

EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LA VEGETATION LICHENIQUE DES MONUMENTS HISTORIQUES

S. DERUELLE

Keywords: air pollution, fertilizers, France, lichens, limestone, monument, nitrogenous, vegetation.

Abstract: Air pollution has a direct influence on stone decay but also an indirect one by favouring lichen development. This is specially perceptible for nitrophilous lichens which proliferate on rain-exposed walls. Thus an historical monument, Notre-Dame de l'Epine's Basilica, was colonized by nitrophilous lichenic population between 1975 and 1980. These nitrophilous species with orange and yellow thallus are responsible for the disfigurement of the Basilica. The spread of nitrophilous lichenic populations is related to a recent increase in the use of fertilizers and, above all, to the recent methods of spraying fertilizers.

Introduction

Les monuments historiques sont souvent détériorés par les conditions de l'environnement. Les pierres utilisées par la construction subissent des dégradations liées aux conditions climatiques locales, à l'activité biologique due aux oiseaux, aux plantes, aux lichens et aux microorganismes, et à la pollution atmosphérique. Globalement il en résulte une altération appelée "maladie de la pierre" (stone illness). Mais si la pollution atmosphérique intervient directement sur la dégradation de la pierre, elle intervient aussi comme facteur écologique responsable de l'installation des lichens.

Habituellement, la pollution atmosphérique est considérée comme un facteur limitant à l'installation des lichens. Si cela est vrai pour les lichens épiphytes, des nuances sont à apporter en ce qui concerne la végétation lichénique des monuments. En effet, le calcaire qui est une pierre souvent utilisée pour la construction des monuments est colonisé par les lichens, même dans les villes où la végétation épiphyte est inexistante. Cela est dû aux conditions microclimatiques existant à l'interface du calcaire et de l'atmosphère. Il se crée localement une atmosphère riche en dioxyde de carbone, qui neutralise l'acidité atmosphérique et permet ainsi l'installation des lichens. A la longue, cependant les lichens disparaissent et seuls des peuplements de microorganismes survivent.

Par contre la pollution azotée a un effet beaucoup plus visible sur la végétation lichénique, en favorisant le développement de peuplements nitrophiles. Un exemple typique est celui de la basilique Notre-Dame de l'Épine. C'est cet exemple que nous développerons ci-après.

Problématique: l'enlaidissement de la basilique Notre-Dame de l'Épine (France)

La basilique Notre-Dame de l'Épine est située dans un petit village de Champagne crayeuse, à 8 km à l'E-NE de Châlons-sur-Marne. Construite en calcaire oolithique compact, au sommet d'une petite colline (altitude 151 m), elle présente la particularité de n'être séparée des champs que par une rangée de maisons et de se trouver ainsi presque en rase campagne.

Cet édifice, construit entre 1400 et 1527, est classé monument historique et son entretien est suivi par le Laboratoire des Monuments Historiques de Champs-sur-Marne. Le Laboratoire des Monuments Historiques est notamment chargé de l'étude des aspects microbiologiques de l'altération des pierres.

Vers 1970, sont apparus, notamment sur la façade W, des peuplements lichéniques orangés et verdâtres qui nuisent à l'esthétique de la basilique. Entre 1975 et 1980, l'extension considérable de ces peuplements a amené le Laboratoire des Monuments Historiques à nous contacter, et nous avons entrepris une étude écologique de ces peuplements lichéniques.

Le problème était de déterminer la cause du développement récent des lichenes sur la façade W et de proposer éventuellement un remède au problème d'esthétique.

Dans un premier temps, nous avons effectué une étude approfondie de la végétation lichénique de la basilique (Deruelle et al., 1979) et nous avons mis en évidence la double influence des substances azotées et du mouillage du substrat par les eaux de pluie sur l'installation des peuplements lichéniques nitrophiles. Ce phénomène très important et déjà souligné dans le S-E de la France par Clauzade et Roux (1975), nous a conduit, dans un deuxième temps, à entreprendre une étude des facteurs microclimatiques des principaux biotopes de la basilique et des conditions des écoulements d'eau sur les murs (Deruelle, 1983).

Methods d'étude

Analyse de la végétation lichénique

L'analyse de la végétation lichénique a été effectuée à partir de 30 relevés phytosociologiques réalisés en utilisant les méthodes de Klement (1955) et de Braun-Blanquet (1964). Chaque relevé concerne une surface supérieure à l'aire minimale et floristiquement aussi homogène que possible. Les divers relevés d'un même peuplement ont été réunis en un tableau (voir ci-après) où les espèces rencontrées sont classées, selon leurs affinités phytosociologiques ou écologiques. Pour chaque espèce, un paramètre synthétique classique, le degré de présence, a été précisé sous forme d'un chiffre romain. Signalons ici, que pour ne pas endommager

la basilique, les prélèvements d'échantillons ont été très réduits. Toutefois, les peuplements étudiés étant constitués exclusivement par des lichens épilithiques bien visibles et de détermination relativement aisée, il est vraisemblable qu'un nombre relativement peu important d'espèces ait échappé aux relevés.

Etudes microclimatiques

Les facteurs microclimatiques ont été étudiés par plus de 4000 mesures ponctuelles effectuées pendant un an, et par des enregistrements continus.

Les mesures ponctuelles concernent la luminosité, la température du substrat, la température de surface des thalles, la température de l'air à proximité des thalles et l'humidité relative. Elles ont été réalisées selon les méthodes de mesures décrites par Roux (1979) dans son étude sur les peuplements lichéniques saxicoles calcicoles du SE de la France.

Les enregistrements du mouillage du substrat ont été effectués avec un ténographe. C'est un appareil (Fig. 1) qui comprend quatre capteurs de mouillage, un circuit électronique de détection du mouillage avec un oscillateur et un détecteur de seuil par capteur, et un enregistreur sur papier. Le principe de l'appareil (Roux, 1979-80) repose sur le fait que la mouillage de deux lames voisines du capteur entraîne la mise sous tension du détecteur de seuil et l'enregistrement de la durée du mouillage. Les capteurs installés au milieu des peuplements lichéniques traduisent fidèlement les variations de l'humidité substratique.

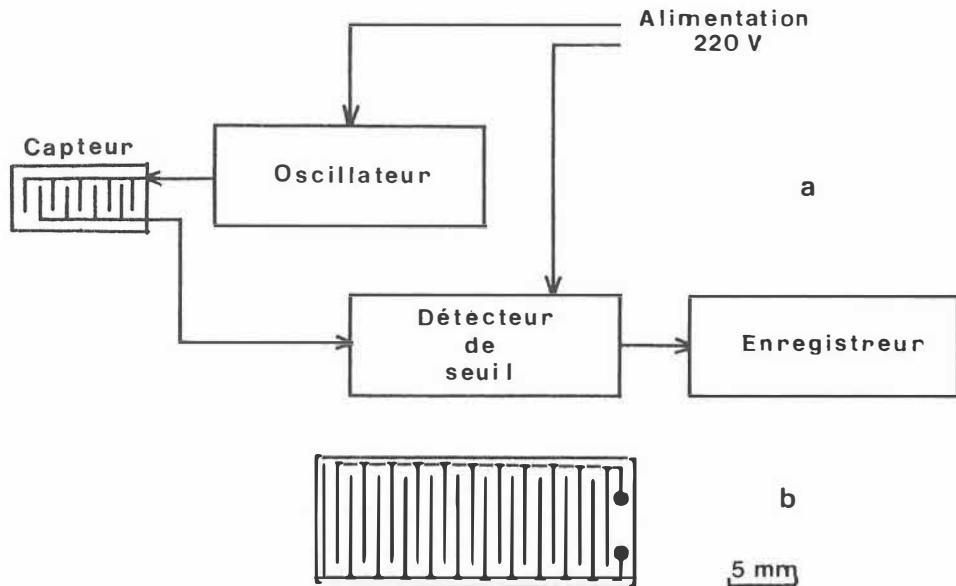


Fig. 1 - Schéma des principaux éléments du ténographe (a) et détail d'un capteur de mouillage vu de dessus (b). (d'après Roux 1979-80).

Resultats et discussion

Inventaire des peuplements lichéniques

Cinq peuplements lichéniques dont un avec trois faciès différents ont été déterminés sur la basilique. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après (Fig. 2).

L'examen des peuplements lichéniques de la basilique Notre-Dame de l'Épine nous amène à faire les constatations suivantes:

- le *Dirinetum repandae stenhammarosum* Clauzade et Roux 1975 (colonne g) est une association non nitrophile qui colonise les stations mal éclairées et protégées des écoulements des eaux de pluie par des corniches plus ou moins larges. Même s'ils altèrent la pierre sur plusieurs mm, les thalles blanc-gris du *Dirina* ne se distinguent pas du calcaire et ne sont pas responsables de la détérioration de l'esthétique de la basilique.

Les peuplements de l'alliance *Aspicilion calcareae* Roux 1978 (colonne f) colonisent de faibles surfaces sur des zones légèrement inclinées (30°) et mouillées par les eaux de pluie. Ces peuplements contenant 56% d'espèces nitrophiles ont été qualifiés de peuplements hémi-nitrophiles.

- Ils sont localisés surtout à l'E et sont protégés des vents dominants d'W par la basilique elle-même, et des vents du S et d'E par des habitations situées à quelques mètres seulement de cette face E.

- les peuplements fortement nitrophiles (colonnes a à e) colonisent principalement la façade W de la basilique. Il s'agit:

- de l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* Nowak 1960 (colonne a) avec 100% d'espèces nitrophiles. Le faciès typique de cette association se développe sur les surfaces inclinées des corniches, des gargouilles ou de la base des piliers. On la rencontre aussi sur la façade W, de part et d'autre de la rosace centrale. C'est cette association riche en lichens dont la couleur varie du verdâtre à l'orangé vif, qui est responsable pour l'essentiel des traînées jaune-verdâtre qui se sont récemment développées sur la basilique.

- des faciès à *Phaeophyscia orbicularis* (colonne b) et à *Xanthoria candelaria* (colonne c) de la même association. Ils se développent exclusivement sur les parois verticales vraisemblablement moins mouillées par les écoulements d'eau. La faciès à *Xanthoria candelaria* est quant à lui localisé sur la façade W de la basilique, et à sa proximité immédiate.

- de l'association *Caloplacetum citrinae* Beschel 1950 ex Klement 1955 (colonne d) formant des traînées jaune-citron sur les pierres modérément mouillées par les eaux de pluie. Les thalles du *Caloplaca citrina* attirent l'oeil par leur couleur jaune vif mais leur faible développement et leur localisation réduite sur quelques pierres du chevet les rendent dans l'ensemble, moins apparents que les peuplements à *Candelariella medians* et *Xanthoria candelaria*.

- de peuplements à *Caloplaca murorum* f. *regularis* et f. *obliterata* (colonne e) qui occupent des biotopes protégés par des piliers ou par de petites corniches. Ces

| Espèces | Degré de présence | | | | | | |
|---|-------------------|-----|----|-----|-----|----|---|
| | a | b | c | d | e | f | g |
| Espèces nitrophiles | | | | | | | |
| <i>Candellariella medians</i> | V | V | IV | III | . | V | . |
| <i>Caloplaca decipiens</i> | V | IV | V | . | IV | . | . |
| <i>Lecanora albescens f. monstrosula</i> | V | II | V | . | . | . | . |
| <i>Phaeophyscia orbicularis</i> | IV | V | V | . | . | . | . |
| <i>Xanthoria candelaria</i> | IV | IV | V | . | V | . | . |
| <i>Physconia grisea</i> | . | IV | II | . | . | . | . |
| <i>Caloplaca citrina</i> | II | . | . | V | IV | V | . |
| <i>Lecanora urbana</i> | II | . | . | . | V | . | . |
| <i>Caloplaca murorum f. obliterated</i> | . | . | . | . | V | . | . |
| <i>Caloplaca murorum f. tegularis</i> | . | . | . | . | V | . | . |
| <i>Caloplaca rudorum</i> | II | . | . | III | IV | . | . |
| <i>Lecanora crenulata</i> | . | . | II | III | V | . | . |
| <i>Verrucaria macrostoma</i> | III | III | II | II | . | V | . |
| <i>Caloplaca teicholyta</i> | III | V | II | V | . | V | . |
| <i>Lecanora albescens f. albescens</i> | V | II | . | V | . | V | . |
| <i>Caloplaca murorum f. pulvinata</i> | V | II | II | . | II | . | . |
| <i>Buellia epipolia v. murorum</i> | III | . | II | III | IV | . | . |
| <i>Caloplaca heppiana</i> | V | V | II | V | . | V | . |
| <i>Caloplaca aurantia</i> | V | . | II | . | . | . | . |
| <i>Physcia adscendens</i> | . | IV | II | . | . | . | . |
| <i>Caloplaca coronata</i> | III | II | . | . | . | V | . |
| <i>Lecanora hagenii</i> | III | . | . | . | . | . | . |
| <i>Lecania erysibe</i> | . | II | . | III | . | . | . |
| <i>Xanthoria parietina ssp. calcicola</i> | . | . | IV | . | . | . | . |
| <i>Lecanora dispersa</i> | . | . | . | III | . | V | . |
| <i>Lecanora dispersa f. crenulata</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| Espèces non nitrophiles | | | | | | | |
| <i>Lecanora campestris</i> | . | . | I | III | . | . | . |
| <i>Verrucaria sp</i> | . | . | I | . | . | . | . |
| <i>Physconia pulverulenta</i> | . | II | . | . | . | V | . |
| <i>Lecanora subcircinata</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| <i>Aspicilia hoffmannii</i> | . | . | . | . | . | I | . |
| <i>Dermatocarpon trachytichum</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| <i>Aspicilia contorta</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| <i>Caloplaca lactea</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| <i>Verrucaria nigrescens</i> | . | . | . | . | . | V | . |
| <i>Dirina repanda f. stenhammari</i> | . | . | . | . | . | . | V |
| Espèces nitrophiles en % | 100 | 93 | 88 | 92 | 100 | 56 | 0 |

Fig. 2 - Composition floristique des cinq peuplements lichéniques de la basilique et de leurs principaux faciès.

a) faciès typique de l'association à *Candellariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* Nowak 1960;

b) faciès de cette même association à *Phaeophyscia orbicularis* dominant;

c) faciès de cette même association à *Xanthoria candelaria* dominant;

d) *Caloplacatum citrinae* Beschel 1950 ex Klement 1955;

e) peuplement à *Caloplaca murorum f. tegularis* et *f. obliterated*;

f) peuplement de l'alliance *Aspicilion calcareae* Roux 1975.

groupements rencontrés quelle que soit l'exposition du substrat sont légèrement mouillés par les eaux de pluie qui apportent suffisamment de nitrates pour permettre le développement d'espèces nitrophiles. Lorsque les écoulements sont plus importants, soit naturellement à cause de la configuration des sculptures, soit artificiellement par rupture partielle d'une corniche par exemple, on observe des peuplements de transition avec l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* Nowak 1960.

L'inventaire des peuplements lichéniques de la basilique Notre-Dame de l'Épine nous amène à constater:

1°) la présence de peuplements calcicoles déjà décrits par ailleurs mais avec des faciès nouveaux;

2°) l'abondance des peuplements nitrophiles;

3°) la liaison entre l'enlaidissement de la façade W et la nitrophilie des associations qui s'y développent.

Exigences microclimatiques des associations

Parmi les différentes associations étudiées sur la basilique Notre-Dame de l'Épine, l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* est la plus héliophile, la plus photophile et la plus thermophile. Le *Dirinetum repandae stenhammarosum* est au contraire l'association la moins héliophile, la moins photophile et la moins thermophile, et ceci quelle que soit l'ambiance climatique du moment. Les autres peuplements présentent des caractères intermédiaires.

L'écart thermique entre l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* d'une part et le *Dirinetum repandae stenhammarosum* d'autre part est de 2°C par temps clair et de 1°C par temps couvert. Même si la température est un facteur essentiel de la répartition des lichens, cette différence de température est ici trop faible pour expliquer la colonisation des différents biotopes de la basilique. Il en est de même pour la luminosité. Par contre un facteur semble essentiel, c'est la durée de mouillage du substrat.

Le temps de mouillage a été mesuré en continu pour quatre stations entre le mois de mars 1980 et le mois de mars 1981 (Fig. 3). L'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* est la plus mouillée pour l'ensemble de l'année. Cette importance de mouillage se retrouve chaque mois puisque pour chacun des 13 mois étudiés la durée du mouillage est la plus élevée. Le peuplement à *Caloplaca murorum* f. *obliterata* et f. *tegularis* présente le temps de mouillage le plus faible avec surtout un mouillage pendant la période hivernale d'octobre à avril. L'existence de vents dominants du N et du NE pendant l'hiver peut expliquer cette répartition hivernale du mouillage. L'association *Dirinetum repandae stenhammarosum* est également peu mouillée avec un maximum en décembre (40% du mouillage annuel). En ce qui concerne cette association on peut préciser que le thalle du *Dirina* est hydrofuge et que les gouttelettes d'eau roulent en surface sans le mouiller véritablement. Il n'en est cependant pas de même pour le capteur où les gouttelettes adhèrent en surface et déclenchent l'enregistrement. En-

fin, le faciès à *Xanthoria candalaria* de l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* a un mouillage intermédiaire (644 h pour l'année) entre les deux associations vues précédemment (255 h et 350 h) et la faciès typique (1107 h).

Il ressort de cette étude que l'association à *Candelariella medians* et *Phaeophyscia nigricans* (faciès typique) qui possède le temps de mouillage le plus long, est en outre l'association la plus nitrophile. Le mouillage du faciès à *Xanthoria candalaria* plus faible est cependant suffisant pour permettre l'installation de lichens nitrophiles (88% d'espèces nitrophiles). A côté de cela le *Dirinetum repandae stenhammarosum* qui n'est pas véritablement mouillé par les eaux de pluie, n'est pas nitrophile.

Origine des apports azotes

Les observations phytosociologiques et les mesures du temps de mouillage du substrat, effectuées sur la basilique Notre-Dame de l'Epine indiquent que les peuplements nitrophiles occupent préférentiellement les surfaces mouillées par les écoulements d'eau. Or, les écoulements d'eau existent depuis la construction de la basilique, y compris sur la façade W dont l'enlaidissement ne remonte qu'à une

| Mois | Durée de mouillage en mm | | | |
|------------------------|--|--|---|--------------------------------------|
| | <i>Dirinetum repandae stenhammarosum</i> | Peuplement à <i>C. murorum</i> f. <i>obliterata</i> et f. <i>tegaris</i> | Association à <i>Candelariella medians</i> et <i>Phaeophyscia nigricans</i> | |
| | | | Faciès typique | Faciès à <i>Xanthoria candalaria</i> |
| 1980 | | | | |
| mars ¹ | 362 | 914 | 4641 | 1806 |
| avril | 128 | 592 | 4313 | 431 |
| mai | 154 | 47 | 3256 | 1021 |
| juin | 294 | 8 | 318 | 54 |
| juillet | 1988 | 22 | 8865 | 3449 |
| août | 170 | 0 | 2344 | 437 |
| septembre ¹ | 121 | 5 | 1528 | 343 |
| octobre | 843 | 879 | 6881 | 2375 |
| novembre | 1499 | 2584 | 5807 | 3400 |
| décembre | 8210 | 5660 | 10430 | 7400 |
| 1981 | | | | |
| janvier | 2954 | 2200 | 5860 | 6777 |
| février | 1913 | 1604 | 6352 | 4462 |
| mars | 2386 | 770 | 5822 | 6661 |
| TOTAL en heures | 350 h | 255 h | 1107 h | 644 h |

Fig. 3 - Durée de mouillage des quatre peuplements retenus.

(1) enregistrement effectué pendant 10 jours (début des mesures le 22/3/80);

(2) appareil n'ayant fonctionné que pendant 3 jours (absence d'alimentation électrique).

quinzaine d'années.

Le développement rapide de l'association nitrophile à *Candelariella mediana* et *Phaeophyscia nigricans* traduit indiscutablement un apport de substances azotées qui n'existait pas autrefois. C'est cette pollution azotée qui est responsable de l'enlaidissement de la façade W de la basilique.

L'existence de nombreux pigeons nichant partout sur la basilique constitue un apport non négligeable d'azote. Mais la localisation des fientes, limitée à quelques zones bien déterminées et la présence de pigeons signalée depuis très longtemps, ne peuvent justifier l'ampleur de l'expansion récente des lichens nitrophiles. Une autre source de substances azotées est constituée par les engrais employés à dose massive dans cette région de grande culture. Or, depuis une quinzaine d'années, les engrais azotés sont utilisés en Champagne sous forme liquide (nitrates) ou sous forme gazeuse (ammoniac). Les engrais liquides sont stockés dans de grandes curves entreposées dans les champs avant d'être pulvérisés. Ainsi, en moyenne 300 à 400 litres d'engrais liquides sont épandus par hectare de culture, la quantité pulvérisée variant avec la nature de la culture.

Cette technique récente d'épandage des engrais par pulvérisation est donc une source importante de pollution azotée. Sous l'action des vents dominants, des vésicules de nitrates et des particules de sol enrichies en azote nitrique ou ammoniacal sont plaquées sur la façade W de la basilique. Les pluies qui frappent directement la façade solubilisent les substances azotées et favorisent l'installation puis le développement des lichens nitrophiles. Des observations identiques ont été faites en Grande-Bretagne (Brightman et Seaward, 1977) où les mêmes espèces nitrophiles colonisent les murs des églises.

C'est donc la pollution azotée qui est responsable du développement des peuplements lichéniques nitrophiles et de l'enlaidissement récent de la basilique Notre-Dame de l'Épine. On peut attribuer cette pollution aux modalités d'épandage des engrais par pulvérisation sous forme liquide et gazeuse.

Conclusion

Nous avons envisagé ici un cas précis où la pollution atmosphérique était responsable du développement de peuplements lichéniques sur un monument historique. C'est surtout sous cette forme de pollution azotée plutôt développée en milieu rural qu'en milieu urbain, que la pollution atmosphérique agit sur les lichens des monuments. Le développement des lichens nitrophiles très colorés est responsable de l'enlaidissement de la pierre.

Le ravalement de la basilique Notre-Dame de l'Épine a été entrepris depuis notre étude, et des traitements divers de la pierre ont été tentés. A l'heure actuelle, seule la façade W a été rénovée mais la présence de lichens sur les piliers des autres faces de la basilique et l'utilisation intensive des engrais risque d'entraîner l'installation de nouveaux lichens. Des observations régulières devraient permettre de suivre précisément une recolonisation de la façade W par les lichens.

Bibliographie

- Braun-Blanquet J., 1964. *Pflanzensoziologie Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer. Vienne et New-York. 864 p.
- Brigthman F.H. et M.R.D. Seaward, 1977. *Lichens of man-made substrates*. In Seaward M.R.D. (ed.): *Lichen Ecology*. 253-293. Academic Press London.
- Clauzade G. et C. Roux, 1975. *Etude écologique et phytosociologique de la végétation lichénique des roches calcaires non altérées dans les régions méditerranéenne et sub-méditerranéenne du Sud-Est de la France*. Bull. Hist. Nat. Marseille, 35: 153-208.
- Déruelle S., 1983. *Ecologie des lichens du Bassin Parisien. Impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO₂, Pb) et relations avec les facteurs climatiques*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VI, 300 + 220 p.
- Déruelle S., Lallement R. et C. Roux, 1979. *La végétation lichénique de la basilique Notre Dame de l'Epine (Marne)*. Documents Phytosociologiques. N.S. 4: 217-234 e.
- Klement O., 1955. *Prodromus der mitteleuropäischen Flechtengesellschaften*. Feddes Repertorium. Beih. 135: 5-194.
- Roux C., 1979. *Etude écologique et phytosociologique des peuplements lichéniques saxicoles-calciocoles du Sud-Est de la France*. Thèse Doctorat d'Etat. Paris. 534 p.
- Roux C., 1979-1980. *Etude de la durée de mouillage du substrat dans cinq peuplements lichéniques saxicoles-calciocoles de Provence*. Bull. Soc. Linnéenne Provence. 32: 65-97.

Dr. S. DERUELLE
Laboratoire de Cryptogamie
Université Pierre et Marie Curie
F 75230 PARIS CEDEX 05