

# BIOMONITOR

CONSEIL & EXPERTISE  
EN ENVIRONNEMENT



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère du Développement durable  
et des Infrastructures

Administration de l'environnement

---

## SUIVI DE POLLUANTS ORGANIQUES PERSISTANTS DANS L'AIR AMBIANT AU MOYEN D'ANALYSES D'AIGUILLES D'EPICEAS

**Campagne de 2016**

**Synthèse des campagnes de 1993, 2007 et 2016**



**ADMINISTRATION DE L'ENVIRONNEMENT**

1, Avenue du Rock'n'Roll  
L-4361 ESCH-SUR-ALZETTE

---

**SOMMAIRE**

	page
<b>1. Cadre général et objectifs</b>	3
<hr/>	
<b>2. Procédures techniques</b>	
2.1. Méthodologie générale	4
2.2. Réseau de stations de suivi	4
2.3. Campagne de collecte	4
2.4. Technique de collecte des échantillons	8
2.5. Transport et traitement des échantillons	9
2.6. Programme analytique	10
2.7. Expression des résultats analytiques	10
2.8. Caractérisation biométrique des échantillons	12
2.9. Synthèse des données disponibles	12
<hr/>	
<b>3. Paramètres biométriques</b>	
3.1. Circonférence des arbres	13
3.2. Poids de 1.000 aiguilles	13
<hr/>	
<b>4. Dioxines / furannes (PCDD/PCDF)</b>	
4.1. Expression et présentation des résultats	15
4.2. Campagne de 2016	15
4.3. Evolution entre les campagnes de 1993-94, 2007 et 2016	16
<hr/>	
<b>5. Polychlorobiphényles (PCB)</b>	
5.1. Expression et présentation des résultats	17
5.2. PCDD/PCDF/PCB en 2016	17
5.3. Evolution des PCDD/PCDF/PCB entre 2007 et 2016	18
5.4. PCB <sub>i</sub> en 2016	19
5.5. Evolution des PCB <sub>i</sub> entre 2007 et 2016	20
<hr/>	
<b>6. Penta- et Hexachlorobenzène (PeCB, HeCB)</b>	
6.1. Expression et présentation des résultats	21

---

6.2. Campagne de 2016	21
6.3. Evolution entre les campagnes de 2007 et 2016	22

---

<b>7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>	
7.1. Expression et présentation des résultats	23
7.2. Expression conventionnelle (HAP 16) en 2016	24
7.3. Evolution des HAP 16 entre 2007 et 2016	25
7.4. HAP 16 en 2016 et part des HAP majeurs	26
7.5. HAP 4 en 2016	27
7.6. Evolution des HAP 4 entre 2007 et 2016	28
7.7. Equivalents de toxicité appliquées à l'expression conventionnelle en 2016	29

---

<b>8. Métaux lourds</b>	
8.1. Expression et présentation des résultats	30
8.2. Métaux lourds en 2016	30
8.3. Evolution des métaux lourds et métaux traces entre 1993 et 2016	32

---

<b>9. Enseignements pratiques</b>	
9.1. Appréciation générale	34
9.2. Fiabilité des données de 1993-94 et de 2007	35
9.3. Limites de quantification analytiques	35
9.4. Influence de la biométrie des aiguilles sur les teneurs en contaminants	35
9.5. Expression des HAP	36

---

<b>10. Synthèse et conclusion</b>	37
-----------------------------------	----

---

<b>Références citées</b>	40
--------------------------	----

**Annexe**

---

## 1. CADRE GENERAL ET OBJECTIFS

---

Les **polluants organiques persistants** (POP) figurent parmi les substances chimiques les plus problématiques d'un point de vue toxicologique et écotoxicologique. Ils sont associés à des propriétés de génotoxicité, de cancérogénicité, de tératogénicité (effets exercés sur les embryons), de bioaccumulation et de perturbation endocrinienne (analogues hormonaux).

La **Convention de Stockholm**, un accord international signé le 22 mai 2001 et entré en vigueur le 17 mai 2004, vise à diminuer la dispersion des POP dans l'environnement et, dès lors, l'exposition des populations humaines. A côté de l'interdiction d'un certain nombre de substances de synthèse, pour l'essentiel des pesticides comme la dieldrine, l'heptachlore, l'hexachlorobenzène, le mirex et le toxaphène, la convention appelle les 152 pays signataires à **réduire les émissions de POP** rejetés dans le milieu ambiant de façon non intentionnelle. Parmi les composés visés figure l'un des groupes de contaminants environnementaux les plus emblématiques : les dioxines, les furannes et les polychlorobiphényles.

Au Luxembourg, l'Administration de l'Environnement est en charge de l'élaboration et de la mise en œuvre d'un plan d'action relatif à la Convention de Stockholm [1]. Dans ce cadre, elle mène des **programmes de suivi**, dont l'un s'appuie sur l'**analyse d'aiguilles d'épicéas**. Cet indicateur biologique présente deux caractéristiques particulièrement intéressantes : (1) le feuillage persistant est fortement exposé à l'air ambiant et (2) les aiguilles sont recouvertes d'un film protecteur gras, capable de capter et de fixer durablement les contaminants présents dans la colonne d'air. La combinaison d'un réseau de stations et de campagnes répétées dans le temps forme un dispositif visant à évaluer les évolutions de la contamination de l'air ambiant par les POP aussi bien dans l'espace que dans le temps.

Une première campagne d'analyse de POP dans les aiguilles d'épicéas a été réalisée en 1993. L'exercice a ensuite été répété sur des bases équivalentes en 2007. Les référentiels des deux séries ont été repris pour définir les modalités pratiques d'une **troisième campagne en 2016**, dès lors espacée de plus de 20 ans par rapport aux analyses initiales.

Les **objectifs** de la biosurveillance des POP dans les aiguilles d'épicéas sont principalement de deux ordres : (1) obtenir un diagnostic actualisé en 2016 de la situation de contamination environnementale, moyennant un spectre chimique élargi et (2) tracer et objectiver l'évolution de la pollution du compartiment atmosphérique en comparant les diagnostics de 1993, 2007 et 2016.

## 2. PROCEDURES TECHNIQUES

---

### 2.1. Méthodologie générale

Les modalités techniques appliquées lors de la campagne menée en 2016 s'appuient sur les principes généraux et les convergences de deux procédures standardisées, l'une allemande, VDI 3957/11 de 2007 [2], et l'autre française, NF X43-905 de 2016 [3]. A cette base méthodologique sont intégrées les pratiques mises en oeuvre lors des deux campagnes précédentes de 1993-94 et de 2007, dans la mesure où des informations sont disponibles.

### 2.2. Réseau de stations de suivi

Pour des raisons de continuité dans le temps, le choix des stations du réseau de prélèvement de 2016 s'oriente fortement aux campagnes de 1993-94 et de 2007 (**tableau 1**). A la suite d'une analyse de pertinence, la plupart des emplacements de collecte définis précédemment ont été maintenus. A l'époque, le diagnostic d'une part ciblait les émetteurs connus comme l'incinérateur du SIDOR à Leudelange et le bassin sidérurgique et, d'autre part, visait une évaluation des impacts à proximité des frontières du pays (**figure 1**).

Dans le but d'élargir le spectre thématique et la diversité du diagnostic, de nouveaux sites ont été ajoutés en 2016. Ceux-ci se trouvent avant tout sur le territoire de la Ville de Luxembourg et, dans une moindre mesure, au sein de l'agglomération d'Esch-sur-Alzette (**figures 2 et 3**). Ils visent à évaluer les niveaux de contamination d'origines diffuses, comme la circulation automobile ou les centrales de chauffage urbain. D'autres ajouts de stations sont motivés par des situations d'émissions spécifiques, comme le complexe sidérurgique d'Esch-Belval, les activités industrielles à Eselborn/Lentzweiler et la centrale d'enrobage (production d'asphalte) à proximité de l'autoroute et de l'aéroport au niveau du plateau du Cents à Luxembourg.

Le codage des stations est choisi de façon à pouvoir les identifier de façon immédiate. Dans une optique de continuité, le code des campagnes de 1993 et 2007 est accolé en complément.

### 2.3. Campagne de collecte

A la suite d'une campagne de prospection effectuée en juillet 2016, les collectes d'aiguilles d'épicéas ont été réalisées aux 21 stations du réseau :

- les 16 et 17 août à Luxembourg-ville,
- le 7 septembre à Esch-sur-Alzette, Schiffflange et Leudelange,

- le 8 septembre à Garnich-Holzem, Hovelange et Surré et
- le 14 septembre à Echternach, Bivels, Weiswampach et Eselborn/Lentzweiler.

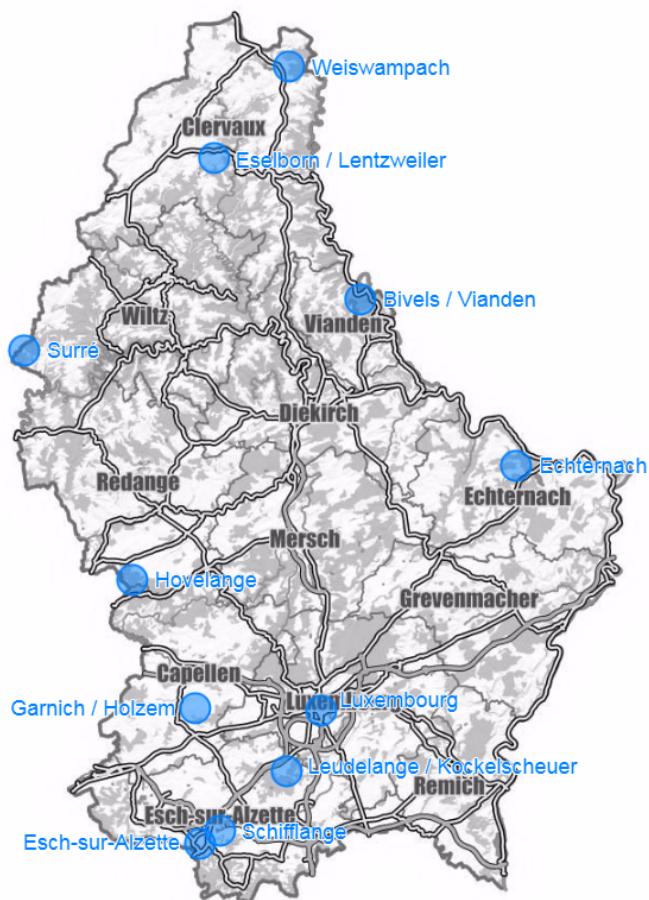
**Tableau 1.**  
Réseau de stations de collecte d'aiguilles d'épicéas en 2016.

N°	Station	Code	Coordonnées GPS
<b>Luxembourg</b>			
1	Kirchberg - Bld K. Adenauer	LU-01	N 49.627941 E 6.152773
2	Kirchberg - Av. J.F. Kennedy	LU-02	N 49.621855 E 6.154778
3	Cents - Rue du Cents	LU-03	N 49.619362 E 6.179567
4	Cents - Cimetière	LU-04	N 49.614482 E 6.154045
5	Limpertsberg - Université	LU-05	N 49.622984 E 6.113253
6	Limpertsberg - Eglise	LU-06	N 49.620763 E 6.120350
7	Centre - Parc <i>Kinnekswiss</i>	LU-07	N 49.614800 E 6.125103
<b>Esch-sur-Alzette</b>			
8	Lallange - cimetière	ES-01	N 49.512254 E 5.990504
9	Wobrécken	ES-02	N 49.505098 E 5.980380
10	Parc Laval	ES-03_F06	N 49.498463 E 5.979020
11	Belval - <i>An Elsebrech</i>	ES-04	N 49.506412 E 5.962808
12	<i>Gaalgebierg</i>	ES-05_F08	N 49.485147 E 5.986921
<b>Autres localités</b>			
13	Schifflange	SCH_F07	N 49.506545 E 6.002674
14	Leudelage / Kockelscheuer	LEU_F04	N 49.556863 E 6.087983
15	Garnich / Holzem	GAR_F01	N 49.609632 E 5.970684
16	Hovelange	HOV_F10	N 49.716745 E 5.889621
17	Surré	SUR_F14	N 49.906827 E 5.750477
18	Weiswampach	WEI_F15	N 50.140081 E 6.091164
19	Bivels / Vianden	BIV_F13	N 49.948395 E 6.181694
20	Echternach	ECH_F09	N 49.810638 E 6.382100
21	Eselborn / Lentzweiler (Z.I.)	LEN	N 50.064324 E 5.994412

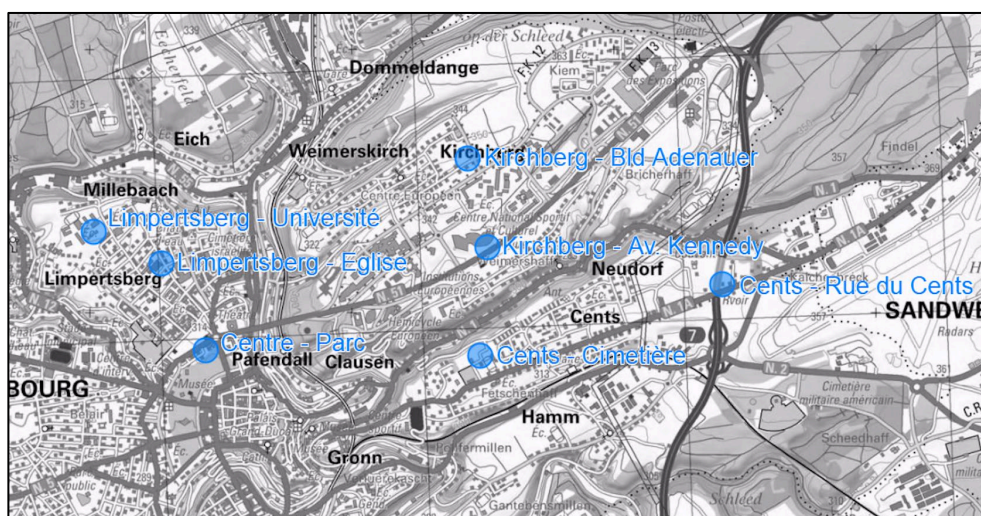
En vue d'une pérennisation du suivi, chacun des emplacements du réseau a été caractérisé par ses coordonnées GPS, moyennant une précision de 5 à 10 m (tableau 1), et par un cliché photographique. Ces derniers sont placés sur un support informatique. Dans ces conditions, une campagne future pourra être effectuée dans des conditions très proches de celle de 2016. Il est important de préciser qu'aucun marquage n'a été effectué sur site.

A titre d'illustration, les situations de terrain des arbres échantillonnés à quatre des 21 stations du réseau sont présentées sur les **photos 1 à 4**.



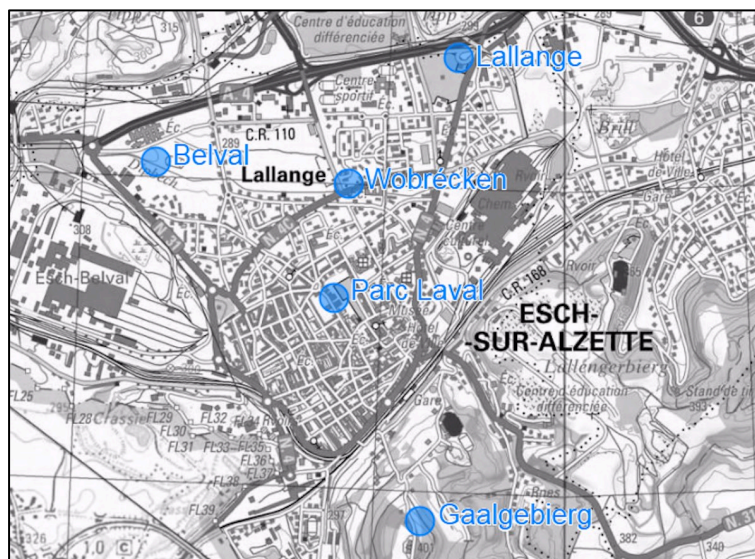


**Figure 1.**  
Localisation d'ensemble des stations du suivi.



**Figure 2.**  
Localisation des stations au sein de la Ville de Luxembourg.





**Figure 3.**  
Localisation des stations de l'agglomération d'Esch-sur-Alzette.



**Photos 1 à 4.**

Ambiance des stations de Luxembourg-Limpertsberg - Université (en haut à gauche), Esch-Lallange (en haut à droite), Hovelange (en bas à gauche) et Echternach (en bas à droite).



## 2.4. Technique de collecte des échantillons

De façon pratique, le prélèvement s'effectue sur un arbre unique, choisi, sur un site donné, comme étant le plus exposé à l'environnement ambiant. Ce principe s'applique pour les rangées et les groupes d'arbres, mais aussi en lisière de forêt. Dans tous les cas, la partie de l'arbre dans laquelle est effectué le prélèvement doit être libre de toute interférence vis-à-vis d'un arbre voisin ou de tout autre obstacle gênant la circulation de l'air.

Le prélèvement est réalisé dans le tiers supérieur de l'arbre en prenant soin de couper un nombre identique de rameaux selon les quatre points cardinaux, de manière à disposer d'une biomasse homogène, exposée dans les conditions les plus variables possible. La récolte sur l'arbre est réalisée par un grimpeur, formé et équipé pour cet exercice (**photos 5 et 6**). La phase de collecte a été effectuée en collaboration avec l'Administration de la Nature et des Forêts<sup>1</sup>. Notons, à titre d'information, que certains arbres du programme atteignent des hauteurs qui approchent les 30 m.



**Photos 5 et 6.**

Grimpeurs montant dans les épicéas pour récolter des rameaux dans le tiers supérieur de l'arbre.

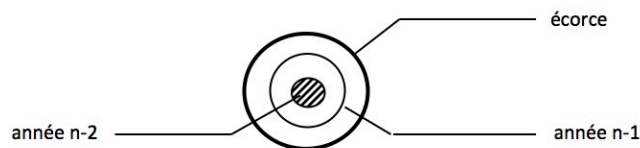
A partir des rameaux tombés au sol, les pousses de l'année sont coupées au moyen d'un sécateur préalablement nettoyé à l'eau, puis à l'alcool. Cette partie la plus récente est facilement identifiable par une couleur plus claire et une texture comparativement plus souple. C'est la partie du rameau immédiatement attenante à la pousse de l'année (n-1) qui est récupérée sur une feuille d'aluminium posée sur le sol. L'échantillon est formé par la réunion

---

<sup>1</sup> Nous souhaitons remercier l'Administration de la Nature et des Forêts pour sa participation à ce programme ainsi que tous les grimpeurs impliqués. Nos remerciements s'adressent également aux Villes de Luxembourg et d'Esch-sur-Alzette, aux Communes de Beckerich, de Roeser et de Schifflange, à la Société Electrique de l'Our, au *Porverband* Limpertsberg-Fabrique d'Eglise de Saint Joseph, ainsi qu'à toutes les personnes privées qui ont soutenu le travail de l'Administration de l'Environnement en donnant accès à leur propriété.

d'un nombre équivalent de brins, généralement entre 20 et 25, à partir des rameaux récoltés selon les quatre points cardinaux.

Il est important de noter qu'il peut s'avérer difficile de distinguer la pousse de l'année n-1 et celle de l'année précédente n-2 (**figure 4**). Cette distinction ne relève pas d'une importance primordiale, car les campagnes de collecte sont suffisamment espacées dans le temps pour éviter toute interférence, sachant que les épicéas conservent leurs aiguilles généralement entre 4 et 9 ans. Une évaluation grossière permet d'admettre que les échantillons récoltés en septembre 2016 sont composés au moins à trois quarts d'aiguilles qui se sont développées en 2015. La durée d'exposition dépasse donc un an sans dépasser deux ans et demi.



**Figure 4.**

Schéma de coupe d'un rameau d'épicéa avec identification de la pousse des l'années n-2 et n-1 vis-à-vis de l'accroissement de l'année en cours.

## 2.5. Transport et traitement des échantillons

Sur le lieu de collecte, les pousses récoltées sont enveloppées dans la feuille d'aluminium. L'ensemble est placé dans un sachet en polypropylène de qualité alimentaire, préalablement étiqueté. Le transport s'effectue dans une glacière réfrigérée avec des pains de glace.

Au laboratoire, les échantillons sont mis à sécher en déployant la feuille d'aluminium sur une étagère. Au fur et à mesure du séchage, les aiguilles tombent de façon spontanée. A la fin du processus, les tiges de bois sont enlevées et les aiguilles sont récupérées dans des boîtes en polypropylène de qualité alimentaire.

Avant le début de la phase analytique, chaque échantillon est minutieusement inspecté en l'étalant sur une feuille d'aluminium afin d'enlever tous les corps étrangers ainsi que des aiguilles collées par de la résine. Les échantillons sont regroupés dans une deuxième enceinte et conservés au sec et à l'abri de la lumière jusqu'au conditionnement pour l'envoi aux laboratoires d'analyses.

## 2.6. Programme analytique

En 2016, le spectre des analyses effectuées est le suivant :

- Dioxines (PCDD) et furannes (PCDF)
- Polychlorobiphényles analogues de dioxines (dl-PCB) et indicateurs (PCBi)
- Pentachlorobenzène (PeCB) et Hexachlorobenzène (HeCB)
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), zinc (Zn)

Parmi ces cinq catégories de contaminants, seules les trois premières sont visées par la Convention de Stockholm. Les HAP sont également considérés comme des POP, mais ne relèvent pas de la Convention de Stockholm. Une série de métaux traces (Cr, Ni, Zn) et de métaux lourds (Cd, Hg, Pb) ainsi que le métalloïde As ont été ajoutés au dispositif dans un but de valoriser au maximum l'effort de collecte des échantillons.

En fonction des objectifs visés, des sources d'émission connues ou suspectées et de l'historique des campagnes précédentes (1993-94 et 2007), le spectre des analyses a été adapté à chacune des stations du réseau (**tableau 2**). Ainsi, par exemple, cinq des sept emplacements situés sur le territoire de la Ville de Luxembourg ciblent uniquement les HAP et les métaux. En revanche, le programme complet est déployé au niveau des stations déjà échantillonnées en 1993-94 et/ou en 2007. Une situation intermédiaire se présente pour d'agglomération d'Esch-sur-Alzette avec un effort conséquent à trois des cinq sites.

## 2.7. Expression des résultats analytiques

### *Dioxines (PCDD), furannes (PCDF) et polychlorobiphényles (PCB)*

Les concentrations en PCDD/PCDF sont exprimées en picogramme d'équivalents de toxicité suivant la définition de l'Organisation Mondiale de la Santé en 2005 par gramme de biomasse sèche d'aiguilles (pg OMS-TEQ/g PS). Les dl-PCB sont intégrés aux PCDD/PCDF pour former l'expression globale des PCDD/PCDF/PCB, présentée selon la même unité. La somme conventionnelle des 6 congénères de l'expression des PCBi est exprimée en nanogramme par gramme de poids sec (ng/g PS).

### *Pentachlorobenzène (PeCB) et Hexachlorobenzène (HeCB)*

Les teneurs de ces deux substances individuelles dans les aiguilles d'épicéas sont données en nanogramme par gramme de biomasse sèche (ng/g PS).

**Tableau 2.**

Spectre des analyses dans les échantillons d'aiguilles d'épicéas en 2016.

N°	Station	PCDD/ DF/B	PCBi	PeCB HeCB	HAP	Métaux
	<b>Luxembourg</b>				•	•
1	Kirchberg - Bld K. Adenauer				•	•
2	Kirchberg - Av. J.F. Kennedy				•	•
3	Cents - Rue du Cents				•	•
4	Cents - Cimetière				•	•
5	Limpertsberg - Université	•	•	•	•	•
6	Limpertsberg - Eglise				•	•
7	Centre - Parc <i>Kinnekswiss</i>	•	•	•	•	•
	<b>Esch-sur-Alzette</b>					
8	Lallange - cimetière		•	•	•	•
9	Wobrécken		•	•	•	•
10	Parc Laval	•	•	•	•	•
11	Belval - <i>An Elsebrech</i>	•	•	•	•	•
12	<i>Gaalgebierg</i>	•	•	•	•	•
	<b>Autres localités</b>					
13	Schifflange	•	•	•	•	•
14	Leudelage / Kockelscheuer	•	•	•	•	•
15	Garnich / Holzem	•	•	•	•	•
16	Hovelange	•	•	•	•	•
17	Surré	•	•	•	•	•
18	Weiswampach	•	•	•	•	•
19	Bivels / Vianden	•	•	•	•	•
20	Echternach	•	•	•	•	•
21	Eselborn / Lentzweiler (Z.I.)	•	•	•	•	•

### *Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)*

L'expression conventionnelle des HAP est formée par la somme arithmétique de 16 composés définie (en 1977) par l'US-EPA (*Environmental Protection Agency*) et exprimée en nanogramme par gramme de poids sec (ng/g PS). Compte tenu de l'importance croissante des HAP en terme de contamination du compartiment atmosphérique, une approche plus différenciée fera l'objet d'un paragraphe séparé (voir 7.1).



---

### *Métaux traces, métaux lourds et métalloïde*

Les résultats relatifs aux concentrations d'arsenic (As), de cadmium (Cd), de chrome (Cr), de mercure (Hg), de nickel (Ni), de plomb (Pb) et de zinc (Zn) sont exprimés en microgramme par gramme de biomasse sèche ( $\mu\text{g/g PS}$ ).

### **2.8. Caractérisation biométrique des échantillons**

La plupart des arbres échantillonnés appartiennent à l'espèce *Picea abies*, c'est-à-dire l'épicéa commun. Toutefois, pour la production de bois, des cultivars physiologiquement plus performants que la forme sauvage ont été développés. A ceci s'ajoute que différentes espèces du genre *Picea* s'hybrident facilement. En situation, il devient alors souvent difficile de distinguer l'épicéa commun des cultivars et des hybrides. Dans les parcs se trouvent en plus des formes exotiques, qui, elles aussi, peuvent être issues d'hybridations.

Devant cette situation complexe, il a été décidé de ne pas se focaliser sur la détermination (hypothétique) des espèces, mais de caractériser les différents échantillons sur la base de deux critères biométriques, voire physiologiques que sont : (1) la circonférence de l'arbre et (2) le poids sec de 1.000 aiguilles. Précisons que ce second paramètre est recommandé dans la norme allemande [2].

La circonférence du tronc d'arbre est mesurée à une hauteur de 1,5 m du sol au moyen d'un mètre ruban. Le poids de 1.000 aiguilles est évalué après séchage d'un aliquot à 80 °C jusqu'à poids constant. Trois fois 300 aiguilles sont comptées, puis pesées sur une balance de précision à 0,1 mg. Si les trois résultats dévient de moins de 5 %, la moyenne est validée. Dans le cas contraire, les valeurs la plus élevée et la plus faible sont éliminées et deux nouveaux comptages sont effectués à partir de l'aliquot de départ.

### **2.9. Synthèse des données disponibles**

La base de données actuellement disponible provient de trois campagnes, réalisées en 1993-94, 2007 et 2016. Afin de rendre les données comparables entre elles, les séries antérieures ont été actualisées en fonction de l'évolution des expressions conventionnelles. Il fallait notamment convertir les I-TEQ appliqués aux PCDD/PCDF avant 1998 à l'expression actuelle des PCDD/PCDF/PCB qui inclut les dl-PCB.

Ce travail de synthèse et de mise à jour a été réalisé sous la forme d'un fichier informatique (tableur) dont chaque onglet correspond à une station du réseau. Etant donné que cette opération n'a pas besoin d'être répétée, la démarche pratique n'est pas détaillée ici. La banque de données, vérifiée et validée par les services de l'Administration de l'Environnement, est

fournie sur support informatique. Précisons que les différentes expressions historiques des PCDD/PCDF(/PCB) sont présentées, tout comme plusieurs expressions de somme concernant les HAP.

### 3. PARAMETRES BIOMETRIQUES

#### 3.1. Circonférences des arbres

La circonférence des arbres échantillonnés se situe dans une gamme de 88 cm à Luxembourg-Cents - Cimetière à 248 cm à Luxembourg Centre-Parc - *Kinnekswiss* (**tableau 3**). Trois des 21 arbres présentent une circonférence inférieure à 100 cm et deux une circonférence supérieure à 200 cm. Une large majorité de 16 arbres se trouve dans l'intervalle 100 à 200 cm.

Il est très peu probable que la dimension des arbres exerce une influence directe sur la qualité de l'accumulation de contaminants environnementaux, les paramètres déterminants étant l'exposition et l'âge des aiguilles. L'intérêt de ces relevés réside dans la possibilité de se placer dans des conditions de prélèvement équivalentes lors de prochaines campagnes.

#### 3.2. Poids de 1.000 aiguilles

Le poids de 1.000 aiguilles varie d'un minimum de 1,586 g à Luxembourg-Cents - Rue du Cents à un maximum de 2,989 g à Surré (tableau 3). Quatre des 21 arbres échantillonnés présentent des valeurs inférieures à 2 g pour 1.000 aiguilles. Trois de ces arbres se trouvent dans des situations de forte exposition aux conditions environnementales et présentent des symptômes de faiblesse physiologique. Outre la station de Luxembourg-Cents - Rue du Cents, il s'agit des stations d'Esch-Belval - *An Elsebrech* et de Luxembourg-Kirchberg - Avenue J.F. Kennedy.

L'hypothèse d'une causalité entre l'exposition et le poids des aiguilles est étayée par deux constats complémentaires. D'une part, d'autres sites fortement soumis aux influences environnementales présentent des masses comparativement faibles, tels Luxembourg-Kirchberg - Bld K. Adenauer, Schifflange et Esch-Wobrécken. D'autre part, les individus les plus vigoureux d'un point de vue physiologique se distinguent avec les masses d'aiguilles les plus élevées. Des exemples sont : Leudelage, Garnich/Holzem, Weiswampach, mais également Luxembourg-Limpertsberg - Université.

**Tableau 3.**

Caractéristiques biométriques des arbres échantillonnés aux différentes stations du réseau.

N°	Station	Circonférence (cm)	Poids de 1.000 aiguilles (g)
<b>Luxembourg</b>			
1	Kirchberg - Bld K. Adenauer	147	2,078
2	Kirchberg - Av. J.F. Kennedy	96	1,949
3	Cents - Rue du Cents	105	1,586
4	Cents - Cimetière	88	2,453
5	Limpertsberg - Université	234	2,807
6	Limpertsberg - Eglise	157	2,631
7	Centre - Parc <i>Kinnekswiss</i>	248	2,738
<b>Esch-sur-Alzette</b>			
8	Lallange - cimetière	180	2,761
9	Wobrécken	137	2,356
10	Parc Laval	105	2,602
11	Belval - <i>An Elsebrech</i>	98	1,913
12	<i>Gaalgebierg</i>	197	2,253
<b>Autres localités</b>			
13	Schifflange	140	2,150
14	Leudelage / Kockelscheuer	100	2,971
15	Garnich / Holzem	178	2,953
16	Hovelange	170	1,949
17	Surré	186	2,989
18	Weiswampach	123	2,809
19	Bivels / Vianden	140	2,412
20	Echternach	187	2,631
21	Eselborn / Lentzweiler (Z.I.)	142	2,483

L'explication pour un poids comparativement faible à la station de Hovelange réside dans le fait que les aiguilles sont de petite taille. Au regard des caractéristiques biométriques, l'arbre échantillonné n'est pas un épicéa commun, mais appartient à une autre espèce.

Indépendamment de la raison qui détermine le poids des aiguilles, il faut considérer qu'une masse faible équivaut à une surface proportionnellement élevée, dès lors que les résultats des analyses sont exprimés vis-à-vis du poids sec. A l'opposée, des aiguilles plus lourdes présentent en proportion une surface de fixation des contaminants plus faible. Cette caractéristique fondamentale des différents échantillons d'aiguilles devra être prise en compte lors de l'interprétation des résultats.

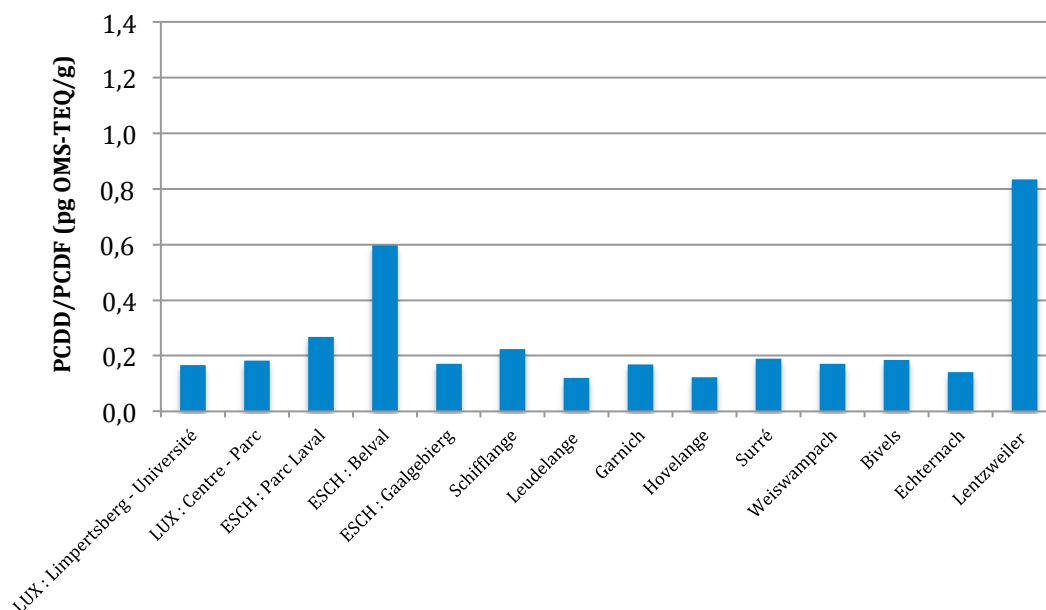
## 4. DIOXINES / FURANNES (PCDD/PCDF)

### 4.1. Expression et présentation des résultats

Parmi les 17 composés et groupes de composés qui forment les équivalents de toxicité des PCDD/PCDF selon la définition de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), deux expressions différentes sont possibles suivant que les limites de quantification analytiques sont comptabilisées ou non. Dans le cas où les composés non quantifiés sont négligés (teneur égale à zéro), l'expression exclusive sous-estime la contamination. En revanche, avec l'intégration des limites, l'expression inclusive surestime la situation réelle. Dans la réglementation communautaire en matière de qualité des denrées alimentaires, l'Union Européenne a fait le choix de la seconde option afin de se placer dans la situation la plus défavorable (*worst case*). En terme d'impact sur l'environnement, il est judicieux d'appliquer une objectivité maximale et de retenir une expression conventionnelle intermédiaire, en comptabilisant la moitié de la limite de quantification.

### 4.2. Campagne de 2016

Parmi les 14 échantillons d'aiguilles d'épicéas analysés en 2016, deux présentent des concentrations en PCDD/PCDF nettement accrues : il s'agit de celui de Lentzweiler et de celui d'Esch-Belval (**figure 5**). Dans les deux cas, c'est une influence industrielle avérée qui est ciblée, à savoir la Z.I. d'Eselborn/Lentzweiler et le site sidérurgique d'Esch-Belval.



**Figure 5.**

Profil spatial en 2016 des concentrations en PCDD/PCDF dans les aiguilles d'épicéas.

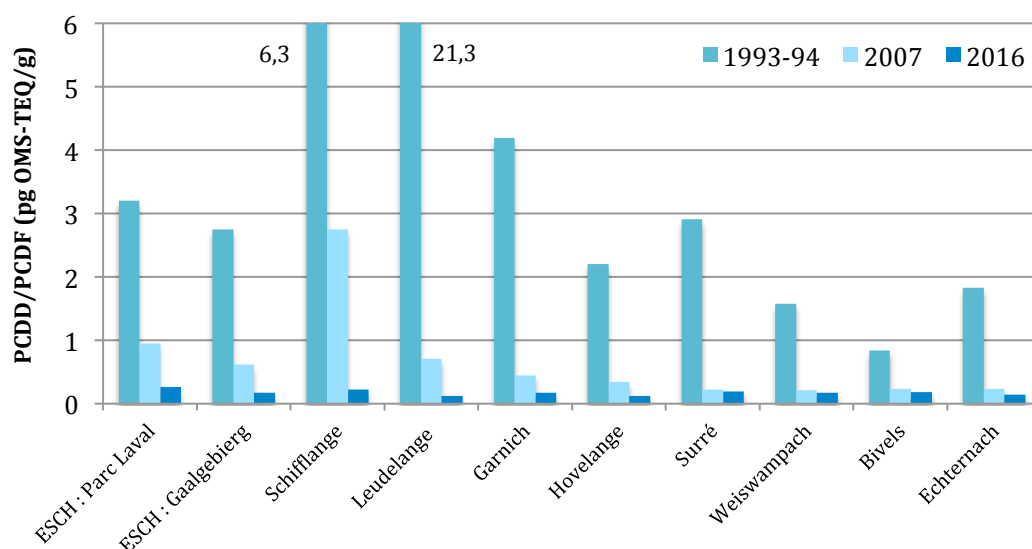


Le Parc Laval à Esch-sur-Alzette objective distinctement un impact secondaire, alors que le site de Schifflange indique une empreinte résiduelle. Les deux stations de la Ville de Luxembourg tout comme Esch-Gaalgebierg affichent des niveaux équivalents à ceux relevés en milieu rural, notamment à Garnich, Surré, Weiswampach et Bivels. Il faut dès lors admettre que la ligne de base des niveaux ubiquitaires de PCDD/PCDF dans les aiguilles d'épicéas s'établit actuellement sous la barre de 0,20 pg OMS-TEQ/g de poids sec.

Trois emplacements se distinguent par des situations de contamination inférieure à la ligne de base : Echternach, Hovelange et surtout Leudelange qui présente la concentration la plus faible du réseau avec 0,12 pg OMS-TEQ/g. Ce constat vient confirmer les enseignements fondés sur le réseau des bryophytes terrestres. Il objective une bonne maîtrise des émissions de PCDD/PCDF de la part de l'incinérateur du SIDOR.

#### 4.3. Evolution entre les campagnes de 1993-94, 2007 et 2016

Le suivi réalisé sur dix stations objective une baisse spectaculaire des teneurs en PCDD/PCDF dans l'intervalle de temps de 22 ans (**figure 6**). L'évolution la plus drastique est constatée à la station de Leudelange où les teneurs passent de 21,3 pg OMS-TEQ/g en 1993 à 0,71 pg OMS-TEQ/g en 2007, puis à 0,12 pg OMS-TEQ/g en 2016. Sur l'ensemble de la période, le facteur de dépollution s'établit à 178. La baisse a été plus progressive à Schifflange en maintenant des niveaux comparativement élevés en 2007 (2,8 pg OMS-TEQ/g). L'arrêt de la production à l'aciérie électrique en octobre 2011 a fait chuter le niveau de contamination d'un facteur de 12,2.



**Figure 6.**

Evolution entre 1993-94 et 2016 des concentrations en PCDD/PCDF dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

Aux huit autres emplacements du réseau, la diminution des PCDD/PCDF se concrétise surtout entre 1993-94 et 2007. Des évolutions ultérieures (entre 2007 et 2016) sont avant tout apparentes aux deux sites d'Esch-sur-Alzette (Parc Laval et *Gaalgebierg*), signant une réduction de l'impact de l'industrie sidérurgique, et, dans une moindre mesure, sur la face ouest du pays, à Garnich et à Hovelange. A Surré, Weiswampach, Bivels et Echternach, le niveau de fond avait déjà été fortement approché en 2007 avec des valeurs juste au-dessus de la barre de 0,20 pg OMS-TEQ/g, soit entre 0,21 et 0,23 pg OMS-TEQ/g.

## 5. POLYCHLOROBIPHENYLES (PCB)

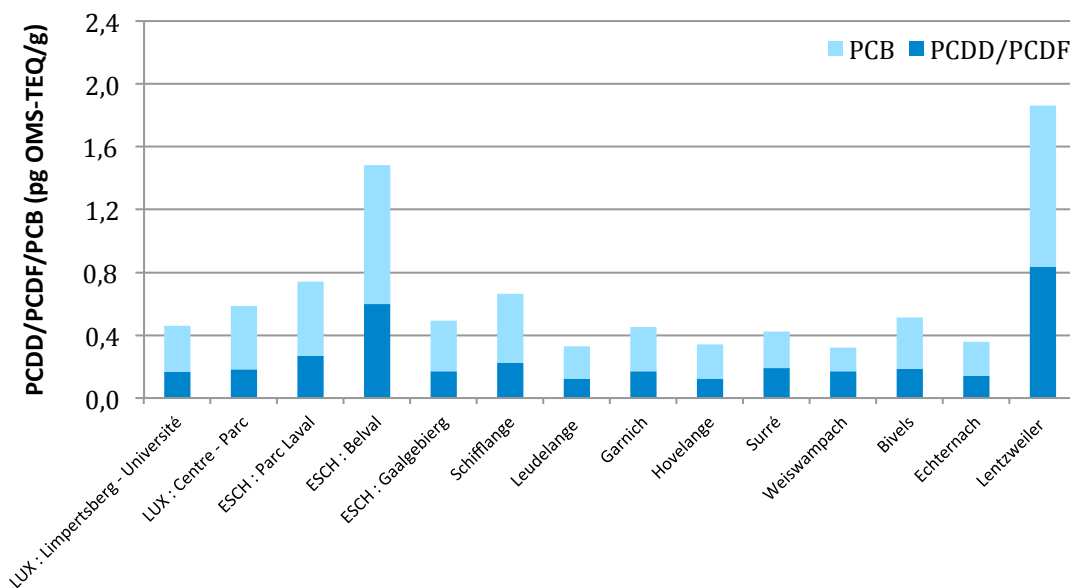
### 5.1. Expression et présentation des résultats

Pour les PCB, il faut distinguer deux approches : d'une part les PCB analogues de dioxines (*dioxin-like* PCB, dl-PCB) et les PCB indicateurs (PCBi)<sup>2</sup>. En raison de leurs propriétés toxicologiques, les dl-PCB sont intégrés aux PCDD/PCDF pour former l'expression d'équivalents de toxicité conventionnelle PCDD/PCDF/PCB. Dans cette expression définie par l'OMS, les PCDD représentent 66,3 % de la toxicité, les PCDF 30,4 % et les dl-PCB seulement 3,2 %. En raison de leur intégration fonctionnelle à l'expression globale, les dl-PCB ne seront pas traités de façon séparée. En revanche, les PCBi, une somme arithmétique de six congénères (numéros conventionnels : 28, 52, 101, 138, 153, 180), font l'objet d'une présentation spécifique. La démarche d'expression des résultats est la même que pour les PCDD/PCDF avec intégration de 50 % des limites de quantification des composés analytiquement non détectés.

### 5.2. PCDD/PCDF/PCB en 2016

Bien que la part relative des dl-PCB soit faible, leur contribution à l'expression PCDD/PCDF/PCB est conséquente (**figure 7**). Sur l'ensemble du réseau, elle s'élève en moyenne à 62 %. La part la plus élevée, 69 %, est relevée à Luxembourg-Centre au parc de la ville et la plus faible à Weiswampach avec 47 %. La contribution des dl-PCB est comparativement élevée dans le contexte de la sidérurgie à Esch-sur-Alzette et à Schifflange et plus faible à Lentzweiler où l'expression PCDD/PCDF/PCB est formée à 45 % de PCDD/PCDF (0,83 pg OMS-TEQ/g) et à 55 % de dl-PCB (1,03 pg OMS-TEQ/g) pour un total de 1,86 pg OMS-TEQ/g.

<sup>2</sup> Des explications concernant cette différenciation dépassent le cadre de ce compte-rendu.



**Figure 7.**

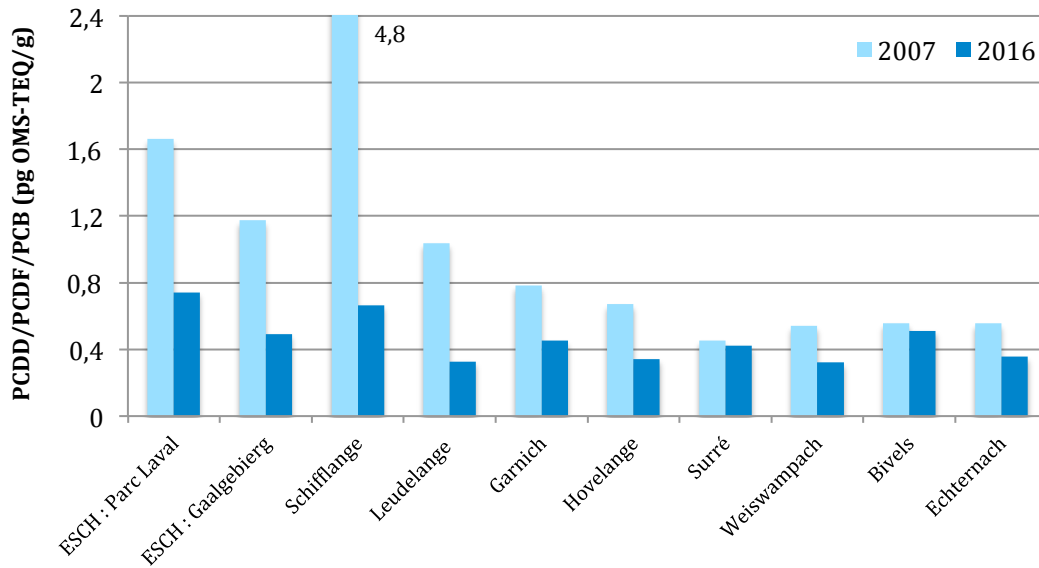
Profil spatial en 2016 des concentrations en PCDD/PCDF/PCB dans les aiguilles d'épicéas.

Le profil spatial des PCDD/PCDF/PCB reste proche de celui des PCDD/PCDF. Le contexte industriel d'Eselborn/Lentzweiler tout comme les activités sidérurgiques à Esch-sur-Alzette (Belval et Parc Laval) et à Schifflange se détachent clairement d'une ligne de base, autour de 0,45 pg OMS-TEQ/g. Vis-à-vis de ce repère, les stations de Luxembourg-Centre et de Bivels affichent des concentrations accrues, alors que Echternach, Hovelange, Leudelange et Weiswampach objectivent les niveaux les plus faibles du réseau.

### 5.3. Evolution des PCDD/PCDF/PCB entre 2007 et 2016

Précisons d'abord que les dl-PCB ont seulement été définis en 1997. De ce fait, ils n'ont pas pu être analysés de façon ciblée à l'occasion de la campagne initiale en 1993-94.

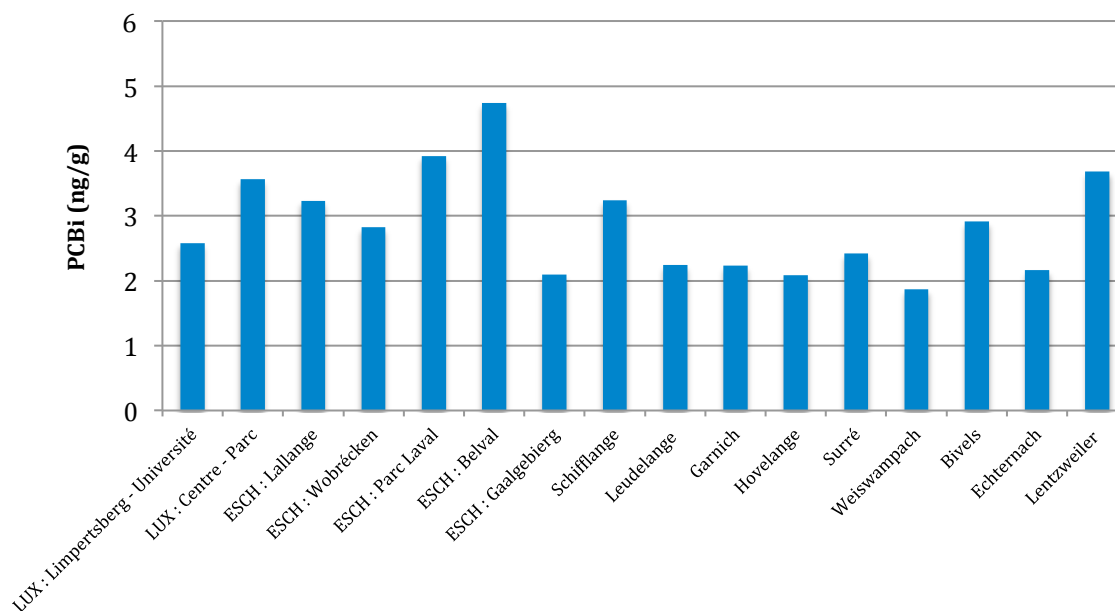
La comparaison des séries de 2007 et de 2016 à un ensemble de dix stations montre que la baisse des niveaux de contamination par les PCDD/PCDF/PCB est plus marquée dans la partie sud du Luxembourg, surtout à Schifflange et y compris à Garnich et à Hovelange, que dans le nord du pays (**figure 8**). Ce constat reflète une évolution favorable plus tardive dans le contexte d'une forte pression industrielle. A Surré et à Bivels, la tendance à la baisse est très modeste ces dix dernières années, alors qu'elle s'est poursuivie à Weiswampach et à Echternach. Dans l'ensemble, il faut constater que le profil spatial évolue vers une certaine uniformisation. Ceci souligne l'intérêt d'inclure au dispositif des emplacements (potentiellement) fortement exposés à des sources contaminantes, comme Esch-Belval et Lentzweiler.



**Figure 8.**  
Evolution entre 2007 et 2016 des concentrations en PCDD/PCDF/PCB dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

#### 5.4. PCB<sub>i</sub> en 2016

Dans l'ensemble, le profil spatial des PCB<sub>i</sub> est moins différencié que celui des PCDD/PCDF/PCB (**figure 9**). Le contraste maximal du réseau atteint un facteur de 2,7 entre Esch-Belval (4,7 ng/g) et Weiswampach (1,8 ng/g). Sans surprise, les deux stations situées sous l'influence



**Figure 9.**  
Profil spatial en 2016 des concentrations en PCB<sub>i</sub> dans les aiguilles d'épicéas.

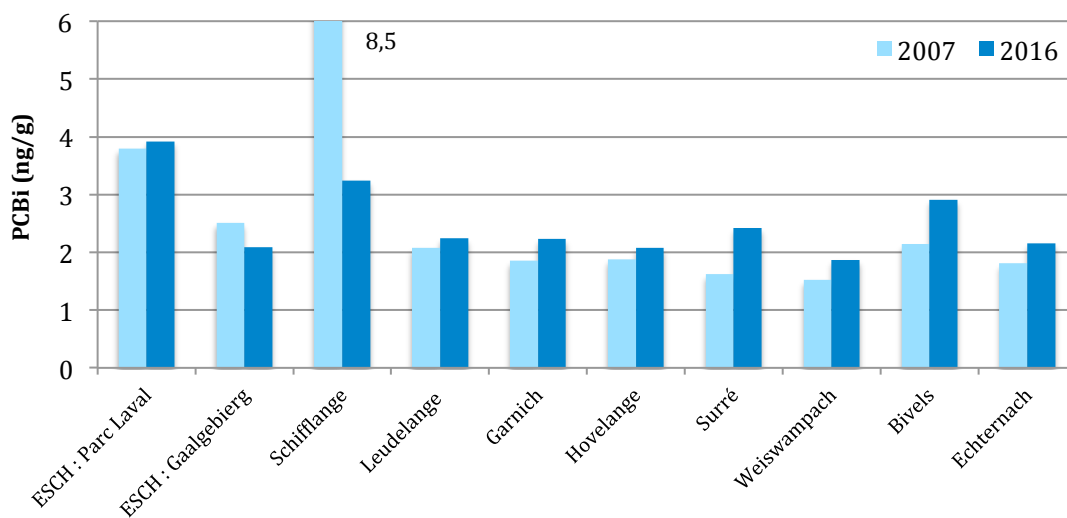


des activités sidérurgiques à Esch-sur-Alzette, Belval et Parc Laval, présentent les niveaux de contamination par les PCB<sub>i</sub> les plus élevés. En troisième position figure Eselborn/Lentzweiler, un site qui cible également des émissions industrielles. Le parc de la Ville de Luxembourg objective une exposition comparativement élevée. Comme pour les PCDD/PCDF/PCB, Schiffflange affiche une empreinte résiduelle.

Avec Esch-Gaalgebierg et Leudelange, les six stations rurales forment une ligne de base autour d'une concentration en PCB<sub>i</sub> de 2,0 ng/g de poids sec. L'impact est légèrement plus élevé à Bivels et à Surré, plus faible à Weiswampach et à Hovelange.

### 5.5. Evolution des PCB<sub>i</sub> entre 2007 et 2016

Deux constats majeurs caractérisent l'évolution des teneurs en PCB<sub>i</sub> sur la période d'environ dix ans (**figure 10**). Le premier est la baisse marquée du niveau de contamination à la station de Schiffflange, passant de 8,5 ng/g à 3,1 ng/g. Ce changement s'explique aisément par l'arrêt de l'aciérie en 2011. Le site d'Esch-Parc Laval, pour sa part, reste certainement influencé par les émissions du complexe sidérurgique d'Esch-Belval. Le deuxième fait marquant est l'importante stabilité des teneurs en PCB<sub>i</sub> à la plupart des stations du suivi, en considérant que les légères augmentations restent dans les marges d'incertitudes d'une technique d'indication biologique. La comparaison des deux campagnes confirme la ligne de base autour de 2,0 ng/g, avec, en 2016 comme en 2007, une situation comparativement plus favorable à Weiswampach et légèrement plus défavorable à Bivels. Ce constat récurrent sur un intervalle de temps d'environ dix ans souligne la fiabilité et la cohérence de la méthode.



**Figure 10.**

Evolution entre 2007 et 2016 des concentrations en PCB<sub>i</sub> dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

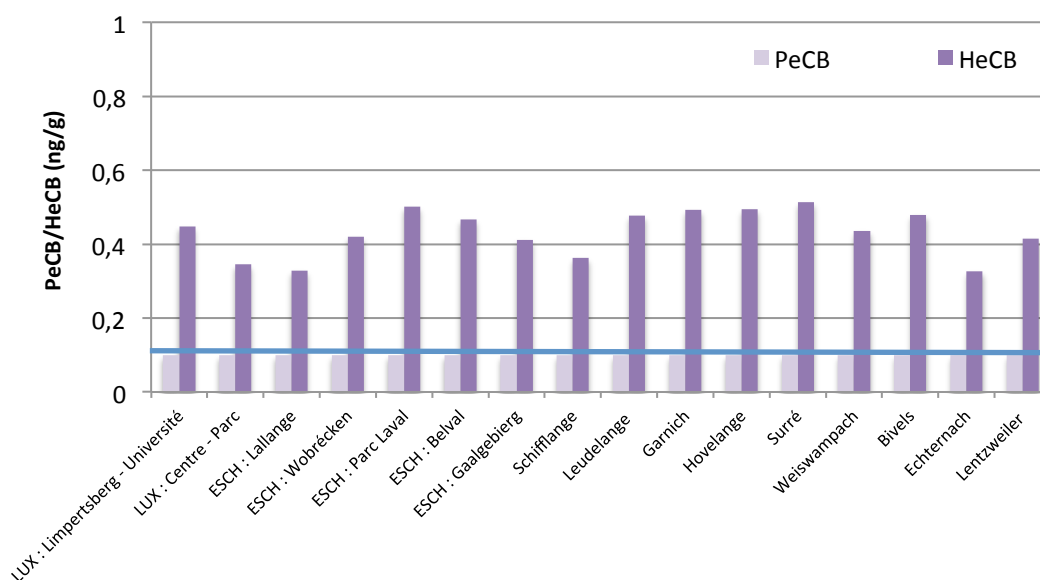
## 6. PENTA- ET HEXACHLOROBENZENE (PeCB, HeCB)

### 6.1. Expression et présentation des résultats

Le PeCB et le HeCB sont deux composés analysés individuellement dans les aiguilles d'épicéas. La réduction de leurs concentrations dans l'environnement fait partie des objectifs de la Convention de Stockholm. Le PeCB a été ajouté au dispositif en 2016, alors que le HeCB est analysé depuis 2007.

### 6.2. Campagne de 2016

Les concentrations du PeCB se situent au-dessous de la limite de quantification analytique de 0,1 ng/g de poids sec à l'ensemble des 16 stations du réseau (**figure 11**). Ce constat peut être interprété de deux manières. La première consiste à admettre que les concentrations dans l'air ambiant sont faibles. L'explication alternative s'appuie sur la volatilité de ce composé qui n'aurait qu'une tendance modeste à se fixer dans la couche de cire qui recouvre les aiguilles d'épicéas.



**Figure 11.**

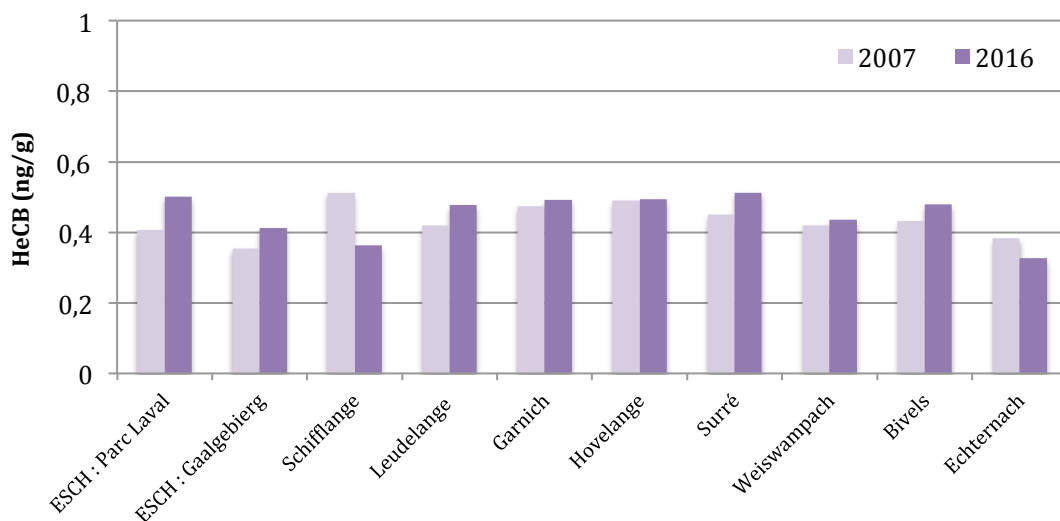
Profil spatial en 2016 des concentrations en PeCB et HeCB dans les aiguilles d'épicéas. Ligne bleue : limite de quantification analytique.

Le HeCB présente un profil relativement homogène autour d'une ligne de référence à environ 0,4 ng/g. Les niveaux les plus élevés sont relevés aux stations d'Esch-Parc Laval et de Surré, les plus faibles à Esch-Lallange et à Echternach. A la fois le faible contraste entre les stations

du réseau et les caractéristiques du profil spatial rendent toute interprétation différentielle peu convaincante. Les deux explications formulées à l'égard du PeCB peuvent également être avancées pour le HeCB, en admettant que l'affinité de celui-ci pour les cires est légèrement plus élevée ou bien que la teneur ubiquitaire dans l'air ambiant est plus importante.

### 6.3. Evolution entre les campagnes de 2007 et 2016

Aux dix stations du réseau qui ont fait l'objet d'une analyse de HeCB à presque une décennie d'intervalle, les niveaux sont étonnamment homogènes à la fois dans l'espace et dans le temps (**figure 12**). Ce résultat appuie l'argumentaire développé ci-dessus, mais souligne également la fiabilité du dispositif - volet échantillonnage et volet analyse -, en ce sens que des teneurs équivalentes sont retrouvées avec des opérateurs et un laboratoire d'analyse différents. La comparaison des données de HeCB n'appelle pas d'autre commentaire.



**Figure 12.**  
Evolution entre 2007 et 2016 des concentrations en PeCB et HeCB dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

---

## 7. HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

---

### 7.1. Expression et présentation des résultats

Conventionnellement, les HAP sont exprimés comme paramètre de groupe, formé par la somme arithmétique de 16 composés définis (en 1977) par l'US-EPA (*Environmental Protection Agency*). Or, il faut constater que le panel conventionnel regroupe des composés très différents, tant par leurs propriétés physico-chimiques que par leurs caractéristiques toxicologiques. Par ailleurs, certains de ces HAP sont ubiquitaires, c'est-à-dire émis par un large spectre de sources, comme la circulation automobile et le chauffage urbain, alors que d'autres composés sont représentatifs d'émissions plus spécifiques. Bien souvent, les HAP ubiquitaires sont majoritaires dans l'empreinte, de sorte qu'une présence accrue des composés les plus toxiques est masquée et peut passer inaperçue.

Dans un objectif d'orienter l'expression des HAP vers une préoccupation environnementale (et sanitaire) plus ciblée, il y a lieu de focaliser l'attention sur les HAP les plus toxiques. A cet égard, le référentiel le plus pertinent à prendre en compte est celui de l'EFSA (*European Food Safety Authority*) qui préconise comme marqueurs de contamination des denrées alimentaires un ensemble de quatre HAP : le benzo(a)pyrène, le chrysène, le benzo(a)anthracène et le benzo(b)fluoranthène [4]. Selon l'EFSA, cette liste peut être étendue à quatre autres substances, en y ajoutant le benzo(k)fluoranthène, le benzo(g,h,i)pérylène, le dibenzo(a,h)anthracène et l'indeno(1,2,3-c,d)pyrène.

Il est important de préciser que le texte réglementaire cité ci-dessus préconise de comptabiliser dans les sommes uniquement les substances quantifiées par les moyens analytiques utilisés et d'attribuer une teneur égale à zéro aux substances non quantifiées<sup>3</sup>. Notons que ce choix d'expression des données est à l'opposé de celui retenu à l'égard des PCDD/PCDF/PCB pour lesquelles les limites de quantification des composés (ou groupe de composés) sont prises en compte dans l'expression des équivalents de toxicité définis par l'OMS (voir 4.1).

Une approche complémentaire à l'expression de la somme des 4 HAP ou des 8 HAP consiste à pondérer les différents composés en leur associant, comme pour les PCDD/PCDF/PCB, des équivalents de toxicité. Cette démarche, validée en France par l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) et le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), attribue au benzo(a)pyrène et au dibenzo(a,h)anthracène la cote de 1, au chrysène et

---

<sup>3</sup> Cette condition pratique équivaut à une exigence de mise en œuvre de moyens analytiques performants.

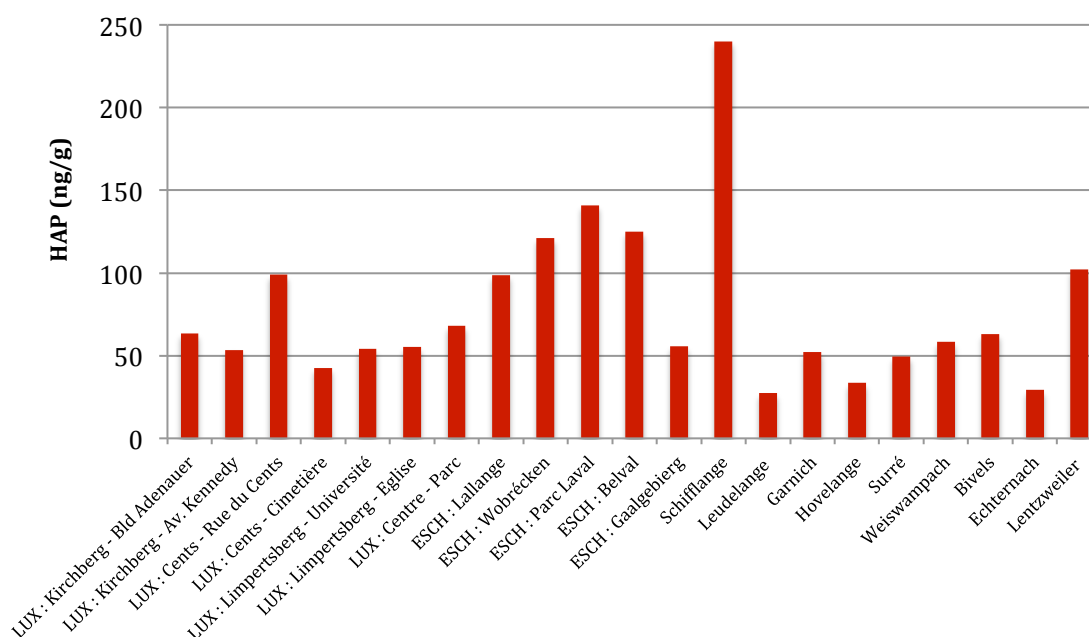


au benzo(g,h,i)pérylène la cote de 0,01, alors qu'aux quatre autres HAP est associée une valeur de 0,1 [5]. La liste exhaustive des cotes est reportée en **annexe 1**.

L'exploitation des données réalisée dans le cadre de ce travail montre que chacune des expressions (16 HAP, 8 HAP, 4 HAP ainsi que les équivalents de toxicité appliqués aux trois listes) présente des avantages et des faiblesses. Une approche exhaustive n'est ici ni souhaitable pour des raisons didactiques, ni pertinente au regard de l'objectif qui consiste en une analyse spatio-temporelle des incidences environnementales de HAP. Afin de rester au plus proche des recommandations actuelles, il y a lieu de se focaliser sur l'expression conventionnelle des 16 HAP et sur l'expression de l'EFSA des 4 HAP. Une représentation des équivalents de toxicité appliqués à la somme des 16 HAP est ajoutée à titre complémentaire.

## 7.2. Expression conventionnelle (HAP 16) en 2016

Parmi les 21 stations du réseau, les incidences de HAP les plus fortes sont relevées à la station de Schiffflange (**figure 13**). Ce résultat est plutôt surprenant, étant donné que la source ponctuelle potentiellement émettrice de HAP, à savoir l'aciérie électrique, n'est plus en fonctionnement depuis octobre 2011. Si l'on admet que les sources diffuses à base d'énergies fossiles, comme le trafic automobile et le chauffage urbain, ne sont pas différentes à Schiffflange que dans d'autres agglomérations, il faut orienter les hypothèses vers une autre origine ponctuelle. A défaut d'identifier cette source, il faut envisager comme interprétation



**Figure 13.**

Profil spatial en 2016 de l'expression conventionnelle des 16 HAP dans les aiguilles d'épicéas.

alternative une interférence au niveau du processus analytique ou même une contamination lors du prélèvement ou lors de la phase de préparation des échantillons.

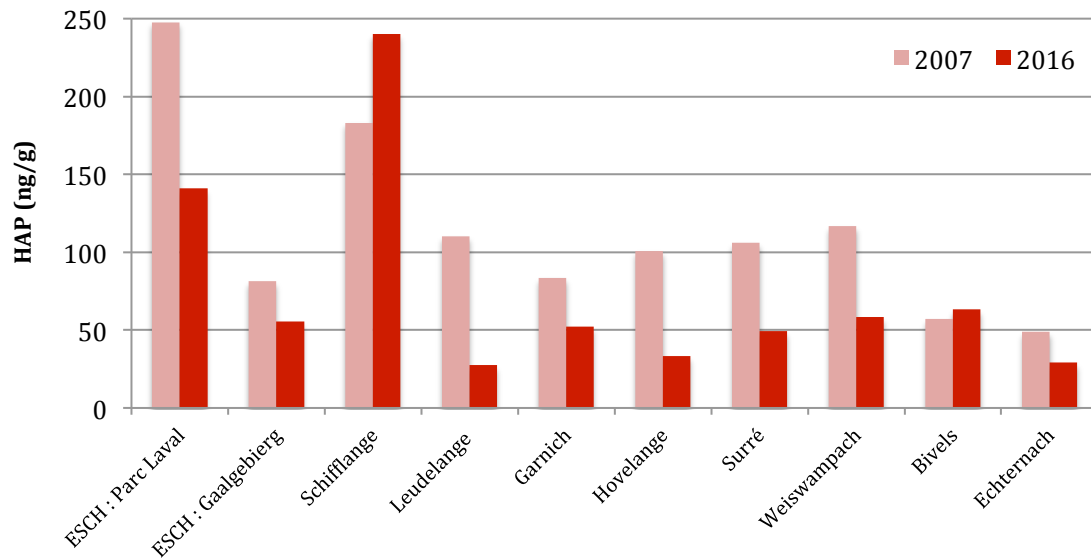
Hormis la situation isolée de Schifflange, c'est l'agglomération d'Esch-sur-Alzette qui présente les concentrations en HAP les plus élevées, avec un maximum en centre-ville au niveau du Parc Laval. Les niveaux de contamination décroissent ensuite vers Esch-Belval, Esch-Wobrécken et Esch-Lallange. Des teneurs en HAP distinctement accrues à Lentzweiler tracent les activités industrielles toutes proches. A Luxembourg-ville, la station de la Rue du Cents forme un contraste notable vis-à-vis du deuxième site du quartier du Cents à proximité du cimetière. Dans ce cas, l'explication est avérée, puisque le site le plus exposé du plateau du Cents cible à la fois le trafic autoroutier de l'A1, le trafic aérien et une centrale d'enrobage (production d'asphalte) à proximité.

Les emplacements des quartiers du Limpertsberg et du Kirchberg à Luxembourg, tout comme celui du *Gaalgebierg* à Esch-sur-Alzette affichent des concentrations proches de celles rencontrées en milieu rural. La ligne de base représentant le niveau ubiquitaire des HAP dans les aiguilles d'épicéas s'établit autour de 50 ng/g de poids sec. Vis-à-vis de ce référentiel, les trois sites les moins exposés aux HAP sont Hovelange, Echternach et Leudelange. Que la station de Leudelange objective la situation la moins impactée du réseau, malgré l'influence de l'incinérateur du SIDOR, peut surprendre, mais cette réalité est vérifiée sur la base des suivis annuels fondés sur l'indication par les bryophytes terrestres.

### 7.3. Evolution des HAP 16 entre 2007 et 2016

Entre 2007 et 2016, les teneurs en HAP dans les aiguilles d'épicéas tracent, dans l'ensemble, une tendance à la baisse (**figure 14**). Cette évolution se concrétise nettement aux stations situées à proximité d'émetteurs ponctuels, comme Esch-Parc Laval (sidérurgie) et surtout Leudelange (incinérateur). Toutefois, elle se vérifie également à l'ensemble des sites ruraux, à l'exception de celui de Bivels, qui, lui, affichait déjà des concentrations comparativement faibles en 2007. Il est intéressant de remarquer que les deux diagnostics espacés de plus de dix ans révèlent la station d'Echternach comme la moins exposée aux HAP ; ce résultat récurrent souligne la fiabilité du suivi.

Le cas spécifique de la station de Schifflange, qui évolue à contre-courant de la tendance générale, a été détaillée plus haut (voir 7.2).



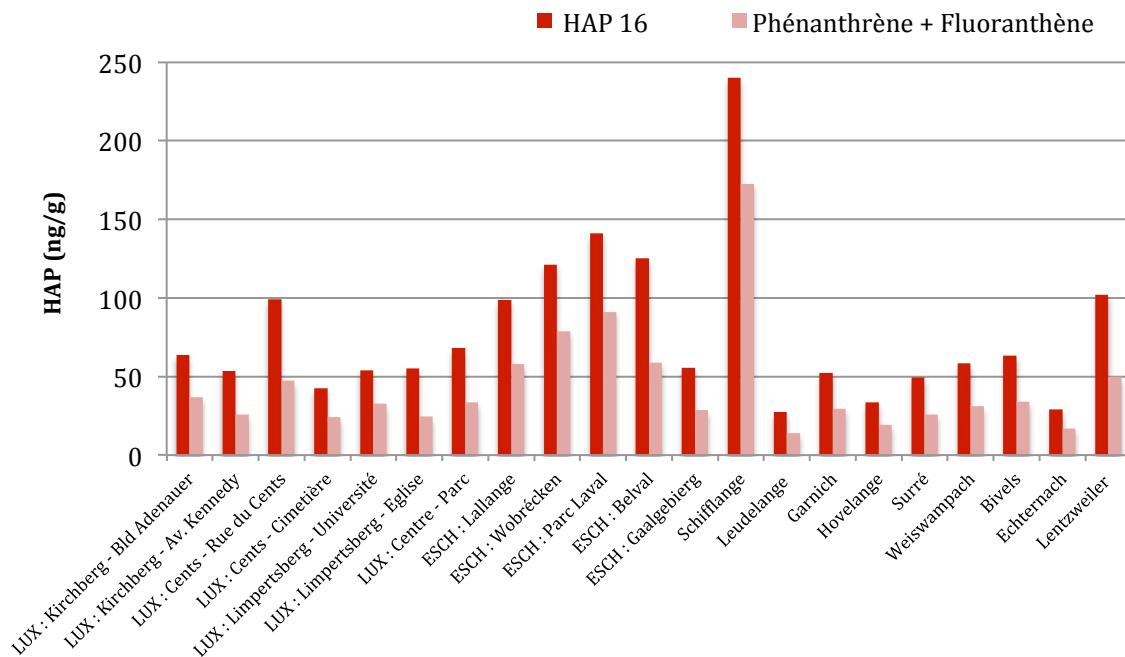
**Figure 14.**

Evolution entre 2007 et 2016 de l'expression conventionnelle des 16 HAP dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

#### 7.4. HAP 16 en 2016 et part des HAP majeurs

Les profils chimiques des HAP aux 21 stations du réseau de suivi sont systématiquement dominés par un composé majoritairement issu d'émissions diffuses, à savoir le phénanthrène. A titre d'exemple, à la station d'Esch-Wobrécken, ce composé représente 56 % de la somme des 16 HAP conventionnels (67 ng/g sur 121 ng/g). Un deuxième HAP apparaît également à des teneurs régulièrement élevées : il s'agit du fluoranthène.

La comparaison entre l'expression conventionnelle des 16 HAP et la somme des 2 HAP que sont le phénanthrène et le fluoranthène objective le poids relatif de ceux-ci (**figure 15**). Ainsi, l'apport de ces deux composés à la somme conventionnelle s'élève par exemple à 57 % à Garnich, à 65 % à Esch-Wobrécken et même à 72 % à Schiffflange. Avec une domination relative aussi importante, les HAP majeurs d'origine diffuse ont pour effet de masquer fortement des composés nettement plus problématiques, présents à des teneurs plus faibles.



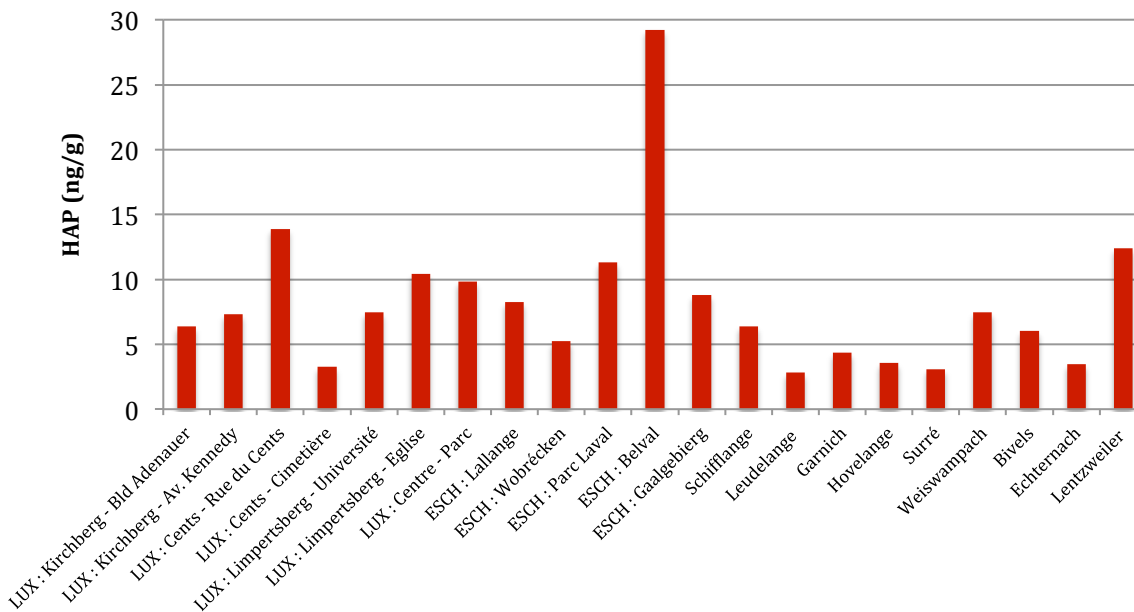
**Figure 15.**

Comparaison suivant le profil spatial de 2016 de la somme conventionnelle des 16 HAP avec la somme de deux HAP ubiquitaires, le phénanthrène et le fluoranthène, dans les aiguilles d'épicéas.

### 7.5. HAP 4 en 2016

L'expression des 4 HAP fournit un profil spatial très différent de l'expression conventionnelle des 16 HAP (**figure 16**). Les stations qui ressortent au premier plan sont celles soumises à une influence industrielle, précisément Esch-Belval (sidérurgie), Luxembourg-Rue du Cents (centrale d'enrobage, plus trafic autoroutier et aérien) et Eselborn/Lentzweiler (surtout industrie de l'aluminium). Deux autres sites d'Esch-sur-Alzette présentent des concentrations accrues : *Gaalgebierg* et Parc Laval. En revanche, Schiffflange revient à des niveaux proches de la majorité des emplacements de la Ville de Luxembourg, mais également de Weiswampach et de Bivels. Les teneurs les plus faibles sont relevées aux stations rurales de Hovelange, Surré, Echternach et Garnich, mais également à Leudelage, Luxembourg-Cents - cimetière, Esch-Wobrécken et Luxembourg-Kirchberg au droit du Boulevard Adenauer. Au regard de l'ensemble de ces emplacements, la ligne de base des 4 HAP dans les aiguilles d'épicéas s'établit autour de 5 ng/g.

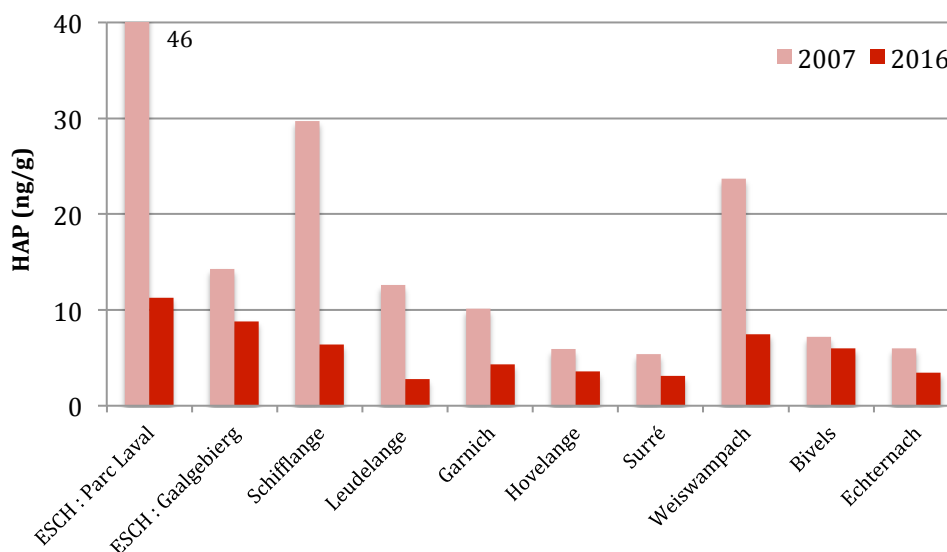




**Figure 16.**  
Profil spatial en 2016 de l'expression des 4 HAP dans les aiguilles d'épicéas.

### 7.6. Evolution des HAP 4 entre 2007 et 2016

Sur la base de la somme des 4 HAP, les niveaux de contamination régressent à l'ensemble des dix stations pour lesquelles des données de 2007 sont disponibles (**figure 17**). L'évolution est

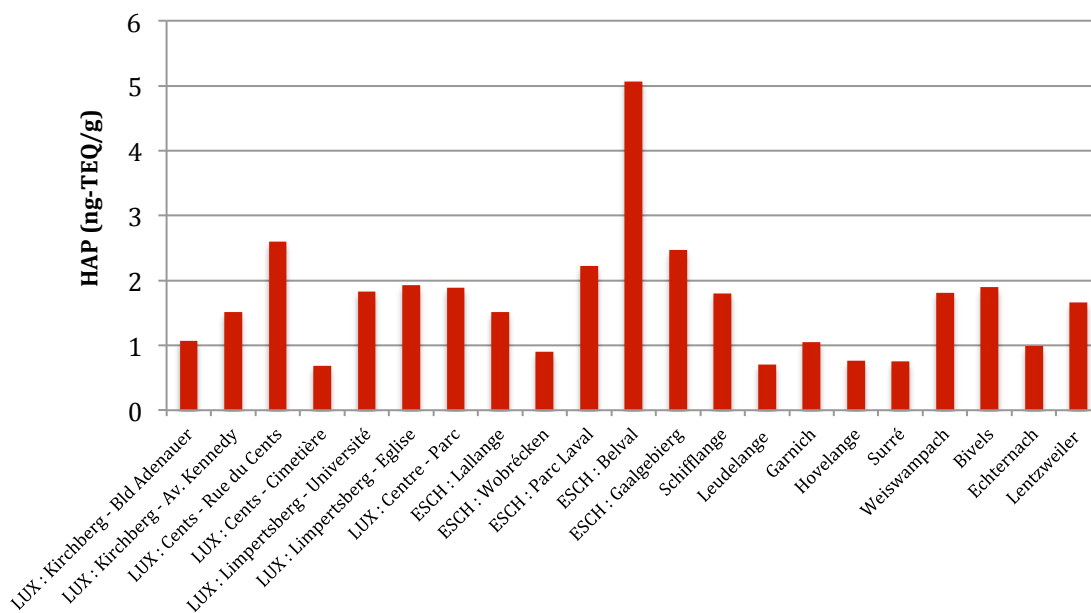


**Figure 17.**  
Evolution entre 2007 et 2016 de l'expression des 4 HAP dans les aiguilles d'épicéas sur un réseau de dix stations.

particulièrement marquée à la station de Schiffflange, ce qui d'une part trace l'arrêt de l'activité sidérurgique locale et, d'autre part, tend à relativiser l'impact d'une possible deuxième ou nouvelle source d'émission de HAP. Parmi les autres sites, c'est Esch-Parc Laval qui maintient le niveau de contamination le plus élevé ; ce constat reflète clairement une composante industrielle.

**7.7. Equivalents de toxicité appliqués à l'expression conventionnelle des HAP en 2016**

L'application des équivalents de toxicité des 16 HAP (**figure 18**) fournit, pour la série de 2016, un profil spatial proche de celui de la somme des 4 HAP (voir 7.5, figure 16). Les sites à proximité d'émetteurs industriels forment un contraste marqué vis-à-vis des stations rurales les moins exposées aux HAP. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque les équivalents de toxicité pondèrent les différents composés en faisant ressortir les plus toxiques et en réduisant l'influence relative de ceux considérés comme les moins problématiques.



**Figure 18.**  
Profil spatial en 2016 des équivalents de toxicité appliqués à l'expression conventionnelle des 16 HAP dans les aiguilles d'épicéas.

## 8. METAUX LOURDS

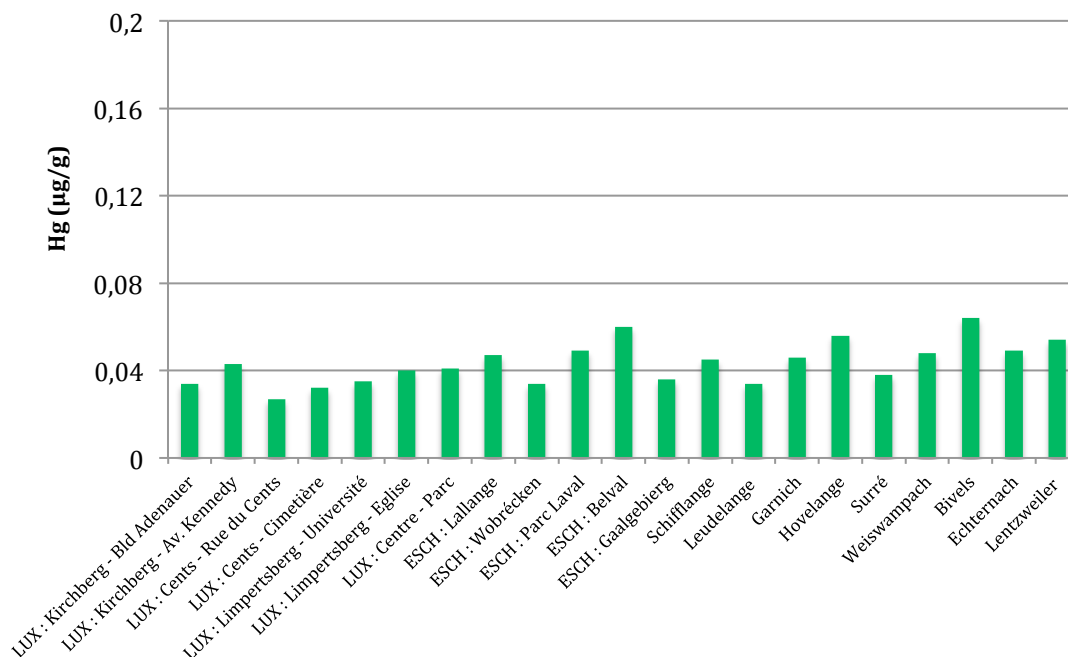
### 8.1. Expression et présentation des résultats

Parmi les sept éléments métalliques analysés, l'interprétation se focalise sur les trois métaux lourds que sont le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb). Les métaux traces, chrome (Cr), nickel (Ni) et zinc (Zn), tout comme le métalloïde arsenic (As) ne sont pas présentés en détail. En revanche, la comparaison entre 1993 et 2016 permet d'apprécier l'évolution sur un intervalle de temps de presque un quart de siècle.

### 8.2. Métaux lourds en 2016

#### Mercurure (Hg)

Le profil spatial du Hg est caractérisé par une amplitude faible (**figure 19**). Dans l'ensemble, il y a peu de contraste entre les grandes agglomérations, Luxembourg et Esch-sur-Alzette, et les stations rurales. Les concentrations sont même plus élevées aux emplacements du nord du pays qu'à l'intérieur de l'agglomération de Luxembourg. A Esch-sur-Alzette, le site industriel de Belval objective la valeur la plus élevée du réseau, suivi de la station du Parc Laval. Parmi



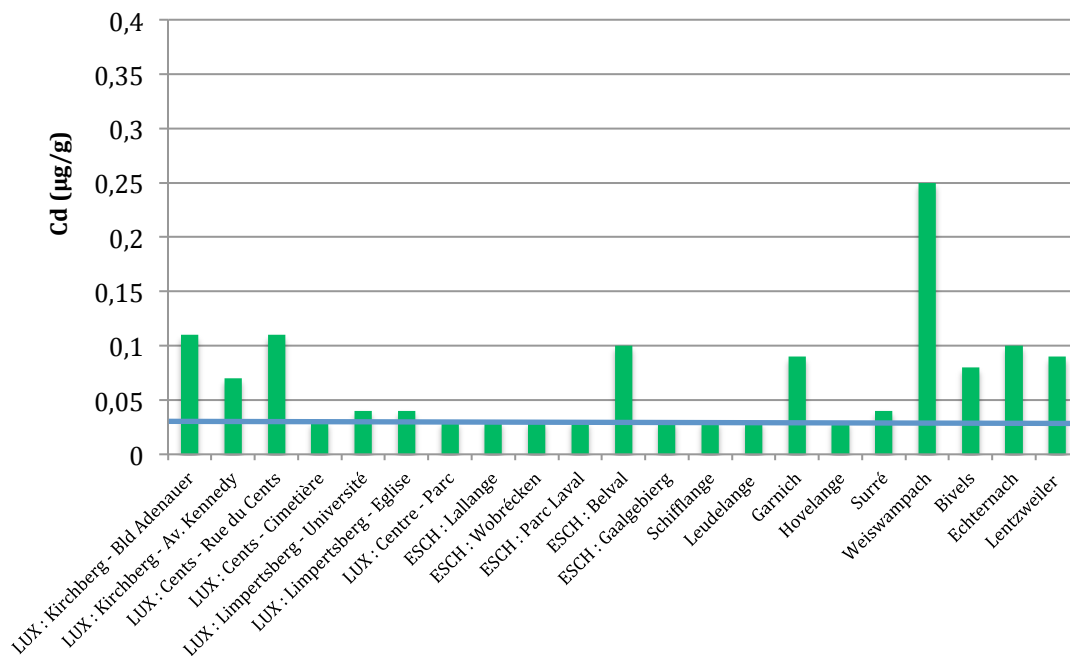
**Figure 19.**  
Profil spatial en 2016 des concentrations en Hg dans les aiguilles d'épicéas.

les sites en milieu rural, ce sont Bivels et Hovelange qui présentent les niveaux comparativement les plus importants. Les fluctuations autour d'une ligne de base à environ 0,04 µg/g peuvent être attribuées à la fois à des émissions locales d'envergure modeste et à des caractéristiques géochimiques spécifiques.

*Cadmium (Cd)*

Pour ce métal lourd, c'est Weiswampach qui ressort comme le site le plus exposé (**figure 20**). Ce constat est plutôt surprenant et, en l'absence d'émetteur connu à l'échelle locale, il y a lieu de proposer les hypothèses d'une origine géochimique de Cd ou d'un épisode de contamination particulier. Alternativement, à défaut de confirmer ces options, le processus analytique (depuis le prélèvement des échantillons) doit être incriminé.

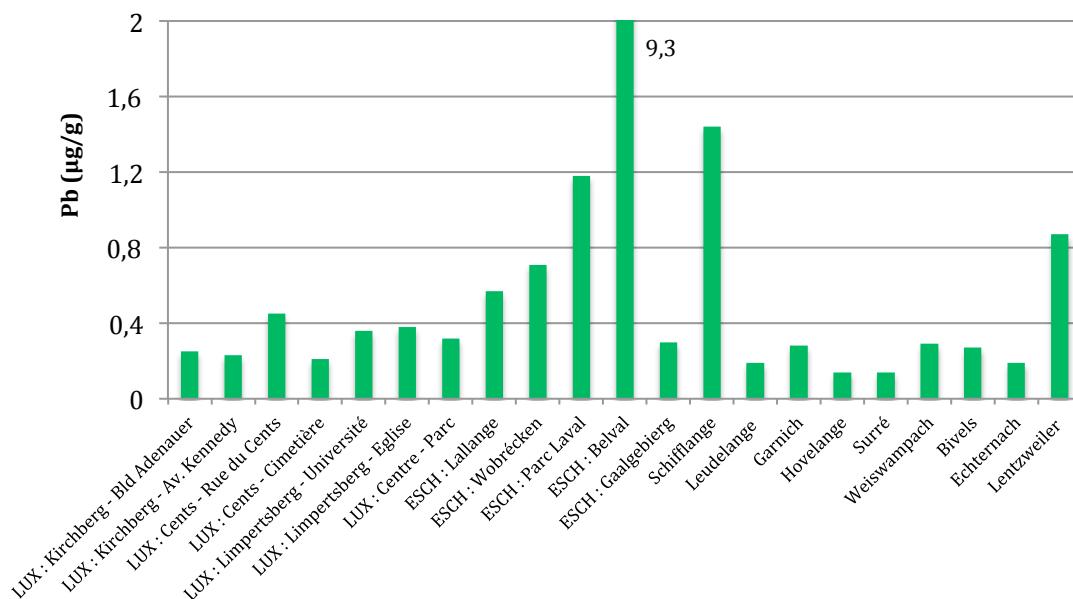
A sept de 21 stations du réseau, les teneurs en Cd restent au-dessous de la limite de quantification établie à 0,03 µg/g de poids sec. Aux autres emplacements, à l'exception de Weiswampach, les niveaux atteignent au maximum la barre de 0,1 µg/g. Ces niveaux faibles vis-à-vis du seuil de quantification analytique rendent difficile toute interprétation fine des résultats.



**Figure 20.**  
Profil spatial en 2016 des concentrations en Cd dans les aiguilles d'épicéas.  
Ligne bleue : limite de quantification analytique.

*Plomb (Pb)*

Contrairement aux deux autres métaux lourds, le Pb affiche un profil spatial fortement différencié (**figure 21**). Il souligne ses qualités de traceur des activités industrielles, étant donné que les niveaux de contamination les plus élevés sont relevés sous l'influence du site sidérurgique d'Esch-Belval, à Schiffflange sous forme d'une empreinte résiduelle et à Lentzweiler. A Esch-sur-Alzette, le Parc Laval est davantage exposé que les quartiers de Wobrécken et de Lallange alors que le *Gaalgebierg* est largement épargné. A Luxembourg-ville, la concentration en Pb comparativement plus élevée au site de la Rue du Cents s'explique également par les activités économiques locales tandis que les plateaux du Kirchberg et du Cents, largement ouverts aux vents, sont caractérisés par des niveaux plus faibles qu'au Limpertsberg et au centre-ville. Parmi les sites ruraux, Surré, Hovelange et Echternach se distinguent par les teneurs les plus faibles, autour de 0,2 µg/g. La concentration légèrement accrue à Weiswampach tend à confirmer le résultat du Cd.



**Figure 21.**  
Profil spatial en 2016 des concentrations en Pb dans les aiguilles d'épicéas.

**8.3. Evolution des métaux lourds et métaux traces entre 1993 et 2016**

Des métaux lourds et métaux traces ont été analysés à l'occasion d'une campagne menée en 1993 à un ensemble de sept stations, dont quatre sont communes au relevé de 2016. L'évolution des teneurs métalliques dans les aiguilles d'épicéas dans l'intervalle de temps de



23 ans est présentée sous forme de tableau, car, pour la plupart des éléments, la diminution est telle qu'une représentation graphique est peu expressive.

#### *Arsenic (As)*

En 2016, les concentrations en As sont comprises dans une gamme restreinte, entre 0,04 et 0,14  $\mu\text{g/g}$  de poids sec (**tableau 4**). En 1993, le maximum culminait à 1,8  $\mu\text{g/g}$  à Schiffflange. A cette station, la baisse entre 1993 et 2016 représente un facteur de 16,4.

**Tableau 4.**

Evolution entre 1993 et 2016 des teneurs en métaux lourds et métaux traces (en  $\mu\text{g/g}$  de poids sec) dans des aiguilles d'épicéas collectées à quatre sites.

<b>Métal</b>	<b>10 Esch Parc Laval</b>	<b>13 Schiffflange</b>	<b>14 Leudelage / Kockelscheuer</b>	<b>15 Garnich / Holzem</b>
<b>Arsenic (As)</b>				
2016	0,14	0,11	0,04	0,06
1993	0,46	1,8	< 0,40	< 0,40
<b>Cadmium (Cd)</b>				
2016	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,09
1993	0,27	1,3	0,17	0,32
<b>Chrome (Cr)</b>				
2016	0,42	0,38	0,14	0,16
1993	6,8	13	3,9	18
<b>Mercure (Hg)</b>				
2016	0,05	0,05	0,03	0,05
1993	0,80	0,93	0,89	0,36
<b>Nickel (Ni)</b>				
2016	0,35	0,23	0,55	2,2
1993	1,6	1,8	1,8	4,4
<b>Plomb (Pb)</b>				
2016	1,2	1,4	0,19	0,28
1993	30	120	5,5	6,5
<b>Zinc (Zn)</b>				
2016	55	44	41	111
1993	110	490	80	< 80

#### *Cadmium (Cd)*

A trois des quatre emplacements, les teneurs en Cd se situent en 2016 au-dessous de la limite de quantification de 0,03  $\mu\text{g/g}$ . La valeur accrue relevée à Garnich en 2016 est nettement

inférieure au niveau le plus faible mesuré en 1993. A Schiffflange, la chute des concentrations en Cd dépasse un facteur de 43.

#### *Chrome (Cr)*

En 2016, le Cr est quantifié sous la barre de 0,5 µg/g aux quatre sites. A la station de Garnich, la baisse enregistrée représente un facteur de 112. Aux autres emplacements, l'évolution est moins importante, mais atteint tout de même un multiple de presque 28 à Leudelage.

#### *Mercuré (Hg)*

Les concentrations de Hg fluctuent en 2016 autour d'une ligne de base à environ 0,04 µg/g (voir 8.2). Aux trois sites directement sous l'influence d'émetteurs à Esch, Schiffflange et Leudelage, les teneurs dépassaient 0,80 µg/g en 1993, soit *a minima* 16 fois plus élevées.

#### *Nickel (Ni)*

L'évolution des concentrations en Ni dans les aiguilles d'épicéas est légèrement moins importante, en ce sens que les facteurs de diminution sont compris entre 2,0 à Garnich et 7,8 à Schiffflange. Le Ni ne peut dès lors pas être considéré comme un traceur des activités économiques ciblées.

#### *Plomb (Pb)*

La régression du traceur spécifique du secteur de la sidérurgie qu'est le Pb est spectaculaire à Schiffflange et à Esch-Parc Laval avec des facteurs de respectivement 86 et 25. Le site de Leudelage atteint en 2016 un niveau particulièrement faible, en baisse d'un facteur de 29 par rapport à 1993.

#### *Zinc (Zn)*

Le Zn est à la fois un traceur des activités industrielles (sidérurgie et métallurgie) et un métal ubiquitaire. A Schiffflange, la diminution entre 1993 et 2016 dépasse un facteur de 11 ; l'évolution est nettement plus modeste aux trois autres emplacements.

## **9. ENSEIGNEMENTS PRATIQUES**

---

### **9.1. Appréciation générale**

Ce diagnostic d'impact sur la base d'analyses d'aiguilles d'épicéas et la comparaison avec les résultats des campagnes précédentes a conduit à plusieurs réflexions et enseignements d'ordre

pratique. Pour éviter de déborder le cadre du présent compte rendu, les différentes thématiques sont traitées de façon synthétique, mais pourront être développées par la suite.

## **9.2. Fiabilité des données de 1993-94 et de 2007**

A l'occasion des campagnes de 2007 et de 1993-94, les protocoles de prélèvement et de traitement des échantillons ont été documentés de façon insuffisante pour garantir une parfaite continuité méthodologique en 2016. D'un autre côté, les technologies d'analyse des contaminants traces ont beaucoup évolué ces 25 dernières années. Sur la base de ces deux facettes se pose la question de la fiabilité des données anciennes et, par conséquent, de la pertinence d'une comparaison directe avec les résultats actuels.

A ce titre, une brève enquête a été menée et il s'est avéré que les signataires des bordereaux d'analyses de 2007 et de 1993-94 présentent une réputation telle que les résultats doivent être considérés comme fiable au regard des moyens techniques à disposition. Sur cette base, il faut admettre que les évolutions constatées dans le temps et dans l'espace correspondent bien à la réalité, toujours sous réserve de conditions rétrospectivement non maîtrisables.

## **9.3. Limites de quantification analytiques**

Dans plusieurs groupes de contaminants environnementaux, avant tout les PCDD/PCDF, le PeCB et les PCB, les concentrations mesurées touchent les limites de quantification analytiques. Ce constat est réjouissant en terme de niveau de contamination environnementale, mais il influe sur la précision de l'analyse, notamment à l'égard des paramètres de groupe, en ce sens qu'il impose un choix d'inclure ou d'exclure les limites de quantification des résultats. Lors d'une prochaine campagne, il faudra se préoccuper des limites de quantification sous deux angles : (1) augmenter la sensibilité du processus analytique et (2) alternativement, renoncer à des analyses qui n'apportent pas (plus) d'information pertinente en raison de concentrations jugées très faibles.

## **9.4. Influence de la biométrie des aiguilles sur les teneurs en contaminants**

Aux différentes stations du réseau, le poids de 1.000 aiguilles varie pratiquement du simple au double, avec un minimum de 1,586 g à Luxembourg-Rue du Cents et un maximum de 2,989 g à Surré. A ceci s'ajoute que certains arbres présentent des aiguilles de taille plus petite ; ceci est notamment le cas à Luxembourg-Centre Parc et à Hovelange. Pour des résultats exprimés par rapport au poids sec, les aiguilles comparativement légères devraient accumuler les contaminants à des teneurs plus élevées. De façon analogue, des aiguilles plus petites présentent une surface d'exposition plus importante à l'air ambiant.

A la station de Luxembourg-Centre Parc *Kinnekswiss*, par exemple, les concentrations en HAP sont légèrement plus élevées qu'aux autres emplacements de l'agglomération. Se pose alors la question de savoir, si cette différence est liée à la qualité de l'air ou à une plus grande surface de sorption. De la même manière, est-ce que les niveaux de contamination à Esch-Belval et à Luxembourg-Rue du Cents sont surestimés, en raison d'un poids d'aiguilles faible ? Dans ce cas, les valeurs très faibles mesurées à Hovelange devraient également être surévaluées, en raison de la petite taille des aiguilles. A l'opposé, aux stations présentant des poids d'aiguilles élevés les contaminations devraient être sous-estimées. Ceci serait le cas, par exemple, aux sites de Leudelange et de Surré, alors que le premier présente des concentrations comparativement faibles et le second des teneurs plutôt élevées parmi les stations rurales.

En définitive, il est très difficile d'appréhender à sa juste dimension l'influence des caractéristiques biométriques sur les propriétés de bioaccumulation des contaminants environnementaux. Les raisonnements tenus sont corrects d'un point de vue théorique, mais ils ne permettent pas de tirer d'enseignements concluants d'un point de vue pratique. Pour l'indication biologique fondée sur les aiguilles d'épicéas, comme pour d'autres techniques biologiques (ou non), il faut considérer que chaque résultat constitue une donnée singulière et complexe, résultant d'un ensemble d'influences tant écophysiologicals, écotoxicologiques (exposition, régime d'impact) et météorologiques.

### **9.5 Expression des HAP**

L'analyse des profils chimiques des HAP montre que l'expression conventionnelle sous la forme d'une somme arithmétique de 16 composés n'est pas entièrement satisfaisante, dès lors qu'il s'agit de mettre en évidence des impacts spécifiques. Ainsi, la forte influence de HAP ubiquitaires, notamment le phénanthrène et le fuoranthène, a tendance à masquer des substances nettement plus problématiques et présentes en concentrations comparativement plus faibles. Des pistes visant une approche plus différenciée consistent à prendre en compte une liste réduite de 4 HAP (selon les recommandation de l'EFSA), à appliquer des équivalents de toxicité ou à s'appuyer sur le traceur phare qu'est le benzo(a)pyrène. Au regard de nouvelles sources d'émission de HAP, cette thématique mérite d'être poursuivie au-delà de ce diagnostic fondé sur les aiguilles d'épicéas.

---

## 10. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

---

### *Cadre général*

En fin d'été 2016, des échantillons d'aiguilles d'épicéas ont été collectés sur un réseau de 21 stations à travers tout le Luxembourg dans le but d'actualiser des diagnostics précédents réalisés en 2007 et en 1993-94. La démarche d'ensemble s'inscrit dans les programmes de suivi dans le cadre de la **Convention de Stockholm** visant à réduire la dispersion de polluants organiques persistants dans l'environnement.

### *Base de données*

Une première phase a consisté à élaborer une banque de données contenant sous un format conventionnel **tous les résultats disponibles depuis 1993**. L'ensemble des expressions a fait l'objet d'une mise à jour, de sorte que les données acquises suivant un axe temporel sont rendues directement comparables. La version informatique de la banque de données est conçue de façon évolutive et pourra être adaptée ou complétée au gré des besoins.

### *Fait majeur : évolution entre 1993 et 2016*

Le constat majeur du suivi environnemental fondé sur les aiguilles d'épicéas est incontestablement la **forte diminution des niveaux de contamination** entre 1993 et 2016. Les baisses les plus spectaculaires sur cette période de 23 ans sont enregistrées pour les **dioxines/furannes** (PCDD/PCDF). A Schifflange, par exemple, les concentrations se révèlent être presque 28 fois plus faibles en 2016 qu'en 1993. Sous les vents dominants de l'incinérateur du SIDOR à Leudelange, les aiguilles d'épicéas indiquent même une chute des teneurs d'un facteur de 178. Des évolutions tout aussi favorables sont enregistrées pour les **métaux lourds**, surtout ceux qui tracent des émissions industrielles. Pour la plupart des éléments suivis, il n'est pas rare de constater des baisses de contamination de facteurs qui s'échelonnent entre 10 et 100. Dans le cas des **hydrocarbures aromatiques polycycliques** (HAP), les évolutions entre 2007 et 2016 sont plus modestes, mais la tendance générale suit également un mouvement dans le sens de la diminution.

En revanche, des **variations nettement plus faibles** dans le temps sont objectivées à l'égard des **polychlorobiphényles** (PCB), qu'il s'agisse des dl-PCB (analogues de dioxines) ou des PCBi (indicateurs), et aussi à l'égard du **hexachlorobenzène** (HeCB). Dans les deux cas, il est difficile de savoir, sur la base des données disponibles, si ces composés se maintiennent à des niveaux accrus ou, au contraire, si une ligne de base par rapport à laquelle toute diminution supplémentaire devient de plus en plus difficile est actuellement atteinte.



---

### *Profil spatial de la campagne de 2016*

Pour les traceurs majeurs que sont les PCDD/PCDF/PCB, les HAP et les métaux lourds, les incidences les plus fortes sont clairement associées aux stations directement influencées par des **émetteurs connus et avérés**, que ce soit l'aciérie d'Esch-Belval, l'industrie de l'aluminium à Eselborn/Lentzweiler ou la centrale d'enrobage (production d'asphalte) dans un contexte de trafic autoroutier et aérien à Luxembourg-Cents. Les teneurs les plus élevées en PCDD/PCDF/PCB sont ainsi relevées dans les épicéas à Lentzweiler, alors qu'Esch-Belval se distingue à l'égard des PCB, des HAP et des métaux lourds, particulièrement du plomb. A ces situations d'exposition actuelle, il faut ajouter l'empreinte résiduelle à Schifflange, qui trace la baisse des retombées de contaminants environnementaux suite à l'arrêt de la production en octobre 2011.

Le site de Leudelange présente une situation particulière, en ce sens que les niveaux de contamination y figurent actuellement parmi les plus faibles du réseau de suivi, et ce malgré la proximité immédiate de l'**incinérateur du SIDOR**. Sur la base de ce constat, il faut admettre que les émissions atmosphériques sont maîtrisées au point que l'impact dans l'environnement est jugé très faible. Cette situation favorable est confirmée sur la base d'une autre technique biologique, à savoir celle des bryophytes terrestres, mise en œuvre à un rythme annuel.

Les deux agglomérations qui ont fait l'objet d'une approche plus différenciée, Luxembourg et Esch-sur-Alzette, objectivent des caractéristiques contrastées. A **Esch-sur-Alzette**, le Parc Laval et, dans une moindre mesure, les quartiers de Wobrécken et de Lallange, sont clairement touchés par la pression industrielle locale. A **Luxembourg-Ville**, en revanche, les teneurs mesurées restent plus faibles et se rapprochent même des niveaux de fond relevés aux stations rurales. Parmi les six sites confrontés à des ambiances de pollution diffuse (hors Rue du Cents, exposée aux émissions cumulées d'une centrale d'enrobage, de l'autoroute et de l'aéroport), c'est celui du Parc en centre-ville qui affiche les concentrations comparativement les plus élevées. Ce constat n'est pas surprenant, puisque les plateaux du Limpertsberg, du Cents et du Kirchberg sont largement ouverts aux vents. Ce volet du diagnostic suggère que la **contamination diffuse** générée au sein de l'agglomération exerce relativement **peu d'impact** en terme de pollution persistante accumulable et transférable.

Parmi les **stations situées en milieu rural**, Hovelange, Surré et Echternach présentent, en règle générale, des niveaux de concentration plus faibles que Garnich, Bivels et Weiswampach. Cette différenciation, avérée mais d'envergure modeste, est difficile à expliquer. Plusieurs types d'influences peuvent être invoqués sans pouvoir en déterminer l'effet relatif : des spécificités géochimiques du substrat local, des particularités écophysologiques des arbres échantillonnés, l'impact d'émetteurs locaux et le transport de contaminants à moyenne et longue distance.

---

### *Enseignements techniques*

La synthèse et l'interprétation des résultats de la campagne de 2016 ainsi que la comparaison avec des données antérieures a mené à plusieurs types d'enseignements d'ordre technique. Cela concerne **quatre thématiques**, particulièrement la validité des données antérieures, la pertinence de l'expression conventionnelle des HAP, les limites de quantification analytiques et l'influence des caractéristiques biométriques sur les données écotoxicologiques. Concernant le premier aspect, la validité des données antérieures, il est important de préciser que les variations entre 1993 et 2016 enregistrées pour certains contaminants, notamment les métaux, sont d'une telle ampleur qu'il apparaît nécessaire de maintenir des précautions en terme d'interprétation.

### *Perspectives*

Au regard des enseignements obtenus à la fois en terme d'évolution dans le temps et de profil spatial actuel, le suivi de la contamination atmosphérique par des polluants persistants au moyen d'analyses d'aiguilles d'épicéas doit être considéré comme une **technique performante et fiable**. L'existence d'une base normée est de nature à encourager la pérennisation de ce suivi.

La méthode est plus particulièrement indiquée pour un suivi à moyen terme et à grande échelle, étant donné que la mise en œuvre est plutôt lourde en comparaison avec d'autres techniques de bioindication et que la faisabilité pratique est dépendante de la présence et de l'accessibilité d'épicéas.

Dans le présent contexte, une fréquence de suivi tous les quatre à six ans semble appropriée. Il est possible de définir un réseau principal sur un nombre plus réduit de stations, complété par un ou plusieurs réseaux secondaires qui pourront cibler des situations plus spécifiques. Dans tous les cas, il est important d'inclure au dispositif des situations d'exposition suffisamment contrastées afin d'apprécier au maximum l'amplitude de la contamination environnementale à l'échelle du pays.

Luxembourg, le 11 juillet 2017

Jacques MERSCH  
Diplômé en Sciences écologiques  
Docteur en Toxicologie de l'environnement

## REFERENCES CITEES

---

- [1] Administration de l'Environnement (2015) Plan national de mise en œuvre de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. [http://www.environnement.public.lu/air\\_bruit/dossiers/Plan-national-de-mise-en-ouvre-\\_PNMO\\_-de-la-Convention-de-Stockholm-sur-les-polluants-organiques-persistants-\\_POP\\_-2015/index.html](http://www.environnement.public.lu/air_bruit/dossiers/Plan-national-de-mise-en-ouvre-_PNMO_-de-la-Convention-de-Stockholm-sur-les-polluants-organiques-persistants-_POP_-2015/index.html)
- [2] VDI (2007) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinungen auf Pflanzen (Bioindikation) – Probenahme von Blättern und Nadeln zum Biomonitoring von immissionsbedingten Stoffanreicherungen (passives Biomonitoring). VDI 3957, Blatt 11.
- [3] AFNOR (2016) Biosurveillance de l'air – Biosurveillance passive des contaminants minéraux atmosphériques dans les dépôts particulaires foliaires des conifères. NF X43-905.
- [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] INERIS (2003) Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) ; Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges ; Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).

## ANNEXE 1

**Equivalents de toxicité appliqués à la liste des 16 HAP conventionnels**  
(sur la base d'une synthèse de l'INERIS [5])

<b>Hydrocarbure aromatique polycyclique</b>	<b>Equivalent de toxicité</b>
Naphtalene	0,001
Acenaphtylene	0,001
Acenaphtene	0,001
Fluorene	0,001
Phenanthrene	0,001
Anthracene	0,01
Fluoranthene	0,001
Pyrene	0,001
Benzo(a)anthracene	0,1
Chrysene	0,01
Benzo(b)fluoranthene	0,1
Benzo(k)fluoranthene	0,1
Benzo(a)pyrene	1
Dibenzo(ah)anthracene	1
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0,1
Benzo(g,h,i)perylene	0,01