

## ETUDE DE L'ACCUMULATION DU FLUOR DANS LES LICHENS D'UNE VALLEE ALPINE POLLUEE

J. ASTA

*Université de Grenoble I, Laboratoire de Biologie Végétale,  
BP 53-38041, Grenoble Cedex, France*

&

J. P. GARREC

*Centre d'Etudes Nucléaires, Laboratoire de Biologie Végétale,  
Département de Recherche Fondamentale, 85X-38041, Grenoble Cedex, France*

### RESUME

*L'accumulation du fluor est étudiée chez diverses espèces lichéniques corticoles, terricoles et saxicoles durant trois années successives dans une vallée alpine polluée dont on présente les caractéristiques. La teneur en fluor des thalles diffère selon les espèces et reflète aussi les variations du niveau de pollution fluorée de l'air dans l'espace et dans le temps, comme celle de la végétation phanérogamique. La concentration en fluor des lichens corticoles présente des variations saisonnières en relation avec les précipitations et montre un parallélisme avec la teneur en fluor des phanérogames, alors que celle des lichens terricoles ne subit pas de telles variations et semble sous l'influence d'autres facteurs. On constate l'existence d'une teneur naturelle en fluor de lichens témoins prélevés dans des régions non polluées.*

### ABSTRACT

*Fluoride accumulation was studied in various corticolous, terricolous and saxicolous lichen species in a polluted alpine valley during three successive years. The fluoride concentration of the lichen thallus depends on the species and variations in the level of atmospheric fluoride pollution in space and time, as it does in the phanerogamic vegetation. The fluoride concentration in corticolous species, which is paralleled in phanerogams, shows seasonal variations in relation to rainfall. In contrast, the fluoride concentration in terricolous lichens seems to be influenced by other factors. A natural fluoride concentration is observed in lichens sampled from non-polluted regions.*

267

## INTRODUCTION

Le rôle des lichens comme indicateurs de pollution par  $\text{SO}_2$  a fait l'objet de plusieurs études et commence à être assez bien connu. Par contre, les travaux concernant l'influence de la pollution fluorée sur les lichens sont encore peu nombreux. Ceux qui existent traitent de l'action du fluor sur la morphologie, l'anatomie ou la physiologie des lichens par des expériences de fumigation ou de transplantation (Schönbeck, 1969; Leblanc *et al.*, 1971; Nash, 1971; Comeau & Leblanc, 1972; Börtitz & Ranft, 1972; Ranft & Dässler, 1972; Horntvedt, 1976a; De Wit, 1976; Steubing, 1977).

Parallèlement, des applications de la méthode de l'indice de pureté atmosphérique (IPA), basée sur le nombre d'espèces lichéniques, leur abondance et leur degré de fertilité (De Sloover, 1964) ont été effectuées dans diverses régions soumises à une pollution fluorée (Leblanc *et al.*, 1972; Pišút & Lisická-Jelinková, 1974). Cependant, peu d'auteurs ont étudié la teneur en fluor des lichens dans les régions polluées, et chez ces cryptogames, seulement quelques valeurs sont citées (Martin & Jacquard, 1968; Gilbert, 1971, 1973; Leblanc *et al.*, 1971; Kaleta, 1973; Holub & Kontriosová, 1974; Horntvedt, 1976b; Steubing *et al.*, 1976). De même, les teneurs naturelles en fluor des lichens poussant en atmosphère non polluée restent généralement inconnues.

## BUT DU TRAVAIL

La présence dans la vallée de l'Arc (Maurienne) d'une pollution atmosphérique par le fluor due à l'existence de trois usines d'aluminium et le fait que cette vallée soit l'objet de nombreux travaux sur l'impact de cette pollution au niveau de la végétation phanérogamique (De Cormis, 1975-1977; Garrec *et al.*, 1976), nous ont incités à choisir cette région pour l'étude de l'accumulation du fluor dans les lichens.

Les méthodes désormais classiques de cartographie de la pollution au moyen des lichens ne nous semblaient pas adaptées au milieu. En effet, l'échelle de sensibilité établie par Hawksworth & Rose (1970) est utilisée actuellement dans le cas de pollution par  $\text{SO}_2$  pour lequel la tolérance ou la sensibilité des lichens sont mieux connues que pour le fluor. Cette méthode, ainsi que la méthode de l'IPA, s'applique à des régions de topographie peu variable où l'on peut retrouver des 'stations homologues' (De Sloover, 1964), présentant un microclimat aussi semblable que possible. Et de fait, les applications qui en ont été tirées jusqu'à présent se sont adressées à des régions de basse altitude, sans relief accentué et soumises généralement à des conditions écologiques assez voisines. Or, la région étudiée ici, qui est une vallée de montagne, présente de grandes variations écologiques (topographie au relief accusé, altitude variable, climat de type continental de montagne, etc.).

De plus, aucune étude préalable de la flore et de la végétation lichénique n'ayant été effectuée avant l'installation des usines qui remonte au début du siècle, aucune comparaison entre un état primitif sain et l'état actuel ne pouvait être

effectuée. Dans les Alpes, les facteurs écologiques, et par conséquent la végétation, variant assez rapidement d'une vallée à l'autre, il nous était également difficile d'entreprendre une comparaison entre la Maurienne et une autre vallée.

C'est pourquoi il nous a semblé intéressant d'étudier l'accumulation du fluor dans les lichens et ses variations au cours de trois années successives, parallèlement aux travaux portant sur l'accumulation du fluor chez les phanérogames. De même que les végétaux supérieurs fournissent une indication intégrée du niveau de pollution de l'air, la connaissance seule du taux de fluor de plusieurs espèces de lichens de cette région suffit-elle pour évaluer cette pollution au cours du temps?

Pour chaque espèce lichénique étudiée, nous avons également pris soin de comparer la teneur naturelle en fluor d'échantillons prélevés dans des régions non polluées.

#### PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE: LA MAURIENNE

##### *Localisation*

La Maurienne ou vallée de l'Arc est située dans le département de la Savoie, au pied du Massif de la Vanoise (Fig. 1). Dans cette vallée, trois parties peuvent se différencier de part leur orientation. En remontant la vallée, on distingue: une région basse, d'Aiguebelle à Saint-Etienne de Cuines, orientée NS; une partie moyenne, ou Moyenne-Maurienne, allant de Saint-Etienne de Cuines à Modane et orientée NW-SE et enfin une partie haute, ou Haute-Maurienne, en amont de Modane et orientée SW-NE.

##### *Climat*

*Les vents:* Le régime des vents a été étudié en Moyenne-Maurienne durant cinq années successives (1970 à 1974) à partir de relevés effectués trois fois par jour, vers 0800 h, 1400 h et 2000 h (Garrec *et al.*, 1976). Les renseignements recueillis ont permis de constater que, sur la totalité, il y avait 53 % de vents nuls, 34 % de vents d'ouest et 13 % de vents d'est. Donc, dans la majorité des cas, les vents enregistrés sont des vents d'ouest qui remontent la vallée.

*La pluie (renseignements recueillis auprès de la Station météorologique de Challes-les Eaux):* Les moyennes trimestrielles des précipitations durant les années 1975, 1976 et 1977, permettent de constater (Fig. 2): (1) un régime des pluies sensiblement parallèle en Moyenne et en Haute-Maurienne; (2) l'existence d'un net déficit hydrique entre l'automne 1975 et l'été 1976 et (3) de fortes précipitations à partir de l'automne 1976.

*La neige (renseignements fournis par le Centre d'Etude de la Neige de Saint-Martin d'Hères. Réseau CEDONIGLA):* Le Tableau 1 présente le nombre de jours d'enneigement dans deux stations de Maurienne (Valloire et Aussois) durant les trois années étudiées. La durée d'enneigement, importante, s'étale généralement du mois de Novembre au mois d'Avril.

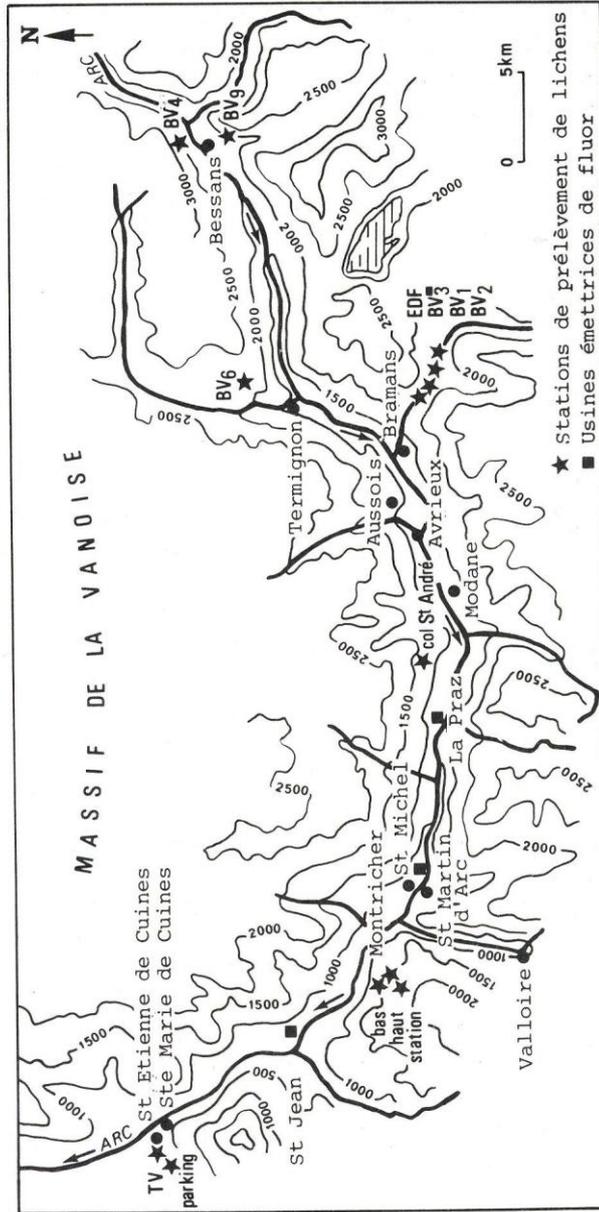


Fig. 1. Vallée de l'Arc (Maurienne). Plan de situation de la région étudiée. Les courbes de niveau sont espacées de 500m.

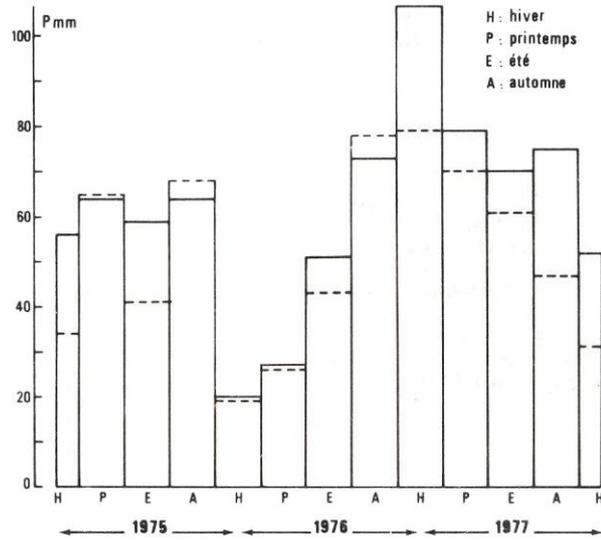


Fig. 2. Précipitations moyennes trimestrielles en millimètres durant les années 1975, 1976 et 1977. — Moyenne-Maurienne (station de Saint-Martin d'Arc), --- Haute-Maurienne (Moyenne des Stations d'Avrieux et d'Aussois).

TABLEAU I  
NOMBRE DE JOURS D'ENNEIGEMENT DE JANVIER 1975 À DÉCEMBRE 1977

	Premier trimestre 1975	Hiver 1975-1976	Hiver 1976-1977	Dernier trimestre 1977
Moyenne-Maurienne (station de Valloire)	106	141	173	48
Haute-Maurienne (station d'Aussois)	106	105	121	41

*La température (données transmises par la Station météorologique de Chambéry-Aix les Bains):* Les moyennes annuelles de deux stations de Moyenne-Maurienne et d'une station de Haute-Maurienne sont de 7° à 8°C.

Seuls sont présentés ici les facteurs climatiques ayant fait l'objet de mesures précises. Des travaux antérieurs (Bartoli, 1966) ont d'ailleurs montré l'originalité du climat de la Maurienne, vallée la plus froide et la plus sèche des vallées internes des Alpes.

Mais il existe aussi d'autres facteurs dont il est difficile de cerner l'influence sur le terrain: relief, exposition, brises locales, inversions de température, brouillards, etc.

*La pollution fluorée*

*Les sources:* La Maurienne abrite, dans sa partie moyenne, trois usines d'aluminium d'inégale importance. En allant de l'amont vers l'aval, on trouve

successivement La Praz dont la production est d'environ 4 000 tonnes par an, Saint-Michel de Maurienne avec 12 000 tonnes par an, enfin celle de Saint-Jean de Maurienne dont la production annuelle avoisine 80 000 tonnes d'aluminium.

Les rejets fluorés (tonnes par an) pour chaque usine et pour l'ensemble de la vallée sont indiqués dans le Tableau 2.

TABLEAU 2  
REJETS FLUORÉS (tonnes/an) POUR CHAQUE USINE ET POUR L'ENSEMBLE DE LA VALLÉE (DOCUMENTS ALUMINIUM PECHINEY)

Année	Saint-Jean	Saint-Michel	La Praz	Ensemble de la vallée
1967-1970	1000-1100	180	90	1270-1370
1971-1973	900-1000	180	90	1170-1270
1974	700	180	90	970
1975	420	180	90	690
1976	420	120	60	600
1977	420	90	30	540

Nous remarquons que dans la vallée, la source principale de pollution atmosphérique par le fluor provient de l'usine de Saint-Jean de Maurienne, et nous constatons une nette diminution des émissions fluorées depuis 1974 due à la mise en place progressive de systèmes de captation des fumées fluorées.

*Niveau de pollution atmosphérique:* Le niveau de pollution de l'air, dû aux usines, a été mesuré par la méthode des papiers à la chaux uniquement durant la saison de végétation d'avril à octobre, dans dix stations de Moyenne-Maurienne (Tableau 3) (De Cormis, 1975-1977).

TABLEAU 3  
NIVEAU DE POLLUTION DE L'AIR ( $\mu\text{g dm}^{-2} \text{ JOUR}^{-1}$ )  
MESURÉ ENTRE AVRIL ET OCTOBRE SUR 10 POSTES CaO  
(D'APRES DE CORMIS, 1975-1977)

	1975	1976	1977
Moyenne	2.2	1.5	2.3
Valeurs extrêmes	1.7-3.3	0.9-1.9	1.3-3.4

Nous constatons que la moyenne annuelle du niveau de pollution de l'air a baissé entre 1975 et 1976, mais a augmenté en 1977. Entre avril et octobre, ce niveau de pollution subit des fluctuations (Fig. 3).

Par ailleurs, nous savons que la Haute-Maurienne présente des taux de pollution très nettement inférieurs à ceux de la Moyenne-Maurienne du fait de son éloignement des sources de pollution et, qu'en 1977 le taux de pollution y est quasiment nul (rapports internes, CEN, Grenoble).

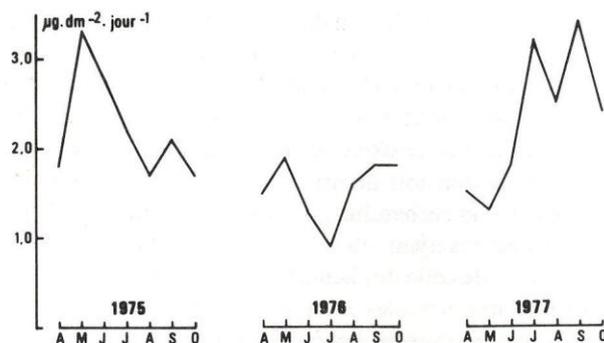


Fig. 3. Moyenne mensuelle (avril à octobre) calculée sur 10 postes CaO ( $\mu\text{g dm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ ) de la teneur en fluor atmosphérique.

#### MATERIEL ET METHODES

##### Sur le terrain

Les stations étudiées sont celles où sont effectués parallèlement des prélèvements de végétaux supérieurs dans lesquels nous étudions l'accumulation du fluor (Garrec *et al.*, 1976, et travaux en cours) (Tableau 4).

Etant donné la prédominance des vents remontant la vallée, les stations ont été choisies principalement en amont des sources émettrices de fumées fluorées, sur les deux versants.

TABLEAU 4  
STATIONS DE PRÉLÈVEMENTS DES LICHENS DOSÉS

Stations	Distance à Saint-Jean de Maurienne (km)	Altitude (m)	Exposition
<i>Stations de Moyenne-Maurienne</i>			
Saint-Etienne de Cuines TV	12	800	NE
Saint-Etienne de Cuines Parking	12.5	900	NE
Montricher bas	5	1070	NNE
Montricher haut	5.5	1400	NNE
Montricher Station de Ski	6	1550	NNE
Col Saint-André	25	1350	SSW
<i>Stations de Haute-Maurienne</i>			
Planey de Bramans EDF	46	1660	NNE
Planey de Bramans BV <sub>3</sub>	47	1680	NNE
Planey de Bramans BV <sub>1</sub>	47.5	1700	NNE
Planey de Bramans BV <sub>2</sub>	48	1720	NNE
Termignon BV <sub>6</sub>	50	1600	SSW
Bessans Averole BV <sub>9</sub>	68	1900	NNW
Bessans Villaron BV <sub>4</sub>	69	1800	E

L'existence d'un niveau de pollution de l'air nettement différent entre la Moyenne et la Haute-Maurienne nous a incités à grouper séparément les stations situées dans ces deux régions. L'usine de Saint-Jean de Maurienne étant la source principale de pollution atmosphérique, nous avons précisé la distance de chaque station de prélèvement par rapport à cette usine, distance qui tient compte de la topographie de cette vallée très encaissée entraînant une circulation sinueuse des masses d'air.

Le but de l'étude étant la recherche d'accumulation du fluor dans les lichens, et le critère du choix des stations ayant été basé auparavant en fonction de la végétation phanérogame et non de celle des lichens, nous avons été astreints à récolter dans chaque station les lichens corticoles et terricoles le plus fréquemment rencontrés, au lieu de pouvoir choisir les espèces lichéniques à doser.

De plus, si en Haute-Maurienne, lichens corticoles et terricoles sont toujours présents, nous notons par contre en Moyenne-Maurienne une présence faible ou même l'absence des lichens épiphytes (sans doute liée au niveau de pollution élevé de l'air).

Dans chaque station, les récoltes de lichens sont réalisées de la manière suivante: les lichens corticoles sont prélevés sur les mêmes arbres—quand cela est possible, sur ceux faisant aussi l'objet de prélèvement—et les lichens terricoles sont récoltés à des emplacements situés sur un territoire limité à 10 à 20 m<sup>2</sup> de surface autour de la région de prélèvement des lichens corticoles et des végétaux supérieurs.

Sur les troncs ont été récoltés: *Parmelia physodes* (L.) Ach. et *P. furfuracea* (L.) Ach. de la famille des Parméliacées, ainsi que *Usnea muricata* Mot., *Letharia vulpina* (L.) Ach., *Alectoria jubata* (L.) Ach. em. Mot., qui appartiennent à la famille des Usnéacées.

Des espèces de lichens terricoles ont été prélevées: *Cladonia* du groupe *pyxidata* (*Cl. pyxidata* (F.) Fr. *sensu stricto* et *Cl. chlorophaea* (Floerke) Spreng.), ainsi que des *Peltigera*, *P. canina* L. le plus souvent et *P. aphthosa* (L.) Willd. dans la station BV<sub>2</sub>.

Remarquons que les deux genres ont été observés dans un grand nombre de stations, ce qui confirme une assez grande résistance de ces lichens à la pollution fluorée (Gilbert, 1973).

Quelques lichens saxicoles ont également été récoltés: *Umbilicaria* (diverses espèces), *Parmelia conspersa* (Ehrht.) Ach., *P. stenophylla* (Ach.) Heug. et *Xanthoria elegans* (Link) Th. Fr.

Les prélèvements ont été effectués durant les années 1975, 1976 et 1977, à des périodicités régulières. Cependant, les dates de prélèvements sont différentes selon les stations, car certaines stations, d'altitude élevée, sont enneigées plus longtemps. Ces dates sont les suivantes: en 1975 (25 et 26 juin, 23 et 24 septembre, 16 octobre); en 1976 (13 et 14 avril, 14 et 15 juin, 27 et 28 juillet, 21 et 22 septembre, 25 et 26 octobre); en 1977 (26 et 27 avril, 7 juillet, 29 septembre, 26 et 27 octobre).

Pour comparaison, nous avons choisi comme région non polluée la station de Fond de France (1 500 m), dans le Massif de Belledonne où ont été récoltées les mêmes espèces de lichens sauf *Letharia vulpina*, absent de cette région d'étage

montagnard, qui a été prélevé sur mélèze *Larix europaea* dans le Briançonnais (2000 m).

#### *Au laboratoire*

Le fluor a été dosé dans les thalles de lichens, ainsi que dans le support correspondant (écorce ou sol). La préparation des échantillons ne pose pas de difficultés particulières dans le cas des espèces corticoles et des *Peltigera*. Dans le cas des *Cladonia*, dont une partie du thalle est très appliquée au sol, nous n'avons analysé le fluor que dans les podétions, ceci afin d'éviter les risques de contamination.

Comme pour les végétaux supérieurs, l'analyse du fluor a été réalisée selon la méthode de Levaggi *et al.* (1971). Cette méthode consiste en une minéralisation des thalles ou du support dans une fiole à oxygène de Schöniger, suivie d'un dosage du fluor recueilli dans une solution absorbante au moyen d'une électrode spécifique.

Une étude effectuée au préalable a montré que la précision sur chaque mesure du fluor par cette méthode est toujours inférieure à 7%. De façon à obtenir au niveau d'une station la plus juste représentation du taux de pollution d'une espèce donnée, nous prélevons une dizaine d'échantillons. Après séchage à l'étuve à 100° durant trois jours, tous les échantillons sont broyés ensemble. Les dosages sont ensuite réalisés à partir de 100 mg de la poudre homogène obtenue.

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### *Concentration du fluor dans les espèces lichéniques étudiées*

*Comparaison des espèces lichéniques entre elles:* Les graphiques (Fig. 4 à 6) représentant l'évolution de la pollution dans les différentes stations, ainsi que le Tableau 5 donnant le niveau moyen de pollution des lichens en Maurienne et dans des régions non-polluées, nous permettent de constater que parmi les lichens corticoles, les Parméliacées accumulent davantage de fluor que les Usnéacées

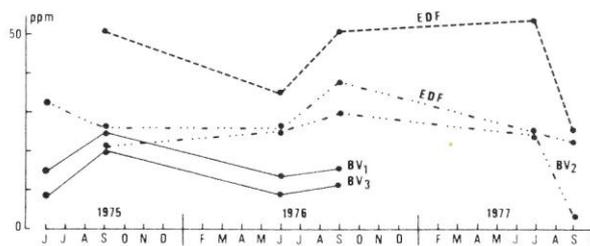


Fig. 4. Teneurs en fluor (en ppm) des thalles de *Parmelia furfuracea*, *Letharia vulpina* et des aiguilles de mélèze. Stations du Planey de Bramans BV<sub>1</sub>, BV<sub>2</sub>, BV<sub>3</sub> et EDF (Hte-Maurienne) (rassemblées sur un même graphique car très proches géographiquement) --- *Parmelia furfuracea*, ······ *Letharia vulpina*, ——— mélèze.

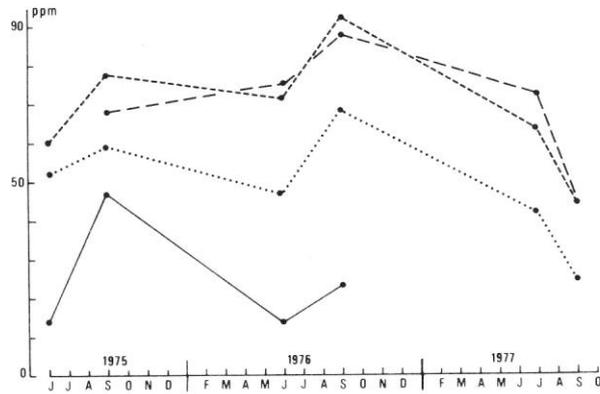


Fig. 5. Teneurs en fluor (en ppm) des thalles de *Parmelia furfuracea*, *P. physodes*, *Usnea muricata* et des aiguilles de méléze. Station de Termignon BV<sub>6</sub> (Haute-Maurienne). ---- *Parmelia furfuracea*, ——— *Parmelia physodes*, ..... *Usnea muricata*, — méléze.

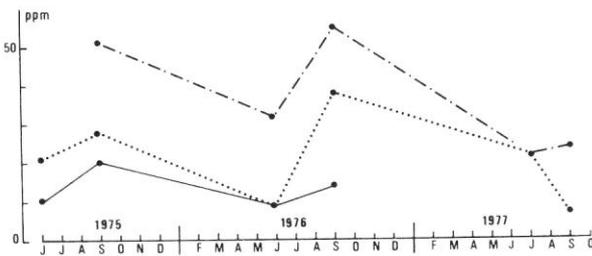


Fig. 6. Teneurs en fluor (en ppm) des thalles d'*Usnea muricata*, *Alectoria jubata* et des aiguilles de méléze. Station de Bessans Averole BV<sub>9</sub> (Hte-Maurienne) ..... *Usnea muricata*, ——— *Alectoria jubata*, — méléze.

TABLEAU 5  
TENEUR MOYENNE EN FLUOR (ppm) DES ESPÈCES LICHÉNIQUES ÉTUDIÉES EN MAURIENNE ET DANS DES RÉGIONS NON POLLUÉES ENTRE 1975 ET 1977

	Maurienne		Regions non polluées	
	*S <sub>Y</sub>	** $\bar{Y} \pm t_{0.05(n-1)}S_Y$	*S <sub>Y</sub>	** $\bar{Y} \pm t_{0.05(n-1)}S_Y$
<i>Parmelia furfuracea</i>	5.2	54 ± 11	2.0	24 ± 6
<i>Parmelia physodes</i>	5.8	65 ± 14	4.0	19 ± 11
<i>Usnea muricata</i>	5.6	35 ± 12	2.9	14 ± 8
<i>Alectoria jubata</i>	6.8	37 ± 19	1.4	13 ± 4
<i>Letharia vulpina</i>	2.6	25 ± 6	0.6	16 ± 3
<i>Cladonia gr. pyxidata</i>	5.2	43 ± 10	3.3	22 ± 9
<i>Peltigera canina</i>	9.3	71 ± 19	1.6	15 ± 5

\* Ecart type de la moyenne  $S_Y = S\sqrt{n}$ .

\*\* Moyenne et 1/2 intervalle de confiance à 95%.

étudiées (environ 1, 5 à 2, 5 fois plus). Ces résultats pourraient s'expliquer par le type morphologique du thalle différent, la surface d'exposition plus importante chez les thalles aplatis des *Parmelia* semblant être à l'origine de cette accumulation. Il est également possible que la structure anatomique radiée des Usnéacées soit moins propice à l'accumulation du fluor que la structure stratifiée des *Parmelia*.

De même, chez les lichens terricoles, *Peltigera canina* concentre davantage le fluor que les podétions de *Cladonia* (près de 2 fois plus) et, parmi les espèces saxicoles, les *Parmelia* observés apparaissent environ deux fois plus riches en fluor (128 ppm) que les *Umbilicaria* (65 ppm).

*Comparaison avec la teneur en fluor de lichens non pollués:* On peut constater d'après le Tableau 5 que les mêmes espèces lichéniques prélevées dans des régions non polluées possèdent déjà une certaine teneur en fluor, dont la valeur moyenne, variable selon les espèces, est située généralement entre 12 et 25 ppm (49 chez des *Parmelia* saxicoles).

Quoique bien plus faibles que dans les lichens de Maurienne, les teneurs en fluor des lichens de régions non polluées varient dans le même sens: les *Parmelia* corticoles présentent une teneur en fluor plus élevée que les Usnéacées, la concentration du *Peltigera* est supérieure à celle de *Cladonia* et les *Parmelia* saxicoles accumulent plus de fluor (49 ppm) que les *Umbilicaria* (21 ppm).

*Comparaison des teneurs en fluor des lichens corticoles et des aiguilles de résineux:* Les résineux choisis pour cette comparaison sont pour la Haute-Maurienne le mélèze, qui y est très commun, et pour la Moyenne-Maurienne l'épicéa *Picea abies*, de loin le résineux le plus fréquent et dont l'accumulation du fluor a été étudiée dans des aiguilles prélevées sur cinq années.

Le Tableau 6 et les Fig. 4 à 6 nous permettent de constater le parallélisme qui existe entre l'accumulation du fluor dans les thalles lichéniques et dans les aiguilles de résineux.

Cependant, alors que la concentration en fluor des lichens de Haute-Maurienne est généralement plus élevée que celle des aiguilles de mélèze (Fig. 4 à 6), l'étude effectuée en Moyenne-Maurienne dans la seule station de Saint-Etienne de Cuines (Tableau 6), commencée plus tardivement et où nous n'avons pu récolter que deux

TABLEAU 6  
TENEURS EN FLUOR (ppm) DES LICHENS (L), DE  
L'ÉCORCE (Ec) ET DES AIGUILLES D'ÉPICÉA DANS LA  
STATION DE SAINT-ETIENNE DE CUINES, PARKING  
(MOYENNE-MAURIENNE)

	Octobre 1976		Avril 1977		Octobre 1977	
	L	Ec	L	Ec	L	Ec
<i>Parmelia furfuracea</i>	45	47	24	36	61	80
<i>Parmelia physodes</i>	63	61	39	38	73	71
Epicéa		61		47		67

espèces de *Parmelia*, nous montre que les teneurs en fluor de ces lichens sont peu différentes de celles des aiguilles d'épicéa. Ces résultats pourraient s'expliquer entre autre par l'âge différent des organes étudiés: une année maximum d'accumulation pour les aiguilles de mélèze, mais plusieurs années pour les aiguilles d'épicéa et les thalles de lichen.

*Relation entre la concentration en fluor dans les lichens et la distance à la source de pollution*

La comparaison des teneurs en fluor chez *Usnea muricata* dans les stations BV<sub>6</sub> et BV<sub>9</sub>, éloignées respectivement de 50 et 68 km de Saint-Jean de Maurienne, confirme une baisse de l'accumulation du fluor dans une même espèce quand on s'éloigne des sources de pollution (Figs 5 et 6).

De même, la teneur en fluor des thalles de *Cladonia* et de *Peltigera* (Figs 9 et 10) est plus élevée en Moyenne-Maurienne qu'en Haute-Maurienne.

*Concentration en fluor des lichens en fonction du temps*

*Influence du niveau de pollution de l'air:* En Haute-Maurienne, nous constatons aussi bien chez les lichens corticoles (Figs 4 à 6) que chez les lichens terricoles (Figs 7, 9 et 10) une baisse générale de la teneur en fluor entre 1975 et 1977.

En Moyenne-Maurienne, l'accumulation du fluor dans les thalles corticoles (Tableau 6) et terricoles (Figs 8 à 10) subit une baisse nette entre 1975 et 1976 mais montre en général une hausse en automne 1977.

Ces variations annuelles du taux d'accumulation dans les thalles lichéniques montrent dans un cas comme dans l'autre une relation nette avec les variations du taux annuel de pollution de l'air et reflètent assez exactement ces variations (cf. Tableau 3).

Rappelons que dans le cas des végétaux supérieurs, ceux-ci répercutent fidèlement

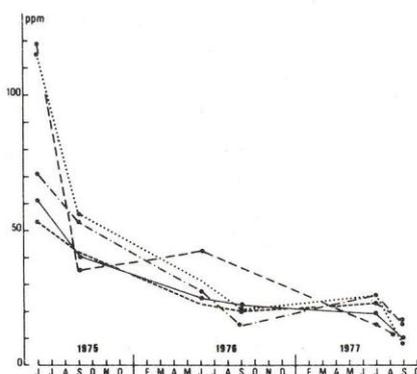


Fig. 7. Teneurs en fluor (ppm) des thalles de *Cladonia* gr. *pyxidata*. Stations de Haute-Maurienne  
 —·— BV<sub>1</sub>: Planey de Bramans, — BV<sub>2</sub>: Planey de Bramans, ···· BV<sub>3</sub>: Planey de Bramans,  
 - - - BV<sub>4</sub>: Bessans Villaron, — — — BV<sub>6</sub>: Bessans Averole.

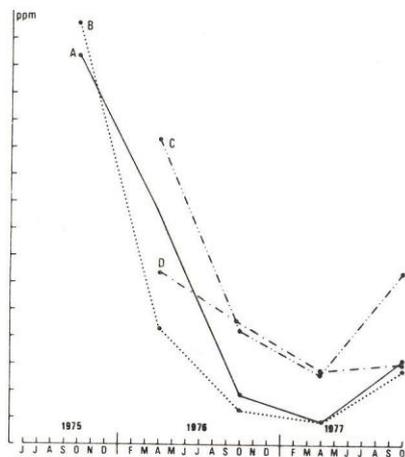


Fig. 8. Teneurs en fluor (ppm) des thalles de *Cladonia* gr. *pyxidata*. Stations de Moyenne-Maurienne. — A: Saint-Etienne de Cuines TV, ..... B: Saint-Etienne de Cuines Parking, ..... C: Montricher Station de ski, —·—· D: Col Saint-André.

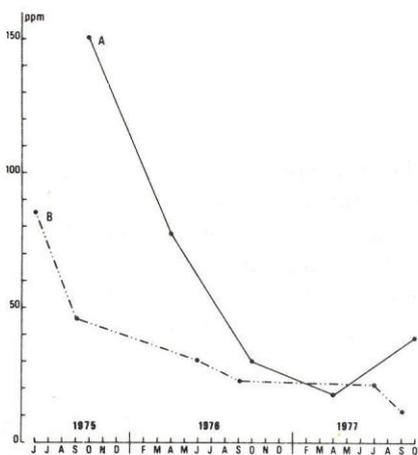


Fig. 9. Teneur moyenne en fluor (ppm) des thalles de *Cladonia* gr. *pyxidata*. — A: Stations de Moyenne-Maurienne. —·—· B: Stations de Haute-Maurienne.

et rapidement les variations du niveau de pollution de l'air (Garrec & Plebin, 1975). Les lichens apparaissent ainsi tout à fait comparables aux végétaux supérieurs.

Les analyses de la teneur en fluor dans l'air étant effectuées entre avril et octobre et uniquement en Moyenne-Maurienne, il nous a donc été impossible d'étudier statistiquement la corrélation mise en évidence entre le niveau de pollution de l'air et la concentration en fluor des thalles corticoles et terricoles de Haute et Moyenne-Maurienne.

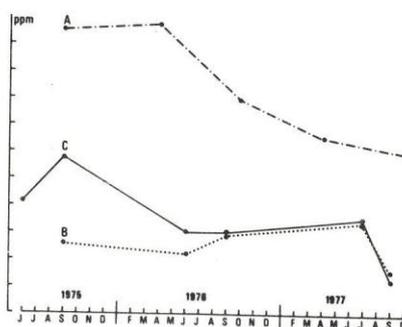


Fig. 10. A (---) Teneur moyenne en fluor (ppm) des thalles de *Peltigera canina* dans les stations de Moyenne-Maurienne. B (····) Teneur en fluor (ppm) de *Peltigera canina* dans les station de Bessans Villaron BV<sub>4</sub>. C (—) Teneur en fluor (ppm) de *Peltigera canina* dans les station du Planey de Bramans BV<sub>2</sub>.

*Influence des facteurs climatiques:* L'accumulation du fluor chez les lichens corticoles (Figs 4 à 6) est soumise à des variations saisonnières au cours des trois années d'observation, avec une hausse automnale (en 1975 et 1976), une baisse au printemps et généralement, en Haute-Maurienne, une baisse en automne 1977, période à laquelle les teneurs en fluor des lichens se rapprochent très nettement du niveau de base naturel.

Par ailleurs, il a été montré qu'il existe une corrélation entre le taux de pollution de la végétation phanérogamique par le fluor et la pluviosité à la même époque (Garrec *et al.*, 1976). D'importantes précipitations, par suite du fort lessivage des feuilles, entraînent une diminution de l'accumulation, tandis qu'à l'inverse une faible pluviosité augmente le taux de pollution. Des conclusions identiques à celles des végétaux supérieurs sur le rôle de la pluie pour le lessivage ont été avancées pour les épiphytes, par Barkman (1969).

Il nous a semblé intéressant d'étudier quantitativement la corrélation existant entre la pluviosité et la concentration en fluor dans les lichens corticoles et terricoles.

L'étude mathématique effectuée nous a permis de constater que c'est seulement la pluviosité moyenne au cours des deux mois précédant le prélèvement qui modifie chez les lichens corticoles l'accumulation du fluor d'origine atmosphérique (*cf.* Fig. 11). Nous mettons en évidence également qu'une pluviosité inférieure à 50 mm/mois entraîne une légère augmentation de la concentration en fluor dans les lichens, alors qu'à l'inverse, une pluviosité supérieure à 50 mm/mois la diminue. Ce résultat est confirmé statistiquement par un test du logarithme du rapport de vraisemblance basé sur le calcul d'une grandeur statistique  $G$  distribuée comme un  $\chi^2$ :

$$G = 18.833 > \chi_{0.01(1)}^2 = 10.83 \quad (p = 1.4 \cdot 10^{-5})$$

résultat très hautement significatif qui confirme l'hypothèse de Barkman (1969).

Par contre, le même traitement mathématique effectué pour les lichens terricoles

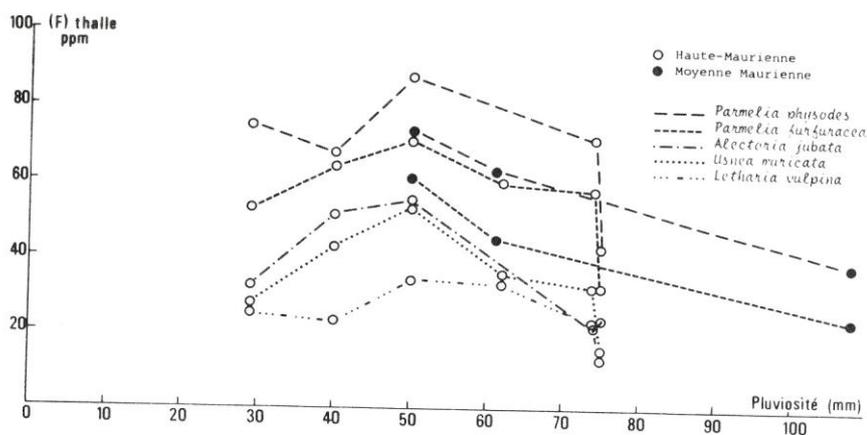


Fig. 11. Relation entre la concentration en fluor dans les thalles de lichens corticoles et la pluviosité moyenne des deux mois précédant le prélèvement au cours des années 1975 à 1977.

montre qu'il n'y a aucune relation entre la pluviosité et la concentration en fluor des lichens. Le test du logarithme du rapport de vraisemblance donne:

$$G = 0.029 < \chi_{0.05(1)}^2 = 3.841 \quad (p = 0.86)$$

résultat non significatif.

Les variations saisonnières de la teneur en fluor chez les lichens corticoles s'expliqueraient donc par les fortes pluviosités au cours de l'hiver et les faibles précipitations d'été. La chute de l'accumulation du fluor dans les lichens corticoles en Haute-Maurienne durant l'automne 1977 résulterait de la conjugaison, d'une part de la quasi disparition de la pollution en Haute-Maurienne, et d'autre part d'un été particulièrement arrosé.

Il n'est peut-être pas abusif d'admettre que dans les conditions naturelles, les lichens corticoles sont, comme les végétaux supérieurs, capables de fournir une bonne indication intégrée à la fois du niveau de pollution atmosphérique et de la pluviosité.

Au contraire des lichens corticoles, l'accumulation du fluor dans les lichens terricoles n'est pas influencée par la pluviosité comme nous l'avons démontré plus haut et ne présente pas de variations saisonnières (Figs 7 à 10).

Du fait de leur localisation au ras du sol, ces lichens bénéficieraient d'un microclimat dû à l'action protectrice de la végétation environnante ou à celles de la neige et du sol. Dans cette région montagneuse, en effet, l'enneigement très long protège sans doute les lichens terricoles de la pollution atmosphérique durant la saison hivernale. De même, par son humidité importante, le sol, toujours en contact étroit avec les lichens terricoles, doit jouer un rôle de régulation non négligeable, créant un véritable effet 'tampon' du point de vue hydrique qui régulariserait la fixation du fluor dans ces lichens, indépendamment des variations climatiques.

*Accumulation du fluor dans les thalles de lichen et rôle du support*

Nous pouvons tout de suite constater que les teneurs en fluor des écorces, le plus souvent comprises entre 25 et 100 ppm, sont du même ordre de grandeur que les teneurs en fluor des lichens (Tableau 7). Il ne semble d'ailleurs pas exister de relation entre les teneurs en fluor des lichens et du support correspondant et on peut admettre que, dans cette étude, le fluor contenu dans les épiphytes provient uniquement du fluor atmosphérique.

Par contre, les teneurs en fluor du sol apparaissant toujours élevées (Tableaux 8 et 9), nous nous sommes demandé si, dans le cas des lichens terricoles observés, le fluor édaphique ne pouvait pas intervenir dans l'accumulation du fluor chez les lichens. De plus, même si elles varient beaucoup dans la nature d'un site à l'autre, ces teneurs

TABLEAU 7  
TENEURS EN FLUOR (ppm) DES LICHENS (L) ET DE L'ÉCORCE (Ec) DE MÊLÈZE DANS LES STATIONS DE HAUTE-MAURIENNE

	Juin 1975		Septembre 1975		Juin 1976		Septembre 1976		Juillet 1977		Septembre 1977	
	L	Ec	L	Ec	L	Ec	L	Ec	L	Ec	L	Ec
Planey de Bramans:												
<i>Parmelia furfuracea</i> EDF	—	—	51	102	35	54	51	74	54	85	25	18
<i>Letharia vulpina</i> EDF	—	—	26	30	26	68	38	65	25	36	22	23
<i>Letharia vulpina</i> BV <sub>2</sub>	33	25	21	52	26	27	30	47	22	26	4	28
Termignon BV <sub>6</sub> :												
<i>Parmelia furfuracea</i>	60	98	78	77	71	77	92	77	63	89	40	26
<i>Parmelia physodes</i>	—	—	68	106	75	60	88	96	72	75	43	51
<i>Usnea muricata</i>	52	129	59	91	47	85	68	78	42	46	24	35
Bessans Averole BV <sub>9</sub> :												
<i>Usnea muricata</i>	21	81	28	62	9	30	38	58	22	58	7	77
<i>Alectoria jubata</i>	—	—	51	62	32	30	55	51	22	67	24	60

TABLEAU 8  
TENEURS EN FLUOR (ppm) DES LICHENS (L) ET DU SOL (S) DANS LES STATIONS DE MOYENNE-MAURIENNE

	Octobre 1975		Avril 1976		Octobre 1976		Avril 1977		Octobre 1977	
	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S
<i>Cladonia</i> gr. <i>pyxidata</i> :										
Saint-Etienne de Cuines Parking	157	319	44	199	13	149	9	123	28	341
Saint-Etienne de Cuines TV	146	260	87	431	19	457	9	195	32	309
Montricher station de ski	—	—	115	404	43	494	26	366	64	402
Col Saint-André	—	—	65	520	45	420	28	295	31	101
<i>Peltigera canina</i> :										
Saint-Etienne de Cuines Parking	—	—	41	97	72	391	29	189	37	125
Montricher bas	156	493	155	424	52	537	113	573	87	373
Montricher haut	97	317	169	382	89	360	44	193	56	213
Montricher station de ski	66	183	68	190	108	618	77	183	épuisé	

TABLEAU 9  
TENEURS EN FLUOR (ppm) DES LICHENS (L) ET DU SOL (S) DANS LES STATIONS DE HAUTE-MAURIENNE

	Juin 1975		Septembre 1975		Juin 1976		Septembre 1976		Juillet 1977		Septembre 1977	
	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S
<i>Cladonia</i> gr. <i>pyxidata</i> :												
Planey de Bramans BV <sub>3</sub>	116	220	57	143	32	125	21	212	26	136	8	184
Planey de Bramans BV <sub>1</sub>	72	207	54	139	28	143	15	66	26	237	15	129
Planey de Bramans BV <sub>2</sub>	62	188	41	101	25	160	22	250	19	172	9	158
Termignon BV <sub>6</sub>	121	539	36	475	43	309	37	419	15	329	9	155
Bessans Villaron BV <sub>4</sub>	57	176	42	242	23	136	20	267	23	161	16	198
<i>Peltigera canina</i> :												
Bessans Villaron BV <sub>4</sub>	—	—	26	240	22	88	29	163	34	210	16	80
<i>Peltigera aphthosa</i> :												
Planey de Bramans BV <sub>2</sub>	42	67	58	139	30	72	30	262	35	141	12	79

en fluor du sol apparaissent en moyenne plus élevées dans les stations proches de la source de pollution que dans les stations éloignées, ce qui indiquerait une contamination fluorée directe du sol. Il ne serait aussi pas impossible que la fabrication d'acides lichéniques permette l'assimilation du fluor du sol par les lichens.

Notons qu'en Moyenne-Maurienne, le niveau de pollution atmosphérique est trop élevé pour qu'un effet du fluor du sol soit détectable au niveau des lichens. Par contre, une étude en Haute-Maurienne, où la pollution en 1976 et 1977 a pratiquement disparu, peut nous permettre de vérifier cette hypothèse. Or, l'observation de l'évolution de la teneur en fluor des lichens dans les différentes stations de Haute-Maurienne (Tableau 9) montre une baisse régulière jusqu'à un niveau de base constant, quelle que soit la teneur en fluor du sol. Ceci semble donc démontrer l'absence, ou tout au moins la très faible influence de la teneur en fluor du sol sur celle des lichens terricoles.

Ce fait serait d'ailleurs tout à fait en concordance avec ce qui se passe chez les plantes supérieures: les travaux de Garber *et al.* (1967), ainsi que ceux de De Cormis (1968) ont montré qu'il n'y a pas de relation entre la teneur en fluor total du sol et la composition des plantes en cet élément. Seule une étude physiologique pourrait confirmer le même phénomène chez les lichens.

Comme les lichens terricoles, les lichens saxicoles ont un contact étroit avec le support, mais, ainsi que l'écorce, la roche est généralement peu riche en fluor (la teneur en fluor d'un thalle de *Xanthoria elegans* (Link.) Th. Fr. était de 98 ppm, celle de la roche correspondante de 89 ppm). Nous n'avons pas suffisamment de résultats pour en tirer des conclusions indiscutables, mais il nous semble qu'en ce qui concerne leurs réactions à une pollution fluorée, les lichens saxicoles pourraient présenter un cas intermédiaire entre lichens corticoles et lichens terricoles. L'étude sur l'accumulation du fluor dans ces lichens et sur leur comportement en milieu pollué mériterait d'être approfondie.

## CONCLUSION

Cette étude, effectuée dans une vallée de montagne soumise à une pollution fluorée et où les conditions écologiques sont très variables, a montré que la mesure de la teneur en fluor dans différents lichens permet de dégager un certain nombre de conclusions sur le comportement de ces végétaux.

Chez les lichens corticoles soumis à une même pollution, l'accumulation du fluor apparaît plus élevée chez les Parméliacées que chez les Usnéacées. Chez les lichens terricoles, les *Peltigera* accumulent davantage de fluor que les *Cladonia* mais les variations de l'accumulation du polluant apparaissent plus accentuées chez les *Cladonia*. Les différences de réactions entre espèces lichéniques sont sans doute en relation avec la forme du thalle mais aussi avec la structure anatomique et le comportement physiologique des lichens.

Nous confirmons que l'accumulation du fluor chez les lichens corticoles et terricoles est proportionnelle au niveau de pollution de l'air et reflète bien les variations de ce niveau dans l'espace et dans le temps. En effet, les concentrations de fluor trouvées dans les lichens diminuent régulièrement quand on s'éloigne des sources de pollution ou lorsque les émissions fluorées diminuent.

Nous mettons en évidence que, vis-à-vis d'une pollution atmosphérique fluorée, les réactions de la végétation lichénique corticole et terricole sont tout à fait comparables à celles de la végétation phanérogamique et répercutent fidèlement et rapidement les variations du niveau de pollution de l'air. A la suite de la diminution du taux de fluor dans l'air, apparaît un déséquilibre entre la végétation lichénique et l'atmosphère environnante, et si un nouvel état d'équilibre s'instaure rapidement, cela indique que la concentration en fluor dans les lichens diminue, soit par augmentation de la biomasse, soit par lessivage du fluor au cours des précipitations.

Cependant, dans le détail, on constate une différence dans les réactions entre lichens corticoles et lichens terricoles. En effet, les lichens corticoles reflètent parfaitement les variations saisonnières du niveau de pollution de l'air et ressemblent, en ce sens, tout à fait à la végétation phanérogamique, tandis que les lichens terricoles semblent subir davantage l'influence d'autres facteurs écologiques qui estompent les variations saisonnières (couvert végétal, neige, humidité du sol, etc.). Dans les deux cas, l'humidité de l'air, mais aussi la lumière, la température, le vent, en agissant sur l'évapotranspiration, interviennent probablement sur la teneur en fluor des lichens mais dans des conditions difficiles à cerner sur le terrain.

Parallèlement, cette étude a montré que dans des régions non-polluées il existe chez les lichens étudiés une teneur naturelle en fluor, qui oscille en moyenne entre 12 et 25 ppm. Or, dans les régions polluées, quand le niveau de pollution diminue, on constate que la teneur en fluor des lichens tend vers ces valeurs de base. Il est donc possible que la plus grande partie du fluor atmosphérique accumulé dans les lichens se présente sous une forme pouvant être facilement éliminée sous l'action de différents facteurs (pluie, humidité du substrat, etc.).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Monsieur B. Lachet, pour l'aide amicale qu'il nous a apportée dans l'étude statistique de ce travail.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARKMAN, J. J. (1969). The influence of air pollution on bryophytes and lichens. In *Air pollution, Proceedings of the First European Congress on the Influence of Air Pollution on Plants and Animals*, 197-209. Wageningen, Pudoc.
- BARTOLI, CH. (1966). Etudes écologiques sur les associations forestières de la Haute-Maurienne. *Annls. Sci. For.*, **23**, p. 321.
- BÖRTITZ, S. & RANFT, H. (1972). Zur SO<sub>2</sub> und HF Empfindlichkeit von Flechten und Moosen. *Biol. Zbl.*, **91**, 613-23.
- COMEAU, G. & LEBLANC, F. (1972). Influence du fluor sur le *Funaria hygrometrica* et l'*Hypogymnia physodes*. *Can. J. Bot.*, **50**, 847-56.
- DE CORMIS, L. (1968). Absorption des fluorures en solution et migration du fluor chez la tomate. *Annls. Physiol. vég.*, Paris, **10**, 155-69.
- DE CORMIS, L. (1975-1977). *Rapports d'activité annuels*. Station d'Etude de la Pollution atmosphérique d'Avignon-Montfavet (INRA).
- DE SLOOVER, J. (1964). Végétaux épiphytes et pollution de l'air. *Revue Quest. scient.*, **25**, 531-61.
- DE WIT, T. (1976). Epiphytic lichens and air pollution in the Netherlands. *Bthca Lichen*, **5**, 1-227.
- GARBER, I. K., GUPERIAN, R. & STRATMANN, H. (1967). Untersuchungen über die Aufnahme von fluor aus dem Boden durch Pflanzen. *Qualitas Plantarum*, **3**, 223-6.
- GARREC, J. P. (1976). *Contribution à l'étude écologique et physiologique des effets d'une pollution atmosphérique par le fluor sur la végétation*. Thèse Dr. es-Sciences, Université de Grenoble.
- GARREC, J. P. & PLEBIN, R. (1975). Répercussion au niveau de la végétation d'une vallée alpine de la diminution d'une pollution atmosphérique par le fluor. Dans *Nuisances et environnement. Journées Intern. de l'Antipollution*, 29 sept.-30 oct. 1975, Grenoble, 97-100.
- GARREC, J. P., PLEBIN, R. & BOSSAVY, J. (1976). Comportement du sapin (*Abies alba* Mill.) durant plusieurs cycles de végétation dans le cas d'une pollution fluorée. *Rev. for. fr.*, **28**(2), 95-105.
- GILBERT, O. L. (1971). The effect of airborne fluorides on lichens. *Lichenologist*, **5**, 26-32.
- GILBERT, O. L. (1973). The effect of airborne fluorides. In *Air pollution and lichens*, ed. by B. W. Ferrey, M. S. Baddeley & D. L. Hawksworth, 176-91. London, Athlone.
- HAWKSWORTH, D. L. & ROSE, F. (1970). Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature, Lond.*, **227**, 145-8.
- HOLUB, Z. & KONTRISOVA, O. (1974). Phytoindikation der Luftverunreinigung durch Fluorimmissionen. *Biologia, Bratisl.*, **28**, 827-36.
- HORNTVEDT, R. (1976a). Response of transplanted epiphytic lichens to fluoride air pollution. In *Forest Pathology Field Guide Excursion*, IUFRO Congress, 16th, Norway, 1976, II(2), 20-5.
- HORNTVEDT, R. (1976b). *The response of epiphytic lichens to fluoride air pollution. Proceedings of the Kuopio meeting on plant damages caused by air pollution*, Kuopio, 1976, ed. by L. Kärenlampi, 93-4. Finland, Kuppion korkeakoulu and Kuopion Luonnon Ystävien Yhdistys.
- KALETA, M. (1973). Contribution to the determination of the degree of air pollution by means of lichens. *Acta geobiol.*, **2**(5), 9-20.
- LEBLANC, F., COMEAU, G. & RAO, D. N. (1971). Fluoride injury symptoms in epiphytic lichens and mosses. *Can. J. Bot.*, **49**, 1691-8.
- LEBLANC, F., RAO, D. N. & COMEAU, G. (1972). Indices of atmospheric purity and fluoride pollution pattern in Arvida, Quebec. *Can. J. Bot.*, **50**, 941-98.
- LEVAGGI, D. A., OYUNG, W. & FELDSTEIN, M. (1971). Microdetermination of fluoride in vegetation by oxygen bomb combustible and fluoride ion electrode analysis. *J. Air Pollut. Control Ass.*, **21**, 277-9.
- MARTIN, J. F. & JACQUARD, F. (1968). Influence des fumées d'usine sur la distribution des lichens dans la vallée de la Romanche (Isère). *Pollut. Atmos.*, avril-juin, 95-9.
- NASH III, T. H. (1971). Lichen sensitivity to hydrogen fluoride. *Bull. Torrey bot. Club*, **98**, 103-6.

- OZENDA, P. & CLAUZADE, G. (1970). *Les lichens. Etude biologique et flore illustrée*. Paris, Masson.
- PIŠŮT, I. & LISICKÁ-JELINKOVÁ, E. (1974). Epiphytische Flechten in der Umgebung einer Aluminiumhütte in der Mittelslowakei. *Biologia, Bratisl.*, **29**, 29–38.
- RANFT, H. & DÄSSLER, H. G. (1972). Zur Rauchempfindlichkeit von Flechten und Moosen und ihrer Verwendung als Testpflanzen. *Arch. Naturschutz & Landschaftsforsch.*, **12**, 189–202.
- SCHÖNBECK, H. (1969). Eine Methode zur Erfassung der biologischen Wirkung von Luftverunreinigungen durch transplantierte Flechten. *Staub-Reinhalt. Luft.*, **29**(17), 14–18.
- STEBING, L. (1977). The value of lichens as indicators of emission load. In *Vegetation science and environmental protection*, ed. by A. Miyawaki, R. Tüxen & S. Okuda, 235–46. Tokyo, Haruzen.
- STEBING, L., KIRSCHBAUM, U. & GWINNER, M. (1976). Nachweis von Fluorimmissionen durch Bioindikatoren. *Angew. Bot.*, **50**, 169–85.