

L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain

J.-F. Brunet^(1*), P. Branchu⁽²⁾, C. Eychene⁽³⁾, S. Belbèze⁽¹⁾ et D. Guyonnet⁽¹⁾

- 1) BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex, France
- 2) Cerema, direction territoriale Ile-de-France, Equipe Team, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes, France
- 3) Soltracing, 9 rue des Pirogues de Bercy, 75012 Paris, France

* Auteur correspondant : jf.brunet@brgm.fr

RÉSUMÉ

Les acteurs de l'aménagement urbain portent un intérêt croissant aux informations leur permettant de qualifier et gérer les sols de leur territoire. Les données mises à leur disposition par les programmes du GIS Sol sont parmi les plus pertinentes pour les questions relatives à la prise en compte des sols, des fonctions et de la qualité chimique des sols. Dans ce dernier domaine, la base de données des analyses de sols urbains (BDSolU), portée par le BRGM, a vocation à jouer un rôle majeur. En effet, elle vise la mise à disposition de référentiels de fonds pédogéochimiques essentiels pour suivre les recommandations ministérielles en matière de diagnostic des sols potentiellement pollués et de gestion des terres excavées. Ce programme comprend l'acquisition de données, la mise au point du calcul des fonds pédogéochimiques et leur restitution aux utilisateurs. L'étude de l'interopérabilité des données BDSolU et DoneSol a aussi débuté pour permettre, à terme, l'interrogation simultanée des deux bases.

BDSolU a déjà contribué à la détermination de fonds pédogéochimiques des sols sur la basse vallée de la Seine à l'occasion du projet GeoBaPa piloté par Soltracing, et sur le territoire de Toulouse Métropole lors d'un projet de démonstration méthodologique conduit par le BRGM. En retour, des résultats d'analyses recueillis par ces projets ont aussi alimenté la base, ce qui permet d'améliorer sa représentativité statistique.

Les acteurs de l'aménagement ont désormais à répondre à de nouveaux enjeux et de nouveaux objectifs, notamment celui du zéro artificialisation nette (ZAN) fixé par la loi dite « Climat et résilience ». Celle-ci a introduit la prise en compte des fonctions exercées par les sols dans

Comment citer cet article :

Brunet J.-F., Branchu P., Eychene C., Belbèze S. et Guyonnet D., 2023 - L'offre du GIS Sol aux politiques d'aménagement urbain *Étude et Gestion des Sols*, 30, 195-206

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

le Code de l'Urbanisme. Le projet partenarial MUSE, coordonné par le Cerema, a produit pour les sols des cartes au 1/250 000 d'indicateurs de fonction et d'indice de multifonctionnalité en s'appuyant sur les données du GIS Sol. Les outils cartographiques mis au point fournissent un porter à connaissance sur les sols afin d'orienter les documents d'urbanisme. Ce projet met en avant le besoin de données complémentaires, pour augmenter l'échelle d'application mais également pour renseigner le milieu urbain.

À l'avenir, les programmes conduits par les membres du GIS Sol devront assurer la bancarisation de flux de données volumineux, respectant des prérequis en termes de qualité pour permettre l'appropriation de ces informations par l'ensemble des acteurs de l'aménagement du territoire. La sensibilisation de ces derniers à l'importance des sols et à leur préservation est un préalable indispensable.

Mots-clés

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, aménagement urbain, économie circulaire, fonctions des sols, cartographie.

SUMMARY

THE GIS SOL OFFER TO PLANNING POLICIES AND URBAN POLICIES

Urban planning stakeholders are increasingly interested in information enabling them to qualify and manage the soils of their territory. The data made available to them by the GIS Sol programs are among the most relevant for questions relating to the consideration of functions and chemical quality of soils. In this last area, the database of urban soil analysis (BDSolU), supported by BRGM, which joined GIS Sol in 2021, should play a major role. Indeed, it aims to provide essential pedogeochemical backgrounds to follow ministerial recommendations for the diagnosis of potentially contaminated soils and the management of excavated soil. This program includes data acquisition, development of the calculation of pedogeochemical backgrounds and restitution to users. The study of the interoperability of BDSolU and DoneSol data, carried out by INRAE, has also begun to allow the simultaneous interrogation of the two databases.

BDSolU has already contributed to the determination of the pedogeochemical backgrounds of soils in the lower Seine valley as part of the GeoBaPa project led by Soltracing, and in the territory of Toulouse Métropole during a methodological demonstration project led by BRGM. In return, the analysis results collected by these projects have also fed the database, which improves its statistical representativeness.

Development actors now have to respond to new challenges and new objectives, in particular that of zero net artificialization (ZAN) set by the so-called "Climate and Resilience" law. This law introduced the consideration of the functions exercised by soils in the Town Planning Code. The MUSE partnership project coordinated by Cerema has produced soil maps at 1:250,000 of function indicators and multifunctionality index based on data from the GIS Soil. The mapping tools developed provide knowledge on soils in order to guide urban planning documents. This project highlights the need for additional data, to increase the scale of application but also to better understand the urban environment.

In the future, the programs carried out by the members of the GIS Sol will have to ensure the storage of large flows of data, while respecting prerequisites in terms of quality to allow the appropriation of this information by all the actors of the development of the territory. Raising their awareness of the importance of soils and their preservation is an essential prerequisite.

Key-words

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, urban planning, circular economy, soils functions, cartography.

RESUMEN

LA OFERTA DEL GIS SOL A LAS POLÍTICAS DE ORDENACIÓN URBANA

Los actores de la ordenación urbana tienen un interés creciente en la información que les permita cualificar y gestionar los suelos de su territorio. Los datos proporcionados por los programas del GIS Sol son de los más pertinentes para las cuestiones relativas a la toma en cuenta de los suelos, de las funciones y de la calidad química de los suelos. En este último ámbito, la base de datos de análisis de suelos urbanos (BDSolU), llevada por el BRGM, tiene vocación de desempeñar un papel fundamental. En efecto, su objetivo es la puesta a disposición de referenciales de fondos pedogeoquímicos esenciales para seguir las recomendaciones ministeriales en materia de diagnóstico de los suelos potencialmente contaminados y de gestión de las tierras excavadas. Este programa incluye la adquisición de datos, la elaboración del cálculo de los fondos pedogeoquímicos y su restitución a los usuarios. El estudio de la interoperabilidad de los datos BDSolU y DoneSol, realizada por INRAE, también se ha iniciado para permitir, a largo plazo, la consulta simultánea de las dos bases.

BDSolU ya ha contribuido a la determinación de los fondos pedogeoquímicos de los suelos en el bajo valle del Sena durante el proyecto GeoBaPa dirigido por Soltracing, y en el territorio de Toulouse Métropole durante un proyecto de demostración metodológica dirigido por el BRGM. A su vez, los resultados de los análisis recogidos por estos proyectos también han contribuido a la base, lo que permite mejorar su representatividad estadística.

Los actores de la ordenación tienen ahora que responder a nuevos retos y nuevos objetivos, en particular el del cero artificialización neta (ZAN) fijado por la ley denominada «Clima y resiliencia». Ésta introdujo la toma en cuenta de las funciones ejercidas por los suelos en el Código de Urbanismo. El proyecto de colaboración MUSE, coordinado por Cerema, produjo para los suelos mapas al 1/250.000 de indicadores funcionales e índices de multifuncionalidad, utilizando los datos del GIS Sol. Los instrumentos cartográficos elaborados proporcionan información sobre los suelos para orientar los documentos de planificación. Este proyecto destaca la necesidad de datos complementarios, para aumentar la escala de aplicación pero también para conocer el medio urbano.

En el futuro, los programas dirigidos por los miembros del GIS Sol deberán garantizar la bancarización de flujos de datos voluminosos, respetando requisitos de calidad para permitir la apropiación de esta información por el conjunto de los actores de la ordenación del territorio. La sensibilización de estos últimos sobre la importancia de los suelos y de su conservación es una condición indispensable.

Palabras clave

GIS Sol, DoneSol, RRP, BDSolU, ordenación urbana, economía circular, funciones del suelo, cartografía.

LES ENJEUX ASSOCIÉS À LA CONNAISSANCE DE LA QUALITÉ DE SOLS

La nécessaire prise en compte des sols dans les opérations d'aménagement

L'aménagement du territoire, de la planification au projet d'aménagement urbains, a trop longtemps considéré les sols comme un support, négligeant largement leur importance écologique. Ces dernières années, les sols ont été mis à l'agenda sociétal (initiative citoyenne « People for soil »), politique (plan biodiversité), législatif et réglementaire, gagnant ainsi en considération. Le Code de l'urbanisme met ainsi en avant, depuis la promulgation en août 2021 de la Loi Climat et Résilience (Légifrance, 2021a) portant la lutte contre l'artificialisation des sols, l'importance des fonctions écologiques exercées par les sols et de leur préservation. **Les fonctions introduites dans la Loi sont les fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que le potentiel agronomique.** Ces fonctions, non définies dans le texte de Loi, s'approchent de celles proposées par la stratégie thématique européenne en faveur de la protection des sols (la production de biomasse et de matière première, le stockage, la filtration et la transformation d'éléments nutritifs, de substances et d'eau, la fourniture d'un support au développement de la biodiversité, la constitution d'un réservoir de carbone, ainsi que la conservation du patrimoine géologique et archéologique) mais restent globales par rapport à celles renseignées dans les publications scientifiques pour décrire la complexité du fonctionnement d'un sol (cf. par exemple Greiner *et al.*, 2017).

Face à cet enjeu, il est nécessaire de proposer une sensibilisation, d'œuvrer à une conscientisation sur les sols

et leurs importances mais également de fournir des outils aux différents acteurs en charge de la planification et de l'aménagement urbains pour qu'ils puissent intégrer la prise en compte des sols dans leurs choix. La mobilisation des données disponibles est alors indispensable pour proposer un véritable **porter à connaissance** sur les sols et ainsi orienter les choix d'aménagement notamment dans les zones péri-urbaines sous pression d'urbanisation. Le versement sur le Géoportail de l'IGN (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) de la carte des sols français au 1/250 000 issue du programme IGCS (INRAE, 2020) en a constitué la première étape.

Le développement récent de méthodes pour estimer la qualité des sols, basées sur des indicateurs ou indices, illustre clairement les besoins opérationnels mais également les difficultés à produire des outils suffisamment robustes (Rabot *et al.*, 2017 ; Bünemann *et al.*, 2018 ; Blanchart *et al.*, 2019). Les méthodes proposées sont ainsi plus ou moins complexes et génériques et utilisent des jeux de données souvent importants ce qui rend leur transfert vers l'opérationnel complexe.

L'importance du fond pédogéochimique pour la gestion des sites et sols (potentiellement) pollués

Les villes sont remaniées en permanence par les activités humaines. Constructions, démolitions, excavations, terrassements, apports de terres et remblais de matériaux, naturels ou non, s'y succèdent depuis des siècles. Les sols ainsi anthropisés et les sols relictuels de la couverture pédologique initiale constituent une véritable mosaïque rendant leur cartographie difficile (Belbèze *et al.*, 2023 ; Branchu et Montagne, 2020).

Les villes sont aussi le théâtre d'émissions atmosphériques diffuses de diverses substances (échappement des véhicules,

cheminées des industries et des chauffages collectifs ou individuels) et localement de pollutions concentrées. Les usages et pratiques sont également responsables d'un enrichissement des sols urbains en substances polluantes.

Ces activités, ces intrants perturbent le fonctionnement et l'organisation des sols urbains. Il est donc nécessaire, dans la planification urbaine, de préserver les sols les plus fonctionnels, d'envisager dans certains cas de re-fonctionnaliser les sols dégradés dans les milieux urbains et avant tout, de mieux connaître ces sols et notamment leur composition chimique. En effet, leurs concentrations en métaux, en métalloïdes et aussi en composés organiques présentent souvent de fortes variations spatiales et les concentrations habituelles de ces substances, ce que l'on appelle le **fond pédogéochimique**, sont peu ou mal connues.

Les substances en question peuvent être des molécules organiques ou des composés et éléments minéraux. En vue d'éviter leurs potentiels effets nocifs sur le long terme, on se focalise sur les substances persistantes dans les sols, comme les métaux (plomb, mercure, chrome, cadmium...) et métalloïdes (arsenic, antimoine...) et les molécules qui ne sont pas ou peu sujettes à la dégradation : hydrocarbures dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), dioxines et furanes. On retient également les polluants persistants émergents comme les composés perfluorés ou certains principes actifs pharmaceutiques.

Certaines de ces substances peuvent avoir pour origine les activités humaines en plus d'être présentes dans les sols naturellement en fonction de la nature de la géologie locale. D'autres sont uniquement d'origine anthropique.

Il est donc nécessaire, particulièrement en milieu urbain, de tenir compte de l'influence diffuse des activités humaines sur le fond pédogéochimique naturel et c'est pourquoi l'on parle de **fond pédogéochimique anthropisé ou FPG**.

Le fond pédogéochimique est essentiel pour **diagnostiquer les sites et sols pollués** (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017) et pour **valoriser les terres excavées** que l'on doit parfois évacuer des chantiers (Coussy et al., 2020). En effet, dans un cas comme dans l'autre, la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués recommande en premier lieu la comparaison de la qualité des sols des sites concernés avec, respectivement, des « valeurs d'analyse de la situation » et des « valeurs-seuils nationales ». Il s'agit de valeurs dérivées des concentrations dites « habituelles » des sols ou « gammes de valeurs couramment observées dans les sols « ordinaires » de toutes granulométries issues de l'étude ASPITET¹ » d'INRAE (Droissart-Long, 2018). Cette comparaison est souvent affinée au moyen de valeurs locales de fonds pédogéochimiques

ou de fonds pédogéochimiques anthropisés (Ministère de la Transition écologique, 2020).

Or, les valeurs ASPITET, déterminées à partir d'études conduites en milieu agricole et forestier (Baize, 2000), ne reflètent pas les concentrations habituelles en milieu urbain. Des valeurs de fond pédogéochimique anthropisé ont été produites localement par quelques projets et collectivités. Mais la méthode de calcul et même les protocoles pour l'obtention des données nécessaires à ce calcul font l'objet de débats (Belbèze et al., 2023). Ainsi, l'ensemble du territoire français n'est pas encore couvert sur la base d'une approche nationale robuste et homogène. Il y a pourtant un enjeu majeur à mieux connaître la qualité chimique des sols urbains, notamment dans le cadre de la requalification des friches urbaines encouragée par les différentes politiques gouvernementales et encore récemment par le **plan France Relance** (Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, 2022).

LES DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES AYANT MOBILISÉ LES DONNÉES

Porter à connaissance des sols et de leurs fonctions

Le projet MUSE - Un porter-à-connaissance des sols et de leur multifonctionnalité à l'échelle du territoire urbain

Le projet MUSE (Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme) financé par l'Ademe dans le cadre de l'appel à projet Modevalurba produit en 2022 (Branchu et al., 2022) une méthode générique applicable sur l'ensemble du territoire et basée en grande partie sur les données « sol » associées aux Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) afin de construire des cartes de quatre fonctions écologiques potentiellement exercées par les sols (régulation du cycle de l'eau, production de biomasse, réservoir de carbone et réservoir de biodiversité) et au final une carte de la multifonctionnalité potentielle des sols. Ces fonctions sont décrites par des indicateurs (potentiel d'infiltration, potentiel agronomique, stock potentiel de carbone et abondance/diversité lombriciennes, respectivement) reposant sur différentes données (données brutes du RRP au format DoneSol², données statistiques). Quelle

¹ ASPITET : Apports d'une Stratification Pédologique à l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces

² DoneSol est la base de données nationale structurant et regroupant les données ponctuelles et surfaciques des études pédologiques : <https://www.gissol.fr/outils/donesol-web-336#>

que soit l'origine de la donnée, la restitution cartographique en milieu non urbain s'appuie sur une représentation à l'échelle des unités cartographiques de sols proposées par le RRP. L'usage des données brutes associées au RRP a été, lorsque cela s'avérait possible, privilégié pour construire ces indicateurs. En raison de l'âge des RRP (et de leurs données), il a été choisi de s'appuyer sur les paramètres intrinsèques et pérennes du sol. Cela a ainsi été le cas pour les fonctions de production de biomasse et de régulation du cycle de l'eau (Figure 1). Les données utilisées sont celles correspondant à l'unité typologique de sol (UTS) prépondérante dans l'unité cartographique de sol (UCS) considérée. Les cartes des fonctions s'accompagnent alors d'une carte reflétant la représentativité de l'UTS considérée au sein de l'UCS. À ces cartes de fonctions sont également associées des cartes présentant les contraintes : salinité, pente, contamination pour le potentiel agronomique et pente pour le potentiel d'infiltration.

L'indice de multifonctionnalité est ensuite construit sur la base d'une simple somme des quatre fonctions écologiques (Figure 2).

Pour les deux autres fonctions (réservoir de carbone, réservoir de biodiversité), les données n'étant pas disponibles à l'échelle des UCS, il a été fait le choix d'utiliser des données exploitées non plus à l'échelle des UCS, mais à l'échelle des

Figure 1 : Logique de caractérisation des fonctions écologiques. © Cerema

Figure 1: Logic of characterization of ecological functions. © Cerema

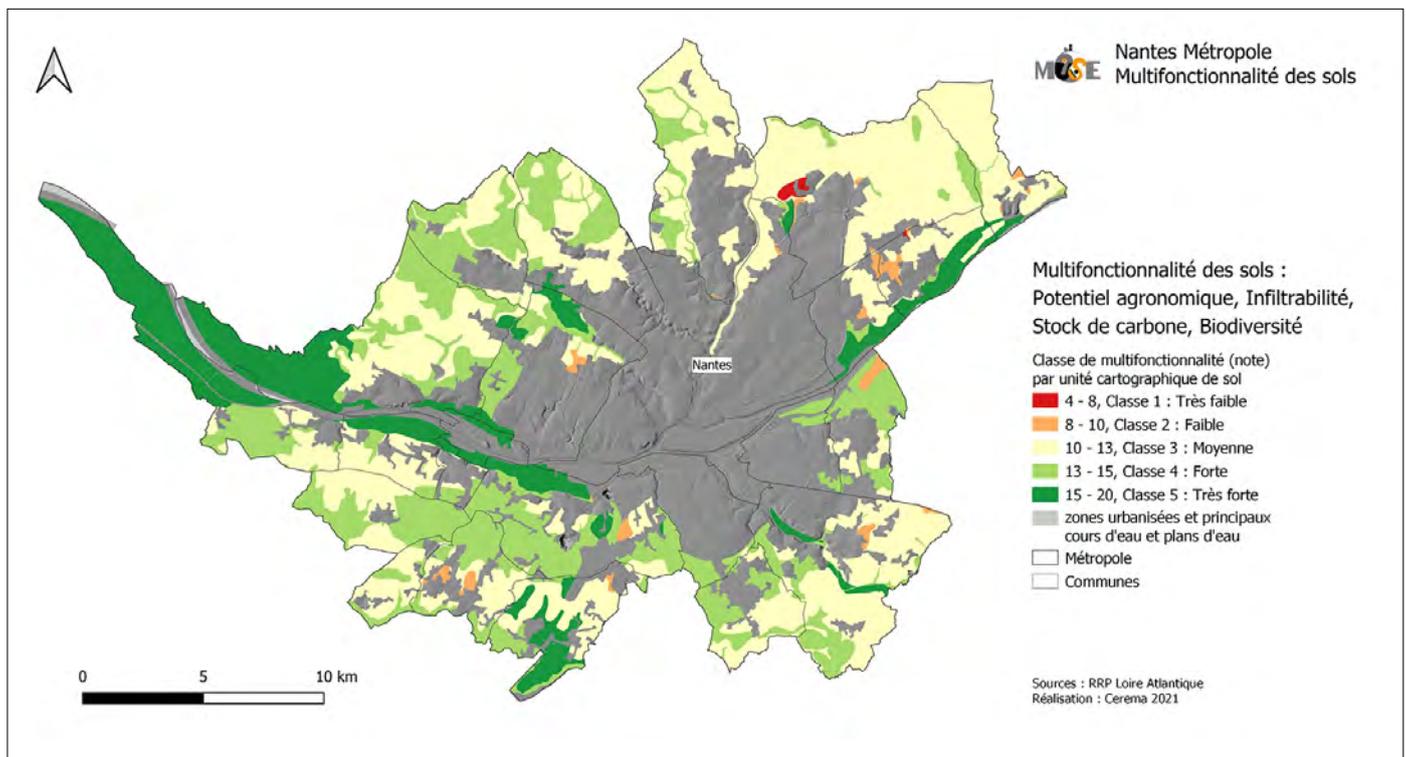
Fonction	Source de biomasse	Régulation du cycle de l'eau
Indicateur	Potentiel agronomique	Potentiel d'infiltration
Paramètre (sous-indicateur)	Réservoir utile Texture de surface pH Profondeur du sol Charge en éléments grossiers	Présence d'un niveau imperméable Texture de surface Degré d'hydromorphie Perméabilité du sol*

* Obtenu par fonction de pédotransfert

postes d'occupation des sols. Ces données ont été produites en partie à partir des données du programme « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols » (RMQS) du Gis Sol. C'est notamment le cas des données issues de l'outil Aldo de l'ADEME qui permet d'estimer le stock de carbone du sol en fonction de l'occupation du sol (Perez *et al.*, 2018) et celui du réservoir de biodiversité qui s'appuie sur les données statistiques d'abondance et de diversité spécifique des vers de terre issues de la base de données EcoBioSoil (Observatoire National de la Biodiversité,

Figure 2 : Illustration de la carte de multi-fonctionnalité potentielle des sols sur le territoire non urbain de Nantes Métropole. © Cerema

Figure 2: Illustration of the map of potential soil multifunctionality in the non-urban territory of Nantes Métropole. © Cerema



2021). Les indicateurs stock de carbone et abondance/diversité des vers de terre ont ensuite été calculés pour chaque UCS du RRP.

Les différentes cartes sont associées à cinq classes notées de 1 à 5, la note 1 correspondant à une intensité de la fonction exercée, ou de la multifonctionnalité, la plus faible, et 5 à la plus forte. La représentation cartographique de ces notes va du rouge (note la plus faible) au vert (note la plus forte) (Figure 2).

Ces cartes, associées aux UCS des RRP, s'arrêtent aux abords des agglomérations urbaines, faute de données utilisables dans ces zones. À l'heure actuelle il est ainsi impossible d'appliquer la méthode décrite ci-dessus dans le milieu urbain. Le projet MUSE a alors fait appel, dans ces zones urbaines, à une approche par proxy basée sur le fait que la profondeur d'un sol permettrait d'approcher l'aptitude des sols à exercer certaines fonctions. L'hypothèse est faite que, suite au processus d'aménagement urbain, la profondeur du sol est pilotée par le type de végétation plantée. Le croisement du taux d'imperméabilisation des sols (données satellitaires du programme Copernicus) et du type de végétation (Base OCSGE de l'IGN ou données du programme Copernicus) permet alors de proposer un indice représentant la capacité potentielle d'un sol urbain à exercer tout ou partie des fonctions associées à un sol naturel. Cet indice est cartographié à une échelle très fine, les données Copernicus étant produites par carreaux de 10 x 10 m.

Perspectives

Ce travail illustre la possibilité de produire, à l'échelle du 1/250 000^e et en dehors du milieu urbain, des cartes de connaissance des sols et des fonctions qu'ils exercent.

Si ces cartes sont bien adaptées aux échelles supra-communales des schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) et des schémas de cohérence territoriale (SCoT), elles ne répondent pas aux besoins plus précis des PLU (Plans locaux d'urbanisme) et encore moins des projets d'aménagement. Des données supplémentaires sont alors nécessaires, notamment dans des zones à enjeux particuliers (biodiversité, agriculture...). Elles permettront ainsi d'orienter les choix de la collectivité dans son document d'urbanisme mais aussi de renseigner les indicateurs pour définir le degré d'artificialisation d'un sol dans le cadre d'un projet d'aménagement.

Les fonds pédogéochimiques anthropisés

Le projet Fonds pédogéochimiques Urbains (FGU) - La détermination de fonds pédogéochimiques anthropisés en milieu urbain

Pour déterminer de façon uniforme le FPGA dans les 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 « Etablissements de fonds pédogéochimiques urbains - FGU ». A partir de 2014, la BDSolU a été conçue et développée comme base nationale de référence pour engranger et valoriser ces analyses (BRGM, 2022).

Ce projet de détermination des valeurs de fond pédogéochimiques urbains comprend quatre grands volets :

- la **bancarisation des données** collectées à travers la France ;
- l'**étude de l'interopérabilité** des données DoneSol et BDSolU ;
- la **mise au point d'une méthode de calcul du FPGA** ;
- la création d'une **interface interactive** permettant de restituer les résultats de ces calculs.

L'objectif 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.

Chacun de ces volets implique de relever des défis particuliers à chaque étape de la procédure, depuis l'acquisition jusqu'au traitement et à la diffusion des données.

Bancariser les données

Pour des raisons pratiques, le projet FGU ne fait pas appel à un programme spécifique de prélèvements et d'analyses. En effet, 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, ministères, établissements publics fonciers, bureaux d'études, projets d'aménagement, projet de recherche. Ainsi, le premier projet contributeur appelé « Etablissements sensibles » a été conduit à partir de 2008 par le BRGM pour le ministère de l'Écologie et du Développement Durable, et consistait à réaliser des diagnostics préventifs des sols dans les établissements accueillant des enfants ou des adolescents (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022).

Il est important de prendre en compte que les prélèvements contributeurs ne relèvent donc pas d'un plan d'échantillonnage dans une maille géographique régulière, dans une période de temps 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 de bâtiments et de la densité des différents réseaux (voies routières, égouts, distribution d'énergie, télécommunications, transports sous-terrain).

L'interopérabilité des données

L'interopérabilité des données DoneSol et BDSolU a été étudiée dans le cadre du projet FGU et du projet SUPRA (Sols Urbains et Projets d'Aménagement, *de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols*) conduit de 2018 à 2021 par le Laboratoire Sols et Environnement de l'Université de Lorraine (SUPRA, 2021). Il s'agit de rendre interopérables les données des bases BDSolU et DoneSol en raison de la complémentarité de leur contenu en matière de répartition géographique (espaces rural et urbain) et de paramètres analysés (chimiques et pédologiques).

À terme, cette interopérabilité, construite sur des standards reconnus et des normes internationales (Observations and Measurements, SensorThings API de l'Open Geospatial Consortium; OGC, 2022), permettra des croisements avec d'autres bases en France et à l'étranger. Les premiers jalons de possibles collaborations avec les programmes européens LUCAS³ (European Commission, 2021) et EUSO⁴ (Bispo et Le Bas., 2021) ont d'ores et déjà été posés.

Mise au point d'une méthode de calcul des Fonds pédogéochimiques anthropisés (FPGA) urbains

Les informations qui alimentent la BDSolU comportent une très forte hétérogénéité de lieux de prélèvement, de méthodes de sondage, d'échantillonnage et d'analyse, due aux différents objectifs visés par les divers projets contributeurs, aux différentes pratiques des intervenants et à l'évolution de ces pratiques dans le temps. Les résultats d'analyses ainsi recueillis font le plus souvent partie d'études de diagnostic de sols en lien avec des activités industrielles, potentiellement polluantes. De ce fait, elles ne sont pas systématiquement les plus représentatives du fond pédogéochimique recherché. En outre, la collecte de ces données d'origines diverses, leur mise en forme, la vérification et l'éventuel ajout des données descriptives complémentaires aux jeux de données fournis, impliquent un important travail d'harmonisation et représentent des postes importants lors de la constitution d'une telle base de données.

La base de données BDSolU a donc été prévue pour bancariser de nombreuses informations permettant de décrire les différents lieux de prélèvement à différentes échelles géographiques : registres d'occupation du sol dans la ville

« OCSOL GE » développés par le CRIGE en région 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 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 éléments grossiers), et enfin de préparation et d'analyse au laboratoire ou sur site sont aussi bancarisées. Dans la plupart des cas, ces dernières informations sont codifiées selon les registres développés par le SANDRE (Sandre, 2022).

Actuellement, la détermination de valeurs de fonds pédogéochimiques est réalisée par le BRGM dans le cadre du projet FGU. Le traitement des données comprend une étape de sélection d'analyses représentatives des FPGA attendus, puis une étape de calcul des valeurs de fond faisant appel à la **limite supérieure interne de Tukey** (Tukey, 1977). En raison des effectifs encore limités des résultats d'analyse bancarisés, les valeurs de fonds pédogéochimiques sont pour l'instant en cours de détermination pour quelques villes et agglomérations de France. Les résultats calculés pour ces zones géographiques dotées d'un nombre suffisant d'analyses, seront assortis d'avertissement sur les conditions générales de leur obtention et les limites de leur utilisation.

Restituer les résultats

À l'issue du traitement des données, le projet porteur de la BDSolU prévoit la diffusion des résultats des calculs en fonction de l'effectif de la population obtenue à l'étape de sélection. Si cet effectif est inférieur à un seuil bas actuellement fixé à 30, seules des statistiques de base (moyenne, médiane et principaux quantiles) ainsi que des représentations de la distribution de la population (histogrammes, boîtes de Tukey; Tukey, 1977) et des cartes seront fournies pour chaque élément ou substance. Ces cartes sommaires présenteront des cercles proportionnels aux concentrations analysées pour chaque point de prélèvement. Un effectif supérieur à 30 autorise le calcul et la proposition de valeurs de fond en complément de ces informations.

Toutefois, la restitution de données géoréférencées et de cartes présentant les points de prélèvement se heurte aussi à une volonté de la part des propriétaires des données de ne pas révéler la localisation de ces points afin de ne pas porter préjudice à la valeur foncière du terrain (même en cas de concentrations très faibles). Les consignes de confidentialité attachées à chaque lot de données sont donc également

3 LUCAS : Land Use and Coverage Area frame Survey
<https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/lucas>

4 EUSO : EU Soil Observatory
https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso_en

bancarisées et prises en compte au moment de la sélection des données et de la restitution cartographique.

La mise à disposition de ces résultats au public est prévue en 2023.

Les perspectives du projet

Depuis 2018, le projet se poursuit en partenariat avec l'unité InfoSol 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.

À terme, la poursuite de la bancarisation de nouvelles données doit permettre d'étendre la restitution des fonds pédogéochimiques au reste du territoire national et plusieurs tâches restent à mener comme :

- le perfectionnement de la méthode de détermination des valeurs de fond et de l'algorithme associé ;
- la détermination des incertitudes de calcul ;
- le développement et l'automatisation de calculs d'interpolation et géostatistiques pour la restitution de cartes de FPGA (Sauvagat, 2019 ; Belbèze *et al.*, 2019) ;
- le développement de l'interface web et de l'outil cartographique interactif d'interrogation de la BDSolU en temps réel ;
- l'interrogation d'autres bases de données, dont DoneSol, grâce à la mise en place de l'interopérabilité des données.

LES FONDS PÉDOGÉOCHIMIQUES ANTHROPIÉSÉS, EXEMPLES DE PROJETS UTILISATEURS ET CONTRIBUTEURS

Le projet GeoBaPa - Un référentiel de fonds pédogéochimiques pour la basse vallée de la Seine

Soltracing intervient dans le cadre de projets d'aménagement pour garantir les bonnes conditions de réutilisation des terres excavées, notamment le maintien de la qualité des sols sur les sites où sont réutilisées ces terres. Cette société privée est à la fois contributrice au programme BDSolU et utilisatrice de ses données. De 2016 à 2020, Soltracing a piloté le projet GeoBaPa (Soltracing, 2022a) de détermination des valeurs de fond sur la basse vallée de la Seine dans les régions Ile-de-France et Normandie. Ce projet a produit un référentiel spécifique à ces régions, sur la base de données recueillies en propre ou auprès de collectivités et d'organismes d'aménagement ou de recherche. Ces données rejoignent la BDSolU tandis que celles qui y étaient déjà bancarisées ont aussi été mises à contribution. Le référentiel GeoBaPa est utilisé pour les opérations de valorisation des terres excavées dans le cadre de projets

d'aménagement, notamment paysagers (Figure 3).

Soltracing intervient sur l'ensemble du territoire métropolitain et, dans ce cadre, sera utilisateur des données BDSolU obtenues dans d'autres régions et pour la détermination de fond pédogéochimiques dans des agglomérations comme Bordeaux, Toulouse ou Lyon. Ces données pourront être utilisées dans les outils d'aide à la décision que Soltracing propose en vue de garantir que les opérations de réutilisation respectent bien la qualité des sols urbains en place.

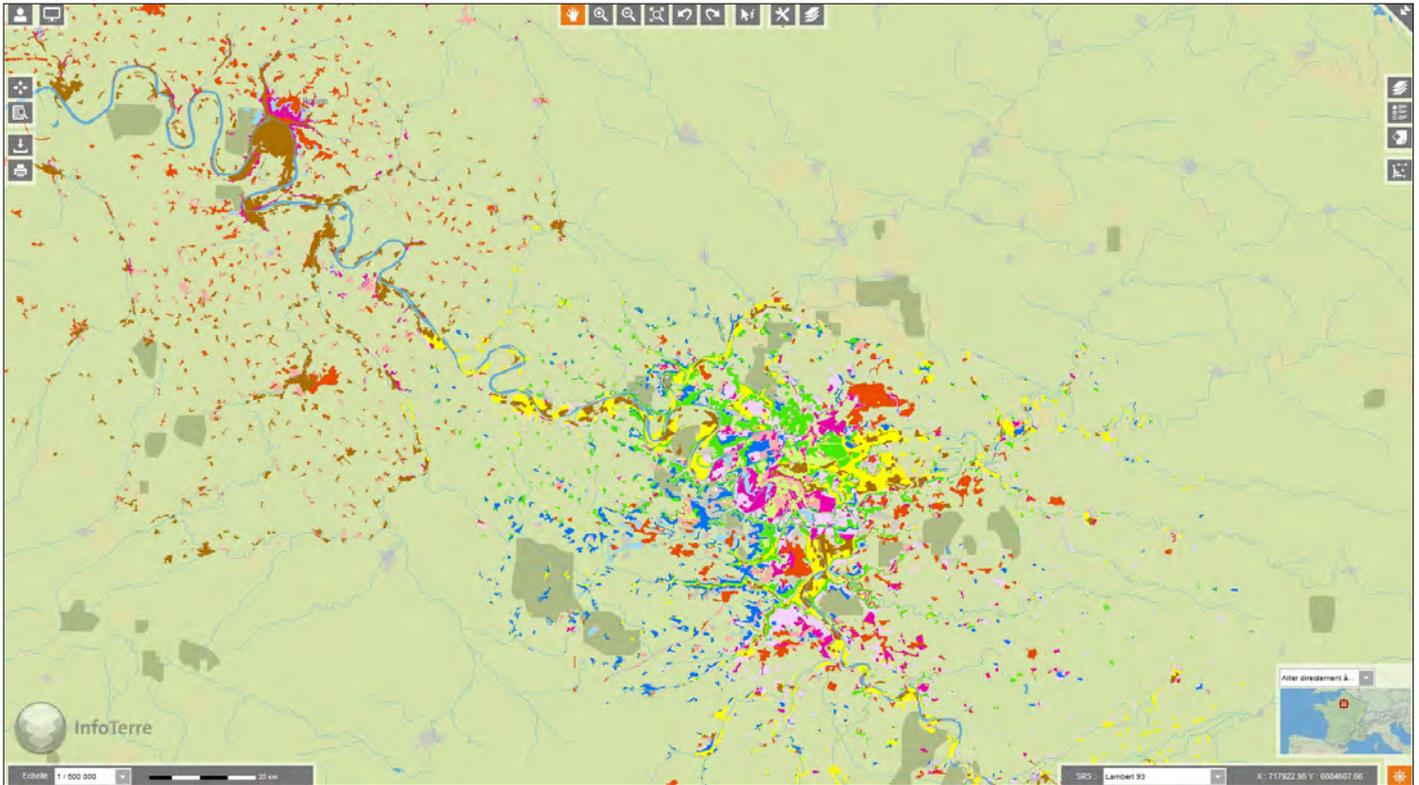
L'arrêté du 4 juin 2021 fixe les critères de sortie du statut de déchet des terres excavées. Ce texte a pour objectif de favoriser leur valorisation au détriment de leur évacuation en centre de stockage, pratique encore trop courante (Légifrance, 2021b). L'article R541-45 du Code de l'Environnement précise les conditions de leur traçabilité (Légifrance, 2021c). En effet, une partie des 160 millions de tonnes de terres excavées produites sur des chantiers de construction en France chaque année n'entrait pas dans un processus de traçabilité. En Ile-de-France ce volume de terres sans traçage s'élevait à 4 millions de tonnes. La connaissance des flux et de la qualité de ces terres, en particulier celles jugées *a priori* sans impact de pollution et parfois mal gérées, peut encore être améliorée. C'est l'enjeu des plateformes de caractérisation et de traçabilité en ligne comme celles développées par Soltracing (Soltracing, 2022b) ou par le BRGM avec l'appui du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (Terrass, 2022).

Le projet FGU Toulouse - Un démonstrateur de la méthode de détermination des fonds pédogéochimiques proposée par le groupe de travail conduit par l'ADEME

Le BRGM a réalisé pour le compte du Ministère de la Transition écologique et solidaire, une opération de démonstration de la faisabilité opérationnelle des recommandations des guides de détermination des valeurs de fonds produits par l'ADEME en 2018 (Belbèze *et al.*, 2019) (Figure 4). L'objectif était de fournir à Toulouse métropole un appui méthodologique pour la valorisation des terres excavées sur son territoire. L'outil développé vise en effet à terme, à apporter aux différents acteurs de la métropole (collectivités, bureaux d'études, promoteurs...) une meilleure connaissance de la qualité chimique des sols urbains. Cette opération a été l'occasion de valoriser des données déjà obtenues par la métropole Toulousaine dans le cadre d'un IHU (inventaire historique urbain), de ses chantiers d'aménagement et les données recueillies par la BDSolU sur son territoire (notamment dans le cadre des diagnostics des sols dans les établissements accueillant des enfants et des adolescents). Ces analyses ont été complétées par celles obtenues lors de deux campagnes d'échantillonnage réalisées spécialement par le

Figure 3 : Extrait de la cartographie géostatistique des sous-zones de fond pédogéochimique de type « remblai » obtenue par le projet GeoBaPa sur le Bassin Parisien ; légende et tableau des valeurs associées. Disponibles depuis le visualiseur InfoTerre du BRGM <http://infoterre.brgm.fr>. © BRGM

Figure 3: Extract from the geostatistical cartography of the sub-zones of the pedogeochemical background of the “backfill” type obtained by the GeoBaPa project on the Paris Basin; map legend and table of the associated values. Available from the BRGM InfoTerre viewer <http://infoterre.brgm.fr>. © BRGM



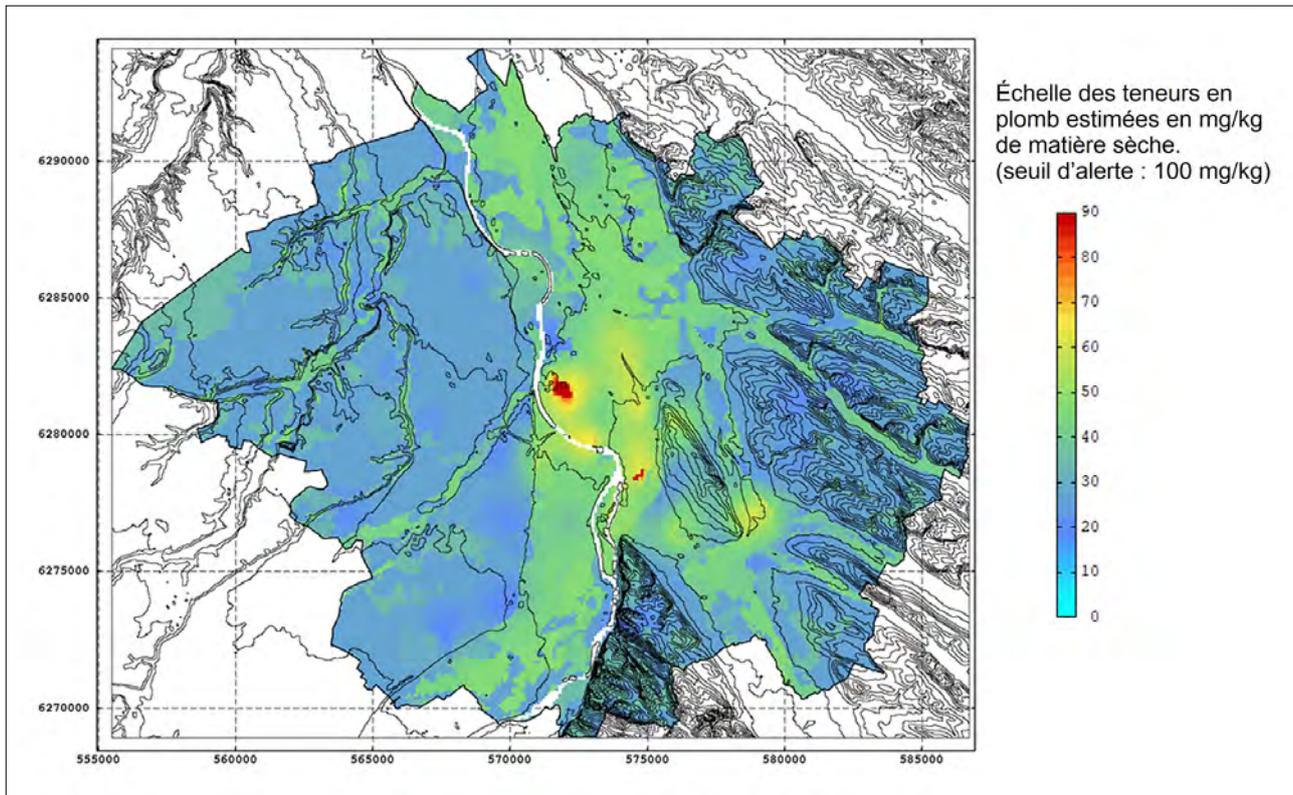
VALEURS DE FOND PEDO-GEOCHEMIQUE – NIVEAU 2 (en mg/kg de matière sèche)																
SUBSTANCE	ZONE 1	ZONE 2		ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6	ZONE 7	ZONE 8	ZONE 9	ZONE 10	ZONE 11	ZONE 12	ZONE 13	ZONE 14	ZONE 15
	Nat.	Nat.	Remb.	Nat.	Nat.	Nat.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.	Nat.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.	Remb.
ELEMENTS TRACES METALLIQUES	Arsenic (As)	25	25	30	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Baryum (Ba)	150	170	150	150	150	210	150	230	160	150	150	150	230	300	160
	Cadmium (Cd)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9	0,6	0,6	0,8	0,4
	Chrome (Cr)	90	90	100	100	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	Cuivre (Cu)	40	40	40	40	40	60	50	60	50	40	120	40	60	100	40
	Mercure (Hg)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	0,8	0,15	0,15	0,6	0,2	0,6	1,8	1,2
	Molybdène (Mo)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Nickel (Ni)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Plomb (Pb)	50	50	50	50	50	110	70	140	100	50	180	90	150	170	70
	Antimoine (Sb)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Sélénium (Se)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zinc (Zn)	150	150	150	150	150	230	150	170	180	150	250	150	150	200	150	
COMPOSES ORGANIQUES PERSISTANTS	7 PCB	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	16 HAP	10	10	10	10	10	10	10	20	10	10	10	15	10	10	10
SUBSTANCES ORGANIQUES	Hydrocarbures totaux C10-C40	50	50	50	50	50	50	60	80	300	100	100	150	100	150	80

« Nat. » : rendu unique ou présence de terrain naturel sur le site receveur (couleurs associées à la cartographie « Valeurs de fond pédogéochimiques uniques ou naturelles des régions Ile-de-France / Normandie »)

« Remb. » : présence de remblais anthropiques sur le site receveur (couleurs associées à la cartographie « Valeurs de fond pédogéochimiques en terrain remblayé des régions Ile-de-France / Normandie »)

Figure 4 : Cartographie géostatistique des teneurs en plomb du FPGA dans les sols urbains de la Métropole de Toulouse ayant pu être établie à partir des données disponibles (krigeage simple avec moyenne et variance locales variant en fonction de la géologie et de l'occupation du sol). © BRGM

Figure 4: Geostatistical mapping of the lead content of the FPGA in the urban soils of the Metropolis of Toulouse that could be established from the available data (simple kriging with local mean and variance varying according to geology and land use) (Belbèze et al., 2019). © BRGM



BRGM qui ont permis de réunir 40 échantillons de sols de surface et 100 échantillons de sols profonds prélevés tous les mètres dans 20 sondages de 5 m de profondeur. Les analyses ont porté sur 24 paramètres : éléments traces métalliques, HAP, cyanures totaux, indice phénol, PCB, BTEX, somme des hydrocarbures légers C5-C10, somme des hydrocarbures C10-C40 et dioxines. À leur tour, ces résultats complémentaires alimentent la BDSolU.

L'intérêt de jeux de valeurs de fond au niveau local est multiple et cela peut être illustré au travers de différents exemples :

- la comparaison des résultats d'analyses de sol disponibles aux seuils de niveau 1 du Guide ministériel de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement (Coussy et al., 2020) peut mettre en évidence des dépassements des valeurs seuils pour chacune des entités géographiques considérées. Dans ce cas, l'existence de valeurs de fond permet d'augmenter sensiblement les chances de trouver un **site receveur compatible** et susceptible de pouvoir accueillir les stocks de terres excavées ;

- la comparaison des résultats de diagnostics de sols aux valeurs du référentiel obtenu peut conduire à la réalisation d'**études de risques sanitaires**. Il complète alors le référentiel ASPITET habituellement utilisé, obtenu par INRAE pour des zones agricoles, quand celui-ci manque de valeurs pour certains paramètres, notamment les composés organiques.

Les méthodes d'exploitation des résultats proposées par le BRGM au travers de cette étude ont ainsi permis de définir, au regard du contexte local, les fonds pédo-géochimiques anthropisés sur le territoire de Toulouse Métropole (Figure 3). Ces valeurs ont vocation, par exemple, à favoriser l'économie circulaire, notamment la valorisation des terres excavées sur ce territoire tout en évitant de dégrader la qualité des sols de la zone d'accueil. Les valeurs de fond pédo-géochimique anthropisé permettent ainsi de limiter le nombre d'études de risques sanitaires habituellement nécessaires (Belbèze et al., 2019).

CONCLUSIONS ET BESOINS FUTURS

Les activités humaines exercent une forte pression sur les sols. Toutefois, le législateur s'est emparé de cette problématique et produit des textes de loi pour assurer la sauvegarde et la réhabilitation de cette ressource.

La lutte contre l'artificialisation des sols est au cœur de la **loi Climat et résilience de 2021**. Le projet MUSE a proposé des indicateurs des 4 fonctions écologiques introduites par cette loi et a produit des cartes utilisables dans les documents d'urbanisme. Il s'agit maintenant de déterminer comment caractériser un sol artificialisé ou une surface désartificialisée à l'échelle du projet d'aménagement ce qui permettra aux collectivités de mieux connaître les fonctionnalités des sols dans les milieux urbain et périurbain.

Le Code de l'environnement encadre la traçabilité des terres excavées. La connaissance des flux et de la qualité de ces terres devrait s'améliorer dans les années qui viennent. Il est toutefois fondamental que les aménageurs s'approprient ces démarches.

De même, la nécessaire requalification des friches urbaines pour limiter le mitage des campagnes est appuyée depuis 2014 par la **loi ALUR** (Accès au logement et à un urbanisme rénové ; Légifrance, 2014) et plus récemment par le **Plan France Relance** (Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, 2022). Elle implique de toujours mieux connaître la qualité chimique des sols urbains.

La BDSolU fait partie des programmes du GIS Sol depuis que le BRGM a rejoint le Groupement en janvier 2021. Les objectifs de ce programme restent l'appui aux décideurs et aux aménageurs en les informant de façon homogène, complète et précise sur les zones es zones urbaines et périurbaines. L'un des enjeux est une plus grande implication des collectivités détentrices de données, afin qu'elles alimentent la BDSolU. Ainsi, de nouvelles collaborations entre le programme BDSolU et des projets comme GeoBaPa ou la détermination des fonds pédogéochimiques sur le territoire de Toulouse Métropole sont encouragées.

À l'avenir, il conviendra d'encadrer la production de ces flux de données toujours plus volumineux pour les capitaliser dans de bonnes conditions, notamment dans les bases de données DoneSol et BDSolU. Cet autre enjeu important pour le GIS Sol nécessitera une sensibilisation de l'ensemble des acteurs (élus, aménageurs, citoyens), à l'importance des sols et à la préservation de leur qualité, notamment par le recours aux sciences participatives.

Les outils de caractérisation des sols et de leurs fonctions sont alimentés par les données de la base DoneSol en milieu rural et, dans un futur proche, feront aussi appel aux données relatives aux sols urbains disponibles dans la BDSolU. Des données agropédologiques, qui pourraient être produites dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie ZAN, seront aussi nécessaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les organisateurs de la journée des 20 ans du GIS Sol du 6 décembre 2021 à Paris, France, pour leur invitation à participer à cette journée puis à transcrire dans le présent article les propos échangés au cours de la session de cette journée intitulée « L'offre actuelle du GIS Sol en support aux politiques d'aménagement du territoire ». Cette session a intégré les présentations :

- de la base de données des analyses de sols urbains BDSolU pilotée par le BRGM avec le cofinancement de l'ADEME dans le cadre du projet FGU « Établissement de fonds pédogéochimiques urbains » conduit en partenariat avec INRAE et eOde, et avec l'appui de Mines ParisTech ;
- du projet « Référentiel de fond pédo-géochimique du bassin parisien » GeoBaPa piloté par Soltracing avec le financement de l'ADEME, les Régions Ile-de-France et Normandie, le groupement d'Agences d'Urbanisme Vallée de la Seine et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en partenariat avec BG Ingénieur Conseils, Geovariances, le BRGM et ESIRIS Group ;
- du projet MUSE « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme » soutenu par l'ADEME et le ministère de la Transition écologique et solidaire, et piloté par le Cerema en association avec INRAE, le BRGM, la Chambre d'Agriculture de l'Indre, l'IRSTV, l'Université Gustave Eiffel, l'Université Aix-Marseille et le CEREGE.
- Les diaporamas présentés et la vidéo de la discussion sont disponibles sur le site internet du GIS Sol : <https://www.gissol.fr/non-classe/journee-les-20-ans-du-gis-sol-5559>

Le BRGM remercie l'ADEME pour le co-financement du projet « Établissement de fonds pédogéochimiques urbains - FGU » (2010-2023), ainsi que pour son financement du projet « Sols Urbains et Projets d'Aménagement, de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols - SUPRA ». Le BRGM et Soltracing remercient l'ADEME, les régions Ile-de-France et Normandie, le groupement d'Agences d'Urbanisme Vallée de la Seine et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer pour le financement du projet « Référentiel de fond pédo-géochimique du bassin parisien - GéoBaPa ». Le BRGM remercie le ministère de la Transition écologique et solidaire pour son co-financement du projet « FGU Toulouse ». Le BRGM et le Cerema remercient le ministère de la Transition écologique et l'ADEME pour le financement du projet « Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme - MUSE ».

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2018). Méthodologie de détermination des valeurs de fonds dans les sols : Echelle d'un site/d'un territoire. Groupe de travail sur les valeurs de fonds. 107 p. <https://bibliothèque.ademe.fr/sols-pollues/32-guide-pour-la-determination-des-valeurs-de-fonds-dans-les-sols-echelles-d-un-territoire-d-un-site.html>
- Baize D. (2000). Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA. n° 39, pp. 39-54.
- Belbèze S., Rohmer, Négrel P., Guyonnet D. (2023). Defining urban geochemical backgrounds: a review and proposals for addressing uncertainties. *Science of the Total Environment* (soumis).
- Belbèze S., Djemil M., Béranger S., Stochetti A. (SCM), (2019). Détermination de FPGA - Fonds Pêdo-Géochimiques Anthropisés urbains. Agglomération pilote : TOULOUSE METROPOLE. Rapport final. BRGM/RP-69502-FR, 347 p., 73 fig., 37 tabl., 4 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69502-FR.pdf>
- Bispo A., Le Bas C. (2021). Is there a role of EU national soil data organizations in contributing to EUSO? The French example - EU Soil Observatory, Stakeholder Forum - Data integration session - November 20th, 2021. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/u891/EUSO/first-SHF/presentations/data/5_antonio_bispo_euso_session_dataintegration_france.pdf
- Blanchart A., Calvaruso C., Eglin T., Pierart A., Grand C. (2019). Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols, Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. 31 p.
- Branchu P., Marseille F., Béchet B., Bessièrre J.-P., Boithias L., Duviogneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemoit A., Métois R., Moulin J., Néel C., Sheriff R. (2022). MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 184 pages. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement>
- Branchu P., Montagne D. (2020). Les sols (péri)urbains : entre gradients d'anthropisation et de contamination, pp. 16-23, *In Mouglin et al.* (Eds), Les sols urbains sont-ils cultivables ? Editions Quae, Paris.
- BRGM (2022). Site internet BDSolU.fr. <http://www.bdsolu.fr/>
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L. (2018). Soil quality - A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105-125. doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- Coussy S., Dubrac N., Hulot C., Billard A., Kaabouch S. (2020). Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement. MTES/DGPR/Bureau du sol et du sous-sol. Version 2. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
- CRIGE (2014). BD Ocsol PACA Base de donnée régionale d'occupation des sols <https://www.crige-paca.org/projets/bd-ocsol-paca/>
- Droissart-Long A. (2018). Méthodologie de gestion des sites et sols pollués - Principales évolutions - Interprétation de l'état des milieux (IEM) et introduction des valeurs d'analyse de la situation (VAS) - Révision de 2017. Conférence « Les Mardis de la DGPR » du 23 janvier 2018, Paris, France. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/mardi-dgpr-23-janvier-2018-methodologie-gestion-sites-sols-pollues>
- European Commission (2021). Eurostat, LUCAS : enquête sur l'utilisation et l'occupation des sols : édition 2021, Publications Office, 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/8785>
- European Environment Agency (1995). Corine Land Cover. <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>
- Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A., Papritz A. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services, *Land Use Policy*, 69: 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>
- INRAE (2020). Communiqué de presse « Une nouvelle carte des sols de France accessible à tous ». <https://www.inrae.fr/actualites/nouvelle-carte-sols-france-accessible-tous>
- INSEE (2021). Nomenclature d'activités française. <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>
- Légifrance (2014). LOI n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000028772256/>
- Légifrance (2021a). LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets - NOR : TREX2100379L <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>
- Légifrance (2021b). Arrêté du 4 juin 2021 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les terres excavées et sédiments ayant fait l'objet d'une préparation en vue d'une utilisation en génie civil ou en aménagement. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043704475>
- Légifrance (2021c). Code de l'environnement Article R541-45 https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043308106/
- Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, (2022). Fonds pour le recyclage des friches. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/fonds-recyclage-friches>
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/methodologie-nationale-gestion-sites-sols-pollues>
- Ministère de la Transition écologique (2020). Guides de valorisation hors site des terres excavées dans des projets d'aménagement. <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022). Démarche établissements sensibles <http://ssp-infoterre.brgm.fr/page/demarche-etablissements-sensibles>
- Observatoire National de la Biodiversité (2021). <https://naturefrance.fr/indicateurs>
- OGC (2022). SensorThings - Introduction. <http://opengeospatial.github.io/e-learning/sta/text/main.html>
- Perez L., Buitrago M., Eglin T. (2018). Notice technique de l'outil ALDO : Estimation des stocks et des flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois à l'échelle d'un EPCI. 21 p.
- Rabot E., Keller C., Ambrosi J.-P., Robert S. (2017). Revue des méthodes multiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols, dans le cadre de l'aménagement du territoire. *Etude et Gestion des Sols*, 24, pp. 59-72.
- Sandre (2022). Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau. <https://www.sandre.eaufrance.fr/>
- Sauvaget B. (2019). Constitution de référentiels géochimiques locaux pour les sols et proches sous-sols urbains : de la base de données à l'interprétation géostatistique. *Géochimie*. Université Paris sciences et lettres, 2019. Français. (NNT : 2019PSLEM014). <https://www.theses.fr/2019PSLEM014>
- Soltracing (2022a). Le projet GeoBaPa. <https://soltracing.fr/geobapa>
- Soltracing (2022b). Notre offre pour réussir une valorisation de terres <https://soltracing.fr/offre>
- Supra (2021). Sols urbains : les caractériser pour aider la décision de leur affectation lors des projets d'aménagement. <https://expertises.ademe.fr/content/supra-sols-urbains-projets-damenagement>
- Terrass (2022). L'application Terrass. <https://tex-infoterre.brgm.fr/fr/terrass/lapplication-terrass>
- Tukey J.W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. ISBN 0-201-07616-0 CDEGFGHIJ-HA-798