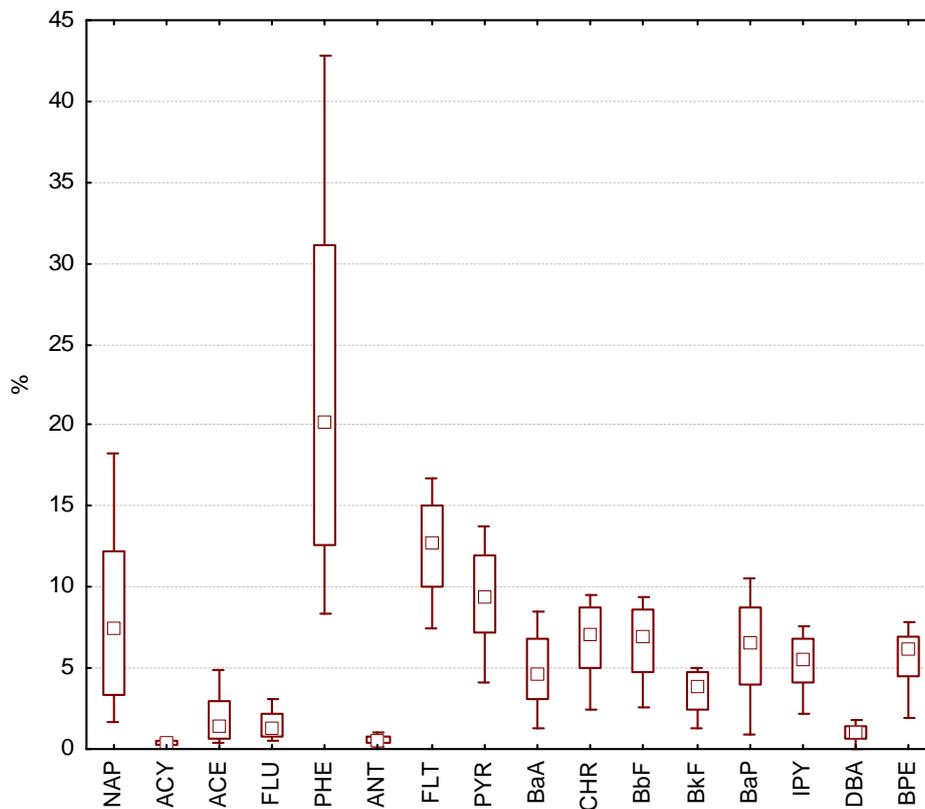




# Teneurs en HAP et en PCB dans les sols en Suisse

Résultats de l'Observatoire national des sols 1995/1999

André Desaulles, Stefan Ammann, Franziska Blum, Rahel Brändli, Thomas Bucheli



Juin 2010

---

## **Donneurs d'ordre**

Office fédéral de l'environnement (OFEV), représenté par Fabio Wegmann

CH-3003 Berne

[www.umwelt-schweiz.ch](http://www.umwelt-schweiz.ch)

Office fédéral de l'agriculture (OFAG), représenté par Anton Candinas

CH-3003 Berne

[www.blw.admin.ch](http://www.blw.admin.ch)

## **Mandataires**

Station fédérale de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich

[www.art.admin.ch](http://www.art.admin.ch)

## **Auteurs**

André Desaulles ART, [andre.desaules@art.admin.ch](mailto:andre.desaules@art.admin.ch)

Stefan Ammann ART,

Franziska Blum ART,

Rahel Brändli ART (jusqu'à fin 2006),

Thomas Bucheli ART

## **Disponible sous**

[www.nabo.admin.ch](http://www.nabo.admin.ch) > Bibliographie N° 184

## **Remerciements**

Nous remercions cordialement nos collègues de l'époque à Liebefeld, Ruedi Dahinden, Thomas Keller et Konrad Studer, pour les prélèvements d'échantillons, ainsi que Kirsten Rehbein pour l'élaboration des cartes et Reto Meuli pour la supervision du manuscrit. Nous remercions également les donneurs d'ordre de l'OFEV et de l'OFAG.

## Table des matières

Résumé.....	1
Abréviations et symboles.....	3
Glossaire.....	5
1 Introduction.....	7
2 Principes.....	9
2.1 Etat général des connaissances sur les HAP.....	9
2.2 Etat général des connaissances sur les PCB.....	15
2.3 Etudes sur les HAP et les PCB en Suisse.....	20
2.4 Le réseau de référence NABO.....	22
2.5 Programme analytique et méthodes.....	23
2.6 Evaluation de l'incertitude du système de mesure.....	27
2.7 Evaluation des teneurs en HAP et en PCB.....	29
3 Résultats et interprétation.....	31
3.1 Incertitude de mesure des teneurs en HAP et en PCB de cette étude.....	31
3.2 Reproductibilité des teneurs en HAP et en PCB de différentes études.....	40
3.3 Teneurs en HAP et en PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm).....	42
3.4 Profils des composés HAP et PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm).....	50
3.5 Corrélations avec les HAP et les PCB.....	52
3.6 Attribution des sources de HAP.....	56
4 Conclusions.....	59
5 Projets.....	61
6 Recommandations.....	63
7 Bibliographie.....	65
Annexes.....	74

### Annexes

Annexe 1: Données relatives aux sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP <sub>16</sub> et en PCB <sub>7</sub> en mg/kg.....	75
Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés.....	77
Annexe 3: Règles concernant la combinaison des incertitudes standard (propagation des erreurs).....	88
Annexe 4: Sélection des fonctions de répartition et de leurs conditions d'utilisation.....	89

## Listes des tableaux

Tableau 2-1: Propriétés physiques, chimiques et toxiques des 16 principaux composés HAP.....	9
Tableau 2-2: Fonds géochimiques des HAP <sub>16</sub> et de benzo[a]pyrène dans les couches superficielles du sol des Länder allemands en mg/kg (LABO, 2003).....	13
Tableau 2-3: Propriétés physiques et chimiques des 7 congénères PCB (Li et al., 2003).....	15
Tableau 2-4: Fonds géochimiques des PCB <sub>6</sub> dans les couches superficielles du sol des Länder allemands en mg/kg (LABO, 2003).....	18
Tableau 2-5: Etudes cantonales portant sur les teneurs en HAP et en PCB dans les sols (Etat: juin 2008) .....	20
Tableau 2-6: Résumé des teneurs en HAP et en PCB (0-20 cm) en Suisse (Keller & Desaulles, 2001) .....	21
Tableau 2-7: Valeurs seuils légales pour les HAP, le benzo[a]pyrène (BaP) et les PCB dans les sols (mg/kg) .....	29
Tableau 3-1 Probabilité de dépassement des valeurs indicatives des concentrations des HAP <sub>16</sub> , de le BaP et des PCB <sub>7</sub> sur la base de l'incertitude de mesure élargie .....	33
Tableau 3-2: Estimation approximative de l'incertitude de mesure relative pour les teneurs en HAP <sub>16</sub> , BaP et PCB <sub>7</sub> à partir de l'incertitude analytique des analyses inter laboratoires OSol.....	41
Tableau 3-3: Aperçu et comparaison des teneurs en HAP <sub>16</sub> , BaP et PCB <sub>7</sub> ainsi que des valeurs seuils dépassées dans les sols (0-20 cm) de Suisse .....	42
Tableau 3-4: Sites du NABO avec dépassement des seuils de prévention.....	43
Tableau 3-5: Aperçu des teneurs en HAP <sub>16</sub> , Benzo[a]pyrène et PCB <sub>7</sub> en fonction de l'utilisation du sol en mg/kg (valeurs en gras > valeurs indicatives) .....	48
Tableau 3-6: Comparaison de la séquence et de la fréquence des composés HAP et PCB dominants d'après l'utilisation du sol .....	50
Tableau 3-7: Corrélations des HAP <sub>16</sub> et PCB <sub>7</sub> avec les différentes propriétés des sols et des sites dans le réseau NABO .....	52
Tableau 3-8: Caractéristiques des HAP dans la littérature portant sur les émissions et dans le réseau de référence NABO (tiré de: Brändli et al., 2008) .....	56
Tableau 3-9: Marqueurs HAP caractéristiques dans la littérature portant sur les émissions et dans le réseau de référence NABO (modifié à partir de: Brändli et al., 2007) .....	57

**Liste des illustrations**

Illustration 2-1: Carte synoptique des 105 sites NABO .....	22
Illustration 2-2: Plan de prélèvement des échantillons .....	24
Illustration 2-3: Représentation schématique des composantes et parts d'incertitude .....	27
Illustration 2-4: Modèle arithmétique pour l'ensemble du processus de mesure .....	28
Illustration 3-1: Incertitude de mesure U (p=95%) pour HAP <sub>16</sub> , PCB <sub>7</sub> et BaP en fonction de la concentration. ....	32
Illustration 3-2: Eléments contribuant à l'incertitude de mesure à la limite de détection et au niveau des valeurs indicatives pour les HAP <sub>16</sub> , le BaP et les PCB <sub>7</sub> . ....	32
Illustration 3-3: Répétabilité moyenne de l'ensemble du processus de mesure (précision de la répétabilité locale), de l'analytique, ainsi que du prélèvement et de la préparation des échantillons pour les HAP <sub>16</sub> , le BaP et les PCB <sub>7</sub> exprimés en coefficient de variation (CV en %).....	34
Illustration 3-4: Répétabilité de l'ensemble du processus de mesure pour les teneurs en HAP et PCB sur la base de 20 sites comprenant chacun une répétition de 4 échantillons composés, en coefficient de variation (CV %).....	35
Illustration 3-5: Reproductibilité entre laboratoires: écart systématique du laboratoire du NABO en % pour les HAP <sub>16</sub> , le BaP et les PCB <sub>7</sub> dans le programme d'analyses interlaboratoires OSol.....	36
Illustration 3-6: Stabilité de mesure des analyses de laboratoire: évolution des deux échantillons de contrôle (KB11 et KB13) ainsi que des véritables échantillons de répétition (EW), représentée sous forme d'écart en % par rapport à la 1ère détermination.....	38
Illustration 3-7: Carte synoptique des teneurs en HAP <sub>16</sub> - (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO .....	45
Illustration 3-8: Carte synoptique des teneurs en BaP (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO.....	46
Illustration 3-9: Carte synoptique avec les teneurs en PCB <sub>7</sub> (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO .....	47
Illustration 3-10: Teneurs en HAP et en PCB des sites du NABO (0-20 cm) exprimées en µg/kg et groupées en fonction de l'utilisation du sol (VI: valeur indicative, BG: limite de détermination, NWG: limite de détection).....	49
Illustration 3-11: Résumé des parts relatives des composés simples HAP et PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm) de tous les sites.....	50
Illustration 3-12: Diagramme de dispersion et droites de régression linéaire pour les HAP <sub>16</sub> et PCB <sub>7</sub> avec des caractéristiques différentes au niveau du sol et du site (paramètres de corrélation et de régression dans le tableau 3-7).....	54

Illustration 3-13 Trois profils HAP caractéristiques du modèle linéaire mixte dans le réseau de référence NABO en proportions relatives moyennes: A) profil léger, B) profil lourd avec augmentation progressive de composés lourds, C) profil lourd avec diminution progressive des composés lourds (tiré de: Brändli et al., 2007) ..... 58

## Résumé

Le présent rapport contient des éléments détaillés relatifs aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et aux polychlorobiphényles (PCB) dans les sols, ainsi que la synopsis la plus actuelle jusqu'ici des teneurs en HAP et en PCB des sols en Suisse, en particulier dans le réseau de référence de l'Observatoire national des sols (NABO). Une attention particulière a été vouée à la qualité des données et à la saisie de l'incertitude de mesure.

En Suisse, les teneurs en HAP et en PCB des sols sont mesurées depuis les années 90. Des mesures ont été effectuées entre 1995 et 2005 dans les sites sélectionnés du réseau NABO, et ce rapport présente pour la première fois des résultats pour l'ensemble des 105 sites d'observation de la troisième période de mesure 1995/99. Dans les champs de mesure respectifs, l'incertitude de mesure élargie est de 44 à 63% pour les HAP<sub>16</sub>, 36-46% pour les PCB<sub>7</sub> et 56% pour les benzo[*a*]pyrènes (BaP). Les teneurs (min. / médianes / max.) des couches superficielles du sol (0-20 cm) sont de 0.032 / 0.163 / 8.46 mg/kg pour les HAP<sub>16</sub>, de 0.0005 / 0.013 / 1.13 mg/kg pour le BaP et de 0.0005 / 0.0016 / 0.012 mg/kg pour les PCB<sub>7</sub>. En tout, les valeurs indicatives de prévention n'ont été dépassées que sur trois sites pour les HAP<sub>16</sub> (valeur indicative 1 mg/kg) et sur deux sites pour le BaP (valeur indicative 0.2 mg/kg): 31 Coffrane NE avec grandes cultures, 55 Nyon VD avec vignobles et 97 Lugano dans un parc municipal. Pour les PCB<sub>7</sub>, toutes les teneurs étaient nettement inférieures à la valeur indicative non officielle de 0.02 mg/kg. Le regroupement des teneurs en fonction de l'utilisation du terrain montre de manière générale une tendance à des teneurs plus élevées en HAP<sub>16</sub> et en BaP sous les forêts de conifères, dans les vignobles (n=4) et dans les sites de protection (n=4).

En ce qui concerne les HAP<sub>16</sub>, le composé le plus fréquent est le phénanthrène, suivi du fluoranthène et du pyrène. Pour les PCB<sub>7</sub> la série se décline comme suit: PCB-153 > PCB-138 > PCB-101. Une différence nette en fonction de l'utilisation du sol n'a pas pu être observée. L'examen des relations avec l'utilisation pratique des sols a révélé la corrélation de loin la plus importante et significative entre les HAP<sub>16</sub> et le BaP ( $r = 0.88$ ). Les autres relations avec notamment l'altitude et le C<sub>org</sub> étaient nettement plus faibles. Les corrélations en matière de stratification en fonction de l'utilisation du sol étaient quelque peu meilleures: pour les herbages extensifs HAP<sub>16</sub>/altitude ( $r = -0.62$ ), pour les herbages intensifs HAP<sub>16</sub>/Pb ( $r = 0.78$ ), pour les sites de protection HAP<sub>16</sub>/Hg ( $r = 1.0$ ) et PCB<sub>7</sub>/Hg ( $r = 0.98$ ), pour les forêts de conifères HAP<sub>16</sub>/altitude ( $r = -0.68$ ) et PCB<sub>7</sub>/HAP<sub>16</sub> ( $r = 0.85$ ). Il n'a pas été possible d'attribuer clairement des sources d'émission aux teneurs en HAP du sol, mais on a trouvé des conditions mixtes dans lesquelles les sources de combustion sont supérieures aux sources pétrochimiques.

Différentes conclusions peuvent en être tirées:

1. Tandis que l'incertitude de mesure élargie des données mesurées dans l'étude a permis de fournir des résultats utilisables, cela n'a été que partiellement, voire parfois pas du tout le cas pour l'incertitude de mesure des données mesurées entre différentes études.

2. Le degré de contamination mesuré dans le réseau de référence NABO s'est avéré faible pour les HAP<sub>16</sub> et le BaP et négligeable pour les PCB<sub>7</sub> par rapport aux seuils de prévention.
3. Les écarts nets dans les répartitions de fréquence des composés indiquent que l'on a affaire à des situations de contamination spécifiques. De manière globale, ce sont les immissions composées qui prédominent.
4. Les corrélations trouvées dans le réseau de référence NABO n'ont guère d'importance en matière de protection concrète des sols. Il faudrait pour cela améliorer la stratification spécifique aux contaminations et disposer d'un plus grand collectif de sites.
5. De manière générale, l'attribution des sources de HAP n'était pas nette dans les cas individuels, mais elle a confirmé que les sources de combustion étaient prédominantes.

Le rapport se termine par la liste des projets et une série de recommandations destinées aux services de protection des sols de la Confédération et des cantons.

## Abréviations et symboles

ACY	Acénaphthylène (3 anneaux)
ACE	Acénaphthène (3 anneaux)
ALP	Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux
ANT	Anthracènes (3 anneaux)
ART	Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon
BaA	Benzo[ <i>a</i> ]anthracène (4 anneaux)
BaP	Benzo[ <i>a</i> ]pyrène (5 anneaux)
BbF	Benzo[ <i>b</i> ]fluoranthène (5 anneaux)
BkF	Benzo[ <i>k</i> ]fluoranthène (5 anneaux)
BPE	Benzo[ <i>ghi</i> ]pérylène (6 anneaux)
CHR	Chrysène (4 anneaux)
C <sub>org</sub>	Carbone organique
COR	Coronène
K <sub>ow</sub>	Coefficient de partage octanol-eau
cPHE	4-H-cyclopenta[ <i>def</i> ]phénanthrène
cPYR	Cyclopenta[ <i>cd</i> ]pyrène
CV	Coefficient de variation $CV(\%) = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 ; \quad SD : \text{écart - type}, \bar{x} : \text{moyenne}$
DBA	Dibenzo[ <i>a,h</i> ]anthracène (5 anneaux)
EMPA	Institut fédéral de recherche sur les matériaux (EMPA), Dübendorf
EPA	Environmental Protection Agency of the USA
ETHZ	Ecole polytechnique fédérale, Zürich
FET	Facteur d'équivalence toxique
FLU	Fluorène (3 anneaux)
IPY	Indéno[ <i>1,2,3-cd</i> ]pyrène (6 anneaux)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MONARPOP	Monitoring network in the alpine region for persistent and other organic pollutants ( <a href="http://www.monarpop.at">www.monarpop.at</a> )
MS	Matière sèche (séchée à 105°C)
NAP	Naphtaline (3 anneaux)
OVF	Office vétérinaire fédéral, Liebefeld
OFAG	Office fédéral de l'agriculture, Berne
OSol	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols, 1998
Osol 1986	Ordonnance sur les polluants du sol, 1986
POP	Polluants organiques persistants
PPS	Produits phytosanitaires
PYR	Pyrène (4 anneaux)
PCB	Polychlorobiphényles

## Abréviations et symboles (suite)

PCB-28	(Trichlorobiphényle)
PCB-52	(Tétrachlorobiphényle)
PCB-101	(Pentachlorobiphényle)
PCB-118	(Pentachlorobiphényle)
PCB-138	(Hexachlorobiphényle)
PCB-153	(Hexachlorobiphényle)
PCB-180	(Heptachlorobiphényle)
PCB <sub>7</sub>	Somme des 7 congénères PCB selon la liste de l'Institute of Reference Materials and Measurements (IRMM): n° IUPAC 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180
PCDD/F	Dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), (somme des dibenzo-p-dioxines polychlorées et des dibenzofuranes polychlorés)
RET	Rétène

## Glossaire

Congénères	Composés chimiques ayant la même formule brute
Coefficient de partage octanol/eau ( $C_{ow}$ )	Coefficient de partage sans dimension indiquant le rapport des concentrations en n-octanol et en eau d'un produit chimique dans un système à deux phases.
Facteur d'équivalence toxique (TEF)	Le TEF indique le niveau de toxicité d'une substance par rapport à la dioxine de Seveso. Le TEF1 a été attribué à la dioxine de Seveso (2,3,7,8-TCDD)
Lipophile	Qui a de l'affinité pour les graisses ou qui est lié aux graisses
Polychlorobiphényles (PCB)	Groupe de substances organiques de 209 composés ayant en commun une structure de base comprenant deux anneaux de carbone avec un degré de chloration différent.
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Groupe de substances organiques comprenant env. 300 composés. Il s'agit d'hydrocarbures cycliques constitués de deux anneaux benzol condensés ou plus. La structure, la disposition et le nombre d'anneaux déterminent les propriétés physiques et chimiques des composés.
Isomères	Composés chimiques ayant la même formule brute, mais une structure chimique différente
Pression de vapeur saturante	Pression partielle d'une substance chimique qui se trouve en équilibre thermodynamique avec sa phase liquide ou solide.
Solubilité aqueuse	Quantité maximale d'une substance (en gramme ou en Mol), qui peut se diluer complètement à une température donnée dans un volume donné d'eau pure.
PCB coplanaire	Les congénères de PCB ne présentant aucun ou un seul atome de chlore dans les positions 2 et 6 (ortho) des anneaux biphényles. Ainsi, les anneaux se placent sur un même plan et sont semblables aux dioxines dans leur structure spatiale et leur toxicologie.
Hydrophobe	Qui repousse l'eau
Pression de la vapeur	Pression gazeuse dépendant de la substance et de la température.
Persistant	La persistance est un paramètre agrégé qui caractérise le degré de dégradation, resp. la «durée de présence», et donc le potentiel de danger d'une substance dans l'environnement (Scheringer et al. 2001, GAIA 10, 122ss). D'après la convention de Stockholm, un produit chimique est considéré comme persistant lorsque sa demi-vie dans l'eau, resp. dans le sol ou le sédiment est supérieure à deux, resp. six mois.



## 1 Introduction

Dans le cadre de l'«Ordonnance sur les polluants du sol» (OSol, 1986), les premiers résultats sur les teneurs en polluants anorganiques dans le réseau de mesures NABO ont été publiés en 1993 (Desaules & Studer, 1993). En 1998, l'OSol (1986) a été remplacée par l'«Ordonnance sur les atteintes portées au sol» (OSol, 1998) qui fixait également pour la première fois des valeurs seuils légales pour les PCDD/F, les HAP et les PCB. Le mandat était ainsi donné d'examiner également dans le réseau de référence NABO ces trois groupes de polluants organiques considérés comme persistants et pouvant donc se concentrer dans les sols.

Les teneurs en HAP et en PCB avaient déjà été mesurées auparavant dans sites choisis du NABO (Berset & Holzer, 1995; Bucheli et al., 2004; Schmid et al., 2005). Cependant, les résultats n'étaient pas comparables, principalement en raison des méthodes utilisées (Desaules et al., 2008) et le nombre de sites était trop petit pour en tirer des conclusions à l'échelle du pays. Il a donc été décidé de mesurer les HAP et les PCB de l'ensemble des 105 sites du réseau de référence NABO. Sur la base d'études fouillées (Desaules & Dahinden, 2000b), aucune indication significative ou pertinente quant à l'influence de la température de séchage à 40°C et au contact des échantillons de sol avec des matériaux synthétiques (polyéthylène et polypropylène) sur les analyses de HAP et de PCB dans les échantillons de sol n'est avérée. Ainsi, dans cette étude les HAP et les PCB ont été mesurés dans les échantillons de sol pulvérulents et donc divisibles de manière représentative et partageables du troisième relevé (1995/99). Les résultats des teneurs en PCDD/F de 23 sites choisis du NABO ont été publiés (Schmid et al., 2005).

Un aperçu des résultats des HAP et des PCB avait déjà été présenté dans une publication (Desaules et al., 2008) et la problématique de la comparabilité avec d'autres études suite à un manque d'harmonisation avait été discutée. Différents procédés d'attribution aux sources avaient été évaluées sur la base des données existantes (Brändli et al., 2008).

Les objectifs du présent rapport sont de présenter, discuter et évaluer les résultats des teneurs en HAP et en PCB de tous les sites du réseau de référence NABO avec une qualité de données assurée puisqu'il s'agit d'une analyse de l'état à l'échelle du pays. On a en outre établi les proportions de composés simples par rapport à la somme, appelées aussi profils HAP et PCB et elles ont été discutées sous l'angle de l'utilisation du sol et de l'adéquation pour l'attribution aux sources. L'estimation de l'incertitude (chap. 3.1) doit également permettre de présenter et de discuter l'influence de la méthode sur la concentration mesurée. Des conclusions en ont été tirées pour la protection concrète des sols, d'autres projets ont été conçus et des recommandations en sont issues. Le rapport est structuré en conséquence.

Comparativement à l'analyse des polluants non organiques dans les sols, celle des polluants organiques est en retard. Cela est dû aux exigences et au coût relativement élevés des analyses en raison du nombre presque illimité de composés de substances organiques et du faible niveau des fourchettes de concentrations. Cependant, il est essentiel qu'il y ait des seuils légaux pour les polluants organiques dans les sols (OSol 1998), valeurs qui n'existent en Suisse que depuis 1998.

Contrairement aux substances non organiques, des tonnes de substances organiques nouvellement synthétisées parviennent chaque année dans l'environnement (Breivik & Alcock, 2002). La plupart d'entre elles se décomposent toutefois rapidement. Cependant, on manque à ce jour d'une stratégie permettant d'identifier de manière précoce les nouveaux polluants organiques des sols potentiellement dangereux. Les polluants organiques persistants toxiques (POP: persistent organic pollutants), qui sont ubiquitaires et peuvent se concentrer dans les sols, sont considérés comme problématiques pour l'environnement. Les HAP et les PCB en font également partie.

## 2 Principes

### 2.1 Etat général des connaissances sur les HAP

L'aperçu se base en grande partie sur la littérature scientifique spécialisée (Gocht, 2005; Nisbet & LaGoy, 1992; Schmid et al., 2005; Starke et al., 1991; Wilcke & Amelung, 2000) et sur l'encyclopédie Wikipedia (<http://de.wikipedia.org>).

#### Propriétés physiques et chimiques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont un groupe de substances organiques comprenant env. 300 composés. Il s'agit d'hydrocarbures cycliques composés de deux anneaux de benzol condensés ou plus. La structure, la configuration et le nombre d'anneaux déterminent les propriétés physiques et chimiques des différents composés. Selon l'Agence américaine de protection de l'environnement (U.S. EPA), seules les 16 principaux composés HAP analysés sont habituellement considérés comme représentatifs des HAP, à savoir la naphthaline, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo[*a*]anthracène, chrysène, benzo[*b*]fluoranthène, benzo[*k*]fluoranthène, benzo[*a*]pyrène, indéno[*1,2,3-c,d*]pyrène, dibenzo[*a,h*]anthracène et benzo[*ghi*]pérylène. Leurs propriétés physiques et chimiques sont résumées dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Propriétés physiques, chimiques et toxiques des 16 principaux composés HAP

Ab-ré- viation	Substance	Formule chimique	Anneaux	Masse molaire [g mol <sup>-1</sup> ]	Point de fusion <sup>a)</sup> [°C]	Solubilité dans l'eau <sup>1) a)</sup> (25°C) [mg L <sup>-1</sup> ]	Pression de vapeur <sup>1) a)</sup> (25°C) log [Pa]	log K <sub>ow</sub> <sup>a)</sup> (25°C) [-]	TEF <sub>BaP</sub> <sup>2) b)</sup>
NAP	Naphtaline	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	2	128	80	110	1,57	3,4	0,001
ACY	Acénaphthylène	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	3	152	83	37	0,62	4,1	0,001
ACE	Acénaphthène	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	3	154	95	17	0,18	3,9	0,001
FLU	Fluorène	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	3	166	116	16	-0,15	4,2	0,001
PHE	Phénanthrène	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	3	178	100	6,2	-0,95	4,6	0,001
ANT	Anthracène	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	3	178	216	5,4	-1,11	4,5	0,01
FLT	Fluoranthène	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	4	202	107	1,7	-2,06	5,3	0,001
PYR	Pyrène	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	4	202	150	2,4	-1,92	5,3	0,001
BaA	Benz[ <i>a</i> ]anthracène	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	4	228	158	0,29	-3,22	5,6	0,1
CHR	Chrysène	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	4	228	254	0,37	-3,97	5,6	0,01
BbF	Benzo[ <i>b</i> ]fluoranthène	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5	252	167	0,031	---	6,6	0,1
BkF	Benzo[ <i>k</i> ]fluoranthène	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5	252	217	0,044	-5,39	6,8	0,1
<b>BaP</b>	<b>Benzo[<i>a</i>]pyrène</b>	<b>C<sub>20</sub>H<sub>12</sub></b>	<b>5</b>	<b>252</b>	<b>179</b>	<b>0,13</b>	<b>-4,67</b>	<b>6,0</b>	<b>1</b>
DBA	Dibenzo[ <i>a,h</i> ]anthracène	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	5	278	266	0,12	-7,04	7,2	1
IPY	Indéno[ <i>1,2,3-cd</i> ]pyrène	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	6	276	163	1,44	---	7,7	0,1
BPE	Benzo[ <i>ghi</i> ]pérylène	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	6	276	222	0,023	-4,65	7,2	0,01

<sup>1)</sup>Solubilité dans l'eau et pression de vapeur saturante des liquides réfrigérés

<sup>2)</sup>TEF<sub>BaP</sub>: Toxicité sous forme de facteur d'équivalence toxique du Benzo[*a*]pyrène

<sup>a)</sup> (Gocht, 2005)

<sup>b)</sup> (Nisbet & LaGoy, 1992)

Dans la série présentée, le nombre d'anneaux benzol augmente, de même qu'en général le poids moléculaire. La pression de vapeur en tant que mesure de la volatilité, ainsi que la solubilité dans l'eau, diminuent de la naphthaline au benzo[*ghi*]pérylène. Plus le coefficient de partage octanol/eau ( $K_{ow}$ ) augmente, plus la lipophilité, resp. l'hydrophobicité et ainsi la tendance à la sorption au carbone organique lié augmentent.

Les HAP sont hydrophobes, peu solubles dans l'eau, mais très lipophiles. Comme la pression de vapeur de la plupart des HAP est très faible, ils ne sont présents en phase gazeuse dans l'atmosphère que jusqu'au pyrène (HAP semi-volatiles). A partir du benzo[*a*]anthracène, le transport dans l'atmosphère n'a lieu que sous forme liée aux particules.

Plus le nombre d'anneaux, resp. la grandeur des molécules augmente, plus les HAP sont difficilement solubles dans l'eau et moins ils sont volatils. En raison des différences au niveau des propriétés physico-chimiques et toxiques, il est judicieux de faire une répartition entre les HAP de faible poids moléculaire (2-3 anneaux) et ceux de poids moléculaire plus élevé à partir du fluoranthène (4-6 anneaux). Les HAP de faible poids moléculaire se trouvent dans l'air principalement sous forme gazeuse et dans les sous-sols, sous forme soluble dans l'eau d'infiltration et dans les eaux souterraines. Dans l'air, les HAP de poids moléculaire plus élevé se trouvent principalement sous forme liée aux particules, avec une préférence marquée pour la matière organique.

### Ecotoxicologie

De par leur persistance, leur répartition ubiquitaire et leur toxicité, les HAP sont des polluants environnementaux très importants. Dans les années 1980 déjà, l'U.S. EPA a intégré les 16 principaux composés HAP mentionnés plus haut dans la liste des polluants prioritaires. Le groupe des HAP est le groupe de substances qui comprend le plus grand nombre connu de substances cancérigènes. Presque tous les HAP avec plus de quatre anneaux de carbone sont cancérigènes. Comme au sein des HAP, le benzo[*a*]pyrène présente une cancérigénicité élevée et qu'il peut atteindre jusqu'à 10 % de l'ensemble (voir Illustration 3-11), le benzo[*a*]pyrène est souvent mentionné séparément (OFEV, 2001a). Comme dans le Tableau 2-1, la toxicité des HAP est donc également indiquée en facteur d'équivalence toxique du benzo[*a*]pyrène ( $TEF_{BaP}$ ) (Nisbet & LaGoy, 1992).

En raison de leur persistance et de leurs propriétés lipophiles, les HAP ont tendance à une bioaccumulation dans les tissus riches en graisse et cela d'autant plus que leur poids moléculaire est élevé (Sims & Overcash, 1983). L'absorption de HAP dans l'organisme humain se produit principalement par la nourriture et, dans une moindre mesure, par inhalation et contact avec la peau (Vyskocil et al., 2000).

### Sources

Les HAP sont formés principalement comme sous-produits indésirables d'une combustion incomplète. En plus de la combustion anthropogène du bois, des carburants fossiles, des déchets et autres matériaux similaires, les feux de forêts et de steppe, ainsi que les éruptions volcaniques sont

reconnus comme sources naturelles de HAP. Li et al. (2001) décrit les émissions actuelles de HAP provenant de sources naturelles comme négligeables, tant elles sont faibles. Wilcke, (2007) fait toutefois référence aux nouvelles connaissances sur la production biogène de naphthaline, de phénanthrène et de pérylène et conclut que les contributions des HAP naturels sont plus élevées que ce que l'on ne pensait jusqu'ici.

Les HAP sont des composants naturels du charbon et du pétrole et se concentrent dans les goudrons et les bitumes de manière anthropogène durant les processus de distillation. Seuls quelques rares HAP sont fabriqués par l'industrie chimique. Ils sont utilisés principalement pour les insecticides, les stabilisateurs, les produits pharmaceutiques, les additifs cosmétiques, les solvants, les plastifiants, la fabrication d'encres et de plastiques.

La répartition géographique des HAP est principalement liée à la combustion des énergies fossiles (installations de chauffage et trafic). Les résidus toxiques des usines à gaz, des cokeries et des autres déchets contenant des HAP constituent localement des sources importantes. D'après les inventaires actuels des émissions, les HAP sont principalement émis par des sources diffuses. L'identification des sources, resp. la distinction entre les HAP pyrolytiques et pétrogènes sur la base des différentes configurations des composés simples est plus ou moins facile à déterminer et d'autant plus difficile que la distance aux sources augmente (Brändli et al., 2008).

### **Comportements dans les sols**

Le sol est le principal réservoir de HAP (Gocht, 2005; Wild & Jones, 1995a) et la pénétration se fait principalement par déposition de particules. La volatilisation n'a d'importance que pour les HAP semi-volatiles jusqu'au phénanthrène à trois anneaux (Cousins & Jones, 1998). Les échanges sélectifs de HAP entre le sol et l'atmosphère peut provoquer des contaminations lors du séchage des échantillons de sol, en raison de la concentration des combinaisons de faible poids moléculaire (Cousins et al., 1997). Les variations de température provoquent des échanges multiples entre le sol et l'atmosphère (« hopping »), un fractionnement le long de gradients de température décroissants (« global distillation ») et une accumulation dans les régions plus froides (Gouin et al., 2004; Halsall et al., 1997; Weiss et al., 2000).

Dans les sols, les HAP se répartissent presque exclusivement dans la matière organique (Means et al., 1980). En fonction de la qualité de cette dernière, en particulier la taille de ses particules, resp. la spécificité de sa surface, leur capacité de sorption varie fortement. La désorption des HAP hydrophobes dépend également fortement du sorbant. Elle est en général faible à température ambiante et augmente avec la température. C'est la raison pour laquelle, dans les conditions naturelles, les HAP ne se déposent que de manière relativement minime en profondeur (Cousins et al., 1999; Krauss et al., 2000).

Les principales causes de migration en profondeur dans les sols sont les processus de pédoturbation et de transport des solutions principalement dans les macropores (Guggenberger et al., 1996). Le transport semble être principalement lié au déplacement de particules (organiques) du sol (Jones et al., 1989a). Une grande capacité de sorption constitue en général une barrière efficace contre les déplacements.

Chez les plantes, l'absorption de HAP au travers des solutions du sol est très faible, la sorption de HAP volatilisés à la surface des feuilles est en revanche plus importante (Starke et al., 1991). Une compilation de littérature a permis à Wilcke (2000) de trouver des facteurs de transfert se situant entre 0.001 et 0.4 pour l'absorption des plantes, sachant que la majorité des facteurs se situent en dessous de 0.001.

Dans les sols, les HAP sont en général difficilement dégradables et sont donc considérés comme persistants. En raison de la pénétration minimale de la lumière en profondeur, la dégradation par photolyse est négligeable et la dégradation microbienne est également minimale en raison de la mauvaise solubilité dans l'eau, resp. de la mauvaise biodisponibilité pour les composés de plus de quatre anneaux (Sims & Overcash, 1983). Plus le vieillissement augmente, plus l'extractibilité, la dégradabilité et la toxicité diminuent (Alexander, 1995; Beck et al., 1996; Hatzinger & Alexander, 1995).

### **Evolution des immissions et des teneurs**

A partir de diverses études sur les carottes de sédiments, Gocht (2005) a fait la distinction entre quatre périodes:

1. Période pré-industrielle jusqu'à env. 1850, avec relativement peu d'apports de HAP provenant des sources naturelles (fond géochimique)
2. De 1880 à 1965, les apports sont près de 25 fois plus importants que ceux de la période pré-industrielle, principalement à cause de la combustion de carburants fossiles.
3. Baisse des apports entre 1965 et 1980 jusqu'en 1990, en raison des contrôles des émissions dans les pays industrialisés.
4. Après une stabilisation des apports à un niveau environ 10 fois plus élevé que celui de la période pré-industrielle, il y a des signes d'une nouvelle augmentation due au nombre croissant de véhicules (Lima et al., 2003; Wild & Jones, 1995b).

Des analyses rétrospectives dans les échantillons de sol archivés d'une parcelle d'essai semi-rurale dans le sud de l'Angleterre, exposée uniquement aux apports atmosphériques, ont fait état d'une concentration de HAP 4 à 5 fois plus élevée pour la période de 1846 à 1986 (Jones et al., 1989a; Jones et al., 1989b). De manière générale, ce sont là surtout les HAP de poids moléculaire élevé benzo[*b*]fluoranthène, benzo[*a*]pyrène et pyrène qui ont le plus augmenté. En revanche, on peut constater une diminution en ce qui concerne la naphthaline, de faible poids moléculaire, dont la combinaison est celle qui possède le point de fusion le plus bas.

### **Teneurs actuelles en HAP**

Dans la littérature, les teneurs en HAP ne sont souvent pas indiquées en tant que somme des 16 principaux composés HAP selon l'U.S. EPA. La localisation des sites, ainsi que la profondeur de prélèvement, sont en outre souvent définies de manière insuffisante. Cela rend difficile, voire impossible d'effectuer des comparaisons qui seraient judicieuses (Desaules et al., 2008). Le

meilleur degré d'harmonisation (LABO, 2003) est celui du fond géochimique des HAP<sub>16</sub> éloignés et proches des émissions des Länder allemands, résumés dans le Tableau 2-2.

**Tableau 2-2: Fonds géochimiques des HAP<sub>16</sub> et de benzo[a]pyrène dans les couches superficielles du sol des Länder allemands en mg/kg (LABO, 2003)**

Site	n	HAP <sub>16</sub>		Benzo[a]pyrène	
		Médiane	90 <sup>ème</sup> centile	Médiane	90 <sup>ème</sup> centile
<b>Eloigné de l'émission:</b>		<b>0.10-2.3</b>	<b>0.36-5.3</b>	<b>&lt;0.01-0.24</b>	<b>0.01-0.57</b>
<b>Grandes cultures:</b>		<b>0.10-0.38</b>	<b>0.48-1.28</b>	<b>&lt;0.01-0.03</b>	<b>0.018-0.09</b>
Bade-Wurtemberg	58	0.19	0.54		
Bavière <sup>1)</sup>	53			0.008	0.049
Brandebourg	201	0.16	0.51	0.011	0.046
Hesse	26	0.10	0.48	0.010	0.045
Mecklembourg-Poméranie	55	0.19	0.82	0.023	0.087
Basse-Saxe	160			0.007	0.018
Rhénanie du Nord-Westphalie	136			0.03	0.070
Rhénanie du Nord-Palatinat	52	0.26	0.72	0.023	0.064
Sarre	24			0.016	0.047
Saxe	306	0.25	0.54	<0.01	0.026
Thuringe	87	0.38	1.28	0.018	0.077
<b>Prairies:</b>		<b>0.17-0.33</b>	<b>0.53-2.36</b>	<b>0.01-0.03</b>	<b>0.03-0.19</b>
Bade-Wurtemberg	65	0.26	0.53		
Brandebourg	161	0.29	1.05	0.019	0.100
Mecklembourg-Poméranie	27	0.17	0.67	0.019	0.057
Basse-Saxe	38			0.014	0.052
Rhénanie du Nord-Westphalie	94			0.030	0.100
Rhénanie du Nord-Palatinat	43	0.31	2.36	0.024	0.185
Saxe	165	0.28	0.68	0.010	0.031
Thuringe	61	0.33	0.92	0.015	0.064
<b>Forêt - couche d'humus:</b>		<b>0.22-2.3</b>	<b>0.5-5.3</b>	<b>0.015-0.24</b>	<b>0.06-0.57</b>
Bade-Wurtemberg	61	1.15	2.98		
Bavière <sup>2)</sup>	30			0.015	0.090
Brandebourg	56	1.17	2.90	0.050	0.155
Mecklembourg-Poméranie	24	0.22	0.48	0.030	0.057
Rhénanie du Nord-Westphalie	55			0.240	0.570
Sarre	35			0.162	0.527
Saxe	178	1.7	3.1	0.082	0.190
Thuringe	73	2.3	5.3	0.074	0.230
<b>Forêt - couche superf. du sol:</b>		<b>0.13-1.0</b>	<b>0.36-2.3</b>	<b>&lt;0.01-0.07</b>	<b>0.01-0.30</b>
Bade-Wurtemberg	116	0.25	1.99		
Bavière <sup>2)</sup>	45			0.019	0.300
Brandebourg	121	0.35	1.21	0.019	0.088
Mecklembourg-Poméranie	26	0.24	0.62	0.014	0.040
Rhénanie du Nord-Palatinat	58	0.78	1.92	0.039	0.122
Rhénanie du Nord-Westphalie	52			0.070	0.230
Sarre	40			0.066	0.166
Saxe	226	0.13	0.36	<0.010	0.011
Thuringe	49	1.0	2.3	0.022	0.098

<sup>1)</sup> Grandes cultures et prairies

<sup>2)</sup> Eloigné et proche de l'émission

Tableau 2-2: Suite

Site	n	HAP <sub>16</sub>		Benzo[a]pyrène	
		Médiane	90 <sup>ème</sup> centile	Médiane	90 <sup>ème</sup> centile
<b>Proche de l'émission</b>		<b>0.21-4.4</b>	<b>0.81-16.5</b>	<b>&lt;0.01-0.36</b>	<b>0.04-1.43</b>
<i>Grandes cultures:</i>				<i>0.009-0.025</i>	<i>0.04-0.24</i>
Bavière	44			0.023	0.142
Hesse	21			0.009	0.041
Basse-Saxe	24			0.025	0.056
Rhénanie du Nord-Westphalie	173			0.080	0.240
Saxe	68	0.39	0.81	0.017	0.051
<i>Prairies:</i>				<i>0.024-0.1</i>	<i>0.07-1.43</i>
Hambourg <sup>1)</sup>	21	1.3	5.2	0.090	0.310
Rhénanie du Nord-Westphalie	100			0.090	0.300
Sarre	22			0.103	1.434
Saxe	53	0.52	1.3	0.024	0.070
<i>Forêt – couche d'humus:</i>					
Sarre	25			0.124	0.171
Saxe	29	2.10	3.5	0.095	0.200
<i>Forêt – couche sup. du sol:</i>					
Rhénanie du Nord-Westphalie	23			0.060	0.810
Sarre	79			0.077	0.247
Saxe	35	0.21	1.0	<0.010	0.036
<b>Région urbaine:</b>					
Hambourg	90	4.4	16.5	0.36	1.26

<sup>1)</sup> Grandes cultures et prairies

<sup>2)</sup> Eloigné et proche de l'émission

Le fond géochimique a été estimé entre 0.001 et 0.01 mg/kg (Edwards, 1983) et les teneurs en HAP les plus basses mesurées de nos jours étaient environ 10 fois plus élevées (Wilcke, 2000). Pour les régions rurales d'Europe, Maliszewska-Kordybach (2003) indique en résumé des teneurs en HAP se situant fréquemment entre 0.05 et 0.30 mg/kg et des valeurs moyennes de 1 à 4 mg/kg pour les sols urbains. Des teneurs en HAP de 0.09 à 44.29 mg/kg ont été mesurées dans 90 sites de Hambourg (Gras et al., 2000). De manière générale, les teneurs en HAP augmentent au fur et à mesure qu'on se rapproche des activités de combustion dues à l'industrie, au trafic et au chauffage, et plus ces activités sont de nature intense et prolongée (Jones et al., 1989b; Reinirkens, 1993; Sims & Overcash, 1983). Le gradient des teneurs en HAP dans les couches superficielles du sol est généralement le suivant: sols de grandes cultures < sols minéraux forestiers < sols de prairies < sols urbains < sites pollués spécifiques (Knoche et al., 1995; Reinirkens, 1993).

### Profil des HAP

Dans son étude de la littérature, Wilcke (Wilcke, 2000) indique le plus souvent une forte corrélation entre les différents HAP qui ont donc un profil similaire dans les zones climatiques tempérées. Ce sont souvent les pourcentages en fluoranthène, phénanthrène et pyrène qui dominent (Desaules et al., 2008).

## 2.2 Etat général des connaissances sur les PCB

L'aperçu se base en grande partie sur les données de l'Office fédéral de l'environnement d'Allemagne ([www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)) et de l'encyclopédie Wikipedia (<http://de.wikipedia.org>).

### Propriétés physiques et chimiques

Tout comme les dioxines et les furanes, les biphényles polychlorés (PCB) font partie des hydrocarbures chlorés. Les PCB constituent un groupe de substances organiques réunissant 209 composés chimiques présentant la même structure de base (congénères). Ils ont en commun une configuration de base comprenant deux anneaux de carbone (biphényles), avec un degré de chloration différent. D'après l'Institute of Reference Materials and Measurements (IRMM), la somme des 7 congénères PCB (n° IUPAC) PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-118, PCB-138, PCB-153 et PCB-180 (OSol, 1998) sont considérés comme importants en Suisse du point de vue de leur toxicité pour l'environnement. Cependant, dans la littérature, les sommes sont souvent constituées par d'autres congénères (Desales et al., 2008). On trouve souvent le PCB<sub>6</sub>, en omettant le PCB-118 (p. ex. LABO, 2003). Les propriétés physiques et chimiques des 7 congénères PCB sont présentées dans le Tableau 2-3 (Li et al., 2003).

Tableau 2-3: Propriétés physiques et chimiques des 7 congénères PCB (Li et al., 2003)

N° IUPAC	Formule chimique (C <sub>12</sub> H <sub>10-n</sub> Cl <sub>n</sub> )	Position du chlore sur les anneaux	Poids moléculaire [g mol <sup>-1</sup> ]	Point de fusion [°C]	Solubilité dans l'eau <sup>1)</sup> (25°C) [mg L <sup>-1</sup> ]	Pression de vapeur <sup>1)</sup> (25°C) [Pa]	log C <sub>ow</sub> (25°C)
PCB-28	C <sub>12</sub> H <sub>7</sub> Cl <sub>3</sub>	2,4,4'-trichlorbiphényle	257.54	58	2.28*10 <sup>-1</sup>	-1.57	5.66
PCB-52	C <sub>12</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>4</sub>	2,5,2',5'-tétrachlorbiphényle	291.99	87	1.40*10 <sup>-1</sup>	-1.92	5.91
PCB-101	C <sub>12</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>5</sub>	2,4,5,2',5'-pentachlorbiphényle	326.43	77	3.33*10 <sup>-2</sup>	-2.61	6.33
PCB-118	C <sub>12</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>5</sub>	2,4,5,3',4'-pentachlorbiphényle	326.43	110	2.23*10 <sup>-2</sup>	-3.00	6.69
PCB-138	C <sub>12</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>6</sub>	2,3,4,2',4',5'-hexachlorbiphényle	360.88	79	6.75*10 <sup>-3</sup>	-3.25	7.21
PCB-153	C <sub>12</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>6</sub>	2,4,5,2',4',5'-hexachlorbiphényle	360.88	103	1.11*10 <sup>-2</sup>	-3.22	6.87
PCB-180	C <sub>12</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>7</sub>	2,3,4,5,2',4',5'-heptachlorbiphényle	395.32	112	5.22*10 <sup>-3</sup>	-3.97	7.16

<sup>1)</sup> Solubilité dans l'eau et pression de vapeur des liquides réfrigérés.

Les PCB sont des substances solides jaunâtres presque inodores. Elles sont thermiquement et chimiquement stables, difficilement inflammables, électriquement non conductrices, très hydrophobes et donc peu solubles dans l'eau, mais lipophiles et pratiquement non biodégradables. D'après leurs propriétés physico-chimiques, elles sont plus ou moins difficilement volatiles.

## Ecotoxicologie

Les PCB appartiennent au groupe dit des «douze salopards» (dirty dozen) parmi les polluants organiques persistants (POP), qui ont été interdits au niveau mondial par la Convention de Stockholm établie par l'ONU en 2001, laquelle est entrée en vigueur à partir de 2004. Les PCB ont été interdits dans de nombreux pays d'Amérique du Nord et d'Europe de l'Ouest à la fin des années 1970 déjà. La Suisse connaît l'interdiction des PCB depuis 1986 (Osubst, 1986: annexe 3.1 et (ORRChim, 2005: annexe 1.1). Suite à deux cas d'intoxications massives par des contaminations de denrées alimentaires au PCB survenus au Japon en 1968 et à Taiwan en 1979, on a constaté pour la première fois une action de longue durée des PCB sur les êtres vivants. Parmi les effets toxiques sur les humains, on citera entre autres la chloracnée et les retards du développement corporel et mental. On les soupçonne d'avoir une activité cancérigène et hormonale, de même que d'être la cause de troubles de la fertilité chez les hommes et chez les animaux. Dans la chaîne alimentaire, les PCB s'accumulent avant tout dans les tissus adipeux. Chez l'homme, l'intoxication par les PCB provient à plus de 90 % de l'alimentation. L'organisation mondiale de la santé (OMS) a calculé des facteurs d'équivalence toxique (TEF) pour 12 des 109 congénères PCB sur la base de la grande toxicité de la «dioxine de Seveso» (2,3,7,8 TCDD). Parmi les 7 congénères IRMM, on ne trouve que PCB-118 avec une valeur TEF – OMS de 0.0001 (1998), actualisée à 0.00003 depuis 2005 (Van den Berg et al., 2006).

## Sources

Les hydrates de carbone chlorés, et donc également les PCB, se forment lors de combustion incomplète en présence de produits chlorés, spécialement lors de l'incinération de déchets. Depuis 1929, le PCB est produit de manière industrielle. Ses domaines d'application sont les transformateurs, les condensateurs électriques, la transmission de chaleur, les installations hydrauliques, les plastifiants et les agents ignifuges dans les matières synthétiques. Les raisons de la présence ubiquitaire de PCB dans l'environnement proviennent d'avaries, d'utilisations inadéquates, de la gestion des déchets et de sa très mauvaise biodégradabilité.

## Comportement dans le sol

Les sols sont de loin les principaux réservoirs de PCB. En Angleterre, c'est le cas pour le 93 % des composés PCB que l'on trouve dans l'environnement (Harrad et al., 1994). Sur de grandes étendues, ils sont apportés dans les sols essentiellement par voie atmosphérique et, localement, par les épandages de boues d'épuration ou par des avaries, comme les fuites d'huile, par exemple. Le processus dominant en matière de pertes de PCB est la volatilisation, surtout pour les congénères de PCB de faible poids moléculaire et faiblement chlorés (Alcock et al., 1996; Harrad et al., 1994). Les échanges entre le sol et l'atmosphère conduisent essentiellement à des contaminations d'échantillons de sol avec des composés PCB de faible poids moléculaire (Alcock et al., 1994). Les variations de température peuvent provoquer une multiplication des échanges entre le sol et l'atmosphère (hopping) et, le long de gradients de température décroissants, amener un fractionnement des composés PCB (global distillation) et une accumulation dans les régions plus froides (Gocht, 2005; Gouin et al., 2004; Harner et al., 1995; Harrad et al., 1994; Lead et al., 1997; Malanichev et al., 2004; Weiss et al., 2000). Les PCB ayant un poids moléculaire élevé retombent

en général à proximité des sources, alors que les PCB de faible poids moléculaire sont transportés sur de longues distances (Meijer et al., 2003; Meijer et al., 2002). La diffusion de PCB se produit surtout dans la matière organique du sol (Cousins et al., 1999; Krauss et al., 2000; Meijer et al., 2003). Le rapport étroit entre les teneurs en humus et en PCB auquel on pourrait donc s'attendre n'est toutefois pas complètement confirmé dans la littérature (Krauss & Wilcke, 2005; Lead et al., 1997; Wilcke & Amelung, 2000; Wilcke et al., 2006).

En comparaison avec les HAP, l'extractibilité chimique de certains congénères de PCB est plus élevée et donc leur migration en profondeur également (Doick et al., 2005; Krauss et al., 2000).

La bioaccumulation de PCB par la voie sol - plante - animaux, semble plus importante que pour les HAP (Duarte-Davidson & Jones, 1996). Le phénomène de l'accumulation, tout au long de la chaîne alimentaire, de PCB dans les tissus adipeux des poissons, des mammifères et des hommes dans les régions froides, est connu (Abrahams, 2002).

D'une manière générale, les PCB ne sont pas facilement dégradables, mais il y a des différences. Une faible diminution de la part des congénères PCB faiblement chlorés accompagnée d'une diminution de la granulométrie indique qu'on a affaire à une augmentation de la dégradation par rapport aux PCB plus fortement chlorés (Wilcke & Zech, 1998).

Lorsque la part des congénères PCB faiblement chlorés diminue peu et que ce phénomène est accompagné d'une diminution de la granulométrie, cela indique une augmentation de la dégradation par rapport aux PCB plus fortement chlorés.

### **Evolution des immissions et des teneurs**

Des analyses rétrospectives, effectuées dans des échantillons de sols de parcelles d'essais semi rurales du Sud de l'Angleterre, montrent une forte augmentation des teneurs en PCB entre 1940 et le début des années 60, avec un pic entre la fin des années 60 et le début des années 70. Ensuite, les teneurs en PCB redescendent au niveau antérieur des années 1940 (Alcock et al., 1993; Harrad et al., 1994). Les concentrations en PCB dans l'atmosphère ont en revanche atteint leur pic au début des années 1970 (Harner et al., 1995). Les raisons de cette évolution sont à chercher d'une part dans l'évolution des émissions, mais également dans l'échange de PCB entre le sol et l'atmosphère, ainsi que dans la migration et l'accumulation dans les régions froides (Gouin et al., 2004; Lead et al., 1997).

### **Teneurs actuelles en PCB**

Dans la littérature internationale, on n'a trouvé que peu d'études indiquant des teneurs en PCB<sub>7</sub> (Desaules et al., 2008), à l'instar de ce que demande l'OSol (OSol, 1998). Il est relativement fréquent de trouver des indications de teneurs en PCB<sub>6</sub> ne prenant pas PCB-118 en considération, comme on peut le voir dans le tableau 2-4, à l'exception de la Thuringe. Pour information, la proportion de PCB-118 dans les PCB<sub>7</sub> varie entre 2.1 % et 20.8 % (médiane 8.3 %).

Il apparaît qu'en Bavière, les valeurs pour les grandes cultures et la forêt sont comparativement souvent élevées et qu'en Thuringe, la limite de quantification est relativement élevée. Il n'y a pas d'explication à cela.

### Profil PCB

Parmi les congénères PCB, PCB-138, 153, 180 et 101 dominent largement (Desaules et al., 2008). Les profils PCB semblent ne dépendre que peu de l'utilisation du sol et de la situation des immis-sions.

**Tableau 2-4: Fonds géochimiques des PCB6 dans les couches superficielles du sol des Länder allemands en mg/kg (LABO, 2003)**

Site	n	PCB <sub>6</sub>	
		médiane	90ème centile
<b>Eloigné de l'émission:</b>		<b>&lt;0.001-0.068</b>	<b>0.002-0.55</b>
<b>Grandes cultures:</b>		<b>&lt;0.001-0.020</b>	<b>0.002-0.150</b>
Bade-Wurtemberg	58	<0.001	0.007
Bavière <sup>2)</sup>	76	0.020	0.150
Brandebourg	222	0.003	0.003
Hesse	26	0.001	0.003
Basse-Saxe	168	0.002	0.002
Rhénanie du Nord-Westphalie	112	0.003	0.014
Rhénanie-Palatinat	155	<0.001	0.008
Sarre	24	0.002	0.009
Thuringe <sup>a</sup>	87	<0.007	<0.007
<b>Prairies:</b>		<b>&lt;0.001-0.003</b>	<b>0.004-0.050</b>
Bade-Wurtemberg	65	<0.001	0.004
Bavière <sup>2)</sup>	60	n.n.	0.050
Brandebourg	162	0.003	0.004
Basse-Saxe	43	n.n.	0.005
Rhénanie du Nord-Westphalie	159	0.003	0.007
Rhénanie-Palatinat	79	<0.001	0.007
Thuringe <sup>1)</sup>	61	<0.007	<0.007
<b>Forêt- couche d'humus:</b>		<b>0.003-0.068</b>	<b>0.013-0.550</b>
Bade-Wurtemberg	61	0.038	0.107
Bavière <sup>2)</sup>	64	0.068	0.550
Brandebourg	56	0.003	0.013
Rhénanie du Nord-Westphalie	47	0.049	0.110
Sarre	35	0.047	0.088
Thuringe <sup>1)</sup>	73	0.012	0.063
<b>Forêt - couche superf. du sol</b>		<b>0.002-0.015</b>	<b>0.007-0.067</b>
Bade-Wurtemberg	116	0.002	0.024
Bavière <sup>2)</sup>	46	0.011	0.067
Brandebourg	120	0.003	0.007
Rhénanie-Palatinat	138	0.015	0.067
Rhénanie du Nord-Wesphalie	48	0.005	0.025
Sarre	38	0.002	0.017
Thuringe <sup>1)</sup>	49	<0.007	0.021

Tableau 2-4: Suite

Site	n	PCB <sub>6</sub>	
		médiane	90ème centile
<b>Proche de l'émission:</b>		<b>0.0005-0.094</b>	<b>0.002-0.134</b>
<i>Grandes cultures:</i>			
Hesse	21	0.0005	0.002
Basse-Saxe	24	n.n.	0.013
Sarre	31	0.003	0.044
<i>Prairies:</i>			
Sarre	23	0.005	0.047
<i>Forêt- couche d'humus:</i>			
Sarre	27	0.094	0.134
<i>Forêt -couche superf. du sol</i>			
Sarre	71	0.009	0.030

<sup>1)</sup> Analogue aux PCB<sub>7</sub> en Suisse (OSol, 1998)

<sup>2)</sup> Eloigné et proche de l'émission

### 2.3 Etudes sur les HAP et les PCB en Suisse

Entre 1990 et 2008, 11 stations cantonales de protection des sols ont publié 19 études fournissant des données concernant les teneurs en HAP et/ou en PCB à partir de 693 sites au total (tableau 2-5).

**Tableau 2-5: Etudes cantonales portant sur les teneurs en HAP et en PCB dans les sols (Etat: juin 2008)**

Canton	Etudes	Nombre de sites	Références
AG	Untersuchung von Waldböden im Kanton Aargau auf die Belastung mit organischen Schadstoffen	13	(Känzig & Werfeli, 1990)
BE	Bodenüberwachung im Kanton Bern - Bodenbericht 2003	38	(AfL BE, 2003)
BL/AG	Schadstoffe aus dem Strassenrandbereich in den Kantonen Basel-Landschaft und Aargau (Schwermetalle und HAP)	57	(AUE BL & Abt. Umwelt AG, 2000)
BL	Statusbericht zur Belastung der Baselbieter Böden mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) und polychlorierten Biphenylen (PCB)	48	(AUE BL, 2002)
BL	Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft: Drittbeprobung nach 10 Jahren (1995-2005) - Langfristige Überwachung der Schadstoff-anreicherungen in Siedlungs- und Waldböden.	10	(AUE BL, 2005a)
BL/BS	PCB in Böden im Bereich von Beckenrändern in den Kantonen BL und BS (interner Bericht)	21	(AUE BL, 2005b)
BS	Monitoring Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Heavy Metals in Urban Soil, Compost and Vegetation	21	(Niederer et al., 1995)
FR	FRIBO - Réseau d'observation des sols agricoles 1987-1994	50	(Julien & Morand, 1995)
GR	Bodenschutz: Fallstudie Siedlungsgebiete in Graubünden - Bericht über die Bodenuntersuchungen im Bündner Rheintal und in der Landschaft Davos. 2. Teil: Organische Schadstoffe	281	(AfU GR, 1998)
OW	Schadstoffbelastung der Böden im Kanton Obwalden - Resultate der Untersuchungskampagnen 1992 und 2002	3	(ALU OW, 2005)
SG	Schadstoffbelastung siedlungsnaher Landwirtschaftsböden im Kt. St.Gallen	24	(AfU SG, 1996)
SG	Kantonale Bodenüberwachung (KABO) St. Gallen 2007 – Auswertung der Viertbeprobung	3	(AfU SG, 2007)
SO	Schadstoffbelastung der Böden entlang von Autobahnen - Ergebnisse der Untersuchungen von 1990 und 1991	2	(AfU SO, 1994a)
SO	Untersuchungen der Schadstoffbelastung von Boden und Vegetation entlang von Kantonsstrassen sowie Strassenwischgut	3	(AfU SO, 1994c)
SO	Ubiquitäre Belastung des Bodens mit Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) im Siedlungsgebiet.	22	(AfU SO, 1994b)
TI	Contenuti di idrocarburi policiclici aromatici (HAP) e bifenili policlorati (PCB) nei suoli in Ticino.	50	(Gini, 1996)
ZH	Die Belastung mit Schwermetallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) in ausgewählten Strassen im Kanton Zürich.	6	(FaBo ZH, 1995b)
ZH	Bodenbelastungen mit Schwermetallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen durch den Betrieb der Jagdschiessanlage Embrach.	1	(FaBo ZH, 1995a)
ZH	Die Belastung mit HAP und Blei an Strassen im Kanton Zürich.	40	(FaBo ZH, 2000)
<b>Total</b>		<b>693</b>	

Les données dont on dispose pour la période de 1990 – 1996 ont été exploitées sous forme de distributions de fréquences (Keller & Desaulles, 2001). Un résumé des résultats est présenté dans le tableau 2-6. A l'époque, on ne disposait pas encore d'un contrôle de qualité de la comparabilité des teneurs en polluants organiques par le biais d'analyses inter laboratoires. Celui-ci n'existe que depuis 1998 (Desaulles & Dahinden, 1999) dans le cadre de l'OSol (1998).

**Tableau 2-6: Résumé des teneurs en HAP et en PCB (0-20 cm) en Suisse (Keller & Desaulles, 2001)**

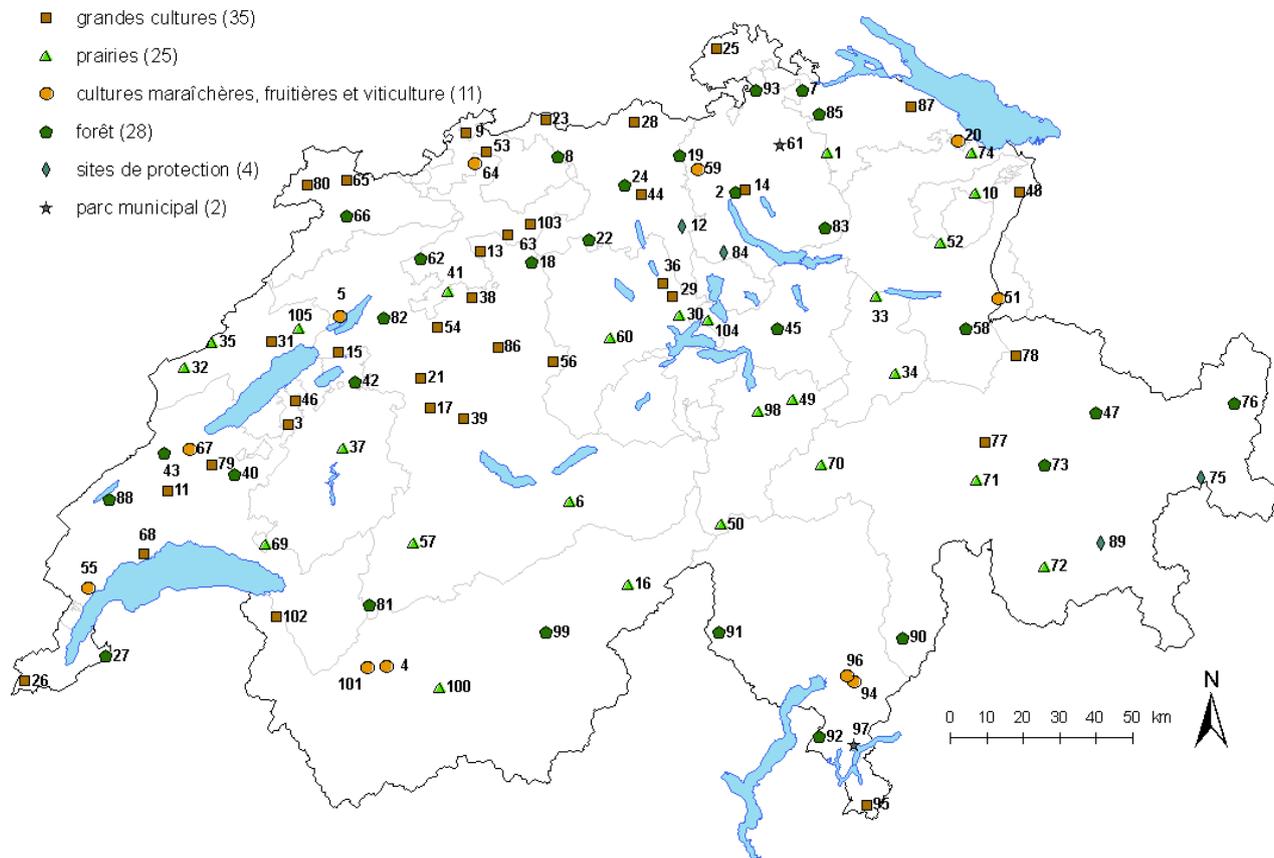
<b>polluant organique</b>	<b>échantillons (n)</b>	<b>10ème centile (mg/kg)</b>	<b>médiane (mg/kg)</b>	<b>moyenne (mg/kg)</b>	<b>90ème centile (mg/kg)</b>
HAP <sub>16</sub>	542	0.1	0.5	2.6	7.2
Benzo[a]pyrène	583	0.007	0.035	0.235	0.66
PCB <sub>7</sub>	357	0.001	0.004	0.016	0.021

La distribution des fréquences des résultats d'analyses est caractérisée par une très nette asymétrie vers la droite, comme le prouvent les moyennes, qui sont plus élevées que les médianes. Ceci s'explique surtout par les valeurs des sites de jardins et des zones résidentielles, qui sont nettement plus élevées. Les valeurs provenant de sites forestiers sont en général également plus élevées que celles des sites agricoles. Dans le cas des HAP<sub>16</sub>, plus de 40 % des valeurs dépassent la valeur indicative fixée à 1 mg/kg par l'OSol (1998) et pour benzo[a]pyrène, 12 % dépassent la valeur indicative de 0.2 mg/kg. Nous ne disposons pas de valeur indicative pour les PCB<sub>7</sub> et le seuil d'investigation au prélèvement, qui est de 0.1 mg/kg, est dépassé par 2.5 % de toutes les valeurs.

Diverses études ont été effectuées sur des sites choisis dans le réseau de référence NABO (Berset & Holzer, 1995; Bucheli et al. 2004; Schmid et al. 2005).

## 2.4 Le réseau de référence NABO

L'illustration 2-1 donne un aperçu de la répartition géographique des 105 sites d'observation répartis selon leur utilisation.



**Illustration 2-1: Carte synoptique des 105 sites NABO**

Le choix et la répartition géographique des sites NABO ont été effectués sur la base d'un concept général. Celui-ci a prévu une pondération selon les immissions probables et a tenu compte de critères environnementaux tels que ceux des régions pédologiques, ainsi que ceux de différents types d'occupation et d'utilisation ayant un impact sur les immissions écologiques. De plus amples informations concernant le réseau de référence NABO peuvent être consultées dans trois rapports (Desaules & Studer, 1993; Desaules & Dahinden, 2000a; Desaules et al., 2006).

## 2.5 Programme analytique et méthodes

### Programme analytique

A partir des analyses de sols du troisième prélèvement (1995/99) portant sur l'ensemble des 105 sites du réseau de référence NABO, les 16 HAP figurant dans le tableau 2-1 et les 7 PCB figurant dans le tableau 2-3 ont été analysés selon (OSol, 1998) et, en outre, ils ont été indiqués comme somme des HAP<sub>16</sub>, respectivement des PCB<sub>7</sub>.

Le carbone organique (C<sub>org</sub>) a également été mesuré, car il fournit une valeur d'accompagnement importante pour l'interprétation.

Le relevé initial (1985/91) comprenait également pour 102 sites, hormis huit métaux lourds et le fluor, l'analyse unique des caractéristiques pédologiques telles que la réaction du sol (pH), la teneur en calcaire (CaCO<sub>3</sub>), C<sub>org</sub>, la texture (argile, silt, sable), les oxydes de fer et d'aluminium, la capacité d'échange cationique et le phosphate (soluble dans le CO<sub>2</sub>) (Desaules & Studer, 1993).

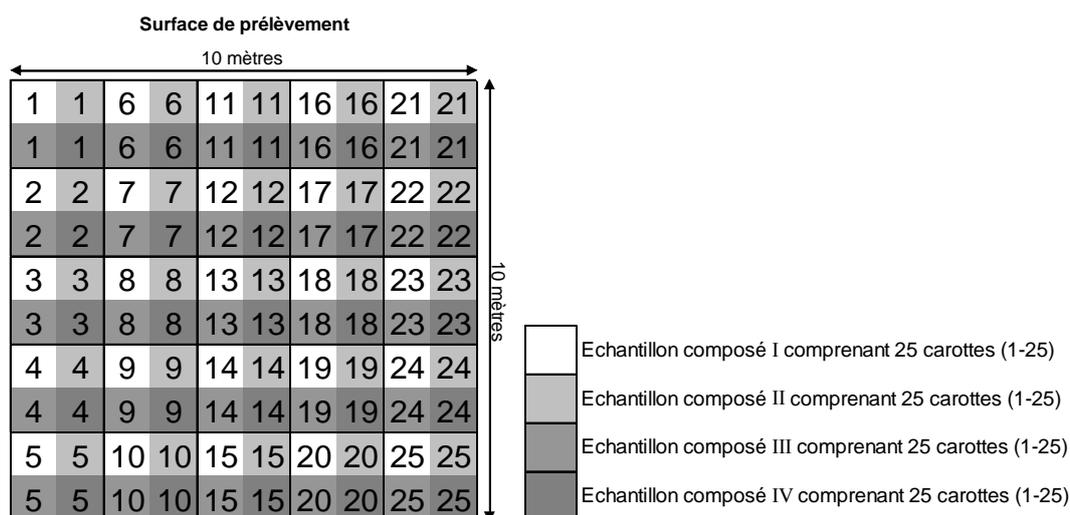
Le problème rencontré lors du prélèvement et de la préparation d'échantillons représentatifs à partir d'échantillons congelés n'ayant pas encore été résolu de manière satisfaisante, les analyses ont été effectuées sur des échantillons ayant été en fait prélevés et préparés à des fins d'analyse de polluants inorganiques. Ceci peut se justifier pour cette étude sur les teneurs en HAP et en PCB des sols en Suisse, car une étude (Desaules & Dahinden, 2000b) a démontré que le contact avec des matières synthétiques et le séchage des échantillons à 40 °C n'exercent pas une influence déterminante sur le résultat des analyses.

### Prélèvement d'échantillons et transport

Le prélèvement des échantillons a été effectué sur des surfaces de 100 m<sup>2</sup>, de forme généralement carrée, conformément aux directives d'un manuel (Hämmann & Desaules, 2003). Le plan de prélèvement de l'illustration 2-2, montre que, sur chaque site et selon une trame stratifiée de forme carrée, on a prélevé quatre échantillons composés parallèles, comprenant au moins 25 carottes chacun. La profondeur de référence pour les prélèvements était de 20 cm à partir de la surface du sol. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une tarière à carotte (demi tube) en acier dur de 3 cm de diamètre intérieur. Les échantillons ont été transportés en automobile, à température ambiante, dans des sacs en plastique dûment étiquetés.

### Préparation physique et archivage des échantillons

Les échantillons de sols ont été mis dans un four à air chaud au plus tard un jour après leur arrivée au laboratoire et séchés entre 2 et 4 jours à 40°C. Les pierres ainsi que les corps étrangers furent, dans la mesure du possible, triés à la main. Ensuite, les échantillons ont été concassés à l'aide d'un broyeur à mâchoires (Retsch type BB2), puis passés délicatement à travers un tamis de matière synthétique à mailles de 2 mm (terre fine). Après la division représentative des échantillons au moyen d'un diviseur d'échantillons à couloirs, ils furent conditionnés dans des bocaux hermétiques et archivés dans un local relativement sombre et sec.



**Illustration 2-2: Plan de prélèvement des échantillons**

### Analyses HAP et PCB et expression des résultats

Les instructions standard pour les méthodes utilisées dans le présent rapport aux fins d'analyses HAP et PCB dans les sols du NABO peuvent être consultées sur le site internet du NABO ([www.nabo.admin.ch](http://www.nabo.admin.ch)), sous la rubrique «Quality». De ce fait, la méthode ne sera décrite que brièvement.

#### Extraction:

Juste avant le prélèvement, les récipients d'échantillons ont été agités pendant 10 min. Les échantillons de sols de 5 à 40 g (normalement 20 g) ont été mélangés avec 50 % de sulfate de sodium et 5 % de cuivre. La moitié du mélange a été ensuite transférée dans les cartouches d'extraction Soxhlet, qui ont été au préalable lavées et séchées. Les standards internes (200 ng des 16 HAP deutérés et 50 ng des PCB marqués au  $^{13}\text{C}_{12}$ ) ont été instillés sur la surface des échantillons et recouverts avec le reste du mélange d'échantillons. Les cartouches d'extraction remplies ont été placées dans l'extracteur Soxhlet, au préalable nettoyé au chlorure de méthylène, et l'extraction des HAP et des PCB à l'hexane a pu commencer. L'extraction a duré 36 heures. Une fois celle-ci terminée, les extracteurs ont été soigneusement vidés dans des ballons. L'extrait a ensuite été transvasé dans des verres d'évaporation Syncore. Pour terminer, 6 tubes de chaque extrait ont été placés dans un analyseur Syncore et l'hexane a été vaporisé jusqu'à l'obtention d'un volume résiduel de 6 à 8 ml. Entre-temps, les verres Syncore ont été rincés avec chacun environ deux fois deux ml d'hexane, auquel on a ajouté environ 1 ml d'isooctane comme «keeper». L'extrait préconcentré a été séparé par gravimétrie dans un rapport de 80:20. Pour les étapes suivantes, l'analyse des HAP s'est déroulée séparément de celle des PCB.

#### Purification des extraits:

**HAP:** L'extrait d'hexane réduit a été préconcentré dans du cyclohexane et purifié au moyen d'une répartition liquide-liquide avec du diméthylformamide: eau Milli-Q (9:1, v/v) d'après (Aamot et al., 1987). Une prochaine étape de purification a ensuite été réalisée au travers de sulfate de sodium

anhydre et d'un gel de silice désactivé (10% eau Milli-Q) dans une colonne de verre ouverte. L'éluat a été préconcentré au moyen d'un Syncore et d'azote jusqu'à un volume final d'env. 50 µL. Pour terminer, l'extrait a été transféré dans une fiole GC et mélangé avec 200 ng du standard de récupération indéno[1,2,3-*cd*]fluoranthène. Après fermeture de la fiole, l'échantillon était prêt à être analysé par GC-MS.

**PCB:** L'extrait a été purifié au travers de sulfate de sodium anhydre, ainsi que de différents gels de silice conditionnés (avec acide sulfurique, 10 % eau Milli-Q, et hydroxyde de sodium) dans une colonne de verre ouverte (Smith et al., 1984). L'éluat a été préconcentré au moyen d'un Syncore et d'azote jusqu'à un volume final d'env. 50 µL. Pour terminer, l'extrait a été transféré dans une fiole GC et mélangé avec 50 ng de standard de récupération 1,2,3,4-tétrachloronaphtaline. Après fermeture de la fiole, l'échantillon était prêt à être analysé par GC-MS.

### Séparation et mesure:

**HAP:** Les HAP ont été mesurés sur un Agilent GC/MS 6890/5973i. 1 µL d'extrait a été injecté sur la colonne. Une colonne capillaire Rtx-5Sil MS (30 m, 0.25 mm ID, 0.25 d'épaisseur de film) de Restek (BGB Analytik AG, CH-4469, Anwil) a été utilisée pour la séparation. 2 m de colonne Siltek Guard (0.53 mm ID) du même fabricant ont été utilisés comme précolonne. Le barème de température suivant a été appliqué: 1 min à 100°C, à raison de 5°C/min jusqu'à 300°C, 15 min à 300°C. La température de l'injecteur a été maintenue de manière constante à 3°C de plus que la température du four selon le principe du suivi du four («oven track»). L'hélium a été choisi comme gaz porteur, à un flux de 1 mL/min. La température du MS était de 280°C. Le MS a été utilisé en mode EI à -70 eV. L'identification de chacune des substances à analyser a été assurée par deux ions spécifiques à la substance à analyser avec un rapport de signal déterminé avec des solutions standard. Le ion de quantification correspondait au poids moléculaire respectif ( $m/z = M^+$ ) pour tous les HAP et tous les standards deutérés, tandis que  $[M-2H]^+$ , resp.  $[M-2D]^+$  ont été utilisés pour le ion de qualification. La quantification s'est faite par la méthode du standard interne. Différentes quantités de substances à analyser (7.5-2500 pg/µL) et des quantités constantes de standard interne et de standard de récupération (200 pg/µL) dans du toluol ont servi de solutions de calibration.

**PCB:** Les PCB ont été analysés avec un Agilent GC/MS 6890/5973. 1 µL d'extrait a été injecté sur la colonne. La séparation s'est faite avec un SGE HT-8 (50 m, 0.22 mm ID, 0.25 d'épaisseur de film; Schmidlin AG, CH-6345 Neuheim). 2 m d'une colonne capillaire de silice fondue désactivée (0.53 mm ID, Agilent Technologies AG, CH-4052 Basel) ont servi de précolonne. Le barème de température suivant a été appliqué: 1 min à 90°C, à raison de 20°C/min jusqu'à 200°C, 10 min à 200°C, à raison de 3°C/min jusqu'à 285°C, à raison de 10°C/min jusqu'à 310°C, 20 min à 310°C. La température de l'injecteur a été maintenue de manière constante à 3°C de plus que la température du four selon le principe du suivi du four («oven track»). Un flux constant de 1 mL/min d'hélium a servi d'éluat. La température de la source MS était de 230°C et la température du quadrupole MS de 150°C. Le MS a été utilisé en mode EI à -70 eV. L'identification de chacune des substances à analyser a été assurée par deux ions spécifiques à la substance à analyser avec un rapport de signal déterminé avec des solutions standard. Le ion de quantification correspondait au ion de molécule pour tous les PCB (également ceux marqués au  $^{13}\text{C}_{12}$ ), PCB-52,  $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB-52 et TCN exceptés.  $[M+2]^+$  a été utilisé comme ion de qualification. Pour les PCB-52,  $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB-52 et TCN,  $[M+2]^+$  a

été utilisé comme ion de quantification et  $[M]^+$  comme ion de qualification. La quantification s'est faite par la méthode du standard interne. Différentes quantités de substances à analyser (5-250 pg/ $\mu$ L) et des quantités constantes de standard interne et de standard de récupération (50 pg/ $\mu$ L) dans de l'isooctane ont servi de solutions de calibration.

### **Limites de détection des analyses HAP et PCB.**

Les limites de détection – équivalentes à trois fois la valeur à blanc – se situent entre 0.00004 et 0.0051 mg/kg MS pour 20 g de sol pesé pour les HAP individuels, resp. à 0.015 mg/kg pour les HAP<sub>16</sub> et à 0.0001 mg/kg pour le benzo[*a*]pyrène. Pour les congénères de PCB individuels, la limite de détection se situe entre 0.00004 et 0.0005 mg/kg MS, resp. à 0.002 mg/kg pour les PCB<sub>7</sub>. Au-dessous de la limite de détection analytique, il n'est plus raisonnable de procéder à de quelconques assertions quantitatives.

### **Calcul des sommes et expressions des résultats:**

Les paramètres des sommes HAP<sub>16</sub> et PCB<sub>7</sub> se calculent à partir de la somme des 16, resp. 7 paramètres individuels. Si un paramètre individuel se situe en-dessous de la limite de détection, on utilise la valeur de la limite de détection pour le calcul de la somme.

## 2.6 Evaluation de l'incertitude du système de mesure

Il n'est pas possible d'interpréter et d'apprécier correctement les données mesurées si la quantification et la qualité des mesures ne sont pas adéquates. En matière de mesure, il faut entendre par là l'ensemble des procédés visant à obtenir une valeur mesurée (DIN, 1994), qui comprend donc le prélèvement d'échantillons sur le terrain, la préparation des échantillons et également l'analyse en laboratoire. L'incertitude de mesure du processus dans son entier, en tant qu'appréciation quantitative de la qualité de mesure, est le résultat de l'addition des variances de chaque composante d'incertitude (Ellison et al., 2003a). L'incertitude de mesure peut ensuite être découpée en paramètres de qualité tels que la répétabilité, la reproductibilité, la justesse et la stabilité de mesure. L'illustration 2-3 présente schématiquement les composantes d'incertitude, et également les parts d'incertitude. Il n'est toutefois pas toujours possible de différencier clairement les composantes des parts d'incertitude dans la pratique. Le chapitre 3.1.3 fournit une description et une quantification des paramètres de qualité que sont la répétabilité, la reproductibilité, la justesse et la stabilité de mesure.

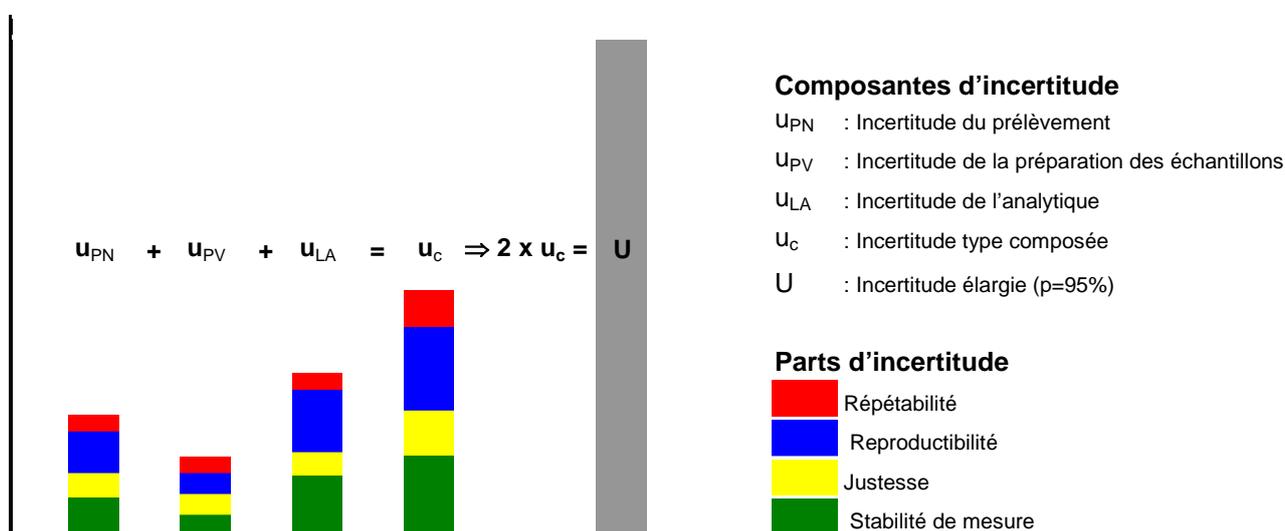


Illustration 2-3: Représentation schématique des composantes et parts d'incertitude

### Quantification de la qualité de mesure (incertitude de mesure élargie $U$ )

On confond souvent à tort l'incertitude de mesure avec la précision d'analyse, exprimée sous forme d'écart type simple des analyses chimiques, ce qui fait qu'elle est donc grossièrement sous-estimée (cf. chap. 3.1.3 paragraphe Répétabilité). Dans le concept appliqué ci-après, on calcule l'incertitude de mesure élargie  $U$ , obtenue en multipliant l'incertitude combinée  $u_c$  avec un facteur d'élargissement  $k$ . Pour un intervalle de confiance d'environ 95 % (distribution normale),  $k$  prend la valeur 2 (Ellison et al., 2003a). De cette manière, la base d'interprétation et de décision obtenue est nettement plus réaliste, même si, de ce fait, l'incertitude de mesure est 2 à 5 fois plus grande que jusqu'alors.

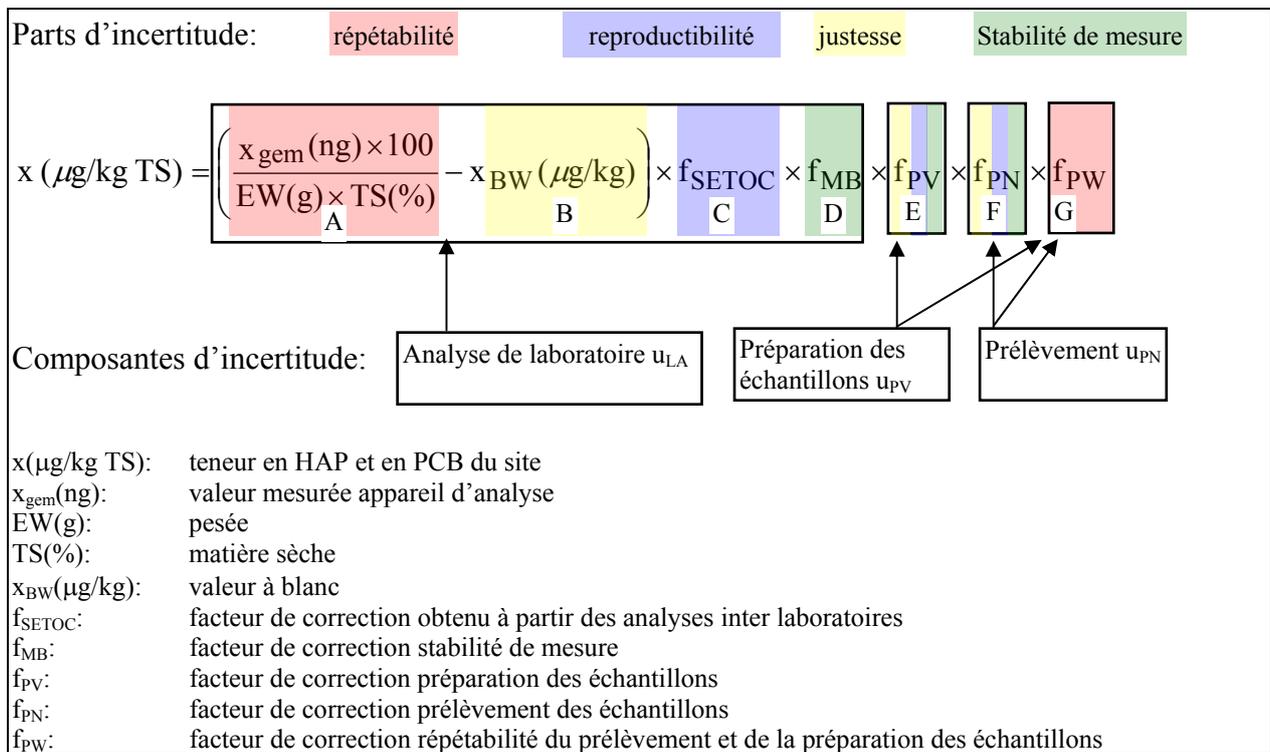
#### Procédure

Dans une première phase, la grandeur de mesure est décrite de manière précise. Pour ce faire, on a habituellement recours à un modèle arithmétique pour l'ensemble du processus de mesure (illustra-

tion 2-4). La deuxième phase consiste à identifier les sources d'incertitude. Pour ce faire, le processus de mesure est découpé en processus partiels ayant chacun ses propres composantes d'incertitude. Pour terminer, chaque composante d'incertitude est quantifiée, ce qui nécessite de définir quantitativement les parts d'incertitude des différents paramètres de qualité, soit de manière expérimentale, soit sur la base de la littérature, ou encore de manière empirique. Les parts d'incertitude seront finalement combinées selon les règles de la loi de propagation des erreurs. Avant de les combiner, on convertira toutes les parts d'incertitude en incertitudes standard, c'est-à-dire en écarts types. Les annexes 3 et 4 fournissent des indications quant à la manière de convertir les parts d'incertitude en incertitude standard et à les combiner selon la loi de la propagation des erreurs.

### Composantes et parts d'incertitude, et modèle arithmétique

La détermination des HAP et des PCB se base sur les composantes d'incertitude que sont le prélèvement d'échantillons, la préparation des échantillons et l'analyse en laboratoire, lesquelles se composent des parts d'incertitude des paramètres qualitatifs tels que la répétabilité, la justesse, la reproductibilité et la stabilité de mesure (illustration 2-3 et illustration 2-4).



**Illustration 2-4: Modèle arithmétique pour l'ensemble du processus de mesure**

Pour le calcul de l'incertitude combinée de l'ensemble du processus de mesure, l'équation peut être résumée et simplifiée de la manière suivante:

$$x(\mu\text{g/kg TS}) = (A - B) \times C \times D \times E \times F \times G$$

Le chapitre 3.1 donne une description détaillée des composantes et des parts d'incertitude, qui, dans la mesure du possible, ont été quantifiées.

## 2.7 Evaluation des teneurs en HAP et en PCB

L'évaluation des teneurs en HAP et en PCB se base essentiellement sur les valeurs seuils légales (tableau 2-7). D'autres bases d'interprétation sont fournies par la littérature (par ex. tableau 2-2, tableau 2-4 et tableau 2-6), l'utilisation du sol, le  $C_{org}$ , l'altitude, les différents composés simples, les proportions entre les marqueurs et, bien sûr, la qualité de l'appareil de mesure.

**Tableau 2-7: Valeurs seuils légales pour les HAP, le benzo[a]pyrène (BaP) et les PCB dans les sols (mg/kg)**

<b>Suisse<sup>1)</sup></b> (OSol, 1998):	<b>HAP<sub>16</sub></b>	<b>BaP</b>	<b>PCB<sub>7</sub></b>
Valeurs indicatives:	1	0.2	(0.02) <sup>2)</sup>
Seuils d'investigation:			
- pour une utilisation permettant un prélèvement de sol direct	10	1	0.1 <sup>3)</sup>
- pour les cultures vivrières	20	--	0.2
- pour les cultures fourragères	--	--	0.2
Valeurs d'assainissement:			
- pour les places de jeux	100	10	1
- pour les jardins privés et familiaux	100	10	1
- pour l'agriculture et l'horticulture	--	--	3
<b>Allemagne<sup>4)</sup></b> (BBodSchV, 1999):	<b>HAP<sub>16</sub></b>	<b>BaP</b>	<b>PCB<sub>6</sub></b>
Valeurs de prévention:			
teneur en humus ≤ 8 %	3	0.3	0.05
teneur en humus > 8 %	10	1	0.1
Seuils d'investigation:			
- places de jeux	--	2	0.4
- zones résidentielles	--	4	0.8
- parcs municipaux et zones de loisirs	--	10	2
- zones artisanales et industrielles	--	12	40
- grandes cultures, jardins potagers	--	1	--
Valeurs d'intervention:	--	--	200 <sup>5)</sup>
<b>Pays-Bas<sup>6)</sup></b> (VROM, 2000):	<b>HAP<sub>10</sub></b>	<b>BaP</b>	<b>PCB<sub>7</sub></b>
Valeurs assignées	1	--	0.02
Valeurs d'assainissement	4	--	1

<sup>1)</sup> en mg/kg MS jusqu'à 15% d'humus et en mg/dm<sup>3</sup> lorsqu'on dépasse 15% d'humus, profondeur de prélèvement 0 – 20 cm

<sup>2)</sup> valeur indicative officielle (OFAG, 2001b)

<sup>3)</sup> profondeur de prélèvement 0-5 cm

<sup>4)</sup> profondeur de prélèvement standard 0-10 cm, excepté 0-30 cm pour les grandes cultures et les cultures maraîchères

<sup>5)</sup> pour les prairies

<sup>6)</sup> concentration moyenne pour au moins 25 m<sup>3</sup>, instructions pour le prélèvement (NEN 5742, 2001), Sol standard (10% matière organique, 25% argile); corrections pour la matière organique (VROM, 2000).

En Suisse, les seuils légaux sont décrits dans les commentaires concernant l'OSol (OFEFP, 2001a) comme suit:

- Les valeurs indicatives sont destinées à prévenir les atteintes et servent de référence pour l'évaluation à long terme de la fertilité des sols. En cas de dépassement des valeurs indicati-

ves, les cantons doivent prendre des mesures, afin d'empêcher la progression des atteintes du sol. Leur objectif est de protéger l'écosystème sol dans son ensemble.

- Les seuils d'investigation servent à désigner le niveau à partir duquel on pourrait se trouver face à une menace pour les humains, les animaux de rente ou les plantes cultivées. En cas de dépassement, les cantons s'engagent à investiguer pour savoir s'il s'agit d'une menace concrète et, le cas échéant, à prendre des mesures.
- Les valeurs d'assainissement visent à écarter un danger et indiquent l'existence d'une menace effective pour les humains, les animaux de rente ou les plantes cultivées. En cas de dépassement, des mesures concrètes doivent être prises sans délai.

En Suisse, aucune valeur indicative n'existe pour les PCB<sub>7</sub>, car toutes les mesures légales visant à en supprimer les sources, à savoir l'interdiction des PCB, ont été prises en 1986 déjà (Osubst, 1986: annexe 3.1 et ORRChim, 2005 Annexe 1.1). Dans un but préventif, on a donc utilisé la valeur assignée établie par les Pays-Bas, soit 0.02 mg/kg (tableau 2-7).

### 3 Résultats et interprétation

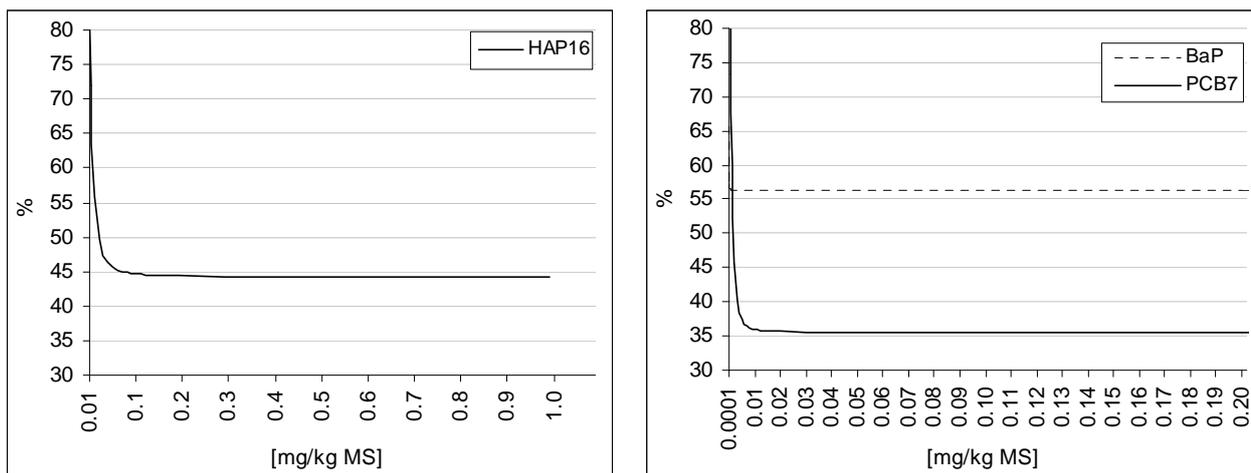
#### 3.1 Incertitude de mesure des teneurs en HAP et en PCB de cette étude

Pour être en mesure d'effectuer des interprétations et de prendre des décisions correctes, il est important de tenir compte des principales limites qui caractérisent la qualité des données. Il convient de savoir si l'on considère l'ensemble de la qualité de mesure, y compris le prélèvement et la préparation des échantillons, ou s'il s'agit uniquement de la qualité des analyses à partir d'échantillons archivés (terre fine < 2 mm, préparée et séchée). On verra ci-après que les possibilités de quantification séparée des parts d'incertitude varient énormément. Si la part d'incertitude de l'analyse en laboratoire est bien connue, des lacunes existent encore en matière de part d'incertitude pour le prélèvement et la préparation des échantillons, à l'exception de la répétabilité. Ainsi, on ne peut procéder qu'à une évaluation globale de la qualité de mesure, et il convient d'en tenir compte dans l'interprétation et l'appréciation des résultats de mesure. De plus, les incertitudes de mesure présentées ci-après ne sont valables que pour les processus de mesure correspondant à ceux de cette étude (chapitre 2.5). L'influence des différentes stratégies de prélèvement d'échantillons (profondeur de prélèvement, taille de la surface, nombre d'échantillons composés, ...) et de la préparation des échantillons ne peut être évaluée que difficilement et de manière peu fiable. Ceci rend très difficile la comparaison entre différentes études. On a toutefois tenté de calculer l'incertitude pour les données issues de différentes études au chapitre 3.1.

##### 3.1.1 Incertitude de mesure élargie (U) de l'ensemble du processus de mesure

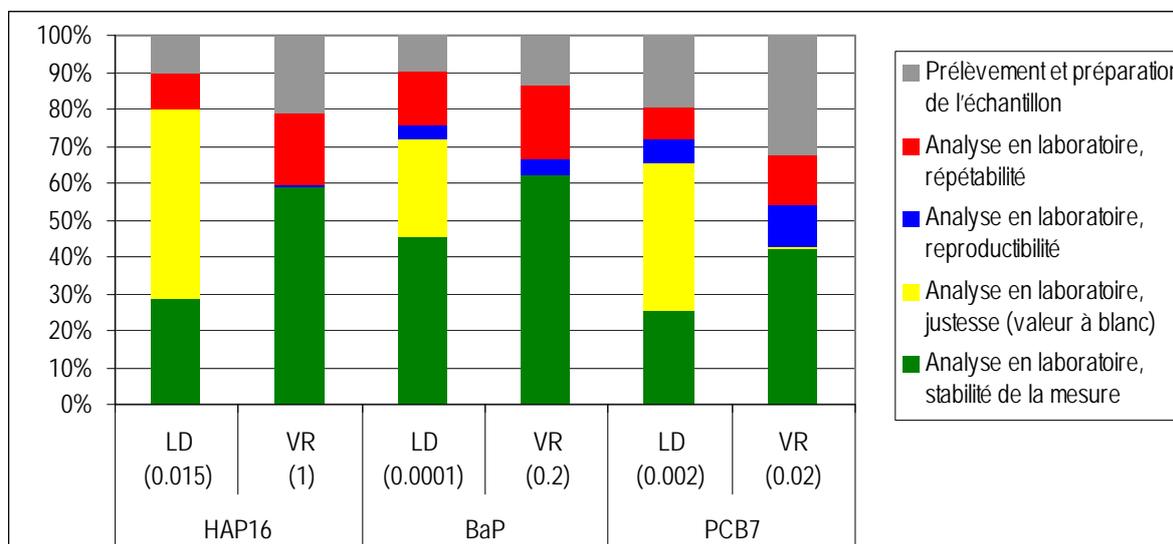
Pour cette étude, l'incertitude de mesure combinée ( $u_c$ ), telle que décrite au chapitre 2.6, a été calculée au moyen du modèle arithmétique (illustration 2-4). En multipliant par le facteur 2, on obtient l'incertitude de mesure élargie (U) avec un intervalle de confiance de 95 %, ce qui permet d'assurer l'interprétation des données.

L'illustration 3-1 fournit l'incertitude de mesure élargie ( $p = 95 \%$ ) pour HAP<sub>16</sub>, PCB<sub>7</sub> et benzo[a]pyrène en fonction de la concentration. Exprimée en pourcent à la limite de détection (LD) (0.015 resp. 0.002 mg/kg MS), elle se monte à 63 % resp. à 46 % pour HAP<sub>16</sub>, resp. PCB<sub>7</sub> et diminue avec l'augmentation de la concentration jusqu'à 44%, resp. 36%. L'incertitude de mesure de benzo[a]pyrène est constante à 56 % lorsqu'on dépasse le domaine de concentration de 0.0005-0.2 mg/kg MS.



**Illustration 3-1: Incertitude de mesure U (p=95%) pour HAP<sub>16</sub>, PCB<sub>7</sub> et BaP en fonction de la concentration.**

L'évaluation de chaque composante et part d'incertitude (chap. 3.1.3) a montré que seule une petite partie de l'incertitude de mesure provient du prélèvement et de la préparation des échantillons. La majeure partie (>70 %) est inhérente aux analyses en laboratoire (illustration 3-2). C'est pour cette raison que, dans l'illustration 3-2, la représentation de l'analyse en laboratoire a été divisée en différentes parts d'incertitude. Pour la détermination des HAP<sub>16</sub>, l'incertitude de mesure est générée par la valeur à blanc jusqu'à une concentration de 0.02 mg/kg, ensuite essentiellement par la stabilité de mesure de l'analyse en laboratoire. Pour le benzo[a]pyrène, la stabilité de mesure est la cause de la plus grande part d'incertitude à tous les niveaux de concentration considérés. Pour la détermination dse PCB<sub>7</sub>, la plus grande part d'incertitude est générée par la valeur à blanc jusqu'à une concentration de 0.003 mg/kg, ensuite elle provient de la stabilité de mesure.



**Illustration 3-2: Éléments contribuant à l'incertitude de mesure à la limite de détection et au niveau des valeurs indicatives pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub>.**

### 3.1.2 Probabilité de dépassement des valeurs indicatives en tenant compte de l'incertitude de mesure élargie

Au moment d'interpréter les concentrations rencontrées dans cette étude, il faut toujours veiller à tenir compte également de l'incertitude de mesure (U). Le tableau 3-1 indique les probabilités de dépassement des valeurs indicatives des HAP<sub>16</sub> et de le BaP en tenant compte de l'incertitude de mesure élargie. Pour les PCB<sub>7</sub>, on a admis une valeur indicative officielle de 0.002 mg/kg. Il apparaît qu'il n'est possible d'interpréter et d'apprécier de manière plus ou moins raisonnable que les seules valeurs des HAP<sub>16</sub> et celles des PCB<sub>7</sub>.

**Tableau 3-1 Probabilité de dépassement des valeurs indicatives des concentrations des HAP<sub>16</sub>, de le BaP et des PCB<sub>7</sub> sur la base de l'incertitude de mesure élargie**

Probabilités de dépassement	Concentrations en [mg/kg]		
	HAP <sub>16</sub> Valeur indicative= 1	BaP Valeur indicative = 0.2	PCB <sub>7</sub> (Valeur indicative non officielle = 0.02)
très probable: env. > 97.5 %	>1.44	>0.312	>0.027
probable: env. 50-97.5 %	1.0-1.44	0.2-0.312	0.02-0.027
possible: env. 2.5-50 %	0.56-1.0	0.088-0.2	0.013-0.02

### 3.1.3 Les paramètres de qualité (parts d'incertitude) et leur part dans les composants d'incertitude en détail

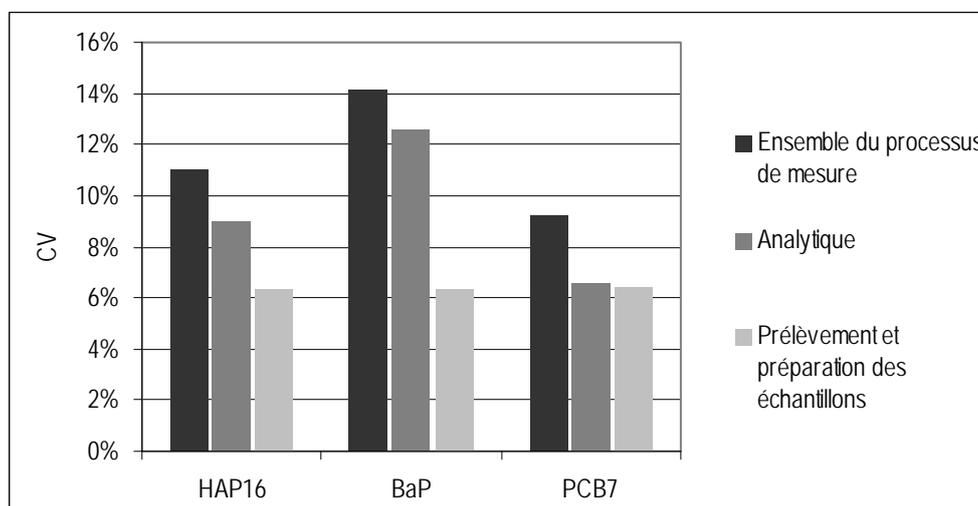
#### La répétabilité

Dans 20 des 105 sites de prélèvement, on a analysé tous les échantillons composés issus de prélèvements répétés à 4 reprises. Le fait que la préparation physique des échantillons et l'analyse chimique se déroulaient en parallèle (simultanément), permet de quantifier la répétabilité de l'ensemble du processus de mesure, ci-après nommée précision de la répétabilité locale. Tous les types d'utilisation du sol y sont représentés, à l'exception des sites viticoles, arboricoles et de protection. La répétabilité des analyses de laboratoire a été quantifiée en tant que précision de la répétabilité des analyses des doubles déterminations de 11 sites (extraction et mesure effectuées chaque fois dans la même série). La précision de la répétabilité du prélèvement et de la préparation des échantillons a été calculée à partir de la variance de la précision de la répétabilité des sites et des analyses.

Pour les HAP<sub>16</sub>, tout comme pour le BaP et les PCB<sub>7</sub>, la part de la précision de la répétabilité des sites relative à l'ensemble de l'incertitude de mesure s'élevait à moins de 20 %. Cela montre clairement que la précision de la répétabilité d'un processus de mesure ne suffit pas pour estimer l'incertitude de mesure.

L'illustration 3-3 présente la précision moyenne de la répétabilité, exprimée en coefficient de variation (CV), ceci pour l'ensemble d'un processus de mesure (précision de la répétabilité locale), pour l'analytique, ainsi pour que le prélèvement et la préparation des échantillons. La précision de la répétabilité locale pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> se monte à 11 %, à 14 % et à 9 %. La répétabilité de l'ensemble du processus de mesure est ainsi assez bonne, bien que les valeurs

moyennes correspondantes pour les métaux lourds se situent généralement en dessous de 6 % (Desales & Dahinden, 2000a). La répétabilité moyenne de la précision des analyses pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> se monte à 9 %, 12,6 % et à 6,5 %. Pour les trois paramètres, la précision moyenne du prélèvement et de la préparation des échantillons se monte à 6,4 %. Cela indique que la division des échantillons à analyser et l'analyse chimique prennent une part non négligeable dans la précision de la répétabilité locale vue dans son ensemble.



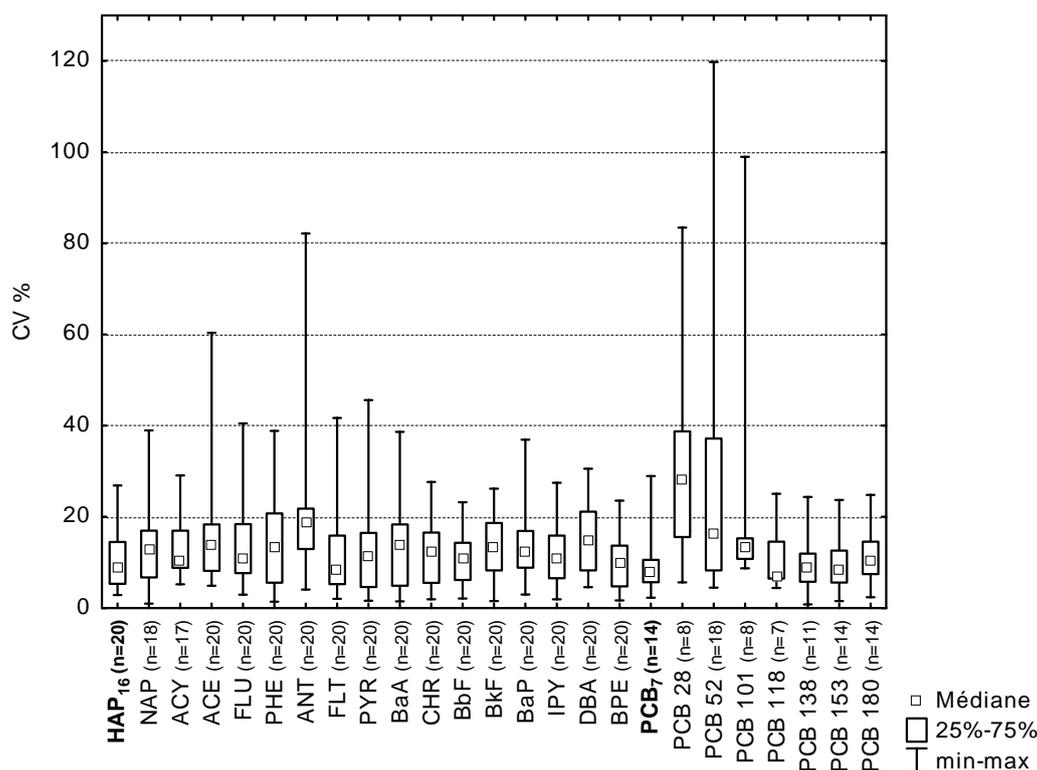
**Illustration 3-3: Répétabilité moyenne de l'ensemble du processus de mesure (précision de la répétabilité locale), de l'analytique, ainsi que du prélèvement et de la préparation des échantillons pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> exprimés en coefficient de variation (CV en %)**

La précision de la répétabilité locale des 20 sites présentée dans l'illustration 3-4 comprend les domaines de concentration suivants: pour les HAP<sub>16</sub> 0.071–8.47 mg/kg (médiane 0.247 mg/kg), pour le BaP 0.004–1.13 mg/kg (médiane 0.017 mg/kg) et pour les PCB<sub>7</sub> 0.001–0.0083 mg/kg (médiane 0.003 mg/kg).

Pour les HAP<sub>16</sub>, l'étendue de la précision de la répétabilité locale, exprimée comme CV, varie entre 3 et 27 %. Pour le BaP, la séparation des «pics» était plus difficile et la précision de la répétabilité locale varie entre 3 et 37 %. Parmi les 16 HAP, le FLT présentait la meilleure précision de la répétabilité locale (médiane 8.4 %) et l'ANT la moins bonne (médiane 18.7 %). Il se pourrait que cela soit dû aux différents niveaux de concentration de FLT (médiane 0.0276 mg/kg) et d'ANT (médiane 0,0012 mg/kg). Aucune influence manifeste de l'utilisation du sol n'a pu être observée.

L'amplitude de la précision de la répétabilité locale pour les PCB<sub>7</sub> variait entre 2 et 29 %. Parmi les 7 congénères PCB, le PCB-118 présentait la meilleure précision de répétabilité locale (médiane 7.1 %) et le PCB-28 la moins bonne (médiane 28.1 %). La raison de cette différence est certainement due à nouveau aux différents niveaux de concentration. Tout comme pour les HAP, aucune influence de l'utilisation du sol n'est apparue.

L'amplitude de la précision de la répétabilité locale est pratiquement identique pour les HAP<sub>16</sub> et pour les PCB<sub>7</sub>, bien que pour les PCB<sub>7</sub>, les concentrations soient d'un ordre de grandeur de deux fois plus basses. Ceci peut être expliqué par le fait qu'on a utilisé uniquement les valeurs dépassant les limites de détection correspondantes.



**Illustration 3-4: Répétabilité de l'ensemble du processus de mesure pour les teneurs en HAP et PCB sur la base de 20 sites comprenant chacun une répétition de 4 échantillons composés, en coefficient de variation (CV %)**

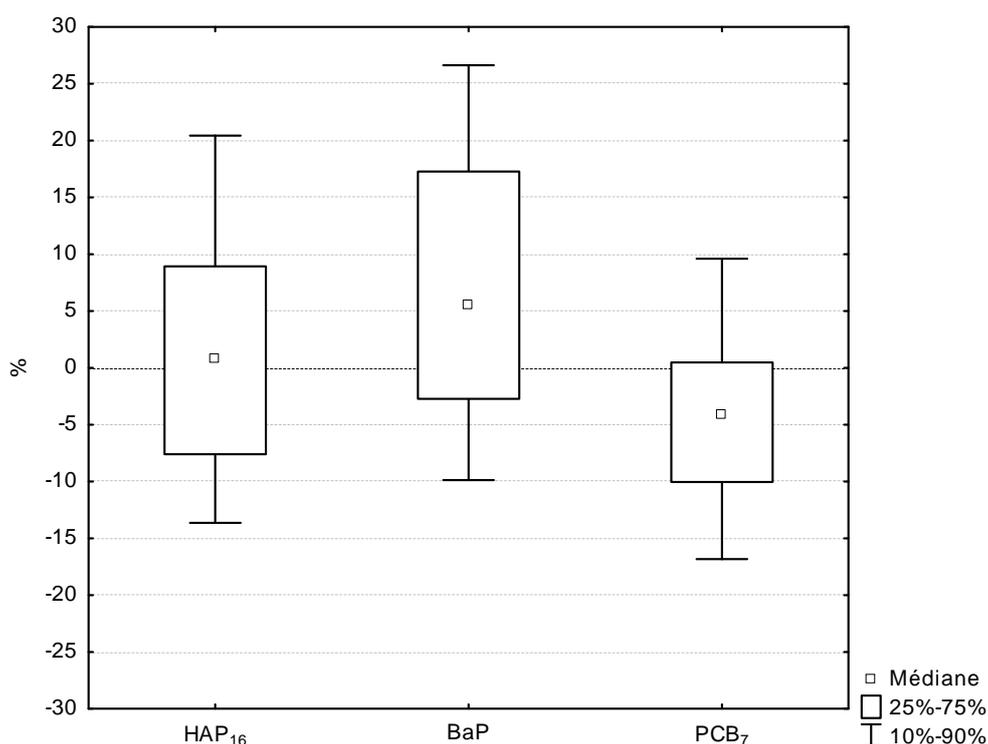
### Reproductibilité

La reproductibilité entre les prélèvements et de la préparation des échantillons ne peut pas être quantifiée à l'aide des données dont on dispose, car, dans le cas du prélèvement et de la préparation des échantillons, il est difficile de séparer la reproductibilité de la justesse et de la stabilité de mesure. Pour un plan de prélèvement d'échantillons identique, avec un prélèvement et une préparation des échantillons identiques et simultanés (carottes par surface, profondeur de prélèvement, température de séchage, concassage des échantillons, etc.), les écarts par rapport à l'ensemble de l'incertitude de mesure sont pourtant faibles, car sinon, la reproductibilité, la stabilité de mesure et la justesse du prélèvement et de la préparation des échantillons, additionnés, conduiraient également à une plus grande part d'incertitude.

L'estimation de la reproductibilité devient très difficile quand on a affaire à des différences en matière de stratégie de prélèvement d'échantillons, ou de prélèvement et de préparation d'échantillons, comme c'est le cas lorsque l'on compare les données de plusieurs études ou de plusieurs pays (Desaules et al., 2008). Une estimation de ce genre a été tentée au chapitre 3.2.

La reproductibilité entre laboratoires est facilement quantifiable grâce à une participation régulière au programme d'analyses interlaboratoires OSol. L'illustration 3-5 représente les écarts systématiques du laboratoire du NABO en % pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> dans le programme

d'analyses interlaboratoires OSol. Seules les données datant de l'époque durant laquelle les analyses de cette étude ont été effectuées furent prises en considération (2003-2006 pour les HAP<sub>16</sub> et le BaP, 2003-2005 pour les PCB<sub>7</sub>). Les valeurs médianes des écarts systématiques s'élevaient à +1 % pour HAP<sub>16</sub>, à +6 % pour le BaP et à -4 % pour les PCB<sub>7</sub>. On constate que les écarts des valeurs d'analyse, malgré la notion d'écart systématique, n'étaient pas de nature systématique, mais seulement tendancielle et que les écarts apparaissaient aussi bien en positif qu'en négatif. Cela est dû à la variabilité de la mesure au fil du temps et sera traité dans le paragraphe stabilité de mesure. Pour les analyses des PCB et du BaP, l'influence de la reproductibilité entre laboratoires sur l'incertitude de mesure a pu être réduite par une correction des valeurs d'analyse avec l'écart systématique moyen.



**Illustration 3-5: Reproductibilité entre laboratoires: écart systématique du laboratoire du NABO en % pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> dans le programme d'analyses interlaboratoires OSol**

### Justesse

Les influences systématiques prises en considération (biais), qui ne sont pas corrigées et donc influencent les résultats de mesures sont: les valeurs à blanc des analyses, les erreurs de profondeur de prélèvement et les pertes d'échantillons lors du prélèvement, ainsi que les pertes sélectives, comme par exemple la poussière lors de la préparation des échantillons.

Ainsi qu'on peut le voir dans l'illustration 3-2, la valeur à blanc des analyses constitue entre 25 et 50 % de l'incertitude de mesure dans le domaine de la limite de détection, et diminue très rapidement avec l'augmentation de la concentration, pour atteindre une part négligeable inférieure à 1 %.

On pourrait améliorer l'incertitude de mesure pour les concentrations avoisinant la limite de détection si l'on procédait à une «correction de la valeur à blanc».

Lors du prélèvement et de la préparation des échantillons, les facteurs suivants conduisent à des écarts en matière de résultats de mesure:

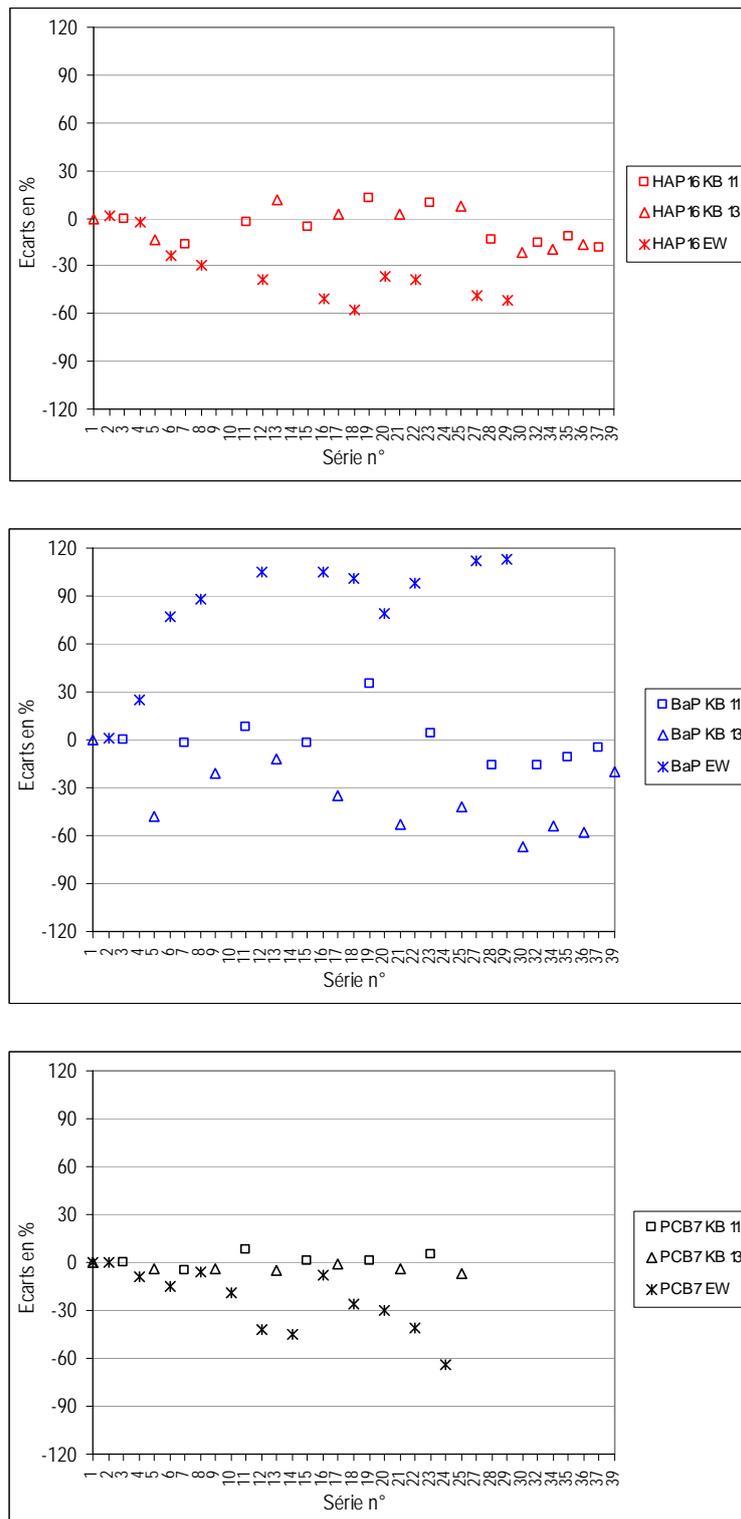
- La combinaison de différentes profondeurs de carotte avec des différences en matière de concentration des horizons lors du prélèvement des échantillons.
- La combinaison des pertes sélectives de certaines fractions (par ex. la poussière) avec leurs différences de concentration lors de la préparation des échantillons.

Dans les deux cas, on a admis un facteur de cinq pour la différence de concentration et 10 % de variation dans la profondeur de prélèvement, respectivement pour les pertes sélectives. Cela correspond à des profondeurs de carotte de 18 à 22 cm, et à des pertes sélectives de 200 g pour 2 kg d'échantillon. L'expérience montre que ces hypothèses correspondent aux «pires des cas». Cumulés avec la reproductibilité et la stabilité de mesure du prélèvement et de la préparation des échantillons, ces effets ne participent toutefois dans l'incertitude de mesure que pour une part maximale de 20 % en ce qui concerne HAP<sub>16</sub> et BaP, respectivement de 30 % dans le cas de PCB<sub>7</sub> (Illustration 3-2).

### Stabilité de mesure

La stabilité de mesure en laboratoire se rapporte à l'ensemble de la période (octobre 2003 jusqu'à août 2005 pour les PCB<sub>7</sub>, respectivement jusqu'à décembre 2006 pour les HAP<sub>16</sub> et le BaP) durant laquelle les analyses de ces études ont été effectuées. La stabilité de mesure en laboratoire exerce une influence considérable sur l'ensemble de l'incertitude de mesure. Dans chaque série d'analyse, un échantillon de l'avant-dernière série a fait une nouvelle fois l'objet d'une extraction et d'une mesure («véritable répétition»). En outre, dans une série sur deux, on a repris deux différents échantillons de contrôle en alternance (KB 11 et KB 13). Le tableau 3-6 illustre l'évolution de ces échantillons sous forme d'écart en % par rapport à la première série. Les valeurs oscillent entre -60 % et 10 % pour HAP<sub>16</sub>, -60 % et 0 % pour PCB<sub>7</sub>, et -70 % et 110 % pour BaP. La stabilité de mesure en laboratoire ainsi représentée comprend également la précision de la répétabilité en laboratoire, laquelle est toutefois beaucoup plus faible, expliquant ainsi seulement une part minimale de l'instabilité de mesure.

L'illustration 3-6 montre que différents échantillons, ayant des matrices et des concentrations différentes, peuvent diverger fortement de plusieurs façons. Pour améliorer la stabilité de mesure des analyses de laboratoire, il faut, lorsque l'on procède à des analyses de nouveaux sols en laboratoire, reprendre des échantillons identiques et stables dans le temps, issus d'anciennes séries, et corriger les résultats sur la base de ces derniers. En procédant de cette manière, on parvient également à neutraliser d'éventuelles influences dues à la matrice et à des domaines de concentration différents.



**Illustration 3-6: Stabilité de mesure des analyses de laboratoire: évolution des deux échantillons de contrôle (KB11 et KB13) ainsi que des véritables échantillons de répétition (EW), représentée sous forme d'écart en % par rapport à la 1ère détermination**

La stabilité de mesure de l'ensemble du processus de mesure n'a pas été étudiée. En revanche, le projet Varitemp (Desaules et al., 2004) contient une étude portant sur la constance des conditions locales (entre autres l'humidité et la densité du sol) et du prélèvement et de la préparation des échantillons pour la détermination des métaux lourds. Dans cette étude, sur six sites choisis,

exploités de différentes façons (cultures, herbages et forêts), les cinq séries chronologiques existantes du NABO, constituées d'intervalles de mesure quinquennaux (3 – 4 points de mesure), ont été complétées par des séries chronologiques Varitemp constituées d'intervalles de mesure semestriels (6 points de mesure). La constance des conditions locales, ainsi que du prélèvement et de la préparation des échantillons, exprimée sous forme de coefficient de variation (CV) se situait en dessous de 10 % et était donc nettement meilleure, comparativement à la stabilité de mesure en laboratoire des analyses de HAP et de PCB.

### 3.2 Reproductibilité des teneurs en HAP et en PCB de différentes études

Si l'on veut comparer entre elles les teneurs en HAP et en PCB de différentes études, l'incertitude augmente considérablement. En plus des écarts dus aux différentes méthodes d'analyse, respectivement de laboratoire, il faut tenir compte spécialement des différences en matière de prélèvement et de préparation des échantillons.

En l'absence de données supplémentaires en matière d'analytique des valeurs de mesure, l'incertitude des analyses peut être estimée à partir des résultats du programme d'analyses interlaboratoires OSol des années 1998 à 2008 (Ammann & Desaulles, 2009). Ceux-ci couvrent une large palette de diverses méthodes d'analyse et concentrations. Pour les concentrations qui ne sont pas couvertes, on peut estimer l'incertitude analytique à l'aide de l'équation de Horwitz, qui permet d'établir des pronostics, et d'apprécier les résultats des analyses interlaboratoires (Horwitz & Albert, 2006).

L'estimation de l'incertitude globale des différents processus de mesure est nettement plus difficile, car la méthode de quantification de l'incertitude du prélèvement et de la préparation physique des échantillons n'est pas encore très avancée et fait souvent défaut (Ramsey & Ellison, 2007). A cela s'ajoute le fait qu'il serait nécessaire de disposer de prélèvements d'échantillons à partir d'essais comparatifs, comme cela a été fait en Suisse, mais uniquement pour les mesures de métaux lourds (Desaulles & Dahinden, 1994; Wagner et al., 2001). L'apport que peut représenter l'incertitude du prélèvement et de la préparation des échantillons peut toutefois, pour des données issues de différentes études, se situer à un niveau plusieurs fois supérieur à celui de l'analyse de laboratoire (Gy, 1998).

Dans une première approche, nous proposons d'estimer l'incertitude des teneurs en HAP et PCB des différentes études à partir de l'incertitude analytique comparée du programme d'analyses interlaboratoires OSol, respectivement de l'équation d'Horwitz et en prenant sommairement en compte les conditions de mesure (comprenant les processus de mesure et les conditions du sol) (tableau 3-2). Dans le cas où les conditions de mesure sont très semblables, c'est-à-dire processus de mesure (stratégie de prélèvement des échantillons semblable, profondeur de prélèvement semblable, préparation du sol semblable, température de séchage identique) et conditions du sol très semblables (type de sol, travail du sol, degré d'humidité et de tassement), l'incertitude analytique sera multipliée par un facteur deux et lorsque les conditions de mesure sont très différentes, par un facteur cinq. Lorsque les conditions de mesure sont variables, on peut aussi multiplier par un facteur trois ou quatre.

Les conditions de mesure peuvent être plus ou moins différentes, spécialement lorsqu'il y a des différences dans la profondeur de prélèvement, mais aussi lors de pertes sélectives d'échantillons dues à des différences en matière d'humidité du sol, et, de manière un peu moins marquée, lorsqu'il y a des différences de température et de durée de séchage au cours de la préparation des échantillons (Desaulles & Dahinden, 2000b).

**Tableau 3-2: Estimation approximative de l'incertitude de mesure relative pour les teneurs en HAP<sub>16</sub>, BaP et PCB<sub>7</sub> à partir de l'incertitude analytique des analyses inter laboratoires OSol**

Matière	Concentrations (cf. tableau 3-3)	Incertitude analytique (AU)	Incertitude de mesure		
			Conditions de mesure très semblables (2 x AU)	Conditions de mesure très différentes (5 x AU)	
	[mg/kg]	(2 CV)			
HAP <sub>16</sub>	Minimum	0.032	±54 % <sup>3)</sup>	±108 %	±270 %
	10ème centile	0.072	±48 % <sup>3)</sup>	±96 %	±240 %
	Médiane	0.163	±42 % <sup>3)</sup>	±84 %	±210 %
	Référence <sup>1)</sup>	1	±26 % <sup>2)</sup>	±52 %	±130 %
	Maximum	8.46	±32 % <sup>2)</sup>	±64 %	±160 %
BaP	Minimum	0.0005	±100 % <sup>3)</sup>	±200 %	±500 %
	10ème centile	0.003	±77 % <sup>3)</sup>	±154 %	±385 %
	Médiane	0.013	±60 % <sup>2)</sup>	±120 %	±300 %
	Référence <sup>1)</sup>	0.2	±55 % <sup>2)</sup>	±110 %	±275 %
	Maximum	1.13	±52 % <sup>2)</sup>	±104 %	±260 %
PCB <sub>7</sub>	Minimum	0.0005	±100 % <sup>3)</sup>	±200 %	±500 %
	10ème centile	0.0008	±94 % <sup>3)</sup>	±188 %	±470 %
	Médiane	0.0016	±84 % <sup>3)</sup>	±168 %	±420 %
	Maximum	0.012	±62 % <sup>3)</sup>	±124 %	±310 %

<sup>1)</sup> (OSol, 1998)

<sup>2)</sup> Valeurs issues du programme d'analyses interlaboratoires OSol (Ammann & Desales, 2009)

<sup>3)</sup> Calculé avec l'équation Horwitz (Horwitz & Albert, 2006)

Comparativement à l'incertitude de mesure bien fondée de cette étude (Chapitre 3.1), les incertitudes de mesure des teneurs issues de diverses études (conditions de mesure différentes), bien que n'étant estimées que sommairement pour l'instant, sont de manière disparate beaucoup plus élevées, mais néanmoins réalistes à première vue, même s'il n'est pas très raisonnable d'interpréter une incertitude de mesure dépassant 100 % en matière de protection des sols. On constate ainsi qu'il est pratiquement impossible de comparer les résultats de différentes études, particulièrement lorsque leurs conditions de mesure étaient très différentes (Desales et al., 2008).

### 3.3 Teneurs en HAP et en PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm)

L'annexe 1 donne un aperçu des données du site, des paramètres du sol, ainsi que des teneurs en HAP<sub>16</sub> et PCB<sub>7</sub> de cette étude et des études antérieures (Berset & Holzer, 1995; Bucheli et al., 2004; Schmid et al., 2005). L'annexe 2 présente, de manière détaillée, les données du site et de la couche superficielle du sol des 105 sites NABO de cette étude. L'annexe 1 montre clairement que les valeurs de mesure antérieures, prélevées à d'autres profondeurs (0 – 10 cm), obtenues avec une autre méthode d'extraction (saponification par KOH) et provenant d'un autre laboratoire (Liebefeld) sont pratiquement impossibles à comparer entre elles, pas plus qu'elle ne peuvent être comparées avec celles de cette étude.

#### Aperçu sommaire et comparaisons

Le tableau 3-3 donne un aperçu sommaire et une comparaison des teneurs en HAP et PCB (0 – 20 cm) provenant de la troisième enquête du réseau de référence NABO de 1995/99, ainsi que les données suisses dont on dispose pour la période 1990 – 1996 (Keller & Desaulles, 2001).

**Tableau 3-3: Aperçu et comparaison des teneurs en HAP<sub>16</sub>, BaP et PCB<sub>7</sub> ainsi que des valeurs seuils dépassées dans les sols (0-20 cm) de Suisse**

Source de données	échant. (n)	min. (mg/kg)	10ème centile (mg/kg)	médiane (mg/kg)	moyenne (mg/kg)	90ème centile. (mg/kg)	max. (mg/kg)	>valeur seuil <sup>3</sup> (n)	(%)
<b>HAP<sub>16</sub></b> (valeur indicative = 1 mg/kg)									
Réseau NABO <sup>1)</sup>	101	0.032	0.072	0.163	0.338	0.486	<b>8.46</b>	3	3
Suisse <sup>2)</sup>	542	0.013	0.098	0.500	<b>2.59</b>	<b>7.23</b>	<b>90.56</b>	193	35
<b>Benzo[a]pyrène</b> (valeur indicative = 0.2 mg/kg)									
Réseau NABO <sup>1)</sup>	101	0.0005	0.003	0.013	0.032	0.050	<b>1.13</b>	2	2
Suisse <sup>2)</sup>	583	0.0006	0.007	0.035	<b>0.235</b>	<b>0.66</b>	<b>9.42</b>	128	22
<b>PCB<sub>7</sub></b> (valeur assignée Pays-Bas = 0.02 mg/kg)									
Réseau NABO <sup>1)</sup>	105	0.0005	0.0008	0.0016	0.002	0.004	0.012	0	0
Suisse <sup>2)</sup>	357	0.0001	0.0009	0.004	0.016	<b>0.021</b>	<b>0.602</b>	35	10

<sup>1)</sup> Données de la troisième enquête 1995-1999

<sup>2)</sup> Données disponibles de différentes sources durant la période 1990-1996 (Keller & Desaulles, 2001)

<sup>3)</sup> Valeurs indicatives pour les HAP<sub>16</sub> = 1 mg/kg et Benzo[a]pyrène = 0.2 mg/kg ainsi que la valeur assignée pour les Pays-Bas pour PCB<sub>7</sub> = 0.02 mg/kg (cf. Tableau 2-7).

Alors que le réseau de référence NABO est censé répertorier la contamination «normale» des sols en Suisse (OFEFP, 2001a), la majeure partie des très nombreuses valeurs de mesure suisses provient des études de contamination cantonales (Keller & Desaulles, 2001). On peut donc comprendre que toutes les valeurs du réseau de référence NABO présentées dans le tableau 3-3 soient

plus basses et que seuls de très rares seuils de prévention soient dépassés ( $HAP_{16} = 3 \%$ , Benzo[a]pyrène = 2 % et  $PCB_7 = 0 \%$ ). Les deux sites considérés comme contaminés en tenant compte de l'incertitude de mesure (tableau 3 – 1), ainsi que le site considéré comme probablement contaminé, sont présentés dans le tableau 3 – 4.

**Tableau 3-4: Sites du NABO avec dépassement des seuils de prévention**

Site	Altitude (m)	Utilisation du sol	Condition d'immission	HAP <sub>16</sub> (mg/kg)	BaP (mg/kg)	PCB <sub>7</sub> (mg/kg)
31 Coffrane NE	775	Grandes cultures	rurale, installation de recyclage de goudron à 1.5 km	<b>2.690</b>	<b>0.285</b>	0.001
55 Nyon VD	440	Viticulture	semi-rurale	<b>(1.034)<sup>1)</sup></b>	0.094	0.001
97 Lugano TI	273	Parc municipal	citadine	<b>8.465</b>	<b>1.129</b>	0.004

(Valeur indicative HAP<sub>16</sub> = 1 mg/kg et BaP = 0.2 mg/kg; Valeur assignée PCB<sub>7</sub> = 0.02 mg/kg)

<sup>1)</sup> Valeur indicative tenant compte d'une incertitude de mesure élargie de 44 % (Tableau 3-1) se recoupant avec une probabilité inférieure à 95 %.

On n'observe un dépassement des seuils de prévention que pour les HAP<sub>16</sub> et pour le BaP, mais pas pour les PCB<sub>7</sub>. De ce point de vue, on peut considérer qu'une contamination par PCB<sub>7</sub> ne représente aucun risque, hormis dans des situations locales spécifiques (par ex. déchets toxiques). Le niveau de contamination des sols en HAP et surtout en PCB dans le réseau de référence NABO peut donc être décrit comme généralement bas.

Au vu des 33 sites de grandes cultures examinés, la contamination du site de grandes cultures (31) doit être considérée comme une exception. Nous n'avons pas élucidé si l'installation de recyclage de goudron pouvait jouer un rôle dans la contamination. L'importance des contaminations dans le site viticole (55) et dans le parc municipal (97) ne peut pas être catégorisée sur la base du réseau NABO uniquement, car celui-ci ne comprend jusqu'à maintenant que quatre, respectivement deux sites correspondants. Un coup d'œil sur les autres valeurs d'analyses suisses disponibles (Keller & Desales, 2001) montre qu'il est fréquent de rencontrer des contaminations de cet ordre de grandeur dans des situations locales analogues.

Les valeurs mesurées en Suisse, tirées de différentes sources (Keller & Desales, 2001), doivent toutefois être interprétées avec circonspection, car on ne dispose que depuis 1998 de données sur la reproductibilité analytique en matière de polluants organiques conformément à l'OSol (OSol, 1998) (Desales & Dahinden, 1999). Auparavant, la règle voulait que, dans plus de 50 % des cas, l'incertitude des analyses corresponde à l'écart standard relatif multiplié par deux. La situation actuelle est documentée dans le tableau 3-2. L'annexe 1 explique avec quelle sensibilité la reproductibilité peut réagir en rapport avec des différences d'échantillons, de méthode et de laboratoire sur un même site déjà. Ceci est approfondi dans Desales et al., (2008). Pour cette raison, la comparaison avec les teneurs d'autres études (par ex. tableau 2.2 et tableau 2-4) est problématique, comme il en ressort également du tableau 3-2.

### **Aperçu géographique**

Les données des représentations géographiques des teneurs (illustration 3-7, illustration 3-8 et illustration 3-9) montrent que les HAP<sub>16</sub>, le BaP et surtout les PCB<sub>7</sub> se trouvent d'une manière générale nettement en dessous des valeurs indicatives de prévention et des valeurs assignées de prévention. Les sites figurant déjà dans le tableau 3-4 n'en font pas partie. Si l'on se rapporte aux valeurs indicatives correspondantes, les teneurs en BaP se situent toutes en dessous de celles de HAP<sub>16</sub>. Ainsi, dans le réseau de référence NABO, BaP est un indicateur de contamination moins sensible que HAP<sub>16</sub>. De même, BaP ne se met pas plus nettement en évidence comme indicateur pour les endroits situés en zone urbaine et denses en trafic (Annexe 2), comme mentionné dans la littérature par exemple Chung et al., 2007; Jensen et al. 2007; Wilcke, 2007. Sur le Plateau, on a tendance à rencontrer des teneurs un peu plus élevées. Les Préalpes, en revanche, n'apparaissent pas comme de vastes zones d'accumulation, comme il a été constaté dans le projet UE MONARPOP ([www.monarpop.at](http://www.monarpop.at)). Il faudra tester ci-après si une stratification en fonction de l'utilisation du sol permet une interprétation plus poussée des teneurs.

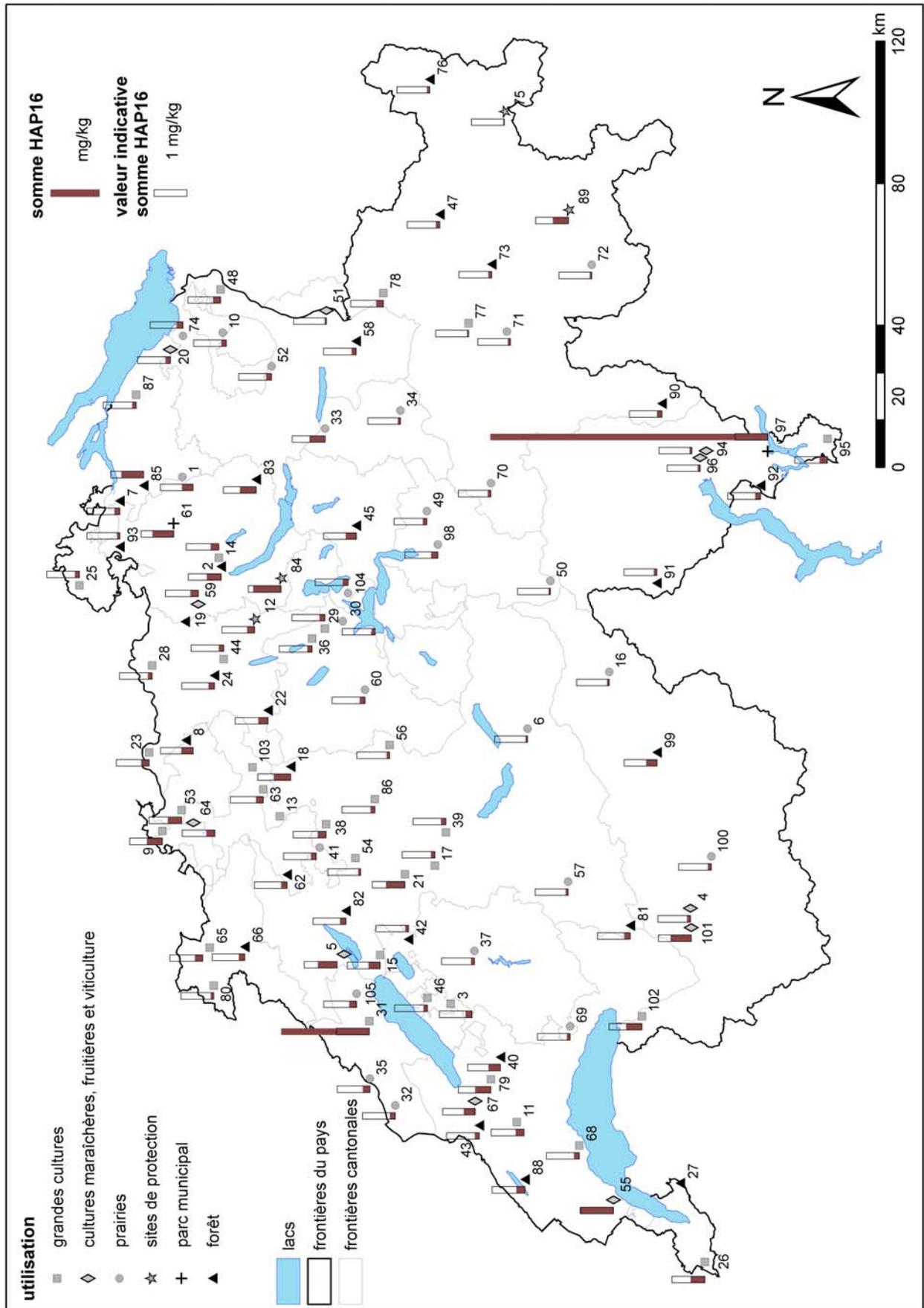


Illustration 3-7: Carte synoptique des teneurs en HAP<sub>16-</sub> (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO

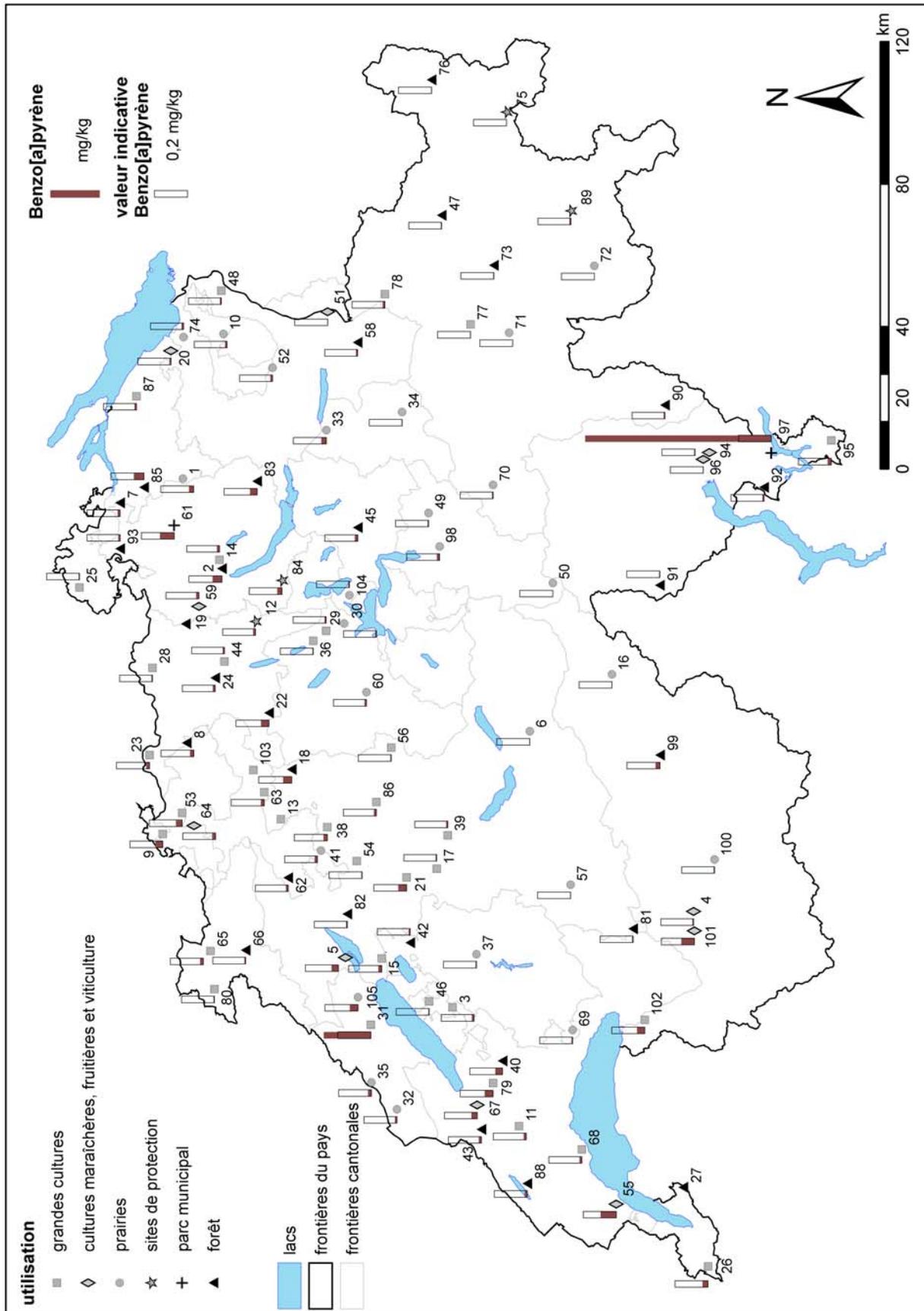


Illustration 3-8: Carte synoptique des teneurs en BaP (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO

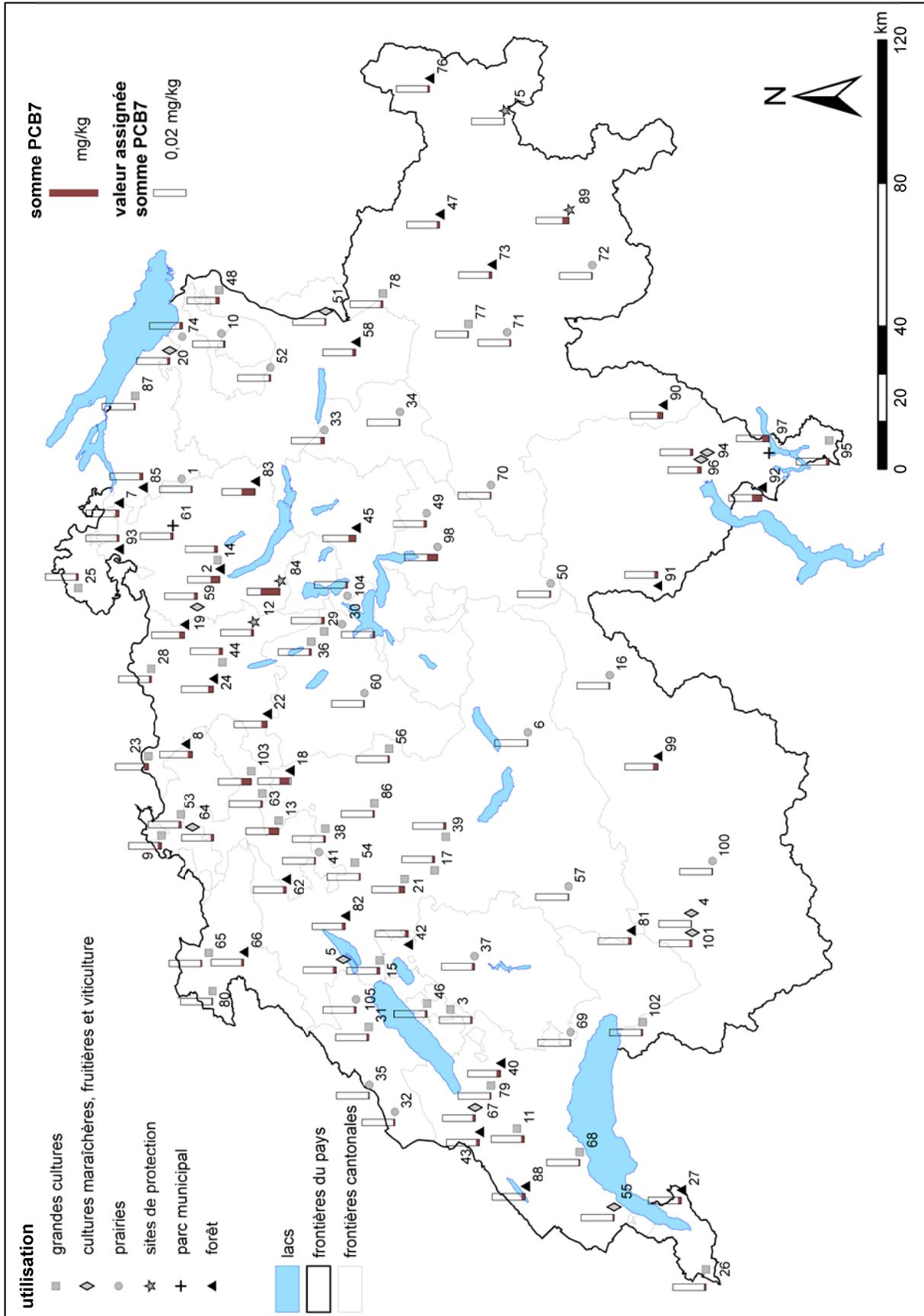


Illustration 3-9: Carte synoptique avec les teneurs en PCB<sub>7</sub> (0-20 cm) dans le réseau de référence NABO

**Teneurs selon l'utilisation du sol**

Le tableau 3-5 donne un aperçu global des teneurs regroupées selon l'utilisation du sol. A l'exception des quatre sites de viticulture et, bien entendu, des deux parcs municipaux, les valeurs analysées sont réparties de manière générale selon une distribution asymétrique vers la droite (médiane < valeur moyenne). Rares sont les sites très contaminés qui influencent la valeur moyenne plus fortement que la médiane. Pour les valeurs des PCB, généralement basses, ceci apparaît moins nettement aux environs de la limite de détection.

**Tableau 3-5: Aperçu des teneurs en HAP<sub>16</sub>, Benzo[a]pyrène et PCB<sub>7</sub>, en fonction de l'utilisation du sol en mg/kg (valeurs en gras > valeurs indicatives)**

Utilisation du sol	n	min.	10 <sup>ème</sup> cent.	25 <sup>ème</sup> cent.	médiane	moyenne	75 <sup>ème</sup> cent.	90 <sup>ème</sup> cent.	max.
<b>HAP<sub>16</sub> (Valeur indicative = 1 mg/kg)</b>									
Prairies extensives	17	0.054	0.062	0.072	0.106	0.115	0.157	0.195	0.225
Prairies intensives	8	0.096	0.096	0.098	0.172	0.208	0.279	0.467	0.467
Grandes cultures	33	0.038	0.089	0.134	0.219	0.305	0.250	0.479	<b>2.690</b>
Viticulture	4	0.068	0.068	0.325	0.606	0.578	0.832	<b>1.034</b>	<b>1.034</b>
Cult. maraîchères	4	0.049	0.049	0.060	0.154	0.177	0.293	0.350	0.350
Arboriculture	3	0.111	0.111	0.111	0.149	0.174	0.264	0.264	0.264
Parcs municipaux	2	0.646			<b>4.555</b>	<b>4.555</b>			<b>8.465</b>
Sites de protection	4	0.032	0.032	0.131	0.351	0.396	0.662	0.853	0.853
Forêt de conifères	16	0.079	0.092	0.128	0.221	0.250	0.345	0.486	0.505
Forêt de feuillus	10	0.084	0.094	0.138	0.176	0.223	0.181	0.516	0.675
Tous les sites	101	0.032	0.072	0.110	0.163	0.338	0.316	0.486	<b>8.465</b>
<b>Benzo[a]pyrène (Valeur indicative = 0.2 mg/kg)</b>									
Prairies extensives	17	0.001	0.001	0.002	0.006	0.009	0.013	0.017	0.050
Prairies intensives	8	0.005	0.005	0.007	0.012	0.015	0.024	0.029	0.029
Grandes cultures	33	0.002	0.004	0.007	0.014	0.026	0.022	0.046	0.285
Viticulture	4	0.003	0.003	0.022	0.060	0.054	0.087	0.094	0.094
Cult. maraîchères	4	0.002	0.002	0.003	0.011	0.014	0.026	0.035	0.035
Arboriculture	3	0.007	0.007	0.007	0.008	0.012	0.021	0.021	0.021
Parcs municipaux	2	0.087	0.087	0.087	<b>0.608</b>	<b>0.608</b>	<b>1.129</b>	<b>1.129</b>	<b>1.129</b>
Sites de protection	4	0.001	0.001	0.005	0.012	0.013	0.022	0.029	0.029
Forêt de conifères	16	0.002	0.003	0.005	0.015	0.022	0.043	0.052	0.056
Forêt de feuillus	10	0.007	0.007	0.008	0.012	0.017	0.015	0.042	0.061
Tous les sites	101	0.001	0.003	0.006	0.013	0.032	0.022	0.050	<b>1.129</b>

<sup>1)</sup> voir Tableau 2-7

Tableau 3-5: Suite

Utilisation du sol	n	min.	10 <sup>ème</sup> cent.	25 <sup>ème</sup> cent.	médiane	moyenne	75 <sup>ème</sup> cent.	90 <sup>ème</sup> cent.	max.
PCB <sub>7</sub> (Valeur assignée Pays-Bas <sup>1)</sup> = 0.02 mg/kg)									
Prairies extensives	17	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.006
Prairies intensives	8	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
Grandes cultures	35	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.006
Viticulture	4	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cult. maraîchères	4	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Arboriculture	3	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002
Parcs municipaux	2	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
Sites de protection	4	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.008	0.012	0.012
Forêt de conifères	16	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008
Forêt de feuillus	12	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.006
Tous les sites	105	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.012

<sup>1)</sup> voir Tableau 2-7

Pour les HAP, les médianes des types d'utilisation du sol les plus répandus dépassent la teneur médiane de tous les sites dans l'ordre décroissant suivant: forêt de conifères > grandes cultures > forêt de feuillus > prairies intensives. Pour le BaP, on trouve forêt de conifères > grandes cultures et pour les PCB, forêt de feuillus > forêt de conifères.

Le regroupement des teneurs selon l'utilisation du sol (illustration 3-10) montre que les différences à l'intérieur des groupes sont en général plus grandes qu'entre les groupes. Cela laisse supposer que les différences proviennent en majeure partie des dépôts atmosphériques.

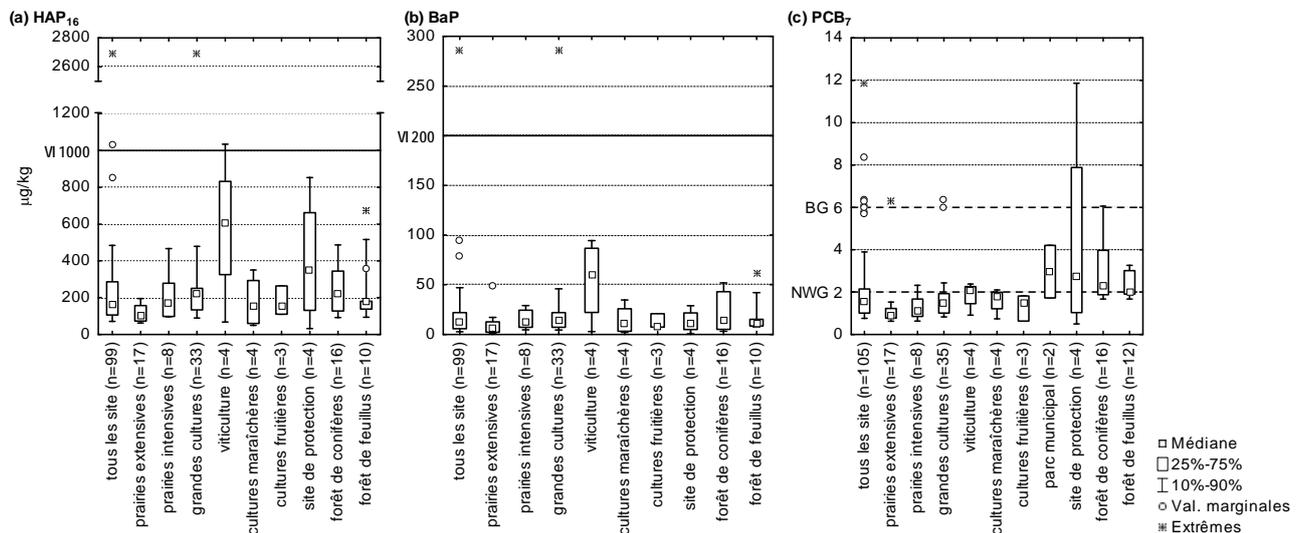
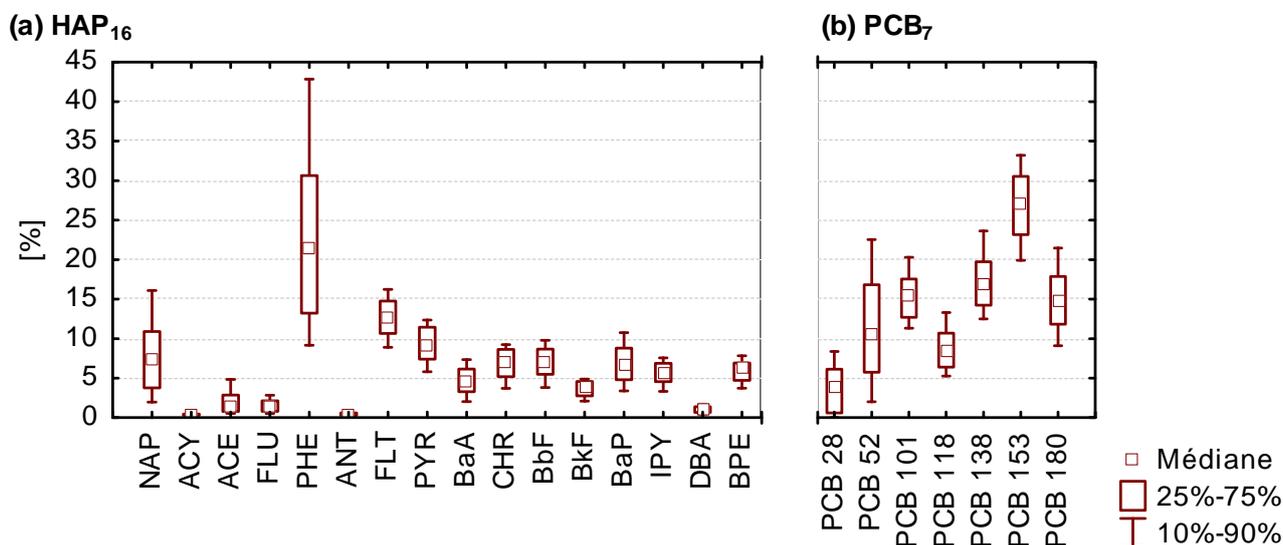


Illustration 3-10: Teneurs en HAP et en PCB des sites du NABO (0-20 cm) exprimées en µg/kg et groupées en fonction de l'utilisation du sol (VI: valeur indicative, BG: limite de détermination, NWG: limite de détection)

### 3.4 Profils des composés HAP et PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm)

L'illustration 3-11 montre de manière condensée la part en pourcents que représente chaque composé HAP et PCB pour les sites NABO. Dans le tableau 3-6, les séquences sont regroupées selon la fréquence des composés dominants en fonction de l'utilisation du sol.



**Illustration 3-11:** Résumé des parts relatives des composés simples HAP et PCB dans la couche superficielle du sol (0-20 cm) de tous les sites

**Tableau 3-6:** Comparaison de la séquence et de la fréquence des composés HAP et PCB dominants d'après l'utilisation du sol

Utilisation du sol	Site	Fréquence et séquence
<b>Composés HAP</b>		
Prairies extensives	17	PHE 30%>>FLT,NAP 11%>PYR 8%
Prairies intensives	8	PHE 20%>>FLT 12%>PYR 9%>NAP 8%
Grandes cultures	33	PHE 22%>>FLT 14%>PYR 10%>CHR 7%
Viticulture	4	PHE 17%>FLT 15%>PYR 12%>BaP 9%
Cult. maraîchères	4	PHE 19%>FLT 13%>PYR 10%>NAP 9%
Arboriculture	3	PHE 22%>>FLT 13%>PYR 9%>NAP,BbF 8%
Parcs municipaux	2	BaP 15%>FLT 14%>PYR 12%>BbF 10%
Sites de protection	4	PHE 37%>>NAP 12%>FLT 10%>PYR 7%
Forêt de conifères	16	PHE 23%>>FLT 13%>PYR 9%>BbF 8%
Forêt de feuillus	10	PHE 19%>FLT 13%>PYR 10%>NAP 8%
<b>Composés PCB</b>		
Prairies extensives	17	153 (25%)>101 (17%)>180,52,138 (15%)
Prairies intensives	8	153 (29%)>138 (19%)>180 (15%)
Grandes cultures	35	153 (25%)>101,138 (16%)>52 (15%)
Viticulture	4	153 (26%)>180 (17%)>138 (16%)
Cult. maraîchères	4	153 (27%)>138 (19%)>101 (15%)
Arboriculture	3	153 (30%)>138 (18%)> 180 (17%)
Parcs municipaux	2	153 (31%)>138 (23%)>180 (18%)
Sites de protection	4	153 (25%)>101 (22%)>138 (17%)
Forêt de conifères	16	153 (25%)>138 (16%)>180 (18%)
Forêt de feuillus	12	153 (28%)>138 (22%)>180 (19%)

## Les Composés HAP

Avec 3 anneaux benzoliques, le PHE est le composé le plus fréquent, mais il présente également la plus grande dispersion (illustration 3-11). Après PHE, viennent FLT et PYR, avec chacun 4 anneaux. La part, tant physique que chimique, de l'ANT intermédiaire (3 anneaux) est nettement plus faible (illustration 3-11), car il est formé en beaucoup plus petites quantités par la plupart des sources d'émission (voir tableau 3-8). La stratification selon l'utilisation du sol ne montre aucune différence essentielle, hormis dans les rares parcs municipaux et sites de protection de l'étude (voir tableau 3-6). Ainsi qu'il en ressort de nombreuses études (par ex.: Chung et al., 2007; Jensen et al., 2007; Wilcke, 2007), les composés HAP les plus légers, avec 2-3 anneaux, dominent dans les sites situés en périphérie, contrairement aux composés lourds avec 4-5 anneaux dans les sites urbains. Dans le réseau de référence NABO, ce fractionnement ne peut pratiquement pas être constaté, ou alors de manière tout au plus partielle (Annexe 2). Ainsi, le rôle de BaP comme indicateur ne paraît pas très fiable. La large dominance de PHE, FLT et PYR (illustration 3-11) indiquerait plutôt une situation d'immissions mixtes actives à travers tout le pays. Dans la littérature, FLT occupe aussi souvent le premier rang (Desaules et al., 2008). Etant donné que PHE, FLT et PYR présentent un facteur d'équivalence toxique (TEF) relativement faible à 0.001 (Chap. 2.1), la toxicité du profil HAP prédominant est également relativement faible.

## Les composés PCB

Les congénères de PCB dominants sont: PCB-153 > PCB-138 > PCB-101, PCB-180 (illustration 3-11). On ne sait pas si la dominance de ces congénères est le résultat des quantités produites ou de la persistance. Lorsque l'on effectue une stratification en fonction de l'utilisation du sol (tableau 3-6), la première place revient de manière incontestable au PCB-153, alors que le PCB-138, le PCB-101 et PCB-180 se partagent le deuxième rang. Dans la littérature, la dominance de PCB-153 n'est pas fréquente (Desaules et al., 2008). Seul un site de prairie (Annexe 2: site n° 98) avec une part importante de PCB-180 (56 %) présente un profil unique et exceptionnel, qui est déjà mentionné dans une autre étude (Schmid et al., 2005). Cela indique une source spécifique de PCB. Dans les environs, outre les sources d'émissions semi rurales habituelles, se trouve une fabrique de câbles et de munitions. Il n'y a toutefois aucune indication directe permettant l'attribution d'une source.

### 3.5 Corrélations avec les HAP et les PCB

En matière de protection pratique des sols, on ne peut prendre en compte que les corrélations fortes ( $r > 0.8$ ), avec un haut degré de signification ( $p < 0.05$ ), robustes, fiables et surtout pertinentes. Plus le nombre de valeurs mesurées est grand, plus celles-ci sont réparties de manière proche et régulière le long d'une droite de régression ayant une pente proche de 1, et plus les corrélations sont fortes, avec un haut degré de signification, robustes et fiables (tableau 3-7 et illustration 3-12).

**Tableau 3-7: Corrélations des HAP<sub>16</sub> et PCB<sub>7</sub> avec les différentes propriétés des sols et des sites dans le réseau NABO**

Etude	Utilisation du sol	Corrélation y / x	Coefficient de corrélation <sup>1</sup>	Pente (b)	n	Diagramme de dispersion
<b>HAP</b>						
Etude NABO en question	Toutes	HAP <sub>16</sub> / BaP	$r = 0.88^{**}$	8.5	99	Fig. 3-12a
		HAP <sub>16</sub> / Hg	$r = 0.44^{**}$	1225	97	Fig. 3-12b
		HAP <sub>16</sub> / C <sub>org</sub>	$r = -0.03$	-1.7	94	Fig. 3-12c
		HAP <sub>16</sub> / altitude	$r = -0.31^{**}$	-0.11	99	Fig. 3-12d
	Prairies extensives	HAP <sub>16</sub> / Hg	$r = 0.39$	281	16	Fig. 3-12b
		HAP <sub>16</sub> / Pb	$r = 0.55^*$	1.7	16	Fig. 3-12e
		HAP <sub>16</sub> / altitude	$r = -0.62^{**}$	-0.06	17	Fig. 3-12d
	Prairies intensives	HAP <sub>16</sub> / Hg	$r = 0.71^*$	5400	8	Fig. 3-12b
		HAP <sub>16</sub> / Pb	$r = 0.78^*$	8.9	8	Fig. 3-12e
	Viticulture	HAP <sub>16</sub> / C <sub>org</sub>	$r = -0.95^*$	-322	4	Fig. 3-12c
	Sites de protection	HAP <sub>16</sub> / Hg	$r = 1.00^{**}$	2717	4	Fig. 3-12b
		HAP <sub>16</sub> / C <sub>org</sub>	$r = 0.91$	15.4	4	Fig. 3-12c
	Forêt de conifères	HAP <sub>16</sub> / Hg	$r = 0.53^*$	1142	15	Fig. 3-12b
		HAP <sub>16</sub> / altitude	$r = -0.68^{**}$	-0.25	16	Fig. 3-12d
Sites NABO choisis (Bucheli et al., 2004)	Toutes	NAP / C <sub>org</sub>	$r = 0.77^{**}$	0.11	23	non
	Forêt	NAP / C <sub>org</sub>	$r = 0.90^{**}$	0.15	11	non
	Forêt	ACE / C <sub>org</sub>	$r = 0.75^*$	0.01	10	non
	Forêt	FLU / C <sub>org</sub>	$r = 0.95^{**}$	0.01	10	non
	Forêt	NAP / suie	$r = 0.80^{**}$	16.74	10	non
	Forêt	FLU / suie	$r = 0.75^*$	1.75	10	non
<b>PCB</b>						
Etude NABO en question	Toutes	PCB <sub>7</sub> / C <sub>org</sub>	$r = 0.51^{**}$	0.14	102	Fig. 3-12f
		PCB <sub>7</sub> / altitude	$r = -0.15$	-	105	Fig. 3-12g
		PCB <sub>7</sub> / HAP <sub>16</sub>	$r = 0.46^{**}$	0.001	99	Fig. 3-12h
	Sites de protection	PCB <sub>7</sub> / Hg	$r = 0.98^*$	38	4	Fig. 3-12i
		PCB <sub>7</sub> / HAP <sub>16</sub>	$r = 0.97^*$	0.01	4	Fig. 3-12h
	Forêt de conifères	PCB <sub>7</sub> / HAP <sub>16</sub>	$r = 0.85^{**}$	0.01	16	Fig. 3-12h
Sites NABO choisis (Schmid et al., 2005)	Toutes	PCB <sub>7</sub> / PCDD/F	$r = 0.85$	0.017	23	Oui

<sup>1)</sup> r Pearson; R Spearman; \* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$

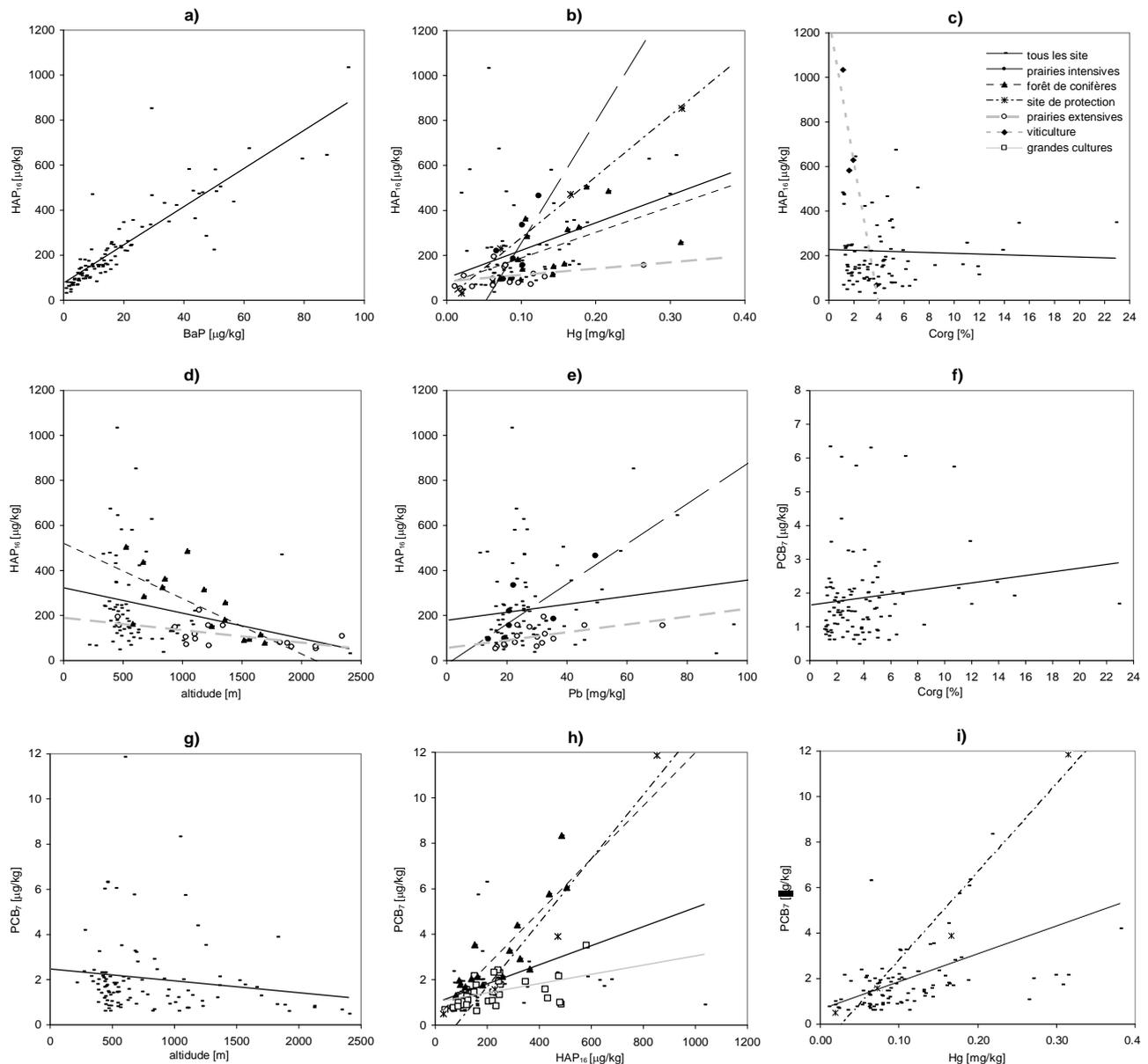
Bien que de nombreuses composés présentent une corrélation forte et significative entre elles (par ex.: Chung et al., 2007; Heywood et al., 2006), celles-ci n'ont que peu d'importance en tant qu'indicateur de contamination pour la protection pratique des sols. En revanche, les corrélations des HAP<sub>16</sub> et des PCB<sub>7</sub> avec la substance indicatrice BaP, avec les propriétés du sol en matière de carbone organique et de métaux lourds, ainsi qu'avec les propriétés du site en matière d'utilisation du sol, d'altitude et de latitude géographique sont pertinentes, ainsi qu'il ressort d'un condensé de

littérature (Desaules et al., 2008). L'utilisation du sol est de loin l'indicateur de contamination auquel on recourt le plus souvent et il est utilisé comme critère de stratification dans le tableau 3-7. Elle est néanmoins rarement assez sélective, comme le montre l'illustration 3-10. Pour un pays montagneux comme la Suisse, avec des sites NABO situés entre 209 m et 2'400 m d'altitude, il semble que cette dernière soit particulièrement indiquée comme facteur de corrélation. D'une part, lorsque l'altitude augmente, l'utilisation du sol devient plus extensive, la densité de la population diminue et, avec elle, l'intensité des émissions. D'autre part, les dépôts augmentent à cause de l'accroissement des précipitations, du volume d'air et de la condensation liés à l'abaissement des températures. Pour ces raisons, les régions de montagnes s'avèrent être des zones de concentration pour les polluants organiques transportés au loin (Daly & Wania, 2005; Weiss, 1998), comme l'a également étudié de manière plus détaillée le projet de l'UE MONARPOP ([www.monarpop.at](http://www.monarpop.at)) pour la région alpine. Les analyses de corrélation sélectionnées pour les valeurs des HAP et des PCB du tableau 3-7 et de l'illustration 3-12 seront discutées et appréciées séparément ci-après.

### Corrélations HAP

Dans l'ensemble du réseau de mesure NABO, sans stratification selon l'utilisation du sol, les corrélations des concentrations des HAP<sub>16</sub> avec le BaP sont fortes, avec un haut degré de signification. Ceci confirme le rôle de BaP en tant qu'indicateur (par ex. Wang et al., 2007; Wilcke, 2000). La relation avec le Hg est en fait hautement significative, mais elle est plutôt faible. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre, à savoir que les concentrations en C<sub>org</sub> et en HAP<sub>16</sub> augmentent avec l'altitude, la corrélation des HAP<sub>16</sub> avec C<sub>org</sub> et l'altitude est négative. On pourrait supposer que la raison vient de la superposition des différentes utilisations du sol, mais cette hypothèse est largement contrecarrée par les corrélations spécifiques à l'utilisation du sol, qui sont aussi négatives. On pourrait avancer comme explication possible le fait que les sites NABO, étant en partie très éloignés les uns des autres, ne fournissent aucun gradient raisonnable en matière d'altitude à cause de l'hygiène de l'air et pour d'autres raisons. En revanche, les corrélations positives des HAP<sub>16</sub> avec le Hg et le Pb sur les sites exploités de manière extensive (prairies extensives, sites de protection et forêts de conifères) montrent que ces polluants sont transportés sur de longues distances. Il semble que les corrélations des composés HAP simples plutôt légers avec le C<sub>org</sub> et la suie soient plus fortes que celles avec la somme des HAP<sub>16</sub> (Tableau 3-7). Pour la protection des sols en général, les corrélations HAP trouvées dans le réseau de mesure NABO n'ont pas une grande importance pratique, car elles sont soit faible et/ou non significatives, ou la pente des droites de régression est très éloignée de 1.

Dans une autre étude portant sur le réseau NABO (Brändli et al., 2008), on a analysé d'autres corrélations avec 5 HAP légers (NAP-PHE) et 11 lourds (ANT-BPE), qui étaient en partie statistiquement significatives, mais atteignaient des coefficients de corrélation de 0.5 au plus. La teneur en C<sub>org</sub> présentait une corrélation plus positive avec les HAP légers qu'avec les lourds, alors que cette tendance était complètement inversée pour la densité de population. De plus, les HAP lourds étaient corrélés négativement avec l'altitude. On peut ainsi en déduire l'hypothèse que les HAP lourds sont moins mobiles et que les HAP légers se trouvent dans un meilleur équilibre avec les teneurs en C<sub>org</sub>.



**Illustration 3-12: Diagramme de dispersion et droites de régression linéaire pour les HAP<sub>16</sub> et PCB<sub>7</sub> avec des caractéristiques différentes au niveau du sol et du site (paramètres de corrélation et de régression dans le tableau 3-7)**

### Corrélations PCB

Dans le réseau de mesures NABO, les teneurs en PCB<sub>7</sub> ne sont pas corrélées avec l'altitude. En revanche, les corrélations positives avec C<sub>org</sub> et HAP<sub>16</sub>, toutes utilisations du sol confondues, sont relativement faibles, mais avec un haut degré de signification. Si l'on considère les utilisations du sol séparément, les corrélations positives sont fortes et significatives avec le Hg et les HAP<sub>16</sub> sur les quatre sites de protection, et avec HAP<sub>16</sub> uniquement dans les forêts de conifères. Bien que la corrélation avec les PCB<sub>7</sub> et les HAP<sub>16</sub> soit significative et, selon l'utilisation du sol, forte, le recours à des modèles de régression linéaire en vue d'établir des pronostics n'est pas raisonnable, étant donné la faiblesse de la pente. Ceci est semble-t-il également valable pour la corrélation des

HAP<sub>16</sub> avec la somme des dioxines et des furanes (PCDD/F) (tableau 3-7). Le constat pour l'utilisation des corrélations des PCB dans la pratique est le même que pour les HAP.

Dans l'étude citée plus haut (Brändli et al., 2008), les corrélations avec les PCB-28, PCB-52 légers et avec les PCB-101, PCB-180 lourds ont également été analysées. Les résultats étaient semblables à ceux obtenus avec les HAP, mais les coefficients de corrélation significatifs ne dépassaient pas 0.37.

### 3.6 Attribution des sources de HAP

Trois méthodes d'attribution des sources ont été évaluées de manière critique dans une étude (Brändli et al., 2008) se basant sur les données NABO présentées ici (Annexe 2).

#### Caractéristiques des rapports HAP

Le tableau 3-8 présente les caractéristiques des rapports HAP dans la littérature portant sur les émissions et dans le réseau NABO.

**Tableau 3-8: Caractéristiques des HAP dans la littérature portant sur les émissions et dans le réseau de référence NABO (tiré de: Brändli et al., 2008)**

Conditions HAP	Attribution de source (littérature <sup>1)</sup> )		Sols du NABO <sup>2)</sup>	
	pétrogène	pyrogène		
ANT/(ANT+PHE)	<0.1	>0.1	0.02	(0.003-0.11)
BaA/(BaA+CHR)	<0.2	>0.35	0.40	(0.27-0.58)
FLT/(FLT+PYR)	<0.4	>0.4	0.58	(0.53-0.72)
IPY/(IPY+BPE)	<0.2	>0.2	0.49	(0.36-0.55)
ComHAP/HAP <sub>16</sub>	0.3	0.7	0.65	(0.16-0.89)
(mPHE+ANT)/PHE	5	0.5	0.15	(0.07-0.46)
(mFLT+PYR)/PYR	4	0.3	0.36	(0.22-0.70)
1,7-/(1,7+2,6) dmPHE	0.45-0.7	<0.45 oder 0.7-0.9	0.59	(0.47-0.83)
	Combustion de combustibles fossiles liquides	Combustion d'herbe, de charbon, de bois		
FLT/(FLT+PYR)	0.4-0.5	>0.5	0.58	(0.53-0.72)
IPY/(IPY+BPE)	0.2-0.5	>0.5	0.49	(0.36-0.55)
RET/(RET+CHR)	0.1.5-0.5	0.83/0.96	0.17	(0.02-0.93)
1,7-/(1,7+2,6)dmPHE	<0.45	0.7-0.9	0.59	(0.47-0.83)
	Pas de trafic	Trafic		
BaP/BPE	<0.6	>0.6	1.13	(0.48-2.86)
1,7-/(1,7+2,6)dmPHE	<0.45	>0.45	0.59	(0.47-0.83)
	diagénétique	pyrogène		
PER/(PER+PYR)	0.77	0.13	0.18	(0.03-0.90)

<sup>1)</sup> voir (Brändli et al., 2008)

<sup>2)</sup> Médiane (Min.-Max.), n = 82 à 102

#### Abréviations:

ANT Anthracène, PHE Phénanthrène, BaA Benzo[*a*]anthracène, CHR Chrysène, FLT Fluoranthène, PYR Pyrène, IPY Indéno[*1,2,3-cd*]pyrène, BPE Benzo[*ghi*]pérylène, RET Rétène, Com(bustion)HAP = (Somme de FLT, PYR, BaA, CHR, Benzo[*b*]fluoranthène, Benzo[*k*]fluoranthène, Benzo[*a*]pyrène, IPY, BPE), m méthylé, dm diméthylé

Les rapports HAP indiquant des sources de combustion (pyrogènes) dominant en comparaison avec ceux qui indiquent des sources pétrochimiques (pétrogènes). Une classification entre la combustion des carburants liquides fossiles et celle des carburants solides biogènes indique que les quatre rapports HAP correspondent à un mélange en faveur des carburants solides. Ce constat se trouve quelque peu en contradiction avec la nette domination des sources de combustion liées au trafic. Le fait que les sources pyrogènes dominant nettement par rapport à la formation diagénétique naturelle à partir de molécules terrestres précurseurs n'est pas étonnant. Il est important de retenir qu'en matière de résultats, on a toujours affaire à des conditions mixtes et les résultats des différents

rapports HAP sont pratiquement tous discutables. Brändli et al., (2008) fournit à ce sujet une discussion plus critique et plus approfondie.

### Marqueur moléculaire HAP

Le tableau 3-9 présente les résultats tirés de la littérature portant sur les émissions, ainsi que ceux du réseau NABO.

**Tableau 3-9: Marqueurs HAP caractéristiques dans la littérature portant sur les émissions et dans le réseau de référence NABO (modifié à partir de: Brändli et al., 2007)**

Marqueur moléculaire	Source (littérature <sup>1)</sup> )	Sols NABO <sup>2)</sup> (µg/kg)
RET	Combustion de bois Plantes plus élevées Installations d'incinération Processus diagénétiques Trafic routier	2.06 (n.d.-68.01)
PER	Processus diagénétiques Processus naturels	3.20 (0.41-77.99)
COR	Trafic routier Sources naturelles	7.42 (0.73-32.05)
cPHE	Combustion à haute température Trafic routier	1.64 (0.35-13.66)
cPYR	Combustion de biomasse Trafic routier Combustion à haute température	2.02 (0.15-15.73)

<sup>1)</sup> voir (Brändli et al., 2008)

<sup>2)</sup> Médiane (Min.-Max.), n = 82 à 102

#### Abréviations:

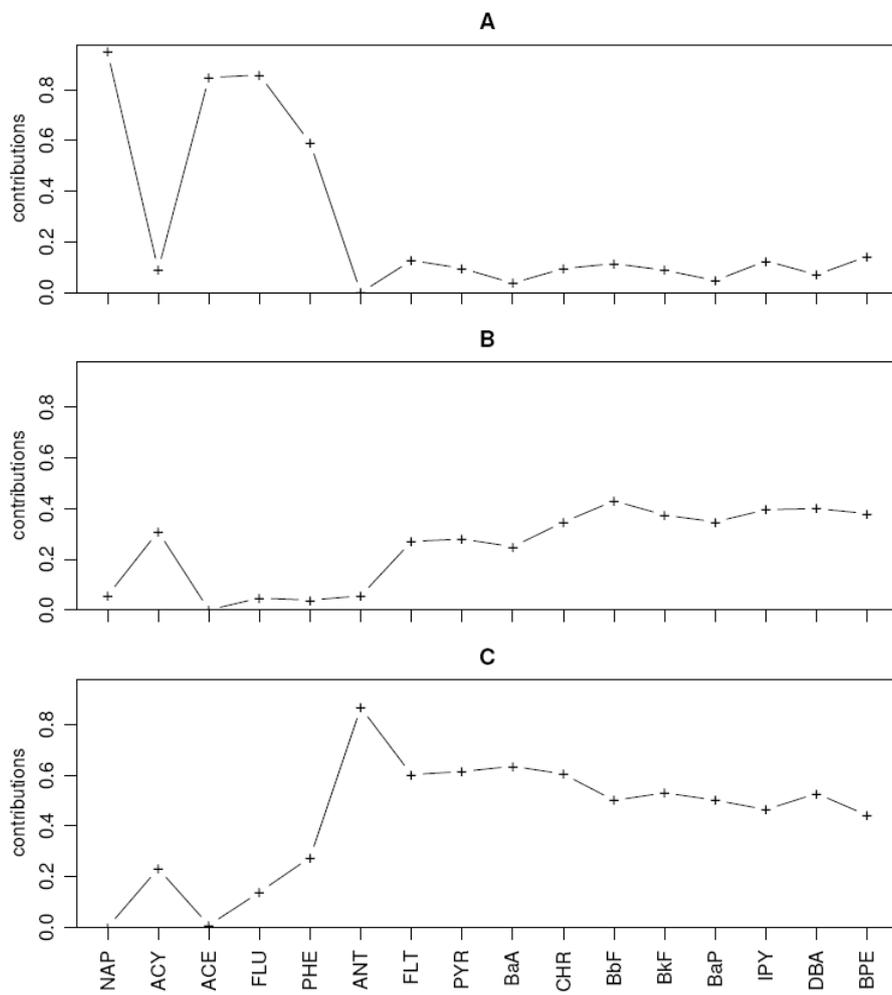
RET Rétène, PER Pérylène, COR Coronène, cPHE 4-H-CyclopentaPHE, cPYR Cyclopenta[cd]PYR

Les résultats des marqueurs moléculaires HAP ne sont pas clairs non plus. Si l'on considère par exemple le trafic routier comme étant la principale source d'influence pour le site autoroutier (105), ceci n'est pas valable dans 33 % des cas pour COR, dans 45 % des cas pour cPHE et dans 48 % des cas pour PYR.

### Modèle linéaire mixte

Contrairement aux précédentes méthodes, le modèle linéaire mixte prend en compte les 16 HAP et postule que certaines sources se distinguent parce que leurs parts en HAP sont constantes (profils HAP, cf. chap. 3.4). Ceci a permis de faire ressortir les trois profils HAP caractéristiques de l'illustration 3-13.

Les profils des HAP lourds B) et C) étaient plus fréquents en basse altitude et dans les cas de densité de population élevée, ce qui confirme que les apports en HAP lourds sont à proximité des sources. Les trois profils des HAP ont été comparés avec des profils d'émissions (n = 300) tirés de la littérature (Brändli et al., 2007). Ainsi, le profil A) présente des similitudes avec les profils d'émissions de combustion (de bois) et de liants d'asphalte. Les profils B) et, dans une moindre mesure C), ressemblaient aux profils des émissions de poussière urbaine.



**Illustration 3-13** Trois profils HAP caractéristiques du modèle linéaire mixte dans le réseau de référence NABO en proportions relatives moyennes: A) profil léger, B) profil lourd avec augmentation progressive de composés lourds, C) profil lourd avec diminution progressive des composés lourds (tiré de: Brändli et al., 2007)

## 4 Conclusions

Les résultats et leur interprétation permettent de tirer des conclusions quant à leur pertinence et d'en faire une interprétation globale pour la protection des sols.

- 1) Qualité des données:** Si l'incertitude de mesure élargie des données mesurées à l'intérieur d'une étude (processus de mesure identique) a fourni des résultats utilisables pour la protection des sols pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub>, ce ne fut que partiellement, voire certaines fois pas du tout le cas pour la reproductibilité des données de mesure correspondantes tirées de différentes études. Il semble pratiquement exclu d'obtenir une reproductibilité des données sensée lorsque les conditions de mesure présentent de grandes différences (différences de profondeur de prélèvement, degré d'humidité et de tassement, ...).
- 2) Teneur en HAP et en PCB de la couche superficielle du sol:** Dans le réseau de référence NABO, le degré de contamination chimique par les HAP<sub>16</sub> et par le BaP s'avère faible, et par les PCB<sub>7</sub> insignifiant si l'on se réfère aux valeurs indicatives et assignées de prévention. Ce constat ne prend pas en considération les sites de contamination spécifique (par ex. déchets toxiques), qui ont tout au plus été utilisés à titre d'exemple par le réseau de référence NABO, mais qui ne peuvent pas être considérés comme représentatifs. Dans la région du Plateau, caractérisée par des densités de population élevées, les teneurs avaient tendance à être localement légèrement plus élevées. En revanche, les Préalpes ne sont pas apparues comme de vastes zones d'accumulation. Si l'on considère l'utilisation du sol, seules les forêts de conifères avaient clairement une valeur indiquant des teneurs légèrement plus élevées.
- 3) Profil des composés HAP et PCB dans la couche superficielle du sol:** En matière de composés dominants, d'une manière générale, les profils HAP ainsi que les profils PCB étaient très semblables. On a rarement constaté des différences nettes spécifiques à un même endroit, mais elles indiquaient en général une situation de contamination. Pour les profils HAP, il semble qu'une situation d'immissions mixtes domine, avec une toxicité moyenne, en raison des parts dominantes de composés relativement peu toxiques (PHE, FLT, PYR). Le BaP a été relevé une seule fois comme indicateur de contamination dominant dans le site d'un parc municipal (61).
- 4) Corrélations avec les HAP et les PCB:** Les corrélations trouvées dans le réseau de référence NABO ne sont pas très intéressantes en matière de protection concrète des sols, car elles sont soit trop faibles et/ou non significatives, ou la pente de leurs droites de régression est très éloignée de 1, et donc inadéquate pour établir des pronostics fiables. Pour obtenir des corrélations utiles pour la pratique, il faudrait une stratification plus spécifique sur la base d'une plus grande collection de sites.
- 5) Attribution d'une source aux HAP:** Les résultats des trois méthodes appliquées ne sont souvent pas explicites en détail, mais ils confirment dans l'ensemble la dominance de sources de combustion.



## 5 Projets

Les sols sont des systèmes ouverts et des passerelles écologiques. De plus, ils ne sont pas contaminés uniquement par des apports de HAP et de PCB, mais par une multitude d'autres polluants organiques en plus des polluants inorganiques. Pour cette raison, nous donnons ci-après un bref aperçu des projets en cours et à venir au sujet des polluants organiques dans le sol:

### HAP

Etant donné que, dans leur composition, les concentrations en HAP<sub>16</sub> mesurées dans le réseau de référence NABO reflètent en général une situation d'immission mixte diffuse, il faut développer un modèle multicompartiments pour la Suisse, permettant de calculer le transport, la dégradation et le dépôt de HAP. Ceci devrait aider à savoir si les concentrations de HAP mesurées dans le sol sont le résultat de l'interférence de différentes sources d'émission ou de processus de dispersion (fractionnement). La personne de contact du NABO pour l'ensemble du projet EPFZ et ART est M. Armin Keller ([armin.keller@art.admin.ch](mailto:armin.keller@art.admin.ch)).

### PCB et dioxine

Bien que toutes les concentrations de PCB et de dioxine mesurées à ce jour dans le réseau de référence NABO se situent nettement en dessous des valeurs indicatives de prévention, d'autres projets existent malgré tout dans un autre contexte. Parmi les 209 congénères PCB existants, les PCB coplanaires, de type dioxine, (cPCB) ont récemment capté l'attention. Cet intérêt à leur égard a été suscité essentiellement par les concentrations élevées de cPCB trouvées dans les poissons, ainsi que la question de leur provenance. La personne de contact pour les PCB de type dioxine est M. Markus Zennegg à l'EMPA ([markus.zennegg@empa.ch](mailto:markus.zennegg@empa.ch))

Les quantités les plus élevées de dioxine et de cPCB dans les denrées alimentaires ont été relevées dans l'Union européenne en 2006. Etant donné que la Suisse utilise ces données, des études ont été menées, afin de dresser un état des lieux. Les résultats ont montré des dépassements pour la viande de bœuf. Le projet SIBEPRO a été lancé, afin d'élucider les causes de cette élévation. On planifie également d'analyser l'existence d'une source possible de contamination par absorption directe de terre chez les bovins. M. Michel Geinoz d'ALP ([michel.geinoz@alp.admin.ch](mailto:michel.geinoz@alp.admin.ch)) s'est mis à disposition en tant que personne de contact pour ce projet commun des offices fédéraux OFSP, OVF, OFEV, OFAG et de la Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux ALP.

### Pesticides

En Suisse, chaque année environ 1'500 tonnes de produits phytosanitaires chimiques (PPC: herbicides, insecticides, fongicides etc.), contenant environ 440 matières actives, sont achetés et utilisés par l'agriculture. La majeure partie de ces PPC aboutit directement ou indirectement dans le sol. Si l'on veut éviter d'éventuels effets toxiques sur les êtres vivants dans le sol, sur les plantes par absorption, ou par lessivage sur les eaux souterraines et de surface, il convient de faire en sorte que les PPC se dégradent le plus rapidement possible dans le sol. Les PPC homologués de nos jours présentent une large palette de valeurs en matière de demi-vie et de coefficient  $K_{oc}$ . Il faut partir du

principe que, dans la réalité, quelques composés, ou leurs produits de transformation, peuvent persister longtemps dans le sol.

Le flux des données rassemblées dans le cadre des parcelles du NABO, ainsi que les prélèvements de sol archivés, permettent de suivre la persistance des PPC modernes à long terme. Ainsi, le but est de développer une méthode de screening pour les PPC dans les échantillons de sol et, à l'aide de cette dernière, d'analyser des échantillons de sol choisis dans les archives du NABO, pour pouvoir tirer des conclusions en matière de persistance de ces composés dans la pratique agricole. La personne de contact est M. Armin Keller d'ART ([armin.keller@art.admin.ch](mailto:armin.keller@art.admin.ch)).

### **Autres polluants organiques**

On peut trouver dans le commerce quelque 8'400'000 substances chimiques, dont 240'000 sont homologuées Muir & Howard, (2006). La majeure partie de celles-ci sont des matières organiques. Muir et Howard Muir & Howard, (2006) ont établi une liste de 58 polluants organiques prioritaires en fonction de leurs critères de persistance, de bioaccumulation et de toxicité. Parmi ceux-ci, une douzaine sont analysés en routine et 5 figurent peut-être dans des programmes de surveillance environnementaux. Sur cette trame, une journée a été organisée en décembre 2007 par l'OFEV avec pour thème les polluants émergents (emerging contaminants) et leur importance pour la protection des sols en Suisse. La personne de contact pour les projets concrets qui pourraient en résulter est M. Thomas Bucheli d'ART ([thomas.bucheli@art.admin.ch](mailto:thomas.bucheli@art.admin.ch)).

## 6 Recommandations

Les conclusions et les perspectives du projet permettent de faire toute une série de recommandations, qui peuvent être articulées entre la Confédération et les cantons selon la répartition des tâches qui prévaut en Suisse en matière de protection des sols (OSol 1998).

### Confédération

En vue de dispenser des conseils appropriés visant à une protection efficace des sols contre la contamination par des polluants organiques, la Confédération devrait élaborer les bases d'application suivantes ou améliorer celles qui existent:

- 1) Poursuivre le programme d'analyses interlaboratoires OSol et, si la participation est suffisante, documenter la comparaison de l'incertitude analytique pour les polluants organiques depuis 1998. De plus, il conviendrait de mettre à disposition un module internet convivial pour le calcul de la reproductibilité des résultats d'analyse.
- 2) Optimiser l'incertitude de mesure élargie par:
  - Répétition de mesures sur des échantillons stables, identiques (matrice et concentration), provenant d'anciennes séries conjointement à de nouveaux échantillons et, à la rigueur, correction des valeurs d'analyse.
  - Réseau de prélèvement d'échantillons et d'analyses pour les HAP<sub>16</sub>, le BaP et les PCB<sub>7</sub> et éventuellement pour d'autres polluants organiques.
- 3) Améliorer la base de données indicatives en matière de teneurs en HAP<sub>16</sub>, BaP et PCB<sub>7</sub>, particulièrement dans les cultures spéciales (viticulture, cultures fruitières et maraîchères) et les sols urbains.
- 4) En se fondant sur un transect d'altitude adéquat basé sur une même utilisation du sol (forêts de conifères), vérifier les constats établis par MONARPOP ([www.monarpop.at](http://www.monarpop.at)) pour la Suisse au sujet de la concentration dans les Préalpes de polluants organiques transportés sur de grandes distances.
- 5) Elaborer de meilleurs critères et méthodes pour augmenter la fiabilité lors de découvertes de situations de contamination spécifique par des polluants organiques (hot spots).
- 6) Lancer une étude pilote en vue d'observer les sols sur une longue durée en matière de teneurs en HAP, mais pas (encore) en PCB.
- 7) Analyser par screening d'autres polluants organiques du sol prioritaires parmi les échantillons NABO archivés, ainsi que les polluants organiques persistants émergents dans les échantillons NABO à venir.
- 8) Remanier et compléter les valeurs réglementaires et l'appréciation du risque pour les contaminations en polluants organiques sur la base des connaissances les plus récentes. Il s'agirait tout particulièrement de contrôler le niveau d'importance des 7 congénères PCB analysés jusqu'ici et, à la rigueur, de l'adapter.

## Cantons

Pour une mise en application appropriée de la protection des sols contre la contamination par des polluants organiques, on recommandera aux cantons de recourir aux conseils fournis par la Confédération (OSol, 1998: art. 3 et 4), ainsi qu'aux directives ci-après:

- 1) Le manuel «Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes» (Hämmann & Desales, 2003) a pour objectif d'aider à améliorer le degré de reproductibilité des analyses de sols et, par là, leur interprétation. A cette fin, les éléments importants sont avant tout l'emplacement des sites, la surface de prélèvement, la profondeur de prélèvement, le rapport entre le volume des échantillons et le poids des échantillons séchés et la reproductibilité d'autres caractéristiques des sols relativement stables, mais aussi dynamiques, comme par exemple la texture ou la teneur en  $C_{org}$ .
- 2) Depuis 1998, les analyses inter laboratoires OSol, de même que la liste publique des laboratoires qui en découlent ([www.nabo.admin.ch](http://www.nabo.admin.ch) > Quality), servent à quantifier, voire à améliorer l'incertitude analytique comparée pour les polluants organiques à partir d'échantillons de laboratoires (par ex. Ammann & Desales, 2009).
- 3) A ce jour, les chapitres 3.1 et 3.2 de cette étude offrent la base la plus actuelle pour une évaluation réaliste de l'incertitude de mesure prise dans son ensemble, en allant du prélèvement des échantillons jusqu'aux résultats d'analyses pour les teneurs en HAP<sub>16</sub>, BaP et PCB<sub>7</sub>. Il faudrait en tenir compte pour l'interprétation des données.
- 4) En fonction du type d'analyse et d'utilisation, on peut se baser sur des valeurs d'orientations (Keller & Desales, 2001) pour classer et interpréter les teneurs mesurées en HAP<sub>16</sub>, BaP, PCB<sub>7</sub>, ainsi qu'en dioxine et en furane.
- 5) A ce jour, nous ne disposons que d'un seul rapport (Holenstein, 1996) traitant de la découverte de taches soupçonnées être à l'origine de contaminations par des polluants organiques. Cependant, il semble qu'il soit possible d'augmenter sensiblement l'indice de fiabilité par l'analyse systématique et la mise en valeur des études de contamination réalisée jusqu'à ce jour et en améliorant l'attribution des sources. Entre 1990 et 1996, le dépassement des valeurs indicatives était dû essentiellement à des sites dont on présumait la contamination à raison de 36 % pour les HAP<sub>16</sub> et 22 % pour le BaP (Keller & Desales, 2001).
- 6) Finalement, le manuel «Sols pollués - Evaluation de la menace et mesures de protection» (Mailänder & Hämmann, 2005) fournit une aide de grande valeur pour la pratique.

Les cantons recevront la recommandation de s'annoncer auprès de la Confédération s'ils ont besoin d'informations pour la pratique, car il ne sera possible de développer une protection des sols appropriée et applicable que sur la base d'un dialogue constructif et d'une collaboration entre les cantons et la Confédération.

D'une manière générale, en l'état actuel des connaissances, les HAP devraient faire l'objet d'analyses plus fouillées que ce ne fut le cas pour les PCB jusqu'à ce jour, exception faite des sites de contamination spécifiques. En outre, d'autres polluants organiques, dont l'importance a été reconnue, doivent également être pris en considération dans la protection des sols suisses.

## 7 Bibliographie

- Aamot, E., Krane, J. & Steinnes, E., 1987. Determination of trace amounts of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil. *Fresenius Z. Anal. Chem.*, 328: pp. 569-571.
- Abrahams, P.W., 2002. Soils: their implications to human health. *Sci. Total Environ.*, 291: pp. 1-32.
- AfL BE, 2003. Bodenüberwachung im Kanton Bern - Bodenbericht 2003. Amt für Landwirtschaft, Abteilung Umwelt und Landwirtschaft des Kantons Bern, CH-3052 Zollikofen. 51 pp.
- AfU GR, 1998. Bodenschutz: Fallstudie Siedlungsgebiete in Graubünden - Bericht über die Bodenuntersuchungen im Bündner Rheintal und in der Landschaft Davos. 2.Teil: Organische Schadstoffe. Amt für Umweltschutz Graubünden, Chur. 50 pp.
- AfU SG, 1996. Schadstoffbelastung siedlungsnaher Landwirtschaftsböden im Kt. St.Gallen. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Fachstelle Bodenschutz, St. Gallen. 63 pp.
- Afu SG, 2007. Kantonale Bodenüberwachung (KABO) St. Gallen. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Fachstelle Bodenschutz, St. Gallen.
- AfU SO, 1994a. Schadstoffbelastung der Böden entlang von Autobahnen - Ergebnisse der Untersuchungen von 1990 und 1991. Berichte Nr. 1. Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn, Solothurn. 65 pp.
- AfU SO, 1994b. Ubiquitäre Belastung des Bodens mit Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) im Siedlungsgebiet. Bericht Nr. 16. Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn, Solothurn. 14 pp.
- AfU SO, 1994c. Untersuchungen der Schadstoffbelastung von Boden und Vegetation entlang von Kantonsstrassen sowie Strassenwischgut. Berichte Nr. 6. Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn, Solothurn. 29 pp.
- Alcock, R.E., Bacon, J., Bardget, R.D., Beck, A.J., Haygarth, P.M., Lee, R.G.M., Parker, C.A. & Jones, K.C., 1996. Persistence and fate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sewage sludge-amended agricultural soils. *Environmental Pollution*, 93: pp. 83-92.
- Alcock, R.E., Halsall, C.J., Harris, C.A., Johnston, A.E., Lead, W.A., Sanders, G. & Jones, K.C., 1994. Contamination of environmental samples prepared for PCB analysis. *Environmental Science and Technology*, 28: pp. 1838-1842.
- Alcock, R.E., Johnston, A.E., McGrath, S.P., Berrow, M.L. & Jones, K.C., 1993. Long-term changes in the polychlorinated biphenyl content of United Kingdom soils. *Environmental Science and Technology*, 27: pp. 1918-1923.
- Alexander, M., 1995. How toxic are toxic chemicals in soil? *Environ. Sci. Technol.*, 29: pp. 2713-2717.
- ALU OW, 2005. Schadstoffbelastung der Böden im Kanton Obwalden - Resultate der Untersuchungskampagnen 1992 und 2002. Amt für Landwirtschaft und Umwelt Obwalden, Sarnen. 16 pp.

- Ammann, S. & Desaulles, A., 2009. Essai interlaboratoire OSol 2008. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zurich. 61 pp.
- AUE BL, 2002. Statusbericht zur Belastung der Baselbieter Böden mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) und polychlorierten Biphenylen (PCB). Amt für Umweltschutz und Energie, Fachstelle Bodenschutz, Liestal. 32 pp.
- AUE BL, 2005a. Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft: Drittbeprobung nach 10 Jahren (1995-2005) - Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherungen in Siedlungs- und Waldböden. Amt für Umweltschutz und Energie, Fachstelle Bodenschutz, Liestal. 53 pp.
- AUE BL, 2005b. PCB in Böden im Bereich von Beckenrändern in den Kantonen BL und BS. Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft., Liestal. (interner Bericht)
- AUE BL & Abt. Umwelt AG, 2000. Schadstoffe aus dem Strassenrandbereich in den Kantonen Basel-Landschaft und Aargau (Schwermetalle und HAP). Amt für Umwelt und Energie Kanton Basel-Landschaft, Liestal und Abteilung Umwelt Kanton Aargau, Aarau.
- BBodSchV, 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, W. König and G. Einsele (Editors), Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Massnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Band 3 (Ziffer 8005), BoS 27. Lfg X/98. Erich Schmidt Verlag, Berlin, p. 57.
- Beck, A.J., Johnsen, D.L. & Jones, K.C., 1996. The form and bioavailability of non-ionic organic chemicals in sewage sludge amended agricultural soils. *Sci. Tot. Environ.*, 185: pp. 125-149.
- Berset, J.D. & Holzer, R., 1995. Organic micropollutants in Swiss agriculture: Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in soil, liquid manure, sewage sludge and compost samples; a comparative study. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 59: pp. 145-165.
- Brändli, R.C., Bucheli, T.D., Ammann, S., Desaulles, A., Keller, A., Blum, F. & Stahel, W.A., 2008. Critical evaluation of PAH source apportionment tools using data from the Swiss soil monitoring network. *J. Environ. Monitor.*, 10: pp. 1278-1286.
- Brändli, R.C., Bucheli, T.D., Kupper, T., Furrer, R., Stahel, W.A., Stadelmann, F.X. & Tarradellas, J., 2007. Organic pollutants in compost and digest; 1. Polychlorinated biphenyls, polyaromatic hydrocarbons and molecular markers. *J. Environ. Monitor.*, 9: pp. 456-464.
- Breivik, K. & Alcock, R., 2002. Emission impossible? The challenge of quantifying sources and releases of POPs into the environment. *Environ. Intern.*, 28: pp. 137-138.
- Bucheli, T.D., Blum, F., Desaulles, A. & Gustafsson, Ö. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere*, 56: pp. 1061-1076.
- BUWAL, 2001b. Wegleitung - Verwertung von ausgehobenem Boden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 3003 Bern. 20 pp.
- Chung, M.K., Hu, R., Cheung, K.C. & Wong, M.H., 2007. Pollutants in Hong Kong soils: Polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemosphere*, 67: pp. 464-473.

- Cousins, I.T., Gevao, B. & Jones, K.C., 1999. Measuring and modelling the vertical distribution of semi-volatile organic compounds in soils. I: PCB and PAH soil core data. *Chemosphere*, 39: pp. 2507-2518.
- Cousins, I.T. & Jones, K.C., 1998. Air-soil exchange of semi-volatile organic compounds (SOCs) in the UK. *Environmental Pollution*, 102: pp. 105-118.
- Cousins, I.T., Kreibich, H., Hudson, L.E., Lead, W.A. & Jones, K.C., 1997. PAHs in soils: contemporary UK data and evidence for potential contamination problems caused by exposure of samples to laboratory air. *Sci. Total Environ.*, 203: pp. 141-156.
- Daly, G.L. & Wania, F., 2005. Organic contaminants in mountains. *Environ. Sci. Technol.*, 39: pp. 385-398.
- Desaules, A., Brändli, R.C., Ammann, S., Bucheli, T.D., Blum, F. & Keller, A., 2008. PAH and PCB in soils of Switzerland - Status and critical review. *J. Environ. Monitoring*, 10: pp. 1265-1277.
- Desaules, A. & Dahinden, R., 1994. Die Vergleichbarkeit von Schwermetallanalysen in Bodenproben von Dauerbeobachtungsflächen - Ergebnisse eines Probenahmeringversuches. Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), 3097 Liebefeld. 25 pp.
- Desaules, A. & Dahinden, R., 1999. VBBo-Ringversuch 1998 - Organische Schadstoffe / Essai interlaboratoire OSol 1998 - Micropolluants organiques. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau - Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (FAL-IUL), 3003 Bern. 48 pp.
- Desaules, A. & Dahinden, R., 2000a: Réseau national d'observation des sols - Variations des teneurs en polluants après 5 et 10 ans de suivi. Cahier de l'environnement no 320. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (éd.), 3003 Berne. 129 p.
- Desaules, A. & Dahinden, R., 2000b. Zum Einfluss von Trocknungstemperatur und Kunststoff-Kontakt auf HAP- und PCB-Analysen in Bodenproben bei Routineuntersuchungen. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), 3003 Bern. 34 pp. ([www.nabo.admin.ch](http://www.nabo.admin.ch) > Bibliographie Nr. 80)
- Desaules, A., Keller, A., Schwab, P. & Dahinden, R., 2004. Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphor in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 8046 Zürich. 107 pp.
- Desaules, A., Schwab, P., Keller, A., Ammann, S., Paul, J. & Bachmann, H.J., 2006. Polluants inorganiques dans les sols suisses et évolutions après 10 ans. Agroscope FAL Reckenholz, Station de recherches fédérale en agroécologie et agriculture, Zurich. 139 pp.
- Desaules, A. & Studer, K., 1993. NABO - Réseau d'observation des sols: période d'observation 1985-1991. Cahier de l'environnement no 200. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (éd.), CH-3003 Berne. 135 p., annexes 175 pp.
- DIN, 1994. Internationales Wörterbuch der Metrologie. 2. Auflage. Beuth Verlag, Berlin, 106 pp.

- Doick, K.J., Klingelmann, E., Burauel, P., Jones, K.C. & Semple, K.T., 2005. Long-term fate of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils. *Environmental Science and Technology*, 39(10): pp. 3663-3670.
- Duarte-Davidson, R. & Jones, K.C., 1996. Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludge applied to agricultural soils: II. The potential for transfers to plants and grazing animals. *Sci. Total Environ.*, 185: pp. 59-70.
- Edwards, N.T., 1983. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment - a review. *J. Environ. Qual.*, 12: pp. 427-441.
- Ellison, S.L.R., Rösslein, M. & Williams, A., 2003a. Ermittlung der Messunsicherheit bei analytischen Messungen. Zweite Auflage (2. Entwurf). EURACHEM CITAC, 118 pp.
- Ellison, S.L.R., Rösslein, M. & Williams, A., 2003b. Quantifier l'incertitude dans les Mesures Analytiques. EURACHEM CITAC, 116 pp.
- FaBo ZH, 1995a. Bodenbelastungen mit Schwermetallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen durch den Betrieb der Jagdschiessanlage Embrach. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, Zürich. 19 pp.
- FaBo ZH, 1995b. Die Belastung mit Schwermetallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) in ausgewählten Strassen im Kanton Zürich. 45. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, Zürich.
- FaBo ZH, 2000. Die Belastung mit HAP und Blei an Strassen im Kanton Zürich. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, Zürich. 17 pp.
- Gini, F., 1996. Contenuti di idrocarburi policiclici aromatici (HAP) e bifenili policlorati (PCB) nei suoli in Ticino. Sezione dell'Agricoltura, CH-6500 Bellinzona, 19 pp.
- Gocht, T., 2005. Die vier Griechischen Elemente: Massenbilanzierung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Kleineinzugsgebieten des ländlichen Raumes. Dissertation am Institut der Geowissenschaften der Universität Tübingen, Tübingen. 140 pp.
- Gouin, T., Mackay, D., Jones, K.C., Harner, T. & Meijer, S.N., 2004. Evidence for the "grasshopper" effect and fractionation during long-range atmospheric transport of organic contaminants. *Environ. Pollut.*, 128: pp. 139-148.
- Gras, B., Jaeger, C. & Sievers, S., 2000. Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (HAP) in Oberböden Hamburgs. *Zeitschrift Umweltchemie Ökotoxikologie*, 12: pp. 75-82.
- Guggenberger, G., Pichler, M., Hartmann, R. & Zäch, W., 1996. Polycyclic aromatic hydrocarbons in different forest soils: Mineral horizons. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 159: pp. 565-573.
- Gy, P., 1998. *Sampling for Analytical Purposes*. John Wiley & Sons, Chichester, 153 pp.
- Halsall, C.J., Barrie, L.A., Fellin, P., Muir, D.C.G., Billeck, B.N., Lockhart, L., Rovinsky, F.Y.A., Kononov, E.Y.A. & Pastukhov, B., 1997. Spatial and temporal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Arctic atmosphere. *Environmental Science and Technology*, 31: pp. 3593-3599.

- Hämmann, M. & Desaulles, A., 2003. Manuel: Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes. L'environnement pratique (VU-4814-F). Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEV (éd.), CH-3003 Berne. 100 pp.
- Harner, T., Mackay, D. & Jones, K.C., 1995. Model of the long-term exchange of PCBs between soil and atmosphere in the southern U.K. *Environmental Science and Technology*, 29: pp. 1200-1209.
- Harrad, S.J., Sewart, A.P., Alcock, R., Boumphrey, R., Burnett, V., Duarte-Davidson, R., Halsall, C., Sanders, G., Waterhouse, K.S., Wild, R. & Jones, K.C., 1994. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: Sinks, sources and temporal trends. *Environ. Pollut.*, 85: pp. 131-146.
- Hatzinger, P.B. & Alexander, M., 1995. Effect of aging of chemicals in soil on their biodegradability and extractability. *Environ. Sci. Technol.*, 29: pp. 527-545.
- Heywood, E., Wright, J., Wienburg, C.L., Black, H.I.J., Long, S.M., Osborn, D. & Spurgeon, D.J., 2006. Factors Influencing the National Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Biphenyls in British Soils. *Environ. Sci. Technol.*, 40(40): pp. 7629-7635.
- Holenstein, J., 1996. Mögliche Quellen und Pfade für Schadstoffeinträge in Böden. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 13 pp.
- Horwitz, W. & Albert, R., 2006. The Horwitz Ratio (HorRat): A useful index of method performance with respect to precision. *J. AOAC Int.*, 89: pp. 1095-1109.
- Jensen, H., Reimann, C., Tor, E.F., Ottesen, R.T. & Arnoldussen, A., 2007. PAH-concentrations and compositions in the top 2 cm of forest soils along a 120 km long transect through agricultural areas, forests and the city of Oslo, Norway. *Environ. Pollut.*, 145: pp. 829-838.
- Jones, K.C., Stratford, J.A., Tidridge, P. & Waterhouse, K.S., 1989a. Polynuclear aromatic hydrocarbons in an agricultural soil: Long-term changes in profile distribution. *Environmental Pollution*, 56: pp. 337-351.
- Jones, K.C., Stratford, J.A., Waterhouse, K.S., Furlong, E.T., Giger, W., Hites, R.A., Schaffner, C. & Johnston, A.E., 1989b. Increases in the polynuclear hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century. *Environ. Sci. Technol.*, 23: pp. 95-101.
- Julien, P. & Morand, D., 1995. FRIBO - Réseau d'observation des sols agricoles 1987-1994. Institut agricole de l'Etat de Fribourg, Grangeneuve, Posieux. 146 pp.
- Känzig, A. & Werfeli, M., 1990. Untersuchung von Waldböden im Kanton Aargau auf die Belastung mit organischen Schadstoffen. Kantonales Labor Aargau, Aarau, Zürich. 24 pp.
- Keller, T. & Desaulles, A., 2001. Böden der Schweiz – Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990-1996). Umwelt-Materialien Nr. 139. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern. 115 pp.
- Knoche, H., Klein, M., Kördel, W., Wahle, U., Hund, K., Müller, J. & Klein, W., 1995. Literaturstudie zur Ableitung von Bodengrenzwerten für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (HAP). Texte 71. Umweltbundesamt, Berlin. 63 pp.

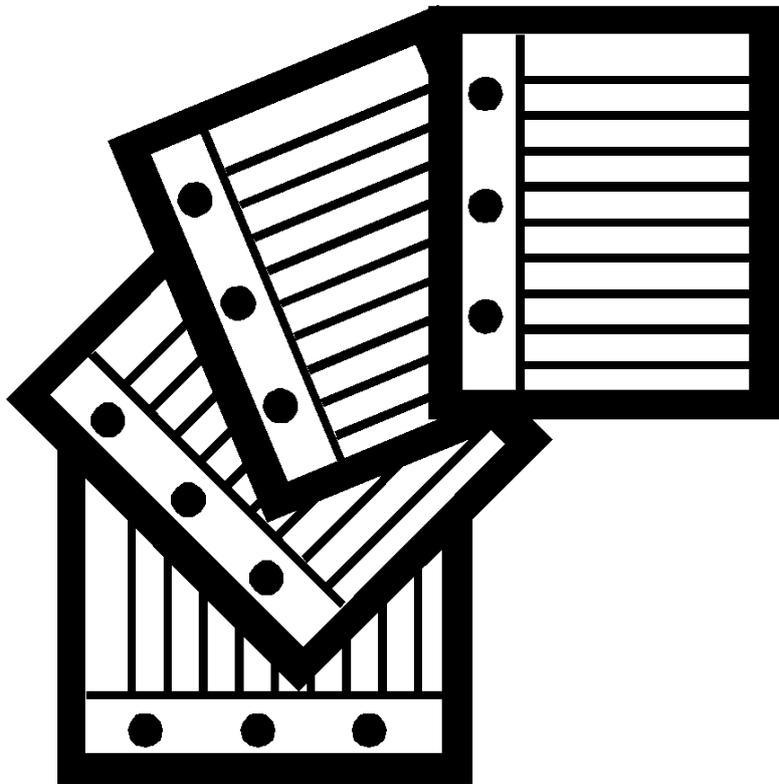
- Krauss, M. & Wilcke, W., 2005. Persistent organic pollutants and soil density fractions: distribution and sorption strength. *Chemosphere*, 59: pp. 1507-1515.
- Krauss, M., Wilcke, W. & Zech, W., 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in forest soils: depth distribution as indicator of different fate. *Environ. Pollut.*, 110: pp. 79-88.
- LABO, 2003. Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, W. König and G. Einsele (Editors), *Bodenschutz - Ergänzbares Handbuch der Massnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), 3; Ziffer 9006. Erich Schmidt Verlag, Berlin, p. 51.
- Lead, W.A., Steinnes, E., Bacon, J.R. & Jones, K.C., 1997. Polychlorinated biphenyls in UK and Norwegian soils: spatial and temporal trends. *Sci. Total Environ.*, 193: pp. 229-236.
- Li, K., Christensen, E.R., VanCamp, R.P. & Imamoglu, I., 2001. PAHs in dated sediments of Ashtabula River, Ohio, USA. *Environmental Science and Technology*, 35: pp. 2896-2902.
- Li, N., Wania, F., Lei, Y.D. & Daly, G.L., 2003. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for selected polychlorinated biphenyls. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 32: pp. 1545-1590.
- Lima, A.L.C., Eglington, T.I. & Reddy, C.M., 2003. High-resolution record of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbon deposition during the 20th century. *Environmental Science and Technology*, 37: pp. 53-61.
- Mailänder, R.A. & Hämman, M., 2005. *Manuel – Sols pollués – Évaluation de la menace et mesures de protection*. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne. 105pp
- Malanichev, A., Mantseva, E., Shatalov, V., Strukov, B. & Vulykh, N., 2004. Numerical evaluation of the PCBs transport over the northern hemisphere. *Environmental Pollution*, 128: pp. 279-289.
- Maliszewska-Kordybach, B., 2003. Soil quality criteria for polycyclic aromatic hydrocarbons - Current information and problems. *Fres. Environ. Bull.*, 12: pp. 946-951.
- Means, J.C., Wood, S.G., Hassett, J.J. & Banwart, W.L., 1980. Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils. *Environ. Sci. Technol.*, 14: pp. 1524-1528.
- Meijer, S.N., Ockenden, W.A., Sweetman, A., Breivik, K., Grimalt, J.O. & Jones, K.C., 2003. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes. *Environ. Sci. Technol.*, 37: pp. 667-672.
- Meijer, S.N., Steinnes, E., Ockenden, W.A. & Jones, K.C., 2002. Influence of environmental variables of the spatial distribution of PCBs in Norwegian and U.K. soils: implications for global cycling. *Environ. Sci. Technol.*, 36: pp. 2146-2153.
- Muir, D.C.G. & Howard, P.H., 2006. Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists. *Environ. Sci. Technol.*, 40: pp. 7157-7166.

- NEN 5742, 2001. Soil - Sampling of soil and sediments for the determination of metals, inorganic compounds, semi-volatile organic compounds and physico-chemical soil characteristics (in Dutch only). NEN 5742:2001. Netherlands Normalisatie-instituut, Delft.
- Niederer, M., Maschka-Selig, A. & Hohl, C., 1995. Monitoring Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Heavy Metals in Urban Soil, Compost and Vegetation. *Environ. Sci. & Pollut. Res.*, 2(2): pp. 83-89.
- Nisbet, I.C.T. & LaGoy, P.K., 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 16: pp. 290-300.
- OFEFP, 2001a. Commentaires concernant l'ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). L'environnement pratique VU-4809-F, Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP), Berne. 33 pp
- OFEFP, 2001b. Evaluation et utilisation de matériaux terreux (Instructions matériaux terreux). L'environnement pratique VU-4812-F, Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP), Berne. 20 pp
- ORRChim, 2005. Ordonnance du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim). RS 814.81.
- Osol, 1986. Ordonnance du 9 juin 1986 sur les polluants du sol (Osol). SR 814.12. substitué par Osol 1998.
- OSol, 1998. Ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). SR 814.12.
- Osubst, 1986. Ordonnance du 9 juin 1986 sur les substances dangereuses pour l'environnement (Ordonnance sur les substances, Osubst) Verordnung vom 9. Juni 1986 über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung, StoV). RS 814.013. substitué par ORRChim, 2005.
- Ramsey, M.H. & Ellison, S.L.R., 2007. Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches. EURACHEM/EUROLAB/Nordtest/AMC, 102 pp.
- Reinirkens, P., 1993. Landesweite Erhebung von HAP-Gehalten in Böden Nordrhein-Westfalens. *Mittl. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 72: pp. 1033-1036.
- Schmid, P., Gujer, E., Zennegg, M., Bucheli, T.D. & Desaulles, A., 2005. Correlation of PCDD/F and PCB concentrations in soil samples from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. *Chemosphere*, 58: pp. 227-234.
- Sims, R.C. & Overcash, M.R., 1983. Fate of polynuclear aromatic compounds (PNAs) in soil-plant systems. *Residue Rev.*, 88: pp. 1-68.
- Smith, L., Stalling, D.L. & Johnson, J.L., 1984. Determination of Part-Per-Trillion Levels of Polychlorinated Dibenzofurans and Dioxins in Environmental Samples. *Anal. Chem.*, 56: pp. 1830-1842.
- Starke, U., Herbert, M. & Einsele, G., 1991. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (HAP) in Boden und Grundwasser. In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, W. König and G. Einsele (Editors), *Bodenschutz: Ergänzbares Handbuch der Massnahmen und Empfehlungen für Schutz*,

- Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Band 1 (Ziffer 1680), BoS 9. Lfg. X/91. Erich Schmidt Verlag, Berlin, p. 38.
- Van den Berg, M., Birnbaum, L.S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N. & Peterson, R.E., 2006. The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. *Toxicological Sciences*, 93: pp. 223-241.
- VROM, 2000. Circular on target values and intervention values for soil remediation. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), The Hague. 11p., annexes 51p. pp.
- Vyskocil, A., Fiala, Z., Chenier, V., Krajak, L., Ettlerova, E., Bucak, J., Viau, C. & Emminger, S., 2000. Assessment of multipathway exposure of small children to PAH. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 8: pp. 111-118.
- Wagner, G., Lischer, P., Theocharopoulos, S.P., Muntau, H., Desaulles, A. & Quevauviller, P., 2001. Quantitative evaluation of the CEEM soil sampling intercomparison. *Sci. Total Environ.*, 264: pp. 73-101.
- Wang, Z., Chen, J., Yang, P., Qiao, X. & Tian, F., 2007. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian soils: distribution and toxicity assessment. *J. Environ. Monitoring*, 9: pp. 199-204.
- Weiss, P., 1998. Persistente organische Schadstoffe in Hintergrund-Waldgebieten Österreichs. M-097. Umweltbundesamt, Wien.
- Weiss, P., Lorbeer, G. & Scharf, S., 2000. Regional aspects and statistical characterisation of the load with semivolatile organic compounds at remote Austrian forest sites. *Chemosphere*, 40: pp. 1159-1171.
- Wilcke, W., 2000. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil - a Review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163: pp. 229-248.
- Wilcke, W., 2007. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma*, 141: pp. 157-166.
- Wilcke, W. & Amelung, W., 2000. Persistent organic pollutants in native grassland soils along a climosequence in North America. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64(163): pp. 2140-2148.
- Wilcke, W., Krauss, M., Safronov, G., Fokin, A.D. & Kaupenjohann, M., 2006. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in soils of the Moscow region: Concentrations and small-scale distribution along an urban-rural transect. *Environ. Pollut.*, 141: pp. 327-335.
- Wilcke, W. & Zech, W., 1998. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in bulk soil and particle size separates of soils in a rural community. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*(161): pp. 289-295.
- Wild, S.R. & Jones, K.C., 1995a. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget. *Environmental Pollution*, 88: pp. 91-108.

Wild, S.R. & Jones, K.C., 1995b. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget. *Environmental Pollution*, 88: pp. 91-108.

## Annexes



**Annexe 1: Données relatives aux sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP<sub>16</sub> et en PCB<sub>7</sub> en mg/kg**

N°	Lieu	Cant.	altit.	Utilisation	Type de sol	Formes d'humus	C <sub>org</sub> (%)			HAP <sub>16</sub> (mg/kg)				PCB <sub>7</sub> (mg/kg)				
							0-20cm	0-20cm	0-10cm	(1), 1995/99	(2), 1985/89	(4), 2002	(1), 1995/99	(3), 1985/89	(4), 2002	(1), 1995/99	(3), 1985/89	(4), 2002
1	Tänikon	TG	537	Prairie intensive	limon argileux	mull	3.8	0.247	0.235	0.336	0.0097	0.0015	0.0010					
2	Zürich	ZH	668	Forêt de conifères	limon	mull avec moder	3.4		0.4	0.438		0.009	0.0058					
3	Payerne	VD	488	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.2			0.204			0.0011					
4	Conthey	VS	478	Cult. fruitières	sable limoneux	mull	1.7			0.110			0.0006					
5	La Neuveville	BE	475	Viticulture	sable limoneux	mull	1.6			0.582			0.0021					
6	Gründelwald	BE	1915	Prairie extensive	limon argileux	mull avec moder	5.8			0.062			0.0006					
7	Oberstammheim	ZH	581	Forêt de conifères	limon	mull	3.2			0.163			0.0021					
8	Rothenfluh	BL	695	Forêt de feuillus	limon argileux	mull	4.8			0.357			0.0028					
9	Binningen	BL	324	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.1		0.451	0.462		0.0024	0.0022					
10	Gais	AR	935	Prairie extensive	limon	mull humide	4.2			0.150			0.0013					
11	La Sarraz	VD	515	Grandes cultures	limon	mull	1.8			0.250			0.0018					
12	Aristau	AG	380	S/Prairie à litière	argile limoneuse	mull humide	4.9			0.230			0.0016					
13	Wiedlisbach	BE	455	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.4						0.0063					
14	Dübendorf	ZH	440	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.5			0.247			0.0023					
15	Ins	BE	433	Grandes cultures	argile limoneuse	anmoor	15.1			0.347			0.0019					
16	Mühlebach	VS	1220	Prairie intensive	limon sableux	mull	3.8			0.067			0.0008					
17	Niedermuhlem	BE	945	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.7			0.121			0.0016					
18	Langenthal	BE	525	Forêt de conifères	silt limoneux	mull avec moder	7.0		0.578	0.508		0.012	0.0060					
19	Wettingen	AG	685	Forêt de feuillus	limon argileux	mull	3.1						0.0032					
20	Roggwil	TG	460	Cult. fruitières	limon	mull	2.0			0.149			0.0015					
21	Köniz	BE	565	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.5	0.208		0.581	0.0082		0.0035					
22	Staffelbach	AG	675	Forêt de conifères	limon sableux	mull avec moder	4.0			0.286			0.0033					
23	Möhlin	AG	343	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.3			0.241			0.0024					
24	Niederlenz	AG	387	Forêt de feuillus	limon sableux	mull	2.8		0.179	0.177		0.0056	0.0033					
25	Schleitheim	SH	545	Grandes cultures	argile	mull	2.3	0.068		0.144	0.0083		0.0015					
26	Avully	GE	428	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.1			0.432			0.0012					
27	Jussy	GE	505	Forêt de feuillus	limon	mull	2.4		0.098			0.0023	0.0019					
28	Leuggem	AG	465	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.4			0.134			0.0014					
29	Eschenbach	LU	450	Grandes cultures	limon argileux	mull	2.3			0.158			0.0018					
30	Ebikon	LU	635	Prairie intensive	limon sableux	mull	2.7			0.099			0.0012					
31	Coffrane	NE	775	Grandes cultures	limon	mull	2.2			2.690			0.0013					
32	La Brévine	NE	1215	Prairie extensive	argile limoneuse	mull	8.4		0.142	0.157		0.0017	0.0011					
33	Mollis	GL	431	Prairie intensive	silt argileux	mull humide	4.6	0.145		0.467	0.011		0.0023					
34	Elm	GL	1880	Prairie extensive	limon argileux	mull	5.0			0.079			0.0009					
35	Le Cerneux-Peq.	NE	1093	Prairie intensive	limon	mull	3.3			0.222			0.0008					
36	Hochdorf	LU	500	Grandes cultures	limon	mull	2.0	0.06		0.140	0.0077		0.0014					
37	Ependes	FR	735	Prairie intensive	limon sableux	mull	2.8			0.096			0.0015					
38	Koppigen	BE	478	Grandes cultures	limon	mull	1.7	0.199		0.246	0.0091		0.0013					
39	Kiesen	BE	534	Grandes cultures	limon	mull	3.0	0.085		0.149	0.0101		0.0015					
40	St. Cierges	VD	851	Forêt de conifères	limon sableux	moder	4.9			0.364			0.0025					
41	Kyburg-Buchegg	SO	464	S/Prairie extensive	limon	mull	2.7		0.104	0.158		0.0009	0.0009					
42	Galmwald	FR	580	Forêt de feuillus	limon sableux	mull avec moder	2.9			0.104			0.0019					
43	Orbe	VD	622	Forêt de feuillus	limon sableux	mull	3.0		0.219	0.138		0.0031	0.0020					
44	Hendschiken	AG	417	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.4			0.150			0.0022					
45	Alpthal	SZ	1180	Forêt de conifères	limon argileux	mull humide	12.3			0.305			0.0044					
46	Vallon	FR	439	Grandes cultures	argile limoneuse	mull	2.3			0.122			0.0013					
47	Davos	GR	1655	Forêt de conifères	sable limoneux	humus brut	11.9		0.187	0.116		0.0037	0.0017					
48	Oberriet	SG	409	Grandes cultures	tourbe	tourbe	13.8	0.198	0.145	0.226	0.016	0.0026	0.0023					
49	Unterschächen	UR	1100	Prairie intensive	limon argileux	mull	4.7			0.119			0.0015					
50	Realp	UR	2120	Prairie extensive	sable limoneux	mull	4.3		0.05	0.054		0.0009	0.0008					
51	Wartau	SG	464	Cult. maraichères	sable limoneux	mull	1.4			0.049			0.0007					
52	Krummenau	SG	1338	Prairie extensive	limon	mull	4.2		0.314	0.157		0.0017	0.0012					
53	Gempen	SO	626	Grandes cultures	argile limoneuse	mull	2.8			0.423			0.0016					

S/ Site de protection (réserve naturelle ou site de protection des eaux)

(1) Berset J.D. et Holzer R., 1995: 18 sites NABO choisis parmi les premiers prélèvements (1985/89), profondeur de piqûre 0-20 cm, KOH-saponification, Hexan/Methanol

(2) Bucheli et al., 2004: 23 sites NABO choisis parmi un prélèvement supplémentaire (2002), profondeur de piqûre 0-10 cm, extraction au soxhlet

(3) Schmid P. et al., 2005: 23 sites NABO choisis parmi un prélèvement supplémentaire (2002), profondeur de piqûre 0-10 cm, extraction au soxhlet

(4) Cette étude: troisième prélèvement NABO (1995/99), profondeur de piqûre 0-20cm, extraction au soxhlet

**Annexe 1: Données relatives aux sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP<sub>16</sub> et en PCB<sub>7</sub> en mg/kg (suite)**

N°	Lieu	Cant.	altit.	Utilisation	Type de sol	Formes d'humus	C <sub>org</sub> (%)	HAP <sub>16</sub> (mg/kg)				PCB <sub>7</sub> (mg/kg)			
								(1), 1995/99 0-20cm	(2), 1985/89 0-20cm	(4), 2002 0-10cm	(4), 1995/99 0-20cm	(1), 1985/89 0-20cm	(3), 2002 0-10cm	(4), 1995/99 0-20cm	
54	Zuzwil	BE	557	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.1	0.064	0.066	0.069	0.0065	0.0011	0.0008		
55	Nyon	VD	440	Viticulture	limon	mull	1.1	0.575		1.034	0.0119		0.0009		
56	Trub	BE	998	Grandes cultures	silt limoneux	mull	3.1	0.079		0.089	0.0173		0.0010		
57	St. Stephan	BE	1030	S/prairie sèche	argile limoneuse	mull	4.0	0.091		0.072	0.0172		0.0006		
58	Mels	SG	910	Forêt de conifères	limon	moder	6.1	0.168	0.167	0.140	0.0246	0.0027	0.0020		
59	Dällikon	ZH	425	Prairie intensive	limon	mull humide	2.9	0.092		0.237	0.0152		0.0021		
60	Entlebuch	LU	955	Prairie intensive	limon sableux	mull humide	3.7			0.158			0.0009		
61	Winterthur	ZH	445	Parc municipal	limon	mull	2.1	0.439	0.619	0.646	0.0192	0.0026	0.0017		
62	Bettlach	SO	1065	Forêt de feuillus	silt argileux	mull avec moder	4.2	0.26	0.161	0.176	0.029	0.0032	0.0020		
63	Oensingen	SO	450	Grandes cultures	limon argileux	mull	2.0			0.219			0.0011		
64	Duggingen	BL	375	Cult. fruitières	limon argileux	mull	4.1			0.264			0.0018		
65	Cornol	JU	482	Grandes cultures	silt limoneux	mull	1.2			0.234			0.0009		
66	St. Ursanne	JU	540	Forêt de feuillus	limon argileux	mull	6.2			0.175			0.0017		
67	Method	VD	432	Cult. maraichères	tourbe	argile	22.9			0.350			0.0017		
68	Etoy	VD	435	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.4			0.159			0.0006		
69	Attalens	FR	818	Prairie intensive	limon	mull	3.2	0.07		0.097	0.0074		0.0006		
70	Disentis	GR	1105	Prairie intensive	limon sableux	mull	3.5			0.097			0.0008		
71	Lohn	GR	1818	Prairie extensive	limon	mull	4.9			0.081			0.0009		
72	Bivio	GR	2118	Prairie extensive	limon	mull	6.3			0.064			0.0008		
73	Alvaneu	GR	1560	Forêt de conifères	limon	moder	5.6			0.097			0.0018		
74	Mörschwil	SG	526	Prairie intensive	limon argileux	mull	5.0			0.187			0.0019		
75	Zernez	GR	2400	S/gazon alpin	limon sableux	mull	3.6			0.032			0.0005		
76	Sent	GR	1690	Forêt de conifères	limon sableux	mull avec moder	5.2			0.079			0.0013		
77	Paspels	GR	830	Grandes cultures	silt limoneux	mull	2.4			0.038			0.0007		
78	Igis-Landquart	GR	532	Grandes cultures	silt limoneux	mull	3.3			0.222			0.0015		
79	Pailly	VD	684	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.0			0.484			0.0009		
80	Chevèze	JU	538	Grandes cultures	silt limoneux	mull	1.5			0.087			0.0008		
81	Gsteig	BE	1355	Forêt de conifères	limon	mull	4.4			0.183			0.0018		
82	Kappelen	BE	441	Forêt de feuillus	limon sableux	mull	4.3		0.13	0.181		0.0027	0.0020		
83	Wald	ZH	1040	Forêt de conifères	limon	mull avec moder	7.6			0.486			0.0083		
84	Rifferswil	ZH	597	S/Haut marais	tourbe	argile	42.8			0.853			0.0119		
85	Frauenfeld	TG	383	Forêt de feuillus	silt limoneux	mull	5.3			0.675			0.0020		
86	Lützelflüh	BE	618	Grandes cultures	limon sableux	mull	1.8			0.125			0.0011		
87	Klarsreuti	TG	559	Grandes cultures	limon	mull	1.5			0.121			0.0009		
88	L'Abbaye	VD	1358	Forêt de conifères	limon	mull	10.9			0.259			0.0021		
89	St. Moritz	GR	1825	S/Haut marais	tourbe	argile	37.8			0.471			0.0039		
90	Sta. Maria i.C.	GR	1245	Forêt de conifères	sable limoneux	moder	11.8			0.152			0.0035		
91	Campo	TI	1517	Forêt de conifères	limon	moder	6.9			0.092			0.0020		
92	Novaggio	TI	1080	Forêt de feuillus	limon	mull avec moder	10.6		0.15	0.161		0.0078	0.0057		
93	Marthalen	ZH	405	Forêt de feuillus	limon	mull	2.2			0.084			0.0014		
94	S. Antonino	TI	209	Cult. maraichères	limon sableux	mull	1.8		0.06	0.071		0.0012	0.0019		
95	Coldrerio	TI	336	Grandes cultures	limon	mull	1.2			0.243			0.0019		
96	Gudo	TI	265	Viticulture	sable limoneux	mull	3.7			0.068			0.0024		
97	Lugano	TI	273	Parc municipal	limon sableux	mull	2.3			8.465			0.0042		
98	Erstfeld	UR	455	Prairie intensive	limon sableux	mull	4.4	0.208	0.231	0.195	0.0154	0.0084	0.0063		
99	Visp	VS	830	Forêt de conifères	limon sableux	mull avec moder	5.0		0.41	0.326		0.0033	0.0029		
100	St. Martin	VS	2340	Prairie extensive	limon sableux	mull	4.9			0.110			0.0007		
101	Chamoson	VS	730	Viticulture	limon sableux	mull	1.9			0.629			0.0020		
102	Vouvry	VS	379	Grandes cultures	silt	mull	1.1			0.479			0.0010		
103	Härkingen	SO	431	Grandes cultures	limon	mull	2.3						0.0060		
104	Seebodenalp	SZ	1025	Prairie extensive	limon	mull	3.9		0.075	0.106		0.0013	0.0012		
105	Chaumont	NE	1138	Prairie intensive	limon argileux	mull	5.8			0.225			0.0013		

S/ Site de protection (réserve naturelle ou site de protection des eaux)

(1) Berset J.D. et Holzer R., 1995: 18 sites NABO choisis parmi les premiers prélèvements (1985/89), profondeur de piqûre 0-20 cm, KOH-saponification, Hexan/Methanol

(2) Bucheli et al., 2004: 23 sites NABO choisis parmi un prélèvement supplémentaire (2002), profondeur de piqûre 0-10 cm, extraction au soxhlet

(3) Schmid P. et al., 2005: 23 sites NABO choisis parmi un prélèvement supplémentaire (2002), profondeur de piqûre 0-10 cm, extraction au soxhlet

(4) Cette étude: troisième prélèvement NABO (1995/99), profondeur de piqûre 0-20cm, extraction au soxhlet

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés

Numéro du site:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Description du site</b>									
Altitude	537	668	488	478	475	1'915	581	695	324
Utilisation du sol	Prairies intensives	Forêt de conifères	Grandes cultures	Cultures fruitières	Viticulture	Prairies extensives	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Grandes cultures
Température annuelle moyenne (°C)	7.1	7.9	8.2	8.5	9.4	6	7.3	7.6	9
Précipitations annuelles moyennes	1'173	1'128	1'023	575	1'058	1'251	967	947	790
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	3'555	6'499	1'891	1'909	3'443	1'394	1'404	1'408	6'286
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Ville, ind. chim.
Distance à la source principale d'ér	0,3	1.5	0.3	0.5	0.4	>3	1.5	2	0.75
Type d'immission	semi-rural	résidentiel	semi-rural	semi-rural	semi-rural	isolé	rural	rural	agglomérat.
Position par rapport à la couche d'inversion	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus haut	plus bas	même niveau	plus bas
Type d'humus	mull	mull (moder)	mull	mull	mull	mull (moder)	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>									
C <sub>org</sub> (% MS)	3.8	3.4	1.2	1.7	1.6	5.8	3.2	4.8	1.1
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	6.7	4.7	6.5	7.2	7.4	3.6	5.1	6.7	4.9
<b>HAP (µg/kg<sub>av</sub>)</b>									
<b>HAP<sub>16</sub></b>	336	438	204	110	582	62	163	357	462
NAP naphthaline	9.1	8.6	6.7	11	18	13	7.4	35	7.6
ACY acénaphthylène	0.83	2.7	0.92	0.46	3.6	0.50	1.0	1.3	2.6
ACE acénaphthène	3.8	2.2	1.5	6.2	4.3	3.1	2.5	2.6	2.7
FLU fluorène	2.6	2.3	1.3	3.2	5.1	3.2	1.8	2.6	2.5
PHE phénanthrène	31	36	67	19	108	27	16	97	59
ANT anthracène	2.8	3.5	1.2	1.1	3.9	<0.2	0.99	1.3	2.2
FLT fluoranthène	57	71	27	13	107	4.6	27	48	76
PYR pyrène	44	54	17	9.9	82	2.6	20	32	57
BaA benzo[a]anthracène	27	29	9.2	6.3	44	0.85	8.7	14	28
CHR chrysène	32	42	14	7.9	48	1.5	15	23	39
BbF benzo[b]fluoranthène	32	45	14	7.5	32	1.6	17	25	44
BkF benzo[k]fluoranthène	17	20	7.3	3.9	24	0.79	7.8	11	25
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	29	56	13	7.4	41	1.6	14	23	45
IPY idéno[1,2,3-cd]pyrène	22	29	11	5.5	26	1.2	11	18	33
DBA dibenz[a,h]anthracène	5.7	7.7	2.5	1.3	2.2	<0.04	2.3	4.0	6.9
BPE benzo[g,h,i]pérylène	22	29	11	6.0	31	1.4	11	19	32
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>									
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	3.1	3.3	0.86	0.71	14	0.35	2.4	1.7	
RET rétène	1.1	2.0	0.89	0.76	17	0.81	3.3	3.6	
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	0.95	1.3	0.68	0.29	16	0.15	1.4	1.3	
PER pérylène	5.2	62	1.3	2.1	25	0.41	1.0	1.0	
COR coronène	13	20	4.9	3.6	19	1.5	15	14	
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.33	0.34	0.13	0.16	0.39	0.10	0.31	0.14	0.25
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.41	0.40	0.37	0.32	0.50	0.31	0.29	0.28	0.38
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.56	0.58	0.58	0.54	0.63	0.54	0.58	0.61	0.57
<b>PCB (µg/kg<sub>av</sub>)</b>									
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0.98	5.8	1.1	0.63	2.1	0.61	2.1	2.8	2.2
PCB 28	<0.04	<0.04	0.13	<0.04	0.12	<0.04	<0.04	0.10	0.10
PCB 52	<0.04	0.19	0.10	<0.04	0.39	0.14	<0.04	0.41	0.24
PCB 101	<0.4	0.73	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.42	<0.4
PCB 118	<0.2	0.25	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
PCB 138	<0.5	1.2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	2.0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.79	0.73	0.54
PCB 180	<0.3	1.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.53	0.50	0.30

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H-cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)

Numéro du site:	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>Description du site</b>										
Altitude	935	515	380	455	440	433	1'220	945	525	685
Utilisation du sol	Prairies extensives	Grandes cultures	Streuwiese	Grandes cultures	Grandes cultures	Grandes cultures	Prairies extensives	Grandes cultures	Forêt de conifères	Forêt de feuillus
Température annuelle moyenne (°C)	8.5	8.3	8.4	8.5	7.9	9.1	4.1	6.9	8.1	7.6
Précipitations annuelles moyennes	1'523	939	1'206	1'266	1'128	994	1'044	1'176	1'163	1'007
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	2'165	2'037	1'724	1'490	3'985	1'502	604	1'411	3'131	4'608
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Industrie- /Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'é <sub>r</sub>		1.5	1.2	0.8	0.5	1.5	2	3	2	2.5
Type d'immission	rural	rural	rural	semi-rural	résidentiel and	semi-rural	rural	rural	semi-rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	même niveau
Type d'humus	hydromull	mull	hydromull	mull	mull	wet mull	mull	mull	mull (moder)	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	4.2	1.8	4.9	1.4	1.5	15	3.8	1.7	7.0	3.1
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	4.8	6.6	5.6	5.1	7.3	6.0	5.4	5.1	3.2	4.4
<b>HAP (µg/kg<sub>dwt</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	150	250	230		247	347	67	121	508	
NAP naphthaline	6.9	9.0	21		5.8	45	5.6	8.7	20	7.4
ACY acénaphthylène	0.53	0.81	0.72		0.54	1.1	<0.4	<0.4	1.5	1.7
ACE acénaphthène	1.6	2.0	4.6		3.3	12	1.0	2.3	3.7	1.5
FLU fluorène	1.3	1.5	4.3		2.1	7.2	1.0	2.1	4.5	2.1
PHE phénanthrène	18	92	53		83	101	34	44	67	21
ANT anthracène	0.65	0.68	1.00		0.43	1.3	<0.2	0.72	2.0	1.6
FLT fluoranthène	22	28	29		31	38	6.6	14	79	40
PYR pyrène	17	19	21		21	25	3.6	9.2	59	29
BaA benzo[a]anthracène	9.2	11	10		11	13	1.6	4.2	24	13
CHR chrysène	14	17	18		15	18	2.5	7.0	44	22
BbF benzo[b]fluoranthène	14	17	16		18	20	2.5	6.6	51	24
BkF benzo[k]fluoranthène	6.8	8.5	7.7		11	10	1.7	4.0	24	14
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	13	15	14		16	20	2.3	5.8	52	
IPY idéno[1,2,3-cd]pyrène	10	12	12		13	15	1.4	5.3	35	18
DBA dibenz[a,h]anthracène	2.6	3.6	2.8		2.4	3.9	0.58	0.72	7.0	3.1
BPE benzo[g,h,i]pérylène	12	13	13		13	15	2.5	5.6	32	16
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	1.4	1.1	1.6		5.5		0.73	1.1	4.5	3.4
RET rétène		0.75	1.5		1.8		1.0	1.3	2.8	3.9
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1.7	1.3	1.5		8.3		0.80	1.3	2.5	2.1
PER pérylène	3.5	2.4	4.6		35		1.6	2.2	5.1	
COR coronène	12	6.5	14		41		1.9	4.7	25	29
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.24	0.10	0.27		0.31	0.11	0.13	0.09	0.11	0.25
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.36	0.37	0.33		0.38	0.39	0.44	0.33	0.36	0.39
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.55	0.56	0.64		0.65	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61
<b>PCB (µg/kg<sub>dwt</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	1.3	1.8	1.6		6.3	2.3	1.9	0.83	1.6	6.1
PCB 28	0.07	0.18	0.05		0.11	0.19	0.09	<0.04	0.06	0.15
PCB 52	<0.04	0.48	0.15		0.53	0.46	0.50	0.17	0.19	0.24
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4		0.92	<0.4	0.48	<0.4	<0.4	0.76
PCB 118	<0.2	<0.2	<0.2		0.53	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.54
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5		1.2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.5
PCB 153	<0.5	<0.5	<0.5		1.8	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.7
PCB 180	<0.3	<0.3	<0.3		1.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	1.2

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)

Numéro du site:	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
<b>Description du site</b>										
Altitude	460	565	675	343	387	545	428	505	465	450
Utilisation du sol	Cultures fruitières	Grandes cultures	Forêt de conifères	Grandes cultures	Forêt de feuillus	Grandes cultures	Grandes cultures	Forêt de feuillus	Grandes cultures	Grandes cultures
Température annuelle moyenne (°C) 8.3	7.7	7.6	9	8.3	8.4	9.2	9.2	8.5	8.3	
Précipitations annuelles moyennes	1'179	1'000	1'144	1'013	1'007	816	930	872	992	1'159
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	1'756	4'142	1'717	3'069	3'165	1'297	3'089	1'391	1'808	2'294
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Industrie-gelände	Zement-industrie	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier
Distance à la source principale d'ér <sub>1</sub>	0.2	1.5	2	1	1.5	0.75	1.7	2.5	0.05	
Type d'immission	semi-rural	agglomérat.	rural	semi-rural	semi-rural	rural	semi-rural	semi-rural	rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus bas	plus bas	même niveau	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas
Type d'humus	mull	mull	mull (moder)	mull	mull	mull	mull	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	2.0	1.5	4.0	1.3	2.8	2.3	1.1	2.4	1.4	2.3
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	5.4	5.1	3.4	6.2	4.8	7.2	5.2	4.2	5.3	5.3
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	149	581	286	241	177	144	432	134	158	
NAP naphthaline	12	9.6	6.5	8.1	8.8	15	7.2	6.4	6.9	15
ACY acénaphthylène	0.76	2.4	1.2	0.80	0.90	<0.4	1.4	1.1	0.57	0.86
ACE acénaphthène	2.2	2.6	1.9	1.9	2.4	1.9	2.9	0.86	2.0	3.2
FLU fluorène	2.4	3.9	1.9	1.9	1.5	1.8	2.6	1.8	2.1	2.7
PHE phénanthrène	46	92	21	53	18	62	74	33	58	45
ANT anthracène	0.40	6.1	1.7	0.90	1.1	<0.2	4.1	0.91	<0.2	0.46
FLT fluoranthène	19	101	42	33	27	15	70	20	13	19
PYR pyrène	13	77	33	23	20	10	53	14	8.1	14
BaA benzo[a]anthracène	6.6	43	16	13	9.6	2.9	36	6.9	4.4	5.1
CHR chrysène	9.5	47	27	21	18	6.7	40	9.9	6.7	10
BbF benzo[b]fluoranthène	9.9	45	30	21	18	6.7	34	8.5	7.6	10
BkF benzo[k]fluoranthène	6.3	24	14	11	8.6	3.6	19	4.8	3.8	5.8
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	8.1	50	47	19	15	5.5	33	7.1	7.1	9.1
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	6.9	34	20	14	13	5.2	22	7.1	5.8	7.6
DBA dibenz[a,h]anthracène	0.97	8.6	3.7	4.5	2.7	1.1	7.8	1.2	1.2	2.6
BPE benzo[g,h,i]pérylène	6.5	35	19	15	13	6.4	24	7.2	6.2	8.0
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	1.1	6.6	1.9	1.4	1.4	4.9	1.9	1.2	2.9	
RET rétène	1.3	1.4	1.6	1.6	1.6	1.4	1.6	1.4	4.3	
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1.2	3.0	2.1	1.9	1.9	1.9	1.6	1.7	4.0	
PER pérylène	1.8	7.4	2.3	2.3	3.8	3.8	1.7	25		
COR coronène	5.5	14	8.0	9.7	8.7	6.0	3.7	12		
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.14	0.27	0.35	0.14	0.32	0.09	0.26	0.16	0.10	0.13
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.36	0.41	0.40	0.33	0.44	0.28	0.41	0.38	0.32	0.41
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.60	0.57	0.63	0.58	0.54	0.58	0.60	0.57	0.57	0.59
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	1.5	3.5	3.3	2.4	3.3	1.5	1.2	1.9	1.4	1.8
PCB 28	0.07	0.10	<0.04	0.15	<0.04	0.13	0.12	0.08	0.14	0.14
PCB 52	0.19	0.34	0.08	0.32	0.07	0.29	0.31	0.19	0.33	0.31
PCB 101	<0.4	0.54	0.44	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
PCB 118	<0.2	<0.2	0.24	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
PCB 138	<0.5	0.63	0.87	<0.5	0.89	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	1.1	1.0	0.68	1.1	<0.5	<0.5	0.58	<0.5	<0.5
PCB 180	<0.3	0.65	0.61	0.38	0.62	<0.3	<0.3	0.32	<0.3	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)

Numéro du site:	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
<b>Description du site</b>										
Altitude	635	775	1'215	431	1'880	1'093	500	735	478	534
Utilisation du sol	Prairies intensives	Grandes cultures	Prairies extensives	Prairies intensives	Prairies extensives	Prairies intensives	Grandes cultures	Prairies intensives	Grandes cultures	Grandes cultures
Température annuelle moyenne (°C) 8.3		6.8	4.8	8.8	5.7	5.3	8.3	7.7	8.5	8.3
Précipitations annuelles moyennes	1'159	1'146	1'375	1'699	1'587	1'400	1'154	963	1'266	952
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	3'910	986	730	1'689	974	816	3'906	2'153	2'032	916
Situation des émissions	Zone habitée	Teerrecycling-anlage	Zone habitée	Industrie-gelände	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Trafic routier
Distance à la source principale d'ér	0,8	1,5	5	0,1	2,7	0,25	0,5	2,5	0,2	0,5
Type d'immission	semi-rural	semi-rural	isolé	semi-rural	isolé	rural	semi-rural	semi-rural	semi-rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	même niveau	même niveau	plus haut	plus bas	plus haut	plus haut	plus bas	même niveau	plus bas	plus bas
Type d'humus	mull	mull	mull	hydromull	mull	mull	mull	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	2.7	2.2	8.4	4.6	5.0	3.3	2.0	2.8	1.7	3.0
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	5.0	6.5	5.2	6.2	4.3	5.7	6.4	5.3	5.9	7.3
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	99	2'690	157	467	79	222	140	96	246	149
NAP naphthaline	12	19	12	32	14	9.7	18	13	7.6	13
ACY acénaphthylène	<0.4	26	0.58	0.90	<0.4	0.88	0.40	<0.4	1.2	0.41
ACE acénaphthène	1.7	3.0	5.1	10	2.2	1.6	2.1	1.7	1.9	4.4
FLU fluorène	1.2	12	2.9	6.7	3.0	1.7	1.7	1.4	1.6	2.4
PHE phénanthrène	19	226	26	89	36	29	60	26	56	34
ANT anthracène	0.34	19	0.51	3.0	<0.2	0.91	<0.2	0.48	0.91	0.51
FLT fluoranthène	9.9	431	22	78	5.9	31	14	12	27	19
PYR pyrène	7.4	325	16	57	3.3	23	8.2	8.3	21	14
BaA benzo[a]anthracène	4.5	234	6.0	28	1.0	16	4.3	4.0	11	7.0
CHR chrysène	7.3	259	12	36	2.0	20	6.3	5.4	16	9.4
BbF benzo[b]fluoranthène	8.6	252	13	29	2.0	19	5.9	5.0	20	11
BkF benzo[k]fluoranthène	4.0	164	7.1	16	1.1	11	2.9	2.7	12	5.4
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	8.3	285	11	29	3.0	20	4.9	4.7	22	9.4
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	5.9	206	10	24	2.4	18	5.7	5.3	21	7.9
DBA dibenz[a,h]anthracène	1.3	41	1.6	4.6	<0.04	3.1	0.93	0.64	4.2	1.9
BPE benzo[g,h,i]pérylène	6.5	189	10	23	2.6	17	5.6	5.3	23	9.3
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE		29		5.1	1.4	2.3	1.6	1.5		1.1
RET rétène		5.1		2.5	2.1	2.7	2.6	2.0		1.1
cPYR cyclopenta[cd]pyrène		19		2.7	2.2	2.8	2.4	2.2		1.3
PER pérylène		55		7.2	4.5	4.4	3.2	3.0		3.0
COR coronène		77		10	2.6	8.2	4.8	3.7		6.3
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.16	0.55	0.19	0.17	0.09	0.22	0.12	0.15	0.13	0.15
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.47	0.64	0.34	0.33	0.31	0.43	0.37	0.32	0.42	0.39
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.58	0.57	0.60	0.56	0.58	0.58	0.60	0.58	0.59	0.57
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	1.2	1.3	1.1	2.3	0.89	0.76	1.4	1.5	1.3	1.5
PCB 28	<0.04	0.12	<0.04	0.12	0.07	0.06	0.15	0.06	0.10	0.07
PCB 52	0.09	0.30	0.10	0.38	0.21	0.13	0.33	0.15	0.28	0.16
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
PCB 118	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	<0.5	<0.5	0.63	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 180	<0.3	<0.3	<0.3	0.33	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)**

Numéro du site:	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
<b>Description du site</b>										
Altitude	851	464	580	622	417	1'180	439	1'655	409	1'100
Utilisation du sol	Forêt de conifères	Prairies extensives	Forêt de feuillus	Forêt de feuillus	Grandes cultures	Forêt de conifères	Grandes cultures	Forêt de conifères	Grandes cultures	Prairies extensives
Température annuelle moyenne (°C) 7.4	8.5	8.2	8.3	8.2	6.3	8.2	2.6	8	5.4	5.4
Précipitations annuelles moyennes	1'106	1'266	1'023	1'354	1'093	1'652	1'023	1'007	1'334	1'562
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	1'855	1'636	1'984	2'517	1'581	1'400	1'154	1'932	1'751	1'163
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Schiennen-verkehr	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Trafic routier
Distance à la source principale d'ér <sup>1</sup>	1.5	2	0.5	0.2	3	2.7	1.5	1.5	0.2	0.2
Type d'immission	rural	semi-rural	rural	rural	semi-rural	isolé	semi-rural	semi-rural	semi-rural	rural
Position par rapport à la couche d'inversion	même niveau	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	même niveau	plus bas	plus haut	plus bas	plus haut
Type d'humus	moder	mull	mull (moder)	mull	mull	hydromull	mull	raw humus	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	4.9	2.7	2.9	3.0	1.4	12	2.3	12	14	4.7
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	3.5	4.7	3.9	4.3	5.2	5.2	7.6	3.1	5.6	4.7
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	364	158	104	138	150	305	122	116	226	119
NAP naphthaline	13	9.2	7.7	7.1	9.5	26	16	15	36	17
ACY acénaphthylène	1.2	1.0	0.45	0.75	0.54	1.5	<0.4	0.45	0.98	0.47
ACE acénaphthène	2.7	2.9	2.3	1.5	2.4	7.3	2.5	3.0	13	2.9
FLU fluorène	3.0	1.8	1.4	1.0	1.7	6.9	1.9	2.4	5.9	3.1
PHE phénanthrène	33	16	15	17	29	96	50	33	61	36
ANT anthracène	1.6	0.72	0.41	0.63	0.66	0.80	0.20	0.50	1.2	0.54
FLT fluoranthène	58	22	14	22	19	28	13	13	26	15
PYR pyrène	45	17	11	17	15	20	8.4	9.5	16	11
BaA benzo[a]anthracène	22	11	5.1	6.2	7.9	7.4	3.0	4.1	7.4	5.0
CHR chrysène	34	14	8.5	12	12	19	4.9	6.5	11	5.9
BbF benzo[b]fluoranthène	33	12	8.7	12	12	24	5.0	6.7	11	4.8
BkF benzo[k]fluoranthène	17	7.3	4.2	6.6	6.3	7.7	2.6	3.3	5.5	2.6
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	43	17	8.4	15	11	18	4.3	5.2	8.9	5.7
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	26	12	7.6	8.5	10	16	4.0	5.3	9.4	3.7
DBA dibenz[a,h]anthracène	5.0	2.4	1.2	1.7	1.5	2.8	0.46	0.70	1.5	0.45
BPE benzo[g,h,i]pérylène	25	12	7.2	9.4	11	22	4.5	6.7	9.6	4.6
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	7.4	1.9	1.6	1.7	2.8	1.6	1.8	2.1	3.6	3.6
RET rétène	7.5	2.3	1.6	1.7	68	2.1	3.8	2.3	22	22
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	5.2	2.3	1.8	2.0	3.2	2.1	2.2	2.2	4.2	4.2
PER pérylène	12	3.6	3.2	3.3	78	3.2	3.6	5.8	6.4	6.4
COR coronène	23	4.9	5.1	7.0	32	3.7	5.1	6.8	7.8	7.8
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.31	0.30	0.18	0.24	0.13	0.32	0.10	0.12	0.13	0.11
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.36	0.45	0.32	0.40	0.35	0.69	0.28	0.30	0.30	0.22
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.57	0.58	0.56	0.57	0.57	0.65	0.47	0.64	0.61	0.58
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	2.5	0.86	1.9	2.0	2.2	4.4	1.3	1.7	2.3	1.5
PCB 28	0.04	0.04	<0.04	<0.04	0.05	0.13	0.08	0.09	0.10	0.06
PCB 52	0.14	0.10	0.09	0.08	0.15	0.38	0.19	0.20	0.34	0.16
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	1.5	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
PCB 118	0.22	<0.2	0.23	<0.2	0.29	0.29	<0.2	0.23	0.25	<0.2
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	0.54	<0.5	0.70	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	0.78	<0.5	0.65	0.62	0.65	0.85	<0.5	<0.5	0.57	0.50
PCB 180	0.53	<0.3	0.35	0.34	0.38	0.52	<0.3	<0.3	0.33	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)**

Numéro du site:	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
<b>Description du site</b>										
Altitude	2'120	464	1'338	626	557	440	998	1'030	910	425
Utilisation du sol	Prairies extensives	Cult. maraîchères	Prairies extensives	Grandes cultures	Grandes cultures	Viticulture	Grandes cultures	Prairies extensives	Forêt de conifères	Cult. maraîchères
Température annuelle moyenne (°C-0.2)	8.8	5.4	7.6	7.7	9.4	4	6	6.7	7.9	
Précipitations annuelles moyennes	2'327	1'047	1'696	947	1'000	944	1'350	1'330	1'397	1'006
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	344	1'866	1'204	1'833	1'844	4'879	1'146	814	2'188	3'425
Situation des émissions	Zone habitée	Trafic routier	Schiessegelände	Zone habitée	Trafic routier	Feureungsanlage	Zone habitée	Holzindustrie	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'émission	>3	0.4	0	3	0.1	0.3	3	0.5	2	0.8
Type d'immission	isolé	semi-rural	rural	rural	rural	semi-rural	rural	rural	rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus bas	plus haut	même niveau	plus bas	plus bas	plus haut	plus bas	plus haut	plus bas
Type d'humus	mull	mull	mull	mull	mull	mull	mull	mull	moder humifié	hydromull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	4.3	1.4	4.2	2.8	1.1	1.1	3.1	4.0	6.1	2.9
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	3.9	7.2	5.3	7.2	6.1	7.2	4.3	6.0	3.5	6.9
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	54	49	157	423	69	1'034	89	72	140	237
NAP naphthaline	9.9	8.9	9.8	21	8.5	13	16	14	11	15
ACY acénaphthylène	<0.4	<0.4	<0.4	0.66	<0.4	4.5	0.43	<0.4	0.42	0.47
ACE acénaphthène	3.1	2.4	1.9	2.1	<0.8	2.0	4.1	1.8	3.8	3.3
FLU fluorène	2.1	1.3	1.5	1.9	0.65	5.0	2.6	1.5	2.7	2.2
PHE phénanthrène	29	14	25	55	14	133	25	27	26	42
ANT anthracène	<0.2	0.27	0.40	1.4	0.35	9.7	0.30	<0.2	0.52	1.6
FLT fluoranthène	3.7	4.9	16	57	8.8	192	7.4	7.0	19	33
PYR pyrène	1.9	3.6	13	46	6.9	145	5.4	4.6	14	27
BaA benzo[a]anthracène	0.51	1.6	9.9	31	3.3	88	2.8	1.7	5.3	17
CHR chrysène	0.75	2.4	16	39	4.9	105	4.4	2.9	11	20
BbF benzo[b]fluoranthène	0.73	2.2	16	38	5.0	80	5.2	2.8	12	16
BkF benzo[k]fluoranthène	0.39	1.3	7.3	21	2.6	48	2.2	1.6	5.8	9.5
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	0.51	2.0	13	37	4.2	94	4.4	2.6	9.9	17
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	0.66	2.0	12	32	4.4	54	3.9	2.2	8.2	14
DBA dibenz[a,h]anthracène	<0.04	<0.04	1.9	5.9	0.55	12	0.51	0.27	1.4	3.2
BPE benzo[g,h,i]pérylène	1.1	2.1	12	33	4.6	48	4.2	2.8	8.8	15
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	1.3	1.3	1.7	3.0	1.5	12	1.6	1.4		2.6
RET rétène	1.8	1.8	2.1	2.0	2.1	2.6	2.1	2.2		2.6
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1.9	1.9	2.2	2.6	2.0	6.7	2.1	2.0		2.7
PER pérylène	2.7	2.9	4.2	6.8	3.2	10	3.1	2.9		5.7
COR coronène	1.9	0.73	10.0	17	3.0	13	3.9	2.2		8.3
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.09	0.10	0.17	0.16	0.14	0.39	0.10	0.09	0.14	0.18
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.22	0.27	0.39	0.36	0.30	0.45	0.32	0.28	0.35	0.36
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.55	0.59	0.53	0.60	0.62	0.62	0.59	0.59	0.60	0.59
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0.84	0.74	1.2	1.6	0.78	0.91	1.0	0.63	2.0	2.1
PCB 28	0.06	0.04	0.06	0.07	<0.04	0.06	0.09	0.05	<0.04	0.07
PCB 52	0.15	0.10	0.15	0.21	0.06	0.15	0.16	0.13	0.14	0.23
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
PCB 118	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.37
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.63	0.52
PCB 180	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.36	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)

Numéro du site:	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
<b>Description du site</b>										
Altitude	955	445	1'065	450	375	482	540	432	435	818
Utilisation du sol	Prairies intensives	Parc municipal	Forêt de feuillus	Grandes cultures	Cultures fruitières	Grandes cultures	Forêt de feuillus	Cult. maraichères	Grandes cultures	Prairies intensives
Température annuelle moyenne (°C7)		7.1	5.3	7.7	9.1	7.5	8	9.1	9.4	6.8
Précipitations annuelles moyennes	1'796	1'173	1'146	1'054	833	1'055	897	985	944	1'311
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	1'578	4'459	3'257	2'107	1'770	1'159	974	1'266	2'325	2'474
Situation des émissions	Zone habitée	citadin	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Zone habitée	Zement-industrie	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'ér	3,5	0,5	3	1	0,4	1,3	4,25	4	0,5	1
Type d'immission	rural	citadin	rural	semi-rural	semi-rural	rural	rural	semi-rural	semi-rural	rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus bas	plus haut	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus haut
Type d'humus	hydromull	mull	mull (moder)	null	mull	mull	mull	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	3,7	2,1	4,2	2,0	4,1	1,2	6,2	23	1,4	3,2
pH (0,01 M CaCl <sub>2</sub> )	5,2	4,8	4,9	5,3	7,2	5,5	6,9	7,0	5,9	5,8
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	158	646	176	219	264	234	175	350	159	97
NAP naphthaline	12	18	21	13	14	7,9	16	17	9,2	10
ACY acénaphthylène	0,41	5,0	0,84	1,7	0,69	0,84	0,60	1,1	0,67	<0,4
ACE acénaphthène	5,0	1,8	2,3	1,5	6,5	1,2	5,0	7,4	1,4	1,4
FLU fluorène	2,7	2,1	2,4	2,1	3,4	1,3	3,2	3,6	1,5	1,3
PHE phénanthrène	34	51	34	30	43	37	60	32	29	25
ANT anthracène	<0,2	4,2	0,78	1,2	1,00	0,62	0,52	1,9	0,47	0,36
FLT fluoranthène	19	80	23	32	34	45	21	49	20	11
PYR pyrène	14	70	16	24	26	32	14	39	16	8,4
BaA benzo[a]anthracène	8,3	45	6,3	12	15	13	5,8	24	8,5	3,9
CHR chrysène	9,9	51	12	17	20	18	8,7	28	12	5,9
BbF benzo[b]fluoranthène	13	69	16	20	25	19	8,7	36	16	6,4
BkF benzo[k]fluoranthène	6,1	31	5,9	9,7	11	9,6	4,8	17	7,8	3,3
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	12	87	13	21	21	19	8,0	35	14	6,2
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	9,7	59	10	16	18	13	8,5	28	10	6,5
DBA dibenz[a,h]anthracène	1,4	12	1,7	3,0	4,8	3,1	1,1	5,8	1,6	0,86
BPE benzo[g,h,i]pérylène	10	61	11	16	20	13	9,7	28	11	5,7
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	0,88	3,3		1,4	1,7	1,9	1,3	1,8	0,76	0,65
RET rétène	3,0	1,4		1,2	1,2	1,1	1,8	1,3	1,1	1,3
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1,2	2,2		1,5	1,7	1,6	1,6	1,7	1,4	1,3
PER pérylène	4,4	3,3		2,4	5,2	1,8	2,2	10	2,5	2,5
COR coronène	7,5	30		8,2	14	6,1	11	11	4,2	3,7
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0,11	0,27	0,15	0,20	0,20	0,17	0,11	0,21	0,16	0,12
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0,37	0,39	0,35	0,37	0,42	0,37	0,33	0,35	0,45	0,36
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0,59	0,57	0,60	0,58	0,57	0,55	0,59	0,58	0,58	0,57
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0,94	1,7	2,0	1,1	1,8	0,85	1,7	1,7	0,63	0,63
PCB 28	0,07	0,07	<0,04	<0,04	0,07	0,07	0,11	0,06	<0,04	0,05
PCB 52	0,15	0,17	0,12	<0,04	0,17	0,16	0,33	0,13	<0,04	<0,04
PCB 101	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
PCB 118	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,24	<0,2	<0,2	0,26	<0,2	<0,2
PCB 138	<0,5	<0,5	0,52	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
PCB 153	<0,5	0,50	0,55	<0,5	0,55	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
PCB 180	<0,3	<0,3	0,36	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

## Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)

Numéro du site:	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
<b>Description du site</b>										
Altitude	1'105	1'818	2'118	1'560	526	2'400	1'690	830	532	684
Utilisation du sol	Prairies extensives	Prairies extensives	Prairies extensives	Forêt de conifères	Prairies intensives	Gazon alpin	Forêt de conifères	Grandes cultures	Grandes cultures	Grandes cultures
Température annuelle moyenne (°C)	5.4	1.8	-0.7	2.6	8.3	0.2	4.4	9.1	8.5	7.2
Précipitations annuelles moyennes	1'245	1'700	1'173	1'007	1'179	722	696	951	1'005	1'106
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	1'320	412	717	590	1'877	731	1'088	1'654	3'152	1'166
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Zone habitée	Abfallverbrennung	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'ér	0,8	3	3	2	0,5	1,8	1,5	2,5	0,8	1
Type d'immission	rural	rural	isolé	rural	semi-rural	isolé	rural	rural	semi-rural	rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus haut	plus haut	plus haut	plus bas	plus haut	plus haut	plus haut	plus bas	plus bas
Type d'humus	mull	mull	mull	moder/mull	mull	mull	mull (moder)	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	3.5	4.9	6.3	5.6	5.0	3.6	5.2	2.4	3.3	1.0
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	5.1	4.4	4.7	4.3	5.4	4.9	4.9	6.7	7.1	5.1
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	97	81	64	97	187	32	79	38	222	484
NAP naphthaline	7.1	12	12	9.5	15	5.8	8.9	6.5	11	8.4
ACY acénaphthylène	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.78	<0.4	<0.4	<0.4	0.65	0.59
ACE acénaphthène	2.2	2.3	2.8	3.3	4.0	2.3	4.3	1.1	4.7	2.5
FLU fluorène	1.5	3.1	2.5	2.7	2.8	1.4	2.3	0.97	3.8	2.2
PHE phénanthrène	21	50	28	42	46	13	38	13	48	63
ANT anthracène	0.63	<0.2	<0.2	0.24	0.83	<0.2	<0.2	<0.2	4.0	5.1
FLT fluoranthène	11	5.2	4.8	10.0	23	2.4	7.1	3.2	33	86
PYR pyrène	8.6	2.1	2.6	5.8	17	1.4	3.7	2.3	26	69
BaA benzo[a]anthracène	5.5	0.51	0.78	1.7	8.5	0.38	1.1	1.1	15	50
CHR chrysène	6.8	0.84	1.3	3.4	11	0.72	2.2	1.5	15	43
BbF benzo[b]fluoranthène	7.4	0.96	1.7	4.4	12	0.99	2.8	1.4	12	29
BkF benzo[k]fluoranthène	3.6	0.52	0.85	2.0	6.3	0.45	1.3	0.88	7.4	20
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	7.0	0.89	1.3	3.3	12	0.60	2.1	2.0	14	50
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	7.0	0.85	2.6	3.6	13	0.92	2.7	1.3	11	23
DBA dibenz[a,h]anthracène	1.1	<0.04	<0.04	0.56	1.8	<0.04	0.34	0.19	3.2	8.4
BPE benzo[g,h,i]pérylène	6.1	1.1	2.2	3.6	12	1.1	2.4	1.7	13	23
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	0.70	0.43	0.44	0.58	1.0	0.37	0.45	1.4	3.0	6.7
RET rétène	2.7	4.8	1.2	15	1.3	1.1	9.1	3.3	2.7	2.7
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1.2	1.1	1.2	1.2	1.5	1.1	1.1	3.4	3.6	3.7
PER pérylène	3.2	2.1	2.2	2.4	3.8	2.1	2.2	4.2	4.9	9.1
COR coronène	3.2	1.4	2.7	2.7	8.3	1.5	1.9	0.91	8.6	8.1
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.13	0.07	0.09	0.12	0.12	0.10	0.10	0.11	0.17	0.31
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.39	0.31	0.27	0.38	0.33	0.28	0.38	0.33	0.34	0.44
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.67	0.78	0.57	0.82	0.60	0.56	0.83	0.66	0.62	0.57
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0.76	0.91	0.77	1.8	1.9	0.49	1.3	0.69	1.5	0.93
PCB 28	<0.04	0.08	<0.04	<0.04	0.07	<0.04	0.07	<0.04	0.06	0.07
PCB 52	<0.04	0.26	0.16	0.28	0.15	<0.04	0.20	0.11	0.19	0.22
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
PCB 118	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.60	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
PCB 180	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.42	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)**

Numéro du site:	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
<b>Description du site</b>										
Altitude	538	1'355	441	1'040	597	383	618	559	1'358	1'825
Utilisation du sol	Grandes cultures	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Forêt de conifères	Haut-marais	Forêt de feuillus	Grandes cultures	Grandes cultures	Forêt de conifères	Haut-marais
Température annuelle moyenne (°C) 7.5	6	9.4	5.5	7.9	8.3	7.2	7.7	4.5	0.2	
Précipitations annuelles moyennes	1'055	1'315	981	1'727	1'301	887	1'268	919	1'526	722
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	932	1'018	1'063	2'906	1'359	2'896	1'702	1'512	1'115	2'150
Situation des émissions	Zone habitée	Trafic routier	Trafic routier	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Chemische Industrie	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'ér <sup>2</sup>		0.15	0.25	3	1	2	0.2	0.6	>3	1
Type d'immission	rural	rural	semi-rural	rural	semi-rural	semi-rural	rural	semi-rural	rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus bas	plus haut	plus bas	plus haut	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus haut	plus haut
Type d'humus	mull	mull	mull	mull (moder)	tourbe	mull	mull	mull	mull	tourbe
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	1.5	4.4	4.3	7.6	43	5.3	1.8	1.5	11	38
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	5.3	4.0	7.2	3.3	2.9	7.1	5.2	5.5	5.9	4.7
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	87	183	181	486	853	675	125	121	259	471
NAP naphthaline	7.4	20	29	11	99	13	7.0	6.8	22	47
ACY acénaphthylène	<0.4	0.55	0.68	1.3	9.4	1.4	0.58	0.60	0.77	1.0
ACE acénaphthène	<0.8	4.2	10	6.2	36	7.7	1.2	0.84	7.4	23
FLU fluorène	0.78	5.1	4.4	4.6	25	4.7	1.2	0.98	4.4	11
PHE phénanthrène	20	83	51	53	270	58	16	17	52	238
ANT anthracène	0.36	0.29	0.69	2.1	6.4	4.4	0.68	0.53	0.92	1.2
FLT fluoranthène	12	18	17	74	95	108	17	17	37	42
PYR pyrène	8.4	11	13	56	66	93	13	13	26	25
BaA benzo[a]anthracène	4.4	4.2	6.2	23	24	58	8.7	8.2	11	9.3
CHR chrysène	6.6	7.7	9.9	47	44	61	11	11	19	13
BbF benzo[b]fluoranthène	5.8	7.0	8.4	63	40	57	11	9.8	19	13
BkF benzo[k]fluoranthène	3.6	3.5	4.5	24	23	32	5.7	5.1	9.2	6.5
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	4.8	5.2	6.7	43	29	61	13	12	16	9.2
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	5.9	5.6	7.3	36	38	50	8.0	8.3	16	15
DBA dibenz[a,h]anthracène	1.1	1.1	1.6	7.4	8.3	12	1.3	1.4	2.2	2.5
BPE benzo[g,h,i]pérylène	5.9	6.2	9.5	34	39	53	9.7	8.6	17	15
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	1.7	1.9	1.9		7.1	6.3	1.6	1.5	2.4	2.2
RET rétène	2.6	3.4	3.5		36	4.0	1.9	2.4	5.4	185
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	3.5	3.6	3.6		8.8	5.6	2.7	9.3	3.4	3.2
PER pérylène	2.6	2.9	3.4		9.0	16	2.2	1.7	4.0	224
COR coronène	4.1	4.8	8.4		27	28	5.5	4.5	12	13
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.14	0.09	0.24	0.22	0.17	0.37	0.19	0.19	0.15	0.09
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.31	0.30	0.40	0.34	0.31	0.41	0.39	0.39	0.31	0.70
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.56	0.61	0.62	0.58	0.79	0.60	0.56	0.59	0.65	0.62
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0.83	1.8	2.0	8.3	12	2.0	1.1	0.90	2.1	3.9
PCB 28	<0.04	0.13	0.10	0.22	0.41	<0.04	<0.04	<0.04	0.07	<0.04
PCB 52	0.12	0.43	0.19	0.20	1.5	0.12	0.07	0.08	0.23	1.2
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	0.86	2.8	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.98
PCB 118	<0.2	<0.2	0.26	0.50	0.91	<0.23	<0.2	<0.2	<0.2	0.21
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	2.4	1.9	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.53
PCB 153	<0.5	<0.5	0.59	2.5	2.7	0.67	<0.5	<0.5	0.57	0.67
PCB 180	<0.3	<0.3	0.32	1.7	1.7	0.35	<0.3	<0.3	0.39	0.33

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)**

Numéro du site:	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
<b>Description du site</b>										
Altitude	1'245	1'517	1'080	405	209	336	265	273	455	830
Utilisation du sol	Forêt de conifères	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Forêt de feuillus	Cult. maraichères	Grandes cultures	Viticulture	Parc municipal	Prairies extensives	Forêt de conifères
Température annuelle moyenne (°C)	6.6	5.3	9.2	7.8	10.6	9.8	10.6	11.4	8.6	8.2
Précipitations annuelles moyennes	1'548	1'628	2'277	933	1'916	1'645	1'916	1'726	1'208	550
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	645	153	2'256	1'293	842	2'647	1'350	5'526	2'279	2'528
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Feuerungs-anlage	Trafic routier	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Chemische Industrie
Distance à la source principale d'ér	2,3	0,7	2	1	0,5	0,15	0,15	0,2	0,2	1,6
Type d'immission	rural	isolé	rural	semi-rural	semi-rural	semi-rural	semi-rural	citadin	semi-rural	semi-rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus haut	plus haut	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	plus bas	même niveau
Type d'humus	moder humifié	moder/mull	mull (moder)	null	mull	mull	mull	mull	mull	mull (moder)
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>										
C <sub>org</sub> (% MS)	12	6.9	11	2.2	1.8	1.2	3.7	2.3	4.4	5.0
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	3.4	3.7	3.7	4.6	6.4	6.0	6.1	5.0	5.9	5.4
<b>HAP (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>HAP<sub>16</sub></b>	152	92	161	84	71	243	68	8'465	195	326
NAP naphthaline	20	12	14	6.5	<5.1	9.8	6.1	42	<5.1	7.5
ACY acénaphthylène	0.47	0.60	0.98	1.2	<0.4	0.41	<0.4	26	<0.4	0.48
ACE acénaphthène	8.9	3.7	7.8	2.1	2.7	1.4	2.5	28	2.2	7.5
FLU fluorène	4.3	2.8	3.6	1.4	1.6	1.1	1.7	22	1.4	4.1
PHE phénanthrène	40	34	31	12	15	39	25	517	25	49
ANT anthracène	0.59	<0.2	0.52	0.55	0.53	4.0	<0.2	75	1.8	3.4
FLT fluoranthène	14	6.9	16	11	8.7	37	6.6	1'375	30	50
PYR pyrène	11	4.5	12	8.7	6.7	29	4.2	1'128	24	38
BaA benzo[a]anthracène	4.5	1.8	4.9	4.0	2.8	19	1.9	660	13	17
CHR chrysène	8.1	3.4	11	6.0	4.7	20	2.7	740	17	31
BbF benzo[b]fluoranthène	9.2	4.6	14	6.2	4.8	18	3.8	737	17	29
BkF benzo[k]fluoranthène	4.5	2.0	7.2	3.1	2.9	9.2	1.6	445	9.9	18
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	6.9	3.3	9.3	11	4.4	22	2.9	1'129	17	26
IPY idénol[1,2,3-cd]pyrène	8.8	5.0	13	4.0	4.0	14	3.1	689	14	20
DBA dibenz[a,h]anthracène	1.4	0.55	1.6	0.79	0.41	3.1	0.57	110	3.2	4.0
BPE benzo[g,h,i]pérylène	9.9	5.9	14	5.7	6.0	16	4.7	742	15	21
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>										
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	1.4	1.3		1.5		2.2	0.60			
RET rétène	8.5	5.0		2.8		2.1	0.88			
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	2.8	3.0		2.8		2.9	0.95			
PER pérylène	2.6	2.1		1.7		2.5	1.5			
COR coronène	8.2	7.7		4.1		7.4	2.7			
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.10	0.09	0.14	0.24	0.14	0.16	0.09	0.49	0.22	0.18
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.51	0.29	0.43	0.33	0.28	0.32	0.29	0.33	0.40	0.39
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.74	0.72	0.59	0.62	0.58	0.57	0.53	0.53	0.53	0.63
<b>PCB (µg/kg<sub>dw</sub>)</b>										
<b>PCB<sub>7</sub></b>	3.5	2.0	5.7	1.4	1.9	1.9	2.4	4.2	6.3	2.9
PCB 28	<0.04	0.07	<0.04	<0.04	<0.04	0.05	0.06	<0.04	<0.04	0.20
PCB 52	0.16	0.25	0.16	0.07	0.04	0.13	0.12	<0.04	0.13	0.16
PCB 101	0.52	<0.4	0.49	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.58	<0.4	0.57
PCB 118	0.32	<0.2	0.24	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.24	<0.2	0.23
PCB 138	0.59	<0.5	1.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.1	0.52	0.61
PCB 153	1.1	0.53	1.7	<0.5	0.56	0.61	0.75	1.4	1.7	0.74
PCB 180	0.90	0.39	1.5	0.31	0.32	0.41	0.56	0.89	3.5	0.43

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H- cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE, (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 2: Données détaillées des sites, propriétés du sol, ainsi que teneurs en HAP et en PCB avec composés (suite)**

Numéro du site:	100	101	102	103	104	105
<b>Description du site</b>						
Altitude	2'340	730	379	431	1'025	1'138
Utilisation du sol	Prairies extensives	Viticulture	Grandes cultures	Grandes cultures	Prairies extensives	Prairies extensives
Température annuelle moyenne (°C-1.6)		8.5	9.1	10.1	7.2	5.7
Précipitations annuelles moyennes	2'099	575	881	1'015	1'307	1'245
Densité de population <sup>a)</sup> (hab./km <sup>2</sup> )	582	1'294	1'842	1'016	2'797	5'391
Situation des émissions	Zone habitée	Zone habitée	Zone habitée	Trafic routier	Zone habitée	Zone habitée
Distance à la source principale d'ér	1,5	0,7	0,8	0,015	>3	>3
Type d'immission	isolé	semi-rural	semi-rural	semi-rural	rural	rural
Position par rapport à la couche d'inversion	plus haut	plus bas	plus bas	plus bas	plus haut	plus haut
Type d'humus	mull	mull	mull	mull	mull	mull
<b>Analyse du sol (0-20 cm)</b>						
C <sub>org</sub> (% MS)	4.9	1.9	1.1	2.3	3.9	5.8
pH (0.01 M CaCl <sub>2</sub> )	4.3	7.3	7.2	6.6	4.4	6.2
<b>HAP (µg/kg<sub>ow</sub>)</b>						
<b>HAP<sub>16</sub></b>	110	629	479		106	225
NAP naphthaline	8.7	6.8	6.7	5.4	6.7	8.5
ACY acénaphthylène	<0.4	0.79	1.3	1.6	0.49	0.80
ACE acénaphthène	5.3	3.6	1.4	1.2	1.3	<0.8
FLU fluorène	2.6	2.2	1.9	1.6	1.6	1.1
PHE phénanthrène	27	44	34	28	26	12
ANT anthracène	0.42	3.7	4.1	2.9	0.54	1.0
FLT fluoranthène	12	92	98	73	14	25
PYR pyrène	8.8	75	91	58	10	21
BaA benzo[a]anthracène	3.9	70	22	31	4.4	15
CHR chrysène	5.6	52	44	39	6.4	18
BbF benzo[b]fluoranthène	7.9	62	33	45	8.4	22
BkF benzo[k]fluoranthène	3.5	35	23	22	3.7	12
<b>BaP benzo[a]pyrène</b>	5.9	79	46		7.2	50
IPY idéno[1,2,3-cd]pyrène	6.1	47	34	35	5.9	18
DBA dibenz[a,h]anthracène	1.1	13	4.9	7.4	1.7	3.1
BPE benzo[g,h,i]pérylène	10.0	43	33	37	6.9	18
<b>Marqueur HAP<sup>b)</sup></b>						
cPHE 4-H-cyclopenta[def]PHE	0.86	4.1	6.8	4.4	0.92	1.8
RET rétène	1.2	1.4	3.0	1.2	1.7	1.2
cPYR cyclopenta[cd]pyrène	1.2	1.5	3.7	1.8	1.3	2.1
PER pérylène	2.2	20	15		1.8	3.4
COR coronène	6.1	14	16	27	7.4	10
(MPHE/ANT)/PHE [-]	0.12	0.37	0.46	0.38	0.14	0.39
(MFLT/PYR)/PYR [-]	0.28	0.53	0.31	0.33	0.31	0.49
1,7-/(1,7-& 2,6 DmPHE) [-]	0.54	0.59	0.63	0.56	0.75	0.59
<b>PCB (µg/kg<sub>ow</sub>)</b>						
<b>PCB<sub>7</sub></b>	0.68	2.0	1.0	6.0	1.2	1.3
PCB 28	0.08	0.08	0.05	0.04	0.06	0.06
PCB 52	0.19	0.20	0.09	0.46	0.12	0.22
PCB 101	<0.4	<0.4	<0.4	1.0	<0.4	<0.4
PCB 118	<0.2	<0.2	<0.2	0.97	<0.2	<0.2
PCB 138	<0.5	<0.5	<0.5	1.2	<0.5	<0.5
PCB 153	<0.5	0.54	<0.5	1.6	<0.5	<0.5
PCB 180	<0.3	0.40	<0.3	0.70	<0.3	<0.3

<sup>a)</sup> Densité de population de la commune du site

<sup>b)</sup> cPHE: 4-H-cyclopenta[def]phénanthrène, RET: rétène cPYR: cyclopenta[cd]pyrène, COR: coronène, (MPHE+ANT)/PHE: Rapport entre méthylPHE, méthylANT et PHE (MFLT+PYR)/PYR: Rapport entre méthylFLT, méthylPYR et PYR, 1,7-/(1,7-&2,6-)DmPHE: Rapport entre 1,7diméthylPHE et 1,7diméthylPHE, 2,6-diméthylPHE

**Annexe 3: Règles concernant la combinaison des incertitudes standard (propagation des erreurs)****Sommes ou différences**

La variance absolue est égale à la somme des variances absolues des valeurs additionnées.

Pour  $y = x_1 + x_2$  ou  $y = x_1 - x_2$

$$\Rightarrow u_y^2 = u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2$$

$$\Rightarrow u_y = \sqrt{u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2}$$

**Multiplication ou division**

La variance relative est égale à la somme des variantes relatives des valeurs multipliées.

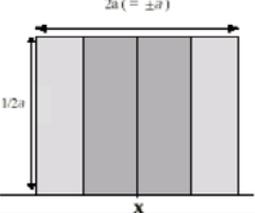
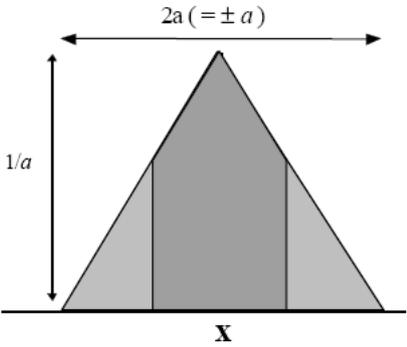
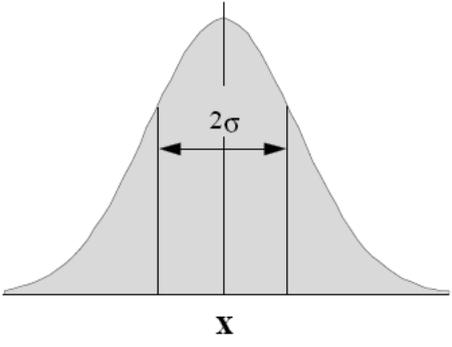
Pour  $y = x_1 \times x_2$  ou  $y = \frac{x_1}{x_2}$

$$\Rightarrow \left(\frac{u_y}{y}\right)^2 = \left(\frac{u_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x_2}}{x_2}\right)^2$$

$$\Rightarrow u_y = y \times \sqrt{\left(\frac{u_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x_2}}{x_2}\right)^2}$$

## Annexe 4: Sélection des fonctions de répartition et de leurs conditions d'utilisation

(Ellison et al., 2003b)

Distribution rectangulaire		
Forme	A utiliser quand :	Incertitude
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un certificat ou une autre spécification donne des limites sans spécifier le niveau de confiance (par exemple 25 ml ± 0,05 ml)</li> <li>Une estimation est faite sous la forme d'un intervalle maximum (<math>\pm a</math>) sans connaître la forme de la distribution.</li> </ul>	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Distribution triangulaire		
Forme	A utiliser quand :	Incertitude
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les informations disponibles sur <math>x</math> sont moins limitées que pour une distribution rectangulaire. Des valeurs proches de <math>x</math> sont plus probables que celle situées près des bornes.</li> <li>Une estimation est établie sous la forme d'un intervalle maximum (<math>\pm a</math>) décrit à l'aide d'une distribution symétrique.</li> </ul>	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}}$
Distribution normale		
Forme	A utiliser quand :	Incertitude
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Une estimation est faite à partir des observations répétées d'un processus variant de manière aléatoire.</li> <li>Une incertitude est donnée sous la forme d'un écart-type <math>s</math>, d'un écart-type relatif <math>s / \bar{x}</math> ou d'un écart-type % RSD sans spécifier la distribution.</li> <li>Une incertitude est donnée sous la forme d'un intervalle de confiance à 95 % (ou autre) <math>x \pm c</math> sans spécification sur la distribution.</li> </ul>	$u(x) = s$ $u(x) = s$ $u(x) = x \cdot (s / \bar{x})$ $u(x) = \frac{CV\%}{100} \cdot x$ $u(x) = c / 2$ <p>(pour <math>c</math> à 95 %)</p> $u(x) = c / 3$ <p>(pour <math>c</math> à 99.7 %)</p>

