

# Les lichens indicateurs de la pollution

## La pollution atmosphérique

Les lichens sont des organismes très adaptés à l'étude de la pollution atmosphérique gazeuse ou particulaire car ils présentent diverses caractéristiques anatomiques et physiologiques particulières : absence de cuticule, de stomates et de vaisseaux conducteurs, présence d'un cortex riche en mucilages, reviviscence, activité photosynthétique toute l'année et croissance lente. Ne possédant pas de moyens de défense vis-à-vis de l'environnement, les lichens deviennent de véritables « éponges » toute l'année et tout au long de leur vie. L'alimentation par l'eau de pluie et l'absorption de l'air se font par le thalle entier, les mucilages des parois absorbent l'eau, les poussières sont piégées entre les filaments mycéliens et les acides lichéniques fixent les polluants. Ces particularités font des lichens de véritables « sentinelles » des modifications environnementales dues aux activités humaines.

Wilhelm Nylander, lichénologue finlandais (1822-1899), au cours de son séjour à Paris dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, fut le premier à émettre l'idée que les lichens pouvaient être considérés comme des « **hygiomètres** » de la qualité de l'air et fournir des informations sur la pollution atmosphérique. A la différence d'un capteur physico-chimique qui traduit la teneur du polluant pour lequel il a été conçu, un lichen prend tout en compte et sert de témoin de la pollution atmosphérique.

Différentes stratégies ont été mises en œuvre : 1/ à partir de l'observation de la flore lichénique sur les troncs d'arbres, on peut établir le niveau de qualité de l'air ambiant (**lichens bioindicateurs**) ; 2/ certaines espèces peuvent accumuler différents polluants et sont utilisés comme capteurs (**lichens bioaccumulateurs**) ; 3/ l'atteinte des fonctions physiologiques peut être mise en évidence (**lichens biomarqueurs**).

## **Bioindication**

### **De l'estimation de la pollution atmosphérique par le dioxyde de soufre à l'établissement d'un indice de qualité environnementale**

En 1866, Nylander recensa une trentaine d'espèces de lichens dans le Jardin du Luxembourg à Paris et constata leur disparition totale en 1896 (Nylander, 1866, 1896). Seuls subsistaient des algues vertes du genre *Desmococcus*. Cette disparition s'est avérée résulter de l'effet du **dioxyde de soufre** (SO<sub>2</sub>), polluant émis par l'utilisation du charbon dans le chauffage remplaçant le bois avec l'évolution industrielle.

A partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, la raréfaction des lichens n'a fait qu'augmenter au cours des années, dans les villes et à proximité des sites industriels, marquée par la disparition des espèces de lichens sensibles comme les Usnées. Seules persistaient les espèces dites **poléotolérantes**.

Différentes méthodes d'estimation de la pollution atmosphérique ont été mises au point selon deux approches : qualitatives (mise au point d'échelles de correspondances lichens-pollution/qualité de l'air) et quantitatives (calcul d'un indice de qualité de l'air).

### **Méthodes qualitatives :**

Les premières méthodes étaient basées sur l'observation des lichens sur le terrain (estimation du nombre d'espèces et pourcentage de recouvrement sur les troncs d'arbres). Ont été mises au point ensuite des échelles de correspondance entre les espèces lichéniques et la teneur en SO<sub>2</sub>. La plus utilisée est celle d'**Hawksworth et Rose** créée en Angleterre en 1970. Dans cette méthode, environ 80 espèces sont

classées en 11 niveaux de pollution allant de 0 à 10, le niveau 0 correspondant au niveau de pollution maximale ( $> 170\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et le niveau 10 au niveau de pureté maximale. Cette méthode a été très utilisée sur l'ensemble du territoire français dans de nombreux travaux entre les années 70 et 80 durant lesquelles le  $\text{SO}_2$  était véritablement le traceur de la pollution atmosphérique.

A la fin des années 80, la quantité de dioxyde de soufre atmosphérique a nettement diminué, les lichens ont commencé à faire leur réapparition sur les arbres du Jardin du Luxembourg, (Letrouit *et al.*, 1992) puis dans d'autres villes de France (Fig. 24 et 25).

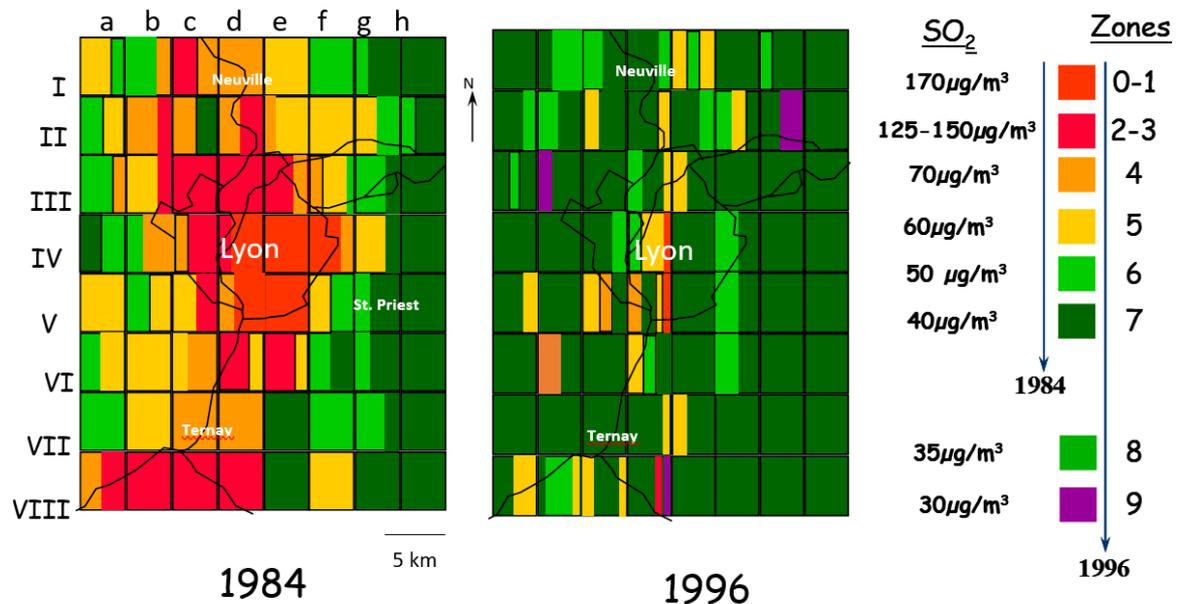


Fig. 24 : Détection de la pollution atmosphérique dans la région lyonnaise à partir de l'observation des lichens selon la méthode d'Hawksworth et Rose (1970.) Estimation des teneurs de  $\text{SO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Entre 1984 et 1996, les lichens ont recolonisé le territoire étudié, par suite de la réduction du  $\text{SO}_2$  atmosphérique. (Source : Thèse Khalil 2000-DR).

Cependant, parallèlement à la diminution du  $\text{SO}_2$ , d'autres polluants atmosphériques ont augmenté : les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) liés au trafic automobile, les composés ammoniacaux en milieu rural liés aux activités agricoles, les composés organiques.

La méthode d'Hawksworth et Rose ne pouvait donc plus être utilisée, et c'est à cette époque que prend naissance une nouvelle approche basée, non plus sur les espèces lichéniques prises indépendamment les unes des autres, mais sur l'observation des communautés d'espèces. Cela a permis d'établir une **échelle d'éco-diagnostic**, où les lichens apparaissent non plus indicateurs d'un seul polluant mais indicateurs de la qualité de l'air (Van Haluwyn et Lerond, 1988). Dans cette méthode, une trentaine d'espèces sont réparties en 7 zones partant de la zone A (qualité de l'air très médiocre) à la zone G (zone de très bonne qualité de l'air). Cette procédure a été appliquée dans la moitié nord de la France (Van Haluwyn, 1992), dans la région lyonnaise (Khalil et Asta, 1998), etc.

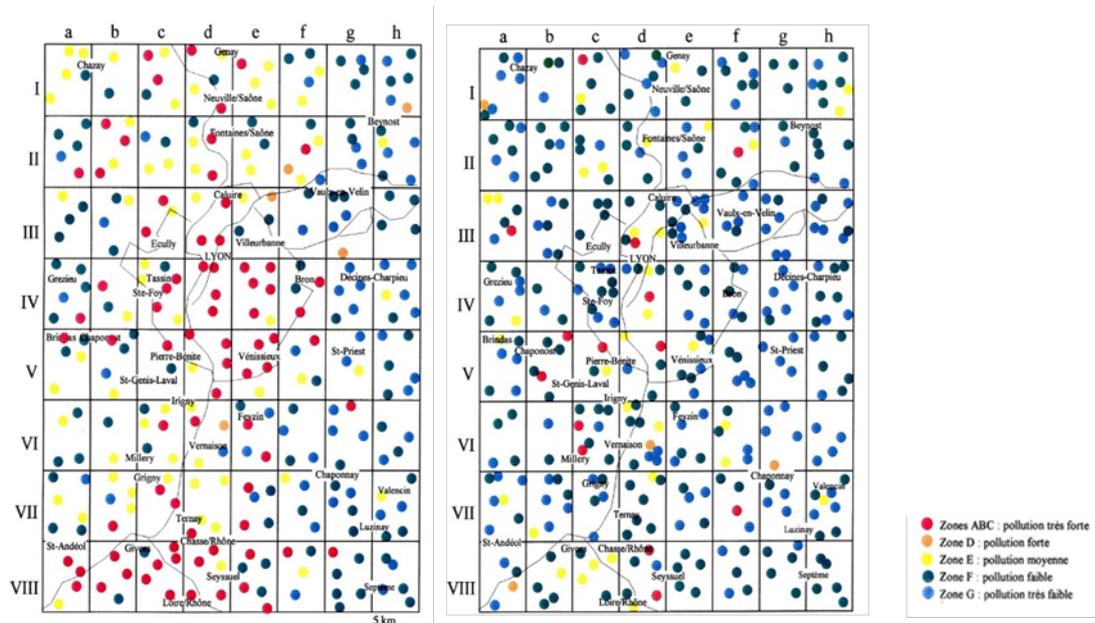


Fig. 25 : Cartographie de la qualité de l'air de la région lyonnaise (1984 et 1996) selon la méthode de Van Haluwyn et Lerond (1988) (Source : Thèse Khalil 2000-DR).

### Méthodes quantitatives :

Ces méthodes sont basées sur le calcul d'un indice de pollution établi à partir d'une formule mathématique qui fait intervenir différents paramètres relatifs à la flore lichénique corticale. La plus connue est la **méthode de l'I.P.A. (indice de pureté atmosphérique)** de Leblanc et de Sloover (1970). Cette approche a été utilisée fréquemment en France, entre autres, dans la région parisienne (Déruelle, 1983), lyonnaise (Khalil et Asta, 1998), grenobloise (Gombert *et al.*, 2004, 2005).

Par la suite, on est passé à **l'étude de la diversité lichénique** comme indicateur de la qualité environnementale. En 2000, 11 scientifiques européens se sont réunis pour élaborer un protocole unique, défini sur une stratégie d'échantillonnage conforme aux règles statistiques et évitant toute subjectivité de l'observateur (Asta *et al.*, 2002). Depuis, une norme AFNOR a été mise au point d'abord à l'échelle de la France (Norme NF X43-903, 2008), puis à l'échelle européenne (Norme européenne EN 16413, 2014). Cette nouvelle méthodologie est basée sur un **Indice Biologique de Lichens Epiphytes (IBLE)** calculé à partir de l'appréciation de la présence/absence, de la fréquence et du recouvrement des espèces (Agnello *et al.*, 2014) (Fig. 26).

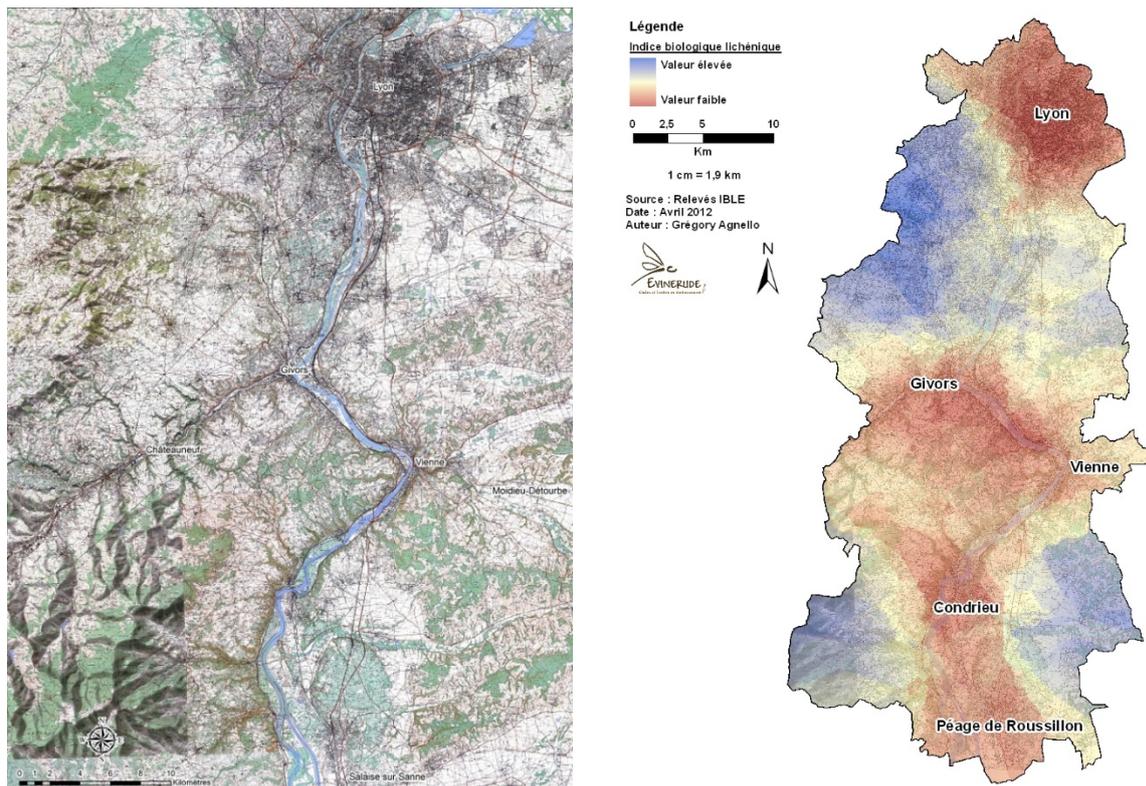


Fig. 26 : À gauche : carte de la vallée du Rhône ; à droite : application de la méthode IBLE : Indice Biologique de Lichens Epiphytes dans la région lyonnaise (d'après Norme NF X43-903, 2008). Les valeurs de l'IBLE reflètent la qualité de l'air : les valeurs faibles (orange à rouge) correspondent à une qualité de l'air basse à médiocre, les valeurs fortes (bleu) à une qualité de l'air moyenne à très bonne. On constate que la plus grande partie de la population se situe dans les secteurs où l'IBLE est le plus faible. (Carte Open Street Map. « Open source »).

### Pollution azotée

Cette pollution favorise le développement des espèces neutrophiles, héminitrophiles et nitrophiles aux dépens des espèces acidophiles. Une des premières études a été réalisée sur la basilique de Notre-Dame de l'Epine (Marne) dont les parois se sont recouvertes progressivement de nombreuses espèces lichéniques nitrophiles, à la suite d'un changement de pratiques culturelles dans le proche environnement (Déruelle *et al.*, 1979).

La pollution azotée due au dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) du trafic automobile a été étudiée en région grenobloise et une échelle de 3 classes de sensibilité des lichens a été établie (Gombert *et al.*, 2003, 2006). Cette échelle est basée sur la caractérisation des espèces lichéniques en fonction de leurs paramètres écologiques, des teneurs estivales de  $\text{NO}_2$  et des caractéristiques environnementales de la région. La présence de lichens nitrophiles sur écorces de résineux a permis de dresser des cartes de pollution azotée d'axes routiers dans le Briançonnais (Fig. 27).

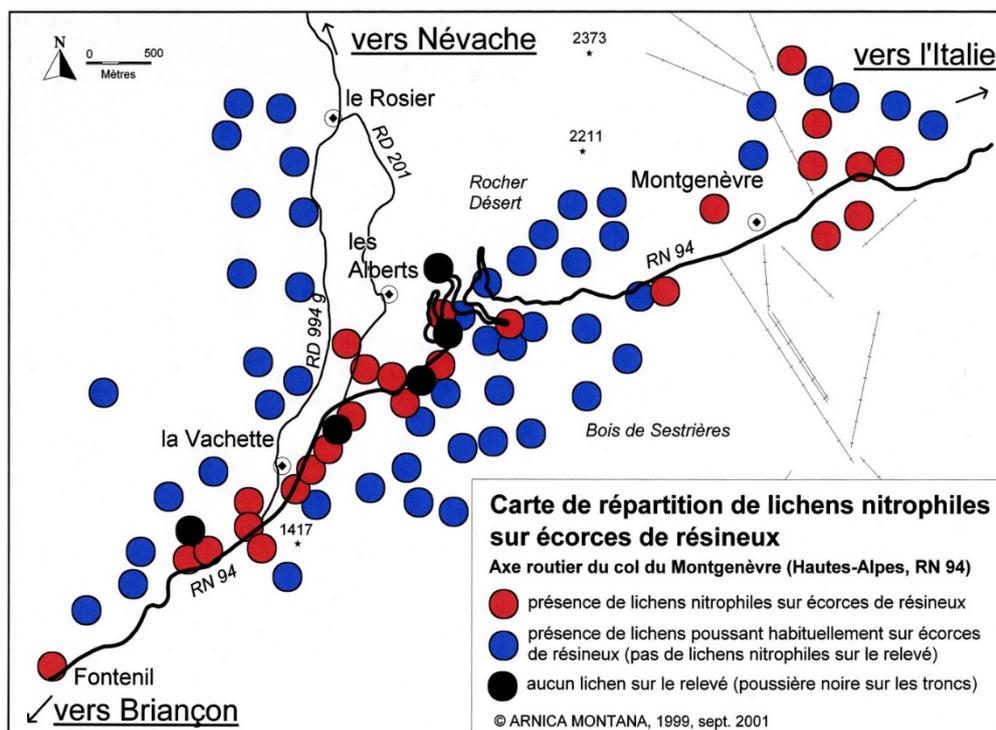


Fig. 27 : Carte de répartition de lichens nitrophiles sur écorces de résineux de part et d'autre de la route Nationale 94 entre Briançon et Montgenèvre (M. Gracia/ARNICA MONTANA, 1999)

Un inventaire des lichens sur écorces de résineux a été réalisé de part et d'autre de la Route Nationale 94, entre Briançon et Montgenèvre (Gracia, 1999 ; Remy *et al.*, 2003). La présence de lichens nitrophiles (pastilles rouges sur la carte) sur les écorces de résineux est localisée à proximité de la voie de circulation. Dès que l'on s'éloigne de la route, les lichens nitrophiles sont de moins en moins présents et l'on retrouve une végétation lichénique acidophile (pastilles bleues sur la carte) habituelle de ce type d'écorce.

Aucun lichen n'a été noté (pastilles noires sur la carte) dans les secteurs où la pollution semble être la plus importante (écorce recouverte de particules fines et noires). Dans la vallée de la Guisane au nord-ouest de Briançon, entre Le Monétier-les-Bains et le col du Lautaret, le même travail effectué de part et d'autre de la route RD 109 (Jouglard, 2001) a montré la même corrélation entre la présence de lichens nitrophiles sur écorces de résineux et la circulation routière.

### Pollution par l'ozone

Une méthodologie identique a été réalisée pour l'ozone pour lequel a été établie une échelle de sensibilité de 4 classes en région grenobloise (Gombert *et al.*, 2006).

### Bioaccumulation et biomarquage

On recherche chez les lichens la teneur en polluants accumulés (**lichens bioaccumulateurs**) ou les effets physiologiques ou cellulaires (**lichens biomarqueurs**).

L'accumulation du **fluor** émis par les usines d'aluminium des vallées alpines a été particulièrement recherchée chez les lichens dans les années 1970-90. Les travaux

ont permis la mise en évidence de la répartition du fluor dans l'espace (cartographies) et dans le temps (Asta et Garrec, 1980 ; Belandria et Asta, 1987 ; Belandria *et al.*, 1991) (Fig. 28).

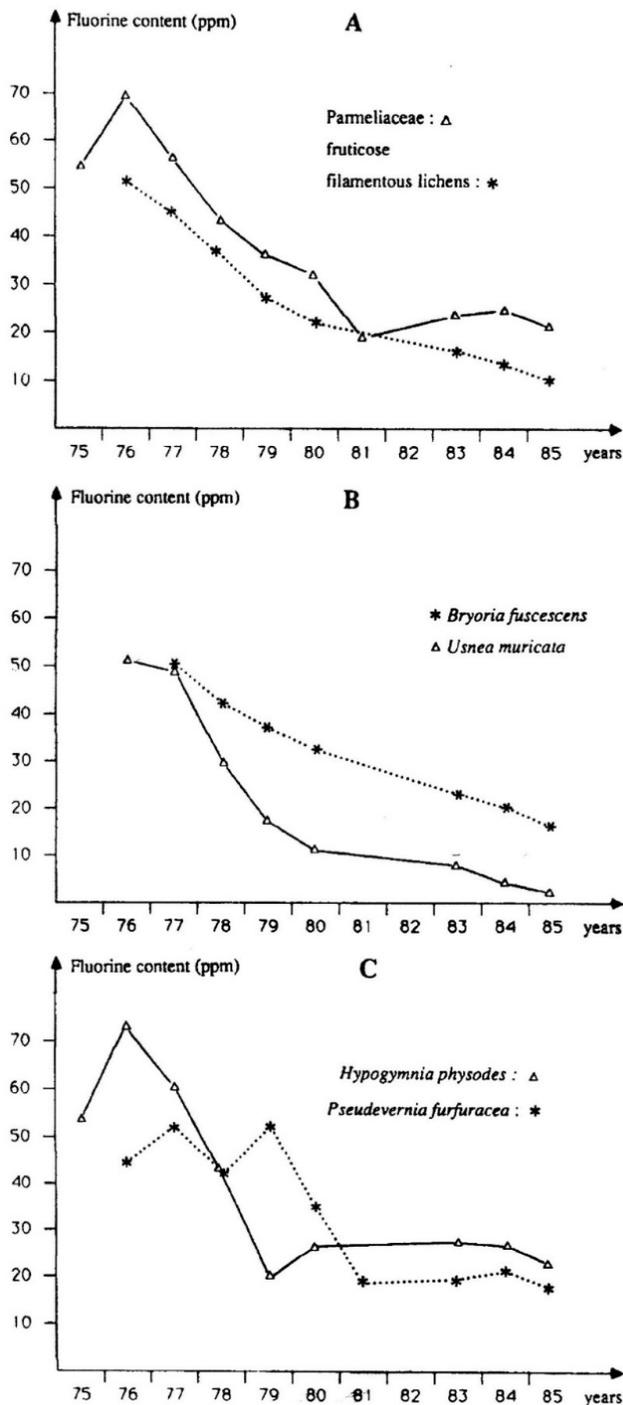


Fig. 28 : Diminution de la concentration en fluor de divers lichens corticoles mesurée dans la vallée de la Maurienne (Savoie) entre 1975 et 1985 (d'après Belandria *et al.*, 1991)

De même, les lichens permettent de suivre l'accumulation **d'éléments traces métalliques** (Fig. 29). La détection de la pollution due au trafic routier par le **plomb** été très étudiée en région parisienne (Déruelle, 1992), dans le nord de la France (Cuny

et al., 2001) ou par d'autres métaux dans les Pyrénées (Veschambre et al., 2003), les Alpes ou dans d'autres régions du monde.



Fig. 29 : Récolte de *Cladonia stellaris* contaminé par du fer atmosphérique issue d'une exploitation minière (Québec, Canada). (Source : photos © GA)

Les rejets des activités industrielles, comme les **usines d'incinération** ont été bien observés dans le département de l'Isère (Gombert et Asta, 1997, 1998, Agnello, 2017, 2018) ainsi que sur le littoral Dunkerquois (Cuny et al., 2004).

Les dépôts de **mercure** atmosphérique émanant d'une usine de chlore-alcali ont été mesurés dans du *Xanthoria parietina*. Les résultats ont bien montré que les concentrations en mercure diminuaient à mesure que l'on s'éloignait de l'usine avec un rayon de contamination de 2 km (Grangeon et al., 2012) (Fig. 30).

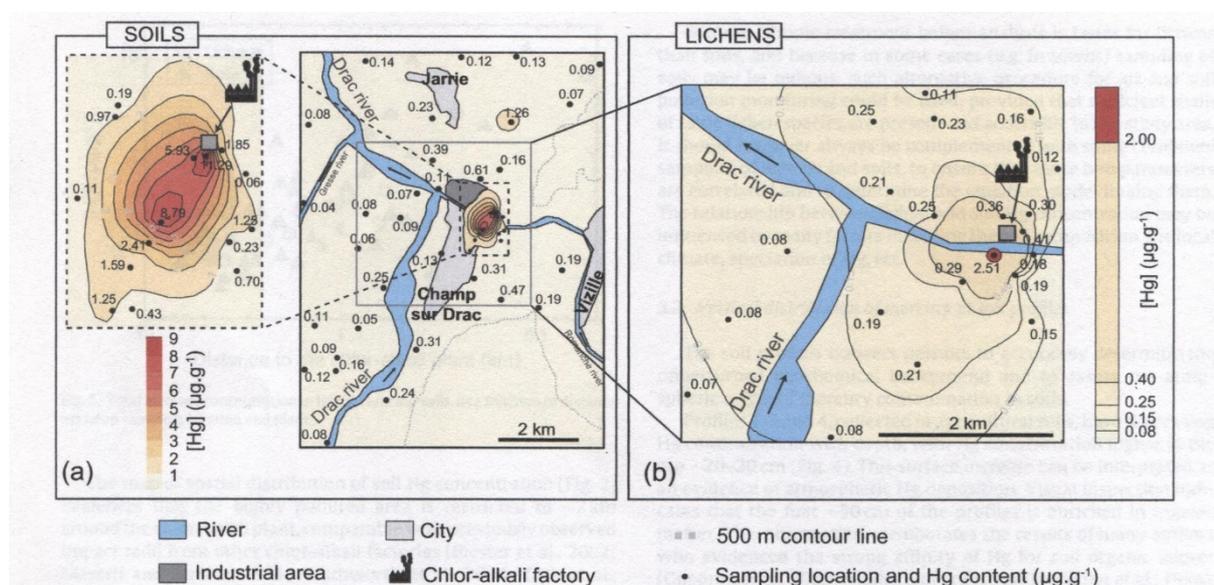


Fig. 30 : Concentrations en mercure (Hg) dans les sols et les lichens de l'usine de Chlore-Alcali de Jarrie (Isère) (d'après Grangeon et al., 2012).

Actuellement, les lichens fournissent des renseignements précieux sur les **composés organiques** (PCB, dioxines, hydrocarbures, etc.) en présentant un facteur de concentration très élevé par rapport aux concentrations présentes dans l'atmosphère.

Les lichens sont bien connus pour leur capacité à accumuler les **éléments radioactifs**. Les premiers travaux ont été conduits dans les années 1950-1970, durant lesquelles ont eu lieu les essais nucléaires surtout dans l'ex URSS. C'est à la même époque qu'ont été analysées les retombées de radioéléments dans l'atmosphère (surtout <sup>90</sup>Sr et <sup>137</sup>Sr) (Papastefanou *et al.*, 1989).

Après l'accident de Tchernobyl de 1986, des troupeaux de rennes ont été contaminés par suite de l'ingestion de lichens contenant des éléments radioactifs<sup>1</sup>. Afin d'éviter que la population humaine qui consommait la viande de renne ne se contamine à son tour, des troupeaux entiers ont dû être abattus.

Par leur effet « mémoire » des activités humaines, on peut aussi utiliser avec succès des **échantillons d'herbier** pour analyser divers polluants organiques ou inorganiques, des éléments radioactifs, etc.

Dans les régions où les lichens sont rares ou absents, la **technique de transplantation** peut être appliquée efficacement, surtout dans le cas des lichens corticoles. En effet, elle peut être mise en œuvre pour un suivi de la pollution atmosphérique, par exemple dans des sites de décharges d'ordures ménagères.

Une norme AFNOR a également été mise au point pour l'utilisation des lichens bioaccumulateurs (Norme NF X 43-904, 2013).

## **Autres types de pollution**

### **Pollution marine**

En mer, divers polluants comme les hydrocarbures et les tensioactifs anioniques se répandent en formant une fine pellicule de quelques micromètres à la surface de la mer. Sur les côtes, les polluants peuvent atteindre les lichens maritimes qui présentent des dommages divers (Lallemant et Van Haluwyn, 1981). Les lichens peuvent être utilisés comme bioindicateurs et bioaccumulateurs de la pollution par les aérosols marins sur le littoral méditerranéen (Roux et Sigoillot, 1987).

### **Pollution des eaux douces**

Les lichens sont utilisés comme bioaccumulateurs des éléments métalliques (*Dermatocarpon luridum*) (Chatenet, 2001, Monnet *et al.*, 2005). Un « biosenseur » plus maniable que ceux utilisés à partir de bactéries a été mis au point pour détecter la présence de benzène en milieu aquatique afin de mettre en évidence des rejets industriels ou accidentels dans l'environnement (Antonelli *et al.*, 2005). Des travaux récents sont conduits sur l'utilisation des lichens et des mousses aquatiques pour la détection des polluants organiques persistants (HAP, dioxines, furanes) dans l'eau (Augusto *et al.*, 2013).

---

1 À la suite de la catastrophe de Tchernobyl, de nombreux travaux ont été réalisés pour suivre la pollution radioactive due à cette explosion. La France n'a pas été épargnée comme en attestent des analyses réalisées dix ans après en 1996 dans des échantillons de *Pseudevernia furfuracea* du Col de Porte (Chartreuse) montrant encore des teneurs non négligeables de césium 134 et 137 (J. Asta. com. pers.)

### **Pollution des sols**

Le plus souvent, les lichens sont utilisés comme bioaccumulateurs, mais certaines espèces servent d'indicateurs d'**éléments traces métalliques**. Ainsi *Diploschistes muscorum*, *Cladonia* et *Stereocaulon*, entre autres, tolèrent des teneurs élevées de métaux dans le sol. *Vezdaea leprosa* est une espèce particulièrement inféodée à la présence de **zinc** car elle se trouve souvent à proximité des glissières en zinc de sécurité routière.

En conclusion, on peut dire que les lichens constituent d'excellents modèles biologiques pour l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires. Des travaux conduits en Italie (Vénétie) ont montré une étroite corrélation entre la mortalité due au cancer du poumon chez des hommes de moins de 55 ans et l'indice de biodiversité lichénique (Cislaghi et Nimis, 1997). Plus récemment, à partir d'une étude menée sur le bassin industriel de Dunkerque, des chercheurs ont pu mettre en évidence une relation entre un Indice de Défavor Localisé (caractérisant la situation socio-économique de la population) et le niveau de contamination des lichens en éléments traces métalliques. Les résultats obtenus ont de cette manière démontré les inégalités environnementales et sociales de santé à l'échelle d'un territoire (Ocelli *et al.*, 2016).