



HAL
open science

Premiers fonds pédogéochimiques urbains de la Base de Données des analyses de Sols Urbains - BDSolU

Jean-François Brunet, Stéphane Belbeze, Etienne Taffoureau, Cécile Le Guern, Hélène Demougeot-Renard, Baptiste Sauvaget, Chantal De Fouquet, Nicolas Saby, Christine Le Bas, Clément Lattelais, et al.

► To cite this version:

Jean-François Brunet, Stéphane Belbeze, Etienne Taffoureau, Cécile Le Guern, Hélène Demougeot-Renard, et al.. Premiers fonds pédogéochimiques urbains de la Base de Données des analyses de Sols Urbains - BDSolU. 5e Rencontres Nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués, ADEME, Feb 2025, Paris, France. hal-04826938

HAL Id: hal-04826938

<https://hal.science/hal-04826938v1>

Submitted on 9 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Premiers fonds pédogéochimiques urbains de la Base de Données des analyses de Sols Urbains - BDSolU

Jean-François BRUNET^{1*}, Stéphane BELBÈZE¹, Etienne TAFFOUREAU², Cécile Le GUERN³, Hélène DEMOUGEOT-RENARD⁴, Baptiste SAUVAGET⁴, Chantal de FOUQUET⁵, Nicolas SABY⁶, Christine LE BAS⁶, Clément LATTELAIS⁷, Antonio BISPO⁶, Hélène ROUSSEL⁸, Clément ZORNIG¹, Dominique GUYONNET⁹

¹ : Unité Sites, Sols et Sédiments Pollués, Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses, BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 ORLEANS Cedex 2, France, jf.brunet@brgm.fr; s.belbeze@brgm.fr; c.zornig@brgm.fr

² : Unité Production Opérationnelle des Projets numériques, Direction du Numérique pour les Géosciences, BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 ORLEANS Cedex 2, France, e.taffourau@brgm.fr

³ : Direction régionale Pays de la Loire, Direction des Actions Territoriales, BRGM, 1 rue des Saumonières, BP 92342, 44323 NANTES Cedex 3, France, c.leguern@brgm.fr

⁴ : eOde Sàrl, 7 chemin de Mont-Riant, 2000 NEUCHÂTEL, Suisse, helenedemougeotrenard@eode.ch; baptistesauvaget@eode.ch

⁵ : Mines Paris, PSL - Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 FONTAINEBLEAU Cedex, France, chantal.de_fouquet@minesparis.psl.eu

⁶ : Unité Info&Sol, Centre INRAE Val de Loire, 2163 Avenue de la Pomme de pin, CS 40001 Ardon, 45075 ORLEANS CEDEX 2, France, nicolas.saby@inrae.fr; christine.le-bas@inrae.fr; antonio.bispo@inrae.fr;

⁷ : Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne, Centre Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, INRAE, 5 rue de La Doua, CS 20244 - 69625 VILLEURBANNE, France, clement.lattelais@inrae.fr

⁸ : ADEME 20 Avenue du Grésillé - BP 90406 – 49004 ANGERS cedex 01, h.rousseau@ademe.fr

⁹ : Direction Générale Programmes, BRGM, 3 avenue Claude Guillemin BP 36009, 45060 ORLEANS Cedex 2, France, d.guyonnet@brgm.fr

* contact : www.bdsolu.fr - BDSolU@brgm.fr

Résumé

Le projet FGU (Fonds pédogéochimiques Urbains) réalisé au cours de trois conventions entre l'ADEME et le BRGM (2009-2014, 2014-2018, 2018-2022) avait pour principal objectif la détermination de fonds pédogéochimiques anthropisés en milieu urbain sur l'ensemble du territoire national. Ces référentiels sont au cœur des démarches de gestion des sites et sols (potentiellement) pollués, en particulier pour mener à bien les diagnostics des sites potentiellement pollués et valoriser les terres excavées. Pour atteindre cet objectif, une base de données des analyses de sols urbains, BDSolU, a été construite afin d'y bancariser les résultats d'analyses obtenus par divers projets relatifs à des aménagements urbains ou à la détermination de fonds locaux ou régionaux. Au terme de la 3^e convention FGU, la BDSolU compte près de 163 000 analyses pour 4 000 échantillons analysés. Ces travaux ont aussi conduit à la mise au point d'une méthode propre à déterminer les lignes de base des fonds pédogéochimiques anthropisés et à les restituer au public. Depuis 2021, le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) compte la BDSolU au nombre de ses programmes. Dans ce cadre, les prochains travaux ont pour ambition l'augmentation du nombre d'analyses bancarisées, l'amélioration de l'ensemble de la chaîne de production de résultats et la mise au point de l'interopérabilité entre les données des bases BDSolU et DoneSol d'INRAE.

Introduction

Les agglomérations urbaines, si l'on écarte leur empiètement sur les territoires agricoles, s'étendent sur des sols souvent mal connus ou sur des remblais de qualité douteuse, parfois impactés par des décennies d'histoire et d'activités artisanales et industrielles. Le fond pédogéochimique y est donc fortement anthropisé. Dans un contexte de croissance constante du taux de population vivant en ville, la connaissance de la qualité chimique des sols urbains devient une préoccupation prépondérante, partagée par de nombreux pays. Comme plusieurs d'entre eux, la France a adopté une politique d'encadrement des sites et sols pollués, fondée sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux. Or, celle-ci ne comprend pas de recueil de valeurs guides permettant de statuer sur l'état des sols. En cas de suspicion de pollution, la démarche commence par la comparaison de l'état du sol considéré à celui des sols « sains » voisins de la zone d'investigation. Il s'agit de différencier, parmi les concentrations de substances observées dans les sols, la part habituellement présente dans la zone, le fond pédogéochimique anthropisé (FPGA), de celle attribuable aux activités du site étudié (MEEM, 2017). De plus, les terres excavées, longtemps considérées comme des déchets une fois franchi le périmètre de leur site d'origine, et déposés en Centre de Stockage de Déchets (CSD), sont peu à peu entrées dans une logique d'économie circulaire. Leur valorisation, fondée sur la compatibilité avec le FPGA du site receveur, est devenue l'objet d'importants enjeux. Pour répondre à ces besoins, l'ADEME et le BRGM ont signé en 2010, 2014, puis en 2018 en partenariat avec INRAE et eOde et avec l'appui de Mines Paris, des conventions pour la détermination des gammes de teneurs habituellement rencontrées pour les principales substances minérales (métaux, métalloïdes) et organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, polychlorobiphényles, dioxines, furanes) présentes dans les sols urbains (projet Fonds pédogéochimiques Urbains, FGU). En produisant ces FPGA urbains avec la Base de Données des analyses de Sols Urbains (BDSolU) le BRGM vise à aider les aménageurs et les décideurs urbains impliqués dans la gestion des sites (potentiellement) pollués en apportant les données indispensables à l'engagement d'un diagnostic de site ou d'une démarche de gestion des terres excavées. Les informations recueillies peuvent également servir dans le cadre d'interprétations de l'état

des milieux, d'aménagements urbains (jardins collectifs, projets d'agriculture urbaine), d'études sanitaires, d'états des lieux préalables à l'implantation d'installations classées, ou d'états des lieux post accident. A partir de 2021, le BRGM a rejoint le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) pour y poursuivre, en interaction avec INRAE, le développement de la BDSolU et la mise au point de l'interopérabilité des données de leurs bases respectives.

Matériel et méthodes

Collecte des données

Contrairement au programme national d'observation des sols agricoles (Saby et al, 2011), le projet FGU ne comporte pas de campagne de prélèvement et d'analyse des sols en propre. En 2010, pour recueillir les analyses nécessaires à ses travaux, il a d'abord été adossé au projet « Diagnostic des établissements accueillant des enfants et des adolescents, Etablissements sensibles ou ETS » (MTECT, 2022). Ce projet ETS a été déployé par le BRGM pour le ministère en charge de l'environnement entre 2010 et 2021, pour donner suite aux recommandations des Plans Nationaux Santé Environnement PNSE 2 puis PNSE 3 (MSP, 2022). Cette démarche d'anticipation a concerné, 1 359 établissements construits sur des sites superposés ou contigus à un ancien site industriel ou une ancienne activité de service répertorié(e) dans la base de données BASIAS. Les diagnostics réalisés ont compris des prélèvements d'échantillons des sols des établissements et des lieux témoins voisins jugés hors influence d'anciennes activités industrielles. Ces échantillons ont été prélevés en surface (essentiellement de 0 à 5 cm de profondeur en visant l'exposition potentielle des populations susceptibles d'ingérer des particules de terre, en particulier en portant les mains à la bouche. Les analyses ont été enregistrées par le BRGM en vue de déterminer des FPGA de surface dans les grandes agglomérations métropolitaines pour venir en appui à la démarche de diagnostic des sols. En 2014, le besoin de données supplémentaires a conduit à la création de la Base de Données des Analyses de Sols Urbains (BDSolU ; Brunet *et al.*, 2018) et à élargir la collecte à d'autres projets (aménagement urbains : quartiers Nantais ; Le Guern, 2017, Nantes-Pirmil ; Le Guern, 2023, détermination de référentiels régionaux : GeoBaPa ; Soltracing, 2022, FGU Toulouse ; Belbèze, 2019). BDSolU permet de conserver les informations sur les sols recueillis dans des conditions et selon des protocoles variés : description de lieux de prélèvement (références historiques, occupation du sol), des sondages, des niveaux de sols et des matériaux rencontrés, des modalités d'échantillonnage, des échantillons, des analyses. Des conventions entre le propriétaire des données et le BRGM encadrent les conditions de fourniture des données et les éventuelles contraintes d'utilisation ou de diffusion attachées à leur confidentialité.

Traitement des données

Au terme de la 3^e convention FGU, l'observation des données bancarisées dans la BDSolU a fait apparaître plusieurs zones géographiques métropolitaines présentant un nombre d'analyses suffisant pour y envisager la détermination de valeurs de fond. Les analyses des échantillons dits de surface (0-5 cm ou 0-30 cm) ou profonds (supérieur à 30 cm) sont utilisées selon que le FPGA recherché est respectivement destiné à un diagnostic de l'exposition sanitaire à des polluants du sol, ou à la gestion de terres excavées (ADEME, 2018). Préalablement aux calculs, une **étape de sélection** des données vise l'obtention de la population la plus représentative possible en fonction de ces deux objectifs (Waldvogel, 2018). Cette étape est rendue nécessaire en raison de la diversité des projets qui contribuent à la BDSolU et des hétérogénéités qui en découlent. Plusieurs niveaux de sélection plus ou moins sévères sont appliqués pour rechercher une population représentative du FPGA visé et présentant l'effectif le plus élevé possible, malgré le nombre encore faible d'analyses bancarisées. Pour chaque niveau, l'étape de calcul transcrite dans un **algorithme en langage « R »** comprend plusieurs fonctions dont : **a) un dégroupement spatial des points de prélèvements** distribués irrégulièrement dans les zones géographiques étudiées en raison de l'orientation de certains projets contributeurs et des contraintes de prélèvement en milieu urbain. La méthode de dégroupement spatial retenue, dite par « fenêtres » (Goovaerts, 1997), repose sur la segmentation du territoire étudié en 100 cellules et le comptage du nombre d'échantillons dans chacune d'elles. Le pourcentage moyen d'échantillons dans chaque cellule (idéalement proche de 1) permet l'obtention d'un indicateur de répartition spatiale. Puis, dans chaque cellule, les résultats d'analyse associés aux échantillons sont pondérés par l'inverse du nombre d'échantillons ; **b) un test d'Hartigan** pour évaluer, pour chaque paramètre, la présence de plusieurs populations (plurimodalité de la distribution des valeurs de concentration ; Hartigan *et al.*, 1985) ; **c) le calcul des principales valeurs statistiques** (moyenne, médiane, écart type, coefficient de variation, quantiles) **et des limites basse et haute de la gamme de concentrations selon les formules respectives des vibrisses inférieure et supérieure internes de Tukey** (Tukey, 1977 ; Le Bas *et al.*, 2024). Par souci de cohérence avec les travaux conduits jusqu'à présent par INRAE (Villanneau *et al.*, 2008), le projet FGU a choisi de retenir ces vibrisses calculées selon les équations suivantes : $V_{inf} = Q1 - 1,5 \times (Q3 - Q1)$ et $V_{sup} = Q3 + 1,5 \times (Q3 - Q1)$ (avec $Q1$: premier quartile, $Q3$: troisième quartile, V_{inf} : vibrisse inférieure interne, V_{sup} : vibrisse supérieure interne, aussi appelée ligne de base) ; **d) la prise en compte des valeurs inférieures à la limite de quantification ou LQ** (valeurs < LQ) dites valeurs censurées : substances détectées par les méthodes d'analyse mises en œuvre au laboratoire, mais à des concentrations trop faibles pour être quantifiées de façon fiable. Souvent ignorées ou substituées par des valeurs arbitraires entraînant des biais statistiques (par exemple, 0 ou LQ/2), ces valeurs sont pourtant porteuses d'information. Elles ont donc été prises en compte par discrétisation du calcul de la vibrisse, lorsque le taux de mesures non quantifiées dépasse 25%. Il s'agit, à condition d'introduire un vecteur de poids, de remplacer chaque donnée non quantifiée par k valeurs discrétisées (et non pas simulées) entre 0 et LQ, chacune recevant (pour cette donnée) un poids 1/k. Chaque donnée quantifiée reçoit un poids égal à 1. Ensuite, la vibrisse de Tukey est calculée avec les données pondérées (initiales et reconstituées) (ADEME *et al.*, 2022) ; **e) le calcul des sommes de concentration pour certaines familles de substances** (16 HAP, PCBi, dioxines et furanes...), lequel prend aussi en compte les concentrations <LQ. Ainsi, dans tous les cas la somme obtenue correspond à la somme de l'ensemble des concentrations et des LQ indiquées. Si au moins l'une des concentrations concernées est <LQ, alors la somme est indiquée comme <LQ. Les limites de quantification des sommes ont été calculées selon le même principe. En outre, les sommes de dioxines et de furanes sont fournies en TEQ OMS 2005. Il s'agit de Quantités Equivalentes

Toxiques calculées par pondération des concentrations de chaque congénère au moyen de Facteurs de Toxicité Equivalente (TEF) proposés en 2005 par l'Organisation Mondiale de la Santé) (Migne et Claude).

Restitution

Pour l'instant, le processus de sélection et de calcul sous R ne comprend pas le choix automatisé du niveau de sélection des données le plus pertinent. Ce choix relève d'une analyse au cas par cas des résultats obtenus pour chaque zone géographique, chaque profondeur, et chaque paramètre. Cette analyse prend en compte i) les valeurs de quantiles, et de la ligne de base éventuellement calculée, ainsi que leur stabilité d'un niveau de sélection à l'autre, ii) la fiabilité relative de ces valeurs entre chaque niveau, iii) l'effectif de la population sélectionnée, iv) l'évaluation de la plurimodalité (test d'Hartigan), v) la dispersion de la population sélectionnée au moyen du coefficient de variation (moyenne/écart type), vi) l'allure de l'histogramme de la population sélectionnée, vii) le taux de valeurs inférieures à la limite de quantification, viii) l'éventuelle influence de valeurs anormales dont la présence peut être indiquée par leur apparition sur l'histogramme et la boîte à moustache, ou par l'amplitude des valeurs minimale et maximale. Le niveau de sélection et donc les résultats de calcul les plus pertinents sont ainsi retenus. En outre, un **indicateur de fiabilité** tient compte de ces principaux critères et est traduit en nombre d'étoiles : * **peu fiable**, ** **moyennement fiable**, *** **fiable**. Les résultats obtenus sont mis à disposition sur le site internet BDSolU.fr. Ils sont accompagnés de l'indice de fiabilité, afin d'aider les personnes qui les consulteront à relativiser les valeurs statistiques fournies. En outre, ces informations sont accompagnées d'un avertissement, principalement pour rappeler qu'elles constituent l'un des outils permettant d'apprécier une situation mais ne sont pas des valeurs officielles et encore moins réglementaires. Pour chaque zone géographique, une page du site web présente : i) un tableau de résultats simplifiés, ii) un fichier PDF présentant le tableau de résultats complet, les histogrammes et les boîtes de Tukey, ainsi que les cartes associées montrant la localisation géographique des points de prélèvement des échantillons de sol analysés, iii) un lien vers un tableau de résultat complet à télécharger au format csv et importable dans un rapport.

Résultats et discussion

Au terme de la 3^e convention FGU, la BDSolU compte près de 163 000 analyses pour 4 000 échantillons analysés, et une méthode de calcul des gammes de concentration de fond, adaptée aux spécificités de la base, a été mise au point puis utilisée pour proposer des valeurs de fond de plusieurs agglomérations urbaines du territoire national. De plus la faisabilité de l'interopérabilité des données de la BDSolU et de la base DoneSol d'INRAE a été démontrée. Les travaux de bancarisation des données dans la BDSolU ont été valorisés dans le cadre d'échanges de données avec d'autres projets et par plusieurs travaux de communication. Le projet FGU Toulouse a été conçu comme une démonstration de l'application de la méthode de détermination des lignes de base des FPGA proposée par l'ADEME en 2018 (ADEME 2018). Sa réalisation a donné lieu à l'utilisation de données recueillies par Toulouse Métropole et de données obtenues lors de campagnes de prélèvements de sols organisées spécialement pour le projet. Mais il a aussi permis de valoriser les données des projets FGU et ETS obtenues sur l'agglomération toulousaine et bancarisées dans la BDSolU (Belbèze *et al.*, 2023 ; Belbèze, 2019). De la même façon, le projet GeoBaPa a donné lieu à un échange d'analyses de sols pour les régions Ile-de-France et Normandie, lequel a contribué à la réalisation d'une cartographie précise de la qualité des fonds pédo-géochimiques du Bassin parisien. Un référentiel public, gratuit et opérationnel a ainsi été constitué pour faciliter et sécuriser les opérations de déblais/remblais en fournissant un cadre transparent et adapté aux pratiques de terrain (Soltracing, 2022).

Conclusions et perspectives

Les travaux de la troisième convention FGU ont permis la mise au point d'une procédure de traitement des données adaptée au contenu de la base BDSolU. En effet, cette procédure repose sur une étape de sélection et de préparation qui prend en compte l'hétérogénéité des données disponibles tout en valorisant les résultats d'analyse inférieurs aux limites de quantification. Une première mise à disposition des lignes de base de FPGA pour les zones géographiques densément représentées dans la base a eu lieu en juin 2024. Le travail accompli permet d'entrevoir une utilisation généralisée des référentiels de la BDSolU au niveau national. Pour autant, cette méthode peut encore être affinée et développée pour plus de fiabilité et de précision. Les tests réalisés lors du projet METOTRASS, associé à la 3^e convention du projet FGU, ouvrent la voie vers l'application d'un filtrage géostatistique des données (Sauvaget, 2019). L'interrogation simultanée des données interopérables de BDSolU et DoneSol sous standard OGC SensorThings fait partie des prochains objectifs pour, à terme, permettre des croisements avec d'autres bases de données en France et à l'étranger. La BDSolU devrait aussi bénéficier des résultats des projets HOUSES (ANR HOUSES, 2022) et ISLANDR (2022) qui développent notamment des algorithmes d'interpolation à partir de données éparées, imprécises ou groupées spatialement. De tels outils permettraient de mieux valoriser ces jeux de données qui reflètent la réalité concrète du terrain. Au cours du projet de la 3^e convention du projet FGU, le système de bancarisation de la BDSolU s'est adapté à l'extension du périmètre d'utilisation des FPGA pour la gestion des sites et sols pollués et des terres excavées, aux besoins et exigences de plusieurs projets fournisseurs ou utilisateurs de données et à la diversité des données recueillies. A l'avenir, il devra encore s'améliorer, évoluer vers plus d'automatisation, et prendre en compte certains polluants dits émergents, comme les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS). L'effort de bancarisation des analyses de sols urbains représentatifs des FPGA doit être poursuivi par la BDSolU. Il doit permettre de couvrir densément et à diverses échelles les agglomérations de l'hexagone et ainsi de proposer aux aménageurs et planificateurs urbains de précieux outils d'aide à la décision. Afin d'appuyer cet effort, l'ADEME apporte son soutien financier aux collectivités soucieuses de mieux connaître la qualité chimique habituelle des sols de leur territoire, de maîtriser les risques sanitaires associés, de faciliter la reconquête des friches et de promouvoir la valorisation des terres excavées.

Références

- ADEME (2018) Méthodologie de détermination des valeurs de fonds dans les sols : Echelle territoriale (112 p.) et Echelle d'un site (107 p). Groupe de travail sur les valeurs de fonds. <https://urls.fr/Qb0iC8>
- ADEME, BRGM, INERIS, eOde (2022) Etablissement de lignes de base des fonds pédogéochimiques anthropisés. 63 p. 9 annexes. BRGM RP-73692-FR - Annexe 6 Note Mines ParisTech. Vibrisse de Tukey et limites de quantification.
- ANR HOUSES (2022) Rohmer J., Henriot A., Belbèze S., Guyonnet D., de Fouquet C., Romary T., Destercke S., Quost B., Leger J-F., Fargier H., Dubois D., Cazeneuve E., Chabrol C. Harmonized Operation of Uncertainties in Spatialized Environmental Systems. Consortium BRGM-ARMINES-HEUDIASYC-IRIT-HESUS.
- Belbèze, S., Rohmer, J., Négrel, P., Guyonnet, D. (2023) Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration*, 254, 107298.
- Belbèze S. avec la collaboration de Djemil M., Béranger S. et Stochetti A. (SCM) (2019) Détermination de FPGA - Fonds Pédogéochimiques Anthropisés urbains. Agglomération pilote : TOULOUSE METROPOLE. Rapport final. BRGM/RP-69502-FR, 347 p., 73 fig., 37 tabl., 4 ann.
- Brunet J.-F., Taffoureau E., Bourguine B., Belbèze S. (2018) Établissement de fonds pédogéochimiques urbains en parallèle à l'Opération ETS du Ministère en charge de l'Environnement. Rapport final. BRGM/RP-67130-FR, 117 p., 12 fig., 2 ann.
- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.
- Hartigan JA, Hartigan PM (1985) The Dip Test of Unimodality. *Annals of Statistics*, 13, 70–84.
- ISLANDR (2022). Information-based Strategies for LAND Remediation. <https://cordis.europa.eu/project/id/101112889/fr>
- Le Bas C., Brossard M., Brunet J-F., Commagnac L., Beaudou A., Belbèze S., Bellifa M., Boukir H., Dalmasso M., Derrière N., Lattelais C., Le Martret H., Lehmann S., Pickel A., Richer-De-Forges AC., Saby NPA., Schellenberger A., Taffoureau E., Toutain B., Wurpillot S., Yahiaoui R. (2024) Le système d'information sur les sols de France : capitaliser, analyser, diffuser, aller vers l'open data. *Étude et Gestion des Sols*, 31, pp.59-73. hal-04385617. <https://hal.inrae.fr/hal-04385617v1>
- Le Guern C., Baudouin V., Sauvaget B., Pineau-Jamin E., Gaubert, C., Braud R., Desse-Engrand F, Polett S., Menoury A., Bodéré G., Milano E., Conil P., Bâlon P. (2017) Développement d'une méthodologie de gestion des terres excavées issues de l'aménagement de quartiers nantais - Phase 1 : Caractérisation des sols et recensement des sources de pollution potentielles - Rapport final. BRGM/RP-67138-FR, 116 p., 4 ann.
- Le Guern C., Baudouin V., Sauvaget B., Dubrac N. (2023) Economie circulaire des terres excavées et transition écologique – accompagnement du projet d'aménagement Pirmil-les-Isles. Rapport final. BRGM/RP-73276-FR, 102 p.
- MEEM - Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (2017) Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués <http://ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues>
- Migne V., Claude T. Polychlorodibenzo-p-dioxines et les polychlorodibenzo-p-furanes (PCDD/F). INERIS – 213434-2783847-0.1. 8p. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/22_DIOXINES_ET_FURANES_%28PCDD_F%29%20v1.pdf
- MSP - Ministère de la Santé et de la Prévention (2022). Deuxième plan national Santé-environnement (PNSE2) - 2009–2013 <https://solidarites-sante.gouv.fr/ministere/documentation-et-publications->
- MTECT (2022) Ministère de la Transition écologique de la Cohésion des territoires. Démarche établissements sensibles. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/page/demarche-etablissements-sensibles>
- Saby, N.P.A., Marchant, B.P., Lark, R.M., Jolivet, C.C., Arrouays, D. (2011). Robust geostatistical prediction of trace elements across France. *Geoderma* 162, 303–311.
- Sauvaget B. (2019) Constitution de référentiels géochimiques locaux pour les sols et proches sous-sols urbains : de la base de données à l'interprétation géostatistique. *Géochimie*. Thèse de doctorat de l'Université Paris sciences et lettres, 2019. Français. (NNT : 2019PSLEM014).
- Soltracing (2022) Le projet GeoBaPa. <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/geobapa-referentiel-meilleure-gestion-terres-issues-btp>
- Tukey, J.W. (1977) *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley. ISBN 9780201076165.
- Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N.P.A., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V., Arrouays D. (2008) Détection de valeurs anormales d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Etude et Gestion des Sols*, 15(3), 183-200.
- Waldvogel M-C., Brunet J-F. (2018) Recommandations pour le prélèvement d'échantillons de sols pour la détermination de valeurs de fonds. Note BRGM – D3E/3SP – JFB-MD n°2018-597.

Remerciements

Nous remercions l'ADEME, le BRGM et le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires pour leur soutien financier au cours des projets porteurs de la BDSolU.