

Document public



Établissement de fonds pédo-géochimiques urbains en parallèle à l'Opération ETS du Ministère du Développement durable

Rapport final

BRGM/RP-64845-FR
mai 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Établissement de fonds pédo-géochimiques urbains en parallèle à l'Opération ETS du Ministère du Développement durable

Rapport final

BRGM/RP-64845-FR
mai 2015

Étude réalisée dans le cadre de la convention n° 1072C0046 ADEME-BRGM

JF. Brunet

Avec la collaboration de

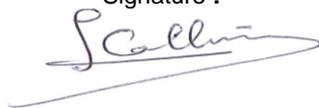
F. Guiet, C. Blanc, V. Laperche, P. Balon et N. Aubert

Vérificateur :

Nom : L. Callier
Fonction : Responsable scientifique de
Programme

Date : 15/05/2015

Signature :

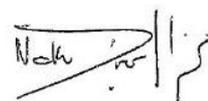


Approbateur :

Nom : N. Dörfliger
Fonction : Directrice, Direction Eau,
Environnement & Écotechnologies

Date : 26/05/2015

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Fond pédo-géochimique urbain, FGU, ETM, Arsenic, HAP dioxines, Furanes, PCB, Cyanures, Indice phénol, Gestion des sites et sols pollués, Terres excavées, France.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Brunet J.-F. Avec la collaboration de Guiet F., Blanc C., Laperche V., Balon P. et Aubert N. (2015) – Établissement de fonds pédo-géochimiques urbains et industriels en parallèle à l'Opération ETS du Ministère du Développement durable. Rapport final. BRGM/RP-64845-FR, 100 p., 14 fig., 20 tabl., 3 ann.

Synthèse

La convention n° 1072C0046 entre l'ADEME et le BRGM a encadré le projet « Établissement d'un fond géochimique urbain et industriel en parallèle à l'opération ETS » (FGU) du 19 novembre 2010 au 18 novembre 2014. Les travaux entrepris correspondent à la bancarisation d'analyses de sols urbains « exempts » de pollution directe et répartis sur l'ensemble du territoire national. Le projet comportait aussi une tâche complémentaire relative à la traduction d'un ouvrage en allemand intitulé « Valeurs de fond pour les matières inorganiques dans les sols ».

L'objectif est d'apporter un appui (dans les limites du contexte, de la méthodologie et des protocoles utilisés dans cette étude FGU), aux différents acteurs impliqués dans la gestion des sites (potentiellement) pollués et d'améliorer la connaissance de la qualité des sols urbains. Il s'inscrit dans le contexte de la méthodologie nationale de cette thématique précisée par les textes publiés par le Ministère en charge de l'environnement en février 2007 et construits sur un principe de réhabilitation en fonction de l'usage. En l'absence de valeurs réglementaires pour le milieu « sol », celle-ci préconise la comparaison de la qualité des sols investigués à celle des sols voisins exempts de tout impact direct et représentatifs du fond pédo-géochimique dit « naturel ». Il s'agit en fait d'un fond pédo-géochimique naturel auquel s'ajoute un fond anthropique résultant des retombées diffuses des activités humaines. En milieu rural, les fonds pédo-géochimiques et anthropiques sont relativement bien connus grâce aux bases de données de l'INRA (Base de données des éléments traces métalliques - BDETM - et Réseau de mesure de la qualité des sols - RMQS). Le projet FGU consiste à déterminer les fonds pédo-géochimiques et anthropiques spécifiques aux différents milieux urbains en France. La base de données développée pour le projet FGU permet également la bancarisation d'analyses de sols urbains prélevés au droit d'anciens sites industriels. Les connaissances ainsi acquises sur la qualité des sols urbains pourront, entre autre, servir (après adaptation et compléments) la mise en œuvre de la démarche de gestion des terres excavées. Le projet FGU s'appuie sur la mise en œuvre, par le ministère du Développement durable, des « Diagnostics des sols dans les lieux accueillant des enfants ou des adolescents » (projet « Établissements sensibles - ETS »).

Le présent rapport présente le projet et rappelle les détails de son fonctionnement. Il passe en revue les résultats d'une étude bibliographique et le premier bilan de la collecte de données. Fin 2014, la base de données FGU compte 46 957 résultats d'analyses correspondant à 457 échantillons de sols « témoins » (et à 535 échantillons de sols prélevés dans l'enceinte d'établissements scolaires située au droit ou en contiguïté d'anciens sites industriels (BASIAS)). Les échantillons ont été prélevés dans 446 établissements implantés dans 238 villes elles-mêmes réparties dans 20 régions métropolitaines. Les principales statistiques descriptives et les corrélations entre métaux sont fournies pour les trois agglomérations pour lesquelles les résultats obtenus sont suffisamment nombreux. Les résultats concernant les principaux éléments traces métalliques sont confrontés aux données disponibles dans les bases de données BDETM et aux valeurs anormales déterminées par le RMQS. Les premières observations semblent confirmer la présence de fonds pédo-géochimiques et anthropiques distincts entre milieu rural et urbain ainsi qu'entre les différentes agglomérations.

Les molécules organiques font l'objet d'un traitement limité (HAP, dioxines et furanes) en raison du peu de données disponibles et d'une majorité de valeurs inférieures aux limites de quantification. Les analyses des fractions d'hydrocarbures (TPH) sont insuffisantes pour une interprétation.

Malgré un certain nombre de limites à leur traitement, les données recueillies au cours de cette convention constituent un premier état des lieux de la qualité des sols urbains représentatifs de l'activité anthropique diffuse en France.

Enfin, les initiatives de communication pour présenter le projet au cours de conférences nationales et internationales sont rappelées et les pistes de développement envisagées au cours de la seconde convention ADEME-BRGM sont décrites.

Cette dernière prévoit la refonte de la base de données et du protocole permettant son alimentation. Il s'agit de bancariser des analyses de sols et leurs métadonnées dans le cadre d'autres projets hors ETS. Ces données pourront avoir été obtenues selon des protocoles de prélèvement et d'analyse variés et notamment, concerner des sols profonds. Cet outil sera donc rebaptisé Base de données des analyses de Sols Urbains (BDSolU). Il évolue pour permettre la bancarisation des données pouvant apporter un appui aux acteurs des « Sites et sols pollués » dans diverses situations où il est nécessaire de connaître la qualité des sols en milieu urbain :

- détermination de fonds pédo-géochimiques et anthropiques urbains ;
- gestion sanitaire de l'exposition des populations aux sols ;
- diagnostic de pollution ;
- détermination de seuils de dépollution (en tenant compte également de l'usage envisagé du site) ;
- gestion des terres excavées.

Cependant le modèle de fonctionnement du projet doit encore être révisé de façon à alimenter par de nombreux prélèvements complémentaires la base de données. Sans cet effort, le projet ne sera pas en mesure de répondre à ses objectifs dans des délais raisonnables.

Le traitement et le mode d'interprétation des données recueillies devront aussi être définis et pourront varier selon ces objectifs et les contextes. Ils dépendront, entre autre, des réponses apportées aux différentes questions méthodologiques apparues à chaque étape de la collecte, du traitement et de la diffusion des données. Ces questions sont récapitulées dans ce rapport et seront débattues dans le cadre d'un groupe de travail mis en place et coordonné par l'ADEME.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contextes justifiant la bancarisation de données sur le fond pédo-géochimique urbain	11
2.1. CONTEXTE D'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES SOLS	11
2.2. CONTEXTE DE GESTION DES TERRES EXCAVÉES.....	12
3. Bancarisation des analyses de sols urbains en parallèle à l'opération ETS.....	13
3.1. DÉFINITIONS.....	14
3.1.1. Fond pédo-géochimique naturel local.....	14
3.1.2. Fond pédo-géochimique et anthropique urbain	14
3.2. ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS SLU	15
3.3. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE SOLS SLU	16
3.4. ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS SLU.....	16
3.5. BANCARISATION DES RÉSULTATS D'ANALYSE	17
3.6. ESTIMATION DU NOMBRE D'ÉCHANTILLONS ATTENDUS ET COMPARAISON AUX RÉSULTATS	17
4. Étude bibliographique.....	19
4.1. LE PROJET EUROPÉEN URGE (URBAN GEOCHEMISTRY PROJECT)	20
4.2. SURGE – SOIL URBAN GEOCHEMISTRY IN DUBLIN	20
4.3. LE PROJET GSUE	21
4.4. LE PROJET POLLUSOL2	21
5. Bilan de la collecte de données.....	23
5.1. BILAN DU NOMBRE DE DONNÉES COLLECTÉES.....	23
5.1.1. Prévision et répartition brute des analyses d'échantillons de sols FGU SLU	23
5.1.2. Collecte des analyse des échantillons SLE	24
5.1.3. Vérification des résultats d'analyse et correction du contenu de la base de données	24
6. Statistiques descriptives	27
6.1. AGGLOMÉRATIONS ÉTUDIÉES	27
6.2. MÉTHODE.....	27

6.3.	RÉSULTATS GLOBAUX POUR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES.....	28
6.3.1.	Arsenic.....	30
6.3.2.	Plomb.....	31
6.4.	RÉSULTATS GLOBAUX POUR LES SUBSTANCES ORGANIQUES.....	33
6.4.1.	Hydrocarbures aromatiques polycycliques	33
6.4.2.	Dioxines et furanes.....	37
7.	Corrélations	41
8.	Confrontation des résultats aux données BDETM et INDIQUASOL.....	45
8.1.	CONFRONTATION AVEC LES DONNÉES INDIQUASOL (INRA)	45
8.2.	CONFRONTATION AVEC LES DONNÉES DE LA BDETM (INRA).....	48
9.	Questions apparues au cours du projet	53
9.1.	CHOIX D'UNE CARACTÉRISATION SYSTÉMATIQUE OU THÉMATIQUE.....	53
9.2.	CHOIX D'UNE ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE	54
9.3.	CHOIX DES LIEUX DE PRÉLÈVEMENT	54
9.4.	CHOIX DE LA MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE	55
9.5.	CHOIX DE LA MÉTHODE ET DE LA PROFONDEUR DE PRÉLÈVEMENT	56
9.6.	CHOIX DES SUBSTANCES À ANALYSER.....	57
9.7.	MODALITÉS D'ANALYSE	57
9.7.1.	Méthodes de préparation des échantillons	57
9.7.2.	Choix des laboratoires.....	58
9.7.3.	Limites de quantification.....	58
9.8.	INTERPRÉTATION ET TRAITEMENT STATISTIQUE DESCRIPTIF	59
9.9.	DIFFUSION DES RÉSULTATS	60
10.	Communication	63
10.1.	GEOENV2014	63
10.2.	GEOSCIENCES	63
10.3.	RENCONTRES NATIONALES 2014 DE LA RECHERCHE SUR LES SITES ET SOLS POLLUÉS.....	63
11.	Perspectives	65
11.1.	POURSUITE DE LA BANCARISATION DES DONNÉES « ETS »	65
11.2.	REFONTE DE LA BASE DE DONNÉES	65
11.2.1.	Utilisation des codes Sandre	66

11.2.2. Recueil de données provenant de projets d'aménagement urbains - Cohérence avec la gestion des terres excavées	66
11.2.3. Moyens informatiques	67
12. Conclusions.....	69
13. Bibliographie	73

Liste des figures

Figure 1 : Schéma définissant le fond pédo-géochimique et anthropique urbain et les zones de prélèvement choisies.....	15
Figure 2 : Ensemble des résultats obtenus pour les métaux/métalloïdes sur la France.....	28
Figure 3 : Comparaison des vibrisses supérieures internes obtenue pour les éléments traces métalliques et métalloïdes dans les différentes zones géographiques étudiées.	29
Figure 4 : Représentation des résultats concernant l'arsenic obtenus pour la France, et pour les agglomération A, B et C sous forme de boîte à moustache.	31
Figure 5 : Représentation des résultats obtenus pour la France et pour les agglomération A, B et C sous forme de boîtes à moustaches pour le plomb.	32
Figure 6 : Représentation des résultats pour le benzo(a)pyrène obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîtes à moustaches (mg/kg).	36
Figure 7 : Représentation des résultats pour la somme des 16 HAP (US-EPA) obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîtes à moustaches (mg/kg).	36
Figure 8 : Représentation des résultats de la somme dioxines et furanes pour la France après substitution des valeurs inférieures à la LQ par 0 et conversion en quantités toxiques équivalentes.	40
Figure 9 : Représentation des résultats de la somme dioxines et furanes pour la France après substitution des valeurs inférieures à la LQ par LQ et conversion en quantités toxiques équivalentes.	40
Figure 10 : Relation entre le chrome et le nickel pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,79$).	43
Figure 11 : Relation entre le plomb et le zinc pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,63$).	43
Figure 12 : Relation entre le plomb et le mercure pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,63$).	43
Figure 13 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats RMQS pour les agglomérations A, B et C.....	47
Figure 14 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats BDETM pour les agglomérations B, C et pour toute la France.....	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des répartitions prévues et observées des échantillons analysés dans le cadre des projet ETS et FGU.....	23
Tableau 2 : Répartition finale des échantillons analysés selon leur statut dans la base de données..	25
Tableau 3 : Nombre de villes concernées par des prélèvements de sols FGU par région.	26

Tableau 4 : Tableau récapitulatif et comparatif des vibrisses supérieures internes pour les éléments traces obtenus sur les différentes zones géographiques étudiées.....	29
Tableau 5 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et les agglomérations A, B et C pour l'arsenic (LQ _i = Limite de quantification inférieure).....	30
Tableau 6 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour le plomb (LQ _i = limite de quantification inférieure).....	32
Tableau 7 : Répartition des valeurs par rapport aux limites de quantification pour les 16 HAP et pour l'ensemble des 426 échantillons recueillis sur la France entière.	34
Tableau 8 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour le benzo(a)pyrène.....	34
Tableau 9 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour la somme des 16 HAP (US-EPA).....	35
Tableau 10 : Tableau des principaux résultats concernant les dioxines.	37
Tableau 11 : Tableau des principaux résultats concernant les furanes.	38
Tableau 12 : Coefficients de toxicité équivalente publiés par l'OTAN et l'OMS pour les dioxines étudiées.....	38
Tableau 13 : Coefficients de toxicité équivalente publiés par l'OTAN et l'OMS pour les furanes étudiés.....	39
Tableau 14 : Somme des quantités toxiques équivalents pour les dioxines et les furanes étudiés pour les trois séries de coefficients de toxicité équivalente et pour l'ensemble de la France.....	39
Tableau 15 : Coefficients de corrélation (Pearson et Spearman) entre métaux et métalloïdes dans les agglomérations A, B et C et pour l'ensemble des agglomérations de France. . .	42
Tableau 16 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats RMQS pour les agglomérations A, B et C. Cd en µg/kg et Cu, Ni, Pb, Zn, Cr en mg/kg (vert : valeur FGU ; gras : valeur RMQS maximale, gras italique : valeur RMQS minimale).....	46
Tableau 17 : Liste des départements et des petites régions agricoles (code INSEE) considérées pour l'obtention des résultats BDETM pour chaque agglomération. (ER = Eau régale, HF = Acides fluorhydrique/Perchloriques, Inconnu : mode de minéralisation inconnu)	48
Tableau 18 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour l'agglomération B. Cd, Hg en µg/kg et Cu, Ni, Pb, Zn, Cr en mg/kg (*outlier : valeur supérieure à la vibrisse supérieure - vert : valeur FGU).....	49
Tableau 19 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour l'agglomération C. Cd, Hg en µg/kg et Cu, Ni, Pb, Zn, Cr en mg/kg (*outlier : valeur supérieure à la vibrisse supérieure - vert : valeur FGU).....	50
Tableau 20 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour toute la France. Cd, Hg en µg/kg et Cu, Ni, Pb, Zn, Cr en mg/kg.	51

Liste des annexes

Annexe 1 : Logigramme de sélection entre échantillons SLU prélevés en phase 1 et 2 de l'opération ETS	75
Annexe 2 : Tableaux récapitulatifs des résultats pour l'ensemble des substances considérées	79
Annexe 3 : Poster présenté au cours de GeoEnv 2014.....	89
Annexe 4 : Article présenté à l'occasion des rencontres nationales de la recherche de l'ADEME 2014.....	93

1. Introduction

L'étude intitulée « Établissement d'un fond géochimique urbain et industriel en parallèle à l'opération ETS du Ministère du Développement durable » est réalisée dans le cadre de la convention de financement FGU n° 1072C0046 entre l'ADEME et le BRGM pour une durée de 24 mois, entre le 19 novembre 2010 et le 18 novembre 2012. Cette convention a fait l'objet d'un avenant notifié le 28 janvier 2013 ayant pour objet de modifier la répartition des dépenses et de prolonger la durée du projet de 24 mois, soit au 18 novembre 2014.

La convention prévoit la constitution d'une base de données d'analyses de sols prélevés en milieu urbain et industriel sur l'ensemble du territoire national.

Outre l'amélioration des connaissances de la pédo-géochimie des sols en milieu urbain, cette base de données a pour objectif de servir aux différents acteurs impliqués dans la gestion des sites (potentiellement) pollués, notamment, au stade de :

- l'interprétation de l'état des milieux ;
- la gestion des terres excavées.

Ces deux démarches, dont le contexte est rappelé en détail ci-après (cf. Chapitre 2), font appel à la construction d'un référentiel sur la qualité des sols. Celui-ci est actuellement corroboré le plus souvent par comparaison avec les informations des bases de données suivantes (1) :

- BDETM - Base de Données des Éléments Traces Métalliques, établie dans le cadre de l'épandage des boues de station d'épuration (milieu rural) gérée par l'INRA ;
- RMQS - Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, établie dans le cadre de la surveillance des sols agricoles (milieu rural), géré par l'INRA ;
- ASPITET - Apport d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Éléments Traces, développée par l'INRA ;
- IMN - Inventaire minier national, établi dans le cadre de l'exploration minière en milieu alluvial, géré par le BRGM.

L'amélioration apportée par le projet FGU repose sur une meilleure adaptation au contexte des sites et sols (potentiellement) pollués, grâce à :

- des prélèvements réalisés en milieu urbain (résidentiel et industriel) ;
- des échantillons prélevés et analysés selon des règles qui correspondent aux protocoles habituellement adoptés pour cette thématique, et déjà décrits dans de précédents rapports (2) (3).

L'acquisition des premières données de cette base s'est appuyée sur l'opération nationale de « Diagnostic des sols dans les établissements accueillant des enfants et des adolescents ».

Le présent rapport décrit les conditions de réalisation et les résultats de cette opération.

En outre, le projet FGU a donné lieu à la traduction du texte allemand intitulé « Valeurs de fond pour les matières inorganiques dans les sols » (*Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden - 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, 2003*) faisant un état des lieux sur la démarche utilisée pour élaborer le fond géochimique en Allemagne sur les sols et déjà présenté dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-61591-V1-FR.

2. Contextes justifiant la bancarisation de données sur le fond pédo-géochimique urbain

2.1. CONTEXTE D'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES SOLS

En février 2007, le ministère du Développement durable a proposé de nouvelles démarches de gestion aux différents acteurs de la thématique « sites et sols (potentiellement) pollués » (2). Ces démarches décrivent l'ensemble des étapes de gestion d'un site (potentiellement) pollué : le diagnostic permettant d'identifier et de localiser une pollution, l'interprétation de l'état des milieux (IEM), la mise en place du plan de gestion pour fixer des objectifs de réhabilitation, l'évaluation des risques résiduels, etc... Pendant le déroulement de ces démarches, et notamment de l'IEM, l'interprétation des données recueillies sur le terrain donne nécessairement lieu à la comparaison des analyses et des mesures avec des valeurs de références. Ainsi, la démarche d'IEM conduit à comparer l'état des milieux investigués (cf. Annexe 2 de la note ministérielle aux préfets du 8 février 2007) (3) :

- à l'état des milieux naturels voisins de la zone d'investigation ;
- à l'état initial de l'environnement pour les installations classées ;
- aux valeurs de gestion réglementaires mises en place par les pouvoirs publics. Ces valeurs de gestion réglementaires correspondent au niveau de risque accepté par les pouvoirs publics pour l'ensemble de la population française.

En effet, les pouvoirs publics fixent des valeurs sanitaires qui réglementent la qualité de l'air inhalé ainsi que de l'eau et des aliments ingérés par la population. Aussi, ces valeurs font elles naturellement office de références dans le cadre des études entreprises sur les sites (potentiellement) pollués. Cependant, le sol ne fait pas l'objet d'une réglementation sanitaire spécifique et il n'existe en France aucune valeur de référence réglementaire pour ce milieu. En cohérence avec la politique de gestion des terres excavées, une terre est considérée exempte de pollution dès lors que ses caractéristiques sont cohérentes avec le fond géochimique naturel local. Ainsi, de la même façon qu'une denrée alimentaire peut être consommée sans risque pour la population générale si elle satisfait aux exigences des critères de comestibilité retenus au niveau européen par les pouvoirs publics, un sol peut être considéré sans danger pour les populations lorsqu'il est conforme à son état naturel initial¹, ou lorsqu'il est conforme à l'état d'un sol dont il est admis qu'il ne pose pas de problème particulier pour l'usage envisagé.

Par conséquent, l'évaluation de l'état du compartiment sol se fait par rapport à un référentiel qu'il s'agit de construire et de proposer en fonction du contexte local : nature du sol bien sûr, mais également, finalité du plan de gestion ou nécessité de l'interprétation de l'état des milieux. La démarche prévoit la comparaison de l'état du milieu considéré à l'état des milieux naturels voisins de la zone d'investigation. Il s'agit de distinguer le fond géochimique naturel et notamment les anomalies géochimiques locales des pollutions attribuables au site. Par ailleurs, les sites industriels sont rarement isolés en pleine nature mais le plus souvent regroupés en zones industrielles et/ou au cœur d'un tissu urbain où un fond anthropique se superpose au fond géochimique naturel.

Il convient alors de recueillir des données sur ce fond pédo-géochimique anthropisé.

¹ Toutefois, l'état naturel initial des sols peut présenter localement des concentrations élevées pour certaines substances susceptibles d'engendrer des risques sanitaires.

2.2. CONTEXTE DE GESTION DES TERRES EXCAVÉES

Les terres concernées par la démarche de valorisation des terres excavées, sont les terres issues de sites qui relèvent de la méthodologie de gestion des sites et sols pollués définie par la note ministérielle du 8 février 2007. À ce titre, le site, désormais considéré comme site producteur, doit faire l'objet d'un diagnostic de la qualité des sols. **Les terres nécessitant d'être excavées et susceptibles d'être réutilisées doivent être caractérisées afin de vérifier si leurs propriétés chimiques sont cohérentes avec le fond géochimique naturel local ou le bruit de fond urbain local du site receveur (4).**

S'il est démontré que les terres présentent des caractéristiques cohérentes avec le fond géochimique naturel local ou le fond pédo-géochimique et anthropique diffus urbain local, le producteur des terres excavées pourra les réutiliser :

- dans un périmètre restreint d'environ une trentaine de kilomètres ;
- dans un terrain de même fond géochimique (naturel ou urbain selon le référentiel choisi et justifié lors de la caractérisation des terres) (5).

Il est indispensable de réaliser des investigations sur site afin de permettre la prise en compte d'éventuelle hétérogénéité locale de la qualité des sols. En effet, une des difficultés récurrentes dans la gestion des sites et sols pollués, concerne la détermination du fond géochimique naturel local et la justification de la présence d'éventuelles anomalies naturelles. Les propositions de valeur de fond géochimique naturel doivent permettre d'aider les parties prenantes à lever le doute sur le fond géochimique naturel dans des régions à fortes minéralisations.

3. Bancarisation des analyses de sols urbains en parallèle à l'opération ETS

Le 2^{ème} Plan National Santé-Environnement (PNSE - 2009-2013) prévoyait à son action 19 l'identification des établissements recevant des populations sensibles sur des sites potentiellement pollués du fait d'anciennes activités industrielles. Les établissements concernés sont les crèches, les écoles maternelles et élémentaires, les établissements hébergeant des enfants handicapés, les collèges et lycées, ainsi que les établissements de formation professionnelle des jeunes du secteur public ou privé. Les aires de jeux et les espaces verts attenants à ces établissements sont également concernés (6).

Cette démarche est désormais traduite dans l'article 43 de la loi N° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'Environnement, promulguée le 5 août 2009. Elle est pilotée par le Ministère du Développement durable. Les modalités de programmation et de réalisation des opérations de diagnostic ainsi que les missions des acteurs concernés sont précisées dans la circulaire du 4 mai 2010 (7).

La mise en œuvre des « Diagnostics des sols dans les lieux accueillant des enfants ou des adolescents » (nom abrégé « Établissements sensibles – ETS »), lancée par le Ministère du Développement durable, correspond à une opération de grande envergure au cours de laquelle plus de 2 000 établissements feront l'objet au cas par cas, de visites et de prélèvements de sols et de gaz (sol et air intérieur) spécifiques pour évaluer la qualité des milieux de vie des populations sensibles.

La première tranche de l'opération ETS concerne les établissements identifiés dans 17 régions métropolitaines par croisement de la base de données des établissements accueillant des enfants ou des adolescents de l'Éducation Nationale avec la base de données BASIAS des anciennes activités de service développée par le Ministère du Développement durable. C'est sur cette première tranche que s'est principalement appuyé la collecte d'analyses de sols urbains réalisée dans le cadre du projet FGU.

Le dispositif opérationnel mis en place par le BRGM (en qualité de Maître d'ouvrage délégué du Ministère du Développement durable pour l'opération ETS) et encadrant la mise en œuvre des diagnostics à l'échelle du territoire national offre l'opportunité :

1. de prélever et d'analyser, selon un protocole homogène et reproductible, les sols de surface des sites visés par les diagnostics et/ou de leur proche environnement ;
2. de bancariser et de centraliser les données et les métadonnées ;
3. d'exploiter ces données selon une méthodologie prédéfinie dans le but de dégager des tendances (statistiques) sur la qualité des sols de surface d'environnements urbains (zone de plus de 5 000 habitants).

La bancarisation des analyses a donc été possible grâce au prélèvement puis à l'analyse des sols par les neuf bureaux d'études et les cinq laboratoires impliqués dans l'opération ETS :

- soit dans le cadre de leurs travaux de diagnostic (analyses prises en charge par le projet ETS) ;
- soit spécialement pour le projet FGU au cours de la visite initiale des sites (analyses prises en charge par le projet FGU).

Comme convenu dans les marchés ETS passés entre le BRGM et le bureau d'études, ce dernier procède systématiquement à des prélèvements de sols lors de sa première visite sur le site ETS (Phase 1). Si la suite du diagnostic du site ne donne lieu à aucun prélèvement de sol, le BRGM lance l'analyse de ces échantillons dits **SLU (Sols Urbains) spécifiques au projet FGU**. Si la suite du diagnostic du site (Phase 2) conduit au prélèvement et à l'analyse d'échantillons de sol **SLU et SLE (Sol des Établissements prélevés, par définition, au droit ou à proximité d'un site BASIAS) spécifiques au projet ETS**, le BRGM intègre les résultats de ces analyses dans la base de données. Dans ce cas, les échantillons SLU spécifiques au projet FGU, prélevés au cours de la première visite du site ne sont pas analysés (voir schéma en Annexe 1).

Afin de bancariser les connaissances acquises sur la qualité des sols urbains au cours du projet ETS, le BRGM a décidé d'alimenter aussi la base de données avec les analyses des échantillons réalisés au droit des établissements dits SLE (en plus des échantillons SLU). Le présent rapport ne présente que les résultats de traitement des analyses de sols SLU.

Les modalités de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons SLU et la procédure de bancarisation mises en œuvre dans le cadre de ce projet sont intégrées aux cahiers des charges des différents marchés de l'opération ETS à destination des bureaux d'études et des laboratoires. Elles ont été décrites de façon détaillées dans le rapport BRGM/RP-61591-V1-FR et sont rappelées ci-dessous pour mémoire.

3.1. DÉFINITIONS

3.1.1. Fond pédo-géochimique naturel local

D'après D. Baize (8), « *Le fond pédo-géochimique naturel local (FPGN) est la concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique* ».

3.1.2. Fond pédo-géochimique et anthropique urbain

En milieu urbain, les sols ont été remaniés et/ou rapportés pendant des durées variables, allant de quelques années à quelques siècles, en fonction des zones considérées et de l'extension des villes. Des apports anthropiques diffus s'ajoutent au fond pédo-géochimique dits « naturel ». Ils correspondent aux retombées atmosphériques diffuses liées aux activités humaines (trafic routier, chauffage, incinérateurs, activités industrielles, minières, artisanales, agricoles, de loisirs...) en dehors de tout dépôt dû à un panache concentré. Ils comprennent :

- une part provenant d'activités extérieures à la ville (retombées atmosphériques rurales et urbaines, proches et éloignées, voire transfrontalières) ;
- une part résultant des activités propres à la ville (trafic routier, chauffage urbain et individuel, industrie, artisanat,...).

La tâche du projet FGU est de comptabiliser, pour une agglomération donnée, le fond pédo-géochimique « naturel » et les apports anthropiques urbains diffus locaux (Figure 1).

L'expression « Fond pédo-géochimique » n'est pas adaptée pour décrire cet ensemble. En effet, certaines substances associées aux apports anthropiques n'ont pas pour origine i) le périmètre urbain considéré (ex : métaux issus de mines éloignées), ii) le sol ou le sous-sol local (ex : molécules produites au moment de la combustion d'hydrocarbures fossiles), iii) ni même le milieu naturel (molécules xénobiotiques).

Il est donc ici proposé l'expression « Fond Pédo-Géochimique et Anthropique Urbain (FPGAU) »². Toutefois, par simplification, dans ce rapport, on emploiera généralement l'expression Fond pédo-géochimique urbain (FGU).

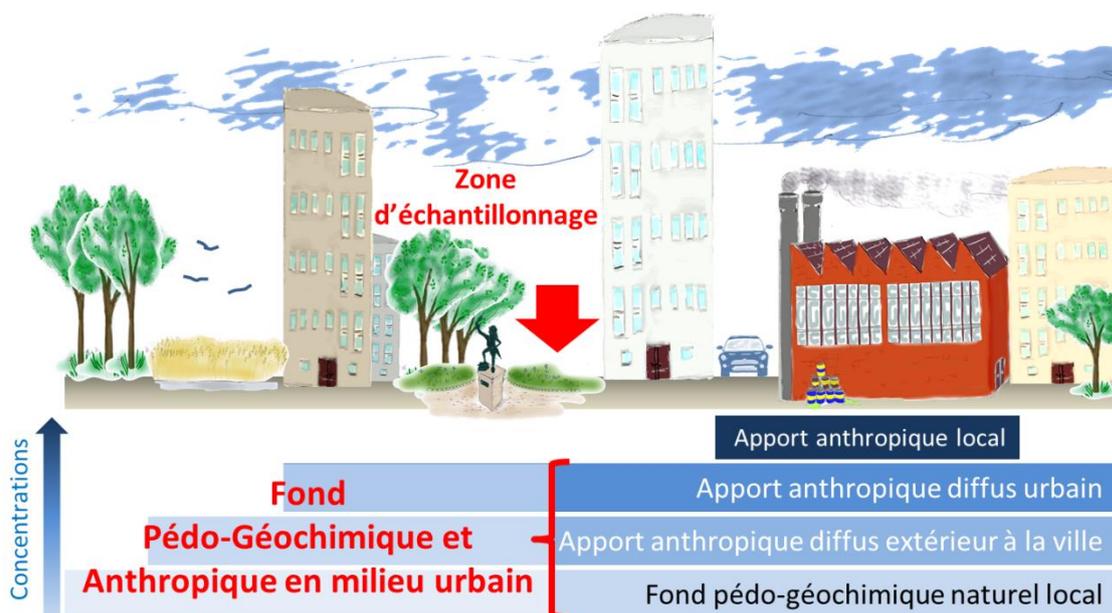


Figure 1 : Schéma définissant le fond pédo-géochimique et anthropique urbain et les zones de prélèvement choisies.

En fonction de sa localisation géographique (climat et pédo-géologie) et de son histoire (activité industrielle, réseau routier,...) chaque agglomération présente un FGU qui lui est propre. Ce sont les valeurs de ces FGU, que l'on souhaite déterminer et distinguer des apports anthropiques locaux (spot de pollution ou contamination locale) pour un certain nombre de substances, dans le cadre de ce projet.

3.2. ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS SLU

Un ou deux échantillons sont prélevés dans un rayon d'un kilomètre autour de l'établissement ou du groupe scolaire concerné par l'opération ETS, selon leur configuration. Chaque échantillon est réalisé par le rassemblement composite de 5 prélèvements de sol de surface entre 0 et 5 cm réalisé dans un carré de 3 m de côté, après homogénéisation et enlèvement des éléments grossiers et des végétaux.

L'échantillonnage est réalisé dans l'objectif d'assurer au mieux le fond géochimique urbain sur la base des critères suivants :

- prélèvement dans les parcs, lieux de loisirs et jardins ;
- optimisation spatiale du prélèvement par rapport à l'usage de l'espace urbain pour éviter toute pollution aigüe (route, zone de dépôts, industrie ou activité de service (sites Basias ou BASOL) ;
- observation macroscopique de l'échantillon et notamment des caractéristiques organoleptiques. Tout prélèvement marqué par une forte présence de déchets d'origine industrielle (scorie, mâchefer...) ou trace évidente de pollution (huile, hydrocarbure...) sera écarté.

² Il peut être question dans la littérature internationale de « back ground level » ou « niveau de bruit de fond ». En cohérence avec les travaux du Groupe de Travail « Fond pédo-géochimique et anthropique urbain », cette appellation sera ici abandonnée, car sa définition correspond plus, dans le contexte de détermination de la pollution des sols, à une incertitude analytique (Baize 1997).

3.3. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE SOLS SLU

Tous les échantillons font l'objet d'un tamisage à 2 mm, d'un séchage et d'un broyage à 250 µm (après concertation avec les laboratoires, la porphyrisation à 80 µm prévue par le protocole de la convention n'a pu être mise en œuvre et a été remplacée par un broyage à 250 µm). Pour éviter tout biais, les précautions d'usage liées à la granulométrie du milieu de prélèvement sont prises : taille de l'échantillon proportionnelle à la taille des éléments représentés (cailloux), hétérogénéité intrinsèque du sol et bonnes pratiques d'échantillonnage (prise multiples, homogénéisation, quartage,...).

3.4. ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS SLU

Sur chaque échantillon, les analyses suivantes sont effectuées :

Éléments (inorganiques) et composés organo-minéraux :

- éléments traces métalliques (ETM) classiquement abordés dans le cadre des balayages analytiques pour les sites et sols pollués : arsenic, cuivre, chrome, plomb, zinc, nickel, cadmium, après attaque à l'eau régale (HCl, HNO₃). La mesure est classiquement faite en spectrométrie atomique avec torche plasma (ICP-AES) ;
- mercure total par la méthode des hydrures couplée à un spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA) ;
- cyanures totaux, soit par la méthode colorimétrique (applicable à des concentrations en cyanures comprises entre 0,5 et 50 mg/kg de l'échantillon d'origine), soit par méthode titrimétrique avec indicateur (applicable aux concentrations en cyanures supérieures à 50 mg/kg de l'échantillon d'origine).

Composés organiques :

- hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) de la liste des 16 composés de l'US EPA (HAP16), selon la méthode de chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse (CG-SM) ;
- indice phénol total par colorimétrie et spectrométrie U.V ;
- hydrocarbures avec répartition des fractions carbonées entre C10 et C40 par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme (GC-FID) ;
- polychlorobiphényles (PCB) (liste des 7 congénères dits « indicateurs ») par chromatographie en phase gazeuse (CPG) et détecteur à absorption électronique (ECO) ;
- Polychlorodibenzodioxines et Polychlorodibenzofurannes (PCDD/PCDF) par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse à haute résolution (HRGC-MS) après extraction des 17 congénères (7 dioxines et 10 furannes) considérés comme toxiques (analyse initialement prévue sur 10 % des échantillons prélevés spécifiquement pour le projet FGU³).

³ En accord avec l'ADEME en fin d'exercice, cette répartition a été adaptée et la fraction d'échantillons donnant lieu à l'analyse des dioxines est passée de 10 à 100 % sur les dernières commandes d'analyse, pour répondre à plusieurs contraintes rencontrées en cours de projet :

- nombre total d'échantillons à analyser moindre que prévu ;
- tarification des analyses revues à la baisse dans le cadre des marchés ETS ;
- enveloppe budgétaire analytique totale constante ;
- besoin d'améliorer la représentation statistique des analyses de dioxines/furannes.

3.5. BANCARISATION DES RÉSULTATS D'ANALYSE

Les bureaux d'études et les laboratoires renseignent un bordereau d'analyses MS Excel® en respectant les codes d'un lexique fourni par le BRGM. Ce lexique est un fichier au format MS Excel ® qui présente la correspondance entre les codes et :

- les familles de substances (lexique FAM numéroté de 1 à 20) ;
- les substances (lexique COMP numéroté de 1 à 307) susceptibles d'être analysées ;
- les unités de mesure utilisées pour le rendu des résultats d'analyse (lexique UNI numéroté de 1 à 15).

Le fichier fournit aussi des informations sur la nomenclature à respecter pour la construction des noms des échantillons et pour distinguer les différents types d'échantillons (FGU SLU et prélevés au droit des établissements SLE).

Les bordereaux d'analyses MS Excel alimentent une base de données ORACLE® via une interface Access®.

3.6. ESTIMATION DU NOMBRE D'ÉCHANTILLONS ATTENDUS ET COMPARAISON AUX RÉSULTATS

Lors de l'élaboration du projet FGU en 2008-2009, la convention ADEME-BRGM prévoyait la couverture de la première phase du projet ETS pour environ 650 établissements et le même nombre d'échantillons de sols FGU.

En fait, cette première convention, prolongée par un avenant, couvre la phase 1 et une partie de la phase 2 du projet ETS. Ces deux premières phases du projet ETS englobent une liste de 1 816 établissements répartis équitablement entre les deux phases (des phases ultérieures concerneront la ville de Paris et la région Rhône-Alpes). Cette liste a été obtenue par croisement de la base de données BASIAS et des bases de données des établissements accueillant des enfants et des adolescents.

Ces 1 816 établissements doivent théoriquement donner lieu à :

- plusieurs échantillons de sols FGU par établissement dont les sols feront l'objet d'une analyse dans le cadre du projet ETS et permettant une comparaison avec les sols prélevés au droit de l'établissement ;
- 1 échantillon de sol FGU par établissement dont les sols ne seront pas analysés dans le cadre du diagnostic mais dans le cadre du projet FGU. Le projet FGU repose sur le marché du projet ETS et fait donc appel aux mêmes prestataires. Ce sont donc les mêmes laboratoires qui réaliseront les analyses.

Dans les faits, pour les besoins des diagnostics, les bureaux d'études prélèvent 2 à 4 échantillons de sols FGU. Mais il arrive souvent que les prélèvements d'échantillons de sols FGU soient prélevés au profit de plusieurs établissements proches ou de groupes scolaires.

Suite à la compensation des deux phénomènes, il est possible d'estimer le nombre total d'échantillons de sols FGU attendus pour les phases 1 et 2 du projet à environ 1 816.

Les phases 1 et 2 du projet ETS concernent 411 villes ce qui conduit à estimer qu'elles donneront lieu à une moyenne d'un peu plus de 4 échantillons de sols FGU par ville. Une analyse plus fine des listes d'établissements du projet ETS montre que neuf villes présentent un potentiel d'échantillons de sols FGU supérieur à 20 et trois villes, ici nommées A, B et D, fourniront plus de 30 échantillons (limite inférieure acceptable de l'effectif des populations pour qu'un traitement statistique soit représentatif), soit respectivement : 103, 74 et 57 échantillons.

Ces chiffres sont toutefois surestimés si l'on considère qu'ils ne tiennent pas compte de l'élimination d'un nombre important de points de prélèvement potentiels, avant analyse, suite à :

- la vérification de l'existence des établissements au cours de la visite du site. En effet, certains établissements d'abord retenus, s'avèrent ne plus être concernés par la démarche pour cause par exemple de fermeture ou de déménagement de l'école ;
- l'absence d'autorisation des maîtres d'ouvrage ou des responsables d'établissements pour réaliser le diagnostic ;
- des échantillonnages n'ayant pas été conduits selon les consignes et qui n'ont pu être réitérés.

La prise en compte de la région Rhône-Alpes et de Paris, devrait apporter deux agglomérations supplémentaires présentant plus de 30 échantillons de sols urbains FGU (E et F). On disposera donc à l'issue du projet ETS d'un fond pédo-géochimique et anthropique urbain pour quatre à cinq villes.

La première convention décrite dans le présent rapport, couvre la phase 1 et une partie de la phase 2 du projet ETS, pour environ 1 000 établissements retenus après croisement de la base de données BASIAS et de la base de données des établissements de l'Éducation Nationale. Ce chiffre est une estimation du nombre maximum d'échantillons de sols FGU que l'on peut espérer bancariser au cours de l'exercice.

4. Étude bibliographique

Un rapport bibliographique (9) a été réalisé dans le cadre d'un stage d'apprentissage en alternance au BRGM et à l'Université Paris-Sud XI. Il présente un état des principales connaissances disponibles sur l'élaboration de fonds pédo-géochimiques urbains à l'étranger principalement basé sur l'ouvrage de Johnson *et al.* (10).

Le choix d'acquérir des connaissances sur la qualité des sols urbains apparaît dans le cadre de nombreux projets d'aménagement urbain qui intègrent de plus en plus la volonté de reconquérir les friches industrielles, de maîtriser l'étalement urbain et d'assurer la sécurité sanitaire des citoyens. Cette préoccupation est partagée par de nombreuses agglomérations dans le monde et des réalisations de fond pédo-géochimiques urbains ont été identifiées sur l'ensemble des continents.

L'étude bibliographique a cependant choisi de se concentrer sur des projets européens repérés en Belgique, Espagne, Finlande, Grèce, Irlande, Italie, au Royaume-Uni et en Suède. Parmi les 8 projets retenus dans le cadre du rapport bibliographique on relève quelques projets remarquables de par l'échelle géographique ou la démarche adoptée, particulièrement proche de celle du projet FGU dont, SURGE, GSUE et POLLUSOL. L'étude a également mis en évidence le projet URGE sur les sols urbains entrepris par différents Services Géologiques Européens (dans le cadre d'EuroGeoSurveys - www.eurogeosurveys.org). Des contacts ont été établis par mail avec les auteurs de plusieurs études.

Elle a permis de comparer la démarche adoptée dans le cadre du projet FGU à celles adoptées lors de la réalisation de ces projets et de la conforter concernant la stratégie d'échantillonnage et la méthode de prélèvement des échantillons. En effet, malgré des différences dues à des divergences d'objectifs et de méthodologie de gestion des sols pollués selon les pays, il ressort de l'étude quelques grands principes méthodologiques d'élaboration d'un fond pédo-géochimique urbain. Ainsi l'étude tend à confirmer les choix du projet FGU, notamment :

- la réalisation de prélèvement d'échantillons composites constitués de 5 sous-échantillons prélevés dans un périmètre de 3 x 3 m sur les cinq premiers centimètres de sol ;
- la mise en solution des échantillons par l'eau régale, en vue de l'analyse des éléments traces métalliques ;
- l'utilisation de boîtes à moustaches pour la restitution des données.

Elle a aussi fournie des pistes pour compléter la démarche, notamment sur les méthodes d'analyses statistiques et de restitution des données et a permis d'envisager l'intégration de nouvelles données dans la base FGU. Ses principales recommandations sont :

- compléter les prélèvements initiaux pour assurer une meilleure couverture des zones investiguées et établir une sélection précise des zones exemptes de potentielle pollution ;
- prendre aussi en compte des échantillons prélevés en profondeur pour assurer la cohérence avec la démarche de gestion des terres excavées (4);
- l'ajout du bismuth, du cobalt, de l'antimoine et du vanadium dans le pack analytique standard du projet FGU, leur présence à des concentrations anormales étant principalement due à l'activité humaine ;
- l'utilisation des graphes de pourcentages cumulés et des boîtes à moustaches dans le traitement statistiques des résultats d'analyse et la substitution des valeurs sous les limites de quantification par 50 % des limites de quantification.

4.1. LE PROJET EUROPÉEN URGE (URBAN GEOCHEMISTRY PROJECT)

Le groupe d'experts géochimistes de l'EuroGeoSurveys a lancé le projet URGE (Urban Geochemistry Project) en utilisant des protocoles d'échantillonnage et d'analyses identiques dans plus de 10 villes européennes situées sous des climats différents, dont : Acerra-Marigliano (Naples, Italie), Aschersleben (Allemagne), Dublin (Irlande), Kristiansand (Norvège), Hämelinna et Karlstad (Suède), Sisak (Croatie), Maribor (Slovénie) et Athènes (Grèce).

Les membres du projet URGE estiment que les Services Géologiques des pays Européens sont les seules institutions pouvant cartographier systématiquement les zones urbaines selon des méthodes harmonisées afin de produire des données comparables à travers l'Europe. Ils ont le savoir-faire pour distinguer les fonds géochimiques naturels et anthropiques. Selon les membres du projet URGE, le développement durable urbain requiert une gestion et un contrôle combinés de l'état des sols urbains ainsi que des flux de substances chimiques (11).

La phase I du projet URGE est achevée. Elle a été une étape d'apprentissage pour la réalisation d'une phase II plus structurée qui devrait débuter en 2016.

Le point focal du groupe d'experts géochimistes de l'EuroGeoSurveys en France est M. Ph. Negrel (BRGM).

De toute évidence, la volonté d'EuroGeoSurveys et les objectifs du projet (cartographie urbaine et harmonisation des méthodes à travers l'Europe) font de URGE un cadre de travail et de coopération incontournable pour le projet FGU.

4.2. SURGE – SOIL URBAN GEOCHEMISTRY IN DUBLIN

Le projet SURGE de cartographie du fond géochimique de Dublin (Irlande) a été réalisé par le Service Géologique Irlandais en collaboration avec le Service Géologique de Norvège (12). Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet URGE.

L'objectif de l'acquisition d'informations sur les sols de Dublin était d'améliorer la gestion de l'environnement en établissant des valeurs de base géochimiques pour les métaux et certains composés organiques. Il fournit des informations pertinentes sur la chimie des sols en milieu urbain pour la santé humaine et utiles dans le cadre du plan d'urbanisation. Il permettra aussi d'identifier et de quantifier l'impact humain sur les sols dans les zones urbaines par comparaison avec les valeurs obtenues en milieu rural.

Les résultats du projet montrent que les sols du centre ville de Dublin ont des niveaux plus élevés d'éléments potentiellement dangereux et de polluants persistants que les sols situés à l'extérieur de la ville. Les résultats sont cohérents avec ceux observés dans les agglomérations du monde entier et avec l'histoire industrielle de Dublin. Plus de 1 000 prélèvements ont été réalisés au droit de points de prélèvements choisis au hasard sur les sols de surface (0-10 cm) des parcs publics et des écoles du grand Dublin entre octobre et novembre 2009. Les analyses ont porté sur 31 substances minérales incluant les éléments traces métalliques (ETM).

Les résultats indiquent une forte influence anthropique pour le plomb, le cuivre, le zinc et le mercure, particulièrement rencontrés sur les docks, en centre ville et dans les zones industrielles. Les autres substances minérales présentent une forte corrélation avec la roche mère en présence. Près de 200 prélèvements ont donné lieu à l'analyse des HAP et des PCBs.

Les concentrations de HAP décroissent du centre ville vers la périphérie de Dublin ce qui reflète l'histoire de la ville en matière de chauffage domestique au charbon, d'émissions industrielles et de trafic routier. Les molécules rencontrées indiquent que la majorité des HAP provient de la combustion du charbon. Les autres sources sont les remblais, les incendies et les activités de traitement du bois et de recyclage des pneus.

Les résultats des analyses de PCB indiquent des niveaux faibles et ponctuels, principalement en centre ville. Les molécules présentes indiquent une contamination probablement due à des sources industrielles historiques et à de vieilles peintures plutôt qu'à des activités récentes.

4.3. LE PROJET GSUE

Le projet GSUE (Geochemical Surveys of Urban Environments) du Royaume-Uni a été initié en 1992 par le British Geological Survey. L'intérêt de ce projet réside dans l'importance du nombre de prélèvements réalisés sur l'ensemble du territoire britannique (27 villes concernées fin 2014 (13)). L'échantillonnage est basé sur une collecte systématique d'échantillons de sol de surface (5-20 cm) et plus profonds (35-50 cm) selon un maillage constitué de cellule de 500 m de côté. Les échantillons font l'objet d'une analyse de 46 éléments par fluorescence X. Le pH, la perte au feu et la teneur en matière organique sont également déterminés.

Les données fournissent une vue d'ensemble de la signature géochimique urbaine et puisque la collecte est harmonisée sur l'ensemble du territoire, les sols urbains et ruraux peuvent être aisément comparés. Elles sont particulièrement utiles au plan d'aménagement du territoire du Royaume-Uni et pertinentes dans le cadre législatif de la régénération urbaine et des sols pollués. Elles sont utilisées pour l'évaluation des risques sanitaires, la protection de la qualité des eaux et l'identification des sources de pollution (14).

4.4. LE PROJET POLLUSOL2

Le projet POLLUSOL2 a donné lieu à une cartographie du fond géochimique des zones industrielles de la région wallonne (Belgique). L'intérêt de ce projet réside dans la concordance des objectifs avec ceux de FGU mais aussi dans la méthodologie appliquée à la réalisation du fond géochimique.

Il fait suite au projet POLLUSOL 1 réalisé par l'Université de Liège et l'Université Catholique de Louvain à la demande de la SPAQuE⁴ qui excluait les zones urbaines et industrielles. POLLUSOL 2 est une étude interuniversitaire également commanditée par SPAQuE dont les objectifs sont d'évaluer les impacts anthropiques sur l'environnement et d'améliorer la gestion des sols... L'étude porte sur les sols touchés par la pollution atmosphérique accumulée depuis l'ère industrielle et vise à déterminer, interpréter et cartographier les concentrations de fonds en polluants organiques (HAP), métaux et métalloïdes dans les secteurs influencés par ces retombées. Les échantillons sont prélevés dans les prairies, les champs, les forêts, les pelouses et les potagers.

⁴ La société SPAQuE est une entreprise spécialisée dans la réhabilitation de friches industrielles et de décharges. www.spaque.be.

5. Bilan de la collecte de données

5.1. BILAN DU NOMBRE DE DONNÉES COLLECTÉES

À la fin de la première convention ADEME-BRGM, la base de données contient les résultats d'analyse d'échantillons de sols prélevés en milieu urbain de type SLU dits FGU. Les résultats des analyses de type SLE prélevés au droit des établissements scolaires y ont également été bancarisés.

5.1.1. Prévision et répartition brute des analyses d'échantillons de sols FGU SLU

Lors de la rédaction de la convention en 2008-2009, le nombre d'échantillons de sols FGU prélevés dans le cadre du projet ETS entre 2010 et 2012 avait été estimé à 650. La répartition prévue des analyses comprenait 227 échantillons (35 %) dans le cadre des diagnostics ETS et 423 échantillons (65 %) dans le cadre du projet FGU. La prise en compte d'un avenant à la convention signé avec l'ADEME en janvier 2013 et des données de travail du projet ETS conduisent à espérer au maximum la bancarisation de 1 000 échantillons (voir paragraphe 3.6).

Finalement 684 échantillons FGU, dits « SLU » ont été prélevés dans le cadre du projet FGU (phases 1 et 2 du projet ETS). Ils sont répartis selon les catégories suivantes :

- 319 échantillons prélevés en phase 1 du projet ETS et analysés dans le cadre du projet FGU ;
- 260 échantillons résultant de diagnostics (phase 2 du projet ETS) dans les établissements ayant donné lieu à des prélèvements et des analyses de sols ;
- 105 échantillons prélevés dans des conditions ne respectant pas les consignes (commune de moins de 5 000 habitants ou prélèvements en milieu rural, en forêt, sur les berges des rivières et des canaux, sur des ronds-points, sur des talus...). Dans une dizaine de cas, ces échantillons ont été prélevés de nouveau après rappel des consignes aux bureaux d'études et certains sont comptabilisés dans la catégorie des échantillons analysés.

	Estimation 2008-2009	Réalisation
Échantillons prélevés en phase 1 de l'opération ETS	227 (45 %)	319 (47 %)
Échantillons prélevés en phase 2 de l'opération ETS	423 (65 %)	260 (38 %)
Échantillons n'ayant pas été analysés car ne respectant pas les consignes	-	105 (15 %)
TOTAL	650 (100 %)	684 (100 %)

Tableau 1 : Comparaison des répartitions prévues et observées des échantillons analysés dans le cadre des projet ETS et FGU.

À la fin de l'avenant à la convention, en novembre 2014, le projet FGU a donc, en tout, donné lieu à 579 échantillons de sols FGU prélevés en phases 1 et 2 de l'opération ETS. Ce nombre est inférieur au nombre estimé à la conception du projet alors qu'il devrait le dépasser suite à l'allongement de la durée de la convention. Ces différences ont plusieurs causes :

- il existe un décalage temporel entre le prélèvement des échantillons pour l'opération ETS et leur prise en charge dans le cadre du projet FGU ;

- tous les établissements traités par le projet ETS n'ont pas donné lieu à des visites sur site (refus du maître d'ouvrage, établissements fermés ou réaffectés,...) ;
- certains établissements réunis au sein d'un même groupe scolaire ou géographiquement proches peuvent avoir donné lieu à un seul prélèvement FGU⁵ ;
- un retard des bureaux d'études et des laboratoires est constaté pour la livraison des analyses (estimé à environ 70 échantillons) ;
- et surtout, une centaine d'échantillons, pour lesquels les consignes de prélèvement n'ont pas été respectées, a été rejetée sans remplacement.

5.1.2. Collecte des analyse des échantillons SLE

Bien qu'ils ne soient, par définition, pas représentatifs du fond pédo-géochimique et anthropique urbain, les échantillons de sols prélevés au droit des établissements étudiés par le projet ETS ont également donné lieu à une bancarisation des résultats d'analyses. Ces résultats sont distingués par le champ SLE associé à ce type d'échantillon. Ils n'ont pas été intégrés dans l'analyse statistique des résultats fournis dans les chapitres suivants de ce rapport.

À la fin de la première convention ADEME-BRGM on compte 574 échantillons SLE dans la base de données.

À la suite des diagnostics, une partie des établissements a été classé dans la catégorie dont les sols ne posent pas de problème. Par conséquent, une analyse croisée des résultats de la base de données FGU et de la base de données des résultats ETS permettrait sans doute d'accorder aux échantillons de sols correspondants le statut de sols « FGU ».

Certains sols SLE d'établissements ont révélé, pour certaines substances, des concentrations incohérentes avec celles des échantillons SLU prélevés dans le voisinage. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme des échantillons de sols « FGU ». Néanmoins, il conviendrait d'étudier la possibilité de considérer ces échantillons comme des échantillons « SLU », avec toutes les réserves nécessaires, pour les autres substances qui ne sont pas concernées par ces résultats.

Ces démarches conduiraient à augmenter le nombre d'analyses disponibles pour la détermination des fonds pédo-géochimiques et anthropiques urbains locaux.

5.1.3. Vérification des résultats d'analyse et correction du contenu de la base de données

Les résultats d'analyse ont fait l'objet de plusieurs vérifications portant sur :

- la cohérence des données (erreurs d'unité, faute de frappe,...) ;
- la fiabilité des conditions de prélèvement des échantillons dont les résultats d'analyses comportent des valeurs extrêmes. Cette vérification a donné lieu à une appréciation de la validité du lieu de prélèvement au moyen de l'outil cartographique de la base de données BASIAS, du visionneur de panorama sur les voies Street View et le cas échéant des photographies aériennes anciennes proposées sur le GéoPortail.

Suite à cette opération le statut de plusieurs échantillons a été modifié (Tableau 2) :

⁵ Cette situation s'est notamment produite quand les espaces verts aux abords des établissements scolaires n'étaient pas assez nombreux pour acquérir un échantillon par établissement et par espace vert. Au cours de la démarche les préleveurs ont reçu pour consigne de réaliser plusieurs échantillons dans un même espace vert.

- le statut SLE a été affecté à des échantillons initialement dits SLU suite, par exemple, à un prélèvement réalisé par erreur au droit d'un site inventorié dans BASIAS ;
- le statut SLU a été affecté à des échantillons préalablement notés SLE par erreur au moment de leur enregistrement ;
- des analyses d'échantillons dont les conditions de prélèvement ne respectent pas les consignes ont été identifiés et les échantillons refusés.

Échantillons FGU prélevés au cours des phases ETS 1 & 2 (SLU)	457
Échantillons prélevés en milieu potentiellement contaminé (SLE)	535
Échantillons analysés puis refusés	47
Total	1 039

Tableau 2 : Répartition finale des échantillons analysés selon leur statut dans la base de données.

Fin 2014, la base de données FGU comptait 1 039 échantillons de sols (SLU, SLE et « refusés »). Ces échantillons ont été prélevés à proximité ou au droit de 446 établissements implantés dans 238 villes métropolitaines elles-mêmes réparties dans les 20 régions concernées par la première et la seconde tranche de l'opération ETS (ill. 6 et 7). Le nombre de résultats d'analyse bancarisés s'élève à 46 957. Cependant, plusieurs résultats d'analyses sont encore attendus de la part des laboratoires au moment où ce rapport est rédigé. Les 1 039 échantillons comprennent :

- 457 échantillons prélevés dans des espaces verts, dits « FGU » (codés SLU pour sols urbains) et représentatifs du fond pédo-géochimique urbain (contamination diffuse). Seuls les 17 101 résultats d'analyse de ces échantillons, correspondant aux paramètres mentionnés dans la convention, feront l'objet d'une exploitation ci-après ;
- 535 échantillons prélevés au droit des établissements scolaires (codés SLE pour sols des établissements) et donc potentiellement contaminés par les activités liées à la présence d'un ancien site inventorié dans BASIAS. Une partie de ces échantillons peut être assimilée à des échantillons FGU SLU quand les diagnostics réalisés dans le cadre du projet ETS aboutissent à la conclusion que les sols ne posent pas de problème. Sous réserve d'une vérification au cas par cas, les analyses de ces échantillons pourront donc, à terme, compléter les résultats obtenus pour les SLU. Les analyses des autres échantillons SLE resteront bancarisées au titre d'information sur la qualité des sols urbains ;
- 47 échantillons « impropres » à une valorisation pour absence de respect des consignes de prélèvements.

D'ores et déjà, on note que le nombre d'échantillons FGU moyen par ville est de 2. Il ne sera donc pas possible, dans le cadre de cette seule étude, d'établir un fond géochimique basé sur des résultats statistiques dans chacune des agglomérations concernées par le projet (voir également le paragraphe 3.6).

On observe également une importante hétérogénéité de la répartition régionale des villes où des prélèvements de sols ont eu lieu (Tableau 3) liée au principe même du projet ETS et aux différences historiques d'industrialisation et d'urbanisation entre les régions.

Région	Nb Villes
Alsace	5
Aquitaine	7
Auvergne	2
Basse-Normandie	6
Bourgogne	8
Bretagne	16
Centre	12
Champagne-Ardenne	13
Franche-Comté	6
Ile-de-France	45
Languedoc-Roussillon	19
Limousin	2
Lorraine	9
Midi-Pyrénées	17
Nord-Pas-de-Calais	7
Pays-de-la-Loire	16
Picardie	15
Poitou-Charentes	5
Provence-Alpes-Côte-D'azur	28
TOTAL	238

Tableau 3 : Nombre de villes concernées par des prélèvements de sols FGU par région.

6. Statistiques descriptives

6.1. AGGLOMÉRATIONS ÉTUDIÉES

Les villes présentant plus de 30 échantillons FGU ont été retenues pour réaliser des statistiques descriptives. Au stade actuel du projet, seules trois agglomérations, A, B et C, répondent à ce critère (la base de données FGU ne dispose pas encore de données suffisantes concernant la ville D mentionnées précédemment. Les résultats présentés pour l'agglomération C correspondent aux données de plusieurs villes qui forment un même ensemble urbain continu). Les zones géographiques considérées ont été définies arbitrairement pour englober très largement les agglomérations.

À titre indicatif, les résultats obtenus pour ces agglomérations seront comparés à ceux obtenus pour la France entière. Il convient toutefois de rappeler que les résultats à l'échelle du territoire ne sont pas représentatifs dans la mesure où la géologie, la pédologie, l'histoire industrielle, les conditions climatiques diffèrent d'une agglomération à l'autre.

6.2. MÉTHODE

Les valeurs inférieures aux limites de quantification ont été substituées par 50 % de cette limite pour effectuer les calculs (méthode choisie suite aux recommandations de l'étude bibliographique (9)).

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, de boîtes à moustache selon le principe introduit par Tukey (8). Il s'agit d'une méthode graphique permettant de faire apparaître sur un même diagramme les principales informations concernant la distribution de la population : moyenne, médiane et les autres quartiles Q_{25} et Q_{75} . Les quartiles correspondant à 25 et 75 % de la population définissent la longueur de la boîte représentée sur le graphique. Il s'agit de la distance interquartile :

$$DI = Q_{75} - Q_{25}$$

Les moustaches, ou vibrisses internes sont définies comme suit :

$$\text{Vibrisse supérieure interne} = Q_{75} + 1,5 \text{ DI}$$

$$\text{Vibrisse inférieure interne} = Q_{25} - 1,5 \text{ DI}$$

Les moustaches, ou vibrisses externes (généralement absentes du graphique) sont définies comme suit :

$$\text{Vibrisse supérieure externe} = Q_{75} + 3 \text{ DI}$$

$$\text{Vibrisse inférieure externe} = Q_{25} - 3 \text{ DI}$$

Les valeurs situées en-deçà ou au-delà des vibrisses inférieures ou supérieures sont dites extrêmes. Ces valeurs ont donné lieu à la vérification indiquée en 5.1.3 et certaines ont été corrigées (erreur de saisie) ou éliminées du jeu de données quand cela était justifié (par exemple : prélèvement de sol ne respectant pas les consignes et réalisé au droit d'un ancien site BASIAS).

Suite à cette vérification, on relève toujours, pour plusieurs substances, la présence de valeurs extrêmes pour lesquelles nous ne disposons d'aucune explication argumentée. Ces valeurs ont donc été conservées et intégrées aux calculs qui suivent. En faible proportion, elles n'ont pas d'influence significative sur les résultats des calculs des quartiles (dont la médiane) et des vibrisses.

Ces valeurs extrêmes peuvent correspondre à :

- des erreurs ou des prélèvements réalisés au droit d'anciens sites industriels, malgré les vérifications indiquées ci-dessus pour réduire au maximum le nombre de cas appartenant à cette catégorie ;
- un fond pédo-géochimique et anthropique urbain présentant une gamme de concentrations globalement plus élevées (pour des raisons géologiques, pédologiques ou anthropiques), mais sous-représenté du fait de la distribution thématique des points de prélèvement retenus ;
- de fortes anomalies locales révélatrices, dans les espaces verts concernés, d'une pollution qui devra être confirmée ou infirmée au moyen de contrôles, et d'analyses complémentaires.

Les résultats des statistiques descriptives sont fournis ici en première approche. Le jeu de données devra être complété par de nouvelles analyses pour améliorer la représentativité. De plus, il conviendra sans doute d'effectuer un traitement pour tenir compte de l'hétérogénéité de la distribution spatiale des points de prélèvement. En effet, la démarche d'échantillonnage du projet FGU ne repose pas sur un plan d'échantillonnage selon une grille systématique. Les échantillons sont prélevés de façon « thématique » dans les espaces verts jugés exempts de pollution locale à proximité des établissements investigués par le projet ETS. Dans ce contexte, un même espace vert est souvent l'objet de plusieurs prélèvements relatifs à plusieurs établissements, et peut de ce fait présenter une surreprésentation qu'il conviendra de pondérer.

6.3. RÉSULTATS GLOBAUX POUR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

L'ensemble des résultats obtenus pour les métaux/métalloïdes étudiés en France et dans les agglomérations A, B et C se trouve en Annexe 2. La Figure 2 réunit les boîtes à moustaches obtenues pour la France seule et montre la présence prépondérante du zinc et du plomb.

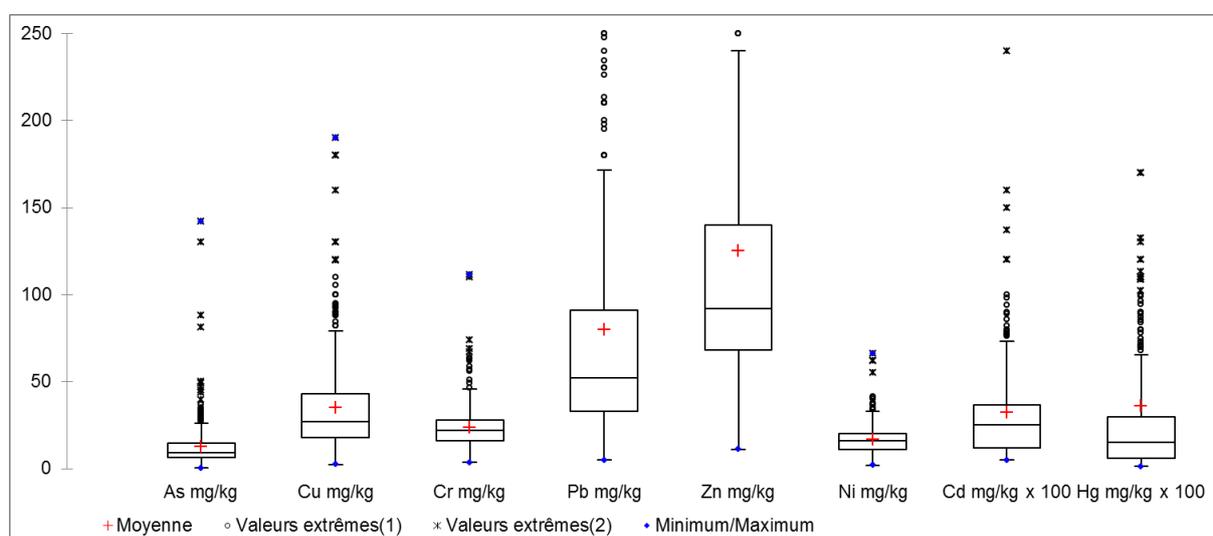


Figure 2 : Ensemble des résultats obtenus pour les métaux/métalloïdes sur la France.

Pour simplifier, le Tableau 4 et le graphique de la Figure 3 montrent uniquement les différences entre les valeurs des vibrisses supérieures internes obtenues pour toutes les zones géographiques étudiées. On relève principalement des valeurs plus élevées pour l'agglomération A pour le plomb, le zinc, le cadmium, le mercure et dans une moindre mesure pour le cuivre. Par contre les valeurs obtenues pour l'arsenic, le chrome et le nickel sont plus faibles que dans les autres zones géographiques.

Agglomération	As mg/kg	Cu mg/kg	Cr mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg	Hg mg/kg
A	11	90	23	288	360	20	1,37	1,32
B	18	63	43	140	170	28	0,45	0,70
C	12	67	33	170	210	20	0,52	1,20
France	26	79	46	171	240	33	0,73	0,65

Tableau 4 : Tableau récapitulatif et comparatif des vibrisses supérieures internes pour les éléments traces obtenues sur les différentes zones géographiques étudiées.

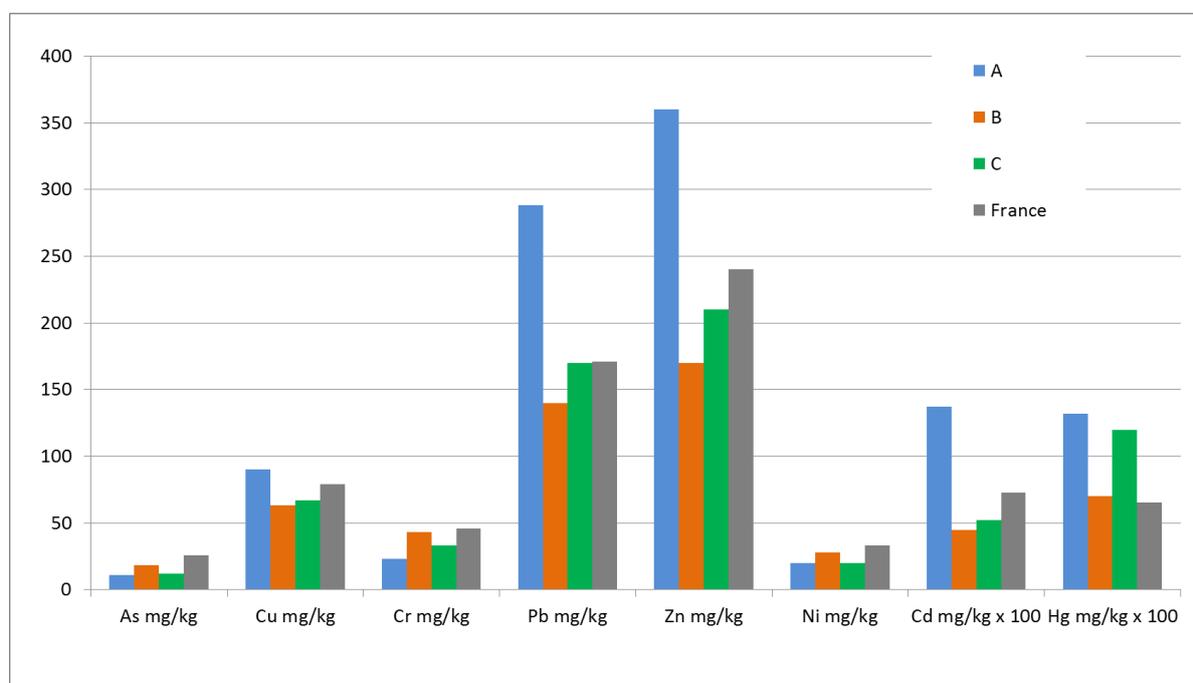


Figure 3 : Comparaison des vibrisses supérieures internes obtenue pour les éléments traces métalliques et métalloïdes dans les différentes zones géographiques étudiées.

Les résultats détaillés ci-dessous concernent : arsenic et plomb. Ils sont comparés aux concentrations couramment observées dans les sols « ordinaires » et aux anomalies naturelles modérées à fortes dans les sols de toutes granulométries en France définies par les résultats du programme ASPITET de l'INRA (15). Les résultats concernant les autres substances sont fournis en Annexe 2.

6.3.1. Arsenic

L'arsenic est un métalloïde dont les concentrations couramment observées dans les sols « ordinaires » vont de 1,0 à 25,0 mg/kg MS. Les concentrations atteignent 30 à 60 mg/kg dans le cas d'anomalies naturelles modérées et 60 à 284 mg/kg dans le cas d'anomalies naturelles fortes.

Pour les zones considérées, les moyennes des concentrations observées, dans le cadre du projet FGU, sont de l'ordre de 10 mg/kg. Par ailleurs, 90 % des valeurs observées en France sont inférieures à 26 mg/kg et donc majoritairement comprises dans la gamme des concentrations rencontrées dans les sols ordinaires.

Les valeurs maximales dans les trois agglomérations considérées sont de l'ordre de 20 mg/kg. Si l'on considère la France entière, une valeur maximale de 142 mg/kg est toutefois enregistrée (Tableau 5).

On constate cependant une répartition variable des populations selon les zones géographiques considérées puisque les concentrations observées au niveau des vibrisses supérieures vont d'environ 10 mg/kg pour les agglomérations A et C au double pour l'agglomération B et presque au triple pour la France entière (Figure 4).

Arsenic en mg/kg	France	A	B	C
Nb résultats disponibles	425	30	49	28
Nb résultats < LQi	8	3	3	0
Maximum	141,9	21,0	18,4	17,0
Vibrisse supérieure interne	26,0	11,0	18,4	12,0
90 ^e centile	21,1	13,2	16,0	11,0
75 ^e centile	14,5	9,0	14,0	9,0
Médiane	9,2	7,0	11,5	8,1
Moyenne	12,5	8,5	11,1	8,3
Ecart-Type	12,6	4,1	4,1	2,9
25 ^e centile	6,4	6,3	8,0	6,7
10 ^e centile	4,6	5,1	5,9	4,5
Minimum	0,5	3,5	0,5	1,5

Tableau 5 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et les agglomérations A, B et C pour l'arsenic (LQi = Limite de quantification inférieure).

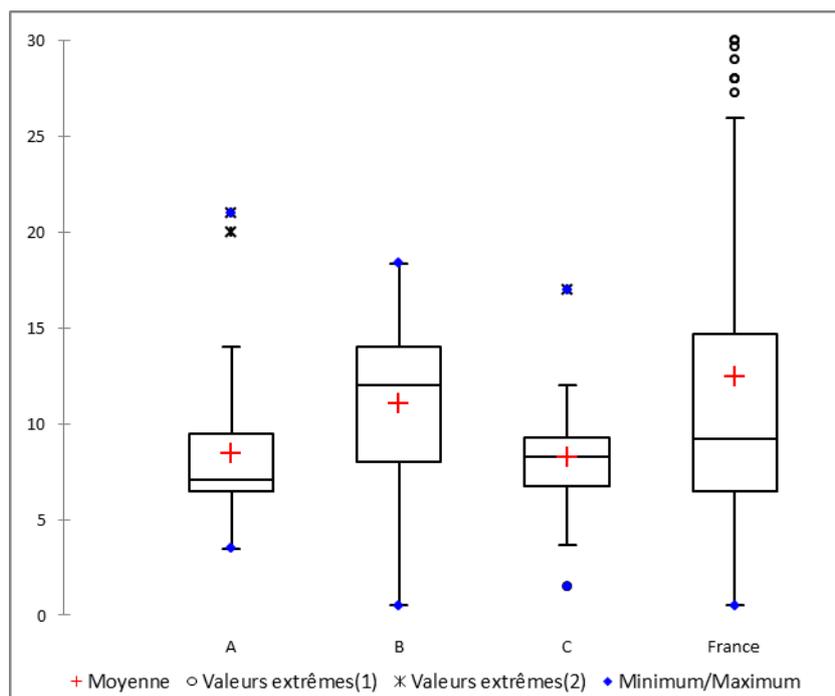


Figure 4 : Représentation des résultats concernant l'arsenic obtenus pour la France, et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîte à moustache (Certaines valeurs extrêmes ne sont pas représentées du fait de l'échelle des ordonnées choisie).

6.3.2. Plomb

Les concentrations de plomb dans les sols ordinaires sont de l'ordre de 9 à 50 mg/kg. Les autres gammes de valeurs observées vont de 60 à 90 mg/kg et de 100 à 10 180 mg/kg respectivement en cas d'anomalies modérées et fortes.

On constate que les concentrations des sols urbains analysés dans le cadre du projet FGU présentent des concentrations moyennes situées dans la gamme des anomalies modérées pour les trois agglomérations considérées. Dans les agglomérations A et C, 25 % des sols présentent des concentrations comprises dans la gamme des sols ordinaires (Tableau 3).

Les sols urbains qui ont fait l'objet d'une analyse dans le cadre du projet présentent donc majoritairement des concentrations en plomb anormales par rapport aux sols des zones rurales. Ce résultat indique une influence significative des retombées diffuses des activités anthropiques urbaines sur les concentrations des sols urbains en plomb.

On relève également des répartitions variables des populations d'échantillons entre les zones géographiques étudiées puisque les moyennes, les médianes et les vibrisses observées peuvent varier du simple au double entre deux populations (Figure 5).

Plomb en mg/kg	France	A	B	C
Nb résultats	425	30	49	28
Nb résultats < LQi	2	0	0	0
Maximum	720,0	288,1	270,0	410,0
Vibrisse supérieure interne	171,4	288,1	140,0	170,0
90 ^e centile	165,0	213,5	131,0	170,0
75 ^e centile	91,0	175,7	79,5	110,0
Médiane	52,0	99,0	43,0	73,0
Moyenne	79,8	115,1	68,8	95,6
Ecart-Type	87,0	74,9	59,4	76,2
25 ^e centile	32,5	52,0	31,5	51,0
10 ^e centile	22,0	24,0	22,8	40,4
Minimum	5,0	15,3	12,0	8,7

Tableau 6 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour le plomb (LQi = limite de quantification inférieure).

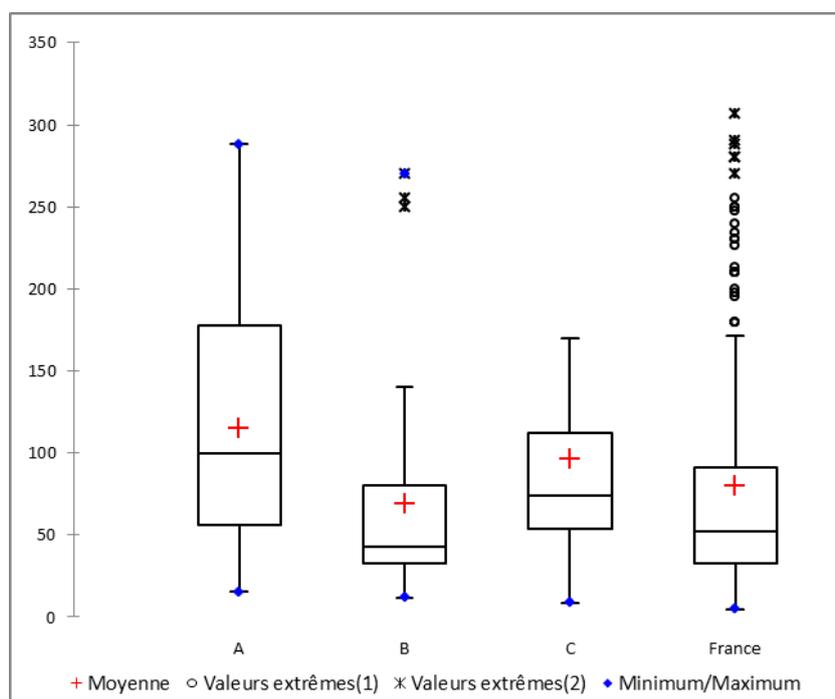


Figure 5 : Représentation des résultats obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîtes à moustaches pour le plomb (Certaines valeurs extrêmes ne sont pas représentées du fait de l'échelle des ordonnées choisie).

6.4. RÉSULTATS GLOBAUX POUR LES SUBSTANCES ORGANIQUES

Les résultats complets concernant les 42 substances organiques étudiées sont fournis sous forme de tableaux concernant les 3 agglomérations A, B et C et la France entière en Annexe 2. Les taux de valeurs inférieures aux limites de quantification sont globalement élevés.

Pour la France entière, ce taux dépasse :

- 25 % pour 39 substances ;
- 20 % et 70 % respectivement pour 15 et 6 des 16 HAP US-EPA ;
- 80 % pour l'ensemble des 7 PCB indicateurs ;
- 50 % pour 5 des 7 dioxines et pour 7 des 10 furanes.

Par conséquent un grand nombre de ces données n'est pas exploitable par simple substitution des valeurs inférieures à limite de quantification et devront faire l'objet d'une valorisation plus approfondie ultérieurement.

Par ailleurs, le nombre d'analyse des fractions d'hydrocarbures $C_{10}-C_{12}$, $C_{12}-C_{16}$, $C_{16}-C_{21}$, $C_{21}-C_{40}$ prévues dans la convention ADEME-BRGM est de toute façon insuffisant pour effectuer une interprétation. En effet, pour les besoins du projet ETS ces paramètres ont été remplacés en cours de convention par les fractions d'hydrocarbures aromatiques et aliphatiques TPHW (respectivement : C_6-C_7 , C_7-C_8 , C_8-C_{10} , $C_{10}-C_{12}$, $C_{12}-C_{16}$ et C_5-C_6 , C_6-C_8 , C_8-C_{10} , $C_{10}-C_{12}$, $C_{12}-C_{16}$). Actuellement, le nombre d'analyses recueillies pour ces nouveaux paramètres est insuffisant, d'autant que ces fractions d'hydrocarbures n'ont pas été détectées dans un grand nombre de cas.

Les paragraphes suivants présentent les résultats détaillés concernant :

- les HAP et plus particulièrement le benzo(a)pyrène pour lequel un plus grand nombre de données est disponible ;
- les dioxines et les furanes.

6.4.1. Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les HAP sont des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. L'US-EPA porte une attention particulière à 16 de ces molécules, en raison notamment de leur toxicité.

Dans le cadre du projet FGU, ces 16 molécules ont été analysées dans les échantillons de sols urbains. Les résultats montrent une grande quantité de cas où les molécules n'ont pas été détectées. Sur les 426 échantillons de sol recueillis sur la France entière, seuls 6 présentent des valeurs supérieures à la limite de quantification des laboratoires pour l'ensemble des 16 HAP.

Le Tableau 7 montre que le taux de valeurs inférieures aux limites de quantification varie de 16 % (Fluoranthène) à 90 % (Acénaphthène) selon les molécules. Le benzo(a)pyrène, l'un des HAP jugé les plus toxiques, présente l'un des taux de valeurs supérieures aux limites de quantification les plus élevés (71 %) et a donc été retenu pour réaliser les statistiques descriptives suivantes.

Molécule	Valeurs <LD		Valeurs >LD		Total
	nb	%	nb	%	
Naphtalène	377	88	49	12	426
Acénaphène	382	90	44	10	426
Acénaphthylène	341	80	85	20	426
Anthracène	315	74	111	26	426
Phénanthrène	156	37	270	63	426
Fluorène	368	86	58	14	426
Chrysène	113	27	313	73	426
Benzoanthracène	143	34	283	66	426
Fluoranthène	69	16	357	84	426
Pyrène	90	21	336	79	426
Benzo(k)fluoranthène	177	42	249	58	426
Benzo(a)pyrène	123	29	303	71	426
Benzo(b)fluoranthène	104	24	322	76	426
Dibenzo(a,h)anthracène	357	84	69	16	426
Benzo(g,h,i)pérylène	119	28	307	72	426
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	119	28	307	72	426

Tableau 7 : Répartition des valeurs par rapport aux limites de quantification pour les 16 HAP et pour l'ensemble des 426 échantillons recueillis sur la France entière (pourcentages maximaux en gras).

Benzo(a)pyrène (mg/kg)	France	A	B	C
Nb résultats	426	30	49	28
Nb résultats < LQi	123	7	26	4
Taux de valeurs < LQi (%)	29	23	53	14
Maximum	15	0,901	0,490	4,500
Vibrisse supérieure interne	0,628	0,400	0,180	0,580
90 ^e centile	0,590	0,400	0,171	0,440
75 ^e centile	0,290	0,237	0,090	0,453
Médiane	0,110	0,186	0,025	0,190
Moyenne	0,357	0,206	0,074	0,441
Ecart-type	1,026	0,197	0,089	0,846
25 ^e centile	0,030	0,077	0,025	0,080
10 ^e centile	0,025	0,025	0,024	0,025
Minimum	0,010	0,025	0,010	0,003

Tableau 8 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour le benzo(a)pyrène.

Selon les zones géographiques considérées, on observe des valeurs variables pour les principaux indicateurs (moyenne, médianes, centiles et vibrisses) et principalement des résultats inférieurs dans l'agglomération B où l'on note également un taux supérieur de concentrations sous les limites de quantification inférieures (Tableau 8 et Figure 6).

Une autre réflexion statistique a porté sur la somme des 16 HAP (US-EPA) même si cela peut présenter un biais par rapport à une description basée sur une seule substance. En première approche, cette solution est toutefois retenue pour exploiter le plus de données possible et effectuer, même à titre indicatif, une comparaison avec les résultats obtenus pour le benzo(a)pyrène.

Le Tableau 9 et la Figure 7 montrent pour la somme des 16 HAP des variations selon les zones géographiques assez comparables à celles observées pour le benzo(a)pyrène.

Somme 16 HAP (mg/kg)	France	A	B	C
Nb résultats	426	30	49	28
Nb résultats < LQi	57	2	18	1
Maximum	166,8	9,9	4,1	54,0
Vibrisse supérieure interne	7,0	3,7	2,0	5,8
90 ^e centile	7,8	5,6	1,9	6,9
75 ^e centile	3,3	2,7	1,1	4,2
Médiane	1,5	2,0	0,5	2,1
Moyenne	4,3	2,7	0,9	5,0
Ecart-type	11,6	2,3	0,8	10,1
25 ^e centile	0,6	1,1	0,4	0,9
10 ^e centile	0,4	0,5	0,3	0,4
Minimum	0,2	0,3	0,20	0,3

Tableau 9 : Comparaison des résultats statistiques obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C pour la somme des 16 HAP (US-EPA).

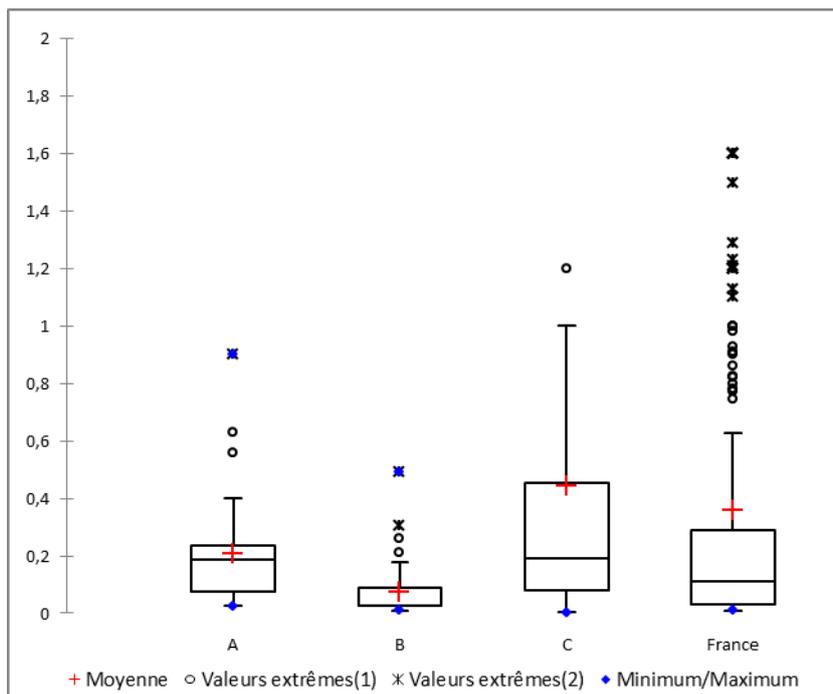


Figure 6 : Représentation des résultats pour le benzo(a)pyrène obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîtes à moustaches (mg/kg) (Certaines valeurs extrêmes ne sont pas représentées du fait de l'échelle des ordonnées choisie).

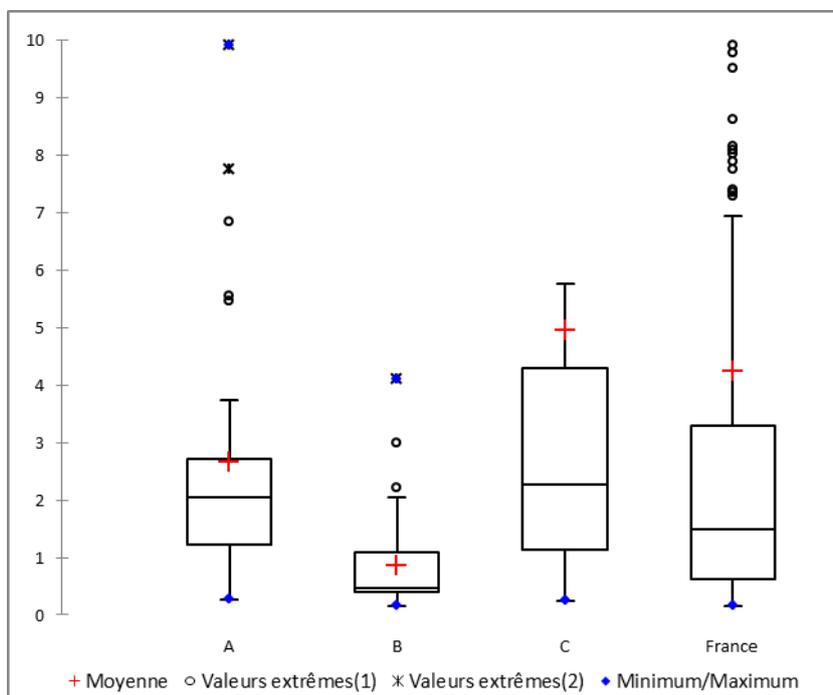


Figure 7 : Représentation des résultats pour la somme des 16 HAP (US-EPA) obtenus pour la France et pour les agglomérations A, B et C sous forme de boîtes à moustaches (mg/kg) (Certaines valeurs extrêmes ne sont pas représentées du fait de l'échelle des ordonnées choisie).

6.4.2. Dioxines et furanes

En raison de l'organisation du projet, les analyses disponibles pour les dioxines et les furanes sont encore moins nombreuses que pour les autres substances. En effet, en raison du prix élevé des analyses de ces substances, la convention ADEME-BRGM prévoyait le traitement de seulement 10 % des échantillons SLU prélevés au cours des phases 1 des diagnostics ETS.

À l'issue de la première convention ADEME-BRGM, le nombre d'analyses disponibles pour les dioxines et les furanes devrait donc s'élever à 32 pour l'ensemble du territoire (soit 10 % des 319 échantillons SLU prélevés et analysés en phase 1 Voir 5.1.1). Mais, l'avenant convenu avec l'ADEME a permis de passer ce taux à 100 % au cours de la dernière année de l'étude (voir paragraphe 3.6). Ainsi pour l'ensemble du territoire français, la base de données compte actuellement 152 analyses de dioxines et de furanes. Pour les agglomérations A, B et C, le nombre d'analyse s'élève respectivement à 12, 20 et 15 ce qui, compte-tenu du nombre important de résultats inférieurs à la limite de quantification, est insuffisant pour effectuer une interprétation statistique valide. Ce paragraphe présentera donc uniquement les résultats obtenus pour ces substances pour l'ensemble du territoire national.

Le taux de résultats inférieurs à la limite de quantification varie de 4 à 97 % selon les dioxines. La dioxine OCDD (OctaChloroDibenzoDioxine, le congénère portant le nombre maximal d'atomes de chlore) est détectée dans 96 % des échantillons et présente la concentration maximale la plus élevée (940 ng/kg) (Tableau 10). Les limites de quantification varient en fonction des méthodes d'analyse et des contraintes de préparation (exemple : dilution). Les Tableau 10 et suivants présentent donc les valeurs minimales et maximales observées.

ng/kg	2,3,7,8-TCDD	1,2,3,7,8-PeCDD	1,2,3,4,7,8-HxCDD	1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,2,3,7,8,9-HxCDD	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	OCDD
Nb valeurs	152	152	152	152	152	152	152
Valeurs < LQ	147 – 97 %	125 – 82 %	133 – 88 %	85 – 56 %	101 – 66 %	14 – 9 %	6 – 4 %
LQ min.	0,18	0,01	0,28	0,29	0,29	0,45	0,01
LQ max.	2	2	2,1	3,7	2,4	7,5	25
Valeur min.	0,09	0,115	0,14	0,145	0,145	0,60	2,45
Valeur max.	1,00	5,70	8,00	9,60	9,10	160,00	940,00

Tableau 10 : Tableau des principaux résultats concernant les dioxines.

Le taux de résultats inférieurs à la limite de quantification varie de 38 à 95 % selon les furanes. La molécule 2,3,7,8-TCDF (2,3,7,8-TétraChloroDibenzoFurane) est détectée dans 62 % des échantillons. Mais la concentration maximale a été détectée pour les congénères OCDF et 1,2,3,4,6,7,8 HpCDF (OctaChloroDibenzoFurane et 1,2,3,4,6,7,8,HeptaChloroDibenzoFurane) avec respectivement 75 et 76 ng/kg (Tableau 11).

ng/kg	2,3,7,8-TCDF	1,2,3,7,8-PeCDF	2,3,4,7,8-PeCDF	1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,2,3,7,8,9-HxCDF	2,3,4,6,7,8-HxCDF	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	OCDF
Nb valeurs	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Valeurs < LQ	57-38 %	90-59 %	84-55 %	72-47 %	81-53 %	142-93 %	76-50 %	61-40 %	144-95 %	100-66 %
LQ mini.	0,3	0,27	0,25	0,29	0,31	0,3	0,3	0,38	0,37	0,73
LQ max.	2,7	2	2	2	2	2,1	2	7,5	7,5	25
Valeur min.	0,16	0,16	0,15	0,17	0,17	0,15	0,16	0,41	0,19	0,45
Valeur max.	33,00	10,00	15,00	15,00	16,00	4,60	18,00	76,00	3,75	75,00

Tableau 11 : Tableau des principaux résultats concernant les furanes.

Usuellement les concentrations des dioxines et des furanes sont transposées en concentrations équivalentes de toxicité calculées en les multipliant par des coefficients de toxicité équivalente. Cette transposition permet la comparaison de la toxicité de molécules entre elles et aussi de sommer les résultats obtenus afin de fournir un unique résultat, plus facile à interpréter, pour l'ensemble des dioxines, des furanes ou des dioxines-furanes analysées.

Différents coefficients de toxicité ont été calculés par l'OTAN (Organisation du Traité de l'Atlantique Nord) en 1989 et par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) en 1998, puis en 2005 (Tableau 12 et Tableau 13). La dernière série de coefficients publiée ne recevant pas un accueil unanime de la part de la communauté scientifique, l'ensemble des résultats obtenus a été présenté (comme souvent) avec les trois séries de coefficients disponibles.

En raison du nombre important de valeurs inférieures aux limites de quantification, et avec toutes les réserves déjà évoquées, les résultats seront de plus présentés ici après substitution par 0 % (Sub. 0 %) et 100 % (Sub.100 %) des limites de quantification, pour l'ensemble des dioxines et furanes étudiés (Tableau 14).

Congénère	OTAN 1989	OMS 1998	OMS 2005
2,3,7,8-TCDD	1	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	0,5	1	1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	0,01	0,01
OCDD	0,001	0,0001	0,0003

Tableau 12 : Coefficients de toxicité équivalente publiés par l'OTAN et l'OMS pour les dioxines étudiées.

Congénère	OTAN 1989	OMS 1998	OMS 2005
2,3,7,8-TCDF	0,1	0,1	0,1
1,2,3,7,8-PeCDF	0,05	0,05	0,03
2,3,4,7,8-PeCDF	0,5	0,5	0,3
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1	0,1	0,1
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01	0,01	0,01
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01	0,01	0,01
OCDF	0,001	0,0001	0,0003

Tableau 13 : Coefficients de toxicité équivalente publiés par l'OTAN et l'OMS pour les furanes étudiés.

Dioxines + Furanes (TEQ)	OTAN 1989		OMS 1998		OMS 2005	
	Sub. 0 %	Sub. 100 %	Sub. 0 %	Sub. 100 %	Sub. 0 %	Sub. 100 %
Nb. résultats	152	152	152	152	152	152
Maximum	20,51	20,58	22,53	22,61	19,96	19,96
Vibrisse sup. int.	7,90	7,77	8,00	8,74	6,20	7,96
90 ^e centile	6,02	6,96	6,50	7,47	5,75	6,75
75 ^e centile	3,31	4,75	3,13	5,16	2,81	4,92
Médiane	1,03	3,22	0,86	3,59	0,93	3,48
Moyenne	2,32	4,15	2,35	4,51	2,17	4,23
Ecart-type	3,31	2,92	3,62	3,16	3,22	2,81
25 ^e centile	0,14	2,68	0,09	2,74	0,14	2,78
10 ^e centile	0,04	1,59	0,03	1,80	0,04	1,73
Minimum	0,000	1,01	0,00	1,14	0,000	1,10

Tableau 14 : Somme des quantités toxiques équivalents pour les dioxines et les furanes étudiés pour les trois séries de coefficients de toxicité équivalente, pour une substitution des valeurs < LQ par 0 ou 100 % de la LQ et pour l'ensemble de la France.

Quel que soit le référentiel de coefficient choisi, on constate selon le mode de substitution, des différences plus importantes entre les deux premiers qu'entre les deux derniers quartiles. Les vibrisses supérieures internes semblent aussi moins influencées par le mode de substitution (Figure 8 et Figure 9).

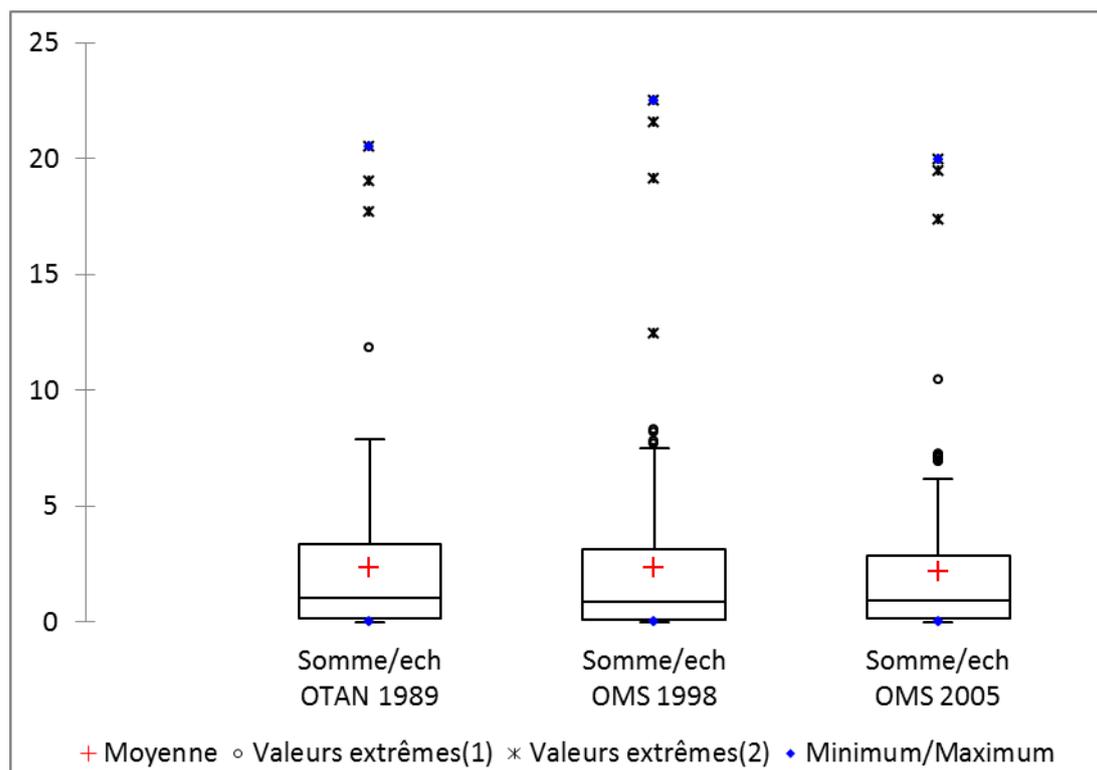


Figure 8 : Représentation des résultats de la somme dioxines et furanes pour la France après substitution des valeurs inférieures à la LQ par 0 et conversion en quantités toxiques équivalentes.

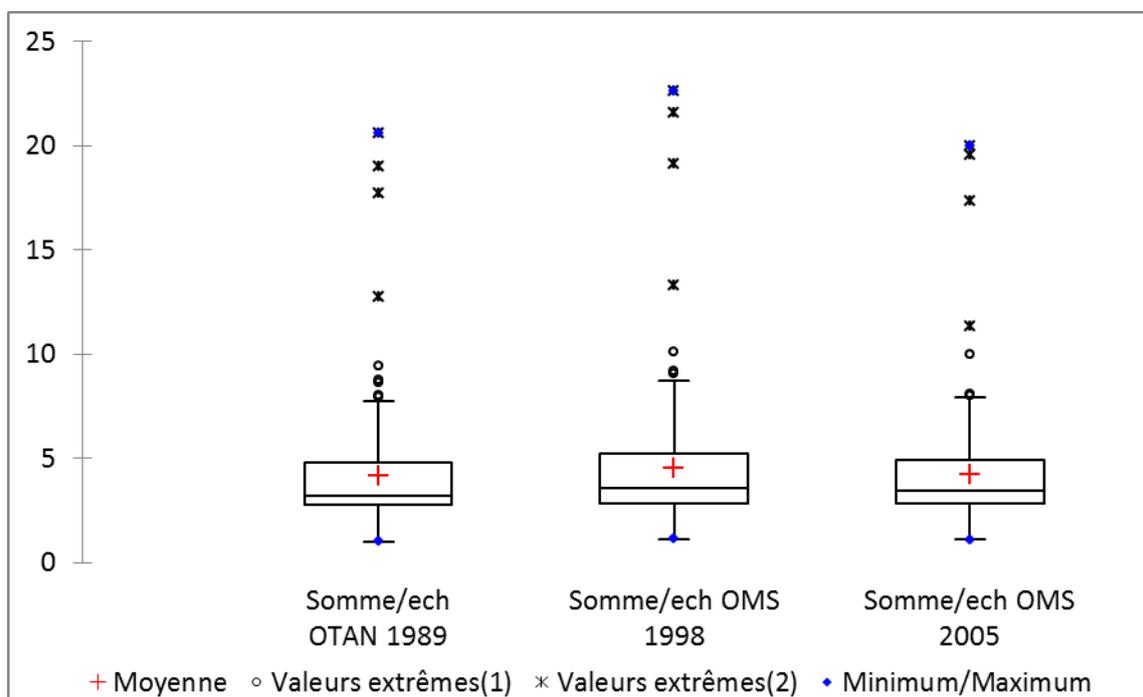


Figure 9 : Représentation des résultats de la somme dioxines et furanes pour la France après substitution des valeurs inférieures à la LQ par LQ et conversion en quantités toxiques équivalentes.

7. Corrélations

Les concentrations des métaux/métalloïdes dans les sols présentent entre elles des corrélations plus ou moins marquées.

Le tableau de corrélation (Tableau 19) et les graphiques suivants (Figure 10 à Figure 12) ont été créés après élimination, pour chaque paramètre, et pour chaque zone géographique considérée, des valeurs supérieures aux vibrisses, c'est-à-dire les valeurs extrêmes (outliers), afin d'obtenir des résultats indépendants des anomalies. Cependant cette méthode conduit à une diminution sensible des effectifs des populations :

- 22 échantillons pour A (au lieu de 30) ;
- 41 échantillons pour B (au lieu de 49) ;
- 23 échantillons pour C (au lieu de 28) ;
- 249 échantillons pour la France entière (au lieu de 425).

Les calculs ont été effectués en utilisant les coefficients de détermination de Pearson (corrélation standard) et de Spearman. Outre une plus grande robustesse, ce dernier est plus adapté :

- à la détermination des corrélations non linéaires ;
- mais surtout dans notre cas, au traitement de données ne suivant pas une loi normale de répartition.

Les résultats obtenus entre les deux méthodes sont globalement cohérents mais les coefficients de corrélation Spearman sont systématiquement plus faibles que ceux obtenus avec Pearson. Quelques corrélations moyennes à fortes obtenus selon Pearson sont faibles avec Spearman (Tableau 15).

Des profils de corrélations cohérents sont mis en évidence. Ils montrent des profils différents selon les agglomérations :

- les résultats obtenus dans l'agglomération A présentent une forte corrélation plomb/zinc/cadmium ;
- dans l'agglomération B, ce sont les corrélations plomb/mercure et chrome/nickel qui sont les plus fortes ;
- dans l'agglomération C, les résultats présentent surtout une corrélation arsenic/nickel/chrome et plomb/mercure ;
- à l'échelle nationale, et malgré une diversité de contextes géologiques, pédologiques, climatiques et historiques, on constate des corrélations nickel-chrome (Figure 10) mais aussi plomb-zinc (Figure 11) et plomb-mercure (Figure 12).

Calculs selon le coefficient de Pearson

Calculs selon le coefficient de Spearman

A

As	As							
Cu	0,38	Cu						
Cr	0,39	0,77	Cr					
Pb	0,57	0,41	0,19	Pb				
Zn	0,29	0,60	0,33	0,78	Zn			
Ni	0,53	0,56	0,66	0,24	0,28	Ni		
Cd	0,32	0,50	0,23	0,78	0,91	0,31	Cd	
Hg	0,45	0,62	0,48	0,62	0,51	0,66	0,54	

A

As	As							
Cu	0,15	Cu						
Cr	0,15	0,43	Cr					
Pb	0,17	0,42	0,06	Pb				
Zn	0,02	0,39	0,09	0,63	Zn			
Ni	0,30	0,37	0,42	0,09	0,11	Ni		
Cd	0,02	0,28	0,04	0,56	0,80	0,15	Cd	
Hg	0,20	0,37	0,30	0,32	0,22	0,56	0,33	

B

As	As							
Cu	0,30	Cu						
Cr	0,70	0,22	Cr					
Pb	0,20	0,69	0,05	Pb				
Zn	0,45	0,65	0,51	0,53	Zn			
Ni	0,72	0,35	0,87	0,08	0,53	Ni		
Cd	-0,09	0,24	-0,13	0,34	0,28	0,05	Cd	
Hg	0,09	0,58	-0,07	0,88	0,37	-0,06	0,43	

B

As	As							
Cu	0,07	Cu						
Cr	0,50	0,04	Cr					
Pb	0,06	0,51	0,02	Pb				
Zn	0,16	0,30	0,30	0,26	Zn			
Ni	0,56	0,10	0,75	0,02	0,27	Ni		
Cd	0,01	0,06	0,02	0,10	0,04	0,00	Cd	
Hg	0,02	0,37	0,00	0,69	0,10	0,00	0,14	

C

As	As							
Cu	0,51	Cu						
Cr	0,68	0,21	Cr					
Pb	0,32	0,80	-0,04	Pb				
Zn	0,50	0,74	0,15	0,59	Zn			
Ni	0,87	0,46	0,82	0,23	0,39	Ni		
Cd	0,66	0,71	0,29	0,59	0,63	0,49	Cd	
Hg	0,27	0,52	0,06	0,63	0,60	0,06	0,51	

C

As	As							
Cu	0,17	Cu						
Cr	0,48	0,03	Cr					
Pb	0,03	0,54	0,04	Pb				
Zn	0,17	0,50	0,01	0,42	Zn			
Ni	0,65	0,14	0,63	0,00	0,09	Ni		
Cd	0,50	0,44	0,10	0,31	0,48	0,31	Cd	
Hg	0,03	0,40	0,00	0,66	0,48	0,00	0,24	

France

As	As							
Cu	0,15	Cu						
Cr	0,54	0,21	Cr					
Pb	0,12	0,52	0,05	Pb				
Zn	0,22	0,50	0,26	0,63	Zn			
Ni	0,47	0,33	0,79	0,07	0,36	Ni		
Cd	-0,01	0,24	0,05	0,43	0,52	0,12	Cd	
Hg	-0,01	0,40	-0,01	0,63	0,44	0,05	0,28	

France

As	As							
Cu	0,06	Cu						
Cr	0,31	0,09	Cr					
Pb	0,03	0,33	0,01	Pb				
Zn	0,09	0,34	0,12	0,38	Zn			
Ni	0,27	0,17	0,65	0,00	0,17	Ni		
Cd	0,00	0,06	0,00	0,17	0,28	0,02	Cd	
Hg	0,00	0,22	0,00	0,54	0,20	0,01	0,10	

Tableau 15 : Coefficients de corrélation (Pearson et Spearman) entre métaux et métalloïdes dans les agglomérations A, B et C et pour l'ensemble des agglomérations de France.

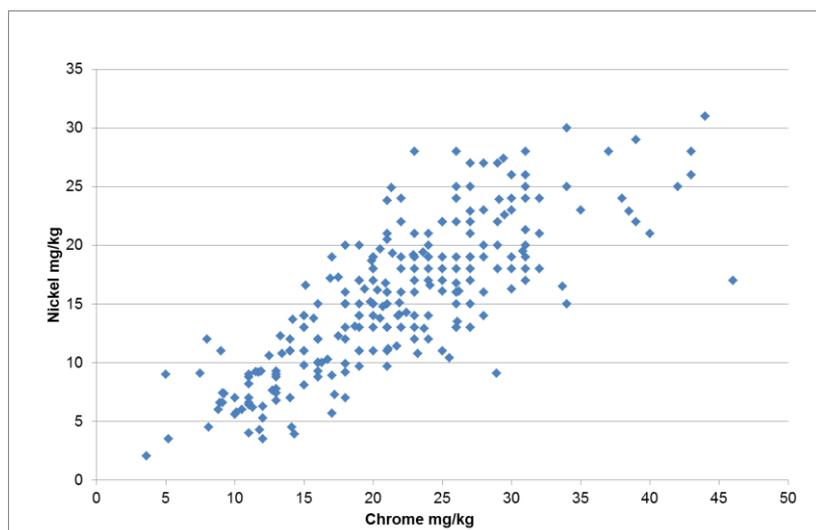


Figure 10 : Relation entre le chrome et le nickel pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,79$).

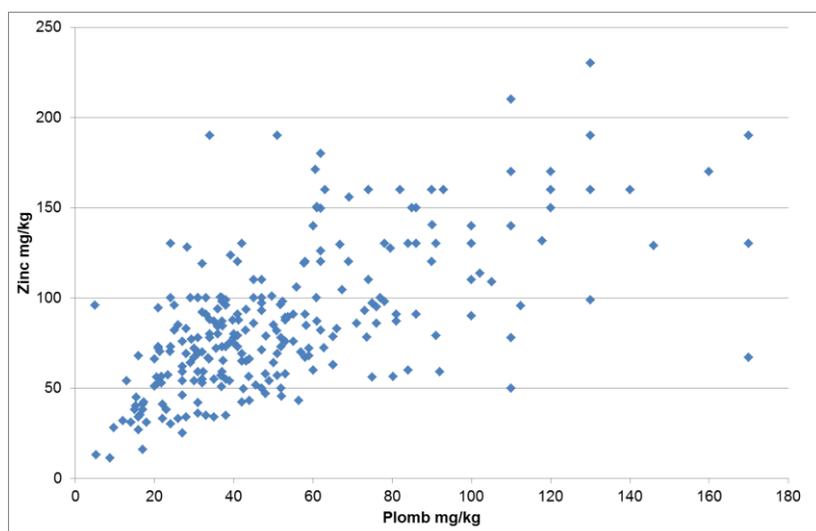


Figure : Relation entre le plomb et le zinc pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,63$).

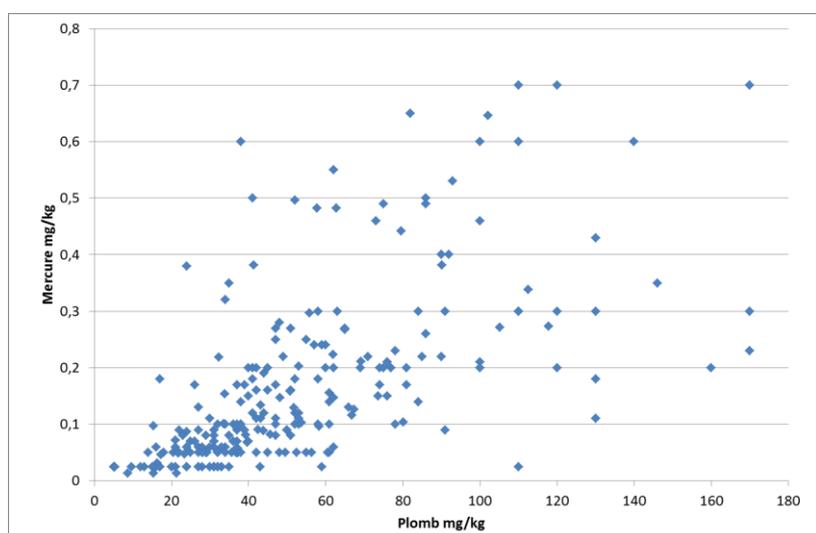


Figure 11 : Relation entre le plomb et le mercure pour l'ensemble des agglomérations de France ($r = 0,63$).

8. Confrontation des résultats aux données BDETM et INDIQUASOL

Les résultats obtenus dans le cadre du projet FGU sont ici confrontés à ceux des bases de données les plus courantes : INDIQUASOL et BDETM⁶.

Cette réflexion est donnée seulement à titre indicatif, et sans projection d'utilisation dans le cadre des diagnostics et problématiques de gestion des sols potentiellement pollués sur les sites industriels.

En effet, il ne peut s'agir d'une véritable comparaison en raison de nombreuses divergences de contexte, d'objectif et de méthodologie entre les différents jeux de données. Les divergences principales sont :

- la réalisation du projet INRA dans un contexte principalement agricole ;
- les analyses réalisées sur échantillon composite prélevé entre 0 et 30 cm, en plein champ, après minéralisation à l'acide fluorhydrique ou à l'eau régale.

8.1. CONFRONTATION AVEC LES DONNÉES INDIQUASOL (INRA)

INDIQUASOL est la base de données des indicateurs de la qualité des sols développée par l'INRA dans le cadre du GIS Sol (Groupement d'Intérêt Scientifique Sol). Les indicateurs sont déterminés sur la base des données du Réseau National de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) qui repose sur le suivi de 2 200 sites selon une maille carrée de 16 km de côté couvrant l'ensemble du territoire français. Réalisé pour déterminer la fertilité de sols, l'outil permet également la mise en évidence de zones naturellement riches en éléments traces métalliques (ETM) et celles où des contaminations diffuses d'origine anthropique sont suspectées (16). L'outil cartographique en ligne d'INDIQUASOL permet d'afficher les valeurs de vibrisse locale pour les ETM des sols.

Les valeurs obtenues dans le cadre du projet FGU ont donc été confrontées à ces seuils de valeurs dites « anormales »⁷ du RMQS obtenues par l'analyse des échantillons prélevés entre 0 et 30 cm, dans les mailles superposant et entourant les agglomérations considérées dans ce rapport. Suivant la taille des agglomérations, les valeurs du projet FGU sont comparées aux valeurs de 4 à 9 cellules permettant de recouvrir les agglomérations (Tableau 16).

Le tableau (Tableau 16) et graphiques (Figure 13) confrontent les valeurs des vibrisses supérieures obtenues dans le cadre du projet FGU avec les valeurs anormales du RMQS pour le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc et le chrome.

⁶ Aucune confrontation avec l'Inventaire Minier National du BRGM n'a été effectuée car les agglomérations A, B et C se trouvent dans des zones qui ne sont pas couvertes par l'IMN.

⁷ Le terme « anormalique » mentionné sur le site INDIQUASOL est un néologisme créé par D. Baize en 1997. (35)

Vibrisse sup. interne	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
FGU A	1 370	90,0	20,0	288,1	360,0	23,0
Cellule RMQS A1	1 014	61,6	96,6	75,1	160,6	112,9
Cellule RMQS A2	923	57,5	104,5	56,4	166,0	116,6
Cellule RMQS A3	902	72,6	80,2	78,3	155,6	105,9
Cellule RMQS A4	1 053	101,1	101,1	122,9	173,0	144,3

Vibrisse sup. interne	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
FGU B	450	63,0	28,0	140,0	170,0	43,0
Cellule RMQS B1	666	55,2	94,8	42,3	175,7	135,5
Cellule RMQS B2	629	53,7	59,3	47,3	152,6	106,4
Cellule RMQS B3	891	46,1	83,4	43,5	168,9	128,3
Cellule RMQS B4	581	48,8	65,4	50,0	161,6	107,3

Vibrisse sup. interne	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
FGU C	520	67,0	20,0	170,0	210,0	33,0
Cellule RMQS C1	2 107	70,9	65,3	123,7	183,5	126,6
Cellule RMQS C2	997	64,0	61,6	102,1	141,7	109,1
Cellule RMQS C3	909	49,6	42,8	115,1	110,0	107,7
Cellule RMQS C4	1 083	62,0	64,2	113,4	166,2	106,6
Cellule RMQS C5	1 053	67,7	62,6	121,3	165,0	111,9
Cellule RMQS C6	998	51,0	52,1	110,5	118,2	114,3
Cellule RMQS C7	862	55,0	64,4	103,9	162,6	129,0
Cellule RMQS C8	899	54,6	49,6	115,9	129,3	113,5
Cellule RMQS C9	770	51,8	45,0	115,6	105,7	109,6

Tableau 16 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats RMQS pour les agglomérations A, B et C.

Cd en µg/kg et Cu, Ni, Pb, Zn, Cr en mg/kg

(vert : valeur FGU ; gras : valeur RMQS maximale, gras italique : valeur RMQS minimale).

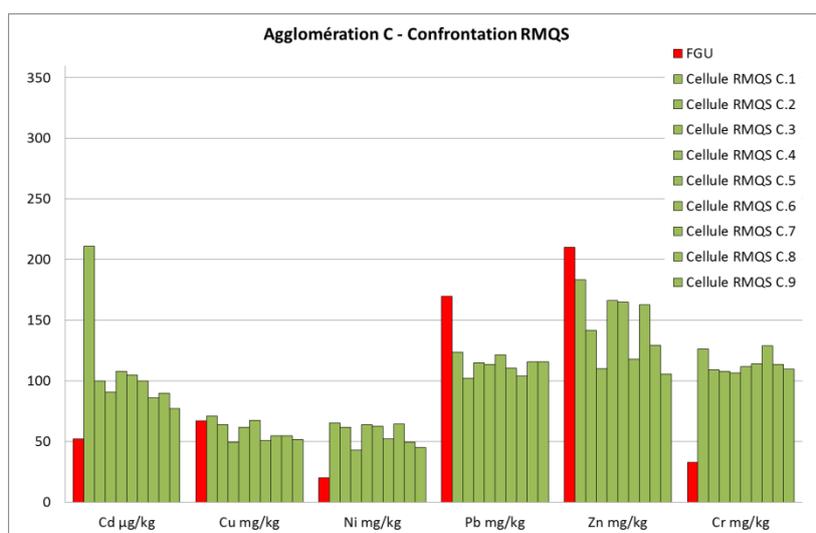
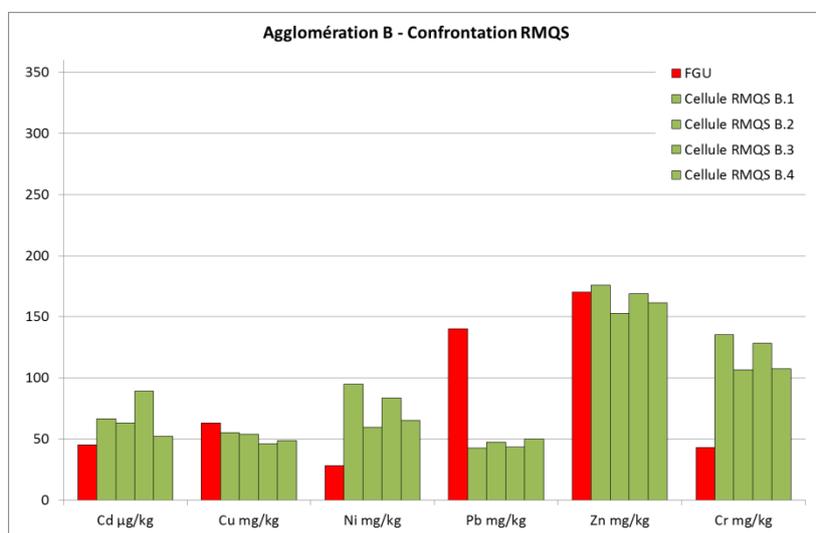
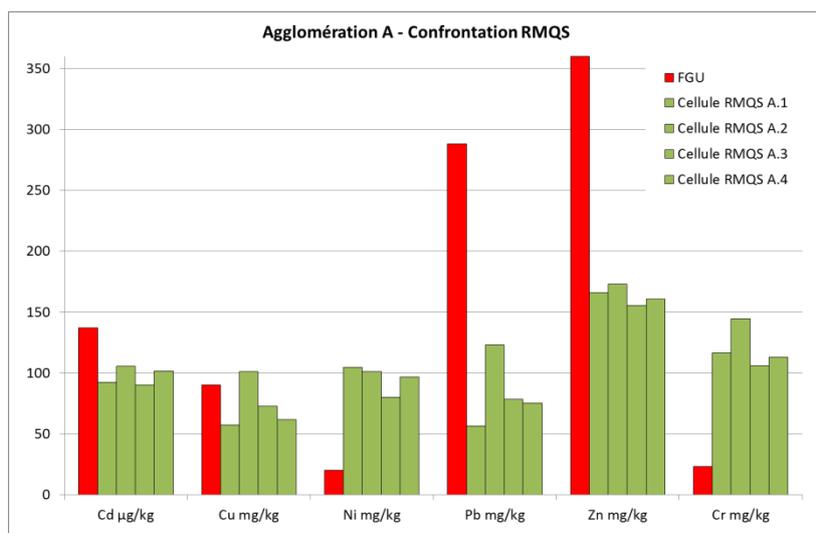


Figure 12 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats RMQS pour les agglomérations A, B et C.

Dans chaque région étudiée, les vibrisses supérieures obtenues au cours du projet FGU et les valeurs anormales RMQS présentent le même profil pour certains métaux :

- vibrisses FGU plus faibles pour le nickel et le chrome ;
- vibrisses de même ordre de grandeur pour le cuivre ;
- vibrisses FGU plus élevées pour le plomb, mais de façon moins marquée pour l'agglomération C.

On distingue également des différences entre les régions pour d'autres métaux :

- dans l'agglomération A, pour le cadmium, la vibrisse FGU est plus élevée que les valeurs anormales RMQS, tandis que dans les agglomérations B et C, les vibrisses FGU sont plus faibles que les valeurs RMQS ;
- dans l'agglomération B, pour le zinc, la vibrisse FGU est de même ordre de grandeur que les valeurs anormales RMQS. Par contre, dans l'agglomération A, et dans une moindre mesure pour l'agglomération C, les valeurs des vibrisses sont plus élevées.

8.2. CONFRONTATION AVEC LES DONNÉES DE LA BDETM (INRA)

La BDETM est la Base de Données des Éléments Traces Métalliques développée par l'INRA qui recueille les analyses des teneurs en ETM réglementaires sur les terrains recevant des boues de station d'épuration urbaine⁸. Les échantillons sont prélevés dans les horizons de surface (horizon labourés) des terrains agricoles susceptibles de recevoir des boues de station d'épuration urbaine.

La base de données BDETM a donné lieu à deux campagnes de prélèvements :

- une première campagne entre 1990 et 2000 dont les résultats sont disponibles par département ;
- une seconde campagne entre 2000 et 2010 dont les résultats sont disponibles par petite région agricole.

La minéralisation (mise en solution) des sols a été réalisée par attaque au moyen de mélanges des acides fluorhydrique et perchlorique ou des acides chlorhydrique et nitrique (eau régale). La répartition de l'utilisation des deux protocoles d'attaque n'est pas homogène d'une zone géographique à une autre (Tableau 17).

Agglomérations	BDETM 1990-2000		BDETM 2000-2010 Petite région agricole (PRA)
	Départements	Minéralisation (%) ER - HF - Inconnu	
A	Dept. A1	7-91-2	PRA. A1
B	Dept B1	92-0-8	PRA. B1
C	Dept C1 & Dept C2, C3, C4	7-91-0	PRA. C1, PRA.C2

Tableau 17 : Liste des départements et des petites régions agricoles (code INSEE) considérées pour l'obtention des résultats BDETM pour chaque agglomération.
(ER = Eau régale, HF = Acides fluorhydrique/Perchloriques, Inconnu : mode de minéralisation inconnu).

⁸ Ces valeurs réglementaires (prescriptions du décret du 8 décembre 1997 complété par l'arrêté du 8 janvier 1998) ne sont pas des valeurs de gestion dans le cadre des diagnostics et des problématiques des sols potentiellement pollués sur les sites industriels.

Les résultats des analyses obtenues dans le cadre du projet FGU ont été confrontés, pour chaque agglomération considérée, aux résultats des deux campagnes de prélèvements BDETM (Tableau 17)⁹.

Les données de la première campagne BDETM sont disponibles pour la France entière ce qui permet une confrontation avec les valeurs FGU obtenue pour l'ensemble du territoire Français. Les tableaux suivants confrontent dans chaque agglomération, les valeurs obtenues dans le cadre du projet FGU avec les valeurs BDETM pour le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc, le chrome, et le mercure (Tableau 18 à Tableau 19). Les graphiques suivants ont été construits en utilisant les valeurs correspondant aux vibrisses supérieures (Figure 14).

Résultats en mg/kg		Référence lieu	Effectif	1 ^{er} quartile	médiane	3 ^e quartile	Vibrisse sup. interne	Nb outliers*
Cadmium	FGU	B	49	0,100	0,200	0,260	0,450	4
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	161	0,150	0,200	0,250	0,400	6
	BDETM 1998	Dpt. B1	901	0,150	0,200	0,300	0,530	25
Cuivre	FGU	B	49	24,0	33,0	42,0	63,0	4
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	168	14,1	18,3	23,2	36,8	14
	BDETM 1998	Dpt. B1	987	9,0	12,0	18,3	32,0	93
Nickel	FGU	B	49	12,0	18,0	22,1	28,0	0
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	163	18,6	22,4	28,8	44,0	3
	BDETM 1998	Dpt. B1	989	13,3	18,1	24,7	41,8	25
Plomb	FGU	B	49	31,5	43,0	79,5	140,0	3
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	163	17,8	19,9	24,1	33,6	5
	BDETM 1998	Dpt. B1	985	174,0	21,7	27,3	42,8	15
Zinc	FGU	B	49	73,5	96,0	120,0	170,0	1
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	168	51,2	60,3	76,6	114,7	7
	BDETM 1998	Dpt. B1	986	35,5	45,1	62,0	101,7	42
Chrome	FGU	B	49	15,0	20,8	26,8	43,0	0
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	163	26,6	31,3	40,1	60,3	9
	BDETM 1998	Dpt. B1	986	16,8	20,8	25,5	39,0	39
Mercure	FGU	B	49	0,050	0,130	0,320	0,700	4
	BDETM 2000-2010	PRA. B1	448	0,020	0,020	0,030	0,050	13
	BDETM 1998	Dpt. B1	870	0,020	0,030	0,050	0,100	25

Tableau 18 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour l'agglomération B. (*outlier : valeur supérieure à la vibrisse supérieure - vert : valeur FGU).

⁹ NB : Les données BDETM concernant l'agglomération A n'ont pas été trouvées. Les données FGU pour l'agglomération C sont aussi localisées dans des départements pour lesquels les données BDETM n'ont pas été trouvées.

Résultats en mg/kg		Référence lieu	Effectif	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	Vibrisse supérieure	Nb outliers*
Cadmium	FGU	C	28	0,210	0,250	0,350	0,520	1
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	0,240	0,290	0,340	0,490	12
		PRA. C2	16	0,250	0,290	0,330	0,450	5
	BDETM 1998	Dept.C1	743	0,200	0,250	0,229	0,475	25
		Dept. C2, C3, C4	247	0,230	0,310	0,400	0,660	9
Cuivre	FGU	C	28	20	31	45	67	1
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	12,26	15,55	18,64	28,21	4
		PRA. C2	16	13,32	19,77	26,28	45,72	1
	BDETM 1998	Dept.C1	755	9,9	12,3	16,7	26,9	56
		Dept. C2, C3, C4	251	11	12,6	16	23,5	8
Nickel	FGU	C	28	12	18	22	20	0
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	17,33	21,16	25,57	37,93	9
		PRA. C2	16	14,57	17,74	23,03	35,72	0
	BDETM 1998	Dept.C1	758	15,1	19,4	24	37,35	4
		Dept. C2, C3, C4	251	16,8	20,5	24,7	36,6	2
Plomb	FGU	C	28	51	73	110	170	1
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	15,83	19,28	23,42	34,81	8
		PRA. C2	16	20,47	34,56	43,61	78,32	1
	BDETM 1998	Dept.C1	760	23,5	26,4	31,1	42,5	77
		Dept. C2, C3, C4	252	23,1	25,5	30,8	42,4	20
Zinc	FGU	C	28	73	120	160	210	2
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	47,83	56,16	64,12	88,56	3
		PRA. C2	16	50,26	59,19	68,40	95,61	5
	BDETM 1998	Dept.C1	757	49	56	65	89	35
		Dept. C2, C3, C4	252	48	56	65	90,5	8
Chrome	FGU	C	28	16	19	25	33	1
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	226	32,95	39,52	48,07	70,75	10
		PRA. C2	16	24,28	33,85	39,03	61,16	0
	BDETM 1998	Dept.C1	757	38,4	45,3	52,3	73,15	8
		Dept. C2, C3, C4	252	37,9	44,9	50,8	70	7
Mercure	FGU	C	28	0,225	0,385	0,755	1,200	0
	BDETM-2000-2010	PRA. C1	118	0,050	0,070	0,120	0,225	16
		PRA. C2	12	0,110	0,150	0,220	0,385	2
	BDETM 1998	Dept.C1	700	0,050	0,060	0,090	0,150	84
		Dept. C2, C3, C4	243	0,050	0,070	0,110	0,200	36

Tableau 19 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour l'agglomération C (*outlier : valeur supérieure à la vibrisse supérieure - vert : valeur FGU).

Vibrisse sup. interne (mg/kg)	FGU	BDETM-1998
Cadmium	0,733	0,800
Cuivre	80,5	33,3
Nickel	33,5	50,3
Plomb	178,8	52,4
Zinc	248,0	122,5
Chrome	46,0	91,8
Mercure	0,660	0,130

Tableau 20 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats de la base de données BDETM pour toute la France.

Les trois zones géographiques étudiées présentent des profils identiques :

- les vibrisses FGU sont très nettement les plus élevées pour le plomb, le zinc et le mercure ;
- les vibrisses FGU sont les plus élevées pour le cuivre ;
- les vibrisses sont de même ordre pour le cadmium ;
- les vibrisses FGU sont les plus faibles pour le nickel et le chrome.

Cette dernière observation peut s'expliquer par une moindre dissolution de ces métaux par l'eau régale que par le mélange fluorhydrique/perchlorique démontré par BAIZE *et al.*, (17). On note en effet que pour l'agglomération B, où les analyses de l'INRA ont été majoritairement réalisées après attaque à l'eau régale, les vibrisses FGU et BDETM présentent des différences moins marquées que dans les autres agglomérations.

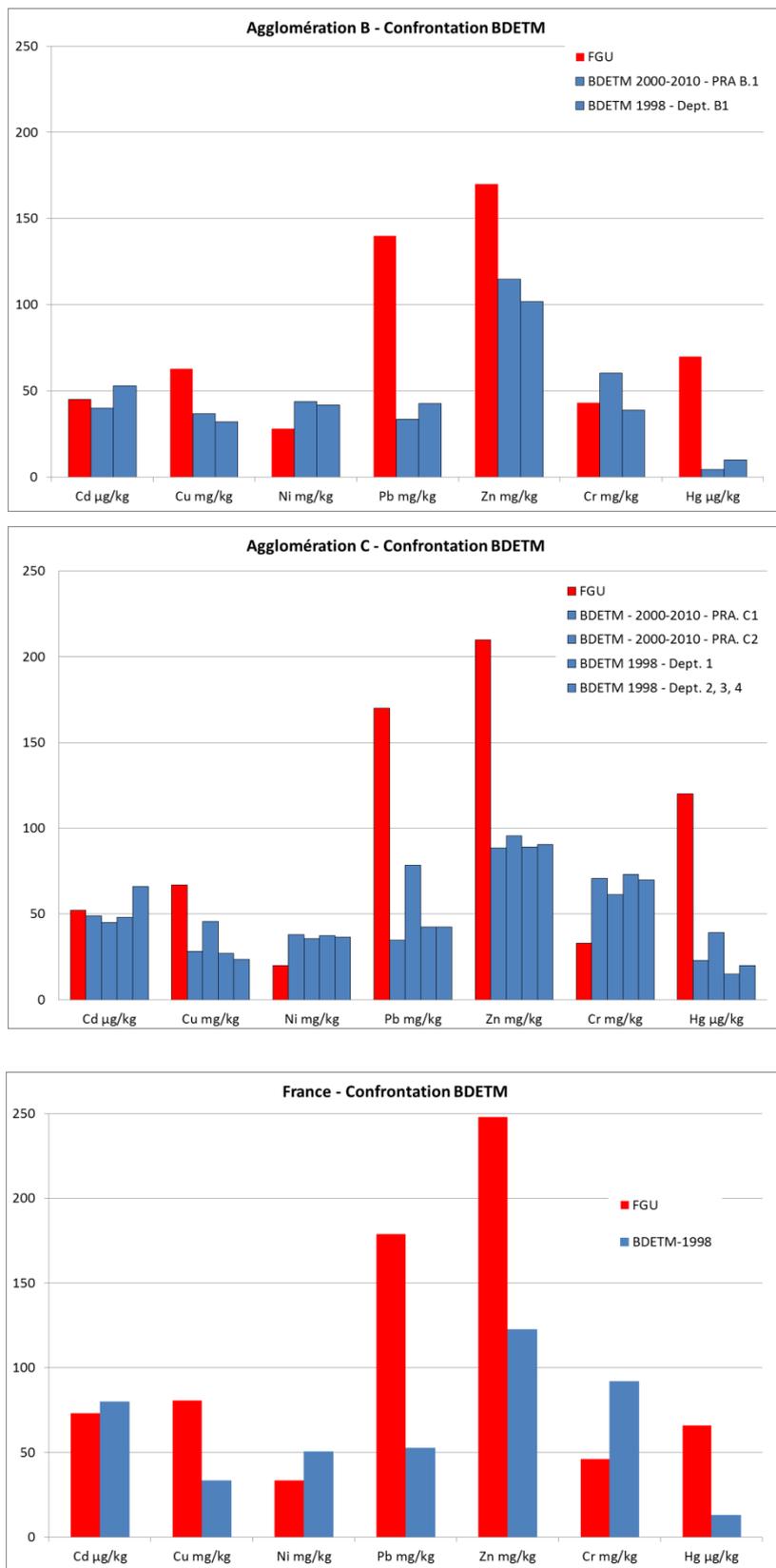


Figure 13 : Confrontation des résultats du projet FGU et des résultats BDETM pour les agglomérations B, C et pour toute la France.

9. Questions apparues au cours du projet

À chaque étape de la réalisation du projet, des questions se sont posées à propos de certains choix méthodologiques. Même si la norme ISO 19258 présente plusieurs recommandations en matière de réalisation d'un fond pédo-géochimique, elle laisse aux opérateurs le soin de trancher, selon les besoins de leurs études, entre différentes approches. Mais il est aussi apparu que certaines de ces approches font encore débat entre scientifiques partageant pourtant les mêmes objectifs.

L'ADEME a choisi de mettre en place un groupe de travail « Fond pédo-géochimique et anthropique » pour tenter d'établir, de façon argumentée, les meilleures réponses aux questions soulevées, dans le cadre du projet FGU. *A priori*, dans plusieurs cas, les réponses dépendront des contextes et des objectifs suivis :

- protection sanitaire vis-à-vis de l'exposition des populations aux sols de surface (ingestion de sol par porter main-bouche ou consommation de récoltes, inhalation de poussières) ;
- diagnostic de pollution ;
- objectif de dépollution ;
- gestion de terres excavées...

Ces questions sont ici réunies et décrites afin d'alimenter le groupe de travail.

9.1. CHOIX D'UNE CARACTÉRISATION SYSTÉMATIQUE OU THÉMATIQUE

Les études portant sur la qualité des sols à l'échelle urbaine se divisent en deux types de caractérisation :

- l'une, dite systématique, qui consiste à prélever les sols systématiquement sur l'ensemble du territoire étudié, selon un maillage préétabli ;
- l'autre, dite thématique, qui donne lieu à des prélèvements de sols choisis pour leurs caractéristiques (par exemple : localisation, activité accueillie, nature...).

Le choix entre les deux approches dépend des objectifs visés. Pour cartographier l'ensemble d'un territoire, en intégrant tous les types de sols et tous les niveaux de contamination présents, l'approche systématique est la plus appropriée. Elle répond à un besoin de connaissance et de cartographie de la qualité des sols sur une zone donnée. Elle semble inadaptée à la réalisation d'un fond pédo-géochimique et anthropique urbain.

Le projet FGU s'inscrit dans une approche thématique puisqu'il s'agit de bancariser les analyses de sols urbains exempts de toute pollution locale (spot) et uniquement impactés par une contamination diffuse. Dans le cadre de la première convention du projet, il convient de noter que l'approche est encore plus restrictive, puisque contrainte par le protocole du projet ETS à des prélèvements dans des espaces verts proches des établissements investigués. C'est pourquoi la nécessité d'obtenir des données complémentaires a été identifiée très tôt.

Néanmoins, le choix de prélever spécifiquement les sols des espaces verts, tel que défini en 3.2, pose les questions suivantes sur la représentativité des résultats :

- **comment établir le FGU dans les agglomérations de faible densité en espaces verts ?**
- **les espaces verts ont-ils une répartition homogène dans l'agglomération ?**
- **les espaces verts ont-ils une répartition représentative de la diversité pédo-géologique de l'agglomération ?**
- **les méthodes statistiques et de corrélation des données peuvent-elles aider à répondre aux questions ci-dessus ou à les contourner ?**

9.2. CHOIX D'UNE ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE

Il est convenu que la prise en compte d'un unique FGU pour l'ensemble des agglomérations d'un pays n'a pas de sens (même s'il est intéressant d'avoir une vision statistique générale du FGU sur l'ensemble du territoire national pour déterminer l'amplitude des résultats et positionner à titre indicatif une agglomération par rapport à un contexte national). Même au sein d'une agglomération, la littérature et les analyses obtenues dans le cadre du projet FGU montrent une forte variabilité et des résultats extrêmement hétérogènes.

Par ailleurs, les textes de gestion des sites (potentiellement) pollués de 2007 préconisent une comparaison des sols investigués avec les sols voisins sans préciser les distances associées à cette notion de voisinage.¹⁰

Dans ces conditions, sur quelle étendue géographique associer un FGU exploitable par les utilisateurs ?

Une fourchette de valeurs (définies par exemple graphiquement au moyen des vibrisses d'une boîte à moustache) devrait répondre aux contraintes suivantes :

- **prendre en compte un nombre suffisant de points de prélèvement pour assurer la représentativité statistique des résultats ;**
- **correspondre à des points de prélèvements répartis sur une zone géographique cohérente pour sa pédo-géologie, son histoire industrielle, son climat, son exposition aux vents dominants... ;**
- **représenter une zone géographique suffisamment restreinte pour tenir compte des variations locales des concentrations naturelles et anthropiques diffuses.**

Est-il possible de regrouper les points de prélèvement de plusieurs agglomérations localisées dans une même région, une même formation géologique ?

9.3. CHOIX DES LIEUX DE PRÉLÈVEMENT

Selon la définition du 3.1.3, le point de prélèvement à retenir pour la réalisation du fond géochimique urbain doit présenter un sol représentatif de la pédo-géologie locale et de la contamination diffuse anthropique à l'exception de toute pollution localisée. Idéalement, il s'agirait d'un lieu de l'agglomération urbaine :

¹⁰ A cette notion de voisinage devrait s'ajouter des origines géologique (formation géologique) et pédologique (horizon) identiques.

- situé de façon à recueillir de façon uniforme les retombées diffuses atmosphériques (fumées, particules) provoquées par les activités anthropiques locales à transfrontalières ;
- préservé depuis la révolution industrielle :
 - de toute pollution des sols (spot) et de tout panache de retombées atmosphériques,
 - de tout remaniement, remblaiement, amendement, traitement physique ou chimique.

Devant le caractère utopique d'un tel lieu, le projet FGU a retenu les espaces verts (parcs, lieux de loisirs, jardins) pour y prélever les sols dits « FGU ». Cette solution est cohérente avec les démarches rapportées par la littérature (9). Ainsi, Tarvaninen (18) indique qu'il effectue ses prélèvements dans les cours d'écoles, les centres de soins, les parcs, les cours des résidences et à proximité des zones industrielles.

Mais, même si, par ailleurs, les consignes de sélection des points de prélèvement fournies par le projet ont été suivies, ces lieux peuvent présenter des caractéristiques incompatibles avec la réalisation d'un FGU :

- création récente datant de quelques mois à quelques années ;
- sols constitués de matériaux rapportés : terreaux, terre végétale, sable ;
- sols travaillés et recevant des apports de substances diverses : engrais, chaux, produits phytosanitaires, ...

Selon Demetriades (19), membre du projet URGE, *a minima*, les points de prélèvement devraient ne pas avoir été perturbés depuis au moins 10 ans.

Dans ces conditions :

- **la liste des lieux de prélèvement ne devrait-elle pas être plus restrictive et se limiter aux lieux dont l'ancienneté est certaine et l'histoire connue : parcs de châteaux, jardins des plantes, jardins ouvriers anciens, vieux cimetières ?**
- **au sein de ces localisations, les points de prélèvement les moins « perturbés » pourraient-ils être choisis en concertation avec les responsables disposant de la mémoire des lieux ?**

Il serait intéressant de tester cette solution et de comparer les résultats aux données déjà obtenues dans une même agglomération.

9.4. CHOIX DE LA MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE

Le choix d'un échantillon composite dans un carré de 3 m de côté (assemblage de 5 prélèvements au coin et au centre du carré), retenu par le projet FGU, permet de limiter l'effet dit « pépité » associés aux prélèvements unitaires.

Cependant ce choix fait l'objet d'un débat entre les auteurs. Ainsi, le rapport bibliographique réalisé par M. Jarzabek (9) montre que la méthode d'échantillonnage par composite est souvent retenue. Cependant, Demetriades (19) réfute l'échantillonnage composite au prétexte qu'il dilue la pollution éventuellement présente, et affirme que le mode de prélèvement unitaire est le plus usité dans le domaine des sols pollués et de la géochimie urbaine.

Selon le BRGM, les différentes approches doivent être confrontées aux objectifs des études. S'il s'agit d'une étude systématique et cartographique, la maille de la grille d'échantillonnage choisie doit permettre une bonne représentation de toute la région étudiée au moyen d'échantillons unitaires. Dans le cas de la détermination d'une étude thématique pour la constitution d'un fond géochimique, l'échantillonnage composite permet d'obtenir une bonne représentation de chaque zone échantillonnée.

Pour l'opération FGU, le prélèvement composite, tel qu'il a été défini, semble tout à fait indiqué. Toutefois, en cas de détection d'anomalie et de vérification sur site, des prélèvements faisant appel aux deux techniques seraient utiles.

9.5. CHOIX DE LA MÉTHODE ET DE LA PROFONDEUR DE PRÉLÈVEMENT

La prise en compte des contaminations dues aux retombées atmosphériques pour l'établissement d'un fond pédo-géochimique conduit naturellement à analyser les sols de surface. Le protocole du projet FGU prévoit des prélèvements entre 0 et 5 cm de profondeur. Le projet URGE préconise des prélèvements entre 0 et 10 cm (18). Même si ces choix semblent relativement proches, certains auteurs ont montré qu'une différence de quelques centimètres entre deux profondeurs de prélèvement peut provoquer d'importants effets de dilution (20), (21).

Ces considérations conduisent à plusieurs questions :

- **quelle est la meilleure profondeur de prélèvement à retenir pour la réalisation d'un fond pédo-géochimique urbain ? Quel est le comportement des substances provenant des dépôts atmosphériques ? Restent-ils en surface ?**
- **un fond pédo-géochimique urbain réalisé à partir d'échantillons prélevés en surface est-il une référence pertinente dans le cadre d'un diagnostic portant sur des sols profonds (quelques mètres) et *a fortiori* pour la gestion de terres excavées ?**
- **quel est l'effet d'une couverture végétale sur les dépôts atmosphériques ? Vaut-il mieux prélever sur une surface engazonnée ou sur une surface de terre nue ? En cas de prélèvement sur une surface enherbée, comment tenir compte de l'élimination du réseau racinaire sur la profondeur réelle du prélèvement ?**

La tarière à main de type Edelman semble la plus adaptée pour réaliser un échantillon en limitant les perturbations du sol et en autorisant le retrait d'une partie superficielle contenant des racines. Cependant, dans le cas de sols très sableux et secs, un prélèvement à la pelle de plantation peut s'avérer plus adapté. Jusqu'à présent, le projet FGU ne donne aucune consigne sur la méthode et l'outil à utiliser, postulant que les bureaux d'études réalisent les prélèvements des échantillons de sol dans les règles de l'art, adaptées aux contextes pédologiques rencontrés et à l'objectif de la mesure.

En outre, il faut signaler qu'il est apparu une discordance entre les méthodologies retenues par le projet FGU qui préconise des prélèvements de sols FGU entre 0 et 5 cm (selon les indications dans le texte de la convention I) et par le projet ETS qui donne lieu à des prélèvements de sols entre 0 et 30 cm dans les jardins potagers pédagogiques afin de prendre en compte un effet éventuel sur les « légumes racines ». Dans le cadre des diagnostics ETS il n'est pas cohérent de comparer les résultats de prélèvements effectués entre 0 et 30 cm dans les jardins pédagogiques au sein des établissements avec des prélèvements de sols FGU prélevés dans des espaces verts avoisinants entre 0 et 5 cm. Il en résulte une disparité entre les profondeurs des différents échantillons dont les analyses ont été bancarisées.

9.6. CHOIX DES SUBSTANCES À ANALYSER

Le pack analytique prévu dans le cadre du projet FGU comprend les principaux ETM et des molécules organiques connues pour leur persistance dans l'environnement. Outre des aspects budgétaires, ce choix exclut les molécules dégradables pour deux raisons :

- les prélèvements sont réalisés en surface dans des conditions peu favorables à leur conservation ;
- les substances recherchées doivent correspondre à une pollution diffuse chronique.

Toutefois, l'étude bibliographique conduite par M. Jarzabek (9) préconise de compléter la liste des substances analysées dans le cadre du projet FGU par le bismuth, le cobalt, l'antimoine et le vanadium dont la présence est principalement due à l'activité humaine.

Afin de vérifier l'opportunité d'ajouter ces substances, ou d'autres, au pack analytique du projet FGU, le BRGM (22) a entrepris une recherche rapide basée sur :

- la toxicité des métaux/métalloïdes ;
- la fréquence de leur apparition dans la matrice activités-polluants en cours de mise à jour par le BRGM (23) ;
- la fréquence de leur apparition rapportée dans l'ouvrage de Johnson *et al.* (10).

Plusieurs métaux/métalloïdes, candidats potentiels à l'ajout dans la liste des paramètres analysés dans les sols, font donc actuellement l'objet d'une réflexion, dont : antimoine, cobalt, étain, vanadium, molybdène, baryum et manganèse.

Par ailleurs, les travaux conduits par l'INRA montrent qu'il est pertinent de compléter les investigations sur les sols avec l'analyse du fer, du carbone organique total (COT) (notamment pour l'établissement de corrélations) et de la granulométrie.

9.7. MODALITÉS D'ANALYSE

9.7.1. Méthodes de préparation des échantillons

Le débat principal sur la méthode de préparation des échantillons porte sur le protocole de solubilisation des sols en vue de l'analyse des éléments traces. L'attaque par le mélange d'acides fluorhydrique/perchlorique est considéré comme totale vis-à-vis de la plupart des minéraux mais son usage est de plus en plus contraint pour des raisons de sécurité. La solubilisation par le mélange d'acides chlorhydrique/nitrique (eau régale) est désormais préféré et à l'étranger, la plupart des valeurs guides ont été déterminées en utilisant cette méthode (19).

L'usage de ces différentes méthodes donne lieu à une interrogation sur la validité de la comparaison ou de l'exploitation des résultats. En effet, pour une même teneur totale de substance, la nature des minéraux présents dans les sols et les méthodes employées, peuvent modifier sensiblement les valeurs obtenues par analyse. Duigou *et al.* (24) ont testé statistiquement les résultats des analyses réalisées selon les deux méthodes dans la même base de données, lors de la valorisation des données BDETM pour la région Centre. Les indicateurs statistiques aux mesures du plomb et du zinc par solubilisation à l'acide fluorhydrique ont été systématiquement plus élevés que ceux de la population contenant les échantillons solubilisés à l'eau régale. Par contre, il n'est pas apparu de différence pour le cadmium, le chrome, le cuivre et le nickel.

Il conviendra donc de conserver ces réserves en mémoire au moment de l'exploitation de résultats de la base de données FGU si elle est amenée à bancariser des résultats d'analyses obtenus selon des protocoles différents de ceux d'ETS.

Par ailleurs, il pourrait être pertinent de compléter les investigations par une série d'analyses après, d'une part une attaque totale et, d'autre part une lixiviation douce (19). Les informations recueillies permettraient de déterminer les proportions disponible et « mobile » de chaque ETM. Ainsi, dans le cadre du réseau RMQS, l'INRA procède à l'analyse des teneurs totales et extractibles (EDTA - Éthylène Diamine Tétra-Acétique) des ETM.

Dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires utilisée dans les problématiques de la gestion des sols (potentiellement) pollués, il conviendrait de déterminer si l'on se place :

- dans une démarche au cas par cas, en fonction des différents modes d'exposition (ingestion de sols, inhalation de sols, ingestion de légumes, ingestion d'eau, ...), nécessitant la détermination des teneurs disponibles dans chaque cas et impliquant les analyses dédiées selon divers mode de préparation des échantillons ;
- dans une démarche protectrice basée sur une exposition maximale, n'impliquant que la détermination de la teneur totale.

9.7.2. Choix des laboratoires

Entre 2010 et 2015, le projet ETS, et donc le projet FGU qui y est assujetti, ont fait appel à 9 bureaux d'études pour la réalisation des prélèvements et à 5 laboratoires pour l'analyse des échantillons. Il est évident que cette diversité des opérateurs et des méthodes d'analyse est préjudiciable à l'homogénéité et à la qualité des résultats du projet FGU.

De plus, pour une même analyse, les laboratoires n'emploient pas systématiquement les mêmes méthodes ce qui conduit à des disparités, pour les résultats et pour les limites de quantification associées. Ce point est particulièrement sensible pour les analyses de molécules organiques qui présentent des concentrations souvent proches ou inférieures aux limites de quantification.

Idéalement, il conviendrait de faire appel à un unique laboratoire proposant des protocoles de préparation et d'analyse standardisés et des limites de quantification adaptés aux molécules rencontrées (notamment dioxines et furanes). Outre ces travaux normatifs (ISO 19258), le BRGM anime un groupe de travail (GT Laboratoires) pour harmoniser les méthodes d'analyses de sols dans le contexte des sites (potentiellement) pollués.

9.7.3. Limites de quantification

La gestion des résultats inférieurs aux limites de quantification¹¹ donne lieu à diverses approches :

- valeurs ignorées ;
- substitution par 0 % ou 50 % ou 80 % ou 100 % de la limite de quantification ;
- traitement statistique spécifique.

¹¹ Une assimilation des limites de quantification et des limites de détection est souvent observée dans la littérature ce qui semble découler d'un abus de langage.

Ignorer les valeurs inférieures aux limites de quantification conduit d'une part à ne pas tenir compte d'échantillons qui correspondent pourtant à un résultat et d'autre part à limiter le nombre de résultats permettant une exploitation statistique.

La substitution permet de contourner ce problème et la pratique qui semble la plus courante à l'international (9) comme en France (24) est la substitution par 50 % de la limite de quantification. Une variante consiste à fournir une fourchette de résultats en calculant les valeurs après substitution par 0 et par 100 %. Cette méthode permet d'utiliser un nombre maximal de données. Quelques essais ont montré que les vibrisses supérieures sont peu sensibles au type de substitution.

Une autre approche pourrait consister à adopter systématiquement une attitude protectrice d'un point de vue sanitaire. La solution retenue pourrait alors découler d'un choix arbitraire tendant vers l'obtention des valeurs seuils les plus basses possibles.

La méthode de gestion des données inférieures aux limites de quantification par substitution par des valeurs fixes ou par des valeurs tirées aléatoirement présente l'inconvénient de biaiser la distribution de la population. De plus, elle atteint ses limites quand le nombre de valeurs concernées représente un taux important de la population. L'INRA (25) et l'université ETH de Zürich (Suisse) (26) par exemple, ont, mis en place des traitements statistiques avancés permettant de contourner cette situation. De telles méthodes n'ont pas été mise en œuvre pour les résultats FGU pour l'instant.

Selon les objectifs et les contextes, la réponse à la question de la gestion des valeurs inférieures aux limites de quantification pourrait être multiple. Il conviendrait toutefois de fixer un cadre argumenté à ces réponses.

9.8. INTERPRÉTATION ET TRAITEMENT STATISTIQUE DESCRIPTIF

L'interprétation des données recueillies lors des études de fond pédo-géochimiques passe par un traitement statistique descriptif. Si l'utilisation des boîtes à moustaches selon la méthode développée par Tukey en 1977 (8) pour représenter les résultats de façon synthétique semble faire l'unanimité, plusieurs interprétations sont possibles en fonction des choix suivants :

- faut-il supprimer les outliers identifiés au moyen des boîtes à moustaches et retraiter les valeurs restantes avant de fournir un résultat définitif ? Il semble que non si l'on ne dispose pas d'arguments justifiant ce retrait (exemple : erreur flagrante de protocoles de prélèvement ou d'analyse) ;
 - choix d'un indicateur pour la détermination d'un seuil au-delà duquel les valeurs diffèrent du fond pédo-géochimique. Il existe plusieurs méthodes dont huit identifiées ci-dessous :
1. Moyenne augmentée de deux fois l'écart-type. Cette méthode simpliste semble aujourd'hui obsolète (27) ;
 2. 95^{ème} centile. Cet indicateur correspond à la valeur au-dessous de laquelle se trouve 95 % de la population. Elle consiste à décider arbitrairement que 5 % de la population dépassent systématiquement le niveau du fond pédo-géochimique ce qui la rend discutable pour certains auteurs (27) ;
 3. Méthode graphique utilisant une tangente à la courbe des fréquences cumulées ;
 4. Méthode graphique dite de Lepeltier faisant appel à la distribution des fréquences cumulées des concentrations. La valeur de fond géochimique est fournie par l'intersection

d'une ligne représentant la distribution log-normale des concentrations avec la ligne représentant 50 % des fréquences cumulées (28) ;

5. Méthode graphique faisant appel aux dispersogrammes (29) ;
6. Méthode d'estimation du fond géochimique naturel des formations géologiques semi-automatique fondée sur la méthode de la droite de Henry et basée sur la méthode de Lepeltier (29) ;
7. La vibrisse supérieure interne. Elle est calculée en ajoutant au 75^{ème} centile (également appelé 3^{ème} quartile) 1,5 fois la valeur de l'écart interquartile. L'écart interquartile est la différence entre le 3^{ème} et le 1^{er} quartile (25^{ème} centile) ;

Vibrisse supérieure interne = 3^{ème} quartile + 1,5 X (3^{ème} quartile – 1^{er} quartile).

Cette méthode découle directement de l'usage des boîtes à moustaches et est souvent utilisée, notamment par l'INRA (8). Elle a été retenue dans le cadre du présent rapport.

8. Méthode MAD (Médian Absolute Deviation). Cette méthode est proposée par Rothwell et al. (30) consiste à ajouter deux fois la valeur MAD à la médiane. La valeur MAD correspond à une mesure de la dispersion de la population. Elle correspond à la médiane des différences absolues entre chaque valeur de la population et la médiane de cette dernière.

Seuil = Médiane + 2 x MAD

D'après les travaux de Rothwell *et al.*, cette méthode jugée statistiquement plus robuste, conduit à des valeurs très nettement plus faibles (d'un facteur 2 à 20) que celles obtenues avec la vibrisse supérieure.

Une fois encore selon les objectifs et les contextes, l'une ou l'autre de ces méthodes pourrait s'avérer plus pertinente que les autres. Il conviendra de fixer des règles d'usage argumentées sur des bases techniques, statistiques et scientifiques (et couplées à l'objectif de la politique nationale en matière de sites et sols pollués défini en France par la circulaire de février 2007).

9.9. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les résultats des mesures de fond pédo-géochimiques sont recherchés par les bureaux d'études et par les aménageurs et sont au cœur de plusieurs enjeux techniques et financiers.

De ce fait, il conviendrait de les diffuser en observant certaines précautions relatives :

- à leur validation et à leurs limites ;
- à la mise en forme des valeurs ;
- au mode d'emploi les accompagnants dans les différents contextes : diagnostic de pollution, objectif de réhabilitation, gestion de terres excavées,...

En effet, les premiers résultats présentés ici sont limités à 3 agglomérations et doivent faire l'objet de réserves suite à plusieurs limitations liées à leur représentativité :

- observations parfois douteuse des consignes de prélèvement et d'échantillonnage ;
- diversité des opérateurs et des méthodes sur le terrain et au laboratoire, d'où hétérogénéités des protocoles de prélèvement et d'analyse ;
- nombre important de valeurs inférieures aux limites de quantification pour certaines substances ;
- effectif des populations de résultats faible pour une interprétation statistique robuste ;
- protocole d'établissement des valeurs seuils pas encore normalisé.

Ces résultats doivent donc être complétés puis validés d'un point de vue technique avant leur exploitation. Au-delà de cet aspect, ils devront également être validés pour une bonne cohérence avec la méthodologie nationale de gestion des sites et sols (potentiellement) pollués mise en place par le Ministère en charge de l'environnement.

Cette réflexion doit s'accompagner de choix :

- sur le protocole de fourniture des résultats :
 - données calculées et fixées pour différentes agglomérations ou zone géographiques,
 - données calculées à la volée en fonction de la zone géographique (région, agglomération, quartier,...) déterminée par l'utilisateur (système TAPIR - Finnish national geochemical baseline database, mis en place par la Finlande (18; 31)) ;
- et sur leur mise en forme :
 - valeur(s) seuil(s),
 - fourchettes de valeurs,
 - boîtes à moustaches.

L'ensemble de la démarche de diffusion des résultats devra être complété par un mode d'emploi, des réserves et limites d'usage en accord avec les démarches de gestion des terres excavées et de diagnostic de la qualité des sols.

Ainsi, dans le cadre de ce dernier contexte, il est jusqu'à présent convenu que les résultats du projet FGU ne doivent pas être utilisés en lieu et place des analyses d'échantillons de sols exempts de tout impact local prélevés au voisinage des sites étudiés, mais servir à conforter celles-ci.

10. Communication

Le déroulement de la première convention ADEME-BRGM sur le fond pédo-géochimique urbain a été l'occasion de présenter le projet à plusieurs reprises.

10.1. GEOENV2014

La 10^{ème} conférence internationale de géostatistique appliquée à l'environnement (GéoENV 2014), organisée par le Centre de Géosciences de MINES Paris Tech, s'est déroulée du 9 au 11 juillet 2014 à Paris (France). La contamination des sols était l'un des thèmes abordés par la conférence et à ce titre, le BRGM a présenté un poster décrivant le projet « Fond Pédo-géochimique urbain » (Annexe 3).

Cette présentation a permis de faire connaître le projet aux acteurs des sites et sols pollués présents (bureaux d'études, sociétés spécialisées en géostatistiques appliquées à la gestion des sites et sols pollués, enseignants,...).

10.2. GÉOSCIENCES

Le numéro 18 de la revue Géosciences du BRGM parue en juillet 2014 (32) est consacré aux sols. Un article intitulé « Les sols dans la gestion des aménagements urbains » y présente les actions du BRGM pour l'acquisition de connaissances sur l'état des sols et l'intérêt de leur capitalisation pour l'aménagement et le redéploiement urbain. Cet article accorde un large encadré à la présentation du projet Fond Géochimique Urbain.

10.3. RENCONTRES NATIONALES 2014 DE LA RECHERCHE SUR LES SITES ET SOLS POLLUÉS

Les 3^{èmes} rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués étaient organisées par l'ADEME du 18 au 19 novembre 2014. Cet évènement a donné au BRGM l'opportunité de présenter le projet Fond Géochimique Urbain et quelques résultats obtenus au cours de la première convention (l'article associé à la présentation orale se trouve en Annexe 4). Il a également permis d'établir un premier contact avec des organismes travaillant sur la même thématique ou potentiellement fournisseur de données.

11. Perspectives

La convention II ADEME-BRGM (2014-2017) pour la réalisation de Fonds pédo-Géochimiques Urbains a été signée en septembre 2014. Elle prévoit essentiellement :

- la poursuite de l'action de bancarisation d'analyses de sols urbains jugés uniquement impactés par les retombées diffuses des activités anthropiques (dits « sols FGU »), entamée au cours de la convention I. Cette bancarisation s'appuie toujours sur le projet « Diagnostics de sols dans les lieux accueillant des enfants et des adolescents » entrepris par le BRGM pour le MEDDE (Projet « ETS ») ;
- la refonte de la base de données créée au cours de la convention I.

Les travaux de cette nouvelle convention pourront également comprendre l'approfondissement de l'étude bibliographique entreprise au cours du stage de Master en alternance de M. Jarzabek (Université Paris Sud-Orsay – Master Génie Géologique) et des propositions de pistes d'amélioration de la norme NF EN ISO19258 « Qualité du sol – Guide pour la détermination des valeurs de Fond pédogéochimique et anthropique ».

11.1. POURSUITE DE LA BANCARISATION DES DONNÉES « ETS »

Le projet FGU reste adossé au projet ETS tant d'un point de vue technique, pour le recueil des analyses elles-mêmes, que d'un point de vue logistique puisque :

- les cahiers des charges ETS intègrent le mode de fonctionnement des deux projets et les consignes de prélèvement FGU ;
- les commandes d'analyses passées aux laboratoires par le projet FGU sont fondées sur les tarifs négociés par le projet ETS dans le cadre de ses différents marchés.

Les résultats d'analyses provenant des visites et des diagnostics d'environ 1 500 établissements restent à recueillir. Ces établissements sont majoritairement localisés sur la ville de Paris (phase de diagnostics entamés), la petite couronne et le département Nord-Pas-de-Calais (la région Rhône-Alpes n'est pas encore concernée car une phase préalable de révision de l'inventaire BASIAS est en cours).

11.2. REFONTE DE LA BASE DE DONNÉES

Une refonte de la base de données développée au cours de la première convention ADEME-BRGM a été proposée pour :

- utiliser les codes Sandre (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau) ;
- recueillir des données provenant d'autres projets qu'ETS ;
- intégrer un protocole d'échange et de vérification des données entre les producteurs de données et le BRGM ;
- créer des requêtes permettant l'extraction et la valorisation des données.

11.2.1. Utilisation des codes Sandre

« Le Sandre a pour mission, d'établir et de mettre à disposition le référentiel des données sur l'eau du Système d'Information sur l'Eau (SIE). Ce référentiel, composé de spécifications techniques et de listes de codes libres d'utilisation, décrit les modalités d'échange des données sur l'eau à l'échelle de la France. D'un point de vue informatique, le Sandre garantit l'interopérabilité des systèmes d'information relatifs à l'eau » (Site www.sandre.eaufrance.fr).

Dans ce cadre le Sandre a développé plusieurs lexiques (Codes Sandre) qui permettent l'échange de données et notamment l'alimentation de la base de données sur les eaux souterraines ADES.

Plutôt que le projet FGU continue de développer ses propres lexiques, il a été proposé logiquement qu'il fasse appel aux codes Sandre. La nouvelle base de données fera donc appel à ces codes pour identifier les intervenants (opérateurs), les paramètres (substances analysées), le lieu où sont effectuées les analyses, les méthodes d'analyse, les remarques sur les résultats d'analyses (notamment leur statut par rapport aux LQ) et le lexique des unités de résultat.

11.2.2. Recueil de données provenant de projets d'aménagement urbains – Cohérence avec la gestion des terres excavées

La refonte de la base de données doit permettre son enrichissement par des analyses provenant d'autres projets qu'ETS. Bien sûr, elle recueillera d'avantage d'analyses de sols de surface prélevés :

- dans des espaces verts, pour la détermination de fonds pédo-géochimiques selon le protocole établi par la convention I, échantillons SLU dits « FGU » ;
- au droit d'anciens sites industriels, pour améliorer la connaissance de la qualité des sols urbains, échantillons SLE.

Mais cette refonte de la structure de la base de données aidera aussi à mieux répondre à la problématique des terres excavées en collectant également des analyses de sols à diverses profondeurs prélevés dans le cadre de projets d'aménagement urbains. Cette collecte est envisagée dans le cadre de partenariats entre le BRGM et des collectivités dont certains sont déjà engagés : Marseille (EUROMED) et Nancy (EPFL).

En effet, de plus en plus d'aménageurs urbains émettent le besoin de mieux connaître leur territoire. La bancarisation des données qu'ils produisent au cours de leurs études des sols urbains et l'acquisition des données de fond pédo-géochimique urbain leur permettraient :

- d'opérer une reconquête raisonnée des quartiers anciens et/ou des friches industrielles ;
- de mieux gérer les terres excavées ;
- d'améliorer la gestion des sites et sols (potentiellement) pollués.

Cette évolution entraîne la bancarisation de nombreuses nouvelles métadonnées pour identifier et définir le site fournisseur, le sondage, la profondeur, les niveaux rencontrés, les matériaux rencontrés et leur granulométrie.

Dans le cadre de ces projets, le BRGM propose(ra) des protocoles harmonisés de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons basés sur l'état de l'art et notamment sur les résultats du projet URGE et des Groupes de Travail « Laboratoire » et « Fond pédo-géochimique et anthropique ». Toutefois, il ne pourra les imposer à l'ensemble des projets. C'est pourquoi la refonte de la base de données prévoit également la possibilité de renseigner des champs de métadonnées pour ces paramètres.

Enfin, la base sera construite de façon à assurer une cohérence avec la base de données ADES (banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), la Banque de données du Sous-Sol (BSS) pour permettre une exploitation 3D des données au moyen du logiciel GDM (Suite logicielle BRGM utilisée pour la représentation et la modélisation de données géologique).

11.2.3. Moyens informatiques

Pendant la première convention ADEME-BRGM, la base de données a été développée sous Access-Oracle. Les données seront transférées sous une nouvelle base développée sous le système de base de données PostgreSQL.

Cette base sera alimentée via une interface web dédiée sur laquelle seront déposés par les producteurs (bureaux d'études en particulier), les résultats d'analyse et les métadonnées grâce à un nouveau fichier Excel standardisé. Ce protocole permettra une vérification automatisée de la validité d'une partie des données soumises par les producteurs. En cas d'invalidité des données (exemples : fichier incomplet ou coordonnées du point de prélèvement renseignées dans un référentiel différent de celui attendu) le système demandera automatiquement au producteur de vérifier ou de corriger son fichier.

En outre le site internet dédié diffusera les consignes de prélèvement, les modèles de fichiers, les modes opératoires et d'une façon générale les informations relatives au projet et à la thématique « Fond pédo-géochimique et anthropique urbain ».

12. Conclusions

La première convention ADEME-BRGM pour l'établissement de fonds pédo-géochimiques et anthropiques urbains (Projet FGU - 2010-214) a permis la création d'une base de données et la bancarisation de plus de 45 000 données. Il s'agit des résultats d'analyses d'échantillons de sols urbains prélevés dans des espaces verts jugés exempts de toute pollution directe (457 échantillons), et au dans l'enceinte d'établissements scolaires située au droit ou en contiguïté d'anciens sites industriels (BASIAS) (535 échantillons) dans le cadre du projet « Établissements sensibles ».

Le projet FGU se trouve toutefois limité par le cadre même du contexte de cette association, notamment du fait :

- des difficultés pour communiquer et faire respecter les consignes de prélèvement ;
- de la pluralité des opérateurs sur le terrain et des laboratoires ;
- de la pluralité des limites de quantification employées ;
- du nombre insuffisant de données recueillies par agglomération.

De plus, les données exploitables concernent surtout les métaux et métalloïdes, car les substances organiques ne sont pas quantifiables dans un grand nombre de cas.

Sous réserve de ces limites, les résultats ont pu être exploités statistiquement pour trois agglomérations et à titre comparatif pour l'ensemble du territoire. Les valeurs sont fournies à titre indicatif et ne peuvent refléter la multiplicité des contextes géologiques, pédologiques, climatiques et historiques des agglomérations rencontrées sur les territoires concernés.

Des corrélations entre substances ont été mises en évidence. Enfin, malgré des modes d'obtention parfois différents, les résultats ont été confrontés, à titre indicatif, aux valeurs de la base de données BDETM et aux valeurs anormales fournies par le réseau RMQS.

Ces premiers résultats mettent en évidence :

- un important potentiel de variation des valeurs de concentration d'une agglomération à une autre, ainsi qu'au sein d'une même agglomération, ce qui a déjà été relevé dans la littérature ;
- diverses signatures pédo-géochimiques pour une même série de substances et des corrélations différents d'une zone géographique à une autre. Cette observation tend à confirmer l'existence d'un fond pédo-géochimique et anthropique spécifique à chaque agglomération. Une corrélation forte entre chrome et nickel est observé à l'échelle nationale mais pas systématiquement à l'échelle des agglomérations ;
- des différences positives ou négatives marquées, et sensiblement identiques d'une agglomération à une autre pour des ETM donnés, entre les valeurs obtenues en milieu rural et en milieu urbain. Ainsi les valeurs seuils anormales RMQS sont plus élevées dans les agglomérations étudiées que dans le milieu rural proche, systématiquement pour le plomb et localement pour le zinc. Ces différences mettent en évidence une influence importante des retombées diffuses liées aux activités anthropiques urbaines locales (notamment au trafic routier) pour ces substances.

Les confrontations entre les vibrisses supérieures FGU et les vibrisses supérieures de la base de données ETM montrent également l'existence de concentrations plus élevées en agglomération qu'en milieu rural pour le mercure.

Enfin, les valeurs seuils anormales RMQS et BDETM semblent plus faibles dans les agglomérations étudiées que dans le milieu rural environnant, pour le chrome et le nickel. Cette observation suggère un effet lié :

- à des pratiques agricoles et/ou urbaines (terres rapportées),
- à la nature des formations géologiques,
- et, plus probablement, à une moindre solubilisation de ces métaux par l'eau régale (utilisée dans le cadre du projet FGU) que par le mélange d'acides fluorhydrique/perchloriques (principalement utilisé par l'INRA).

Les résultats obtenus pour les substances organiques présentent souvent un nombre majoritaire de valeurs inférieures aux limites de quantification ce qui les rend peu exploitables. Les résultats sont toutefois présentés pour les 16 HAP, et plus particulièrement le benzo(a)pyrène et, en l'absence de données suffisantes pour les agglomérations considérées, à l'échelle du territoire national, pour les dioxines et les furanes.

Malgré un certain nombre de limites à leur traitement, les données recueillies au cours de cette convention constituent un premier état des lieux de la qualité des sols urbains représentatifs de l'activité anthropique diffuse en France.

La base de données BdSolU doit fournir des valeurs utiles pour la gestion des sols pollués par les bureaux d'études dans chaque agglomération française. Cependant son modèle de fonctionnement actuel ne permettra pas d'atteindre cet objectif à court terme. Pour cela, la base devrait impérativement être complétée par les analyses issues du projet ETS, mais surtout de nombreuses analyses provenant d'autres projets. La collecte et l'analyse de nombreux échantillons complémentaires par le projet FGU lui-même devraient aussi être envisagées. Il conviendra d'effectuer ces tâches en :

- assurant une plus grande production d'échantillons ;
- faisant appel à des protocoles harmonisés ;
- garantissant de meilleures conditions de qualité.

Cette base permet également la bancarisation de données issues de l'analyse de sols prélevés sur d'anciens sites industriels pour acquérir une meilleure connaissance de la qualité des sols urbains. Elle pourrait ainsi contribuer à répondre au besoin croissant des collectivités de réaliser des projets d'aménagement urbains intégrant la reconquête de friches (notamment dans le cadre de la révision du Guide de gestion des terres excavées et la mise en place de référentiels à différentes échelles géographiques). Là encore, le nombre et la qualité des données collectées seront décisifs. Des collaborations entre le BRGM et plusieurs collectivités sont d'ores et déjà en cours pour assurer cette tâche.

Dans cet objectif, la base de données FGU, qui sera rebaptisée, base de données des analyses de sols urbains (BDSolU) doit faire l'objet d'une refonte complète afin d'intégrer de multiples métadonnées (notamment concernant la profondeur de prélèvement et les matériaux rencontrés) et de faire appel aux codes Sandre.

Les différentes catégories de données devront être distinguées, traitées et interprétées en fonction des contextes et des objectifs :

- détermination de fonds pédo-géochimiques et anthropiques urbains ;
- gestion sanitaire de l'exposition des populations aux sols ;
- diagnostic de pollution ;
- détermination de seuils de dépollution (selon la méthodologie nationale, en fonction des risques sanitaires et des usages);
- gestion des terres excavées.

Leur diffusion devra être accompagnée de réserves d'utilisation.

La réalisation de ces tâches nécessitera d'apporter des réponses argumentées et adaptées aux questions qui se posent à chaque étape de la collectes des données, de leur traitement et de leur diffusion.

13. Bibliographie

1. MEDDE. Bases de données relatives à la qualité des sols : contenu et utilisation dans le cadre de la gestion des sols pollués. [En ligne] Avril 2008. [Citation : 23 Juin 2015.] www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id_article=19946.
2. —. Deux démarches distinctes de gestion des sites pollués. *Site internet du MEDDE*. [En ligne] 2007. www.developpement-durable.gouv.fr/Deux-demarches-bien-distinctes.html.
3. —. Note du 8 février 2007. *Site internet du MEDDE*. [En ligne] 2007. www.developpement-durable.gouv.fr/Note-du-8-fevrier-2007-Sites-et.html.
4. BLANC, Céline. Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement. *Site du Ministère du Développement durable*. [En ligne] 2012. www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id_article=27486.
5. COUSSY, S. *Guide de caractérisation des terres excavées dans le cadre de leur réutilisation hors site en technique routière et dans les projets de réaménagement*. s.l. : BRGM, 2013. BRGM/RP-62856-FR.
6. MEDDE. Opération nationale "Diagnostic des sols dans les lieux accueillant des enfants et des adolescents". *Site internet du MEDDE*. [En ligne] 2010. www.developpement-durable.gouv.fr/Diagnostiquer-les-lieux.html.
7. —. Circulaire du 4 mai 2010 - Diagnostics des sols dans les lieux accueillant les enfants et les adolescents. *Site internet du MEDDE*. [En ligne] 2010. www.developpement-durable.gouv.fr/Circulaire-du-4-mai-2010.html.
8. BAIZE, Denis. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. s.l. : INRA, 1997.
9. JARZABEK, Maxime. *Rapport bibliographique : retour d'expérience sur les fonds pédogéochimiques de sols urbains – Pratiques à l'étranger*. s.l. : BRGM, 2014.
10. JOHNSON, Christopher C., et al., et al. *Mapping the chemical environment of urban areas*. s.l. : Wiley, 2011. ISBN : 978-0-470-74724-7.
11. BGR. Description du projet URGE. *Site internet de l'Institut Fédéral pour les Géosciences et les Ressources Naturelles Allemand (BGR)*. [En ligne] 2015. [Citation : 10 03 2015.] www.bgr.bund.de/EN/Themen/GG_Geochem_anorg/Projekte/_laufend/URGE_Urbane_Geochemie_Europa/URGE_Urbane_Geochemie_Europa_en.html.
12. GSI. Site internet du Geological Survey of Ireland. [En ligne] 2015. [Citation : 10 03 2015.] www.gsi.ie/Surge.htm.
13. FORDYCE, Fiona. *Communication personnelle*. [interv.] Maxime JARZABEK. 30 09 2014.
14. *GSUE: Urban Geochemical mapping in Great Britain*. FORDYCE, F. M. et al. 2005, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, pp. pp. 325-336.
15. *Teneurs totales en " métaux lourds " dans les sols français - Résultats généraux du programme ASPITET*. BAIZE, Denis. 39, s.l. : INRA, 2000, Vol. Le courrier de l'environnement. Février 2000.
16. INRA. *L'état des sols de France*. s.l. : INRA, 2011.
17. BAIZE, D., SABY, N. et DESLAIS, W. *Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles de France*. s.l. : ADEME - INRA - GISSOL, 2007.
18. TARVAINEN, Timo. *Communication personnelle*. [interv.] Maxime JARZABEK. 22 09 2014.
19. DEMETRIADES, Alecos. *Communication personnelle*. [interv.] JARZABEK Maxime. 09 29, 2014.

20. *A soil sampling strategy for mapping trace elements concentration in a test area.* SASTRE J., VIDAL M., RAURET G., SAURAS T. 1-2, pages 141-152, s.l. : Elsevier - Science of The Total Environment, 2001, Vol. 264.
21. *Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles.* LUO X-S., XUE Y., WANG Y-L., CANG L., XU B., DING J. May 2015, Pages 152-157, s.l. : Elsevier - Chemosphere, 2015, Vol. 127.
22. BALON, P. *Ingénieur Sites et sols pollués.* juin 2015.
23. AUBERT N., KOCH-MATHIAN J.Y., BARATON A. *Elaboration d'une base de données Activités et polluants potentiels. Rapport final.* s.l. : BRGM, 2014. BRGM/RP-64125-FR.
24. *Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Eléments Traces Métalliques. Cas de la région Centre.* DUIGOU N, BAIZE D, BISPO A. 2 - pages 91 à 108, Etude et Gestion des Sols : s.n., Avril 2011, Vol. 18.
25. SABY, N. - INRA Orléans. *Ingénieur INRA.* Juillet 2015.
26. DEMOUGEOT-RENARD, H. - ETH Zürich. *Ingénieur ENSG Nancy.* Juillet 2015.
27. *Background and threshold: critical comparison of method of determination.* REIMAN C., FILZMOSE P., GARRETT R.G. Page 1-16, s.l. : Elsevier - Science of Total Environment, 2005, Vol. 346.
28. LEPELTIER, Claude. *A Simplified Statistical Treatment of Geochemical data by graphical Representation.* *Economic Geology.* 1969, Vol. 64, Page 538-550.
29. CARY, L et LEYNET, A. *Proposition de valeurs du fond géochimique naturel des sols à partir des données de l'Inventaire Minier National.* s.l. : BRGM, 2011. BRGM/RP-60300-FR.
30. ROTHWELL Katherine A., COOKE Martin P. *A comparison of methods used to calculate normal background concentrations of potentially toxic elements for urban soil.* *Science of Total Environment.* 2015, Vol. 532, 625-634.
31. *TAPIR — Finnish national geochemical baseline database.* JARVAA J., TARVAINENA T., REINIKAINEN J., EKLUNDA M. 20, s.l. : Elsevier - Science of The Total Environment, 15 septembre 2010 2010, Vol. 408. Page 4385-4395.
32. BLANC, C et VANOUHUSDEN, E. *Les sols dans la gestion des aménagements urbains.* *Géosciences.* 2014, pp. 40-47.
33. BRUNET, Jean-François. *Établissement d'un fond pédo-géochimique urbain et industriel en parallèle à l'Opération ETS du Ministère du Développement durable.* s.l. : BRGM, 2012.
34. *TAPIR — Finnish national geochemical baseline database.* JARVAA J., TARVAINENA T., REINIKAINEN J., EKLUNDA M. 20, s.l. : Elsevier - Science of The Total Environment, 15 septembre 2010 2010, Vol. 408. Page 4385-4395.
35. BAIZE, Denis. *Communication personnelle.* 2015.

Annexe 1

Logigramme de sélection entre échantillons SLU prélevés en phase 1 et 2 de l'opération ETS

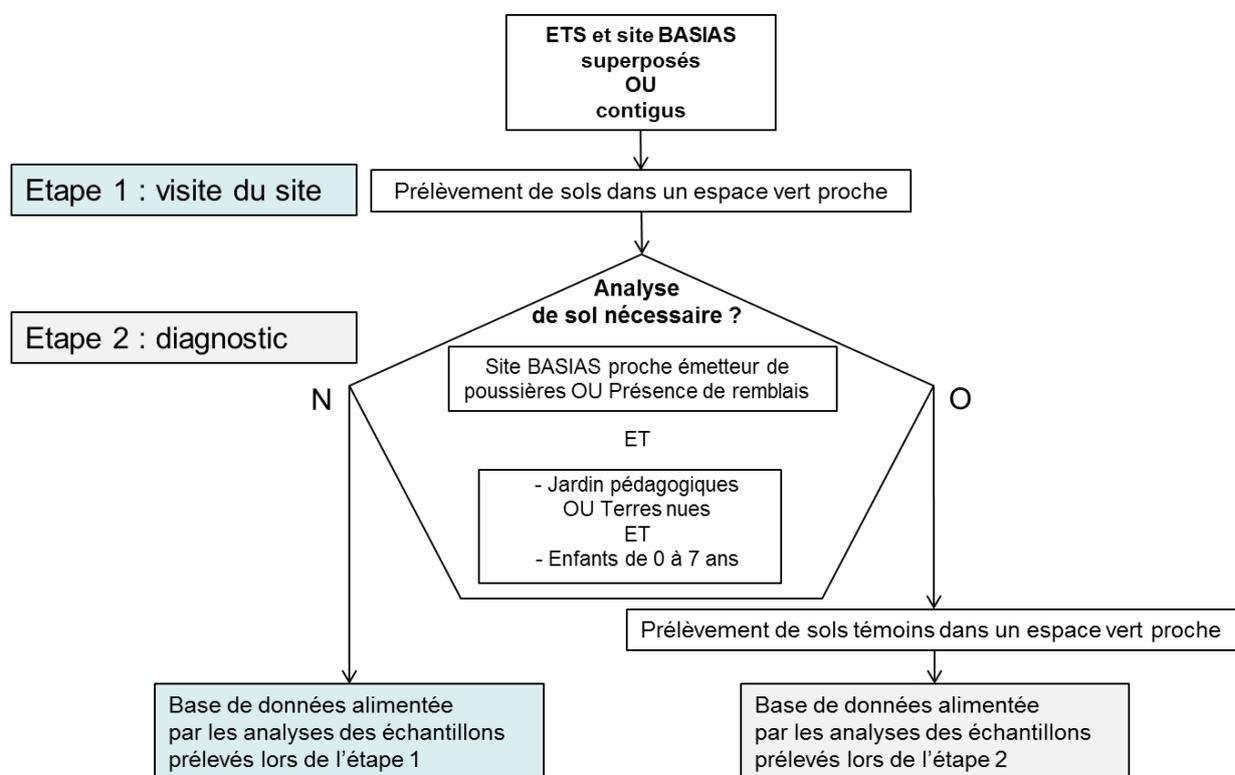


Figure 1 : Les échantillon de sols prélevés en dehors du site lors de l'étape 1 du diagnostic de l'opération ETS sont analysés quand l'étape 2 ne donne pas lieu à des analyses de sols.

Annexe 2

Tableaux récapitulatifs des résultats pour l'ensemble des substances considérées

mg/kg	Zone géographique	As	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni	Cd	Hg
Nombre de valeurs	Agglomération A	30	30	30	30	30	30	30	30
	Agglomération B	49	49	49	49	49	49	49	49
	Agglomération C	28	28	28	28	28	28	28	28
	France	425	426	425	425	425	425	426	426
Valeur de LQ minimale	Agglomération A	1,0	0,2	0,2	0,5	1,0	0,50	0,05	0,025
	Agglomération B	1,0	0,2	0,2	0,5	1,0	0,50	0,05	0,025
	Agglomération C	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	0,25	0,05	0,026
	France	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	0,25	0,05	0,025
Valeur de LQ maximale	Agglomération A	15	5	10	10	20	3	0,5	0,1
	Agglomération B	4	5	10	10	20	3	0,5	0,1
	Agglomération C	2	1	1	10	5	1	0,5	0,1
	France	15	10	15	13	20	3	1,0	0,1
Nombre de valeurs < LQ	Agglomération A	3 – 10 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	9 – 30 %	0 – 0 %
	Agglomération B	3 – 6 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	25 – 51 %	12 – 24 %
	Agglomération C	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	0 – 0 %	13 – 46 %	2 – 7 %
	France	8 – 2 %	0 – 0 %	3 – 0,7 %	2 – 0,5 %	0 – 0 %	0 – 0 %	154 – 36 %	80 – 19 %
Valeur minimum	Agglomération A	3,50	10,20	11,7	15,3	40,3	9,20	0,05	0,097
	Agglomération B	0,50	7,50	11,5	12,0	32,0	9,00	0,05	0,025
	Agglomération C	1,53	2,55	3,6	8,7	11,2	2,04	0,05	0,013
	France	0,05	2,55	3,6	5,0	11,2	2,04	0,05	0,013
Valeur maximum	Agglomération A	21,0	90	30	288,1	772	20	1,37	1,7
	Agglomération B	18,4	95	43	270,0	360	28	0,90	2,7
	Agglomération C	17,0	100	46	410,0	330	20	0,60	1,2
	France	141,9	190	111,3	720,0	2600	66	3,63	28,0
1er quartile	Agglomération A	6,50	25,125	14,85	55,7	77,5	12,475	0,113	0,233
	Agglomération B	12,00	24,000	15,00	33,0	75,0	12,000	0,100	0,060
	Agglomération C	8,25	21,500	16,75	54,0	77,5	11,000	0,218	0,200
	France	6,43	18,000	16,00	33,0	68,0	11,000	0,120	0,060
Médiane	Agglomération A	7,10	37,20	17,05	99,5	140	13,85	0,41	0,387
	Agglomération B	12,00	33,00	21,00	43,0	96	18,70	0,20	0,150
	Agglomération C	8,25	31,00	19,50	74,0	125	14,50	0,25	0,350
	France	9,20	27,00	21,80	52,0	92	16,00	0,25	0,150
3e quartile	Agglomération A	9,50	59,175	1	177,85	218,625	16,00	0,653	0,778
	Agglomération B	14,00	42,000	27	80,00	120,000	22,00	0,260	0,320
	Agglomération C	9,25	45,000	25	112,50	160,000	17,25	0,370	0,700
	France	14,70	43,000	28	91,00	140,000	20,00	0,368	0,300
Moyenne	Agglomération A	8,450	42,730	17,440	115,057	176,870	14,173	0,433	0,574
	Agglomération B	11,051	36,090	21,451	68,780	102,914	17,954	0,231	0,281
	Agglomération C	8,255	35,234	20,843	96,596	129,329	14,101	0,295	0,451
	France	12,467	35,133	23,680	79,749	124,918	16,685	0,324	0,358
Ecart type	Agglomération A	4,047	20,402	14,772	74,914	144,153	2,482	0,345	0,456
	Agglomération B	4,450	18,484	45,517	59,441	49,876	5,490	0,176	0,426
	Agglomération C	2,846	19,303	64,558	76,177	71,580	4,523	0,15	0,329
	France	12,628	26,444	11,883	86,977	153,223	8,170	0,394	1,478
Vibrise supérieure interne	Agglomération A	11	90	23	288	360	20	1,37	1,32
	Agglomération B	18	63	43	140	170	28	0,45	0,70
	Agglomération C	12	67	33	170	210	20	0,52	1,20
	France	26	79	46	171	240	33	0,73	0,65

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux résultats pour les métaux/métalloïdes.

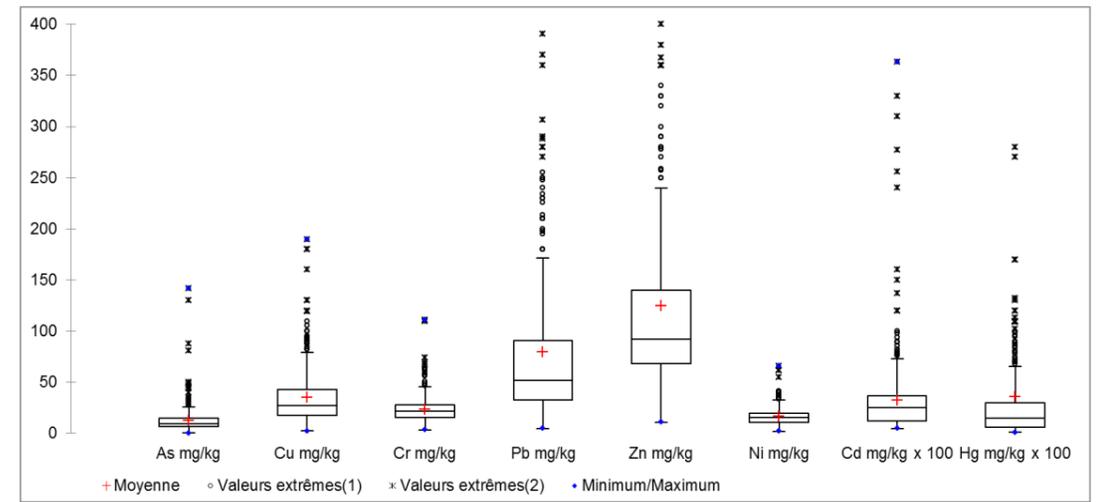


Figure 1. Résultats obtenus pour les ETM sur l'ensemble des agglomérations étudiées en France.

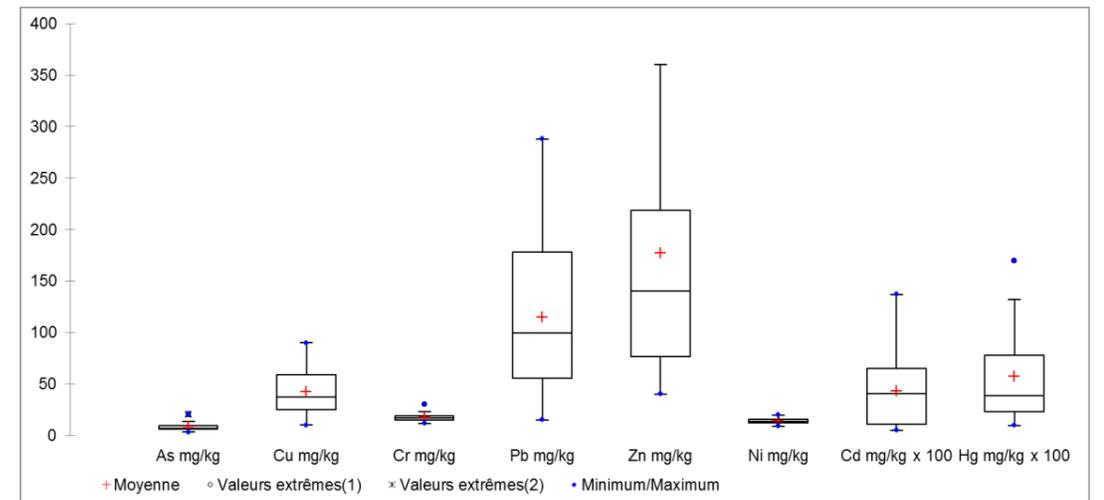


Figure 2. Résultats obtenus pour les ETM sur l'agglomération A.

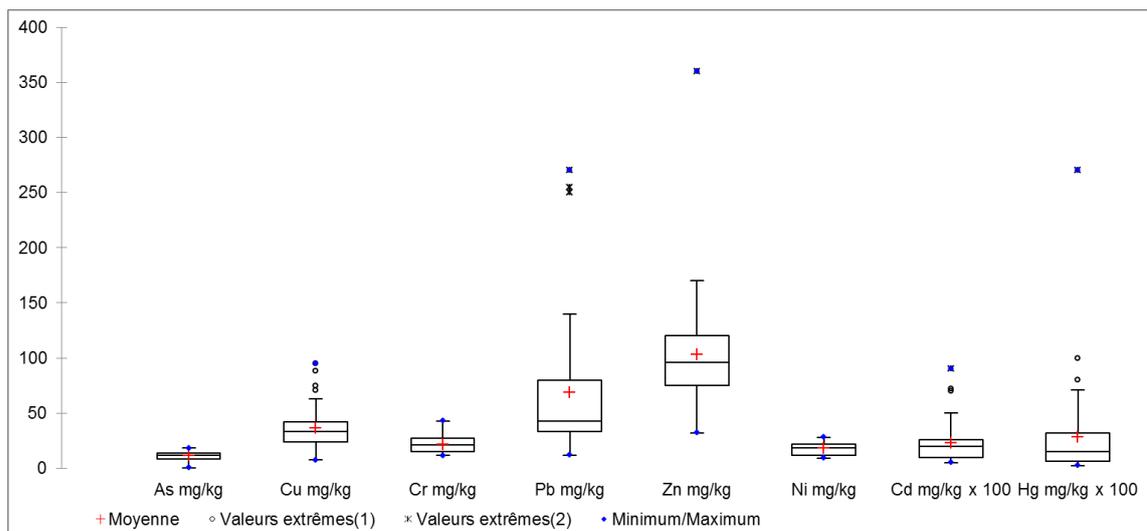


Figure 3 : Résultats obtenus pour les ETM sur l'agglomération B.

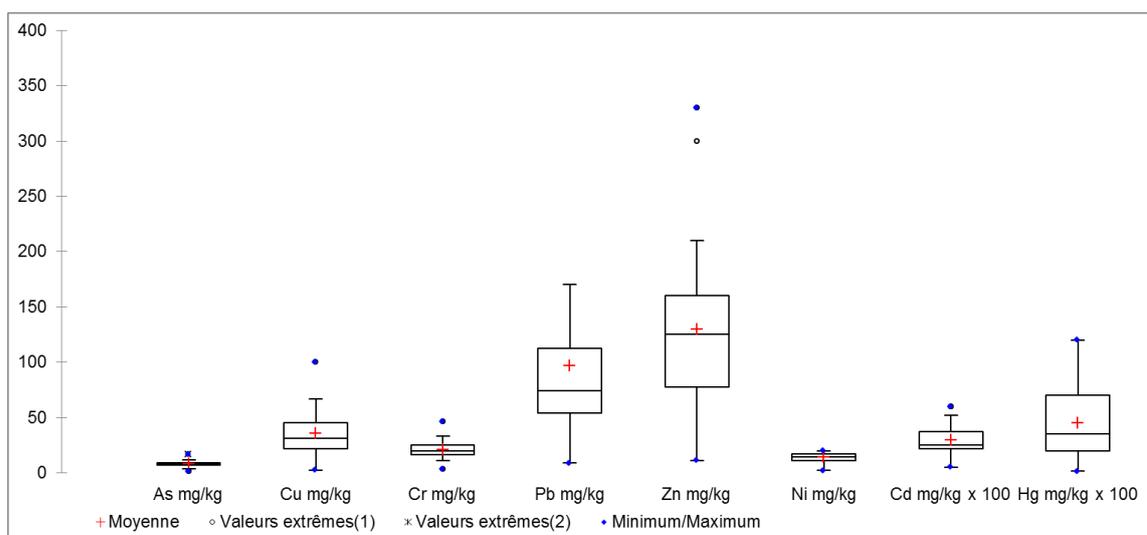


Figure 4 : Résultats obtenus pour les ETM sur l'agglomération C.

mg/kg	Zone géographique	CN	Indice phénol
Nombre de valeurs	Agglomération A	30	25
	Agglomération B	49	37
	Agglomération C	28	28
	France	423	364
Valeur de LQ minimale	Agglomération A	0,1	0,1
	Agglomération B	0,1	0,1
	Agglomération C	0,1	0,1
	France	0,1	0,1
Valeur de LQ maximale	Agglomération A	1	0,5
	Agglomération B	1	0,6
	Agglomération C	1	0,6
	France	1	0,7
Nombre de valeurs < LQ	Agglomération A	20 – 67 %	22 – 88 %
	Agglomération B	29 – 59 %	36 – 97 %
	Agglomération C	13 – 46 %	26 – 93 %
	France	285 – 67 %	338 – 93 %
Valeur minimum	Agglomération A	0,05	0,05
	Agglomération B	0,05	0,05
	Agglomération C	0,05	0,05
	France	0,05	0,05
Valeur maximum	Agglomération A	2,4	2,00
	Agglomération B	3,8	0,30
	Agglomération C	2,5	0,36
	France	9,2	75,00

Tableau 2 : Récapitulatif des principaux résultats pour les cyanures et l'indice phénol.
(Les centiles et les vibrisses n'ont pas été calculés en raison du nombre important de valeurs inférieures à la LQ ou du nombre insuffisant de données).

mg/kg	Zone	PCBi n° 28	PCBi n° 52	PCBi n° 101	PCBi n° 118	PCBi n° 138	PCBi n° 153	PCBi n° 180
Nombre de valeurs	A	30	30	30	30	30	30	30
	B	49	49	49	49	49	49	49
	C	28	28	28	28	28	28	28
	France	426	426	426	426	426	426	426
Valeur de LQ mini.	A	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	B	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	C	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	France	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Valeur de LQ maxi.	A	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	C	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	France	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Nombre de valeurs < LQ	A	30 – 100 %	30 – 100 %	25 – 83 %	22 – 73 %	21 – 70 %	21 – 70 %	21 – 70 %
	B	47 – 96 %	47 – 96 %	47 – 96 %	43 – 88 %	38 – 78 %	38 – 78 %	41 – 84 %
	C	28 – 100 %	28 – 100 %	28 – 100 %	26 – 93 %	23 – 82 %	26 – 93 %	26 – 93 %
	France	423 – 99 %	412 – 97 %	402 – 94 %	389 – 91 %	354 – 83 %	356 – 84 %	378 – 89 %
Valeur mini.	A	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,001
	B	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	C	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	France	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Valeur maxi.	A	0,010	0,010	0,010	0,010	0,016	0,015	0,010
	B	0,010	0,016	0,036	0,042	0,034	0,025	0,012
	C	0,010	0,010	0,010	0,010	0,011	0,010	0,010
	France	0,015	0,037	0,110	0,110	0,110	0,074	0,034

Tableau 3 : Récapitulatif des principaux résultats pour les PCB indicateurs.
(Les centiles et les vibrisses n'ont pas été calculés en raison du nombre important de valeurs inférieures à la LQ ou du nombre insuffisant de données).

mg/kg	Zone	Naphtalène	Acé-naphtène	Acé-naphtylène	Anthracène	Phén-anthrène	Fluorène	Chrysène	Benzo-anthracène	Fluor-anthène	Pyrène	Benzo(k)fluoranthène	Benzo(a)pyrène	Benzo(b)fluoranthène	Dibenzo(a,h)anthracène	Benzo(g,h,i)pérylène	Indéno (1,2,3-c,d)pyrène
Nbre de valeurs	A	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	B	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
	C	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	France	426	426	426	426	426	426	426	426	426	426	426	427	427	426	427	426
Valeur de LQ mini.	A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	France	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Valeur de LQ maxi.	A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	B	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,5	0,15	0,15
	France	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	1,3	0,15	0,15
Nbre de valeurs < LQ	A	26 – 87 %	26 – 87 %	24 – 80 %	21 – 70 %	9 – 30 %	26 – 87 %	7 – 23 %	10 – 33 %	3 – 10 %	3 – 10 %	14 – 47 %	7 – 23 %	5 – 17 %	23 – 77 %	7 – 23 %	7 – 23 %
	B	46 – 94 %	48 – 98 %	47 – 96 %	42 – 86 %	29 – 59 %	48 – 98 %	49 – 100 %	26 – 53 %	20 – 41 %	23 – 47 %	31 – 63 %	26 – 53 %	23 – 47 %	48 – 98 %	26 – 53 %	27 – 55 %
	C	23 – 82 %	23 – 82 %	14 – 50 %	12 – 43 %	3 – 11 %	19 – 68 %	2 – 7 %	4 – 14 %	2 – 7 %	16 – 57 %	4 – 14 %	4 – 14 %	3 – 11 %	24 – 86 %	3 – 11 %	2 – 7 %
	France	377 – 88 %	382 – 90 %	341 – 80 %	315 – 74 %	156 – 37 %	368 – 86 %	113 – 27 %	143 – 34 %	69 – 16 %	90 – 21 %	177 – 42 %	123 – 29 %	104 – 24 %	357 – 84 %	119 – 28 %	119 – 28 %
Valeur mini.	A	0,005	0,005	0,01	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01	0,025	0,02	0,01	0,025	0,025	0,01	0,025	0,02
	B	0,005	0,005	0,005	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,001	0,01
	C	0,005	0,005	0,005	0,005	0,013	0,005	0,025	0,025	0,025	0,025	0,13	0,025	0,025	0,005	0,025	0,013
	France	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01	0,005	0,01
Valeur maxi.	A	0,410	0,740	0,470	0,151	0,820	0,750	1,180	0,656	1,717	1,811	0,398	0,901	0,711	0,820	0,637	0,870
	B	0,075	0,100	0,075	0,090	0,289	0,010	0,390	0,400	0,640	0,540	0,230	0,490	0,490	0,180	0,310	0,360
	C	0,025	0,320	0,280	1,100	4,100	0,250	3,900	4,400	11,000	8,900	2,400	4,500	5,300	0,360	2,900	4,200
	France	1,600	3,000	31,000	2,100	16,000	12,000	10,000	11,000	33,000	29,000	6,400	15,000	13,000	4,400	7,800	10,000

Tableau 4 :Récapitulatif des principaux résultats pour les 16 HAP US-EPA. (Les centiles et les vibrisses n'ont pas été calculés en raison du nombre important de valeurs inférieures à la LQ ou du nombre insuffisant de données).

ng/kg	Zone	2,3,7,8-TCDD	1,2,3,7,8-PeCDD	1,2,3,4,7,8-HxCDD	1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,2,3,7,8,9-HxCDD	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	OCDD	2,3,7,8-TCDF	1,2,3,7,8-PeCDF	2,3,4,7,8-PeCDF	1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,2,3,7,8,9-HxCDF	2,3,4,6,7,8-HxCDF	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	OCDF
Nbre de valeurs	A	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	B	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	C	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	France	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
Valeur de LQ mini.	A	0,47	0,01	0,5	0,51	0,5	0,7	1	0,5	0,51	0,55	0,56	0,54	0,49	0,5	1,1	0,78	1,1
	B	0,3	0,29	0,31	0,42	0,34	0,5	0,01	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,39	0,34	0,65	0,57	0,78
	C	0,5	1	1	1	1	5	0,01	0,5	1	1	1	1	1	1	5	5	10
	France	0,18	0,01	0,28	0,29	0,29	0,45	0,01	0,3	0,27	0,25	0,29	0,31	0,3	0,3	0,38	0,37	0,73
Valeur de LQ maxi.	A	1	1	2,1	2,4	2,4	7,5	25	1,7	1,8	1,7	1,5	1,5	1,7	1,5	7,5	7,5	25
	B	1,2	1	1,5	2,2	1,7	7,5	25	2	1,3	1,5	1,9	1,8	1,5	1,85	7,5	7,5	25
	C	1	1	1,5	1,5	1,5	7,5	25	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	7,5	7,5	25
	France	2	2	2,1	3,7	2,4	7,5	25	2,7	2	2	2	2	2,1	2	7,5	7,5	25
Nbre de valeurs < LQ	A	12 – 100 %	9 – 75 %	11 – 92 %	5 – 42 %	5 – 42 %	0 – 0 %	0 – 0 %	4 – 33 %	5 – 42 %	4 – 33 %	3 – 25 %	3 – 25 %	10 – 83 %	4 – 33 %	1 – 8 %	12 – 100 %	2 – 17 %
	B	20 – 100 %	19 – 95 %	19 – 95 %	12 – 60 %	14 – 70 %	0 – 0 %	0 – 0 %	9 – 45 %	13 – 65 %	11 – 55 %	9 – 45 %	11 – 55 %	19 – 95 %	10 – 50 %	7 – 35 %	20 – 100 %	12 – 60 %
	C	15 – 100 %	11 – 73 %	13 – 87 %	5 – 33 %	8 – 53 %	0 – 0 %	1 – 7 %	15 – 100 %	4 – 27 %	2 – 13 %	3 – 20 %	4 – 27 %	15 – 100 %	2 – 13 %	3 – 20 %	15 – 100 %	13 – 87 %
	France	147 – 97 %	125 – 82 %	133 – 88 %	85 – 56 %	101 – 66 %	14 – 9 %	6 – 4 %	57 – 38 %	90 – 59 %	84 – 55 %	72 – 47 %	81 – 53 %	142 – 93 %	76 – 50 %	61 – 40 %	144 – 95 %	100 – 66 %
Valeur mini.	A	0,235	0,265	0,25	0,3	0,295	6,9	46	0,25	0,255	0,275	0,31	0,295	0,245	0,25	2,5	0,39	3,8
	B	0,15	0,145	0,155	0,22	0,17	4,2	17	0,165	0,17	0,175	0,175	0,175	0,195	0,17	0,75	0,285	0,9
	C	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	10	12,5	1,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5	2,5	5
	France	0,09	0,115	0,14	0,145	0,145	0,6	2,45	0,16	0,16	0,145	0,165	0,17	0,15	0,155	0,405	0,185	0,445
Valeur maxi.	A	0,500	1,900	3,900	4,900	3,600	39,000	200,000	14,000	6,000	5,700	11,000	6,000	2,800	4,800	55,000	3,750	52,000
	B	0,600	1,200	1,300	3,400	2,200	41,000	560,000	9,700	3,600	3,200	4,800	3,500	1,300	4,300	16,000	3,750	23,000
	C	0,500	2,100	2,400	4,800	4,600	86,000	620,000	8,000	3,600	4,400	4,800	4,600	0,750	5,800	25,000	3,750	45,000
	France	1,000	5,700	8,000	9,600	9,100	160,000	940,000	33,000	10,000	15,000	15,000	16,000	4,600	18,000	76,000	3,750	75,000

Tableau 5 : Récapitulatif des principaux résultats pour les dioxines et les furanes.
(Les centiles et les vibrisses n'ont pas été calculés en raison du nombre important de valeurs inférieures à la LQ ou du nombre insuffisant de données).

mg/kg	TPH aliphatiques					TPH aromatiques				
	EC > C6-C7	EC > C7-C8	EC > C8-C10	EC > C10-C12	EC > C12-C16	EC > C5-C6	EC > C6-C8	EC > C8-C10	EC > C10-C12	EC > C12-C16
Nbre de valeurs	224	202	275	320	276	224	275	275	327	276
Valeur de LQ mini.	0,15	0,05	0,55	1	3	0,5	0,5	0,5	1	3
Valeur de LQ maxi.	10	10	10	10	10	10	10	10	20	10
Nbre de valeurs < LQ	224 – 100 %	202 – 100 %	275 – 100 %	303 – 95 %	259 – 94 %	224 – 100 %	275 – 100 %	275 – 100 %	307 – 94 %	269 – 97 %
Valeur mini.	-	-	-	3,4	11	-	-	-	1,1	13
Valeur maxi.	-	-	-	110	100	-	-	-	110	490

Tableau 5 : Récapitulatif des principaux résultats pour les fractions TPH (Total Petroleum Hydrocarbures) aliphatiques et aromatiques pour la France.
(Les centiles et les vibrisses n'ont pas été calculés en raison du nombre important de valeurs inférieures à la LQ).

Annexe 3

Poster présenté au cours de GeoEnv 2014



Urban Geochemical Background and Contaminated Land Management

Since 2010, under agreement with ADEME, BRGM develops a database of analysis of urban soils. Soils are sampled in all major French cities from areas considered to be representative of the anthropogenic geochemical diffused background.

Main Goal

- > The main goal of the **Urban Geochemical Background (UGB) database** is to assist contaminated land management stakeholders, by providing them:
 - a better knowledge of the chemical composition of soils in urban areas,
 - the needed data during (potentially) contaminated site diagnosis, or when excavated soil management is necessary.

Context

> In 2007, the French Ministry in charge of environment has developed methodological guidelines to facilitate the management of contaminated sites and soils. During the diagnosis of a (potentially) contaminated site or the management of excavated soils, the results of analysis must be compared with references. As there is no regulation guideline value for (potentially) contaminated soils in France, **the French approach recommends comparison with "natural" soils near the investigated area.** When (potentially) contaminated sites are located in urban areas, the near soils that are chosen as reference must be representative of the superposition of natural geochemical background and anthropogenic diffused background (Picture 1).

Method

> UGB project (ADEME-BRGM agreement #1072C0046) relies on the French national study called "Diagnosis of soils at day-care, schools, colleges and specialized institutes where are children and teenagers" (see insert). In the future, the UGB project will collect soil sampling and analysis data from other existing and coming studies.

Soils are sampled around each investigated place in all urban areas of more than 5,000 inhabitants. Samples are composed of 5 unit samples from squares of side 3 m, between 0 and 5 cm deep, after extraneous or larger components have been removed. The aim of the sampling is to reach soils that are representative of the urban geochemical background following the main following principles:

- optimization of the sampling location in order to avoid high contamination due to high traffic street, industrial sites and service activities, decanting areas... (Picture 1),
- macroscopic observation of the sample including organoleptic characteristics.

Each sample is analysed at least for **more than 40 of the most common inorganic and organic pollutants:** As, Cu, Cr, Pb, Zn, Ni, Cd, Hg, CN, PAH, phenol, TPH, PCBs...

Results and discussion

> At the end of January 2014, the UGB database contained **35,493 results from 801 analysed soils collected at 247 places in 138 towns** (Picture 2). As an example, descriptive statistics of all the raw data collected for lead in France indicate a mean concentration of 104 mg.kg⁻¹ and the existence of outliers that are visible in the scattergram of Picture 3. These anomalous values could be removed after checking of representativeness and statistical treatment. But more data will be necessary in order to provide results at a local scale (urban area).

The methodological challenges that have arisen during this first period and the preliminary results obtained lead us to guide the next steps of the study.

Diagnosis of soils at day-care, schools, colleges and specialized institutes for children and teenagers

This study (abbreviation: "Sensitive Establishments" or ETS) was launched by the Ministry in charge of environment in 2008 and is led by the BRGM. It results from the intersection of the databases of the Ministry in charge of education and the database of former industrial sites or service activities (BASIAS) of the Ministry in charge of environment. During this operation, more than 2,500 schools will be on a case by case basis, visited, and investigated to assess the quality of the living environment of "sensitive" populations.

More information on: www.developpement-durable.gouv.fr/Diagnostiquer-les-lieux.html

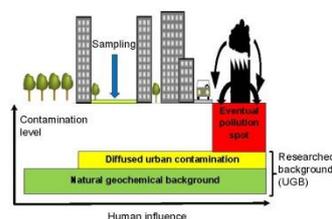
Authors

BRUNET J.F.¹, GUIET F.⁴, MALON J.F.⁴, BODENAN F.¹, LEYNET A.³, JARZABEK M.¹, LEPROND H.¹, HUBE D.¹, ROUVREAU L.¹, CALLIER L.¹, BLANC C.¹, PIANTONE P.², ROUSSEL H.⁵

¹: Water, Environment and Ecotechnologies Division, eau-env@brgm.fr; ²: Scientific and Production Division, p.piantone@brgm.fr; ³: Georesources Division, a.leynet@brgm.fr; ⁴: Information Systems Division, f.guiet@brgm.fr

BRGM, 3 avenue Claude Guillemin - BP 36009, 45060 Orléans Cédex 2, France,

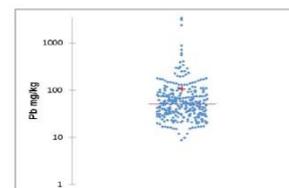
⁵ ADEME, 20, avenue du Grésillé - BP 90406, 49004 Angers Cédex 01, France, helene.rousseau@ademe.fr



Picture 1. UGB definition and sampling location.



Picture 2. Location of investigated urban areas.



Picture 3. Scattergram analysis collected for lead in surface urban soils representative of anthropogenic diffused geochemical background in France.

Conclusion and perspectives

> The construction of a national database on the local Urban Geochemical Background is started. But an important work of banking and thinking on the validity of the analysis collected and their treatment remains necessary.

Recovering of complementary data from other projects will help to reach better spatial distribution of sampling points and representative results at the urban area scale. It will be necessary to ensure with vigilance consistency of the data coming from various contributors.

Users will have to keep in mind that the values provided by the UGB database are not intended to substitute for determining the state of the environment of a neighbouring ground but should confirm it.

www.brgm.fr

Annexe 4

Article présenté à l'occasion des rencontres nationales de la recherche de l'ADEME 2014

Élaboration de fonds pédo-géochimiques urbains pour la gestion des sites et sols pollués

Jean-François BRUNET^{1*}, Frédéric GUIET⁴, Jean-François MALON⁴, Françoise BODENAN¹,
Aurélien LEYNET³, Maxime JARZABEK¹, Hubert LEPROND¹, Laurent ROUVREAU¹, Lucien
CALLIER¹,
Céline BLANC¹, Daniel HUBE¹, Patrice PIANTONE², Hélène ROUSSEL⁵

¹ : Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies, eau-env@brgm.fr

² : Direction Scientifique et de la Production, p.piantone@brgm.fr

³ : Direction des Géoressources, a.leynet@brgm.fr

⁴ : Direction des Systèmes d'Information, f.quiet@brgm.fr
BRGM, 3 avenue Claude Guillemin - BP 36009, 45060 Orléans Cédex 2, France,

⁵ : ADEME, 20, avenue du Grésillé - BP 90406, 49004 Angers Cédex 01, France,
helene.rousseau@ademe.fr

* contact : eau-env@brgm.fr

Résumé

Dans le cadre de la convention n° 1072C0046 conclue en novembre 2010 avec l'ADEME, le BRGM a construit et alimente une base de données d'analyses de sols urbains. Les échantillons de sols sont prélevés sur l'ensemble des grandes agglomérations françaises dans des zones jugées exemptes de toute pollution ponctuelle. L'objectif est de constituer un fond pédo-géochimique urbain qui aidera les différents acteurs impliqués dans la gestion des sites (potentiellement) pollués, notamment en :

- améliorant la connaissance de la géochimie des sols en milieu urbain ;
- apportant les données indispensables au cours de leurs travaux, comme par exemple, un diagnostic de site ou une démarche de gestion des terres excavées.

L'acquisition des premières données de cette base s'appuie très largement sur l'opération nationale de « Diagnostic des sols dans les établissements accueillant des enfants et des adolescents » engagée depuis 2008 par le Ministère du Développement durable. Un premier traitement statistique, réalisé à titre d'essai, a fourni un aperçu des pistes envisageables pour la suite de l'étude. Mais à l'échelle de l'agglomération le contenu de la base est encore insuffisant pour être spatialement représentatif et statistiquement fiable. De plus, un travail de réflexion sur la validité et le traitement des analyses bancarisées reste nécessaire. A l'avenir, d'autres projets, donnant lieu à des analyses de sols urbains dans des conditions similaires, pourraient contribuer à la création de la base de données « Fond Pédo-géochimique Urbain ».

Introduction

En février 2007, le ministère du Développement durable a proposé de nouvelles démarches de gestion aux acteurs de la thématique « Sites et sols (potentiellement) pollués » [1]. Ces démarches décrivent l'ensemble des étapes de gestion d'un site (potentiellement) pollué : le Diagnostic, l'Interprétation de l'État des Milieux (IEM), la mise en place du Plan de Gestion et l'Analyse des Risques Résiduels (ARR). Pendant le déroulement de ces démarches, l'interprétation des données recueillies sur le terrain donne nécessairement lieu à la

comparaison des analyses et des mesures avec des valeurs de références. La démarche d'IEM, par exemple, s'appuie sur la gestion effective des risques mise en œuvre par les pouvoirs publics pour la population française (Annexe 2 de la note ministérielle aux préfets du 8 février 2007) (3). Elle conduit ainsi à comparer l'état des milieux :

- à la qualité des milieux naturels voisins de la zone d'investigation (hors influence des activités du site concerné) ou à l'état initial de l'environnement pour les installations classées ;
- aux valeurs de gestion réglementaires mises en place par les pouvoirs publics.

En l'absence de valeur réglementaire pour les sols, la démarche privilégie la comparaison de l'état du sol du site considéré à celui des sols « naturels » voisins de la zone d'investigation. Pour ce faire, il convient de connaître le fond pédo-géochimique naturel, notamment des anomalies pédo-géochimiques locales et de distinguer les pollutions attribuables au site étudié de celles ne l'impliquant pas. De plus, il faut tenir compte de l'implantation des sites en zones industrielles et/ou au cœur d'un tissu urbain où un fond anthropique diffus se superpose au fond pédo-géochimique naturel.

Par ailleurs, les sites relevant des textes du 8 février 2007 et considérés comme producteurs de terres excavées, doivent désormais faire l'objet d'un diagnostic de la qualité des sols. Les terres nécessitant d'être excavées et susceptibles d'être réutilisées doivent être caractérisées afin de vérifier si leurs propriétés chimiques sont cohérentes avec le fond géochimique naturel local ou avec le Fond pédogéochimique et anthropique urbain local du lieu où leur réutilisation est envisagée en remblai [3].

Ces deux situations justifient le recueil de données sur le fond pédo-géochimique anthropisé, ou fond pédo-géochimique urbain, dans l'ensemble des grandes agglomérations françaises. Cette tâche, cofinancée par l'ADEME et le BRGM, consiste à mettre en place, dans un cadre pluriannuel, une base de données nationale regroupant les analyses (voir liste des paramètres concernés ci-dessous) de sols prélevés en milieu urbain mais exempts de toute pollution autre que diffuse. Cette opération est conçue pour bancariser les données obtenues grâce à divers projets dont, principalement, le projet « Diagnostics des sols dans les lieux accueillant des enfants ou des adolescents » (nom abrégé « Etablissements sensibles – ETS ») [4].

Lancée par le Ministère du Développement durable en 2008, ETS est une opération de grande envergure conduite par le BRGM et qui résulte du croisement des bases de données des établissements accueillant les enfants ou les adolescents (Ministère de l'Éducation nationale) et des anciens sites industriels ou activités de service (BASIAS) (Ministère du Développement durable) [5]. Au cours de l'opération, plus de 2 000 établissements feront l'objet, au cas par cas, de visites, de prélèvements et d'analyses pour évaluer la qualité des milieux de vie des populations « sensibles ». Les modalités de prélèvement, de préparation et d'analyse des échantillons, mises en œuvre dans le cadre du projet FGU sont intégrées aux cahiers des charges des différents marchés ETS à destination des bureaux d'études et des laboratoires qui y participent.

Matériel et méthodes

Dans un rayon d'environ un kilomètre autour de chaque établissement visité, les bureaux d'études en charge de l'opération ETS recueillent un à deux échantillons composites spécialement pour l'opération FGU. Ces échantillons sont constitués par prélèvements à la tarière à main ou à la pelle, puis homogénéisation de 5 prises unitaires de sol de surface entre 0 et 5 cm, dans un périmètre n'excédant pas un carré de 3 m de côté, après enlèvement des éléments grossiers et des végétaux. L'échantillonnage vise la

représentativité du fond pédo-géochimique urbain des agglomérations de plus de 5 000 habitants en suivant les principaux critères suivants :

- optimisation spatiale du prélèvement par rapport à l'usage de l'espace urbain pour éviter toute pollution aigue (route, zone de dépôts, industrie ou activité de service,...),
- observation macroscopique de l'échantillon et notamment des caractéristiques organoleptiques.

Les échantillons sont accompagnés d'un descriptif de la typologie des sols et localisés par leurs coordonnées géographiques en WGS 84 décimal. Au laboratoire, ils font l'objet d'un tamisage à 2 mm et d'un broyage à 80 µm. Sur chaque échantillon, les analyses suivantes sont effectuées par les laboratoires retenus dans le cadre de l'opération ETS :

1. Éléments traces métalliques (ETM) classiques : arsenic, cuivre, chrome total, plomb, zinc, nickel, cadmium, après attaque à l'eau régale (HCl, HNO₃). La mesure est classiquement faite par spectrométrie atomique avec torche plasma (ICP-AES) ;
2. Mercure total par la méthode des hydrures couplée à un spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA) ;
3. Cyanures totaux, soit par colorimétrie (applicable à des concentrations en cyanures comprises entre 0,5 mg/kg et 50 mg/kg de l'échantillon d'origine), soit par titrimétrie avec indicateur (applicable aux concentrations en cyanures supérieures à 50 mg/kg de l'échantillon d'origine) ;
4. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) selon la liste des 16 composés retenues par l'US-EPA (HAP16), selon la méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse (CG-SM) ;
5. Indice phénol total par colorimétrie et spectrométrie U.V ;
6. Hydrocarbures avec répartition des fractions carbonées entre C10 et C40 par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme (GC-FID) ;
7. Polychlorobiphényles (PCB) (liste des 7 congénères dits « indicateurs ») par chromatographie en phase gazeuse (CPG) et détecteur à absorption électronique (ECO).

Sur 10 % des échantillons prélevés, l'analyse des Polychlorodibenzodioxines et Polychlorodibenzofuranes (PCDD/PCDF) est également effectuée par chromatographie gazeuse à haute résolution couplée à la spectrométrie de masse (HRGC-MS) après extraction des 17 congénères (7 dioxines et 10 furannes) considérés comme toxiques.

En fonction des besoins des diagnostics ETS, des sols sont parfois prélevés à proximité ou au droit des établissements et leur analyse alimente aussi la base de données FGU. Le pack analytique ci-dessus, peut alors être complété par un ou plusieurs autres paramètres couramment recherchés :

1. Chrome VI, manganèse, aluminium, antimoine, baryum, cobalt, fer, molybdène, sélénium, vanadium,
2. Cyanure libre,
3. HAP : méthyl-naphtalènes (somme 1-méthyl-naphtalène et 2-méthyl-naphtalène),
4. Hydrocarbures aromatiques totaux TPH entre C6 et C16 et hydrocarbures aliphatiques totaux TPH entre C5 et C16,
5. Polychlorobiphényles semblables aux dioxines (PCB-DL),
6. Isomères de l'hexachlorocyclohexane (HCH),

7. Dichloro-diphényl-trichloro-éthane (DDT), Dichloro-diphényl-trichloro-éthylène (DDE), et Dichloro-diphényl-dichloro-éthane (DDD),
8. Amines aromatiques et amonium,
9. Fluorures
10. Composés Aromatiques Volatils (CAV),
11. Composés Organo-Halogénés Volatils (COHV),
12. Phénol, o-crésol, m-crésol, p-crésol, naphtol,
13. Dioxines et Furanes : TCDD, PeCDD, HxCDD, HpCDD, TCDF, PeCDF, HxCDF, HpCDF, THF, DBF,
14. Carbazole, Benzothiophène,
15. Plombtétraéthyl,
16. Matières sèches, teneur en carbone.

Résultats et discussion

En septembre 2014, la base de données FGU compte 43 813 résultats d'analyses correspondant à 957 échantillons de sols. Ils proviennent des visites et diagnostics de 588 établissements implantés dans 209 villes elles-mêmes réparties dans les 23 régions métropolitaines concernées par la première et la deuxième tranche de l'opération ETS. La base de données contient donc, en moyenne, les résultats d'analyse de 4 à 5 échantillons de sols par ville. Mais les paramètres listés ci-dessus ne sont pas tous systématiquement analysés et, par ailleurs, les valeurs obtenues sont souvent inférieures aux limites de quantification. Il en résulte un nombre d'analyses exploitables insuffisant pour réaliser une étude statistique représentative à l'échelle d'une agglomération urbaine. Les premières analyses bancarisées ont toutefois été décrites et représentées graphiquement à l'échelle du territoire métropolitain afin d'avoir un aperçu des résultats obtenus.

Ce premier traitement fait apparaître, pour un paramètre donné, une variabilité des limites de quantification lié à l'adaptation des protocoles d'analyse aux teneurs en présence, mais aussi à la participation obligée de plusieurs laboratoires associés à l'opération ETS par appel d'offre, selon la loi de marché public. De plus, les statistiques descriptives des données brutes recueillies indiquent par exemple pour le plomb, une moyenne de 104 mg/kg. Les valeurs extrêmes, visibles sur le dispersogramme associé (figure 1), pourraient être écartées à terme, après vérification de leur représentativité puis élimination des points statistiquement anormaux situés au-delà de la moyenne augmentée de deux fois l'écart-type. Un important travail de traitement des données reste donc à accomplir et les résultats présentés ici sont encore préliminaires.

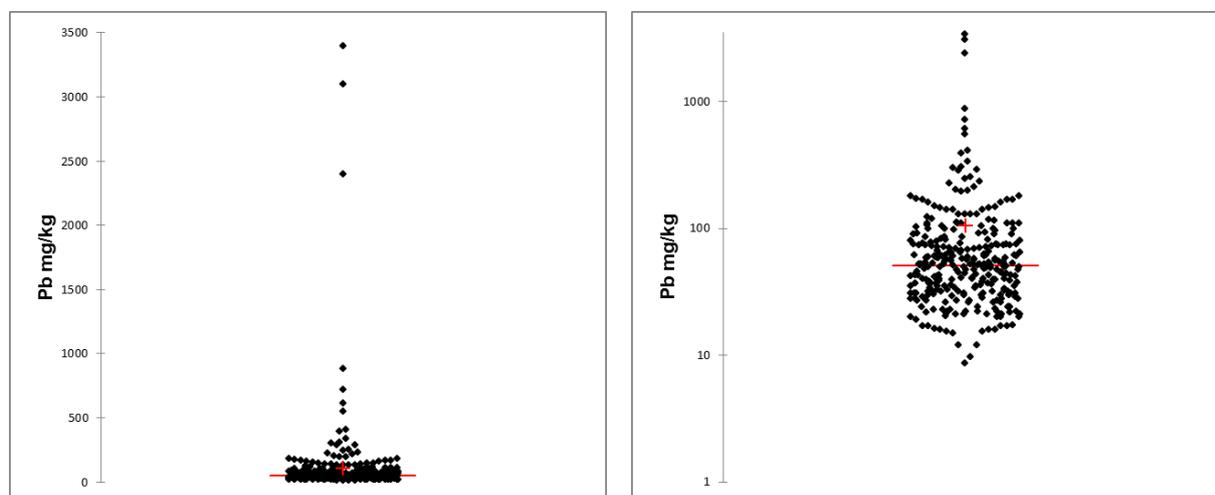


Figure 1 : Dispersogrammes des analyses de plomb à l'échelle du territoire métropolitain dans les sols urbains de surface exempts de pollutions ponctuelles (échelles décimale et logarithmique).

Conclusions et perspectives

La convention conclue entre l'ADEME et le BRGM a permis d'entamer la construction et l'alimentation d'une base de données de fond pédo-géochimique urbain à l'échelle nationale. Cependant, un important travail de bancarisation et de réflexion sur la validité et le traitement des analyses recueillies est encore nécessaire. Les modalités de diffusion des premiers résultats vers les bureaux d'études impliqués dans l'opération ETS, sont aussi en cours d'élaboration.

Outre la confrontation des résultats FGU aux travaux apparentés antérieurs (RMQS [6], ASPITET [7], IMN [8]), il conviendra, à l'avenir, de rechercher une procédure permettant de pallier l'hétérogénéité de la répartition spatiale des points de prélèvement. En effet, la procédure retenue dans le contexte du projet ETS conduit au choix de points de prélèvement localisés préférentiellement dans les espaces verts à proximité des établissements retenus. Le recours à d'autres projets pourrait permettre une meilleure répartition spatiale des points de prélèvement et un traitement des données statistiquement représentatif à l'échelle de l'agglomération urbaine. Les opérations engageant des prélèvements de sols dans les lieux représentatifs du fond anthropique urbain diffus, comme certains projets d'aménagement impliquant par exemple la gestion de terres excavées sous l'outil TERRASS [9], sont des voies possibles de contribution au projet FGU. Il sera néanmoins nécessaire d'assurer avec vigilance la cohérence des données des différents contributeurs, notamment vis-à-vis des protocoles de prélèvement et d'analyse mis en œuvre.

Une fois les résultats rendus disponibles, les utilisateurs devront adopter une démarche réfléchie et conserver un regard critique. En effet, au cours d'un diagnostic de site, les valeurs fournies par la base de données FGU ne devront pas se substituer à la détermination de l'état du milieu sol voisin de la zone d'investigation. Leur vocation est simplement de contribuer à confirmer la pertinence du référentiel proposé par l'intervenant pour gérer le compartiment sol.

Références

- [1] Démarches de gestion des sites et sols (potentiellement) pollués
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Deux-demarches-bien-distinctes.html>
- [2] Note ministérielle du 08 février 2007 et annexes 1 à 3
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Note-du-8-fevrier-2007-Sites-et.html>
- [3] Blanc C. avec la participation de Lefèvre F. (MEDDTL), Boissard G., Scamps M. (BRGM) et Hazebrouck B. (INERIS) – (2012) - Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement.
BRGM/RP-60013-FR, 53p
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Guide-de-reutilisation-hors-site.html>
- [4] Opération nationale « Diagnostic des sols dans les établissements accueillant des enfants et des adolescents »
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Diagnostiquer-les-lieux.html>
Circulaire du 4 mai 2010 - Diagnostics des sols dans les lieux accueillant les enfants et les adolescents
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Circulaire-du-4-mai-2010.html>
- [5] BASIAS – Inventaire historique de sites industriels et activités de service
<http://basias.brgm.fr>

[6] RMQS – Réseau de Mesures de la Qualité des Sols

<http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php>

[7] ASPITET - Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Éléments Traces

<http://etm.orleans.inra.fr>

[8] IMN – Inventaire Minier National

http://sigminesfrance.brgm.fr/geoch_inventaire.asp

[9] TERRASS – Outil de gestion des terres excavées

<http://terrass.brgm.fr>

Remerciements

Le BRGM remercie l'ADEME pour le financement du projet « Fond Géochimique Urbain » dans le cadre de la convention n° 1072C0046 du 19 novembre 2010. Le BRGM exprime également ses remerciements au Bureau du Sol et du Sous-sol de la Direction Générale de la Prévention des Risques du ministère du Développement durable pour la contribution de l'opération « Diagnostics des sols dans les lieux accueillant des enfants ou des adolescents » au projet « Fond Géochimique Urbain ».



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement & Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr