

BIOSURVEILLANCE AU MOYEN DE LA TECHNIQUE DES BRYOPHYTES TERRESTRES

SYNTHÈSE 1996 - 2020

D'ËMWELTVERWALTUNG

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt

QUALITÉ DE L'AIR



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de l'environnement

BIOMONITOR

CONSEIL & EXPERTISE
EN ENVIRONNEMENT



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de l'environnement

BIOSURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT AU MOYEN DE LA TECHNIQUE DES BRYOPHYTES TERRESTRES

Synthèse sur 25 ans : de 1996 à 2020



Administration de l'Environnement
Unité Surveillance et Evaluation de l'Environnement
1 Avenue du Rock'n'Roll
L-4361 ESCH-SUR-ALZETTE

SOMMAIRE

	page
1. Cadre général et objectifs	4
<hr/>	
2. Procédures pratiques	
2.1. Principe de la technique	5
2.2. Méthodologie standardisée	5
2.3. Réseau de stations	5
2.4. Campagnes de collecte des échantillons	6
2.5. Analyses	7
2.6. Base de données	8
<hr/>	
3. Analyse de données multidimensionnelles	
3.1. Principe et méthodologie	9
3.2. Préparation de la base de données	9
3.3. Profil des stations sur la période 1996 à 2020	9
3.4. Evolution des profils dans le temps	12
<hr/>	
4. Contraste d'impact de 1996 à 2020	
4.1. Principe et objectifs	13
4.2. Méthodologie	13
4.3. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)	14
4.4. Zinc (Zn)	16
4.5. Plomb (Pb)	18
4.6. Chrome (Cr)	18
4.7. Benzo(a)pyrène	21
<hr/>	
5. Evolution de la contamination diffuse	
5.1. Principe et objectifs	23
5.2. Plomb (Pb)	23
5.3. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)	24
5.4. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	25
<hr/>	
6. Evolution des impacts à l'échelle nationale	
6.1. Principe et objectifs	25
6.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)	26
6.3. Plomb (Pb)	27

6.4. Zinc (Zn)	28
6.5. Cadmium (Cd)	29
6.6. Chrome (Cr)	30
6.7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	31

7. Impact au droit des centres industriels	
7.1. Principe et objectifs	32
7.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)	32
7.3. Plomb (Pb)	33
7.4. Cadmium (Cd)	34
7.5. Chrome (Cr)	35
7.6. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	37

8. Impact de l'incinérateur du SIDOR	
8.1. Principe et objectifs	37
8.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)	37
8.3. Cadmium (Cd)	39
8.4. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	40

9. Conclusion et enseignements pratiques	41
---	----

1. CADRE GENERAL ET OBJECTIFS

Dans le cadre de ses missions d'évaluation et de suivi de la qualité des milieux ambiants, l'Administration de l'Environnement a mis en place et gère dans la durée des réseaux faisant appel à des **techniques de biosurveillance**. Ces méthodes biologiques, qui s'appuient pour la plupart sur des standards nationaux ou internationaux, poursuivent l'objectif de révéler et de quantifier l'impact de contaminants spécifiques et persistants dans le compartiment atmosphérique. Elles s'adressent à la fois à des substances polluantes organiques, comme les dioxines ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques, et à des éléments minéraux, comme les métaux lourds et métaux traces. De par leur durée d'exposition, les indicateurs biologiques présentent l'avantage de fournir des informations qualitatives et quantitatives, intégrées dans le temps.

L'un des réseaux de biosurveillance évaluant l'état de l'environnement est fondé sur la collecte et l'analyse de **bryophytes ou mousses terrestres**. Ces organismes, naturellement présents, ont la faculté de fixer et d'accumuler les contaminants qui se déposent au sol à partir de la colonne d'air. Comme il est possible d'effectuer la collecte (d'une même espèce) à plusieurs endroits et à plusieurs reprises dans la même population, la méthode répond à la double exigence d'un **suivi dans l'espace et dans le temps**.

Dans sa conduite de routine, c'est-à-dire selon une procédure technique stable, le **réseau bryophytique** fonctionne **depuis 1996**. Les prélèvements sont réalisés suivant une fréquence annuelle, de sorte à aménager suffisamment de temps pour que les populations de mousses puissent se reconstituer. Un certain nombre de **postes de suivi** ont été maintenus inchangés depuis le début du programme, alors que d'autres ont fait l'objet d'ajustements en fonction des besoins au fil du temps.

Fort de une base de données désormais conséquente sur 25 ans (1996 à 2020) pour une douzaine d'emplacements stratégiques, dont la plupart ciblés sur des émetteurs industriels, et une diversité d'aérocontaminants, l'Administration de l'Environnement a souhaité faire réaliser un **bilan de synthèse**. L'intérêt de la démarche consiste à la fois à tirer des enseignements concrets en considérant la base de données comme un **outil de rétrospection** et à orienter les **choix futurs** dans la poursuite du programme de surveillance de la qualité de l'air, et plus généralement celle de l'environnement, suivant des critères d'espace et de temps.

2. PROCEDURES PRATIQUES

2.1. Principe de la technique

La technique des mousses terrestres en tant que méthode de bioindication végétale s'appuie sur une propriété fondamentale de ces organismes qui, en l'absence de racines, tirent leurs nutriments exclusivement des dépôts de poussières. Comme les dépôts au sol sont en relation avec la quantité cumulée de contaminants présents dans l'air sur une certaine durée, l'analyse chimique des organismes accumulateurs fournit une indication intégrée dans le temps de la présence de contaminants, voire de pollution. La croissance progressive des pousses et la dégénérescence des tiges à la base font qu'il y a actualisation continue de l'indication biologique vis-à-vis de l'état récent de la contamination de l'air ambiant.

2.2. Méthodologie standardisée

La méthode des bryophytes terrestres prélevées *in situ* à des fins de quantification de l'impact de contaminants environnementaux persistants a fait l'objet d'une standardisation à l'échelle européenne¹, à la suite d'un travail préparatoire en France par l'AFNOR². La norme européenne EN 16414 a été éditée en janvier 2014. Les procédures techniques appliquées avant cette date sont suffisamment proches de la méthode standardisée pour considérer que les données présentent une homogénéité très satisfaisante sur la totalité de la période d'intégration, soit de 1996 à 2020.

2.3. Réseau de stations

Au fil des années, le réseau des stations de prélèvement a été adapté de manière plus ou moins courante dans un but d'acquérir des données suivant les besoins concrets de diagnostic d'impact. Toutefois, l'ossature du dispositif est restée stable durant toute la période du suivi, de sorte à disposer d'une base de données cohérente.

Pour la synthèse de 1996 à 2020, un total de 15 stations a été retenu (**tableau 1**). La moitié environ de ces sites couvrent la totalité ou la quasi-totalité de la période du suivi, alors que d'autres ont été ajoutés au fil du temps ou, au contraire, abandonnés à partir d'une certaine date. En fonction de leur localisation et de l'objectif de suivi, les différents emplacements sont répartis en trois catégories : (A) le bassin industriel du sud du pays, (B) en marge de celui-ci ou au droit d'installations spécifiques et (C) en milieu rural en tant que sites de référence.

¹ Comité Européen de Normalisation (2014) Ambient Air – Biomonitoring with mosses – Accumulation of atmospheric contaminants in mosses collected *in situ* : from the collection to the preparation of samples. EN 16414.

² BioMonitor a fait partie des commissions de normalisation de l'AFNOR et du CEN qui ont élaboré respectivement les normes française et européenne.

Tableau 1.

Réseau des stations de collecte d'échantillons de bryophytes terrestres retenues dans la synthèse 1996 à 2020.

Station de collecte	Emplacement	Code	Période de suivi
<i>A. Bassin industriel</i>			
Schifflange	Cité <i>Um Benn</i>	SCH-Ben	1996 - 2020
Schifflange	Rue du Moulin & lieu-dit <i>Hedingerstrachen</i>	SCH-Hed	2001 - 2020
Esch-Lallange	Lieu-dit <i>Am Pudel</i>	ESC-Lal	2000 - 2020
Esch-sur-Alzette	Esch-Centre & Quartier <i>Raemerich</i>	ESC-Cen-Rae	1996 - 2020
Esch-sur-Alzette	Cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	ESC-Els	1996 - 2020
Differdange	Cités Sidney Thomas & Henry Grey	DIF-Gre	1996 - 2020
Differdange	Rue du Jardin & contournement N31	DIF-Con	2000 - 2020
Rodange	Lieu-dit A la Siole	ROD-Sio	2001 - 2020
Rodange	Cité Huberty	ROD-Hub	2001 - 2020
<i>B. Situations spécifiques</i>			
Bettembourg	Limite du bassin industriel	BET	1996 - 2013
Leudelange	Incinérateur du SIDOR	LEU	1996 - 2020
Wiltz	Zone industrielle	WIL	1996 - 2020
<i>C. Milieu rural</i>			
Osweiler	Terrains agricoles structurés de haies	OSW	1996 - 2013
Beckerich	Zone d'influence des eaux minérales	BEC	1996 - 2020
Nospelt	En lisière de forêt	NOS	2003 - 2020

2.4. Campagnes de collecte des échantillons

Epoque de la campagne de collecte

Les campagnes de collecte d'échantillons de mousses terrestres ont été menées à un rythme annuel en respectant rigoureusement la même époque, à savoir le mois d'avril, le plus souvent entre le 10 et le 20 du mois. Le choix de cette époque de l'année est justifié à la fois par la biologie des bryophytes, actives entre le début de l'automne jusqu'à la fin du printemps, et par la facilité de collecte, en ce sens que les touffes sont bien visibles avant la croissance de la strate de végétation herbacée.

Espèce de bryophyte collectée

Sur l'ensemble du réseau, la même espèce de bryophyte est collectée, à savoir *Brachythecium rutabulum* (**photos 1 et 2**). Il s'agit d'une espèce largement répandue dans les milieux ouverts (friches, prés, jardins, lisière de forêt) et relativement facile à identifier pour une personne formée et expérimentée.



Photos 1 et 2.

Touffe typique de la bryophyte ou mousse terrestre *Brachythecium rutabulum* (à gauche) et vue rapprochée détaillant les brins et les feuilles (à droite).

Préparation des échantillons et envoi au laboratoire d'analyses

Après la collecte, les échantillons de mousses sont séchés à l'air libre, triés et conditionnés suivant les procédures normées. Ils sont remis dans un délai le plus bref à l'Administration de l'Environnement qui prend en charge l'expédition à un laboratoire d'analyse de son choix.

2.5. Analyses

La liste des aérocontaminants analysés dans les échantillons de mousses est restée stable durant toute la période d'intégration. Elles se présente de la manière suivante :

- les dioxines/furanes (PCDD/PCDF),
- les polychlorobiphényles analogues de dioxines (*dioxin-like* ou dl-PCB),
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- les métaux lourds Cd, Hg, Pb, les métaux traces Cr, Mo, Ni, Zn et le métalloïde As.

Parmi les composés organiques, les dl-PCB ont été intégrés au dispositif dès leur validation par l'Organisation Mondiale de la Santé en 2000 sous l'expression PCDD/PCDF/PCB. Parmi les métaux, l'As et le Ni ont été ajoutés en 2003, le Mo en 2008. D'autres métaux ont été abandonnés, comme par exemple le Cu.

Les différents aérocontaminants suivis sont présentés suivant leurs expressions et unités conventionnelles. Toutes les données sont définies vis-à-vis du poids sec des mousses, exprimé en grammes (g).

2.6. Base de données

Compilation des résultats

Fondamentalement, la base de données de 1996 à 2020 a été constituée en rassemblant les résultats bruts des bordereaux d'analyses tels qu'ils ont été réceptionnés à l'issue de chacune des campagnes annuelles. Aucune procédure de validation, ni de traitement ex-post n'a été appliquée. Ce choix est justifié en considérant que la masse de données est suffisamment importante pour que les résultats éventuellement erronés n'exercent pas d'influence décisive sur les conclusions pratiques. La base de donnée complète est fournie sous format électronique (classeur Excel).

Cas des PCDD/PCDF et des PCDD/PCDF/PCB

Depuis 1996, l'expression conventionnelle des équivalents de toxicité (TEQ) applicables aux PCDD/PCDF/PCB a été adaptée à deux reprises par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Le réseau fondé sur les mousses a suivi cette évolution à l'échelle internationale en intégrant la nouvelle expression dès sa validation, soit dans le détail : I-TEQ de 1996 à 1999, OMS-TEQ-1998 de 2000 à 2007 et OMS-TEQ-2005 de 2008 à 2020. Toutes les données ont été maintenues dans leur format d'origine, même si ce choix implique un (léger) biais quantitatif.

Par ailleurs, avec la diminution généralisée (et documentée³) de la contamination de l'environnement par les PCDD/PCDF/PCB, il est devenu indispensable d'introduire pour chaque résultat d'analyse le différentiel entre d'une part l'expression minimale (ou exclusive) qui ignore les composés qui ne sont pas quantifiable à l'analyse et, d'autre part, l'expression maximale (ou inclusive) qui intègre les limites de quantification des substances non détectées.

Pour les besoins de la synthèse, l'expression privilégiée est celle des PCDD/PCDF exclusive, c'est-à-dire l'impact réel des congénères quantifiés de dioxines et de furanes. Les dl-PCB ne sont pas pris en considération à ce stade, car les séries seraient écourtées, étant donné que l'expression complète PCDD/PCDF/PCB n'a été intégrée qu'à partir de l'année 2000.

Cas des HAP

L'expression conventionnelle associée aux HAP est la somme arithmétique de 16 substances définies par l'US-EPA en 1977. En raison de la forte hétérogénéité, notamment en terme de toxicité, l'Union européenne a choisi, dans le cadre de ses dispositions réglementaires, une expression plus condensée, formée par la somme des 4 HAP suivants : le benzo(a)anthracène,

³ BioMonitor (2017) Suivi de polluants organiques persistants dans l'air ambiant au moyen d'analyses d'aiguilles d'épicéas. Campagne de 2016 ; Synthèse des campagnes de 1993, 2007 et 2016. Administration de l'Environnement.

le benzo(a)pyrène, le benzo(b)fluoranthène et le chrysène⁴. C'est cette expression qui est retenue dans le cadre de la présente synthèse. Comme précédemment, suivant une approche pragmatique, les substances dont la concentration se situe au-dessous de la limite de quantification sont considérées comme absentes, c'est-à-dire à une concentration nulle.

3. ANALYSE DE DONNEES MULTIDIMENSIONNELLES

3.1. Principe et méthodologie

Dans une première approche, la base de données est analysée dans son ensemble en appliquant des méthodes statistiques descriptives multidimensionnelles. Ces techniques sont utilisées avantageusement lorsqu'il s'agit de visualiser des tendances et évolutions en présence de quantités importantes de données. Dans le cas présent, la base de données est formée de 25 séries annuelles (de 1996 à 2020) réparties sur 15 stations de suivi pour un ensemble de 10 contaminants environnementaux.

La méthode employée est celle de l'analyse en composantes principales (ACP), sur des données centrées et réduites, en considérant les moyennes des teneurs en contaminants comme variables quantitatives actives et les stations du réseau comme variables qualitatives illustratives. L'analyse a été conduite dans l'environnement R du package FactoMineR.

3.2. Préparation de la base de données

Les 15 stations du réseau ont été intégrées au dispositif suivant les données disponibles, c'est-à-dire sans tenir compte des différences dans leur durée de suivi (voir 2.3). Les contaminants sont les suivants : PCDD/PCDF et dl-PCB suivant les expressions conventionnelles (voir 2.6), HAP (somme des 4 HAP), As, Cd, Cr, Mo, Ni, Pb et Zn. Pour l'ensemble des données, les valeurs inférieures aux limites de quantification analytique sont considérées comme nulles, étant donné c'est bien cette expression (exclusive) qui représente le plus fidèlement l'intensité d'un impact⁵.

3.3. Profil des stations sur la période 1996 à 2020

L'analyse statistique par la technique de l'ACP rassemble 83 % de la variabilité de la base de données suivant les deux axes d'un plan, dont 70 % sur l'axe horizontal et 13 % suivant l'axe vertical (**figure 1**). La troisième dimension représente 8 % de la variabilité ; elle est

⁴ Règlement (UE) N° 835/2011 de la Commission du 19 août 2011 modifiant le règlement (CE) n° 1881/2006 en ce qui concerne les teneurs maximales pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les denrées alimentaires.

⁵ L'alternative qui consiste à choisir l'expression inclusive est davantage adaptée à une évaluation d'ordre sanitaire, puisqu'il est alors pertinent de se placer dans la situation du cas le plus défavorable (*worst case*).

essentiellement liée aux teneurs en Cr qui caractérisent avant tout les stations de Differdange. Cette dimension n'est pas développée dans le cadre de l'ACP ; le cas du Cr sera traité à plusieurs reprises plus loin.

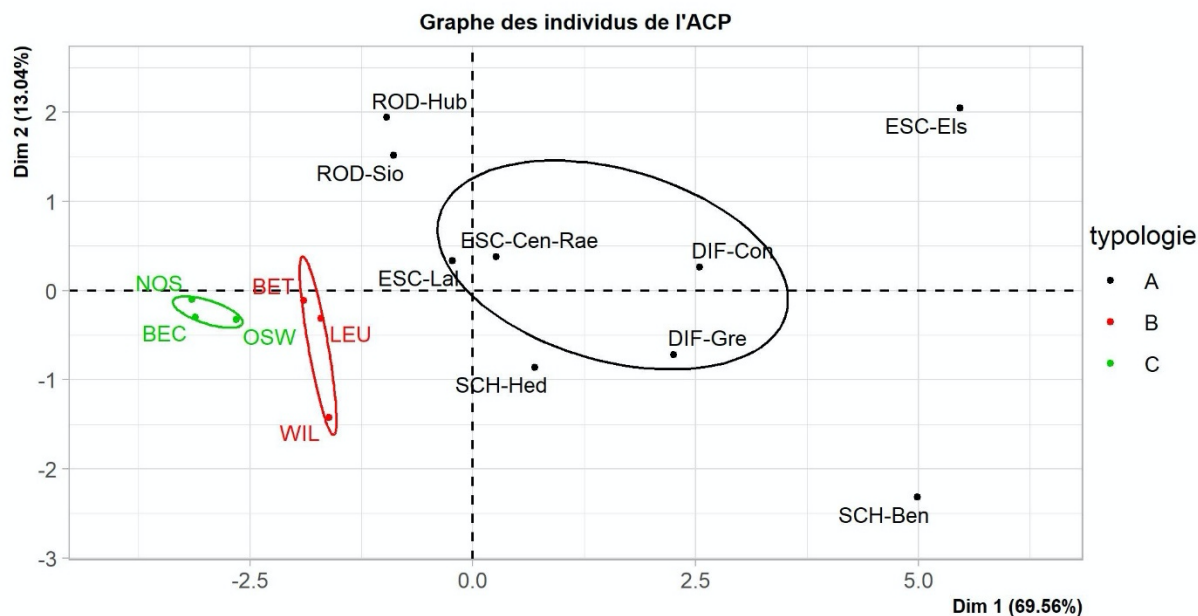


Figure 1.

Positionnement des stations (individus) dans le plan principal de l'analyse en composantes principales (ACP).

La première dimension de l'ACP (suivant l'axe horizontal), qui représente plus des deux tiers de la variabilité, est associée aux concentrations des différents aérocontaminants en général. Les principales contributions sont les teneurs en Pb et en Cd avec des corrélations supérieures à 96 % et, dans une moindre mesure, en Zn et en dl-PCB, corrélés à plus de 90 % (**figure 2**). La deuxième dimension (suivant l'axe vertical) fait ressortir des profils marqués, particulièrement l'As, le Ni et le Mo vers le haut, les PCDD/PCDF et les HAP vers le bas. Alors que les corrélations restent fortes (> 70 %) pour ces contaminants, le Cr se singularise nettement.

Le positionnement des stations dans le plan de l'ACP illustre à la fois leur typologie et leurs principales caractéristiques en terme de contamination, aussi bien qualitative que quantitative. Ainsi, les stations en milieu rural (typologie C ; couleur verte) se situent à gauche ; elles discriminent les concentrations les plus faibles. Nospelt (NOS) bénéficie de l'avantage d'un ajout plus tardif (en 2003) en présence d'une tendance à la diminution de la contamination diffuse de l'environnement (voir plus loin), tandis que Beckerich (BEC) et Osweiler (OSW) sont légèrement tirés vers le bas au-dessous de l'axe horizontal, en raison d'impacts épisodiques de PCDD/PCDF et de HAP, essentiellement au début du suivi.

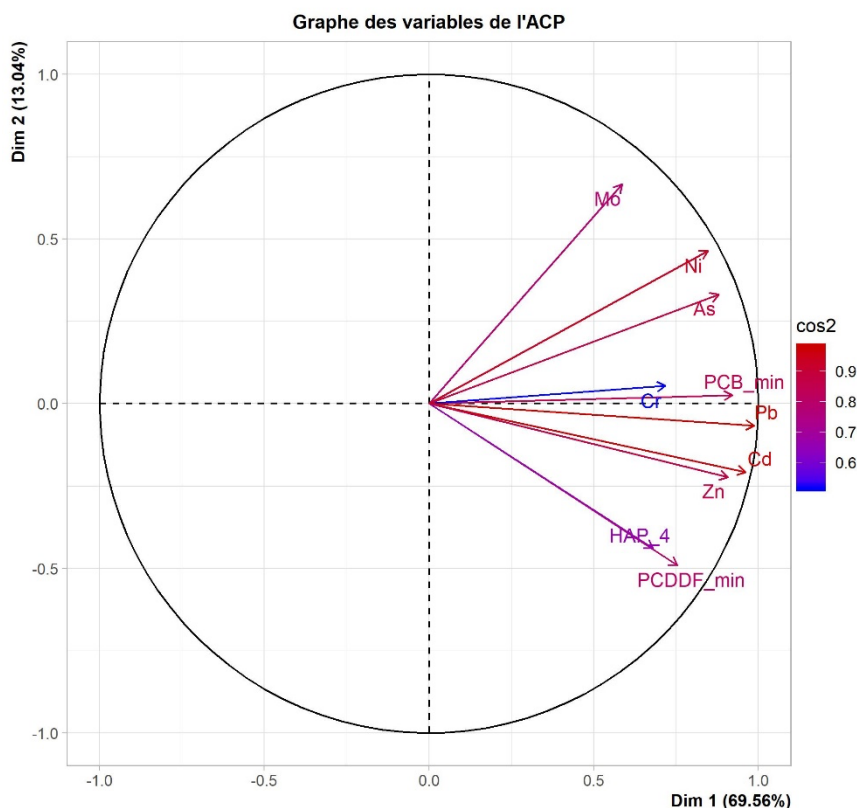


Figure 2. Positionnement des contaminants (variables) dans le plan principal de l'analyse en composantes principales (ACP).

A l'autre bout du spectre, à droite du plan factoriel, se situent les stations du bassin industriel (typologie C). Elles se caractérisent par des niveaux de contamination élevés et une forte hétérogénéité, traduisant une grande dispersion. Ainsi, la station de Schifflange-*Um Benn* (SCH-Ben), sous l'influence du complexe sidérurgique d'Esch-Schifflange, rend compte d'un impact élevé dont les principaux marqueurs sont les PCDD/PCDF et les HAP. L'emplacement d'Esch-*An Elsebrech* (ESC-Els), situé en zone d'impact maximal d'Esch-Belval, présente une incidence équivalente, mais différenciée par les métaux As, Mo et Ni. Les stations plus éloignées des installations sidérurgiques, Schifflange-*Hedingerstrachen* (SCH-Hed) d'une part, Esch-Centre/*Raemerich* (ESC-Cen-Rae) et Esch-Lallange (ESC-Lal) d'autre part, se décalent nettement vers la gauche, mais restent dans la même moitié du plan factoriel tout en se rapprochant de l'axe horizontal. Ce constat traduit une intensité de contamination moindre, le maintien du profil d'impact et une perte de typicité.

Les deux stations de Differdange, situées respectivement au sud (DIF-Gre) et à l'ouest (DIF-Con) du complexe sidérurgique, sont décalées vers la gauche du plan factoriel, c'est-à-dire dans le sens d'un impact globalement plus faible qu'aux stations les plus exposées d'Esch-sur-Alzette et de Schifflange. Bien que proches l'une de l'autre, elles se positionnent de part et d'autre de l'axe horizontal, indiquant que le site des Cités Henry Grey et Sidney Thomas

(DIF-Gre) présente un profil davantage influencé par les PCDD/PCDF ; la position plus neutre sur le versant ouest du site industriel (DIF-Con) tend à indiquer une influence majeure du Cr qui évolue vers le troisième axe de l'ACP, non représenté.

Les stations situées à Rodange présentent une intensité d'impact nettement plus réduite, objectivée par un décalage vers la gauche du plan factoriel. Elles se positionnent proches l'une de l'autre avec un profil typé vers le haut en raison d'un émetteur spécifique de Mo.

Enfin, les trois stations de la typologie B se placent entre les deux autres groupes, non loin des stations rurales, conformément à leur situation géographique. Le site de Bettembourg (BET) occupe une position neutre, proche de l'axe horizontal. Leudelage (LEU), sous l'influence de l'incinérateur du SIDOR, est corrélé à des incidences historiques et épisodiques de PCDD/PCDF et de Zn, alors que Wiltz (WIL) est tiré vers le bas en raison d'un profil marqué par les HAP.

3.4. Evolution des profils dans le temps

A côté du positionnement des stations du réseau national les unes par rapport aux autres, un second pôle d'intérêt est formé par une visualisation de la dynamique actuellement en cours. A cette fin, l'ACP a été enrichie par l'intégration des données obtenues au cours des six dernières années de la surveillance. Ce bloc de 2015 à 2020 est représenté par les données d'un ensemble (relativement homogène) de neuf stations. Il est important de souligner que ces données additionnelles sont introduites en tant que variables quantitatives illustratives, c'est-à-dire qu'elles ne participent pas à la construction de l'ACP.

Très logiquement, la base de données prise dans son intégralité (1996-2020) se positionne au centre du plan factoriel, au croisement des deux axes (**figure 3**). La projection des données 2015 à 2020 est fortement décalée vers la gauche le long de la première dimension (axe horizontal), ce qui traduit une baisse d'ensemble des teneurs en contaminants environnementaux dans les bryophytes. Un léger décalage vers le haut suivant la deuxième dimension (axe vertical) tend à indiquer une diminution de l'influence des contaminants PCDD/PCDF, HAP, Zn, Cd, Pb. Il s'agit là précisément des traceurs de l'industrie sidérurgique.

Les neuf stations singularisées sur la période récente (2005-2020) montrent toutes une évolution similaire vis-à-vis de la période complète (1996-2020) : une baisse sensible de l'intensité de contamination (décalage vers la gauche) et un éloignement des traceurs les plus typiques du secteur de l'industrie lourde (décalage vers le haut). Les glissements les plus conséquents sont constatés pour les deux stations de Schifflange (SCH-Ben et SCH-Hed) ; cette évolution s'explique aisément par l'arrêt de la production sidérurgique sur le site d'Esch-Schifflange en octobre 2011.

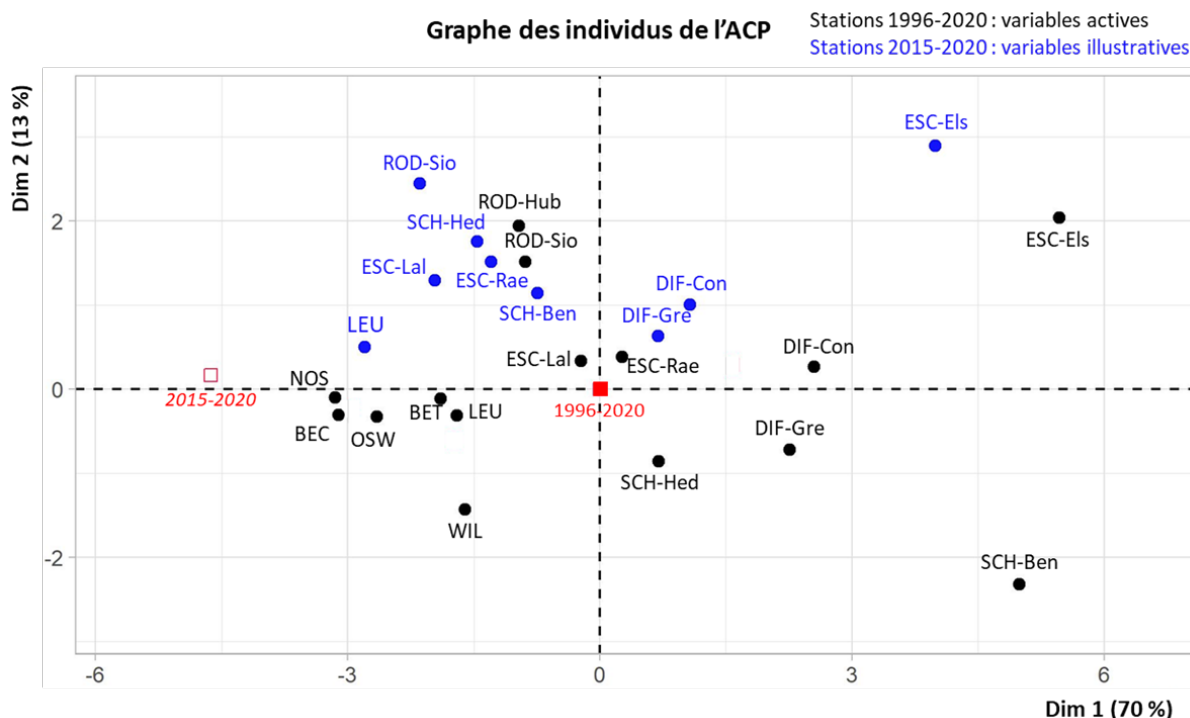


Figure 3. Positionnement des stations (individus) sur les périodes 1996-2020 (en noir) et 2015-2020 (en bleu) dans le plan principal de l'analyse en composantes principales (ACP) ; glissement conjoint de la base de données 2015-2020 vis-à-vis de celle de 1996-2020 (en rouge).

4. CONTRASTE D'IMPACT DE 1996 A 2020

4.1. Principe et objectifs

L'analyse statistique présente l'intérêt de visualiser la base de données dans sa globalité, mais cette approche d'ensemble ne permet pas de traduire l'impact réel des différents contaminants dans l'espace et dans le temps. Pour cela, il est nécessaire de s'adresser aux données unitaires. Une appréciation quantitative des incidences est obtenue par l'application d'un outil de hiérarchisation sous la forme d'une grille de qualité.

4.2. Méthodologie

Depuis le début du suivi, les données courantes ont été interprétées au moyen d'un outil simple qui est une grille de qualité à trois niveaux d'intégration. Les classes de qualité successives sont définies de la manière suivante :

- Gamme de référence : ensemble de situations comprenant, sans distinction possible, à la fois des cas d'absence de pollution, de pollution faible et de suspicion de pollution locale ; la concentration de repère est considérée comme valeur pivot, c'est-à-dire la valeur la plus

représentative de la situation naturelle ou de la contamination d'origine diffuse de l'environnement ;

- Contamination certaine : ensemble de situations pour lesquelles un apport de pollution à l'échelle locale est avéré ;
- Contamination forte : ensemble de situations pour lesquelles la pollution est non seulement certaine, mais peut être jugée importante.

Pour les besoins d'un suivi rigoureux, la grille de qualité appliquée au réseau bryophytique national a été mise à jour à plusieurs reprises au cours des 25 années de fonctionnement. Les modalités techniques s'appuient sur des procédures utilisées à une échelle internationale ⁶. Pour une visualisation aisée, les trois niveaux de la grille sont associés à un code de couleur : respectivement vert, orange et rouge.

Les valeurs retenues ici sont celles de la dernière actualisation, effectuée en 2018. Pour les campagnes annuelles antérieures (1996 à 2017), la grille de qualité représente dès lors un outil de rétrospection. Celui-ci peut, d'une certaine manière, être considéré comme peu objectif, puisqu'il est avant tout destiné à se projeter dans l'avenir, c'est-à-dire à interpréter les résultats futurs dans le but d'en tirer des enseignements pratiques.

4.3. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)

L'évolution au cours des 25 années de suivi des concentrations de PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres montre un vif contraste aussi bien dans l'espace que dans le temps (**tableau 2**). Sur l'ensemble du réseau, Schifflange-Cité *Um Benn* représente l'emplacement le plus exposé avec un diagnostic de contamination forte (rouge) du début du suivi en 1996 jusqu'à l'arrêt de la production sidérurgique sur le site d'Esch-Schifflange en 2011. Cet impact s'est largement propagé dans l'espace jusqu'aux stations situées sur le territoire de la ville d'Esch-sur-Alzette. Au droit des deux autres complexes industriels, Esch-Belval et Differdange, les niveaux de PCDD/PCDF dans les mousses sont restés plus faibles avec une alternance d'impacts jugés certains (orange) et de dégradations plus fortes (rouge). Les valeurs les plus élevées sont incontestablement relevées dans les premières années du suivi pour régresser de façon progressive après le pic de 2002. Au sein du bassin industriel, les postes de Rodange affichent, en règle générale, les teneurs en PCDD/PCDF les plus faibles.

Aux stations de la typologie B, le site de Leudelage, sous l'influence de l'incinérateur du SIDOR, présente historiquement les niveaux de contamination les plus élevés, en comparaison avec Bettembourg et Wiltz. Aux trois références rurales (typologie C), le franchissement du seuil de contamination certaine (orange) est de nature épisodique. Entre 1996 et 2008, des niveaux ponctuellement accrus peuvent être interprétés comme des épisodes de contamination diffuse de l'environnement. En revanche, la valeur de 1,9 pg

⁶ La construction et la mise à jour de l'outil d'interprétation courant des résultats dépasse le cadre de la présente synthèse ; des compléments d'informations peuvent être fournis sur demande.

Tableau 2.

Evolution des concentrations en PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres du réseau national de biosurveillance entre 1996 et 2020 ; application d'une grille de qualité à trois niveaux.

Station de collecte	19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08
A													
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	2,50	7,51	7,41	3,15	2,26	2,73	4,17	4,20	2,97	3,10	6,42	4,47	3,55
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	-	-	-	-	-	1,38	2,38	2,43	2,41	1,54	3,76	2,35	2,07
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	-	-	-	-	1,29	1,17	1,76	2,13	1,47	1,35	1,77	5,09	1,64
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	2,11	5,42	1,41	1,05	1,20	0,91	1,68	1,36	1,26	1,37	1,20	1,50	0,77
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	2,78	2,84	1,39	1,11	1,60	2,23	2,58	1,36	1,56	1,38	1,96	1,42	1,15
Differdange - Cités Thomas/Grey	2,37	2,56	2,37	1,35	1,96	1,32	1,90	1,21	1,98	1,56	1,18	1,25	1,21
Differdange - Contournement N31	-	-	-	-	1,09	1,36	2,99	1,32	1,50	1,25	1,96	1,64	1,33
Rodange - A la Siôle	-	-	-	-	-	1,25	1,77	0,98	0,98	1,29	1,10	1,17	0,59
Rodange - Cité Huberty	-	-	-	-	-	0,86	1,20	0,96	0,80	0,96	1,02	1,25	0,70
B													
Bettembourg	1,04	1,29	1,01	0,53	1,07	0,82	1,44	0,86	0,70	0,64	0,92	1,16	0,63
Leudelage (SIDOR)	-	2,47	1,60	1,21	4,11	0,85	1,79	1,05	0,81	0,99	1,24	1,57	0,96
Wiltz	-	0,88	0,98	1,02	2,96	1,17	1,20	0,69	0,61	1,13	0,83	1,00	1,27
C													
Osweiler	0,80	1,20	0,81	0,55	0,63	0,67	0,78	0,52	0,60	0,62	0,76	1,01	0,54
Beckerich	0,62	0,82	0,48	0,36	0,66	0,79	0,91	0,65	0,50	0,75	0,67	0,81	0,65
Nospelt	-	-	-	-	-	-	-	0,53	0,85	0,79	0,88	0,87	1,33

Station de collecte	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20
A												
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	2,90	2,74	2,35	0,74	0,89	-	0,25	0,80	0,08	0,03	0,40	-
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	1,33	0,97	1,16	0,92	0,63	0,05	0,32	0,37	0,04	0,02	0,09	0,03
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	1,42	1,10	0,76	0,64	0,51	0,22	0,31	0,27	0,03	0,15	0,04	0,06
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	0,93	0,70	1,05	0,80	0,90	0,46	0,45	0,38	0,08	0,15	0,04	0,06
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	1,24	0,95	1,00	1,11	0,91	0,76	1,01	0,84	0,77	0,49	0,81	0,29
Differdange - Cités Thomas/Grey	1,11	0,73	0,68	0,85	0,57	0,37	0,54	0,45	0,08	0,24	0,08	0,17
Differdange - Contournement N31	1,46	1,02	0,65	0,96	0,74	0,40	0,61	0,50	0,47	0,44	0,23	0,27
Rodange - A la Siôle	0,77	0,40	0,66	0,67	0,48	0,77	0,40	0,25	0,04	0,07	0,03	0,04
Rodange - Cité Huberty	0,78	0,39	0,54	0,59	0,36	0,16	-	-	-	-	-	0,03
B												
Bettembourg	0,56	0,52	0,46	0,51	0,68	-	-	-	-	-	-	-
Leudelage (SIDOR)	0,72	0,77	0,73	0,45	0,49	-	0,23	0,16	0,05	0,07	1,11	-
Wiltz	0,60	0,56	0,46	0,70	0,62	0,23	-	-	-	-	-	0,03
C												
Osweiler	0,44	0,34	0,33	0,33	1,90	-	-	-	-	-	-	-
Beckerich	0,49	0,41	0,42	0,38	0,50	-	-	-	-	-	-	-
Nospelt	0,45	0,34	0,42	0,35	0,33	-	-	-	-	-	-	-

	Grille de qualité
Référence	0,40
Contamination avérée (seuil 1)	0,90
Contamination forte (seuil 2)	1,5

OMS-TEQ/g relevée à Osweiler en 2013 ne peut pas être validée. Ensemble avec des concentrations fortement stabilisées depuis 2009, ce résultat a contribué à la décision la même année d'abandonner le suivi des PCDD/PCDF aux trois stations rurales.

Aux emplacements situés sous l'influence directe d'émetteurs industriels (hors Schifflange), une amorce nette vers une diminution des retombées de PCDD/PCDF est constatée depuis 2007. A partir de la campagne annuelle de 2008, le seuil de contamination forte (rouge) n'a plus été dépassé aux stations d'Esch-sur-Alzette et de Differdange. Dans la suite, des valeurs au-dessous de la référence d'impact (couleur verte) apparaissent de plus en plus et s'imposent définitivement, à une exception près, à partir de 2014. A Schifflange, l'effet de la fermeture du site sidérurgique en 2011 sur la qualité du compartiment atmosphérique est immédiat, tandis que la tendance à l'amélioration a été nettement anticipée à Rodange, à partir de 2009.

Depuis 2015, la chute des teneurs en PCDD/PCDF dans l'environnement, telle que tracée par l'accumulation dans les mousses terrestres, est impressionnante. Au point que certaines stations affichent une résorption complète de l'impact avec des valeurs récurrentes au-dessous de 0,1 pg OMS-TEQ/g. Toutefois, il est essentiel de souligner que le dispositif de suivi reste cohérent et efficace, en ce sens que les incidences comparativement les plus élevées sont relevées au droit des complexes industriels en activité et qu'un pic de contamination a été identifié en 2019 à Leudelange, sous les vents dominants de l'incinérateur du SIDOR.

4.4. Zinc (Zn)

Le Zn apparaît très clairement comme un traceur spécifique des activités industrielles du bassin sidérurgique (**tableau 3**). A Schifflange, l'arrêt de la production en 2011 a provoqué une césure spectaculaire, même si un « effet de mémoire », lié à la mobilisation de poussières contaminées, est constaté à l'emplacement le plus exposé (Cité *Um Benn*) sur une période additionnelle de cinq ans, soit jusqu'en 2016. Aux autres sites, les concentrations les plus élevées ont distinctement été relevées au début du suivi avec un maximum à 1.500 µg/g à Differdange en 2000. Dans la suite, le Zn maintient un caractère persistant d'impact chronique aux trois stations situées sous l'influence directe des sites industriels en activité à Esch-sur-Alzette et à Differdange avec une majorité de diagnostics de contamination forte (rouge). Notons encore que le décrochage à Rodange vers des niveaux jugés faibles (vert) s'est produit dès 2006.

Aux trois emplacements de la typologie B, les retombées de Zn sont comparativement plus élevées à Leudelange, sous l'influence de l'incinérateur du SIDOR, qu'à Bettembourg en tant qu'agglomération en marge du bassin industriel et qu'à Wiltz où les activités industrielles ne sont pas émettrices de Zn. En 25 ans, la contamination diffuse de l'environnement, tracée aux emplacements de référence rurale (typologie C), a diminué d'environ 50 µg/g dans les années 1996 à 1999 à environ 30 µg/g à partir de 2015.

Tableau 3.

Evolution des concentrations en Zn dans les bryophytes terrestres du réseau national de biosurveillance entre 1996 et 2020 ; application d'une grille de qualité à trois niveaux.

Station de collecte	19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08
A													
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	260	320	380	620	450	429	1420	726	362	413	947	715	678
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	-	-	-	-	-	171	640	284	152	182	350	294	366
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	-	-	-	-	180	162	250	156	126	102	214	268	288
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	210	210	180	200	160	131	172	175	89	171	188	131	153
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	410	270	400	290	340	238	352	200	167	150	401	499	312
Differdange - Cités Thomas/Grey	430	630	560	1400	1500	345	395	336	279	311	486	459	361
Differdange - Contournement N31	-	-	-	-	250	285	600	267	316	192	536	268	276
Rodange - A la Siôle	-	-	-	-	-	136	212	156	111	132	119	104	63
Rodange - Cité Huberty	-	-	-	-	-	97	124	97	73	190	88	50	69
B													
Bettembourg	-	94	75	83	68	57	74	68	46	48	77	59	64
Leudelage (SIDOR)	-	110	94	120	97	73	74	71	60	63	104	67	71
Wiltz	-	77	46	57	41	45	59	51	30	44	55	40	57
C													
Osweiler	55	56	46	55	46	27	39	39	30	33	39	42	50
Beckerich	64	54	49	43	36	42	45	40	27	25	36	37	37
Nospelt	-	-	-	-	-	-	-	38	34	31	51	31	41

Station de collecte	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20
A												
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	390	982	440	150	209	206	119	133	75	69	63	63
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	189	284	181	110	110	108	77	63	56	52	68	38
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	127	278	135	108	81	108	68	52	54	72	55	46
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	97	262	164	120	142	221	134	75	110	91	97	65
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	156	302	362	390	361	555	423	289	260	182	189	169
Differdange - Cités Thomas/Grey	242	258	305	380	188	180	239	233	221	254	646	142
Differdange - Contournement N31	240	280	230	290	191	159	214	146	217	201	193	87
Rodange - A la Siôle	66	79	78	80	67	82	62	57	55	59	53	31
Rodange - Cité Huberty	41	68	65	112	62	58	40	46	41	47	39	39
B												
Bettembourg	57	52	52	70	42	-	-	-	-	-	-	-
Leudelage (SIDOR)	6,1	82	66	73	59	66	-	52	55	-	-	-
Wiltz	37	65	40	43	30	56	-	43	29	-	-	-
C												
Osweiler	28	29	36	45	26	-	-	-	-	-	-	-
Beckerich	28	44	35	38	39	34	25	27	25	33	34	23
Nospelt	34	46	44	41	52	35	26	25	27	33	39	27

	Grille de qualité
Référence	40
Contamination avérée (seuil 1)	120
Contamination forte (seuil 2)	200

4.5. Plomb (Pb)

Le Pb présente un profil de contamination dans l'espace et dans le temps intermédiaire à ceux des PCDD/PCDF et du Zn (**tableau 4**). Ce métal lourd est incontestablement un traceur spécifique des activités sidérurgiques avec des concentrations élevées dans la durée. Toutefois, une tendance lourde à la diminution de l'impact est indiquée par le fait qu'au droit des sites industriels en activité à Esch-sur-Alzette et à Differdange un diagnostic de contamination forte (rouge) n'est plus constaté depuis 2018. Les trois dernières séries annuelles (2018 à 2020) tendent même vers une résorption progressive de l'impact du Pb. Aux stations de Schifflange, la diminution des incidences a été comparablement lente, soulignant ainsi le caractère historique du Pb à l'égard de l'industrie lourde. A Rodange, le décrochage a été précoce, puisque des teneurs supérieures à 10 µg/g n'y sont plus relevées depuis 2005.

En faisant abstraction des résultats manifestement hors champ (*outliers*), l'évolution des concentrations de Pb dans les mousses collectées aux stations spécifiques (typologie B) et aux références rurales (typologie C) trace la régression de la contamination diffuse du Pb dans l'environnement atmosphérique. A partir de concentrations autour de 5 à 10 µg/g dans les années 1996 à 2000, les niveaux ont diminué entre 1 et 2 µg/g à partir de 2012 et tendent à tomber sous la barre de 1 µg/g en 2019 et en 2020.

En s'appuyant sur la totalité de l'évolution en 25 ans, le bilan du Pb dans les bryophytes montre que les retombées actuelles au sein du bassin industriel sont équivalentes à celles de la contamination diffuse de l'environnement au début du suivi.

4.6. Chrome (Cr)

Le Cr est un métal trace intimement lié aux rejets atmosphériques à travers tout le bassin industriel (**tableau 5**). Alors que les campagnes annuelles de 1999 à 2001, puis de 2004 et 2005 laissaient entrevoir une diminution des incidences, une chronicité s'établit à partir de 2006 au droit des principaux émetteurs. A Schifflange, cette évolution est interrompue en 2011 par l'arrêt de la production sidérurgique. Dans les zones d'impact maximum des deux sites en activité, Esch-Belval et Differdange, un diagnostic synonyme d'une contamination forte (rouge) au Cr est relevé depuis maintenant 15 ans. La dégradation progressive, focalisée pour l'essentiel sur la station des Cités Grey et Thomas à Differdange est objectivée par le fait que les teneurs les plus élevées de Cr dans les bryophytes ont été atteintes dans un passé récent, soit en 2016 avec 72 µg/g, puis en 2018 avec 64 µg/g. Précisons encore que l'impact chronique de Cr à la station du lieu-dit A la Siole à Rodange doit être mis en relation avec des émanations du crassier tout proche.

Tableau 4.

Evolution des concentrations en Pb dans les bryophytes terrestres du réseau national de biosurveillance entre 1996 et 2020 ; application d'une grille de qualité à trois niveaux.

Station de collecte	19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08
A													
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	33	40	60	27	18	17	47	58	47	41	46	49	51
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	-	-	-	-	-	8,1	19	28	19	18	22	20	26
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	-	-	-	-	7,9	8,3	14	20	17	13	16	16	18
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	24	23	25	14	7,0	5,8	14	22	12	13	12	12	10
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	44	31	70	16	18	16	19	33	29	23	45	63	32
Differdange - Cités Thomas/Grey	33	30	37	30	14	5,2	12	29	31	26	26	36	32
Differdange - Contournement N31	-	-	-	-	9,4	7,4	79	37	50	22	42	26	31
Rodange - A la Soie	-	-	-	-	-	58	14	18	12	9,6	7,7	6,4	2,7
Rodange - Cité Huberty	-	-	-	-	-	20	11	11	8,8	7,7	10	6,8	9,7
B													
Bettembourg	-	13	8,8	9,8	11	6,8	7,5	12	6,4	7,3	6,6	5,5	4,8
Leudelage (SIDOR)	-	13	11	8,9	12	2,6	7,4	12	7,3	8,9	8,7	7,8	7,2
Wiltz	-	9,7	7,5	8,0	7,1	4,0	4,6	6,9	2,7	9,6	21	3,6	5,0
C													
Osweiler	8,9	9,5	36	5,4	5,9	1,2	2,9	4,2	3,0	3,2	4,4	3,9	2,8
Beckerich	5,1	6,9	7,8	3,8	4,0	1,7	1,9	4,6	2,8	3,4	3,0	2,7	1,6
Nospelt	-	-	-	-	-	-	-	3,6	3,4	4,0	4,7	2,9	2,9

Station de collecte	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20
A												
Schifflange - Cité <i>Um Benn</i>	26	70	30	14	39	28	16	14	11	6,8	5,4	5,9
Schifflange - <i>Hedingerstrachen</i>	13	17	13	9,0	19	11	7,4	6,1	5,2	2,9	5,0	2,5
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	9,1	20	8,5	8,7	9,0	11	5,4	4,7	3,9	5,6	4,7	3,2
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	8,5	19	12	11	18	21	11	8,3	11	7,0	7,1	3,9
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	16	31	33	31	47	44	33	24	26	14	12	11
Differdange - Cités Thomas/Grey	19	22	18	22	13	14	14	15	11	13	12	6,6
Differdange - Contournement N31	26	38	16	18	18	8,2	15	11	18	14	13	6,3
Rodange - A la Soie	5,6	6,8	4,9	3,3	4,3	3,7	4,1	2,5	4,3	4,3	3,1	1,2
Rodange - Cité Huberty	2,9	5,9	5,1	3,9	3,8	2,9	2,2	2,9	7,6	4,7	2,5	2,0
B												
Bettembourg	3,8	3,8	3,5	3,6	3,7	-	-	-	-	-	-	-
Leudelage (SIDOR)	4,3	6,2	4,8	4,9	4,4	3,7	3,7	4,1	8,6	3,8	2,4	2,5
Wiltz	2,3	4,1	2,7	2,5	3,5	2,8	3,2	3,0	2,2	6,6	3,4	0,88
C												
Osweiler	1,8	2,8	2,3	1,7	2,2	-	-	-	-	-	-	-
Beckerich	1,2	2,2	2,1	1,6	2,0	1,2	1,5	2,2	1,7	1,6	1,0	0,74
Nospelt	2,7	2,9	3,1	1,6	1,7	1,3	1,1	1,6	1,4	2,0	0,93	0,72

	Grille de qualité
Référence	2,0
Contamination avérée (seuil 1)	10
Contamination forte (seuil 2)	16

Tableau 5.

Evolution des concentrations en Cr dans les bryophytes terrestres du réseau national de biosurveillance entre 1996 et 2020 ; application d'une grille de qualité à trois niveaux.

Station de collecte	19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08
A													
Schiffflange - Cité <i>Um Benn</i>	13	13	14	7,3	6,1	4,8	13	24	3,1	5,6	22	10	18
Schiffflange - <i>Hedingerstrachen</i>	-	-	-	-	-	3,4	5,7	8,9	1,4	1,9	9,6	4,2	8,0
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	-	-	-	-	3,7	3,2	5,2	11	1,7	2,4	10	4,1	8,5
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	20	8,1	8,4	4,9	2,8	4,2	5,1	20	1,4	4,0	9,1	3,8	0,5
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	32	11	8,2	5,4	15	4,2	11	28	2,8	4,9	43	31	20
Differdange - Cités Thomas/Grey	62	41	28	15	11	5,8	17	55	7,2	12	26	28	25
Differdange - Contournement N31	-	-	-	-	5,2	3,8	15	24	4,9	4,4	22	9,3	14
Rodange - A la Soie	-	-	-	-	-	13	22	19	4,9	4,2	6,6	5,8	4,2
Rodange - Cité Huberty	-	-	-	-	-	4,8	5,4	19	2,3	1,6	7,9	2,7	4,1
B													
Bettembourg	-	4,5	3,3	2,2	4,3	2,0	2,3	7,6	1,4	2,6	6,3	1,9	2,5
Leudelage (SIDOR)	-	7,5	3,9	3,4	2,2	1,9	6,0	16	2,6	3,7	7,1	3,4	4,0
Wiltz	-	4,9	5,6	5,3	18	3,2	2,1	9,2	0,8	5,6	9,1	1,3	2,1
C													
Osweiler	4,4	2,3	2,4	2,2	13	1,1	0,8	7,9	0,5	0,8	2,4	1,3	1,5
Beckerich	4,8	3,1	8,9	2,7	0,6	1,2	0,8	3,2	0,5	0,8	1,4	0,8	0,9
Nospelt	-	-	-	-	-	-	-	1,9	0,4	0,5	1,9	1,6	0,8

Station de collecte	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20
A												
Schiffflange - Cité <i>Um Benn</i>	13	14	24	6,0	9,5	5,4	12	6,6	9,5	6,4	5,3	12
Schiffflange - <i>Hedingerstrachen</i>	7,9	3,4	9,9	3,6	5,4	3,7	8,3	6,3	6,9	3,7	7,4	3,3
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	6,9	6,4	7,1	7,4	4,4	4,4	5,4	5,0	4,2	5,1	6,4	4,7
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	6,0	6,3	10	9,0	13	7,8	6,9	7,0	9,7	7,0	9,5	7,4
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	15	9,7	27	21	22	21	24	34	31	26	20	25
Differdange - Cités Thomas/Grey	24	19	41	47	32	22	47	72	39	64	54	28
Differdange - Contournement N31	21	13	19	22	27	15	16	17	30	27	23	8,9
Rodange - A la Soie	8,8	3,4	8,6	2,1	9,8	8,2	11	11	8,2	7,6	7,5	3,3
Rodange - Cité Huberty	2,6	2,3	6,9	8,9	4,0	3,4	3,7	7,1	3,6	3,4	2,7	2,5
B												
Bettembourg	2,4	1,2	3,9	3,1	3,6	-	-	-	-	-	-	-
Leudelage (SIDOR)	4,5	1,9	5,3	5,3	4,8	3,1	6,0	5,2	6,7	4,5	3,5	3,8
Wiltz	1,8	1,2	2,4	8,3	5,3	7,2	4,3	3,1	1,9	2,8	2,2	0,7
C												
Osweiler	1,9	0,8	3,0	2,7	2,4	-	-	-	-	-	-	-
Beckerich	1,0	0,6	2,1	0,9	1,7	0,8	1,5	2,1	1,6	1,1	0,9	0,7
Nospelt	2,4	0,7	2,7	1,9	1,0	0,8	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,7

	Grille de qualité
Référence	1,2
Contamination avérée (seuil 1)	7,0
Contamination forte (seuil 2)	12

Les niveaux de contamination relevés au sein du bassin industriel contrastent fortement avec les concentrations de Cr dans les échantillons des stations de référence, comprises entre 0,5 et 3 µg/g. Sur la période de 25 ans, la contamination diffuse de l'environnement a relativement peu évolué, puisque des valeurs autour de 1 µg/g ont déjà été mesurées au début des années 2000.

Aux stations de la typologie B, les teneurs en Cr sont généralement plus élevées qu'aux emplacements ruraux, pour la plupart sous la barre de 5 µg/g. Les incursions de contamination avérée (orange) sont de nature épisodique, plus fréquentes à Wiltz et à Leudelange qu'à Bettembourg.

4.7. Benzo(a)pyrène (B(a)P)

Le B(a)P se substitue ici à la somme des 4 HAP de l'Union européenne, puisque ce traceur est individualisé depuis le début du suivi, ce qui fait que, contrairement au concept plus récent des 4 HAP, une grille de qualité a été développée et tenue à jour.

L'impression optique du tableau fait état d'une période de concentrations élevées de B(a)P entre 2005 et 2011, précédée et suivie de niveaux globalement plus faibles (**tableau 6**). Dès les campagnes de 1998 à 2000, il était établi que le B(a)P, et plus généralement les HAP, ne pouvaient pas être considérés comme des traceurs spécifiques des activités industrielles, même si, de façon récurrente, des maxima annuels sont associés aux sites sidérurgiques en activité. Cette appréciation est soulignée par des valeurs élevées à Leudelange entre 1997 et 2000 ; une diminution nette et durable par la suite peut être mise en relation avec une meilleure maîtrise des rejets atmosphériques de l'incinérateur du SIDOR. La contamination chronique des mousses collectées à Wiltz n'a, pour l'instant, pas trouvé d'explication satisfaisante autre que celle de l'influence du fond géochimique.

Aux stations de référence en milieu rural, les diagnostics épisodiques (Osweiler) ou récurrents (Beckerich) de contamination avérée et forte sont complètement résorbés à partir de 2007 ; il y a de fortes présomptions que ces impacts soient liés à certaines pratiques agricoles, notamment des brûlis. Une ligne de base du B(a)P est tracée de manière nettement plus représentative à la station de Nospelt, ajoutée en 2003 dans un contexte délibérément en retrait de toute activité humaine. Encore située au-dessus de 5 ng/g entre 2009 et 2012, la teneur de fond du B(a)P dans les bryophytes s'établit entre 2 et 3 ng/g de 2015 à 2019.

L'amélioration d'ensemble de la qualité de l'environnement en matière de contamination par les HAP entre 2014 et 2020 par rapport à la période 2006 à 2013 pourrait s'expliquer par une synergie d'effets dont les principaux seraient : des efforts de dépollution du secteur industriel, une amélioration des carburants et des motorisations dans le secteur des transports, une montée en gamme des chaudières dans le chauffage collectif et individuel et des évolutions dans les pratiques agricoles.

Tableau 6.

Evolution des concentrations en B(a)P dans les bryophytes terrestres du réseau national de biosurveillance entre 1996 et 2020 ; application d'une grille de qualité à trois niveaux.

Station de collecte	19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08
A													
Schiffflange - Cité <i>Um Benn</i>	255	158	62	1,7	36	25	31	29	47	37	71	21	34
Schiffflange - <i>Hedingerstrachen</i>	-	-	-	-	-	26	76	98	44	82	259	31	44
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	-	-	-	-	16	21	14	17	20	14	40	11	29
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	86	98	20	10	24	26	34	42	26	35	50	18	29
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	40	37	20	18	15	19	47	33	20	29	283	31	52
Differdange - Cités Thomas/Grey	53	36	27	24	22	30	3,7	39	16	47	60	20	241
Differdange - Contournement N31	-	-	-	-	20	15	26	21	29	26	83	15	36
Rodange - A la Soie	-	-	-	-	-	11	11	8,7	7,6	9,3	7,4	7,6	5,0
Rodange - Cité Huberty	-	-	-	-	-	17	9,4	9,0	12	17	29	15	14
B													
Bettembourg	68	24	13	14	7,3	6,0	15	14	13	24	64	14	9,7
Leudelange (SIDOR)	-	120	87	70	45	4,4	7,2	5,0	3,9	11	15	6,5	10
Wiltz	-	165	17	18	49	310	59	100	28	73	55	30	80
C													
Osweiler	9,1	10	69	7,0	7,6	28	6,7	4,1	3,1	48	11	9,7	6,7
Beckerich	28	56	17	33	8,9	2,1	6,2	1,4	4,8	9,0	19	4,5	5,6
Nospelt	-	-	-	-	-	-	-	2,1	2,2	5,5	5,1	3,8	4,8

Station de collecte	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20
A												
Schiffflange - Cité <i>Um Benn</i>	34	78	42	45	177	14	28	23	34	28	28	22
Schiffflange - <i>Hedingerstrachen</i>	146	93	106	39	21	19	16	15	17	14	31	7,1
Esch-Lallange - <i>Am Pudel</i>	23	40	25	16	13	10	11	14	15	19	33	6,5
Esch - Quartier <i>Raemerich</i>	20	32	54	20	37	13	8,0	8,2	17	16	20	7,5
Esch - cité jardinière <i>An Elsebrech</i>	51	80	83	81	29	20	33	26	24	26	20	13
Differdange - Cités Thomas/Grey	51	107	40	19	40	11	9,4	12	12	8,5	14	4,1
Differdange - Contournement N31	41	67	28	30	20	13	14	23	49	18	19	13
Rodange - A la Soie	11	11	13	18	8,6	215	4,3	8,7	4,7	4,4	4,4	2,7
Rodange - Cité Huberty	19	35	43	13	8,6	6,9	6,0	7,2	3,6	3,8	6,3	5,6
B												
Bettembourg	20	28	22	19	12	-	-	-	-	-	-	-
Leudelange (SIDOR)	10	17	14	3,5	4,8	2,0	3,9	4,1	3,5	6,4	4,5	2,6
Wiltz	85	66	47	45	34	4,5	70	41	30	65	61	6,2
C												
Osweiler	7,1	9,3	12	8,8	6,5	-	-	-	-	-	-	-
Beckerich	3,4	11	12	8,3	5,5	9,9	5,3	5,5	3,5	5,4	4,3	1,5
Nospelt	6,4	6,5	8,1	5,5	3,4	4,6	2,6	2,4	2,5	2,1	2,7	< 1,5

	Grille de qualité
Référence	7,5
Contamination avérée (seuil 1)	18
Contamination forte (seuil 2)	32

5. EVOLUTION DE LA CONTAMINATION DIFFUSE

5.1. Principe et objectifs

Pour mieux appréhender dans le détail les évolutions dans le temps, il est judicieux de s'intéresser de façon ciblée à la contamination de l'environnement d'origine diffuse. Cet impact diffus, c'est-à-dire qui provient d'une addition de multiples sources, est évalué aux stations situées en milieu rural, en l'absence de toute source d'émission locale directe.

Pour illustrer cette dimension du diagnostic, c'est la station de Beckerich qui est retenue. L'emplacement de collecte de bryophytes présente l'avantage d'être situé dans l'emprise de la source d'eaux minérales. Cette station a été maintenue dans le dispositif durant la totalité de la période de suivi. Les résultats présentés correspondent aux contaminants environnementaux qui révèlent les indications les plus intéressantes.

5.2. Plomb (Pb)

Les teneurs en Pb dans les bryophytes collectées à la station de Beckerich diminuent de façon progressive, à partir de valeurs autour de 6 µg/g dans les années 1996 à 1998 à environ 1 µg/g en 2019 et en 2020 (**figure 4**). Les premières années du suivi sont encore marquées par les carburants au Pb (de tétra-éthyl), définitivement interdits dans l'Union européenne à partir de 2001. La dernière décennie reflète surtout les efforts de dépollution du secteur industriel.

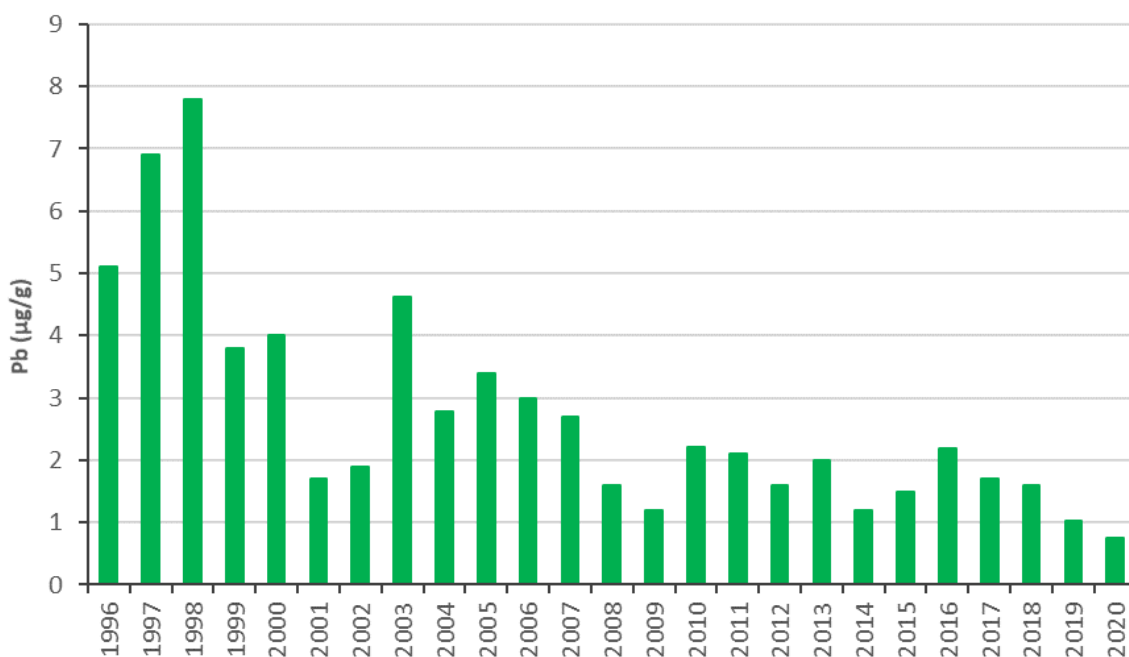


Figure 4.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en Pb dans les bryophytes terrestres à la station de référence rurale de Beckerich.

Le profil dans le temps est distinctement marqué par les crises économiques de 2001-2002, puis de 2008 et, dans une moindre mesure, de 2014-2015, avec, chaque fois, un léger décalage dans le temps. Ce constat illustre la sensibilité de la méthode à des changements du niveau de contamination dans le milieu ambiant.

5.3. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)

L’empreinte d’impact dans le temps des PCDD/PCDF est différente de celle du Pb (**figure 5**). Hormis une stabilisation de la concentration dans les mousses autour de 0,4 pg OMS-TEQ/g entre 2009 et 2013, il est difficile d’identifier une tendance lourde. En particulier, les différentes crises économiques ne sont pas objectivables dans le profil.

Deux explications complémentaires peuvent être envisagées. D’abord, au début du programme (1996 à 2005), les procédures analytiques des PCDD/PCDF étaient nettement moins sensibles qu’actuellement. De ce fait, des concentrations faibles, soit entre 0,4 et 0,8 pg OMS-TEQ/g, peuvent ne pas être significativement différentes avec la conséquence que des variations à l’intérieur de cette amplitude seraient masquées. Ensuite, le suivi à la station de Beckerich a été abandonné à partir de 2014, en raison d’une part des faibles variations relevées entre 2009 et 2013 et, d’autre part, des moyens budgétaires disponibles. Dès lors, une (éventuelle) baisse de la contamination diffuse par les PCDD/PCDF n’est pas documentée.

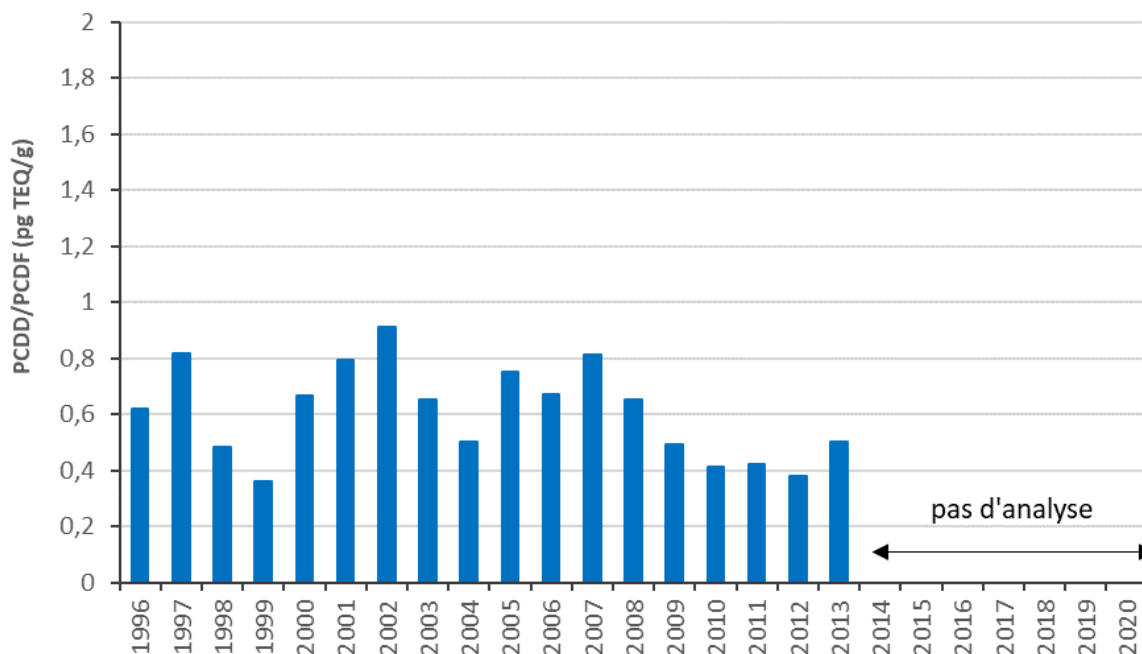


Figure 5.

Evolution entre 1996 et 2013 des concentrations en PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres à la station de référence rurale de Beckerich.

5.4. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP (somme arithmétique des 4 HAP de l'Union européenne) présentent un profil temporel proche de celui du Pb (**figure 6**). Comme ces substances sont majoritairement générées lors de processus de combustion, principalement des énergies fossiles, l'impact des crises économiques de 2001-2002 et de 2007-2008 est tout à fait apparent. Sur le long terme, la baisse des concentrations de HAP dans le compartiment atmosphérique est à mettre au crédit des efforts menés à l'échelle communautaire. Notons encore que les fortes variations interannuelles relevées au début du programme peuvent être attribuées, du moins en partie, à des faiblesses au niveau des procédures analytiques.

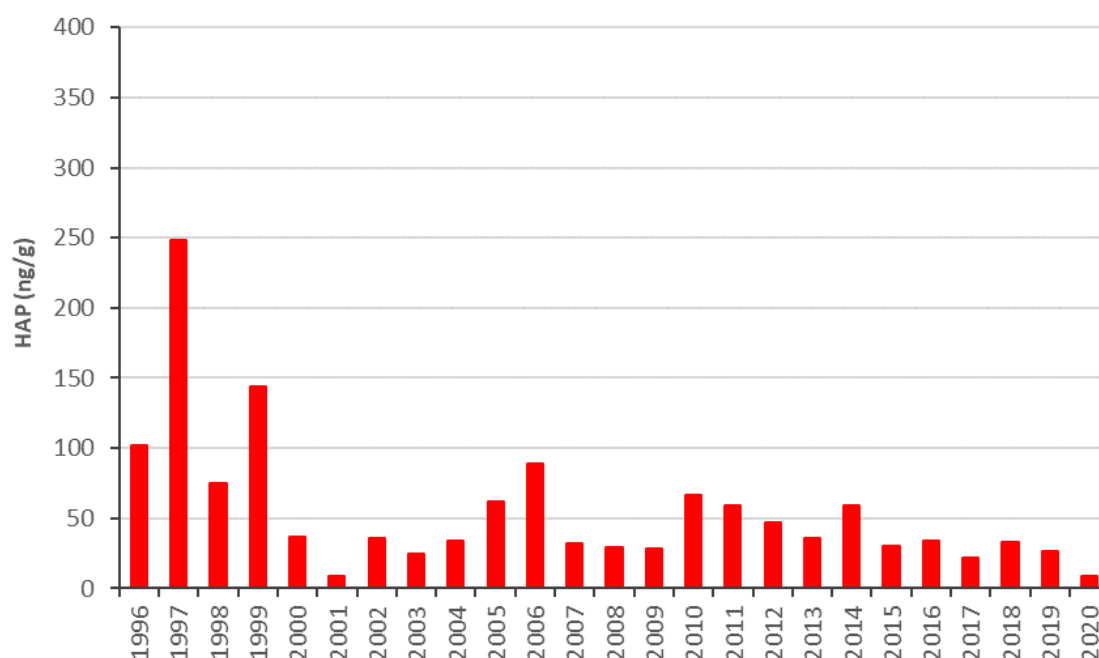


Figure 6.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en HAP dans les bryophytes terrestres à la station de référence rurale de Beckerich.

6. EVOLUTION DES IMPACTS A L'ECHELLE NATIONALE

6.1. Principe et objectifs

Pour suivre l'évolution de l'impact des contaminants environnementaux sur la totalité du réseau national, il est indispensable d'appliquer une méthode de synthèse des données afin de maintenir une lisibilité suffisante des représentations graphiques. La solution qui s'est avérée la plus judicieuse consiste à diviser la période de suivi de 25 ans en cinq blocs de cinq années successives, en considérant chaque fois la valeur moyenne. Dans cette configuration, tous les

blocs ne sont pas représentés à chaque station, en raison soit d'un début de suivi retardé (bloc 1996-2000), soit de la décision d'un arrêt de certaines analyses (bloc 2016-2020).

6.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)

A la plupart des stations qui présentent un suivi complet (1996-2020), les concentrations les plus élevées de PCDD/PCDF sont relevées au début du suivi (1996-2000 et/ou 2001-2005) et les plus faibles dans la période du dernier bloc de cinq ans (2016-2020) (**figure 7**). Ce constat objective une diminution d'ensemble des retombées atmosphériques et, dès lors, de la contamination du compartiment atmosphérique par les PCDD/PCDF.

Schiffflange (Cité *Um Benn*) ressort nettement du profil spatio-temporel par les niveaux de contamination les plus importants. La rupture entre le bloc 2006-2010 et celui de 2011-2015 est brutale, du fait que la production sidérurgique a été arrêtée fin 2011. L'amélioration de la qualité environnementale s'est propagée aux deux stations co-impactées, d'une part au lieu-dit *Hedingerstachen* à Schiffflange et au lieu-dit *Am Pudel* à Esch-sur-Alzette.

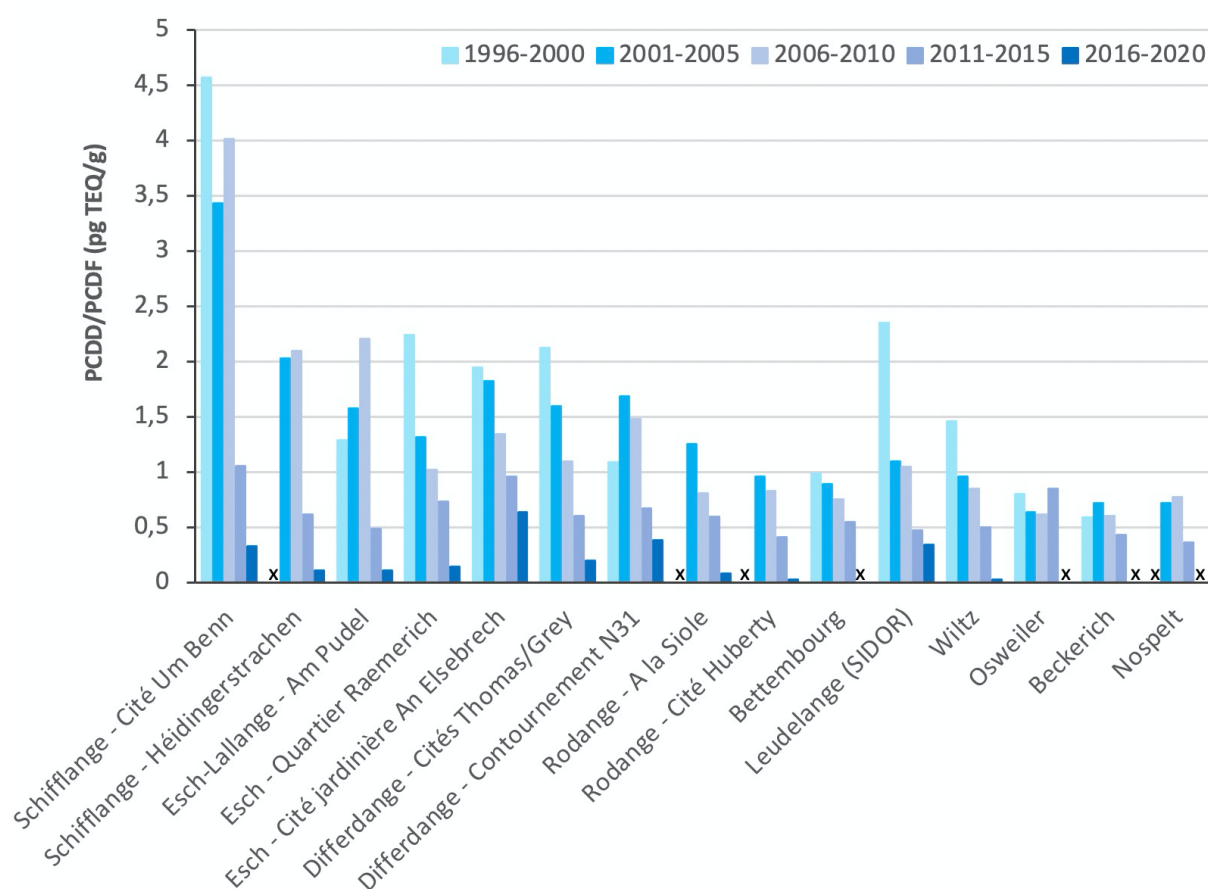


Figure 7.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres à l'ensemble des stations du réseau national.

x : pas de données ou données incomplètes pour former les moyennes sur cinq années successives

Aux autres emplacements du réseau, indépendamment de leur localisation, la diminution des teneurs en PCDD/PCDF dans les bryophytes a été plus progressive. La régularité de l'amélioration enregistrée au fil du temps est même remarquable aux stations situées sous l'influence directe d'émetteurs, que ce soit à Esch-sur-Alzette (cité jardinière *An Elsebrech*), à Differdange, à Leudelange (SIDOR) ou à Wiltz. A tel point que l'impact prend un caractère résiduel dans le bloc 2016 à 2020 par comparaison aux périodes précédentes.

6.3. Plomb (Pb)

Les teneurs en Pb dans les bryophytes suivent une tendance équivalente à celle des PCDD/PCDF (**figure 8**). Toutefois, deux différences marquantes doivent être relevées : d'une part la baisse de la contamination est plus tardive et, d'autre part, elle est moins prononcée aux stations impactées par des activités industrielles. Dès lors, il faut admettre que la réduction des émissions est plus efficace vis-à-vis des PCDD/PCDF que vis-à-vis du Pb.

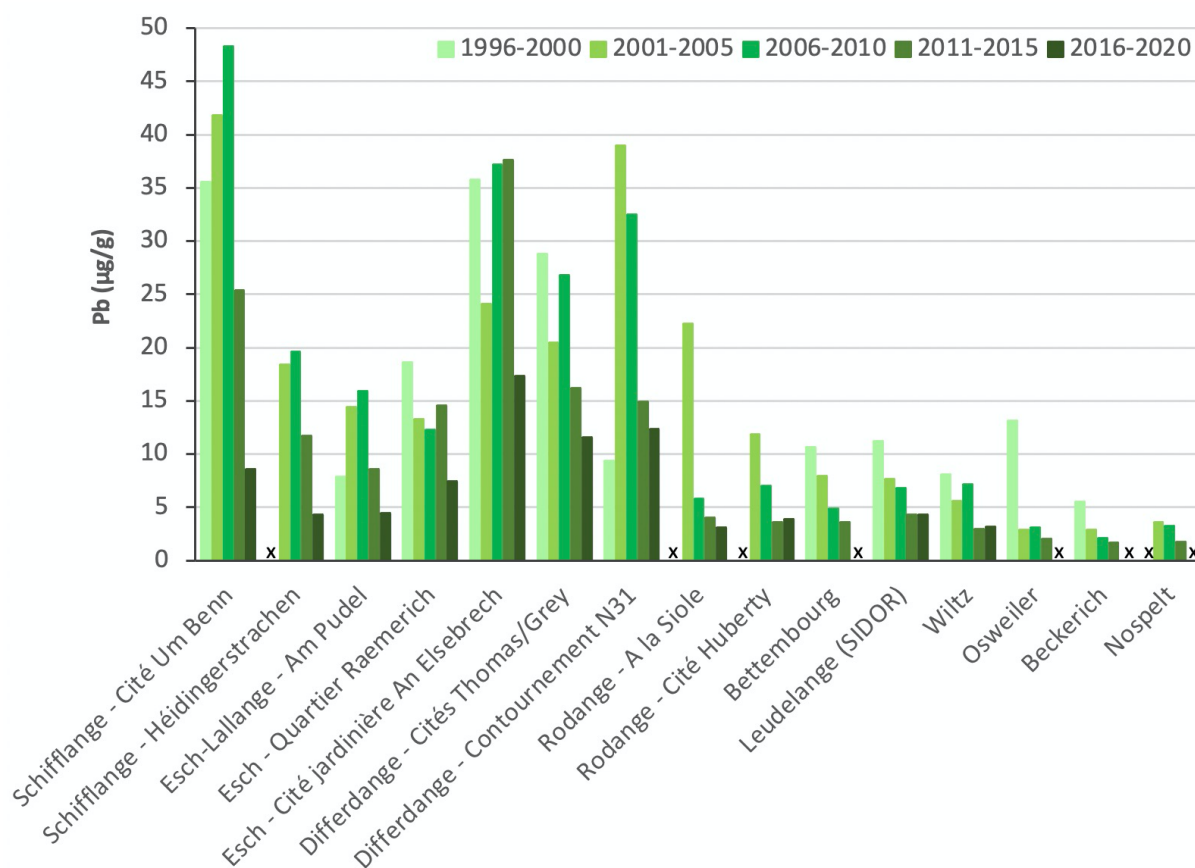


Figure 8.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en Pb dans les bryophytes terrestres à l'ensemble des stations du réseau national.

x : pas de données ou données incomplètes

En faisant abstraction de la situation de Schifflange, marquée de façon décisive par la fermeture du complexe sidérurgique en 2011, la diminution des retombées apparaît

proportionnellement plus importante aux stations situées à l'extérieur du bassin sidérurgique qu'aux emplacements de suivi à Esch-sur-Alzette et à Differdange. Ce constat manifeste l'impact actuel des activités industrielles.

Dans ce contexte, il est particulièrement intéressant de souligner que les teneurs récentes de Pb dans les mousses (2016-2020) au droit des sites sidérurgiques en activité sont proches des concentrations relevées aux stations situées à l'extérieur du bassin industriel au début du programme (1996-2000). Cette appréciation, déjà mentionnée plus haut (voir 4.5), illustre de façon convaincante les efforts de dépollution accomplis par le secteur industriel.

6.4. Zinc (Zn)

Au regard du contraste spatio-temporel du profil, le Zn ressort comme un traceur typique des activités sidérurgiques (**figure 9**). Alors que les concentrations sont restées stables aux stations de référence rurale (Osweiler, Beckerich, Nospelt) durant la totalité de la période du suivi (1996-2020), une diminution progressive est intervenue aux emplacements de la typologie B (Bettembourg, Leudelange, Wiltz), tout comme à Rodange. En revanche, l'impact

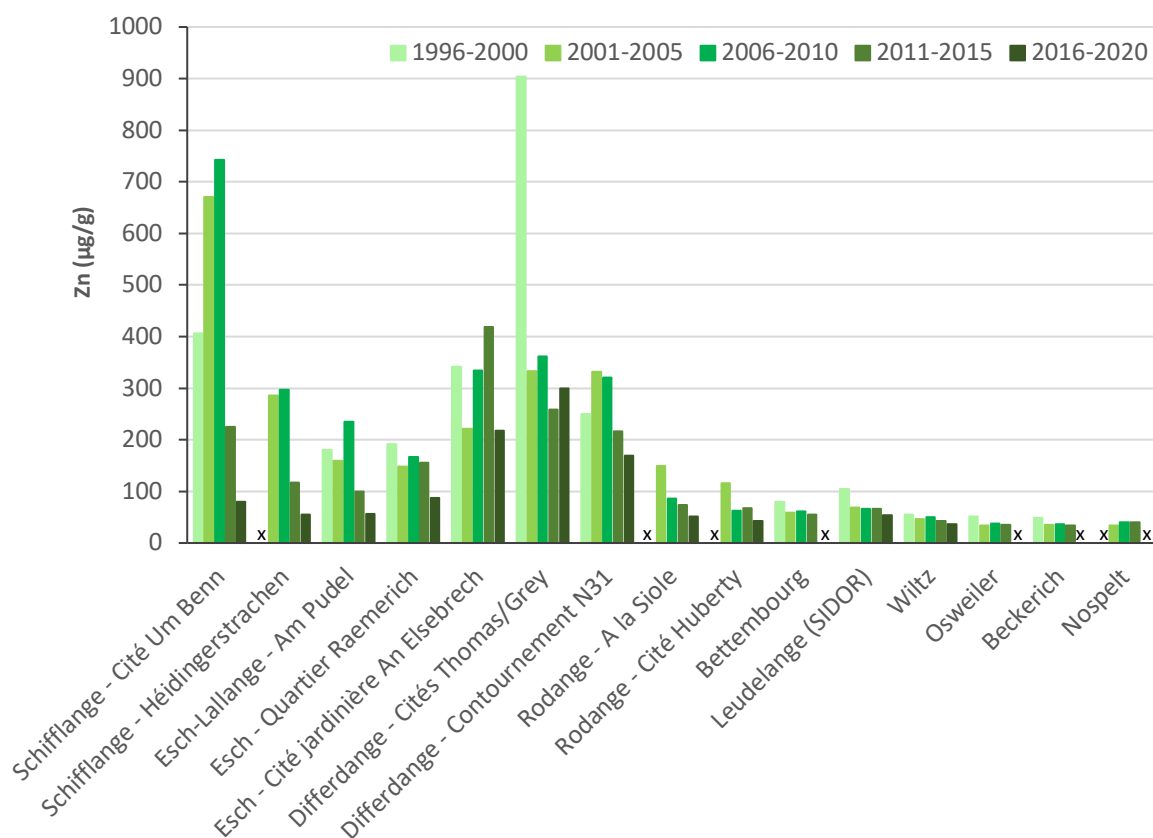


Figure 9.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en Zn dans les bryophytes terrestres à l'ensemble des stations du réseau national.
x : pas de données ou données incomplètes

se maintient de façon chronique aux postes de suivi influencés par les activités industrielles à Esch-sur-Alzette et à Differdange. Comme pour les autres contaminants, le Zn trace de façon rigoureuse l'amélioration de la qualité environnementale intervenue à Schiffflange, suite à l'arrêt de la production sidérurgique en 2011.

6.5. Cadmium (Cd)

Le cas du Cd est intermédiaire entre ceux du Pb et du Zn, en ce sens qu'il présente des caractéristiques d'évolution des deux métaux précédents (**figure 10**). D'une part, les niveaux de contamination restent stables au droit des sites sidérurgiques en activité à Esch-sur-Alzette et à Differdange et, d'autre part, les concentrations décrivent des diminutions progressives aux stations des typologies B et C. A ce titre, il faut particulièrement relever la tendance durable d'une baisse proportionnellement importante des retombées de Cd à Leudelage (SIDOR), à Wiltz et à Rodange. Comme pour les autres traceurs, la chute des concentrations de Cd aux stations de Schiffflange est impressionnante, même si les teneurs du bloc le plus récent (2016-2020) se maintiennent encore bien au-dessus des niveaux des sites de référence.

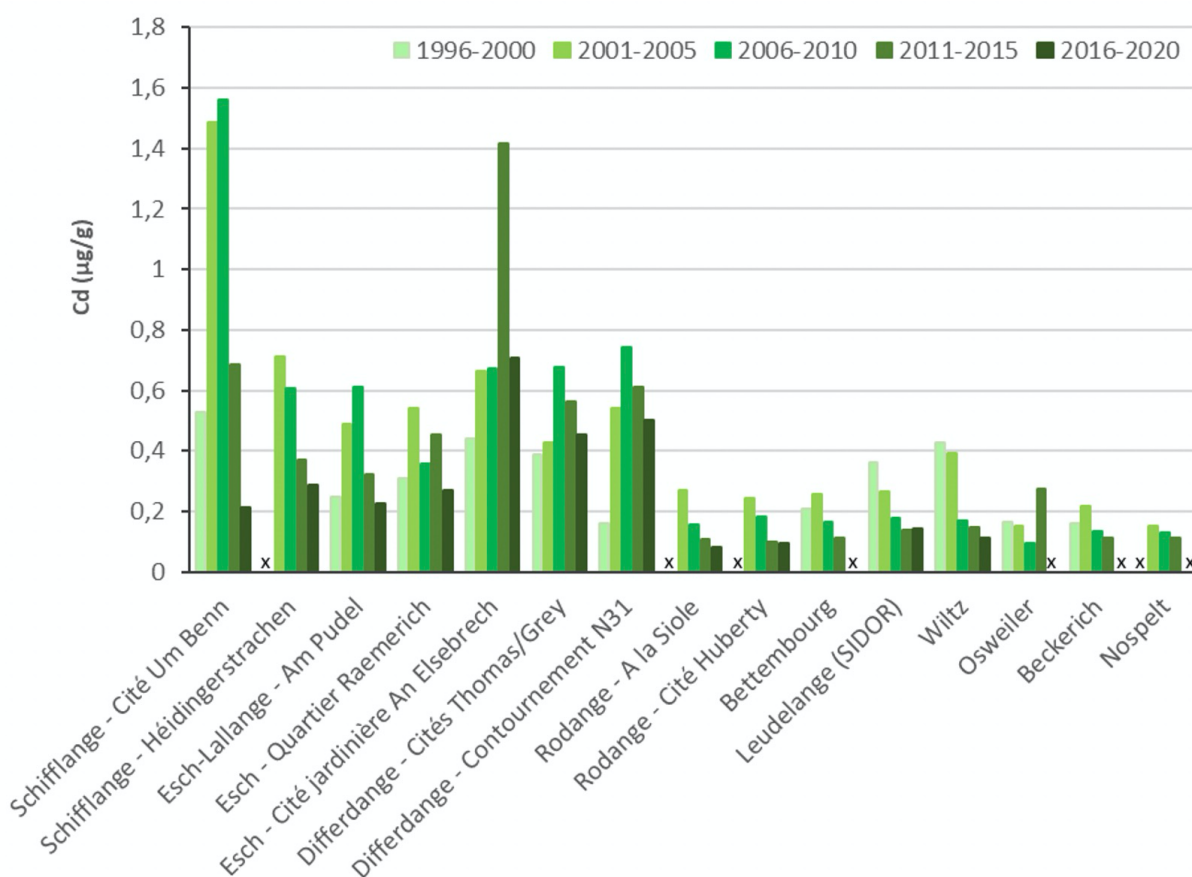


Figure 10.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en Cd dans les bryophytes terrestres à l'ensemble des stations du réseau national.

x : pas de données ou données incomplètes

Ce résidu d'impact est avantagement attribué aux activités engendrées par la cessation de la production, éventuellement le démontage des infrastructures sidérurgiques. L'origine du Cd est alors le réenvol de poussières contaminées.

6.6. Chrome (Cr)

Parmi les métaux lourds et métaux traces, le Cr se distingue nettement par des caractéristiques et une évolution spatio-temporelle très différentes (**figure 11**). D'abord, contrairement aux quatre contaminants précédents (PCDD/PCDF, Pb, Zn, Cd), le Cr n'a historiquement pas été un traceur des activités industrielles du complexe sidérurgique d'Esch-Schifflange. Ensuite, constat nettement plus marquant, le Cr s'inscrit dans une tendance confirmée à une amplification de la contamination environnementale, donc à une augmentation des rejets industriels dans l'air ambiant. Cette évolution se vérifie distinctement aux emplacements les plus exposés aux complexes industriels à Differdange et à Esch-sur-Alzette. La plupart des autres stations se caractérisent par une diminution des retombées de Cr au début du suivi (1996-2000), puis d'une relative stabilité (2001-2020).

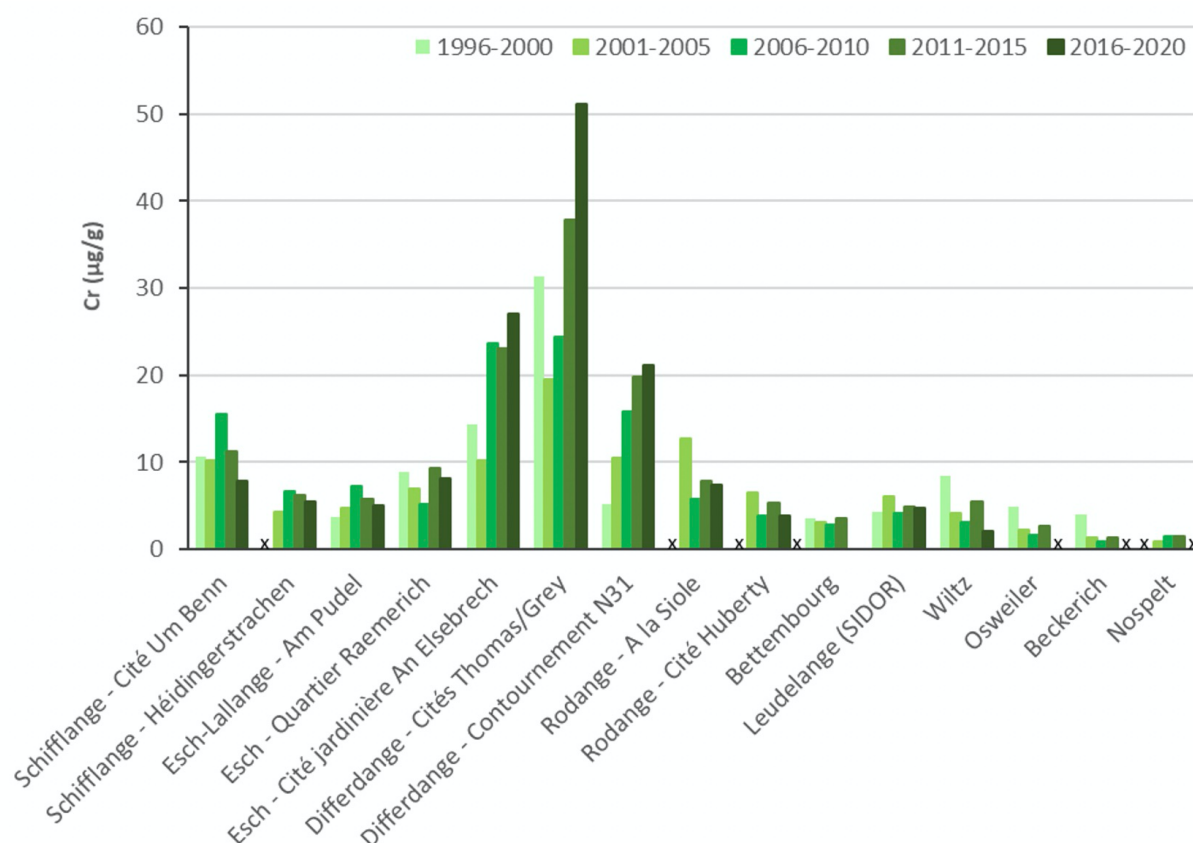


Figure 11.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en Cr dans les bryophytes terrestres à l'ensemble des stations du réseau national.
x : pas de données ou données incomplètes

6.7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

L’empreinte spatio-temporelle des HAP aux 15 stations du réseau montre que les retombées reflètent avant tout le caractère urbain de l’environnement, sans toutefois exclure une composante industrielle (mineure) aux stations de Schiffflange, d’Esch-sur-Alzette et de Differdange (**figure 12**). Malgré des données moyennées sur des blocs de cinq ans, de fortes fluctuations apparaissent à la plupart des emplacements. Ces variations sont difficiles à expliquer, sinon par des facteurs d’ordre météorologique ou des faiblesses analytiques.

Deux constats particuliers méritent d’être relevés. Il s’agit d’abord de l’anomalie flagrante à Wiltz. Etant donné que de fortes concentrations en HAP dans les bryophytes sont récurrentes, malgré des mesures d’assurance qualité lors des phases de prélèvement et de préparation des échantillons, il est pertinent d’attribuer la contamination, du moins en partie, à une composante géochimique. Ensuite, le contraste entre les sites urbains et industriels, d’une part, et les références rurales, d’autre part, est optiquement bien perceptible et a tendance à se creuser. Ce constat souligne que les zones rurales sont nettement moins exposées aux HAP, malgré le caractère ubiquitaire de ceux-ci.

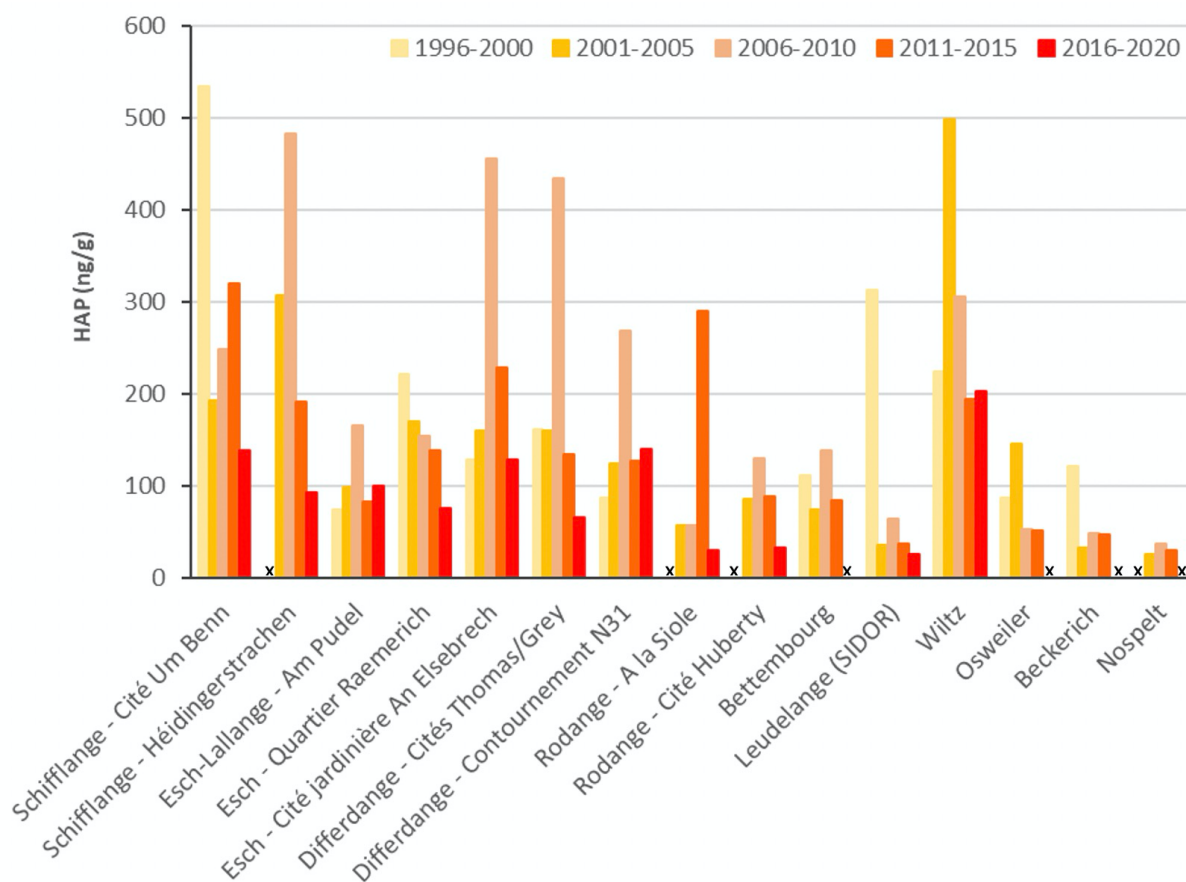


Figure 12.

Evolution sur des intervalles de cinq ans (valeurs moyennes) entre 1996 et 2020 des concentrations en HAP dans les bryophytes terrestres à l’ensemble des stations du réseau national.

x : pas de données ou données incomplètes

7. IMPACT AU DROIT DES CENTRES INDUSTRIELS

7.1. Principe et objectifs

Dans l'idée de départ du réseau bryophytique, l'un des principaux objectifs consistait à suivre l'évolution à moyen terme des retombées atmosphériques de contaminants au droit des grands centres industriels. Pour affiner cet aspect particulier, les données des trois stations situées en zone d'impact maximum des complexes sidérurgiques de Schifflange (Cité *Um Benn*), d'Esch-sur-Alzette (cité jardinière *An Elsebrech*) et de Differdange (Cités Sidney Thomas et Henry Grey) ont été extraites et placées sur un axe temporel de 1996 à 2020. La station rurale de Beckerich est ajoutée en tant que repère de comparaison.

7.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)

Entre 1997 et 2011, le profil est distinctement marqué par l'impact des PCDD/PCDF à Schifflange (**figure 13**). Très logiquement, les teneurs chutent dès 2012, à la suite de l'arrêt de la production en octobre 2011. Toutefois, un niveau de fond se maintient jusqu'en 2016, voire

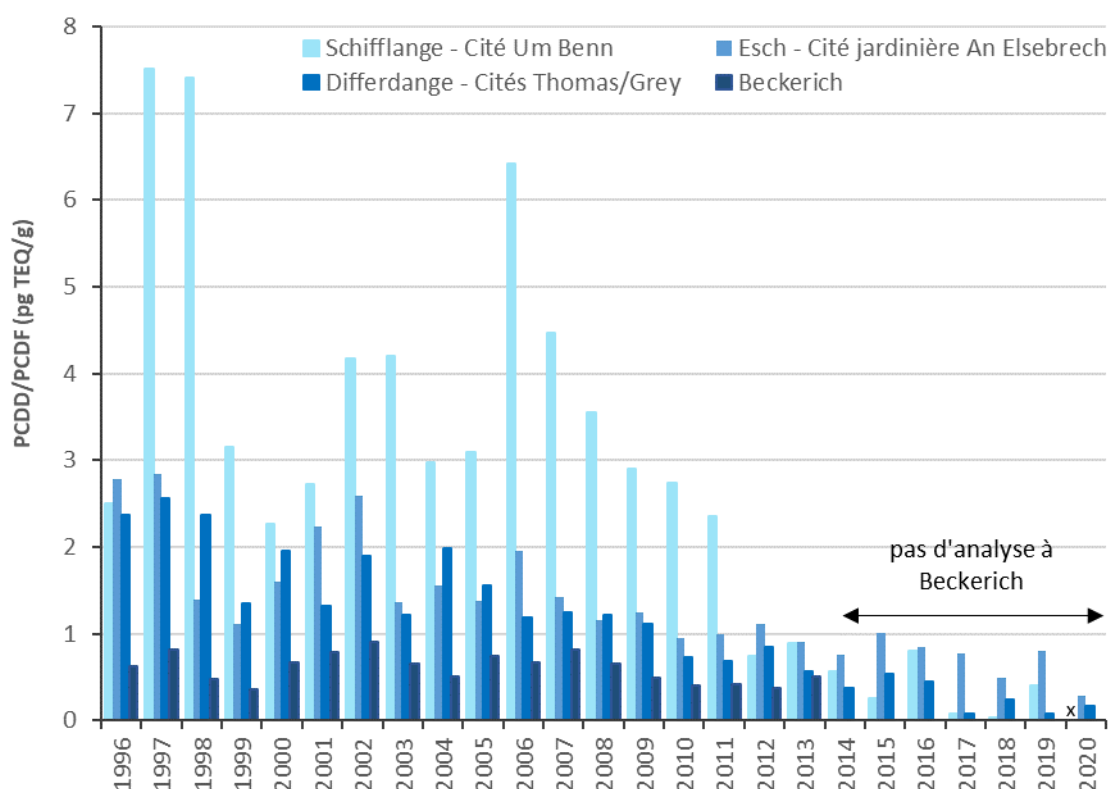


Figure 13.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres au droit des trois grands centres sidérurgiques et comparaison avec la station de référence de Beckerich.
x : pas de donnée

en 2019, ce qui indique la persistance d'une contamination locale à caractère diffus, certainement en lien avec la mobilisation de poussières à partir de l'ancien site sidérurgique.

Lors de la plupart des campagnes annuelles, l'impact est légèrement plus important à Esch-sur-Alzette qu'à Differdange. Entre 1996 et 2002, la barre des 2 pg TEQ/g est franchie de façon récurrente. Les valeurs passent ensuite progressivement sous le seuil de 1 pg TEQ/g, pour tendre de plus en plus vers des niveaux résiduels. Ainsi, l'impact mesuré à partir de 2017 au droit des centres industriels est proche de celui de la contamination diffuse relevée en milieu rural sur l'ensemble de la période de suivi. Cette appréciation illustre les résultats accomplis en terme de réduction de la pollution environnementale par les PCDD/PCDF.

7.3. Plomb (Pb)

Le graphique fait ressortir le Pb comme un traceur incontestable de l'impact de la contamination occasionnée par le secteur de la sidérurgie, tant le contraste vis-à-vis de la station rurale de Beckerich est quantitativement important et durable dans le temps (**figure 14**). Le profil exprime également de façon nette les effets des crises économiques de 2001-2002, puis de 2008-2009 (voir 5.2).

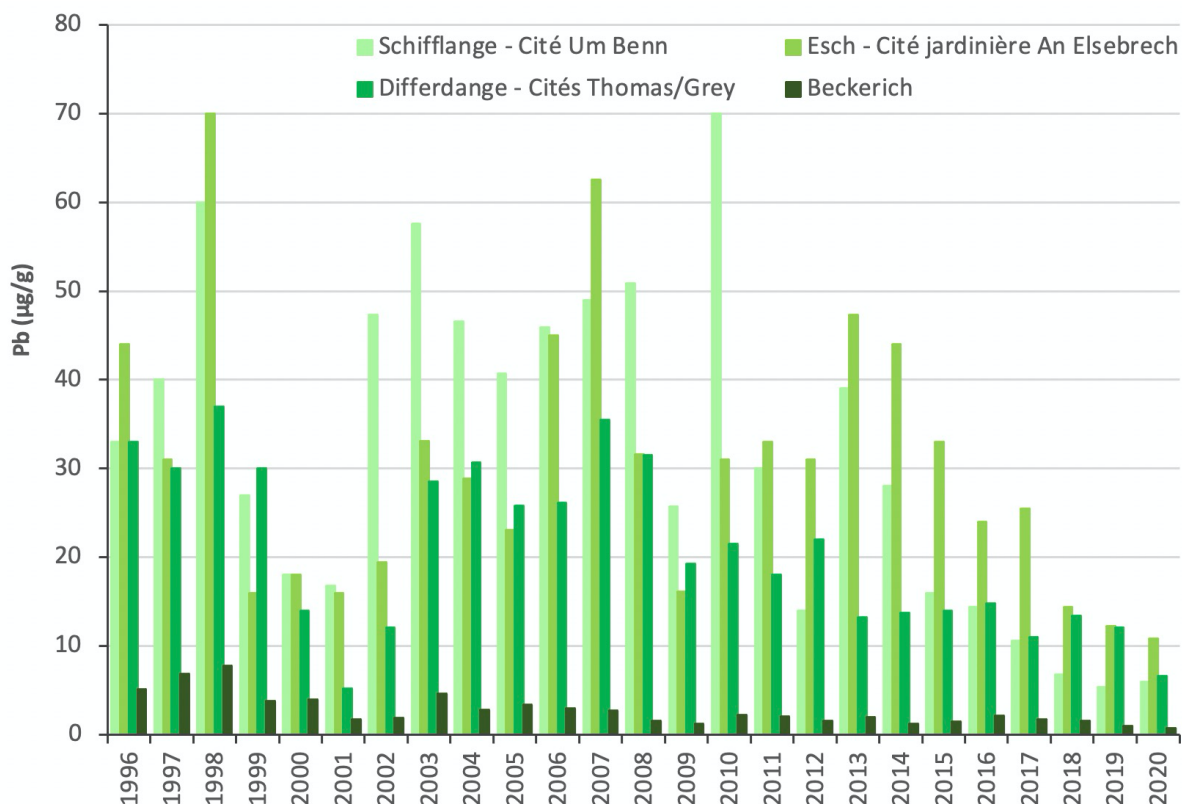


Figure 14.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en Pb dans les bryophytes terrestres au droit des trois grands centres sidérurgiques et comparaison avec la station de référence de Beckerich.

Comme pour les PCDD/PCDF, le profil est fortement marqué par la station de Schifflange avant la fermeture en 2011. A Esch-sur-Alzette, des impacts accrus sont relevés entre 1996 et 1998, puis en 2006 et en 2007. Après une nouvelle augmentation en 2013, une baisse plus ou moins régulière intervient pour atteindre un minimum historique en 2020.

A quelques exceptions près, les retombées de Pb ont été comparablement plus faibles à Differdange qu'aux deux autres emplacements industriels. Le niveau d'impact a évolué de 1996 à 2008 dans une gamme située grossièrement entre 20 et 30 µg/g, pour se rapprocher de plus en plus de la barre des 10 µg/g entre 2009 et 2019. La campagne de 2020 marque un plancher historique, tout en restant très nettement au-dessus de la référence rurale de Beckerich.

7.4. Cadmium (Cd)

Dans la seconde moitié du suivi, le profil du Cd est d'abord dominé par des retombées élevées à Schifflange entre 2007 et 2010, puis à Esch-sur-Alzette de 2013 à 2015 (**figure 15**). A partir de 2013, la régression progressive de l'impact du Cd suit un profil étonnamment proche de

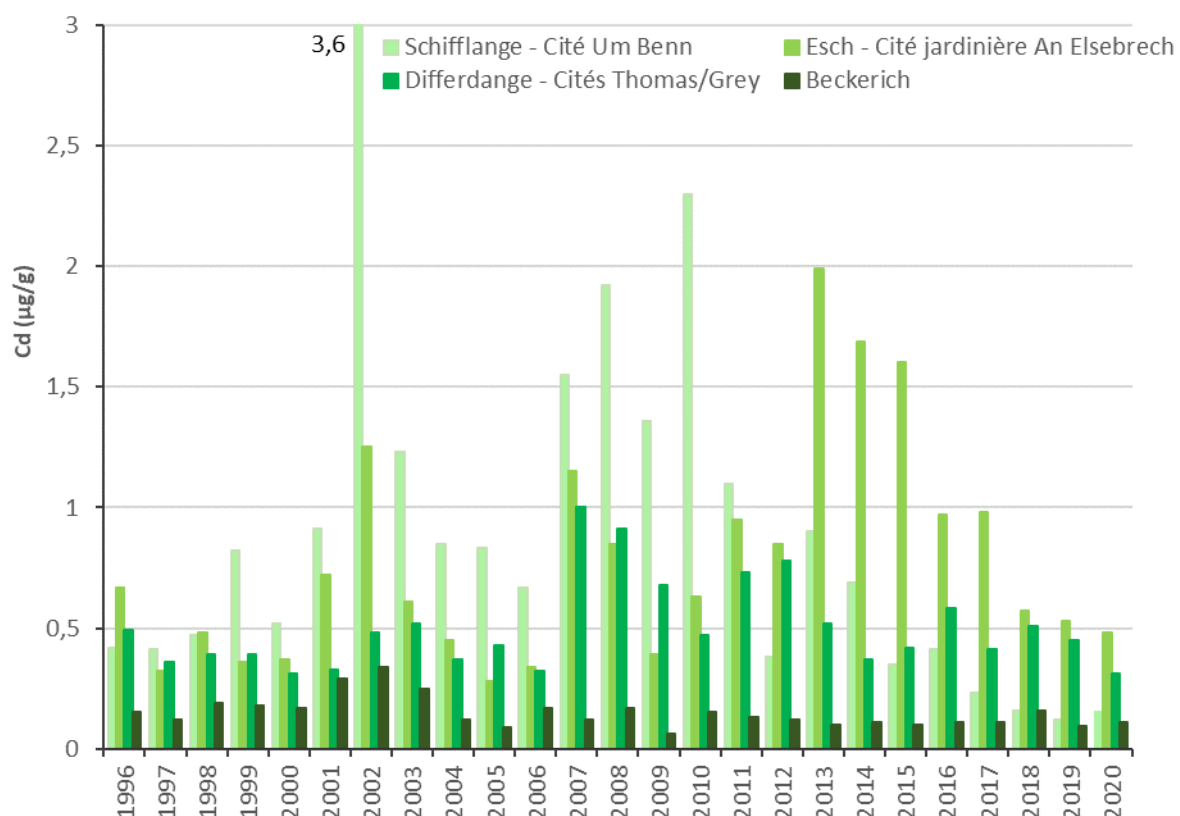


Figure 15.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en Cd dans les bryophytes terrestres au droit des trois grands centres sidérurgiques et comparaison avec la station de référence de Beckerich.

celui du Pb, et ce de façon simultanée aux trois stations industrielles. Cette caractéristique objective des sources communes des deux métaux lourds. Dès lors, le Cd peut également être considéré comme un traceur des activités sidérurgiques, même si le contraste quantitatif vis-à-vis de la station de référence est moins prononcé. Notons encore qu'à Schiffflange, l'impact du Cd est complètement résorbé à partir de 2018.

Une singularité du Cd vis-à-vis des autres contaminants concerne la période 1996 à 2006. Hormis le pic de 2002 à Schiffflange - qui a pu impacter le site d'Esch-sur-Alzette et être à l'origine d'un effet de mémoire en 2003 -, le profil de cet intervalle de temps est peu varié avec une majorité de valeurs, du moins à Esch-sur-Alzette et à Differdange, au-dessous de la barre de 0,5 µg/g. Les changements intervenus en 2007 et surtout en 2013 marquent une véritable rupture qui est manifestée par le constat que les niveaux de 2018 à 2020 sont équivalents à ceux des campagnes de 1997 à 1999 ou de 2004 à 2006. Dès lors que la méthodologie du suivi a été maintenue inchangée, il faut rechercher une explication du côté des évolutions structurelles, notamment dans les technologies de dépollution ou dans la qualité de la ferraille.

7.5. Chrome (Cr)

Cette dernière hypothèse est confirmée et avantageusement illustrée par le cas du Cr (**figure 16**). En considérant les sites d'Esch-sur-Alzette et de Differdange, le profil suivant l'axe temporel indique incontestablement une augmentation des retombées de ce métal trace, même si une évolution à la baisse est clairement amorcée après le pic de 2016 à Differdange.

En tout état de cause, le Cr forme une synthèse entre les deux métaux précédents, en ce sens que son profil rejoint celui du Pb au début du suivi, puis se rapproche de celui du Cd. Toutefois, il n'y a pas de concordance qualitative, ni quantitative nettes entre le Cr et les autres contaminants. Le Cr ressort clairement comme un traceur du site de Differdange, alors que Esch-sur-Alzette et Schiffflange sont davantage caractérisés respectivement par le Cd et par le Pb.

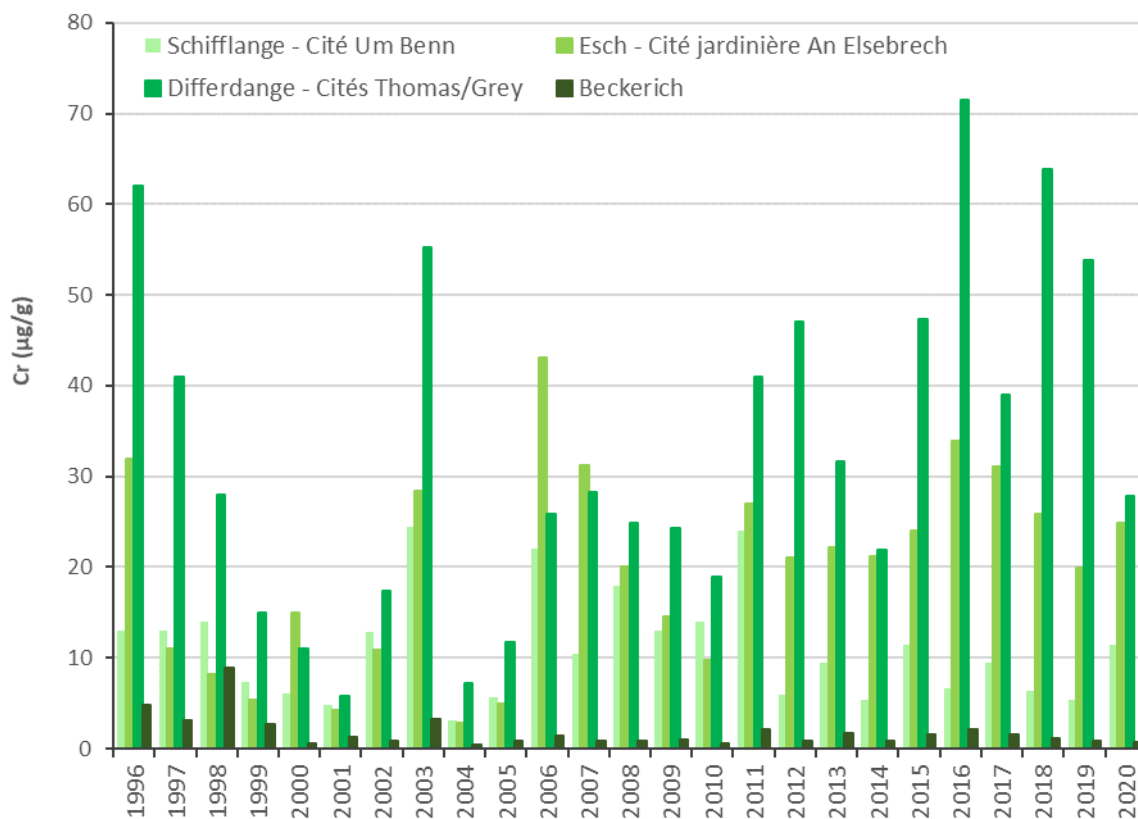


Figure 16.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en Cr dans les bryophytes terrestres au droit des trois grands centres sidérurgiques et comparaison avec la station de référence de Beckerich.

7.6. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP présentent un tracé très différent de ceux des métaux et des PCDD/PCDF (**figure 17**). Le profil est marqué d'abord par des pics d'impact : à Schifflange en 1996 et en 2013, à Esch-sur-Alzette en 2006 et à Differdange en 2008. Le caractère non récurrent de ces épisodes ne permet pas d'interprétation pertinente. Le deuxième fait marquant est formé par une période de teneurs accrues de HAP dans mousses entre 2006 et 2013, précédée (de 1998 à 2005) et suivie (depuis 2014) par des périodes présentant des incidences comparativement plus faibles. Là encore, l'observation est robuste, mais tout essai d'explication risque d'être peu fondé.

En se focalisant sur la période la plus récente, soit à partir de 2014, les retombées sont équivalentes aux stations de Schifflange et d'Esch-sur-Alzette, mais notablement plus faibles à l'emplacement de Differdange. En faisant abstraction des campagnes avant 2000, la station rurale de Beckerich présente durablement des concentrations basses. Ces constats objectivent le caractère de traceur des HAP vis-à-vis de l'ambiance urbaine, les rejets industriels ne représentant que l'une des composantes de l'impact.

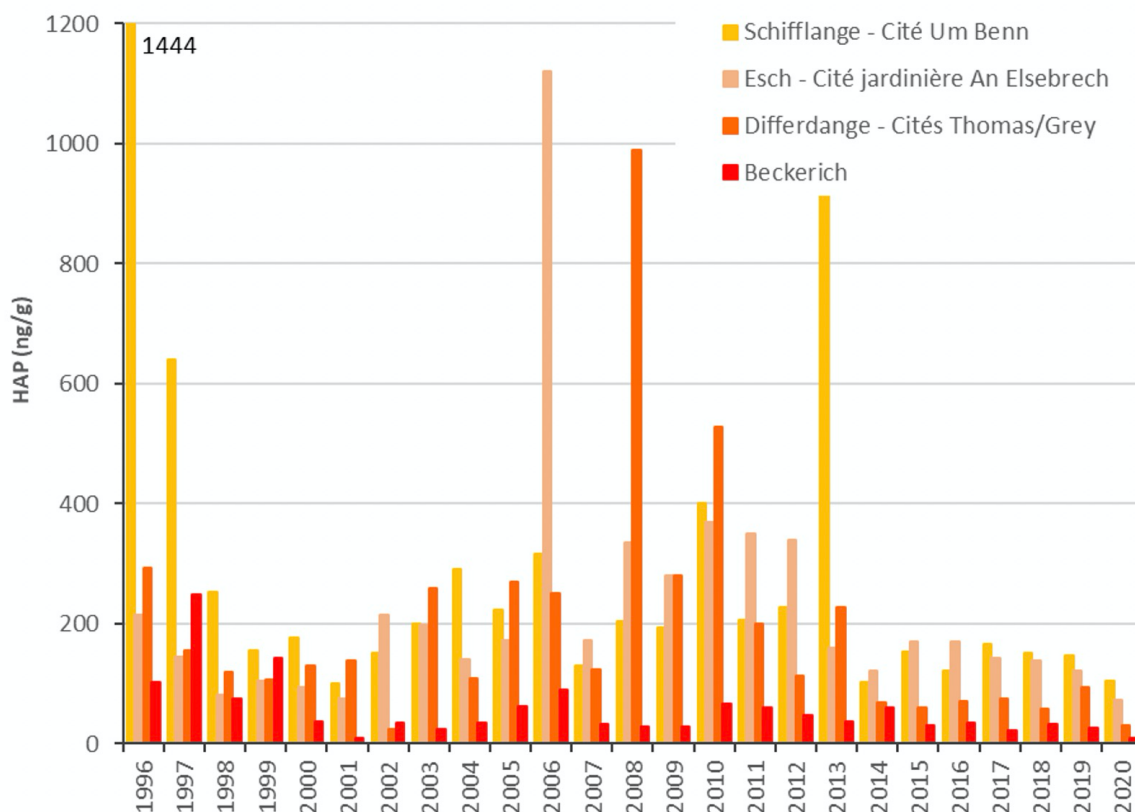


Figure 17. Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en HAP dans les bryophytes terrestres au droit des trois grands centres sidérurgiques et comparaison avec la station de référence de Beckerich.

8. IMPACT DE L'INCINERATEUR DU SIDOR

8.1. Principe et objectifs

Un dernier aspect à détailler est le suivi de l'impact de l'incinérateur du SIDOR à Leudelange. Il s'agit de l'unique incinérateur d'ordures ménagères au Luxembourg. Une station de collecte de bryophytes terrestres en zone d'impact maximum sous les vents dominants a été ajoutée au dispositif en 1997. Comme précédemment pour les sites sidérurgiques (voir 7.1), les données de la référence rurale de Beckerich sont ajoutées en guise de base de comparaison. En matière de lecture des résultats, il est utile de noter que les axes des concentrations sont adaptés et ne correspondent pas à ceux appliqués aux centres industriels du bassin sidérurgique. Comme pour les autres thématiques développées, les contaminants présentés sont les plus expressifs.

8.2. Dioxines / furanes (PCDD/PCDF)

Le contraste entre l'impact à Leudelange et la référence de Beckerich atteint un maximum lors de la campagne de 2000 (**figure 18**). Les différences quantitatives se réduisent ensuite au

fur et à mesure des séries annuelles successives. Il est alors particulièrement intéressant de constater que l'évolution à Leudelage entre 2002 et 2012 suit la même ligne de base que celle de la contamination diffuse enregistrée à Beckerich.

A partir de 2012, les concentrations de PCDD/PCDF chutent sous la barre de 0,5 pg OMS-TEQ/g pour poursuivre une baisse progressive jusqu'en 2020. Cette résorption complète des retombées de dioxines est interrompue par un pic en 2019, à une teneur (1,1 pg OMS-TEQ/g) qui n'avait plus été atteinte depuis 2007. Ces rejets accrus doivent certainement être mis en relation avec des dysfonctionnements au niveau de l'incinérateur. En raison d'une difficulté logistique, la station de Leudelage n'a pas été retenue dans le dispositif lors de la campagne de l'année suivante, en 2020.

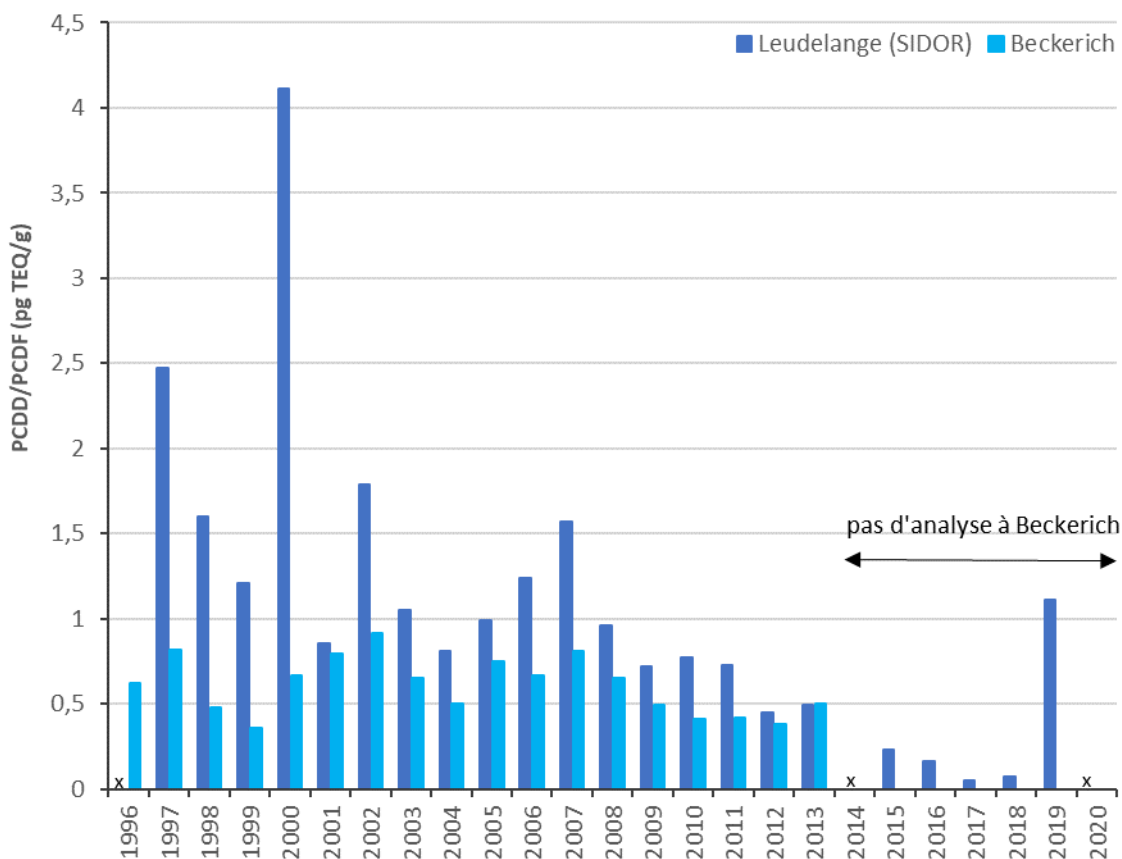


Figure 18.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en PCDD/PCDF dans les bryophytes terrestres à la station de Leudelage, située en zone d'impact maximum de l'incinérateur du SIDOR, et comparaison avec la station de référence rurale de Beckerich.

x : pas de donnée

8.3. Cadmium (Cd)

Le profil du Cd est proche de celui des PCDD/PCDF, en ce sens que les différentiels d'impact de l'incinérateur vis-à-vis de la contamination diffuse sont limités pour l'essentiel au début du suivi, soit de 1997 à 2000 et, dans une bien moindre mesure, jusqu'en 2008 (**figure 19**).

A partir de 2010, le contraste se réduit pour disparaître complètement entre 2018 et 2020. Ce constat signifie que l'incinérateur ne produit plus aucun impact de Cd vis-à-vis de la contamination diffuse de l'environnement. Au regard de concentrations en présence, ces niveaux sont proches des valeurs naturelles du fond géochimique.

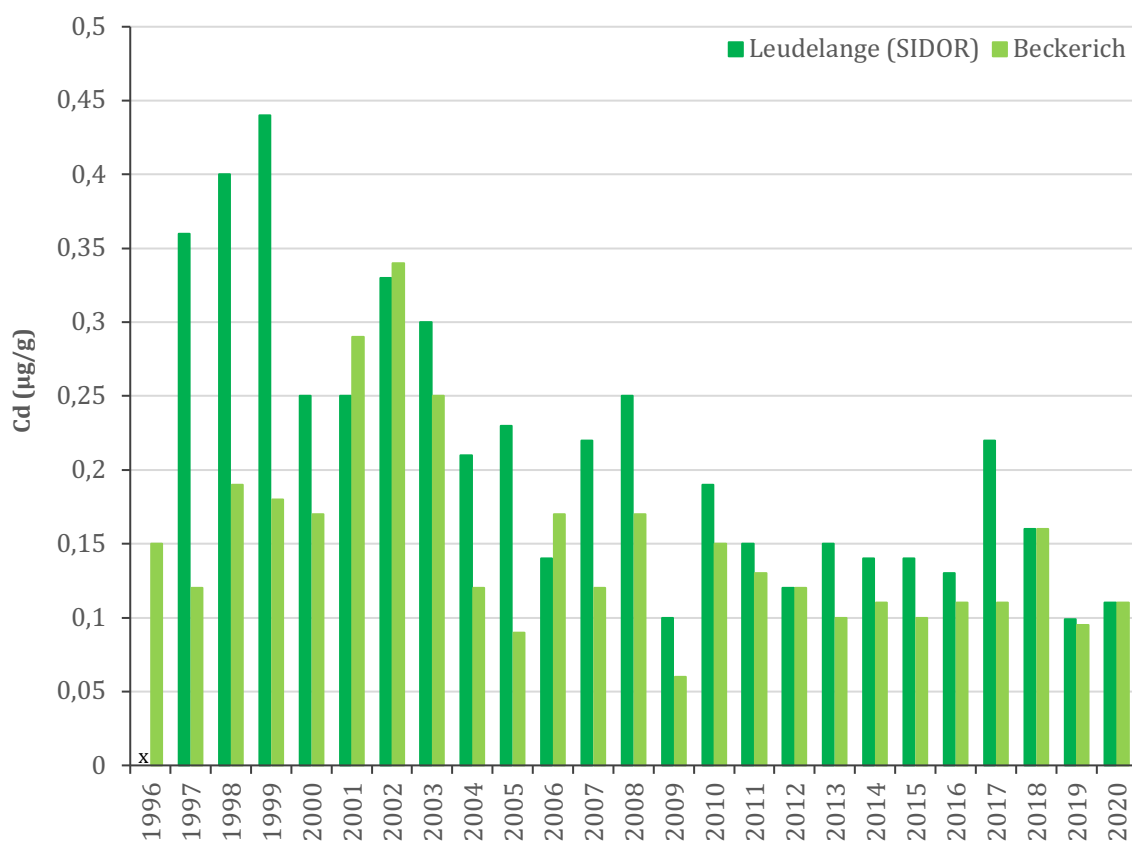


Figure 19.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en Cd dans les bryophytes terrestres à la station de Leudelange, située en zone d'impact maximum de l'incinérateur du SIDOR, et comparaison avec la station de référence rurale de Beckerich.

x : pas de donnée

8.4. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Sur la base de l'activité fondamentale de l'incinérateur, c'est-à-dire la destruction de déchets par traitement thermique, les HAP sont des traceurs fortement pertinents de l'impact environnemental des retombées atmosphériques (**figure 20**).

Cette hypothèse s'est vérifiée au début du suivi, de 1997 à 2000, toutefois sous la réserve que les concentrations d'origine diffuse étaient également élevées. A partir de 2001, le signal d'impact relevé à Leudelage s'est de plus en plus ajusté à celui de Beckerich, de sorte que l'incidence de l'incinérateur peut tout au plus être qualifiée de résiduelle.

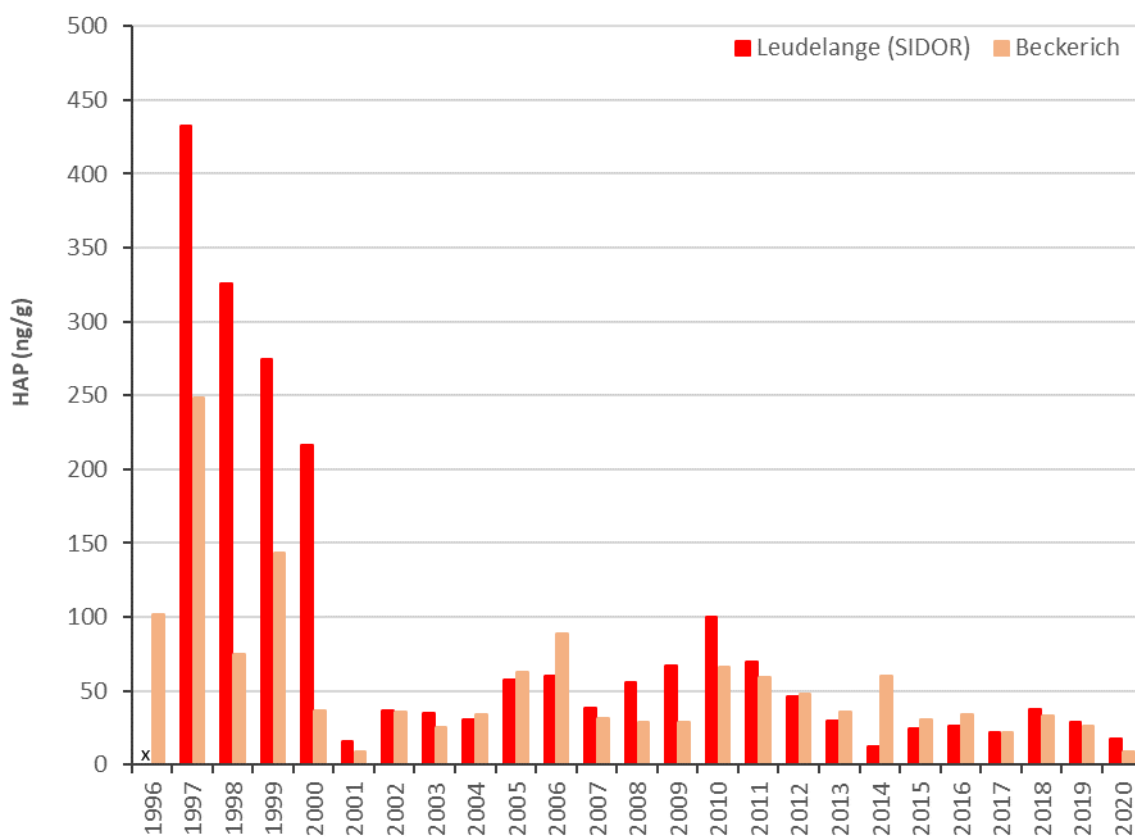


Figure 20.

Evolution entre 1996 et 2020 des concentrations en HAP dans les bryophytes terrestres à la station de Leudelage, située en zone d'impact maximum de l'incinérateur du SIDOR, et comparaison avec la station de référence rurale de Beckerich.

x : pas de donnée

9. CONCLUSION ET ENSEIGNEMENTS PRATIQUES

L'Administration de l'Environnement gère depuis 1996 un réseau d'évaluation et de suivi de la contamination de l'air ambiant par des polluants (minéraux et organiques) persistants moyennant des analyses dans des bryophytes ou mousses terrestres. Au bout d'une **durée de fonctionnement de 25 ans**, la **réalisation d'une synthèse** s'imposait dans le but à la fois de tirer des enseignements pratiques du passé et de se questionner sur les perspectives en terme de besoins et d'exigences futurs dans le domaine de la biosurveillance de la qualité de l'environnement.

Dans une approche d'ensemble, les différentes stations du réseau ont été caractérisées au moyen d'une méthode statistique suivant l'intensité et la nature de la contamination environnementale. Ce **positionnement stratégique des sites** les uns par rapport aux autres révèle des contrastes très utiles à des appréciations spécifiques à une échelle locale. A côté de la dimension spatiale, un axe temporel a été introduit en considérant les six dernières années du suivi par rapport à la totalité de la base de données. Les glissements ainsi opérés objectivent une **amélioration de la qualité environnementale** à l'ensemble des placettes de suivi, illustrant ainsi les efforts de dépollution accomplis.

Un deuxième volet a consisté à appliquer à une sélection de contaminants environnementaux un outil d'interprétation sous la forme d'une grille de qualité. Cette procédure, de caractère classique, a pour objectif de disposer d'une **vue hiérarchisée de l'impact** aux différentes placettes du réseau. Elle permet à la fois d'identifier des traceurs typiques des activités économiques surveillées, de caractériser les situations de contamination et de suivre les évolutions dans le temps.

La **sensibilité de la technique** des mousses terrestres vis-à-vis de changements dans le milieu ambiant est démontrée sur la base de l'évolution de la contamination d'origine diffuse en milieu rural. Ainsi, les profils dans le temps du plomb et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pris comme exemples, intègrent à la fois les améliorations constatées sur le long terme et, de façon plus particulière, les effets des crises économiques des années 2001-2002, puis 2008-2009 sur la qualité de l'environnement.

Dans une optique de lisibilité maximale, les données ont été organisées en divisant la période de 25 ans en blocs successifs de cinq ans. Cette démarche présente l'avantage de **visualiser des tendances lourdes** à la fois suivant l'axe spatial et suivant l'axe temporel. Elle permet particulièrement d'objectiver la baisse progressive et impressionnante, jusqu'à résorption de la contamination ambiante par les dioxines, la régression du traceur historique qu'est le plomb et les fortes variations associées aux HAP.

Dans un deuxième temps, l'analyse des contaminants les plus typiques est affinée sur le **bassin sidérurgique**. Un fait marquant central constitue la chute des concentrations dans les

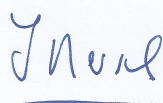
bryophytes en réponse à l'arrêt de la production à Schiffflange en octobre 2011. Ce constat central démontre la capacité de l'indication à s'actualiser de façon courante sur la qualité de l'environnement local. D'autres aspects essentiels sont la maîtrise de plus en plus importante des émissions - et donc des retombées - de PCDD/PCDF, mais également la substitution progressive du plomb par le chrome en tant que principal traceur de l'impact des activités sidérurgiques, alors que le zinc et le cadmium persistent comme indicateurs secondaires au droit des sites industriels en activité à Esch-sur-Alzette et à Differdange.

Une autre appréciation spécifique a été portée sur l'impact de **l'incinérateur du SIDOR à Leudelange**. Là aussi, le suivi sur 25 ans objective de façon conséquente une baisse des retombées de contaminants persistants au fil des années. A tel point que des niveaux proches de la contamination d'ordre diffus de l'environnement ont été atteints ces dernières années. Toutefois, la campagne de 2019 a interrompu la tendance d'ensemble par un pic de dioxines à une teneur dans les mousses qui n'avait plus été mesurée depuis 2007.

A travers le développement présenté, la méthode (standardisée) des bryophytes terrestres s'établit comme une **technique multifacette** qui possède à la fois des intérêts d'évaluation et de suivi de contaminations connues, de contrôle de l'efficacité de dépollution et de traçage de la qualité de fond de l'environnement (en milieu rural). La méthode présente les avantages d'être simple à l'usage, reproductible et surtout d'une sensibilité et d'une fiabilité élevées. Avec le **potentiel de rétrospection actuellement disponible**, autant suivant un axe spatial que suivant un axe temporel, le/la gestionnaire est en capacité, données à l'appui, à la fois de **démontrer les succès** de sa politique, mais également d'**objectiver d'éventuels manquements** de la part d'exploitants d'établissements classés.

En guise de **perspectives**, l'expérience durant ces 25 ans montre clairement que le concept fondamental d'une campagne annuelle est strictement approprié pour un suivi sur le long terme. Dans un esprit de continuité, il est intéressant de disposer d'une ossature fondamentale de stations permanentes. Toutefois, moyennant le potentiel de rétrospection et donc une base d'interprétation rigoureuse, le système présente une souplesse telle que le réseau peut être adapté à tout moment aux besoins identifiés par le/la gestionnaire. Cette capacité d'adaptation s'applique aussi bien à l'emplacement des stations qu'au choix des contaminants analysés.

Luxembourg, le 28 avril 2022



Jacques MERSCH

Diplômé en Sciences écologiques

Docteur en Toxicologie de l'environnement