

LICHENS ET ACCUMULATION DES METAUX LOURDS

Le point après 10 ans de suivi en Bourgogne... et ailleurs.

Olivier Daillant

Première publication in : *Bulletin de l'AFL (Association Française de Lichénologie)*, 2003.

Résumé :

Après un rappel des mécanismes d'intégration des éléments traces et des métaux lourds dans les lichens et des méthodes utilisées, des résultats d'analyses sont présentés pour l'argent (Ag), l'antimoine (Sb), l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), l'étain (Sn), le manganèse (Mn), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) le zinc (Zn) et le vanadium (V). ces résultats proviennent des campagnes de prélèvements et d'analyses menées en Bourgogne et dans deux autres sites entre 1993 et 2002. Une exploitation statistique est présentée en vue d'avoir des points de comparaison, les concentrations les plus fortes sont citées en fonction des activités qui en sont à l'origine. Enfin les temps de résidence des métaux lourds dans les lichens sont évoqués et des rapprochements avec d'autres compartiments de l'environnement et l'organisme humain sont tentés.

Mots clés :

Bio accumulation ; Elements traces ; Métaux lourds ; *Parmelia sulcata* ; *Xanthoria parietina*

INTRODUCTION

Les vertus bio-indicatrices des lichens sont souvent évoquées et pourtant ces vertus présentent de nombreuses facettes : il s'agit certes de la présence/absence de certaines espèces ou cortèges d'espèces, de réactions physiologiques face à certaines situations, mais aussi de leur capacité de stocker à long terme certains éléments, les éléments-traces et les métaux lourds en particulier. On parle alors plutôt de "bio-accumulation" ou de "bio monitoring".

En France, Deruelle (1984) a été le premier à approfondir la question en étudiant la présence de plomb dans les lichens en fonction de sources d'émission spécifiques, à l'époque particulièrement le transport routier et l'essence avec adjonction de plomb. D'autres éléments potentiellement problématiques pour l'environnement ou la santé publique ont été recherchés dans les lichens dans plusieurs pays voisins, comme les Pays Bas (Sloof et Wolterbeek, 1991) ou l'Italie (Nimis, 1989). Chez nous, ces éléments n'ont commencé à être recherchés chez les lichens, voire recherchés tout court, qu'il y a une dizaine d'années. Une des régions ayant fait l'objet du plus grand nombre de prélèvements et d'analyses est la Bourgogne, avec des relevés systématiques depuis 1992.

LES ELEMENTS RECHERCHES

Les **métaux lourds**, de masse volumique supérieure à 5 kg/dm³ font partie des éléments de transition dans la classification périodique des éléments. Ils possèdent des propriétés voisines et on les trouve souvent associés. Conventionnellement, les **éléments traces** sont les 68 éléments minéraux, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 % ; ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total (Baize, 1997). Parmi ces éléments, certains sont indispensables au déroulement des processus biologiques : ce sont les **oligo-éléments**. Baize (1997) cite le cuivre, le cobalt, le fer, le manganèse, le molybdène, le nickel, le zinc, l'arsenic, le chrome, le sélénium et le Vanadium pour le règne animal. La plupart sont toxiques dès que leur teneur excède un seuil donné. Bien que l'arsenic ne soit pas à proprement parler un métal lourd, il est pris en compte du fait de sa

toxicité. Enfin, certains éléments traités ici n'ont pas d'utilité biologique et sont uniquement des toxiques : le cadmium, le plomb, le mercure et l'étain. Le choix des éléments traces dont il est question ici a été dicté par le choix des sites et est traité ci-après, dans la section "répartition géographique..."

L'ACCUMULATION DANS LE THALLE DES LICHENS

Les métaux et autres éléments sont libérés dans l'atmosphère par des activités industrielles ou par la mise en circulation de particules du sol. Ils sont alors présents dans l'atmosphère sous différentes formes avant de se déposer sur les thalles des lichens puis d'y être incorporés, sous forme élémentaire ou associés à d'autres éléments pour former des molécules ayant plus ou moins d'affinités avec des tissus vivants (plus ou moins "bio-disponibles") ; la granulométrie des particules est très variable (il peut aussi y avoir une adsorption sur d'autres particules en suspension dans l'atmosphère) et à chacune de ces formes correspond un comportement particulier dans l'environnement.

Selon ce comportement, les éléments-traces se déposent plus ou moins rapidement sur les lichens, suivant différents processus. Knops et al. (1991) en distinguent cinq :

- Les dépôts humides : pluie et neige
- Les dépôts occultes : brouillard, rosée... ces dépôts ont normalement lieu dans une atmosphère stable.
- La sédimentation : dépôt sec de particules par gravité, selon la vitesse du vent.
- L'impaction : les aérosols (particules de faible granulométrie restant normalement en suspension dans l'atmosphère) sont interceptés par les thalles des lichens.
- L'incorporation directe des gaz : ce processus ne nous intéresse ici que dans la mesure où le mercure peut être incorporé de cette façon.

Les thalles de la plupart des lichens foliacés et fruticuleux ont une grande surface par rapport à la surface couverte ; les deux derniers processus peuvent donc être relativement plus importants que pour des surfaces lisses.

Une fois sur la surface du thalle, les éléments qui ne sont pas lessivés avec les prochaines précipitations sont incorporés. Brown et Brown (1991) ont énuméré les modes de fixation dans les tissus fongiques des lichens :

- La structure en réseau de nombreux lichens permet un piégeage des particules les plus grossières dans l'espace intercellulaire. A titre d'exemple, *Xanthoria parietina* a 20% d'espace libre.
- Les parois cellulaires ont des récepteurs anioniques leur permettant de fixer les métaux lorsqu'ils sont présents sous forme de cations.
- Une incorporation intracellulaire existe, régulée par des processus physiologiques complexes.

Dans leur travail, ces auteurs ont mis au point des méthodes d'extraction par étapes, permettant de déterminer la proportion des métaux présents sous forme particulaire, liés à des sites membranaires ou localisés à l'intérieur des cellules.

Garty (2001) dans son travail de revue de la bio-accumulation des métaux lourds dans les lichens, évoque ces processus plus en détail : concernant la fixation extracellulaire, les lichens, fonctionnant comme des échangeurs d'ions ou des chélateurs ont, à la surface du thalle, une charge négative nette. L'absorption de métaux serait rapide, réversible et dépendante du pH comme de la concentration du métal dans la solution. Ils absorbent les ions métalliques de l'eau de pluie et relarguent des ions H⁺ ou d'autres ions métalliques, ayant une capacité de fixation moindre. Il cite plusieurs études se penchant sur les sites extracellulaires de fixation de cations ; ainsi des groupes carboxyle sont impliqués dans la complexation du plomb dans les parois hyphales de *Xanthoria parietina*. La chitine, présente dans ces parois, est également évoquée comme fixateur de métaux.

Contrairement à l'absorption extracellulaire évoquée ci-dessus, l'absorption intracellulaire est un processus lent, avec une accumulation dans le temps. Garty (2001) cite plusieurs auteurs ayant étudié le cadmium : son incorporation intracellulaire suit le même chemin de transport que le magnésium. L'absorption de Cd

semble de plus stimulée par la lumière, ce qui fait penser à un lien entre métabolisme et incorporation du métal.

La concentration totale d'un élément dans un lichen n'est donc pas, à elle seule, suffisante pour quantifier de façon précise l'impact d'une source d'émission. Il en principe nécessaire de connaître la forme physique et chimique de cet élément lors de l'émission dans l'atmosphère d'une part et dans le lichen d'autre part, ce qui n'est pas toujours possible, souvent même illusoire. Il est alors envisageable d'adopter une autre approche : les écarts entre les concentrations de certains éléments dans les lichens prélevés à proximité de sites contaminés et les lichens provenant de sites témoins sont souvent tels qu'il est possible d'établir des corrélations sans trop de doutes... Le tableau 1 présente les écarts de concentrations d'éléments-traces dans les lichens en fonction de diverses activités industrielles.

Tableau 1 : Ordre de grandeur de la concentration en éléments-traces dans les lichens en relation avec les activités humaines.

Rapport Maxi/fond	Elements	Source connue expliquant la présence de ces éléments dans les lichens
10 - 100	Ag	Industrie photographique, développement de films
	As	Zones industrielles
	Cd	Recyclage de batteries, composants électriques
	Cu	Vignes
	Mn	Activités industrielles en général, combustion du charbon
	Sn	Soudures, composants électroniques
	Zn	Activités industrielles, transports
	V	Transport, produits pétroliers, fabrication de poêles
> 100	Co	Industries anciennes
	Cr	Aciers spéciaux
	Ni	Aciers spéciaux
	Pb	Recyclage de batteries, soudures de composants électroniques

Il est aussi possible d'observer jusqu'à quelle distance de la source les dépôts sont décelables. En présence de procédés comparables, il est permis d'établir des comparaisons entre sites, voire des comparaisons entre les concentrations dans les lichens et les problèmes de santé publique.

REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES SITES ETUDIES

La plus grande partie des lichens analysés proviennent des quatre départements de Bourgogne : Côte d'Or, Nièvre, Saône-et-Loire et Yonne, où les Services Santé Environnement des Directions Départementales de l'Action Sanitaire et Sociale (DDASS) ont commandé des études systématiques sur les lichens, dans les principales gglomérations industrielles en 1998 et dans les villes plus petites et les zones rurales en 1999. Lors de ces campagnes, 90 échantillons ont été analysés pour rechercher 10 éléments : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn).

Depuis 1993 cependant, certains de ces métaux lourds ont été recherchés systématiquement autour des centres industriels de Saône-et-Loire à l'initiative de la DDASS ou des Municipalités concernées. La ville

de Mâcon a fait procéder à des analyses sur les lichens en 1994, 1996, 1998 et 2000. La ville de Dijon (Côte d'Or) a commandé une étude lichens incluant l'analyse de métaux en 1996.

Selon l'environnement industriel, d'autres éléments ont été recherchés : l'argent (Ag), l'antimoine (Sb), l'étain (Sn) et le vanadium (V).

Dans certains cas de contaminations particulièrement fortes, des interventions ciblées ont eu lieu :

- A Seurre, en Côte d'Or, où une usine de composants électroniques a été à l'origine de relâchements massifs de métaux liés à la soudure (cuivre, étain et plomb) en 1998 ; le cas était problématique dans la mesure où le groupe scolaire situé à moins de 100 mètres a été contaminé. Ce site est actuellement fermé.

- A Bourg-Fidèle, dans les Ardennes, où une usine du groupe Métaleurop procède au recyclage des métaux non ferreux, les batteries en particulier. Elle a été à l'origine d'une forte contamination en plomb et en cadmium ayant occasionné quelques remous dans les médias. La contamination a cessé en 1999 après que l'administration ait imposé des limites de rejets plus sévères mais a recommencé au printemps 2001 lorsque les dispositifs n'ont plus fonctionné. Il semblerait que les émissions soient retournées à la normale depuis septembre 2001. Les dommages occasionnés font actuellement l'objet d'une procédure devant les tribunaux. Des lichens y ont été prélevés et analysés en 1999, 2001 et 2002.

- A Villefranche-sur-Saône (Rhône), où une usine (située sur la commune voisine d'Arnas) exerce le même genre d'activités qu'à Bourg-Fidèle et a occasionné le même genre de pollution (plomb en particulier), quoique à un niveau moindre semble-t-il. Deux échantillons de lichens y ont été prélevés et analysés en 2002.

LES ESPECES ETUDIEES

Lors des campagnes de prélèvements systématiques, les deux espèces retenues ont été *Parmelia sulcata* et *Xanthoria parietina*, dans la mesure où il était estimé que leur comportement en matière d'accumulation était suffisamment proche. Dans certains cas exceptionnels, d'autres espèces ont été prélevées, soit parce que les espèces pilotes n'étaient pas présentes (1 *Physcia tenella* et 1 *Physconia grisea* à Chalon-sur-Saône), soit pour compléter les relevés sur un site particulier ; ainsi *Parmelia acetabulum* et *Xanthoria polycarpa* ont-ils été prélevés à Seurre et *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes* et *X. polycarpa* à Bourg-Fidèle. Cette dernière espèce a également été prélevée dans plusieurs autres sites avec l'espoir d'avoir un reflet des contaminations plus récentes, dans la mesure où il s'agit d'une espèce pionnière dans les zones péri-urbaines. Ces espèces n'ont pas été incluses dans les traitements statistiques.

PRELEVEMENTS

Les lichens ont été prélevés sur des troncs verticaux d'arbres hors couvert forestier, à hauteur d'homme (entre 70 cm et 2 mètres). Dans la mesure du possible, les thalles (au moins une trentaine) ont été pris sur 3 à 6 arbres différents par station. Ils ont été décollés avec un couteau en plastique après avoir été imbibés d'eau déminéralisée. Cette procédure permet de les débarasser des débris d'écorce sur place. Ils ont été ensuite séchés à température ambiante sur un tamis de plastique dans un exsiccateur puis conditionnés dans des sachets à échantillons. A l'arrivée au laboratoire, ils ont été déshydratés à l'étuve à 80°.

ANALYSES

Les dosages ont été réalisés à la Cellule de Spectrométrie d'Absorption Atomique (CSAAB) de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Bourgogne (Dijon). Tous les éléments ont été analysés par spectrométrie d'absorption atomique. Les échantillons de lichens ont été minéralisés dans un appareil à micro-ondes (MLS - 1200 mega, Milestone, Italie). Après dilution dans de l'eau ultra pure, les concentrations en Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sn et V ont été mesurées avec un spectromètre d'absorption atomique thermique

Zeeman (SpectrAA-300, VARIAN, France). Les concentrations de manganèse et de zinc ont été déterminées en utilisant un spectromètre à absorption de flamme (deuterium correction GBC 203).

RESULTATS

Les résultats sur les deux espèces pilotes ont fait l'objet d'un traitement statistique. Le tableau 2 indique le fond naturel et les valeurs record des deux campagnes d'analyses en Bourgogne en 1998 et 1999. Si les concentrations trouvées sur l'un des sites ayant présenté des problèmes de santé publique sont différentes des records de Bourgogne, elles figurent également sur le tableau. Le fond naturel a été défini en calculant la moyenne des trois valeurs les plus faibles. Lorsque c'était possible, une répartition par percentiles a également été réalisée. Elle figure sur le tableau 3. Ces deux tableaux avaient déjà été présentés sous une forme légèrement différente au Workshop BIOMAP 2000 (Daillant et al. 2000). Les résultats sont exprimés en milligrammes par kilogramme sur la matière sèche.

Tableau 2 : Fond naturel et records dans *Parmelia sulcata* et *Xanthoria parietina*. Résultats exprimés en milligrammes par kilogramme sur la matière sèche.

	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sn	Zn	V
Fond	2,9	0,11	0,22	0,1	1,0	8,31	11,13	0,7	5,67	0,47	45	0,76
Maximum régional	101	8,2	3,39	103	255,8	183,2	507	689,6	515,4	9,6	725	20,1
2° record régional	19,6	7,81	3,34	60	254,4	95,5	304	416,6	194,8	8,3	389	19,4
Sites pollués avec problèmes santé	ma x		12,40						1158	12,0		
	min		1,20						232	3,8		
Maxi/fond	34,8	75	56	1030	255	22	46	985	206	26	16	26

Tableau 3 : Présentation de la répartition des résultats par percentiles ainsi que des records de Bourgogne et des concentration trouvées dans des sites spécifiquement pollués avec des problèmes de santé publique. Résultats exprimés en milligrammes par kilogramme sur la matière sèche.

	As	Cu	Mn	Pb	Sn	Zn	V
Fond	0,11	8,31	11,13	5,67	0,47	45	0,76
Percentile							
10%	0,22	8,9	14,5	9,2	0,47	54	1,05
25%	0,44	13,5	24,3	15,8	0,79	76	1,75
50%	0,90	21,6	43,1	28,8	1,39	111	3,10
75%	1,85	34,3	76,2	52,4	2,43	163	5,47
90%	3,55	52,2	127,5	89,9	4,04	230	9,14
95%	5,23	67,1	173,3	124,1	5,48	282	12,41
99%	10,83	107,4	308,6	227,2	9,68	414	22,05
Record régional	8,2	183,2	507	515,4	9,60	725	20,10
2ème record	7,81	95,5	304	194,8	8,32	389	19,80
Sites fortement contaminés avec problèmes de santé				1158	12,0	688	
max							
min				232	3,8	189	

Des résultats sont également présentés sur les tableaux 4 et 5 : le premier reprend les résultats d'analyses sur un site particulièrement contaminé, Bourg-Fidèle (Ardenne 08) lors de trois campagnes de prélèvements. Le deuxième fournit des maxima en fonction de sites consacrés à diverses activités industrielles ou agricoles. L'incinérateur de Cluny y figure également même si les résultats ne sont pas spectaculaires : la collecte sélective des déchets, lancée trois ans avant les analyses a permis de faire diminuer fortement les émissions de métaux. Cet incinérateur a fait parler de lui par la suite à cause de ses émissions excessives de dioxines, mais c'est une autre histoire...

Tableau 4 : Concentrations importantes ou caractéristiques dans les lichens en fonction de différentes activités. Le cas de l'incinérateur de Cluny (71) est également mentionné, même si les résultats ne sont pas spectaculaires : la collecte sélective des déchets a permis de faire diminuer fortement les émissions de métaux.

Lieu et année	Teneurs dans les lichens										Remarques
	Ag	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	
Fond naturel	2,9	0,2	0,1	1	8,3	<0,1	11	0,7	5,7	45	
Sidérurgie											
Imphy (58) - 1998				13 3	96			68 9			Aciers spéciaux
Le Creusot (71) - 1995				25 4		0,4	30 9		515	725	Industrie très ancienne
Incinération											
Dijon (21), 1997		0,9	98	20			25 0	18	186	183	
									15,5	34 à 222	2 ans après mise en place de la collecte sélective de déchets; petite unité
Industrie photographique											
Chalon sur Saône, 1993	10 1										1934 mg/kg d'Ag sur <i>Ph. adscendens</i> au pied de l'incinérateur de l'usine
Combustion charbon											
Montceau les Mines (71) 1994	1,6	10 3	20		0,17	21 9			105		Centrale thermique avant mise en place dispositif réduction des émissions
Recyclage métaux non ferreux											
Bourg-fidèle (08), 99-2002		12							115 8		Plombémies
Villefranche/Saône (69)02		2,9							195		Quelques plombémies
Composants électroniques											
Seurre (21), 1998					17 8				942	688	sur feuilles de tilleul: 520 Cu, 627 Pb et 2740 Zn Plombémies
Viticulture											
Beaune (21), 1998					16 3						
Pouilly/Loire (58), 1998					55						

Tableau 5 : Présentation des résultats d'analyses à Bourg-Fidèle (08) de 1999 à 2002.

Lieu	Espèce	Station	Cd			Pb		
			févr-99	avr-01	sept-02	févr-99	avr-01	sept-02
Témoin 15 km N de Bourg-Fidèle	<i>P. sulcata</i>		0,48			61		
Pylone 800 m SW	<i>P. sulcata</i>	couvert forêt	1,19			232,3		
Pylone 800 m SW	<i>H. physodes</i>	couvert forêt	4,25	3,38	0,72	428,1	553,7	44,7
Cimetière 800 m NE	<i>P. sulcata</i>	arbre isolé	5,15			795		
Cimetière 800 m NE	<i>H. physodes</i>	sur piquet	1,88	2,08	0,82	298,6		171,5
Cimetière 800 m NE	<i>E. prunastri</i>	arbre isolé	11,2	10,52	5,14	499,5	543	232,2
Eglise 500 m NE	<i>P. sulcata</i>	arbre planté	7,2	4,07	2,97	1158		431,5
Eglise; 500 m NE	<i>X. polycarpa</i>	arbre planté	6,4	3,06	2,93	805,8	242,8	139,9
rue du Bois 500 m N	<i>P. sulcata</i>	arbre de haie	12,4			661,4		
lisière bois 600 m SE	<i>P. sulcata</i>	10 m lisière	1,42			263,3		
		MOYENNE	5,16	4,62	2,52	520,3	446,5	204
		Ecart-type	4,19	3,37	1,83	333,7		144,1
		Médiane	4,7	3,38	2,93	463,8	543	171,5

DISCUSSION

La présentation du fond, des percentiles et des records permet des comparaisons si l'on recherche la présence de métaux lourds dans des nouveaux sites. Reste à savoir ce que l'on peut faire à partir de telles d'analyses. S'il est relativement aisé de dire d'une concentration dans un lichen que c'est "trop" (tout ce qui dépasse le fond est "trop"), il est plus difficile de dire si c'est "beaucoup". Peut-être convient-il à ce stade de s'interroger sur la raison d'être de la bio-indication lichénique (ici par bio-accumulation). L'utilisation des lichens présente d'abord deux avantages : elle permet tout d'abord de reconstituer l'historique d'activités industrielles ayant émis des métaux lourds dans l'environnement, donc de s'acquitter d'une sorte de "devoir de mémoire". C'est aussi et surtout l'un des rares domaines où une participation citoyenne à la surveillance de la qualité de l'environnement est possible, dans un domaine pourtant très technique. Ensuite, sa finalité est de permettre de protéger soit l'environnement, soit la santé humaine.

Sur ces deux derniers points, il est bon de pouvoir situer un niveau de contamination par rapport à d'autres, que ce soit par comparaison avec le fond ou en se positionnant par rapport à des moyennes ou des percentiles ; il est raisonnable de supposer que l'homme est plus exposé à un métal lorsque celui-ci est également présent de façon accrue dans le lichen, même si l'inverse n'est pas vrai (il y a des voies d'incorporation dans l'organisme qui ne passent pas par l'air : par exemple les peintures anciennes au plomb ou tout apport pouvant provenir de l'alimentation, comme les poissons et fruits de mer, les champignons...). Cela dit, lorsque les lichens présentent des concentrations anormalement élevées, il y a lieu de s'interroger. Cette interrogation devrait alors logiquement inciter les autorités chargées de la santé publique à faire des recherches plus approfondies.

Ce principe connaissant quelques exceptions, la lichénologie peut-elle permettre de franchir une étape de plus ? C'est possible en principe, si certaines conditions sont remplies. Le tableau 6 présente une tentative

dans ce sens pour le plomb (d'après Daillant et al 2003, conférence ICHMET, International Conference on Heavy Metals, Grenoble). Les usines de Bourg-Fidèle (08) et de Villefranche-sur-Saône (69) ont émis des métaux lourds et en particulier du plomb en exerçant des activités du même type. Ce plomb, issu essentiellement de la fusion de batteries, a du être émis sous la même forme. Le plomb rejeté par l'usine de Seurre, qui réalisait des soudures de composants électroniques n'avait sans doute pas une forme chimique différente. Dans les trois cas, des sols ont été contaminés à des niveaux variant entre 500 et 1000 milligrammes par kilogramme, parfois même plus (un sol est souvent considéré comme contaminé au-delà de 500 mg/kg). Dans les trois cas aussi il y a eu des cas de plombémies : on parle de plombémie au delà du seuil de 100 microgrammes de plomb par litre de sang, même si des symptômes n'apparaissent pas encore à ce niveau (encore que les effets sur les performances intellectuelles sont difficilement quantifiables...). Il y a même eu des cas isolés, à Bourg-Fidèle comme à Seurre, de concentrations de plomb dans le sang supérieures à 200 µg/l. Le tableau 6 détaille le nombre de cas recensés chez les enfants (sources : pour Bourg-Fidèle, Schmitt et al. 2002 ; pour Seurre, rapport DRIRE, consultable sur place à la DRIRE Bourgogne).

A la lecture du tableau 6, on constate qu'en se limitant aux deux espèces pilotes à Bourg-Fidèle et à Seurre, aucune concentration n'est inférieure à 200 mg/kg ; de plus, dans les deux cas on rencontre des valeurs atteignant 500 mg/kg. A Villefranche/Arnas, les valeurs sont un peu plus basses, mais cela s'explique par l'éloignement de l'usine des sites de prélèvement (respectivement 1700 mètres et un peu plus de 2000 mètres) alors que dans les cas précédents, les lichens avaient été prélevés dans un rayon de 500 m à Seurre et jusqu'à 1200 m à Bourg-Fidèle. La teneur en plomb de l'échantillon le moins éloigné de la source à Villefranche est néanmoins très proche de la barre des 200 mg/kg.

Tableau 6 : Rapprochements entre les teneurs en plomb des lichens et les problèmes de santé publique.

	Emissions atmosph. annuelles totales	Contamination maxi du sol (en mg/kg)	% d'échantillons de sang > 100 µg/l	Total enfants examinés	Concentration dans les lichens en mk/kg			
					min	max	moyenne	n échantillons
Bourg-Fidèle 1989 - 1995	140 kg							
Bourg-Fidèle 1999	70 kg	> 1000	22%	96	263	1.158	571,3	9
Bourg-Fidèle 2001	450 kg				243	543	446,5	3
Bourg-Fidèle 2002	< 40 kg		12%	97	232	431,5	203,9	5
Seurre 1999		> 1000	8%	297	44,7* 478	942	428,8	8
Villefranche 1999/2002		< 600	2,40%	626	38,4* 107,4	195,1	-	2

Au vu de ces éléments, on peut empiriquement constater les parallélismes suivants :

1. lorsque des lichens (*P. sulcata* ou *X. parietina*) présentent une concentration en plomb supérieure à 500 mg/kg, il y a toujours des problèmes de santé humaine.

2. Dans un rayon proche (inférieur à 1 km) d'une source industrielle rejettant du plomb, la concentration de ce métal dans les lichens n'est pas inférieure à 200 mg/kg.

Une telle approche est-elle envisageable pour d'autres métaux lourds ? Elle pourrait l'être à condition que soient connus certains paramètres, en particulier la forme physique et chimique d'un élément rejeté dans l'atmosphère, la nature régulière ou accidentelle du rejet et le temps de résidence de ce métal chez l'homme comme chez le lichen :

1. **La forme physique et chimique lors de l'émission** : elle peut être déterminée si les processus industriels en jeu sont connus ou si des informations sont fournies par des capteurs. Il est plus difficile de savoir si des modifications se produisent lors du transport dans l'atmosphère, pouvant donner lieu à des composés plus toxiques. Parfois la littérature spécialisée donne des indications à ce sujet.

2. **Contamination chronique ou ponctuelle** : les lichens permettent de se faire une idée, en particulier s'ils sont associés à d'autres bio-indicateurs : les deux espèces de lichens principalement traitées ici intègrent des dépôts sur plusieurs années ; il est néanmoins intéressant d'examiner les teneurs dans les thalles d'espèces à développement plus rapide, en particulier *Xanthoria polycarpa*. En complétant avec des analyses de feuilles d'arbres, on peut aboutir à une datation approximative par tranches : de quelques jours à un maximum de six mois pour des feuilles ; de six mois à un an pour *X. polycarpa* et plusieurs années pour *X. parietina* et *P. sulcata*.

Une contamination ponctuelle récente est normalement associée à une forte concentration dans toutes les espèces de bio-indicateurs lichéniques et à une contamination dans les feuilles s'inscrivant dans un même ordre de grandeur (dans notre expérience, les concentrations des feuilles dans les zones non polluées sont inférieures d'un facteur 10 à celles trouvées dans les lichens). Par ailleurs, en cas de contamination ponctuelle, le marquage ne se manifeste souvent que dans une direction par rapport à la source.

Une émission chronique en revanche se caractérise par une contamination plus régulière dans toutes les directions (avec plus ou moins d'intensité selon la rose des vents). Ainsi a-t-on constaté à Seurre que *P. sulcata* était fortement contaminé en plomb dans toutes les directions, même s'il l'était plus vers le nord-est, dans le sens du panache : 942 mg/kg à 100 mètres et 563 mg/kg à 400 m. Côté "propre" la teneur était de 484 mg/kg à 100 m. Par contre, *X. polycarpa* présentait une contamination de seulement 38,4 mg/kg du côté "propre" et de 304 mg/kg dans la direction contaminée, là où *P. sulcata* était à 563 mg/kg. Ces constats avaient permis de déduire :

- qu'il y avait eu aussi bien une contamination de fond, ancienne et étendue dans le temps, encore bien présente dans *P. sulcata* mais s'étant déjà estompée dans *X. polycarpa*

- qu'un relâchement accidentel récent et massif s'est superposé à la pollution chronique, alourdissant la contamination de *P. sulcata*, contaminant les thalles de *X. polycarpa* exposés et les feuilles d'arbres prélevées dans le même axe (627 mg/kg sur des feuilles de tilleul).

3. En présence d'une contamination ponctuelle, il est utile de connaître le **temps de résidence des éléments-traces dans les lichens comme dans l'organisme humain**. Ceux-ci ne coïncident pas toujours. Concernant l'organisme humain, le temps de résidence dépend souvent de la forme chimique de l'élément et peut varier selon l'âge. Les données sur la question sont à rechercher au coup par coup, car très éparpillées dans la littérature spécialisée (voir néanmoins Sabbioni, 1997) et leur présentation dépasserait le cadre de cet article. Rappelons simplement que dans la plupart des cas ce temps de résidence est long et que pour le cadmium l'élimination est même quasi-nulle.

Le temps de résidence chez les lichens s'exprime en **période biologique**, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la concentration diminue de moitié. Cette période peut être calculée de différentes façons : par des analyses répétées après des transplants ou in situ, après qu'une source ait cessé d'émettre : cela a permis d'observer la décroissance du plomb et du chrome dans les lichens d'un quartier de Mâcon (71) autrefois voué à la sidérurgie et réhabilité depuis : le Vallon des Rigolettes. Pour le plomb,

la période biologique peut aussi être calculée en se basant sur l'incorporation par le thalle du plomb 210, d'origine essentiellement naturelle et dont les dépôts par m² par an sont connus (voir les détails des calculs in Kirchner et Daillant 2002). Le tableau 7 présente les périodes biologiques pour quelques éléments dans *P. sulcata* et *X. parietina*, en indiquant le mode de détermination et les sites concernés en cas d'analyses répétées dans le temps. Les périodes "effectives" (période biologique corrigée de la décroissance radioactive) de deux éléments radioactifs sont également reprises à titre indicatif. On observe que les temps de résidence des éléments étudiés s'inscrivent dans un même ordre de grandeur. Les résultats de Bourg-Fidèle (tableau 5) pourraient faire penser que celui du cadmium est proche de celui du plomb: la courbe d'évolution est en effet très comparable à celle du plomb.

Tableau 7 : Temps de résidence de certains éléments dans les lichens *P. sulcata* et *X. parietina*, exprimé en terme de période biologique (ou de période effective pour les éléments radioactifs).

Elément	Espèce		Site	Mode de détermination
Eléments stables				
	<i>P. sulcata</i>	<i>X. parietina</i>		
Argent		3,3 ans	Chalon sur Saône/Industrie photographique	Comparaison des résultats
Chrome	2,7 à 2,9 ans	3 ans	Mâcon et le Creusot	Comparaison des résultats
Plomb	≤ 2 ans	2,7 à 3,9 ans	Chalon sur Saône, Mâcon et le Creusot	Comparaison des résultats
Plomb *	2,2 ± 1,4		Calcul à partir des dépôts de plomb 210 (radioactif, période 20,6 ans)	
Eléments radioactifs				
Plomb 210	2 ± 1,3			Calcul des dépôts
Cesium 137	2,6 ± 1,2	2,7 ans	Région de Montceau-les-Mines et de Chalon-sur-S	Comparaison des résultats

CONCLUSION

Le premier stade de l'étude des métaux lourds par les lichens se concentrait nécessairement sur l'imprégnation de l'environnement et sur les distances que les métaux recherchés pouvaient parcourir avant de se déposer ; on est passé du simple constat comparatif au transect, puis à la cartographie. Les écarts considérables entre concentrations ont amené à envisager une exploitation plus poussée des résultats : le chemin à parcourir avant que les lichens ne passent du statut d'indicateur de l'imprégnation de l'environnement à celui d'indicateur chiffré de la santé est certes encore long, mais des corrélations sont réalisées depuis longtemps entre la qualité globale de l'air, les lichens et la santé. Dans la mesure où pour les métaux lourds, des rapprochements semblent prometteurs dans certains cas, il serait dommage de ne pas poursuivre ce chemin.

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes doivent être citées pour leur contribution à ces études :

Pour l'initiative et le financement des études : Mme Girard-Frossard (DDASS 21), Mme Larose (DDASS 89), Mme Loizeau et M. Tillier (DDASS 71) et M. Potel (DDASS (58)), Mme Delavière (DRASS Bourgogne) Mme Lerendu ainsi que Mme Marie Paris et M. Roche (Service d'Hygiène et Santé, Ville de Mâcon), M. Ferrière (Museum d'Histoire Naturelle, Ville de Dijon)

Pour les analyses : Mme Autissier et M. Beltramo (CSAAB, Faculté de Pharmacie, Université de Bourgogne, Dijon).

Prélèvements et recherches permettant leur interprétation : Mme Gueidan, M. Joyeux, Mme Alexandra Paris, M. Michel et M. Pognat (Observatoire Mycologique), Mmes Chougny, Combier et Nicolas (Société d'Etudes du Milieu Naturel en Mâconnais, SEMINA)

Exploitation statistique : M. Kirchner (Université de Bremen, Allemagne)

Recherches bibliographiques : M. Jacquiot (Observatoire Mycologique)

Fourniture de documents et informations : Mme Coquet (DDASS 08), M. Deruelle (AFL) et Mme Schneider (Association de Défense de l'Environnement de Bourg-Fidèle)

REFERENCES :

Baize, D. 1997 : Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA éditions, 409 p.

Brown, DH et Brown, RM, 1991: Mineral Cycling and Lichens: the Physiological Basis, *Lichenologist* 23 (3), 293 - 307

Daillant O., Kirchner G., Beltramo J.L., Gueidan C., Jacquiot L., Joyeux E., Loizeau M.N., Paris A., Pognat C. and Tillier C.: Lichens and new possibilities of bio-indication in France, BIOMAP 2000, Terceira, Açores, 28/08/2000 - 03/09/2000.

Daillant O. et Kirchner G. 2000 : La bio-accumulation d'éléments-traces dans les lichens : Références chiffrées, *Observations Mycologiques*, n°16, 25 - 29.

Daillant O, Beltramo J.L. et Tillier, C 2003 : Lichens as Bio-monitors of Trace-elements in Central and Eastern France, *J. Phys. IV France*, 107, 349 - 352.

Deruelle S., 1984 : L'utilisation des lichens pour la détection et l'estimation de la pollution par le plomb, *Bull. Ecol.* 15, 1 - 6.

Garty J. 2001 : Biomonitoring Atmospheric Heavy Metals with Lichens: Theory and Application, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20 (4), 309 - 371.

Kirchner G. and Daillant O. 2002 : The potential of lichens as long-term biomonitors of natural and artificial radionuclides, *Environmental Pollution* 120, 145 - 150.

Knops, JMH, Nash III, TH, Boucher, VL et Schlesinger WH, 1991 : Mineral Cycling and Epiphytic Lichens: Implications at the Ecosystem Level, *Lichenologist* 23 (3), 309 - 321.

Nimis, P.L., 1989: I licheni come bio-indicatori di inquinamento atmosferico nell'area di Scio, Thiene, Breganze (VI); *Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona*, vol 16, 154 p.

Sabbioni E., 1997 : Valori di Riferimento di Elementi in Tracce nella Popolazione Europea. Il Progetto EURO TERVIHT e le Prospettive per la Popolazione dell'Area Mediterranea. X Congresso Intern. "Problemi Ambientali e Sanitari nell'area Mediterranea", Ordine naz. Biologi, 10 - 13 ottobre 1997, Maratea PZ (I).

Schmitt M., Deshayes F., Fradet M.R., Coquet S., Brun N., Humbert B. 2002 : Nouvelle enquête sur l'impression saturnine des enfants à Bourg-Fidèle, *Rapport DDASS des Ardennes*, Santé Environnement 38 pages + annexes.

Sloof J.E. et Wolterbeek H.T., 1991 : National Trace Element Air Pollution Monitoring Survey using Epiphytic Lichens, *Lichenologist*, 23, 139 - 165.