

Les lichens, outils dynamiques de la surveillance des PCB dans l'atmosphère

Lichens, dynamic tools for monitoring PCBs in the atmosphere

Philippe Giraudeau¹, Richard Lallemand¹

Abstract

In France, measurements of PCBs in lichens were performed since 2006, most of the time for industrials. Air Lichens started this monitoring around sites reprocessing electrical transformers with pyralene in several regions. The aim was to get a better understanding of the exposition to the PCBs and of the lichens' abilities in detecting them. Thus, it occurred that on exposed areas, the levels of PCBs Indicators (including CB138, CB153 and CB180) are coupled to PCDD/Fs (polychlorinated dibenzodioxins and polychlorinated dibenzofurans). Besides, lichens reflect variations in exposure depending on the distance and on the particulate or gaseous emission of PCBs levels. Furthermore, retention capabilities are very important as saturation levels are not yet reached (levels of over 900 ng/kg I - TEQ WHO 1998 for PCDD/Fs and more than 1000 ng/kg for DL-PCBs for controls below 5 ng/kg). Moreover, in situations exposed to PCDD/Fs, DL-PCBs, NDL-PCBs, lichens reflect a dynamic balance between exposures and concentrations. However, in case of reduction of the emission source, the decrease in lichens is not immediate. Hence, to be able to overcome this difficulty, Air Lichens uses healthy thalli transplanted from its own Natura 2000 site characterized by very low pollutant background levels and follows them regularly. Then, the method consists in transplanting and disposing lichens in target sites from which they are collected in a sequential manner. The results of the impregnation of the transplants are evaluated based on the basic content that of the nature reserve, but also based on the levels measured in lichens already in the immediate surroundings of the target site prior to the placement of transplants. Given current locations, regardless of the particular pollutant (PCDD/Fs, DL-PCBs, PCDD/Fs + DL-PCBs, PCBs Indicators and NDL-PCBs), the first three months show a moderate increase for transplants which then continue growing up and the levels after 6 months show a strong rise that continues after 9 months. The evolution observed on transplants exposed in an area known for presenting higher contents shows that lichens are perfectly adapted to the follow-up of the kinetics of atmospheric PCBs and after 9 months of exposure, the contents of the transplants from the nature reserve has evolved to reach 50-70% of the level measured in lichens already in the immediate surroundings of the target site before the placement of transplants.

Keywords

lichens, PCBs, PCDD/Fs, exposure, transplants, research, kinetic.

Résumé

En France, des mesures de PCB dans les lichens sont réalisées depuis 2006, la plupart du temps pour des industriels. La société Air Lichens a débuté cette surveillance autour de sites de retraitement de transformateurs électriques au pyralène dans plusieurs régions. L'objectif de départ est de mieux comprendre l'exposition aux PCB et la capacité des lichens à les pister efficacement. Il apparaît ainsi que, sur des zones exposées, les teneurs en PCB Indicateurs (dont CB138, CB153 et CB180) sont couplées aux PCDD/F (polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes). Par ailleurs, les lichens reflètent les variations d'exposition selon l'éloignement et les niveaux d'émissions particulières ou gazeuses de PCB. De plus, les capacités de rétention sont très importantes, car les niveaux de saturation (teneurs de plus de 900 ng/kg I-TEQ OMS 1998 pour les PCDD/F et plus de 1 000 ng/kg pour les PCB-DL pour des témoins inférieurs à 5 ng/kg) n'ont pas encore été atteints. Dans des situations exposées aux PCDD/F, PCB-DL, PCB-NDL, les lichens traduisent donc un équilibre dynamique entre les expositions et les concentrations. Cependant, en cas de diminution de la source d'émission, la baisse dans les lichens n'est pas immédiate. Afin de pouvoir contourner cette difficulté, Air Lichens plante des lichens sains à partir de sa propre station Natura 2000 caractérisée par des teneurs de fond qu'elle suit régulièrement. La méthode consiste alors à planter des lichens dans des sites cibles dont ils sont ensuite prélevés d'une façon séquentielle. Les résultats de l'impregnation des implants sont évalués en fonction du taux de base, celui de la réserve naturelle, mais aussi en fonction des niveaux mesurés dans les lichens in situ avant la pose des implants. Au regard des implantations actuelles, quel que soit le polluant considéré (PCDD/F, PCB-DL, PCDD/F + PCB-DL, PCB Indicateurs et PCB-NDL), les trois premiers mois présentent une accentuation modérée qui se poursuit ensuite. Le taux après 6 mois présente une forte accentuation qui se continue à 9 mois. L'évolution observée sur les implants exposés dans une zone connue pour présenter des taux plus élevés démontre que les lichens sont parfaitement adaptés au suivi de la cinétique des PCB atmosphériques et, après 9 mois d'exposition, le contenu des implants « réserve naturelle » a évolué pour atteindre 50 à 70 % du taux mesuré sur les lichens in situ avant la pose des implants.

Mots-clés

lichens, PCB, PCDD/F, exposition, implants, recherche, cinétique.

(1) Air Lichens 17 rue des Chevrettes 44470 Carquefou - air.lichens@wanadoo.fr

1. Introduction

L'utilisation des lichens pour le suivi environnemental et les transferts atmosphériques des Polychlorobiphényles à comportement voisin des dioxines (PCB-DL) et des PCB dits « Indicateurs », au nombre de sept, reste une discipline scientifique, réservée à des expérimentateurs avertis. Des procédés innovants résultant des recherches d'Air Lichens permettent non seulement de porter un diagnostic pertinent sur les niveaux d'exposition, mais ils permettent aujourd'hui d'apprécier la cinétique des transferts. Les lichens sont à ce titre des sentinelles positives judicieuses permettant de déceler des risques d'introduction éventuelle dans l'alimentation animale et humaine.

Les capacités intrinsèques originales des lichens sont liées à l'absence de racines, de cuticule et à la présence d'une régulation hydrique au niveau du partenaire photosynthétique. Leur constitution favorise la rétention de nombreuses molécules et les métaux sont retenus, voire fixés, à la paroi fongique. Leur différence et spécificité par rapport à d'autres bioindicateurs tels que les bryophytes, résident dans l'équilibre relatif existant entre le contenu de l'air en polluants et celui des lichens. Les résultats des dosages dans les lichens reflètent les variations d'exposition. Ainsi, les taux sont proportionnels avec l'éloignement et les niveaux d'émissions particulaires ou gazeuses, comme c'est le cas pour les PCB.

Les lichens n'accumulent pas les polluants en permanence grâce à un équilibre relatif entre le contenu de l'air et celui des lichens. Cependant leurs capacités de rétention peuvent être très importantes car la connaissance des niveaux maximum et de saturation n'a pas encore été atteinte. En effet, les PCB ou les PCDD/F ne semblent pas porter atteinte à la survie de la majeure partie des espèces de lichens rencontrées dans les périmètres de contrôle, bien que des zones de décoloration à la périphérie des thalles soient parfois notées.

Cet article relate deux phases distinctes : la comparaison des résultats dans les lichens et dans les matrices alimentaires pour animaux (fourrages), d'une part, et l'étude et le suivi des PCB dans des lichens allochtones implantés dans des conditions témoins ou dans des secteurs exposés, d'autre part. Le but n'est pas de traiter des phases de collecte, de préparation des échantillons et des dosages mais d'informer sur les capacités des lichens en tant qu'outil de suivi des teneurs environnementales des PCB transitant par voie atmosphérique.

Le terme d'implants est préférable dans ce cas à celui de transplants car la méthode diffère de celle proposée par les auteurs (Brodo, 1961) ou lors d'études consacrées aux métaux (Deruelle, 1983). Les implants (Ilibagues®) conservent leur vitalité et se développent si la durée d'exposition est prolongée.

2. Historique

La société Air Lichens a débuté cette surveillance autour de sites de retraitement ou de réparation de transformateurs électriques contenant ou ayant contenu du pyralène, et cela dans plusieurs régions. Sur des zones exposées, les teneurs en PCB Indicateurs (essentiellement les PCB138, PCB153 et PCB180) semblent couplées à celles de PCDD/F (polychlorodibenzodioxines et surtout avec les polychlorodibenzofuranes qui dominent sur les sites les plus exposés). Les teneurs en PCB indicateurs des zones non exposées sont proches de 10 à 15 ng.g⁻¹ et sont associées à des teneurs en PCDD/F inférieures à 3,0 ng.kg⁻¹ (I-TEQ OMS 1998), ce qui correspond à des valeurs témoins pouvant être considérées comme le bruit de fond anthropique actuel des PCB en France.

Le bruit de fond moyen en France en PCDD/F a pu être évalué par Air Lichens à 2,5 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 sur plusieurs dizaines d'échantillons, mais une décroissance relative est souvent rencontrée depuis plusieurs années, et les régions méditerranéennes présentent des valeurs plus faibles (souvent ≤ 2.0 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998) pouvant être en relation avec la photodégradation ou avec une plus forte remobilisation par volatilisation en période chaude, y compris pour les congénères plus chlorés ou avec des situations écologiques particulières (ombrage, exposition) pour les lichens. Ceci impose régulièrement la réévaluation des valeurs de détection des retombées.

3. Méthode

Dans des situations exposées aux PCDD/F, PCB-DL, PCB-NDL, les lichens peuvent présenter une relative inertie. Dans la mesure où ces organismes traduiraient un équilibre dynamique entre l'exposition et la concentration interne et qu'ils ont une durée de vie et de pérennité de plusieurs années, le temps de désorption en cas de diminution de la source d'émission peut paraître trop lent pour que la baisse soit constatée rapidement. Ainsi, les lichens *in situ* portent à la fois les stigmates d'une pollution historique en régression et l'équilibre des niveaux contemporains d'exposition.

Pour contourner cette difficulté et compléter le diagnostic des lichens *in situ*, Air Lichens propose d'implanter des organismes sains et de les suivre régulièrement. Air Lichens dispose donc de sa propre station Natura 2000, riche en lichens naturels et caractérisée par des teneurs de fond basses pour tous les polluants, que cette société mesure dans le cadre de son activité et de ses recherches, dont les dioxines, furanes et PCB. Des lichens issus de cette zone naturelle sont implantés dans des sites cibles et prélevés d'une façon séquentielle.

3.1. Validation de l'utilisation des lichens pour la surveillance de la qualité de l'atmosphère

L'utilisation d'une matrice aussi sensible que les lichens n'est pas accessible sans précaution et sans compétences affirmées, car de la pertinence du diagnostic et de ses aléas vont dépendre des conclusions en matière d'expositions locales, qui ne seront pas sans conséquences sanitaires sinon sur la perception des risques pour la population. La préservation de la santé humaine est finalement l'aboutissement de l'utilisation de ce biocapteur. Les procédures nécessaires à la mise en œuvre de tels outils et diagnostics restent encore du domaine de la recherche appliquée et de la prestation intellectuelle, mais pas encore de la prestation de service.

Des expériences d'implantation ont été réalisées dans le but d'apporter des données interprétables dans la surveillance et le diagnostic environnementaux. Elles consistent à prélever des lichens dans une zone témoin et à les implanter pendant un temps déterminé dans des sites supposés pollués par les PCB.

Une étude s'est ainsi intéressée aux expositions à 3, 6, 9 et 12 mois pour les PCB (Aair Lichens, 2012/2013). Des recherches sont en cours pour optimiser le choix des espèces de lichens utilisables et leurs supports de croissance avant de les soustraire du milieu naturel.

3.2. La bioconcentration des PCB par les lichens

Les teneurs maximales obtenues à ce jour vont jusqu'à plus de 900 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 pour les PCDD/F (Giraudeau, Lallemand, 2012/2013, non publié), alors que les bruits de fond sont proches de 2,0 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 et de plus de 1 000 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 pour les PCB-DL, avec des témoins inférieurs à 3 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 ou encore 2 000 µg.kg⁻¹ pour les PCB Indicateurs avec des témoins < 10 µg.kg⁻¹.

Pour que les lichens soient confirmés comme matrice pour la surveillance de la qualité de l'air dans une recherche environnementale, ils ont dû remplir plusieurs conditions :

- Les concentrations en PCB dans les lichens doivent être proportionnelles à celles d'une matrice répondant à des normes comme les herbes destinées à l'alimentation animale (le but est d'aborder la chaîne alimentaire : herbe, alimentation animale, produits laitiers, alimentation humaine).
- La relation à l'éloignement avec la source polluante doit pouvoir être dépistée visiblement.

- La durée de retombées des polluants recherchés doit être compatible avec le temps de réaction de la matrice utilisée pour la biosurveillance. En effet, les mesures dans les laits répondent à l'alimentation animale dès six mois précédant le prélèvement, et les lichens, par le biais de leur sensibilité, permettent de déceler des risques d'introduction éventuels dans l'alimentation.

Les travaux préliminaires effectués par Giraudeau (2012), en comparaison d'herbes destinées à l'alimentation animale et après contrôle dans une phase de culture de ray-grass (NF X 43-901), démontrent que l'utilisation des lichens, bien que répondant à des protocoles complexes dans une étude scientifique, est fiable et peut être utilisée seule.

Une mesure ponctuelle des PCB dans les lichens n'est pas suffisante. Comme le montre la figure 1, une source émissive ne peut être décelée qu'à partir d'un certain nombre de mesures mettant en évidence une décroissance en s'éloignant de cette source, la plupart du temps en progression géométrique dans l'axe de la rose des vents.

Dans une campagne de mesures, il convient de s'appuyer sur une référence ou valeur témoin choisie préférentiellement dans le même contexte régional. Par expérience, une source ne devient significative que lorsqu'elle dépasse de 40 % la valeur du niveau de base. Ce pourcentage correspond à la somme des incertitudes maximales habituellement rencontrées (15 % à l'analyse, 15 % à la collecte et à la préparation des échantillons, 10 % d'incertitudes aléatoires).

Giraudeau a mis en évidence, au cours de ses recherches sur les lichens et les teneurs en PCDD/F, le seuil de 20 ng.kg⁻¹ I-TEQ OMS 1998 ou OMS 2005 qui garantit que la majeure partie des produits alimentaires destinés à l'alimentation humaine (végétaux alimentaires cultivés ou produits animaux élevés dans le même secteur géographique) resteront inférieurs aux valeurs réglementaires.

Les recherches se poursuivent pour apprécier à la fois un nouveau seuil intégrant PCB et PCDD/F qui pourrait être considéré comme un seuil d'alerte pour l'alimentation animale, donc pouvant garantir contre l'introduction de PCDD/F et PCB dans les laits, et ce faisant dans l'alimentation humaine (exception pour les œufs dont les sources de contamination sont plus complexes et dépendent le plus souvent de la tenue des poulaillers).

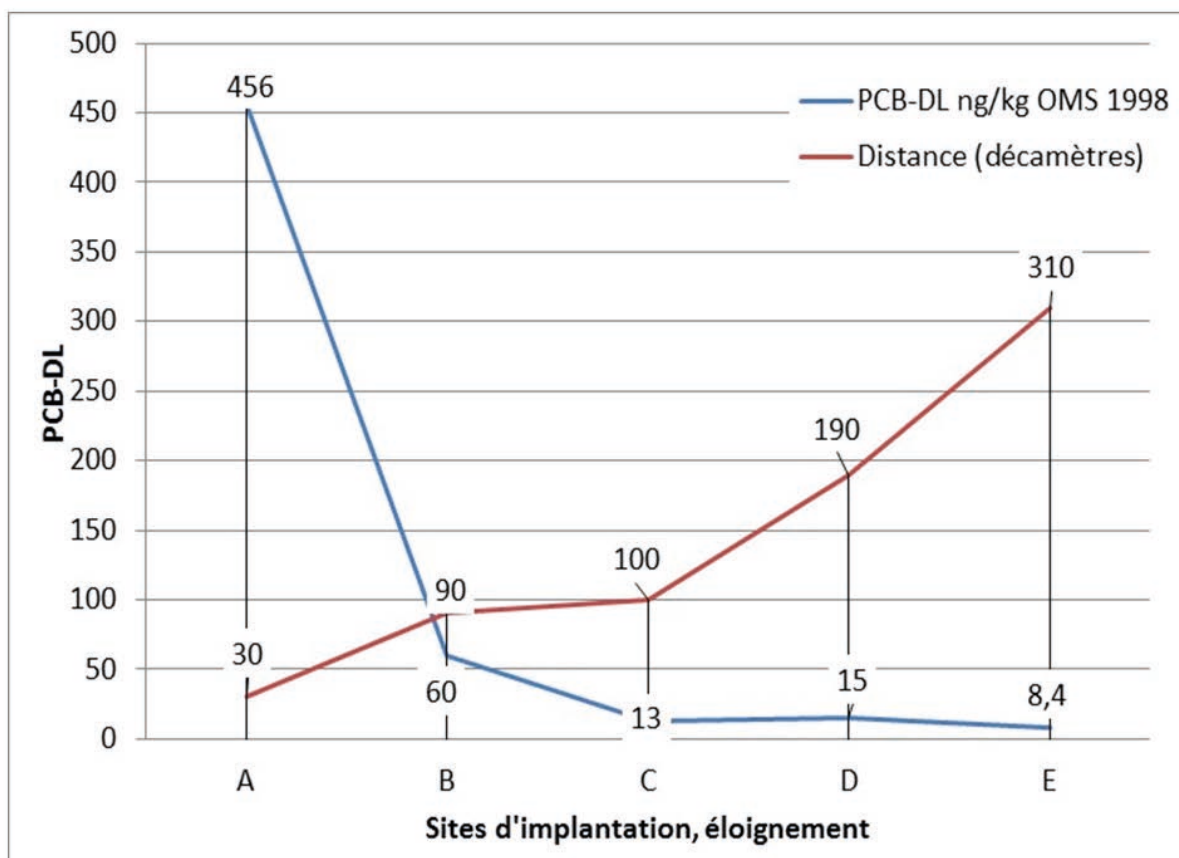


Figure 1. Décroissance des teneurs en PCB-DL (ng.kg^{-1} I-TEQ OMS 1998) selon l'éloignement de la source en décamètres.

Decrease of DL-PCBs content (ng.kg^{-1} I-TEQ WHO 1998) based on the origin remoteness, in decametre.

4. Comparaison des concentrations de PCDD/F et de PCB dans les lichens et dans les herbes fourragères

La comparaison des concentrations de molécules polluantes dans les lichens et les herbes destinées aux fourrages (essentiellement des ray-grass hybrides du genre *Lolium* et diverses espèces commensales de prairies) prélevées au même moment et dans le même site permet de constater que les lichens bioaccumulent nettement plus. Ceci a été confirmé par des études réalisées sur du ray-grass normalisé (NF X 43-901, Afnor, 2008). Ainsi, pour les PCDD/F, les valeurs dans les lichens implantés présentent une concentration de 30 à 130 fois supérieure aux valeurs des herbes (tableau I) et de 23 fois pour le témoin.

Lorsqu'il s'agit de la somme PCDD/F + PCB-DL, les lichens présentent une concentration de 4 à 19 fois supérieure aux herbes sur les mêmes sites (tableau II) et, dans le cas des PCB-NDL seuls, l'avantage pour les lichens est de 3 à 23 fois (tableau III). Le suivi dans les lichens présente donc un atout essentiel : il est

nettement plus sensible en vue de mettre en évidence une source de polluants organiques persistants chlorés qui diffusent dans l'atmosphère. Il permet donc de réagir et d'engager un plan de prévention de pollution avant que la qualité des herbes au titre de fourrages ne devienne rédhibitoire.

Pour une telle surveillance, on privilégiera cependant la détermination systématique des PCDD/F + PCB DL qui optimise le résultat.

Cette bioconcentration supérieure dans les lichens par rapport aux herbes permet de calculer les concentrations maximales pouvant être admises dans les lichens au titre de sentinelles. Ainsi, dans le cas des dioxines et furannes, lorsque les échantillons d'herbes ne sont pas « conformes » par rapport à 12 % d'humidité selon la réglementation européenne, **les taux dans les lichens sont toujours supérieurs à 50 ng.kg^{-1} (I-TEQ OMS 2005)**. (Teneur maximale autorisée dans les aliments pour animaux (herbes) pour les PCDD/F 0,75 $\text{ng OMS 2005 I-TEQ.kg}^{-1}$ de matrice à 12 % d'humidité – Règlement UE n° 277/2012 du 28 mars 2012).

Tableau I. Facteurs de concentrations des PCDD/F entre lichens et herbes naturelles (ng.kg^{-1} I-TEQ OMS 2005). Conformité $< 0.75 \text{ ng.kg}^{-1}$ I-TEQ OMS 2005 à 12 % d'humidité (LABERCA). Pour les PCDD/F, les valeurs dans les lichens présentent une concentration de 30 à 130 fois supérieure aux valeurs des herbes, et de 23 fois pour le témoin.
Factors of PCDD/Fs concentration between lichens and grass (ng.kg^{-1} I-TEQ WHO 2005). Compliance $< 0.75 \text{ ng.kg}^{-1}$ I-TEQ WHO 2005 at 12% humidity level (LABERCA). When it comes to the PCDD/Fs, lichens display a higher rate of 30 to 130 times more than the grass and of 23 times more for the witness results.

Dénomination	PCDD/F dans les lichens (I-TEQ ng.kg^{-1} OMS 2005)	PCDD/F dans les herbes (I-TEQ ng.kg^{-1} OMS 2005)	Rapports L/H	
L2 ; H5	50	0,379	132	Conforme
L4 ; H3	12	0,112	107	Conforme
L5 ; H4	15	0,152	99	Conforme
L6 ; H2	18	0,570	32	Conforme
L12 ; H1	457	6,815	67	Non conforme
L13 ; H6	718	8,314	86	Non conforme
Témoin	2,1	0,09	23	

Tableau II. Facteurs de concentrations des PCDD/F + PCB-DL entre lichens et herbes naturelles (ng.kg^{-1} I-TEQ OMS 2005). Conformité $< 1.25 \text{ ng.kg}^{-1}$ I-TEQ OMS 2005 à 12 % d'humidité (LABERCA). Lorsqu'il s'agit de la somme PCDD/F + PCB-DL, les lichens présentent une concentration de 4 à 19 fois supérieure aux herbes.
Factors of concentration of the sum of PCDD/Fs + DL-PCBs between lichens and grass (ng.kg^{-1} I-TEQ WHO 2005). Compliance $< 1.25 \text{ ng.kg}^{-1}$ I-TEQ WHO 2005 at 12% humidity level (LABERCA). When it comes to the sum of the PCDD/Fs + DL-PCBs, lichens display a higher rate of 4 to 19 times in comparison to the grass results.

Dénomination	PCDD/F + PCB-DL Lichens (I-TEQ ng.kg^{-1} OMS 2005)	PCDD/F + PCB-DL Herbes (I-TEQ ng.kg^{-1} OMS 2005)	Rapports L/H	
L2 ; H5	154	8,323	19	Non conforme
L4 ; H3	19	2,183	9	Non conforme
L5 ; H4	24	3,169	8	Non conforme
L6 ; H2	37	9,067	4	Non conforme
L12 ; H1	956	127,526	8	Non conforme
L13 ; H6	1784	402,155	4	Non conforme
Témoin	2,5	0,20	13	

Tableau III. Facteurs de concentrations des PCB-NDL entre lichens et herbes naturelles ($\mu\text{g.kg}^{-1}$). Conformité $< 10 \mu\text{g.kg}^{-1}$ à 12 % d'humidité (LABERCA). Dans le cas des PCB-NDL, l'avantage pour les lichens est de 3 à 23.
Factors of NDL-PCBs concentration between lichens and grass ($\mu\text{g.kg}^{-1}$). Compliance $< 10 \mu\text{g.kg}^{-1}$ at 12% humidity level (LABERCA). When it comes to the NDL-PCBs, lichens display a higher rate of 3 to 23 times more in comparison to the grass results.

Dénomination	PCB NDL Lichens $\mu\text{g.kg}^{-1}$	PCB NDL Herbes $\mu\text{g.kg}^{-1}$	Rapports L/H	
L2 ; H5	456	19,66	23	Non conforme
L4 ; H3	22	5,09	4	Conforme
L5 ; H4	45	7,42	6	Conforme
L6 ; H2	56	19,22	3	Non conforme
L12 ; H1	1766	227,31	8	Non conforme
L13 ; H6	1920	379,86	5	Non conforme
Témoin	1,3	0,34	4	

Lorsque l'on prend en compte les PCB-DL + PCDD/F, si les échantillons d'herbes ne sont pas conformes par rapport à la réglementation européenne, dans un tel cas **le taux des PCDD/F seuls dans les lichens doit être inférieur à 19 ng.kg⁻¹ (I-TEQ OMS 2005)**. Toute valeur supérieure ne peut garantir l'innocuité des herbes sur le même site du point de vue PCDD/F + PCB-DL. (PCDD/F + PCB-DL, teneur maximale autorisée dans les aliments pour animaux (herbes) 1,25 ng OMS 2005 I-TEQ.kg⁻¹ de matrice à 12 % d'humidité – Règlement UE n° 277/2012 du 28 mars 2012).

Si l'on s'intéresse à l'expression des mesures des 6 PCB-NDL (tableau III), la concentration par rapport aux herbes est de 3 à 23 fois selon les cas. **La ligne rouge à ne pas dépasser pour les lichens serait alors d'environ 40 µg.kg⁻¹**. (Teneur maximale dans les aliments pour animaux (herbes) : 10 µg.kg⁻¹ de matrice à 12 % d'humidité – Règlement UE n° 277/2012 du 28 mars 2012).

Ainsi, les mesures de PCDD/F, des PCDD/F + PCB-DL ou des PCB-NDL dans les lichens sont évidemment plus sensibles et peuvent permettre d'agir en amont de tout dépassement des valeurs dans l'alimentation animale, et, par extension, dans des produits destinés à l'alimentation humaine (produits laitiers, par exemple).

5. Réactions des implants de lichens aux expositions par les PCB

Les résultats de l'imprégnation des implants sont évalués en fonction du taux de base, celui de la réserve naturelle d'où ils ont été extraits, mais aussi en fonction des niveaux mesurés dans les lichens *in situ* avant l'implantation.

Un témoin a été implanté dans une zone périurbaine. Le seul fait de déplacer des lichens de la réserve naturelle vers un nouveau contexte les soumet de manière quasi certaine à l'influence de zones habitées dans lesquelles les chauffages domestiques au bois sont nombreux et susceptibles d'apporter leur contribution de pollutions.

D'après l'état des recherches actuelles effectuées par Giraudeau, Aair Lichens, quel que soit le polluant considéré (PCDD/F, PCB-DL, PCDD/F + PCB-DL, PCB Indicateurs et PCB-NDL), les trois premiers mois (implantation en juin et retrait en septembre) présentent une accentuation modérée pour les implants. Celle-ci se poursuit ensuite, et le taux après 6 mois (décembre) atteint le double du niveau de la réserve naturelle. La mesure à 9 mois d'exposition (mars) démontre une poursuite de l'élévation des taux.

La figure 2 présente l'évolution des teneurs en PCB-DL sur le site périurbain après implantation (septembre) et démontre que les valeurs de base à l'issue de l'implantation évoluent en fonction du contexte, notamment du chauffage au bois résidentiel. Trois mois après l'arrêt de la saison de chauffage, une décroissance est observée.

La figure 3 démontre que le phénomène concerne aussi les PCB-Indicateurs.

La figure 4 présente les évolutions après la pose des implants dans une zone exposée. Les lichens dits « état initial » sont les lichens *in situ* du point concerné, et les lichens implantés tendent régulièrement vers cette concentration.

L'évolution observée sur les implants exposés dans une zone connue pour présenter des taux plus élevés démontre que les lichens sont parfaitement adaptés au suivi de la cinétique des PCB atmosphériques (figure 4) et, après 9 mois d'exposition, le contenu des implants « réserve naturelle » a évolué pour atteindre 50 à 70 % du taux mesuré sur les lichens *in situ* avant la pose des implants.

Le fait que le taux *in situ* ne soit pas atteint en 12 mois pourrait indiquer que, dans des cas de forte exposition, une partie des PCB est fixée et que l'équilibre air/lichens ne concerne que la partie non fixée. Des études sont en cours sur la désorption des PCB dans les lichens à partir d'implantations allochtones dans la réserve naturelle. Il est aussi possible que cet arrêt soit lié à une baisse d'exposition.

La figure 5 montre l'exemple d'une somme PCDD/F + PCB-DL. Il est observé qu'entre 9 et 12 mois, il y a arrêt de l'imprégnation dans les implants. Il s'est avéré que ceci correspondait à une modification de process industriel destinée à limiter les émissions ou la diffusion de PCB dans l'atmosphère.

6. Perspectives

Les lichens participent à une alerte environnementale et renseignent sur les possibles expositions animales et humaines *via* les chaînes trophiques, dans des sites exposés aux PCB, avec l'avantage de fournir des balises en prévention d'un éventuel risque. Ils n'affranchissent pas pour autant des mesures directes dans les aliments. Lorsque les PCB sont liés à une activité industrielle (diffusion active) ou à une source de diffusion passive (relargages environnementaux de pollutions anciennes), accidentelle ou suite à une malveillance, les lichens permettent de cerner les zones de retombées et leur ampleur.

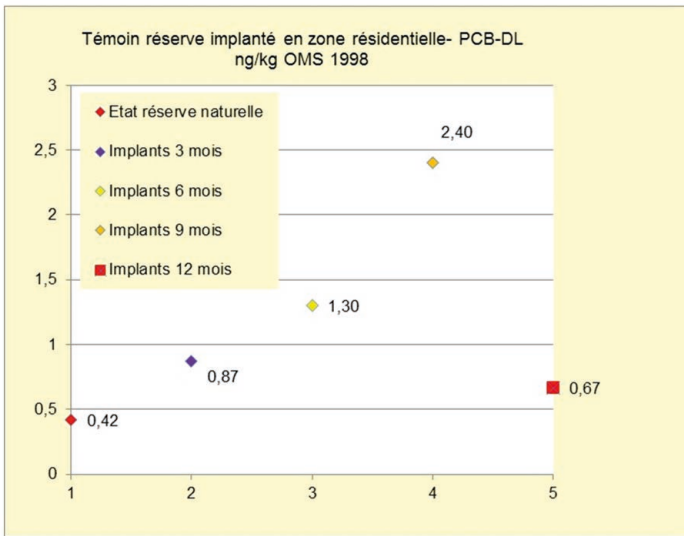


Figure 2. Évolution des PCB-DL du témoin à partir de l'implantation en zone périurbaine. Les valeurs à l'issue de l'implantation (écart-type 17 %) évoluent en fonction du contexte, notamment du chauffage domestique au bois.
Evolution of the DL-PCBs results of the witness from the transplant original area to a near-urban area. At the end of the process (standard deviation 17%), the level progress accordingly to the context, in particular residential wood fire context.

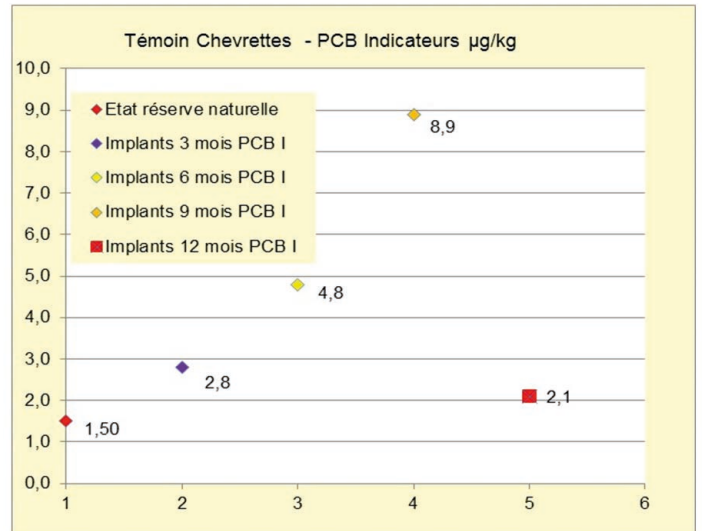


Figure 3. Évolution des PCB-Indicateurs dans le témoin au cours du programme. Trois mois après l'arrêt de la saison de chauffage, une décroissance est observée.
Evolution of the PCBs – Indicators level of the witness throughout the research. Three months after the end of the heating season, a decrease can be observed.

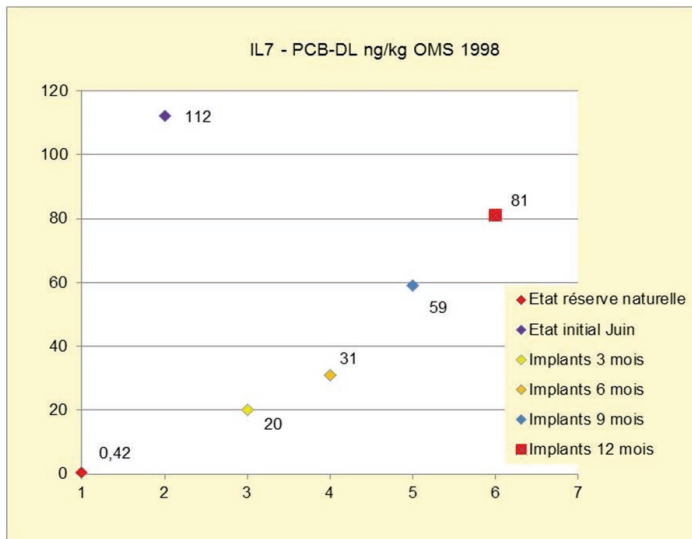


Figure 4. Évolution des PCB-DL en 12 mois d'implantation dans un secteur exposé. Les lichens dits « état initial » sont les lichens *in situ*, et les lichens implantés tendent vers cette concentration.
Evolution of the DL-PCBs level during a 12 months transplanted in an exposed area. "Original conditions" Lichens are the in situ ones and transplanted lichens follow an upward trend toward this value.

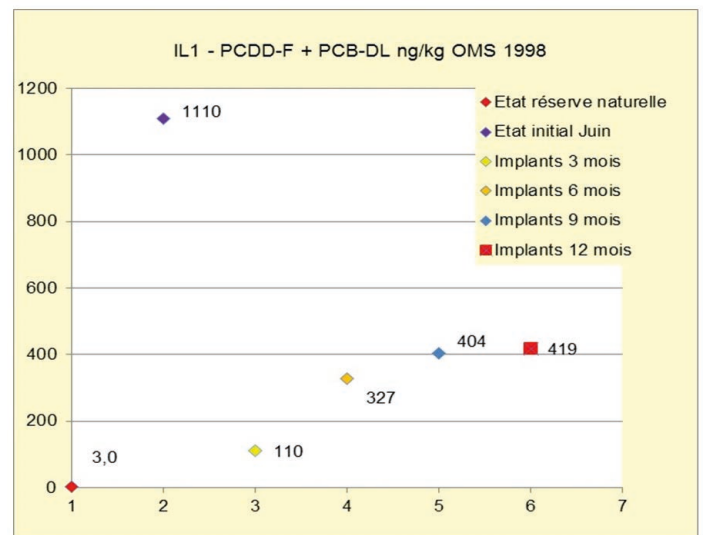


Figure 5. Exemple d'évolution pour les PCDD/F + PCB-DL de 0 à 12 mois. Entre 9 et 12 mois, il y a arrêt de l'imprégnation dans les implants. Il s'est avéré que ceci correspondait à une modification de procédures destinée à limiter les exports de PCB dans l'atmosphère.
Example of an evolution of the sum of PCDD/Fs + DL-PCBs from 0 to 12 months. Between 9 to 12 months, there is a cessation in the transplants' impregnation. It occurred that it was corresponding with a process modification which outcome was to limit the release of PCBs in the atmosphere.

Les procédés d'implantation au cœur des sites industriels peuvent permettre de dépister les origines de diffusion de polluants à partir des bâtiments et aider à la prise de décisions pour diminuer l'exposition des personnels et des riverains.

Les mesures dans les lichens autochtones ou implantés se révèlent particulièrement pertinentes. Ces organismes qui montrent un pouvoir de bioconcentration des plus remarquables intègrent les retombées atmosphériques comme les émissions gazeuses. Ils sont aujourd'hui une des meilleures sentinelles de l'environnement pour caractériser l'impact éventuel

d'une source émissive atmosphérique en PCB ou en PCDD/F, ou par défaut l'absence significative de sources de pollution identifiables pour ces molécules.

Cette méthodologie innovante a été testée avec succès à l'intérieur d'industries et suite à des accidents environnementaux. Elle est applicable en s'affranchissant de tout support naturel de lichens, tel que les arbres, bien que la meilleure stratégie tiende à la fois dans l'examen des lichens autochtones et la mise en place d'implants qualitativement et quantitativement tracés par une équipe de niveau universitaire.

Références bibliographiques

Aair Lichens (2012/2013). Industrie de retraitement des produits souillés aux PCB, étude interne.

AFNOR (2008). Biosurveillance de l'air, biosurveillance active de la qualité de l'air à l'aide de ray-grass : des cultures à la préparation des échantillons, NF X43-901. Norme.

Brodo I.M. (1961). Transplants experiments with corticolous lichens using a new technique. *Ecology*, n° 42, p. 838-841.

Deruelle. S. (1983). Écologie des lichens du Bassin Parisien, impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO₂, Pb) et relations avec les facteurs climatiques. Thèse de doctorat d'État, université P. et M. Curie, Paris, 300 p. et annexes 202 p.

Journal Officiel de l'Union Européenne, JOUE (2012). Règlement (UE) n° 277/2012 de la commission du 28 mars 2012 modifiant les annexes I et II de la directive 2002/32/CE du parlement européen et du Conseil, en ce qui concerne les teneurs maximales et les seuils d'intervention relatifs aux dioxines et aux polychlorobiphényles, Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. Disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:091:0001:0007:FR:PDF>