



# Etude de synthèse de l'état des sols sur le territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg

Rapport final

**BRGM/RP-54829-FR**  
juillet 2006  
Mise à jour décembre 2006



AGGLOMÉRATION DE STRASBOURG



# Etude de synthèse de l'état des sols sur le territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg

## Rapport final

**BRGM/RP-54829-FR**

Juillet 2006,

Mise à jour décembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2004 POL E04

**P. Elsass**

Avec la collaboration de

**A. Bouzonville, F. Elsass, G. Fourniguet, P. Gorsy, N. Liewig, G. Morvan, N. Perdrial**



AGGLOMÉRATION DE STRASBOURG

### Vérificateur :

Original signé par :

Nom : V. Laperche

Date : 31/08/2006

### Approbateur :

Original signé par :

Nom : P. Elsass

Date : 11/09/2006

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots clés :** Pollution, sols, métaux lourds, hydrocarbures, PCB, HAP, dioxines, retombées aériennes, Bas-Rhin, Alsace, Strasbourg, Communauté Urbaine de Strasbourg

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Elsass P., A. Bouzonville, F. Elsass, G. Fourniguet, P. Gorsy, N. Liewig, G. Morvan, N. Perdrial (2006) – Etude de synthèse de l'état des sols sur le territoire de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Rapport final BRGM RP-54829-FR, 50 p., 8 ann.

## Synthèse

Le Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles de l'agglomération de Strasbourg (SPPPI) a été sollicité par la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS) pour que soit réalisée une étude de synthèse de l'état de la situation des sols strasbourgeois. Le BRGM s'est proposé pour prendre la maîtrise d'ouvrage de l'étude sur la base d'un cahier des charges validé par le SPPPI. Le financement de l'étude est apporté à parts égales par l'Ademe, la CUS et la dotation de Service public du BRGM.

L'étude de 20 sites de parcs publics et de jardins familiaux sur le territoire de la CUS est destinée à examiner l'état général de la pollution des sols par les métaux lourds, les hydrocarbures et les dioxines, dans l'objectif de mettre en évidence s'ils peuvent présenter des risques pour la santé de la population.

Les sites de prélèvement ont été choisis sous l'influence de diverses sources de retombées aériennes et les échantillonnages ont été effectués avec beaucoup de soin pour éviter toute contamination ou perte de produits. Les analyses de métaux lourds ont été faites sur des composites de 3 à 4 échantillons par site, prélevés par carottage jusqu'à une profondeur maximale de 25 cm. Les analyses d'hydrocarbures ont été menées sur un seul prélèvement par site jusqu'à 25 cm, celles de dioxines sur un seul prélèvement jusqu'à 10 cm de profondeur.

Les analyses des métaux lourds ne montrent pas de valeurs inquiétantes. Parmi les métaux analysés, le plomb atteint localement la VCI usage sensible, mais sa moyenne reste inférieure à la VDSS. La moyenne des teneurs en chrome atteint la VDSS mais fait clairement partie du fond géochimique naturel.

Parmi les hydrocarbures et phytosanitaires analysés, on observe des teneurs approchant la VCI usage sensible de façon très ponctuelle pour les PCB (polychlorobiphényles) et sur quelques sites pour les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Des teneurs en HAP sont rencontrées sur pratiquement tous les sites et semblent liées à la circulation automobile.

Les teneurs en dioxines (équivalent toxique TEQ) sont en moyenne inférieures à la valeur guide allemande de 5 pg/g et globalement inférieures à la valeur guide suédoise de 10 pg/g pour un usage sensible.

L'étude des données des concentrations en métaux dans les pluies indique que les teneurs en métaux sont faibles par rapport aux valeurs guide (eau potable), à part le nickel et l'aluminium qui approchent de la VCI usage sensible. L'étude pilote des retombées aériennes particulières montre l'omniprésence des métaux dans les particules et la diversité des sources d'éléments métalliques.



# Sommaire

<b>1. Contexte</b> .....	<b>9</b>
1.1. HISTORIQUE DE L'ETUDE.....	9
1.2. PRINCIPES DE L'ETUDE.....	9
1.3. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE .....	10
<b>2. Prélèvements et analyses</b> .....	<b>13</b>
2.1. PRELEVEMENTS.....	13
2.1.1.Prélèvements pour analyse des métaux (sur les 20 sites) .....	13
2.1.2.Prélèvements pour analyse des hydrocarbures (sur les 20 sites).....	14
2.1.3.Prélèvements pour analyse des dioxines (sur 10 sites seulement).....	15
2.1.4.Prélèvements de contrôle complémentaires (site JF 07) .....	16
2.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS .....	16
2.2.1.Echantillons pour analyse des métaux lourds .....	16
2.2.2.Echantillons pour analyse des hydrocarbures et des dioxines.....	17
2.3. PROGRAMME ANALYTIQUE .....	20
2.3.1.Analyse des métaux lourds au BRGM Orléans .....	20
2.3.2.Analyse des hydrocarbures au CAR Illkirch .....	20
2.3.3.Analyse des dioxines au CARSO de Lyon .....	20
<b>3. Principaux résultats</b> .....	<b>21</b>
3.1. ANALYSES DES METAUX.....	21
3.1.1.Analyses au laboratoire .....	21
3.1.2.Analyses au Niton® .....	25
3.2. ANALYSES DES HYDROCARBURES.....	25
3.2.1.Substances détectées .....	25
3.2.2.Résultats en PCB .....	26
3.2.3.Résultats en HAP .....	27
3.3. ANALYSES DES DIOXINES .....	31
<b>4. Etude des retombées aériennes</b> .....	<b>35</b>
4.1. ETUDE DES PLUIES.....	35
4.2. ETUDE DES RETOMBEES PARTICULAIRES .....	39
4.2.1.Classification des particules en familles et espèces.....	39
4.2.2.Analyse et interprétation des données .....	40
4.2.3.Synthèse des résultats .....	42

<b>5. Conclusions</b> .....	<b>47</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>49</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Cadre géologique du territoire de la CUS .....	11
Illustration 2 : Carte des sites de prélèvements .....	12
Illustration 3 : Liste des 20 sites de prélèvements.....	14
Illustration 4 : Prélèvement des échantillons .....	18
Illustration 5 : Préparation in situ pour analyse des métaux (a, b) et prélèvement pour hydrocarbures (c, d).....	19
Illustration 6 : Paramètres statistiques élémentaires sur les principaux métaux lourds.....	21
Illustration 7 : Cartes des résultats en arsenic et en plomb.....	23
Illustration 8 : Tableau des résultats des analyses des principaux métaux .....	24
Illustration 9 : Résultats en PCB sur l'échantillon d'origine et les contrôles du site JF 07 .....	26
Illustration 10 : Echantillonnage complémentaire sur le site JF 07 avec résultats en PCB et HAP totaux.....	27
Illustration 11 : Proportion des différents HAP sur les 18 sites où tous les HAP sont quantifiés .....	28
Illustration 12 : Statistiques des HAP par type d'environnement (en µg/kg) .....	28
Illustration 13 : Résultats en HAP sur l'échantillon d'origine et les contrôles du site JF 07 (en µg/kg).....	28
Illustration 14 : Carte des résultats en benzo(A)pyrène .....	29
Illustration 15 : Statistiques sur les résultats en hydrocarbures .....	30
Illustration 16 : Equivalents toxiques des dioxines et furanes.....	31
Illustration 17 : Valeurs guides pour les dioxines dans les sols (Umweltbundesamt 2006).....	32
Illustration 18 : Carte des résultats en dioxines.....	33
Illustration 19 : Quantités de pluie à Strasbourg 1998-2001 .....	36
Illustration 20 : pH des pluies à Strasbourg 1998-2001 .....	36
Illustration 21 : Tableau des concentrations des métaux lourds dans les pluies à Strasbourg .....	37
Illustration 22 : Anti-corrélation entre métaux (en µg/L) et pH.....	38
Illustration 23 : Répartition mensuelle des ETM dans les familles de constituants.....	41

Illustration 24 : Images MET et analyses chimiques EDS (en % at.) des retombées atmosphériques particulières sur le site de l'observatoire (Strasbourg). (a) (b) efflorescence bactérienne en décembre ; (c) et (d) photos de détail. ....	43
Illustration 25 : Images MET et analyses chimiques EDS (en % at.) des retombées atmosphériques particulières sur le site de l'observatoire (Strasbourg). Résidus de combustion au mois de juin 2004 : (a) vue d'ensemble ; (b) et (c) photos de détail. ....	44
Illustration 26 : Images MET et analyses EDS des retombées atmosphériques microbiennes sur le site de l'observatoire (Strasbourg) : efflorescences bactériennes (a) mois de février; (b) avril.....	45
Illustration 27 : Image MET et analyses EDS des retombées atmosphériques sur le site de l'observatoire (Strasbourg) durant le mois de mars 2004 : suies et matières organiques amorphes. ....	45

## Liste des annexes sur le CD ROM

Annexe 1	
Description des sites	
Annexe 2	
Résultats des analyses des métaux au Niton	
Annexe 3	
Résultats des analyses des pluies_(ULP)	
Annexe 4	
Etude des retombées particulières (ULP)	
Annexe 5	
Résultats d'analyse des métaux (BRGM)	
Annexe 6	
Résultats des analyses d'hydrocarbures (CAR)	
Annexe 7	
Résultats des analyses des dioxines (CARSO)	
Annexe 8	
Dioxines et furannes, quelques repères	





# 1. Contexte

## 1.1. HISTORIQUE DE L'ETUDE

L'Alsace est une région où l'importance de la qualité de l'environnement est perçue depuis longtemps, et l'agglomération de Strasbourg ne fait pas exception. C'est ainsi qu'il existe depuis 1992 un Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles de l'agglomération de Strasbourg (SPPPI), rassemblant des représentants des industriels, de l'Administration, des Collectivités, de la Communauté Scientifique et des Associations.

Le SPPPI a été sollicité par la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS) pour que soit réalisée une étude de synthèse de l'état de la situation des sols strasbourgeois. Après examen d'un premier exposé de l'état des connaissances par le BRGM (Chabart, 2001), qui montrait que les analyses de sols disponibles étaient trop disparates pour pouvoir tirer des conclusions générales. Lors de la réunion du 5 novembre 2002 il a constitué un groupe de travail chargé d'élaborer un cahier des charges pour une étude systématique de la qualité des sols et une évaluation des coûts qu'elle supposerait. Ce groupe de travail s'est réuni tout au long de l'année 2003 pour mettre au point le contenu d'un cahier des charges ainsi qu'une estimation des coûts de plusieurs variantes. Les travaux du groupe de travail ont été présentés en réunion de la commission "Eau et déchets" du SPPPI du 27 janvier 2004, et le cahier des charges définitif a été approuvé (Elsass, 2004).

Le BRGM s'est proposé pour prendre la maîtrise d'ouvrage de l'étude de synthèse de l'état des sols sur le territoire de la CUS sur la base de ce cahier des charges. Le financement de l'étude est apporté à parts égales par l'Ademe (notification le 29 octobre 2004), la CUS (notification le 12 avril 2005) et la dotation de Service public du BRGM (fiche programme 04POLE04). L'étude a été lancée en mai 2005 et s'est achevée en juillet 2006.

## 1.2. PRINCIPES DE L'ETUDE

L'étude se propose d'obtenir une vue d'ensemble sur l'état des sols de la CUS et d'examiner s'il existe des risques potentiels pour la santé de la population. Les principes retenus pour l'étude dans le cahier des charges validé par le SPPPI (Elsass, 2004) sont les suivants :

- Le budget disponible permet d'analyser 20 prélèvements, nombre suffisant pour faire l'objet d'une analyse statistique des résultats,
- Les prélèvements sont répartis sur l'ensemble du territoire de la CUS, en aval (dans le sens d'écoulement de la nappe phréatique) de zones d'activités et à proximité des grands axes de circulation, mais sans cibler d'installations industrielles en particulier (des études spécifiques de l'environnement immédiat de certaines installations étant en cours par ailleurs),

- Les sites prélevés sont choisis par le Service de l'Ecologie urbaine de la CUS dans des zones sensibles telles que les espaces verts accueillant du public et les jardins familiaux. Ils doivent être sous l'influence des diverses sources de retombées aériennes,
- Les prélèvements portent sur les 25 premiers centimètres du sol qui constituent la rhizosphère dans laquelle se nourrissent les plantes et qui peuvent éventuellement constituer une source d'ingestion de terre (par exemple par des enfants en bas âge),
- Les substances recherchées sont les métaux lourds, les hydrocarbures totaux, les HAP<sup>1</sup>, les PCB<sup>2</sup>, les pesticides organo-chlorés et les dioxines,
- Les résultats doivent être évalués suivant les valeurs guides nationales en matière de pollution des sols publiées par le BRGM pour le compte du Ministère de l'environnement,
- En outre un point sur les retombées atmosphériques actuelles doit être réalisé par l'équipe "Microparticules environnementales" du Centre de Géochimie de la Surface de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

### 1.3. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Le territoire de la CUS est situé géographiquement à cheval sur plusieurs domaines (Illustration 1) :

- le lit majeur du Rhin constitué des sables et graviers rhénans gris souvent recouverts de limons de débordement,
- la terrasse de Schiltigheim constituée de loess récents à l'Est et de loess plus anciens à l'Ouest à partir de collines de Hausbergen,
- le lit de la basse Bruche constitué de sables, graviers et limons vosgiens rouges à roses.

Cependant les sols de la plupart des sites de prélèvements sont développés sur des remblais ou des sols très remaniés avec des débris anthropiques, on rencontre très peu de sols naturels. Si l'on prend pour exemple les deux sites développés sur des loess, on constate que l'un d'eux (JF 02 à Bischheim) est bien constitué d'un sol de jardin sur loess, mais que l'autre (PA 01 à Mundolsheim) est constitué de loess rapporté pour paysager le parc, pratiquement sans sol développé. On trouvera la description des sols de chaque site en annexe 1.

---

<sup>1</sup> HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques – famille de composés comprenant au moins 2 cycles aromatiques, de toxicité variable suivant le composé, produits notamment par la combustion du charbon et du pétrole (Rollin et Quiot 2005).

<sup>2</sup> PCB : polychlorobiphényles – mélange d'isomères de synthèse, bioaccumulables, dont certains sont considérés comme des homologues des dioxines concernant la toxicité (*dioxin-like*), utilisé dans les fluides diélectriques (transformateurs) ou les fluides hydrauliques, d'utilisation très restreinte par la réglementation (INERIS 2005)

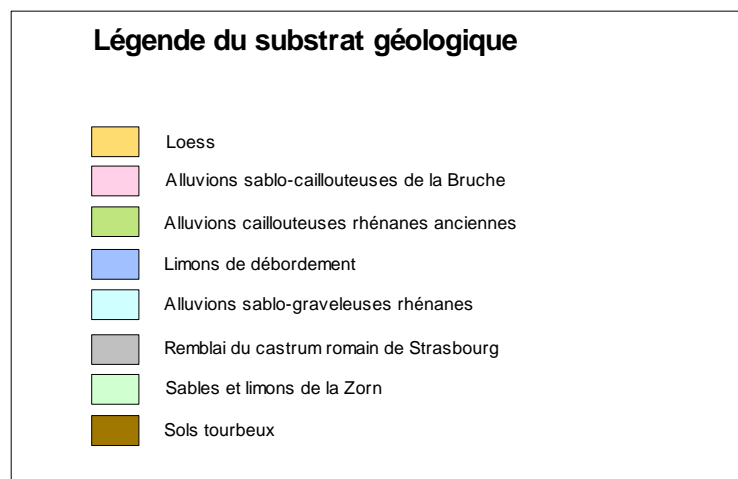
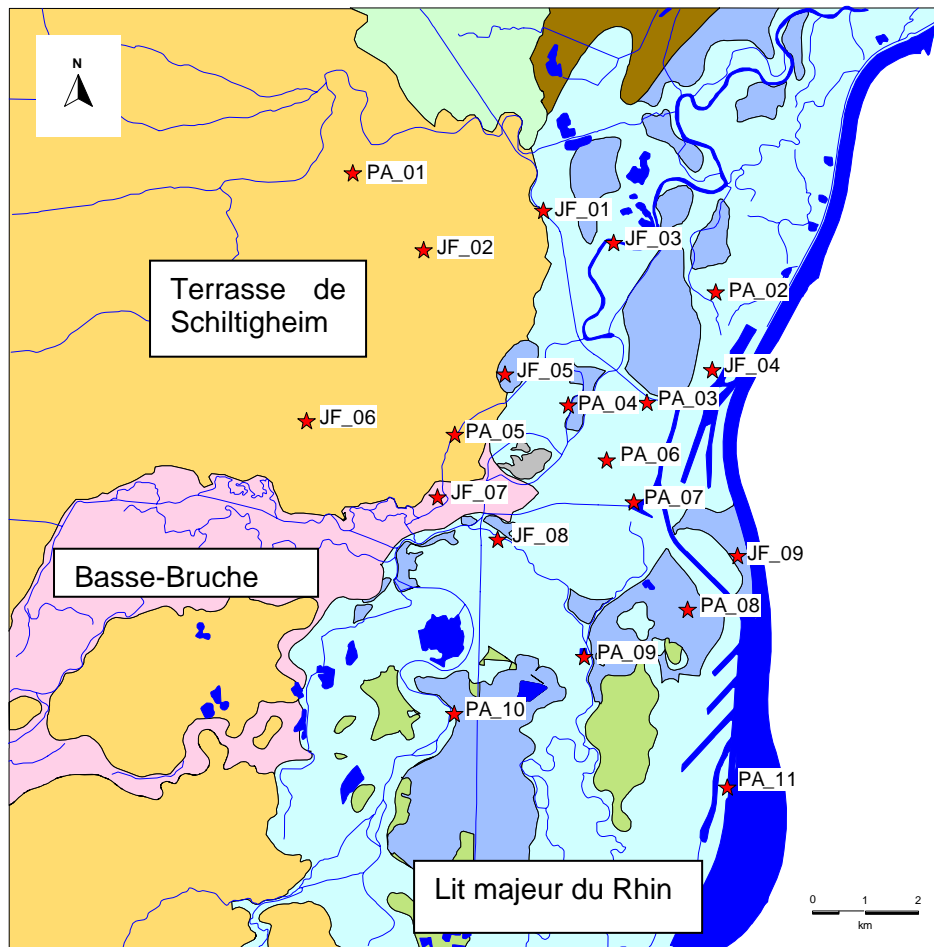


Illustration 1 : Cadre géologique du territoire de la CUS

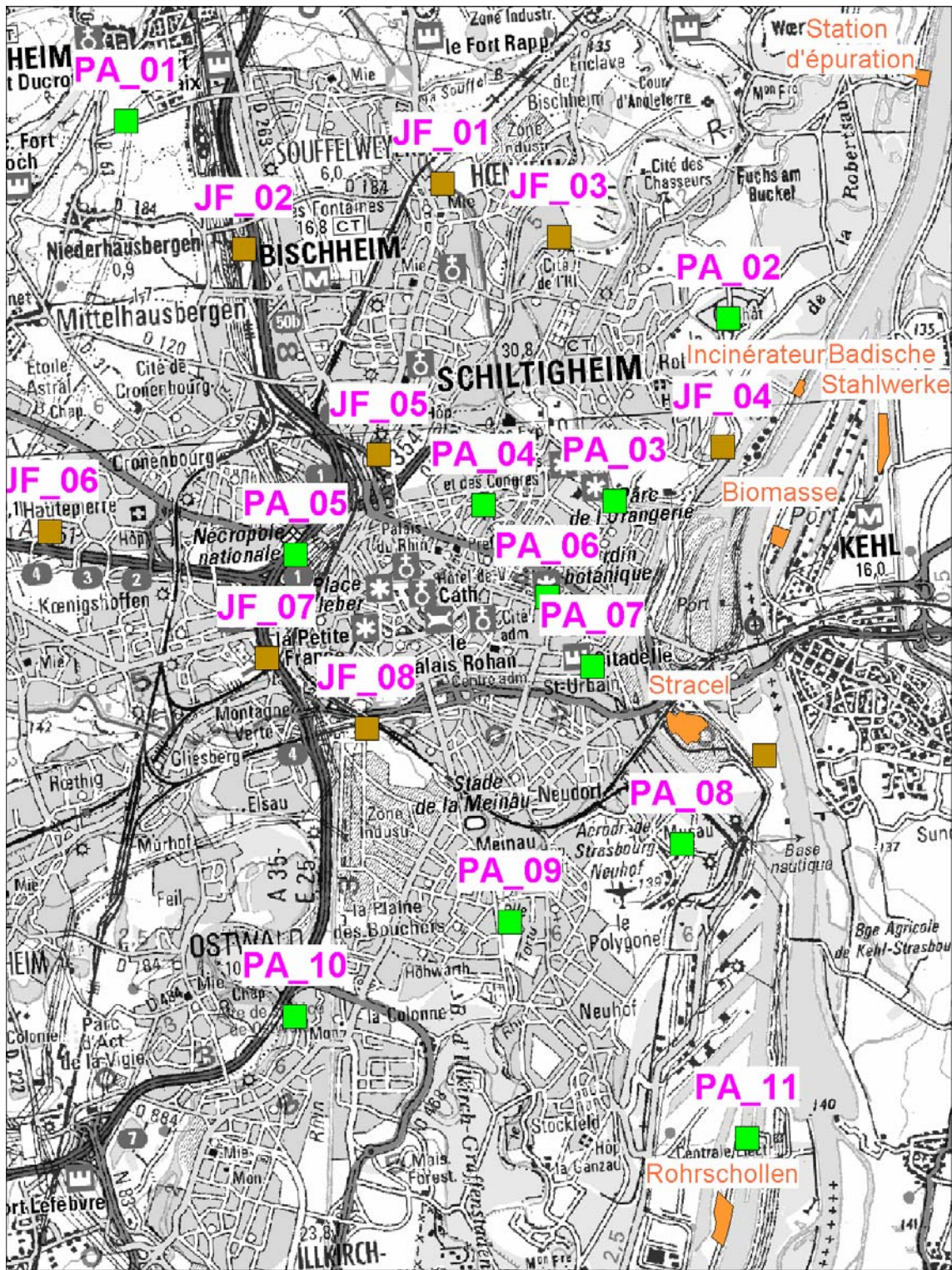


Illustration 2 : Carte des sites de prélèvements  
Fond de plan : Scan100 © IGN 2003

## 2. Prélèvements et analyses

### 2.1. PRELEVEMENTS

Le Service de l'Ecologie Urbaine de la CUS a proposé de réaliser les prélèvements dans 9 jardins familiaux et 11 parcs d'agrément répartis sur l'ensemble du territoire de la CUS dans des voisinages variés (Illustration 2 et Illustration 3). Une reconnaissance de terrain a été menée en juin et juillet 2005 en concertation avec les services de la CUS en charge des différentes localités afin d'identifier les sites de prélèvement qui devaient être engazonnés, soumis à une pluviosité normale (hors couvert) et non traités.

Les prélèvements ont été réalisés en août 2005 par une équipe composée de personnes du BRGM, du CNRS et de l'INRA, à l'aide d'un carottier à main prêté par l'INRA de Nancy. Plusieurs prélèvements ont été réalisés sur chaque site en fonction du type d'analyse prévu (métaux, hydrocarbures, dioxines). Un échantillonnage complémentaire de contrôle des hydrocarbures a été réalisé en mai 2006 sur le site JF 07 (Jardins familiaux de Koenigshoffen, rue de l'Abbé Lemire). Les procédures de prélèvement employées sont décrites ci-après.

#### 2.1.1. Prélèvements pour analyse des métaux (sur les 20 sites)

- Piquetage des points de prélèvement, en général 4 points répartis aux sommets d'un carré de 2 m de côté, nettoyage (tonte de l'herbe, enlèvement des grosses racines par grattage), Illustration 4a et b ;
- Prélèvement des échantillons à l'aide d'un carottier à main (Illustration 4c et d) sur une profondeur de 25 cm si possible, sinon jusqu'au refus : souvent il n'a pas été possible de dépasser 15 à 20 cm en raison de la présence de gros graviers ou d'artefacts enterrés ;
- Emballage sous sac plastique et numérotation individuelle à l'aide d'étiquettes préimprimées de la partie supérieure de chaque carotte (5 premiers centimètres environ correspondant à la partie racinaire du sol) ;
- Emballage sous sac plastique et numérotation individuelle à l'aide d'étiquettes préimprimées du matériau restant de chaque carotte ;

On notera que les sols échantillonnés qui étaient des sols enherbés non traités et souvent piétinés se sont révélés extrêmement compacts, le carottage manuel a dû être effectué en tapant à coups de masse sur le carottier pour pouvoir l'enfoncer.

N° site	Analyse des dioxines	Type site	Nom du secteur	Commune	Voisinage
JF_01	oui	Jardin familial	Bord canal	Hœnheim	résidentiel
JF_02		Jardin familial	Bord A4	Bischheim	circulation automobile
JF_03	oui	Jardin familial	Cité de l'Ill	Strasbourg	chaufferie
JF_04	oui	Jardin familial	Port aux Pétroles/ Engelbrechtsworther	Strasbourg	industriel
JF_05		Jardin familial	Place de Haguenau/ Helenengarten	Strasbourg	circulation automobile
JF_06		Jardin familial	Hautepierre	Strasbourg	circulation automobile
JF_07		Jardin familial	Koenigshoffen/ Pré St Gall/ rue de l'Abbé Lemire	Strasbourg	circulation automobile
JF_08		Jardin familial	Fédération/ Kaltau 1	Strasbourg	industriel
JF_09	oui	Jardin familial	Parc du Rhin	Strasbourg	naturel
PA_01		Parc public	Rue du Haldembourg	Mundolsheim	naturel
PA_02	oui	Parc public	Parc de Pourtalès	Strasbourg	naturel
PA_03	oui	Parc public	Orangerie	Strasbourg	résidentiel
PA_04	oui	Parc public	Parc des Contades	Strasbourg	résidentiel
PA_05		Parc public	Glacis	Strasbourg	circulation automobile
PA_06		Parc public	Jardin botanique	Strasbourg	résidentiel
PA_07		Parc public	Citadelle	Strasbourg	résidentiel
PA_08	oui	Parc public	Polygone	Strasbourg	naturel
PA_09	oui	Parc public	Meinau	Strasbourg	résidentiel
PA_10		Parc public	Niederbourg	Illkirch	résidentiel
PA_11	oui	Parc public	Darse IV - écluse EDF	Strasbourg	industriel

Illustration 3 : Liste des 20 sites de prélèvements

### **2.1.2. Prélèvements pour analyse des hydrocarbures (sur les 20 sites)**

- Piquetage de 2 points de prélèvement, à l'intérieur du carré délimité par les prélèvements pour métaux lourds, et nettoyage (tonte de l'herbe, enlèvement des grosses racines par grattage) ;
- Prélèvement des 2 échantillons (1 original et un double) à l'aide d'un carottier à main sur une profondeur de 25 cm si possible, sinon jusqu'au refus (en général entre 15 et 20 cm) ;
- Extraction et emballage immédiat de chaque carotte dans un flacon en verre scellé par un joint en caoutchouc protégé par une feuille d'aluminium pour éviter tout contact du caoutchouc avec l'échantillon ; numérotation individuelle à l'aide d'étiquettes préimprimées (Illustration 5c et d).

La taille du carottier permettait d'extraire la carotte directement à l'intérieur des bocaux en verre afin de minimiser les pertes de substances volatiles par dégazage. L'utilisation d'étiquettes préimprimées avec les numéros d'échantillons évitait l'utilisation d'un marqueur indélébile susceptible de polluer les échantillons en hydrocarbures.

### **2.1.3. Prélèvements pour analyse des dioxines (sur 10 sites seulement)**

- Piquetage d'un point de prélèvement supplémentaire à l'intérieur du carré délimité par les prélèvements pour métaux lourds, et nettoyage (tonte de l'herbe, enlèvement des grosses racines par grattage) ;
- Prélèvement d'un échantillon à l'aide du carottier à main sur une profondeur de 10 cm seulement ;
- Extraction et emballage immédiat de la carotte dans un flacon en verre scellé par un joint en caoutchouc protégé par une feuille d'aluminium ; numérotation individuelle à l'aide d'étiquettes préimprimées.

Le choix des sites de prélèvements pour dioxines a été discuté lors de la réunion de la commission "Eau et déchets" du SPPPI du 27 janvier 2004. La proposition initiale était de les prélever sur les sites de type jardins familiaux, mais l'intérêt porté par la commission sur le secteur de la Robertsau et les retombées possibles de l'usine d'incinération à amener à présélectionner les points suivants : PA02, PA03, PA08, PA09, PA11, JF04, JF09, qui ont été complétés par 3 autres sites choisis au hasard (Illustration 3).



#### **2.1.4. Prélèvements de contrôle complémentaires (site JF 07)**

Suite à la mise en évidence d'une valeur en PCB<sup>3</sup> relativement élevée sur le site JF 07 (jardins familiaux de Koenigshoffen, rue de l'Abbé Lemire), 8 prélèvements complémentaires ont été effectués à 20 m d'intervalle environ autour du prélèvement anormal, suivant la procédure de prélèvement pour analyses d'hydrocarbures, et analysés pour les PCB et les HAP<sup>4</sup>, afin de vérifier qu'il s'agissait bien d'une anomalie ponctuelle. On trouvera le détail de l'opération dans le chapitre concernant le site JF 07 en **annexe 1**.

## **2.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS**

### **2.2.1. Echantillons pour analyse des métaux lourds**

L'état de l'art en matière d'évaluation de sites pollués est le prélèvement de plusieurs sous-échantillons que l'on mélange pour obtenir un composite représentatif de la moyenne des sols du site. C'est pourquoi il a été décidé de prélever, autant que possible, 4 sous-échantillons sur chaque site. Dans le cas de la présente étude on pouvait craindre que des pollutions très ponctuelles (objets enterrés, plombs de chasse etc.) rendent les prélèvements non représentatifs du fond géochimique.

Aussi lors des premières opérations d'échantillonnage (le 9 août 2005) a-t-il été réalisé un préexamen de la variabilité des teneurs en métaux lourds du site en analysant chaque carotte à l'aide d'un appareil portatif à fluorescence X Niton<sup>®</sup> (Laperche et Mossmann, 2004 ; Laperche, 2005). Les analyses par fluorescence X ont été pratiquées soit sur le sol après nettoyage, soit sur la carotte extraite du carottier, soit sur un sous-échantillon homogénéisé et placé dans une boîte de Petri en plastique. Ce préexamen n'a pas montré d'anomalies particulières : les 4 carottes donnaient des valeurs comparables en plomb et arsenic.

Les premiers échantillons ont ainsi pu être préparés sur le site. Les 4 carottes prises sur chaque site ont été démottées, mélangées, homogénéisées sur site, et deux échantillons de 2,5 kilogrammes ont été préparés, l'un pour envoi au Laboratoire du BRGM à Orléans, l'autre étant conservé comme témoin (Illustration 5a et b).

---

<sup>3</sup> PCB : polychlorobiphényles – mélange d'isomères de synthèse, bioaccumulables, dont certains sont considérés comme *dioxin-like*, utilisé dans les fluides diélectriques (transformateurs) ou les fluides hydrauliques, d'utilisation très restreinte par la réglementation (INERIS 2005)

<sup>4</sup> HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques – famille de composés comprenant au moins 2 cycles aromatiques, de toxicité variable suivant le composé, produits notamment par la combustion du charbon et du pétrole (Rollin et Quiot 2005).

Pour les échantillonnages suivants le spectromètre de fluorescence X n'était pas disponible, aussi a-t-on conservé les carottes individuelles en mettant à part la carotte de surface (tranche 0 – 5 cm) et le matériau restant (tranche 5 – 25 cm). Les carottes de surface ont fait l'objet d'analyses par fluorescence X ultérieurement lors de la phase de préparation en atelier. Aucune anomalie notable n'a été rencontrée (la fourchette des teneurs en plomb et arsenic mesurées par fluorescence X ne variait pas plus que du simple au double), de sorte qu'il n'a pas été nécessaire d'éliminer de sous-échantillon anomal.

Les teneurs mesurées par fluorescence X sur la surface de la carotte 0 – 5 cm et sur le côté de la même carotte ont par ailleurs été notées afin d'examiner s'il y avait une différence entre les teneurs de surface et les teneurs plus en profondeur. Le détail de ces mesures est exposé en **annexe 2**.

### **2.2.2. Echantillons pour analyse des hydrocarbures et des dioxines**

La préparation de ce type d'échantillons est une phase très importante pour éviter les erreurs d'échantillonnage dues aux pertes de produits volatils. Les carottes des prélèvements pour hydrocarbures et dioxines ont été placées dans des bocaux étanches dès extraction du carottier grâce au dispositif à manivelle permettant d'éjecter la carotte (Illustration 5c et d). Elles ont été placées dans des glacières avec packs de glace qui ont été collectées dans les 48 heures par le Laboratoire d'analyses CAR d'Illkirch. Consigne a été donnée au Laboratoire de prendre un sous-échantillon sur toute la hauteur de la carotte.



(a) Préparation d'un site



(b) Nettoyage de l'emplacement



(c) Carottage à la tarière manuelle



(d) Extraction de l'échantillon

*Illustration 4 : Prélèvement des échantillons*



(a) Démottage et homogénéisation sur site



(b) Quartage sur site



(c) Prélèvement pour hydrocarbures



(d) Bocaux scellés et étiquetés

*Illustration 5 : Préparation in situ pour analyse des métaux (a, b) et prélèvement pour hydrocarbures (c, d)*

## 2.3. PROGRAMME ANALYTIQUE

Le programme d'analyse a fait l'objet de plusieurs devis qui ont amené à sélectionner le laboratoire d'analyses du BRGM Orléans pour les métaux lourds (coût légèrement inférieur pour une limite de quantification plus basse) et le laboratoire CAR (Centre d'Analyses et de Recherches d'Illkirch) pour les hydrocarbures (coût inférieur pour une prestation équivalente, plus grande proximité). Les deux laboratoires sous-traitent les analyses de dioxine au même laboratoire, le CARSO à Lyon. Aussi la priorité a-t-elle été donnée au laboratoire le plus proche, celui d'Illkirch.

Les prélèvements réalisés ont donc été répartis entre les différents laboratoires en vue du programme analytique décrit ci-après.

### 2.3.1. Analyse des métaux lourds au BRGM Orléans

- mesures physiques : détermination du pH dans l'eau (d'après la norme NF ISO 10390), pertes de masse à 40° et 450°,
- analyse des métaux par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP/AES) après grillage à 450°C, frittage au peroxyde de sodium et mise en solution à l'acide chlorhydrique de la totalité du solide (limites de détection de 2 à 20 ppm),
- dosage du mercure par absorption atomique (vapeurs froides) selon la norme NF EN 1483 après mise en solution à l'eau régale selon NF EN 13346,
- dosage de l'arsenic par absorption atomique avec atomisation électrothermique selon la norme NF EN ISO 15586 (T90-119) après mise en solution à l'eau régale selon NF EN 13346.

Les résultats analytiques complets sont présentés en **annexe 5**.

### 2.3.2. Analyse des hydrocarbures au CAR Illkirch

- analyse des hydrocarbures totaux par screening semi-quantitatif,
- analyse des pesticides organochlorés par screening semi-quantitatif,
- analyse des polychlorobiphényles (PCB) par screening semi-quantitatif,
- analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par screening semi-quantitatif.

Les résultats analytiques complets sont présentés en **annexe 6**. Ils comprennent également les résultats en HAP et PCB des 8 échantillons de contrôle du site JF 07.

### 2.3.3. Analyse des dioxines au CARSO de Lyon

- expédition des échantillons par le CAR d'Illkirch,
- analyses des dioxines et furanes.

Les résultats analytiques complets sont présentés en **annexe 7**.

### 3. Principaux résultats

#### 3.1. ANALYSES DES METAUX

##### 3.1.1. Analyses au laboratoire

Les analyses des métaux ont été réalisées au laboratoire du BRGM à Orléans par ICP pour 24 éléments et par absorption atomique pour l'arsenic et le mercure (**annexe 5**). Les éléments pour lesquels existent des normes (VDSS : valeur de définition de source sol<sup>5</sup> ; VCI : valeur de constat d'impact<sup>6</sup>) sont présentés dans le tableau de l'illustration 4 (BRGM, 2002). On a également indiqué la valeur du pH dans l'eau qui est systématiquement de 8, soit légèrement basique.

	Asaa (Arsenic)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	Hg (Mercure)	Ni (Nickel)	pH	Pb (Plomb)	Zn (Zinc)
Minimum	6	9	46	18	< LQ	15	8	16	65
Maximum	20	15	132	111	1	35	8	405	330
Nombre d'échantillons >LQ	20	20	20	20	11	20	20	20	20
Moyenne	11	12	68	45	0.3	26	8	125	152
Ecart-type	3	2	19	27	0.2	5	0.2	102	86
CV	0.3	0.1	0.3	0.6	0.7	0.2	0.0	0.8	0.6
VDSS	19	120	65	95	3.5	120		200	4500
VCI sol usage sensible	37	240	130	190	7	240		400	9000
VCI sol usage non sensible	120	1200	7000	950	600	1200		2000	
Commentaire des résultats	Fond naturel élevé	Fond naturel bas	Fond naturel élevé = VDSS	Influence anthropique	Influence anthropique	Fond naturel bas	Sols légèrement basiques	Influence anthropique	Influence anthropique

Illustration 6 : Paramètres statistiques élémentaires sur les principaux métaux lourds

On constate que certains éléments (arsenic, cobalt, chrome, nickel) ont un coefficient de variation (CV : rapport de l'écart-type sur la moyenne) assez bas, entre 0,1 et 0,3, qui indique que la distribution est probablement proche d'une distribution gaussienne. On peut donc supposer qu'il s'agit d'un fond géochimique naturel.

- L'arsenic a une moyenne inférieure à la VDSS (11 ppm) mais pouvant atteindre cette valeur, reflétant un fond géochimique relativement élevé, mais inférieur à celui observé dans les limons de la Thur (Elsass et Kramers, 2003) ou dans les marnes oligocènes des Couches de Pechelbronn (Dames & Moore, 1998) : la carte en Illustration 7 fait ressortir le point JF 07 où la valeur maximale de 20 mg/kg a été relevée.
- Le cobalt présente une moyenne de 12 ppm, très basse par rapport à la VDSS.

<sup>5</sup> VDSS : Valeur de définition de source sol : concentration à partir de laquelle on considère qu'un sol est pollué par la substance concernée (BRGM, 2002).

<sup>6</sup> VCI : Valeur de constat d'impact : concentration (eau, sol) à partir de laquelle on considère qu'il y a un risque sanitaire ou environnemental et qu'une étude détaillée des risques est nécessaire (BRGM, 2002).

- Le chrome a une moyenne de 68 ppm qui dépasse légèrement la VDSS (65 ppm) et un maximum qui atteint la VCI usage sensible. Ce fond géochimique élevé est connu également dans les limons de la Thur (Elsass et Kramers, 2003) et dans le gisement de potasse du Sud de l'Alsace (Elsass, 2004).
- Le nickel présente une moyenne de 26 ppm, basse par rapport à la VDSS.

D'autres éléments (cuivre, mercure, plomb, zinc) ont un coefficient de variation plus élevé, entre 0,6 et 0,8, reflétant une distribution s'écartant d'une distribution normale (distribution de Gauss dite "courbe en cloche"), avec des valeurs occasionnellement élevées. Ceci peut être interprété comme un fond géochimique affecté par une influence anthropique. Comme le coefficient de variation reste inférieur à 1, la moyenne arithmétique reste une bonne estimation<sup>7</sup>.

- Le cuivre, avec une moyenne de 45 ppm, reste largement inférieur à la VDSS.
- Le mercure est très bas et ne dépasse pas 1 ppm.
- Le plomb a une moyenne de 125 ppm largement inférieure à la VDSS, mais peut atteindre localement les 400 ppm de la VCI zone sensible ; la carte de l'illustration 7 fait ressortir le point JF 03 où le maximum de 405 mg/kg a été relevé.
- Le zinc avec une moyenne de 152 ppm est inférieur à la VDSS d'au moins un ordre de grandeur.

Le plomb a été par le passé un des métaux lourds posant un problème général du fait d'une pollution diffuse par les rejets de combustion des essences au plomb. Depuis les années 1980 les additifs au tétraéthylplomb (0,1 à 0,4 g/litre d'essence) tendent à disparaître et sont interdits à la vente par l'Union européenne depuis l'an 2000.

On peut donc penser que les concentrations en plomb rencontrées dans les sols représentent une pollution historique due à l'utilisation des essences au plomb par le passé. Il n'y a cependant pas de corrélation entre les fortes teneurs en plomb et les sites localisés dans des environnements de forte circulation urbaine, comme on aurait pu le penser.

Des résultats plus complets des analyses des principaux métaux sont donnés dans le tableau de l'illustration 8, les fiches de résultats analytiques des métaux sont présentées en **annexe 5**.

---

<sup>7</sup> Dans une distribution normale (gaussienne), le coefficient de variation CV (le rapport de l'écart-type sur la moyenne) est largement inférieur à 1. S'il est supérieur à 1, il ne peut s'agir d'une distribution normale. Ces observations permettent d'établir la règle suivante : un CV très bas (entre 0 et 0,2) indique que la distribution est probablement gaussienne, et on en déduit que la moyenne arithmétique est une bonne estimation de l'espérance mathématique (la moyenne de la population). Un CV supérieur à 1 indique une distribution erratique non gaussienne, pour laquelle la moyenne arithmétique sera une estimation biaisée de la moyenne.

Ici on considère qu'une distribution gaussienne dans les sols correspond à un fond géochimique plus ou moins naturel, et les distributions erratiques tendant à indiquer la présence de pollutions ponctuelles d'origine généralement anthropique en milieu urbain.

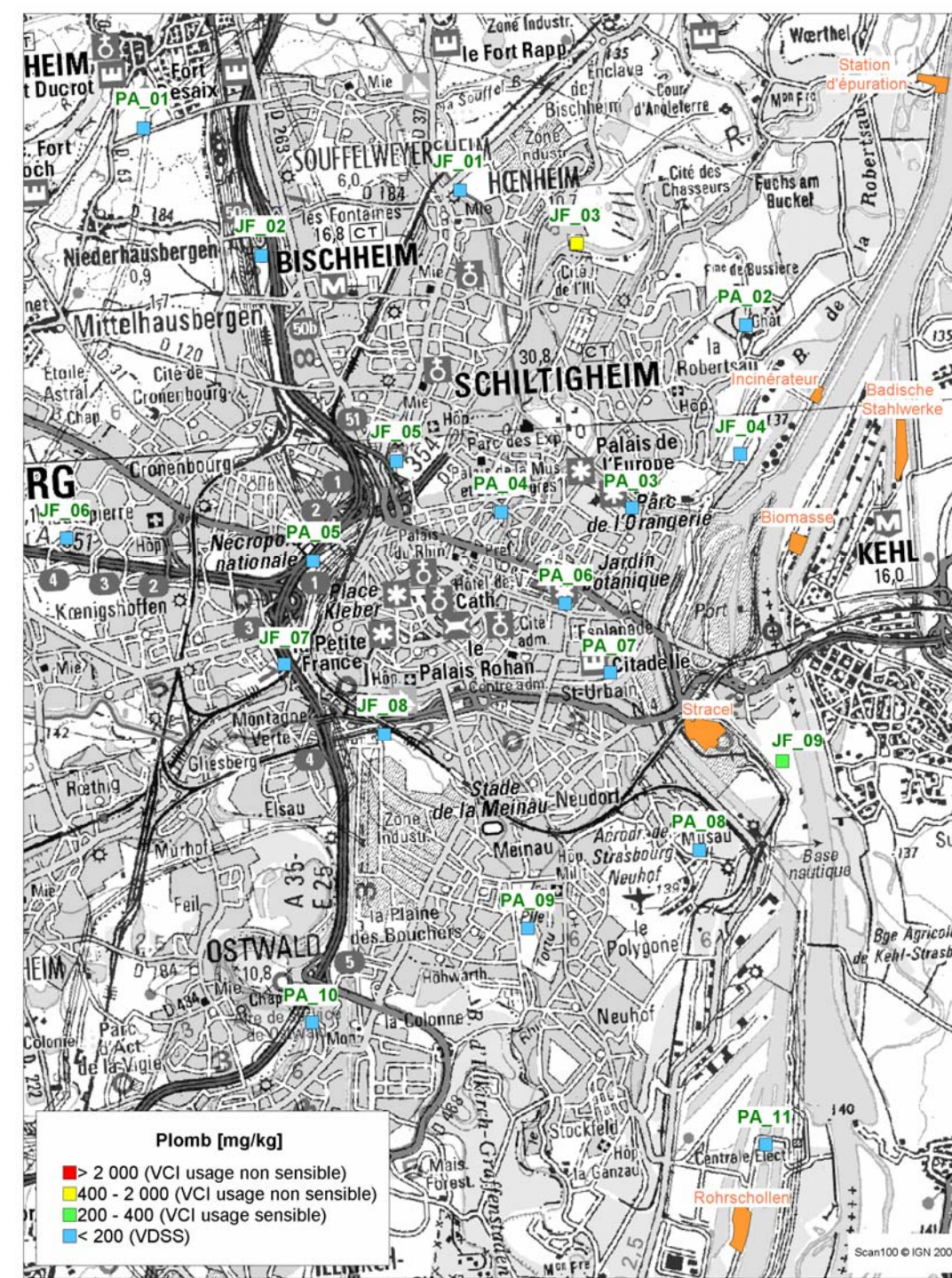
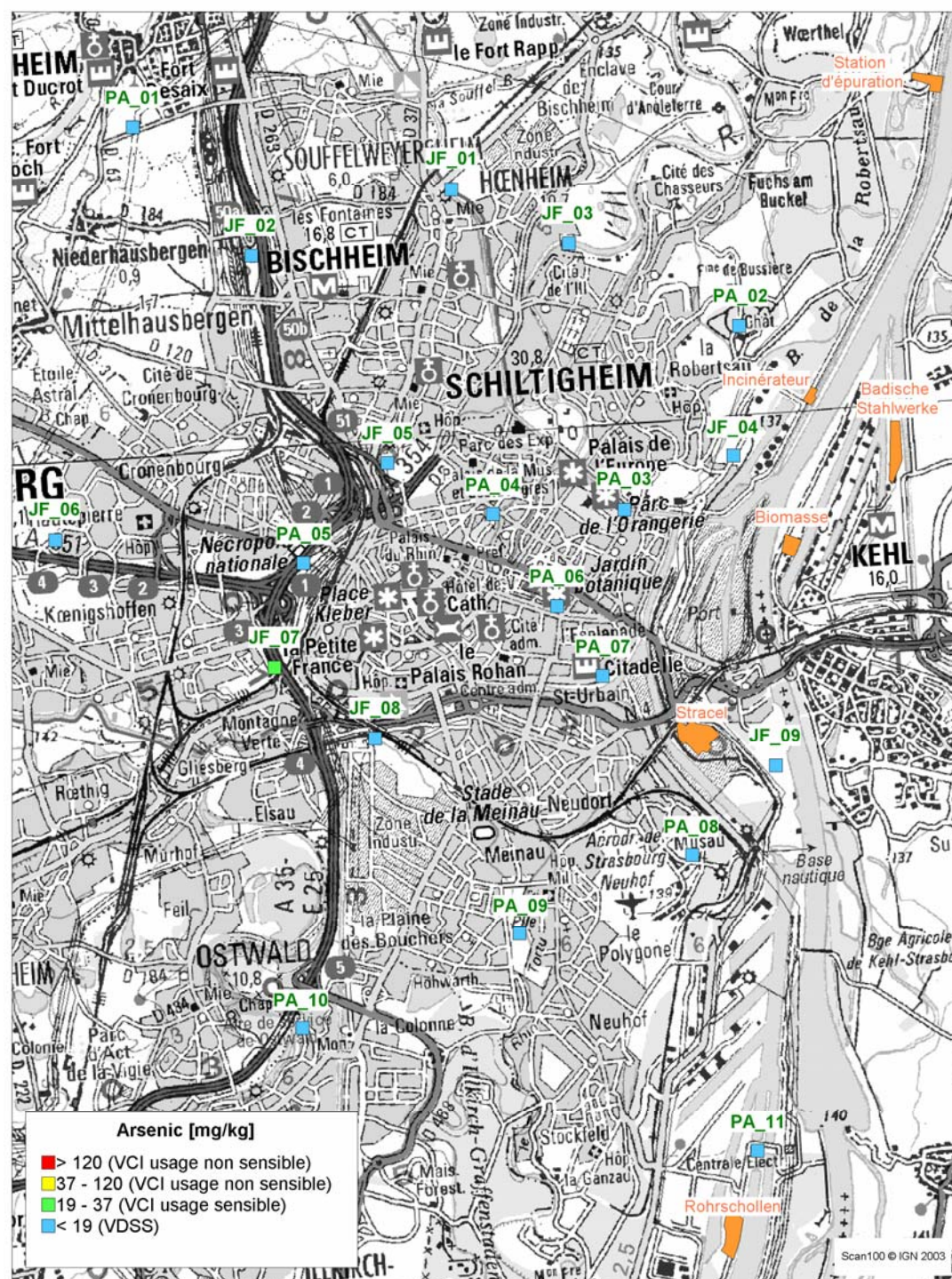


Illustration 7 : Cartes des résultats en arsenic et en plomb



Résultats en métaux	PH (pH)	PM40 (Perte de masse à 40°C)	PP (Perte de masse à 450°C)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Bi (Bismuth)	Cd (Cadmium)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	Hg (Mercure)	Li (Lithium)	Mo (Molybdène)	Ni (Nickel)	Pb (Plomb)	Sb (Antimoine)	Sn (Etain)	Sr (Strontium)	V (Vanadium)	Zn (Zinc)	Zr (Zirconium)
LQ (limite de quantification)	0	0.05	0.05	5	10	10	10	2	5	10	5	0.1	10	5	10	10	10	10	5	10	5	20
Echantillon/ unité	U	%	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
JF 01 ML 1	7.9	17	7.27	8	36	333	< LQ	2	12	72	36	< LQ	42	< LQ	30	58	< LQ	11	139	57	280	274
JF 02 ML 1	7.9	7.87	5.03	18	39	324	< LQ	< LQ	13	76	111	< LQ	34	< LQ	32	74	< LQ	12	166	56	169	359
JF 03 ML 1	7.7	15	6.76	14	18	430	< LQ	< LQ	11	54	61	0.5	36	< LQ	23	405	< LQ	18	210	38	242	170
JF 04 ML 2	7.9	15.9	6.37	9	25	219	< LQ	< LQ	10	57	23	< LQ	32	< LQ	21	35	< LQ	< LQ	270	43	102	149
JF 05 ML 1	8	7.51	4.44	12	23	383	< LQ	< LQ	13	60	64	0.5	33	< LQ	28	182	< LQ	17	170	45	196	234
JF 06 ML 2	8	7.15	4.97	12	35	378	< LQ	< LQ	12	71	31	0.1	44	< LQ	28	155	< LQ	< LQ	144	55	88	316
JF 07 ML 1	7.6	10.6	9.17	20	26	480	< LQ	2	15	63	55	0.5	44	< LQ	32	132	< LQ	17	110	55	330	212
JF 08 ML 2	7.6	11.3	6.34	13	16	434	< LQ	< LQ	11	99	57	0.3	34	< LQ	23	146	< LQ	20	155	43	299	193
JF 09 ML 2	7.8	17.9	8.73	12	< LQ	594	< LQ	< LQ	13	59	45	0.3	32	< LQ	26	328	< LQ	< LQ	217	40	222	113
PA 01 ML 2	8.1	5.3	3.73	10	38	299	< LQ	< LQ	13	77	19	< LQ	35	< LQ	28	19	< LQ	< LQ	167	50	65	411
PA 02 ML 1	7.9	11.8	5.89	7	< LQ	234	< LQ	< LQ	9	46	19	0.2	26	< LQ	15	61	< LQ	< LQ	203	33	68	132
PA 03 ML 2	8	15	4.94	10	23	240	< LQ	< LQ	11	58	21	< LQ	35	< LQ	27	118	< LQ	< LQ	227	46	77	141
PA 04 ML 2	7.8	6.85	4.94	10	39	335	< LQ	< LQ	13	72	23	< LQ	35	< LQ	31	31	< LQ	< LQ	83	55	71	399
PA 05 ML 2	8.1	12	4.83	11	24	324	< LQ	< LQ	11	62	27	< LQ	35	< LQ	26	40	< LQ	< LQ	163	42	84	242
PA 06 ML 1	7.9	13	6.41	8	< LQ	246	< LQ	< LQ	9	54	76	0.2	27	< LQ	18	174	< LQ	< LQ	214	29	122	156
PA 07 ML 1	7.9	14.5	6.47	14	36	581	< LQ	< LQ	15	82	81	0.9	36	< LQ	35	168	< LQ	26	106	55	174	336
PA 08 ML 1	8	15.3	7.35	10	19	274	< LQ	< LQ	11	53	34	0.2	34		23	65	< LQ	12	199	42	105	105
PA 09 ML 2	7.9	17	6.99	9	23	254	< LQ	< LQ	10	59	23	< LQ	34	< LQ	27	196	< LQ	< LQ	164	43	78	157
PA 10 ML 1	8.1	12	4.17	11	37	317	< LQ	2	11	132	83	< LQ	33	5	30	102	< LQ	14	164	43	206	231
PA 11 ML 1	8.2	11.6	4.32	6	17	248	< LQ	< LQ	10	59	18	< LQ	33	< LQ	19	16	< LQ	< LQ	274	44	71	133
Minimum	7.6	5.3	3.73	6	< LQ	219	< LQ	< LQ	9	46	18	< LQ	26	< LQ	15	16	< LQ	< LQ	83	29	65	105
Maximum	8.2	17.9	9.17	20	39	594	< LQ	2	15	132	111	0.9	44	< LQ	35	405	< LQ	< LQ	274	57	330	411
Moyenne	7.9	12.2	6.0	11.2	27.9	346.4	< LQ	< LQ	11.7	68.3	45.4	0.3	34.7	< LQ	26.1	125.3	< LQ	< LQ	177.3	45.7	152.5	223.2
Ecart-type	0.2	3.8	1.5	3.4	8.5	109.9			1.7	19.4	26.9	0.2	4.5		5.2	101.6			50.2	7.9	86.3	96.4
CV	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3			0.1	0.3	0.6	0.7	0.1		0.2	0.8			0.3	0.2	0.6	0.4
VDSS				19					120	65	95	3.5			120	200						4500
VCI sol usage sensible				37					240	130	190	7			240	400						9000
VCI sol us. non sensible				120					1200	7000	950	600			1200	2000						

Illustration 8 : Tableau des résultats des analyses des principaux métaux

### 3.1.2. Analyses au Niton®

Les analyses réalisées avec l'appareil de fluorescence X portatif Niton® sont à considérer comme des analyses qualitatives. La précision et la justesse des analyses de l'appareil sont discutées en **annexe 2**. Seul le cuivre apparaît bien calibré par rapport aux analyses faites en laboratoire. Par contre les analyses des éléments Zr, Sr, Pb, Zn, Fe apparaissent suffisamment fiables pour que l'on puisse faire des comparaisons statistiques entre séries de mesures.

Nous pouvons ainsi comparer les analyses faites au Niton® sur la surface (le sommet des carottes) et en profondeur (le côté des carottes, de 0 à 5 cm de profondeur). Les graphiques de corrélation nous permettent de constater qu'il y a une forte tendance à un enrichissement en profondeur par rapport à la surface pour le fer et localement pour le plomb, une tendance moins forte pour le zirconium et le strontium, tandis que cuivre et zinc ne montrent pas de tendance nette.

Ces observations sont cohérentes avec l'idée que le pH basique tendrait à fixer cuivre, plomb et zinc tandis que le fer serait lessivé en surface. Le comportement du plomb sur certains sites n'est pas expliqué, mais le fait que les teneurs en plomb ne soient pas plus élevées en surface qu'en profondeur tendrait à indiquer que la pollution aérienne au plomb n'est plus aussi forte qu'elle a pu l'être dans le passé, lors de l'utilisation généralisée des carburants au plomb.

## 3.2. ANALYSES DES HYDROCARBURES

### 3.2.1. Substances détectées

Les statistiques sur les résultats fournis par le laboratoire CAR d'Illkirch sont présentées dans le tableau (Illustration 15) avec les normes (VDSS : valeur de source sol ; VCI : valeur de constat d'impact) si elles existent (BRGM, 2002). On trouvera les fiches d'analyse détaillées en **annexe 6**.

Le taux de matière sèche est assez constant, de l'ordre de 85 % ce qui correspond à 15 % d'humidité. Les coefficients de variation sont élevés (toujours supérieurs à 2), ce qui concorde avec une répartition erratique des pollutions dues à des sources ponctuelles anthropiques.

On constate que les pesticides et notamment les HCH (lindane) ne sont pratiquement jamais détectés. Les DDT sont détectés à des teneurs très faibles sur 7 sites. Par contre on observe des teneurs préoccupantes en PCB (polychlorobiphényles) et HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sur certains sites.

### 3.2.2. Résultats en PCB

Les PCB sont détectés sur 8 sites. Sur 6 de ces sites les teneurs sont faibles, mais sur un site (JF 03, Jardins de la Cité de l'III) le total des PCB atteint 112 µg/kg, dépassant de 10 % la VCI usage sensible qui est de 100 µg/kg, et sur un autre (JF 07 Pré Saint-Gall à Koenigshoffen, rue de l'Abbé Lemire) 2887 µg/kg, ce qui est très élevé bien que largement inférieur à la VCI usage non sensible qui varie suivant la substance entre 17 000 et 60 000 µg/kg.

Comme les PCB sont des substances synthétiques qui ne peuvent provenir que d'une pollution anthropique ponctuelle, la question de la dimension de la contamination du site JF 07 pouvait se poser : s'agissait-il d'une anomalie très ponctuelle ou d'une pollution plus étendue due à un déversement accidentel en bord de route par exemple ? La présence de débris de véhicule automobile sur le site de prélèvements (verre "Securit", pot d'échappement, pièces en plastique) plaiderait plutôt en faveur d'un accident de la circulation.

Au nom du principe de précaution, le site JF 07 a fait l'objet de prélèvements de contrôle en mai 2006 destinées à délimiter la zone contaminée. Les analyses confirment le caractère très ponctuel de l'anomalie en PCB (voir la description détaillée du site en **annexe 1**). En effet les 8 échantillons prélevés à proximité (à des distances comprises entre 5 et 40 m) ne montrent que des traces de PCB inférieures de 2 ordres de grandeur (100 fois) à la première analyse (Illustration 9 et Illustration 10). Il n'y a donc pas lieu de tenir compte de cette anomalie très ponctuelle.

N°ECHANTILLON	N° ANALYSE	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 118	PCB 138	PCB 153	PCB 180	PCB totaux
JF07-HY01	26223/05	<2.0	28.5	303	138	809	887	722	2887.5
JF07-HY02	14925/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	8.2	7.9	6	22.1
JF07-HY03	14926/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0
JF07-HY04	14927/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	5	4.8	4.3	14.1
JF07-HY05	14928/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	3.5	3.6	2.4	9.5
JF07-HY06	14929/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0
JF07-HY07	14930/06	<2.0	<2.0	<2.0	2.1	9.6	9.6	5.6	26.9
JF07-HY08	14931/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0
JF07-HY09	14932/06	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	2.6	2.6	<2.0	5.2

Illustration 9 : Résultats en PCB sur l'échantillon d'origine et les contrôles du site JF 07

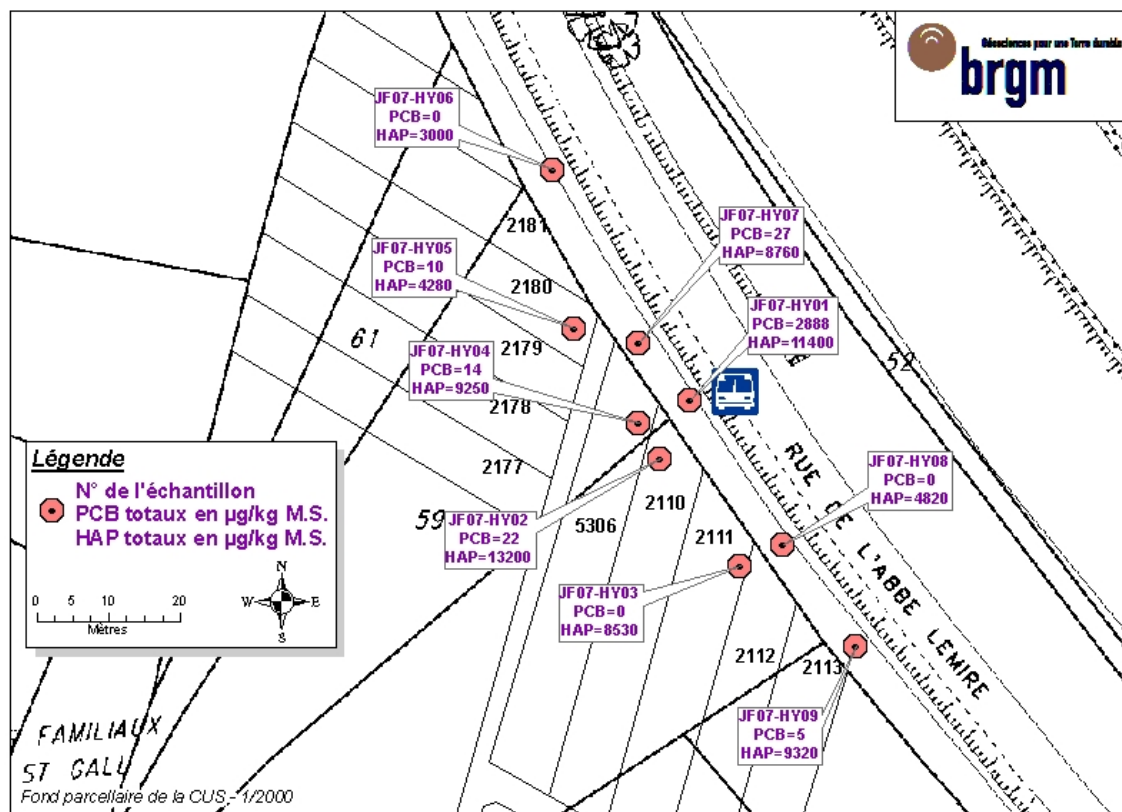


Illustration 10 : Echantillonnage complémentaire sur le site JF 07 avec résultats en PCB et HAP totaux

### 3.2.3. Résultats en HAP

Les HAP sont détectés sur presque tous les sites (19 sur 20). L'analyse de l'impact doit être faite par substance, car la toxicité des HAP varie beaucoup d'une substance à l'autre. On constate ainsi que les concentrations restent largement inférieures aux VDSS, sauf pour un site (JF 05, Elenengarten, Place de Haguenau), où la concentration en benzo(a)pyrène, le composé le plus nocif, dépasse la VDSS et atteint presque la VCI usage sensible (6720 µg/kg pour une VCI de 7000).

La cartographie des résultats en benzo(A)pyrène, le composé le plus toxique, est présentée à titre d'exemple (Illustration 14). Elle ne montre pas de répartition interprétable.

Lorsque l'on analyse la proportion des différentes substances par rapport au total des HAP, on remarque que cette proportion est remarquablement constante quel que soit le site considéré, avec une dominante de fluoranthène (Illustration 11). Deux sites ne sont pas pris en compte, l'un parce qu'aucun HAP n'est quantifié, l'autre parce que seul le fluoranthène est quantifié. Cette observation indique que les HAP ont une origine commune, qui est probablement la circulation automobile.

	FLUORANTHENE	BENZO(B) FLUORANTHENE	BENZO(K) FLUORANTHENE	BENZO(A) PYRENE	INDENO PYRENE	BENZO(GHI) PERYLENE
Nbre de détections	18	18	18	18	18	18
Minimum	25%	14%	8%	11%	8%	8%
Maximum	42%	25%	14%	21%	13%	13%
<b>Moyenne</b>	<b>32%</b>	<b>19%</b>	<b>10%</b>	<b>18%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>
Médiane	32%	19%	9%	18%	10%	11%
Ecart-type	4%	3%	1%	3%	1%	1%
Coef. Var.	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1

Illustration 11 : Proportion des différents HAP sur les 18 sites où tous les HAP sont quantifiés

L'hypothèse d'une pollution ayant pour origine la circulation automobile peut être testée en examinant la distribution des HAP en fonction du type de voisinage des sites. On trouve effectivement que ce sont les sites localisés dans des environnements de forte circulation urbaine qui présentent les plus fortes concentrations en HAP, qui sont plus élevées d'un ordre de grandeur (10 fois) que dans les autres environnements (Illustration 12). On note que le coefficient de variation est plus faible pour le total des HAP de chaque type de voisinage que pour l'ensemble des sites : il reste élevé (de 0,9 à 1,5), mais la variabilité est moins grande lorsqu'on considère le même type de voisinage.

HAP totaux	Voisinage du site			
	circulation automobile	industriel	naturel	résidentiel
Min	287	0	6.3	310
Max	42000	2530	2880	4560
Moyenne	10979	885	1011	1786
Ecart-type	16028	1426	1276	1682
Coef. var.	1.5	1.6	1.3	0.9
Médiane	5744	124	579	772

Illustration 12 : Statistiques des HAP par type d'environnement (en µg/kg)

N°ECHANTILLON	N° ANALYSE	FLUORANTHENE	BENZO(B) FLUORANTHENE	BENZO(K) FLUORANTHENE	BENZO(A) PYRENE	INDENO PYRENE	BENZO(GHI) PERYLENE	HAP totaux
JF07-HY01	26223/05	4740	1610	1060	2070	999	944	11400
JF07-HY02	14925/06	3750	2110	1420	2340	1900	1680	13200
JF07-HY03	14926/06	2800	1490	805	1730	850	850	8530
JF07-HY04	14927/06	2750	1560	1020	1760	1110	1050	9250
JF07-HY05	14928/06	1430	765	411	745	471	458	4280
JF07-HY06	14929/06	1220	455	293	446	300	288	3000
JF07-HY07	14930/06	3440	1400	875	1460	781	803	8760
JF07-HY08	14931/06	2010	808	465	639	466	425	4820
JF07-HY09	14932/06	4110	1160	889	1380	815	963	9320
	Moyenne	2917	1262	804	1397	855	829	8062
	Ecart-type	1208	514	360	661	473	418	3385
	CV	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4

Illustration 13 : Résultats en HAP sur l'échantillon d'origine et les contrôles du site JF 07 (en µg/kg)

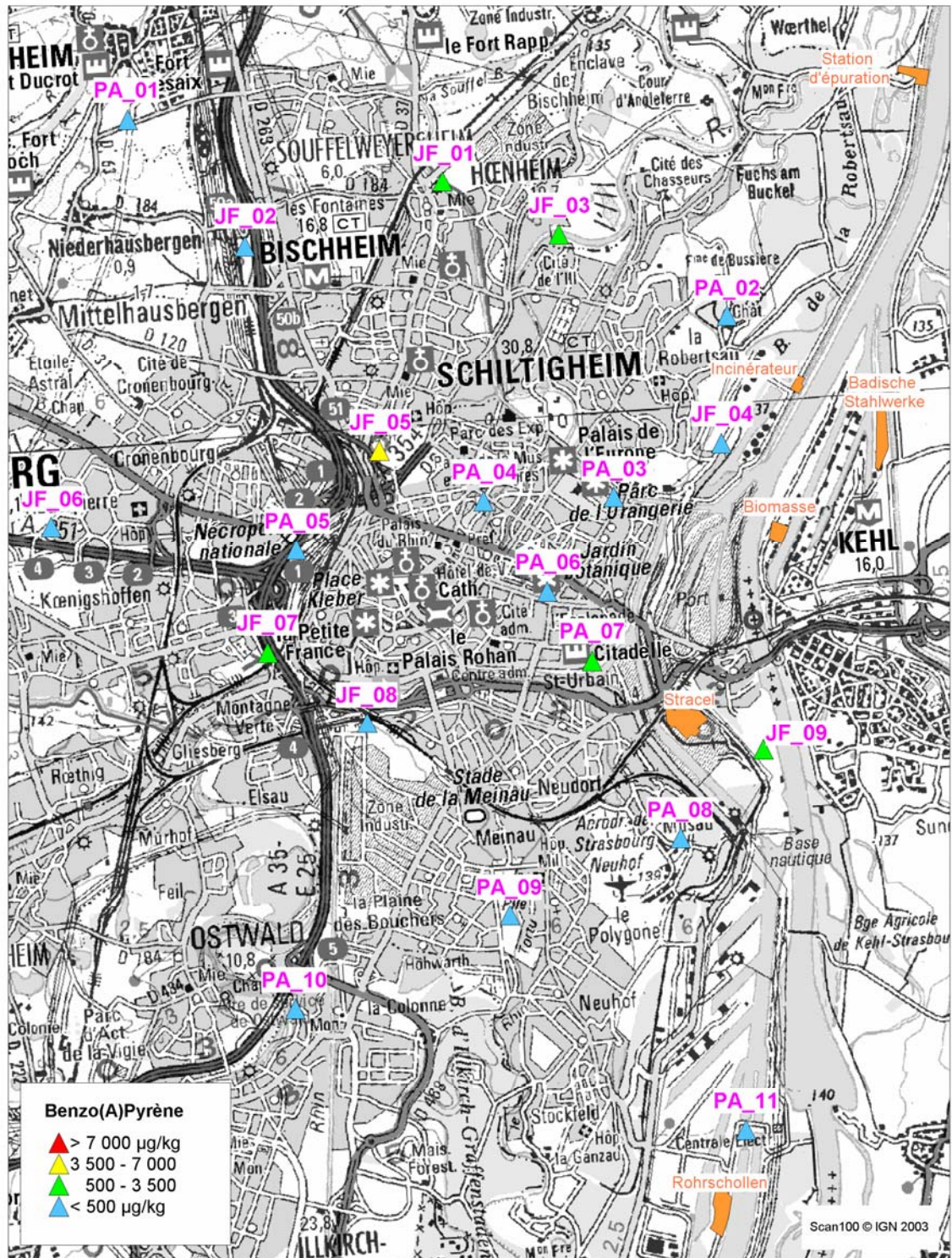


Illustration 14 : Carte des résultats en benzo(A)pyrène

Le cas du site JF 07, où les HAP ont été également analysés sur les 8 points de contrôle, permet d'examiner ce qui se passe à une échelle locale (Illustration 10 et Illustration 13). On constate que la variabilité des résultats est beaucoup plus faible : les valeurs varient de 1 à 4, le coefficient de variation est d'environ 0,5, indiquant une répartition proche d'une gaussienne à cette échelle. Il s'agit donc bien d'une pollution diffuse à l'échelle locale.

	Unité	Nbre de détections	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Coef. Var.	VDSS	VCI sensible
MATIERES SECHES	%		78	91	85	84	0.0		
HYDROCARBURES TOTAUX	mg/kg	20	3	573	54	21	2.3	2500	5000
ALDRINE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	2000	4000
DIELDRINE	µg/kg	1	0	27	1	0	4.5	-	-
DRINES totaux	µg/kg	1	0	27	1	0	4.5	2000	4000
HEXACHLOROBUTADIENE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	13000	
α HCH	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
β HCH	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
γ HCH	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
HCH totaux	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	5000	10000
HEXACHLOROBENZENE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	4000	8000
TRIFLURALINE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
1,2,3-TRICHLOROBENZENE	µg/kg	1	0	3	0	0	4.5	-	-
1,2,4-TRICHLOROBENZENE	µg/kg	1	0	6	0	0	4.5	12000	25000
1,3,5-TRICHLOROBENZENE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
A ENDOSULFAN	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
B ENDOSULFAN	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
ENDRINE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
OP DDE	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
PP DDE	µg/kg	7	0	31	4	0	2.0	-	-
OP DDD	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
PP DDD	µg/kg	3	0	8	1	0	2.8	-	-
OP DDT	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	-	-
PP DDT	µg/kg	5	0	43	5	0	2.2	-	-
DD totaux	µg/kg	7	0	82	9	0	2.1	2000	4000
PCB 28	µg/kg	0	0	0	0	0	0.0	50	100
PCB 52	µg/kg	2	0	29	2	0	3.5	50	100
PCB 101	µg/kg	3	0	303	16	0	4.2	50	100
PCB 118	µg/kg	4	0	138	8	0	3.8	50	100
PCB 138	µg/kg	7	0	809	43	0	4.2	50	100
PCB 153	µg/kg	8	0	887	47	0	4.2	50	100
PCB 180	µg/kg	5	0	722	38	0	4.3	50	100
PCB totaux	µg/kg	8	0	2888	154	0	4.2	-	-
FLUORANTHENE	µg/kg	19	0	12900	1399	247	2.1	3050000	6100000
BENZO(B)FLUORANTHENE	µg/kg	18	0	10000	850	140	2.6	-	-
BENZO(K)FLUORANTHENE	µg/kg	18	0	3830	419	72	2.1	450000	900000
BENZO(A)PYRENE	µg/kg	18	0	6720	699	146	2.2	3500	7000
INDENOPYRENE	µg/kg	18	0	4350	447	81	2.2	8000	16100
BENZO(GHI)PERYLENE	µg/kg	18	0	4100	437	80	2.1	-	-
HPA totaux	µg/kg	19	0	42000	4254	750	2.2	-	-

Illustration 15 : Statistiques sur les résultats en hydrocarbures

### 3.3. ANALYSES DES DIOXINES

10 échantillons ont fait l'objet d'analyses des polychloro-dibenzo-p-dioxines (PCDD) et des polychloro-dibenzofuranes (PCDF). Parmi ces composés, seuls 17 congénères sont reconnus comme toxiques. La mesure de toxicité d'un échantillon est obtenue par la mesure quantitative de ces 17 congénères auquel on applique un facteur d'équivalent toxique (I-TEF) pour obtenir une teneur en "Equivalent toxique dioxines et furanes " (I-TE) (*cf. annexe 8*).

Les résultats des analyses réalisées au CARSO – Laboratoire santé environnement hygiène de Lyon sont donnés dans le tableau (Illustration 16), l'étude complète est présentée en **annexe 7** (CARSO, 2005). On constate que l'indice I-TE varie entre 1,6 et 11 pg/g, avec une distribution relativement erratique (coefficient de variation de 0,8) qui se reflète par une moyenne de 4,2 et une médiane de 2,5.

N° site	Type site	Nom du secteur	Commune	Voisinage	I-TEQ OMS 1997	Unité
JF_01	Jardin familial	Bord canal	Hœnheim	résidentiel	2.3	pg/g MS
JF_03	Jardin familial	Cité de l'III	Strasbourg	chaufferie	8.7	pg/g MS
JF_04	Jardin familial	Port aux Pétroles/ Engelbrechtsworther	Strasbourg	industriel	4.3	pg/g MS
JF_09	Jardin familial	Parc du Rhin	Strasbourg	naturel	11	pg/g MS
PA_02	Parc public	Parc de Pourtalès	Strasbourg	naturel	2	pg/g MS
PA_03	Parc public	Orangerie	Strasbourg	résidentiel	1.6	pg/g MS
PA_04	Parc public	Place de la République	Strasbourg	résidentiel	1.6	pg/g MS
PA_08	Parc public	Polygone	Strasbourg	naturel	2.7	pg/g MS
PA_09	Parc public	Meinau	Strasbourg	résidentiel	1.9	pg/g MS
PA_11	Parc public	Darse IV	Strasbourg	industriel	6.1	pg/g MS
					Minimum	1.6
					Maximum	11.0
					Moyenne	4.2
					Ecart-type	3.3
					CV	0.8
					Médiane	2.5

*Illustration 16 : Equivalents toxiques des dioxines et furanes*



Les valeurs guides françaises pour les concentrations en dioxines dans les sols sont relativement élevées : la VDSS est de 500 pg I-TEQ/g MS, la VCI de 1000 (BRGM, 2002). On pourra utilement se référer aux valeurs guides plus strictes proposées par le Groupe de travail *Bund/Länder Arbeitsgruppe Dioxine* en 1993 (Illustration 17). Leur application aux usages agricoles recommande l'interdiction du pâturage au-delà de 5 pg/g et la limitation des autres usages agricoles au-delà de 40 pg/g.

En Suède, la limite pour les sols est fixée à 10 pg/g pour les usages sensibles et 250 pg/g pour les usages non sensibles (UNEP, 1999).

Usage	Valeur guide
Tous usages possibles	< 5 pg I-TEQ/g MS
Pâturage interdit, contrôle des cultures	5 à 40 pg I-TEQ/g MS
Limitation des cultures	> 40 pg I-TEQ/g MS
Usage aire de jeu interdit	> 100 pg I-TEQ/g MS

Illustration 17 : Valeurs guides pour les dioxines dans les sols (Umweltbundesamt 2006)

On constate que la moyenne et la médiane des équivalents toxiques des dioxines et furanes des sols de la CUS se trouvent effectivement en dessous de la valeur guide allemande de 5 pg/g TEQ, et que la valeur maximum de 11 dépasse de peu la limite suédoise pour les usages sensibles de 10 pg/g TEQ. Globalement il n'y a donc pas de valeurs alarmantes pour l'usage "jardins familiaux". Il faut d'ailleurs noter que les dioxines, en règle générale, ne sont pas du tout concentrées par les légumes (à l'exception des courgettes). Les choux servent de référence pour les retombées aériennes de dioxine justement parce qu'ils ne l'absorbent pas du sol, mais piègent les particules aériennes<sup>8</sup>. L'autoconsommation de légumes ne pose donc pas de problème *a priori* surtout si l'on prend la précaution de laver les légumes avant consommation.

En ce qui concerne l'usage "parc public", les concentrations observées ne posent pas de problème. En effet l'impact sur la santé peut être évalué en se référant à la méthodologie de l'INERIS pour l'établissement des VCI (Bonnard *et al.* 2001) : un enfant (de moins de 6 ans et de poids moyen 15 kg) jouant dans un espace extérieur absorbe 150 mg de terre par jour, ce qui revient avec un sol à 10 pg/g à absorber  $10 * 0,150 / 15 = 0,1$  pg/kg. Cette valeur est négligeable en comparaison de la dose journalière tolérable définie par l'Union Européenne qui est de 2 pg par kg de poids. Ce n'est d'ailleurs qu'à partir d'une contamination 10 fois supérieure que l'usage aire de jeu est limité dans les recommandations allemandes (Illustration 17).

<sup>8</sup> D'après une communication de R Malisch, Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt (CVUA) Freiburg : Biomonitoring in Kehl – Grünkohl (Sitzung Umwelt- und Sozialausschuß der Stadt Kehl, 14 juin 2005)

La carte de répartition des résultats (Illustration 18) fait ressortir les sites dépassant 5 pg/g : PA 11 et JF 09 se trouvent en bordure du Rhin, à faible distance de sources potentielles d'émission (PA 11, 6,1 pg/g, se situe au Nord de l'usine d'incinération du Rohrschollen, JF 09, 11 pg/g, au Sud de l'usine Stracel). L'anomalie de JF 03 (8,7 pg/g, Cité de l'III) peut s'expliquer par la proximité d'une chaufferie.

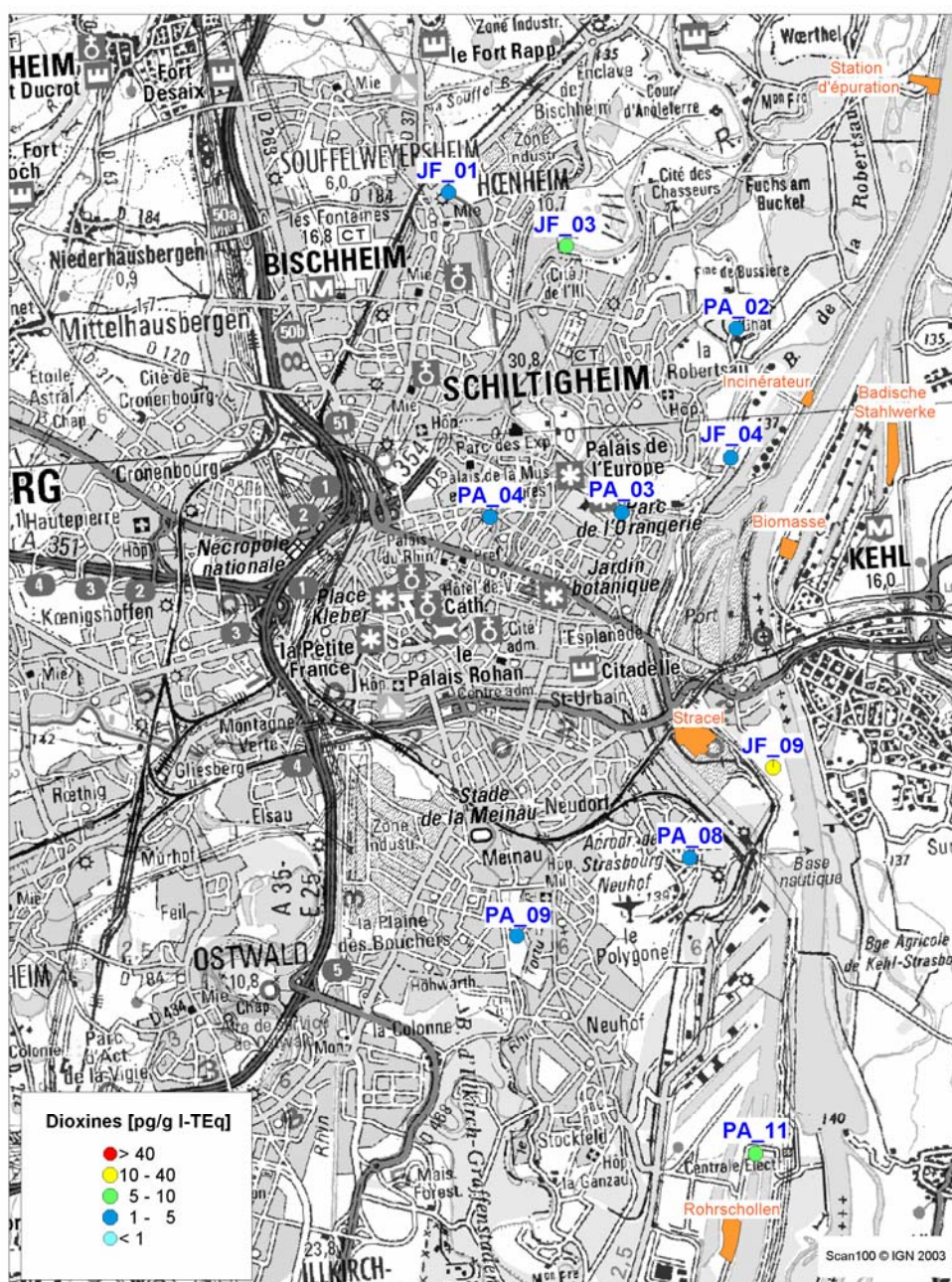


Illustration 18 : Carte des résultats en dioxines  
En orange : sources potentielles d'émission de pollutions aériennes



## 4. Etude des retombées aériennes

### 4.1. ETUDE DES PLUIES

M. Maurice Millet du Laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère (Centre de Géochimie de la surface, Université Louis Pasteur, Strasbourg) nous a aimablement mis à disposition des analyses des pluies à Strasbourg effectuées entre 1998 et 2001 (**annexe 3**). Les prélèvements ont été effectués à la station météo de l'Observatoire au Jardin botanique, correspondant au site PA 06. Les analyses comprennent le relevé des hauteurs de pluie (Illustration 19), le pH (Illustration 20), les anions et cations majeurs, ainsi que les métaux lourds, mais ces derniers essentiellement sur l'année 2000.

Le graphe du pH (Illustration 20) indique que les pluies à Strasbourg sont plutôt acides (pH généralement inférieur à 7). La composition des pluies et des brouillards étudiés par le même Laboratoire de 1991 à 1999 montre une tendance à la diminution de l'acidité que les auteurs attribuent à la réduction des émissions de SO<sub>2</sub> (Herckes *et al.*, 1998, 2002). L'examen du graphe permet de constater que les pluies sont généralement plus acides en hiver et les pluies de l'année 2000, pour laquelle nous avons des données sur les concentrations en métaux, étaient particulièrement acides, alors que les quantités tombées ne présentaient rien d'exceptionnel.

Les concentrations en métaux ont été converties en µg/L afin de pouvoir les comparer à des VCI eaux (Illustration 21). Les concentrations observées sont très en dessous des valeurs guides pour les métaux à l'exception du nickel, dont la valeur maximale observée atteint la VCI, et de l'aluminium, qui s'en rapproche. En examinant de plus près le tableau, on remarque que les concentrations en nickel décroissent avec le temps, de même que Zn, Fe et Cu, tandis que le pH augmente.

Si l'on trace un graphique de corrélation, il apparaît, malgré quelques valeurs erratiques, une nette anti-corrélation entre pH et les métaux nickel, cuivre et zinc (Illustration 22). Il est permis de supposer que cela est dû à une plus grande solubilité de ces métaux aux pH acides.

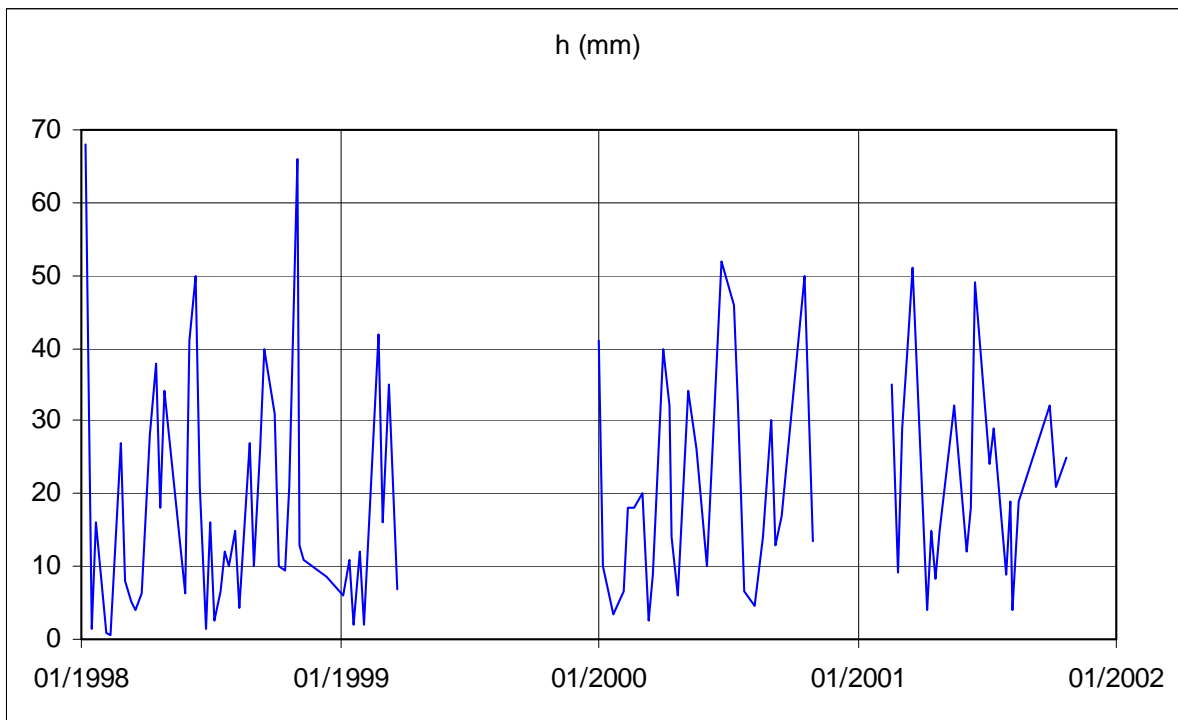


Illustration 19 : Quantités de pluie à Strasbourg 1998-2001

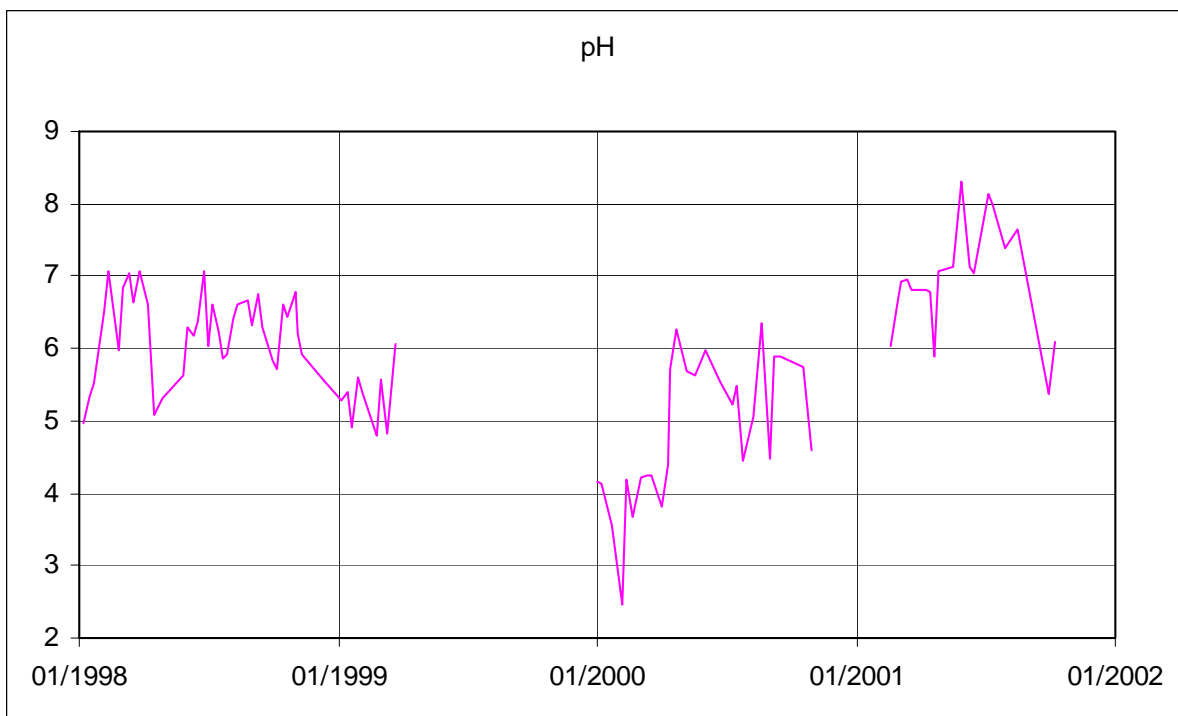


Illustration 20 : pH des pluies à Strasbourg 1998-2001

	pH	H(mm) mm	Zn µg/L	Ni µg/L	Mn µg/L	Fe µg/L	Cr µg/L	Cu µg/L	Ti µg/L	Al µg/L	Sr µg/L	Cd µg/L	Ba µg/L	Pb µg/L
12/1999			66.0	22.0	6.0	205.0		75.0	3.0	37.0	5.0		4.0	
01/2000	3.6	61.2	58.0	20.7	13.7	320.6		41.7	4.0	122.7	4.6		6.0	
02/2000	4.0	56.0	29.5	10.5	6.5	69.5		10.2	2.0	29.0	3.0		4.0	
03/2000	4.1	51.5	64.0	16.0	18.0	322.9		12.5	2.0	144.5	5.0		6.0	
04/2000	5.5	52.0	60.6	10.8	10.0	39.0	1.9	2.4		80.0	2.9	0.1	1.7	1.2
05/2000	5.8	70.0	22.0	15.5	10.0	48.1	0.9	4.6		31.0	1.6	0.1	1.5	0.8
06/2000	5.6	52.0	46.0	2.2	6.0		1.2	43.5		18.0	4.7	0.2	2.3	2.7
07/2000	5.1	136.5	27.3	4.4	29.3	12.1	0.4	7.4	7.0	45.0	2.4	0.3	2.7	5.1
08/2000	5.3	48.5	34.0	4.7	15.0		0.4	4.2		36.0	3.9	0.2	3.7	1.3
09/2000	5.9	30.0	20.0	2.2	12.7		0.5	0.5		31.5	1.4	0.1	2.0	4.5
10/2000	5.2	63.5	18.0	3.0	13.0	3.0	0.4	0.5		132.0	2.8	0.1	1.6	1.5
02/2001	6.3	44.1	18.0	2.1	8.0	48.1	0.1	3.5		184.5	3.2	0.3	2.4	3.7
03/2001	6.9	125.9	6.0	0.6	4.7		0.1			13.5	1.2		0.6	0.6
Minimum	3.6	30.0	6.0	0.6	4.7	3.0	0.1	0.5	2.0	13.5	1.2	0.1	0.6	0.6
Maximum	6.9	136.5	66.0	22.0	29.3	322.9	1.9	75.0	7.0	184.5	5.0	0.3	6.0	5.1
Moyenne	5.3	65.9	36.1	8.8	11.8	118.7	0.6	17.2	3.6	69.6	3.2	0.2	3.0	2.4
Ecart-type	1.0	32.2	20.4	7.6	6.6	129.1	0.6	23.5	2.1	56.9	1.4	0.1	1.7	1.7
CV	0.2	0.5	0.6	0.9	0.6	1.1	0.9	1.4	0.6	0.8	0.4	0.4	0.6	0.7
<b>VCI</b>			<b>3000</b>	<b>20</b>	<b>50</b>		<b>50</b>	<b>2000</b>		<b>200</b>		<b>5</b>	<b>700</b>	<b>25</b>

Illustration 21 : Tableau des concentrations des métaux lourds dans les pluies à Strasbourg

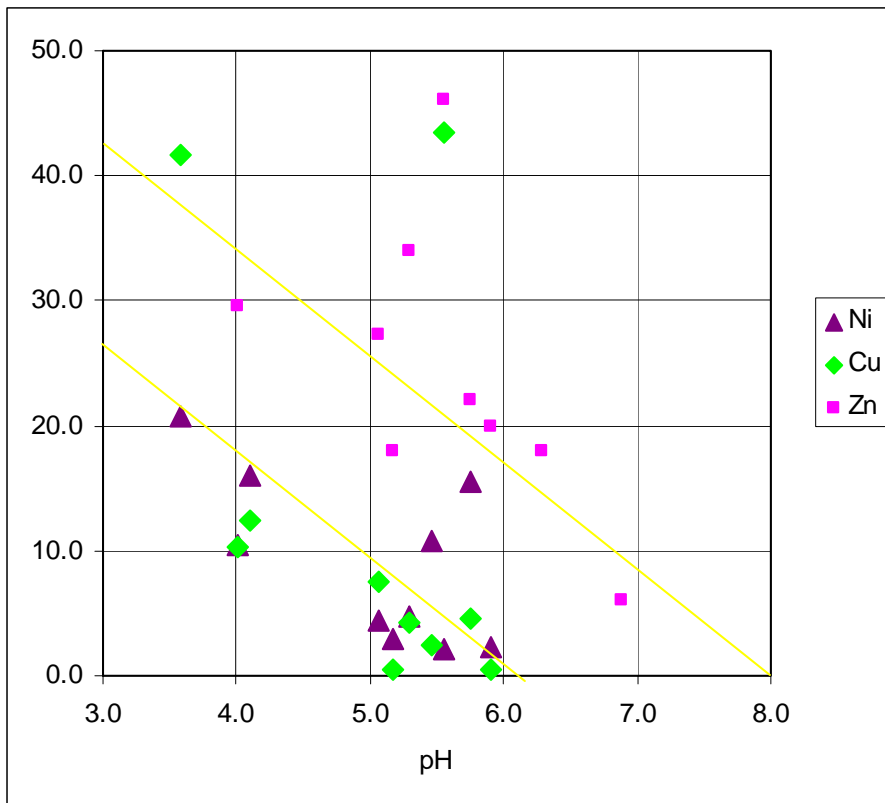


Illustration 22 : Anti-corrélation entre métaux (en µg/L) et pH

## 4.2. ETUDE DES RETOMBÉES PARTICULAIRES

Une étude pilote de caractérisation des matières en suspension particulaires présentes dans les eaux de pluies de la ville de Strasbourg a été menée par l'équipe "Cristallochimie et réactivité des particules fines – Géoparticules" (Centre de Géochimie de la surface, Université Louis Pasteur, Strasbourg) sur le site de l'Observatoire de Météo France (site PA 06 - Jardin Botanique). Cette expérience a fait l'objet d'un suivi pendant une période de 7 mois entre décembre 2003 et juin 2004.

Les particules ont été collectées par filtrage des eaux de pluie en continu sur le terrain avec un dispositif spécifiquement mis au point à l'INRA pour la filtration *in situ* à 5 microns des eaux d'infiltration. Les particules déposées sur des grilles de microscopies ont été analysées individuellement par microscopie électronique à transmission (MET). Au total, près de 800 analyses chimiques multi-élémentaires et 85 documents images ont été enregistrés sur l'ensemble des échantillons. Après filtrage des données, il est resté 658 analyses qui ont été traitées quantitativement.

Le détail de ces travaux réalisés par une équipe mixte CNRS-Université-INRA est exposé en **annexe 4**. L'étude a fait l'objet d'un poster à la rencontre de l'EUG 2006 (Elsass *et al.*, 2006) et un article est soumis au *Journal of soils and sediments* (Elsass *et al.*, soumis).

### 4.2.1. Classification des particules en familles et espèces

Les analyses chimiques des particules individuelles ont été traitées et classées suivant des critères de composition chimique prenant en compte les abondances relatives en éléments organique (C) et minéraux (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba, Pb). La terminologie « non déterminés » (ND) a été utilisée pour désigner les particules non identifiables d'après leur composition chimique par le système de classement utilisé.

Quatre **familles de particules** ont été distinguées d'après leurs constituants : (1) organique ; (2) minérale ; (3) organo-minérale (mixte) ; (4) non déterminée.

Les constituants des particules de chaque famille ont été classés en **espèces**, en se basant sur la richesse en éléments métalliques (Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba, Pb), et les teneurs en éléments chimiques caractéristiques des phases minérales connues dans la littérature :

- L'abondance d'éléments métalliques a servi à définir l'espèce des « ETM ».
- La richesse en éléments majeurs P, S et Cl a servi à définir l'espèce des « sels ».
- La prépondérance de l'élément Si a servi à définir l'espèce appelée « silices ».
- La richesse en Si et Al, ainsi que le rapport Si/Al a servi à définir l'espèce « argiles ».

Au total, cinq espèces composant les familles de particules ont été distinguées :

- (1) ETM ; (2) sels ; (3) silices ; (4) argiles ; (5) non déterminés (ND).



#### **4.2.2. Analyse et interprétation des données**

L'analyse des données traitées s'est appuyée sur la distribution mensuelle des quatre familles de particules et des cinq espèces composant les familles, ainsi que sur la répartition des cinq espèces au sein des familles. Cette analyse a permis de mettre en évidence les caractéristiques principales concernant la nature et la composition chimique des particules présentes dans les retombées atmosphériques.

A chaque étape des traitements et des analyses des données, les interprétations se sont appuyées sur les images des dépôts de matières particulaires. Les images prises à différents grossissements permettent un contrôle, par estimation visuelle, de l'homogénéité / hétérogénéité du dépôt de particules sur l'ensemble de la grille et en conséquence de la représentativité des zones analysées.

La morphologie des particules analysées a également servi à valider les critères de classification. Cette validation a été particulièrement utile pour les phases organiques telles que les bactéries et les espèces minérales telles que les oxy-hydroxydes métalliques et argiles qui ont toutes trois des faciès très typés.

La validation morphologique des espèces « sels » a aussi pu être faite grâce aux nombreuses images et analyses chimiques qui ont été publiées dans la littérature scientifique internationale. La grande majorité de cette littérature traite des aérosols d'origine marine.

#### ***Distribution des familles de particules***

Les distributions des quatre familles de particules identifiées font apparaître une grande variabilité à l'échelle de temps mensuelle.

Les particules classées dans la famille des « organiques » sont essentiellement des micro-organismes de type bactéries d'après des critères morphologiques (Illustration 24).

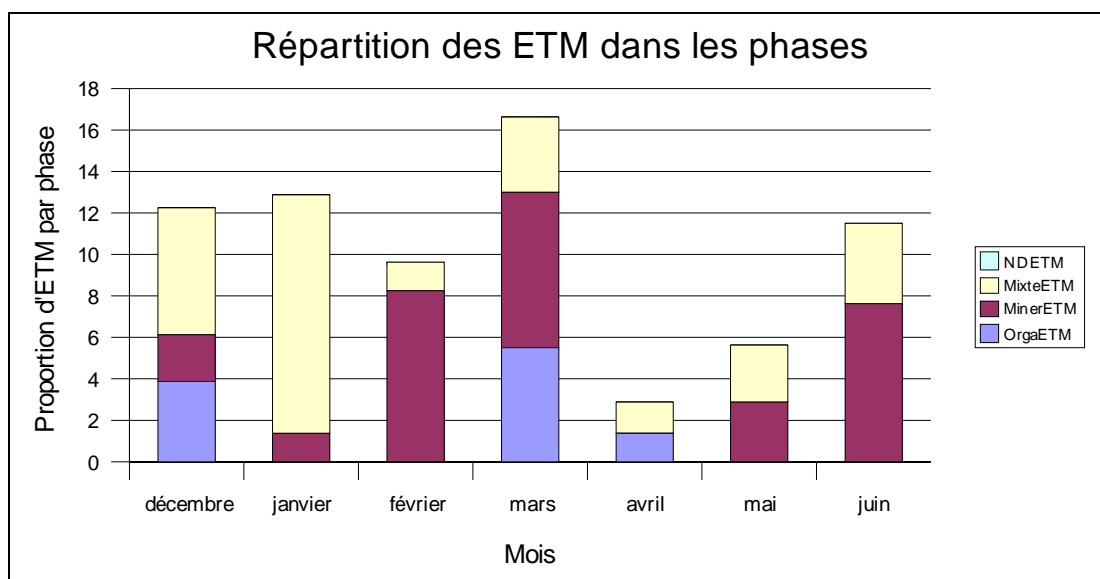
On assiste en particulier aux mois de décembre 2003, février et mars 2004 à des efflorescences bactériennes marquées (Illustration 26).

Par contre les retombées atmosphériques du mois de juin 2004 sont essentiellement chargées en particules minérales (Illustration 25 et Illustration 27).

#### ***Distribution des espèces de constituants***

La distinction d'espèces de constituants (ETM, sels, silices, argiles et ND) a permis de préciser leurs relations (fréquence d'occurrence) avec les familles de particules durant l'ensemble de la période étudiée et d'en suivre les variabilités mensuelles d'après leur abondance moyenne et leur distribution dans les familles de particules.

- Espèce « **ETM** » : Les éléments en trace métalliques (ETM) ont été régulièrement détectés tous les mois. Leur distribution mensuelle et leur répartition par famille sont très hétérogènes. Les ETM apparaissent très nettement liés à des phases minérales ou mixtes (organo-minérales).



*Illustration 23 : Répartition mensuelle des ETM dans les familles de constituants*

- Espèce « **Sels** » : Les sels représentent une espèce généralement très abondante (40 à 80%), sauf pour les mois de février (20%) et mars (7%) où il a été noté une efflorescence bactérienne. L'abondance des sels n'apparaît pas liée à une quelconque famille de constituants (famille majoritairement mixte). Les sels chlorurés peuvent aussi bien avoir une origine lointaine (marine) que locale (sels de déneigement).
- Espèce « **Silices** » : La répartition mensuelle de l'espèce de ces composants essentiellement siliceux montre une occurrence sporadique et généralement faible à l'échelle mensuelle, exception faite du mois de juin. La variabilité des occurrences apparaît surtout liée à l'abondance des constituants, en particulier ceux de la famille des organiques. L'exception du mois de juin semble être accidentelle et liée à des phénomènes de combustion d'après la morphologie des particules.
- Espèce « **Argiles** » : La répartition mensuelle de l'espèce des argiles (composants silico-alumineux), montre le moins de variabilité et leur occurrence apparaît essentiellement liée à des phases minérales et organo-minérales en hiver et minérales au printemps. Il pourrait s'agir de poussières de provenances différentes, plus ou moins lointaines, se différenciant d'après leur composante organique.

### 4.2.3. Synthèse des résultats

Les « Sels » et « Argiles » forment l'essentiel des retombées particulaires. L'espèce « Silices » est généralement rare, les « ETM » (éléments traces métalliques) sont omniprésents.

Malgré la grande variabilité à l'échelle mensuelle des retombées particulaires un certain nombre d'observations peuvent être faites :

- Une abondance plus ou moins grande des retombées de particules de sels (facteur éolien local et aérosols marins) ;
- Des retombées régulières de particules argileuses plus ou moins riches en matière organique (facteur éolien, poussières d'origine proche ou lointaine) ;
- Des périodes d'efflorescences bactériennes (facteur climatique) ;
- Une affinité marquée des éléments métalliques pour les particules minérales ou mixtes. La répartition à l'échelle mensuelle des ETM par type de particule est extrêmement variable, ce qui signifie qu'il existe des sources diverses d'ETM.

Cette étude réalisée à titre pilote mériterait d'être complétée par un suivi focalisé sur les sources d'espèces métalliques, de façon à mieux évaluer la part des sources géogènes et des sources anthropiques (industrielles notamment) dans les retombées atmosphériques particulaires.

Cela nécessiterait un suivi sur une longue durée pour confirmer le caractère saisonnier de certaines retombées et faire la part des occurrences accidentelles. Bien que toutes les études publiées s'accordent à affirmer que la diffusion des aérosols concerne une échelle spatiale transcontinentale, le caractère spécifiquement urbain de certaines des particules collectées devra être confirmé par comparaison avec les retombées en zones périurbaine et/ou agricole situées à l'écart de complexes industriels et même de toute source d'émission domestique.

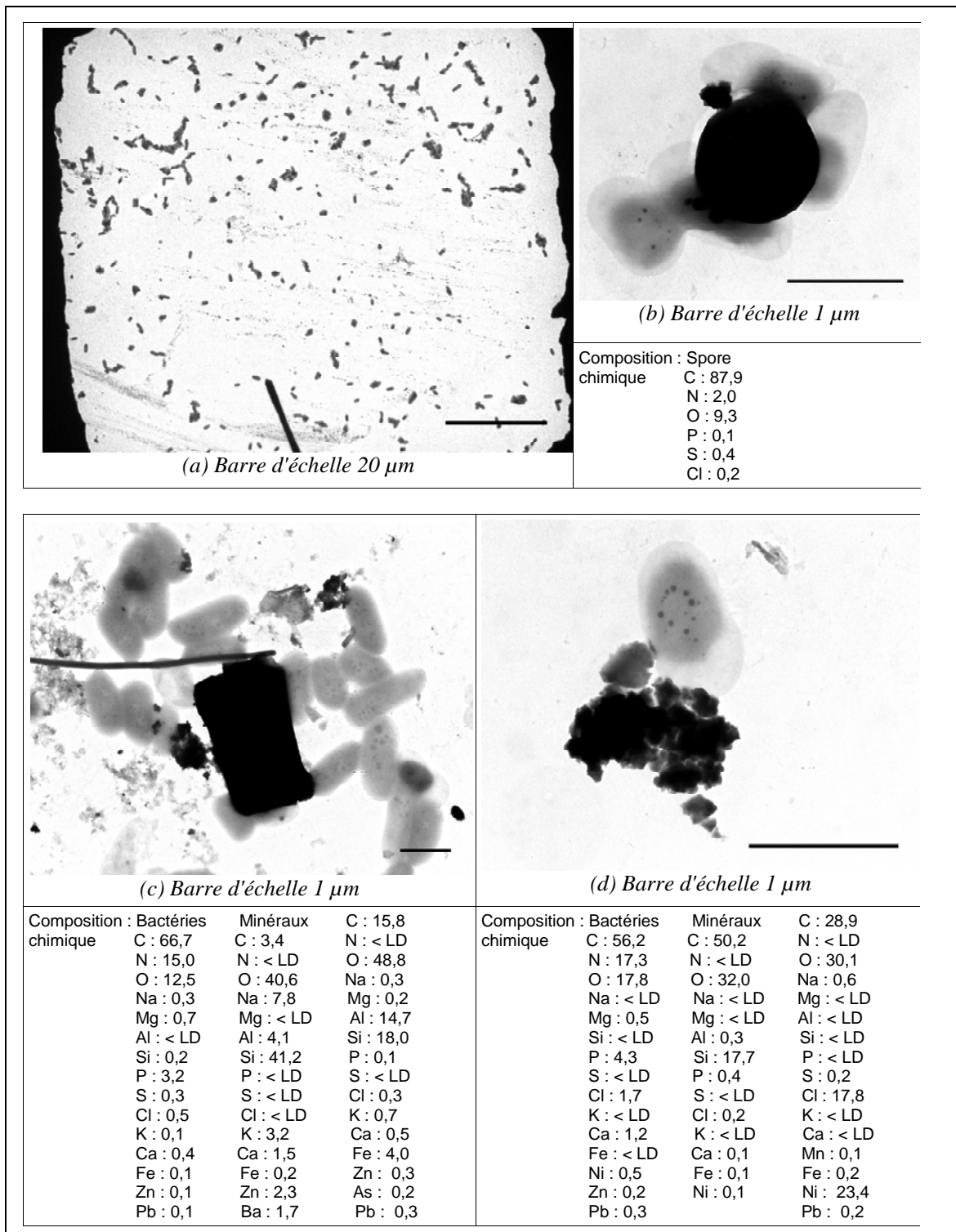
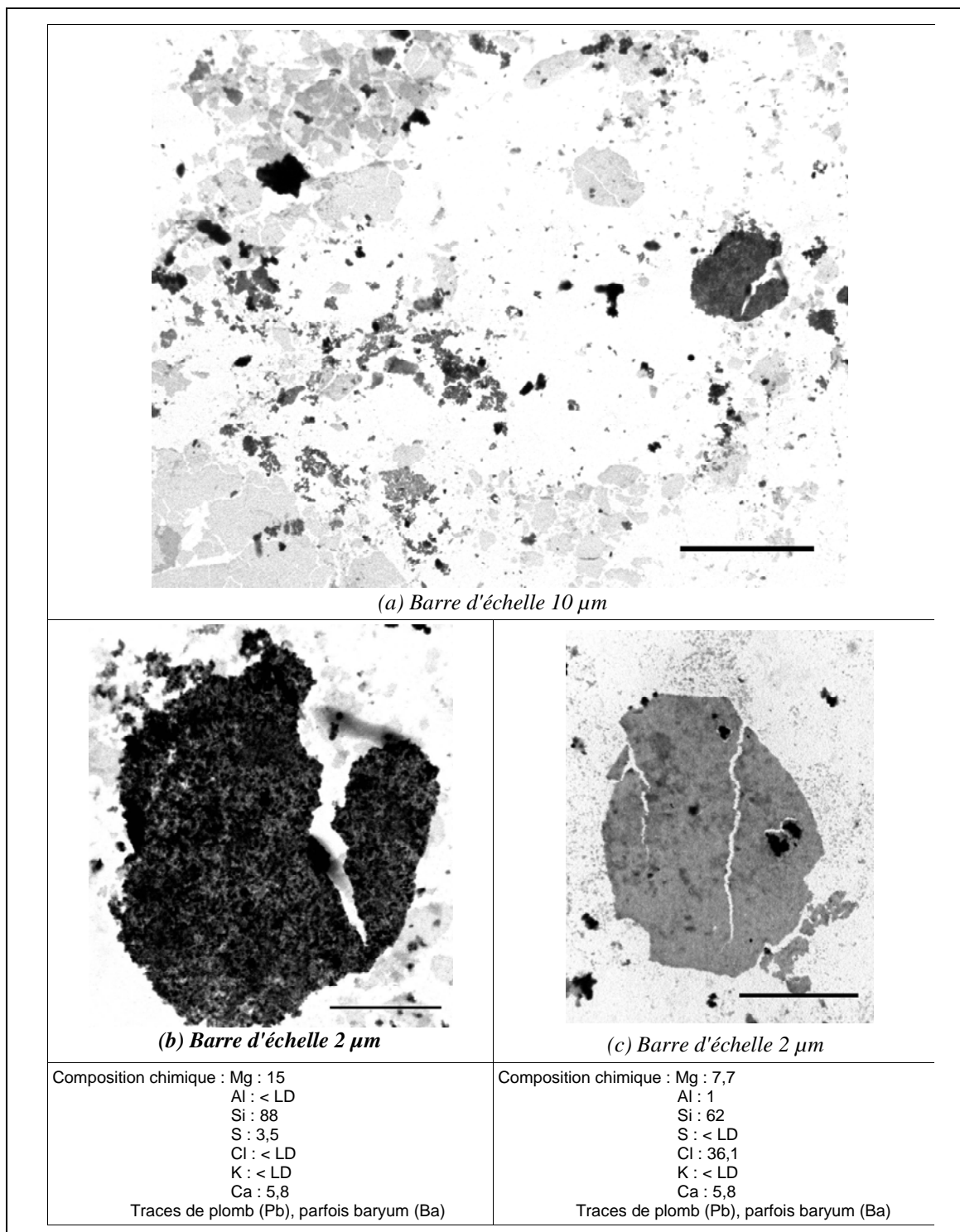


Illustration 24 : Images MET et analyses chimiques EDS (en % at.) des retombées atmosphériques particulières sur le site de l'observatoire (Strasbourg). (a) (b) efflorescence bactérienne en décembre ; (c) et (d) photos de détail.



*Illustration 25 : Images MET et analyses chimiques EDS (en % at.) des retombées atmosphériques particulières sur le site de l'observatoire (Strasbourg). Résidus de combustion au mois de juin 2004 : (a) vue d'ensemble ; (b) et (c) photos de détail.*

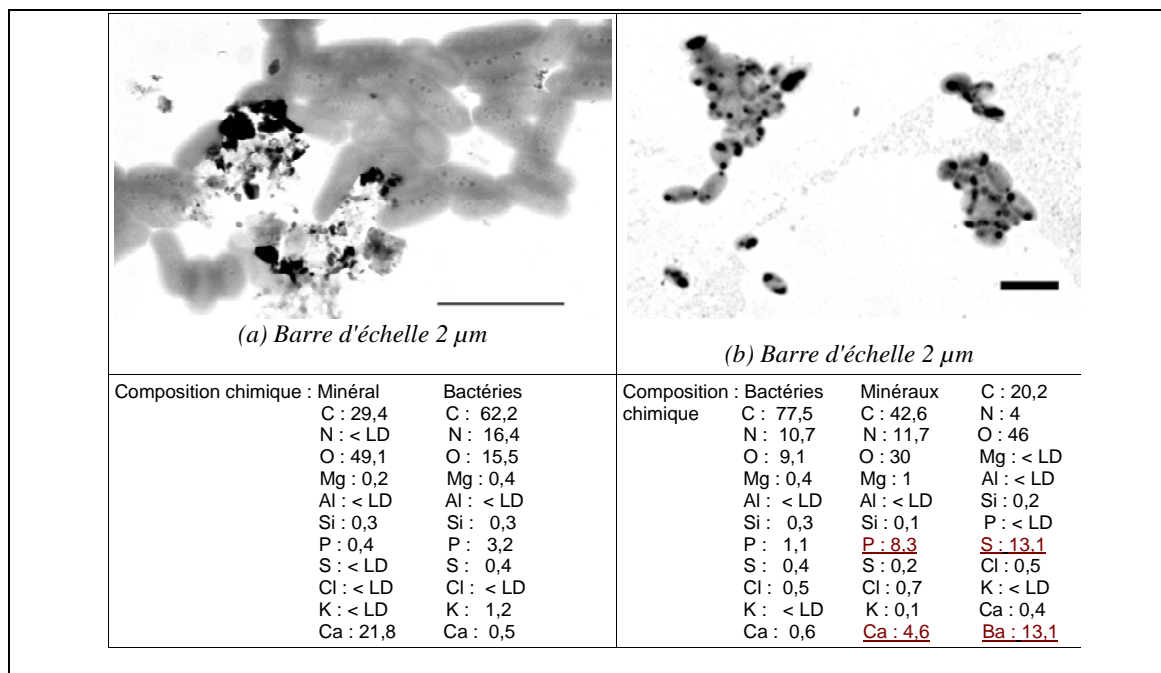


Illustration 26 : Images MET et analyses EDS des retombées atmosphériques microbiennes sur le site de l'observatoire (Strasbourg) : efflorescences bactériennes (a) mois de février; (b) avril

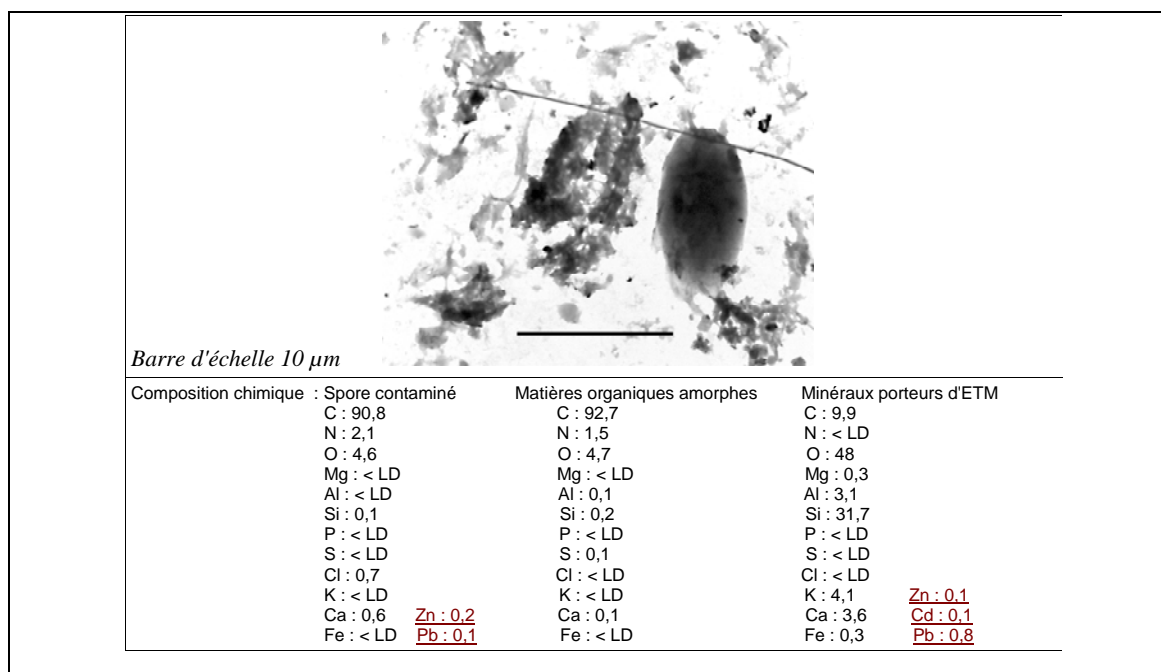


Illustration 27 : Image MET et analyses EDS des retombées atmosphériques sur le site de l'observatoire (Strasbourg) durant le mois de mars 2004 : suies et matières organiques amorphes.



## 5. Conclusions

L'étude de 20 sites de parcs publics et de jardins familiaux sur le territoire de la CUS était destinée à examiner l'état général de la pollution des sols par les métaux lourds, les hydrocarbures et les dioxines, dans l'objectif de mettre en évidence s'ils pouvaient présenter des risques pour la santé de la population.

Les sites de prélèvement ont été choisis sous l'influence de diverses sources de retombées aériennes et les échantillonnages ont été effectués avec beaucoup de soin pour éviter toute contamination ou perte de produits. Les analyses de métaux lourds ont été faites sur des composites de 3 à 4 échantillons par site, prélevés par carottage jusqu'à une profondeur maximale de 25 cm, et peuvent donc être jugés représentatifs des sites. Les analyses d'hydrocarbures ont été menées sur un seul prélèvement jusqu'à 25 cm, celles de dioxines sur un seul prélèvement jusqu'à 10 cm de profondeur, donc sur un volume relativement réduit.

Les analyses des métaux lourds ne montrent pas de valeurs inquiétantes. Parmi les métaux analysés, le plomb atteint localement la VCI usage sensible, mais sa moyenne reste inférieure à la VDSS. La moyenne des teneurs en chrome atteint la VDSS mais fait clairement partie du fond géochimique naturel.

Parmi les hydrocarbures et phytosanitaires analysés on observe seulement des teneurs préoccupantes très localement pour les PCB (polychlorobiphényles) et HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sur quelques sites. Les teneurs en PCB dépassant largement la VCI usage sensible (tout en restant inférieures à la VCI usage non sensible) sur le site des jardins familiaux de la Rue de l'Abbé Lemire à Koenigshoffen, des échantillonnages de contrôle ont été réalisés ; ils ont montré que cette concentration élevée est une anomalie très ponctuelle en bord de route et que les jardins proches ne sont pas affectés. Des teneurs en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont rencontrées sur pratiquement tous les sites et semblent liées à la circulation automobile. Elles restent néanmoins toujours inférieures à la VCI usage sensible.

Les teneurs en dioxines sont en moyenne inférieures à la valeur guide allemande de 5 pg/g et globalement inférieures à la valeur guide suédoise de 10 pg/g pour un usage sensible. Elles ne posent aucun problème en ce qui concerne l'usage jardin public, par contre deux sites de jardins familiaux pourraient mériter des contrôles complémentaires.

L'étude des données des concentrations en métaux dans les pluies indique que les teneurs en métaux sont faibles par rapport aux valeurs guide (eau potable), à part le nickel et l'aluminium qui approchent de la VCI usage sensible. Les teneurs élevées en nickel sont liées aux pH très acides des pluies de l'année 2000 qui paraît relativement exceptionnelle de ce point de vue.



L'étude pilote des retombées aériennes particulières montre l'omniprésence des métaux dans les particules et la diversité des sources d'éléments métalliques. Une poursuite de ce type d'étude pourrait permettre de mieux distinguer la part des sources géogènes et des sources industrielles dans les apports de métaux lourds par les retombées atmosphériques particulières

L'ensemble de l'étude a fait l'objet d'une présentation au Groupe de travail "Sols" du SPPPI le 7 décembre 2006. Les remarques faites au cours de cette présentation ont été prises en compte dans la présente version du rapport.

## 6. Bibliographie

BONNARD R., HULOT C., LEVEQUE S. (2001) – MATE. Méthode de calcul des Valeurs de Constat d'Impact dans les sols. Rapport INERIS DRC-01-25587/DESP-R01.

BRGM (2002) – Gestion des sites (potentiellement) pollués. Version 2. Mise à jour annexe 5c du 9 décembre 2002.

CARSO (2005) – Analyse des PCDD et PCDF dans 10 sols. Rapport d'essai CAR/05-2049 du 20 septembre 2005.

CHABART M. (2002) - Synthèse sur la situation de la pollution des sols par les métaux lourds a Strasbourg - Etude réalisée dans le cadre des actions de Service Public du BRGM 01-PIR-101. Note technique BRGM ALS/NT01N62

DAMES & MOORE (1998) – Rapport final. Diagnostic approfondi. Evaluation détaillée des risques et étude de scénarios de réhabilitation. Site de l'ancienne raffinerie de Merwiller-Pechelbronn. Rapport Dames & Moore, Nanterre, France.

DENYS S. (2004) – MEDD. Guide pour l'orientation des actions à mettre en œuvre autour d'un site dont les sols sont potentiellement pollués par le plomb. Note INERIS

ELSASS F., PERDRIAL N., BOUZONVILLE A., LIEWIG N. (2006) - Soil contamination in an urban area through rainfall and particle deposition. Poster, European Union of Geosciences, Vienna, 2-7 april 2006.

ELSASS F., PERDRIAL N., LIEWIG N. (soumis) - Soil contamination through rainfall in an urban environment. Typology of fine particles by electron microscopy. Submitted to the *Journal of soils and sediments*.

ELSASS P. (2004a) - Etude de synthèse de l'état des sols sur le territoire de la CUS. Cahier des charges version 2, mars 2004. Etude réalisée dans le cadre du SPPPI Commission "Eau et déchets". Note technique BRGM ALS/NT03N31

ELSASS P. (2004b) - Teneurs en métaux dans les eaux souterraines du bassin potassique. Recherche documentaire. Note technique BRGM ALS/NT03N32 révision janvier 2004.

ELSASS P., KRAMERS E. (2003) - Ancien site BIMA 83 à Cernay Examen du fond géochimique – Note technique BRGM ALS/NT03N20.

HERCKES P., NOPPER A., WORTHAM H. (1998) – Etude comparative de l'évolution de la composition chimique des pluies et des brouillards sur Strasbourg. Rapport CNRS-ULP, Centre de Géochimie de la Surface, Equipe de physico-chimie de l'atmosphère, 29 p.

HERCKES P., WORTHAM H., MIRABEL P., MILLET M. (2002) – Evolution of the fogwater composition in Strasbourg (France) from 1990 to 1999. *Atmospheric research* 64 (2002) p. 53-62.

INERIS (2005) – Polychlorobiphényles. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS-DRC-02-25590-00DF045 Version N°2.1.

LAPERCHE V., (2005) - Evaluation des performances du spectromètre portable de fluorescence X Niton XL723S (au laboratoire et sur le terrain). RP-53377-FR, 72 p, 41 ill., 2 ann.

LAPERCHE V., MOSSMANN J.R. (2004) – Protocole d'échantillonnage des sols urbains pollués par du plomb. Rapport BRGM/RPP-52928-FR.

PELLET M., LAVILLE-TIMSIT L. (1993) – Ministère de l'environnement. Echantillonnage de sols pour caractérisation d'une pollution : guide méthodologique. Rapport BRGM R 37865.

ROLLIN C., QUIOT F. (2005) – Hydrocarbures aromatiques polycycliques. Guide méthodologique. Acquisition des données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transfert dans les sols et les eaux souterraines. Rapport d'étude INERIS N°66240 –DESP-R01.

UMWELTBUNDESAMT (2006) - Belastung der Böden mit Dioxinen und Furanen. Stand März 2006. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeldent=2379>.

UNEP (1999) – Dioxin and furan inventories. National and regional emissions of PCDD/PCDF. United Nations Environment Programme. Prepared by UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Alsace**  
15, rue du Tanin, Lingolsheim  
BP 177  
67834 – Tanneries cedex - France  
Tél. : 03 88 77 48 90