

# INFORMATIONS CONCERNANT LES CONCENTRATIONS DE FOND AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

## PARTIE III : HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

**D'ËMWELTVERWALTUNG**

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt

PROTECTION DES SOLS



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

Administration de l'environnement

# INFORMATIONS CONCERNANT LES CONCENTRATIONS DE FOND AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

## **- PARTIE III : HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)**

Réévaluation des données rassemblées lors des campagnes d'échantillonnage réalisées entre 2002 et 2007 dans le cadre du projet « Bodenmonitoring » (AEV, 2006)

# INTRODUCTION

Les données exploitées ressortent de deux campagnes d'échantillonnage réalisées en 2002/03 et 2006/07 dans le cadre du « Bodenmonitoring ». Les résultats de la première campagne d'échantillonnage ont déjà été publiés par l'Administration de l'environnement (AEV, 2006). Contrairement à la première campagne de prélèvement, qui couvrait toute la surface du pays, la deuxième campagne de prélèvement se limitait au Sud-Ouest du pays. Le protocole d'échantillonnage et les méthodologies analytiques employées afin de mesurer les concentrations en HAP-1-16 de la deuxième campagne correspond à celui de la première. Les détails peuvent être trouver dans la publication de 2006. (AEV, 2006). Dans le cadre de l'élaboration du présent document les données des deux campagnes ont été réévaluées et réinterprétées.

Le présent chapitre reprend les valeurs de référence des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Sauf indication contraire il s'agit de concentrations totales.

## LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)

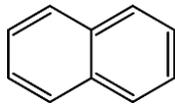
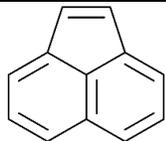
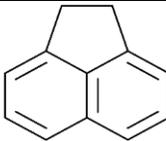
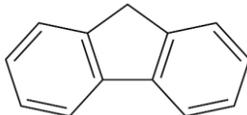
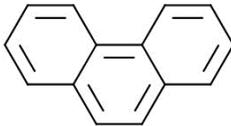
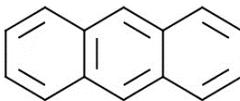
Les hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) sont un groupe de polluants organiques composé de plus que 100 composés différent (*ATSDR, 1995*). Les HAP sont formés par des combustion incomplètes de matières organiques telles que le charbon, le pétrole, le bois ou autres. Ces polluants sont en général présents sous forme de mélanges complexes et non en tant que composé individuel (*ATSDR, 1995 ; Balmer et al., 2019*). Les HAP peuvent être d'origine naturelle, comme les feux de forêts ou les éruptions de volcan ou provenir de sources anthropiques. Les sources d'HAP anthropiques les plus importantes sont des processus industriels tels que la production de coke, du pétrole, de l'aluminium, des agents de protection de bois (creosote), le chauffage de bâtiments par combustion de carburants organiques (bois, mazout, etc.), le trafic (les moteurs de combustion, résidus de pneus) et certaines pratiques agricoles comme l'incinération de chaume (*ATSDR, 1995 ; EC, 2001 ; ECB, 2008 ; EEA, 2021*). Depuis 1990, les émissions en HAP au sein des Etats membre de l'Union Européenne (UE, sans le Royaume Uni) ont baissé de 53%. En même temps, les émissions au Luxembourg ont baissé de 87%. En 2019, les secteurs émetteurs les plus importants au sein de l'UE étaient, le secteur commercial, institutionnel et domestique (81%) et l'industrie (processus 9% ; énergie 4%) (EEA, 2021).

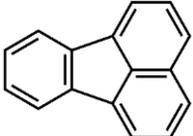
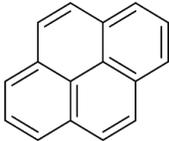
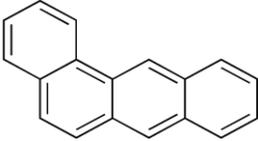
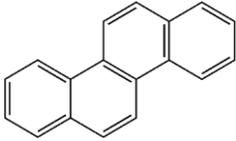
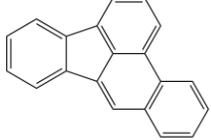
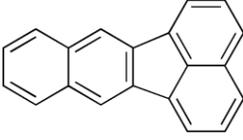
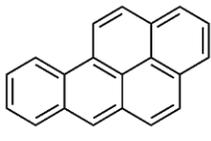
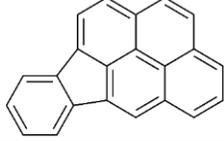
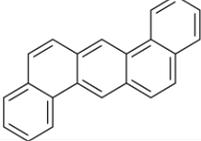
Les HAP sont ubiquitaires dans l'environnement et peuvent être transportés à longue distance. Ainsi l'impact des sources anthropiques ne se limite pas à l'environnement directe de la source même (*Keyte et al. 2013 ; Balmer et al., 2019 ; EMEP, 2020*). Dans les sols, les HAP peuvent se fixer à la matière organique et s'accumuler dans les sols. Les sols peuvent être considérés comme des indicateurs de la pollution environnementale due à la mobilité limitée des HAP dans cette matrice et des temps de demi-vie jusqu'à plus que 17 ans (6250 jours). La charge en HAP dans les sols de surface dépend de l'importance de la déposition atmosphérique, la perte via volatilisation, la biodégradation ainsi que le transfert en

profondeur. Les concentrations les plus élevées sont en général trouvées en milieu urbain, proche de sources ponctuelles et dans des sols ayant un taux de matière organique élevé. Actuellement les concentrations les moins élevées dans les sols tempérés sont environ 10 fois plus importantes qu'avant l'industrialisation (Wilcke et al., 2000 ; Morillo et al., 2007 ; Wang et al., 2016 ; EMEP, 2020).

Au niveau analytique, le groupe est généralement évalué sur base d'un sous-groupe (US-EPA, 1984 ; ISO 13859 : 2014). Les composés pris en compte dans le cadre du « Bodenmonitoring » sont également ceux qui sont réglementés au Grand-Duché de Luxembourg, notamment dans le cadre de la gestion des déchets (RGD, 2017 ; RGD, 2020<sup>a</sup>), de la gestion des eaux (RGD, 2020<sup>b</sup>) ou dans nos pays limitrophes dans le cadre de la gestion des sites pollués (BBSchV, 1999 ; Wallonie, 2018). Il s'agit des 16 composés qui ont été identifiés comme polluants de priorité par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US-EPA) dans le cadre du « Clean Water Act » de 1977 (US-EPA, 2014). C'est également l'US-EPA qui a publié la norme analytique pour ce groupe de 16 HAP (US-EPA, 1984) et qui a par la suite été reprise dans une norme ISO (ISO 13859 :2014).

**Table 1.** Liste des composés faisant partie des 16 HAP analysés dans le cadre du « Bodenmonitoring »

Nom	N°-CAS	Formule	Masse molaire	Structure
Naphtalène	91-20-3	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.17	
Acénaphtylène	208-96-8	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	152.19	
Acénaphtène	83-32-9	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154.21	
Fluorène	86-73-7	C <sub>13</sub> H <sub>9</sub>	166.22	
Phénanthrène	85-01-08	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.23	
Anthracène	120-12-7	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.23	

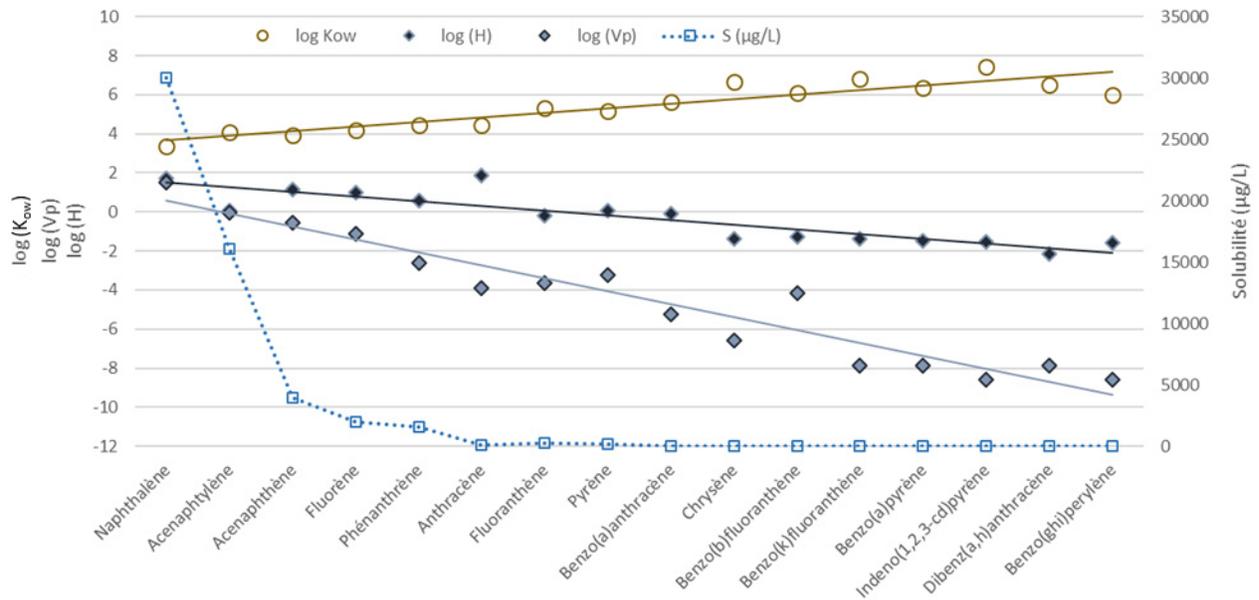
Fluoranthène	206-440	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.26	
Pyrène	204-927-3	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.26	
Benzo(a)anthracène	56-55-3	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.29	
Chrysène	218-01-9	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.29	
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	253.32	
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	253.32	
Benzo(a)pyrène	50-32-8	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	253.32	
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	193-39-5	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.34	
Dibenzo(ah)anthracène	53-70-3	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278.35	
Benzo(ghi)perylène	191-24-2	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.34	

Les 16 composés individuels du groupe des HAP-16 ne sont pas présents en abondances équivalentes dans les sols. Les composés émis dans l'atmosphère sont essentiellement des HAP plus complexes (>4 anneaux) vu que ce sont ces composés qui sont produits lors des processus de pyrolyse dominant les

sources d'émissions (*Budzinski et al., 1997 ; Balmer et al. 2019*). D'autre part, une fois que les composés en HAP sont déposés sur les sols, des processus de lixiviation, volatilisation et de biodégradation peuvent résulter en une diminution des concentrations en HAP dans les sols. Vu que l'importance de ces processus n'est pas équivalente pour les différents composés, la composition du groupe des HAP-16 peut s'altérer dans le temps (*Wilcke, 2000 ; Johnson et Karlson, 2007 ; Nam et al., 2008 ; Maier et al., 2009*).

L'importance des processus de perte dépend des propriétés physico-chimiques des différents composés, ces propriétés sont étroitement liées à la structure moléculaire des différents composés, qui sont indiquées dans le tableau 1. En général, plus la structure est complexe (nombre d'anneaux) moins le composé est soluble, volatile (*Johnson et Karlson, 2007*) et biodégradable (*Maier et al., 2009*). La pression de vapeur ( $V_p$ ) et la constante de Henri ( $H$ ) peuvent être considérées comme indicateurs du potentiel de volatilisation. Plus ces valeurs sont élevées, plus le composé est volatile. La figure 1 ci-après indique le lien entre complexité de la molécule qui augmente du naphthalène vers le benzo(ghi)perylène, la solubilité et le potentiel de volatilisation exprimé via la pression de vapeur et la constante de Henri (*Katsoyiannis et al., 2007*). Pourtant même si les composés plus complexes sont moins solubles, leurs coefficients de partition octanol/eau ( $K_{ow}$ ) élevés les rend plus favorables au transport en association avec les matières organiques dissoutes (*Wilcke, 2000*). La biodégradation impacte essentiellement les composés ayant moins que 4 anneaux qui peuvent être dégradés rapidement et complètement, tandis que les HAP plus complexes sont transformés moins rapide et souvent via cométabolisme (*Maier et al., 2009*).

La composition du groupe des HAP-16 dans les sols s'explique par la balance entre immissions et processus de perte dans les sols (*Nam, J.J. et al., 2008*). À travers la zone tempérée, cette balance semble être similaire vu qu'il a été constaté que la composition des concentrations de fond en HAP-16 dans les sols est assez comparable avec certaines différences selon le degré d'urbanisation et d'industrialisation de la région. (*Wilcke et al., 1996 ; Budzinski et al., 1997 ; Wilcke, 2000 ; Jensen et al., 2007 ; Balmer et al., 2019*). Les composés généralement identifiés comme dominants sont les composés ayant au moins 4 anneaux et dans ce groupe ce sont le fluoranthène, le pyrène, le chrysène et la somme du benzo(b)fluoranthène et du benzo(k)fluoranthène qui prévalent (*Wilcke, 2000 ; Jensen et al., 2007 ; Johnson et Karlson, 2007 ; Nam et al., 2008*).



**Figure 1.** Solubilité ( $S$ ) des différents composés du groupe des HAP-16 en  $\mu\text{g/L}$ , le log de leur coefficient de partition octanol/eau, ainsi que leur potentiel de volatilisation exprimé via le log de la pression de vapeur ( $V_p$ ) en Pa et du log de la constante de Henri ( $H$ ) exprimé en  $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ .

Le tableau suivant reprend les 16 HAP analysés dans le cadre du « Bodenmonitoring » et pour lesquels des valeurs de référence de CF ont été déterminées.

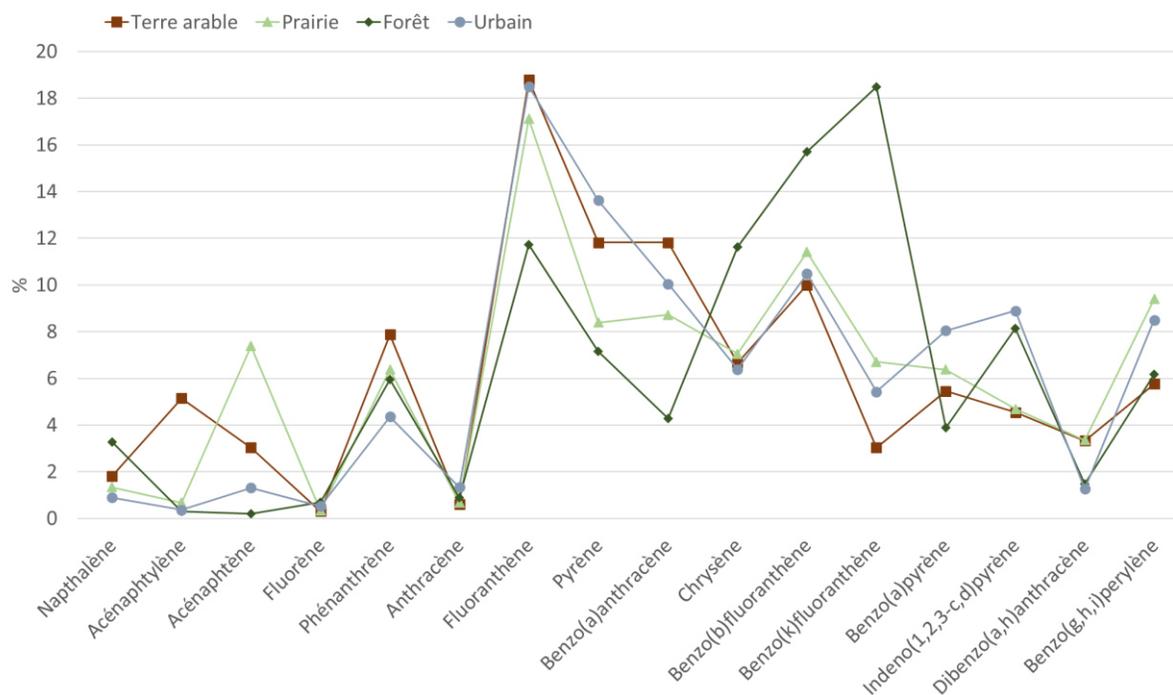
## LES HAP DANS LES SOLS MONDIAUX

Wilcke (2000) a analysé les médianes et moyennes de concentrations en HAP-16 dans 36 publications datant de 1984 à 2000 et en a dérivé les valeurs de référence suivantes :

**Table 2.** Valeurs de référence des concentrations en HAP-16 (mg/kg) typiquement rencontrées en surface des sols tempérés d'après Wilcke et al. (2000).

Occupation des sols	Médiane	Moyenne
Terre arable	0.216	0.328
Prairie	0.194	0.284
Forêt	0.410	0.904
Zone urbaine	1.103	4.420

Wilcke (2000) a également analysé les concentrations de certains composés individuels du groupe des HAP repris dans les 36 études entre 1984 et 2000. Le graphique suivant reprend les moyennes et médianes des 16 composés HAP également analysés dans le cadre du « Bodenmonitoring » :



**Figure 2.** Composition des concentrations de fond en HAP-16 basée sur la moyenne des concentrations des composés individuels tel qu'indiqué par Wilcke (2000).

## LES HAP DANS LES SOLS EUROPÉENS

Morillo *et al.* (2007) a comparé les concentrations en HAP-15 (sans l'acénaphthylène) dans trois villes européennes (Glasgow, Ljubljana et Torino) et a déterminé les valeurs de référence suivantes :

**Table 3.** Valeurs de référence des concentrations en HAP-15 (mg/kg) rencontré en surface (0-10cm) des sols de trois villes européennes. Par rapport aux HAP-16 l'acénaphthylène n'a pas été pris en compte. Données repris e Morillo *et al.* (2007).

Ville	Gamme	Médiane	Moyenne
Glasgow (Royaume-Unis)	1.487-51.822	8.337	11.930
Ljubljana (Slovénie)	0.218-4.488	0.791	0.989
Torino* (Italie)	0.148-3.410	0.702	0.857

\*hormis un site fortement pollué

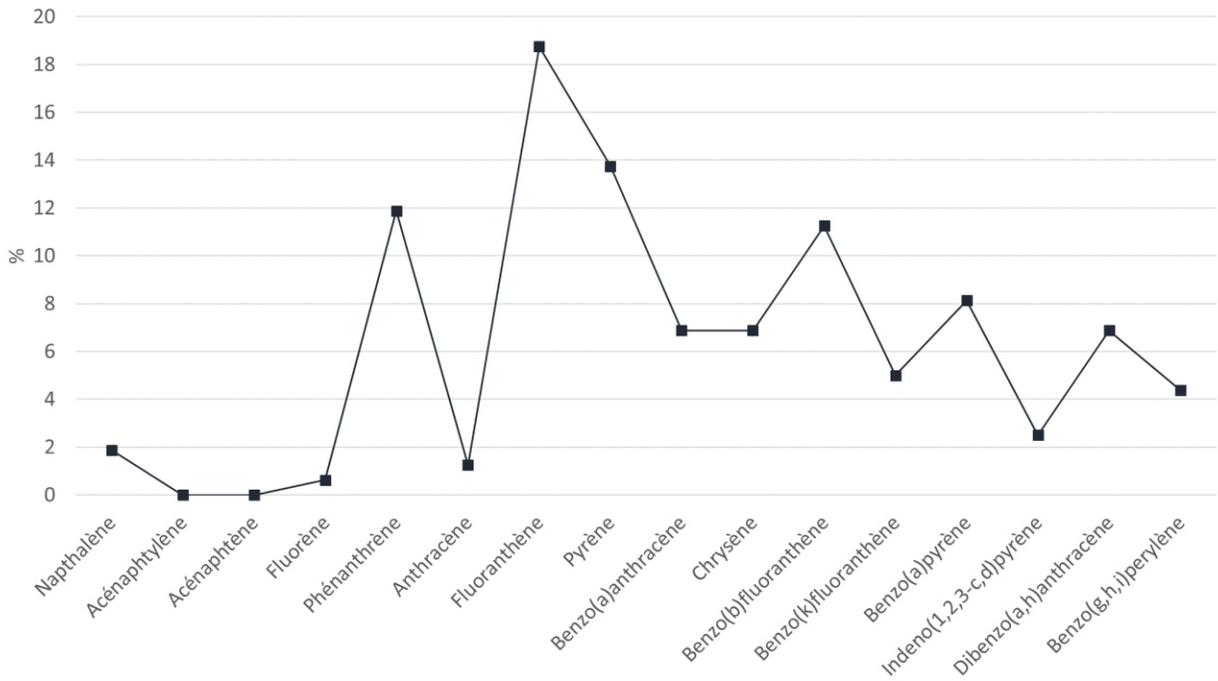
Froger *et al.* (2021) a repris les résultats de plusieurs études à travers le monde. Le tableau suivant est un extrait des études réalisées en Europe.

**Table 4.** Valeurs de référence des concentrations en HAP (mg/kg) de sols à travers le monde tel que repris dans Froger *et al.* (2021) et par Aichner *et al.*(2015).

Pays	Occupation du sol	Gamme	Médiane	Moyenne	Nombre d'HAP considéré	Référence
France	Rural/Urbain	0.005-31.193	0.032		15 (sans acénaphthylène)	Froger <i>et al.</i> (2021)
Norvège (Oslo)	Forêt (0-2 cm)	0.010-2.600	0.300	0.430	16	Jensen <i>et al.</i> , (2007)
Pologne	Rural	0.080-7.264	-		16	Maliszewska-Kordybach <i>et al.</i> , (2008)
Suisse	Tout	0.019-6.870	-		16	Gubler <i>et al.</i> , (2015)*
Allemagne	Forêt (0-5 cm)	0.020-9.038	0.551		16	Aichner <i>et al.</i> , (2013)**
	Forêt (5-10 cm)	0.007-4.423	0.174		16	
Royaume-Unis	Rural	0.024-128.000	-	0.608	16	Bull and Collins, (2013)

\* Document originale non accessible, informations repris de Froger *et al.* (2021)

\*\* Repris de la publication de Aichner *et al.* (2015)



**Figure 3.** Composition des concentrations de fond en HAP-16 basée sur la moyenne des concentrations des composés individuels tel qu'indiqué par Froger et al. (2021). La concentration en acénaphthylène n'est pas indiquée par Froger et al. (2021) et est supposée 0 dans la représentation.

## LES CF DE LA SOMME DES HAP-16 DANS LES SOLS DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

Le présent chapitre reprend les valeurs de référence du groupe des HAP-16. Sauf indication contraire, il s'agit de concentrations totales.

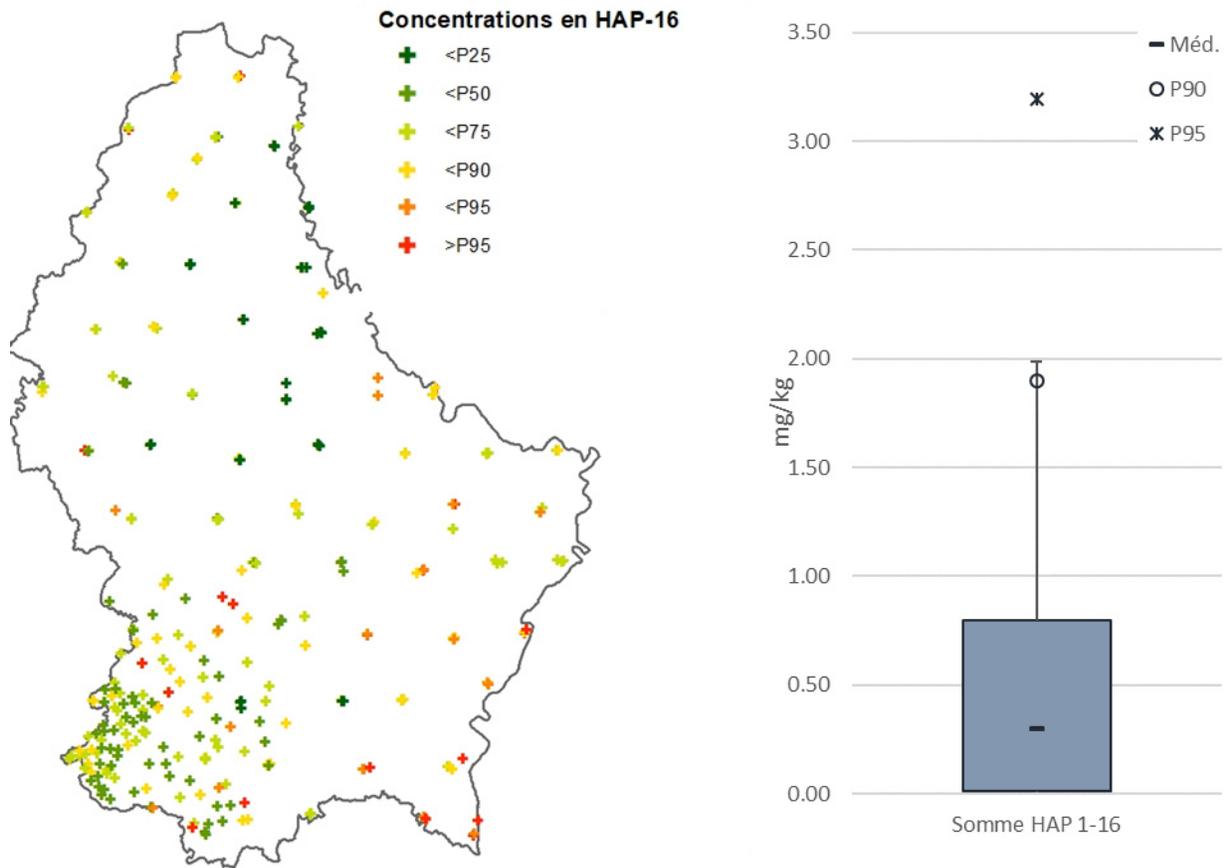
La base de données du « Bodenmonitoring » a été traitée afin d'écarter les échantillons prélevés dans les horizons organiques des forêts, dans des remblais et ceux ne constituant pas d'échantillons représentatifs pour les sols minéraux naturels. Par ailleurs, il a été décidé d'écarter deux points d'échantillonnage présentant des valeurs aberrantes de concentrations en HAP-16 (87.5 et 79.6 mg/kg) où un impact local doit être présumé. Vu que 95% des valeurs de concentrations en HAP sont inférieures à 4.1 mg/kg et que la valeur de concentration maximale après écartement de ces points d'échantillonnage est de 19.3 mg/kg, ces valeurs ne sont pas à considérer comme représentatives pour les CF en HAP. Par ailleurs, ces valeurs aberrantes auraient impacté certaines valeurs de référence dont notamment les moyennes. Tous les échantillons prélevés auprès de ces points ont été supprimés de la base de données. Il s'agit de 4 échantillons.

La base de données finalement exploitée afin de déterminer les valeurs de référence pour les HAP-16 contient 523 échantillons prélevés sur 306 lieux distincts à travers tout le Grand-Duché.

Les valeurs statistiques pour les CF en HAP-16 au Grand-Duché de Luxembourg sont repris dans le tableau et le graphique suivants :

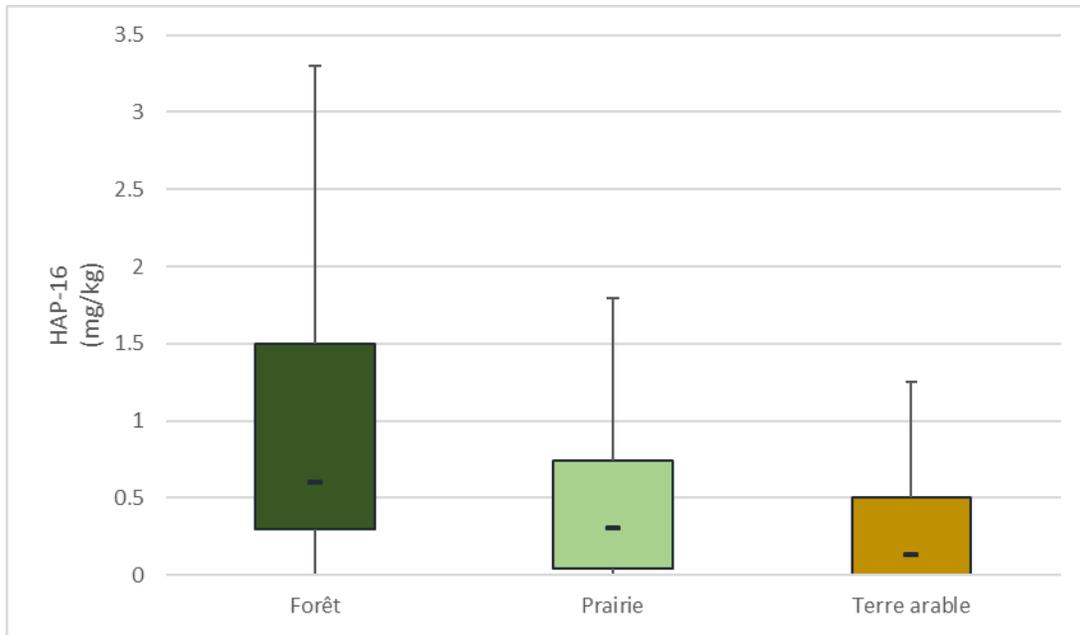
**Table 5.** Valeurs statistiques des CF en HAP-16 au Grand-Duché de Luxembourg exprimées en mg/kg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne)

n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
523	0.010	0.300	0.790	0.800	1.900	3.192

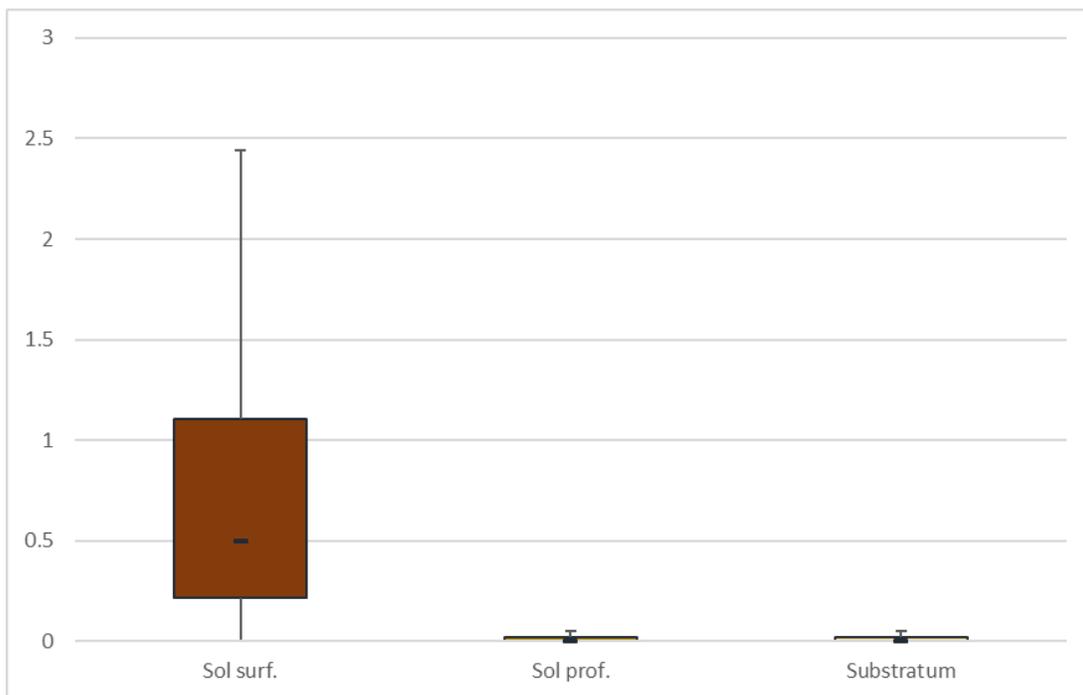


**Figure 4.** Représentation spatiale (gauche) et « Box and Whisker plot » des CF en HAP-16 (mg/kg) dans les sols au Grand-Duché de Luxembourg.

Il a été constaté que les concentrations en HAP-16 mesurées lors du « Bodenmonitoring » dépendent essentiellement de deux paramètres : l'occupation du sol et la profondeur du sol. Les graphiques suivants illustrent les différences en concentration de fond en HAP-16 selon l'occupation du sol (figure 4), la profondeur du prélèvement (figure 5) et la combinaison de ces deux paramètres (figure 6).



**Figure 5.** « Box and Whisker plot » des CF en HAP-16 (mg/kg sol sec) distinguées selon l'occupation du sol.



**Figure 6.** « Box and Whisker plot » des CF en HAP-16 (mg/kg sol sec) distinguées selon la profondeur du sol. Le sol de surface (Sol surf.) : 0-10 cm et 0-30 cm pour les terres arables. Sol en profondeur (Sol prof.) correspond aux couches de sol entre les couches de surface et le substratum peu ou non altéré.

Les valeurs de référence sont établies en faisant la distinction entre types d'occupation du sol : « Forêt », « Terre arable » et « Prairie » et profondeur du prélèvement. Il faut noter que le nombre d'échantillons aux sein de vignobles est très limité et que ces valeurs ne sont pas nécessairement représentatives pour ce type d'occupation du sol. Ces valeurs sont incluses dans l'analyses mais aucune valeur de référence spécifique à ce type d'occupation du sol n'a été déterminée. Par ailleurs, le nombre d'échantillons prélevés en sol de profondeur de forêt qui ont été analysé sur les HAP est également limité. Ceci a comme conséquence que toutes les valeurs de référence n'ont pas pu être déterminées pour les sols en profondeurs en forêts.

Les valeurs de référence pour les HAP-16 sont reprises dans les tableaux suivant :

**Table 6.** Tableaux des valeurs de référence des CF en HAP-16 dans les sols du Grand-Duché de Luxembourg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne).

Occupation du sol	Profondeur	n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
Forêts	Tout*	91	0.300	0.600	1.443	1.500	2.880	4.640
	Surface**	87	0.400	0.700	1.488	1.500	3.100	4.760
	Profondeur***	2	0.060	0.075	0.075	-	-	-
Prairies	Tout*	249	0.045	0.310	0.684	0.740	1.620	2.610
	Surface**	181	0.240	0.530	0.919	0.945	1.932	3.322
	Profondeur***	61	0.000	0.000	0.062	0.065	0.150	0.259
Terres arables	Tout*	178	0.000	0.135	0.5446	0.5	1.41	2.61
	Surface**	113	0.150	0.310	0.834	0.700	2.180	3.642
	Profondeur***	62	0.000	0.000	0.043	0.003	0.075	0.134

\* Comprend des échantillons du substratum (n=12)

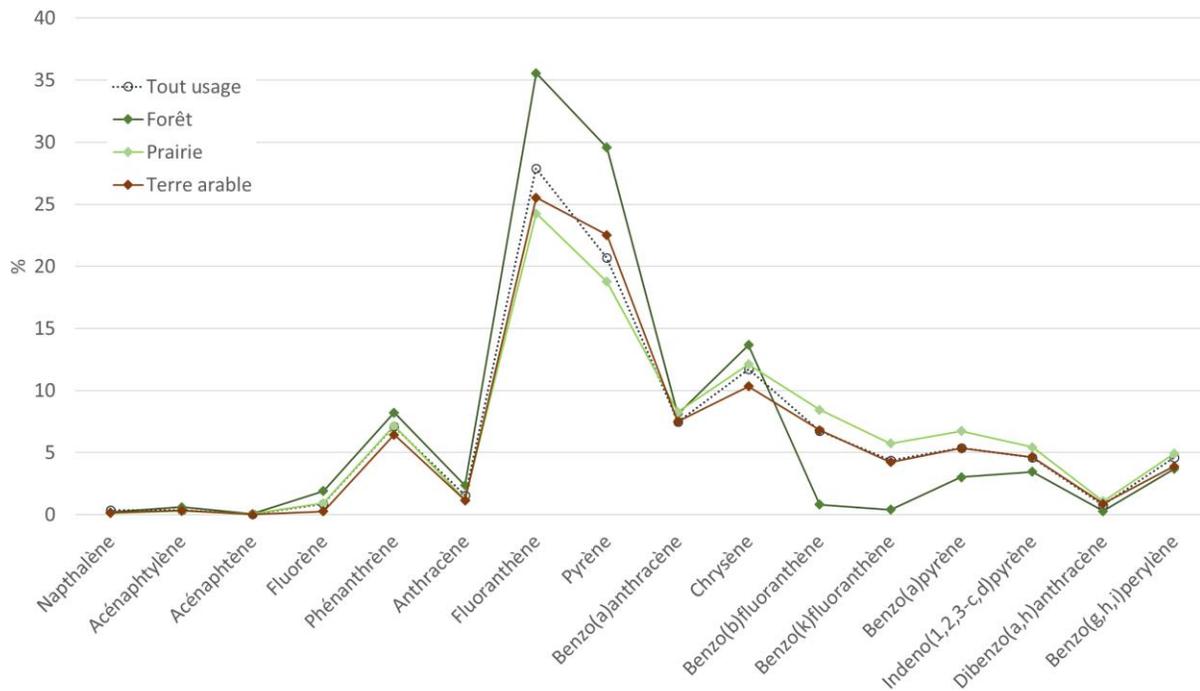
\*\* 0-10 cm pour les forêts et prairies, 0-30 cm pour les terres arables. Les anciens horizons agricoles (rAh) ont été considérés comme sol de surface.

\*\*\* Sol altérés compris entre les sols de surface et le substratum.

## LES CF DES COMPOSÉS INDIVIDUELS DU GROUPE DES HAP-16 DANS LES SOLS DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

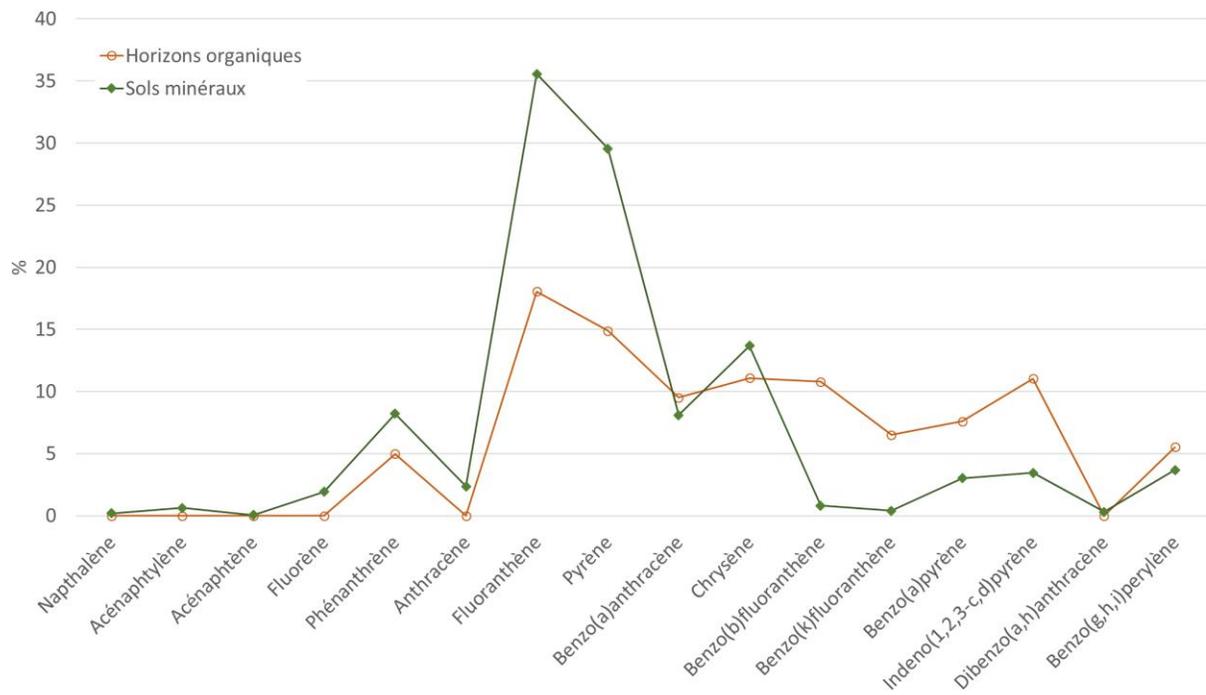
La composition des CF en HAP-16 au Grand-Duché du Luxembourg (figure 7) est comparable à ce qui a été publié par *Wilcke (2000)* pour le monde et par *Froger et al., (2021)* pour la France (figures 2 et 3). La composition suit les principes décrits par une multitude de publications, avec une dominance des composés plus complexes (> 4 anneaux) et dans ce groupe la prépondérance du fluoranthène, du pyrène et du chrysène. La différence entre type d'usage n'est pas très prononcée et ne suit pas le schéma indiqué par *Wilcke (2000)* qui suggère une importance plus élevée du benzo(b)fluoranthène et benzo(k)fluoranthène en forêt par rapport aux terres arables et aux prairies. Dans les sols du Luxembourg ces deux composés semblent au contraire être moins abondants en forêt. Il faut noter que les données se limitent aux sols minéraux des forêts. Il est fort probable que les concentrations et la composition des HAP-16 dans les horizons organiques diffèrent des celles des sols minéraux sous-jacents.

Cette hypothèse est supportée par les quelques analyses (4 échantillons) réalisées sur les horizons organiques lors du Bodenmonitoring (figure 8) qui indiquent que les composés à 5 anneaux ou plus (à part le dibenzo(a,h)anthracène) sont retenus dans les horizons organiques et sont donc moins représentés dans les sols minéraux.



**Figure 7.** Comparaison de la composition du groupe des HAP-16 selon les occupations des sols par indication des pourcentages des fractions des composés individuels par rapport à la somme

du groupe des HAP-16 basée sur les concentrations mesurées lors du Bodenmonitoring réalisé au Grand-Duché de Luxembourg.



**Figure 8.** Comparaison de la composition du groupe des HAP-16 en sol minéraux et horizon organiques par indication des pourcentages des fractions des composés individuels par rapport à la somme du groupe des HAP-16 basée sur les concentrations mesurées lors du Bodenmonitoring réalisé au Grand-Duché de Luxembourg.

Les tableaux suivants reprennent les valeurs statistiques des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 dans les sols du Grand-Duché de Luxembourg, pour tous les usages confondus, pour les forêts, les prairies et pour les terres arables. Des tableaux plus détaillés avec distinction des profondeurs sont donnés en annexe.

### *Tous types d'usage confondus*

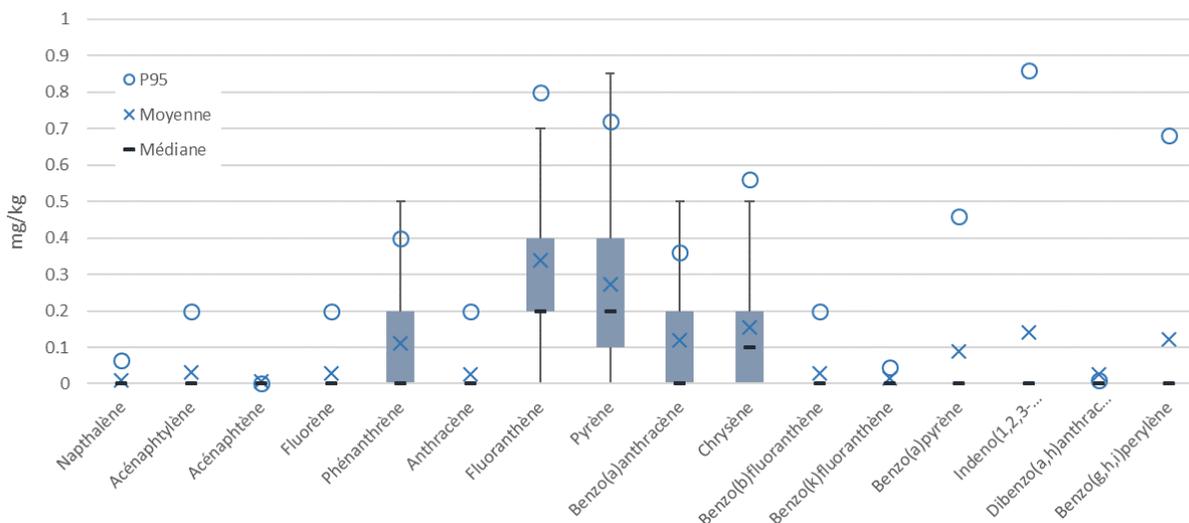
**Table 7.** Valeurs statistiques des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 au Grand-Duché de Luxembourg exprimées en mg/kg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne)

HAP	n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
Naphtalène	523	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010
Acénaphthylène	523	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.010
Acénaphthène	523	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Fluorène	523	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.100
Phénanthrène	523	0.000	0.010	0.058	0.040	0.200	0.300
Anthracène	523	0.000	0.000	0.015	0.000	0.010	0.148
Fluoranthène	523	0.010	0.070	0.178	0.200	0.400	0.600
Pyrène	523	0.000	0.050	0.140	0.200	0.400	0.440
Benzo(a)anthracène	523	0.000	0.010	0.065	0.060	0.200	0.300
Chrysène	523	0.000	0.020	0.085	0.100	0.200	0.308
Benzo(b)fluoranthène	523	0.000	0.000	0.040	0.030	0.106	0.200
Benzo(k)fluoranthène	523	0.000	0.000	0.025	0.020	0.060	0.108
Benzo(a)pyrène	523	0.000	0.000	0.052	0.030	0.200	0.300
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	523	0.000	0.000	0.054	0.020	0.102	0.300
Dibenzo(a,h)anthracène	523	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.028
Benzo(g,h,i)perylène	523	0.000	0.000	0.050	0.020	0.126	0.300

## Les Forêts

**Table 8.** Valeurs statistiques des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 dans les sols de surface des **forêts** au Grand-Duché de Luxembourg exprimées en mg/kg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne)

HAP	n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
Naphtalène	91	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.052
Acénaphthylène	91	0.000	0.000	0.030	0.000	0.084	0.200
Acénaphhtène	91	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
Fluorène	91	0.000	0.000	0.028	0.000	0.100	0.200
Phénanthrène	91	0.000	0.000	0.108	0.200	0.300	0.400
Anthracène	91	0.000	0.000	0.025	0.000	0.086	0.200
Fluoranthène	91	0.190	0.200	0.328	0.400	0.660	0.800
Pyrène	91	0.100	0.200	0.263	0.300	0.480	0.680
Benzo(a)anthracène	91	0.000	0.000	0.115	0.200	0.300	0.340
Chrysène	91	0.000	0.100	0.149	0.200	0.300	0.540
Benzo(b)fluoranthène	91	0.000	0.000	0.030	0.000	0.096	0.228
Benzo(k)fluoranthène	91	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.066
Benzo(a)pyrène	91	0.000	0.000	0.087	0.010	0.300	0.440
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	91	0.000	0.000	0.137	0.000	0.400	0.840
Dibenzo(a,h)anthracène	91	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000	0.014
Benzo(g,h,i)perylène	91	0.000	0.000	0.117	0.010	0.380	0.620

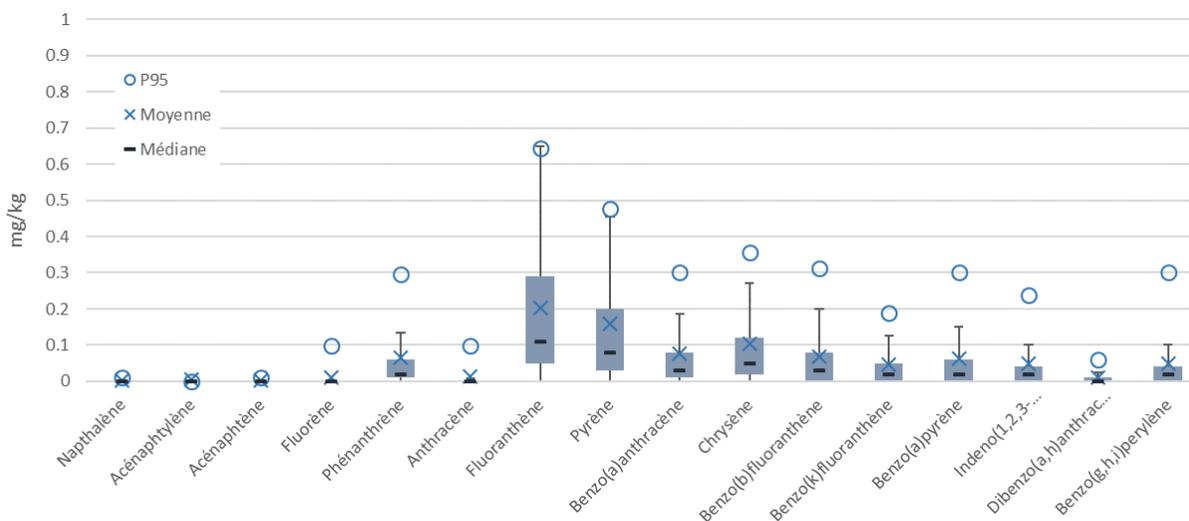


**Figure 9.** « Box and Whisker plot » des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 (mg/kg sol sec) dans les sols de surface (0-10 cm) des forêts du Grand-Duché de Luxembourg.

## Les prairies

**Table 9.** Valeurs statistiques des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 dans les sols de surface des **prairies** au Grand-Duché de Luxembourg exprimées en mg/kg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne)

HAP	n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
Naphtalène	249	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.010
Acénaphthylène	249	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
Acénaphthène	249	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.005
Fluorène	249	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.020
Phénanthrène	249	0.000	0.010	0.049	0.040	0.140	0.200
Anthracène	249	0.000	0.000	0.011	0.000	0.010	0.050
Fluoranthène	249	0.010	0.060	0.151	0.200	0.400	0.580
Pyrène	249	0.010	0.040	0.116	0.185	0.300	0.420
Benzo(a)anthracène	249	0.000	0.010	0.057	0.050	0.200	0.260
Chrysène	249	0.000	0.030	0.077	0.100	0.200	0.290
Benzo(b)fluoranthène	249	0.000	0.020	0.051	0.050	0.120	0.205
Benzo(k)fluoranthène	249	0.000	0.010	0.036	0.035	0.090	0.155
Benzo(a)pyrène	249	0.000	0.010	0.047	0.040	0.160	0.300
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	249	0.000	0.010	0.036	0.030	0.090	0.185
Dibenzo(a,h)anthracène	249	0.000	0.000	0.008	0.010	0.020	0.035
Benzo(g,h,i)perylène	249	0.000	0.010	0.036	0.030	0.080	0.200

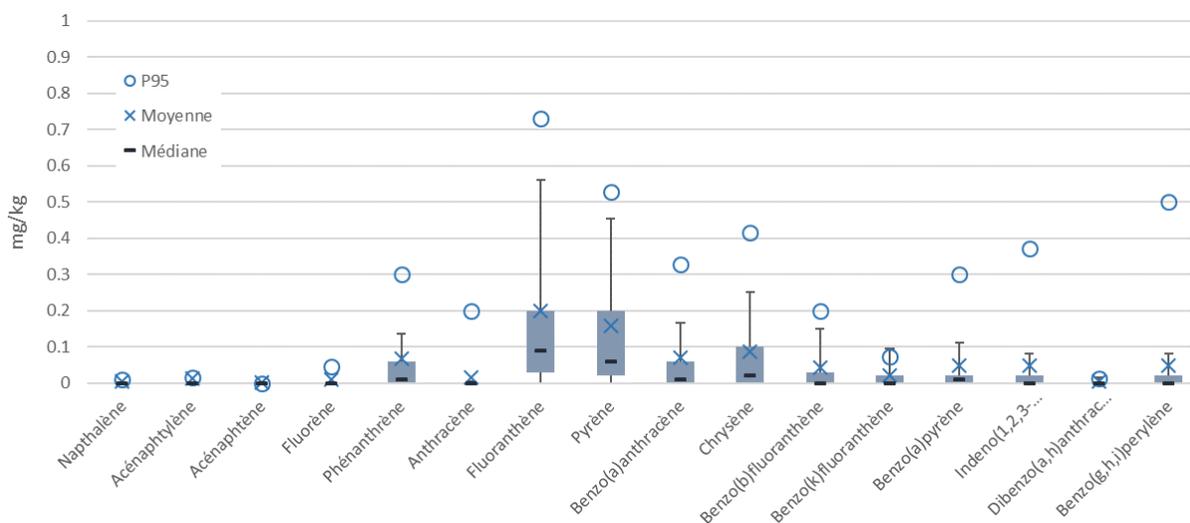


**Figure 10.** « Box and Whisker plot » des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 (mg/kg sol sec) dans les sols de surface (0-10 cm) des prairies du Grand-Duché de Luxembourg.

## Les terres arables

**Table 10.** Valeurs statistiques des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 dans les sols de surface des **terres arables** au Grand-Duché de Luxembourg exprimées en mg/kg. (n : nombre d'échantillons, Méd. : Médiane, Moy. : Moyenne)

HAP	n	P25	Med.	Moy.	P75	P90	P95
Naphtalène	178	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001
Acénaphthylène	178	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000
Acénaphtène	178	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Fluorène	178	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.010
Phénanthrène	178	0.000	0.000	0.044	0.020	0.200	0.203
Anthracène	178	0.000	0.000	0.011	0.000	0.001	0.043
Fluoranthène	178	0.000	0.025	0.130	0.150	0.400	0.500
Pyrène	178	0.000	0.020	0.103	0.100	0.300	0.400
Benzo(a)anthracène	178	0.000	0.000	0.046	0.020	0.105	0.300
Chrysène	178	0.000	0.000	0.057	0.033	0.200	0.300
Benzo(b)fluoranthène	178	0.000	0.000	0.029	0.020	0.051	0.190
Benzo(k)fluoranthène	178	0.000	0.000	0.014	0.010	0.030	0.050
Benzo(a)pyrène	178	0.000	0.000	0.032	0.013	0.051	0.200
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	178	0.000	0.000	0.032	0.010	0.040	0.300
Dibenzo(a,h)anthracène	178	0.000	0.000	0.003	0.000	0.010	0.010
Benzo(g,h,i)perylène	178	0.000	0.000	0.031	0.010	0.040	0.300



**Figure 11.** « Box and Whisker plot » des CF des composés individuels du groupe des HAP-16 (mg/kg sol sec) dans les sols de surface (0-30 cm) des terres arables du Grand-Duché de Luxembourg.

## ANNEXE III - 1 : VALEURS STATISTIQUES DÉTAILLÉES DU « BODENMONITORING » POUR LES HAP-16

### Les forêts

**Table 11.** Valeurs statistiques des concentrations en HAP-16 (mg/kg sol sec) en **Forêt** distinguées selon la profondeur. Sol surf. : Sol de surface équivalent au premier horizon du sol minéral. Lorsqu'un ancien horizon de labour (rAp) était présent en forêt ou en prairie, il est repris dans les sols de surface. Sol prof. Sol de profondeur équivalent aux horizons du type « B », « S », « M », « R » et « P ». Substr. : Substratum équivalent aux horizon de type « C ». N : Nombre de lieux d'échantillonnage, n : nombre de données (analyses d'échantillons).

HAP	Prof.	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Naphtalène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.064	0.400
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.020
Acénaphthylène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.031	0.000	0.100	0.200	1.100
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.020
Acénaphthène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.500
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.010
Fluorène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.029	0.000	0.120	0.200	0.700
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.010
Phénanthrène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.111	0.200	0.300	0.400	1.000
	Sol prof.	2	2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.065	0.065	0.000	0.000	0.000	0.130
Anthracène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.025	0.000	0.120	0.200	0.600
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.015	0.015	0.000	0.000	0.000	0.030
Fluoranthène	Sol surf.	66	87	0.200	0.200	0.340	0.400	0.700	0.800	3.400
	Sol prof.	2	2	0.010	0.015	0.015	0.000	0.000	0.000	0.020
	Substratum	2	2	0.000	0.150	0.150	0.000	0.000	0.000	0.300
Pyrène	Sol surf.	66	87	0.100	0.200	0.273	0.400	0.520	0.720	2.300
	Sol prof.	2	2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.105	0.105	0.000	0.000	0.000	0.210

HAP	Prof.	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Benzo(a)anthracène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.119	0.200	0.300	0.360	2.100
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.055	0.055	0.000	0.000	0.000	0.110
Chrysène	Sol surf.	66	87	0.000	0.100	0.154	0.200	0.320	0.560	1.600
	Sol prof.	2	2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.075	0.075	0.000	0.000	0.000	0.150
Benzo(b)fluoranthène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.028	0.000	0.054	0.200	0.600
	Sol prof.	2	2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.135	0.135	0.000	0.000	0.000	0.270
Benzo(k)fluoranthène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.046	0.700
	Sol prof.	2	2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.045	0.045	0.000	0.000	0.000	0.090
Benzo(a)pyrène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.089	0.000	0.300	0.460	2.100
	Sol prof.	2	2	0.000	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.075	0.075	0.000	0.000	0.000	0.150
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.142	0.000	0.400	0.860	4.500
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.055	0.055	0.000	0.000	0.000	0.110
Dibenzo(a,h)anthracène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.026	0.000	0.000	0.010	1.400
	Sol prof.	2	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	2	2	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.020
Benzo(g,h,i)perylène	Sol surf.	66	87	0.000	0.000	0.121	0.000	0.400	0.680	2.900
	Sol prof.	2	2	0.000	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.010
	Substratum	2	2	0.000	0.060	0.060	0.000	0.000	0.000	0.120
Somme HAP 1-16	Sol surf.	66	87	0.400	0.700	1.488	1.500	3.100	4.760	19.300
	Sol prof.	2	2	0.060	0.075	0.075	0.000	0.000	0.000	0.090
	Substratum	2	2	0.000	0.875	0.875	0.000	0.000	0.000	1.750

## Les prairies

**Table 12.** Valeurs statistiques des concentrations en HAP-16 (mg/kg sol sec) en prairies distinguées selon la profondeur. Sol surf. : Sol de surface équivalent au premier horizon du sol minéral. Lorsqu'un ancien horizon de labour (rAp) était présent en forêt ou en prairie, il est repris dans les sol de surface. Sol prof. Sol de profondeur équivalent aux horizons du type « B », « S », « M », « R » et « P ». Substr. : Substratum équivalent aux horizon de type « C ». N : Nombre de lieux d'échantillonnage, n : nombre de données (analyses d'échantillons).

HAP	Prof	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Naphtalène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.002	0.000	0.010	0.010	0.100
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Acénaphtylène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.300
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Acénaphthène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010	0.200
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fluorène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.099	0.200
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Phénanthrène	Sol surf.	125	181	0.010	0.020	0.065	0.060	0.200	0.295	0.910
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.004	0.010	0.010	0.019	0.070
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Anthracène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.014	0.003	0.020	0.098	0.300
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.009	0.050
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fluoranthène	Sol surf.	125	181	0.050	0.110	0.203	0.290	0.400	0.645	1.800
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.012	0.010	0.030	0.049	0.240
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.003	0.010	0.000	0.000	0.010
Pyrène	Sol surf.	125	181	0.030	0.080	0.158	0.200	0.400	0.476	1.400
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.008	0.010	0.020	0.030	0.170
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.010
Benzo(a)anthracène	Sol surf.	125	181	0.010	0.030	0.077	0.080	0.200	0.300	1.000
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.005	0.000	0.018	0.029	0.100
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.010
Chrysène	Sol surf.	125	181	0.020	0.050	0.103	0.120	0.208	0.355	1.100
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.007	0.010	0.020	0.030	0.130
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.003	0.010	0.000	0.000	0.010

HAP	Prof.	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Benzo(b)fluoranthène	Sol surf.	125	181	0.000	0.030	0.067	0.080	0.178	0.313	0.840
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.007	0.010	0.020	0.030	0.130
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.003	0.010	0.000	0.000	0.010
Benzo(k)fluoranthène	Sol surf.	125	181	0.000	0.020	0.048	0.050	0.128	0.190	0.840
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.005	0.005	0.010	0.029	0.090
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.010
Benzo(a)pyrène	Sol surf.	125	181	0.000	0.020	0.063	0.055	0.200	0.300	0.830
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.005	0.005	0.010	0.020	0.090
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	Sol surf.	125	181	0.000	0.020	0.048	0.040	0.130	0.238	0.500
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.004	0.000	0.010	0.020	0.080
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dibenzo(a,h)anthracène	Sol surf.	125	181	0.000	0.000	0.011	0.010	0.028	0.059	0.200
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.010	0.020
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzo(g,h,i)perylène	Sol surf.	125	181	0.000	0.020	0.048	0.040	0.138	0.300	0.600
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.003	0.000	0.010	0.010	0.060
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Somme HAP 1-16	Sol surf.	125	181	0.240	0.530	0.919	0.945	1.932	3.322	9.670
	Sol prof.	35	61	0.000	0.000	0.062	0.065	0.150	0.259	1.190
	Substratum	7	7	0.000	0.000	0.013	0.030	0.000	0.000	0.050

## Les terres arables

**Table 13.** Valeurs statistiques des concentrations en HAP-16 (mg/kg sol sec) en **terres arables** distinguées selon la profondeur. Sol surf. : Sol de surface équivalent au premier horizon du sol minéral. Lorsqu'un ancien horizon de labour (rAp) était présent en forêt ou en prairie, il est repris dans les sol de surface. Sol prof. Sol de profondeur équivalent aux horizons du type « B », « S », « M », « R » et « P ». Substr. : Substratum équivalent aux horizon de type « C ». N : Nombre de lieux d'échantillonnage, n : nombre de données (analyses d'échantillons).

HAP	Prof.	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Naphtalène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.010	0.230
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.010
Acénaphthylène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.016	0.500
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Acénaphthène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.100
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fluorène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.045	0.200
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Phénanthrène	Sol surf.	113	113	0.000	0.010	0.067	0.055	0.200	0.300	1.130
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.009	0.120
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Anthracène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.016	0.000	0.010	0.200	0.300
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fluoranthène	Sol surf.	113	113	0.030	0.090	0.199	0.200	0.400	0.730	3.700
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.009	0.000	0.010	0.027	0.420
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pyrène	Sol surf.	113	113	0.020	0.060	0.158	0.200	0.400	0.527	2.500
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.006	0.000	0.010	0.019	0.290
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzo(a)anthracène	Sol surf.	113	113	0.000	0.010	0.070	0.060	0.200	0.327	1.250
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010	0.150
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Chrysène	Sol surf.	113	113	0.000	0.020	0.087	0.095	0.260	0.415	1.280
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.005	0.000	0.010	0.010	0.210
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

HAP	Prof.	N	n	P25	Méd.	Moy.	P75	P90	P95	Max
Benzo(b)fluoranthène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.043	0.030	0.090	0.200	1.180
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.005	0.000	0.010	0.020	0.190
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzo(k)fluoranthène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.021	0.020	0.040	0.073	0.530
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.003	0.000	0.007	0.010	0.110
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzo(a)pyrène	Sol surf.	113	113	0.000	0.010	0.049	0.020	0.200	0.300	0.910
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010	0.140
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Indeno(1,2,3-c,d)pyrène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.049	0.020	0.144	0.372	0.700
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010	0.120
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dibenzo(a,h)anthracène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.004	0.000	0.010	0.013	0.110
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzo(g,h,i)perylène	Sol surf.	113	113	0.000	0.000	0.048	0.020	0.172	0.500	0.560
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.002	0.000	0.010	0.010	0.090
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Somme HAP 1-16	Sol surf.	113	113	0.150	0.310	0.834	0.700	2.180	3.642	14.000
	Sol prof.	37	62	0.000	0.000	0.043	0.003	0.075	0.134	1.900
	Substratum	3	3	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.010

## Contact

Administration de l'environnement  
Unité stratégies et concepts  
1, avenue du Rock'n'Roll  
L-4361 Esch-sur-Alzette