luxembourg, parc près de l'avenue de la Porte Neuve (21. 8. 78)
75) Luxembourg, partie sud-ouest du Parc Klein (14. 8. 78)
22) Differdange, centre de la ville (24. 7. 78)
76) Luxembourg, partie nord-ouest du Parc Klein (14. 8. 78)
106) Luxembourg, parc entre l'avenue de l'Arsenal et l'avenue Monterey (21. 8. 78)
34) Entre Sichenhaff et Pfaffenthal, bord de l'Alzette (2. 8. 78)

Zone 2

80) Echternach, abbaye (17. 8. 78)
62) Entre Schieren et Colmar (9. 8. 78)
94) Au nord de Stadtbredimus (19. 8. 78)

84) Grevenmacher, arrêt des autobus CFL (17. 8. 78)
24) Esch-sur-Alzette, parc de l'Arbed au nord-ouest de la ville (28. 7. 78)
26) Kayl, près du cimetière (27. 7. 78)
13) Au nord de Abweiler (24. 7. 78)
91) Au nord de Schengen (19. 8. 78)
18) Au nord de Rumelange (24. 7. 78)
27) Au nord de Schifflange (28. 7. 78)
93) Remich, bord de la Moselle (19. 8. 78)
85) Entre Lorentzweiler et Hunsdorf (18. 8. 78)
95) Entre Ahn et Niederdonven (19. 8. 78)
12) Kockelscheuer, bord des étangs (24. 7. 78)
97) Entre Sandweiler et Itzig, près du Stackelter Mouer (19. 8. 78)
15) Au sud de Dudelange (24. 7. 78)
92) Entre Remerschen et Wintrange (19. 8. 78)
41) Entre Bertrange et Leudelange (4. 8. 78)
58) Diekirch, bord de la Sûre (9. 8. 78)
88) Entre Hellange et Frisange (19. 8. 78)
20) Entre Rumelange et Esch-sur-Alzette (24. 7. 78)
25) Au sud d'Esch-sur-Alzette («Ecole de la Forêt») (28. 7. 78)

RELEVÉS DES ZONES 3, 4 ET 5 : LÉGENDE

Zone 3

16) Entre Dudelange et Zouftgen (24. 7. 78)
49) A l'est de Bœvange (9. 8. 78)
60) Entre Diekirch et Ettelbruck (9. 8. 78)
87) Entre Alzingen et Frisange (19. 8. 78)
2) Au sud-est de Niederanven (17. 7. 78)
90) Entre Remerschen et Elvange (19. 8. 78)
86) Au sud de Alzingen (19. 8. 78)
55) Redingen, près de l'église (9. 8. 78)
96) Entre Canach et Trintange (19. 8. 78)
79) Echternach, Route de Luxembourg (17. 8. 78)
89) Entre Emerange et Burmerange (19. 8. 78)
40) Au sud-est de Weilerbach (3. 8. 78)
81) Au sud de Born (17. 8. 78)
48) A l'ouest de Bissen (9. 8. 78)
1) A l'est de Eisenborn-Imbringen (17. 7. 78)
10) Entre Steinfort et Eischen (21. 7. 78)
31) Entre Heffingen et Reuland (31. 7. 78)
44) Au nord de Strassen (4. 8. 78)
3) Au nord de Olingen (17. 7. 78)
6) Schwanenthal, bord de la forêt (14. 7. 78)

Zone 4

78) Au sud de Michelshof (17. 8. 78)
4) Graulinster (17. 7. 78)
57) Entre Grosbous et Buschrodt (9. 8. 78)
43) Holzem (4. 8. 78)

56) A l'est de Redange (9. 8. 78)
7) Entre Prettange et Schœnfels (21. 7. 78)
42) Dahlem (4. 8. 78)
63) Entre Colmar-Berg et Cruchten (9. 8. 78)
30) A l'ouest de Christnach (31. 7. 78)
83) Au sud de Wecker (17. 8. 78)
11) Entre Olm et Nospelt (21. 7. 78)
82) Au nord-ouest de Wasserbillig (17. 8. 78)
38) Entre Larochette et Medernach (3. 8. 78)
9) Entre Hollenfels et Tuntange (21. 7. 78)
52) A l'ouest de Beckerich (9. 8. 78)

Zone 5

50) Entre Bœvange et Useldange (9. 8. 78)
54) Entre Colpach-Haut et Roodt (9. 8. 78)
28) Au nord de Fischbach (31. 7. 78)
36) Entre Colmar et Bissen (Geismühle) (3. 8. 78)
51) Au nord-est de Rippweiler (9. 8. 78)
39) A l'est de Eppeldorf (3. 8. 78)
64) Entre Cruchten et Schrondweiler (9. 8. 78)
53) Au sud de Colpach-Bas (9. 8. 78)
8) Entre Schœnfels et Marienthal (Klaushof) (21. 7. 78)
47) Entre Mersch et Rouscht (9. 8. 78)
29) Au nord de Meysembourg (31. 7. 78)
37) Entre Mersch et Angelsberg (3. 8. 78)

Remarque :

Dans le tableau 2 on voit que quelques relevés (p. ex. N° 10, 6 et 57) ont un I.A.P. relativement faible, bien que des espèces très toxiphobes y soient présentes.

Je suis d'avis que ces espèces devraient jouer un rôle beaucoup plus important dans le calcul de l'I.A.P., tandis que les lichens plus toxitolérants joueraient un rôle plutôt négligeable.

J'ai calculé l'I.A.P. de tous les relevés par la méthode suivante :

$$\text{I.A.P.} = \frac{1}{100} \sum_{1}^{n} Q^3 \times f.$$

En comparant ces résultats à ceux obtenus par la méthode de De Sloover, j'ai constaté que la nouvelle méthode donne de meilleurs résultats.

Voici les valeurs de l'I.A.P. de tous les relevés avec la méthode de De Sloover ainsi qu'avec la nouvelle méthode. La suite des relevés est la même que celle des tableaux 1 et 2.

Zone 1 A

Ancienne méthode :	3	4	4	5	
Nouvelle méthode :	0,03	0,04	0,04	0,05	

Zone 1 B

A. m.:	5	7	7	8	8	9	10	10	11	11
N. m.:	0,11	0,13	0,19	0,20	0,20	0,21	0,34	0,34	0,29	0,35
A. m.:	11	12	12	12	12	13	13	14	15	16
N. m.:	0,29	0,42	0,36	0,36	0,36	0,37	0,43	0,44	0,45	0,52

Zone 1 C

A. m.:	12	13	13	14	15	16	16	17	20	22
N. m.:	0,84	0,49	1,93	1,40	0,45	1,2	1,5	2,6	1,7	2,9
A. m.:	23	23	23							
N. m.:	1,9	2,9	3,7							

Zone 2

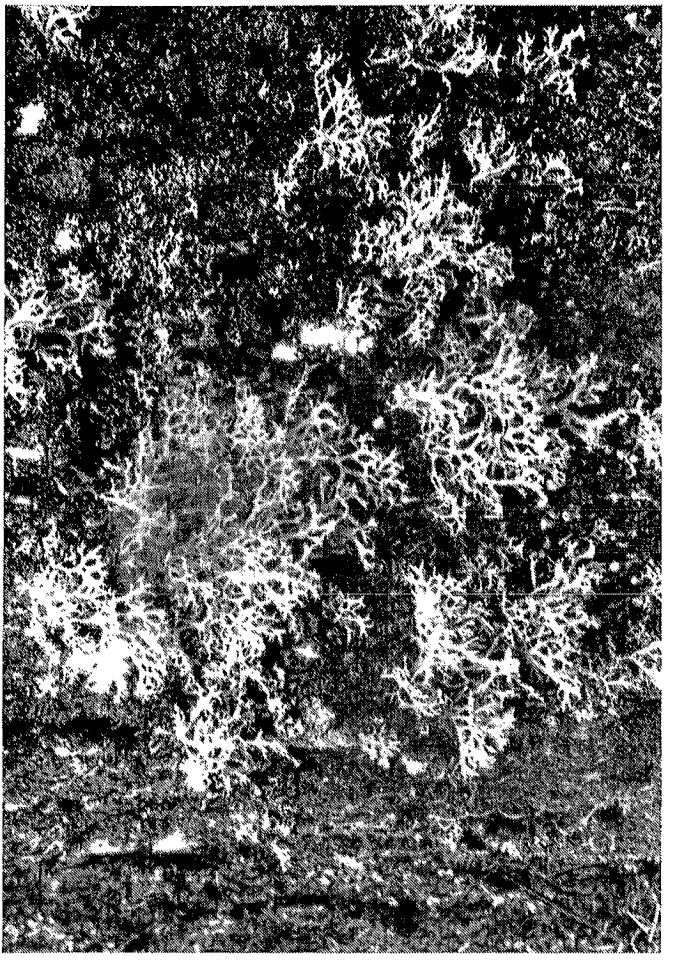
A. m.:	27	36	37	38	40	41	44	45	49	50
N. m.:	4,9	9,8	6,3	8,2	8,1	12	12	16	15	12
A. m.:	53	55	55	57	58	60	63	67	69	69
N. m.:	12	23	25	22	18	15	18	27	23	18
A. m.:	70	71								
N. m.:	27	33								

Zone 3

A. m.:	76	76	78	79	84	86	87	91	93	96
N. m.:	31	38	42	30	39	32	35	40	46	45
A. m.:	94	95	98	103	105	106	107	110	113	114
N. m.:	43	38	43	48	51	69	46	69	60	71



Un tronc de *Fagus sylvatica* couvert de lichens crustacés. L'absence de lichens foliacés ou barbus nous indique souvent que l'air est très pollué.



Evernia prunastri est un lichen toxiphobe qui n'est bien développé et abondant que dans les régions peu polluées.

Zone 4

A. m.:	125	128	128	129	129	132	133	133	135	138
N. m.:	73	69	93	61	67	62	63	65	63	74
A. m.:	143	146	149	156	162					
N. m.:	63	64	75	79	89					

Zone 5

A. m.:	178	178	183	179	179	181	184	214	231	233
N. m.:	94	102	137	84	96	96	97	115	126	130
A. m.:	238	264								
N. m.:	151	149								

Au lieu de diviser le coefficient par 100, on pourrait aussi bien en calculer le logarithme népérien. Cela permettrait de faire une subdivision très simple des différentes zones de pollution :

Zone	$\ln \Sigma_1^n Q^3 \times f$	$\frac{1}{100} \Sigma_1^n Q^3 \times f$
1 A	0–2	0–0,07
1 B	2–4	0,07–0,55
1 C	4–6	0,55–4
2	6–8	4–30
3	8–8,5	30–49
4	8,5–9	49–81
5	9-10	81–220

4. SENSIBILITÉ SPÉCIFIQUE DES LICHENS À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

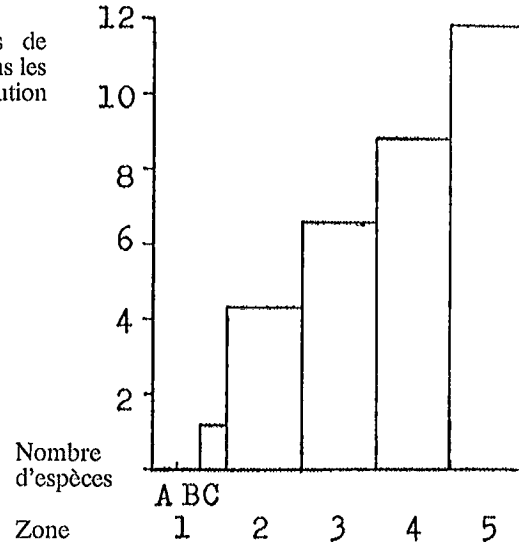
a) Le cortège moyen spécifique

Dans le chapitre précédent j'ai employé l'indice écologique proposé par BARKMAN (1958) pour calculer l'I.A.P. de chaque relevé. Cet indice ne fut cependant que provisoire, car la sensibilité d'une espèce de lichens varie souvent considérablement d'une région à l'autre (DE SLOOVER, 1967). C'est pourquoi DE SLOOVER (1967) a introduit la notion de cortège moyen spécifique qui sert à exprimer dans une région le nombre moyen d'espèces de lichens accompagnant une espèce donnée dans toutes ses stations.

La figure 9 montre le nombre moyen d'espèces de macrolichens par relevé dans chacune des 5 zones de pollution atmosphérique.

On voit très bien que le nombre d'espèces de lichens augmente quand la pollution diminue. Ainsi un cortège moyen spécifique élevé indique que l'espèce en question est plus sensible à la pollution atmosphérique qu'une autre espèce dont le cortège moyen est plus faible.

Figure 9 :
Nombre moyen d'espèces de macrolichens par relevé dans les différentes zones de pollution atmosphérique.



Le désavantage de cette méthode est que l'on ne peut calculer le cortège moyen que pour des espèces fréquentes, présentes dans 15 à 20 relevés au moins. Par conséquent il est difficile ou même impossible de calculer l'I.A.P. à l'aide du cortège moyen spécifique.

Pour les 14 espèces les plus fréquentes du Bon-Pays, j'ai calculé le cortège moyen spécifique en ne considérant que les macrolichens :

	Cort. m. spéc.	indice écologique
Physcia dubia	3,94	2
Physcia tenella	6,31	4
Parmelia sulcata	6,38	5
Physcia grisea	6,53	4
Xanthoria parietina	6,60	6
Physcia adscendens	6,74	5
Parmelia acetabulum	7,54	7
Ramalina farinacea	7,70	7
Evernia prunastri	7,74	8
Parmelia sp. (espèces brunes)	8,00	8
Hypogymnia physodes	8,10	6
Pseudevernia furfuracea	8,27	9
Physcia pulverulenta	8,74	8
Parmelia tiliacea	8,91	8

En comparant le cortège moyen spécifique avec l'indice écologique donné par BARKMAN (1958), on remarque que les résultats obtenus au Luxembourg correspondent plus ou moins à ceux des Pays-Bas. La seule différence est la sensibilité plus prononcée de *Hypogymnia physodes* au Grand-Duché.

b) Préférence spécifique des lichens aux différentes zones de pollution atmosphérique

Pour décrire la sensibilité d'une espèce de lichens à la pollution atmosphérique, il faut indiquer :

1° La quantité maxima de polluants tolérée
2° Les zones de pollution où l'espèce s'observe le plus fréquemment
3° Les zones de pollution dans lesquelles l'espèce est le plus abondant
4° Parfois la quantité minima de polluants nécessaire.

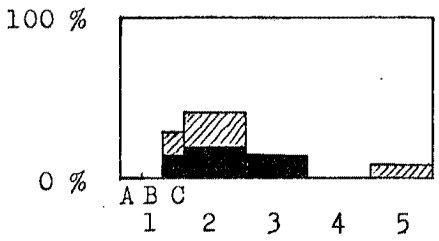
Les méthodes traditionnelles, telles l'indice écologique ou le cortège moyen spécifique, n'attribuent cependant à chaque espèce qu'un seul chiffre relatif à la quantité maxima de polluants tolérée.

Je propose ici une nouvelle méthode qui consiste à montrer avec un schéma les 4 caractéristiques mentionnées plus haut pour chaque espèce.

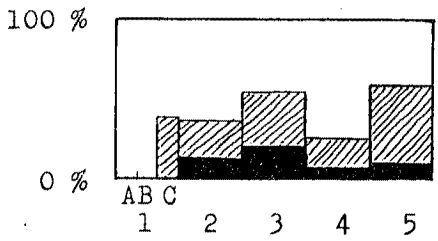
On calcule pour toute zone de pollution le pourcentage de relevés dans lesquels une certaine espèce existe. De plus on distingue entre les relevés où l'espèce a un recouvrement supérieur à 25% (surface noire sur les schémata) et ceux où le recouvrement de l'espèce est plus faible (surface hachurée). Cette méthode permet de mieux comprendre les exigences écologiques de chaque espèce.

Voici les résultats obtenus de toutes les espèces de macrolichens observées dans le Bon-Pays sur le réseau de 106 stations :

Physcia dubia

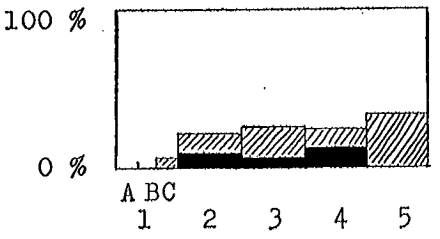


Physcia tenella

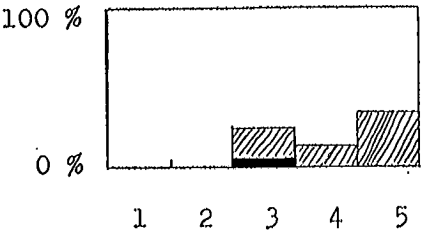


(zone)

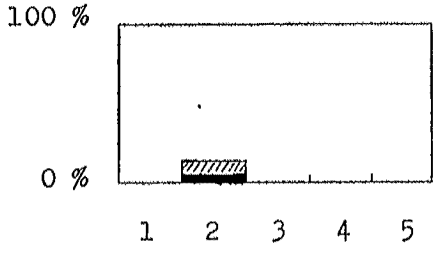
Physcia grisea



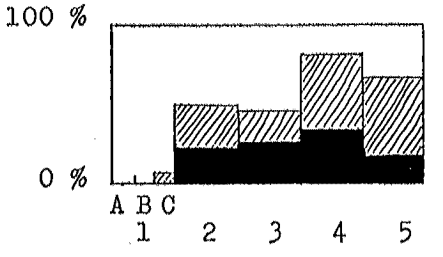
Xanthoria candelaria



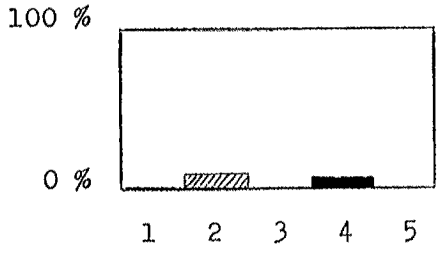
Physcia orbicularis



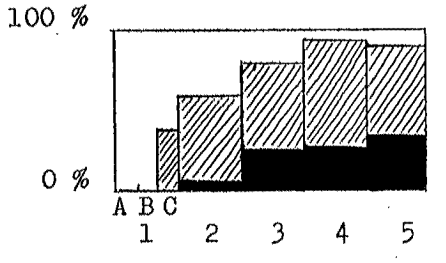
Physcia adscendens



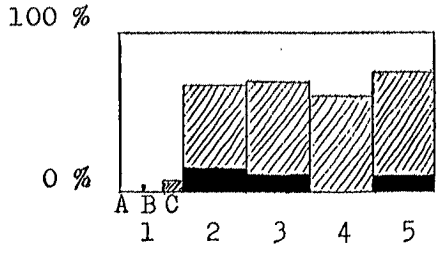
Parmelia dubia



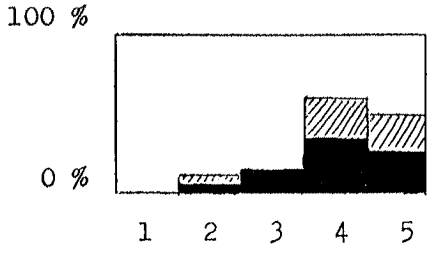
Parmelia sulcata



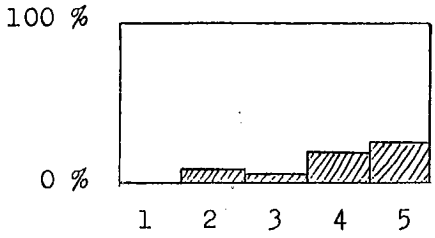
Xanthoria parietina



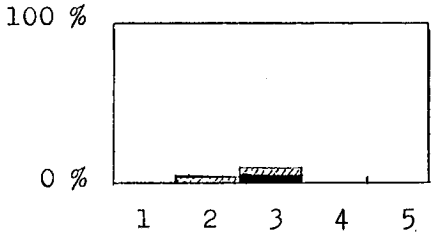
Hypogymnia physodes



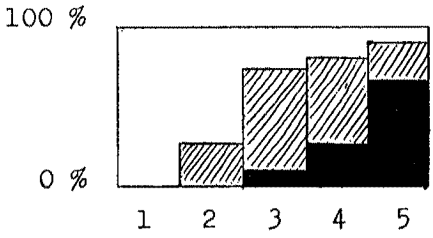
Xanthoria polycarpa



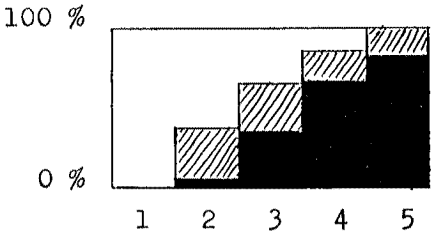
Physcia caesia



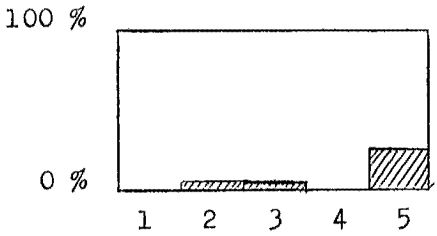
Ramalina farinacea



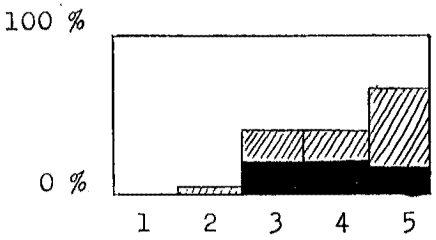
Parmelia acetabulum



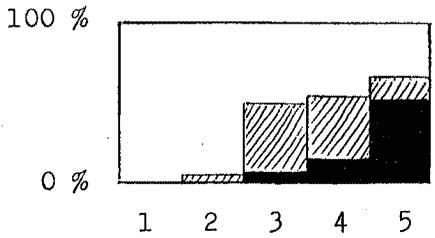
Parmelia caperata



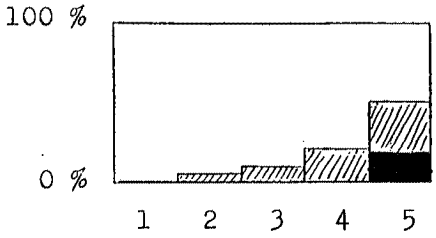
Physcia pulverulenta



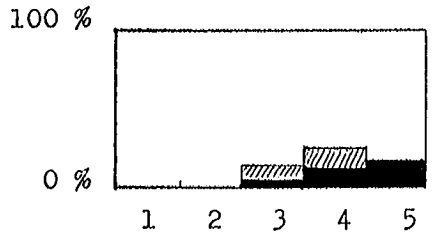
Evernia prunastri



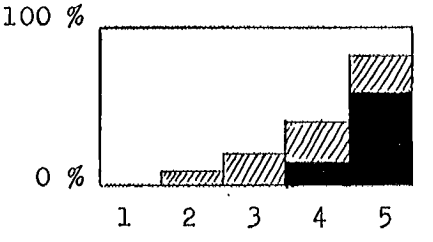
Ramalina fastigiata



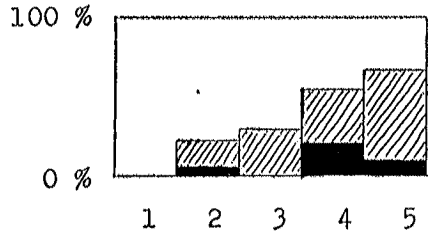
Parmelia pastillifera



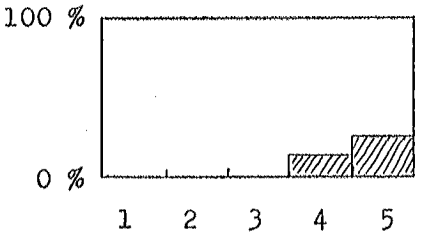
Parmelia tiliacea



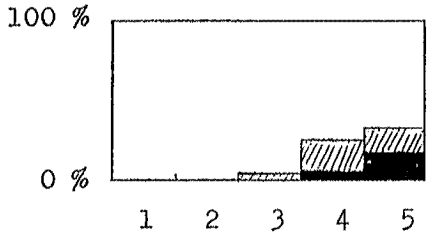
Parmelia sp. (espèces brunes)



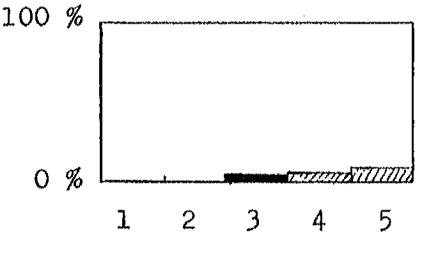
Ramalina fraxinea



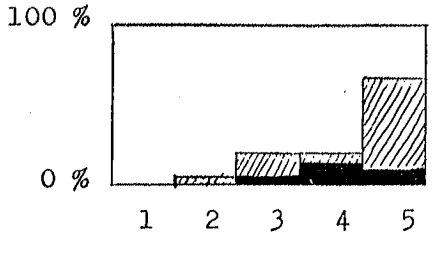
Anaptychia ciliaris



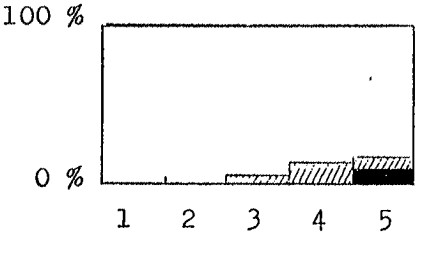
Cetraria chlorophylla

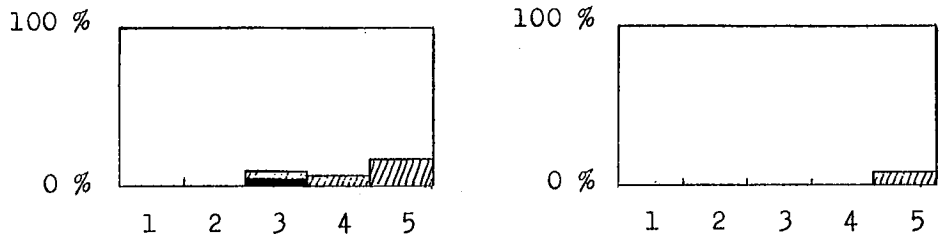


Pseudevernia furfuracea



Parmelia saxatilis





5. LA CONCENTRATION EN SO_2 DANS LES DIFFÉRENTES ZONES DE POLLUTION

Après avoir divisé le Bon-Pays en plusieurs zones de pollution atmosphérique, il serait intéressant de connaître la concentration des divers polluants dans chacune de ces zones. Plusieurs auteurs ont trouvé que le dioxyde de soufre (SO_2) et parfois le fluorure d'hydrogène et l'ozone sont les principaux responsables de la disparition des lichens (COKER, 1967; GILBERT, 1968; etc.).

Dans le tableau 3 j'ai calculé les moyennes de la concentration en SO_2 pendant les hivers de 1973-74, 1974-75 et 1975-76 pour 12 stations différentes du Grand-Duché (d'après des mesures faites par l'Institut d'Hygiène et de Santé Publique, Service de l'air).

Tableau 3 : Concentrations en SO_2 pendant les hivers (octobre à mars) de 1973-74, 1974-75 et 1975-76 (en μgm^{-3})

Station	1973-74	1974-75	1975-76	Moyenne
Luxembourg, Place de Paris	139	124	102	122
Luxembourg, Rue Aldringen	136	100	141	126
Luxembourg, Laboratoire	93	79	87	86
Esch-s.-Alzette, Hôtel de Ville	98	76	67	80
Esch-s.-Alzette, Ecole Brill	89	68	85	81
Dudelange	125	56	50	77
Differdange	74	50	81	68
Pétange	61	52	70	61
Rodange	40	42	42	41
Steinfort	50	42	57	50
Diekirch	73	61	66	67
Grevenmacher	36	33	40	36

La plupart de ces stations se trouvent dans la zone de pollution 1.

En comparant les résultats obtenus à l'aide des bioindicateurs avec les mesures du SO_2 ainsi qu'avec certaines indications faites par des auteurs étrangers sur la sensibilité des lichens (GILBERT, 1970 b; DALY, 1970; HAWKSWORTH et ROSE, 1970; JOHNSEN et SOCHTING, 1973; MORGAN-HUWS et HAYNES, 1973; HAWKSWORTH, ROSE et COPPINS, 1973), on peut établir l'échelle suivante :

Zone	μgm^{-3} SO_2
1 A	>120
1 B	80–120
1 C	60– 80
2	40– 60
3	35– 40
4	30– 35
5	< 30

La concentration en SO_2 est donc généralement supérieure à 60 μgm^{-3} dans les villes, entre 35 et 60 μgm^{-3} dans le sud du pays ainsi que dans les vallées et inférieure à 40 μgm^{-3} dans le reste du Bon-Pays.

On peut maintenant estimer la concentration maximale de SO_2 tolérée par les lichens épiphytiques au Grand-Duché de Luxembourg :

30 μgm^{-3} : *Usnea fulvoreagens*

35 μgm^{-3} : *Parmelia saxatilis*
Anaptychia ciliaris
Ramalina fraxinea

40 μgm^{-3} : *Cetraria glauca*
Pseudevernia furfuracea
Cetraria chlorophylla
Parmelia tiliacea
Parmelia pastillifera
Ramalina fastigiata
Evernia prunastri
Physcia pulverulenta
Xanthoria candelaria

50 μgm^{-3} : *Parmelia acetabulum*
Ramalina farinacea
Hypogymnia physodes

60	μgm^{-3} :	*Xanthoria parietina* *Physcia adscendens* *Physcia grisea* (*Parmelia* sp., espèces brunes) *(Parmelia caperata)* *(Physcia caesia)* *(Xanthoria polycarpa)* *(Parmelia dubia)* *(Physcia orbicularis)*
80	μgm^{-3} :	*Parmelia sulcata* *Physcia tenella* *Physcia dubia*
120	μgm^{-3} :	*Lepraria aeruginosa* *Lecanora conyzaeoides*
170 ?	μgm^{-3} :	*Protococcus viridis*

La seule espèce de macrolichens qui semble être «toxiphile» est *Physcia dubia.* Elle est le mieux développée si la concentration de SO_2 se situe entre 35 et 80 μgm^{-3} et n'apparaît guère à une concentration inférieure à 35 μgm^{-3}. Deux espèces généralement stériles *(Anaptychia ciliaris* et *Physcia adscendens)* présentaient des apothécies en-dessous de 35 μgm^{-3} de SO_2.

DISCUSSION

Après avoir fait cette étude, il me semble utile de discuter sur la valeur des lichens en tant que bioindicateurs de la pollution atmosphérique. En premier lieu analysons les différents facteurs qui puissent influencer la végétation épiphytique d'un arbre.

La pollution atmosphérique joue certainement un grand rôle dans la disparition des lichens des centres urbains et industriels. Ainsi les anciennes flores témoignent souvent de la présence de lichens relativement toxiphobes dans des villes qui étaient alors peu polluées. Mais également des expériences («fumigations») ont montré la sensibilité des lichens aux différents polluants.

Le rôle de *l'humidité atmosphérique* ne doit non plus être négligé. Il y a peu de temps, certains auteurs pensaient encore que c'était la sécheresse de l'air qui détermine l'absence de lichens dans les villes et non pas la pollution atmosphérique.

L'importance de *la lumière* s'observe le mieux dans les forêts. Des espèces forestières comme *Parmelia saxatilis* ou *Evernia prunastri* sont généralement bien développées au bord des forêts ou autour des clairières, mais à l'intérieur des forêts seules quelques espèces crustacées peuvent exister.

Le vent peut avoir une influence positive ou négative sur les épiphytes : Il apporte d'une part l'humidité (pluie), d'autre part l'air pollué provenant d'une source bien déterminée (usine). De plus il empêche davantage les spores à se fixer aux troncs des arbres.

Enfin, c'est *le substrat* lui-même qui peut déterminer l'état de la végétation épiphytique. Une écorce lisse ou rugueuse, les propriétés physiques et chimiques de l'écorce, l'âge et le diamètre du tronc, tous ces facteurs peuvent influencer les lichens d'une façon ou d'une autre.

Pour garantir la validité de l'étude de l'un de ces facteurs (p. ex. la pollution atmosphérique), il faut être sûr d'avoir éliminé tous les autres. Ainsi j'ai considéré dans mon travail uniquement des arbres isolés (luminosité suffisante, humidité semblable), d'un diamètre minimum de 50 cm, et j'ai évité en général de prendre des phorophytes à l'écorce lisse (hêtre, platane, etc.), ou encore ceux qui étaient trop exposés au vent.

Ce qui me pose un problème, c'est la pauvreté générale des lichens dans les vallées.

On pourrait répondre que beaucoup d'agglomérations et industries sont situées dans les vallées (p. ex. la vallée de l'Alzette entre Luxembourg et Mersch), et que le vent va plutôt pousser les masses d'air le long de la vallée que les en sortir, mais pourquoi alors la vallée de la Sûre ne présente-t-elle qu'une végétation lichénique appauvrie ?

Certes les vallées ont souvent un climat relativement chaud et sec, mais la présence de l'eau (p. ex. la Moselle) et la fréquence des brouillards n'indiquent-elles pas une certaine humidité de l'air ?

Seules des études approfondies sur le climat et la pollution atmosphérique des vallées pourront nous en donner une réponse.

Si l'on compare les méthodes utilisant des bioindicateurs à celles du laboratoire, on peut constater un bon nombre d'avantages :

La détection de la pollution de l'air à l'aide de bioindicateurs est beaucoup moins coûteuse qu'avec des stations de mesure; le prix élevé de ces stations rend la cartographie de la pollution sur de grandes surfaces presque impossible.

De plus les lichens permettent de cartographier de vastes régions en très peu de temps, car la végétation épiphytique que nous observons est en réalité le résultat de la pollution moyenne de plusieurs années.

Encore les lichens nous donnent-ils l'image de la pollution globale et non pas de quelques polluants bien déterminés.

Dans les villes où les lichens manquent, on peut également utiliser des bryophytes (mousses) ou même des plantes supérieures.

En résumé, les bioindicateurs nous fournissent des informations très intéressantes, et il serait recommandable de les utiliser toujours parallèlement aux méthodes des laboratoires.

BIBLIOGRAPHIE

BARKMAN, J. J., 1958. – Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. Assen, Pays-Bas.

BARKMAN, J. J., 1963. – De epifyten-flora en -vegetatie van Midden-Limburg (België).
Verhandelingen der Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Afd. Natuurkunde, Tweede Reeks, 54, N° 4, pp. 1–46.

BARKMAN, J. J., 1969. – The influence of air pollution on bryophytes and lichens. In : «Air Pollution». Proceedings of the First European Congress on the Influence of Air Pollution on Plants and Animals. Wageningen, 1968, pp. 197–209.

COKER, P. D., 1967.– The effects of sulphur dioxide pollution on bark epiphytes. Transactions of the British Bryological Society, 5, pp. 341–347.

DALY, G. T., 1970. – Bryophyte and lichen indicators of air pollution in Christchurch, New Zealand.
Proceedings of the New Zealand Society, 17, pp. 70–79.

DELZENNE-VAN HALUWYN, 1973. – Contribution à l'étude de la distribution des lichens épiphytiques dans le nord de la France. Application au problème de la pollution atmosphérique.
Pollution atmosphérique, 60, pp. 415–420.

DE SLOOVER, J., 1964.– Végétaux épiphytes et pollution de l'air.
Revue Quest. scientif., 25, pp. 531–561.

DE SLOOVER, J., 1967.– Pollutions atmosphériques et tolérance spécifique chez les lichens.
Société Botanique de France, Colloque sur les Lichens, pp. 205–217.

DE SLOOVER, J., 1971.– Groupes écologiques, combinaisons d'espèces indicatrices et tolérance à l'égard des pollutions chez les lichens épiphytiques.
Bioindicators of landscape deterioration, Praha, pp. 18–24.

DE SLOOVER, J. et LEBLANC, F., 1968.– Mapping of atmospheric pollution on the basis of lichen sensitivity.
Symposium on Recent Advances in Tropical Ecology : Proceedings, pp. 42–65.

DE SLOOVER, J. et LEBLANC, F., 1970 – Pollutions atmosphériques et fertilité chez les mousses et chez les lichens épiphytiques.
Bulletin Académie et Société Lorraines des Sciences, tome 9, N° 1, pp. 82–90.

DOMRÖS, M., 1966. – Luftverunreinigung und Stadtklima im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkung auf den Flechtenbewuchs der Bäume.
Arb. z. Rhein. Landeskunde 23, Bonn.

DOMRÖS, M., 1967. – Flechten als Indikator von Luftverunreinigung und Stadtklima.
Städtehygiene, 2, pp. 33–39.

DÜLL, R., 1974. – Moose als abgestufte ökologische Zeigerarten für die SO_2-Immission im Industriegebiet zwischen Rhein und Ruhr bei Duisburg.
Société Botanique de France, Coll. Bryologie, pp. 265–269.

FABER, R., 1971.– Climatologie du Grand-Duché de Luxembourg.
Publication du Musée d'Histoire Naturelle et de la Société des Naturalistes Luxembourgeois, Luxembourg.

FENTON, A. F., 1960.– Lichens as indicators of atmospheric pollution.
The Irish Naturalists' Journal, Vol. 13, N° 7, pp. 153–159.

FENTON, A. F., 1964 – Atmospheric pollution of Belfast and its relationship to the lichen flora.
The Irish Naturalists' Journal, Vol 14, pp. 237–245.

GILBERT, O. L., 1965. – Lichens as indicators of air pollution in the Tyne Valley. Ecology and the Industrial Society (Ed. by G. T. GOODMAN, R. W. EDWARDS and J. M. LAMBERT), pp. 35–47, Oxford et Edinburgh.

GILBERT, O. L., 1968.– Bryophytes as indicators of air pollution in the Tyne Valley.
New Phytol., 67, pp. 15–30.

GILBERT, O. L., 1970 a. – Further Studies on the effect of sulphur dioxide on lichens and bryophytes.
New Phytol., 69, pp. 605–627.

GILBERT, O. L., 1970 b. – A biological scale for the estimation of sulphur dioxide pollution.
New Phytol., 69, pp. 629–634.

HAWKSWORTH, D. L. et ROSE, F., 1970. – Qualitative Scale for estimating Sulphur Dioxide Air Pollution in England and Wales using Epiphytic Lichens.
Nature, 277, pp. 145–148.

HAWKSWORTH, D. L., ROSE, F. et COPPINS, B. J., 1973. – Changes in the Lichen Flora of England and Wales Attributable to Pollution of the Air by Sulphur Dioxide.
In : Air Pollution and Lichens. Ed. by B. W. FERRY, M. S. BADDELEY and D. L. HAWKSWORTH. The Athlone Press of the University of London, 1973, pp. 330–367.

INSERENTANT, R. et MARGOT, J., 1963. – Onderzoek naar de Luchtbezoedeling in de Kanaal Zone Gent-Terneuzen.
Deel II. Biologische Enquête. Rapport non publié *.

INSTITUT D'HYGIÈNE ET DE SANTÉ PUBLIQUE (1977). – Mesures du SO_2 et de la fumée noire. Rapport non publié.

JOHNSEN, I. et SOCHTING, U., 1973. – Influence of Air pollution on the epiphytic lichen vegetation and bark properties of deciduous trees in the Copenhagen area.
Oikos 24, pp. 344–351, Copenhagen.

JONES, E. W., 1952. – Some Observations on the Lichen Flora of Tree Boles, with special reference to the Effect of Smoke.
Rev. Bryol. et Lich., 21, pp. 96–115.

LAMBINON, J., 1973. – Indicateurs biologiques de la pollution de l'air.
Economie et Médecine Animales, 14, n° 1, pp. 21–31.

LEBLANC, F. et DE SLOOVER, J., 1970. – Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal.
Canadian Journal of Botany, 48, pp. 1485–1496.

LEBLANC, F. et RAO, D. N., 1974. – A review of the literature on Bryophytes with respect to air pollution.
Société Botanique de France, Coll. Bryologie, pp. 237–255.

MÄGDEFRAU, K., 1960. – Flechtenvegetation und Stadtklima.
In : Naturw. Rundschau 13, pp. 210–214 *.

MORGAN-HUWS, D. I. et HAYNES, F. N., 1973. – Distribution of some Epiphytic Lichens around an Oil Refinery at Fawley, Hampshire.
In : Air Pollution and Lichens. Ed. by B. W. FERRY, M. S. BADDELEY et D. L. HAWKSWORTH. The Athlone Press of the University of London, 1973, pp. 89–108.

MARGOT, J., 1965. – Evolution de la végétation épiphytique du peuplier en relation avec l'âge et les modifications de l'écorce.
Académie royale de Belgique, Classe des Sciences, Mémoires, 36 (7), 82 pp.

NASH III, T. H., 1973. – The Effect of Air Pollution on other Plants, Particularly Vascular Plants.
In : Air Pollution and Lichens. Ed. by B. W. FERRY, M. S. BADDELEY et D. L. HAWKSWORTH. The Athlone Press of the University of London, 1973, pp. 192–223.

ROBITAILLE, G., LEBLANC, F. et RAO, D. N., 1977. – Acid rain : A factor contributing to the paucity of epiphytic cryptogams in the vicinity of a copper smelter.
Rev. Bryol. Lichénol., 43, 1, pp. 53–66.

ROSE, F., 1973. – Detailed Mapping in South-East England.
In : Air Pollution and Lichens. Ed. by B. W. FERRY, M. S. BADDELEY et D. L. HAWKSWORTH. The Athlone Press of the University of London, 1973, pp. 77–88.

SKYE, E., 1968. – Lichens and air pollution.
Acta Phytogeographica Suecica, 52, pp. 1–123.

TAODA, H,. 1972. – Mapping of atmospheric pollution in Tokyo based upon epiphytic bryophytes.
Japanese Journal of Ecology, 22 (3), pp. 125–133.

---

* Références connues de seconde main.

Avec ce travail, l'auteur a reçu le premier prix aux «Réalisations Jeunes Scientifiques Luxembourg» (1978) et un deuxième prix au «11th European Philips Contest for Young Scientists and Inventors» en 1979.