



Contamination diffuse des sols agricoles et urbains : état des connaissances et données disponibles

Claire Froger, Nicolas P. A. Saby, Jean-François Brunet, Dominique Guyonnet, Antonio Bispo

► To cite this version:

Claire Froger, Nicolas P. A. Saby, Jean-François Brunet, Dominique Guyonnet, Antonio Bispo. Contamination diffuse des sols agricoles et urbains : état des connaissances et données disponibles. Ronald Charvet; Christian Mougin; Elisabeth Rémy. Sols urbains, environnement et santé - Repenser les usages, QUAE, 2024, 9782759236855. hal-04502978

HAL Id: hal-04502978

<https://brgm.hal.science/hal-04502978>

Submitted on 13 Mar 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.

1. Contamination diffuse des sols agricoles et urbains : état des connaissances et données disponibles

Claire Froger, Nicolas P. A. Saby, Jean-François Brunet, Dominique Guyonnet, Antonio Bispo

Introduction

La santé des sols, celle des écosystèmes et des êtres humains sont intimement liées. Les activités humaines passées ou actuelles ont pu affecter la qualité de nos sols limitant ainsi leurs usages. Parmi ces impacts, la pollution est reconnue en Europe et en Eurasie comme la troisième des plus grandes menaces sur les sols (FAO et UNEP¹, 2021). En France, le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol) a été créé en 2001 afin de constituer et gérer un système d'information sur les sols de France et de répondre à des demandes des pouvoirs publics et de la société au niveau local et national (Arrouays *et al.*, 2022). Cette création s'inscrit dans le mouvement d'intégration de la protection des sols dans les programmes de protection de l'environnement en Europe (Commission européenne, 2002). Il regroupe plusieurs instances publiques ou gouvernementales : le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, le ministère de la Transition écologique, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), l'Agence de la transition écologique (Ademe), l'Institut de recherche pour le développement (IRD), l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), l'Office français de la biodiversité (OFB) et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Les missions du Gis Sol sont de concevoir et coordonner l'inventaire géographique des sols, les différents programmes de suivi des propriétés et qualités des sols, ainsi que la gestion de ces données. Il est également en charge de la valorisation de ces données en cohérence avec les programmes européens menés par le Bureau européen des sols, la Commission européenne et l'Agence européenne de l'environnement (AEE). Les différents travaux du Gis Sol sont principalement coordonnés et suivis par l'unité Info&Sols d'INRAE Val-de-Loire (Orléans), où a également été construit en 2013

1. Union nationale des entreprises du paysage.

le Conservatoire européen des échantillons de sols (CEES) afin d'accueillir, préparer, gérer et stocker les échantillons de sols issus de différents programmes nationaux et européens d'inventaire et de surveillance de la qualité des sols.

Plusieurs bases de données provenant des réseaux, tels que le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) (Arrouays *et al.*, 2003), ont ainsi été constituées et permettent d'avoir des informations sur la contamination organique et inorganique des sols (Froger *et al.*, 2023b). Dans ce chapitre, nous présentons ces bases de données nationales accessibles et les paramètres mesurés, ainsi que les différents résultats acquis depuis plus de vingt ans traitant des contaminants, organiques et inorganiques, mais aussi une sélection de travaux de recherches permettant d'interpréter ces données sur l'état des sols et les impacts possibles sur la santé humaine.

Les bases de données disponibles sur la qualité chimique des sols

I Les données du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS)

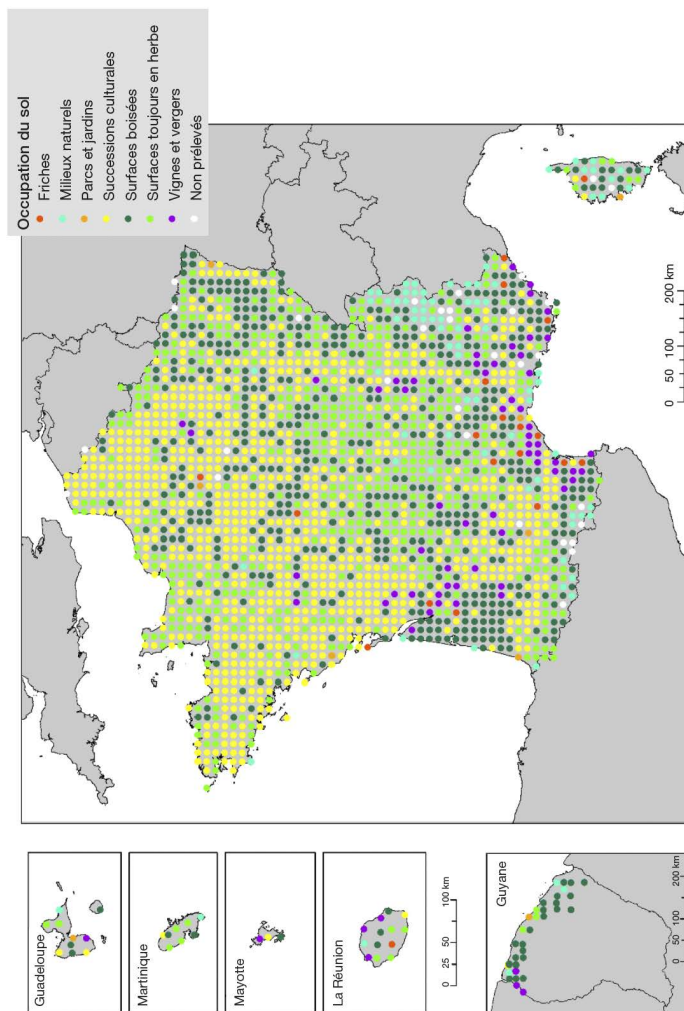
Description du RMQS

Le programme national RMQS se fonde sur un plan d'échantillonnage dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace, la stratégie retenue correspond à un échantillonnage aléatoire systématique, soit une grille carrée de 16 km de côté (Arrouays *et al.*, 2003 ; 2002) (figure 1.1). Ce type de stratégie permet d'obtenir des inférences statistiques valides basées sur des estimations sans biais et précises des paramètres des distributions statistiques (Brus et Saby, 2016). Par ailleurs, elle est également adaptée à l'ajustement de modèles statistiques de type régression (Meersmans *et al.*, 2012) et de type géostatistique (Saby *et al.*, 2011). La résolution de 16 x 16 km fut, quant à elle, définie de façon à couvrir la majorité des combinaisons type de sol-classe d'occupation des sols (Arrouays *et al.*, 2002). Dans le temps, la stratégie retenue correspond à une stratégie par panel rotatif² (Brus, 2014) facilitant la production de manière précoce des sorties sur l'état et les possibles évolutions de différentes propriétés des sols.

Le protocole d'échantillonnage a été développé et validé par les équipes d'Info&Sols (Jolivet *et al.*, 2018). Des échantillons de sol sont prélevés à différentes profondeurs, sur une surface de 400 m², une fosse pédologique est également creusée dans le but d'obtenir une description détaillée du sol par un pédologue présent sur le terrain. Les échantillons composites des sites de prélèvement sont ensuite stockés au Conservatoire européen des échantillons des sols après séchage à 30 °C, tamisage et quartage selon une méthode normalisée (Arrouays *et al.*, 2003 ; Jolivet *et al.*, 2018).

2. Consistant à échantillonner un panel de 200 sites répartis dans l'espace géographique parmi les 2 240 recensés chaque année et de manière à couvrir l'ensemble des sites à la fin de la campagne.

Figure 11. Répartition des 2240 sites du RMQS



Source : Jolivet et al. (2018)

La première campagne du RMQS s'est déroulée sur la période de 2000 à 2015 (jusqu'en 2009 en métropole), en intégrant des mesures de paramètres agronomiques mais aussi l'analyse de plusieurs contaminants (éléments traces métalliques [ETM], polluants organiques persistants [POP], pesticides organochlorés...), cette première campagne étant axée sur la contamination des sols. Les résultats ont été valorisés par le Gis Sol notamment à travers un rapport sur l'état des sols français (Gis Sol, 2011). De nombreuses publications, cartes et rapports sont également disponibles sur le site web du Gis Sol³.

Les données agronomiques et physico-chimiques

Différentes analyses physico-chimiques sont conduites sur les échantillons par le laboratoire d'analyse des sols d'INRAE (LAS, Arras) (tableau 1.1). Les données des analyses effectuées sur les échantillons composites de surface (0-30 cm) et de subsurface (30-50 cm) sont disponibles sur le dataverse du Gis Sol (Institut national de la recherche agronomique *et al.*, 2021).

Tableau 1.1. Analyses physico-chimiques des échantillons du RMQS par le laboratoire d'analyse des sols (LAS, Arras)

Menu analytique pour les sols du RMQS	
Teneur en eau résiduelle à 105 °C (méthode gravimétrique interne) - g/kg	
Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation (NF X 31-107) - g/kg	
Calcaire (CaCO ₃) total, carbone (C) organique, azote (N) total (NF ISO 10693, NF ISO 10694 ou NF ISO 14235, NF ISO 13878) - g/kg	
pH eau (NF ISO 10390)	
pH KCl N (NF ISO 10390)	
pH (CaCl ₂) 0,01 mol/l (NF ISO 10390)	
Phosphore (P ₂ O ₅) - méthode Joret-Hébert (NF X 31-161) - g/kg	
Phosphore (P ₂ O ₅) - méthode Olsen (NF ISO 11263) - g/kg	
Extraction au chlorure de cobaltihexamine (NF ISO 23470)	
Capacité d'échange cationique cobaltihexamine (spectrocolorimétrie) (NF ISO 23470) - cmol+/kg	
Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al échangeables à la cobaltihexamine (ICP-AES/EAF) (NF ISO 23470) - cmol+/kg	
Bore (B) soluble à l'eau bouillante (méth. INRA) - mg/kg	
Extraction selon la méthode Tamm en obscurité (méth. INRA)	
Si, Al, Fe méthode Tamm en obscurité (ICP-AES) (méth. INRA) - g/100 g	

3. <http://www.gissol.fr/publications>

Les analyses des contaminants

De nombreux contaminants ont été mesurés dans les échantillons du RMQS prélevés lors de la première campagne de mesures, comme résumé dans le tableau 1.2. Les ETM ont été mesurés pour les échantillons de surface et subsurface, tandis que les analyses de polluants organiques, d'arsenic (As) et de mercure (Hg) ont été effectuées uniquement sur les échantillons de surface.

Tableau 1.2. Description des mesures de contaminants effectuées sur le RMQS

Molécules	Mesure	Programme	Profondeur
Cd, Cu, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Ti, Zn	Teneurs totales (HF + HClO ₄)	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0-30 cm) Subsurface (30-50 cm)
As, Hg	Teneurs totales	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0-30 cm)
Cd, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn	Teneurs extractibles (EDTA)	RMQS1 (tous les sites)	Surface (0-30 cm) Subsurface (30-50 cm)
PCB, HAP, dioxines, furanes	21 PCB 16 HAP 75 dioxines 135 furanes	RMQS – POP (tous les sites)	Surface (0-30 cm)
Polybromodiphényléthers (PBDE), pesticides organochlorés (OCP), herbicides	39 PBDE 12 organochlorés (DDT, lindane, dieldrine...) 26 herbicides (triazines, phénylurés)	RMQS – OCP (550 sites)	Surface (0-30 cm)
Pesticides (111 molécules)	48 fongicides 36 herbicides (dont le glyphosate) 25 insecticides/acaricides 2 safebers	Phytosol (48 sites)	Surface (0-30 cm)

Des tableaux statistiques sont disponibles en ligne pour les substances dont les mesures sont assez nombreuses pour produire des statistiques considérées comme fiables⁴, ainsi que pour les ETM (Saby *et al.*, 2020), les polychlorobiphényles (PCB) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Saby *et al.*, 2019a). La consultation en ligne permet de filtrer en fonction de différents critères d'intérêt (substance, type d'extraction, etc.).

La spatialisation des données au niveau national avait pour objectif de fournir des cartes informant sur les «teneurs habituelles» dans les sols français, correspondant au cumul du fond «pédogéochimique» et des contaminations diffuses issues des

4. <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>

activités humaines (on parle aussi de fond pédogéochimique anthropisé [FPGA]). Les différentes cartes produites sont disponibles en ligne et téléchargeables sous forme de raster⁵. Les prédictions spatiales à une résolution de 1000 m des teneurs totales de 9 ETM y sont notamment disponibles.

Des exemples de tableaux et de cartes sont présentés ci-après.

■ La base de données des éléments traces métalliques (BDETM)

Pour la réalisation des plans d'épandage des boues d'épuration, de très nombreuses analyses d'ETM dans les sols sont effectuées sur tout le territoire, conformément aux prescriptions du décret du 8 décembre 1997, complété par l'arrêté du 8 janvier 1998. Ainsi, les teneurs en sept ETM sont déterminées (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) sur des échantillons de sols prélevés en surface (horizons labourés) des terres essentiellement agricoles susceptibles de recevoir des épandages de boues de station d'épuration urbaine. Cela concerne des parcelles agricoles très diverses mais qui doivent correspondre aux critères suivants : disposition plane, hors zones à enjeu environnemental (nitrates). D'autres analyses sont parfois également réalisées, liées à la caractérisation agropédologique des échantillons de sols, telles que la granulométrie, le pH, ou encore la matière organique. Toutes ces analyses portent sur la « terre fine » (< 2 mm), ce qui exclut donc tous les « éléments grossiers » de diamètre supérieur à 2 mm (graviers et cailloux).

Ces analyses ont été collectées et répertoriées à partir de la fin des années 1990 dans le cadre d'un projet entre l'Ademe et l'unité INRAE de Sciences du sol d'Orléans (Deslais et Baize, 1997). Le Gis Sol a ensuite repris ce projet et gère aujourd'hui cette base de données nommée BDETM. Différents organismes publics ou privés en charge de ces études sont ainsi sollicités dans le cadre du programme : des maîtres d'ouvrage (collectivités), des maîtres d'œuvre (bureaux d'études ou chambres d'agriculture), des services instructeurs (directions départementales des territoires – DDT) ou des organismes de suivis (chambres d'agriculture, services d'assistance technique aux exploitants des stations d'épuration – SATESE).

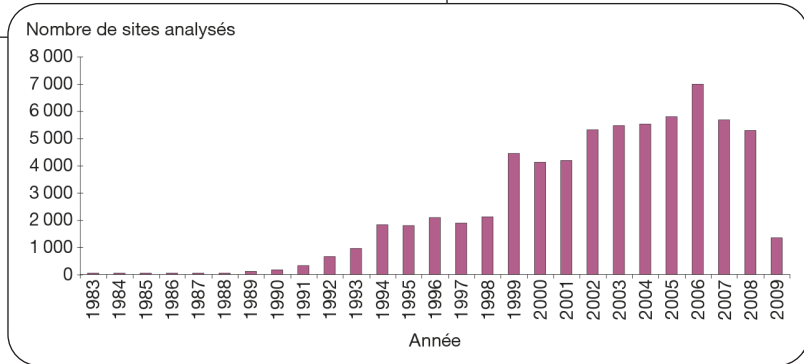
La BDETM contient également des informations sur les prélèvements (localisation géographique, date de prélèvement, organisme responsable de l'étude préalable à l'épandage...) ainsi que sur les analyses (laboratoire, méthode utilisée). La principale hétérogénéité des données récoltées concerne les méthodes analytiques employées par les différents laboratoires pour la détermination des teneurs en ETM, principalement la méthode de mise en solution préalable correspondant à l'extraction totale utilisant un mélange d'acides fort (HF et HClO₄) et à l'extraction « pseudo-totale » à l'eau régale (HNO₃ et HCl). Ces informations sont nécessaires afin de pouvoir comparer les résultats, puisque les deux méthodes peuvent donner des teneurs différentes suivant les sols et les éléments considérés.

5. <https://data.inrae.fr/dataverse/gissol>

Les données du programme ASPITET⁶ (Baize, 1997 ; 2000) ont été intégrées au sein de la BDETM. Ces analyses proviennent de 382 sites distincts en France (sols cultivés et forestiers), dans une quarantaine de départements. Cependant, ils sont irrégulièrement répartis sur le territoire national, situés surtout dans la moitié nord du pays et principalement dans le Bassin parisien, au sens large.

La BDETM compte aujourd'hui plus de 73 400 sites référencés, avec un nombre croissant de données collectées depuis les années 1990 (figure 1.2). De plus, des analyses effectuées dans le cadre d'études scientifiques ont été collectées afin d'alimenter la base de données.

Figure 1.2. Nombre total de sites collectés dans la BDETM de 1983 à 2009



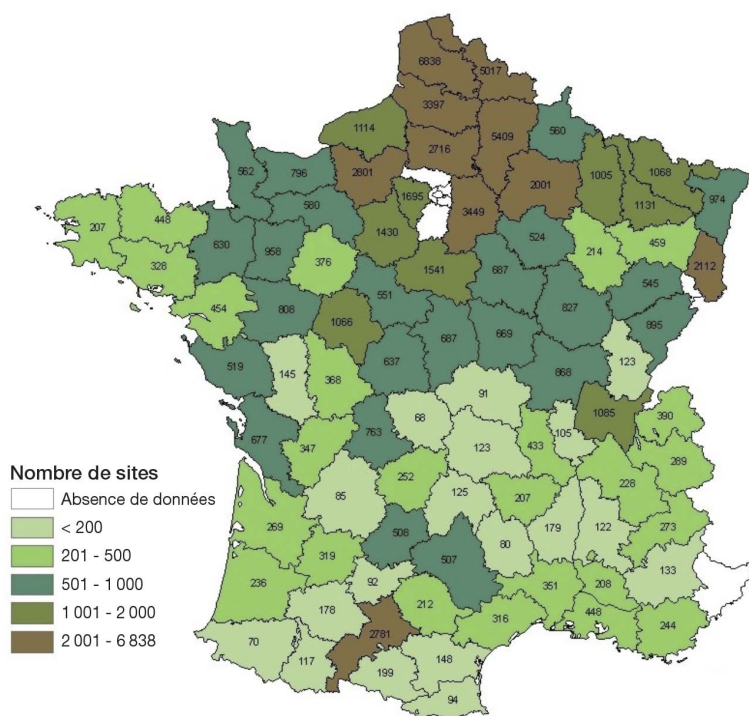
Source : Ademe-INRA

Une grande disparité dans la répartition géographique des sites collectés s'observe à l'échelle du territoire (figure 1.3), elle est principalement liée aux contraintes sur les caractéristiques des parcelles échantillonnées. Cette variabilité s'observe également au niveau des analyses puisque plus de 70 laboratoires différents ont été sollicités. Cependant, la diversité des laboratoires permet de s'affranchir de biais importants liés à des problèmes analytiques que l'on pourrait rencontrer avec un unique laboratoire responsable des analyses.

Au vu du nombre de sites collectés, on peut cependant considérer que ces données apportent des éléments objectifs de comparaison pour toute institution ou tout bureau d'études désirant confronter un résultat d'analyse à différents indicateurs statistiques, en renseignant sur une gamme de variation observée.

6. Apports d'une stratification pédologique à l'interprétation des teneurs en éléments traces.

Figure 1.3. Carte de répartition du nombre de sites référencés dans la BDETM par département



Source : Ademe-INRA

De par leur origine, ces analyses correspondent à des teneurs habituelles des sols agricoles, c'est-à-dire la somme du fond pédogéochimique et des contaminations locales liées aux activités agricoles. Leur traitement a permis la production de cartes des teneurs en éléments traces des sols agricoles français, notamment par interpolation spatiale (krigeage). Les résultats de la BDETM ont ainsi été mis à disposition du public, à travers des web services et des datasets (Saby *et al.*, 2019b). Cependant, aucun outil simple n'existe actuellement pour consulter directement ces données, alors que plusieurs acteurs sont susceptibles d'être intéressés pour divers usages tels que l'établissement des fonds pédogéochimiques pour la gestion des sites pollués ou des terres excavées, mais aussi la connaissance de l'état des sols pour la santé et l'aménagement du territoire. Il est donc essentiel de faciliter leur accès, tout en veillant à respecter la réglementation en matière de diffusion de données puisqu'elles

peuvent être considérées comme des données à caractère personnel et sont soumises au règlement général sur la protection des données (RGPD). Leur diffusion est donc strictement encadrée et nécessite la vérification du respect de ces règles avant toute mise en ligne.

Une nouvelle campagne de collecte de données a démarré en 2023 et devrait permettre de compléter les informations acquises au-delà de 1999.

■ La base de données des analyses de sols urbains (BDSolU)

Pour déterminer de façon uniforme le fond pédogéochimique anthropisé (FPGA) des grandes villes françaises, le BRGM, avec le soutien de l'Ademe, a lancé depuis 2010 la collecte d'analyses de sols en milieu urbain dans le cadre du projet « Établissements de fonds pédogéochimiques urbains – FGU ». À partir de 2014, la BDSolU a été conçue et développée pour regrouper ces analyses (BRGM, 2023).

L'objectif de ce programme est d'apporter un appui aux décideurs et aux aménageurs qui souhaitent mieux connaître la qualité des sols de leur territoire, notamment quand ils sont confrontés à des friches, donc au diagnostic des sols (potentiellement) pollués, et à la valorisation des terres excavées.

Les substances visées peuvent être des molécules organiques dites persistantes dans le temps (HAP, PCB, dioxines et furanes, et désormais les composés perfluorés ou certains principes actifs pharmaceutiques) ou des métaux (plomb, mercure, chrome, cadmium...) et métalloïdes (arsenic, antimoine...).

Comme dans le cas de la BDETM, le projet FGU ne fait pas appel à un programme spécifique de prélèvements et d'analyses : il repose sur la collecte des données existantes ou en cours d'acquisition produites par les collectivités et les organismes acteurs de la gestion des sols urbains (villes, métropoles, ministère, établissements publics fonciers, bureaux d'études, projets d'aménagement, projets de recherche).

Le premier projet contributeur a été conduit à partir de 2008 par le BRGM pour le ministère chargé de l'environnement et consistait à réaliser, sur l'ensemble du territoire national, des diagnostics préventifs des sols dans les établissements accueillant des enfants ou des adolescents (Section thématique Sites et sols pollués du portail InfoTerre du BRGM, 2023).

Les prélèvements contributeurs ne relèvent pas d'un plan d'échantillonnage dans une maille géographique régulière, dans une période déterminée et selon un protocole établi. En outre, le prélèvement d'échantillons de sols en zone urbaine exclut le plus souvent le respect d'une maille d'échantillonnage régulière, en raison de la présence d'immeubles et de la densité des différents réseaux (voies routières, égouts, distribution d'énergie, télécommunications, transports souterrains). Ces contraintes impliquent d'emblée une très forte hétérogénéité – des lieux de prélèvement, des méthodes de sondage, d'échantillonnage et d'analyse – due aux différents objectifs visés, aux différentes pratiques des intervenants et à l'évolution de ces pratiques dans le temps. De plus, les données ainsi recueillies font le plus souvent partie d'études de

diagnostics de sols en lien avec des activités industrielles, potentiellement polluantes. De ce fait, ces contraintes ne sont pas systématiquement les plus représentatives du fond pédogéochimique recherché.

La BDSolU a donc été prévue pour capitaliser de nombreuses informations permettant de distinguer ces différences. Ainsi, elle décrit les différents lieux de prélèvement à différentes échelles géographiques : registres d'occupation du sol dans la ville (nomenclature OCSOL GE⁷) développés par le Centre régional de l'information géographique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (CRIGE-PACA) (CRIGE, 2014) sur la base du standard Corine Land Cover (European Environment Agency, 1995) ; activité au niveau de la parcelle avec les codes NAF (nomenclature d'activités française) développés par l'Insee (Insee, 2021) ; environnement proche dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour du point de prélèvement ; état de la surface du sol au point de prélèvement et, bien entendu, les coordonnées géographiques et altimétriques du point de prélèvement. Les descriptions des sondages (nature des niveaux et matériaux rencontrés, indices organoleptiques) et des échantillons prélevés sont également recueillies dans la base. Les méthodes de sondage (à la pelle, au carottier...), d'échantillonnage (local ou composite), de préparation des échantillons sur site (par exemple, le retrait des grossiers), et enfin de préparation et d'analyse au laboratoire ou sur site sont aussi enregistrées. Dans la plupart des cas, ces dernières informations sont codifiées selon les registres développés par le SANDRE⁸ (SANDRE, 2022).

Le BRGM détermine actuellement, à partir des données BDSolU, les valeurs de fonds pédogéochimiques pour quelques villes et agglomérations de France présentant des effectifs suffisants d'analyses représentatives. Les résultats calculés seront mis à disposition du public début 2024 et assortis d'avertissements sur les conditions générales de leur obtention et les limites de leur utilisation.

À terme, la collecte de nouvelles données devrait se poursuivre et la restitution des fonds pédogéochimiques s'étendre au reste du territoire national. Elles permettront la détermination de valeurs de fond sur des zones géographiques choisies par l'utilisateur selon un mode interactif. Depuis 2018, le projet se poursuit en partenariat avec l'unité Info&Sols d'INRAE et eOde, un bureau d'études basé en Suisse, spécialiste des statistiques et de géostatistique, ainsi qu'avec l'appui de l'École des mines de Paris. La BDSolU est aussi devenue un programme du Gis Sol depuis l'adhésion du BRGM au groupement en 2021. Le projet vise la mise au point d'un outil interactif automatisé de traitement des données, notamment par des méthodes géostatistiques et des rendus cartographiques présentant des plages de couleurs représentatives de FPGA. À l'avenir, plusieurs tâches restent donc à mener comme : l'amélioration de la méthode de sélection et de traitement des données ; la détermination des incertitudes de calcul ; et le développement et l'automatisation de calculs d'interpolation et géostatistique.

7. Occupation du sol à grande échelle.

8. Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau.

État de la contamination des sols français

I Statistiques globales

À partir d'un échantillonnage issu d'une grille systématique (comme celle du RMQS), il est possible d'obtenir des distributions statistiques globales, ainsi que des estimations directes et non biaisées des moyennes par grands ensembles ou domaines géographiques (Brus et Saby, 2016).

Un ensemble de tableaux statistiques a été développé et est disponible en ligne⁹ pour une sélection d'éléments comme les ETM (Saby *et al.*, 2019b), les HAP et les dioxines (Saby *et al.*, 2020). À titre d'exemple, deux tableaux présentent respectivement ces distributions, pour trois éléments traces (tableau 1.3) et pour les HAP (tableau 1.4). Pour ces derniers, le nombre de valeurs en dessous du seuil de détection peut atteindre plus de la moitié des mesures. Dans ce cas, le calcul de la moyenne et de la variance n'est plus adapté (Barnett, 2002). Nous avons privilégié la fourniture d'un ensemble de quantiles (1,5,95 %) en remplaçant les valeurs inférieures au seuil par la moitié du seuil de détection (Orton *et al.*, 2012), pour les HAP notamment.

De nouvelles données de contamination ont été acquises récemment, notamment sur les résidus de pesticides. Dans le cadre d'une convention de recherche avec l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), 47 sols du RMQS sélectionnés parmi les sites des années 2019 et 2020 ont été analysés pour les résidus de pesticides. Au total, 111 substances, majoritairement des substances actives, excepté pour l'acide aminométhylphosphonique ou Ampa (un métabolite du glyphosate), ont été mesurées dans les sols par le laboratoire de physico- et toxico-chimie de l'environnement (LPTC, UMR 5805 EPOC¹⁰, université de Bordeaux). Les résultats de l'étude (figure 1.4) ont été publiés en 2023 (Froger *et al.*, 2023a) et démontrent ainsi la présence de nombreux résidus, jusqu'à 33 substances, dans 98 % des sols, y compris des forêts et prairies non traitées. De plus, certaines substances sont détectées longtemps après leur application sur les parcelles échantillonnées, d'après les registres des agriculteurs, et à des concentrations supérieures à celles attendues.

9. <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>

10. Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux.

Tableau 1.3. Paramètres statistiques des teneurs totales en cuivre, cadmium et plomb dans les sols en France

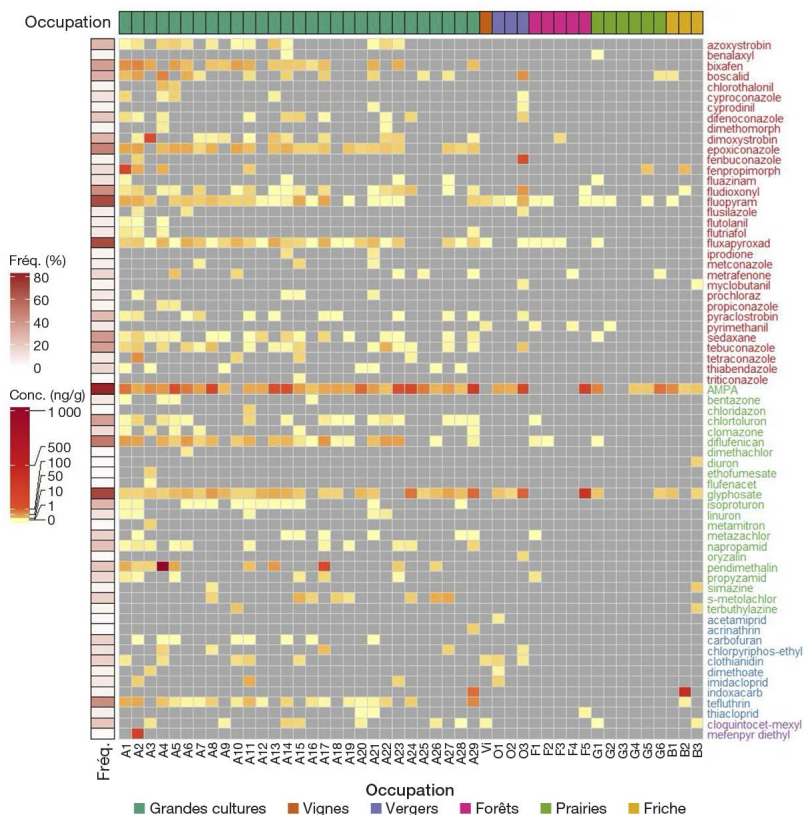
Profondeur d'échantillonnage (en cm)	Nombre de sites RMQS	Moyenne	Médiane	Minimum	q01	q025	q075	q09	q099	Vibrisse (3)
Cuivre 0-30	2144	20,146	13,9	<0,5	5,023	8,67	22,3	35,07	125,14	62
Cuivre 30-50	1775	16,549	12,4	<0,5	4,348	7,705	20	30,3	83,494	56,8
Cadmium 0-30	2144	0,30	0,195	<0001	0,066	0,12	0,33	0,61	1,78	0,95
Cadmium 30-50	1775	0,18	0,113	<0001	0,031	0,060	0,20	0,36	1,19	0,61
Plomb 0-30	2144	32,6	27,8	3,06	16,6	21,2	37,5	49,2	126,6	86,3
Plomb 30-50	1775	26,6	23,0	1,75	12,8	17,4	30,4	42,0	86,6	68,6

Tableau 1.4. Statistiques globales des HAP

	Unité	Médiane	Troisième quart.	Centile 99	Max.	Nombre de Valeur Inf. LQ
Naphtalène	mg/kg	0	0	0,05	1,03	2007
Acénaphthylène	mg/kg	0	0	0,09	0,53	2060
Acénaphthène	mg/kg	0	0	0,01	0,16	2095
Fluorène	mg/kg	0	0	0,02	0,25	1902
Phénanthrène	mg/kg	0,01	0,02	0,17	3,47	965
Anthracène	mg/kg	0	0	0,03	0,56	1959
Fluoranthène	mg/kg	0,01	0,03	0,27	6,08	946
Pyrène	mg/kg	0	0,02	0,22	4,37	1145
Benzo(a)anthracène	mg/kg	0	0,01	0,13	2,18	1578
Chrysène	mg/kg	0	0	0,19	4,14	1955
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg	0	0,02	0,17	2,22	1105
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg	0	0,01	0,09	1,46	1314
Benzo(a)pyrène	mg/kg	0	0,01	0,15	1,73	1480
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg	0	0,01	0,12	1,83	1479
Dibenzo(a,h)anthracène	mg/kg	0	0	0,06	1,13	1986
Benzo(g,h,i)pérylène	mg/kg	0	0	0,14	1,53	1998
TEQ (total_équivalent_toxique_OMS_2005)	mg/kg	0,01	0,02	0,19	2,49	0
Total	mg/kg	0,16	0,22	1,7	31,67	0

Source : <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesmqds/>

Figure 1.4. Représentation graphique des teneurs en pesticides (au centre) en ng/g dans les différents sols échantillonnés (abscisse) organisés par occupation du sol (en haut) et par type de substances (ordonnées à droite) : fongicides (rouge), herbicides (vert), insecticides ou acaricides (bleu), phytoprotecteurs (violet). La fréquence de détection des substances (en %) est représentée sur l'axe gauche des ordonnées.



Source : Froger *et al.* (2023a)

I Statistiques locales

À partir des données BDSolU, il est possible d'obtenir les statistiques de base ainsi qu'une valeur définissant la limite supérieure du fond pédogéochimique urbain (choisie comme étant la vibrisse interne de Tukey [1977]) pour une zone géographique donnée. Les résultats obtenus pour les sols de surface de deux villes A et B sont présentés pour les ETM (plomb et arsenic) et les HAP, respectivement dans les tableaux 1.5 et 1.6.

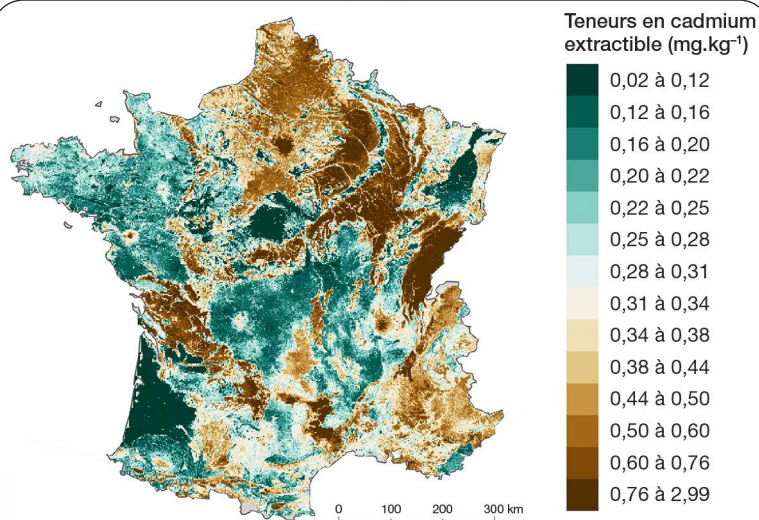
Ces résultats montrent la forte variabilité des concentrations habituelles observées dans les sols urbains des différentes villes, à l'échelle locale de chaque ville, et par rapport aux sols agricoles précédemment décrits, que ce soit pour les éléments traces ou les contaminants organiques comme les HAP.

I Cartographie des contaminants

ETM : spatialisation et FPGA

Les données obtenues dans les différents programmes du Gis Sol, notamment le RMQS, ont permis la construction de cartes spatialisées à l'échelle du territoire métropolitain¹¹. Des méthodes basées sur la théorie des géostatistiques ont ainsi été utilisées (Webster et Oliver, 2000) ainsi que des techniques de cartographie numérique (McBratney *et al.*, 2003), afin de spatialiser au mieux les teneurs observées sur le territoire (figures 1.5 et 1.6).

Figure 1.5. Teneurs en cadmium extractible des sols de surface (0-30 cm) en France : prédiction



Source : Gis Sol, 2019

11. <https://www.gissol.fr/donnees/cartes>

Tableau 1.5. Paramètres statistiques des teneurs en plomb et arsenic dans les sols urbains de surface (0-30 cm) de deux villes A et B en France (mg/kg)

Ville	Nombre de sites	Moy.	Méd.	Min.	q10	q25	q75	q90	q95	Max.	Vibrisse
Plomb	A	116	105,0	88,0	7,43	32,0	46,5	140,0	230,0	260,0	445,0
	B	38	275,0	98,0	7,8	38,7	49,2	213,0	288,0	788,0	3 400,0
Arsenic	A	116	8,8	9,0	3,0	7,0	7,2	10,0	11,0	12,0	22,0
	B	38	10,0	9,2	1,2	5,9	7,6	14,0	19,0	20,0	21,0
											24,0

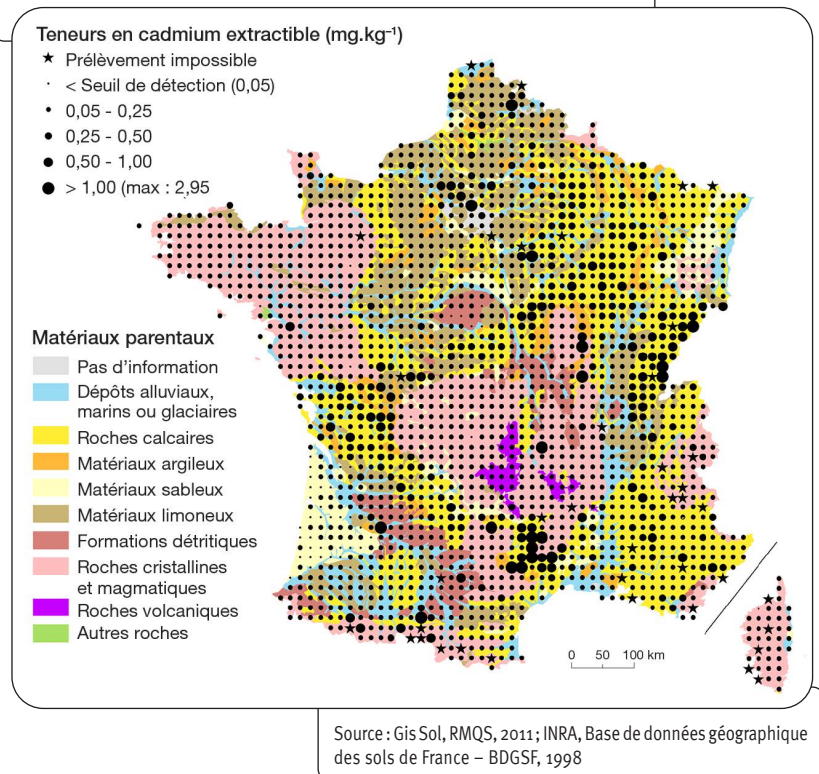
Tableau 1.6. Paramètres statistiques des teneurs en HAP dans les sols urbains de surface (0-30 cm) des villes A (pour 116 sites) et B (pour 38 sites) en France (mg/kg)

	Ville	Moy.	Méd.	Min.	q10	q25	q75	q90	q95	Max.	Vibrisse	Nombre val. < LQ
Naphtalène	A	0,02	0,01	0,01	0,001	0,003	0,01	0,03	0,03	0,44	0,03	89,00
	B	0,06	0,03	0,01	0,002	0,011	0,05	0,14	0,41	0,41	0,11	89,00
Acénaphthylène	A	0,03	0,01	0,01	0,002	0,006	0,03	0,05	0,08	0,24	0,05	62,00
	B	0,07	0,03	0,01	0,003	0,011	0,05	0,14	0,47	0,47	0,11	84,00
Acénaphthène	A	0,01	0,01	0,01	0,001	0,003	0,01	0,02	0,05	0,16	0,02	88,00
	B	0,09	0,03	0,01	0,002	0,011	0,05	0,15	0,74	0,74	0,11	86,00
Fluorène	A	0,01	0,01	0,01	0,001	0,003	0,01	0,02	0,06	0,16	0,02	88,00
	B	0,09	0,03	0,01	0,002	0,011	0,05	0,14	0,75	0,75	0,11	89,00
Phénanthrène	A	0,18	0,07	0,01	0,030	0,040	0,12	0,26	0,94	2,40	0,24	8,00
	B	0,22	0,10	0,01	0,011	0,033	0,22	0,82	0,93	1,10	0,49	36,00
Anthracène	A	0,06	0,02	0,01	0,004	0,011	0,05	0,10	0,19	0,99	0,11	47,00
	B	0,05	0,03	0,01	0,004	0,013	0,07	0,12	0,13	0,15	0,15	76,00
Fluoranthène	A	0,48	0,18	0,02	0,08	0,110	0,39	0,80	2,20	5,20	0,81	1,00
	B	0,46	0,23	0,03	0,05	0,120	0,44	1,20	2,00	2,90	0,93	10,00

Pyrène	A	0,38	0,16	0,01	0,064	0,089	0,32	0,64	1,80	3,90	0,68	0,00
	B	0,34	0,17	0,03	0,050	0,081	0,33	0,93	1,50	2,40	0,70	13,00
Benzo(a)anthracène	A	0,26	0,11	0,01	0,050	0,066	0,22	0,39	1,10	2,90	0,45	2,00
	B	0,20	0,09	0,01	0,017	0,033	0,20	0,35	1,10	1,20	0,45	28,00
Chrysène	A	0,24	0,11	0,01	0,050	0,071	0,21	0,36	1,10	2,30	0,43	2,00
	B	0,28	0,16	0,02	0,050	0,066	0,32	0,88	1,00	1,30	0,70	23,00
Benzo(b)fluoranthène	A	0,38	0,19	0,01	0,073	0,120	0,34	0,63	1,40	3,50	0,67	0,00
	B	0,31	0,18	0,05	0,050	0,076	0,35	0,76	1,40	1,60	0,76	18,00
Benzo(k)fluoranthène	A	0,16	0,08	0,01	0,030	0,049	0,13	0,24	0,62	1,50	0,25	3,00
	B	0,11	0,05	0,01	0,006	0,022	0,13	0,18	0,72	0,81	0,29	42,00
Benzo(a)pyrène	A	0,27	0,14	0,01	0,050	0,081	0,23	0,40	1,00	2,70	0,45	1,00
	B	0,25	0,13	0,01	0,017	0,040	0,28	0,63	1,30	1,80	0,64	26,00
Indéno (1,2,3-cd)pyrène	A	0,20	0,11	0,01	0,048	0,060	0,17	0,32	0,76	1,80	0,34	3,00
	B	0,29	0,15	0,04	0,050	0,066	0,24	0,90	1,10	1,50	0,49	21,00
Dibenzo(a,h)anthracène	A	0,04	0,02	0,01	0,002	0,007	0,04	0,09	0,16	0,43	0,09	72,00
	B	0,11	0,04	0,02	0,004	0,016	0,09	0,21	0,82	0,82	0,21	76,00
Benzo(g,h,i)pérylène	A	0,20	0,11	0,01	0,040	0,060	0,17	0,35	0,73	1,70	0,34	6,00
	B	0,23	0,15	0,04	0,050	0,055	0,27	0,47	0,90	1,30	0,59	23,00
Total 16 HAP	A	2,93	1,33	0,18	0,527	0,779	2,45	4,70	12,22	30,32	4,99	
	B	3,15	1,59	0,32	0,369	0,665	3,14	8,02	15,27	19,25	6,84	
Total 16 HAP (TEQ)*	A	0,42	0,21	0,03	0,073	0,119	0,36	0,66	1,57	4,16	0,72	
	B	0,46	0,22	0,04	0,035	0,077	0,47	1,08	2,58	3,17	1,07	

* TEQ: Total équivalent toxique, d'après Nisbet et LaGoy (1992) in Ineris (2003).

Figure 1.6. Teneurs en cadmium extractible des sols de surface (0-30 cm) en France : valeurs mesurées au point RMQS

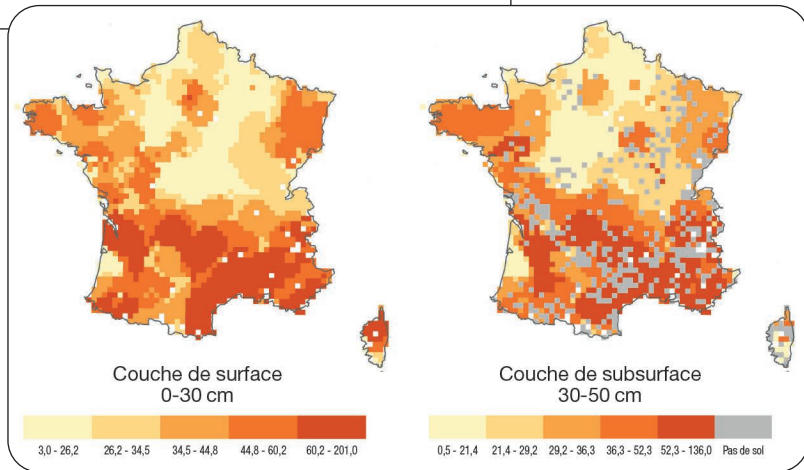


De nombreux produits opérationnels sous forme de fichier raster sont disponibles sur la plateforme de dataverse Gis Sol¹² et librement téléchargeables. Il est possible d'accéder aux prédictions spatiales à une résolution de 1000 m sur les concentrations totales de 10 ETMs et métalloïdes (As, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn) (Saby *et al.*, 2018a). Ces travaux de cartographie des contaminants au niveau national ont été menés notamment pour répondre aux enjeux de la gestion des sites et sols pollués. L'objectif était de fournir une cartographie des « teneurs habituelles » qui se définit comme le cumul du fond pédogéochimique et d'une éventuelle contamination diffuse. Cet indicateur correspond à des valeurs de FPGA. L'établissement de cet indicateur doit ainsi permettre la détection d'une teneur en un élément trace ayant une valeur suspecte, tout en tenant compte du contexte local. Villanneau *et al.* (2008) ont proposé d'établir

12. <https://data.inrae.fr/dataverse/gissol>

cet indicateur à partir d'une limite supérieure de ces teneurs habituelles à l'aide de vibrisses calculées localement à partir des valeurs disponibles dans un voisinage (figure 1.7). Cette approche a en effet l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre, mais elle ignore la présence des possibles corrélations spatiales. Ces données sont également disponibles en ligne (Saby *et al.*, 2018b).

Figure 1.7. Vibrisses du cuivre total contenu dans les sols de surface (0-30 cm) (à gauche) et de subsurface (30-50 cm) (à droite) en France



Source : Villanneau *et al.* (2008)

Ces travaux de spatialisation sont également en cours à partir des données de la BDSolU. Cependant, en milieu urbain, cette spatialisation peut être rendue difficile du fait de l'irrégularité de la répartition spatiale des points de prélèvement, ce qui peut biaiser les résultats en donnant plus de poids à une zone géographique qu'à une autre présentant une moindre densité de prélèvements. Il faut donc dégrouper les points de prélèvement, notamment en tenant compte de la densité des points de prélèvement dans une grille arbitraire (méthode dite « à fenêtre » ; Sauvaget, 2022). Par ailleurs, certains composés et éléments présentent parfois des concentrations très faibles, inférieures aux limites de quantification des méthodes d'analyse. Or, dans la mesure où les fonds pédogéochimiques recherchés peuvent se situer à des niveaux de valeurs faibles ou très faibles, il est indispensable de conserver et d'exploiter ces résultats inférieurs aux limites de quantification. Les ignorer ou les substituer par la limite de quantification, comme cela est souvent pratiqué, conduirait à un biais statistique important (Helsel, 2005). Il est donc fait appel à une méthode de discrétisation d'une loi entre 0 et la limite de quantification. Elle vient compléter l'algorithme de traitement des données et

permet de reconstituer la population d'analyses entre ces bornes (Fouquet, 2022). De par leur origine, les jeux de données obtenus peuvent également présenter des valeurs élevées en raison d'anomalies locales naturelles ou anthropiques, ce qui impacte la spatialisation. Il s'agit donc d'opérer une sélection dans les données disponibles pour obtenir des jeux de données représentatifs et des populations présentant des résultats homogènes, même si quelques valeurs extrêmes (ou *outliers*) peuvent subsister. D'une manière générale, les spécificités du contexte urbain font que la prise en compte des incertitudes dans l'établissement des cartes de fonds pédogéochimiques y revêt une importance toute particulière (Belbèze *et al.*, 2023).

Contaminants organiques : le cas du lindane et des HAP

Parmi les contaminants organiques suivis lors de la campagne du RMQS, on trouve notamment des contaminants organiques classés dans la famille des polluants organiques persistants (POP). Cette famille regroupe des polluants présentant des caractéristiques communes de persistance, de bioaccumulation, de toxicité et de mobilité dans l'environnement. Plusieurs de ces POP ont été mesurés dans les sols français (tableau 1.2 p. 23), notamment le lindane, un herbicide interdit depuis 1993 en France ou encore les HAP, composés organiques produits lors de la combustion de matière organique et classés comme cancérigènes.

Les données obtenues ont ainsi permis la cartographie de ces contaminants lors de projets de recherche et ont fait l'objet de publications. Orton *et al.* (2012) ont ainsi publié la première carte de prédiction de la distribution du lindane dans les sols (figures 1.8 et 1.9), et les travaux de Froger *et al.* (2021), en partenariat avec l'École des mines ParisTech, ont permis la production d'une carte spatialisée sur la distribution de la somme des HAP dans les sols français (figures 1.8 et 1.9). Ces résultats ont ainsi démontré la variabilité spatiale des contaminants organiques dans les sols, et posent la question des risques pour l'environnement et les populations.

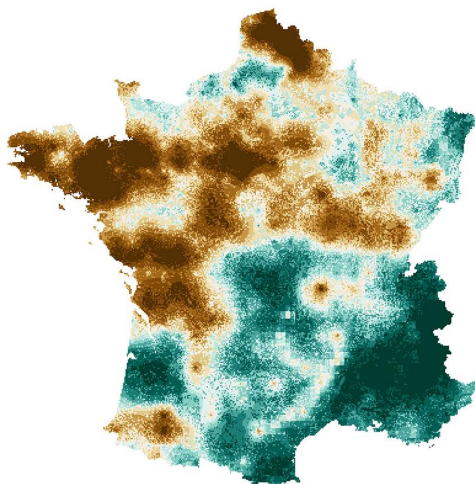
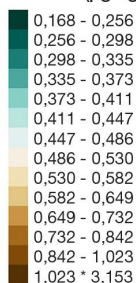
Impact sanitaire et environnemental

La comparaison des concentrations dans les sols avec des valeurs seuils de références permet d'évaluer les risques pour l'Homme et l'environnement. En France, pour certaines substances, des seuils sanitaires sont établis sur la base d'une évaluation des risques pour la santé. Des valeurs seuils sont aussi proposées dans la littérature internationale. Il est ainsi possible d'identifier les concentrations au-delà desquelles un sol peut être considéré comme contaminé. L'un des indicateurs spatiaux possible pour représenter une potentielle contamination consiste à estimer la probabilité d'un sol de dépasser un seuil spécifique.

Dans le cas du lindane, la concentration limite choisie est celle de $5 \mu\text{g.kg}^{-1}$ d'après des travaux de Crommentuijn *et al.* (2000) aux Pays-Bas. Cette concentration limite

Figure 1.8. Prédiction des concentrations de lindane dans les sols métropolitains

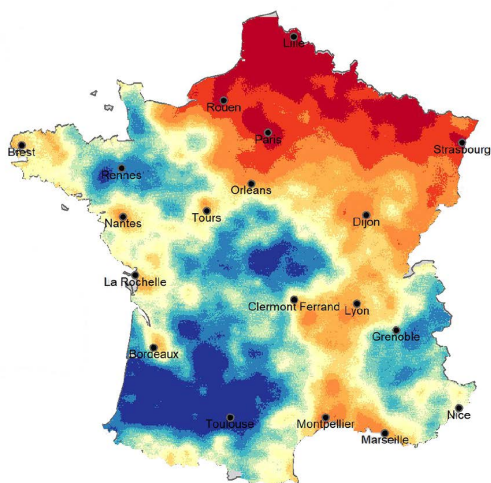
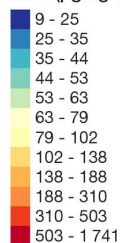
Lindane ($\mu\text{g.kg}^{-1}$)



Source : Orton *et al.* (2012)

Figure 1.9. Prédiction de la somme des HAP dans les sols métropolitains

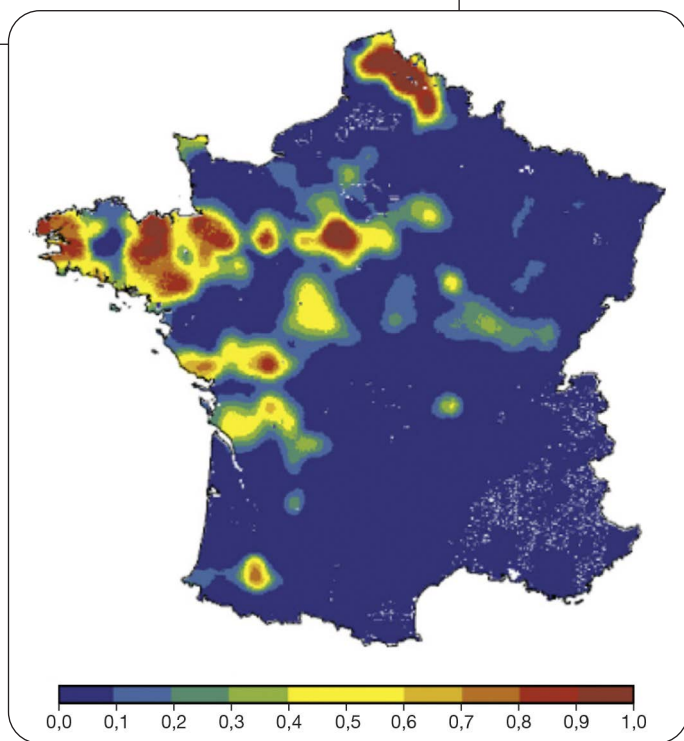
HAP ($\mu\text{g.kg}^{-1}$)



Source : Froger *et al.* (2021)

est basée sur un sol avec une teneur en carbone organique de 10 %, un modèle de régression linéaire a donc été utilisé pour adapter ce seuil aux sols français. Dans le cas des HAP, le seuil de $100 \mu\text{g.kg}^{-1}$ considéré notamment au Canada (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2010) a été utilisé pour calculer une probabilité de dépasser cette limite dans les sols à partir des résultats spatialisés. Les cartes obtenues de probabilité de dépasser les seuils de références sont présentées dans les figures 1.10 et 1.11.

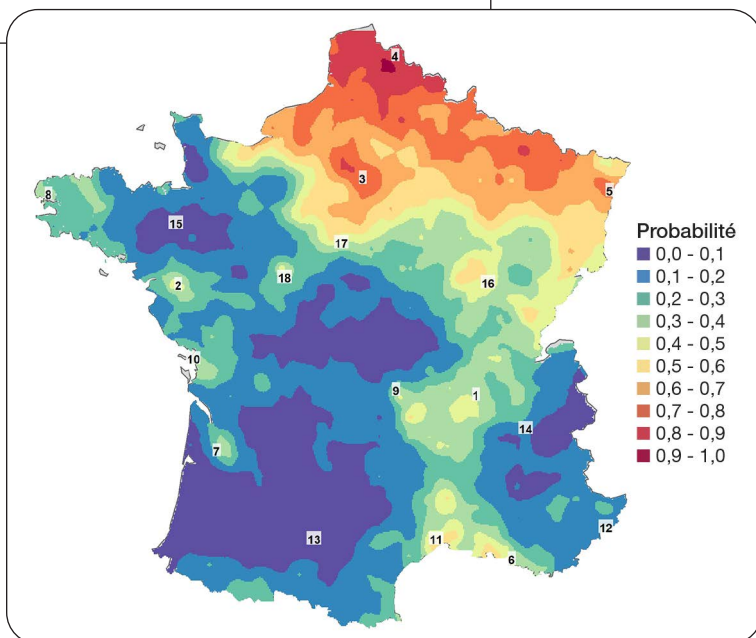
Figure 1.10. Probabilité de dépasser la valeur seuil dans les sols pour le lindane



Source : Orton *et al.* (2012)

L'intérêt d'intégrer la contamination des sols dans les études d'évaluation des risques pour la santé et l'environnement est notamment illustré par les travaux de recherche de Froger *et al.* (2021). Dans ce travail, une évaluation des risques a été conduite à partir des données réelles (à chaque point de mesure) en considérant comme voies d'exposition directe des populations locales : l'ingestion de sol, l'inhalation de particules

Figure 1.11. Probabilité de dépasser la valeur seuil dans les sols pour les HAP

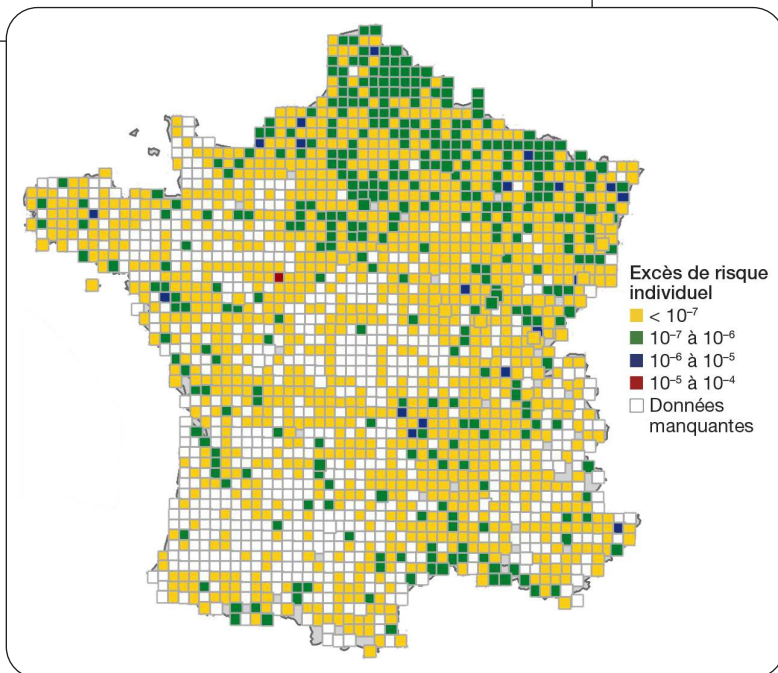


Source : Froger *et al.* (2021)

contaminées et l'absorption par voie cutanée. L'indice de risque obtenu, appelé « excès de risque individuel », traduit le risque de contracter un cancer à la suite d'une exposition chronique aux HAP dans les sols (figure 1.12). Il est généralement considéré comme négligeable en dessous de 10^{-6} , c'est-à-dire une probabilité qu'une personne sur un million soit atteinte d'un cancer du fait de la contamination. Ces résultats démontrent également la forte disparité géographique des risques, plus élevés dans le nord de la France où les populations sont également exposées à la présence de métaux lourds liée au passé industriel de la région.

Plus récemment, dans le contexte des travaux sur les résidus de pesticides dans les sols, une évaluation des risques chroniques pour les vers de terre a été menée (Froger *et al.*, 2023a). Des quotients de risque individuel ont été calculés pour chaque substance en utilisant les valeurs de Non Observable Effect Concentration (NOEC) issues de la Pesticide Properties Database (Lewis *et al.*, 2016), avec un facteur de sécurité de 10. Le cumul des risques individuels a permis d'établir un risque cumulé pour les vers de terre dans chacun des sols prélevés, qui s'avère modéré à fort dans les parcelles cultivées (figure 1.13).

Figure 1.12. Excès de risque individuel pour les populations lié à l'exposition aux HAP dans les sols en France



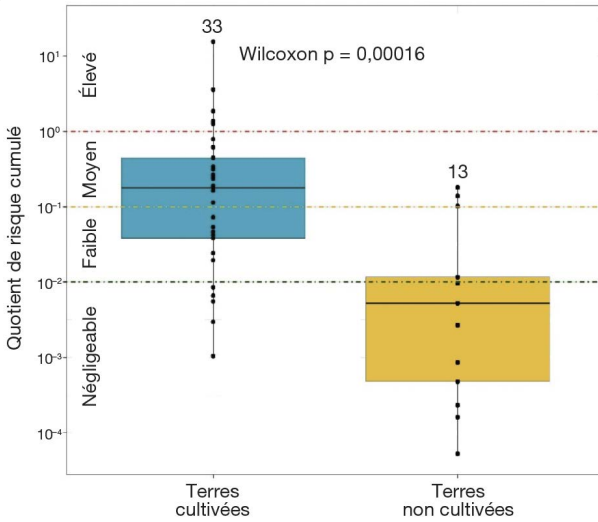
Source : Froger *et al.* (2021)

Ces résultats démontrent l'importance de s'intéresser aux contaminants dans les sols et de leurs impacts sur les écosystèmes et la santé humaine. Dans le futur, l'intégration de composés récemment identifiés comme potentiellement problématiques (composés perfluoroalkylés et polyfluoroalkylés – PFAS, microplastiques...) sera essentielle, et l'utilisation des réseaux de surveillance nationaux pour conduire ces surveillances de nouveaux composés semble indispensable.

Conclusion et perspectives

Les programmes du Gis Sol, mis en place il y a plus de vingt ans, ont permis de collecter des informations sur la présence de contaminants dans les sols en France, principalement les sols agricoles et forestiers. Ces données nationales s'avèrent désormais indispensables pour connaître l'état des sols (notamment le fond pédogéochimique) et évaluer les potentiels risques pour l'environnement et la santé humaine.

Figure 1.13. Risque de toxicité chronique cumulée pour les vers de terre



Source : Froger *et al.* (2023a)

Depuis 2021, le BRGM est membre du Gis Sol et la BDSolU est devenue l'un de ses programmes, apportant des connaissances sur les sols urbains et périurbains, et venant compléter les informations nationales sur les sols. Dans ce contexte, le BRGM et INRAE travaillent à l'interopérabilité des données des deux bases qui couvrent des espaces géographiques différents. Ces espaces se rejoignent et se complètent à la périphérie des villes, leur valorisation croisée permettrait de mieux cartographier la qualité des sols des villes et de leur pourtour. L'accroissement de données dans la BDSolU est essentiel car il permettra à terme de disposer d'une vision nationale de la qualité des sols urbains, dont les teneurs apparaissent très différentes de celles des sols agricoles ou forestiers, compte tenu de l'activité humaine passée et actuelle.

La distinction entre le fond pédogéochimique naturel et la contamination anthropique est capitale pour définir des niveaux de contamination des sols et déclencher des actions publiques. Si ces données sont accessibles à travers différents moyens de consultation, elles doivent être plus largement diffusées et utilisées : elles restent finalement encore assez peu connues d'autres publics comme les médecins ou les évaluateurs des risques, alors même que certains travaux ont montré leur utilité, notamment ceux pour évaluer des inégalités environnementales¹³.

13. <https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/tous-dossiers-thematiques/inegalites-environnementales>

Les demandes pour connaître l'état de la contamination des sols par des molécules émergentes telles que les perturbateurs endocriniens, les PFA ou les pesticides sont croissantes. Compte tenu de la place centrale des sols dans les écosystèmes, puisqu'ils sont à la fois récepteurs et potentielles sources de contaminants dans l'environnement, la surveillance des sols doit être accrue et de nouvelles molécules doivent être ajoutées à la liste de celles déjà suivies.

Le développement et la généralisation de nouvelles technologies d'analyses (telles les analyses non ciblées, Huang *et al.*, 2022 ; 2023) permettront dans les années à venir d'acquérir un nombre croissant de données sur la contamination des sols et de pouvoir identifier les risques associés en lien avec la gestion et les pratiques, qui sont d'une importance capitale notamment pour les politiques de santé publique.

Références bibliographiques

- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N., Grolleau E., 2003. Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) en France, *Étude et gest. des sols*, 10 (4), 241-250.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N. P. A., Grolleau E., 2002. A New Initiative in France: A Multi-Institutional Soil Quality Monitoring Network, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 88, 93-103.
- Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Oudou C., 2022. Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années, *Étude et gest. des sols*, 29, 365-379.
- Baize D., 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France) : Références et stratégies d'interprétation*. Programme ASPITET, 1-410.
- Baize D., 2000. Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET, INRAE, *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 39, février, 39-54.
- Barnett V., 2002. *Sample survey: Principles and Methods*. London, Arnold.
- Belbèze S., Rohmer J., Négrel P., Guyonnet D., 2023. Defining urban geochemical backgrounds: a review and proposals for addressing uncertainties, *Journal of Geochemical Exploration*, 254, 107298.
- BRGM, 2023. Site internet BDSolU.fr - <http://www.bdsolu.fr/>
- Brus D. J., 2014. Statistical sampling approaches for soil monitoring, *Eur. J. Soil Sci.* 65, 779-791. <https://doi.org/10.1111/ejss.12176>
- Brus D. J., Saby N. P. A., 2016. Approximating the variance of estimated means for systematic random sampling, illustrated with data of the French Soil Monitoring Network, *Geoderma*, 279, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.016>
- Canadian Council of Ministers of the Environment, 2010. *Canadian Soil Quality Guidelines: Carcinogenic and Other PAHs (Environmental and Human Health Effects)*. Scientific Criteria Document (revised), 216 p.
- Commission européenne, 2002. *Communication de la Commission du 16 avril 2002 au Conseil, au Parlement européen, au Comité économique et social et au Comité des régions : Vers une stratégie thématique de protection des sols*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0179:FIN:EN:PDF>

- CRIGE, 2014. BD Ocsol PACA, base de données régionale d'occupation des sols <https://www.crige-paca.org/projets/bd-ocsol-paca/>
- Commenttijn T., Sijm D., De Bruijn J., Van Leeuwen K., Van de Plassche E., 2000. Maximum permissible and negligible concentrations for some organic substances and pesticides, *J. Environ. Manage.*, 58, 297-312. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0334>
- Deslais W., Baize D., 1997. Étude des éléments traces dans les sols agricoles français. Un programme Ademe/INRA. In : *Journées Techniques*.
- European Environment Agency, 1995. Corine Land Cover <https://www.eea.europa.eu/publications/CORO-landcover>
- FAO, UNEP, 2021. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>
- Fouquet (de) C., 2022. Vibrisse de Tukey et limites de quantification – Note interne Mines Paris-Tech établie dans le cadre du projet « Établissement de fonds pédogéochimique urbain (FGU), 3^e convention (2019-2023) », 8 p.
- Froger C., Jolivet C., Budzinski H., Pierdet M., Caria G., Saby N. P. A., Arrouays D., Bispo A., 2023a. Pesticide Residues in French Soils: Occurrence, Risks, and Persistence, *Environ. Sci. Technol.*, 57, 7818-7827. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09591>
- Froger C., Pelfrène A., Volatier J.-L., Roussel H., Marot F., Brunet J., Saby N. P. A., Bispo A., 2023b. L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé : les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche, *Étude et gest. des sols*, 30, 235-252.
- Froger C., Saby N. P. A., Jolivet C. C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., De Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A., 2021. Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils, *Soil*, 7, 161-178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- Gis Sol, 2011. *L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*. 188 p. <https://www.gissol.fr/publications/rapport-sur-letat-des-sols-de-france-2-849>
- Helsel D. R., 2005. Nondetects and Data Analysis: Statistics for Censored Environmental Data. New York, John Wiley and Sons, 288 p.
- Huang D., Gao L., Zhu S., Qiao L., Liu Y., Ai Q., Xu C., Wang W., Lu M., Zheng M., 2023. Target and non-target analysis of organochlorine pesticides and their transformation products in an agrochemical-contaminated area, *Chemosphere*, 324, 138314. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138314>
- Huang D., Gao L., Zheng M., Qiao L., Xu C., Wang K., Wang S., 2022. Screening organic contaminants in soil by two-dimensional gas chromatography high-resolution time-of-flight mass spectrometry: A non-target analysis strategy and contaminated area case study, *Environmental Research*, 205, 112420.
- Ineris, 2003. *Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs). Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges. Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)*. Rapport final. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/HAP_4.pdf
- Insee, 2021. Nomenclature d'activités française. <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>
- Institut national de la recherche agronomique, Association marnaise de développement agricole et viticole, Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), chambre départementale d'agriculture des Ardennes, chambre départementale d'agriculture de l'Aube et chambre départementale d'agriculture du Calvados, chambre départementale d'agriculture de Charente, chambre départementale d'agriculture de Charente-Maritime, chambre départementale d'agriculture du Cher, chambre départementale d'agriculture de Corrèze, 2021. *Analyses physico-chimiques des sites du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) du territoire métropolitain pour la 1^{re} campagne (2000-2009), avec coordonnées théoriques*. Recherche Data Gouv, V 2. <https://doi.org/10.15454/QSXXGA>

- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger É., Soler-Dominguez N., 2018. *Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine, 2016-2027*. Version 3, INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, France.
- Lewis K. A., Tziliakis J., Warner D. J., Green A., 2016. An international database for pesticide risk assessments and management, *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.*, 22, 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping, *Geoderma*, 117, 3-52.
- Meersmans J., Martin M. P., De Ridder F., Lacarce E., Wetterlind J., De Baets S., Le Bas C., Louis B. P., Orton T. G., Bispo A., Arrouays D., 2012. A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France, *Agron. Sustain. Dev.*, 32, 873-888. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0085-x>
- Orton T. G., Saby N. P. A., Arrouays D., Jolivet C. C., Villanneau E. J., Marchant B. P., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O., 2012. Spatial distribution of Lindane concentration in topsoil across France, *Sci. Total Environ.*, 443, 338-350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.103>
- Saby N., Villanneau E., Toutain B., Arrouays D., 2018b. Seuils de détection d'anomalies pour 8 éléments traces métalliques (RMQS). Recherche data Gouv, V3. <https://doi.org/10.15454/UEZXBY>
- Saby N., Bertouy B., Boulonne L., Toutain B., Caria G., Jolivet C. A., 2019a. Summary statistics of Permanent Organic Pollutants concentration in French topsoils. <https://doi.org/doi:10.15454/LQVMNN>
- Saby N., Baize D., Duigou N., Toutain B., Arrouays D., 2019b. Statistiques spatio-temporelles par petite région agricole des teneurs en ETM et de propriétés pédologiques issues d'observations collectées dans le cadre du programme BDETM. Gis Sol Dataverse. <https://doi.org/10.15454/4GNNOS>
- Saby N., Bertouy B., Boulonne L., Bispo A., Ratié C., Jolivet C., 2020. Statistiques sommaires issues du RMQS sur les données agronomiques et en éléments traces des sols français de 0 à 50 cm. <https://doi.org/doi:10.15454/BNCXYB>
- Saby P. A. N., Marchant B. P., Arrouays D., Jolivet C., 2018a. Spatial predictions of total and exchangeable trace elements content in France. Recherche data Gouv, V3. <https://doi.org/10.15454/VN9F6H>
- Saby P. A. N., Marchant B. P., Lark R. M., Jolivet C. C., Arrouays D., 2011. Robust geostatistical prediction of trace elements across France, *Geoderma*, 162, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.001>
- SANDRE, 2022. Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau. <https://www.sandre.eaufrance.fr/>
- Sauvaget B., de Fouquet C., Le Guern C., Renard D., Roussel H., 2022. Geostatistical filtering to map a 3D anthropogenic pedo-geochemical background for excavated soil reuse, *Journal of Geochemical Exploration*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107031>
- Section thématique Sites et Sols pollués du portail InfoTerre du BRGM, 2023. Démarche établissements sensibles. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/demarche-etablissements-sensibles>
- Tukey J. W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N., Jolivet C., Marot F., 2008. Détection de valeurs anormales d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de mesure de la qualité des sols, *Étude et Gestion des Sols*, 15 (3), 183-200.
- Webster R., Oliver M., 2007. *Geostatistics for environmental scientists*, 2nd Edition. Chichester UK, John Wiley & Sons Ltd.

2. Les études historiques dans le contexte des sites et sols pollués

Thierry Blondel

Introduction

Avant d'aménager un terrain dans un contexte anthropisé, de réhabiliter un site en déshérence ou de reconverter une parcelle urbanisée en parc ou en jardin, une étude historique et documentaire en lien avec le « passif d'usage ou d'occupation » du site doit être menée dans les règles de l'art.

Ainsi, afin d'éviter les « mauvaises surprises » et se prémunir d'éventuels risques sanitaires et environnementaux, et également d'éventuels contentieux, « il faut mener l'enquête pour dissiper les doutes » ; en résumé : « avant de creuser le sol, il faut creuser l'histoire du site ».

En France, en l'absence de loi sur les sols et de normes définissant ce que serait un sol sain ou acceptable pour chaque type d'usage, la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués¹, avec ses guides associés, basée sur l'approche « gestion du risque selon l'usage » et dont la dernière version révisée date d'avril 2017, ainsi que les codifications de prestations reportées dans la norme Afnor X31-620 en cinq parties de décembre 2021, définissent les prérequis, les moyens et les démarches à mettre en œuvre pour caractériser puis gérer au besoin les problématiques de pollution de tous types de sites.

Les études préalables

■ L'étude historique, documentaire et mémorielle

Sur les parcelles rurales ou urbaines potentiellement à risques, de par leur passif environnemental, une étude historique, documentaire et mémorielle bien menée est à la base de tout diagnostic de pollution.

Il faut en premier lieu réaliser la visite des parcelles, repérer sur plan les différentes occupations actuelles et passées (bâties en place, zones de stockages, présence de cuves, de fosses, de puits, de sous-sols, de parkings, etc.), repérer les regards et les réseaux enterrés, et bien entendu consulter en rentrant du terrain les cartes topographiques, le cadastre et les photos aériennes récentes et anciennes prises au droit du site concerné (Géoportail de l'IGN, Google Earth), les archives locales et régionales,

1. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-02/intro_methodo_ssp_2017.pdf

les bases de données disponibles en ligne (Géorisques avec BASIAS²-BASOL³, BARPI⁴). Il faut y passer deux, trois jours ou plus si nécessaire.

Creuser ainsi l'histoire d'un site ou d'une parcelle n'est certainement pas du temps perdu, bien au contraire. Toute pollution de sol révélée tardivement génère des retards et surtout des surcoûts dans les projets d'aménagement, sans parler ici des risques sanitaires potentiels pour les intervenants découvrant « fortuitement » des problématiques de pollution lors de travaux d'excavations, par exemple.

■ L'étude de vulnérabilité

Concernant l'étude de vulnérabilité d'un site, qui vient normalement à la suite des études historiques, documentaires et mémorielles, il convient bien entendu de consulter les cartes géologiques et hydrogéologiques du secteur étudié (BRGM), ainsi que les données disponibles sur les eaux superficielles et souterraines, sans oublier de compulser autant que nécessaire les suivis quantitatifs et qualitatifs de la ressource en eau, ainsi que les publications technico-scientifiques afférentes (ADES⁵, agences de l'eau, ARS⁶, DREAL⁷, DRIEAT⁸, BRGM, Ademe, universités, écoles, CNRS⁹...).

Concernant le milieu « eau », sa vulnérabilité est d'autant plus importante à considérer, dans toute étude préalable de diagnostic d'un site, qu'il s'agit d'un milieu récepteur et également de transfert de potentielles pollutions, et cela que ce soit en surface (cours d'eau, plan d'eau...) ou en profondeur (nappe d'eau souterraine). Il est important de rappeler que si au niveau des cours d'eau les écoulements sont relativement rapides (quelques mètres à dizaines de mètres par minute), il n'en est pas de même en profondeur et notamment au sein d'un milieu aquifère poreux de nappe alluviale ou autre, où les vitesses d'écoulement sont beaucoup plus faibles qu'en surface (quelques centimètres à quelques mètres par jour).

Hors pollution des sédiments, si une pollution des eaux de surface peut rapidement être détectée et donc traitée, il n'en est pas de même pour un panache de pollution impactant une nappe alluviale. En effet, un tel panache peut avoir été généré par une pollution des sols ayant affecté un terrain implanté à quelques dizaines ou centaines de mètres en amont du site étudié, et impacter ce site plusieurs mois voire plusieurs années après, même si la pollution des sols à l'origine du panache impactant les eaux souterraines a été traitée entre temps.

2. Base de données d'anciens sites industriels et activités de service.

3. Base de données des sites et sols pollués.

4. Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels.

5. Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines.

6. Agence régionale de santé.

7. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

8. Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports.

9. Centre national de la recherche scientifique.

Les substances polluantes potentiellement toxiques, voire agressives ou corrosives, issues de panaches transitant au droit d'un site, peuvent bien entendu impacter directement des ouvrages de prélèvements, tels que des puits utilisés pour l'arrosage de jardins ou pour des pompes à chaleur (PAC), mais également, par dégazage ou remontées de nappe (hautes eaux), les réseaux enterrés comme les canalisations de distribution d'eau destinée à la consommation humaine (EDCH¹⁰, AEP¹¹), ainsi que les fondations de bâtiments ou d'ouvrages, les sous-sols ou les vides sanitaires d'immeubles de bureaux ou d'habitations, etc.

Ainsi, un panache polluant contenant par exemple quelques dizaines à centaines de microgrammes par litre de solvants halogénés dissous (par exemple, le trichloroéthylène [TCE] ou le tétrachloroéthylène [PCE]) peut, par dégazage sous des bâtiments et transfert dans les lieux d'habitation *via* les cages d'escaliers ou les canalisations, être à l'origine de graves problèmes de santé pour leurs occupants, par exposition chronique durant plusieurs mois à plusieurs années des voies respiratoires, et cela même si les odeurs sont très faibles à quasi imperceptibles.

Il est donc très important de réaliser une étude de vulnérabilité détaillée du site, en intégrant impérativement les éventuelles eaux souterraines transitant au droit de ce dernier. Il faut également proposer l'implantation d'un réseau de piézomètres par un hydrogéologue – dans le cas où par exemple l'étude préalable indique qu'une nappe phréatique est présente à quelques mètres de profondeur. Ce réseau sera constitué *a minima* d'un piézomètre implanté en amont hydraulique du site, afin de détecter d'éventuels panaches polluants issus de terrains situés en amont, et *a minima* de deux piézomètres implantés en aval, afin de détecter tout éventuel panache polluant issu du site ou transitant par ce dernier. Tout cela conformément aux règles de l'art, ainsi qu'aux guides et normes en vigueur (Afnor NF X31-614 et NF X31-615).

Une étude de vulnérabilité poussée est nécessaire, en particulier concernant les eaux souterraines en vérifiant si la première nappe qui transite au droit du secteur étudié est soumise à de forts battements (hautes eaux, basses eaux, marnage en zone côtière, aires d'influence de pompages ou de captages), et/ou si elle est « libre », « captive », voire « semi-captive ». Sans cette étude, le risque est de constater par la suite qu'un prestataire a implanté des piézomètres pour le contrôle et le suivi de la qualité des eaux souterraines, qui, hélas, sont « secs » tout ou partie de l'année, par exemple s'ils ont été implantés en période de hautes eaux sans considérer le niveau d'étiage ou de basses eaux (cycles hydriques saisonniers), ou sans considérer la profondeur effective de la nappe notamment en présence d'une couverture imperméable (nappe captive sous couverture argileuse) ou semi-perméable (nappe semi-captive sous couverture limoneuse). Cela arrive fréquemment si un prestataire ne considère que des données piézométriques issues, par exemple, d'un rapport antérieur, sans vérifier si, localement ou régionalement, la nappe est libre, captive ou semi-captive.

10. Eaux destinées à la consommation humaine.

11. Alimentation en eau potable.

I Les méthodes géophysiques

Pour compléter le « panel » des études préliminaires à réaliser avant d'engager des investigations destructives, avec sondages et analyses sur les prélèvements de sols, et quand on manque de données, on peut procéder à des investigations « non destructives ». Les méthodes géophysiques sont à ce propos très utiles, d'autant que la recherche progresse dans ce domaine. Elles ont également un double avantage : elles sont dix fois moins chères que les investigations dites « destructives » (sondages), et elles permettent d'orienter et d'optimiser l'implantation des sondages, et donc *in fine* les coûts d'un diagnostic de pollution. Ces méthodes dites « non destructives » permettent ainsi de réaliser une visualisation, ou *screening*, du site avant implantation des sondages pour prélèvements de sols, puis analyses.

Par exemple, réaliser une cartographie de la résistivité apparente du sol d'un site grâce à des méthodes géophysiques (électriques, électromagnétiques) permet de repérer des zones d'anomalies de conductivité électrique dans le sol (présence de fûts enterrés ou de cuves, de corps d'imprégnation ou de poches de pollution, de zones de circulation ou de rétention de fluides...) qui serviront à orienter l'implantation des sondages par la suite. Pour réaliser une telle cartographie, on effectue un maillage de points de mesures, par exemple, par carreaux de 10 m x 10 m, en affinant le maillage au droit des zones où la visite du site et la recherche historico-documentaire indiquent qu'il peut y avoir des problématiques de pollution.

Une autre mesure simple et « non destructive » est l'analyse des gaz du sol selon un maillage prédéfini de points de mesures, à l'aide d'une sonde et de réactifs, ou avec un PID. Pour information, un PID (*Photoionization Detector*) est un détecteur portable à photo-ionisation qui utilise les rayons ultraviolets (UV) pour détecter la présence de manière qualitative à semi-quantitative de composés organiques volatils (COV) dans l'air ambiant ou dans les gaz du sol, à des gammes de valeurs allant de 1 ppb à 10 000 ppm. Cette méthode de détection donne ainsi « une première idée » sur la présence éventuelle de COV. Elle permet d'orienter par la suite les prélèvements d'air ambiant, de gaz du sol, de sols ou de remblais, pour analyses en laboratoires accrédités qui permettent, eux, d'obtenir des résultats analytiques quantifiés (et opposables) pour chaque substance détectée, et ce afin de pouvoir les comparer à des valeurs guides, des valeurs seuils ou à des normes lorsqu'existantes.

Toutes les études et mesures préalables à un diagnostic de pollution donnent ainsi des indices sérieux mais ne sont ni exhaustives ni parfaites.

Ainsi, même après avoir réalisé des études préalables poussées, on ne pourra toujours pas évaluer l'état ou la qualité des sols présents sous des zones recouvertes (dalles de béton épaisses, déblais avec blocs, voiries ou trottoirs comportant souvent plusieurs couches successives d'enrobé...) ou inaccessibles à cause de l'occupation du site au moment des investigations. Ceci, surtout pour les sols sous des bâtiments en place, qui plus est anciens et avec des sous-sols tout ou partie comblés, ou avec des vides sanitaires trop étroits (en général présents sous des bâtiments pour lutter contre les remontées d'humidité).

Pour cette raison, nombre de bureaux d'études émettent des réserves en conclusion de leurs rapports de diagnostic de pollution, en précisant par ailleurs qu'afin de « lever ces réserves », il devra être procédé à la réalisation de diagnostics de pollution complémentaires au niveau des sols, présents sous ces bâtiments ou ces recouvrements, une fois découverts après démantèlement, déconstruction, évacuation. Encore faut-il que le donneur d'ordre ait prévu un budget « nécessaire et suffisant » pour que le prestataire spécialisé, retenu après appel d'offres, puisse réaliser d'abord – et impérativement – les études préalables historiques, documentaires et mémorielles, et de vulnérabilité. Et d'y ajouter, si nécessaire ou si possible, des investigations non destructives afin de réaliser un *screening* du site concerné pour optimiser l'implantation prévisionnelle des sondages (cf. prestation codifiée A130 – Norme Afnor X31-620 – partie 2 de décembre 2021) avec prélèvements d'échantillons de sols et analyses en laboratoires. Les résultats d'analyses seront utilisés dans le cadre du diagnostic initial, avant la réalisation d'éventuels diagnostics complémentaires s'ils s'avèrent nécessaires, afin d'affiner les estimations de surfaces ou volumes de sols impactés, ou de lever des incertitudes inhérentes à toute interpolation de pollution des sols, notamment au droit de bâtis en place ou de surfaces couvertes (enrobé, béton).

Il est important de rappeler ici que tout diagnostic de pollution doit être réalisé de manière proportionnée aux enjeux. En conséquence, le donneur d'ordre doit prévoir un budget suffisant pour le mettre en œuvre en intégrant impérativement une étude historique et documentaire, une étude de vulnérabilité et une visite préalable du site (prestations codifiées A100-A110 et A120 – Norme Afnor X31-620 – partie 2 de décembre 2021). Et ce, avant toute réalisation d'investigations sur site par sondages pour prélèvements et analyses.

Si de telles études préalables ne sont pas réalisées, voire bâclées par manque de moyens, la levée des incertitudes relatives aux éventuelles problématiques de pollution du sol et du sous-sol ne sera pas possible ou très partielle. Le donneur d'ordres risque de devoir gérer « en urgence » ces problématiques « non prévues » lors des travaux d'aménagement ou de réhabilitation (figure 2.1), avec les dépenses et les retards de réalisation associés, qui peuvent être très conséquents et impacter, voire remettre en cause, le projet initial.

Une autre problématique, qui apparaît lors des études préalables de diagnostic de pollution des sols d'un site, concerne la présence éventuelle de remblais, notamment en zone urbaine où l'on sait que, parfois sur plusieurs décennies voire plusieurs centaines d'années, l'Homme a procédé à de nombreuses constructions puis déconstructions, puis reconstructions, etc.

L'analyse historique et documentaire d'une parcelle urbaine et celle des plans et des photos aériennes anciennes du site ne pourront pas détecter la mise en place de remblais potentiellement souillés sur ce dernier, ou très rarement lorsqu'une photo est prise au moment des remblaiements pour réaliser une plateforme de bâtiment ou une voirie.

Nous avons toutes et tous des exemples de terrains ou de parcelles où les études historiques, documentaires et mémorielles préalables avaient pourtant été réalisées « dans les règles de l'art » par des personnes spécialisées et avec des moyens suffisants – et sur cette base le prestataire était « sûr » qu'il n'y avait pas de cuves enterrées ni d'anciens

Figure 2.1. Découverte fortuite – par manque d'études préalables – d'une cuve enterrée contenant du fioul résiduel avec pollution des sols périphériques par des hydrocarbures lors des travaux de démolition d'anciens bâtiments industriels en zone urbaine



© Thierry Blondel

dépôts de déchets, par exemple. Mais, après le « premier coup de pelle mécanique », les intervenants sur site ont découvert des remblais dégoulinants de goudrons pâteux issus du démantèlement d'une ancienne usine à gaz « il y a cinquante ans, une à deux rues plus loin », ou de remblais noirâtres chargés en mâchefers contenant des métaux lourds et issus d'une ancienne boulonnerie ou d'un ancien incinérateur.

Les études préalables à la réalisation d'un diagnostic de pollution sont donc cruciales car elles visent à définir, avec la meilleure justesse possible, les investigations à réaliser sur site (implantation prévisionnelle des sondages, maillage adapté et profondeur nécessaire, type et nombre de prélèvements selon les milieux concernés, analyses à réaliser, etc.), afin de minimiser les incertitudes implicitement liées au milieu souterrain au droit et en périphérie du site concerné – s'agissant d'un milieu non visible depuis la surface – tout en réduisant les risques d'éventuels contentieux *a posteriori*.

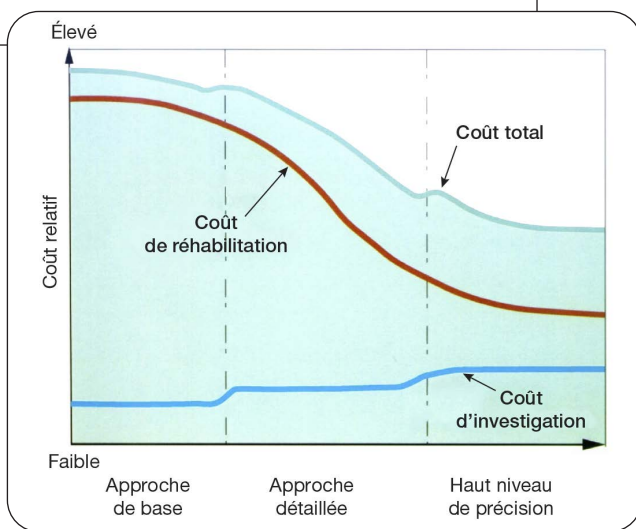
Pour mener à bien toutes études relatives à des problématiques de pollution, notamment sur des terrains réputés à passif environnemental en zone urbaine à périurbaine, il est essentiel que le donneur d'ordres prévoit des moyens adaptés aux enjeux. Il devra échanger au préalable avec le prestataire spécialisé en caractérisation et en gestion de sites et sols pollués, au besoin sur les conseils avisés d'un assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) reconnu et indépendant dudit prestataire, et en lui apportant un soutien financier nécessaire et suffisant. Cela limitera autant que possible

les incertitudes résiduelles à l'issue des investigations de diagnostic de pollution du site ou du terrain concerné, et optimisera par la suite la gestion – et donc les coûts associés – des éventuelles problématiques de pollution rencontrées.

En résumé : « Plus les études préalables seront poussées, meilleurs seront les diagnostics de pollution réalisés à l'issue, plus précise en sera la gestion des éventuelles problématiques de pollution détectées selon le ou les usage(s) prévu(s) du site ou du terrain concerné, et *in fine* meilleures se porteront les finances du donneur d'ordres notamment en cas de travaux nécessaires de dépollution ».

Cette gestion adaptée du passif environnemental doit permettre d'adapter au mieux, voire de diminuer fortement, les éventuels coûts de traitement et de réhabilitation, tout en optimisant la mise en œuvre, à des coûts raisonnables et raisonnés, des projets d'aménagement ou de réhabilitation, avec ou sans changement d'usage, ou de valorisation de terrains ou de parcelles en zone urbaine à périurbaine (figure 2.2).

Figure 2.2. Impact de la précision des études préalables sur les coûts de réhabilitation de sites pollués



Source : Lecomte (1998)

Références bibliographiques

Lecomte P., 1998. *Les sites pollués : traitement des sols et des eaux souterraines*. Éd. Lavoisier, 204 p.

3. Santé et historique des sols en Belgique

François Antoine, Sylvie Lefebvre

Introduction

Deux décennies après la mise en place d'une réglementation et d'instruments permettant de mieux connaître la qualité des sols et leur potentiel impact sur la santé, il importe de relever l'écart existant entre les informations historiques contenues dans les archives et celles qui sont usuellement utilisées par les acteurs de terrain. Afin d'illustrer ce que l'on pourrait qualifier, avec un brin de provocation, de « mirage numérique », la Belgique présente à cet égard un beau cas de figure de par sa complexité institutionnelle, son lourd passé industriel et agricole, et les initiatives prises par les autorités pour répondre aux crises environnementales et sanitaires.

Le labyrinthe institutionnel belge

La gestion de la crise de la pandémie de Covid-19 a rappelé aux Belges le nombre élevé de ministres dont les compétences touchent de près ou de loin à la santé. La complexité du découpage institutionnel dans ce domaine a été suspectée d'avoir compliqué la gestion de la pandémie. En effet, pas moins de dix personnes se partagent douze portefeuilles ministériels en lien avec la santé à différents niveaux de pouvoir (Faniel, 2020). Cette singularité provient notamment de la spécialisation progressive de compétences relevant initialement de la période napoléonienne et qui étaient regroupées dans un très large ministère de l'Intérieur (Terrizzi, 1995). De l'indépendance de la Belgique à nos jours, le département de l'Intérieur ne cesse d'être un ministère essentiel de l'administration centrale. Il donnera naissance à de multiples départements au fur et à mesure que se développent et se précisent les nécessités administratives et politiques d'un État moderne. En parallèle et conjointement se sont développées en Belgique des structures administratives particulières telles que les organismes d'intérêt public, dits « parastataux¹ » (Damar et Delaunois, 1988) qui reflètent le caractère intrinsèquement

1. « Un parastatal est un organisme de droit public indépendant des administrations et créé par une loi, un décret ou une ordonnance. L'Autorité fédérale et les entités fédérées peuvent créer des organismes d'intérêt public indépendants, qui ne font pas partie de l'administration tout en contribuant à l'action du gouvernement dont ils dépendent. » Extrait du site du Crisp (Centre de recherche et d'information socio-politique). <https://www.vocabulairepolitique.be/organisme-d-interet-public-oip/>

« consociatif » du pays². Ce caractère intègre par sa plasticité différentes composantes publiques, comme privées, ainsi que fédérales et fédérées. Dès le xix^e siècle et spécialement au xx^e siècle, ces services décentralisés et déconcentrés, normalement dotés de la personnalité juridique, ont été constitués à différents niveaux de pouvoir afin de gérer un ou plusieurs intérêt(s) public(s) déterminé(s) (Terrizzi, 1995). Jouissant tantôt de l'autonomie financière et technique, tantôt – en sus – de l'autonomie organique, ces structures se justifient aux yeux de leurs promoteurs par une gestion plus souple, par leur capacité d'associer plus directement les interlocuteurs publics et privés (sociaux ou autres), par une indépendance accrue vis-à-vis des organes de contrôle, par la maîtrise du processus de désignation du personnel lors de leur création (Yante, 2003). En outre, le cheminement institutionnel, propre à la Belgique au cours de multiples réformes de l'État, a réparti tant bien que mal – entre les niveaux fédéral, communautaire et régional – différentes compétences telles que le financement de la sécurité sociale, l'infrastructure des hôpitaux ou encore la politique de promotion de la santé et de la prévention. En 1993, la Belgique est officiellement devenue un État fédéral qui se compose des communautés et des régions. Cette complexité institutionnelle est à double tranchant. Elle peut refléter une architecture soucieuse d'appliquer jusque dans ses derniers recoins le principe de subsidiarité. Dans le même temps, elle peut générer le malaise des autorités belges poussées à adopter parfois la politique dite « de la chaise vide » à l'échelon européen ou international, faute d'accord entre les ministres compétents.

Outre les accords de coopération entre les différents niveaux de pouvoirs, la transition numérique a progressivement permis de contourner cet écueil institutionnel par la gestion des flux d'informations et la mise en place de guichets uniques, dans une optique de convivialité et de simplification administrative à destination du citoyen. Apparue dès avant 1980, l'idée de l'utilisation de la technologie pour simplifier les procédures administratives de la sécurité sociale a abouti, en 1990, à l'installation de la Banque-carrefour de la Sécurité sociale. L'interaction de cette nouvelle institution avec les autres institutions de sécurité sociale a mené à la création d'un réseau informatique d'échanges des données, au départ duquel s'est développée, à partir de 1995, la volonté d'harmoniser certains concepts juridiques en vue de simplifier les procédures informatiques de traitement des données et d'accroître l'utilisation des possibilités techniques. De grands projets ont ainsi pu être mis en œuvre dans le but d'offrir aux assurés sociaux et aux entreprises des services facilement utilisables, compréhensibles, rapides, proactifs et de qualité, destinés à réduire au maximum les lourdeurs administratives, les pertes de temps ou les défauts d'octroi de droits qui leur étaient pourtant acquis (Robben *et al.*, 2006).

2. Le politologue Jean-Louis Seiler (Seiler, 1999) définit le consociativisme en ces termes : « Fondé sur le principe "chacun pour soi et les fonds publics pour tous", le système consociatif voit les segments de la société civile tenter de se consolider en institutionnalisant et devenir les piliers d'une société politique où les élites négocient au sommet et s'entendent pour soustraire certaines matières au débat politique. »

Un État fédéral, trois sols fédérés

Afin de saisir le cadre institutionnel du pays, il est d'usage en Belgique de penser en fonction d'une ligne de démarcation entre les communautés et les régions en attribuant aux communautés les compétences liées aux personnes, et aux régions celles liées au sol. Le niveau communal, pour sa part, est tiraillé entre les compétences relevant du fédéral, des communautés et des régions. Dès lors, le sol proprement dit et les compétences environnementales ont progressivement glissé vers les entités fédérées pour ne plus laisser qu'une structure faîtière au niveau fédéral. La première intervention du législateur belge concernant la problématique de la pollution des sols remonte à 1967. Traduisant leur volonté de réorientation économique et sociale, les autorités belges adoptèrent en 1978 une loi visant à la rénovation de tous les sites d'activités économiques désaffectés (Merenne-Schoumaker, 1989). Au cours des années 1980, les compétences basculèrent vers les régions qui progressivement mirent en place leur propre administration et cadre réglementaire en matière de gestion des sols³. Même si les trois entités fédérées suivent des principes similaires en termes d'identification et de « remédiation » des pollutions des sols, il existe un bon nombre de points différents tels que les listes de polluants et les seuils retenus, les listes d'activités à risque ou encore la distinction entre pollution historique et pollution récente.

Quant à la qualité sanitaire des produits agricoles, elle reste du ressort des autorités fédérales. Cette compétence fut encore renforcée à la suite de la crise alimentaire dite « de la dioxine » de 1999 par la création de l'Agence de sécurité alimentaire (désormais Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire – AFSCA). Avec comme devise : « de la fourche à la fourchette », cette dernière contrôle l'ensemble de la chaîne alimentaire. Il est à noter que le lien entre la qualité sanitaire des sols et celle des produits alimentaires ne constitue pas un continuum naturel. Du côté régional, des modèles informatiques font partie de la procédure d'évaluation des risques des sols pour la santé humaine et l'environnement (Davila *et al.*, 2020). L'AFSCA, pour sa part, n'est pas compétente pour le contrôle et le suivi d'une contamination environnementale. Elle ne collabore avec les régions que dans le cadre de ses compétences, à savoir : le contrôle de la sécurité des denrées alimentaires et des aliments pour animaux qui se retrouvent dans les rayons des magasins. Les produits cultivés dans des jardins privés,

3. Région de Bruxelles-Capitale : ordonnance du 5 mars 1999 relative à la gestion et à l'assainissement des sols de la Région de Bruxelles-Capitale, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2010, modifiée de manière substantielle le 23 juin 2017, ci-après ordonnance « Sols ». Région flamande : décret du 27 octobre 2006 relatif à l'assainissement des sols pollués et à la protection du sol, entré en vigueur le 1^{er} juin 2008, tel que modifié en dernier lieu le 27 octobre 2017, ci-après *Bodemdecreet*. La Région flamande est la première à avoir légiféré au sujet des sols qui étaient visés dès 1995 au sein du *Decreet houdende algemene Bepalingen inzake Milieubeleid*, ou décret relatif à la politique générale de l'environnement. Région wallonne : décret du 5 décembre 2008 relatif à la gestion des sols, entré en vigueur le 6 juin 2009, ci-après décret « Sols » de 2008 remplacé par le décret du 1^{er} mars 2018 relatif à la gestion et à l'assainissement des sols. Pour l'essentiel, ce dernier est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2019.

les œufs de poules et autres produits de particuliers restent dans la sphère privée et ne relèvent donc pas de la compétence de l'AFSCA⁴. Afin de pallier cette absence, certaines initiatives telles que «Sanisol» par l'administration de la Région wallonne visent à sensibiliser à la question de la pollution des sols, outiller et accompagner les jardiniers dans l'évaluation et la gestion des risques liés à la culture sur un sol pollué⁵.

L'autoproduction soulevant de plus en plus de questions quant aux risques pour la santé liés aux pollutions relevées dans les sols, Sanisol propose aux jardiniers des conseils pour éviter les types de fruits et légumes qui accumulent les métaux lourds, par exemple. Après des analyses du sol, en cas de doute sur le transfert de polluants vers certaines espèces potagères, des recommandations pour une culture hors sols avec l'usage de terre propre d'origine connue pour éviter toute présence de polluants organiques sont données⁶. Toutefois, des recherches menées en France montrent que les recommandations de changements de pratiques sont peu suivies à moyen et long terme (Mougin *et al.*, 2020).

Passé industriel et agricole des sols

Alors que notre société tente à l'heure actuelle de s'adapter aux bouleversements engendrés par la désindustrialisation et la révolution digitale et d'en saisir les opportunités, nos régions ont depuis une vingtaine d'années lancé d'ambitieuses politiques veillant à apurer une lourde et ancienne dette écologique résultant principalement des révolutions industrielles mais également agricoles qui ont façonné l'environnement du pays depuis plus de deux siècles. En effet, la petite Belgique densément peuplée est une vieille nation industrielle et industrielle. Elle fut la première sur le continent européen à suivre la révolution industrielle qui éclot en Grande-Bretagne à la fin du XVIII^e siècle (Hobsbawm, 2007). En outre, elle fut une très active et intensive économie agricole dont les rendements furent soutenus par les engrais chimiques depuis la fin du XIX^e siècle, auxquels s'ajoutèrent les pesticides au lendemain de la Seconde Guerre mondiale (Segers et Van Molle, 2004).

Au XIX^e siècle et durant la première moitié du XX^e siècle, Bruxelles a été le premier pôle industriel du pays en termes d'emploi et d'établissement. L'activité industrielle était constituée principalement de petites et moyennes entreprises. Traversée de part en part par le canal de Charleroi-Willebroek et aisément accessible par chemin de fer, la capitale belge était une région attractive pour le développement de l'industrie. De plus, l'importante mise en œuvre de la gare maritime de Tour et Taxis avait stimulé la croissance

4. <https://www.favvafsa2021.info/pfas>

5. [http://environnement.sante.wallonie.be/files/document/pdf/Brochure SANISOL.pdf](http://environnement.sante.wallonie.be/files/document/pdf/Brochure_SANISOL.pdf)

6. L'outil Sanisol propose des analyses de sols et une brochure informative sur la culture potagère en sol pollué. <https://www.wallonie.be/fr/demarches/recevoir-des-conseils-sur-le-type-de-legumes-cultiver-dans-mon-potager-grace-loutil-sanisol>

industrielle le long du canal de Laeken à Vilvorde (Vandermotten, 2015). Outre des lieux de production dans le Sud-Luxembourg ou encore dans le Brabant, la Révolution industrielle se concentra en Wallonie sur le sillon Sambre et Meuse qui détenaient les monopoles de la houille, du minerai de fer et des carrières. Au cours du long ^{xix}^e siècle, la Wallonie était à l'avant-garde de l'activité industrielle, transformatrice et exportatrice de l'Europe occidentale. Grâce à une importante série d'investissements publics, la Flandre prendra le relais au lendemain de la Seconde Guerre mondiale en créant *ex nihilo* notamment une imposante sidérurgie et un pôle chimique sur les grands axes navigables et ferroviaires, tout en organisant une urbanisation extensive sur d'anciennes terres agricoles. Sa dynamique économie transformatrice et exportatrice s'appuiera également sur un imposant maillage de petites et moyennes entreprises (Cornelis, 2021). Après un développement florissant qui se poursuit jusqu'aux années 1960, la Belgique tente depuis lors de se relancer sur la base de ses ressources propres et de revenir à une trajectoire de développement conciliant l'économie, l'environnement et le social. L'un des leviers pour atteindre cet objectif est constitué par l'important, mais indispensable travail de réhabilitation des sites pollués, ou potentiellement pollués, afin de répondre aux nécessités de redéploiement économique par la création de nouveaux espaces, et visant à améliorer l'environnement. Certains territoires ont hébergé des activités diversifiées, tandis que d'autres se sont spécialisés. Ainsi, la région de Liège a concentré pendant plusieurs siècles des activités liées à la métallurgie, alors que celle d'Anvers, par exemple, s'est diversifiée autour de l'activité portuaire et chimique. Les provinces de Flandre occidentale et orientale restèrent de manière générale attachées à la production du tissu de lin et de coton qui a fait sa réputation depuis le Moyen Âge. La province du Limbourg a connu un développement économique plus tardif au ^{xx}^e siècle avec l'exploitation des mines de charbon de Campine. Au niveau agricole, l'activité se caractérise jusqu'au lendemain de la Seconde Guerre mondiale par une myriade de petites exploitations intensives en Flandre et de grandes productions céréalières en Brabant et en Hesbaye, la culture des plantes industrielles ou encore un élevage extensif du gros bétail dans le sud du pays (Blomme, 1993).

Les pollutions de sols et de nappes phréatiques sont très fréquentes dans les zones urbaines au passé industriel. Peu visibles, elles présentent des risques réels. Les pollutions rencontrées sont dues à des métaux lourds, des solvants, des hydrocarbures, des cyanures, etc. Elles peuvent être à la source de problèmes de santé tels que cancers, infertilité, troubles du système nerveux, irritations de la peau et des yeux, etc. En milieu urbain, les dangers de cette contamination pour les habitants sont accrus du fait de la mixité « logement-entreprise » et de la densité de population. La pollution du sol peut également avoir un impact significatif sur l'environnement en portant atteinte à la biodiversité, aux écosystèmes et aux nappes d'eau souterraines. La première démarche en cas de suspicion de contamination du sol est l'étude historique. Elle a pour finalité d'éclairer et d'orienter les éventuels travaux d'assainissement d'un site tant du point de vue de la gestion de la pollution que de celui de la conception d'un projet de réhabilitation. Dans un certain nombre de cas, la réhabilitation du site sera

considérée comme indispensable au vu de ses usages et de son environnement. La mise en place d'un programme de réhabilitation passe le plus souvent par des phases complémentaires de diagnostic afin d'acquérir des données de dimensionnement préliminaires aux actions de réhabilitation. Les diagnostics peuvent être de deux natures différentes. On distingue ceux reposant sur une étude documentaire de ceux reposant sur la mise en œuvre de campagnes de mesures sur le terrain. La recherche d'éléments d'information documentaires permet de collecter des données de nature et d'origine différentes (cartes, photographies, rapports d'étude, interviews de personnes ayant travaillé sur le site, etc.) afin de les recouper et de les vérifier, et dans la mesure du possible, de les localiser. Ces éléments d'information permettent de définir un cadre d'étude spatio-temporel, adapté à la nature des enjeux à préserver. Dans ce cadre, une étude historique vise à identifier les activités et pratiques susceptibles d'avoir entraîné une pollution du sol ou des eaux et d'identifier la nature et la quantité des polluants. Cette opération constitue l'une des premières étapes de l'étude préliminaire et précède la phase d'investigation des zones suspectes s'appuyant fondamentalement sur des stratégies d'échantillonnage et la phase d'interprétation des données (Antoine, 2017).

Bases de données sols

Afin de suivre l'état de leurs sols et de mieux assurer leur gestion, les trois régions belges ont entrepris d'identifier et de recenser les terrains susceptibles d'être pollués au travers de banques de données centralisées et actualisées. Elles recensent, pour chaque parcelle cadastrale, les données disponibles liées à un état de pollution éventuel du sol, passé ou présent, ainsi que les parcelles où s'exerce une activité posant un risque. Même si le traitement et la consultation d'informations récentes sont à peu de chose près similaires dans les trois parties du pays, elles diffèrent sensiblement pour leurs données historiques. Leur base historique est commune, à savoir les archives produites en application du décret impérial du 15 octobre 1810 relatif aux « Manufactures et ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode ». Il s'agit d'enquêtes réalisées par les administrations publiques depuis la période française avant la prise de certaines décisions jugées d'utilité publique. Ce dispositif, qui inaugurerait le contrôle sanitaire de la pollution industrielle, avait comme but fondamental de protéger le capital industriel contre les récriminations des voisins. Suivant ce régime juridique, chaque activité industrielle était classée dans une catégorie impliquant des obligations spécifiques. Avec beaucoup d'adaptations, ce régime juridique a perduré jusqu'en 1946, date à laquelle il a été remplacé par le « Règlement général pour la protection du travail ». Au tout début du xx^e siècle, la législation de l'ancêtre du « Permis d'environnement » a imposé un nouveau cadre juridique. Ces archives sont des sources précieuses pour qui veut identifier les activités menées sur un site industriel, les technologies qui y ont été mises en œuvre, les normes techniques qui y sont associées, les nuisances environnementales générées, les conflits avec le voisinage, etc. (Antoine, 2017).

En Région bruxelloise, un inventaire de l'état des sols a été publié pour la première fois en 2002. La source principale de cette base de données spatiale était une collection d'archives d'autorisations d'entreprises insalubres et dangereuses (EID) que l'Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE) avait récupérée de l'ancienne province de Brabant. L'ordonnance bruxelloise sur les sols de 2004 a transformé cet inventaire en un outil juridique. Bruxelles Environnement (Antoine, 2017) avait alors répertorié les sites potentiellement pollués en Région de Bruxelles-Capitale, représentant près de 8 % de sa superficie totale. Après la nouvelle ordonnance de 2009, 14 640 parcelles cadastrales (environ 25 % du territoire régional) ont été marquées comme concernées par un risque de pollution dans l'inventaire de l'état des sols. La Région de Bruxelles-Capitale a privilégié l'option de s'inscrire au plus près de la temporalité dans laquelle travaillent les opérateurs du secteur de l'assainissement des sols en leur fournissant un accès direct à l'information qui leur est potentiellement utile. Au cours de ces évolutions, les principales sources utilisées pour alimenter l'inventaire étaient toujours les archives de l'EID en possession de Bruxelles Environnement⁷.

En Région flamande, chaque commune tient un inventaire des terrains à haut risque dont le sol est potentiellement contaminé. Cet inventaire dépend des activités qui ont eu lieu sur le terrain dans le passé. L'inclusion d'un terrain dans l'inventaire est communiquée à l'administration régionale en charge de la gestion des déchets, à savoir l'Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (désormais OVAM), qui traite les informations dans le registre d'information foncière. L'inventaire communal des terrains à risques joue un rôle informatif important dans la cession de terrains⁸. Le niveau de détail de ces archives dépend ensuite de la commune à laquelle elles appartiennent. Il est à noter que la conservation des archives communales est inégale. Ainsi, au moment de la fusion des communes en 1975, certaines ont parfois été perdues. Les archives provinciales constituant à peu de chose près des doubles des dossiers conservés dans les communes sont également consultées à la recherche d'informations supplémentaires. Curieusement, la masse des archives anciennes de cette série provinciale conservée dans les différents dépôts des Archives de l'État dans les provinces n'a pas été intégrée au système d'information sur les sols de la Région flamande.

En Région wallonne, la Banque de données de l'état des sols (BDES) a été mise en place avant la publication du décret « Sols ». Elle est également enrichie des immenses collections d'archives de l'EID conservées dans les dépôts des Archives de l'État dans les provinces. Ces collections ont été étudiées par le Centre d'histoire des sciences et des techniques (CHST) de l'université de Liège dans les années 2010. Cet important travail, basé sur une collaboration entre la Région wallonne, les Archives de l'État et l'université de Liège, a permis d'améliorer considérablement les inventaires existants. Malheureusement, cet ambitieux programme de recherche a été brutalement interrompu

7. <https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des-lieux-de-l'environnement/sols-etat-des-lieux#inventaire-de-letat-du-sol>

8. <https://ovam.vlaanderen.be/gemeentelijke-inventaris>

faute de financement. Le projet reste donc inachevé. Dès lors, le ministère wallon de l'Aménagement du territoire a alors choisi de mobiliser des informations historiques afin de guider les travaux de dépollution des opérateurs. Des méthodologies pour l'étude historique des terrains potentiellement pollués ont été développées, notamment par le CHST afin de constituer une recherche documentaire conséquente. Ensuite, une synthèse est réalisée par la confrontation de toutes les sources d'information, y compris les résultats de la prospection sur le terrain. L'objectif de ce type d'étude historique est d'orienter les travaux ultérieurs en décrivant précisément l'état du site et en distinguant, en matière de pollution des sols, les zones suspectes des zones non suspectes (Péters et Defêchereux, 2020).

Lors de la mise en place du nouveau cadre légal wallon pour la protection des sols en 2013, ce type d'étude historique est devenu une obligation légale. Elle fait partie de l'étude d'orientation définie par le Guide de référence pour l'étude d'orientation (GREO). Dans ce cadre, le CHST a publié en 2014 un remarquable inventaire des ressources documentaires disponibles, prenant en compte les documents les plus pertinents au regard des objectifs de l'étude historique. Une typologie des ressources documentaires et une méthode d'analyse ont été communiquées aux experts pour garantir la qualité des données historiques collectées⁹. Après dix ans de pratique de l'étude historique dans le cadre du décret « Sols », il semble que dans la majeure partie des cas, les experts maîtrisent mal le paysage des ressources documentaires qui leur semble nébuleux par manque d'expertise dans les sciences humaines (histoire et archéologie principalement), de temps et de précision dans les demandes adressées vers les gestionnaires de ressources documentaires. La question des temporalités éclaire les difficultés de mobilisation des données historiques. Les experts disposent de calendriers très contraignants pour la réalisation de leurs études. Ils planifient, en fonction des moyens disponibles, une étude historique qui ne peut excéder quelques jours. L'essentiel du temps consacré à l'étude d'orientation concerne la préparation et l'analyse des investigations de sol. Ils attendent donc des réponses rapides à leurs demandes de consultation de documents. En ce sens, une réponse négative peut être considérée comme une « bonne réponse », dans la mesure où l'expert ne perdra pas de temps en recherches documentaires. L'archiviste ou gestionnaire devrait répondre qualitativement à la demande de l'expert. Mais, dans la plupart des cas, identifier dans les fonds conservés des documents potentiellement intéressants nécessite une recherche interne qui ne peut pas être immédiate. Entre l'expert pressé et l'archiviste qui n'est pas en mesure de délivrer une réponse qualitative immédiate, il y a donc un hiatus. L'expert joue la montre dans une démarche quantitative, il envoie en début de recherches une série de mails aux divers gestionnaires d'archives sans réellement attendre de réponse positive qui l'obligerait à entamer des recherches documentaires.

9. <https://sol.enviroennement.wallonie.be/home/sols/sols-pollues/code-wallon-de-bonnes-pratiques-cwbp-etude-dorientation.html>

Apports possibles des archives historiques redevenues d'utilité administrative

Plus de trente ans de pratique d'assainissement des sols a démontré une forte hétérogénéité dans la qualité de l'information recueillie laissant de la sorte de nombreux angles morts. De l'aveu même des professionnels de la dépollution, il existe un important déficit d'information sur le passé des sites. Afin de pouvoir opérer un saut qualitatif nécessaire pour restreindre le coût des actes techniques à réaliser sur le terrain et en laboratoire, il faut pouvoir utiliser à plein la masse de documentation papier qui regorge dans les centres d'archives et les administrations. De même, le recours à des solutions radicales et coûteuses de dépollution, telles que l'excavation des terres, pourrait en partie être évité en ciblant plus précisément les zones posant problème ou au contraire celles potentiellement épargnées. Enfin, une meilleure connaissance de la chaîne historique des usages d'un sol peut permettre de pointer la présence de produits polluants pouvant passer sous le radar d'une reconnaissance standard des sols. Or, le développement et l'usage des techniques actuelles de l'information excluent pour une bonne part toutes les possibilités d'exploitation que recèlent les documents papier. Nous pourrions à cet égard parler de « fracture digitale ». Afin de contourner ce double écueil, il faut d'abord une prise de conscience de l'ensemble des acteurs du sol qui sont confrontés pratiquement quotidiennement à ce hiatus entre des demandes croissantes des multiples secteurs liés à la gestion et la planification de la ville, et l'incapacité technique de mettre à disposition ces gisements d'informations indispensables provenant du passé.

Comme par contraste, les pollutions des sols s'étalent sur une temporalité remontant au Moyen Âge, voire à l'Antiquité. Le cœur de la pratique archéologique consiste en la récolte de données permettant de reconstituer localement les paysages anciens, depuis les sols dits « en place » (sols naturels) jusqu'aux sols anthropiques et aux déplacements de terre (sous forme de remblai ou de réaménagement d'assiettes pour la construction et les aménagements urbains). Les archéologues peuvent relever des pollutions anciennes *via* des analyses physico-chimiques de prélèvement de terres noires anthropiques, ou encore *via* la documentation archivistique attestant d'activités polluantes en cave (orfèvrerie, tannerie, huilerie, distillerie...). Il n'est dès lors pas étonnant que l'un des pionniers dans la gestion des pollutions en Wallonie soit archéologue de formation. Au travers de son parcours au sein du CHST de l'université de Liège et de la Société publique d'aide à la qualité de l'environnement (Spaque), Philippe Tomsin a appliqué à l'assainissement des sols les techniques de l'archéologie telles que la stratigraphie et la recherche en archives. Les lieux de conservation d'archives ont un rôle capital à jouer sur la compréhension de l'état des sols. De nouvelles pistes sont exploitables. Il convient à présent de les ouvrir à la consultation. Une difficulté majeure rencontrée par les gestionnaires d'archives est l'accès ou plutôt l'identification des demandes des professionnels et des bureaux d'études. Ces derniers ne disposent en général que d'une adresse ou d'un numéro de parcelle. Or, ces références cadastrales n'ont

de cesse d'évoluer à chaque changement d'affectation du bâti. De même, les noms de rues et les limites communales ont varié au cours du temps ou ne sont tout bonnement pas repris à l'inventaire.

L'Administration générale de la documentation patrimoniale (AGDP) regroupe, au sein du Service public fédéral des finances (SPF), les administrations appelées, jusqu'à il y a peu, du Cadastre, de l'Enregistrement et des Hypothèques¹⁰. Ces dernières ont produit, depuis leur institution à la fin du XVIII^e siècle, une masse phénoménale d'archives : de véritables bases de données papier que la transition numérique va conduire, ces dernières années, hors des murs de l'administration et rejoindre les collections des Archives de l'État. Ainsi, ces grands ensembles documentaires – qui, pour une large part, conservent une grande force probante et une importance juridique à très long terme – sont actuellement en train d'être rendus accessibles à un public plus large. Ouvrant ainsi le champ des possibilités d'exploitation au-delà des objectifs qui ont conduit à sa production. Ces ensembles d'archives cohérents peuvent ainsi tant alimenter l'étude des évolutions morphologiques des territoires, que permettre l'analyse de l'usage du bâti, des types de construction et fonction d'occupation, de l'usage de l'espace public, etc. Ils offrent la possibilité de reconstituer solidement et systématiquement toute transformation juridique ou matérielle d'un espace du plan parcellaire. Les principaux écueils de ces archives, notamment cadastrales, restent cependant leur technicité et leur volume.

L'inventaire du patrimoine industriel a démontré la pertinence de l'étude des anciens sites industriels. Des fiches descriptives complètes, tant au point de vue historique que patrimonial, sont un apport considérable à la connaissance des espaces urbains à préserver, voire réhabiliter. Ces informations d'ordre patrimonial contribuent à offrir de l'information relative à (i) l'identification des établissements industriels et des dépôts divers ; (ii) la description des activités industrielles menées ; (iii) la définition des pratiques industrielles ; et (iv) *in fine*, l'inventaire des polluants potentiels avec une réflexion sur les polluants moins classiques ou non normés. Cette typologie de terrains peut s'associer à des observations liées à la mobilisation de la littérature technique et l'examen des usages et des pratiques dans le domaine industriel au travers principalement des archives d'entreprises et de la collection historique des brevets. Il est à noter que les techniques ont évolué mais le vocabulaire usité également.

Les recherches archivistiques sur le sous-sol peuvent également offrir une meilleure connaissance du bâti souterrain, et permettre de la sorte de recueillir un maximum d'informations autour des éléments qui influent dans le déplacement d'une pollution. La connaissance d'infrastructures présentes dans le sol, telles que des fondations anciennes, les infrastructures d'utilité publique enterrées actuelles ou abandonnées (notamment d'adduction ou d'abduction d'eau), et les infrastructures liées à la mobilité (fondations routières, tunnels, métro, canal, etc.), apporte des éléments utiles à la compréhension de dissémination de contamination dans le cadre d'études de pollutions pour l'ensemble d'un quartier. Une connaissance plus précise des modifications de reliefs (zones de décharge

10. https://finances.belgium.be/fr/sur_le_spf/structure_et_services/administrations_generales/documentation_patrimoniale

publique, travaux de nivellement, comblement de dépressions, de zones d'extraction ou de cours d'eau, etc.) permet également de mettre en évidence des remblais suspects et une meilleure compréhension de l'extension de pollutions connues et de leur dispersion éventuelle. Ces cas de disséminations de pollution ne peuvent être interprétés que par une vision globale de la situation. L'étude historique d'une parcelle, pour être au plus proche de la réalité, doit être élargie au niveau du quartier. Établir un descriptif historique et économique des différentes communes permet de faciliter le travail du bureau d'études qui aura ainsi à sa disposition des clés de compréhension pour l'analyse du site à étudier; clés qui pourront servir pour toute étude effectuée dans le même périmètre.

Il importe également de valoriser les savoirs citoyens qui constituent autant de sources indirectes d'information sur d'anciens sites industriels : photographies, documents, souvenirs, autant de pistes pour mieux comprendre un quartier. Ils proviennent directement de citoyens qui ont en leur possession des documents inédits. Au mieux, ils sont déposés dans un centre local d'archives ou sur un site internet. Malheureusement, trop de documents restent enfouis dans des tiroirs ou sont éliminés. Il faut veiller à pérenniser cette information, à conscientiser les citoyens de la valeur de ces souvenirs, à récolter les témoignages des personnes qui ont travaillé dans les anciens ateliers et usines. Ils sont les derniers témoins des processus d'activités ou encore des habitudes d'entreposage.

Comment des informations et connaissances nouvelles en matière de pollution de sol, issues de recherches historiques – et d'une méthodologie associée –, agissent-elles sur le système sociotechnique associé au sol et à son affectation, notamment au sein des systèmes d'acteurs spécifiques et de leur intentionnalité? En particulier, les quartiers ayant connu une activité industrielle intensive durant plus d'un siècle sont « assainis », moyennant l'utilisation intensive d'excavatrices et le transport de terres pendant quelques jours de chantier. Des solutions basées sur la nature, telles que la phytoremédiation, sont rarement sélectionnées parce que le marché immobilier ne permet pas le temps long nécessaire à ce traitement. Une meilleure connaissance des sols et de leur historique serait donc un grand atout pour penser une ville et des projets urbains plus durables, et plus à même de faire face au changement climatique. Une meilleure prise en compte des sols dans les projets d'aménagement urbanistique permettrait de mieux les protéger, de les régénérer de façon adaptée ou de choisir un usage plus adapté à des sols trop fortement dégradés, tels que des zones d'entreposage, de parking, voire d'un retour d'activités industrielles en milieu urbain.

Les enseignements de la récente crise des composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS)

Les multiples révélations de ces dernières années relatives aux taux de PFAS, dits « *forever chemicals* » au sein de l'Union européenne, se transforment en une déferlante à l'image de l'enquête menée par un consortium de journalistes et publiée notamment dans le quotidien français *Le Monde*. Il est indiqué à propos de ces produits chimiques

hautement toxiques : « Quant à 3M, qui fournissait à Dupont le PFOA [acide perfluorooctanoïque] nécessaire à la fabrication de Téflon, la firme a tant pollué les environs de son usine de Zwijndrecht, près d'Anvers (Belgique) et au-delà, que la zone serait des plus contaminées par le PFAS au monde. » (Horel, 2023). On ne peut que s'étonner en constatant que l'ampleur et l'ancienneté de la pollution étaient inconnues des autorités flamandes en dépit des lois, réglementations et procédures mises en œuvre par les administrations compétentes depuis des décennies. Il est également intéressant de détailler comment ce *hot spot* a été décelé et quel cheminement de compétences a pris ensuite cette révélation. Pour des raisons économiques, la Région flamande avait entrepris d'importants travaux d'infrastructure afin de désengorger la ville portuaire d'Anvers en creusant un tunnel sous l'Escaut. Ce dernier débouche en 2021 à Zwijndrecht à proximité d'une usine de la société américaine 3M, où étaient produits ces composés chimiques de synthèse quasi indestructibles et développés depuis les années 1940 pour résister à l'eau et à la chaleur. L'analyse réglementaire des terres excavées révèle des teneurs en sulfonate de perfluorooctane (PFOS) bien supérieures aux normes environnementales. Des études complémentaires sont menées à la fois sur les sols dans un périmètre qui s'est largement élargi et dans les cours d'eau. Les résultats alarmants et l'inquiétude de la population relayés par les médias et le monde politique ont poussé les autorités à prendre des mesures de précaution en matière d'agriculture et d'approvisionnement d'eau (Van Ossel, 2021), de même que des mesures de santé publique par des analyses sanguines des populations environnantes¹¹.

Le fait que les PFAS forment une grande famille de plusieurs milliers de produits chimiques synthétiques plaide indéniablement sur la nécessité de récolter, pour les substances problématiques, autant d'informations administratives que possible, mais également celles relatives aux procédés de fabrication, afin de pouvoir effectuer des recherches plus ciblées. Le nombre de produits qui font l'objet d'une surveillance des autorités publiques est limité et les coûts des analyses sont élevés (De Muelenaere, 2021). Cette démarche peut contribuer à repérer des polluants qui risquent en fonction de protocoles standards de passer sous le radar, ainsi qu'à mieux prendre en compte les effets cocktails et aider à définir des travaux de « remédiation » moins coûteux et plus respectueux de l'environnement.

L'actuelle crise environnementale des PFAS ne peut qu'inciter les administrations à continuer à renforcer la formation des experts en matière de sources documentaires utiles pour l'étude de sols, ainsi que l'échange et la dissémination des bonnes pratiques. Dans la même optique, il importe de faire appel au *crowdsourcing* afin de contribuer à contourner l'écueil financier auquel sont confrontés les pouvoirs publics pour l'alimentation de données historiques des bases de données numériques sols. Cette démarche permet en effet de mobiliser largement pour la récolte d'informations, mais également d'impliquer les citoyens dans la gestion et les usages du sol. Mais il

11. <https://www.zorg-en-gezondheid.be/nieuws/omwonenden-van-3m-fabriek-in-zwijndrecht-kunnen-zich-aanmelden-voor-een-bloedonderzoek-naar-pfas>

est à pointer que le règlement général sur la protection des données (RGPD), d'application au sein de l'Union européenne depuis le 25 mai 2018, risque de limiter toute marge de manœuvre possible par la mise en place d'un dispositif déterminant quels traitements sont autorisés et sous quelles conditions, ainsi que la façon dont les individus concernés peuvent faire valoir leurs droits¹². Dans cette optique, la consultation des bases de données de l'état des sols dans les trois régions belges est scindée en deux niveaux d'information : l'un pour le public, l'autre plus pointu et/ou rectifiable auquel peuvent accéder les propriétaires et/ou exploitants, ainsi que les personnes et sociétés accréditées.

À cet égard, le RGPD peut dès lors se placer en porte-à-faux avec la convention d'Aarhus signée en 1998 par la Communauté européenne et ratifiée par ses membres donnant aux personnes physiques et aux associations qui les représentent le droit d'accès à l'information et de participation au processus décisionnel en matière d'environnement, ainsi que d'exiger réparation si ces droits ne sont pas respectés¹³. Afin d'atténuer la portée de cette double contrainte, il peut être opportun de faire usage de la dérogation au RGPD accordée pour des « fins archivistiques dans l'intérêt public¹⁴ ». Cette dernière s'applique au traitement ultérieur des données à caractère personnel présentes dans les archives qui ont été transférées dans un service d'archives public, en vertu d'une obligation légale comme la loi sur les archives¹⁵.

Conclusion

Au niveau des citoyens, des administrations, comme des décideurs, il existe une prise de conscience collective sur la nécessité d'atteindre un niveau de qualité de l'eau et de l'air suffisant. En revanche, de par leur nature invisible et silencieuse, les pollutions du sol ne sont pas assez prises en compte. Le sol continue dès lors à être maintenu dans un carcan datant de la période napoléonienne, où les droits du propriétaire sont privilégiés au détriment d'autres usagers du sol. Deux siècles plus tard, la notion de « commun » réapparaît par les nuisances qui doivent être traitées collectivement, ouvrant de la sorte la voie vers un dialogue entre différentes composantes de la société. Toutefois, la gestion des sols pollués présente plusieurs obstacles d'ordre technique (diagnostic et traitement), financier (coûts des réaménagements), juridique ou encore d'accès à l'information. En outre, le sol fait l'objet de multiples concurrences devant concilier

12. <https://eur-lex.europa.eu/content/news/general-data-protection-regulation-GDPR-applies-from-25-May-2018.html?locale=fr>

13. Convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-NU), <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43f.pdf>

14. Article 89 du <https://gdpr-text.com/fr/read/article-89/>

15. La loi relative aux archives en Belgique du 24 juin 1955, modifiée par la loi du 6 mai 2009, *Moniteur belge*, 19 mai 2009.

des impératifs d'ordre alimentaire, d'infrastructure, sanitaire, patrimonial, climatique, économique ou encore de logement. Il s'agit dès lors de trouver de la marge en jouant sur les temporalités, les échelles et le champ chronologique. Ces défis doivent faire appel également aux citoyens afin de suppléer les manques de moyens financiers. Cette dynamique permet, dans le même mouvement, de démocratiser le processus de prise de décision en vue d'augmenter la plasticité des données numériques et les archives papier, dans leur traitement comme dans leurs usages.

Références bibliographiques

- Antoine F., 2017. Archives, outil de la réhabilitation des sites, *Cahiers bruxellois*, 49, 45-58.
- Cornelis L., 2021. Onderzoeksbalans industrieel erfgoed. Versie 2 september 2020, Gent, ETWIE.
- Blomme J., 1993. *The Economic Development of Belgian Agriculture: 1880-1980. A Quantitative and Qualitative Analysis*. Louvain, 443 p.
- Damar M., Delaunois P., 1988. Les organismes d'intérêt public en Belgique, *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 6-7, 3-54.
- Davila F., De Muynck S., Marsin M., Scohier C., Swartenbroeckx M.-A., 2020. *Les sols pollués bruxellois : revue critique et propositions*. Étude IEB, 23. https://www.ieb.be/IMG/pdf/davila_de_muynck_et_al_2020_sols_pollues_ieb.pdf
- De Muelenaere M., 2021 (17 juin). Wallonie : d'autres pollutions historiques qu'en Flandre, mais non des moindres, *Le Soir*. <https://www.lesoir.be/378686/article/2021-06-17/wallonie-dautres-pollutions-historiques-quen-flandre-mais-non-des-moindres>
- Faniel J., 2020. Santé : une répartition complexe des compétences, *Santé conjugulée*, 93, 33-36.
- Hobsbawm E. J., 2007. *L'ère des empires 1875-1914*. Paris, Fayard, 496 p.
- Horel S., 2023 (23 février). Révélation sur la contamination massive de l'Europe par les PFAS, ces polluants éternels, *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/02/23/revelations-sur-la-contamination-massive-de-l-europe-par-les-pfas-ces-polluants-eternels_6162940_4355770.html
- Merenne-Schoumaker B., 1989. La réhabilitation des anciens sites industriels : l'expérience wallonne, *Hommes et Terres du Nord*, 4, 353-357.
- Mougin C., Douay F., Canavese M., Lebeau T., Rémy É., 2020. *Les sols urbains sont-ils cultivables ?* Versailles, éditions Quæ, 227 p.
- Péters A., Defêchereux O., 2020. Retour sur l'expérience wallonne. In Rémy É. (dir.), *Les sols urbains sont-ils cultivables*, Versailles, éditions Quæ, 151-167.
- Robben F., Desterbecq T., Maes P., 2006. L'expérience de la Banque-carrefour de la Sécurité sociale en Belgique, *Recherches et Prévisions*, 86, 19-31.
- Segers Y., Van Molle L., 2004. *Leven van het Land : Boeren in België 1750-2000*. Louvain, 190 p.
- Seiler J.-L., 1999. Un État entre importation et implosion : consociativité, participative et lotissement dans la sphère publique en Belgique. In : Delwit P., De Waele J.-M., Magnette P., *Gouverner la Belgique : Clivages et compromis dans une société complexe*, PUF, Paris, 19.
- Terrizzi R., 1995. *Le ministère de l'Intérieur (1830-1994)*. I. - Étude de l'administration centrale et répertoires des commissions et services publics. Série *Miscellanea Archivistica*. Bruxelles, Studia, 74, Archives générales du Royaume.

Van Ossel D., 2021 (12 juin). La Flandre secouée par un scandale environnemental qui nous concerne tous. <https://www.rtb.be/article/la-flandre-secouee-par-un-scandale-environnemental-qui-nous-concerne-tous-10781726>

Vandermotten C., 2015. L'industrie bruxelloise : deux siècles et demi d'évolution, *Bruxelles Patrimoine*, 15-16, 8-21.

Yante J.-M., 2003. Le projet de recherche : « Les organismes d'intérêt public ou parastataux en Belgique. Créations, action, fonctionnement ». In : Yante J.-M., Tallier P.-A. (dir.), *Les parastataux en Belgique au xx^e siècle. Législations. Évolutions récentes / De parastatalen in België tijdens de 20^{ste} eeuw. Wetgeving. Recentevolutes. Série Miscellanea Archivistica Miscellanea. Studia*, Bruxelles, 153.