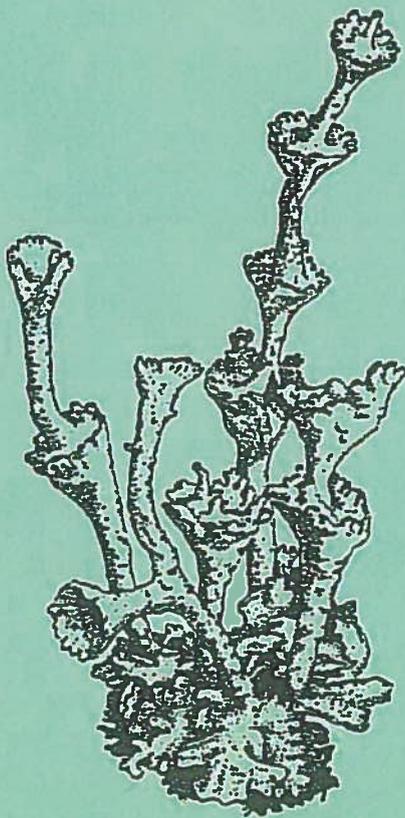


Bull. Inform. Ass. Fr. Lichénol., Mémoires, n°1, 1992, Paris ISSN 0150-0171

**Bulletin d'Informations de  
l'Association Française de Lichénologie  
Mémoires, n° 1, 1992**



---

**Problèmes actuels posés  
à la bioindication lichénique**

---

**C. VAN HALUWYN et B. DE FOUCAULT, éditeurs**

**Séminaire organisé à Lille les 5 et 6 octobre 1991  
par C. van Haluwyn et B. de Foucault**

## ASSOCIATION FRANÇAISE DE LICHENOLOGIE

Président d'honneur: GEORGES CLAUZADE

### Président

André BELLEMERE  
53, Jardins Boieldieu  
92800 PUTEAUX  
(1) 47 71 91 11 p.360  
(1) 47 75 05 31

### Vice Président

Serge DERUELLE  
Laboratoire de Cryptogamie  
Université P. et M. Curie  
7, quai Saint Bernard  
75252 PARIS CEDEX 05  
(1) 44 27 59 70

### Secrétaire

Jean-Claude BOISSIERE  
Laboratoire de Biologie Végétale  
Rte de la Tour Denécourt  
77300 FONTAINEBLEAU  
(1) 64 22 37 40  
Fax (1) 60 72 68 16

### Trésorier

Jean-Pierre GAVERIAUX  
14, Les Hirsons  
62800 LIEVIN

Autres membres du Conseil d'Administration:

Pierre COLLIN, Clothier COSTE

Imprimé par les soins de l'Association - Directeur de la Publication: A. BELLEMERE.

Dépot légal: juin 1992

## SOMMAIRE

Liste des participants	p. 1
Chantal VAN HALUWYN. La bioindication de la pollution atmosphérique dans la région Nord-Pas de Calais : bilan et perspectives.	p. 3
Jean-Patrice MATYSIAK. Ptéridophytes saxicoles et pollution dans le bassin minier du Pas-de-Calais.	p. 17
Michel LEROND. Quinze ans de suivi de placettes-lichens en Haute-Normandie.	p. 29
Marie-Agnès LETROUT. Remarques sur les lichens corticoles de Paris en 1991.	p. 35
Juliette ASTA. Etat des recherches sur les lichens dans les régions alpines françaises.	p. 51
Ulrik SOCHTING. Etat actuel de la bioindication par les lichens dans la région de Copenhague.	p. 55
Klaus AMMANN. Expérimentation d'une nouvelle formulation de l'IAP en Suisse.	p. 59
Jean BEGUINOT. L'insuffisante signification de la diversité spécifique brute : l'apport de l'I.A.P. de LEBLANC et DE SLOOVER.	p. 67
Jean BEGUINOT. Une des causes fondamentales de l'hystérésis de réponse des peuplements lichéniques à la pollution.	p. 69
Jean BEGUINOT. Apport d'une méthode de diagnostic phytosociologique quantifié à l'estimation de la pollution atmosphérique.	p. 73
Bruno de FOUCAULT. Contribution à une épistémologie de la bioindication lichénique.	p. 77
André BELLEMERE. Conclusion générale du séminaire.	p. 101

### ASSOCIATION FRANCAISE DE LICHENOLOGIE

#### Siège Social

Laboratoire de Cryptogamie  
Université de Paris VI, BP 33  
7 quai Saint Bernard  
75252 PARIS CEDEX 05

Prix de l'abonnement 1992 au Bulletin de l'Association Française de Lichénologie (deux fascicules par an)	110 FF
ADHESION (donne droit à l'abonnement)	100 FF
Vente au numéro	60 FF

Tirés à part de tout article sur demande et contre participation aux frais (de photocopie et d'expédition) 1FF/page

Possibilité d'effectuer tous les paiements par CCP : Association Française de Lichénologie n° 11 220 87 R  
PARIS

## LISTE DES PARTICIPANTS

M. Klaus AMMANN  
Universität Bern  
Botanische Institute  
CH-3013 BERN

Melle Juliette ASTA  
8, Place St Eynard  
F-38000 GRENOBLE

Mme Monique AVNAIM  
53, Boulevard de Reuilly  
F-75012 PARIS

M. Jean BEGUINOT  
Le Bois Joli  
77, rue du Docteur Rebillard  
F-71200 LE CREUSOT

M. André BELLEMERE  
53, Jardins Boieldieu  
F-92800 PUTEAUX

Melle Nathalie CHOCHOIS  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE Cédex

M. Olivier DAILLANT  
F-71250 MAZILLE

Melle Marie-Laure DENOEUDE  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE Cédex

M. S. DERUELLE  
5, square du Vimeu  
F-78310. MAUREPAS

M. Jan DORGELO  
Tournavaux  
F-08800 MONTHERME

Melle Laurence DUCHATELET  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE Cédex

M. Bruno de FOUCAULT  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE. Cédex

-2-  
M. Jean-Pierre et Mme Michelle GAVERIAUX  
14, les Hirsons  
F-62800 LIEVIN

M. Jean-Paul KONRAT  
19, rue Erard  
F-75012 PARIS

M. Michel LEROND  
Le Point du Jour  
F-76780 SIGY EN BRAY

Mme Marie Agnès LETROUIT  
Laboratoire de Cryptogamie  
Bât. 50, 6ème étage  
Université de Paris VI  
Quai St Bernard  
F-75252 PARIS Cédex 05

M. Victor. MACQUET  
Hôpital Dron  
rue du Président Coty  
F-59200 TOURCOING

M. Jean-Patrice MATYSIAK  
20, rue Ferrer  
F-62220 CARVIN

M. Marco OTAZU  
Observatoire communautaire de l'Environnement  
Château Dalle Dumont  
rue de Lincelles  
F-59117 WERWICQ

M. Ulrik SØCHTING  
Inst. for Sporeplanter  
Kobenhavns Universitet  
O Farimagsgade 2 D  
DK-1353 KOBENHAVNK

Mme Chantal VAN HALUWYN  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE.Cédex

Melle Virginie VANHOVE  
Département de Botanique et Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
BP 83  
F-59006 LILLE.Cédex

## LA BIOINDICATION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE DANS LA REGION NORD - PAS-DE-CALAIS : BILAN ET PERSPECTIVES

Chantal VAN HALUWYN  
Département de Botanique et de Cryptogamie  
Faculté de Pharmacie  
B.P. 83  
F-59006 Lille Cédex

Nous dresserons dans un premier temps un bilan détaillé des travaux réalisés dans le domaine de la bioindication par les lichens dans notre région.

La première cartographie de la pollution atmosphérique à partir de l'observation des lichens date de 1973. Pour ce faire, nous avons appliqué la méthode anglaise mise au point en 1970 en Grande-Bretagne par HAWKSWORTH et ROSE à l'ensemble des trois départements Nord, Pas-de-Calais, Somme.

Ce travail peut être considéré comme le point de départ (tout au moins en France) des cartographies à grande échelle de la pollution atmosphérique. Ce fut également la première application à l'étranger de la méthode anglaise. Précisons toutefois que nous y avons apporté quelques modifications tenant compte des spécificités régionales.

A partir des résultats obtenus dans le nord de la France, à partir également de discussions engagées auprès des organismes chargés de mesurer la pollution, nous avons été amenée à repenser quelque peu les principes méthodologiques d'une telle méthode.

C'est en 1978 qu'ont été établies les bases d'une nouvelle méthodologie permettant d'établir une échelle de correspondance lichens-pollution. Il ne faut pas se méprendre sur nos motivations ; loin de nous l'idée de "démolir" la méthode anglaise bien au contraire : JOHNSON et SØCHTING 1973, LEROND 1981, DERUELLE 1983 ont par la suite démontré que la méthode de HAWKSWORTH et ROSE était applicable au nord-ouest de l'Europe.

Après la publication de notre première carte, on nous a objecté d'utiliser une méthode établie pour la Grande-Bretagne et pour l'anhydride sulfureux exclusivement ; dans l'esprit de nos détracteurs, la méthode ne pouvait être transposable en dehors de ses limites géographiques ni pour un autre type de pollution.

Nous avons alors utilisé comme outil méthodologique la "phytosociologie" ou plus exactement la méthode sigmatiste d'étude de la végétation de BRAUN-BLANQUET et TUXEN. La réalisation de relevés et de tableaux de la végétation lichénique régionale nous a permis d'objectiver le démantèlement des groupements épiphytes sous l'effet d'une pollution croissante (SO<sub>2</sub> et les autres polluants présents dans l'atmosphère) tout en prenant en compte les facteurs écologiques (substrat, climat, etc.).

Cette méthodologie s'est avérée confortée par les travaux ultérieurs :

- reproductibilité des résultats en Normandie (LEROND 1981) et à la moitié nord de la France (VAN HALUWYN et LEROND 1986)
- matérialisation sous forme d'une échelle de correspondance lichens-qualité de l'air facilement utilisable par des non spécialistes en lichénologie (et, précisons-le, pas tellement différente de l'échelle anglaise tout au moins qualitativement).

Nous avons trouvé en quelque sorte le "brevet d'invention" de la méthode anglaise (!) mais en l'élargissant car, dans notre nouvelle méthode, nous "globalisons", nous intégrons tous les paramètres définissant la qualité des milieux étudiés. Notre méthodologie a l'énorme

avantage d'être toujours d'actualité car adaptable quelle que soient la région et la situation de la pollution atmosphérique (actuellement le SO<sub>2</sub> n'est plus le polluant dominant).

Conjointement, à partir de 1983, des étudiants en Pharmacie de la Faculté de Lille ont choisi la bioindication par les lichens comme sujet de thèse de Doctorat d'exercice :

- C. COURTECUISSÉ-DRUART (1984)

*Contribution à l'étude de la flore lichénique épiphyte du Bois d'Olhain et de ses environs. Application au problème de la pollution atmosphérique.*

- P. HUVENT (1988)

*Les lichens témoins de la pollution atmosphérique dunkerquoise.*

- V. LUYSSÉN (1989)

*Lichens et pollution. Comportement de Lecanora muralis (Schreb.) Rabenh. en milieu urbain et industrialisé. Application à l'est du bassin minier du Nord - Pas-de-Calais.*

- M.L. DENOËUD (1992)

*Les lichens : bioindicateurs de pollution atmosphérique. Application aux alentours de l'usine Roquette à Lestrem, travail un peu plus particulier puisqu'il s'agissait de visualiser l'impact d'une usine sur la végétation épiphyte environnante.*

Le travail de P. HUVENT a été largement utilisé pour la réalisation de l'étude d'impact en vue de l'installation d'un complexe industriel du groupe Pêchiney à l'ouest de Dunkerque.

En ce qui concerne les travaux en cours d'élaboration, ceux-ci s'inscrivent dans la logique de l'évolution de notre démarche : collaboration renforcée avec les réseaux de mesure, étude de la "restauration" de la qualité de l'air en milieu urbain et périurbain, appréhension du phénomène d'hystérésis.

Nous présentons ci-après les différents thèmes abordés :

- N. CHOCHOIS sur la ville de Lille ; ce travail devrait déboucher sur les relations entre la végétation épiphyte et la gestion des espaces verts en milieu urbain. Cette étude est en quelque sorte le prolongement du travail de CARBIENER (s.d.) sur les rôles épurateur et dépollueur des parcs urbains.

- L. DUCHATELET sur la ville d'Arras ; ce projet est très intéressant car il s'inscrit directement dans notre thème sur les problèmes de recolonisation. En 1981, M. SENECOT, Professeur de Sciences Naturelles à Arras, avait demandé à ses élèves de terminale de recenser le nombre d'espèces et le recouvrement des lichens sur les arbres de la ville. En collaboration avec cet enseignant, nous allons refaire le même travail. Une première prospection nous conforte dans le choix d'un tel sujet.

Pour rester dans ce thème de recolonisation, M. LEROND vous présentera le protocole opératoire que nous avons mis au point pour Bradford (Grande-Bretagne, avec SEAWARD), Rouen et Lille : il s'agit de la mise en place de placettes d'observation de la recolonisation épiphyte. Les premiers résultats concernant la ville de Lille ont été publiés dans le *Bulletin régional de l'APPA* en 1990 ; ils ont permis de visualiser l'impact des pointes de pollution sur la recolonisation des arbres par les lichens.

Nous poursuivons cet exposé par la présentation de la carte nouvellement réactualisée de la pollution atmosphérique des départements du Nord et du Pas-de-Calais et la comparaison avec celle initialement établie en 1973.

L'échelle élaborée en 1986 avec LEROND est qualitativement peu différente de l'échelle anglaise ; nous pouvons donc transposer la carte de 1973 en nouvelles coordonnées, mais dans ce cas nous établirons notre comparaison essentiellement au niveau qualitatif (nous verrons ultérieurement pourquoi nous ne pouvons pas nous permettre de comparer quantitativement les deux cartes).

Pour réaliser cette actualisation, nous avons tracé sur la carte de 1973 des transects dans les zones susceptibles de présenter des modifications en fonction de l'implantation des sites industriels, de la direction des vents dominants et de la topographie. Nous nous sommes efforcés de les suivre aussi fidèlement que possible sur le terrain.

Voici ce qu'il ressort de cette comparaison (cartes 1 et 2).

1) Nous avons regroupé les zones B, C et D (la zone A étant pratiquement inexistante) ; la différenciation de chacune de ces zones aurait rendu la carte complètement illisible étant donné leur imbrication l'une dans l'autre comme une mosaïque. Dans tout ce secteur, on assiste à un complet remaniement de la qualité de l'air qui ne se fait pas partout de la même manière. On pourrait rendre compte de cette mosaïque sur des cartes au 1/50 000e ou au 1/25 000e mais pas à l'échelle de la carte que nous utilisons ici. Les travaux de CHOCHOIS et de MULLIE rendront compte de l'extrême complexité de la situation et de l'hétérogénéité qui règnent actuellement au sein de la zone D correspondant à l'agglomération Lille-Roubaix-Tourcoing. Par rapport à la situation de 1973, le secteur B-C-D qui s'étendait du nord de l'agglomération lilloise jusqu'au sud du bassin minier a éclaté en quatre poches. La majeure partie de cette zone est passée au niveau E et la zone E comprend elle-même un certain nombre de sites de niveau F, voire même de niveau G. Ces différents sites de niveau F correspondent à des "niches écologiques" particulières, ce sont essentiellement des zones humides (marais de Santes, Rieulay, Marchiennes, Amaury, de la forêt de Raismes-Saint-Amand, de la vallée de la Sensée). Ceci nous amène donc à envisager la protection de tels milieux ; outre l'intérêt écologique qu'ils représentent dans une région fortement urbanisée et industrialisée, ils constituent de véritables réservoirs de diaspores de lichens en vue d'une recolonisation future du milieu environnant.

2) On observe toujours le télescopage des zones de pollution au niveau des collines de l'Artois. Sur quelques kilomètres, on passe de la zone G (ex. versant de la colline de Vimy) à la zone E (ex. à Givenchy-en-Gohelle au pied de la colline de Vimy dans le bassin minier).

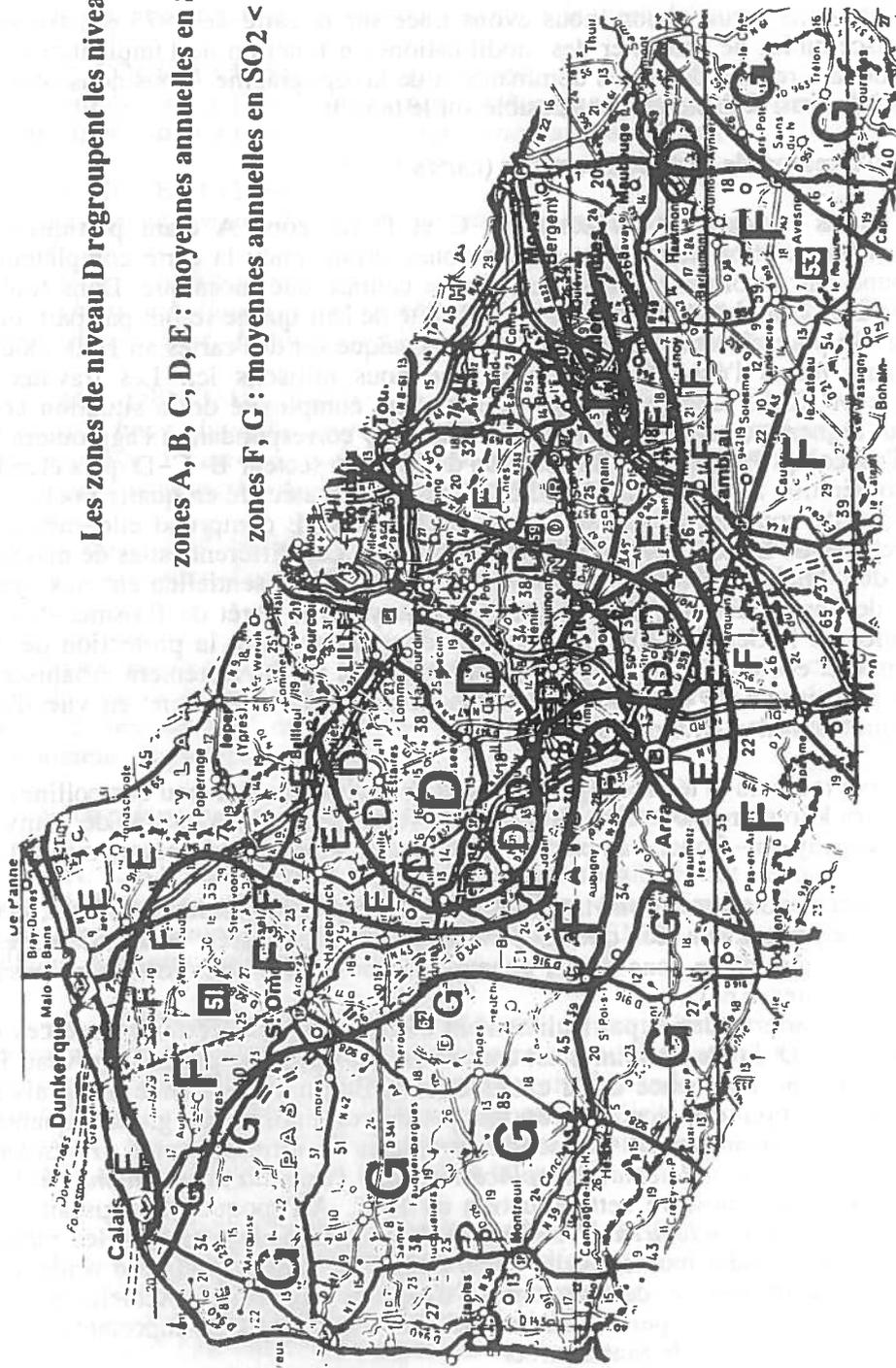
3) Précédemment nous évoquions la difficulté de cartographier certaines zones, cette difficulté est renforcée par une situation que nous avons souvent rencontrée "le saut de zones". On peut passer brutalement d'une zone B, par exemple, à une zone F sans forcément passer par les zones intermédiaires C et D.

Notre nouvelle carte visualise particulièrement bien l'impact de certaines sources de pollution. La zone B-C-D du bassin minier est coupée en deux par une poche de niveau F ; en fait cette zone F reflète l'influence de la cimenterie de Barlin et de l'usine d'engrais de Mazingarbe. L'eutrophisation des écorces par les poussières émises en grande quantité entraîne un développement important d'espèces nitrophiles à nitrotolérantes (*Physconia grisea*, *Xanthoria parietina* ssp. *calcicola*, *Caloplaca vitellina*, *Parmelia acetabulum*, *Physcia dimidiata*). Nous avons déjà observé cette situation en 1972. A l'époque, il s'agissait d'un développement luxuriant de *Candelariella vitellina* et de *Lecanora dispersa* sur les pierres tombales d'un cimetière militaire jouxtant cette usine d'engrais. Mais la pollution acide était trop importante pour permettre le développement d'espèces corticoles. Actuellement la diminution de la pollution en SO<sub>2</sub> permet une colonisation épiphyte très importante, voire prolifique, sur les arbres de la ville de Mazingarbe.

4) Le déclin de l'activité industrielle du bassin de la Sambre intervenu depuis 1973 a entraîné le retour d'une végétation épiphyte importante (zone F à Maubeuge).

5) L'existence d'une poche de niveau E à 15 km au sud de Dunkerque qui pourrait s'expliquer par la retombée d'une partie de la pollution en provenance de Dunkerque lors de situations météorologiques particulières.

Les zones de niveau D regroupent les niveaux A, B, C, D  
zones A, B, C, D, E : moyennes annuelles en SO<sub>2</sub> > 30 µg/m<sup>3</sup>  
zones F, G : moyennes annuelles en SO<sub>2</sub> < 30 µg/m<sup>3</sup>



CARTE 1 : QUALITE DE L'AIR DANS LE NORD - PAS-DE-CALAIS EN 1973

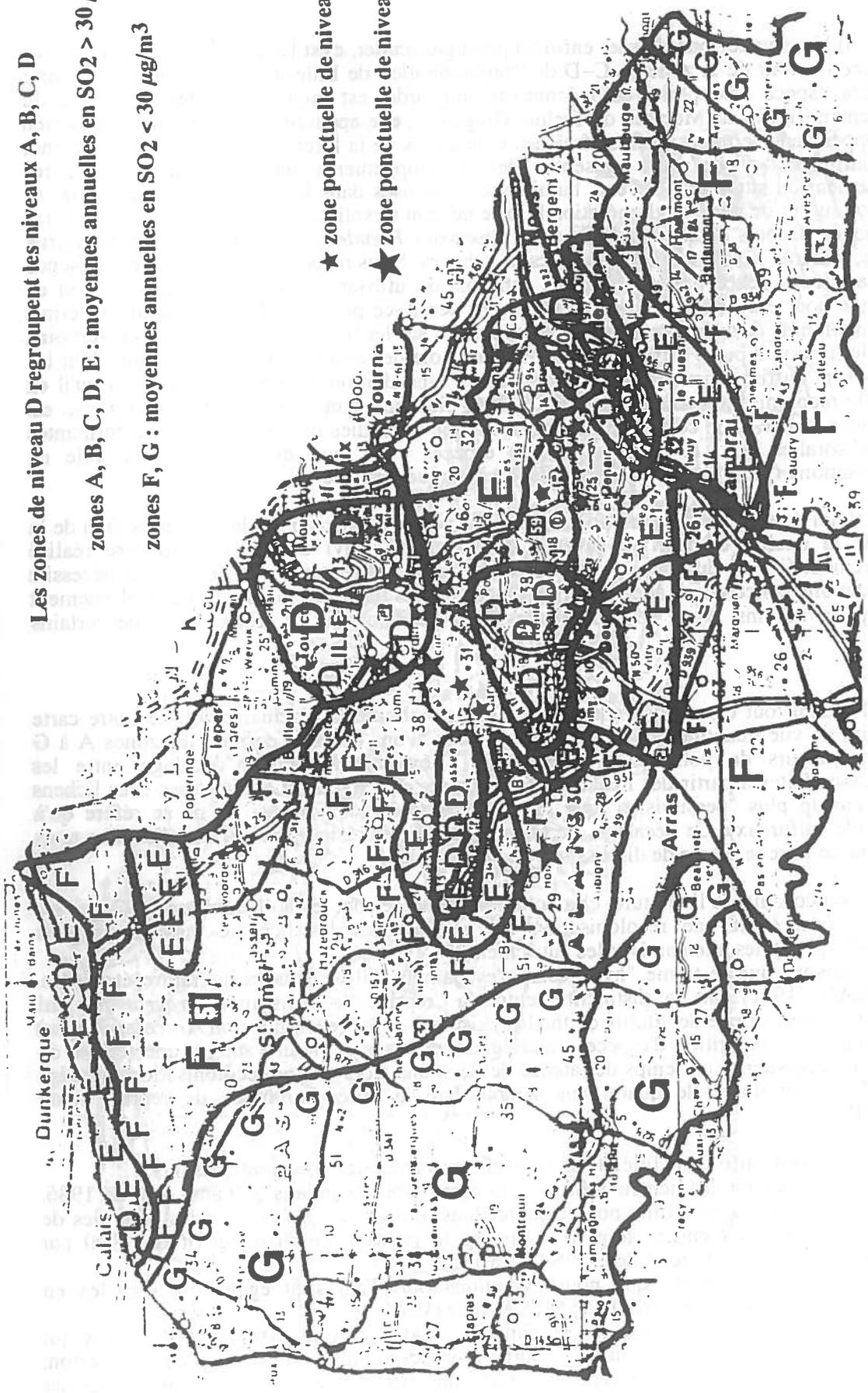
Les zones de niveau D regroupent les niveaux A, B, C, D

zones A, B, C, D, E : moyennes annuelles en SO<sub>2</sub> > 30 µg/m<sup>3</sup>

zones F, G : moyennes annuelles en SO<sub>2</sub> < 30 µg/m<sup>3</sup>

★ zone ponctuelle de niveau F

★ zone ponctuelle de niveau G



CARTE 2 : QUALITE DE L'AIR DANS LE NORD - PAS-DE-CALAIS EN 1992

6) Nous voudrions aborder enfin un point particulier, c'est l'apparition de *Pseudevernia furfuracea* autour de la zone B-C-D de l'agglomération de Lille-Roubaix-Tourcoing (carte 3). Cette espèce acidophile, collinéenne-montagnarde, est bien représentée dans l'est du département (forêts de Mormal, de Trélon-Glageon) ; elle apparaît sous forme de thalles bien développés dans certaines stations fraîches et humides de la forêt de Raismes-Saint-Amand, de Clairmarais ; elle peut présenter des développements importants sur des hêtres d'alignement en situations élevées, humides et venteuses dans le Boulonnais. Par contre, sa présence autour de notre agglomération lilloise ne peut s'expliquer uniquement sur des critères climatiques. Depuis quelques années nous observons *Pseudevernia furfuracea* sur les terrils miniers, à même le sol, sur de petits blocs de schistes. Nous nous demandons si cette présence n'est pas liée à l'exploitation minière ; autrefois on utilisait des Conifères (des sapins) de montagne pour étayer les galeries de mines, ne serait-ce pas ces arbres qui auraient permis l'implantation de cette espèce et son développement sur les terrils ? A partir de tels réservoirs, la recolonisation a pu se faire dans des zones en voie de restauration, sur des arbres dont les écorces sont suffisamment acides pour permettre l'installation de cette espèce. Quoi qu'il en soit cette recolonisation mériterait d'être étudiée plus finement : *Pseudevernia furfuracea* est une espèce isidiée et on considère généralement que les isidies ne sont pas aussi performantes que les soralies pour la propagation des espèces ; on leur attribue plutôt un rôle de recolonisation *in situ*, plus que de propagation à longue distance.

Voici donc les principaux points que nous voulions préciser sur la réactualisation de la carte de la qualité de l'air. A l'avenir, ce travail de suivi devrait pouvoir être réalisé régulièrement (il faut du temps et du "carburant" pour un tel travail !) ; mais cela nécessite également une concertation avec les organismes chargés de la gestion des arbres d'alignement et des parcs urbains. Nous nous proposons donc de demander le "classement" de certains arbres.

Pendant tout cet exposé nous n'avons jamais abordé la réactualisation de notre carte d'un point de vue quantitatif, c'est-à-dire que nous avons évité de corréler les zones A à G avec les valeurs de pollution. Actuellement il existe un complet décalage entre les observations faites à partir des lichens et les mesures effectivement enregistrées : les lichens sont beaucoup plus "pessimistes" que les capteurs (tout au moins si on ne se réfère qu'à l'anhydride sulfureux). Ce décalage, ce phénomène d'hystérésis, mérite d'être discuté ; nous voudrions en faire le thème de discussions de ce Séminaire.

Si on consulte la littérature, chronologiquement, ce sont les hollandais en 1972 qui, les premiers observèrent une recolonisation des milieux par les lichens, puis les anglais (GILBERT 1980), les allemands et les autrichiens.

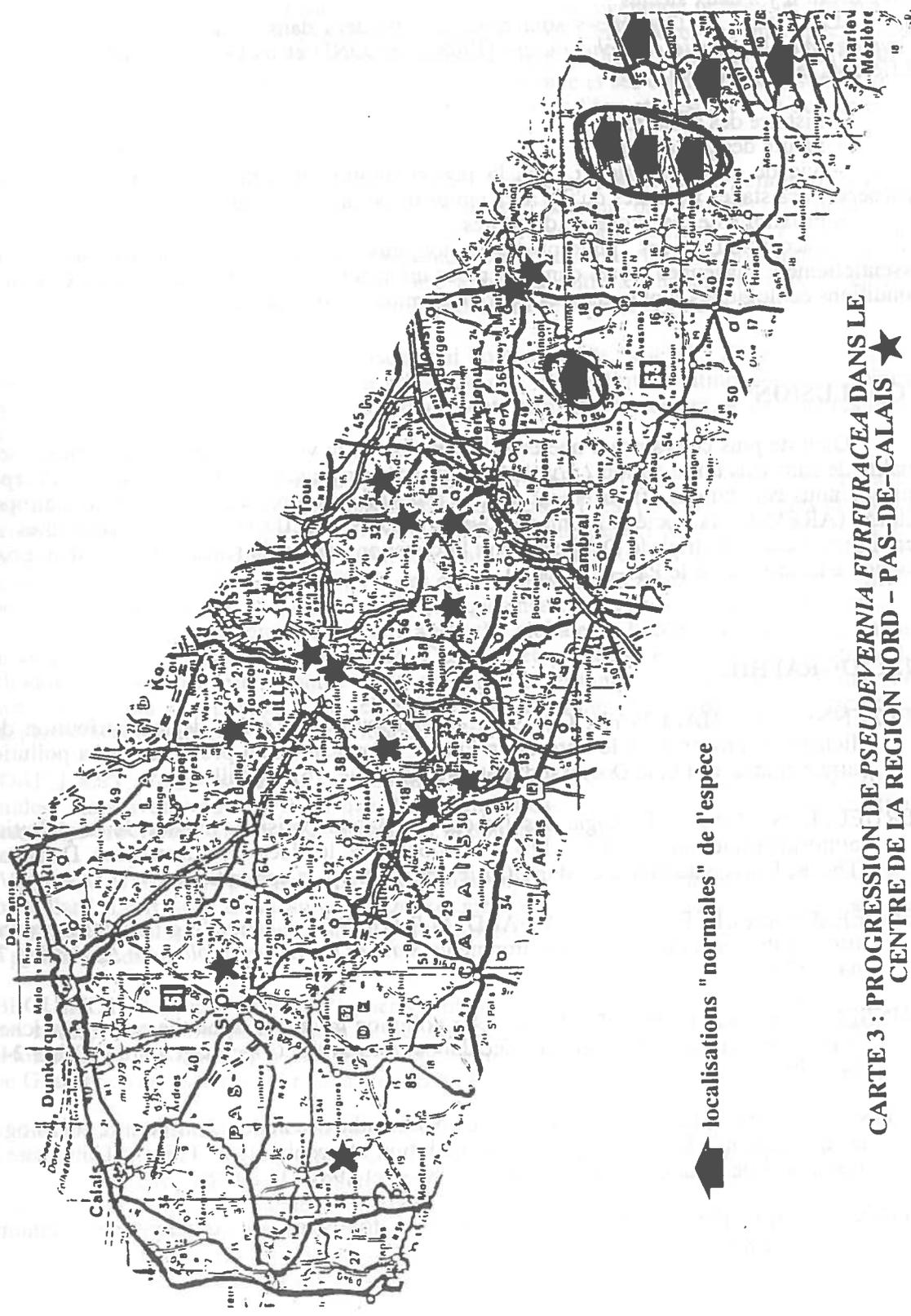
Précisons que le terme "hystérésis" n'est jamais utilisé dans la littérature étrangère. SHOWMAN (1981) fait la distinction entre la "reprise de croissance" (*regrowth*), qui correspond à une reprise de vitalité de thalles existants, et la "recolonisation" (*recolonisation*) correspondant à l'apparition d'espèces antérieurement absentes. Pour l'auteur, une reprise de croissance nécessiterait un temps de latence de deux ans alors qu'une recolonisation en exige le double. Cette durée de quatre ans semble être la durée minimale de reprise selon SEAWARD.

Toujours à partir de la littérature, nous citerons quelques points intéressants.

La réapparition des lichens foliacés à Londres (absents depuis 150 ans) date de 1986. A ce propos signalons qu'à Lille nous commençons à observer quelques stades juvéniles de foliacés, nous sommes encore loin de retrouver le paysage épiphyte décrit en 1900 par FOCKEU et encore moins celui de CUSSAC en 1865.

Les "sauts de zones" que nous évoquons plus haut sont également signalés en Grande-Bretagne par HENDERSON et SEAWARD (1978).

Les végétations épiphytes qui se réinstallent sont souvent différentes de celles qui existaient auparavant en raison soit de l'acidification des écorces, soit de leur eutrophisation, soit de modifications directement liées à l'activité industrielle locale. Nous voudrions préciser



← localisations "normales" de l'espece

**CARTE 3 : PROGRESSION DE PSEUDEVERNIA FURFURACEA DANS LE  
CENTRE DE LA REGION NORD - PAS-DE-CALAIS ★**

que la pollution atmosphérique a eu pour effet de banaliser la flore épiphyte. Les espèces qui réapparaissent, que ce soit à Dunkerque, Lille, Paris, Rouen ou Strasbourg, sont toutes identiques. Pour l'instant il n'est pas encore possible de retrouver les spécificités régionales. Les Anglais sont très pessimistes car ils pensent qu'on ne retrouvera jamais à Londres la flore qui existait il y a deux siècles !

Les causes de l'hystérésis sont rarement abordées dans la littérature. Dans la revue *Cryptogamie, Bryologie et Lichénologie* (1988), LEROND et moi-même avons analysé les différents facteurs en jeu :

- histoire des pollutions,
- nature des pollutions,
- vie de cette pollution : dans la région lilloise on aura d'autant plus de chances d'observer des stades juvéniles qu'il y aura moins de pointes de pollution,
- proximité de réservoirs de diaspores,
- accessibilité des phorophytes ; toujours à Lille, la recolonisation se fait essentiellement sur jeunes arbres dans des parcs urbains bien structurés, c'est-à-dire là où les conditions écologiques sont optimales pour la germination de diaspores.

## CONCLUSION

Quoi de plus convaincant que cette adaptation de la végétation aux changements de la qualité de l'air dans notre région ? L'utilité de cette démarche semble maintenant bien acceptée puisque nous collaborons efficacement avec le réseau de mesure de pollution de la métropole lilloise (AREMA), la société Péchiney Dunkerque, le CREID (Centre de recherches sur l'environnement industriel de Dunkerque) et l'Education Nationale (mise en place d'un projet d'action éducative dans le Pas-de-Calais).

## BIBLIOGRAPHIE

- DELZENNE-VAN HALUWYN, C., 1973. - Contribution à l'étude de la distribution des lichens épiphytes dans le nord de la France : application au problème de la pollution atmosphérique. Thèse Doctorat d'Etat en Pharmacie, 162 p., Lille.
- DERUELLE, S., 1983. - Ecologie des lichens du Bassin parisien. Impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO<sub>2</sub>, Pb) et relations avec les facteurs climatiques. Doctorate Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 360 p. et appendices.
- HENDERSON-SELLERS, A. et SEAWARD, M.R.D., 1979. - Modelling lichen reinvasion for monitoring-ameliorating environments *State of the Art in Ecological Modelling* 7 : 847-854.
- JOHNSEN, I. and SOCHTING, U., 1973. - Air pollution influence upon the epiphytic lichen vegetation and bark properties of deciduous trees in the Copenhagen area. *Oikos* 24 : 344-351.
- LEROND, M., 1981. - Les lichens épiphytes en Normandie orientale : distribution, sociologie et application à la cartographie de la pollution atmosphérique. Thèse d'Université à Université de Rouen. *Actes du Muséum* 1981-1 et 1981-2 : 295 p.
- SHOWMAN, R.E., 1981. - Lichen recolonization following air quality improvement. *Bryologist* 84 : 492-497.

## DISCUSSION

M.A. LETROUIT. Je voudrais aborder le problème de l'appauvrissement des groupements ; Claude ROUX a fait les mêmes observations sur l'étude de la végétation lichénique des arbres isolés quand un groupement est à sa limite. Ce sont toujours les espèces les plus spécifiques qui disparaissent en premier. La seconde remarque que je ferai concerne la qualité des écorces, car se pose le problème de l'imprégnation de l'écorce et ses capacités de restauration ; mais il y a aussi le fait que la qualité des écorces varie avec l'âge et c'est bien ce qu'a montré Isabelle LEGRAND dans sa thèse.

J. BEGUINOT. Si on prend l'exemple d'une forêt où se développe le *Parmelietum caperato-revolutae*, association plutôt hygrophile, s'il y a assèchement, on observera la perte des espèces les plus hygrophiles et l'appauvrissement va ressembler quelque peu à ce que l'on observe sous l'effet d'une pollution croissante. On n'aura pas forcément l'apparition de *Lecanora conizaeoides* mais il y aura une forte similitude entre le phénomène d'assèchement et celui de la pollution, on retombe alors sur le problème de séparer ces deux facteurs.

C. VAN HALUWYN. C'est une des raisons qui nous a incités, Michel LEROND et moi, à parler d'échelle de "qualité des milieux" plus que de pollution atmosphérique. Nous considérons que cette fragmentation des groupements globalise beaucoup de paramètres dont celui de la qualité de l'air.

K. AMMANN. Je parlerai de l'interaction climat local-pollution. Sur le plateau suisse, nous avons trouvé que l'assèchement n'est pas un facteur décisif. Il est possible que dans des pays continentaux comme la Pologne, RYDZACK avait raison de penser le contraire. Ici, dans les pays atlantiques où l'humidité est considérable, j'ai l'impression que la flore lichénique en est plus ou moins dépendante, parce qu'il y a des espèces atlantiques adaptées au climat humide. Alors si cette humidité manque, cela signifie quelque chose, mais en Suisse c'est différent.

Ce qui m'a impressionné, c'est cette approche globale de l'école lilloise et cette façon dont vous travaillez depuis deux décennies. C'est une étape décisive, tout le reste, comme la méthodologie, ce n'est rien contre cette stratégie persistante de faire des travaux, de convaincre les pouvoirs publics, c'est l'élément le plus important. On n'a pas encore discuté de cela, j'aimerais bien aborder cet aspect tout à l'heure.

O. DAILLANT. Vous insistez sur le pouvoir filtrant de la pollution atmosphérique des zones humides, mais avez-vous envisagé que dans certains cas on puisse assister à une situation inverse : les brouillards ont un effet négatif sur la pollution acide ?

C. VAN HALUWYN. A proximité de Lille (à Carvin), il existe une station de recherches sur le brouillard. Le Réseau de mesures de Dunkerque nous avait demandé d'y travailler sur les lichens. Malheureusement dans ce site il y a très peu de phorophytes et quand il y en a, il y a très peu de lichens.

J. BEGUINOT. Pourquoi ne pas imaginer simplement que les réserves de diaspores dans les zones humides sont simplement liées au fait que ce sont des zones humides ? Si on compare aux forêts, il est évident que si c'est une forêt ancienne, en plein cœur de la forêt, on aura une zone G, alors qu'en lisière on aura une zone D ou E, l'effet lisière étant surtout lié à l'humidité.

M. LEROND. Je rejoins K. AMMANN : en la matière il ne faut pas faire d'idéologie. Il est évident qu'un facteur écologique peut conditionner la présence ou l'absence des lichens plus que la pollution elle-même. Le problème n'est pas là, le problème qui se pose est un problème d'échelle géographique sur laquelle on travaille. Si on travaille à une échelle suffisamment importante, on peut pondérer les résultats inhérents à l'effet lisière, aux effets des zones humides. A l'inverse, si on travaille sur un micro-espace où se trouve une zone humide, il est évident que les résultats seront difficiles à interpréter. En matière de bioindication il y a une échelle spatiale qui n'est pas toujours la même, très difficile à définir et très dépendante de la situation dans laquelle on se trouve ; c'est ce que j'appelle une "spécificité régionale".

K. AMMANN. Je vais vous présenter un exemple qui va vous montrer que c'est inutile de discuter de cela. Comment voulez-vous séparer le facteur humidité de la pollution depuis les résultats de M. STUMPF de Zürich ? Il a soigneusement mesuré la diamètre des gouttelettes et a trouvé une corrélation inversement proportionnelle entre le diamètre des gouttelettes et leur concentration en polluants : si on a un assèchement le diamètre diminue, mais la concentration augmente, donc la toxicité augmente. C'est très complexe, tous les facteurs jouent en synergie.

J. DORGÉLO. Quelques remarques :

1) Le fait de travailler exclusivement sur des arbres isolés fait que dans une région comme la miemie, entièrement forestière, je ne peux rien faire. Or, il faut toujours faire avec ce que l'on a.

2) En ce qui concerne l'impact de la gestion forestière, il est très important. Je prendrai l'exemple du massif ardennais coupé en deux par la frontière franco-belge. La gestion forestière est totalement différente de part et d'autre de cette frontière : côté belge, c'est la futaie jardinée, tandis qu'en France, on pratique la coupe à blanc. Les végétations lichéniques ne se ressemblent pas du tout. A priori on aurait l'impression que le côté français serait très pollué et que le côté belge ne le serait pas, ce qui est un non sens.

3) En ce qui concerne la recolonisation. Dans une étude faite sur la ville de Revin (petite ville du département des Ardennes), on a constaté également que la recolonisation lichénique ne se fait que sur des jeunes arbres. S'ils n'existent pas, il faut regarder les jeunes branches. Nous avons également constaté l'influence de la Meuse qui traverse la ville.

S. DERUELLE. En ce qui concerne le travail réalisé à Arras en 1981 par M. SENECOT, Professeur de Sciences Naturelles, je voudrais savoir si cette personne a été capable de déterminer tous les lichens présents dans les différentes stations.

C. VAN HALUWYN. Melle DUCHATELET et moi-même devons rencontrer M. SENECOT, consulter ses documents et nous rendre compte de leur éventuelle utilisation pour une étude de suivi.

*(Au moment où nous imprimons les textes de ce Séminaire, nous avons rencontré Monsieur SENECOT. Avec lui nous avons fait l'inventaire des stations visitées par les élèves en 1981 ; elles existent pratiquement encore toutes. Certes on ne pourra pas attacher trop d'importance au nombre d'espèces, par contre les données concernant le pourcentage de recouvrement sur le tronc sont parfaitement utilisables pour une comparaison).*

S. DERUELLE. On parle de recolonisation de "plantules" (1) le problème est de savoir si on dépasse le stade de "plantules" : se développent-elles pendant deux ou trois mois, voire six mois puis disparaissent-elles ? Ce n'est pas nouveau, on sait très bien que quand c'est très pollué, des thalles se développent à partir des sorédies ou des isidies pendant un certain temps, puis disparaissent. Peut-on dire qu'il y a une recolonisation parce que les plantules sont là ? Est-ce que les plantules vont poursuivre leur développement et peut-on en tenir compte dans les travaux de cartographie ?

C. VAN HALUWYN. Le suivi que je réalise sur la Communauté Urbaine de Lille est fait pratiquement mois par mois, donc j'ai pu voir le va et vient de ces thalles juvéniles. Certains apparaissent, d'autres disparaissent, mais il y a toujours une présence constante de "plantules" sur le tronc.

S. DERUELLE. Mais est-ce une raison pour dire que c'est moins pollué ? Car justement l'effet de la pollution c'est d'empêcher les plantules de dépasser un certain stade de développement.

(1) Nous sommes d'accord avec S. DERUELLE, le terme de plantules n'est pas approprié pour les lichens, nous emploierons désormais le terme de "stades juvéniles".

C. VAN HALUWYN. On répondra à cette question quand on aura accumulé suffisamment de données.

M. LEROND. Dans la région de Rouen, je ne pense pas répondre en ce qui concerne les placettes de recolonisation car il n'y a pas eu de suivi suffisamment rigoureux et long pour pouvoir répondre à la question : les plantules arrivent-elles ou non en stade adulte ? Je n'ai donc pas tiré de conclusions, j'ai seulement parlé de la méthodologie et du protocole.

C. VAN HALUWYN. Il faut quand même souligner qu'il y a des sites où il n'y a aucun stade juvénile et d'autres où le va et vient de très jeunes thalles est incessant. Ce qui veut dire que, dans certains sites, les soralies ou les isidies sont capables de germer alors que cette germination devient impossible dans d'autres en raison des conditions qui y règnent.

On est donc en droit de comparer les sites entre eux. Si en plus nous pouvons montrer, comme nous l'avons fait, qu'il existe une corrélation avec les pointes de pollution, je pense qu'on démontre quelque chose.

SCHUSTER (1985) propose d'utiliser le développement de ces stades juvéniles comme une autre possibilité de l'estimation de la pollution atmosphérique.

K. AMNANN. Je voudrais insister encore une fois sur la complexité de la situation. Nous aussi, en Suisse, avons établi un protocole d'observation permanent des petites branches d'épicéa.

M. LEROND. Sur les placettes en milieu ouvert suivies depuis dix ans entre Rouen et le Havre, j'observe un phénomène de recolonisation dans la mesure où, depuis la carte initiale de 1981, des "plantules" sont apparues à partir de 1984-1985 et on arrive maintenant à une végétation lichénique bien développée (station de Grand Couronne).

S. DERUELLE. Ma question était de savoir si une plantule de *Parmelia caperata*, apparue en 1985 et qui a aujourd'hui 5 cm, a été ou non remplacée par une autre.

C. VAN HALUWYN. Si chacun de nous réalisait dans sa région des études de suivi selon un protocole rigoureux et si possible standardisé, on progresserait certainement dans la connaissance du comportement des stades juvéniles en milieu urbain.

M.A. LETROUIT. Le phénomène de mort de germinations de lichens est très général. La pollution ne leur permet pas de vieillir ; elles meurent plus ou moins jeunes. C'est une question qui à l'heure actuelle mérite d'être approfondie.

K. AMMANN. On ne connaît pas encore tout sur les modalités de propagation des lichens, je suis persuadé que nous aurons encore beaucoup de surprises dans les années à venir.

J. ASTA. A propos de la germination des éléments végétatifs, je connais peu de choses, mais il y a quelques années, avec Gladys BELANDRIA, nous avons essayé de faire germer des spores de lichens dans des milieux contenant des polluants à des concentrations différentes (SO<sub>2</sub> et fluor). En prenant quelques espèces de sensibilité différente à la pollution, on a bien vu que la teneur du polluant était très importante. En supposant que les lichens sur les écorces se replantent par les moyens de la reproduction sexuée, il y a quand même au niveau du milieu des conditions qui sont rencontrées, puisque les écorces ont été transformées, qui jouent un rôle essentiel sur la non recolonisation. On pourrait étudier en laboratoire le devenir de ces plantules.

Une remarque concerne les observations faites sur *Pseudevernia furfuracea*. Tout récemment, avec une étudiante nous avons conduit des travaux sur l'impact de la pollution diffuse à longue distance sur la végétation lichénique. Nous voulions voir s'il y avait des réactions sur *Hypogymnia physodes* et *Pseudevernia furfuracea*. En fait, dans notre région *Pseudevernia furfuracea* et d'autres espèces n'ont pas de réaction significative, excepté *Hypogymnia physodes* qui manifestement semble se développer sur des écorces plus acides.

J. BEGUINOT. Dans ma région, *Parmeliopsis ambigua* n'avait jamais été noté par les lichénologues du siècle dernier, par contre il est actuellement en abondance sur hêtre. *Pseudevernia furfuracea*, qui n'est pas très fréquent dans nos forêts, semble l'être plus sur les platanes de la ville du Creusot.

A. BELLEMERE. Ne serait-ce pas en relation avec des hivers froids et des étés très ensoleillés ?

C. VAN HALUWYN. Quand on lit un des derniers bulletins de la *British Lichen Society*, on s'aperçoit que les Anglais envisagent la possibilité d'utiliser certaines espèces pour mettre en évidence un réchauffement du climat (ex. *Teloschistes* progresse).

J. ASTA. Dans les Alpes, *Pseudevernia furfuracea* n'est jamais terricole, par contre en Scandinavie il l'est.

C. VAN HALUWYN. Il faut rappeler que le terril minier n'est pas une zone froide loin s'en faut !

A. BELLEMERE. La disparition de "plantules" ne pourrait-elle pas aussi être en relation avec les tempêtes très brutales qu'on a connues ces dernières années ?

O. DAILLANT. En Bourgogne, *Pseudevernia furfuracea* et *Hypogymnia physodes* semblent se développer particulièrement bien sur des Douglas malades.

S. DERUELLE. *Pseudevernia furfuracea* est présent presque partout dans la région parisienne.

Autre remarque : je suis choqué par le brossage du petit carré sur l'arbre lors de l'établissement d'une placette de suivi car on perturbe le processus de recolonisation.

M. LEROND. Ce protocole a été mis au point avec C. VAN HALUWYN et M. SEAWARD. Très précisément, c'est M. SEAWARD qui a proposé qu'on introduise dans notre protocole un arbre sur trois, brossé sur une petite surface (1 dm<sup>2</sup>) comme il le fait en Grande-Bretagne. Cela permet d'avoir un stade complètement neuf et d'éliminer tout ce qui est inhérent à la situation antérieure. Mais nous ne prétendons pas que cela soit d'une nécessité impérative.

En matière de bioindication il me semble qu'il y ait deux choses essentielles :

1) Quand on fait de la bioindication à partir de lichens on fait de la lichénologie, mais on fait aussi de l'écologie. On observe, on mesure et surtout on interprète.

2) Plus on avance, plus les questions se posent.

Il faut absolument adopter un protocole pour pouvoir comparer des situations sur des bases comparables.

K. AMMANN. La vraie chance de la bioindication est l'approche intégrale du phénomène, ce qui n'est pas possible avec les méthodes physico-chimiques. C'est le grand intérêt de travailler avec les organismes vivants. Il ne faut surtout pas prétendre vouloir être aussi exact que le chimiste ou le physicien. Dans toutes les discussions au sujet de la bioindication, on retrouve toujours des propos réductionnistes. Il faut voir les choses comme elles sont et nous avons la chance, nous, de voir les choses dans leur intégralité.

J. DORGELO. Je suis très heureux de ces discussions. On a toujours objecté aux biologistes qu'ils n'avaient pas d'épistémologie propre, qu'ils l'empruntaient aux physiciens. Je ne peux que me féliciter d'entendre parler d'une épistémologie de la vie.

J. ASTA. Autre remarque en ce qui concerne les sauts de zones. Sur le campus de l'Université de Grenoble, peu de crustacés mais des foliacés et surtout des thalles d'Usnées de 2 à 3 cm. Je me pose des problèmes quant à leur comportement par rapport à la pollution.

C. VAN HALUWYN. C'est un phénomène que j'observe également. En 1973, au moment de ma thèse, la pollution atmosphérique était surtout gascuse. Les lichens foliacés et fruticuleux



## PTERIDOPHYTES SAXICOLES ET POLLUTION DANS LE BASSIN MINIER DU PAS-DE-CALAIS

Jean-Patrice MATYSIAK  
20, rue Ferrer  
F-62220 CARVIN

Cette étude a été entreprise après la lecture d'un article de J.-R. WATTEZ (1979) intitulé *Un groupe de bioindicateurs végétaux méconnus : les Ptéridophytes. Application à la répartition des Fougères rupicoles dans le nord de la France.*

Il s'avère que les Fougères, notamment les *Asplenium*, sont sensibles à un certain taux de pollution et peuvent ainsi servir de bioindicateurs dans des régions où l'analyse par les lichens est difficile du fait de l'absence de phorophytes. J.-R. WATTEZ rappelle, entre autres, les travaux de R.-M. PAYNE (1978) et présente ses propres résultats pour le nord de la France : il compare la répartition d'*Asplenium ruta-muraria* dans des villages du Pas-de-Calais et de la Somme à celle de villes telles que Montreuil-sur-Mer, Saint-Omer, Arras, Boulogne, Lille. D'après lui, *Asplenium ruta-muraria* est nettement plus rare dans les villes.

Le bassin minier, fortement peuplé et industrialisé, est tout indiqué pour une telle étude. Les inventaires floristiques ont été faits durant l'été 1991 dans 32 communes : de Carvin au nord à Hénin-Beaumont et Douai au sud, de Noyelles-sous-Lens à l'ouest à Raches à l'est, ce qui représente une superficie d'environ 300 km<sup>2</sup> (carte 1).

### I. METHODE

C'est avant tout *Asplenium ruta muraria* qui est utilisé comme bioindicateur. En effet, cette Fougère est, normalement, très commune dans la région et se rencontre aisément sur les vieux murs, c'est-à-dire des murs ayant environ un siècle, voire moins. Le fait qu'*Asplenium ruta muraria* soit très commun n'implique pas qu'il se trouve sur chaque vieux mur ; on peut, tout au plus, dire qu'il est possible qu'il y soit. Il faut donc raisonner en terme de fréquence, et examiner le plus grand nombre de murs possibles.

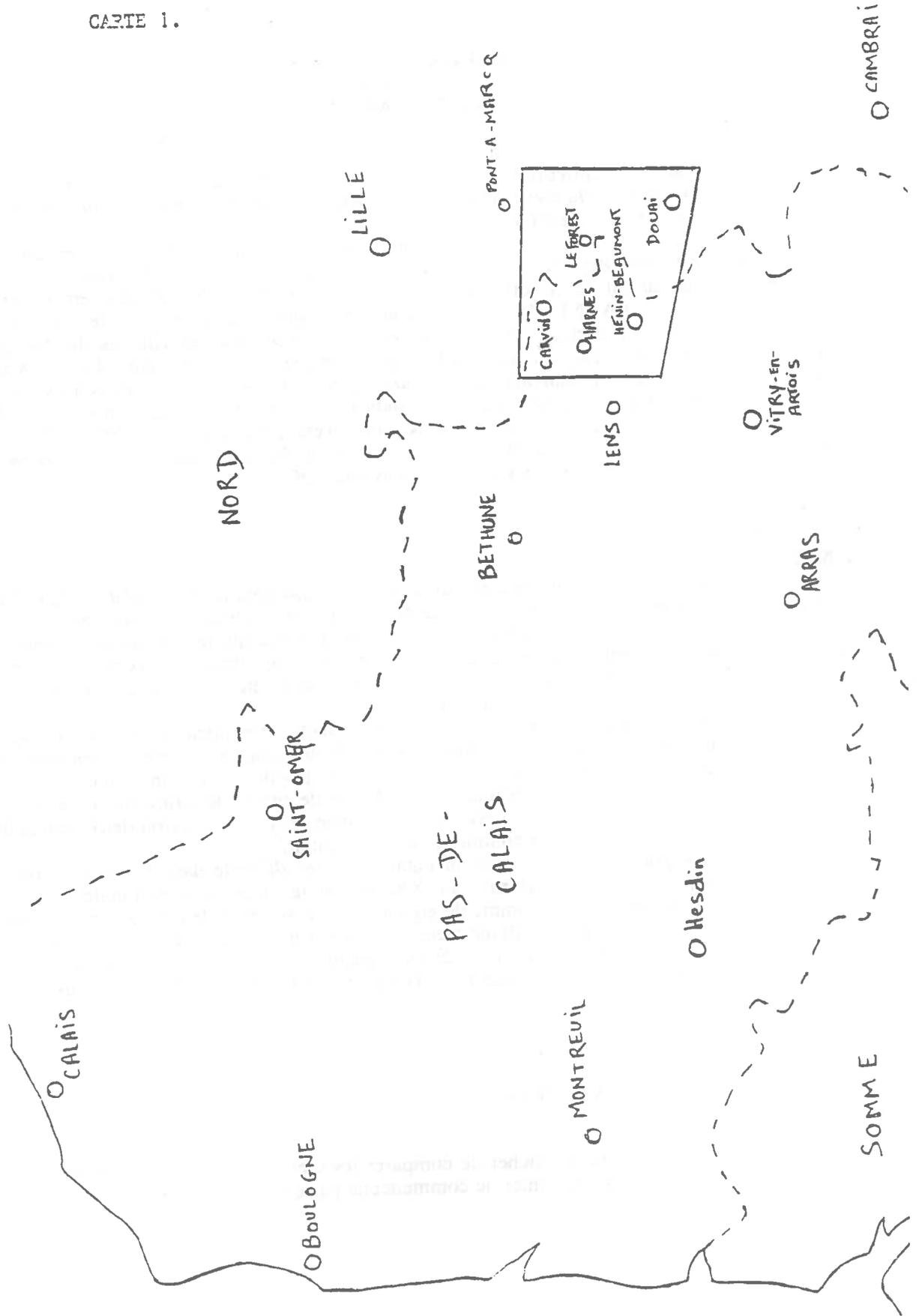
Les inventaires ont été faits à pied, en examinant notamment les églises et leurs environs, les gares et leurs quais, les fermes, les abords des canaux, les murs d'enceinte de propriétés, notamment ceux situés le long des "voyettes" ("voyette" est un terme du patois local désignant un sentier situé en pleine ville et bordé de murs, de haies, etc.), les vieux corons, les cimetières. Cela représente, pour une commune moyenne, environ deux heures de marche et cinq heures pour une ville comme Hénin-Beaumont.

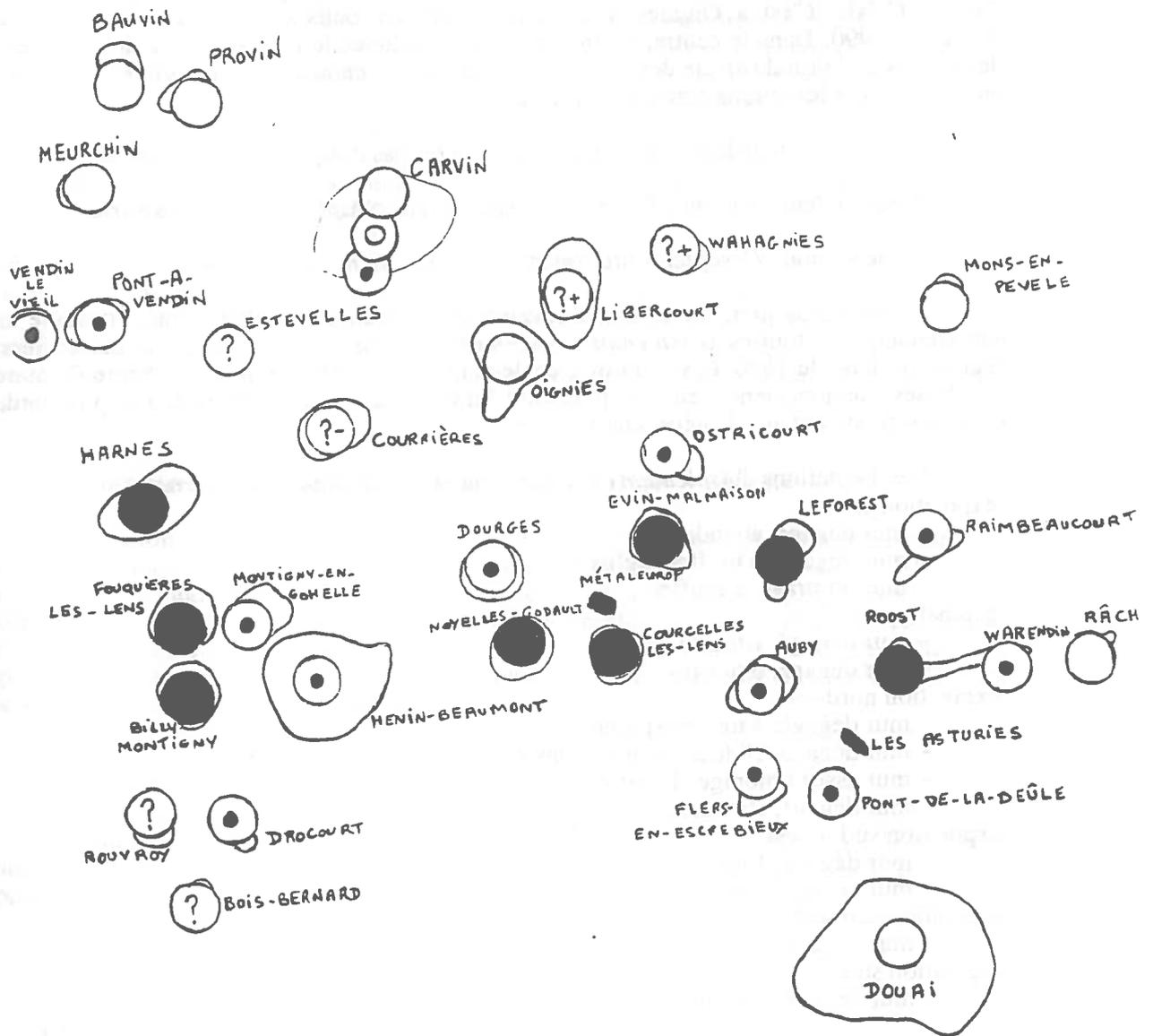
A priori, on pourrait penser qu'un inventaire est très difficile dans le bassin minier, celui-ci ayant été fortement transformé au XX<sup>ème</sup> siècle. Vues des nationales ou des autoroutes, les villes apparaissent comme de gigantesques ensembles de corons. En fait, dans la grande majorité des cas, l'ancien village a été, au moins partiellement, conservé et possède encore un bon nombre de vieux murs. Seules quelques agglomérations ont posé des problèmes ; elles sont marquées, sur la carte 2, d'un point d'interrogation et seront analysées à part.

### II. RESULTATS VILLE PAR VILLE

Comme on pourrait me reprocher de comparer les vieux villages de l'Avesnois et de l'Hesdinois à des villes du bassin minier, je commencerai par une ville où la situation apparaît plus normale. Il s'agit de :

CARTE 1.





-  commun - très commun
-  rare - très rare
-  absent

1/100000<sup>e</sup>

CARTE 2. REPARTITION ET FREQUENCE D'*ASPENIUM RUTA MURARIA*

## 1. Oignies : ville exemplaire

C'est à Oignies qu'en 1841 du charbon a été découvert pour la première fois dans le Pas-de-Calais. C'est à Oignies qu'a fermé le dernier puits de mine de la région, le 21 décembre 1990. Dans le centre, on trouve encore quelques fermes ainsi que des bâtiments et des coronas de la fin du siècle dernier. J'ai commencé l'inventaire à une extrémité de la ville, en laissant de côté les coronas construits après 1930.

1ère station : quelques touffes de *Sedum acre*, pas d'*Asplenium ruta-muraria*

2ème et 3ème stations : *Linaria cymbalaria*, pas d'*Asplenium ruta-muraria*

4ème station : *Dryopteris filix-mas*, pas d'*Asplenium ruta-muraria*.

Un peu plus loin, sur le mur d'enceinte d'un vieux coron abandonné, j'observe enfin une trentaine de touffes d'*Asplenium ruta-muraria*. Puis, de nouveau, sur deux murs de l'église qui date de 1840, et sur un mur également proche. Après une demi-heure de marche, les choses s'annonçaient bien. J'ai poursuivi l'inventaire ; une heure et demie plus tard, 10 stations s'ajoutaient aux 4 précédentes.

Les 14 stations d'*Asplenium ruta-muraria* se décomposent comme suit :

- . exposition est :
  - mur dégagé, abondant
  - mur dégagé, 3 touffes (église)
  - mur ombragé, 1 touffe
- . exposition nord :
  - mur dégagé, 1 touffe (église)
  - mur dégagé, 6 touffes
- . exposition nord-est :
  - mur dégagé, 4 touffes (pignon)
  - mur dégagé, 10 touffes (mur rénové)
  - mur assez ombragé, 1 touffe
  - mur dégagé, abondant
- . exposition sud-ouest :
  - mur dégagé, 1 touffe
  - mur dégagé, abondant
- . exposition sud-est :
  - mur dégagé, 5 touffes
- . exposition sud :
  - mur dégagé, 1 touffe

(par mur dégagé, j'entends un mur exposé directement aux vents et je l'oppose à un mur ombragé -par des arbres- ou abrité -par un autre mur-).

D'autre part, j'ai noté, avec ou sans *Asplenium ruta-muraria*, 4 stations à *Linaria cymbalaria*, 3 stations à *Dryopteris filix-mas*, 4 stations à *Chelidonium majus*, 1 station à *Asplenium trichomanes*. Je laisse de côté les murs ne présentant pas de végétation qu'au sommet, et n'en ayant pas sur leurs parois.

Tous ces éléments sont riches d'enseignements : on s'aperçoit qu'*Asplenium ruta-muraria* n'est pas difficile à trouver, que sa répartition est régulière, qu'il est peu exigeant quant à ses stations (orientations diverses, murs dégagés ou non) et qu'il est plus commun que des plantes comme *Dryopteris filix-mas* ou *Linaria cymbalaria*. Le nombre de pieds, pour une même exposition, est très variable.

Oignies n'est pas un village de campagne, mais *Asplenium ruta muraria* y est tout aussi fréquente. La plupart des communes examinées ensuite comportent un nombre égal, voire supérieur de vieux murs.

## 2. Hénin-Beaumont

Cette ville ne manque pas de vieux murs, mais je n'y ai trouvé que 2 stations à *Asplenium ruta-muraria*, en centre ville, dans des petites cours entourées de murs.

D'un autre côté, j'ai noté 8 stations à *Dryopteris filix-mas*. Le rapport *Asplenium ruta-muraria*/*Dryopteris filix-mas* est donc l'inverse de celui établi à Oignies. Cela montre à quel point *Asplenium ruta-muraria* pourrait être abondant sans pollution atmosphérique.

D'où provient celle-ci ? Hénin-Beaumont se trouve à l'est d'une vaste zone fortement urbanisée et industrialisée comprenant Mazingarbe, Bully-les-Mines, Liévin, Lens, Avion, etc. ; de plus, au sud d'Hénin-Beaumont, se trouve un nombre important d'usines. Or, les vents d'ouest et du sud sont dominants...

A noter une curieuse station à *Asplenium trichomanes* à la sortie d'Hénin-Beaumont, au pont passant sous la voie ferrée, sur la nationale 43. Il y passe un nombre important de voitures, ce qui ne semble pas gêner *Dryopteris filix-mas*. Si l'on regarde à l'intérieur d'une petite fente (orientée est-nord-est), large de 3 cm et profonde d'environ 20 cm, on a la surprise de voir, après que l'oeil se soit habitué à l'obscurité, 6 pieds d'*Asplenium trichomanes* d'une dizaine de cm. Les mouvements d'air sont très restreints à l'intérieur de la fente, et ceci a sans doute permis l'installation de cet *Asplenium*.

## 3. Fouquières-les-Lens, Montigny-en-Gohelle, Billy-Montigny

La situation est identique à celle d'Hénin-Beaumont : au total, 8 stations à *Dryopteris filix-mas*, 5 stations à *Linaria cymbalaria* et 1 seule, à Montigny-en-Gohelle, à *Asplenium ruta-muraria*. Il s'agit de 5 touffes exposées au sud-ouest, sur un mur dégagé, mais qui était encore abrité en 1990 (le mur situé juste en face a été abattu). Il sera donc intéressant de suivre l'évolution de cette station : normalement, *Asplenium ruta-muraria* ne craint pas l'exposition sud-ouest ; mais il va être maintenant directement exposé aux vents. Il faudra donc voir s'il va résister à la pollution ou s'il va disparaître.

## 4. Harnes

La situation n'est pas meilleure : 4 stations à *Linaria cymbalaria*, 3 à *Chelidonium majus*, 1 à *Dryopteris filix-mas*. Il faut parcourir 3 km vers le nord-ouest pour que réapparaisse timidement *Asplenium ruta-muraria*.

## 5. Pont-à-Vendin et Vendin-le-Vieil

Chacune de ces villes possède sa station à *Asplenium ruta-muraria*.

Pont-à-Vendin : 22 touffes sur un mur dégagé, en face nord, auxquels viennent s'ajouter 3 pieds de *Polypodium vulgare*.

Vendin-le-Vieil : sur l'église qui date de 1920 : 1 touffe (frondes de 2 cm maximum) en face nord-ouest et 9 pieds plus vigoureux en face nord.

Plus au nord, à Meurchin, Bauvin, Provin, la situation redevient normale.

## 6. Drocourt

Deux stations distantes l'une de l'autre d'une dizaine de mètres à signaler dans ce village situé au sud d'Hénin-Beaumont : une en face sud-est (1 pied vigoureux) et une en face sud-ouest (14 pieds), dans les deux cas sur des murs dégagés.

On s'aperçoit ainsi qu'*Asplenium ruta-muraria* réapparaît en "tournant le dos" à la pollution : en orientation nord et nord-ouest à Pont-à-Vendin et Vendin-le-Vieil, en orientation sud-est et sud-ouest à Drocourt. Au coeur même d'Hénin-Beaumont, il s'abrite dans des petites cours fermées et abritées.

## 7. Carvin

Les stations à *Asplenium ruta-muraria* ont été portées dans le détail sur la carte 3. Le trait noir cerne la partie de Carvin comportant des vieux murs. Mes commentaires sont les suivants :

- *Asplenium ruta-muraria* est rare dans la partie sud. La station 1 est intéressante. 12 touffes d'*Asplenium ruta-muraria* poussent sur un mur en exposition sud-sud-ouest. Mais on s'aperçoit qu'elles ne sont présentes que sur 3 mètres, à l'abri d'un bâtiment situé juste en face. Pas un seul pied n'est observé sur le reste du mur qui mesure au total 30 cm de longueur.

- Les stations de Carvin centre se trouvent dans une "volette" qui longe l'artère principale. Ici encore, dans les stations abritées, *Asplenium ruta-muraria* devient moins rare.

- Ce n'est qu'au nord qu'on le trouve en exposition sud, sur un mur dégagé. A signaler, également dans cette partie de Carvin, *Asplenium trichomanes* (1 pied en face nord sur un mur dégagé) et *Asplenium scolopendrium* dans le puits d'une maison datant du début du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cet *Asplenium* disparaît peu à peu, sans doute à cause des travaux de soudure régulièrement effectués au-dessus du puits ; quant à *Dryopteris filix-mas*, il n'en souffre pas et gagne même du terrain ! Il y avait également une station à *Asplenium adiantum-nigrum*, jusqu'en août 1991. Mais le mur a été rénové.

On peut donc dire qu'*Asplenium ruta-muraria* est R dans le sud de Carvin, AR-AC dans le centre et C dans le nord. Cette ville est visiblement touchée par une pollution venant du sud. La cause peut en être l'ancienne centrale de Courrières, maintenant utilisée pour brûler des déchets.

Envisageons maintenant les environs de Métaleurop, une usine qui traite les métaux lourds.

## 8. Evin-Malmaison et Courcelles-les-Lens

Le centre d'Evin-Malmaison a un aspect très rural. Les vieux murs n'y manquent pas. La pauvreté de la végétation saxicole en est d'autant plus frappante. Aucune station à *Asplenium ruta-muraria*. Aucune station à *Linaria cymbalaria*, *Dryopteris filix-mas* lui-même est en difficulté : 1 pied à la sortie nord de la ville, en exposition est ; 1 pied sous une gouttière, dans une ferme, 3 pieds entre deux murs espacés de 30 cm, 1 pied de petite taille sur un mur en face est, découvert en juillet, mort en septembre, 1 pied, également de petite taille composé d'une seule fronde (les autres frondes étant mortes), découvert en juillet, mort en septembre. Le seul qui semble tenir sur les parois est *Chelidonium majus*. Je l'ai cependant également vu en difficulté sur un mur à la sortie sud de la ville, face à Métaleurop. En juillet, sur 8 plantules, 4 étaient mortes et 3 dépérissaient (apparition de taches brunes sur les feuilles). En septembre, toutes étaient mortes... mais 2 nouvelles plantules étaient apparues !

Les sommets de murs sont également très pauvres : seuls croissent *Erigeron canadensis*, *Poa annua*, *Senecio vulgaris*, *Sedum acre*, *Cheiranthus cheiri*, *Crepis capillaris*.

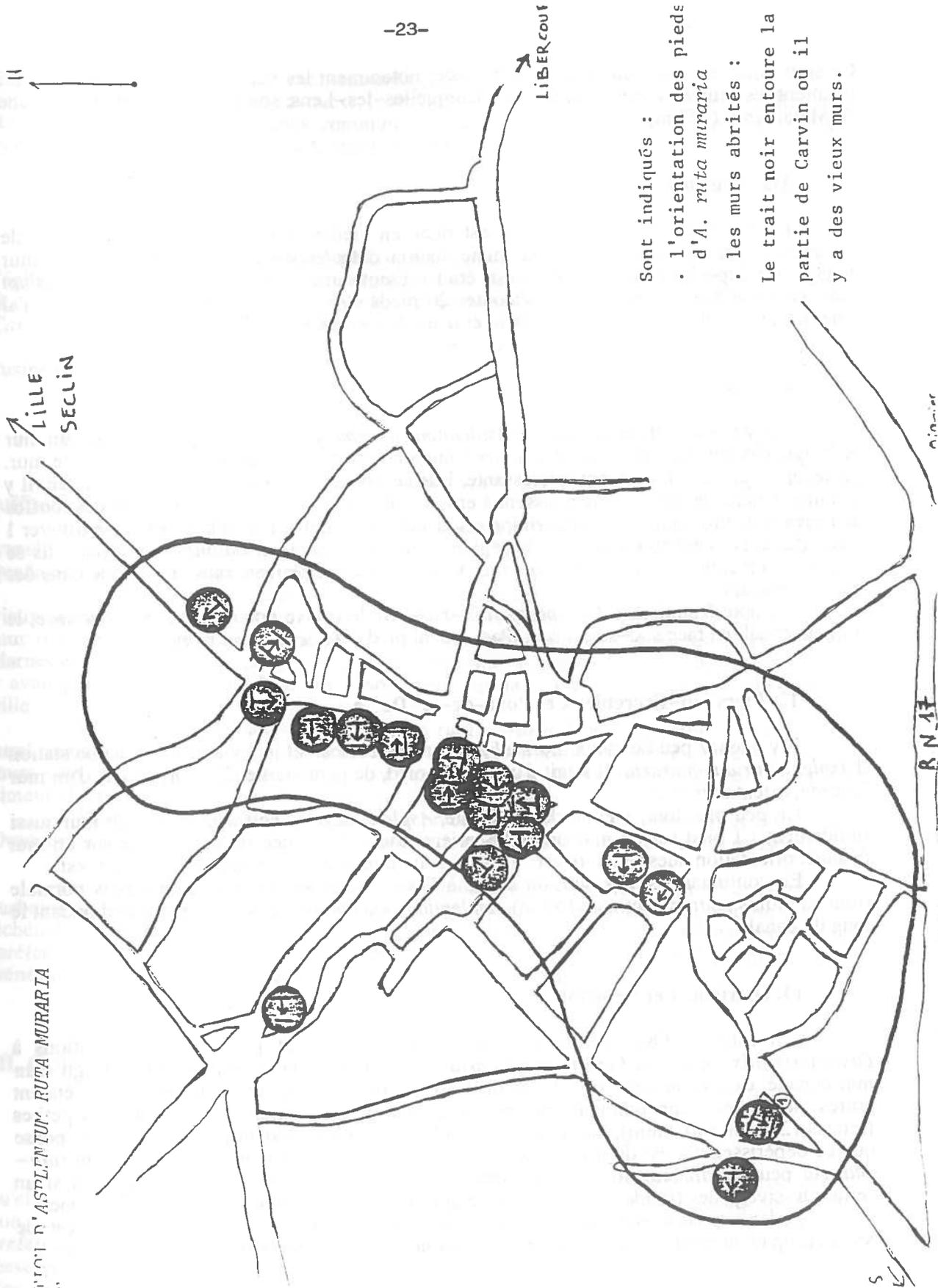
Je me suis ensuite dirigé vers Courcelles-les-Lens en longeant l'usine Métaleurop. Le long de la route, on trouve de nombreux pieds d'une Crucifère caractéristique des sols calaminaires : *Arabis halleri* (= *Cardaminopsis halleri*). *Armeria maritima* ssp. *halleri* se trouve également dans les environs. Il y a moins de vieux murs à Courcelles-les-Lens, mais, d'après ce que j'ai pu voir, la situation est la même qu'à Evin-Malmaison.

## 9. Noyelles-Godault

Toujours pas d'*Asplenium ruta-muraria* à Noyelles-Godault, mais les murs y ont un meilleur aspect : 5 stations à *Dryopteris filix-mas* sur des murs dégagés ; *Linaria cymbalaria* réapparaît ; au sommet des murs, on retrouve *Bromus sterilis*, *Bromus mollis*, *Papaver dubium*, *Veronica arvensis*, *Arenaria serpyllifolia*, *Poa compressa*, ..., des plantes considérées comme communes, mais que je n'ai pas vues à Evin-Malmaison et Courcelles-les-Lens. J'ai fait en une seule journée l'inventaire de ces trois villes, et le contraste fut net.

Evin-Malmaison et Noyelles-Godault sont à égale distance (1,5 km) de Métaleurop.

CAPTE 3. *FRAGMENTUM D'ASPLENTIUM RUTA MURARIA*  
/ CARVIN



Sont indiqués :

- l'orientation des pieds d'*A. ruta muraria*
  - les murs abrités :
- Le trait noir entoure la partie de Carvin où il y a des vieux murs.

Ce sont donc les vents qui font la différence, notamment les vents supérieurs à 10 m/s qui rabattent les fumées vers le sol. Quant à Courcelles-les-Lens, son centre ville est très proche de Métaeurop (750 m).

### 10. Dourges

Encore une ville dont le centre est riche en vieilles maisons. Après deux heures de recherches, j'ai fini par trouver une riche station d'*Asplenium ruta-muraria*. Sur un mur dégagé, en exposition nord-nord-ouest, était présente une centaine de touffes d'*Asplenium ruta-muraria* auxquelles venaient s'ajouter 20 pieds d'*Asplenium trichomanes*. De plus, j'ai noté deux stations de *Linaria cymbalaria* et deux de *Dryopteris filix-mas*.

### 11. Auby

Auby possède deux stations de *Asplenium ruta-muraria*. Dans la première, sur un mur ombragé, d'orientation nord-nord-est, une vingtaine de touffes sont appliquées contre le mur. La seconde est particulièrement intéressante. Elle se trouve dans une petite cour encaissée. Il y a là une dizaine de pieds ; tous poussent à environ de 2 m au-dessous du sol. Sous des touffes de *Dryopteris filix-mas* (qui, lui, grimpe jusqu'au haut du mur), j'ai eu la surprise de trouver 1 pied d'une Fougère très rare dans la région minière : *Asplenium adiantum-nigrum* ; ils se trouvent au même niveau que *D. filix-mas*. Ces Fougères ne peuvent plus croître que dans des recoins obscurs.

J'ai noté 6 stations à *Dryopteris filix-mas*. On le trouve notamment, en abondance, le long du canal, en face sud-sud-ouest. Pas un seul pied d'*Asplenium ruta-muraria*.

### 12. Flers-en-Escrebieux et Pont-de-la-Deûle

Il y a assez peu de vieux murs à Flers-en-Escrebieux et je n'y ai trouvé qu'une station d'*Asplenium ruta-muraria*. Il s'agit d'un unique pied, de petite taille (2,5 cm) au bas d'un mur humide, orientation ouest.

Un peu plus loin, à Pont-de-la-Deûle, *Asplenium ruta-muraria* réapparaît tout aussi timidement : 1 pied sur un mur ombragé, orientation sud ; 1 pied de petite taille sur un mur dégagé, orientation ouest-sud-ouest ; 1 pied sur un mur dégagé, orientation sud-sud-est.

En continuant vers le sud, on arrive à Douai, où la situation redevient plus normale (tout au moins pour le centre de Douai). *Asplenium ruta-muraria* est par exemple abondant le long du canal.

### 13. Ostricourt et Leforest

L'inventaire d'Ostricourt a été fait le 16 septembre et j'y ai trouvé 7 stations à *Dryopteris filix-mas*, 2 à *Linaria cymbalaria* et 1 à *Asplenium ruta-muraria*. Il s'agit d'un mur dégagé, exposé au nord-est. Il y avait là 104 touffes d'un aspect saisissant ; toutes étaient noires, desséchées, apparemment mortes. Cinq d'entre elles avaient encore quelques petites frondes (2,5 cm maximum), alors que les frondes mortes mesuraient plus de 5 cm. Je pense que ce dépérissement est dû à l'absence de pluie pendant un mois et demi. *Asplenium ruta-muraria* peut, normalement, résister à une telle sécheresse ; mais la pluie assure aussi un certain lessivage des frondes et du substrat, empêchant l'accumulation des produits toxiques.

*Asplenium ruta muraria* est absent de Leforest, une ville située au nord-est de Métaeurop et au nord des Asturies, une autre usine traitant les métaux, notamment le zinc.

### 14. Roost-Warendin et Râches

Je sépare dans cette analyse Roost de Warendin. Beaucoup de vieux murs à Roost,

mais pas de trace d'*Asplenium ruta-muraria*. Celui-ci réapparaît à Warendin, sur un mur dégagé, d'orientation ouest-sud-ouest (nombreux pieds). Un peu plus loin, à Râches, *Asplenium ruta-muraria* est plus commun. L'absence d'*Asplenium ruta-muraria* est due vraisemblablement aux usines des Asturies, situées à 1 km au sud-ouest.

### 15. Raimbeaucourt

Après deux heures de recherches, je n'ai trouvé que deux petites stations : une sur l'église : 1 seul pied, de petite taille, en exposition sud sur un mur abrité ; à quelques mètres de là, 5 pieds derrière une pierre tombale. A signaler, de plus, de nombreux pieds de *Cardaminopsis halleri* dans un sentier.

Raimbeaucourt, situé sur une hauteur, est visiblement touché par les effluents de l'usine des Asturies.

### 16. Les points d'interrogation

Il s'agit d'agglomérations où l'inventaire n'est pas concluant, faute d'un nombre suffisant de vieux murs.

- Libercourt : cette petite ville, autrefois hameau dépendant de Carvin, a été fortement transformée à partir du début du siècle. Elle se situe au nord-est de Oignies et je ne pense pas que la pollution y soit importante.

- Courrières : une ville détruite à 80% pendant la dernière guerre où il y a donc peu de vieux murs. J'y ai noté une station à *Asplenium scolopendrium* et *Polypodium vulgare* sur un mur très ombragé, au milieu d'un bois, à la sortie nord. Comme Courrières se situe entre Harnes et Carvin sud, je ne pense pas qu'*Asplenium ruta-muraria* pourrait y être commun, s'il y avait plus de vieux murs. Une des raisons peut être la centrale située au sud-ouest de la ville.

- Wahagnies : trois stations à *Asplenium ruta muraria* dans cette petite ville à l'aspect rural, mais qui est de plus en plus habitée par des personnes travaillant en ville. Les vieux murs sont rénovés ou détruits et remplacés par des murs de parpaings, des palissades de ciment, du grillage ou des haies, ce qui ne facilite pas les inventaires.

- Bois-Bernard : même remarque que précédemment pour ce village situé au sud de Drocourt et qui, il y a dix ans, comptait encore de nombreuses fermes et petites maisons.

Peu à peu, les villages aux alentours des grandes agglomérations sont occupés par des "urbains" ayant une conception de la "propreté" très stricte. Le problème qui se pose pour le lichénologue avec la disparition des arbres d'alignement se pose aussi pour le botaniste avec la raréfaction des vieux murs. Que deviendront les inventaires dans 10 ans ? En effet, cette frénésie d'entretien semble agiter de plus en plus nos contemporains.

## III. CONCLUSION

### 1. *Asplenium ruta-muraria*

Cette Fougère est un excellent bioindicateur de la pollution atmosphérique, ceci parce qu'elle est, normalement, très commune et peu exigeante quant à ses stations (murs abrités ou non, en expositions diverses). Sa raréfaction ou sa disparition et ses orientations préférentielles sont significatives et permettent de cerner les centres de pollution (essentiellement Métaeurop, les Asturies et l'ensemble Lens-Liévin-Hénin-Beaumont) et d'en évaluer la portée.

Quatre facteurs interviennent dans la réapparition d'*Asplenium ruta-muraria* :

- l'orientation ; *Asplenium ruta-muraria* se trouve à Drocourt et Pont-de-la-Deûle en face sud ; à Pont-à-Vendin, Vendin-le-Vieil, Auby, Carvin sud, Ostricourt et Dourges en

face nord ; à Raimbeaucourt, Montigny-en-Gohelle, Hénin-Beaumont, Carvin et Auby sur des murs abrités.

- la fréquence des vents ; *Asplenium ruta-muraria* réapparaît plus vite au sud qu'au nord. Il faut également tenir compte des vents forts (cf. la comparaison entre Evin-Malmaison et Noyelles-Godault).

- la distance par rapport au centre de pollution ; le SO<sub>2</sub> est un gaz lourd, qui se dépose rapidement ; le centre de Oignies est à 5 km au nord de Métaleurop et n'est pas, ou peu touché. De même, la situation à Carvin est différente sur 1,5 km de distance.

- le taux de pollution ; il y a quelques stations à *Asplenium ruta-muraria* entre Lens et Hénin-Beaumont, mais aucune à proximité de Métaleurop.

A quoi est due la rareté ou la disparition d'*Asplenium ruta-muraria* ? R.M. PAYNE (1978) souligne le fait que les frondes soient pérennes. De plus, celles-ci sont très minces, car composées de quelques couches de cellules seulement, ce qui les rend sensibles à la pollution. La station d'Ostricourt semble bien relever de ce cas.

J'ai noté un certain nombre de stations où *Asplenium ruta-muraria* était, non pas vigoureux et abondant comme c'est souvent le cas, mais de petite taille et isolé. Est-ce la pollution qui en est responsable ? Là encore, les observations faites à Ostricourt semblent le montrer : aux nombreuses touffes vigoureuses que l'on pouvait observer au printemps succèdent quelques rares frondes de petite taille. Mais, pour d'autres stations, il peut s'agir de pieds récemment apparus. Le seul moyen pour en savoir plus sera de faire un suivi des stations.

D'autre part, il y a de très nombreux murs où *Asplenium ruta-muraria* n'a pas le temps d'être intoxiqué ... car il n'apparaît pas du tout ! On peut alors penser à un effet de la pollution soit sur la germination des spores, soit sur les prothalles, soit lors de la fécondation où le rôle de l'eau est fondamental.

Lors du Séminaire, K. AMMANN a émis l'hypothèse d'une acidification du substrat. Des mesures ont été faites à Carvin, sans résultat probant pour l'instant (pH 7-7,5).

A quel taux de SO<sub>2</sub> correspond la raréfaction d'*Asplenium ruta-muraria* ? Les mesures restent à faire. La présence d'*Asplenium ruta-muraria* n'implique pas une atmosphère parfaitement pure, mais indique qu'un certain taux de pollution n'a pas été dépassé. J.-R. WATTEZ (1979) le signale peu abondant à très rare dans des zones d'isopollution allant de 5-6 à 3-4 (d'après DELZENNE et BON). Dans cette étude, on trouve plusieurs communes dont il est absent et où la pollution doit donc être encore plus importante. Il est d'ailleurs aberrant que, malgré les mises en garde, les municipalités laissent encore les gens cultiver des légumes à proximité des centres de pollution. Ainsi, il existe des jardins face à Métaleurop ; *Cardaminopsis halleri* pousse en abondance à quelques mètres de là ...

## 2. Autres Ptéridophytes

*Dryopteris filix-mas* est nettement plus résistant. En Angleterre, R.M. PAYNE (1978) fait la même observation : dans le sud-est de l'Essex, pollué du fait de la proximité de Londres, *Dryopteris filix-mas* est la plus commune des Fougères, et les *Asplenium* deviennent rares. *Dryopteris filix-mas* n'est en difficulté qu'à proximité de Métaleurop, à Evin-Malmaison et Courcelles-les-Lens et peut-être aussi à Roost où je n'en ai vu aucun pied. Dans ces trois villes, il y a un nombre important de vieux murs dépourvus de plantes, que ce soit sur les parois ou au sommet. Les Angiospermes semblent être aussi en difficulté.

*Asplenium trichomanes* est classé AC-AR ; dans la région étudiée il est R-RR. J.-R. WATTEZ (1979) ne l'a pas retrouvé à Amiens où il était signalé au début du siècle.

*Asplenium adiantum nigrum* est très rare et ne peut être utilisé comme bioindicateur. Deux stations : une à Carvin, détruite cet été, et une à Auby. Il s'agit d'une maison abandonnée, et cette station sera vraisemblablement détruite dès que la maison sera réoccupée.

*Asplenium scolopendrium* : rare également. Une station à Carvin, dans un puits, et une à Courrières, sur un mur ombragé.

*Polypodium vulgare* : classé AC-C, mais R dans la région. Il ne réapparaît en sommet de mur qu'à Wingles et Bauvin, au nord, et Barlin à l'ouest.

En conclusion, la réaction des Ptéridophytes est claire : la région étudiée est très touchée par la pollution, et cela depuis des dizaines d'années. Des mesures doivent être prises pour 1993. On verra peut-être alors réapparaître *Asplenium ruta-muraria*. Affaire à suivre.

En ce qui concerne l'agglomération lilloise, j'ai arpenté, durant un après-midi, les rues du Vieux-Lille et y ai trouvé 5 belles stations à *Asplenium ruta-muraria* et 1 à *Asplenium scolopendrium*. Il y en aurait peut-être plus sans les nombreux ravalements. De plus, j'ai eu l'occasion de m'arrêter à Haubourdin (sud-ouest de Lille) : en 20 minutes, 6 stations à *Asplenium ruta-muraria* d'orientations diverses ont été découvertes. Visiblement, la situation n'est pas dramatique à Haubourdin. Il serait donc intéressant de passer au peigne fin l'agglomération lilloise. Cependant, un problème se présentera certainement pour quelques communes : l'absence ou le nombre peu élevé de vieux murs.

## BIBLIOGRAPHIE

PAYNE, R.M., 1978. The flora of walls in south-eastern Essex. *Watsonia* 12 : 41-46

WATTEZ, J.R., 1979. Un groupe de bioindicateurs végétaux méconnus : les Ptéridophytes. Application à la répartition des Fougères rupicoles dans le nord de la France. *C. R. 104ème congrès nat. Soc. Sav., Bordeaux, Sciences, (2)* : 155-167.

## DISCUSSION

J. ASTA. Connait-on les types de polluants qui agissent sur la disparition des Fougères ?

J.P. MATYSIAK. Non, par exemple, pour WATTEZ c'est plutôt la pollution automobile tout au moins dans les grandes villes, bien qu'à Lille il y ait quelques stations d'*Asplenium ruta-muraria* et d'*Asplenium scolopendrium* (dans le "Vieux Lille").

Ch. VAN HALUWYN. Il y aurait incrimination de pollution acide : la ville de Courcelles-Lens que vous avez citée précédemment possède un capteur de mesure de SO<sub>2</sub> qui enregistre les plus fortes moyennes de pollution de cette région (il y a dépassement des normes européennes). Il semble y avoir une étroite corrélation entre les observations de J.P. MATYSIAK sur la répartition d'*Asplenium ruta-muraria* et celle qui se fait sur la végétation lichénique.

V. MACQUET. Je souhaiterais une analyse de la répartition d'*Asplenium ruta-muraria* selon les concentrations de Pb dans les sols autour du complexe industriel de Métaleurop.

K. AMMANN. D'un point vue phytosociologique, *Asplenium ruta-muraria* caractérise la classe des *Parietarietea* dont les associations sont très nitrophiles et l'acidification du milieu leur est très préjudiciable.

O. DAILLANT. Peut-on chiffrer les seuils à partir desquels cette Fougère disparaît et peut-on envisager des transplantations ?

J.P. MATYSIAK. Non, car j'ai fait mon étude sans rien savoir ; pour les transplantations, oui, pourquoi pas.

A. BELLEMERE. Pouvez-vous repérer les prothalles ? Car on pourrait penser que les prothalles sont relativement proches des thalles de lichens ; c'est peut-être à ce niveau qu'on peut faire plus facilement la relation avec la pollution.

SEMINAIRE LICHENS ET BIOINDICATION  
ASSOCIATION FRANCAISE DE LICHENOLOGIE

5 et 6 octobre 1991

---

QUINZE ANS DE SUIVI DE PLACETTES-LICHENS  
EN HAUTE-NORMANDIE

---

Michel LEROND  
Consultant Environnement  
Le Point du Jour  
76780 SIGY-EN-BRAY

A l'occasion du séminaire "Lichens et bioindication" qui s'est tenu à Lille les 5 et 6 octobre 1991, il nous a paru opportun de rappeler d'abord la chronologie des travaux que nous avons menés sur ce thème en Haute - Normandie, puis d'évoquer les problèmes méthodologiques qui sont apparus.

## 1. CHRONOLOGIE ET TYPES DE PLACETTES

Nos travaux de lichénologie ont commencé à partir de 1974. A cette date pratiquement aucune recherche n'avait été menée en Haute-Normandie depuis la fin du XIXe. Nos différentes études se sont progressivement diversifiées du point de vue méthodologique selon la chronologie suivante :

**1975** : Mise en évidence de la pollution atmosphérique dans le Parc naturel régional de **Brotonne** par l'étude des lichens.

**1981** : Cartographie de la qualité de l'air de la **Normandie orientale** en utilisant les lichens comme bioindicateurs : environ 1750 stations étudiées.

**1982** : La Direction régionale de l' ONF demande un **suivi de la cartographie initiale**. Elle met son personnel technique à disposition pour les forêts domaniales. Les réseaux de mesure de la pollution, ALPA et REMAPPA acceptent le principe du financement du suivi sur toute la Haute-Normandie tous les deux ans

Le **premier suivi** a été effectué sur un peu moins de 10 % des stations de 1981. Les agents de l' ONF (Onze agents techniques plus des personnels de la Direction régionale) ont bénéficié d'une journée de formation collective, puis d'une reconnaissance de chacune des placettes a été faite et accompagnée de la remise de documents et échantillons.

Deux types de placettes ont été retenus pour ce suivi : les **placettes de milieu ouvert**, environ 150 au départ et les **placettes ONF**, soit une soixantaine.

En **1984, 1986, 1988 et 1990** des suivis réguliers ont été effectués dans les mêmes conditions et ont fait l'objet d'un rapport .

En **1990** une refonte des fiches de suivi et de leur numérotation s'est avérée nécessaire pour une meilleure harmonisation.

De **1982 à 1986** une démarche méthodologique parallèle a été conduite avec Chantal VAN HALUWYN, dans le cadre d'un contrat SRETIE (Ministère de l'Environnement) portant sur la moitié Nord de la France. Cette recherche a permis de conclure sur plusieurs points importants :

----> mise en évidence du **phénomène d'hystérésis** dans les régions qui connaissent une pollution de l'air décroissante.

----> les lichens doivent être considérés comme des bioindicateurs de la **qualité des milieux** et non seulement de l'air.

----> nécessité de suivre des **placettes de recolonisation** sur le long terme.

En **1986** une autre confrontation méthodologique fut possible avec Mark SEAWARD dans le Nord de l'Angleterre

En **1989** enfin, un **protocole d'observation** de placettes de recolonisation à Rouen, Lille et Bradford, a été mis au point avec Chantal VAN HALUWYN et Mark SEAWARD. Depuis un suivi assidu a été effectué à Lille et une fois à Rouen.

**1991 : en Haute-Normandie**

----> **135 placettes de milieu ouvert**

----> **60 placettes ONF en forêt domaniale**

----> **10 placettes de recolonisation sur l'agglomération de Rouen**

## 2. PROBLEMES METHODOLOGIQUES

Les difficultés rencontrées diffèrent selon le type de placettes dont il s'agit, et elles sont spécifiques bien entendu par rapport à l'établissement d'une cartographie initiale.

### - CARTOGRAPHIE INITIALE

Il s'agit d'une cartographie en réseau, comportant environ 1750 stations. La méthodologie, que nous ne rappelons pas ici, fait l'objet d'un protocole précisément défini.

### - SUIVI DES PLACETTES DE MILIEU OUVERT

Là encore, le protocole est précis, il comporte les points essentiels suivants :

- 135 placettes choisies parmi stations initiales
- sur des transects significatifs par rapport à la pollution
- repérées sur carte avec fiches de suivi
- sans repérage sur le terrain
- mode opératoire, cf. VAN HALUWYN, LEROND, 1986

Les principales difficultés rencontrées sont :

- abattages d'arbres, surtout en alignements routiers
- placettes de remplacement malaisées à trouver
- perte de temps sur le terrain, nouvelles fiches à faire.
- interprétation moins rigoureuse
- statut de propriété des placettes (accessible publiquement ou

non)

### - SUIVI DES PLACETTES EN FORET DOMANIALE

Les points principaux du protocole sont :

- 60 placettes choisies parmi les stations initiales
- facilement accessibles en voiture
- nombre d'arbres limité à un ou deux
- sous la protection ONF
- 6 placettes sont en même temps placettes DEFORPA
- repérées sur carte avec fiches de suivi
- repérées sur le terrain par un point bleu à 2m (peu apprécié des forestiers)
- circuit de l'information prévu pour assurer un retour à la Direction régionale
- mode opératoire, cf. VAN HALUWYN, LEROND, 1986

forestiers)

regionale

Les difficultés sont plus spécifiques que précédemment :

- abattages d'arbres malades. placettes abandonnées
- changement d'agent technique
- interprétation à pondérer en milieu forestier

### - SUIVI DES PLACETTES DE RECOLONISATION

Le protocole est cette fois-ci bien particulier et déjà publié dans le Bulletin de l'Association Française de Lichénologie :

- 10 placettes spécifiques sur un axe Sud-Ouest/Nord-Est à travers l'agglomération de Rouen
- sous la protection des collectivités concernées (ONF, communes DDE)
- protocole précis défini en quatre pages. cf. LEROND, VAN HALUWYN, 1988

Les difficultés sont inévitables surtout à la technique du relevé floristique :

- repérage photo inadapté
- marquage aléatoire ( les clous sont "absorbés")
- relevés des plantules fastidieux dès qu'elles sont nombreuses
- dynamique de la recolonisation par à coups
- retour d'information difficile auprès des "propriétaires"

#### **Difficultés majeures**

- > milieu ouvert : abattages d'arbres
- > forêt domaniale : changement d'agent
- > recolonisation : dynamique irrégulière  
relevés fastidieux

### 3. NECESSITE D'UNE HARMONISATION DES PROTOCOLES

A l'issue de cette récapitulation des protocoles et des difficultés rencontrées, nous pouvons résumer notre propos ainsi :

#### - PLACETTES CLASSIQUES

Le suivi est bien maîtrisé, il peut être fait au sein d'une région avec un protocole adapté aux spécificités locales.

#### - PLACETTES DE RECOLONISATION

La dynamique des groupements lichéniques pionniers est mal connue, irrégulière et aléatoire.

Dès lors une double conclusion s'impose :

----> nécessité de confronter les observations entre différentes régions pour affiner la connaissance de la dynamique et mieux maîtriser les difficultés protocolaires.

----> nécessité d'adopter un protocole de base commun aux fins de permettre toutes comparaisons utiles.

**Nécessité d'un protocole de base commun,  
pour le suivi de placettes de recolonisation,  
en situation de pollution de l'air décroissante.**

### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

LEROND, Michel

Les Lichens épiphytes en Normandie Orientale. Distribution, sociologie et application à la cartographie de la pollution atmosphérique. - Actes du Muséum de Rouen, 1981, 1-2. - 300 p.

LEROND, Michel

La Qualité de l'air en Haute-Normandie. Suivis 1982, 1984, 1986, 1988, 1990. - Rouen : Observatoire Régional de l'Environnement. - Env. 25 p. chaque rapport.

LEROND, Michel ; VAN HALUWYN, Chantal

Lichens et pollution : suivi de placettes de recolonisation. - Bulletin d'Information de l'Association Française de Lichénologie. 1988. 13 (2) : p. 12-17.

VAN HALUWYN, Chantal ; LEROND, Michel

Les Lichens et la qualité de l'air. Evolution méthodologique et limites. - Paris : Ministère de l'Environnement. 1986. - 207 p.

VAN HALUWYN, Chantal ; LEROND, Michel

Lichénosociologie et qualité de l'air : protocole opératoire et limites. - Cryptogamie. 1988. 9 (4). - p. 313 - 336.

# REMARQUES SUR LES LICHENS CORTICOLES DE PARIS EN 1991

Marie-Agnès LETROUIT-GALINOU  
Laboratoire de Cryptogamie,  
Université Pierre et Marie Curie, Boite 33,  
7, Quai Saint Bernard  
75252 PARIS CEDEX 05

## INTRODUCTION

En 1990, onze espèces de lichens plus l'algue *Pleurococcus viridis* ont été observés sur les troncs d'arbres du Jardin du Luxembourg (Seaward et Letrouit-Galinou, 1991; Letrouit-Galinou et al., 1992). La présence de lichens foliacés attirait l'attention, car on savait, grâce à deux publications de Nylander (1866 et 1896), qu'ils avaient totalement disparu de ce site entre ces dates tandis que par la suite ne s'étaient ajoutés au *Pleurococcus* que *Lecanora dispersa* (syn. *Lecanora hageni*) signalé sur une racine par Bouly de Lesdain (1948) et le lichen fortement poléotolérant *Lecanora conizaeoides* (Déruelle, 1983), peut-être apparu plus récemment<sup>1</sup>.

L'absence des lichens sur les troncs n'est pas "naturelle" sous nos climats et on connaît fort bien la végétation lichénique épiphyte potentielle de Paris et sa banlieue grâce, à la fois, à des ouvrages anciens (Nylander, 1896; Bouly de Lesdain, 1948) et par des travaux plus récents, effectués en Europe occidentale ou dans des zones peu urbanisées de l'Île de France (Barkman, 1958, Boissière, 1979; Van Haluwyn, 1978; Déruelle, 1983; Van Haluwyn et Lerond, 1986; Boissière et Déruelle, 1988; Rose, 1990). Ce point ne sera pas approfondi ici.

C'est Nylander (1866) qui, le premier, a signalé la disparition progressive des lichens épiphytes à l'approche des villes jusqu'à leur absence totale dans Paris et c'est lui qui, le premier également, a attribué cette disparition au mauvais air des villes. Si quelques travaux ont confirmé ces observations dans le siècle qui a suivi, c'est seulement à partir de 1970 que l'utilisation des lichens comme bioindicateurs et bioestimateurs de la pollution atmosphérique s'est développé et qu'une abondante littérature y a été consacrée (voir la bibliographie spécialisée semestrielle du *Lichenologist* et, pour la France, Van Haluwyn et al., 1986), montrant, entre autres, que c'est surtout la pollution acide globale, en particulier celle liée au dioxyde de soufre émis lors de la combustion des combustibles fossiles, qui est responsable de l'altération de la végétation lichénique corticole.

Le retour des lichens dans des zones d'où ils avaient disparu, a été observé dans de nombreux pays (dès 1976 en Grande-Bretagne, par exemple: Henderson-Sellers et Seaward, 1976) et a pu être mis en relation avec la baisse du taux de SO<sub>2</sub> dans l'air, consécutive d'une part à des changements socio-

<sup>1</sup> *Lecanora conizaeoides* est un lichen acidophile, poléotolérant, caractérisant une pollution acide globale de l'ordre de 170 µg/m<sup>3</sup> (Hawksworth et Rose, 1970, Déruelle, 1983, Van Haluwyn et Lerond, 1986), moyenne largement dépassée à Paris avant les années 1970 (fig.1), ce qui rend très improbable sa présence dans le Jardin du Luxembourg avant cette date. Ce lichen apparaît, parmi les espèces caractéristiques de ce niveau de pollution, une espèce "reconquérante", capable de se réinstaller avant les autres, dès que le niveau de pollution redevient compatible avec sa présence. Cette notion d'"espèce reconquérante" sera développée plus loin au cours de cet exposé.

économiques et d'autre part à des législations volontaristes de réduction des émissions. La figure 1 illustre la diminution du taux de SO<sub>2</sub> à Paris (moyenne hivernale) entre 1958 et 1988 et c'est à cette diminution qu'est attribué le retour des lichens foliacés moyennement poléosensibles dans le Jardin du Luxembourg.

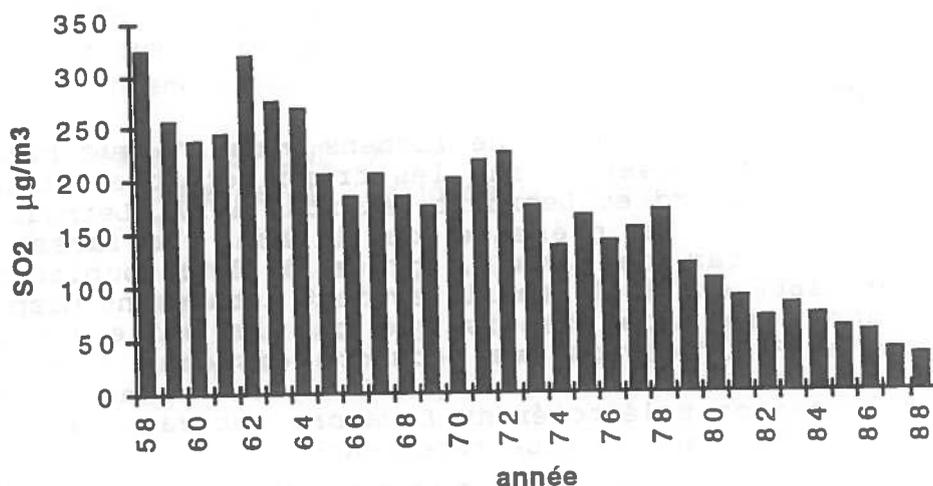


Figure 1. Evolution du taux de SO<sub>2</sub> dans l'air à Paris entre 1958 et 1988, exprimé en moyenne hivernale (données de l'Agence pour la qualité de l'air<sup>2</sup>)

A la suite de l'annonce de la présence de lichens foliacés moyennement poléosensibles dans le Jardin du Luxembourg, la DRASS<sup>3</sup> d'Ile de France a demandé que l'étude des lichens épiphytes autour de Paris, effectuée par Déruelle en 1981 (Déruelle, 1983) soit réactualisée et étendue à toute la région. Par ailleurs, une étude plus détaillée des lichens épiphytes dans la capitale a été commandée par la Ville de Paris<sup>4</sup>.

Trois points seront successivement abordés ici: d'abord, on comparera les listes des lichens observés en 1866 et en 1990 dans le Jardin du Luxembourg, puis on décrira la méthodologie mise en oeuvre pour étudier la végétation lichénique des arbres isolés d'Ile de France, enfin on tirera les premiers enseignements de l'étude réalisée cet été à Paris.

#### Comparaison des lichens corticoles présents dans le Jardin du Luxembourg en 1866 et en 1990.

Nylander (1866) donne une liste de 18 espèces corticoles, tandis que Letrouit et al. (1992) cite 12 épiphytes (dont onze lichens). Cependant plus que cette différence quantitative, c'est la différence qualitative entre les deux listes qui frappe le plus (Tableau 1), différence à la fois spécifique (ce ne sont pas les mêmes espèces) et écologique (ces espèces n'ont pas les mêmes exigences environnementales). Ceci confirme ce que C. Van

<sup>2</sup> Tour GAN, 16 place de l'Iris, Cedex 13 92082 Paris-La Défense.

<sup>3</sup> Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales.

<sup>4</sup> Direction des Parcs et Jardins, Service Paris Espace-Nature.

Haluwyn observe de son côté, c'est à dire que les lichens qui recolonisent les troncs à l'occasion d'une baisse de la pollution par le dioxyde de soufre, ne sont pas toujours ceux qui étaient présents avant que se développe cette pollution.

Espèces	1866	1990	Remarques
<i>Xanthoria parietina</i> <i>Phaeophyscia orbicularis</i> <i>Physcia tenella</i>	X X X	X X X	Lichens foliacés nitrophiles de l'alliance du <i>Xanthorion parietinae</i>
<i>Parmelia acetabulum</i> <i>Physcia stellaris</i> <i>Physconia grisea</i> <i>Xanthoria candelaria</i> <i>Xanthoria fallax</i>	X X X X X		Espèces foliacées, neutrophile (1) et nitrophiles du <i>Xanthorion</i>
<i>Arthonia tenellula</i> <i>Buellia pharacidia</i> <i>Caloplaca cerina</i> <i>Candellariella aurella</i> <i>Lecanora allophana</i> <i>Lecanora argentata</i> <i>Lecidella elaeochroma</i> <i>Rinodina exigua</i>	X X X X X X X X		Espèces crustacées, fructifiées, à thalle lisse, neutrophiles et de poléosensibilités diverses
? <i>Caloplaca saxicola</i> ? <i>Lecanora umbrina</i> var. <i>cyanescens</i>	X X		Espèces incertaines
<i>Lecanora conizaeoides</i> <i>Lecanora expallens</i> <i>Lepraria incana</i> <i>Scoliciosporum chlorococcum</i>		X X X X	Espèces crustacées à thalle pulvérulent, acidophiles et poléotolérantes.
<i>Hypogymnia physodes</i> <i>Parmelia sulcata</i>		X X	Espèces acidophiles du <i>Parmelion</i>
<i>Candellariella vitellina</i> <i>Physcia adscendens</i>		X X	Espèces proches de celles du groupe 1

Tableau 1. Lichens corticoles observés dans le Jardin du Luxembourg (Paris, France) en 1866 (Nylander, 1866) et en 1990 (Letrouit et al., 1992)

Ainsi, dans les lichens cités, soit en 1866, soit en 1990, on peut distinguer 3 groupes d'espèces : celles qui sont communes aux deux listes, celles qui ne sont citées que dans la liste de Nylander et enfin des espèces observées seulement en 1990.

Seules trois espèces sont communes aux deux listes : ce sont des espèces nitrophiles et parmi celles-ci *Phaeophyscia orbicularis* est relativement sensible à la pollution.

Dans la liste de Nylander, on est frappé par la présence de *Parmelia acetabulum*, espèce neutrophile et surtout par les nombreuses espèces crustacées à thalle lisse, appartenant à la même association et dont certaines sont relativement poléotolérantes. La présence de ces espèces, l'absence de *Parmelia caperata* et d'espèces fruticuleuses, plus sensibles à la pollution, la stérilité de *Parmelia acetabulum* montre qu'on se trouvait à cette époque avec une végétation de zone semi-rurale, déjà polluée, comparable à celle observée par Déruelle (1983) autour de Rambouillet.

Les espèces trouvées uniquement en 1990 sont elles aussi significatives. Plusieurs sont des espèces acidophiles dont la présence témoigne de l'acidification toujours sensible des écorces par le dioxyde de soufre. En particulier, on sait que l'extraordinaire développement de *Lecanora conizaeoides* sur les arbres des zones urbaines d'Europe occidentale au cours de ces dernières décennies est lié à cette acidification. *Lecanora dispersa* n'appartient pas à ce groupe et témoignerait plutôt de l'abondance des poussières dans l'air parisien. L'absence de *Physcia adscendens* dans la liste de Nylander aurait une toute autre cause : cette espèce, proche de *Physcia tenella*, n'a été décrite par Olivier qu'après le travail de Nylander.

Il est donc possible de dire que la végétation lichénique des arbres du Jardin du Luxembourg reflète à sa manière l'histoire de Paris et les changements socio-économiques survenus depuis cent ans.

#### Remarques sur l'étude en cours de la végétation lichénique des arbres isolés dans l'Ile de France.

L'étude des lichens de l'Ile de France n'ayant débuté sur le terrain qu'en juin 1991 et étant toujours en cours, aucune conclusion ne peut encore en être tirée. Toutefois on peut fournir quelques précisions sur la méthode de travail suivies.

Compte-tenu de deux contraintes, d'une part avoir rapidement des résultats et d'autre part pouvoir les comparer aux données de Déruelle (1983), il a été décidé :

- de prendre pour base le même maillage que cet auteur, soit des mailles de 0, 5 grade de côté, mais en l'étendant à toute l'Ile de France.
- d'utiliser la même technique de relevé, inspirée de Hawksworth et Rose, (1970), mais sans perdre de vue les améliorations suggérées par divers auteurs comme Van Haluwyn et Lerond (1986) : un groupe d'arbres (si possible au moins dix et de la même espèce) avec un tronc bien vertical et de diamètre au moins égal à 20 cm, est sélectionné et la liste de toutes les espèces lichéniques présentes est dressée; il est de plus précisé si l'espèce se trouve exclusivement à la base (moins de 50 cm du sol) et si le ou les thalles sont particulièrement petits (ceci pouvant indiquer qu'ils se sont installés récemment). Le nom de l'arbre est noté.

L'exploitation des données se fera de plusieurs façons :

- une carte de répartition sera établie pour chaque espèce avec, pour les mailles étudiées en 1983, comparaison avec les données antérieures.
- sera aussi établie une carte des groupements significatifs d'espèces; pour ce travail, toujours dans

l'optique d'une comparaison avec les données de 1983, une première carte sera dressée en prenant pour base les groupements d'espèces poléosensibles de Déruelle, mais l'utilisation d'autres groupements, définis par d'autres auteurs ou suggérés par nos résultats, sera aussi tentée.

- d'autres études, plus écologiques ou statistiques, sont également envisagées.

Cette exploitation des résultats, largement informatisée, se fera en relation avec le Secrétariat Faune-Flore<sup>5</sup> et le Laboratoire de Phytologie Quantitative de l'Université Pierre et Marie Curie.

Un des grands intérêts de l'utilisation des lichens dans l'étude de la pollution atmosphérique globale était l'existence d'une corrélation entre la végétation observable en un lieu donné et le taux moyen hivernal d'acidité globale y sévissant, ce qui avait permis d'établir des échelles d'estimation de la pollution à l'aide des lichens. Actuellement, la question est de savoir quelle valeur on peut encore accorder à ces échelles en période de diminution de la pollution et, si elles ne sont plus utilisables, quelle probabilité existe de pouvoir mettre en évidence d'autres corrélations entre lichens et taux de pollution atmosphérique.

#### Etude des lichens épiphytes de Paris (août 1991).

##### **Méthodes et définition des "milieux"**

Le but du travail a été de pouvoir introduire les données recueillies à Paris dans le travail sur l'Ile de France, tout en donnant une vue plus détaillée de ce qui se passe dans la Ville de Paris. Pour cela:

- a) le maillage utilisé pour l'Ile de France a été pris pour base, mais en divisant chaque maille en quatre (maille de 0,25 gr de côté), soit 32 mailles.
- b) la ville de Paris est comprise dans sa définition administrative, incluant les Bois de Boulogne et de Vincennes
- c) les relevés ont été faits de la même façon que ci-dessus, mais, de plus, on a précisé quel était le type de "milieu" (type écologique des groupes d'arbres) dans lequel se faisaient les relevés. Des études préalables ont conduit en effet à distinguer cinq types de milieux urbains, offrant pour les lichens épiphytes des conditions écologiques sensiblement différentes. Ce sont:
  - Milieu a, "arbres d'alignement" regroupant les arbres des rues et des places : les arbres ne sont pas arrosés, la pollution automobile est intense, il fait chaud et sec, leur base est soumise aux souillures canines.
  - Milieu b, "arbres des pelouses de squares et jardins" : les pelouses sont arrosées et enrichies en engrais, les troncs bénéficient ainsi d'une atmosphère plus fraîche et plus humide, en général aussi, les chiens en sont écartés, enfin circulation automobile et bâtiments sont éloignés.
  - Milieu c, "arbres des allées de square" : les arbres n'ont pas de pelouse à leur base, les allées sont

<sup>5</sup> Comité Faune Flore, Museum National d'Histoire Naturelle, 47 rue Cuvier  
75005 PARIS

poussiéreuses, l'arrosage est rare, la protection contre les chiens est variable.

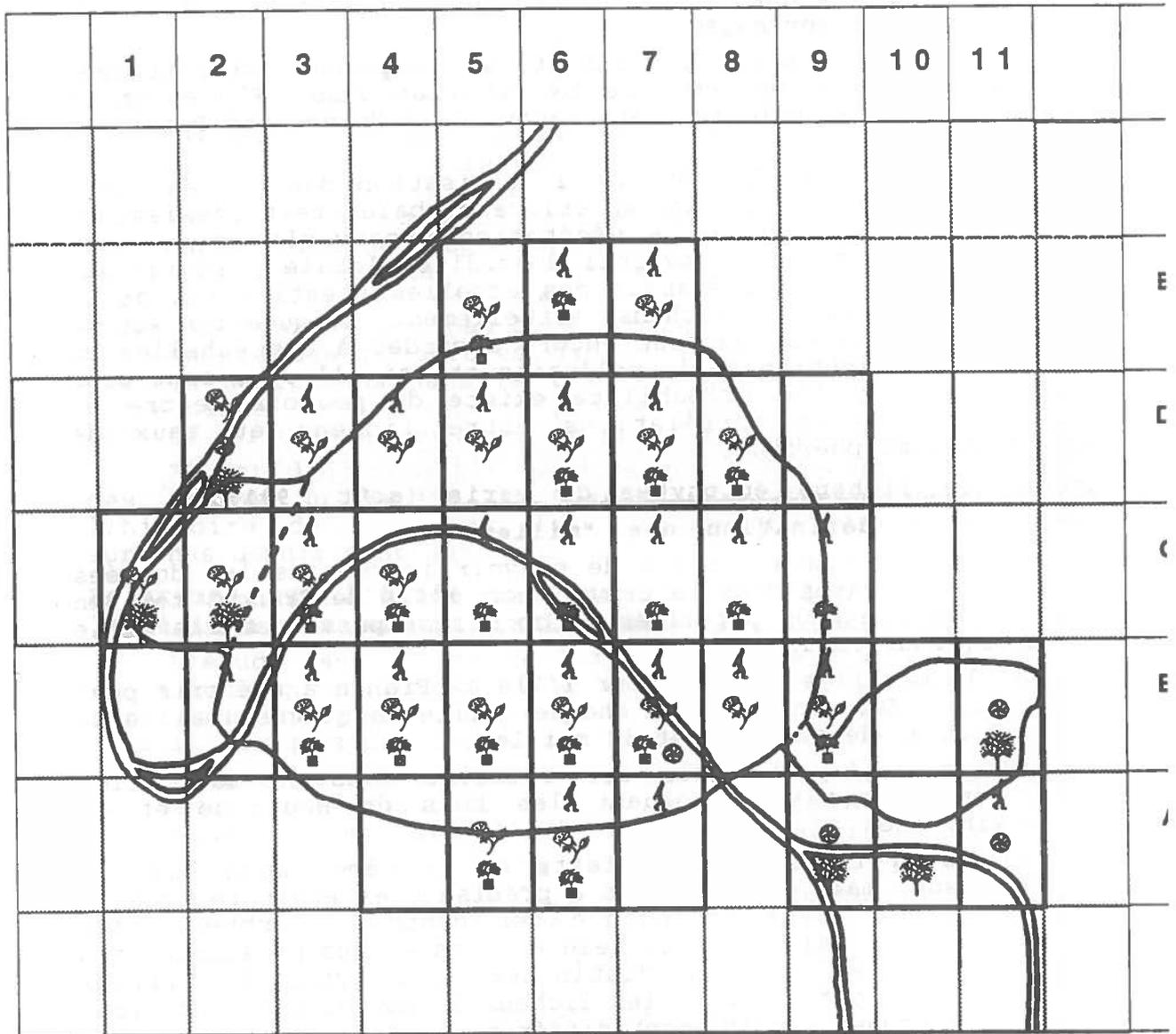


Figure. 2- Milieux étudiés dans chaque maille

- ⋈ = Alignement : rue, place (a)
- 🌻 = Jardin : pelouse (b)
- 🌳 = Jardin : allée (c)
- ⊙ = Clairière (d)
- 🌳 = Forêt : sous-bois (e)

- Milieu d, "arbres des clairières des bois" : ce milieu se rapproche du milieu b par la présence d'herbes à la base des arbres, mais il n'y a pas d'arrosage ni d'épandage d'engrais.

- Milieu e, "arbres des sous-bois" : ce milieu diffère du précédent par une moins grande luminosité et, peut-être, une humidité atmosphérique supérieure.

Dans chaque maille, on s'est efforcé d'étudier le plus grand nombre de "milieux" possibles. (voir figure 2)

- c) Quelques autres caractères ont été notés, mais qui s'avèrent plus difficilement exploitables, par exemple l'orientation et le recouvrement. Par contre, la présence des épiphytes uniquement au haut du tronc est une particularité intéressante pour les arbres du milieu "a".

### **Premières impressions.**

Le travail sur le terrain a été fait dans le courant du mois d'août 1991 (1118 arbres étudiés) et les données sont en cours de saisie en vue d'une exploitation informatique ultérieure. Sans préjuger des résultats définitifs, il est possible de formuler dès maintenant quelques remarques à partir des impressions brutes, venues au cours de l'étude de terrain dont trois méritent une attention particulière.

### PRESENCE DES LICHENS ET ESPECES D'ARBRES.

En ville et notamment dans les parcs et les jardins, existe une très grande variété d'essences. Le traitement informatique des données devrait nous fournir des informations quantifiées sur la plus ou moins grande aptitude des arbres à être colonisés par les lichens, mais déjà le travail sur le terrain fournit des indications. La nature du phorophyte est très importante pour l'implantation des lichens. A Paris, comme C. Van Haluwyn à Lille, il apparaît que les *Paulownia*, les frênes, les érables sont les meilleurs phorophytes suivis par les peupliers et les *Catalpa*. Les tilleuls et les marronniers sont moins favorables, mais ils ont fait l'objet de nombreux relevés à cause de leur abondance aussi bien en alignement que dans les squares. Les platanes et les cèdrelas n'ont jamais été étudiés, leur écorce desquamante n'étant pas favorable à l'installation des lichens. L'âge des arbres peut aussi intervenir, c'est pourquoi seuls les arbres d'un diamètre d'au moins 20 cm ont été retenus. Les arbres très âgés sont souvent moins riches en lichens que les arbres plus jeunes tandis que les très jeunes cèdrelas ont un fort recouvrement de *Lecanora conizaeoides* et de *Pleurococcus* qui disparaissent ensuite. Mention particulière doit être faite des chênes des jardins de Bagatelle, particulièrement riches en espèces.

### PRESENCE DES LICHENS ET "MILIEUX"

Le tableau 2 montre les espèces présentes dans chaque milieu pour l'ensemble des mailles étudiées, le tableau 3 la fréquence<sup>6</sup> de ces espèces par milieu.

Le tableau 2 montre que tous les milieux ne sont pas également favorables au développement des lichens. Le milieu b est le plus favorable, suivi de près par les milieux c et d. Ces milieux ont en commun d'être relativement éloignés des bâtiments. Le milieu a est le plus pauvre si on exclut le relevé fait à l'hippodrome de Vincennes, dans une zone non bâtie, ce qui semble bien confirmer l'importance de la réverbération des murs d'immeubles. Le milieu e est également très pauvre, ce qui

<sup>6</sup> La fréquence est définie ici comme le nombre de mailles où l'espèce est présente dans un milieu donné sur le nombre de mailles où ce milieu a été étudié.

peut paraître surprenant. L'absence de lumière pourrait être là le facteur déterminant.

	a	b	c	d	e	
(Algue) <i>Pleurococcus viridis</i>	1	1	1	1	1	5
(Lich.) cf. <i>Scolisciosp. chloroccc.</i>	1	1	1	1	1	5
(Lich.) <i>Lecanora conizaeoides</i>	1	1	1	1	1	5
(Lich.) <i>Lecanora cf. dispersa</i>	1	1	1	1	0	4
(Lich.) <i>Physcia tenella</i>	(1)	1	1	1	0	4
(Lich.) <i>Lepraria cf. incana</i>	0	1	1	1	1	4
(Lich.) <i>Phaeophyscia orbicularis</i>	(1)	1	1	1	0	4
(Lich.) <i>Physcia adscendens</i>	0	1	1	1	0	3
(Lich.) <i>Xanthoria parietina</i>	(1)	1	1	1	0	4
(Lich.) <i>Candellariella vitellina</i>	(1)	1	1	1	0	4
(Champ.) <i>Athelia sp.</i>	0	1	1	0	1	3
(Lich.) <i>Parmelia borrieri</i>	0	1	1	1	0	3
(Lich.) <i>Physconia grisea</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Evernia prunastri</i>	0	1	1	1	0	3
(Lich.) <i>Candellariella sp</i>	0	1	1	0	0	2
(Lich.) <i>Parmelia sulcata</i>	0	1	1	1	0	3
(Lich.) <i>Hypogymnia physodes</i>	0	1	1	1	0	3
(Lich.) <i>Lepraria sp</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Lecanora muralis</i>	0	1	0	1	0	2
(Lich.) <i>Xanthoria candellaria</i>	0	1	1	0	0	2
(Lich.) <i>Physcia stellaris</i>	0	0	0	1	0	1
(Lich.) <i>Candellariella reflexa</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Parmelia subaurifera</i>	0	0	1	1	0	2
(Lich.) <i>Pertusaria amara</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Cladonia</i>	0	0	0	1	1	2
(Lich.) <i>Xanthoria par. var. calcicola</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Parmelia revoluta</i>	0	0	1	0	0	1
(Lich.) <i>Graphis scripta</i>	0	1	0	0	0	1
(Lich.) <i>Buellia punctata</i>	0	0	0	1	0	1
(Lich.) <i>Diploicia canescens</i>	0	1	0	0	0	1
Total des espèces présentes	8(4)	25	19	19	6	

Tableau 2 : Présence comparée des épiphytes dans les différents milieux. A noter que le nombre de 8 espèces pour le milieu a est atteint d fait d'un relevé exceptionnel en bordure de l'Hippodrome de Vincennes. E l'absence de ce relevé seulement 4 espèces auraient été observées sur le arbres d'alignement.

Le tableau 3 (celui des fréquences) conforte ces premières indications. A signaler la richesse tout à fait particulière du site de Bagatelle (avec en particulier plusieurs espèces crustacées).

Espèces (tri sur la moyenne)	Milieux					MOY	EC/T
	a	b	c	d	e		
(Algue) Pleurococcus viridis	0,83	1	1	1	1	0,97	0,08
(Lich.) cf. Scoliciosp. chlorocc.	0,74	0,95	0,9	0,8	1	0,88	0,11
(Lich.) Lecanora conizaeoides	0,65	0,82	0,8	1	0,83	0,82	0,12
(Lich.) Lepraria cf. incana	0	0,32	0,25	0,8	1	0,47	0,41
(Lich.) Lecanora cf. dispersa	0,09	0,86	0,75	0,6	0	0,46	0,39
(Lich.) Physcia tenella	0,04	0,77	0,55	0,8	0	0,43	0,39
(Lich.) Physcia adscendens	0	0,59	0,4	0,4	0	0,28	0,27
(Lich.) Xanthoria parietina	0,04	0,68	0,2	0,4	0	0,27	0,28
(Lich.) Phaeophyscia orbicularis	0,04	0,73	0,25	0,2	0	0,24	0,29
(Lich.) Parmelia borreri	0,04	0,09	0,05	0,4	0	0,12	0,16
(Lich.) Candellariella vitellina	0,04	0,23	0,05	0,2	0	0,1	0,1
(Lich.) "foliacé ?"	0,04	0,05	0,05	0	0	0,03	0,03
(Champ.) Athelia sp.	0	0,09	0,1	0	0,33	0,1	0,14
(Lich.) Cladonia	0	0	0	0,2	0,17	0,07	0,1
(Lich.) Parmelia sulcata	0	0,05	0,05	0,4	0	0,1	0,17
(Lich.) Physcia stellaris	0	0	0	0,4	0	0,08	0,18
(Lich.) Evernia prunastri	0	0,09	0,1	0,2	0	0,08	0,08
(Lich.) Hypogymnia physodes	0	0,05	0,1	0,2	0	0,07	0,08
(Lich.) Lecanora muralis	0	0,09	0	0,2	0	0,06	0,09
(Lich.) Parmelia subaurifera	0	0	0,05	0,2	0	0,05	0,09
(Lich.) Buellia punctata	0	0	0	0,2	0	0,04	0,09
(Lich.) Physcia sp	0	0,45	0,2	0	0	0,13	0,2
(Lich.) Physconia grisea	0	0,23	0	0	0	0,05	0,1
(Lich.) Candellariella sp	0	0,14	0,05	0	0	0,04	0,06
(Lich.) Lepraria sp	0	0,14	0	0	0	0,03	0,06
(Lich.) Xanthoria candellaria	0	0,05	0,05	0	0	0,02	0,03
(Lich.) Candellariella reflexa	0	0,09	0	0	0	0,02	0,04
(Lich.) Pertusaria amara	0	0,09	0	0	0	0,02	0,04
(Lich.) Parmelia cf. tiliacea	0	0	0,05	0	0	0,01	0,02
(Lich.) Parmelia?	0	0	0,05	0	0	0,01	0,02
(Algue) Trentepohlia sp.	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02
(Algue) Cyanophycée sp.	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02
(Lich.) Xanth. par. var. calcicola	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02
(Lich.) Graphis scripta	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02
(Lich.) Diploicia canescens	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02
(Lich.) petit foliacé	0	0,05	0	0	0	0,01	0,02

Tableau 3. Fréquences des espèces dans les milieux étudiés. a, arbres d'alignement; b, arbres des pelouses de squares, jardins ou parcs; c, arbres des allées de squares, jardins ou parcs; d, arbres des espaces découverts des bois; e, arbres des sous-bois. MOY: fréquence moyenne. E/T: écart-type. Fréquence : rapport entre le nombre de mailles où l'espèce est présente dans un milieu donné et le nombre de mailles où ce milieu a été étudié.

### LICHENS ET PHYSIONOMIE DES ARBRES PARISIENS.

Le tableau 3 permet de distinguer neuf espèces particulièrement fréquentes à Paris et qu'on peut ranger en trois groupes:

- a) celui de *Pleurococcus viridis*, *Lecanora conizaeoides* et d'une croûte verte-sombre provisoirement nommée comme *Scoliciosporum chlorococcum*<sup>7</sup>, (mais avec beaucoup de doute) (fréquence moyenne supérieure à 0,8),
- b) celui de *Lepraria incana*, *Lecanora cf dispersa* et *Physcia tenella* (fréquence moyenne voisine de 0,4)
- c) le groupe de *Physcia adscendens*, *Xanthoria parietina* et *Phaeophyscia orbicularis* avec une fréquence d'environ 0,25 pour l'ensemble des milieux (entre 0,6 et 0,8 pour le milieu b seul).

Parmi ces espèces les plus communes à Paris, quatre sont des lichens foliacés moyennement poléosensibles et il est particulièrement intéressant de constater qu'ils ont été trouvés dans au moins un quart des sites étudiés, et même dans les trois quarts, si on s'en tient aux sites de milieu b, (arbres sur pelouses dans les parcs et jardins). Cependant leurs thalles étant de petite taille (quelques mm) ils sont peu visibles, de sorte que ce sont toujours les croûtes vertes des trois premières espèces qui dominent et caractérisent les arbres parisiens. A côté de ces espèces relativement communes, un autre petit groupe existe, présent dans un site sur 10, avec notamment *Parmelia borreri* et *Parmelia sulcata*.

A l'opposé, l'extrême rareté des lichens crustacés à thalle lisse, même très poléotolérants (comme le *Buellia punctata* caractéristique de la zone "B" de Van Haluwyn et Lerond) mérite d'être soulignée.

### SAUTS DE ZONE ET ESPECES RECONQUERANTES.

La sensibilité différente des espèces de lichens à la pollution atmosphérique a permis d'établir des échelles de poléotolérance dont chaque degré est caractérisé par un groupe d'espèces (Hawksworth et Rose, 1970, Van Haluwyn et Lerond, 1986). Or, dès les premières observations du retour des lichens en zone urbaine, on a constaté que certaines espèces relativement sensibles revenaient rapidement alors que d'autres, plus poléotolérantes, demeuraient absentes. Ce phénomène est connu sous le nom de "saut de zone" (Rose et Hawksworth, 1981, Hawksworth et Mac Manus, 1989, Seaward, 1990). Il s'observe aussi à Paris comme le montre le tableau 4. Deux espèces considérées comme relativement poléosensibles, *Phaeophyscia orbicularis* et *Parmelia subaurifera*, y sont présentes, ce qui est compatible avec les taux moyens de pollution hivernale donnés par les capteurs (Figure 1). Par contre de nombreuses espèces plus tolérantes sont absentes ou rarissimes: c'est le cas entre autres de *Buellia punctata* et *Diploicia canescens*.

On constate que les espèces foliacées qui reviennent à Paris sont essentiellement des espèces sorédiées, tant parmi les espèces nitrophiles (Physciacées) que parmi les espèces acidophiles et neutrophiles (Parméliacées) et on peut penser que ces espèces sont douées d'un grand pouvoir de recolonisation. De

<sup>7</sup> Cette croûte à l'écologie bien définie paraît être en fait un mélange *Pleurococcus* et d'un champignon indéterminé à hyphes torulées noires.

Zones (d'après Déruelle, 1983)	espèces caractéristiques	teneur moyenne hivernale de SO <sub>2</sub> exprimée en µg.m <sup>-3</sup>
1	<u>Pleurococcus viridis</u>	> 170 µg.m <sup>-3</sup>
2	<u>Lecanora conizaeoides</u> , <u>Lepraria incana</u> , <u>Lecanora</u> <u>expallens</u> , <u>Buellia punctata</u>	125 - 150 µg.m <sup>-3</sup>
3	<u>Diploicia canescens</u> , <u>Xanthoria parietina</u> (base), <u>Physcia adscendens</u> (base)	70 µg.m <sup>-3</sup>
4	<u>Xanthoria parietina</u> , <u>Physcia</u> <u>adscendens</u> , <u>Physcia tenella</u> , <u>Ramalina farinacea</u> , <u>Xanthoria</u> <u>candelaria</u> , <u>Hypogymnia</u> <u>physodes</u> , <u>Parmelia sulcata</u> , <u>Parmelia borrieri</u> , <u>Lecanora</u> <u>chlarotera</u> , <u>Chrysothrix</u> <u>candelaris</u> , <u>Pertusaria amara</u> , <u>Evernia prunastri</u>	60 µg.m <sup>-3</sup>
5	<u>Physconia grisea</u> , <u>Phaeophyscia orbicularis</u> , <u>Physconia distorta</u> , <u>Pertusaria albescens</u> , <u>Lecidella elaeochroma</u> , <u>Parmelia tiliacea</u> , <u>Parmelia</u> <u>revoluta</u>	50 µg.m <sup>-3</sup>
6	<u>Parmelia caperata</u> , <u>Parmelia</u> <u>subaurifera</u> , <u>Ramalina</u> <u>fastigiata</u> , <u>Anaptychia</u> <u>ciliaris</u> , <u>Physcia aipolia</u> , <u>Parmelia perlata</u> , <u>Ramalina</u> <u>fraxinea</u> ,	40 µg.m <sup>-3</sup>

souligné plein: espèces observées à Paris en 1991

souligné pointillé: espèces observées une seule fois à Paris en 1991  
(généralement à Bagatelle).

Tableau 4: Relations lichens et pollution acide globale (Déruelle, 1983)

ce point de vue, il est intéressant de constater que la seule espèce foliacée fructifiée trouvée à Paris, *Xanthoria parietina*, est connue pour la rapidité de son cycle de reproduction (moins d'un an) (Bubrick et Galun, 1986).

L'ensemble de ces remarques conduisent à distinguer, parmi les espèces poléotolérantes, certaines plus aptes que d'autres à la reconquête du milieu d'où la pollution les a chassées. Ces espèces "reconquérantes" sont des espèces colonisatrices, à forte capacité de reproduction et souvent à vie courte (les petits *Physcia* par exemple). Comme le montre le tableau 5, il est possible de reconnaître de telles espèces pour chacun des groupes d'espèces des échelles de poléotolérance.

Zone (échelles de poléotolérance)	Espèces reconquérantes*
Zone 2	<i>Lecanora conizaeoides</i> ,
Zone 3	<i>Xanthoria parietina</i> <i>Physcia adscendens</i> ,
Zone 4	Espèces nitrophiles <i>Physcia tenella</i> <i>Physcia adscendens</i> , <i>Xanthoria parietina</i> Autres espèces (plus rares) <i>Parmelia sulcata</i> <i>Parmelia borrieri</i>
Zone 5	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>
Zone 6	<i>Parmelia subaurifera</i>

\* = revenant les premières, quand le taux de SO<sub>2</sub> dans l'air redevient compatible avec leur existence.

Tableau 5 : Espèces "reconquérantes" des différents groupements lichéniques caractéristiques des zones pollution

Ce sont ces espèces qui vont s'installer et se développer, souvent simultanément, dès que la diminution de la pollution le leur permet.

On peut se demander si selon les conditions écologiques, ce sont les mêmes espèces qui reconquièrent l'espace. Il semble bien que non. Ainsi, dans le tableau 5, on voit que pour la zone 4, selon que l'environnement est plus ou moins riche en azote ou plus ou moins acide, ce sont des espèces différentes qui vont envahir le milieu, des *Physciacées*, dans le premier cas, des *Parméliacées* dans le second. Ceci mériterait d'être étudié de façon plus précise, notamment en relation avec les groupes phytosociologiques de Van Haluwyn et Lerond (1986)

### Conclusions

Ce coup d'oeil sur quelques observations de la végétation épiphyte en Ile de France et notamment à Paris montre l'intérêt de l'étude des lichens épiphytes en période de diminution de la pollution par le SO<sub>2</sub>. En particulier, il faut insister sur la notion de saut de zone et d'espèces "reconquérantes" ainsi que

sur le fait que la végétation lichénique qui s'établira, sera, par endroit, fort différente de celle qui prévalait au début du 19ème siècle, avant le développement de l'usage des combustibles fossiles.

On attend aussi beaucoup de l'étude en cours dans la totalité de l'Ile de France, en particulier pour déterminer les relations possibles entre la végétation lichénique observée et les données des capteurs. Il conviendra alors de tenir compte au plus près de la diversité de l'évolution de la pollution en fonction des lieux, zones rurales, suburbaines et urbaines.

### Bibliographie

- BARKMAN J.J., 1958 - Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphyte Gorcum and Co. Assen, 628.
- BOISSIERE J.C., 1979 - Catalogue provisoire des lichens récoltés de 1968 à 1977 en Forêt de Fontainebleau et aux environs. *Documents floristiques*, 2(1), 77-121
- BOISSIERE J. C. et DERUELLE S., 1988 - Estimation de la pollution atmosphérique dans la région de Melun-Fontainebleau en utilisant les lichens comme bio-indicateurs. *Bull. Ass. Naturalistes de la Vallée du Loing*, 64(2), 74-83.
- BOULY DE LESDAIN M., 1948 - Ecologie (phanérogames, Mousses et Lichens) de quelques sites de Paris. Lechevallier ed. Paris.
- BUBRICK P. et GALUN M., 1986 - Spore to spore resynthesis of *Xanthoria parietina*. *Lichenologist*, 18(1), 47-49.
- DERUELLE S., 1983 - Ecologie des lichens du Bassin Parisien. Impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO<sub>2</sub>, Pb) et relations avec les facteurs climatiques. Thèse de Doctorat d'Etat. Paris. France.
- HAWKSWORTH D.L. et ROSE F., 1970 - Qualitative scale for estimating sulfur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*, 227, 145-148.
- HAWKSWORTH D.L. et MAC MANUS P., 1989 - Lichen recolonization in London under conditions of rapidly falling sulfur dioxide levels, and the concept of zone skipping. *Botanical Journal of the Linnean Soc.*, 100, 99-109.
- HENDERSON-SELLERS A. et SEAWARD M.R.D., 1976 - Monitoring lichen reinvasion of ameliorating environments. *Envir. Pollut.*, 19, 207-213.
- LETROUIT-GALINOU M.A., SEAWARD M.R.D., DERUELLE S., 1992 - A propos du retour des lichens épiphytes dans le Jardin du Luxembourg (Paris, France). *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 139, *Lettres Botaniques*, (2), 115-126.
- NYLANDER W., 1866 - Les lichens du Jardin du Luxembourg. *Bull. Soc. Bot. F.*, 13, 364-372.
- NYLANDER W., 1896 - Les lichens des environs de Paris. Paris.
- ROSE F., 1990 - The epiphytic (corticolous and lignicolous) lichen flora of the Forêt de Fontainebleau. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 137, *Lettres Botaniques*, (2/3), 197-209.
- ROSE C.I. et HAWKSWORTH D.L., 1981 - Lichen recolonization in London's cleaner air. *Nature.*, 289, 289-292.
- SEAWARD M.R.D., 1989 - Lichens as monitors of recent changes in air pollution. *Plants Today*, 2, 64-69.

- SEAWARD M.R.D., 1990 - The lichen flora of industrial Teeside. *The Naturalist*, 115, 73-79.
- SEAWARD M.R.D. et LETROUIT-GALINOUS M.A., 1991 - Lichens epiphytes return to the Jardin du Luxembourg in Paris after an absence of almost one century. *Lichenologist*, 23, 181-186.
- VAN HALUWYN C., 1978 - Sur deux associations épiphytes du *Parmelion caperatae* des plaines et collines françaises. *Documents phytosociologiques*, N.S., 2, 117-126.
- VAN HALUWYN C. et LEROND M., 1986 - Les lichens et la qualité de l'air. Evolution méthodologique et limites. Ministère de l'Environnement, S.R.E.T.I.E., 210 p.
- VAN HALUWYN C., ASTA J., BEGUINOT J., BOTINEAU M., DERUELLE S., LEROND M., ROUX C., 1987 - Lichens et environnement, quelques travaux français. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 133, *Actualités Botaniques*, (2), 81-112.

## DISCUSSION

J. BEGUINOT. Il y a 36 causes écologiques qui sont peut-être en ordre de grandeur pas négligeables les unes par rapport aux autres ; à ce moment-là, on ne peut plus faire une classification linéaire. Il y a une classification linéaire avec le SO<sub>2</sub> si on prend uniquement ce paramètre ; mais si on introduit plusieurs paramètres - l'hygrométrie, la capacité de transport des diaspores, n + 1 paramètres qui peuvent jouer -, l'échelle linéaire va se fragmenter et on va trouver des contradictions sans doute fréquemment.

M.A. LETROUIT. Je vous ai parlé des jardins car c'est là qu'on observe le mieux les recolonisations ; on a en effet l'impression d'une recolonisation par la base des arbres, mais si on regarde l, dans ces arbres d'alignement, vous ne retrouvez que trois espèces (*Pleurococcus*, *Lecanora conizaeoides*, *Scoliciosporum chlorococcum*) et la colonisation va du haut vers le bas. Alors que retient-on comme arbres ? Je voudrais retenir les remarques de Françoise GUILLOUX : c'est quand même dans les parcs que l'écologie générale est la plus proche de ce qu'on trouve dans la campagne, c'est-à-dire : pas de maisons proches, de l'herbe au pied des arbres et donc de l'humidité ambiante importante.

S. DERUELLE. Pourriez-vous reprendre votre conclusion quant à la pollution à Paris : diminue-t-elle ou augmente-t-elle ? (on vient de battre tous les records il y a huit jours : 600 µg/m<sup>3</sup> sur 24 heures).

M.A. LETROUIT. Mais oui, je sais qu'une remontée de la pollution peut détruire les lichens en deux mois.

K. AMMANN. Encore une fois, le SO<sub>2</sub> n'est pas le seul facteur, il y en a beaucoup d'autres .

M.A. LETROUIT. Ce qui est intéressant, c'est qu'en ce moment il y a une reconstitution d'une végétation lichénique qui n'existait plus. Pourquoi ? Il faut chercher la cause ; mais le retour, le fait même qu'on revoit des lichens qu'on n'avait pas vus, posent questions et j'aimerais bien que Monsieur CHIRAC, qui veut se baigner dans la Seine en l'an 2000, ait l'idée de voir les arbres de ses parcs couverts de *Ramalina*. Mais il faudrait certainement plus de 10 ans pour que cela puisse se produire.

## ETAT DES RECHERCHES SUR LES LICHENS DANS LES REGIONS ALPINES FRANCAISES

Juliette ASTA

Botanique et biologie végétale

Université de Grenoble

B.P. 53 X

F-38041 GRENOBLE CEDEX

Les travaux sur la pollution ont débuté dans la région de Grenoble en 1975 par une approche de la détection de la pollution fluorée. En effet, dans les Alpes et notamment dans les vallées, des usines d'aluminium sont à l'origine d'une pollution fluorée dont les teneurs anormalement élevées ont été la cause à une certaine époque de la destruction de lambeaux entiers de forêts.

A cette époque j'ai cherché un moyen de voir si les lichens pouvaient apporter une contribution à la détection de cette pollution. J'ai donc adopté une méthode d'analyse du fluor dans les thalles. J'ai utilisé une méthode d'analyse simple, c'est-à-dire prélèvement des échantillons de lichens, broyage, incinération, dosage du fluor par une électrode spécifique au fluor. Plutôt que de m'attacher uniquement à des lichens corticoles, j'ai aussi travaillé sur des lichens terricoles et saxicoles, ce qui a permis d'étendre les champs d'investigation, car la plupart des chercheurs ne s'intéressaient qu'aux lichens épiphytes. J'ai travaillé essentiellement sur deux vallées : vallées de la Maurienne (Savoie) et de la Romanche (Isère). Les deux approches ont été un peu différentes dans les deux cas. En effet en Maurienne, j'avais un choix important de stations car, en parallèle, des prélèvements de végétaux supérieurs étaient réalisés, en particulier des aiguilles de résineux (*Epicea* et Sapin). En Maurienne, le suivi a été effectué sur onze années de 1975 à 1985 sauf une brève interruption au cours de l'année 1982. Cela permet d'avoir une vision des choses grâce au fluor accumulé dans les thalles et là j'ai constaté évidemment une diminution de la quantité de fluor dans les lichens tout à fait en relation avec la diminution de la quantité de fluor atmosphérique. Cette régression de pollution atmosphérique s'explique par plusieurs raisons ; la raison essentielle est l'installation de systèmes d'épuration mais aussi la fermeture d'une des trois usines installées dans la vallée de la Maurienne. Pour la plupart des espèces, je suis quasiment arrivée au niveau le plus bas possible car il y a quand même une teneur naturelle de fluor dans les lichens et cette teneur est difficile à cerner car il est très difficile de trouver des zones témoins. D'où l'intérêt de l'installation d'une zone témoin dans le parc des Ecrins en 1987 par le Ministère de l'Environnement.

Dans la vallée de la Romanche par contre, j'ai fait une approche différente en ce sens que j'ai choisi plusieurs stations dans la vallée et, dans ces stations, j'ai fait des prélèvements en deux années (été 1976 et en 1984 avec Gladys BELANDRIA). Plusieurs espèces étaient prélevées et j'ai conservé l'espèce pour laquelle j'avais le plus de résultats : *Xanthoria parietina*. J'ai exprimé ces résultats sous la forme de cartes d'isopollution en fonction des teneurs de fluor analysé dans les lichens pour trois valeurs : 100 ppm, 200 ppm et 300 ppm ( $\mu\text{g/g}$  de matière sèche). Ces valeurs étaient comparables à celles trouvées dans les aiguilles d'*Epicea*. Je précise tout de suite que 100 ppm sont assez proches de la valeur de base du fluor des aiguilles de l'*Epicea*, alors que ce sont des valeurs déjà très élevées chez les lichens. En 1976, j'avais montré que dans les zones où l'*Epicea* ne répondait pas au fluor, les lichens répondaient déjà depuis longtemps (la valeur de base chez les lichens se situe entre 5 et 10 ppm). Par contre dans les zones de très forte pollution, les lichens ne répondent pas puisqu'ils disparaissent complètement. J'ai eu à l'époque des pointes de 700 ppm. 8 ans après, avec G. BELANDRIA, nous sommes retournées dans les mêmes stations. Nous avons pu constater que la zone très polluée avait beaucoup régressé et s'était même déplacée : au lieu d'être située dans la partie d'implantation des usines, à cause des courants aériens, il y a eu déplacement vers l'est en remontant la vallée. Voilà ces travaux concernant la pollution fluorée.

En 1984 j'ai obtenu un petit crédit de la DDASS de Lyon qui m'a permis d'entreprendre la détection de la pollution acide dans la région lyonnaise en collaboration avec G. BELANDRIA. Nous avons utilisé la méthode qualitative d'HAWKSWORTH et ROSE en l'adaptant bien entendu à la région. La question qui se posait était de savoir si le couloir de la chimie (zone située entre Lyon et la partie sud de la région lyonnaise vers Givors) était vraiment très polluée.

Nous avons dans un premier temps établi une nouvelle échelle qualitative en fonction des espèces trouvées, que nous avons calée au mieux ; à partir de là, nous avons mis en évidence une cartographie d'estimation de la pollution avec 6 zones. Le centre de Lyon paraissait le plus atteint ainsi que la partie située vers Givors mais le couloir de la chimie, à notre grande surprise, apparaissait moins atteint. On l'a expliqué par le fait que les courants aériens qui suivent la vallée du Rhône entraînent vers le sud un certain nombre de fumées qui viennent se plaquer contre le relief où est situé Givors ; mais les vents du nord balayent aussi ces fumées et vont les rajouter à ce qu'il y a déjà sur le centre de Lyon. Latéralement on retrouve progressivement des zones de bonne qualité.

Autre résultat de ce travail : nous avons une carte d'estimation par les lichens très pessimiste par rapport aux données atmosphériques en baisse depuis les années 1980. A l'époque nous avons beaucoup discuté : avec quelle pollution les espèces visibles sur le terrain étaient-elles en corrélation ? Nous avons vu que l'estimation des lichens n'était plus en corrélation avec la pollution récente mais avec une pollution passée entre 1971 et 1979. Nous avons donc mis en évidence un phénomène de retard. Dans le parc de la Croix Rousse, nous avons pu observer l'installation de jeunes thalles de *Physcia* dans une zone où il n'y avait absolument rien.

Je vais présenter maintenant les travaux de Isabelle LEGRAND. Il s'agissait de savoir si les lichens apportaient une réponse dans la détection de ce que le grand public appelle les pluies acides (en fait la terminologie correcte serait "pollution diffuse" à longue distance). I. LEGRAND a travaillé en collaboration avec l'Office National des Forêts dans le cadre du programme DEFORPA. Dans les Alpes, ce programme a mis en place un suivi de 162 placettes forestières choisies sur des coordonnées mathématiques et, parmi celles-ci, nous avons retenu celles de l'étage montagnard. Les 162 placettes sont réparties dans les trois massifs autour de Grenoble : Belledonne, Chartreuse et Vercors. Dans chacune de ces placettes, des critères de dépérissement ont été relevés par les forestiers (perte des aiguilles, changement de couleurs, prélèvement de carotte dans le tronc pour la mesure des cercles de croissance). Au cours des visites de ces placettes, j'avais préconisé de faire des relevés lichéniques pour avoir un nombre suffisant d'observations, mais en choisissant des espèces faciles (les forestiers et les étudiants impliqués dans le suivi ne connaissaient pas ou connaissaient mal les lichens). J'ai choisi les espèces les plus faciles à voir et à déterminer. Toutes les lèpres ont été classées ensemble, les crustacés aussi, mais pour les autres, on a pu avoir des résultats sur *Pseudovernia furfuracea*, *Hypogymnia physodes*, *Platismatia glauca*, *Usnea sp.*, *Bryoria sp.* ainsi que *Lobaria pulmonaria*. J'ai demandé aussi que des prélèvements d'écorce soient effectués à l'aide d'un emporte-pièce ; ces écorces ont ensuite été analysées par Isabelle LEGRAND.

Résultats sur les lichens : contrairement à ce que j'avais imaginé, nous n'avons pas de résultats significatifs sur l'impact de la pollution diffuse au niveau des espèces choisies. Il n'y a pas, semble-t-il, de transformations extraordinaires. Deux résultats sont cependant à retenir :

- *Hypogymnia physodes* apparaît sans doute plus abondant sur les arbres où l'écorce est plus acide (en l'occurrence les arbres dépérissants) ;
- dans les placettes dépérissantes, nous avons trouvé *Lobaria pulmonaria* en excellent état et fertile. Nous en avons déduit que le  $SO_2$  n'était pas l'élément prédominant dans la pollution.

On sait maintenant, que dans cette pollution diffuse, il y a sûrement un amalgame de polluants très diffus qui s'ajoutent à d'autres facteurs (sécheresse, vieillesse naturelle de certains arbres). Par contre dans ce travail, les résultats les plus intéressants ont été obtenus avec les écorces.

En premier lieu, il a fallu que I. LEGRAND travaille davantage sur la mise au point de la méthode. Dans la littérature, on trouve différentes méthodes concernant la nécessité ou non de broyage des écorces dans différentes pollutions. Elle a fait une approche très fine de ce qu'on pouvait utiliser comme matériel d'interface entre le lichen et l'arbre. Elle a fait des prélèvements d'écorce, elle a travaillé sur la partie externe, sur la partie interne, sur l'ensemble de l'écorce ; elle a fait des broyages, mais elle a aussi réalisé des mesures sur des écorces non broyées. Finalement on a choisi la partie externe de l'écorce non broyée.

En fait, ce qui est intéressant pour le lichen, c'est tout ce qui se trouve à la surface de l'écorce. Quand on broie l'écorce, de nombreuses matières passent dans la solution, lesquelles n'intéressent pas forcément les lichens, ainsi que des substances qui viennent brouiller la solution que le lichen peut avoir à sa disposition quand il est sur l'écorce. Finalement il a été décidé de prendre l'écorce non broyée et macérée.

On a essayé aussi de camoufler toute la partie de l'écorce non utilisable par le lichen en paraffinant les zones non touchées par le lichen. En fait cette façon de faire n'a pas apporté de différences notables dans l'interprétation des résultats. En ce qui concerne la solution de macération, l'eau a été préférée au KCl. Les premiers résultats sont indépendants du dépérissement, mais je voudrais l'évoquer car ce travail nous a permis de réfléchir sur ce qu'est vraiment une écorce.

Dans un premier temps, on s'est aperçu que les résultats différaient en fonction de la hauteur du prélèvement sur le tronc, notamment sur *Picea*. Il existe réellement un gradient d'acidité et de conductivité le long du tronc. Le pH est plus acide en bas et la conductivité y est plus faible, cela est sans doute en relation avec l'épaisseur de l'écorce. Car un tronc, c'est une tige qui croît par l'extrémité où se situe le méristème. L'écorce est donc plus mince en haut qu'en bas ; cela joue sur la place de l'écorce par rapport à l'arbre. Si il y a action de la pollution, il y a aussi celle de facteurs internes sur lesquels je reviendrai.

Là où les lichens n'ont pas apporté de réponse sur le dépérissement, l'écorce a pu nous en apporter. Chez les arbres dépérissants, l'écorce est plus acide d'une manière générale et la conductivité est plus faible. Le Sapin a une écorce qui reste en place beaucoup plus longtemps que celle de l'*Epicea*. Dans la végétation lichénique qui s'installe sur l'*Epicea*, il y a des renouvellements plus importants.

Le gradient observé selon la hauteur sur le tronc est en fait moins lié à la hauteur même qu'à l'épaisseur de l'écorce. En haut du tronc, l'écorce est plus mince, l'assise subéro-épidermique est proche et cette écorce est aussi placée très près des tissus conducteurs. Dans les premières assises de cellules, il y a des ions qui passent en provenance des tissus conducteurs et en particulier du liber. En bas du tronc, l'écorce est plus ancienne, plus épaisse et plus soumise à l'influence de l'atmosphère par rapport à ce qui peut se passer à l'intérieur du tronc.

Je vous livre ces éléments d'informations : une écorce est une interface importante entre l'atmosphère et le lichen, donc dans le cadre d'une recolonisation à la suite d'une dépollution, il est sûr qu'il y a eu des transformations de l'écorce et que cela influence directement l'installation de telle ou telle espèce de lichen. Il est donc possible que les sauts de zones signalés par Chantal VAN HALUWYN soient très liés à la nature même de l'écorce, de même le fait que les lichens foliacés reviennent plus vite que les crustacés. L'écorce est un milieu qui n'a pas encore été assez étudié.

## DISCUSSION

O. DAILLANT. A partir de quel taux d'acidité peut-on constater un phénomène de dépérissement ?

J. ASTA. J'avoue n'avoir aucune mémoire des chiffres et je n'ai pas le travail sous la main.

## ETAT ACTUEL DE LA BIOINDICATION PAR LES LICHENS DANS LA REGION DE COPENHAGUE

Ulrik SØCHTING

Inst. for Sporeplanter  
Kobenhavns Universitet  
O Farimagsgade 2 D  
DK 1353 Kobenhavnk

La région de Copenhague fut étudiée plusieurs fois, la première fois en 1936 ; quant à moi, j'ai réalisé des études en 1971, 1982, 1986, 1991.

Nous disposons aussi d'une échelle de corrélation lichens-pollution établie en 1971 à une époque où la pollution par SO<sub>2</sub> était maximale. Cette échelle comprend 9 zones.

L'étude de 1986 a consisté en l'observation d'environ 600 arbres de la région de Copenhague ; ces arbres sont repérables facilement sur le terrain ; nous avons installé des placettes de suivi, nous avons également effectué des photographies et enfin nous avons mesuré le pH de l'écorce. On peut affirmer actuellement que la situation s'est nettement améliorée. *Xanthoria parietina* n'existait pas en 1936 dans le centre de Copenhague ; maintenant cette espèce existe dans le jardin botanique au centre de la ville sous forme de grands thalles fertiles avec un taux de croissance de 4 à 5 mm/an.

En 1971 on pensait que *Lecanora chlorotera* était plus sensible au SO<sub>2</sub> que *Xanthoria parietina* ; mais maintenant il semble que ce *Lecanora* soit beaucoup plus commun que le *Xanthoria*. Ce lichen crustacé préfère une écorce un peu acide, c'est ce qu'il ressort de nos études sur l'acidification des écorces. La pollution en SO<sub>2</sub> est passée de 100 µg à 20 µg. Avec une valeur de 20 µg et sans pointe de pollution, je pense que la majorité des espèces lichéniques épiphytes sur arbres à écorce riche peuvent se développer à Copenhague. Cependant ce n'est pas le cas, pourquoi ?

Il y a une réduction dans l'émission de SO<sub>2</sub> mais en même temps la pollution azotée (NO<sub>2</sub>, NO) augmente encore actuellement. Il y a quelques espèces intéressantes qui indiquent l'acidification, comme c'est le cas à Paris, telles que *Hypogymnia physodes*. Il convient de préciser que ces observations sont faites sur *Ulmus* et *Fraxinus*. En 1936, *Hypogymnia physodes* n'existait pas dans le centre de la ville, ni en 1971 ; mais maintenant cette espèce est très commune ; c'est à n'en pas douter le résultat d'une acidification de l'écorce. Nous avons mesuré l'acidité des écorces de *Ulmus* en 1971, 1986 et 1991.

Notre technique consiste à prélever des fragments d'écorce à la surface du tronc, à les broyer, à diluer le broyat dans de l'eau distillée et à mesurer le pH de la solution au pH-mètre. Le pH est toujours acide. Nous établirons l'hypothèse suivante : *Hypogymnia physodes* ne poussait pas autrefois au centre de Copenhague car la pollution en SO<sub>2</sub> était trop forte ; maintenant que cette pollution a diminué, des espèces qui aiment bien l'écorce acide comme *Hypogymnia physodes* peuvent alors se développer. Nous avons également mesuré le pH de la surface de l'écorce avec une électrode de contact ; dans cette étude nous avons trouvé qu'il existait des relations entre le pH de surface et la fréquence des lichens. Sur tous les arbres dont le pH de surface est inférieur à 3.5, *Hypogymnia physodes* atteint un recouvrement de 45%. Précisons encore que ces résultats concernent *Ulmus*. *Hypocenomyce scalaris* a exactement le même comportement. *Lecanora dispersa* vient sur écorces alcalines (alcalinisées par les poussières, les chiens...). Je propose qu'on utilise ces espèces acidophiles comme indicatrices de l'acidification de l'écorce des arbres à écorce riche comme *Ulmus*, *Fraxinus*. J'ai établi une formule comparable à celle de l'I.A.P. de LEBLANC et DE SLOOVER mais n'utilisant que les espèces acidophiles. J'ai calculé le cortège moyen spécifique des espèces acidophiles qui se développent avec les espèces retenues dans ma liste : le plus acidophile est *Hypocenomyce scalaris*, c'est la meilleure espèce indicatrice, la moins bonne étant *Evernia prunastri*. Cette formule donne de bons résultats dans les petites villes mais pas dans les grandes villes comme Copenhague où la situation est trop complexe.

Dans les études portant sur Copenhague, les échelles de corrélation lichens-pollution antérieurement établies ne sont plus utilisables. Les technocrates ne voient que les concentrations dans l'air, mais nous lichénologues avons un problème avec une écorce qui est transformée, qui s'acidifie, qui accumule des métaux lourds. Cette écorce n'est pas du tout en équilibre avec l'air et cette situation peut durer une vingtaine d'années, voire plus. Nous avons une végétation qui commence à être en équilibre avec l'air ; il y a des espèces foliacées et fruticuleuses qui commencent à pousser parce que leur relation avec l'air est maintenant plus favorable, mais il y a toujours l'écorce qui leur est défavorable. C'est probablement la raison pour laquelle les espèces crustacées ne se développent pas. Faut-il établir des échelles nouvelles ?

J'ai commencé à travailler d'une autre manière. Je considère les lichens comme accumulateurs d'azote. L'azote provient de la circulation automobile sous forme de NO et NO<sub>2</sub> ; ces composés se déposent difficilement, ils sont transportés et, lors de ce transfert, sont transformés en nitrates qui se déposent. Une cartographie des lichens par rapport à ces substances est difficile à établir. Au Danemark, nous avons beaucoup de problèmes avec l'ammonium et l'ammoniac qui, eux, sont facilement déposés assez près de la source et les lichens les absorbent. J'ai réalisé des études sur l'azote total des lichens *Cladonia div. sp.* et *Hypogymnia physodes*. Ces études sont très prometteuses, j'en parlerai au Colloque de Lund en 1992.

## DISCUSSION

K. AMMANN. Le problème de l'azote au Danemark est-il lié au trafic automobile ?

U. SØCHTING. Oui à Copenhague. Mais le plus grand problème c'est l'azote d'origine agricole.

K. AMMANN. C'est aussi la "folie" avec l'ozone en Suisse. On a réduit la vitesse sur les grandes routes pour cette raison. Je pense que l'ozone est un problème très délicat et très complexe et peut-être causé par des activités agricoles. C'est un cycle très compliqué dans l'atmosphère. En Suisse les concentrations maximales en ozone se situent hors des zones urbaines.

U. SØCHTING. L'ozone pose beaucoup de problèmes également au Danemark. *Fagus* serait très sensible à l'ozone, or cette essence connaît des problèmes dans notre pays.

K. AMMANN. A propos de l'index d'acidification, pourquoi ne pas prendre simplement dans la formule le nombre d'espèces acidophiles ? Du point de vue épistémologique, tu fais de la tautologie : tu exprimes l'acidophilie par un chiffre que tu as pris toujours à partir des mêmes données. Avec une formule plus simple, tu pourrais obtenir les mêmes isopleths.

U. SØCHTING. On peut faire beaucoup de choses, je ne sais pas quelle est la meilleure formule. C'est la même formule, c'est la même pratique que pour l'I.A.P. Le plus important est-il de dire que l'espèce est là ou qu'elle a un recouvrement important ?

EXPERIMENTATION  
D'UNE NOUVELLE FORMULATION DE L'IAP  
EN SUISSE

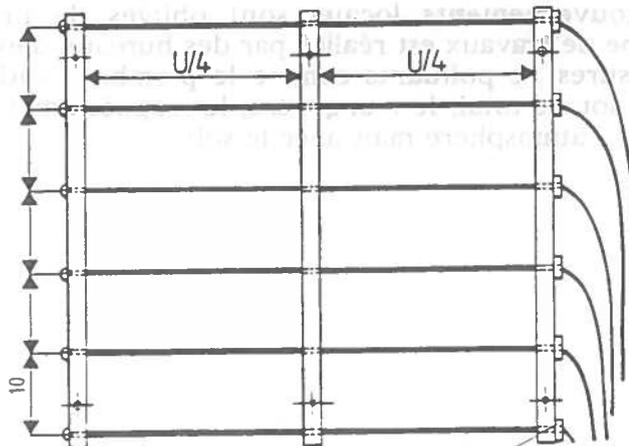
Klaus AMMANN  
Universität Bern  
Botanische Institute  
CH-3013 BERN

Dans cette communication, je vais vous présenter le bilan de cinq années de travaux.

Notre équipe (HERZIG, LIEBENDÖRFER, URECH et moi-même) est incluse dans un programme pluridisciplinaire. Ainsi, on a commencé à se comprendre car les météorologues ont aussi travaillé dans la région de Biel ; des mesures fines de polluants ont été effectuées ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $Cl^-$ , Pb, Cu, Zn, Cd, poussières) et on a fait des modélisations de distribution de ces polluants ; on a réalisé la carte calibrée des lichens. On s'est alors trouvé devant une masse de documents et, à ce moment-là, on a commencé à se comprendre et on a publié ensemble. Par la suite nous avons essayé de nous intégrer aux décisions politiques.

Pourquoi travailler à Biel ? En 1984, un réseau de mesures performant a été installé avec quatorze stations mesurant chacune huit polluants. Dans un premier temps, nous avons cartographié différentes espèces de lichens comme *Parmelia sulcata*, *Hypogymnia physodes* et on a commencé à avoir des problèmes car nous étions un peu naïfs de croire qu'il était possible de résoudre les problèmes seulement avec des cartes. Nous avons décidé de transformer les données obtenues avec les lichens en chiffres, mais de nouveau nous avons eu des problèmes car, si on met en chiffres, c'est très scientifique, mais en fait il n'y a pas de comparaison possible. On a étudié soigneusement la littérature, surtout celle qui utilise les méthodes quantitatives (IAP notamment). On s'est aperçu qu'il y avait beaucoup de formules différentes sans que les raisons de ces modifications soient clairement justifiées. Nous nous sommes alors dits qu'il fallait employer toutes ces formules et en inventer de nouvelles, mais quelle est la meilleure ?

En ce qui concerne le mode opératoire, nous avons utilisé le réseau de Kunze pour relever la végétation lichénique des troncs (fig.) Toutefois nous l'avons modifié en le rendant extensible de manière à l'adapter au diamètre des troncs, ce qui nous permettait de prendre en compte le maximum de flore épiphyte. Les comparaisons faites avec le réseau fixe ont objectivé notre démarche.



On a ensuite réalisé une modélisation multivariable à partir de vingt formules différentes selon deux options A et B. L'option A prend en compte toutes les espèces présentes sur les troncs ; l'option B prend en compte les espèces présentes sauf quatorze espèces éliminées en raison de leur trop grande toxitolérance et ne présentant donc aucune signification. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mesures physico-chimiques de la pollution (notamment les huit paramètres enregistrés et cités précédemment). On a réalisé une régression multilinéaire ; de cette manière, on a commis une faute en disant qu'il existe une relation linéaire, mais si on prend en considération toutes les espèces, en moyenne on peut dire que c'est grossièrement linéaire. On a fait cette régression formule par formule, et on a toujours vu que l'IAP8 et l'IAP18 étaient les meilleures, c'est à dire simplement la somme des fréquences. Tout le reste est beaucoup trop compliqué et moins exact. C'est avec ces formules et surtout l'IAP18 que l'on obtient la plus forte corrélation. Pour chaque formule, pour chaque espèce, pour chaque site, on s'est posé la question suivante : dans la régression multilinéaire, comment réaliser le choix des coefficients  $\beta$  qui nous donne au plus exact notre couplage de lichens simplement par sommation. Avec la combinaison des  $\beta$  et un résidu qui n'est pas explicable, on a trouvé une combinaison stable avec l'IAP18 qui était très proche de 100% (0,95 à 0,98%) avec un reste de 1,2 ou 1,3% non explicable. On est allé plus loin : si on élimine des facteurs, par exemple en ne prenant que les poussières et le SO<sub>2</sub>, alors la qualité est moins bonne, et ainsi de suite jusqu'à ne plus avoir que le SO<sub>2</sub>, à ce moment-là la qualité est très mauvaise. Quand le modèle traite moins de quatre facteurs, la qualité est considérablement amoindrie. Il ne faut surtout pas se concentrer sur le SO<sub>2</sub> ou sur les NO<sub>x</sub>. Ceci montre que notre démarche est presque identique à la méthode phytosociologique de Van HALUWYN et LEROND, car elle n'est pas réductionniste, elle intègre tout. Certains facteurs sont corrélés, d'autres pas du tout. Avec notre méthode, une station sortait du système, mais c'était en fait une station soumise à une pollution considérable en cadmium. On a aussi fait des analyses avec les polluants ; on a vu que l'ozone pose problème, c'est une addition au modèle qui augmente sa qualité. On a développé un système qui nous permet de prédire avec une certaine probabilité (mais pas avec une corrélation linéaire absolue) qu'il y a des limites de pollution qui sont dépassées (on peut le prédire avec une probabilité de 98%).

On a adapté notre système à ces limites légales en ordonnant tous nos résultats IAP d'après ce système de classes adaptées au  $\sigma$  de la courbe de Gauss. On a adopté un  $\sigma$  pour des classes et puis on s'est dit : si on s'adapte pour la définition des zones à la largeur d'un  $\sigma$ , alors on est toujours du côté sûr de la statistique. Tout cela peut être automatisé par des programmes de statistique. On a aussi pris une autre décision car on ne peut pas tout mathématiser en biologie de terrain. On a alors défini de petites sous-régions écologiques ou géographiques où l'on est sûr d'avoir les mêmes conditions climatiques, de trafic, de densité de population et on prend tous les arbres ; alors on bâtit une carte avec ces IAP. Il y a deux choses à distinguer : l'évaluation dont j'ai parlé avec les diverses formules et la calibration d'après les zones, et ainsi on est sûr que, dans le désert lichénique, les limites de pollution sont dépassées. Les gouvernements locaux sont obligés de prendre des mesures. Maintenant ce type de travaux est réalisé par des bureaux d'expertise et on a élargi l'étude à des mesures de polluants comme le plomb, le cadmium, le calcium, le cuivre, le fer, le soufre total, le manganèse, le magnésium (ces deux derniers ne marchent pas avec l'atmosphère mais avec le sol).

## BIBLIOGRAPHIE

- HERZIG, R., LIEBENDORFER, L. und URECH, M. 1987. Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung in der Schweiz : Methoden-Evaluation und Eichung mit wichtigen Luftschadstoffen. *VDI Berichte*, 609 : 619-639.
- HERZIG, R., LIEBENDORFER, L., URECH, M., AMMANN, K., CUECHEVA, M. and LANDOLT, W. 1989. Passive Biomonitoring with lichens as a part of an Integrated Biological Measuring System for Monitoring Air Pollution in Switzerland. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 35 : 43-57.
- HERZIG, R. and URECH, M., 1991. Flechten als Bioindikatoren. Integriertes biologisches Meßsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittland. *Bibliotheca Lichenologica* 43 : 1-283. J. Cramer, Berlin. Stuttgart
- LIEBENDORFER, L., HERZIG, R., URECH, M. und AMMANN, K., 1988. Evaluation und Kalibrierung der schweizer Flechten-Indikationsmethode mit wichtigen Luftschadstoffen. *Staub - Reinhaltung der Luft* . 48 : 233-238.

## DISCUSSION

J. BEGUINOT. Pourriez-vous préciser brièvement la définition de l'IAP18 ?

K. AMMANN. C'est la somme des fréquences. On calcule ces fréquences avec le "réseau", on compte combien de fois une espèce donnée est présente dans les 10 cases du réseau.

J. BEGUINOT. On ne pondère donc pas les espèces par leur rôle écologique, leur sensibilité.

K. AMMANN. On exclue quatorze espèces toxitolérantes.

J. BEGUINOT. Je suis choqué par le fait qu'on considère les espèces comme ayant toutes la même sensibilité.

K. AMMANN. La somme des fréquences est beaucoup plus élevée dans une zone riche en lichens.

J. BEGUINOT. 100% de *Lecanora conizaeoides* ne peuvent avoir la même signification que 100% de *Xanthoria parietina*, les messages donnés par ces deux espèces ne sont pas les mêmes en matière de pollution.

K. AMMANN. Peut-être. Mais nous avons soigneusement comparé les données de recouvrement avec celles de la fréquence et on a vu que la fréquence donnait de bien meilleurs résultats dans notre modèle.

J. BEGUINOT. Pour moi, chaque espèce délivre un message différent. Je suis très surpris qu'on obtienne d'aussi bons résultats avec des fréquences sans tenir compte de la nature de l'espèce. Bien sûr il est évident que les espèces sensibles soient plus fréquemment réunies, avec un nombre important d'espèces, avec des IAP18 élevés. Mais je pense qu'on devrait avoir théoriquement une meilleure corrélation si on tenait compte de la nature de ce cortège.

K. AMMANN. Tout à fait d'accord si on raisonne en mathématicien et si on se réfère à la non linéarité. Or nous avons pris une méthode statistique qui se base sur des corrélations linéaires. Si on connaissait exactement la courbe de la nature biologique de l'espèce, on pourrait se limiter à 2,3 ou 4 espèces seulement.

J. BEGUINOT. La formule initiale de LEBLANC et DE SLOOVER répond en partie à cette question par le fait qu'en pondérant chaque espèce par le cortège spécifique moyen on tient compte de sa sensibilité. C'est tautologique au sens de la simple logique mais, en probabilité, le raisonnement de DE SLOOVER n'est pas tautologique.

K. AMMANN. On a réduit rigoureusement les données à la fréquence et on a été très étonné que cette formule "idiote" du point de vue biologique soit la meilleure.

J. BEGUINOT. Ce qui semble ennuyeux c'est que vos résultats réduisent considérablement l'intérêt de la méthode phytosociologique. Le principe de cette méthode est justement de prendre en compte les caractéristiques écologiques propres à chaque espèce.

K. AMMANN. Non, vous "surchargez" la réalité ! On fait des tableaux, on ne sait rien de la biologie si on fait de la phytosociologie ; on peut aussi entièrement la mathématiser, dans ce cas on ne fait plus de biologie et on travaille uniquement à partir de l'abondance.

J. BEGUINOT. Quand on fait un diagnostic phytosociologique, on observe la présence de telle ou telle espèce ; le diagnostic qui est formulé tient compte des fréquences relatives de chacune des espèces.

K. AMMANN. Dans la méthode phytosociologique, on réalise des tableaux sans rien savoir de la biologie. En phytosociologie, on peut aussi employer des algorithmes, on peut tout "mathématiser" et avoir une phytosociologie absolument claire ; on ne tient compte que des coefficients d'abondance-dominance ; on ne peut pas appeler cela de la biologie.

J. BEGUINOT. En phytosociologie, on fait d'abord une typologie, ensuite on réalise un diagnostic.

K. AMMANN. Quelle sorte de diagnostic ? Ce n'est pas de la biologie. En effet, du point de vue épistémologique, on travaille presque avec les mêmes données ; y ajouter les coefficients d'abondance de BRAUN-BLANQUET et le reste, c'est de la théorie, de l'interprétation, mais pas de la biologie. La biologie commence quand, par exemple, BRAUN-BLANQUET étudie soigneusement, dans quelques pelouses, seulement l'autoécologie espèce par espèce et ajoute ainsi à l'image totale de ces pelouses. Là c'est de la biologie ; le reste est statistique.

J. BEGUINOT. Si on raisonne de cette manière, on condamne la phytosociologie qui justement ne fait pas de l'écologie, l'écologie étant une conséquence.

K. AMMANN. Non, ça je ne le dirai jamais. La phytosociologie pour moi est une science de première importance qui est dénoncée aujourd'hui par les écologues, mais c'est un système valable. C'est aussi un système où l'on emploie des données assez simples et je suis vexé que cela donne des corrélations aussi élevées.

J.P. KONRAT. Ce que vous mesurez en fait, dans les zones très polluées, ce sont celles où il y a très peu d'espèces et dans les zones peu polluées celles où il y a beaucoup d'espèces ; mais pour arriver à y voir clair, là où vous avez des perturbations un peu particulières et quand vous voulez corréler avec un polluant ou un autre, vous êtes obligés de prendre un autre type plus complexe, il faut aller au-delà de cette simple notion de fréquence.

K. AMMANN. Je vois l'argument, c'est qu'il y a une différence, mais la différence n'est pas si grande. Le système phytosociologique est un système qui me plaît beaucoup. J'ai donné des cours à une Université américaine où j'ai été considéré comme révolutionnaire en affirmant que BRAUN-BLANQUET avait raison, devant un public qui dénigrait cette science. J'ai effectivement constaté qu'il y avait des défauts, la phytosociologie n'est pas l'Evangile ! Mais c'est une méthode très pratique comme Mme VAN HALUWYN l'a montré.

J. BEGUINOT. Mme VAN HALUWYN ne considère pas que toutes les espèces ont la même signification.

K. AMMANN. Moi non plus !

J. BEGUINOT. Si, quand on fait la somme des fréquences de toutes les espèces sans dire de laquelle espèce il s'agit.

K. AMMANN. Mais si j'arrive avec une calibration à un coefficient de 98%, moi je suis content.

S. DERUELLE. Plus besoin de déterminer les lichens !

K. AMMANN. C'est faux, on détermine toutes les espèces.

J. BEGUINOT. Moi ça me choque sur le plan du principe de réduire une information qui en plus inclut le nom car il y a plusieurs étapes ; il faut distinguer les différentes espèces (là vous le faites) et ensuite les nommer ; les nommer c'est d'une certaine façon les associer en fonction de leur sensibilité (car on sait qu'il y a des espèces plus sensibles que d'autres). Les résultats auxquels vous aboutissez, c'est que finalement ignorer la sensibilité des espèces donne de meilleures corrélations. C'est vexant et je ne comprends pas.

K. AMMANN. On aurait une meilleure corrélation en n'ignorant pas les différents types de sensibilité, je suis d'accord.

C. VAN HALUWYN. Il y a aussi une grande différence méthodologique : vous prenez en compte pratiquement l'ensemble de la végétation lichénique se développant sur le tronc, tandis qu'avec la méthode phytosociologique on délimite des formes très différentes qui correspondent chacune à des écologies différentes.

J. BEGUINOT. Oui là aussi c'est un peu choquant.

K. AMMANN. Oui nous faisons une généralisation, c'est aussi un "choc" ; mais c'est quand même mieux de travailler avec un réseau de Kuntze extensible !

C. VAN HALUWYN. En fait la méthode des relevés s'apparente à la méthode des fréquences de DU RIETZ.

K. AMMANN. Plus ou moins adaptée, mais ça marche !

U. SØCHTING. Prenez-vous différents types de phorophytes ?

K. AMMANN. Oui, nous avons considéré quatre essences. N'oubliez pas que nous avons calibré notre méthode pour le plateau suisse, on a déjà dû la recalibré dans la région des Grisons.

U. SØCHTING. Il faut aussi standardiser le choix des phorophytes.

K. AMMANN. Oui. On a vu qu'une inclinaison de 3° suffisait pour changer les résultats de manière considérable. La limite de la méthode est de trouver des arbres répondant parfaitement aux critères de choix.

M. LEROND. J'ai le sentiment que les deux méthodes (la vôtre et la nôtre) ne se contredisent pas. Au contraire elles se renforcent. Par contre je crois qu'il y a une différence virtuelle qui tient sans doute à un manque d'explications de notre part. A savoir qu'on a pas assez dit, ou pas assez expliqué, que la gradation des groupements phytosociologiques qu'on retient comme base de l'échelle s'accompagne de manière quasi obligatoire de l'augmentation de la fréquence et cela on ne l'exprime pas suffisamment. Ce qui fait qu'on a l'impression que la différence porte uniquement sur la nature des espèces. Non, il y aussi une différence de fréquence : plus on a de groupements riches et complexes et plus évidemment on sélectionne les espèces, notamment en fonction de la pollution.

Dans l'application pratique sur le terrain, je me demande si c'est transposable partout et si on n'est pas confronté à des difficultés purement matérielles : choix des phorophytes par exemple.

K. AMMANN. Certainement.

C. VAN HALUWYN. Avec notre méthode nous priorisons le qualitatif en vue de l'élaboration d'une échelle de correspondance ; votre méthode priorise le quantitatif en vue d'études statistiques avec des mesures de pollution. En fait nous n'avons pas défini la même finalité.

K. AMMANN. Oui absolument, mais nos données sont presque les mêmes.

J. BEGUINOT. La méthode phytosociologique doit apporter plus de renseignements. Elle est plus riche car elle inclut l'écologie intuitive des espèces.

K. AMMANN. Nous travaillerons à l'avenir sur la non linéarité du comportement biologique de certaines espèces pour avoir une corrélation plus élevée, pour être capable de réduire le

spectre d'espèces considérées, pour avoir la même certitude de corrélation avec peut-être 5, 6 ou 10 espèces. Mais on ne connaît pas encore la biologie de ces espèces.

S. DERUELLE. Quelles sont les espèces retenues pour la réalisation de la carte WWF ?

K. AMMANN. *Parmelia caperata*, *P. tiliacea*, *Usnea hirta*, *Parmelia saxatilis*, *Evernia prunastri* et *Lecanora conizaeoides*. Il existe un cahier Panda en Suisse et en Italie.

M. LEROND. Ces espèces retenues sont peu toxitolérantes, comment faire dans des zones polluées où vos espèces ne peuvent survivre ?

K. AMMANN. Oui, je suis d'accord.

**L'INSUFFISANTE SIGNIFICATION  
DE LA DIVERSITE SPECIFIQUE BRUTE :  
L'APPORT DE L'I.A.P. DE LEBLANC ET DE SLOOVER**

Jean BEGUINOT  
Association Française de Lichénologie

La diversité spécifique brute (c'est-à-dire telle qu'observée) d'un substrat peut être directement identifiée au (ou exprimée en fonction du) nombre d'espèces observées ensemble sur ce substrat (avec éventuelle prise en compte des pondérations apportées par des facteurs spécifiques tels que fréquence des individus/unités d'aire, recouvrement relatif et vitalité de chacune des espèces présentes).

Dès lors que de tels types d'évaluations directes de la diversité spécifique se trouvent être, de fait, hautement corrélés avec le degré de pureté atmosphérique, comme le montrent diverses études (dont, en particulier, celles de K. AMMANN présentées lors de ce Séminaire), il pourrait sembler logique, réciproquement, de considérer la diversité spécifique brute observée comme un bon outil diagnostique du degré de pureté atmosphérique. Ce serait oublier qu'un bon niveau de corrélation est une condition nécessaire mais nullement suffisante pour établir une bonne méthode de diagnostic. Ainsi, par exemple, on trouverait facilement une très bonne corrélation entre l'âge - de 0 à 20 ans - et le tour de taille au sein d'une population d'êtres humains. Pourtant, à l'évidence, cette taille ne garantit nullement un diagnostic individuel fiable de l'âge. De même, chacun a pu observer, non rarement, des substrats porteurs d'une faible diversité spécifique dans des zones pourtant à haute pureté atmosphérique et ce malgré la haute corrélation globale démontrée entre diversité spécifique et qualité de l'air. Du reste, bien souvent, la nature taxonomique des quelques espèces seules présentes "corrige" l'impression que laisserait la constatation brute de la faible diversité spécifique. Ainsi, par exemple, malgré un même effectif spécifique, un substrat porteur de *Usnea sp.*, *Parmelia perlata* et *Parmelia caperata* n'inspire évidemment pas la même opinion que le support hébergeant conjointement *Lecanora conizaeoides*, *Hypogymnia physodes* et *Lepraria incana*.

Cette limitation de valeur diagnostique de la diversité spécifique brute (par rapport à la diversité spécifique potentielle) et la correction qu'apporte la prise en considération des spécificités écologiques des espèces présentes, justifie l'intervention du coefficient correctif écologique "Q" dans l'expression de l'I.A.P. de LEBLANC et DE SLOOVER (1970).

Ces auteurs ont, de plus, eu l'idée, fort élégante, de traduire les messages écologiques envoyés par chacune des espèces présentes dans les termes mêmes de la grandeur primaire qu'ils corrigent : à savoir l'effectif spécifique brut observé. Ainsi, le facteur écologique correctif Q, propre à chaque taxon, est-il lui-même exprimé en terme d'effectif (= diversité) spécifique : le nombre moyen d'espèces accompagnant le taxon considéré ("cortège moyen"). La formulation ainsi établie par LEBLANC et DE SLOOVER permet d'accéder à une estimation de la diversité spécifique potentielle, bien plus significative écologiquement que ne peut l'être la diversité spécifique brute, telle qu'observée. De plus, l'homogénéité de construction qui vient d'être soulignée assure à cette formulation une remarquable self-consistance formelle qui ne peut que contribuer à sa généralité d'application, tout au moins en tant qu'indice d'évaluation de la diversité spécifique potentielle d'un site donné.

Paradoxalement, cette habileté formelle est à l'origine d'une critique - à notre avis tout à fait injustifiée - relative au caractère "apparemment tautologique" de la formulation de l'I.A.P. (pour mémoire, les discussions animées à ce sujet lors du présent Séminaire). Tautologie seulement apparente : en effet, les cortèges spécifiques moyens Q, propres à chaque espèce présente, loin d'être redondants vis-à-vis du nombre brut d'espèces observées sur le site considéré, contribuent au contraire à corriger le biais auquel le nombre brut d'espèces peut conduire, dans l'estimation de la diversité spécifique potentielle du site, comme il vient d'être souligné.

Ainsi, suspecter la valeur théorique de l'I.A.P. de LEBLANC et DE SLOOVER par rapport à celle d'une expression simplifiée directement liée à la diversité spécifique brute observée, sous prétexte de "construction tautologique", reviendrait exactement à considérer les choses à l'inverse de ce qu'elles sont réellement !

En utilisant l'I.A.P. plutôt que des formulations dérivées par excessive simplification théorique et formelle, on évite, en fait, le risque de former des diagnostics de niveau de pollution biaisés, car injustement sévères, dans le cas des sites effectivement pauvres mais potentiellement riches en espèces, ne devant leur paucispécificité qu'aux aléas d'établissement des peuplements et nullement à une écologie (pollution) défavorable.

## BIBLIOGRAPHIE

LEBLANC, F, et DE SLOOVER, J., 1970. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canad. Journ. of Botany*, 48 : 1485-1496.

UNE DES CAUSES FONDAMENTALES DE L'HYSTERESIS DE RETOUR  
DES PEUPEMENTS LICHENIQUES A LA POLLUTION

Jean BEGUINOT

Association Française de Lichénologie

"Non bis in idem"

De manière très générale, on sait que la dynamique des peuplements répond de manière retardée aux évolutions environnementales (ici pollution - dépollution). Cette inertie résulte de ce que l'état d'un peuplement à un instant donné est largement fonction des phases antérieures (croissance et germination des thalles actuels et fertilité de la génération précédente) reflétant ainsi, pour une bonne part, les conditions environnementales prévalant antérieurement.

Ceci laisse prévoir que la restauration du couvert lichénique en phase de pollution décroissante suivra des voies différentes, plus lentes au début, que ne le laisseraient supposer les observations et corrélations effectuées lors de la péjoration antérieure du couvert, en phase de pollution croissante.

Le recours à une modélisation élémentaire permet de confirmer et préciser les grandes tendances suivantes et notamment de interpréter les premières observations, suite à dépollution:

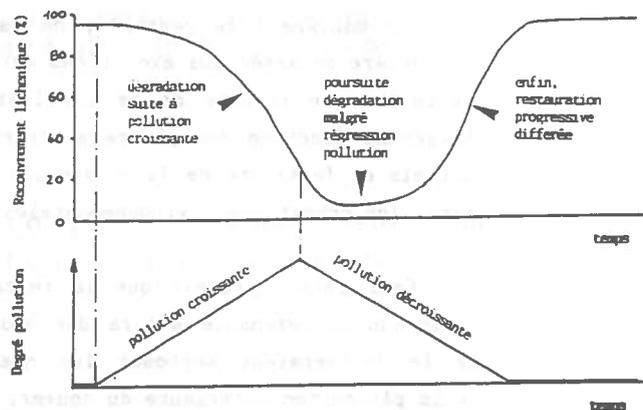
① - La restauration du couvert lichénique peut effectivement se révéler beaucoup plus lente que ne le laisseraient présumer les observations antérieures réalisées en phase de pollution croissante, en particulier au début de la phase de dépollution. Ce mécanisme contribue à expliquer (le cas échéant, conjointement avec d'autres facteurs plus spécifiques) les désaccords observés récemment en situation de dépollution, par rapport aux corrélations lichens-pollution antérieurement établies lors de l'accroissement de la pollution.

② - On doit, en règle générale, s'attendre à ce que ces désaccords soient d'autant plus accusés que les espèces concernées sont plus sensibles.

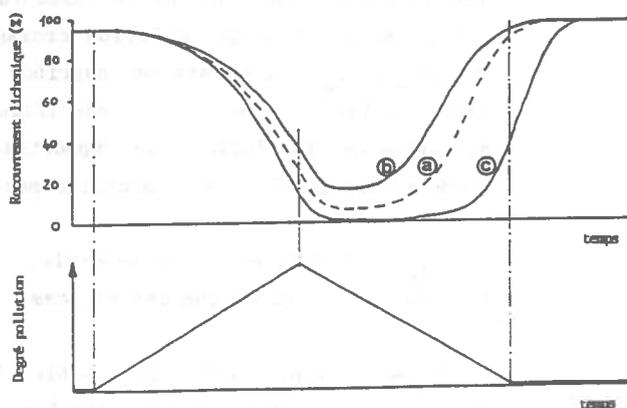
③ - Toutefois, comme prévisible, l'existence de "réserves" de diaspores dans des zones adjacentes moins polluées peut fortement contribuer à réduire les retards en début de restauration (là encore, surtout pour les espèces sensibles).

④ - Dans le cas général de peuplements pluri-spécifiques, les remarques précédentes s'appliquent au peuplement global. Mais, en outre, la composition spécifique (proportions relatives des espèces) est, elle-même, susceptible d'évoluer très différemment en phase de dépollution comparativement à l'étape antérieure de pollution croissante. Le retour à l'équilibre initial en terme de composition est ainsi soumis à un retard encore plus prononcé que celui

Ces quatre grandes tendances sont illustrées graphiquement ci-dessous en utilisant un modèle élémentaire de reproduction-croissance-compétition approprié au mode de développement lichénique (BEGUINOT 1988 - Bull. Ass. Fr. Lic 13 (1) pp 30-43). Un tel modèle ne vise nullement à proposer des simulations quantitativement valables, mais à dégager, en les expliquant, les tendances



① - La restauration du couvert lichénique ne répond que tardivement à la régression de la pollution; il peut même y avoir d'abord poursuite de la détérioration du couvert en dépit de la dépollution commençante. Ensuite, le processus s'accélère fortement (comme pour rattraper le retard!)



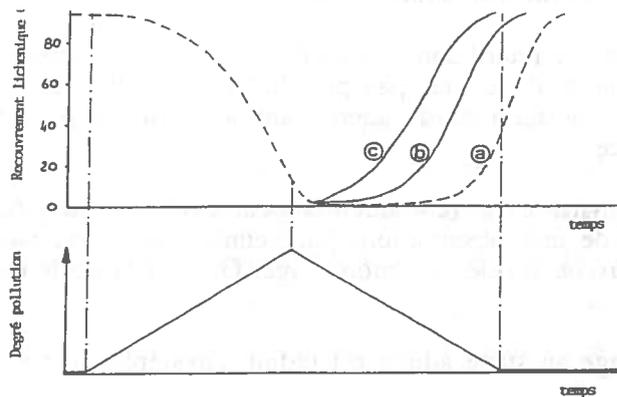
② - Le retard à la restauration est d'autant plus prononcé que l'espèce considérée est sensible à la pollution:

(a) : cas précédent (  $x = 7.5$  )

(b) : espèce moins sensible que (a) (  $x = 5.1$  )

(c) : espèce nettement plus sensible que (a) (  $x = 20$  )

(  $x$  : facteur de réduction du taux de reproduction intrinsèque au maximum de pollution par rapport à sa valeur en l'absence de pollution )

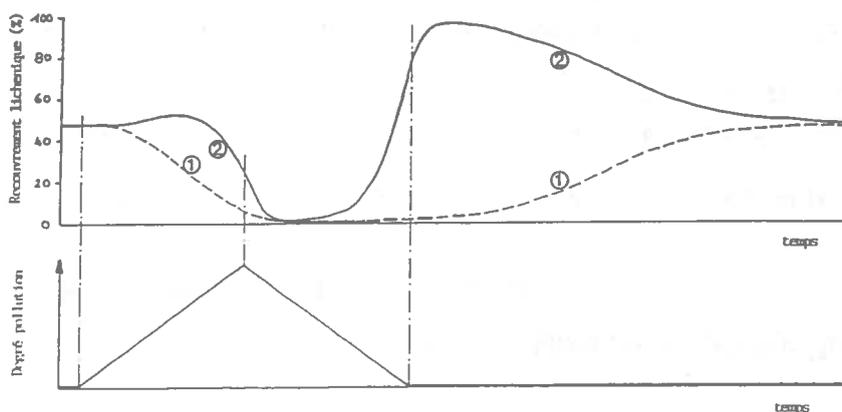


③ - L'apport extérieur de diaspores (issues p. ex. de zones moins polluées ± adjacentes) peut réduire fortement le retard à restauration, surtout dans le cas d'espèces sensibles fortement raréfiées par la pollution antérieure.

On considère ici l'espèce sensible envisagée précédemment sous l'indice ③

- ① : sans apport extérieur de diaspores
- ② : avec apport extérieur "faible" ( $y = 2\%$ )
- ③ : avec apport extérieur plus important ( $y = 10\%$ )

(  $y$  : recouvrement local (%) qui donnerait lieu à alimentation interne en diaspores équivalente à l'alimentation externe considérée )



④ - Evolution des recouvrements spécifiques d'un peuplement à deux espèces : l'une sensible ①, l'autre moins sensible ②. A l'équilibre, avant pollution, les espèces ① et ② sont supposées être en égales proportions (47% recouvrement chacune). Noter, en début de phase polluante, la légère embellie transitoire de l'espèce ② profitant partiellement de l'espace libéré par la décroissance rapide de l'espèce sensible ①. En phase de dépollution, après le temps de retard habituel, l'espèce moins sensible ② restaure très vite son recouvrement qui atteint presque 100% tandis que l'espèce sensible n'évolue guère. Le retour à l'équilibre initial ne s'instaure ensuite que très lentement !

## DISCUSSION

M.A. LETROUIT. Je voudrais parler de ce que j'ai observé en forêt de Chantilly. Pendant tout un temps, je n'ai pas constaté beaucoup de changements, puis tout d'un coup il y a eu une accélération et en quelques années on a vu de nouveau *Parmelia caperata*, *P. sulcata*. Ce qui est remarquable, c'est qu'effectivement les troncs sont complètement recouverts comme dans des zones non polluées mais la composition floristique n'est pas la même et en particulier il y a eu un retard considérable dans l'apparition des espèces crustacées. On voit apparaître seulement maintenant des *Phlyctis*, des *Pertusaria amara*, espèces sorédiées.

J. BEGUINOT. On pourrait penser que ce retard dans l'apparition des espèces crustacées est lié à la sensibilité de ces espèces, mais il ne faut pas prendre mon modèle comme une explication universelle. Je crois plus à ce qui a été dit auparavant, à savoir que les crustacés sont en contact plus direct avec l'écorce.

M.A. LETROUIT. Je pense que la vitesse de reproduction peut expliquer la vitesse de recouvrement. En prenant l'exemple de mes observations parisiennes, *Xanthoria parietina*, espèce à ascospores, développe des *ascomata* dès six mois d'âge. Or c'est la seule espèce à ascocarpe que je vois.

J. BEGUINOT. Si le temps de passage au stade adulte est réduit, l'hystérésis est réduit en proportion.

A. BELLEMERE. Donc votre étude de la dissymétrie de la courbe peut permettre de déterminer en gros à quel moment la pollution a effectivement baissé.

J. BEGUINOT. A cause de la dissymétrie on ne peut pas savoir.

K. AMMANN. Il ne faut pas perdre de vue la complexité même du thalle du lichen. Ainsi un thalle lobé correspondrait à des structures fractales.

**APPORT D'UNE METHODE DE DIAGNOSTIC PHYTOSOCIOLOGIQUE QUANTIFIE  
A L'ESTIMATION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE**

Jean BEGUINOT

Association Française de Lichénologie

Au-delà de son objectif premier de description de la végétation, le diagnostic phytosociologique peut également constituer un outil approprié et pratique d'analyse et d'estimation quantitative des paramètres écologiques régissant la composition locale de la végétation. La "mesure indirecte" du degré de pollution atmosphérique acide à partir de l'observation de la végétation lichénique en constitue un bon exemple.

► **DES QUESTIONS ESSENTIELLES EN PRATIQUE**

S'agissant de "mesures", se posent naturellement les questions habituelles, relatives à l'exactitude et au degré de précision (intervalle de confiance) de l'estimation issue du diagnostic, dans un souci d'interprétation valide des résultats. En particulier, sont à envisager des aspects aussi importants en pratique que :

- détermination de l'intervalle de confiance attribuable au degré de pollution d'un site donné obtenu par diagnostic phytosociologique,
- corrélativement, estimation du degré de signification statistique d'un écart entre diagnostics établis pour deux sites distincts,

questions illustrées plus loin sur deux exemples.

► **UN OUTIL DE REPONSE APPROPRIE :**

**LE DIAGNOSTIC PHYTOSOCIOLOGIQUE QUANTIFIE**

Une méthodologie récemment développée dans cet esprit, dans un cadre d'utilisation générale en phytosociologie (BEGUINOT 1989\*), trouve ici un exemple d'application intéressant. Cette méthode, strictement calquée

---

\* BEGUINOT Jean 1989 - Bull. Soc. Hist. Nat. AUTUN 130 pp. 21-32

dans son principe sur le raisonnement diagnostique traditionnel en phytosociologie, le formalise simplement de manière quantitative. Elle s'appuie sur l'Analyse des probabilités des causes (statistique bayésienne), appropriée lorsque les causes (ici écologiques) influent de manière fréquentielle sur les effets correspondants (ici fréquences d'occurrence des espèces). Cette approche permet d'intégrer, aussi rigoureusement que possible, l'information floristique du site considéré dans l'expression du diagnostic phytosociologique correspondant. Celui-ci s'exprime en termes de probabilités respectives d'affiliation du site étudié aux différentes unités sociologiques de référence (ces dernières ici reliées aux différents degrés de l'échelle de pollution de HAWKSWORTH et ROSE). En pratique, le diagnostic ainsi exprimé est obtenu en moins d'une minute, en exploitant le logiciel correspondant sur calculette programmable de poche.

### EXEMPLES D'APPLICATION DU DIAGNOSTIC QUANTIFIÉ

#### A L'ESTIMATION DU DEGRÉ DE POLLUTION

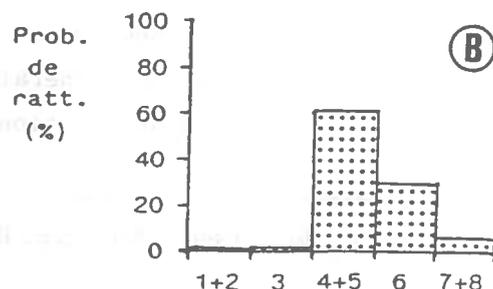
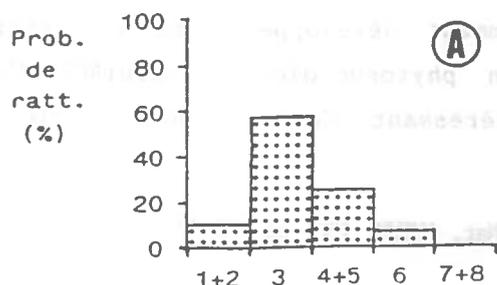
Nota : On a ici convenu de regrouper les niveaux de l'échelle de HAWKSWORTH et ROSE en 5 grandes classes 1+2, 3, 4+5, 6, 7+8.

#### \* Estimation du degré de pollution et son degré de confiance

Deux sites A et B portent les végétations corticoles suivantes :

- (A) Pleurococcus sp., Lecanora conizaeoides, Buellia punctata
- (B) Lecanora conizaeoides, Lecanora expallens, Physcia adscendens, Xanthoria parietina

Le diagnostic phytosociologique habituel conduit a priori à affecter ces deux sites A et B respectivement aux classes 3 et 4+5 de l'échelle de HAWKSWORTH et ROSE. Le diagnostic quantifié, exprimé sous forme d'histogramme de probabilités de rattachement aux différentes classes de l'échelle (figures ci-dessous), tout en tendant à confirmer ces estimations, montre cependant que leur degré de certitude reste limité (probabilités ne dépassant pas 60 % seulement dans chacun des 2 cas). Le rattachement à des classes adjacentes à celles estimées reste donc tout à fait plausible : à ce stade, une affectation tranchée serait trop hâtive.

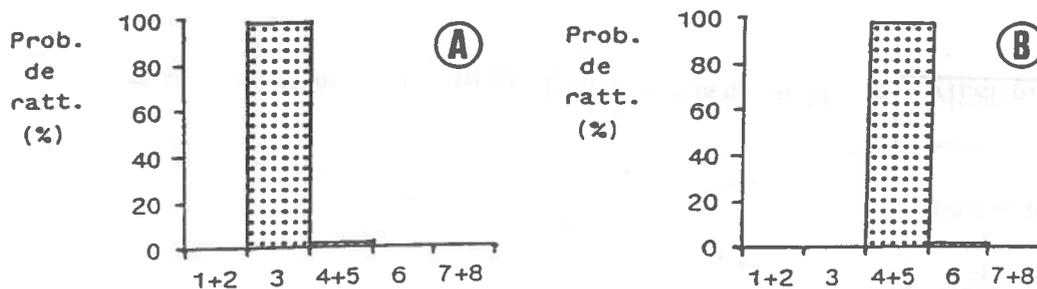


\* Degré de signification de l'écart diagnostiqué entre les 2 sites

La connaissance des distributions de probabilités de rattachement, présentées graphiquement ci-dessus, permet en outre de calculer la probabilité d'existence d'un écart au moins égal à une classe entre les niveaux de pollutions des deux sites A et B. Cette probabilité d'écart, ainsi établie, s'élève seulement à 75 %, laissant ainsi provisoirement sujet à caution l'hypothèse avancée a priori de pollutions significativement distinctes.

\* Affinement du diagnostic par multiplication des relevés sur site

Les tendances précédentes, quelque peu incertaines, incitent à renforcer l'inventaire sur sites en vue d'affiner le diagnostic. Supposons (de manière académique) que les deux listes floristiques précédentes soient chacune confirmée à l'identique, indépendamment sur cinq phorophytes pour chacun des deux sites. Le diagnostic quantifié conduit alors aux distributions de probabilité de rattachement suivantes, évidemment l'une et l'autre plus réservées :



Le degré de certitude des estimations précédentes s'en trouve naturellement nettement renforcé et l'approche quantitative permet de substantier leur caractère statistiquement significatif cette fois : probabilités élevées - voisines de 98 % pour chacun des deux diagnostics de rattachement et pour l'existence d'un écart significatif de pollution entre les deux sites.

En conclusion, l'approche quantifiée permet d'établir des diagnostics phytosociologiques

- \* de manière aussi rigoureuse et objective que possible,
- \* et sous une forme permettant, en outre, d'en tester le degré de signification statistique.

Pour ces raisons, le diagnostic phytosociologique quantifié peut constituer un outil particulièrement approprié aux analyses éco-sociologiques telles que celle évoquée brièvement ici.

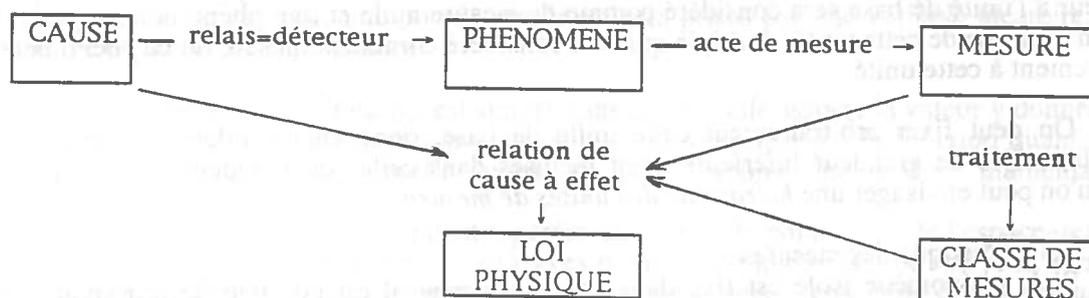
## CONTRIBUTION A UNE EPISTEMOLOGIE DE LA BIOINDICATION LICHENIQUE

Bruno de FOUCAULT

A l'occasion de ce séminaire qui a eu pour but essentiel de confronter divers points de vue sous lesquels peut être perçue la bioindication lichénique, sous le signe notamment de la dualité quantitatif/qualitatif, il a paru intéressant de la replacer dans un cadre formel plus large pour mieux apprécier l'originalité de la démarche floristique en bioindication. Pour cela, on s'appuiera pour une bonne part sur un essai épistémologique antérieur concernant la phytosociologie en général : *La phytosociologie sigmatiste : une morpho-physique* (de FOUCAULT 1986).

### I. GENERALITES

Pour formaliser la bioindication, il faut la replacer d'emblée dans le cadre général de l'appareil de mesure physique, cadre que l'on peut décrire par ce schéma formel (de FOUCAULT 1986) :



#### 1. Concept de détecteur

Placé dans un environnement changeant, son milieu, l'homme n'a jamais directement accès aux qualités de cet environnement. Cet accès n'est possible que par un *relais* (P. VALERY, *Cahiers II* : 882)) entre l'homme et le milieu. En général, ce relais est plutôt appelé un *détecteur* et, pour l'homme, les premiers détecteurs qui lui permettent d'avoir accès à cet environnement sont les *organes sensoriels* : oeil (vue), oreille (audition), nez (odorat), organes sensoriels de la peau (toucher) et de la langue (goût).

Une science physique est l'étude d'un *caché* (BACHELARD) qui se manifeste comme la cause d'un phénomène physique élémentaire, s'il existe un détecteur de ce caché. La mise en évidence de celui-ci dépend fondamentalement de la *sensibilité* du détecteur, qu'on peut mesurer comme le rapport de la variation de l'effet à la variation de la cause qui lui a donné naissance : en fonction de la sensibilité, une partie du caché s'exprimera ou non en tant que phénomène. Selon BACHELARD, un caché qui ne peut être perçu par aucun moyen n'a aucune existence pour le savant : qui n'agit pas n'existe pas. Ainsi, le *phénomène physique élémentaire* apparaît comme une unité de perception dans l'espace-temps.

Du point de vue sensibilité, les détecteurs premiers que sont les organes sensoriels sont limités. Si l'homme veut aller plus loin dans ses investigations, il lui est nécessaire d'élaborer d'autres types de détecteurs.

Quelle que soit la nature du détecteur, il présente un certain nombre de caractères

généraux autres que la sensibilité :

- il présente des *seuils* absolus d'intensité au-delà desquels aucune variation ne se présente à sa sortie ; ceci est bien connu pour l'oeil humain, l'oreille, ...
- il possède un *pouvoir de résolution*, qui est la plus petite variation de la cause donnant un effet mesurable à la sortie du détecteur.

## 2. Mesures

### 2.1. notion de mesure

La perception du phénomène est souvent insuffisante pour qu'il puisse être traité directement par le physicien ; il faut lui attacher une entité plus facile à manipuler. Cette opération formelle qui attache à tout phénomène physique ce critère manipulable est un *acte de mesure* si l'on convient d'appeler *mesure* ce critère. D'une manière générale, nous pouvons appeler "mesure" en un sens élargi tout critère attaché à l'état d'une grandeur fixée dans l'espace et le temps.

Les mesures sont éléments d'ensembles mathématiques structurés. Que doit-on exiger au minimum de la structure mathématique de tels ensembles pour que les mesures soient utiles ? Il suffit de retenir la structure la plus générale qui ait été définie, la *structure de monoïde* : elle opère sur un ensemble muni d'une opération  $v$  interne, associative et pour laquelle il existe un élément neutre, un zéro. Celui-ci sera en l'occurrence la mesure nulle, celle d'un phénomène absent, d'une causalité non détectée par le relais, causalité inférieure à la sensibilité de celui-ci.

### 2.2. unités de mesure

Il n'existe pas de mesure absolue, mais plutôt des mesures relatives à une unité de base, dite *unité de mesure*, dont la grandeur définit la finesse de la mesure ; tout phénomène inférieur à l'unité de base sera considéré comme de mesure nulle et tout phénomène supérieur sera un multiple de cette unité, multiple qui sera considéré comme la mesure de ce phénomène relativement à cette unité.

On peut fixer arbitrairement cette unité de base, donc en considérer de grandeur variable, celles de grandeur inférieure étant incluses dans celles de grandeur supérieure, si bien qu'on peut envisager une *hiérarchie des unités de mesure*.

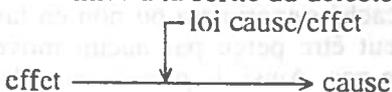
### 2.3. statistique des mesures

Si le phénomène isolé est fixé dans l'espace-temps, il est possible de retrouver des répétitions de ce même phénomène, à des variations de mesure nulle près, en se déplaçant dans cet espace-temps. Entre ces différentes répétitions, il faudra rechercher un invariant commun, ce qui n'empêche cependant pas une certaine variabilité, expression du hasard intervenant dans la genèse de chaque phénomène élémentaire. Cette intervention du hasard justifie l'introduction du *calcul statistique*, alors que l'invariant commun caractérise une catégorie abstraite réunissant les diverses répétitions entre lesquelles se retrouve cet invariant.

## 3. Loi et étalonnage

De la relation de cause à effet naît le concept de *loi physique* locale ou encore, d'une manière plus générale, une loi naît de la relation entre la variation d'une cause et la variation concomitante de l'effet, mesure de la cause.

Ce concept est important parce qu'il permet en pratique d'*étalonner* un détecteur, en associant à chaque valeur d'une cause, la valeur de la mesure correspondante. Une fois cet étalonnage réalisé, la démarche inverse permet de revenir à la valeur de la cause connaissant la mesure donnée à la sortie du détecteur :



## II. LA PHYSIQUE QUANTITATIVE

Grâce à ses facultés intellectuelles, l'homme a pu substituer à ses détecteurs sensoriels des *détecteurs matériels* plus sensibles qui lui ont permis de porter un regard nouveau sur son milieu environnant ; ainsi a pu naître la science moderne, grâce aux progrès techniques acquis par le perfectionnement des détecteurs matériels, en relation avec la finesse progressive des phénomènes à dévoiler.

Le schéma formel général s'applique clairement à la physique habituelle, plus spécialement celle des capteurs de pollution. Ceux-ci sont des détecteurs matériels réglés pour quantifier des types donnés de polluants ; le phénomène physique est donc la pollution détectée par un capteur choisi. Cette physique est *quantitative* parce que ses mesures, correspondant aux concentrations du polluant détecté, sont éléments de l'ensemble ordonné des nombres réels positifs ou nul, lequel possède naturellement la structure de monoïde avec le zéro classique. L'unité de mesure est habituellement le micro-gramme par mètre cube ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), unité qui s'insère dans la suite hiérarchique des unités suivantes :  
...  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \subset \text{mg}/\text{m}^3 \subset \text{cg}/\text{m}^3$  ....

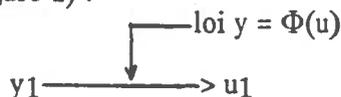
Selon la théorie statistique des erreurs expérimentales, les mesures sont les valeurs prises par des variables aléatoires et sont justifiables des méthodes de cette théorie. Pour l'acte de mesure d'un même phénomène, à partir de la population de mesures qui en dérive, on peut définir une *mesure moyenne*, un *écart-type* et un *intervalle de confiance* centré sur la moyenne.

Les nombres d'une même population  $[a,b]$  ( $b > a$ ) présentent d'une certaine manière une équivalence, possédant un invariant commun, la moyenne des bornes de cet intervalle,  $(a+b)/2$  ; en effet, tout nombre de cette population s'écrit  $(a+b)/2 \pm h$ , avec  $0 \leq h \leq (b-a)/2$ . Cette équivalence, qui n'a vraiment d'intérêt que si la différence  $b-a$  n'est pas trop grande, ce qui est souvent le cas pour une population de valeurs prises par une variable aléatoire, sera qualifiée de *moyenne-équivalence*.

La loi physique quantitative est simple dans ce cas : elle associe la valeur  $y$  donnée à la sortie du détecteur à la concentration  $u$  en polluant et s'exprime par la fonction quantitative  $y(u)$ , concept fondamental à partir duquel on peut élaborer une analyse mathématique quantitative.

On a vu que les mesures étaient repérées au niveau de points  $(x,t)$  de l'espace-temps ; au-delà de l'étude isolée des phénomènes en ces points, il est intéressant de suivre la variation de leurs mesures  $y$  lors de déplacements spatiaux ou temporels. L'ensemble de ces mesures le long d'un gradient donné de l'espace-temps correspond à la fonction  $y(x,t)$ . Si ces phénomènes varient dans l'espace-temps, c'est que le milieu causal est lui-même fluctuant ; si donc leurs mesures sont fonction de l'espace-temps, c'est par l'intermédiaire d'une causalité u elle-même fonction de l'espace-temps  $u(x,t)$ .

La loi  $y = \Phi(u)$  se rattache au concept d'étalonnage de l'appareil de mesure puisque cette opération consiste à mesurer quantitativement les effets  $y$  (déplacement d'un curseur, déviation d'une aiguille, ...) d'une variation causale  $u$  croissante à la sortie de l'appareil, autrement dit à établir une courbe représentative de la fonction  $y = \Phi(u)$ . A posteriori, une fois la courbe établie, on peut se donner un effet  $y_1$  et, par la démarche inverse, revenir à la cause  $u_1$  (figure 1) :



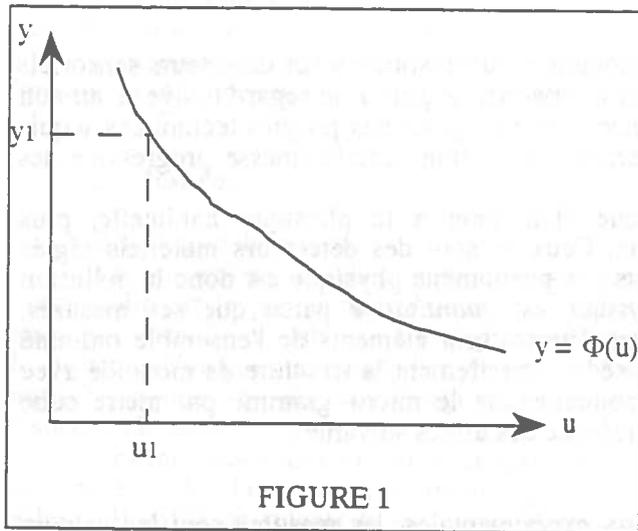


FIGURE 1

### III. LA PHYSIQUE QUALITATIVE DE LA BIOINDICATION

Nous en venons progressivement à la physique de la bioindication qui est une physique nettement plus *qualitative* ; pourtant en réalisant les transpositions convenables, il est possible de préciser les homologues qualitatifs de la physique quantitative précédente.

#### 1. Le détecteur

Le détecteur du caché n'est plus un appareil matériel, un capteur, mais un concept nettement plus formel à savoir un ensemble d'êtres vivants appelés en l'occurrence *lichens*. C'est donc l'être vivant qui est utilisé comme relais. Pour cette raison, on a parfois parlé de *biomètre* ou de *phytomètre*. Il est encore souvent difficile de préciser les propriétés de ces détecteurs biologiques : on sait qu'ils présentent une sensibilité, des seuils absolus et un pouvoir de résolution, mais que peut-on dire de plus ?

Les lichénologues les ont depuis deux siècles décrits puis classés en catégories abstraites ou *taxons* dotés d'un nom double (binôme linnéen) pour faciliter les échanges entre chercheurs. Un *système hiérarchique* permet d'ordonner ces catégories ; il répond parfaitement à la définition générale d'un système ensemble d'éléments, ici les catégories abstraites, unies par des relations, ici d'inclusion entre celles-ci :

... ⊂ sous-espèce ⊂ espèce ⊂ genre ⊂ famille ⊂ ordre ⊂ ...

l'espèce étant considérée comme l'unité fondamentale. L'ensemble des  $n$  espèces  $E_j$  (et éventuellement unités inférieures, variations fines des espèces) d'un territoire constitue la *flore lichénique* de ce territoire. Notons qu'on ajoute souvent à cette flore lichénique détectrice une alge fréquemment associée, *Pleurococcus viridis*.

#### 2. Le phénomène élémentaire

Le phénomène élémentaire traduisant le caché détecté est une partie seulement de l'ensemble des lichens du territoire, ceux qui peuvent vivre dans les conditions imposées par le milieu écologique. Cette partie se concrétise sur le tronc d'arbre par une *communauté lichénique*.

Les limites de la communauté sont fixées par le lichénologue : celui-ci peut considérer qu'elle correspond à l'ensemble du tronc. Mais le lichénosociologue délimitera une communauté lichénique élémentaire par une homogénéité floristique et physiologique ; alors elle prendra plus strictement le nom de *individu d'association lichénique* (I.A.). L'ensemble des phénomènes-communautés lichéniques d'un territoire correspond à la *végétation lichénique* de ce territoire, concept qu'il faut bien distinguer de celui de flore déjà défini.

### 3. Les mesures qualitatives

#### 3.1. acte et unités de mesure qualitative

L'acte de mesure du phénomène délimité est réalisé par le lichénologue qui se penche sur la communauté qu'il a définie (I.A. pour le lichénosociologue) : il va lui attacher la liste des taxons présents sur elle. Cette liste peut donc être considérée comme une mesure, mais une mesure qui n'est plus un nombre réel positif, une *mesure qualitative*.

De l'homologie entre le système d'unités de mesures quantitatives présenté en II et le système hiérarchique des unités taxonomiques, on peut considérer qu'un rang taxonomique quelconque peut constituer une *unité de mesure qualitative* (de FOUCAULT 1987). On pourrait ainsi concevoir pour mesurer ce phénomène de relever la liste des familles ou encore celle des genres représentés. Exemples (déduits du relevé ci-dessous) :

avec l'unité de mesure "famille" : *Physciaceae, Ramalinaceae, Parmeliaceae*

avec l'unité de mesure "genre" : *Physcia, Ramalina, Physconia, Parmelia, Anaptychia*

Mais la mesure la plus fine est évidemment celle qui s'appuie sur le niveau hiérarchique le plus bas, c'est-à-dire l'espèce et ses variations.

La liste réalisée sur une communauté avec cette unité très fine peut être appelée d'une manière générale *inventaire lichénique* (ou simplement "inventaire") ; et, si cette communauté est précisément un I.A., l'inventaire prendra le nom de *relevé lichénosociologique* (ou simplement "relevé").

De tels listes-inventaires  $L_j$  font donc apparaître la présence ou l'absence des  $n$  espèces  $E_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) de la flore. Ces mesures peuvent être représentées par une matrice  $(n,1)$  à  $n$  lignes et une colonne  $\parallel a_{ij} \parallel$  où :

- $a_{ij} = 1$  si  $E_i \in L_j$
- $a_{ij} = 0$  si  $E_i \notin L_j$ .

Souvent, pourtant, on ne se contente pas de cette simple notation de présence-absence, on quantifie au moyen de coefficients  $f_{ij}$  l'importance physionomique de  $E_i$  dans  $L_j$ , si bien que la matrice mesure devient dans ce cas  $\parallel a_{ij}.f_{ij} \parallel$ .

Exemple (d'après de FOUCAULT et VAN HALUWYN, 1981, tableau 4 : rel. 88, légèrement modifié) :

- Physcia tenella* 1
- Ramalina farinacea* +
- Physconia pulverulacea* +
- Physcia aipolia* +
- Parmelia perlata* 2
- Parmelia pastillifera* +
- Anaptychia ciliaris* +
- Parmelia caperata* 2
- Parmelia subrudecta* 1
- Parmelia acetabulum* +

Une unité de mesure encore plus fine peut s'appuyer sur les *écodèmes* (GILLET et al. 1991) des espèces lichéniques classiques, unités précisément de rang inférieur à l'espèce. C'est implicitement ce que font HAWKSWORTH et ROSE lorsqu'ils différencient *espèces fructifiées* et *espèces non fructifiées*, ou *apparition* et *plein développement*, ce que font VAN HALUWYN et LEROND (1988) lorsqu'ils indiquent un stade juvénile (j) ou un thalle altéré ( $^{\circ}$ ) au niveau des coefficients du relevé. En fait, ces indications pourraient être transférées sur les espèces distinguées en écodèmes. Par ex., au lieu d'écrire dans trois relevés successifs :

$E_1 \quad +^{\circ} \quad 1 \quad 2j$

on pourrait distinguer trois écodèmes  $E_1^{\circ}$ ,  $E_1$  et  $E_1j$  pour écrire :

E1°	+	-	-
E1	-	1	-
Eij	-	-	2

On a précisé antérieurement qu'un ensemble de mesures devait au moins posséder une structure de monoïde pour une opération entre ces éléments. Les mesures qualitatives obéissent à cette règle si l'on définit une somme  $v$  entre relevés de la manière suivante :

$\| a_{i1} \| v \| a_{i2} \| = \| (a_{i1} - a_{i2})^2 \|$   
 qui permet de doter un tel ensemble d'une structure de groupe commutatif, donc a fortiori de monoïde. L'élément neutre de cet ensemble pour cette somme est le relevé nul  $R_0 = \| a_{j0} \|$ , où  $a_{ij} = 0$  quel que soit  $i$ , un zéro généralisé.

L'inconvénient des mesures qualitatives, au regard des mesures quantitatives, est qu'elles ne sont pas ordonnables en général le long d'un axe ; par ex., on ne peut jamais déclarer qu'un relevé est "inférieur" ou "supérieur" à un autre.

### 3.2. statistique des mesures

Les traitements statistiques des mesures qualitatives, plus précisément des relevés, aboutissent au rapprochement des relevés floristiquement affines dans des classes de mesures dites *syntaxons élémentaires* (en abrégé Sy El). Cette équivalence taxonomique est homologue de la moyenne-équivalence quantitative. Chaque classe est caractérisée par un invariant floristique résumé par l'ensemble des *espèces constantes* à travers les relevés qui s'y rattachent. Elle est dénommée selon des règles précises de nomenclature phytosociologique. Elle présente une certaine *variabilité*, qui résume les petites différences de nature aléatoire entre ses relevés. Une telle classe obéit donc à des propriétés statistiques et il est notamment possible de définir une *mesure moyenne*, c'est-à-dire un relevé moyen (de FOUCAULT 1979).

De la même manière qu'un relevé peut être représenté par une matrice, un syntaxon de  $m$  mesures pourra être représenté par un tableau ou une matrice  $(n,m)$  à  $n$  lignes et  $m$  colonnes  $\| a_{ij}, f_{ij} \|$ .

Exemple : tableau 1 suivant (de FOUCAULT et VAN HALUWYN 1981, tabl. 4 : rel. 79-89, légèrement modifié)

Numéro des relevés	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	
<i>Parmelia acetabulum</i>	+	2	+	2	1	+°	1	+	1	+		V
<i>Physcia tenella</i>		2	1		1	1	+		2	1	+	IV
<i>Ramalina farinacea</i>				+	+		1	1	+	+		IV
<i>Parmelia subrudecta</i>		+	2			+	2	3	+	1	3	IV
<i>Pertusaria alb. corallina</i>		+	+		+	+	+	+	2			IV
<i>Anaptychia ciliaris</i>	2	4	1	2	3				i	+		IV
<i>Lecanora expallens</i>				+	+	+	+		+			III
<i>Ramalina fastigiata</i>				+	+	1	+	+			+°	III
<i>Parmelia pastillifera</i>			4			4	1	1	+	+		III
<i>Buellia punctata</i>							+	1	1	+		II
<i>Xanthoria parietina</i>	+°	2	+	+								II
<i>Physconia grisea</i>	+	+									+	II
<i>Parmelia perlata</i>	1								+	2	2	II
<i>Parmelia caperata</i>							+			2		I
<i>Physcia aipolia</i>		+								+		I
<i>Xanthoria candelaria</i>						+						+
<i>Candelariella vitellina</i>		i										+
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>				i								+
<i>Physconia pulverulacea</i>										+°		+
<i>Ramalina fraxinea</i>	+											+
Accidentelles :	5	3	4	4	4	2	5	8	6	4	6	

Ce tableau décrit un *Parmelietum acetabuli* Ochsner 1928 (BARKMAN 1958, sous le nom de *P. acetabulae*), dont les espèces constantes (présences V et IV) sont *Physcia tenella*, *Parmelia acetabulum*, *Ramalina farinacea*, *Parmelia subrudecta*, *Pertusaria albescens* var. *corallina* et *Anaptychia ciliaris* ; la dernière colonne à droite, dite *colonne de présence* ou *colonne romaine*, correspond au relevé moyen déduit de cette population de 11 relevés.

Un cas très particulier de tel syntaxon est celui qui est associé au relevé nul R0, le syntaxon nul T0 dépourvu de variabilité.

### 3.3. groupe systématique

Quand on parle de bioindication, on fait souvent appel à des ensembles d'espèces aux exigences écologiques et à la sensibilité voisines pour un facteur du milieu. En général, ces ensembles sont dénommés *groupes écologiques* (DUVIGNEAUD 1946, GOUNOT 1969) ; or ce terme peut être source d'ambiguïté car de tels ensembles ne sont pas des groupes au sens mathématique. Toutefois, il est possible d'engendrer de véritables groupes, dits *systématiques* (en abrégé GS), à partir de ces espèces : quelques espèces  $E_i$ ,  $i$  décrivant un ensemble indiciel  $I_p$ , engendrent un groupe systématique  $G_p$  pour la somme  $v$  :

$$G_p = [ \parallel a_{ij} \parallel , a_{ij} = 0, i \notin I_p ]$$

L'intérêt de ces groupes systématiques est de permettre une décomposition des relevés ou des Sy El en sommes de tels groupes ou, plus souvent, de parties de tels groupes :

pour T donné, il existe K tel que

$$T = \sum g_p, p \text{ décrivant un ensemble indiciel } K \text{ attaché à } T \text{ et } g_p \subset G_p.$$

### 3.4. du qualitatif au quantitatif

Certains auteurs, estimant peut-être que le quantitatif est de valeur supérieure au qualitatif, s'empressent de transformer les données qualitatives de l'approche floristique en mesures quantitatives, souvent appelées "*indices*". Un indice biologique n'est en effet finalement rien d'autre qu'une mesure quantitative (puisque c'est un nombre) attachée à une grandeur, déduite d'une liste d'espèces, autrement dit d'une mesure qualitative. L'une des raisons à cela est certainement que les mesures quantitatives sont ordonnables et plus facilement comparables entre elles.

Un bon exemple de tel indice est l'IAP de LEBLANC et DE SLOOVER (1970), indice qui ne semble pas avoir été jamais mieux formalisé que dans la publication initiale de ces auteurs.

Dans cette méthode, une étape analytique a pour but d'inventorier  $m$  stations indicées par  $j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) sur la base d'une flore de  $n$  espèces  $E_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Les listes (ce ne sont pas des relevés dans cette méthode)  $L_j$  inventorient les espèces avec leur fréquence  $f_{ij}$  (comprise entre 1 et 5 ; on ne discutera pas ici les divergences qui règnent sur la définition des  $f_{ij}$ ) sur les stations ; ces  $L_j$  peuvent donc être représentées par les  $(n,1)$ -matrices  $\parallel a_{ij}.f_{ij} \parallel$ , selon les notations du paragraphe III.3.1. On en déduit le nombre d'espèces par inventaire  $N_j = \sum_i a_{ij}$ . Les auteurs en déduisent aussi le nombre d'espèces accompagnant l'espèce  $E_j$  dans  $L_j$  :  $N_j - 1$ .

Dans une étape synthétique, on considère l'ensemble des  $m$  stations et la  $(n,m)$ -matrice  $\parallel a_{ij}.f_{ij} \parallel$  pour calculer l'"indice écologique"  $Q_i$  (moyenne du nombre d'espèces accompagnant une espèce donnée) de chaque espèce :

$$Q_i = [\sum_j a_{ij} \cdot (N_j - 1)] / \sum_j a_{ij}$$

A ce propos, il me semble que le qualificatif de "écologique" est impropre pour un tel indice, qui ne fait pas intervenir de données d'ordre écologique, mais au plus des données d'ordre sociologique. Quoi qu'il en soit, on déduit de tout cela l'IAP pour chaque station :

$$I_j = (\sum_i Q_i \cdot f_{ij}) / 10.$$

## 4. Loi causale qualitative

Si la lichénosociologie, comme la phytosociologie, est une physique qualitative, c'est parce qu'elle s'efforce d'associer à tout Sy El floristiquement défini un ensemble de valeurs prises par les facteurs du milieu, qui en résume la causalité, ou dont le Sy El est la mesure qualitative. En rapprochant causes écologiques et effets lichéniques, on peut définir des lois

causales qualitatives locales sous la forme Sy El/cause.

Si on s'intéresse plus spécialement à une face particulière du milieu, par ex. la pollution, on va chercher à définir plutôt des lois qualitatives relatives, dont on ne retient que ce qui les distingue des lois voisines, soit ce facteur variable pollution  $u$ . Si, au moins approximativement, pour chaque  $T_k$ , on peut trouver un intervalle de variation causale  $U_k = [u_k, u_{k+1}[$  sur lequel  $T_k$  reste structurellement stable, ne change pas significativement sur le plan qualitatif, on peut définir un "pas" causal  $\Delta u_k = u_{k+1} - u_k$  et une loi qualitative relative  $T_k/U_k$ . Pour cela, il y a tout de même nécessité d'utiliser au moins localement un détecteur physique, donc des mesures quantitatives.

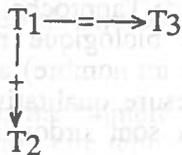
## 5. Un cadre systémique pour la bioindication

Dans bien des disciplines, dont assez récemment la phytosociologie (de FOUCAULT, 1984a), l'approche systémique des phénomènes a pris un essor considérable et constitue souvent une voie royale et holistique pour les appréhender. On va l'introduire ici en lichénosociologie, avec des applications aux relations lichens-pollution.

### 5.1. notion de système, représentation

Un ensemble d'éléments en interrelations est appelé un "système". On peut parler ici de *système sociolichénique*, si les éléments sont des communautés végétales lichéniques.

Un système peut être aisément représenté par un graphe dont les sommets sont les étiquettes nomenclaturales des Sy El et dont les arcs sont les relations systémiques sous forme de flèches portant un symbole fonction de la relation. Ex.



### 5.2. limites d'un système élémentaire

Un problème important qui se pose en approche systémique est la limite pratique d'un système élémentaire. Pour qu'il ait un intérêt, il faut lui donner des dimensions intéressantes : il ne doit pas être trop petit (un système réduit à un élément unique n'a aucun intérêt) ni trop vaste. Un bon critère de délimitation paraît être une certaine symétrie interne, ce qui lui assure une certaine cohérence, symétrie qu'on placera au niveau des éléments systémiques. En termes plus concrets, on imposera aux éléments du système de posséder des caractères communs, invariants, à prendre si possible dans leur déterminisme causal. L'intérêt de ce critère d'homogénéité interne est de pouvoir dire que le déterminisme du passage d'un élément à un autre du même système est à rechercher en dehors du déterminisme commun à ces éléments. En quelque sorte, cet invariant intra-systémique caractérise le système étudié et sert à le qualifier.

Pour le thème qui nous retient ici, le caractère épiphytique des végétations étudiées sera l'un de ces invariants. Un tel système ainsi délimité est encore trop vaste ; il est nécessaire de retenir en plus une invariance écologique : invariance climatique et invariance de substrat. Finalement, on retiendra des systèmes sociolichéniques caractérisés chacun par une ambiance climatique et un substrat uniforme relativement aux végétations lichéniques qui en sont éléments. Ces conditions de milieu uniformes servent à qualifier les divers systèmes sociolichéniques épiphytiques. Cette démarche stricte permet d'objectiver les divers protocoles expérimentaux qui sous-tendent toutes les méthodes d'études des relations lichens/pollution. D'une manière générale, les auteurs s'accordent sur les invariants systémiques suivants :

- critère méso-climatique : exclusion du milieu forestier, étude de stations isolées (arbres d'alignement, isolés en parcs et vergers) ;
- critère écologique : observer au-dessus de 80 cm sur le tronc pour éliminer l'influence du couvert herbacé de la base du tronc et les effets éventuellement eutrophisants des animaux ;

- critère dynamique : considérer des troncs de plus de 20 cm de diamètre pour atténuer les effets de la dynamique propre aux communautés lichéniques.

La plupart des autres facteurs écologiques peuvent varier et alors permettre de séparer des systèmes autonomes : macroclimat, nature chimique du substrat (basique-eutrophiée ou acide) facilement signifiée par l'indication du binôme linnéen du phorophyte.

Ces critères d'homogénéité étant retenus, on s'aperçoit alors que la transformation intra-systémique principale qui reste est la transformation pollution.

Une fois un système délimité de cette manière, on pourra naturellement envisager des passages entre systèmes élémentaires en changeant une partie du déterminisme caractéristique de l'un d'eux. On qualifiera de *inter-systémiques* les transformations permettant de passer d'un système élémentaire à un autre (pouvant donc permettre de définir des systèmes de systèmes élémentaires), par opposition à intra-systémiques.

### 5.3. notion de série

Comme en domaine quantitatif, dans ce domaine qualitatif, on peut aussi considérer la variation d'une cause *u* et suivre ses effets en termes de mesure qualitative, de relevés par ex.. Ces variations de cause induisent effectivement des changements, notamment qualitatifs, dans les communautés qui les subissent. De tels changements se manifestent par la disparition ou/et l'apparition d'espèces. On observe donc une suite de communautés, mieux de Sy El floristiquement définis. On appellera *série* une telle suite de Sy El, classes de mesures qualitatives, qui apparaissent successivement quand une variable causale croît ou décroît. Cette notion de série généralise au domaine qualitatif la fonction quantitative d'une variable.

### 5.4. représentations d'une série

#### 5.4.1. représentation synfloristique

Une série lichénosociologique peut d'abord être représentée par un tableau des diverses mesures ou, plus simplement, par un tableau des mesures moyennes des Sy El. Ex. le tableau 2 suivant réunit sept Sy El (l'un d'eux étant réduit à un relevé) traduisant les modifications d'une végétation lichénique sous l'influence d'une pollution atmosphérique acide croissante (d'après LEROND 1981 : tb 11)

Sy El :

- 1 : *Parmelietum acetabuli*
- 2 : gr. à *X. parietina* - *Phaeophyscia orbicularis*
- 3 : gr. à *X. parietina*
- 4 : gr. à *Diploicia canescens*
- 5 : *Lecanoretum pityreae* à *L. expallens*
- 6 : *Lecanoretum pityreae*
- 7 : *Pleurococcetum*

Le *Lecanoretum pityreae* Barkman 1958 et le *Pleurococcetum vulgaris* (Schorler 1914) Hilitzer 1925 sont des associations pionnières, mais stables en milieu pollué, bloquées dans leur dynamique normale (BARKMAN 1958).

TABLEAU 2

numéro de Sy El nombre de rel.	1	2	3	4	5	6	7
1. <i>Parmelia acetabulum</i>	V						
<i>Anaptychia ciliaris</i>	III						
<i>Ramalina fastigiata</i>	III						
<i>Parmelia sulcata</i>	III						
<i>Buellia punctata</i>	II	I					
<i>Physcia aipolia</i>	II						
<i>Ramalina farinacea</i>	II						
<i>Pertusaria alb. corallina</i>	II						
<i>Parmelia perlata</i>	I						
<i>Candelariella xanthostigma</i>	I						
<i>Phlyctis argena</i>	I						
<i>Ramalina fraxinea</i>	I						
<i>Parmelia caperata</i>	I						
2. <i>Physconia grisea</i>	II	I					
<i>Parmelia subrudecta</i>	I	I					
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	+	III					
3. <i>Xanthoria parietina</i>	IV	V	V				
<i>Physcia adscendens</i>	III	V	V				
<i>Physcia tenella</i>	III	V	I				
<i>Lecidella elaeochroma</i>	II	I	III				
<i>Evernia prunastri</i>	III		II				
<i>Lecanora chlorotera</i>	II		II				
<i>Xanthoria candelaria</i>	+		I				
<i>Hypogymnia physodes</i>			I				
<i>Lepraria incana</i>	+		I				
4. <i>Diploicia canescens</i>	II	II	III	1			
5. <i>Lecanora expallens</i>	I		I		2		
6. <i>Lecanora conizaeoides</i>					2	V	
7. <i>Pleurococcus viridis</i>					1	III	2

Chaque marche de ce tableau est définie par un petit ensemble d'espèces, éventuellement réduit à une seule. Ces ensembles engendrent donc des groupes systématiques  $G_p$ ,  $p = 1$  à 7. Ex.  $G_1$  est engendré par l'ensemble 1 (*P. acetabulum*, *Anaptychia ciliaris*,...). Les sept  $T_k$  de cette série peuvent se décomposer en sommes de parties  $g_p$  de tels groupes :

$$T_k = \bigvee_p g_p, p \text{ allant de } k \text{ à } 7.$$

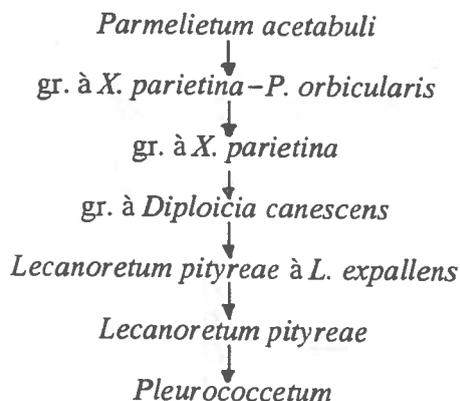
Exemple :  $T_3 = g_3 \vee g_4 \vee g_5 \vee g_6 \vee g_7$ .

L'effet synfloristique essentiel de la pollution se traduit donc par une disparition progressive des GS selon leur sensibilité, d'où la représentation de la série en escalier descendant, dont l'homologue quantitatif est une fonction  $\Phi(u)$  telle que  $d\Phi/du < 0$ . Sur la base des connaissances actuelles sur le synsystème lichénique, il apparaît que les premières espèces à disparaître seraient les caractéristiques d'association, suivies des caractéristiques d'alliance et d'ordre. Le synsystème paraît donc se démanteler progressivement. Les syntaxons 2 à 4 correspondent à des communautés basales (*basal communities*, KOPECKI et HEJNY 1974) et pourraient être dénommées ainsi.

#### 5.4.2. représentation systématique

Selon le mode de représentation choisi pour l'approche systématique, une série pourra être représentée par les étiquettes nomenclaturales reliées par des flèches portant un symbole de la causalité pollution.

Ex. : le tableau 2 donné dans les paragraphes précédents décrit en fait la série suivante



#### 5.4.3. représentation cartographique d'une série à un temps donné

Puisqu'une série est une suite de  $Sy El T_k$ , eux-mêmes ensembles de relevés taxonomiquement équivalents, fixés dans l'espace-temps,  $R(x,t)$ , on peut fixer le temps ( $t = t_1$ ) et chercher à cartographier spatialement la série ainsi fixée. On va appeler "zone isoflore" l'ensemble des points de l'espace dont les mesures floristiques sont taxonomiquement équivalentes :

$$Z_{k,1} = [x/R(x,t_1) \in T_k]$$

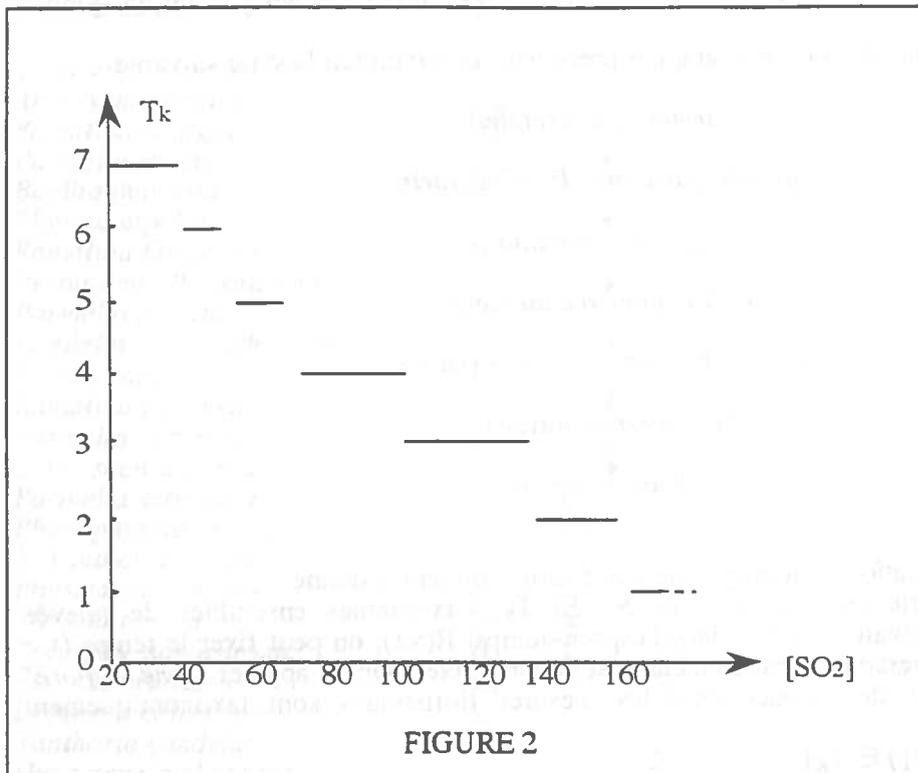
qui se lit "la zone k au temps  $t_1$  est l'ensemble des points x de l'espace dont la mesure qualitative en  $t_1$  appartient au  $Sy El T_k$ ". Les zones peuvent être qualifiées au moyen d'un numéro (zone 1, zone 2, ..., HAWKSWORTH et ROSE 1970) ou d'une lettre (zone A, zone B, ..., VAN HALUWYN et LEROND 1986).

L'ensemble des zones  $Z_k$  au temps  $t_1$  définit une cartographie  $C_1$  au niveau de laquelle les zones sont colorées ; en ce sens la couleur de la zone peut être considérée comme une autre mesure qualitative de la pollution. Si possible on choisira un gradient de couleur significatif du gradient causal, par ex. du plus sombre au plus clair pour un gradient allant du plus pollué au moins pollué.

De telles cartographies facilitent les comparaisons dans le temps puisqu'on peut facilement rapprocher les cartes  $C_1$  et  $C_2$  réalisées respectivement à  $t_1$  et à  $t_2$ .

#### 5.5. Loi globale et étalonnage

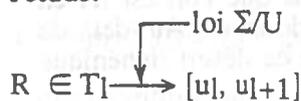
On peut encore adopter une représentation graphique d'une telle série pourtant qualitative, en portant sur l'axe des abscisses les intervalles successifs  $\Delta u_k$  et sur l'axe des ordonnées l'indice croissant k selon un pas arbitraire (figure 2) ; notons que l'on est ici en présence d'un des rares cas où les mesures qualitatives peuvent être ordonnées. Au-delà de  $180 \mu g/m^3$ , aucune végétation n'est observable : on peut considérer que ce désert lichénique correspond au  $Sy El$  nul  $T_0$ .



Grâce à la série  $\Sigma$  d'éléments  $T_k$ , on peut passer des lois qualitatives locales  $T_k/U_k$  à une loi sérielle plus globale, série de lois partielles,  $\Sigma/U$  qui généralise la fonction quantitative  $y = \Phi(u)$ . En définitive, à chaque système, correspond une série et, après étalonnage, une échelle de corrélation végétation lichénique-pollution sous forme de loi globale  $\Sigma/U$ .

En rapprochant démarches quantitative et qualitative, on constate que la cause  $u$  apparaît dans les deux types de lois :  $y = \Phi(u)$  et  $\Sigma/U$  ; en éliminant  $u$  entre les deux expressions, on pourrait obtenir directement une expression mixte de la forme  $\Sigma/y$  ; implicitement, c'est d'ailleurs souvent ainsi que sont étalonnées les séries sociolichéniques.

On obtient une courbe en escalier naturellement moins précise que la courbe quantitative précédente. Mais elle peut servir d'étalonnage puisque, un relevé  $R$  étant donné, grâce à son invariant floristique, on peut reconnaître, aux variations aléatoires près, de quel  $Sy$   $EI T_i$  il relève et en déduire que la variable causale  $u$  prend une valeur comprise entre  $u_i$  et  $u_{i+1}$ . L'intérêt d'une telle démarche dépend naturellement de la précision de l'approche causale : elle est fonction de l'amplitude  $\Delta u_k$  relativement au degré de finesse exigé par l'étude.



C'est un abus de langage de parler de "zones isopollution" puisqu'à une flore à peu près identique correspond un intervalle de concentration qui peut être assez large.

### 5.6. Exemples de systèmes

Il est temps d'illustrer cette démarche en présentant plusieurs de ces systèmes socio-lichéniques dans des conditions écologiques variées.

#### 5.6.1. le système neutrophile subatlantique

Les données apportées aux paragraphes précédents (5.4.1 et 5.4.2) correspondent précisément à un système neutrophile subatlantique : aux invariants protocolaires généraux s'ajoutent les invariants caractéristiques (LEROND 1981, tableau 11) macroclimat subatlantique de la région rouennaise et écorce eutrophe (phorophytes : *Acer*, *Tilia*, *Ulmus*). Le même système atteint le nord de la France (de FOUCAULT et VAN HALUWYN 1981).

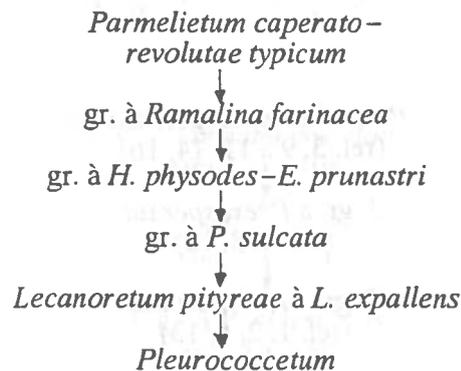
5.6.2. le système acide subatlantique

Dans ce cas, aux invariants protocolaires, s'ajoutent les invariants suivants (LEROND 1981 : tableau 10) : macro-climat subatlantique de la région rouennaise, écorce non eutrophe (phorophytes : *Fraxinus*, *Fagus*, *Malus*, *Populus*, *Quercus*, *Salix*). On notera que seule la nature de l'écorce distingue de système du précédent.

Le tableau synthétique 3 suivant décrit la série associée à ce système acide

numéro de syntaxon	1	2	3	4	5	6	7
nombre de rel.	34	12	19	3	2	7	2
1. <i>Parmelia perlata</i>	V						
<i>Parmelia revoluta</i>	IV						
<i>Parmelia glabratula</i>	II	I					
<i>Ramalina fastigiata</i>	I	+					
2. <i>Parmelia caperata</i>	V	IV					
<i>Parmelia subrudecta</i>	IV	IV					
<i>Ramalina farinacea</i>	II	IV	r				
<i>Phlyctis argena</i>	IV	I	+				
<i>Lecanora chlarotera</i>	II	I	r				
<i>Pertusaria pertusa</i>	III		+				
3. <i>Hypogymnia physodes</i>	III	V	V				
<i>Evernia prunastri</i>	IV	IV	III				
<i>Pertusaria amara</i>	IV	II	II				
<i>Parmelia subaurifera</i>	II	II	I				
4. <i>Parmelia sulcata</i>	II	IV	II	3			
<i>Lepraria incana</i>	II	I	I	1			
<i>Lecidella elaeochroma</i>				1			
<i>Buellia punctata</i>			r	1			
5. <i>Lecanora expallens</i>	III	IV	II	2	2		
6. <i>Lecanora conizaeoides</i>		I	II	2	2	V	
7. <i>Pleurococcus viridis</i>	+	I	I	1	1	III	2

qui donne lieu à une courbe d'étalonnage proche de la précédente. La série systémique s'écrit alors sous la forme



Le *Parmelietum caperato-revolutae* a été décrit par DELZENNE et GEHU (1978).

5.6.3. trois systèmes madrilènes

Grâce aux données de CRESPO et BUENO (1982), on peut analyser d'autres systèmes. Leur démarche n'est pas vraiment lichénosociologique puisqu'il s'agissait de calculer des I.A.P. mais, pour aller plus loin, nous poserons l'hypothèse que leurs inventaires sont assimilables à des relevés.

Les trois systèmes étudiés sont liés à la région de Madrid ; aux invariants protocolaires, s'ajoute ici un invariant macroclimatique : le climat ibéro-méditerranéen. Ils se distinguent au niveau de la nature chimique de l'écorce.

- acide sur *Pinus pinea* (tb 1 des auteurs)

numéro de syntaxon	1	2	3	4	5	6
nombre de relevés	6	3	4	1	1	1
1. <i>Parmelia glabra</i>	IV					
<i>Parmelia quercina</i>	IV					
<i>Lecania cirtella</i>	III					
<i>Lecidella euphorea</i>	II					
2. <i>Parmelia exasperata</i>	IV	3				
<i>Caloplaca holocarpa</i>	III	1				
3. <i>Candelaria concolor</i>	V	2	4			
<i>Usnea sp</i>	V	3	3			
<i>Hypogymnia tubulosa</i>	V	2	1			
<i>Hypogymnia bitteriana</i>	III	2	3			
<i>Buellia punctata</i>	II		1			
<i>Buellia zahlbruckneri</i>	I	1	1			
<i>Ramalina farinacea</i>	I		1			
4. <i>Hypocenomyce scalaris</i>	V	3	4	1		
<i>Parmelia sulcata</i>	IV	2	3	1		
<i>Lecanora strobilina</i>	IV	2	2	1		
<i>Strangospora pinicola</i>	II	1	2	1		
5. <i>Evernia prunastri</i>	V	3	4	1	1	
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	V	3	4	1	1	
<i>Physcia adscendens</i>	I	1	1		1	
<i>Lecanactis premnea</i>	V	3	4	1	1	
<i>Lecanora chlarotera</i>	V	3	4	1	1	
<i>Lecanora carpinea</i>	V	3	4		1	
<i>Parmelia tiliacea</i>	V	3	4	1	1	
6. <i>Lecanora varia</i>	V	3	4	1		1
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	V	3	4	1	1	1
<i>Pleurococcus viridis</i>	V	3	4	1	1	1

pour la série

1. *Parmelietum carporhizantis*  
(rel. 3, 9 à 11, 14, 16)
- ↓
2. gr. à *P. exasperata*  
(rel. 4, 8, 12)
- ↓
3. gr. à *H. bitteriana*  
(rel. 1, 2, 6, 13)
- ↓
4. gr. à *H. scalaris*  
(rel. 7)
- ↓
5. gr. à *P. tiliacea*  
(rel. 15)
- ↓
6. gr. à *S. chlorococcum*  
(rel. 5)

- neutre sur *Quercus rotundifolia* (tb 2 des auteurs)

numéro de syntaxon	1	2	3	4
nombre de relevés	6	4	2	1
<i>Haematomma elatinum</i>	III			
<i>Candelariella vitellina</i>	II			
<i>Ramalina farinacea</i>	I			
<i>Lecanora carpinea</i>	I			
<i>Lecanora chlarotera</i>	III	4		
<i>Pleurococcus viridis</i>	IV	2		
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	III	2		
<i>Lecidea botryosa</i>	II	1		
<i>Buellia punctata</i>	I	1		
<i>Parmelia quercina</i>	I	1		
<i>Physcia biziana</i>	I	1		
<i>Physconia algeriensis</i>	V	4	2	
<i>Physconia enteroxantha</i>	V	4	2	
<i>Lecanora strobilina</i>	V	3	2	
<i>Parmelia tiliacea</i>	V	3	2	
<i>Lecidella euphorea</i>	V	4	1	
<i>Physcia aipolia</i>	V	4	1	
<i>Pseudoparmelia soledians</i>	V	2	2	
<i>Physcia adscendens</i>	V	3	1	
<i>Caloplaca cerina</i>	III		2	
<i>Evernia prunastri</i>	I		1	
<i>Parmelia glabra</i>	V	4	2	1
<i>Candelaria concolor</i>	V	3	2	1
<i>Physconia perisidiosa</i>	V	3	2	1
<i>Lecania dubitans</i>	V	4	1	1
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	V	4	1	1
<i>Physconia pulverulenta</i>	V	3	1	1
<i>Physconia venusta</i>	V	3	2	1
<i>Xanthoria parietina</i>	V	3	2	1
<i>Physcia semipinnata</i>	V	1	2	1
<i>Lecidella pulveracea</i>	IV	1		1
<i>Physconia grisea</i>	II		1	1

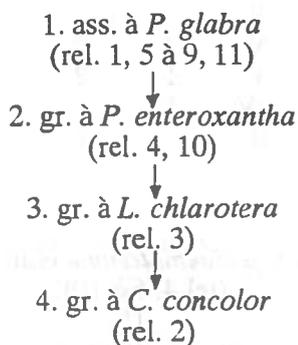
pour la série

1. ass. à *Haematomma elatinum*  
(rel.4, 6 à 10)
- ↓
2. gr. à *L. chlarotera*  
(rel.2, 5, 11)
- ↓
3. gr. à *P. algeriensis*  
(rel. 12, 13)
- ↓
4. gr. à *P. glabra*  
(rel. 3)

- basique eutrophe sur *Ulmus minor* (tb 3 des auteurs)

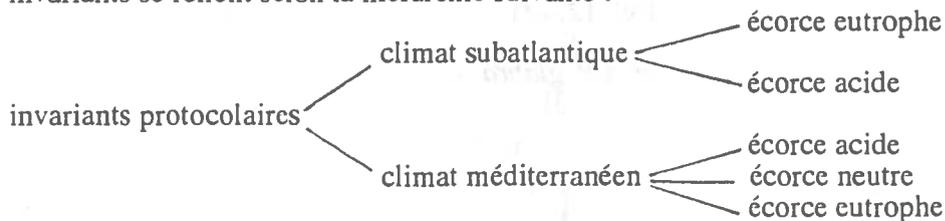
numéro de syntaxon	1	2	3	4
nombre de relevés	7	2	1	1
<i>Parmelia glabra</i>	V			
<i>Parmelia tiliacea</i>	V			
<i>Evernia prunastri</i>	III			
<i>Physcia semipinnata</i>	III			
<i>Pseudoparmelia soledians</i>	III			
<i>Ramalina farinacea</i>	III			
<i>Lecidea botryosa</i>	II			
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	II			
<i>Physcia adscendens</i>	V	2		
<i>Physconia enteroxantha</i>	V	2		
<i>Physconia perisidiosa</i>	V	1		
<i>Lecanora strobilina</i>	IV	2		
<i>Lecidella euphorea</i>	III	1		
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	V	1	1	
<i>Pleurococcus viridis</i>	III	2	1	
<i>Lecanora chlarotera</i>	III		1	
<i>Candelaria concolor</i>	V	2	1	1
<i>Physconia algeriensis</i>	V	2	1	1
<i>Xanthoria parietina</i>	V	2	1	1
<i>Physcia aipolia</i>	V	2		1
<i>Physconia pulverulenta</i>	V	1	1	1
<i>Physconia venusta</i>	IV		1	1
<i>Candelariella vitellina</i>	II	1		1
<i>Lecanora carpinea</i>	II			1

pour la série



### 5.7. Essai de synthèse

Les cinq systèmes qui viennent d'être présentés sont élémentaires bien que leurs invariants se relient selon la hiérarchie suivante :



Des transformations macrogéographiques (changement climatique) ou mésogéographiques (changement de phorophytes) permettent de passer de l'un à l'autre : ce sont des cas particuliers de ces transformations inter-systémiques évoquées en III-5-2. Ces systèmes

étant ainsi rapprochés, on va tenter d'aller plus loin en recherchant des invariants systémiques à travers ces transformations spatiales.

### 5.7.1. isomorphismes systémiques et structuralisme

L'étude comparée de ces divers systèmes fait justement apparaître des points communs, des invariants fonctionnels. Conformément à la démarche structuraliste (de FOUCAULT 1984a, b), on peut concevoir que ces invariants caractérisent une catégorie abstraite rassemblant ces divers systèmes fonctionnant de la même manière. Cette catégorie abstraite est dite *structure formelle* (en abrégé *F-structure*, adjectif : *structural*). L'équivalence des systèmes relevant de la même F-structure est dite *isomorphisme* et les systèmes fonctionnant de la même manière sont dits *isomorphes*. Ces invariants fonctionnels n'empêchent toutefois pas une diversité systémique liée à la diversité de conditions écologiques comme macro-climat et chimie du substrat.

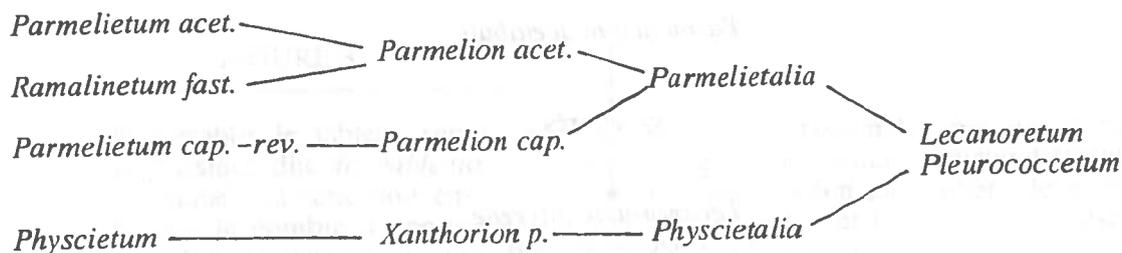
D'une manière synthétique, l'invariant structural commun à ces systèmes socio-lichéniques peut être présenté ainsi : il existe une association lichénique de départ ou de base, floristiquement diversifiée, qui perd progressivement ses espèces à mesure que la pollution croît, en fonction de leur sensibilité à ce facteur ; on assiste donc à un démantèlement progressif du synsystème dont relève cette association ; cette disparition progressive se traduit par une série en escalier descendant ; une cartographie permet de distinguer des zones isoflores centrées sur la source de pollution ; il est possible d'étalonner cette série pour élaborer une échelle de corrélation lichens/pollution.

Le structuralisme sous-tend aussi l'*homologie* : les éléments qui jouent le même rôle, qui ont la même place relative par rapport à leurs voisins sont dits *homologues* ; par ex. toutes les associations de base sont homologues entre elles.

### 5.7.2. convergences sérielles et banalisation de la flore lichénique

Si les F-structures sont caractérisées par des invariants fonctionnels plus que floristiques, entre des systèmes distincts suffisamment proches dans l'espace peuvent se présenter des invariants lichénosociologiques ; ils se relient à la convergence des séries sous l'influence de la pollution croissante. Un excellent exemple est donné par les deux systèmes de la région rouennaise, de même macro-climat, mais de chimie substratique distincte : en comparant les deux séries, on constate que les Sy El finals sont identiques : *Lecanoretum pityrae* et *Pleurococcetum*. Dans d'aussi fortes convergences sérielles, ces éléments finals oublient tout des points de départ des séries.

La rapidité de convergence des séries entre elles dépend essentiellement de la parenté syntaxonomique des associations de départ : des associations proches, relevant de la même alliance, convergent rapidement puisque les espèces caractéristiques d'association disparaissent très vite et que les caractéristiques d'alliance ne permettent plus de distinguer les séries. Ainsi, dans le tableau 4 de de FOUCAULT et VAN HALUWYN (1981), il existe trois associations de base : le *Parmelietum acetabuli* déjà nommé (rel. 79 à 89), le *Ramalinetum fastigiatae* Duv. 1942 (rel. 95 à 99, de conditions assez aérohygrophiles) et le *Physcietum adscendentis* Ochsner 1928 (rel. 91 à 94, sur écorces très eutrophes) ; les deux premières relèvent de la même alliance (*Parmelion acetabuli*) et les communautés qui en dérivent sont indiscernables, se plaçant dans le syntaxon défini par les relevés 64 à 78. Cette alliance se rangerait avec le *Parmelion caperatae* dans un ordre des *Parmelietalia* ; à ce titre, la série issue du *Parmelietum caperato-revolutae* devrait rejoindre ensuite les séries issues des associations du *Parmelion acetabuli*. Enfin la série issue du *Physcietum adscendentis*, relevant des *Physcietalia adscendentis*, devrait converger vers les séries précédentes. Le schéma suivant résume ces convergences.



De telles remarques ne sont évidemment possibles que si le synsystème des végétations lichéniques est suffisamment élaboré, ce qui est encore loin d'être général. Les séries des trois systèmes madrilènes paraissent ne pas présenter de telles convergences malgré la proximité géographique.

Cette notion de convergence débouche inévitablement sur celle de banalisation : aux Sy El initiaux caractéristiques des systèmes élémentaires, donc localisés géographiquement, par dynamique convergente, se substitue(nt) un ou deux taxons d'aire nettement plus vaste et, si le processus se généralise, on trouvera les mêmes syntaxons partout ; ils deviennent banals.

### 5.7.3. isomorphisme de variables

A un moment donné (t fixé), la démarche qualitative oeuvre dans l'espace pour associer les éléments d'une série à une concentration en polluant, avec possibilité de cartographier cette série en une suite de zones isoflores colorées. Indépendamment donc de la causalité pollution, cette série est d'abord spatiale :  
ass. de base toxiphobe → ... → ass. toxitolerante  
(→ : flèche spatiale)

Il est important de noter que, parfois, on a pu mettre en évidence la même suite de Sy El avec des flèches systémiques temporelles. Pour démontrer cela, il faut se placer en un point de l'espace (fixer x) et posséder des données au moins floristiques sur le passé de la station ainsi fixée ; de ces données floristiques, il est possible de déduire jusqu'à un certain point des données sur la végétation lichénique (démarche *paléophytosociologique*, GEHU 1973, transposable ici en *paléolichénosociologique*) ; on retrouve alors plus ou moins des Sy El de la série spatiale.

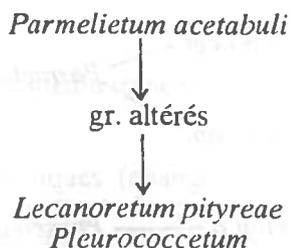
#### Ex 1 : région lilloise

En 1901, sur les arbres de Lille, FOCKEU avait relevé *Ramalina fastigiata*, *R. farinacea*, *R. fraxinea*, *Evernia prunastri*, *Parmelia caperata*, *Physconia pulverulacea*, *P. aipolia*, *Anaptychia ciliaris*, *Xanthoria parietina* ; la présence du binôme *Parmelia olivacea* résulte sans doute d'une confusion avec *P. acetabulum* ; cette flore paraît indiquer une végétation de *Parmelietum acetabuli*

#### Ex. 2 : région rouennaise

En 1824, BEHERE dressait un inventaire floristique des lichens de la région de Rouen, selon un traitement taxonomique et une nomenclature évidemment désuets ; toutefois, un examen des listes montre la présence de *Parmelia caperata*, *P. subrudecta*, *P. perlata*, *P. tiliacea*, *P. acetabulum* (sous le nom de *P. olivacea* comme chez FOCKEU), *Physcia aipolia*, *Anaptychia ciliaris*, *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, des *Ramalina* et *Usnea*, ... ; cette flore semble correspondre encore au *Parmelietum acetabuli*

Dans tous ces exemples, le *Parmelietum acetabuli* correspondant à une zone G, selon la terminologie de VAN HALUWYN et LEROND, est remplacé aujourd'hui, dans les mêmes conditions, en ces localités, par le *Lecanoretum pityreae* et le *Pleurococcetum* (zones A à C, Lille) ou des groupements moins altérés (zones D voire E localement, Rouen) ; on a la série temporelle



(→ : flèche temporelle)

isomorphe à la série spatiale. Des observations voisines pourraient être faites dans la région de Dunkerque d'après les données floristiques historiques de BOULY DE LESDAIN (1910) rattachables à l'association du *Parmelietum acetabuli* (zone G) et les observations plus récentes, d'après lesquelles il y aurait eu dégradation de 1972 (zones E et F) à 1982 (zones B à E) et 1986 (A à D), puis amélioration en 1987 (E-F), selon HUVENT (1988).

L'existence conjointe de séries formées des mêmes éléments (Sy E1) reliés toutefois par des flèches causales distinctes relève de ce que j'ai appelé antérieurement des *isomorphismes de variables*, le plus important étant justement l'isomorphisme spatio-temporel illustré ici, révélateur de symétries entre l'espace et le temps.

#### 5.7.4. heuristique du structuralisme

Les données abstraites apportées par les invariants structuraux offrent toute une heuristique, toute une aide, pour l'étude de nouveaux systèmes sociolichéniques. Cette heuristique s'appuie sur le postulat que ceux-ci sont isomorphes aux systèmes déjà connus, donc qu'ils doivent fonctionner de la même manière, donc qu'on peut a priori leur étendre les invariants structuraux dégagés par la synthèse structuraliste.

Pour chaque système, macroclimatiquement et chimiquement défini, il doit exister une association lichénique de base fonction de ces conditions écologiques ; elle doit se fragmenter à mesure que la pollution augmente en se déplaçant dans l'espace. Cette fragmentation peut être décrite en terme de série, au moyen d'un tableau de mesures qualitatives (de relevés). Puisque les zones isoflores sont centrées sur les sources polluantes, pour rassembler une grande diversité de relevés, il convient de les réaliser le long de transects privilégiés perpendiculaires aux limites de ces zones (figure 3).

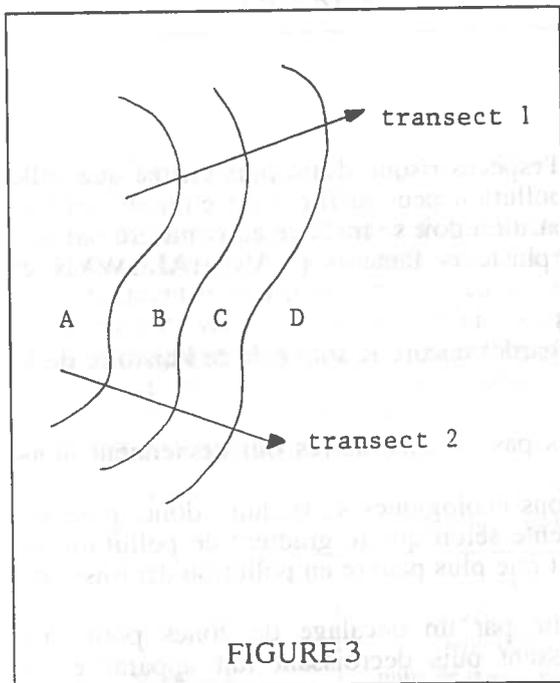


FIGURE 3

Pour établir le tableau sériel, on traite les relevés rassemblés par une méthode statistique classique dite *des tableaux* en phytosociologie ; un invariant structural facilite ce travail statistique : la série doit être en escalier descendant selon un gradient de pollution croissant, donc le nombre d'espèces doit décroître en moyenne et la présence des espèces augmenter ; alors un classement a priori des relevés, selon leur nombre décroissant d'espèces, et des espèces, selon leur présence croissante, facilite la mise en évidence de la série en

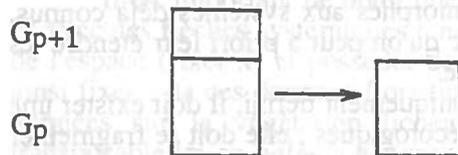
escalier ; ce raisonnement est implicitement décrit par VAN HALUWYN et LEROND 1988 (tb 4 p. 326), dans un autre sens.

Enfin, l'utilisation des isomorphismes spatio-temporels autorise à poser l'hypothèse que les transformations spatiales de la végétation lichénique le long de la série sont aussi des transformations temporelles et qu'à la place d'une végétation fragmentée actuelle, il a pu exister l'association de base.

## 6. Hystérésis

Toute l'analyse précédente avait pour but essentiel d'élaborer une échelle de corrélation entre végétation lichénique décrite en termes de Sy El, unis en une série, et des concentrations croissantes en polluant. Depuis une dizaine d'années, la pollution atmosphérique stagne ou même régresse. Si l'on veut continuer à utiliser la bioindication lichénique, il s'agit de vérifier si l'échelle de corrélation en pollution croissante peut être utilisée en pollution décroissante ou s'il se passe quelque chose d'autre.

La démarche structuraliste a permis de préciser que la disparition d'un GS d'un terme au suivant de cette série était un invariant fonctionnel de ces systèmes socio-lichéniques, disparition qu'on peut symboliser ainsi :



où  $G_p$  apparaît comme invariant floristique par cette transformation. L'inertie de cette transformation dépend naturellement de la sensibilité de  $G_{p+1}$ , ou encore de l'ensemble des espèces qui l'engendre. La transformation inverse, associée à une pollution décroissante, devrait se concrétiser par la réapparition du groupe  $G_{p+1}$  :



Or l'inertie d'une réapparition d'un petit nombre d'espèces risque d'être plus élevée que celle d'une disparition. Par ex., un pic temporaire de pollution peut suffire pour éliminer un  $G_k$ , surtout si les espèces sont très sensibles. La réapparition doit se traduire au contraire par une réinstallation de ces espèces, conditionnée par plusieurs facteurs (VAN HALUWYN et LEROND 1988) :

- accessibilité des espèces aux phorophytes
- qualité favorable des écorces qui ont pu garder encore le souvenir de l'histoire de la pollution locale
- germination puis croissance des lichens
- un type de polluant a pu diminuer mais pas certains autres qui deviennent alors facteurs limitants.

Cette différence d'inertie aux transformations écologiques se traduira donc, pour un degré de pollution donné, à une végétation différente selon que le gradient de pollution est croissant ou décroissant : la flore lichénique devrait être plus pauvre en pollution décroissante par suite d'une inertie plus grande.

Cette différence de comportement, traduite par un décalage de zones pour une pollution donnée, selon un gradient causal croissant puis décroissant fait apparaître un phénomène d'hystérésis tel qu'il existe en physique classique :

- soumis à un champ magnétique croissant, puis décroissant, l'aimantation ou l'induction magnétique des aimants présente un tel phénomène ;
- en métallographie, sous un gradient de température, transformation du Fer  $\alpha$  (cubique centré) en Fer  $\gamma$  (cubique à faces centrées), transformation de l'austénite en martensite.

De même qu'en magnétisme l'hystérésis traduit une résistance à la désaimantation selon le champ décroissant, l'hystérésis de la végétation lichénique traduit une résistance à la dépollution. L'appareil de mesure lichénique présente donc une hystérésis, que l'appareil idéal ne devrait pas présenter (figure 4), ce qui est certainement le cas des capteurs physiques, encore qu'en métrologie, on évoque la possibilité d'existence d'hystérésis pour des appareils de mesure (NEY 1990).

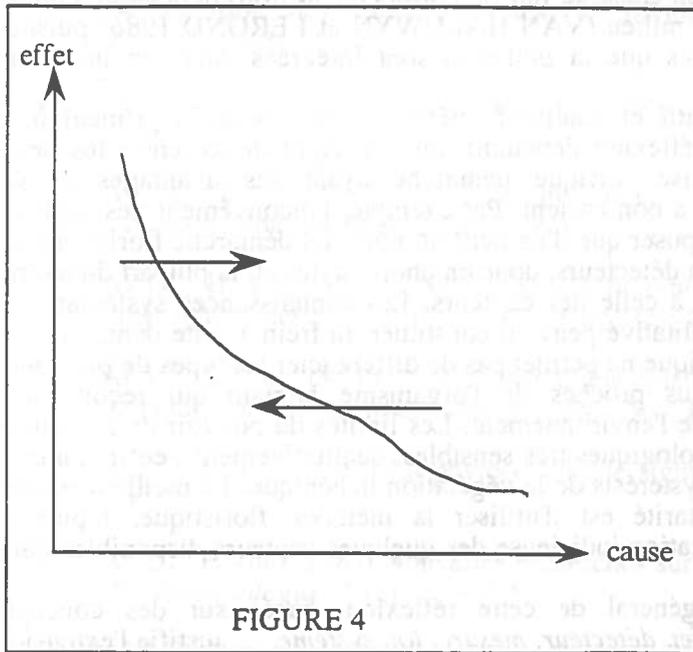


FIGURE 4

### CONCLUSION

En conclusion, il faut revenir sur le schéma général du I et insister sur le fait que la physique quantitative des capteurs et la physique qualitative de la lichénosociologie sont formellement isomorphes, ce que beaucoup de spécialistes de la bioindication soupçonnaient évidemment. Mais pour le démontrer avec précision, il est nécessaire d'élaborer une approche épistémologique en profondeur de la bioindication lichénique. En effet, il existe des invariants formels qui transcendent les deux démarches, technique et floristique. Le tableau suivant résume ces divers invariants et précise pour chaque démarche sous quelle forme ils se réalisent concrètement

invariant	technique, quantitatif	floristique, qualitatif
1. détecteur	capteur	flore lichénique
2. choix du polluant	réglage du capteur	invariant systémique
3. phénomène	pollution détectée	végétation lichénique (I.A.)
4. unité de mesure	unité de poids/unité de volume	niveau hiérarchique systématique
5. mesure	nombre positif	inventaire, relevé
6. classe de mesures	intervalle de nombres proches	Sy Ei
7. équivalence de mesures	moyenne-équivalence	équivalence taxonomique
8. invariant de classe	moyenne de nombres	ensemble des constantes
9. loi (cause à effet)	fonction $y = \Phi(u)$	série $\Sigma/U$
10. loi décroissante	$\Phi$ tel que $\Phi'(u) < 0$	série en escalier descendant
11. effet à cause	$y_1 \rightarrow u_1$	$R \in T_1 \rightarrow U_1$

L'invariant 1 donne toute sa valeur à la célèbre phrase de NYLANDER, si souvent citée en bioindication lichénique : *les lichens donnent à leur manière la mesure de la salubrité de l'air et constituent (si l'on peut dire ainsi) une sorte d'hygiomètre très sensible*. L'invariant 2 mérite une explication supplémentaire ; le physicien construit son capteur pour n'être sensible qu'à un facteur du milieu ; pour parvenir au même but, le lichénologue adopte une démarche systémique, dans laquelle l'invariance interne imposée au système élémentaire défini permet de limiter au maximum les facteurs variables, car la flore lichénique est évidemment sensible à une complexité de facteurs écologiques (microclimat, hygrométrie, lumière, azote, écorce, etc). Ceci ne remet absolument pas en cause le fait de considérer la flore lichénique comme indicatrice globale de la qualité d'un milieu (VAN HALUWYN et LEROND 1986) puisque toutes les données écologiques autres que la pollution sont intégrées dans les invariants caractéristiques des systèmes.

Loin donc d'opposer quantitatif et qualitatif, même si elle donne la primeur à ce dernier, moins bien compris, cette réflexion débouche sur une équivalence entre les deux, moyennant une formalisation précise. Chaque démarche ayant ses avantages et ses inconvénients, il s'agit de les utiliser à bon escient. Par exemple, l'inconvénient des capteurs est leur coût ; on ne peut donc en disposer que d'un petit nombre. La démarche floristique est fondée sur une grande disponibilité en détecteurs, donc en phorophytes et, la plupart du temps, la densité de ceux-ci est supérieure à celle des capteurs. Les connaissances systématiques nécessaires pour l'acte de mesure qualitative peuvent constituer un frein à cette démarche ; le caractère global de l'indication lichénique ne permet pas de différencier les types de polluants, mais, en cela, les lichens sont plus proches de l'organisme humain qui reçoit aussi globalement les agressions néfastes de l'environnement. Les limites du pouvoir de résolution conduisent à choisir des détecteurs biologiques très sensibles, qualitativement ; enfin, l'inertie biologique a pour conséquence une hystérésis de la végétation lichénique. Le meilleur moyen de tirer parti de cette complémentarité est d'utiliser la méthode floristique, rapide et économique, pour guider une implantation judicieuse des quelques capteurs disponibles dans une petite région.

Le caractère suffisamment général de cette réflexion, basée sur des concepts transdisciplinaires comme *cause et effet, détecteur, mesure, loi, système, ...*, justifie l'extension de ces approches à d'autres domaines de la bioindication ; ainsi la végétation herbacée est indicatrice des modifications naturelles ou anthropiques des prairies semi-naturelles (de FOUCAULT 1989) ; en domaine aquatique, l'utilisation de végétaux supérieurs (ROBACH et al. 1991) ou de Bryophytes (EMPAIN 1978, WATTEZ 1977) pourrait donner lieu à une démarche isomorphe à celle-ci. On ne saurait mieux justifier la recherche transdisciplinaire et l'épistémologie de l'invariance qui la sous-tend.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BARKMAN, J.J., 1958. Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. 628 p., Assen.
- BEHERE, J.B.J., 1824. Lichens de Rouen ou tableau analytique des genres et des espèces de lichens découverts jusqu'à ce jour aux environs de Rouen. *Soc. Libre Emul. Rouen* : 119-125.
- BOULY DE LESDAIN, M., 1910. Recherches sur les lichens des environs de Dunkerque. Thèse, Paris, 301 p.
- CRESPO, A. et BUENO, A.G., 1982. Valoracion de las areas isocontaminadas en la Casa de Campo de Madrid, mediante el analisis de bioindicadores (liques epifiticos). *Coll. Botan.* 13 (1) : 279-294.

- DELZENNE, Ch. et GEHU, J.M., 1978. Sur deux associations épiphytes du *Parmelion caperatae* des plaines et collines françaises. *Doc. Phytosoc.* NS II : 117-126.
- DUVIGNEAUD, P., 1946. La variabilité des associations végétales. *Bull. Soc. Roy. Bot. Belg.* 78 : 107-134.
- EMPAIN, A., 1978. Relations quantitatives entre les populations de Bryophytes aquatiques et la pollution des eaux courantes. Définition d'un indice de qualité des eaux. *Hydrobiologia* 60 (1) : 49-74.
- FOCKEU, H., 1901. Flore lilloise limitée au périmètre extérieur des glacis. *Bull. Université de Lille* : 36-39.
- FOUCAULT, B. (de), 1979. Eléments pour une théorie statistique du tableau phytosociologique homogène. *Vegetatio* 40 (3) : 163-174.
- FOUCAULT, B. (de), 1984a. Systémique, structuralisme et synsystématique des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises. Thèse, Rouen, 675 p.
- FOUCAULT, B. (de), 1984b. Introduction à une épistémologie de l'invariance. Application à la botanique et à la phytosociologie. *Bull. Soc. Bot. N. Fr.* 37 (3-4) : 73-84.
- FOUCAULT, B. (de), 1986. La phytosociologie sigmatiste : une morpho-physique. 147 p., Lille.
- FOUCAULT, B. (de), 1987. Nouvelles recherches sur les structures systématiques végétales. *Phytocoenologia* 15 (2) : 159-199.
- FOUCAULT, B. (de), 1989. La structure formelle des systèmes prairiaux mésophiles. Applications agronomiques. *Coll. Phytosoc.* XVI, phytosociologie et pastoralisme, Paris 1988 : 75-99.
- FOUCAULT, B. (de) et VAN HALUWYN, Ch., 1981. Séminaire de phytosociologie cryptogamique, Lille : 16-17 février 1979. *Doc. Phytosoc.* NS V : 503-521.
- GEHU, J.M., 1973. Notes de paléophytosociologie récente dans le Parc régional de Saint Amand. I. La butte du Mont des Bruyères. *Doc. Phytosoc.* 4 : 41-43.
- GILLET, F., de FOUCAULT, B. et JULVE, Ph., 1991. La phytosociologie synusiale intégrée. Objets et concepts. *Candollea* 46 : 315-340.
- GOUNOT, M., 1969. Méthodes d'étude quantitative de la végétation. 314 p., Masson.
- HAWKSWORTH, D.L. et ROSE, F., 1970. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 227, 5254 : 145-148.
- HUVENT, P., 1988. Les lichens : témoins de la pollution atmosphérique dunkerquoise. Thèse de pharmacie, Lille, 126 p.
- KOPECKI, K. et HEJNY, S., 1974. A new approach to the classification of anthropogenic plant communities. *Vegetatio* 29 (1) : 17-20.
- LEBLANC, F. et DE SLOOVER, J., 1970. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.* 48 : 1485-1496.
- LEROND, M., 1981. Les lichens épiphytes en Normandie orientale. Distribution, sociologie et application à la cartographie de la pollution atmosphérique. *Actes du Museum de Rouen* : 1-299.

NEY, G., 1990. Méthodologie de la mesure. *Encycl. Univ.* 15 : 13-17.

ROBACH, F., EGLIN, I. et CARBIENER, R., 1991. Hydrosystème rhéna : évolution parallèle de la végétation aquatique et de la qualité de l'eau (Rhinau). *Bull. Ecol.* 22 (1) : 227-241.

VALERY, P., 1973-74 (rééd.). Cahiers. I : 1491 p., II : 1676 p.. *La Pléiade*, Gallimard, Paris.

VAN HALUWYN, Ch. et LEROND, M., 1986. Les lichens et la qualité de l'air. Evolution méthodologique et limites. Contrat SRETIE, 207 p.

VAN HALUWYN, Ch. et LEROND, M., 1988. Lichénosociologie et qualité de l'air : protocole opératoire et limites. *Cryptogamie, Bryol. Lichénol.* 9 (4) : 313-336

WATTEZ, J.R., 1977. Une estimation biologique de la qualité des eaux courantes à l'aide des Bryophytes aquatiques et sub-aquatiques. *C.R. 102ème congrès Soc. Sav.*, Limoges 1977 : 391-401. Paris

**REMERCIEMENTS** : ils s'adressent chaleureusement à Chantal VAN HALUWYN pour son aide sur la partie proprement lichénologique.

## CONCLUSION GENERALE DU SEMINAIRE

André BELLEMERE

Nous remercions Chantal VAN HALUWYN d'avoir organisé ce séminaire ainsi que tous les participants, pour l'ambiance particulièrement active et chaleureuse qui a permis d'avoir un colloque extrêmement intéressant.

D'autre part, ceci montre que ce séminaire avait un intérêt dans la mesure où le rôle des lichens dans la détermination des pollutions n'est plus à faire maintenant, qu'il est parfaitement reconnu comme nous l'a montré Klaus AMMANN.

On aurait pu s'en tenir à une présentation des faits de la réduction de la pollution pour le nord de la France, mais ce colloque s'est ouvert plus largement et il correspond véritablement à un séminaire de biologie à tout point de vue. On n'a pas seulement parlé des lichens mais aussi des écorces ; en ce qui concerne les lichens, je crois que, si les méthodes d'approche sont différentes, c'est que les problèmes sont extrêmement complexes. Ce séminaire a été un colloque de biologie moderne parce qu'on nous a bien fait voir précisément que le côté réductionniste devait être dépassé.

Le fait que plusieurs techniques d'approche puissent être utilisées montre aussi la difficulté de cet objectif, mais on commence à progresser très largement et à avoir des résultats quantitatifs intéressants.

Je crois donc, pour conclure, que ce séminaire nous a permis d'insister sur la complexité des phénomènes écologiques ; la traduction de la pollution, c'est vraiment comme la traduction de la vie d'une façon générale : chaque individu est en équilibre précaire avec les variables multiples qui sont propres à lui-même et au milieu. La disparition des individus, qu'ils soient des lichens ou des hommes, vient qu'une de ces variables atteint un niveau effectivement insupportable pour le fonctionnement général, ce qui fait que l'individu disparaît. A mon sens c'est l'essentiel de ce qu'il faut retenir.