

Le sol dans les stratégies territoriales : de la planification au projet d'aménagement

Guide méthodologique

Octobre 2026



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier les personnes qui ont contribué à la réflexion ou apporté leur retour d'expérience via la proposition d'exemples lors de réunions d'échanges ou lors d'un comité de suivi. Il s'agit de :

- > Philippe Branchu, Christelle Neaud et Manon Martin (Cerema) ;
- > Bertrand Laroche (INRAE) ;
- > Cécile Le Guern (BRGM) ;
- > Quentin Vincent, Cédric Le Guillou et Paolina Flament Gonzales (EODD Ingénieurs Conseils) ;
- > Kathleen Monod (OFB) ;
- > Olivier Pelegrin (BIOTOPE) ;
- > Emilie PETON (Collectivité Européenne d'Alsace) ;
- > Anne Lefranc, Miriam Buitrago, Antoine Piérart (ADEME)

Nous souhaitons également remercier les onze territoires sollicités afin de conduire des entretiens visant à mieux cerner les besoins et attentes des acteurs. Il s'agit de :

- > La Communauté d'Agglomération Rennes Métropole ;
- > La Métropole Rouen Normandie ;
- > Le Syndicat mixte Métropole Savoie ;
- > La Métropole européenne de Lille ;
- > Le Syndicat du Pays de Maurienne ;
- > Le Syndicat mixte des Rives du Rhône ;
- > Grenoble Alpes Métropole ;
- > La Métropole de Lyon ;
- > Le SCoT Tarentaise Vanoise ;
- > La ville de Ris-Orangis ;
- > L'agglomération Grand Paris Sud Seine-Essonne-Sénart.

Nous tenons à remercier tout particulièrement l'ensemble de ces collectivités pour leur disponibilité et leur contribution, et plus spécifiquement celles ayant participé à [l'Appel à Manifestation d'Intérêt ZAN de l'ADEME](#) pour leur engagement renforcé dans cette démarche : le Syndicat du Pays de Maurienne, le Syndicat mixte Métropole Savoie et la Communauté d'Agglomération Rennes Métropole.

CITATION DE CE RAPPORT

BAPTIST Florence (Soltis environnement), MARIÉ Xavier (SOL PAYSAGE), ROSSIGNOL Jean-Pierre (CARTOURBASOL), DIÉDHIOU Adama (Sol Paysage), BRICHLER Marie-Caroline (Soltis environnement), GRAND Cécile (ADEME). 2026. Le sol dans les stratégies territoriales : de la planification au projet d'aménagement. 182 p.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéros des contrats : 2024004063, 2025MA000403, 2026MA000197

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Soltis environnement, Sol Paysage, Cartourbasol

Coordination technique - ADEME : GRAND Cécile, coordinatrice thématique - Direction/Service : SiteSol (sécurisation et reconversion des friches polluées) -

Graphismes et illustration : Isaac JUSTON (Soltis environnement)

Résumé

L'urbanisation continue et la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers (plus de 22 000 ha/an en France sur la période 2011 – 2021) accélèrent l'artificialisation des sols et la dégradation des services écosystémiques qu'ils nous rendent : régulation des crues, épuration de l'eau, rafraîchissement de l'air, stockage de carbone, production de biomasse et bien d'autres encore. Malgré l'évolution du cadre réglementaire national et européen (loi Climat et Résilience, Règlement européen sur la restauration de la nature, Directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols), la prise en compte de la fonctionnalité des sols demeure encore insuffisante dans les documents de planification territoriale et les projets d'aménagement. Les collectivités font notamment état d'un déficit de données, d'un manque de coordination entre les niveaux de gouvernance et de compétences techniques encore limitées. La connaissance des sols reste par ailleurs souvent centrée sur leur occupation ou leurs caractéristiques foncières et géotechniques, sans prise en compte suffisante de leur qualité et de leurs fonctions écologiques (fertilité, régulation hydrique, stockage de carbone, réservoir de biodiversité).

Face à ce constat, l'ADEME met à disposition un guide méthodologique qui vise à sensibiliser les acteurs de l'aménagement (collectivités, aménageurs, urbanistes, bureaux d'études, etc.) à l'importance des sols. Ce guide vise également à fournir un cadre harmonisé pour évaluer leurs fonctions écologiques quelle que soit l'échelle spatiale considérée et à accompagner les démarches de sobriété foncière et de résilience des territoires à travers la préservation de la santé des sols. Il offre des leviers pour mieux identifier le besoin, mieux définir l'échelle spatiale à investiguer et adapter la méthode aux ressources documentaires disponibles et enfin pour la mise en pratique. Ce guide expose une méthode unique, la méthode « 4 fonctions » qui peut se décliner selon les enjeux et la taille du territoire, et suivant les données disponibles (sources documentaires, données de terrain, etc.). Elle s'adapte suivant trois échelles emboîtées : régionale (réflexions stratégiques), infra-régionale (documents d'urbanisme, zones préférentielles de renaturation) et projet opérationnel (conception du projet, réemploi des matériaux terreux, etc.). Des fiches d'exemples illustrent les rendus cartographiques de la fonctionnalité des sols, l'interprétation des résultats et leurs utilisations pour répondre à des besoins opérationnels.

Le principal objectif est de fournir aux collectivités un cadre méthodologique qui soit directement mobilisable, qui relie connaissance scientifique des sols, représentation cartographique et arbitrages d'aménagement, au service de la sobriété foncière et de la résilience des territoires. Les suites opérationnelles consistent à intégrer le diagnostic des sols dès l'amont des projets, à croiser les données pédologiques avec les enjeux eau-biodiversité-climat, à renforcer la montée en compétence des acteurs et à ancrer ces pratiques dans un cadre réglementaire.

Ce guide constitue une première étape vers la prise en compte des sols dans la planification territoriale et le projet d'aménagement. Il est appelé à évoluer, enrichi par les retours d'expérience et le développement de nouvelles méthodes de mesure (intégration de nouveaux indicateurs, nouvelles technologies, etc.).

Abstract

Continuing urbanisation and the conversion of natural, agricultural and forest land (more than 22,000 ha/year in France between 2011 and 2021) are accelerating soil sealing and degrading the ecosystem services that soils provide: flood regulation, water purification, urban cooling, carbon storage, biomass production and more. Despite improvements to the regulations (the French Climate & Resilience Act, the European Nature Restoration Regulation, the European Soil Monitoring Directive), soil issues continue to be overlooked in planning documents (SRADDET, SCoT, PLU) and design projects. Conversations with eleven local authorities confirm the existence of several obstacles: a lack of localised data, a lack of coordination between different levels of governance (municipalities, inter-municipal bodies, regions), and the fact that soils are often viewed from a land development or geotechnical perspective, without any assessment of their multifunctional capacities (fertility, water regulation, carbon storage, biodiversity).

ADEME therefore provides a guide to raise awareness amongst stakeholders (local authorities, land developers, town planners, consultancy firms, etc.) of the importance of soils and to develop a harmonised methodological framework for assessing soil ecological functions, regardless of the spatial scale. It seeks to contribute towards restrained land use practices and to reinforce the ecological resilience of the different territories making soil an intrinsic component of land planning. It helps identify needs more effectively, define the spatial scale to be investigated more precisely, suggest ways to adapt the method to available documentary resources, and, finally, put it into practice. This guide sets out the methodology "4 functions" depending on the issues at stake, the size of the area in question and the data available (documentary sources, field data, etc.). The methodology is organised across three overlapping scales: regional (strategic considerations), sub-regional (urban planning, priority restoration area) and operational projects (project design and planning, soil de-sealing, reuse of excavated soil, etc.). Example factsheets are included to illustrate the mapping of soil functionality, the interpretation of results and their application to operational needs.

The guide's main contribution is to provide local authorities with a readily usable decision aid that combines scientific soil knowledge, mapping and planning considerations, in order to promote restrained land use practices and reinforce the ecological resilience of regional territories. The next operational steps involve integrating soil assessment at the earliest stages of projects, correlating soil data with water, biodiversity and climate demands, enhancing stakeholders' skills, and ensuring such practices are firmly embedded in land use regulations.

The guide represents a first step towards placing the soil factor firmly on the agenda in land-use planning and will certainly evolve as it is enriched by feedback and the development of new measurement methods (the introduction of more indicators, new technologies, etc.).

Resumen

La urbanización continua y el consumo de espacios naturales, agrícolas y forestales (más de 22 000 ha/año en Francia durante el período 2011-2021) aceleran la artificialización de los suelos y la degradación de los servicios ecosistémicos que nos brindan: regulación de las inundaciones, purificación del agua, enfriamiento del aire, almacenamiento de carbono, producción de biomasa y mucho más. A pesar de la evolución del marco reglamentario nacional y europeo (ley Clima & Resiliencia, Reglamento Europeo sobre la Restauración de la Naturaleza, Directiva Europea sobre la Vigilancia y la Resiliencia de los Suelos), la consideración de la funcionalidad del suelo sigue siendo insuficiente en los documentos de planificación territorial y los proyectos de ordenación. Entre otras cosas, las colectividades informan sobre una escasez de datos, una falta de coordinación entre los niveles de gobernanza y competencias técnicas todavía limitadas. Además, el conocimiento de los suelos se centra a menudo en su ocupación o sus características geotécnicas y de tenencia, sin tener suficientemente en cuenta su calidad y sus funciones ecológicas (fertilidad, regulación hídrica, almacenamiento de carbono, reservorio de biodiversidad).

Frente a esta constatación, la ADEME pone a disposición una guía metodológica que tiene como objetivo sensibilizar a los actores de la ordenación (colectividades, planificadores, urbanistas, oficinas de estudios, etc.) sobre la importancia de los suelos. Esta guía también tiene como objetivo proporcionar un marco armonizado para evaluar sus funciones ecológicas independientemente de la escala espacial considerada y acompañar los procesos de sobriedad y resiliencia de los territorios a través de la preservación de la salud del suelo. Ofrece palancas para identificar mejor la necesidad, definir mejor la escala espacial a investigar y adaptar el método a los recursos documentales disponibles y, por último, para la puesta en práctica. Esta guía expone un método único, el método "4 funciones", que puede declinarse según los desafíos y el tamaño del territorio, y según los datos disponibles (fuentes documentales, datos de campo, etc.). Se adapta según tres escalas encajadas: regional (reflexiones estratégicas), infra-regional (documentos de urbanismo, zonas preferenciales de renaturalización) y proyecto operativo (concepción del proyecto, reutilización de los materiales terrosos, etc.). Fichas de ejemplos ilustran las representaciones cartográficas de la funcionalidad de los suelos, la interpretación de los resultados y sus usos para satisfacer necesidades operativas.

El principal objetivo es proporcionar a las colectividades un marco metodológico para orientar las estrategias territoriales que sea directamente movilizable, que vincule conocimiento científico de los suelos, representación cartográfica y arbitrajes de ordenación, al servicio de la sobriedad de tenencia y de la resiliencia de los territorios. Los seguimientos operativos consisten en integrar el diagnóstico de los suelos desde la fase inicial de los proyectos, en cruzar los datos pedológicos con los desafíos agua-biodiversidad-clima, en reforzar el aumento de las competencias de los actores y anclar estas prácticas en los marcos reglamentarios.

Esta guía constituye un primer paso hacia la consideración de los suelos en la planificación territorial y el proyecto de ordenación. Tiene que evolucionar, enriquecida por las experiencias y el desarrollo de nuevos métodos de medición (integración de nuevos indicadores, nuevas tecnologías, etc.).

SOMMAIRE

SOMMAIRE	7
INTRODUCTION	10
CHAPITRE 1.....	18
LES ENJEUX DU SOL DANS L'AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES	18
1.1 LE SOL DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES DE PLANIFICATION ET D'AMENAGEMENT	19
1.1.1 La préservation et la restauration du sol impulsées par les politiques nationales et internationales	19
1.1.2 Le sol dans la réglementation française	21
1.1.3 Alignement des engagements nationaux et européens pour favoriser la restauration fonctionnelle du sol	22
1.2 LE SOL AU CŒUR DE TOUS LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX.....	25
1.2.1 Le sol, une interface dynamique entre écosystèmes et activités humaines	25
1.2.2 La pédogenèse : comprendre la formation et l'évolution du sol	25
Décrire un sol et caractériser ses propriétés	28
Les outils du pédologue	30
1.2.3 Des fonctions du sol à la fourniture de services écosystémiques	32
Les fonctions du sol	32
Vers une lecture multifonctionnelle du sol.....	36
Des fonctions aux services écosystémiques	36
1.3 LA MODIFICATION DU SOL PAR L'URBANISATION.....	40
1.3.1 Transformation du sol sous l'effet des activités humaines	40
1.3.2 Mesurer le degré d'anthropisation du sol dans un contexte urbain	44
1.4 LA CARTOGRAPHIE DU SOL.....	46
1.4.1 Cartographie du sol en milieu hors contexte urbain	46
1.4.2 Cartographie du sol en milieu urbain : les spécificités	48
CHAPITRE 2.	54
POURQUOI ET COMMENT EVALUER LES FONCTIONS DU SOL ?	54
UNE DEMARCHE EN 4 ETAPES.....	55
2.1 ÉTAPE 1 : FORMULER LE BESOIN, DEFINIR L'ECHELLE SPATIALE ET LES FONCTIONS PRIORITAIRES.....	56
2.2 ÉTAPE 2 : IDENTIFIER LES MOYENS A METTRE EN PLACE	59

2.3 ÉTAPE 3 : ÉVALUER LES FONCTIONS A PARTIR DES PROPRIETES DU SOL	62
2.4 ÉTAPE 4 : CARTOGRAPHIER LES FONCTIONS ET LES SOUS-FONCTIONS DU SOL.....	76
CHAPITRE 3.	78
MISES EN PRATIQUE SUR LES TERRITOIRES	78
3.1 APPROCHE À PARTIR DE BASES DE DONNÉES NATIONALES OU RÉGIONALES	79
Fonction 1 : fonction biologique	80
Fonction 2 : fonction climatique.....	82
Fonction 3 : fonction nutritive	82
Fonction 4 : fonction hydrique	83
Indice de multifonctionnalité	87
Intérêts et limites.....	88
Exemples d'application.....	89
3.2 APPROCHE À PARTIR DE DONNÉES LOCALES ET INVESTIGATION DE TERRAIN.....	95
Fonction 1 : fonction biologique	96
Fonction 2 : fonction climatique.....	100
Fonction 3 : fonction nutritive	101
Fonction 4 : fonction hydrique	103
Intérêts et limites.....	106
Exemples d'application.....	106
3.3 APPROCHE À PARTIR DE L'OCCUPATION DU SOL	111
Intérêts et limites.....	117
CONCLUSION.....	118
BIBLIOGRAPHIE	123
GLOSSAIRE.....	127
ANNEXE 1. COMPTE RENDU ISSU DES ENTRETIENS RÉALISÉS AUPRÈS DES COLLECTIVITÉS	132
ANNEXE 2. ÉVALUATION DU DEGRÉ D'ANTHROPISATION DES SOLS	135
ANNEXE 3. MÉTHODOLOGIE DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS À GRANDE ÉCHELLE EN MILIEU URBAIN ET PÉRIURBAIN	137
ANNEXE 4. DONNÉES À COLLECTER POUR APPLIQUER LES APPROCHES 1 À 3.....	145
ANNEXE 5. BASES DE DONNÉES DISPONIBLES POUR CARACTÉRISER LA MULTIFONCTIONNALITÉ DES SOLS.....	149
A. Les données pédologiques	149
Référentiel Régional Pédologique (RRP)	151

La base de données REFERSOLS	152
Réseau de Mesure et de Qualité des Sols (RMQS)	153
Base de Données des Analyses de Terre (BDAT).....	154
Land Use/Cover Area frame Statistical Survey (LUCAS)	155
GlobalSoilMap.....	156
B. Les données Géorisques	157
Pollution - CASIAS.....	157
Secteurs d'information sur les sols (SIS).....	158
Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI)	159
Pollution - Sites et sols pollués ou potentiellement pollués (ex-BASOL).....	160
BDSolU - Base de Données des analyses de Sols Urbains.....	161
C. Les données d'occupation des sols	161
L'occupation du sol à grande échelle (OCS GE)	163
Carte d'occupation des sols du CES OSO (THEIA).....	164
Corine Land Cover.....	165
Registre Parcellaire Graphique	166
Fichiers fonciers	167
La cartographie nationale des habitats naturels et semi-naturels terrestres (CarHab).....	167
D. Les données thématiques.....	169
ALDO 170	
L'Observatoire National de la Biodiversité (ONB)	171
Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT).....	171
Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR).....	172
La carte de prélocalisation des zones humides	173
Cartofriches	174
Base de données des îlots de chaleur urbains (LCZ)	175
Agreste – Enquête Teruti	176
High Resolution Layer Imperviousness	177
High Resolution Layer Tree Cover and Forests.....	178
High Resolution Layer Small Woody Features	179
ANNEXE 6. CORRESPONDANCE ENTRE LES PARAMÈTRES DE L'APPROCHE 1 ET LES VARIABLES DE LA BASE DONESOL	180

INTRODUCTION

L'urbanisation constitue une dynamique majeure d'évolution des territoires depuis plusieurs décennies. En France, elle s'est accompagnée d'une consommation importante d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF), contribuant à l'artificialisation des sols (environ 22 000 ha/an). Malgré une diminution récente de cette consommation (qui atteint 15 000 ha/an en 2024), les pressions exercées sur les sols demeurent élevées. L'artificialisation des sols constitue un enjeu environnemental fort en raison de ses conséquences sur la biodiversité, la gestion des eaux pluviales, les risques d'inondation, le stockage du carbone et, plus largement, sur les services écosystémiques rendus par les sols (régulation des crues, épuration de l'eau, rafraîchissement de l'air et production de biomasse).

Face à ces constats, les documents d'urbanisme ont progressivement intégré les enjeux environnementaux, et notamment ceux en rapport avec la question du sol (Souami, 2023). Plusieurs outils ont été mobilisés pour accompagner cette transition : les périmètres de protection des espaces agricoles et naturels périurbains (PENAP, ENAP ou PAEN¹), par exemple, contribuent à garantir de manière durable la vocation agricole et naturelle des espaces ainsi classés, qui s'imposent aux plans locaux d'urbanisme ; d'autres, comme la Trame verte et bleue, prennent en compte les continuités écologiques terrestres et aquatiques dans les documents de planification. Ensemble, ces outils ont permis de mieux protéger les habitats et d'orienter l'aménagement vers la densification des espaces déjà urbanisés et/ou la préservation de la biodiversité.

Une première avancée majeure réside dans l'adoption de la loi Climat et Résilience (C&R). Elle consacre l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) et fait évoluer la définition de l'artificialisation des sols en l'appréhendant notamment au regard de l'atteinte à leurs fonctions écologiques. Cette évolution constitue un jalon essentiel pour comprendre la transformation progressive des documents d'urbanisme. La mise en œuvre du ZAN s'inscrit en effet dans une logique de déclinaison successive aux différentes échelles de planification, selon un calendrier défini par la loi, jusqu'à sa traduction dans les documents d'urbanisme locaux. Cette « descente d'échelle » permet ainsi de retracer concrètement la manière dont les objectifs de sobriété foncière et de limitation de l'artificialisation sont progressivement intégrés dans les stratégies territoriales et les outils de planification.

Malgré ces avancées, l'intégration du sol dans la planification territoriale demeure limitée, souvent réduite à la prise en compte de son mode d'occupation, de son statut foncier ou à des approches géotechniques, sans réelle évaluation de sa qualité ni de ses fonctions écologiques. Les collectivités soulignent ainsi le besoin d'outils opérationnels et homogènes, de diagnostics partagés, d'un accompagnement technique renforcé et d'une meilleure sensibilisation des élus afin de reconnaître le sol comme un élément structurant de la planification, au même titre que la biodiversité, l'eau, l'air ou le climat.

¹ PENAP, ENAP ou PAEN : périmètres de protection des espaces agricoles, naturels et périurbains

Afin de répondre à ces attentes, plusieurs démarches de recherche et d'expérimentation ont été engagées ces dernières années pour mieux caractériser les fonctions du sol et accompagner leur intégration dans les politiques publiques. Les travaux consacrés à la trame brune² ainsi que ceux visant à développer des méthodes d'évaluation des fonctions du sol en contexte urbain se sont notamment multipliés. Les projets DESTISOL³ (Cherel et al. 2017) - SUPRA⁴ (Schwartz et al. 2022) - MUSE⁵ (Branchu et al. 2022) - ARTISOL⁶ - Quali-ZAN⁷, et INDIQUASOLS⁸ (Cousin et al. 2025) témoignent de cette dynamique. L'expérimentation « Objectif ZAN »⁹ menée par l'ADEME (2022-2025) permet également d'apporter un premier retour d'expérience sur la prise en compte de la multifonctionnalité du sol dans la planification pour répondre à une variété d'enjeux dans des situations contrastées (littoral, montagne, rural, urbain). Au-delà du contexte français, Bruxelles Environnement a également développé un Indicateur de Qualité des Sols Bruxellois (IQSB)¹⁰ permettant de comparer les sols à l'échelle de la région Bruxelles-Capitale. Ces différentes démarches de recherche et d'expérimentation répondent à des besoins et à des contextes spécifiques. Elles constituent néanmoins des ressources précieuses pour améliorer la connaissance du sol et contribuer à l'évaluation de ses fonctions écologiques.

Le présent guide s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Il vise à proposer un cadre méthodologique harmonisé pour évaluer les fonctions écologiques du sol, quelles que soient l'échelle d'analyse et la nature des territoires considérés. Il s'appuie sur une méthode unique, dite « 4 fonctions », déclinable à l'échelle régionale et infra-régionale et à l'échelle du projet d'aménagement.

Ce travail repose également sur 11 entretiens qui ont été conduits auprès de collectivités territoriales (Figure 1) afin d'identifier les principaux freins et leviers liés à l'intégration des sols dans les démarches de planification (comme le manque de méthode harmonisée, le manque de compétence pour recueillir les informations sur les sols ou encore le manque de coordination entre les différents niveaux de gouvernance). Ces échanges ont permis de mieux cerner les contraintes rencontrées sur le terrain, les outils actuellement mobilisés, ainsi que les perspectives de transfert vers des pratiques opérationnelles. Parmi ces structures, quatre collectivités territoriales interrogées, la ville de Ris-Orangis, Rennes Métropole, le Syndicat du Pays de Maurienne et le Syndicat mixte Métropole Savoie, ont participé à l'expérimentation « Objectif ZAN » pilotée par l'ADEME (2022-2025).

Enfin, un comité de suivi (OFB, Cerema, BRGM, INRAE, RMT sols et territoires, Université Gustave Eiffel, EODD Ingénieurs Conseils) a, par ailleurs, été constitué pour orienter les travaux tout au long du processus.

² Projet Tram'Bio Sol, porté notamment par le bureau d'études Sol Paysage et financé par le PUCA (DGLAN) dans le cadre du programme BAUM (Biodiversité, Aménagement Urbain et Morphologie) : <https://www.urbanisme-puca.gouv.fr/cahier-tram-biosol-a2932.html>

³ <https://www.inrae.fr/actualites/Destisol%27AU>

⁴ <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/6231-sols-urbains-et-projets-d-amenagement-supra.html>

⁵ <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/comprendre-et-sensibiliser/bases-donnees/muse-integrer-les-fonctions-des-sols-dans-les-documents>

⁶ RMT Sols & Territoires, Occitanie

⁷ Quali-ZAN : outil d'aide à la conception et au suivi des projets d'aménagement qui intègre leurs impacts sur la fonctionnalité des sols (Vincent et Lerouzig - EPA Marne 2024)

⁸ <https://www.inrae.fr/actualites/indicateurs-qualite-sols-au-service-politiques-publiques>

⁹ <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/9501-elaborer-des-strategies-territoriales-en-faveur-de-l-objectif-zero-artificialisation-nette.html>

¹⁰ <https://environnement.brussels/pro/services-et-demandes/conseils-et-accompagnement/integrez-la-notion-de-qualite-du-sol-dans-la-conception-de-votre-projet-urbanistique-avec-lindice-iqsb-pro>



Figure 1. Localisation des collectivités interrogées dans le cadre de l'élaboration du guide.

Quels sont les objectifs de ce guide ?

Ce guide a pour objectif d'accompagner les collectivités territoriales et leurs partenaires dans une meilleure intégration des sols au sein des stratégies territoriales et des projets d'aménagement, en considérant le sol comme un écosystème vivant et tridimensionnel. Il vise, in fine, à favoriser une meilleure connaissance de ce milieu en contextes naturel, rural, périurbain et urbain, afin de soutenir leur préservation et, le cas échéant, leur restauration.

Il propose un cadre méthodologique harmonisé qui répond aux critères suivants :

- > Adapté aux enjeux territoriaux (ex : réduire les risques d'inondation par ruissellement, lutter contre la perte de biodiversité, développer les îlots de fraîcheur urbains) ;
- > Applicable sur tout type de sol (naturel, agricole, urbain, périurbain) ;
- > Déclinable à chacune de ces 3 échelles spatiales (régionale, infra-régionale et à l'échelle du projet d'aménagement) ;
- > Applicable quelle que soit la nature des informations mobilisables (ressources documentaires, données de terrain, prospections pédologiques).

Il vise également à sensibiliser et à acculturer les acteurs de la planification et de l'aménagement autour du sol, sa formation sur le long terme, la caractérisation de ses propriétés nécessaires à la détermination de ses fonctions et des services écosystémiques associés. La méthode est conçue pour s'adapter aux données disponibles, aux spécificités des territoires et aux enjeux identifiés, qu'ils soient urbains ou ruraux.

À qui s'adresse le guide ?

Ce guide s'adresse principalement aux collectivités territoriales, ainsi qu'à l'ensemble des acteurs en charge des stratégies territoriales et des projets d'aménagement opérationnels et du développement urbain : services techniques des collectivités, agences d'urbanisme, aménageurs publics et privés, bureaux d'ingénierie territoriale, bureaux d'études environnement, entreprises du paysage, etc. Il propose une approche structurée selon différentes échelles spatiales, afin de s'adapter aux enjeux territoriaux et aux données disponibles. Cette démarche a vocation à être mobilisable à plusieurs niveaux de la planification territoriale, garantissant ainsi une articulation cohérente et un emboîtement des échelles d'analyse et d'action.

Quel est le cadre méthodologique de ce guide ?

Le guide propose une méthode unique, la méthode « 4 fonctions », pour intégrer une meilleure connaissance du sol sur son territoire. Son intérêt principal est de **quantifier quatre (4) fonctions écologiques - fonction biologique, hydrique, climatique et nutritive** - afin de pouvoir les comparer, les cartographier et éclairer les arbitrages d'aménagement.

Ce guide s'inscrit dans un cadre réglementaire (**Loi Climat et Résilience, 2021**) et scientifique (**INDIQUASOLS, Cousin et al. 2025**) et répond aux besoins des territoires (Figure 2).

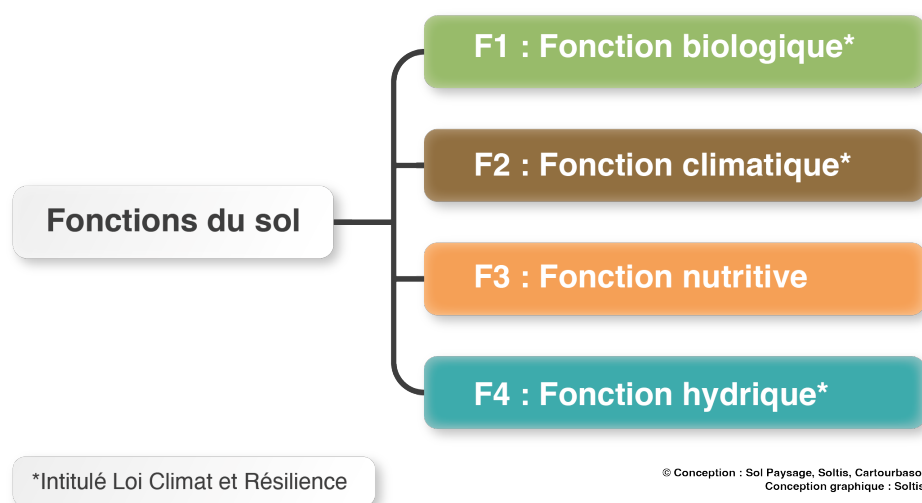


Figure 2. Les 4 fonctions écologiques du sol considérées dans le guide.

Le document insiste sur la nécessité de définir en amont les objectifs des études menées sur les différents types de sols dans les territoires étudiés, car le choix des fonctions à évaluer dépend directement de la finalité poursuivie : diagnostic fonctionnel des sols, identification de secteurs à préserver ou à restaurer, ou encore production d'un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires territoriaux. Cette clarification préalable conditionne le niveau de précision attendu et le coût global de l'étude.

La définition préalable de ces questions permet ainsi d'inscrire les études de sols dans une démarche d'aide à la décision, au service de la stratégie territoriale et des choix d'aménagement. À partir de l'analyse du projet porté par le territoire et selon sa superficie, l'échelle spatiale investiguée est définie par la collectivité ou l'aménageur (Figure 3).

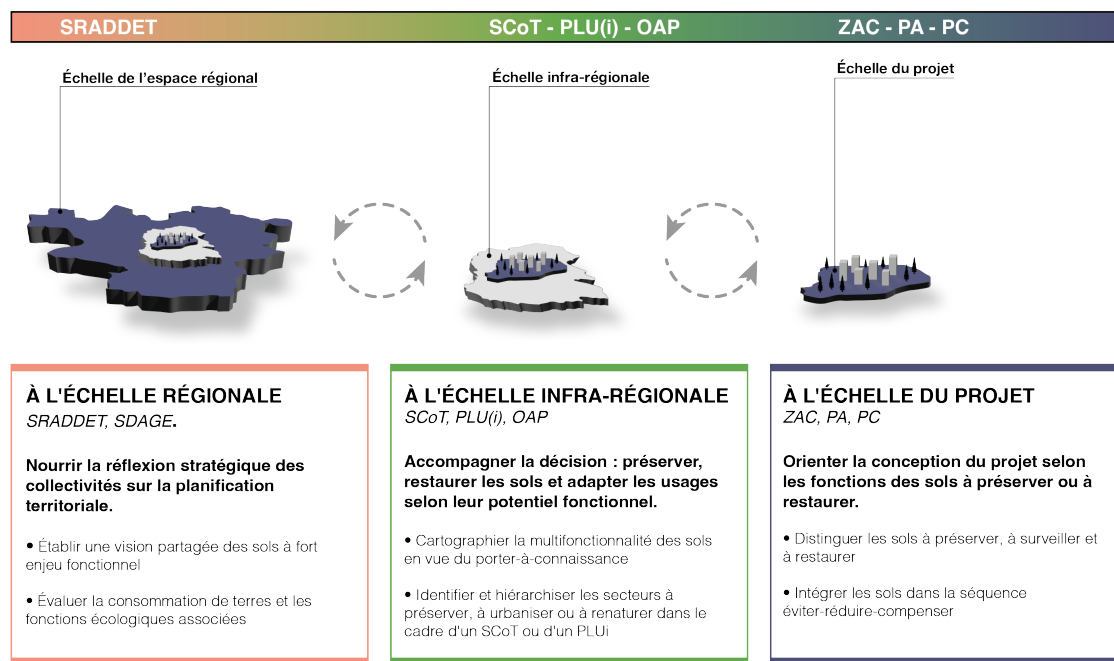


Figure 3. Représentation des trois niveaux d'échelle spatiale et de l'intérêt d'intégrer les sols dans les stratégies de planification et d'aménagement en fonction de ces échelles.

Pour sa bonne application, il est nécessaire de bien connaître les enjeux du territoire et de définir les objectifs attendus pour l'intégration du sol dans les stratégies territoriales. Le recours à une méthode appropriée permet ainsi de produire une représentation cartographique cohérente avec les objectifs poursuivis et de garantir une interprétation robuste des résultats obtenus.

Même si les objectifs des études de sols ne sont pas les mêmes en fonction de l'échelle investiguée, un cadre harmonisé de l'évaluation des fonctions du sol permet d'assurer une cohérence dans l'interprétation des informations sur les sols qui peuvent être acquises sur le long terme (Tableau 1).

Tableau 1. De la formalisation du besoin à l'aboutissement des études pour chaque échelle de travail

	Échelle régionale	Échelle infra-régionale (SCoT, PLUi, PLU, etc.)	Échelle du projet
La question à laquelle on veut répondre	Quels sont les sols à fort enjeu de mon territoire et que perd-on en les consommant ?	Où préserver, restaurer, compenser, implanter ?	Comment aménager cette emprise en tenant compte des sols en place ?
Nature du besoin	Stratégique et politique : partager un diagnostic, argumenter, dialoguer entre acteurs	Planification : localiser et hiérarchiser les secteurs à enjeux	Opérationnel : décider zone par zone, dimensionner, chiffrer

	Échelle régionale	Échelle infra-régionale (SCoT, PLUi, PLU, etc.)	Échelle du projet
Ce que produit l'étude	Vision partagée des sols multifonctionnels ; bilan de la consommation des terres et des fonctions perdues	Cartographie des fonctions et de la multifonctionnalité à l'échelle investiguée ; Sélection des zones à enjeux (agronomie, biodiversité, eau, carbone) ; Hiérarchisation des secteurs à préserver, restaurer ou réhabiliter	Cartographie des fonctions et de la multifonctionnalité à l'échelle du projet ; Sélection des sols à conserver, à surveiller ou à restaurer ; Conception de scénarios de réemploi des terres excavées ; Élaboration de profils de sols à reconstituer

Comment lire ce guide ?

Le guide s'articule autour de trois chapitres principaux, visant à accompagner progressivement le lecteur dans l'appropriation de la démarche d'évaluation des fonctions du sol. Le premier chapitre propose une introduction au sujet et permet d'en préciser les principaux enjeux (**CHAPITRE 1**). Le deuxième approfondit les concepts mobilisés dans le cadre de l'évaluation (**CHAPITRE 2**), tandis que le troisième présente les différentes approches méthodologiques permettant sa mise en œuvre (**CHAPITRE 3**).

Le guide est complété par **SIX ANNEXES** destinées à faciliter l'application opérationnelle de la méthode des « 4 fonctions ». Celles-ci présentent notamment les bases de données mobilisables, les référentiels existants ainsi que les modalités de calcul nécessaires à l'évaluation des fonctions du sol (Figure 4).

L'**ANNEXE 7** est consacrée plus spécifiquement aux référentiels les mieux documentés utilisés pour l'interprétation des indicateurs. Contrairement aux six premières annexes, cette **ANNEXE 7** constitue un document indépendant, mis à disposition en complément du guide. Ce format permet notamment d'en assurer l'actualisation au fil de l'évolution des connaissances, des référentiels disponibles et des besoins d'utilisation de la méthode.

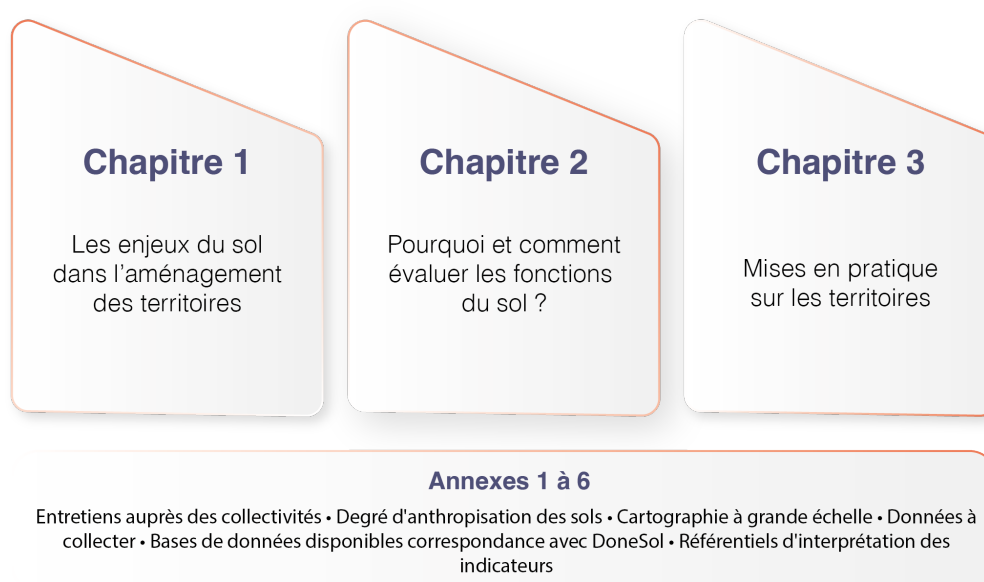


Figure 4. Structuration du guide en 3 chapitres.

- > **Le chapitre 1 : « Les enjeux du sol dans l'aménagement des territoires »** présente le cadre réglementaire et les principaux enjeux liés à la prise en compte des sols dans les politiques publiques. Sont notamment présentés la loi Climat et Résilience, le Règlement européen sur la restauration de la nature ainsi que la directive européenne relative à la surveillance et à la résilience des sols, en cours de transposition. Ce chapitre vise également à familiariser le lecteur avec le fonctionnement et les caractéristiques du milieu sol, en apportant des repères scientifiques, techniques et pratiques. Il permet de construire un vocabulaire commun et de clarifier les principales notions mobilisées dans l'étude des sols et de leurs fonctions. Ces éléments doivent permettre de considérer le sol comme une composante stratégique des démarches de planification territoriale et de conception des projets d'aménagement.
- > **Le chapitre 2 : « Pourquoi et comment évaluer les fonctions du sol ? »** expose la méthode « 4 fonctions », les principes, les conditions de mise en œuvre ainsi que son articulation dans un processus logique de définitions du besoin. Ce chapitre vise à accompagner les acteurs souhaitant passer à l'action et intégrer concrètement les sols dans leurs projets. Cette méthode s'inscrit dans une démarche en 4 étapes pour traduire les informations mobilisables sur les sols en indicateurs fonctionnels afin de donner une valeur quantitative aux fonctions du sol puis de les représenter sous forme cartographique.
- > **Le chapitre 3 : « Mises en pratique sur les territoires »** détaille 3 approches permettant l'évaluation des 4 fonctions écologiques : la première repose sur des bases de données nationales ou régionales, la seconde repose sur des bases de données locales et la nécessité de réaliser des investigations de terrain. Pour orienter ces investigations, une troisième approche basée sur l'occupation du sol peut aussi aider en préalable. Des fiches « exemples » viennent illustrer ces mises en application avec pour objectif de présenter des rendus cartographiques et des cas d'application concrets, facilitant l'appropriation des outils méthodologiques.

Sans viser l'exhaustivité, ce guide pose un cadre méthodologique structurant et évolutif. Il est appelé à être enrichi par les retours d'expérience et l'intégration de nouveaux indicateurs et référentiels d'interprétation affinés au fil du temps.

Bien que les trois chapitres abordent des notions complémentaires, chacun d'eux peut être consulté indépendamment, selon l'activité professionnelle du lecteur et les besoins auxquels il souhaite répondre (Tableau 2).

Tableau 2. Aide à la lecture du guide.

Vous êtes...	Vous cherchez à...	Lisez en priorité...
Élu, décideur	Comprendre pourquoi et quand s'intéresser aux sols	→ le chapitre 1 → les encadrés « À retenir » → ANNEXE 1
Agent d'une collectivité qui prépare une étude ou un cahier des charges	Définir le besoin, l'échelle spatiale concernée, les fonctions à évaluer et les moyens	→ le chapitre 2 → ANNEXES 3 et 4
Technicien de bureau d'études chargé de l'évaluation	Appliquer la méthode « 4 fonctions »	→ le chapitre 2 → le chapitre 3 selon l'approche choisie → ANNEXES 2, 3, 4, 5, 6 et 7
Lecteur qui veut consulter des exemples	Évaluer les possibilités offertes par la méthode « 4 fonctions »	→ Exemples d'application du chapitre 3

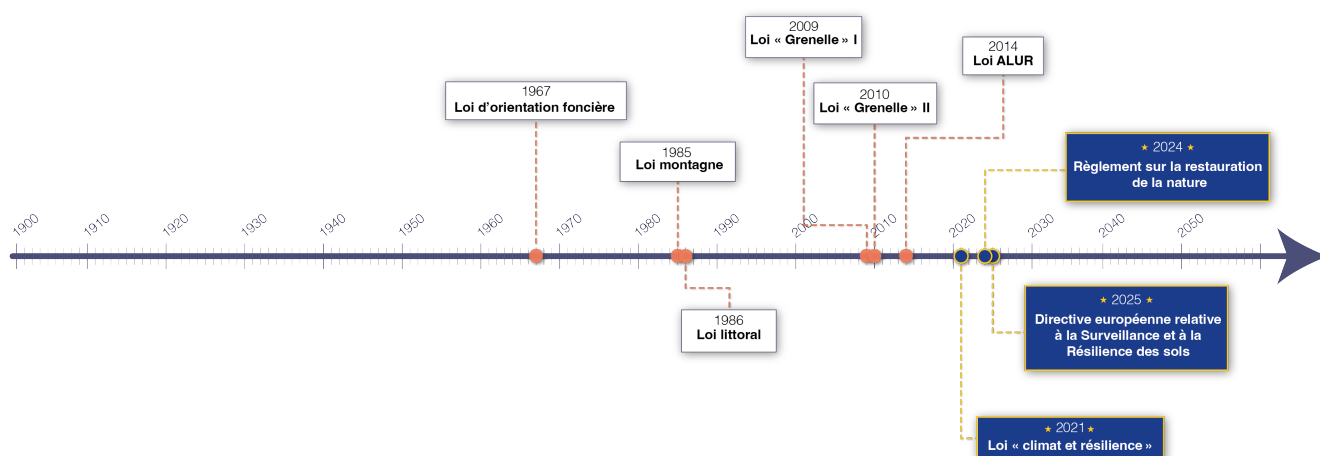
CHAPITRE 1.

LES ENJEUX DU SOL DANS L'AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES

1.1 Le sol dans les politiques publiques de planification et d'aménagement



CHRONOLOGIE DES POLITIQUES D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE EN FRANCE DEPUIS LE XX^e SIÈCLE



© Soltis environnement

Figure 5. Chronologie des principales réglementations influençant la gestion du sol dans la planification territoriale. Cette illustration, ainsi que les paragraphes associés, mettent en évidence uniquement les avancées réglementaires majeures en lien avec le sol.

1.1.1 La préservation et la restauration du sol impulsées par les politiques nationales et internationales

Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, le sol s'intègre progressivement dans les politiques publiques, à travers des dispositifs à différentes échelles : **internationale** (FAO, ONU), **européenne** (stratégies et directives communautaires) et **nationale** (documents de planification, lois sectorielles) (Figure 5).

Publiée en 1981 par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la **Charte mondiale des sols** constitue une étape majeure dans la reconnaissance internationale de l'importance des sols. Actualisée en 2015, elle met en lumière la **diversité des services écosystémiques rendus par les sols**, au-delà des services de production habituellement considérés. L'ONU institue par ailleurs l'**année internationale des sols**, et établit le **5 décembre** comme la **journée mondiale des sols** (en France, organisée chaque année par l'Association Française pour l'Étude du Sol¹¹).

¹¹ <https://www.afes.fr/>

La **Charte européenne des sols** (1972, révisée en 2003) les reconnaît comme une ressource limitée et fragile à protéger, notamment contre la pollution. En 2002, la Commission européenne lance une **stratégie thématique pour la protection des sols**, soumise à consultation auprès d'experts et du grand public. En 2004, la directive sur la responsabilité environnementale introduit un volet spécifique consacré aux contaminations des sols. Enfin, en 2006, la Commission propose une directive-cadre sur les sols, mais celle-ci échoue en raison de l'absence d'unanimité entre États membres, la France s'étant notamment abstenue, le texte étant jugé trop contraignant.

En 2018, une nouvelle avancée est portée par l'**IPBES** (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques), qui réunit un panel d'experts de 45 pays afin d'évaluer l'état des connaissances sur la **dégradation et la restauration des sols**.

En parallèle, plusieurs politiques européennes sectorielles intègrent des mesures de protection des sols :

- > **Politique agricole commune (PAC) ;**
- > **Directive sur les émissions industrielles (2010) ;**
- > **Feuille de route pour une Europe efficiente en ressources (2011).**

À partir de 2019, l'Europe place également les sols au cœur de ses ambitions à travers plusieurs initiatives stratégiques :

- > **Le Pacte vert pour l'Europe (2019) ;**
- > **Le Plan d'objectifs climat pour 2030 ;**
- > **La stratégie pour la biodiversité à l'horizon 2030.**

Ces politiques amènent à l'adoption de la **stratégie européenne pour les sols à l'horizon 2030** (novembre 2021), qui fixe des objectifs ambitieux en matière de protection, de gestion durable et de restauration des sols européens.

Enfin, l'ensemble de ces avancées a conduit à la préparation d'une nouvelle Directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols, proposée par la Commission en 2023¹². Elle fixe un cadre commun pour la préservation et la résilience des sols, mais laisse une marge de manœuvre importante aux États membres. Cette directive instaure une surveillance de la santé des sols fondée sur plusieurs descripteurs (i.e., indicateurs) physiques, chimiques et biologiques des sols. Certaines valeurs cibles de ces descripteurs sont fixées par la directive, d'autres sont laissées à l'appréciation des États membres. **L'objectif central de la directive est d'aboutir à des sols en bonne santé dans toute l'UE d'ici 2050.** Elle a été adoptée définitivement en octobre 2025 et publiée au Journal officiel de l'Union européenne le 26 novembre 2025. Les États membres devront transposer ses dispositions en droit national au plus tard le 17 décembre 2028.

Cette directive européenne introduit des principes d'atténuation de l'artificialisation et encourage la désimperméabilisation et la régénération des sols dans une optique de compensation même si, sur la question de l'aménagement, les décisions en matière d'autorisation d'urbanisme et d'aménagement relèvent des États membres (art. 12). Notons également que certains indicateurs d'artificialisation proposés par la directive européenne peuvent compléter ceux déjà mis en place en France par la loi Climat et Résilience. En France, le suivi de l'artificialisation dans le cadre du ZAN repose sur le suivi de l'Occupation du Sol à Grande Échelle (OCS GE) produite par l'IGN et intégrée à l'Observatoire de l'Artificialisation.

Parallèlement, en 2024, le Règlement européen sur la restauration de la nature a été adopté. Il fixe pour la première fois des objectifs quantitatifs et contraignants : **mettre en place des mesures de restauration sur au moins 20 % des terres et 20 % des mers de l'UE d'ici 2030**, puis sur l'ensemble des écosystèmes qui en ont besoin d'ici 2050, avec un objectif intermédiaire de restaurer au moins 30 % de la surface des habitats dégradés d'ici 2030 (60 % d'ici 2040, 90 % d'ici 2050). **Le règlement couvre tous les types d'écosystèmes, notamment les écosystèmes urbains. Il cible les milieux dégradés, et par conséquent les**

¹² Directive (UE) 2025/2360 du Parlement européen et du Conseil du 12 novembre 2025 relative à la surveillance et à la résilience des sols

sols qui nécessitent des actions de restauration. Un plan national de restauration de la nature est en cours d'élaboration en France.

1.1.2 Le sol dans la réglementation française

Après plusieurs décennies de fort étalement urbain observé durant la seconde moitié du XX^e siècle, l'urbanisation a d'abord été encadrée par les Plans d'Occupation des Sols (POS), institués par la loi d'orientation foncière de 1967. La loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains (loi SRU) du 13 décembre 2000 remplace ensuite les POS par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) et crée les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) ; elle pose le principe d'une gestion économe de l'espace, applicable à l'ensemble des documents de planification. Depuis les années 2000, l'évolution progressive du cadre législatif français a ainsi favorisé l'émergence du concept de sobriété foncière, qui occupe désormais une place centrale dans les démarches de planification et d'aménagement des territoires.

Les lois « **Montagne** » (1985) et « **Littoral** » (1986) instaurent un cadre de protection des espaces sensibles et de limitation de la pression foncière, en imposant une urbanisation en continuité avec les zones déjà bâties (article L. 122-5 du Code de l'urbanisme pour la loi Montagne, article L. 121-8 pour la loi Littoral), principe complémentaire à la sobriété foncière aujourd'hui au cœur de la planification urbaine. Parallèlement, une prise de conscience des impacts socio-économiques de l'étalement urbain a émergé, qu'il s'agisse des coûts liés à la mise en place de réseaux enterrés, à leur entretien, à la santé publique ou encore à l'identité territoriale.

Deux lois importantes ont ensuite été adoptées :

- > **La loi Grenelle I de 2009 vise à établir des orientations pour le développement durable, imposant aux collectivités territoriales de renforcer leurs actions en matière d'aménagement durable.** Elle prévoit une réforme du droit de l'urbanisme pour contrer la réduction des surfaces agricoles et naturelles ainsi que l'étalement urbain. Les outils de planification doivent intégrer la notion de continuités écologiques, garantissant leur préservation et leur restauration ;
- > **La loi Grenelle II de 2010 renforce les mesures de la loi Grenelle I en précisant leur application par secteur.** Elle introduit la « Trame verte et bleue », un réseau de continuités écologiques destiné à favoriser la circulation de la faune et de la flore. Elle impose également aux SCoT et aux PLU d'analyser la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers des dix années précédentes et de fixer des objectifs chiffrés de limitation de cette consommation.

Par la suite, la **loi ALUR** (pour l'Accès au Logement et un Urbanisme Rénové), adoptée en 2014, a pour objectif de mieux encadrer l'urbanisation et de promouvoir une gestion économe de l'espace. Elle renforce la densification des zones déjà urbanisées, restreint l'ouverture à l'urbanisation des espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) en l'absence de SCoT, et confie à la commission départementale de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPENAF) un rôle accru dans leur protection — cette commission, créée par la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt du 13 octobre 2014, remplace la commission départementale de la consommation des espaces agricoles (CDCEA) que visait encore la loi ALUR. Cette dernière introduit également de nouveaux outils de planification, comme le Coefficient de Biotope par Surface (CBS) dans les PLU(i) (article L. 151-22 du Code de l'urbanisme), permettant d'imposer une part minimale de surfaces non imperméabilisées ou éco-aménageables, éventuellement pondérée selon leur nature, afin de favoriser la biodiversité en milieu urbain.

Depuis le début des années 2000, les politiques publiques françaises ont connu une évolution majeure en matière de gestion et de préservation du sol, avec un encadrement progressivement renforcé de la consommation d'espace. Cette dynamique s'est notamment traduite par la montée en puissance des exigences liées à la préservation des ENAF, dans un objectif global de sobriété foncière. L'un des aboutissements les plus marquants de cette évolution est la fixation d'un cap juridique ambitieux : **atteindre le zéro artificialisation nette (ZAN) à l'horizon 2050.**

Ce tournant normatif est consolidé par la **loi Climat et Résilience du 22 août 2021**, qui inscrit l'objectif de ZAN dans le Code de l'urbanisme (article L. 101-2) et fixe un objectif intermédiaire : réduire de moitié le rythme d'artificialisation entre 2021 et 2031 par rapport à la consommation observée sur la décennie

2011-2021 (article 191 de la loi). La nomenclature des surfaces artificialisées et non artificialisées, insérée à l'article R. 101-1 du Code de l'urbanisme par le décret n° 2022-763 du 29 avril 2022, a ensuite été précisée par le décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023 relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols, à partir de critères de couverture et d'usage des sols. La loi impose aux documents de planification (SRADDET, SCoT, PLU(i)) de décliner des objectifs chiffrés et des trajectoires territorialisées de réduction de l'artificialisation. La loi n° 2023-630 du 20 juillet 2023, d'origine sénatoriale, a ajusté les modalités opérationnelles du ZAN, en renforçant la concertation et en modulant certains mécanismes de comptabilisation et de trajectoire ; elle a notamment reporté les échéances de mise en compatibilité des documents de planification, désormais fixées au 22 novembre 2024 pour les SRADDET, au 22 février 2027 pour les SCoT et au 22 février 2028 pour les PLU(i).

Même si la mise en œuvre du ZAN repose toujours sur une comptabilisation surfacique des espaces artificialisés et non artificialisés, l'article L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme précise que l'artificialisation correspond à « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol [...], par son occupation ou son usage » et ouvre la voie à un changement de paradigme : **passer d'une vision en deux dimensions (2D) du foncier à une approche tridimensionnelle (3D) des sols** (Branchu et al. 2022). **Le sol n'est plus simplement appréhendé comme un support foncier ou une réserve d'espaces disponibles, mais comme un système vivant, porteur de fonctions écologiques.**

1.1.3 Alignement des engagements nationaux et européens pour favoriser la restauration fonctionnelle du sol

L'artificialisation des sols crée une pression anthropique directe ou indirecte à l'origine d'une perte de biodiversité et d'une dégradation des écosystèmes. La restauration d'un sol fonctionnel consiste à lui redonner tout ou partie de ses fonctions écologiques, par des actions comme la désimperméabilisation, le décompactage ou l'apport de matière organique. Elle peut enrayer la destruction des habitats et contribuer à faire face au changement climatique (lutte contre la sécheresse, les inondations ou les îlots de chaleur urbains).

L'intérêt des actions liées à la restauration des sols se traduit désormais au plan législatif à plusieurs niveaux avec un alignement des engagements nationaux et européens (Figure 6) :

- > **La loi Climat et Résilience de 2021** vise à atteindre un objectif de « zéro artificialisation nette » en 2050 (loi présentée ci-dessus) ;
- > **Le règlement européen de 2024** relatif à la **restauration de la nature** fixe pour la première fois des objectifs quantitatifs aux États membres pour enrayer la perte de la biodiversité et la dégradation des écosystèmes (Encadré 1) ;
- > **La stratégie nationale biodiversité 2030** a pour objectif de réduire les pressions sur la biodiversité, de protéger et restaurer les écosystèmes et de susciter des changements en profondeur afin d'inverser la trajectoire du déclin de la biodiversité ;
- > **La directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols, adoptée en octobre 2025**, vise, sans fixer d'objectif chiffré de réduction de l'artificialisation, à réduire l'imperméabilisation des sols, le décapage ou l'excavation du sol lors de travaux et, dans une moindre mesure, à compenser la perte de capacité des sols à fournir des services écosystémiques multiples, via la désimperméabilisation des sols et la « reconstruction de zones ayant fait l'objet d'un enlèvement des sols ».

À l'heure actuelle, la restauration fonctionnelle des sols fait l'objet d'un vif intérêt car elle se trouve au cœur des politiques publiques d'aménagement répondant ainsi aux enjeux liés à l'adaptation au changement climatique et à la perte de la biodiversité.

Avec le renforcement des exigences réglementaires, les collectivités ont désormais besoin d'approfondir leurs connaissances sur le sol et de consolider leur ingénierie territoriale, afin de mieux l'intégrer dans la planification comme dans la conception et la mise en œuvre de projets d'aménagement durable.

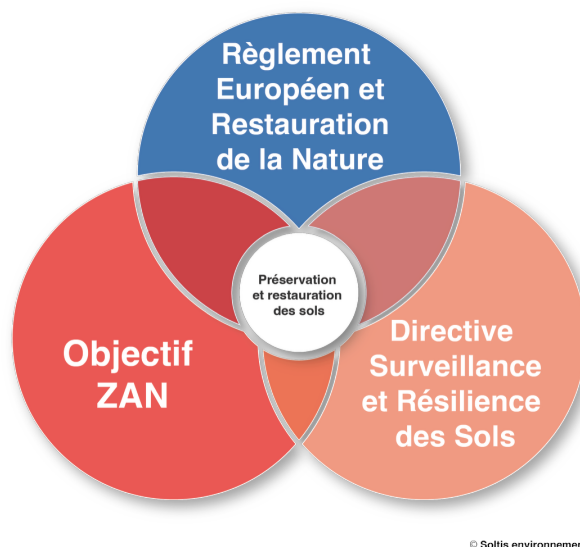


Figure 6. Illustration des principaux engagements nationaux et européens visant la préservation et la restauration des sols.

Dans ce contexte, la prise en compte dans les stratégies territoriales du caractère « fonctionnel » du sol constitue un préalable indispensable à la mise en œuvre de la réglementation européenne et nationale. À ce jour, il est traduit à l'aide de méthodologies basées sur l'usage (ex : agriculture, résidentiel, activités économiques, réseau de transport, etc.), et le couvert végétal (imperméabilisé, végétalisé, peu arboré, arboré). Cela peut alimenter une réflexion sur la stratégie de reconquête des espaces urbanisés dans le cadre d'une identification des zones préférentielles de renaturation avec une approche qualitative intégrant la « santé » ou la « qualité » des sols urbains, afin de prioriser les secteurs à enjeux de renaturation. Or, ces descripteurs d'usage et de couvert végétal renseignent sur l'occupation du sol, pas sur ses fonctions écologiques : deux sols au même usage et au même couvert peuvent avoir des capacités biologiques, climatiques, nutritives ou hydriques très différentes. C'est à cette limite que répond la méthode « 4 fonctions » présentée dans ce guide, qui évalue directement les fonctions du sol plutôt que ses seuls descripteurs de surface.

Encadré 1. Le Règlement européen de restauration de la nature : enjeux et déclinaisons urbaines (entré en vigueur le 18 août 2024)

Adopté à l'échelle européenne, le règlement pour la restauration de la nature fixe un cap ambitieux : **engager des mesures de restauration écologique couvrant, d'ici 2030, au moins 20 % des zones terrestres et marines de l'Union européenne, puis l'ensemble des écosystèmes nécessitant une restauration à l'horizon 2050.** Ce périmètre inclut explicitement les écosystèmes terrestres, marins, forestiers mais également urbains, reconnaissant ainsi le rôle stratégique des villes dans les trajectoires de transition écologique.

La mise en œuvre de ce règlement repose sur un calendrier structurant. Chaque État membre devait soumettre à la Commission européenne un projet de plan national de restauration au plus tard le 1er septembre 2026. Ces plans doivent préciser les indicateurs mobilisés, les seuils retenus, les mesures de restauration envisagées ainsi que les besoins en connaissances et en suivi, traduisant les ambitions européennes à l'échelle nationale et territoriale. En France, ce projet prend la forme du plan national « Agir pour restaurer la nature », dont l'élaboration, engagée par une concertation publique en 2025, se poursuit courant 2026.

En France, cette dynamique s'inscrit en cohérence avec les politiques existantes, notamment à travers la **révision du Plan Nature en ville**, présentée en septembre 2024. Ce plan, coconstruit avec les acteurs de la nature en ville, répond à la fois aux objectifs du règlement européen et à ceux du ZAN issus de la loi Climat et Résilience. Il s'articule autour de quatre axes :

- > Améliorer la connaissance ;
- > Préserver et restaurer la nature dans les stratégies territoriales ;
- > Maintenir et développer la nature dans les projets d'aménagement ;
- > Fédérer les acteurs afin de construire une culture partagée de la nature en ville.

L'article 8 du règlement européen accorde une attention particulière **aux écosystèmes urbains**. Il impose, dans chaque zone d'écosystème urbain (villes, agglomérations et banlieues), l'arrêt de la perte nette de la surface totale d'espaces verts urbains et de couvert arboré urbain d'ici 2030 par rapport à 2024, puis une tendance à la hausse des deux à partir de 2031, jusqu'à l'atteinte de seuils jugés satisfaisants. Le couvert végétal urbain français étant globalement inférieur aux seuils qui permettent à un État membre d'exempter certaines zones, la grande majorité des communes est concernée par ce suivi, même si sa déclinaison opérationnelle (inventaire du patrimoine arboré, plan d'action local) reste à préciser par les autorités nationales et régionales compétentes. Cette ambition vise non seulement à préserver les espaces végétalisés existants, mais également à favoriser la renaturation de secteurs urbanisés dégradés, en renforçant les continuités écologiques et les fonctions environnementales en ville.

Pour suivre ces objectifs, **deux indicateurs principaux** sont mobilisés. Les espaces verts urbains correspondent à la somme des surfaces végétalisées de manière permanente (incluant les surfaces arborées, arbustives et herbacées) et des surfaces d'eau naturelles. Le couvert arboré urbain est inclus dans les espaces verts urbains. Il en représente le sous-ensemble qui forme la canopée urbaine. En France, ces deux surfaces sont mesurées par l'outil Nature en ville, développé par l'IGN et visualisable ici : https://cartes.gouv.fr/rechercher-une-donnee/dataset/IGNF_NATURE-EN-VILLE.

1.2 Le sol au cœur de tous les enjeux environnementaux

1.2.1 Le sol, une interface dynamique entre écosystèmes et activités humaines

Selon l'Association Française pour l'Étude du Sol (AFES) :

« Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse.

L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre.

Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux.

Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes) » (Girard, 2014 - confirmé en 2018).

Cette définition est complétée par l'article 3 de la directive européenne 2025/2360 relative à la surveillance et à la résilience des sols qui définit le sol comme :

« la couche superficielle de la croûte terrestre, située entre le substrat rocheux ou le matériau parental et la surface terrestre, qui est constituée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants ».



À retenir

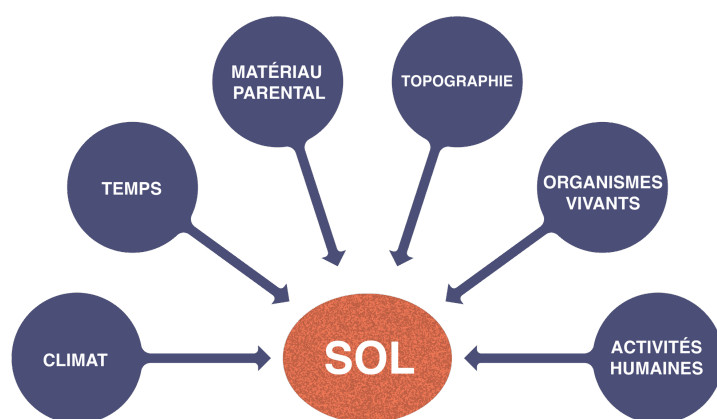
Le sol n'est pas un simple support, mais un système vivant et **évolutif**, résultat de processus physiques, chimiques et biologiques interconnectés. Cette composition plurielle rend le sol intrinsèquement **multifonctionnel**, c'est-à-dire apte à remplir simultanément plusieurs fonctions écologiques : biologiques, climatiques, hydriques, nutritives.

1.2.2 La pédogenèse : comprendre la formation et l'évolution du sol

La **pédogenèse** désigne l'ensemble des **processus physiques, chimiques, biologiques et climatiques** qui transforment un **matériau parental brut (roche mère)** en un **sol**. La pédogenèse, de durée très variable, dépend de nombreux facteurs (climat, nature du matériau parental, relief, végétation, temps...) (Figure 7). Ces processus trouvent leur origine dans des phénomènes d'altération physiques, chimiques et/ou biologiques.

On estime que le sol se forme naturellement au rythme de **0,1 à 10 mm par siècle**.

Figure 7. Principaux facteurs influençant la pédogenèse.

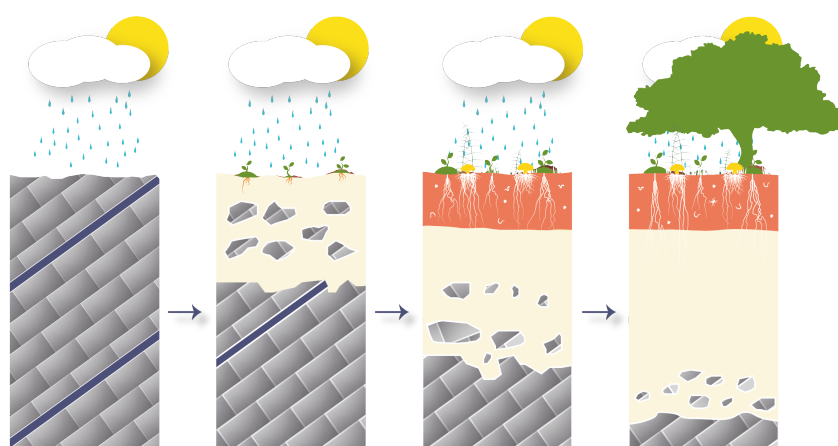


© Soltis environnement

Les phénomènes d'altération du matériau parental, à l'origine de la formation des sols, sont multiples et incluent (Figure 8) :

- > **L'altération physique** : ce processus fragmente mécaniquement les roches et les particules grossières sans modifier leur composition chimique ;
- > **L'altération chimique** : elle implique un ou plusieurs agents d'altération, tels que l'eau et l'oxygène. Elle inclut des mécanismes comme l'hydrolyse, qui constitue le principal moyen d'altération des matériaux par l'action de l'eau ;
- > **L'altération biologique** : les êtres vivants (plantes, micro-organismes, faune du sol) jouent un rôle central en fournissant et en transformant la matière organique et en favorisant l'agrégation des particules minérales et organiques. Ce processus est essentiel pour la structuration et la fertilité du sol (Encadré 3).

La pédogenèse aboutit à la formation d'un sol spécifique à la fois dans le temps et dans l'espace (Encadré 2).



© Soltis environnement

Figure 8. Illustration du processus de pédogenèse (adaptée d'une proposition de Vassili Vassilievitch Dokoutchaïev).

Encadré 2. Les processus de pédogenèse

Sous climat tempéré, plusieurs processus de pédogenèse majeurs gouvernent la différenciation des horizons du sol et déterminent leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques :

- > La **décarbonatation** correspond à la dissolution progressive des carbonates, qui libère les éléments insolubles issus des calcaires ; elle conduit à la formation de CALCOSOLS et de RENDOSOLS, sols calcaires caractérisés par une forte activité biologique et une structure généralement très stable ;
- > La **brunification** résulte de la formation d'un complexe argilo-humique-fer stable, responsable d'une coloration brune des horizons ; elle conduit au développement de BRUNISOLS, sols le plus souvent bien structurés, poreux et à pH proche de la neutralité ;
- > Le **lessivage** correspond au transfert des argiles des horizons superficiels vers des horizons d'accumulation plus profonds, entraînant une différenciation progressive des horizons et une diminution de la perméabilité en profondeur ; ce processus est à l'origine des NÉOLUVISOLS et des LUVISOLS ;
- > L'**hydromorphie** est liée à un excès d'eau temporaire ou permanent, qui induit des processus alternés de réduction et d'oxydation du fer et du manganèse ; elle conduit à la formation de RÉDOXISOLS et de RÉDUCTISOLS ;
- > La **podzolisation** est caractérisée par l'action de matières organiques acides qui attaquent les minéraux argileux et forment des complexes organo-minéraux mobiles, lesquels précipitent en profondeur sous forme d'altos plus ou moins indurés¹³ ; ce processus conduit à la formation de PODZOSOLS, sols fortement acides.
- > L'**anthropisation** est le résultat de l'action des humains sur le milieu naturel, d'une part pour le développement de l'agriculture (défrichement, travail superficiel du sol, fertilisation et amendements) et d'autre part pour le développement des villes et l'urbanisation. Ce processus est à l'origine des ANTHROPOSOLS.

¹³ Horizon du sol fortement cimenté par l'accumulation de complexes organo-minéraux riches en fer et en aluminium, issu de la podzolisation, formant une couche dure et peu perméable.

Encadré 3. Le rôle fondamental de la biologie du sol (Vincent et al. 2023)



© EODD Ingénieurs Conseils

Figure 9. Illustrations de la faune du sol.

Le sol est un écosystème vivant, habité par **une grande diversité d'organismes** (Figure 9), comprenant :

- > **Les micro-organismes** : bactéries, champignons, amibes, etc. ;
- > **La microfaune** : nématodes, rotifères, tardigrades, etc. ;
- > **La mésofaune** : collemboles, acariens, enchytréides, etc. ;
- > **La macrofaune** : vers de terre, fourmis et autres insectes, larves, etc.

L'ensemble des organismes du sol intervient, de manière directe ou indirecte, à la fois dans la formation des sols et dans le maintien de leur santé. La minéralisation assurée par les micro-organismes, la régulation des populations par les prédateurs tels que les araignées ou les chilopodes, ou encore la diminution du stress végétal grâce à la symbiose mycorhizienne, illustrent la diversité des mécanismes biologiques impliqués. Par leurs activités et leurs interactions, les organismes vivants contribuent non seulement au bon fonctionnement du sol, mais aussi à sa résilience face aux perturbations (Gobat et al. 2010).

Décrire un sol et caractériser ses propriétés

Chaque sol porte l'empreinte des processus qui l'ont façonné, climatiques, biologiques, lithologiques, produisant une organisation en strates sub-horizontales, appelées **horizons**, témoins de son évolution au cours du temps.

Le sol ne s'observe pas depuis la surface. Pour accéder à sa description, le pédologue utilise différentes méthodes complémentaires : les coupes naturelles, la fosse pédologique et le sondage à la tarière (voir section suivante). Ces descriptions peuvent être combinées à des outils indirects (télédétection, géophysique, etc.).

Le sondage à la tarière manuelle permet de décrire rapidement un sol par prélèvement de carottes terreuses successives de 20 cm jusqu'à 1,20 m de profondeur. Pour chacune des couches de sol identifiées, les caractéristiques observées sont : épaisseur, humidité, couleur, taches, calcaire (test à l'acide), texture, éléments grossiers, matière organique.

La fosse pédologique intervient pour une description plus complète des horizons du sol type répertorié : en plus des caractéristiques vues à la tarière, s'observent la structure, la compacité, l'activité biologique, l'enracinement, et des traits pédologiques plus spécifiques comme les revêtements argileux des agrégats.

À partir de ces observations à la tarière ou en fosse, différents types de sols sont ainsi directement répertoriés par l'observateur sur le terrain. En complément de ses observations, le pédologue peut prélever des échantillons de sol pour analyses de laboratoire. Ces dernières alimentent le diagnostic pédogénétique et fonctionnel du sol prélevé. Replacées dans leur contexte géomorphologique et paysager, les différentes observations permettent d'appréhender la répartition spatiale et la dynamique d'évolution des sols à l'échelle du territoire et le fonctionnement des couvertures pédologiques.

L'ensemble de ces informations fonde les classifications pédologiques (Encadré 4) et contribue à l'évaluation des fonctions écologiques du sol.

Encadré 4. Le Référentiel Pédologique Français

En 1967, la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) a mis en place une première classification des sols, remplacée par un référentiel plus pragmatique élaboré avec une centaine de pédologues français et internationaux. Ce référentiel, publié en 1992, a été actualisé en 1995 et 2008.

Publié par l'Association Française pour l'Étude du Sol (AFES), il permet de nommer et caractériser le sol selon un référentiel français établi et appelé RP 2008¹⁴ (coordonné par Baize et Girard, 2008).



À retenir

L'AFES, ou **Association Française pour l'Étude du Sol**, fondée en 1934, regroupe toutes les personnes intéressées par les divers aspects de l'étude des sols. L'association a pour objectif de **valoriser les ressources documentaires**, de **reconnaître les compétences en sciences du sol**, ainsi que **d'animer** et de **fédérer les réseaux d'acteurs**.



¹⁴ <https://www.quae.com/produit/1011/9782759214884/referentiel-pedologique-2008>



Figure 10. Illustration de deux profils de sol naturel sur la commune d'Annet-sur-Marne (77) (source : F. Baptist, Soltis environnement). À gauche, le sol est un FLUVIOSOL BRUNIFIÉ-RÉDOXISOL (Baize et Girard 2008). À droite, le sol est un FLUVIOSOL BRUNIFIÉ (Baize et Girard 2008).

Sur la figure 10, il est possible d'observer 2 FLUVIOSOLS différents qui sont des sols issus d'alluvions, matériaux déposés par les cours d'eau lors des périodes de crues ou de fluctuations hydrologiques. Ces dépôts sont constitués de matériaux fins (argiles, limons, sables) pouvant contenir des éléments plus ou moins grossiers (galets, cailloux, blocs). Ils occupent généralement des positions topographiques en fond de vallée.

Les outils du pédologue

La prospection de terrain repose sur l'ouverture de profils pédologiques selon deux protocoles (Figure 11 à Figure 13) :

- > **Sondages à la tarière ou à la pelle manuelle**, lorsque l'accessibilité du site est contrainte ou que les investigations doivent rester peu intrusives. La profondeur atteinte avec une tarière manuelle est généralement de 1,20 m. Les sondages à la tarière sont parfois limités par la présence d'éléments grossiers (par ex. cailloux). Dans ce cas, l'essai de sondage doit être recommencé deux à trois fois, afin de vérifier l'existence réelle d'un niveau de cailloux homogène. Lorsqu'une fosse est creusée à la main, il est généralement compliqué d'aller au-delà de 50 à 60 cm ;
- > **Fosses pédologiques creusées mécaniquement (souvent à la minipelle¹⁵)**, lorsque des observations complètes en profondeur sont requises ou en présence d'un sol très compact voire scellé (auquel cas l'utilisation d'un BRH, brise-roche hydraulique, est nécessaire). Dans ce cas, des profondeurs plus importantes peuvent être explorées. Selon la profondeur et la surface d'ouverture de la fosse, il est possible ou non pour l'expert de descendre dans la fosse pour réaliser l'analyse.

¹⁵ Des sondages au carottier sont également possibles, mais présentent la contrainte de déstructurer la carotte de sol lors de son extraction.



Figure 11. Fosse réalisée à la minipelle (source : Soltis environnement).



Figure 12. Fosse manuelle (source : Soltis environnement).



Figure 13. Sondage pédologique à la tarière manuelle (source : Soltis environnement).

En complément de ces observations de profil, une évaluation de la macrofaune du sol, notamment les vers de terre, peut être réalisée grâce au **test bêche**¹⁶. Ce protocole standardisé, dérivé de celui de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT), consiste à extraire un bloc de sol (généralement de 25 x 25 cm sur 20 à 30 cm de profondeur), à trier la faune manuellement, et à quantifier les individus présents. Il doit être réalisé idéalement entre janvier et avril, période d'activité maximale des vers de terre. L'analyse se base sur leur abondance et diversité, ce qui permet d'évaluer indirectement la fonction biologique.

Chaque zone prospectée fait l'objet d'une description pédologique approfondie. L'expert pédologue identifie les horizons successifs, leur épaisseur, leur structure (mode d'assemblage des particules du sol en agrégats), leur couleur, leur texture (proportions relatives d'argile, de limon et de sable), leur compacité (résistance du sol à la pénétration, liée à son degré de tassement), les traces d'hydromorphie (marques laissées par un engorgement temporaire ou permanent en eau), le calcaire (test à l'acide), l'activité biologique et d'éventuels signes d'altération ou de pollution. **Ces descriptions sont essentielles pour évaluer par la suite les fonctions et orienter les prélèvements.**

Au-delà de la description morphologique des profils, la caractérisation des sols peut être complétée par des mesures *in situ* et *ex situ*. Sur le terrain, certaines propriétés se mesurent directement, comme la perméabilité à l'aide d'un infiltromètre (essai d'infiltration), la résistance à la pénétration ou encore le

¹⁶ Le test bêche fait l'objet de différents référentiels d'interprétation comme la méthode VESS ou encore la méthode ISARA.

pourcentage d'éléments grossiers. En complément, des prélèvements sont réalisés en vue d'analyses en laboratoire (*ex situ*). Celles-ci portent d'une part sur les paramètres physico-chimiques, texture, masse volumique apparente, pH, teneurs en carbone, azote et phosphore, capacité d'échange cationique, et, d'autre part, sur des paramètres biologiques de plus en plus mobilisés pour évaluer l'état biologique des sols : abondance et diversité des communautés microbiennes et de la nématofaune, biomasse microbienne, ou encore analyses d'ADN environnemental (ADNe). Enfin, selon les objectifs de l'étude et l'échelle d'investigation, la caractérisation des sols peut également s'appuyer sur des méthodes indirectes, telles que les outils géophysiques, la télédétection ou la radiométrie gamma.

Le choix des mesures et analyses dépend des fonctions à évaluer, du niveau de précision recherché et des moyens disponibles ; il est défini en amont selon les objectifs de l'étude (voir Chapitre 2).



À savoir

La description du sol sur le terrain, associée aux analyses physico-chimiques en laboratoire et à une mise en contexte environnementale (aspects géologiques, hydrologiques, etc.), permet de qualifier le sol selon le Référentiel Pédologique (Baize et Girard 2008) (Encadré 4).

Toutes ces données collectées peuvent venir enrichir le système d'information national sur les sols DoneSol. L'information est standardisée suivant un dictionnaire de données. Contact : Info&sols@inrae.fr.

1.2.3 Des fonctions du sol à la fourniture de services écosystémiques

Les sols rendent **des services écosystémiques** essentiels aux sociétés humaines. Ils conditionnent la production alimentaire, le stockage du carbone, la régulation du cycle de l'eau, ce qui atténue les inondations et les effets des sécheresses, et apportent des solutions d'adaptation au changement climatique. Les sols filtrent aussi les polluants, contribuant ainsi à la qualité de l'eau. Enfin, ils ont une valeur culturelle et patrimoniale.

Ces services reposent sur des **fonctions écologiques** qui peuvent être altérées ou renforcées selon les usages et les modes d'aménagement. Comprendre ces fonctions constitue donc un préalable indispensable pour orienter les choix d'aménagement, hiérarchiser les usages du sol et définir des stratégies de préservation ou de restauration adaptées.

Les fonctions du sol

Plusieurs définitions sont proposées pour établir ce que sont les fonctions du sol. Nous en citerons trois ici :

« Les fonctions du sol englobent les processus que le sol remplit dans un écosystème, qu'ils soient biologiques ou non biologiques » (Eglin et al. 2021)

« La fonction d'un sol est le résultat d'un processus pédologique, ou d'une combinaison de processus, qui régit la dynamique de la structure et de la composition de l'écosystème et qui, à ce titre, sous-tend les services écosystémiques rendus par le sol » (d'après ISO/TS 18718:2026, norme publiée par l'ISO en janvier 2026 - Fonctions du sol et services écosystémiques associés — Définitions, descriptions et cadre conceptuel)

« La fonction d'un sol est l'assemblage de processus bio-physico-chimiques qui interagissent entre eux assurant une action intégrée qui permet au sol de fonctionner » (Bünemann et al. 2018 ; Cousin et al. 2025).

Dans ce guide, on appellera « fonction du sol » **un assemblage de processus bio-physico-chimiques qui interagissent entre eux et permettent au sol de fonctionner, à l'origine des services écosystémiques qu'il rend** (d'après Büneemann et al. 2018 ; Cousin et al. 2025).

La caractérisation et l'intitulé des fonctions du sol varient selon les disciplines et les sources.

Sur le plan scientifique, des travaux menés notamment par la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE (**étude INDIQUASOLS**) proposent une structuration de la connaissance des sols en **six fonctions essentielles : stockage du carbone, régulation des contaminants, fourniture de nutriments à la biocénose, régulation de l'eau en quantité et en qualité, support de biodiversité et entretien de la structure** (Figure 14) (Cousin et al. 2025). Cette proposition constitue un cadre conceptuel cohérent avec les objectifs d'évaluation de la santé des sols, tels que recherchés par la directive européenne relative à la surveillance et à la résilience des sols (2025/2360), tout en offrant une base utile pour définir des indicateurs opérationnels adaptés aux contextes territoriaux.

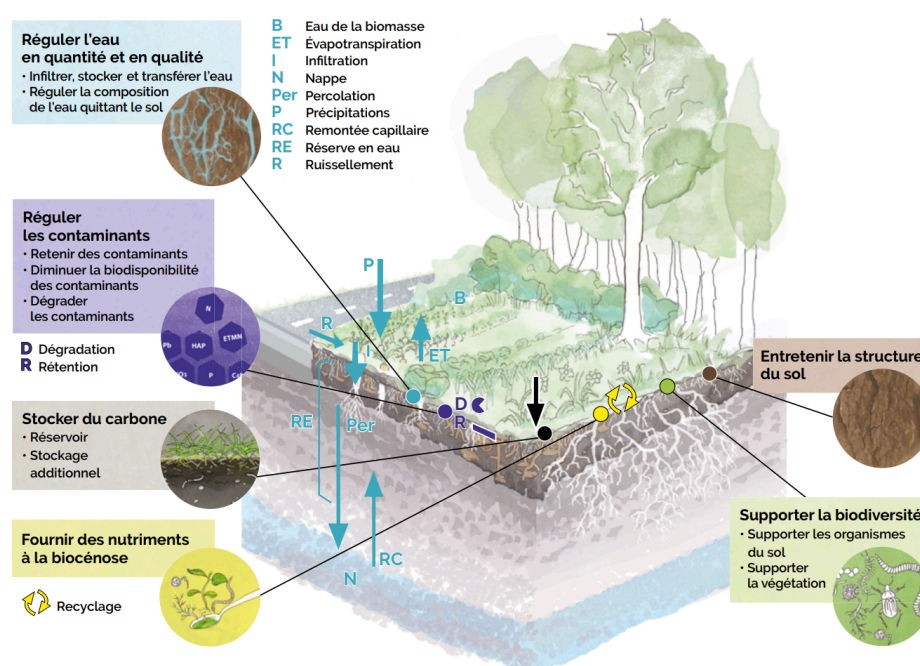


Figure 14. Périmètre des 6 fonctions des sols retenues dans le cadre de l'étude INDIQUASOLS (Cousin et al. 2025).

Sur le plan réglementaire, l'article 192 de la **loi Climat et Résilience** (2021) fait explicitement référence aux fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi qu'au potentiel agronomique. Dans l'esprit de la loi, la fonction climatique des sols correspond essentiellement à leur rôle dans le cycle du carbone et la régulation des gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique. Le potentiel agronomique, quant à lui, s'apparente à un service écosystémique d'approvisionnement intitulé, selon le programme EFESE, « production de biomasse » (Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques, CGDD, 2020). Ce potentiel agronomique est la résultante de l'expression de différentes composantes fonctionnelles telles que la fourniture en nutriments, l'enracinement de la végétation ou encore le stockage et transfert de l'eau à la plante etc. Il présente donc un caractère transversal aux fonctions citées par la loi Climat et Résilience.

Pour assurer une cohérence scientifique et réglementaire et pour faciliter la mise en œuvre sur le terrain, ce guide retient une nomenclature resserrée en quatre fonctions, qui s'appuient sur les cadres précédents tout en restant directement opérationnelles (Figure 15).

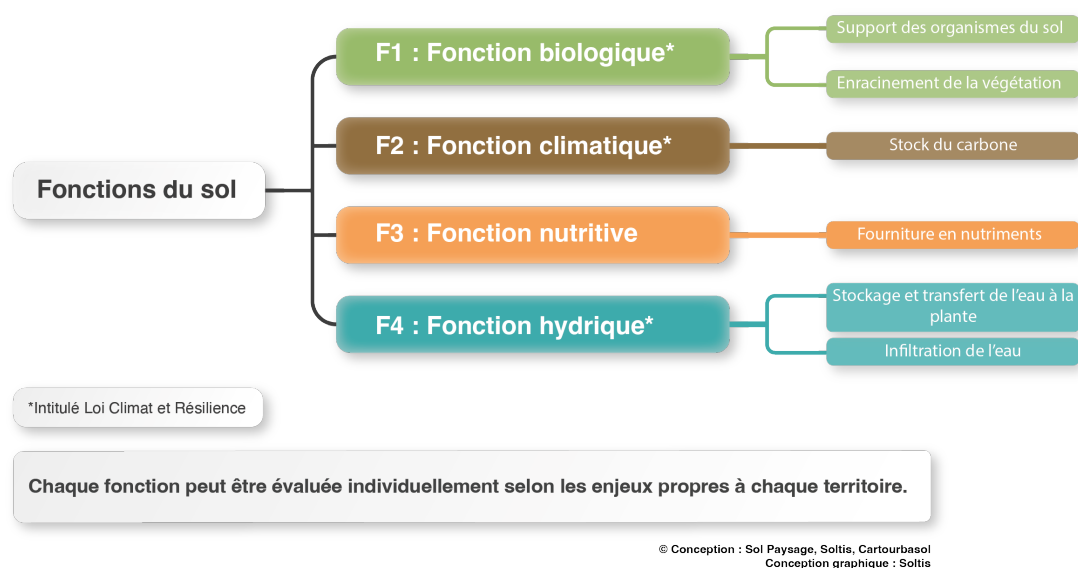


Figure 15. Présentation des 4 fonctions et 6 sous-fonctions évaluées dans le cadre de ce guide.

Chaque fonction se décline en une ou plusieurs sous-fonctions mobilisées pour son évaluation opérationnelle : le support des organismes du sol et l'enracinement de la végétation pour la fonction biologique ; le stock de carbone pour la fonction climatique ; la fourniture en nutriments pour la fonction nutritive ; l'infiltration de l'eau et le stockage et transfert de l'eau à la plante pour la fonction hydrique.

Les quatre fonctions se définissent comme suit :

- > **Fonction biologique** : Le sol héberge et permet de soutenir le développement d'une immense diversité biologique, estimée à 60 % de la biodiversité mondiale (Anthony et al. 2023). Cette biodiversité est l'acteur principal de certains processus comme le recyclage des matières organiques. Au-delà de cet aspect biologique, le sol permet également l'ancrage et le développement du système racinaire de la végétation, condition indispensable au maintien et au renouvellement des couverts végétaux. Cette fonction contribue donc directement au fonctionnement écologique des milieux et participe, de manière indirecte, au potentiel agronomique des sols. Elle dépend par exemple de la texture du sol, de la porosité, de la teneur en matière organique ou encore du pH ;
- > **Fonction climatique** : Le sol renferme davantage de carbone que l'atmosphère : le premier mètre de sol stocke, à l'échelle mondiale, environ 1 410 à 1 550 milliards de tonnes de carbone, soit près du double de la quantité présente dans l'atmosphère (Batjes, 1996). Sa capacité à stocker (ou à relarguer) du carbone dépend de sa teneur en matière organique, ainsi que des pratiques de gestion agricole ou forestière (labour, apports organiques, drainage) et de l'usage du sol, etc. Protéger cette fonction est donc stratégique pour atténuer le changement climatique ;
- > **Fonction nutritive** : Elle correspond à la capacité du sol à mettre à disposition des nutriments essentiels aux végétaux (azote, phosphore, potassium, etc.). Cette disponibilité résulte principalement des cycles biogéochimiques qui assurent la transformation et la circulation des éléments dans le sol. Ces processus reposent en grande partie sur l'activité des micro-organismes, qui décomposent la matière organique et libèrent les nutriments sous des formes assimilables par les plantes. Les propriétés physico-chimiques du sol, notamment le pH et la texture, jouent

également un rôle majeur dans cette mise à disposition, par le biais des phénomènes physico-chimiques dans les sols ;

- > **Fonction hydrique :** Le sol joue un rôle déterminant dans la régulation des flux d'eau. Sa structure, sa texture et sa teneur en matière organique conditionnent sa capacité à absorber, infiltrer et stocker temporairement l'eau. Un sol bien structuré permet une infiltration efficace des précipitations et un stockage de l'eau dans les horizons pédologiques, assurant ainsi une disponibilité hydrique pour la végétation. À l'inverse, un sol compacté, peu poreux ou présentant un horizon imperméable en profondeur peut limiter l'infiltration, favoriser le ruissellement de surface et réduire fortement la réserve utile en eau, c'est-à-dire la quantité d'eau que le sol peut stocker et restituer aux plantes. Cette fonction hydrique participe donc directement à la réalimentation des nappes phréatiques et à l'alimentation en eau de la végétation. Elle contribue, avec la fonction nutritive, à l'expression du potentiel agronomique des sols.

Deux fonctions décrites dans l'étude INDIQUASOLS (Cousin et al. 2025) ne sont pas retenues dans ce guide :

- >  **Fonction de régulation des contaminants**

La fonction de régulation des contaminants repose sur des processus tels que la rétention ou la dégradation des contaminants. Cette régulation reste toutefois partielle : lorsque les concentrations deviennent très élevées, la capacité de régulation du sol est dépassée ; le sol devient alors un sol pollué, susceptible de porter atteinte à la santé humaine ou aux écosystèmes terrestres ou aquatiques. Cette fonction est directement liée au comportement des polluants dans le sol, en particulier à leur biodisponibilité environnementale, c'est-à-dire la fraction d'un contaminant réellement assimilée par les organismes vivants (BRGM).

Elle n'est pas retenue dans ce guide, car son évaluation relève d'une méthodologie nationale dédiée, distincte de l'approche par les 4 fonctions : la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (<https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/methodologie/methodologie-nationale-gestion-ssp>) est à mobiliser en parallèle dès qu'une pollution est suspectée ; un sol bien évalué au regard des quatre fonctions peut en effet être pollué par ailleurs.

En contexte urbain, les teneurs mesurées doivent également être comparées au Fond Pédogéochimique Anthropisé (FPGA), c'est-à-dire le fond géochimique local qui associe l'arrière-plan naturel et les apports diffus liés aux activités humaines anciennes (BRGM), afin de distinguer une anomalie naturelle d'une pollution ponctuelle.

- >  **Fonction d'entretien de la structure du sol**

La fonction d'entretien de la structure du sol est étroitement liée aux fonctions d'habitat pour la biodiversité, dont la végétation, et de régulation quantitative de l'eau. Elle est en effet à la fois un élément fondamental de l'habitat des organismes du sol et la résultante de leur activité biologique. Cette fonction n'est pas retenue dans le guide car elle est appréhendée et mesurée au travers des fonctions biologique et hydrique du sol.

Il est enfin important de souligner que l'approche par les fonctions, telle que portée par la loi Climat et Résilience en lien avec l'artificialisation, peut présenter un risque **pour la préservation patrimoniale des sols**. En effet, tous les sols n'expriment pas les mêmes niveaux de fonctionnalité. Les PLANOSOLS, caractérisés par un horizon profond argileux très peu perméable, contrastent par exemple avec les ARÉNOSOLS, des sols très sableux généralement peu fertiles. De manière analogue, en s'intéressant à la fonction d'habitat pour la biodiversité, les sols peu profonds et peu fertiles accueillent peu de lombriciens mais permettent d'accueillir certaines espèces d'orthoptères, carabes, araignées tandis que des sols peu perméables permettent d'héberger des organismes inféodés aux milieux humides comme les collemboles hygrophiles. Une lecture strictement fonctionnelle pourrait conduire à artificialiser des sols naturels au profit de sols reconstitués supposément plus fonctionnels au regard d'un usage donné. Une telle dynamique risquerait d'appauvrir la diversité des sols.

Vers une lecture multifonctionnelle du sol



À retenir

La multifonctionnalité, concept central de ce guide, désigne la capacité d'un sol à assurer simultanément plusieurs fonctions.

Chaque sol, selon sa structure, sa composition, son contexte topographique ou son usage, exprime des fonctions dominantes et des fonctions plus limitées. En ce sens, les sols ne sont ni équivalents ni interchangeables : certains excelleront naturellement dans la régulation hydrique, d'autres dans la production de biomasse ou dans le stockage du carbone (Branchu et al. 2022).

Cette variabilité fonctionnelle rend nécessaire :

- > De caractériser l'état de l'ensemble des fonctions des différents types de sols du territoire ;
- > De hiérarchiser les usages compatibles ;
- > Et de guider les politiques d'aménagement et les stratégies de protection de l'environnement.

Afin de faciliter la **lecture globale** de cette multifonctionnalité, il est possible de construire un **indice thématique**, qui synthétise l'aptitude d'un sol à assurer simultanément plusieurs sous-fonctions témoignant, par exemple, du potentiel agronomique ou encore du potentiel de régulation climatique (voir chapitre 2).

Cet indice de multifonctionnalité repose sur :

- > L'identification **préalable des fonctions (ou sous-fonctions associées)** évaluées, en mobilisant certaines des six sous-fonctions retenues dans ce guide ;
- > La **normalisation des indicateurs** associés à ces fonctions ou sous-fonctions sur une même échelle commune (par exemple de 0 à 1 ou de 1 à 5), afin de les rendre comparables ;
- > Leur **agrégation mathématique** (moyenne, somme pondérée, algorithme multicritère, etc. ; voir chapitre 2).

Il offre une **vue synthétique** du potentiel fonctionnel des sols, utile pour :

- > **La comparaison entre sites ou territoires ;**
- > **Le suivi temporel** de l'évolution d'un sol à la suite d'un changement de son mode d'occupation par exemple ;
- > Ou la **priorisation des actions d'aménagement, de préservation ou de restauration.**



À savoir

Comme tout indicateur synthétique, cet indice de multifonctionnalité implique une **perte d'information**. Il doit donc être **interprété en complément des indicateurs détaillés**, et sa **construction (pondérations, choix méthodologiques)** doit être transparente.

Des fonctions aux services écosystémiques



À retenir

Un service écosystémique et/ou un bénéfice socio-économique dérive de l'expression d'une ou plusieurs fonctions écologiques (vision anthropocentrée).

Le concept de service écosystémique, introduit notamment par le *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) en 2005, permet d'identifier **les bénéfices socio-économiques que l'être humain tire de l'utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes**, soulignant ainsi son caractère anthropocentré (Reid

et al. 2005). Ce rapport onusien visait à mettre en lumière la dépendance de l'humanité à l'égard du bon état des écosystèmes et donc des fonctions qu'ils expriment (Fèvre 2017).

La déclinaison en France du MEA dans le cadre du programme EFESE (Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques ; CGDD, 2020) a conduit les chercheurs français à distinguer trois catégories de services écosystémiques, auxquelles s'ajoute le patrimoine naturel, qui n'est pas lui-même un service :

- > Les services d'approvisionnement ;
- > Les services de régulation ;
- > Les services socio-culturels ;
- > Le patrimoine naturel.

Comme indiqué ci-dessus, ces services écosystémiques reposent sur la réalisation de fonctions, lesquelles peuvent exister indépendamment de tout bénéfice pour l'Homme (Figure 16).

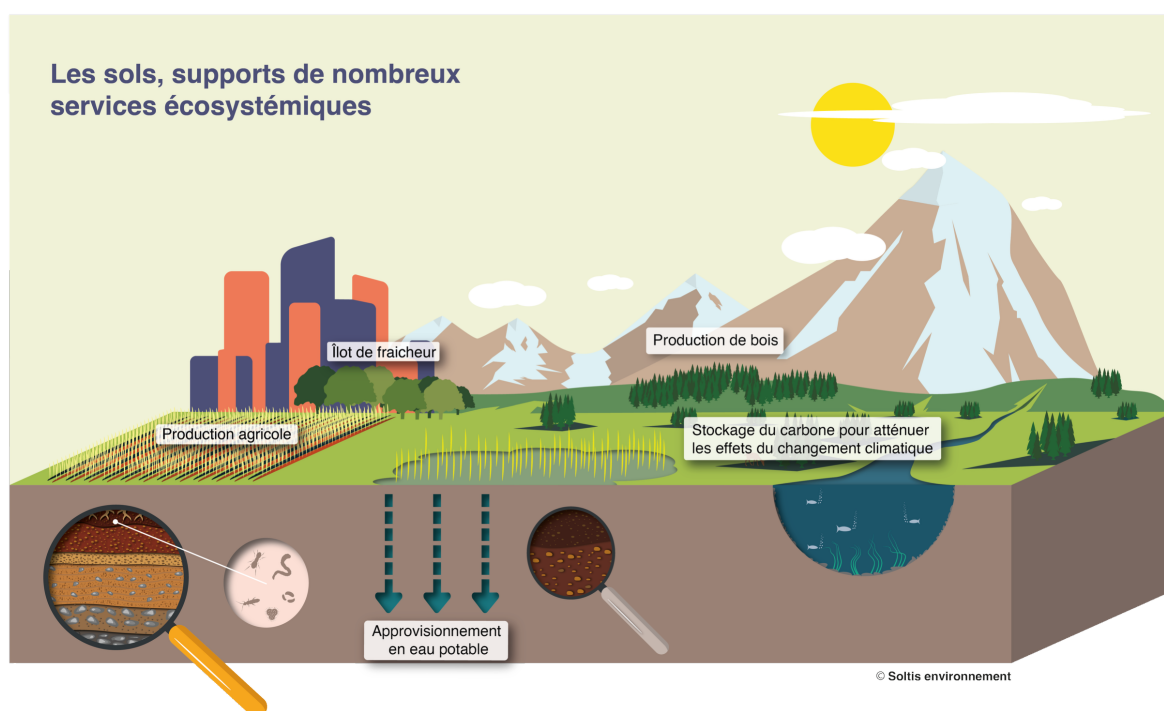


Figure 16. Services écosystémiques auxquels contribuent les sols.

Les services écosystémiques fournis par les sols résultent d'une chaîne de causalité reliant les propriétés intrinsèques du sol à ses fonctions écologiques. La Figure 17 met en évidence ce lien fonctionnel entre les propriétés biophysiques du sol, ses fonctions écologiques, les services écosystémiques qui en découlent et les bénéfices apportés à la société. Les propriétés et processus du sol, tels que la texture, le pH, l'infiltration ou la minéralisation, conditionnent plusieurs fonctions écologiques essentielles, notamment celles du cadre INDIQUASOLS (Cousin et al. 2025) telles que le maintien de la structure, la régulation de l'eau, le stockage du carbone ou le support de la biodiversité. Ces fonctions se traduisent ensuite par des services écosystémiques, tels que la purification de l'eau, la régulation du climat ou le contrôle des inondations, qui contribuent finalement à des bénéfices directs pour l'être humain dans les domaines de la nutrition, de la santé, de la sécurité et des loisirs.

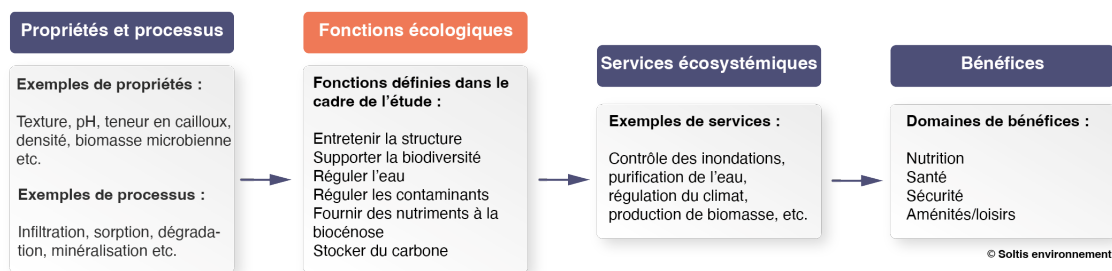


Figure 17. Chaîne fonctionnelle reliant les propriétés et processus du sol aux fonctions écologiques, puis aux services écosystémiques et enfin aux bénéfices pour l'être humain (adaptée de Cousin et al., 2025, d'après le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin, 2010).



À retenir

- > Le sol n'est pas une entité inerte, mais un système vivant, évolutif et multifonctionnel ;
- > Chaque sol exprime des fonctions spécifiques, avec des potentiels différents selon les contextes ;
- > Ces fonctions peuvent être évaluées et, dans certains cas, cartographiées. Elles peuvent également être traduites en services écosystémiques rendus par les sols aux habitants du territoire ;
- > Une bonne lecture multifonctionnelle du sol est essentielle pour guider la planification et les choix d'aménagement, dans un objectif de résilience territoriale, d'adaptation au changement climatique et de préservation et de restauration de la biodiversité.

Encadré 5. Distinction entre qualité et santé des sols

En lien avec l'évaluation des fonctions écologiques des sols, deux notions sont couramment mobilisées : la « **qualité des sols** » et la « **santé des sols** ». La « **santé des sols** » connaît une diffusion croissante, notamment dans les publications des institutions internationales et européennes. Bien que souvent utilisés de manière interchangeable, ces deux termes ne recouvrent pas exactement les mêmes réalités (Figure 18) :

- > La **qualité des sols** correspond au potentiel fonctionnel d'un ensemble de sols pour un usage donné ;
- > La **santé des sols** exprime l'état fonctionnel actuel du sol (par rapport à son potentiel fonctionnel), c'est-à-dire sa capacité à fournir des services écosystémiques, en lien avec son niveau d'altération physique et chimique, son niveau d'activité biologique et de résilience.

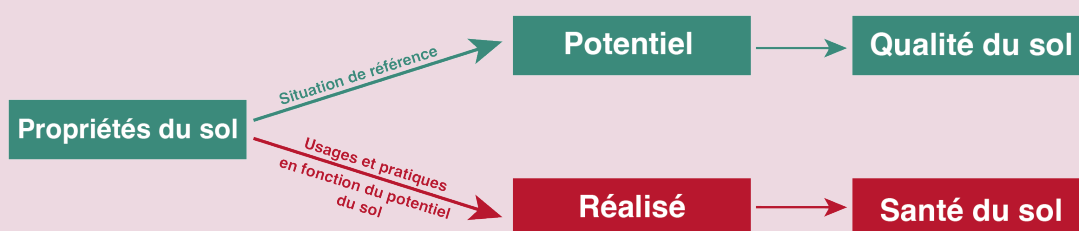


Figure 18. Emploi des termes « qualité » et « santé » des sols.

La qualité des sols désigne l'ensemble des propriétés qui conditionnent leur potentiel d'usage dans un contexte donné. De son côté, la santé des sols correspond à l'écart entre les fonctions réellement observées et celles que le sol serait potentiellement capable d'assurer, compte tenu de ses propriétés ou de son contexte territorial.

1.3 La modification du sol par l'urbanisation

1.3.1 Transformation du sol sous l'effet des activités humaines



À savoir

La **directive (UE) 2025/2360 relative à la surveillance et à la résilience des sols**, adoptée le 12 novembre 2025 et publiée au Journal officiel de l'Union européenne le 26 novembre 2025 (les États membres devront la transposer en droit national au plus tard le 17 décembre 2028, notamment en organisant la surveillance de la santé des sols par « districts de sols »), identifie les principales menaces pesant sur les sols, notamment liées aux pressions anthropiques : l'érosion, la perte de biodiversité, la diminution du stock de carbone organique, la pollution, l'excès de nutriments, le tassement et la salinisation.

Elle précise par ailleurs que **l'artificialisation des terres constitue un processus majeur de dégradation** ; le considérant 37 de la directive distingue deux aspects de l'artificialisation des terres : le changement d'affectation vers des superficies d'infrastructures, et l'artificialisation des sols proprement dite, c'est-à-dire l'altération durable des caractéristiques du sol entraînant une perte de sa capacité à fournir des services écosystémiques ; cette dernière recouvre l'imperméabilisation des sols, l'enlèvement des sols et d'autres formes d'artificialisation. Cette approche européenne, non encore transposée, est à distinguer de la définition française de l'artificialisation (article L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme) et de sa nomenclature d'application (article R. 101-1 et son annexe, issus du décret n° 2022-763 du 29 avril 2022 modifié par le décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023), seule opposable aux documents d'urbanisme.

Lors de l'urbanisation, le sol subit des opérations de creusement, de transport, de stockage, d'étalement de matériaux terreux, mais aussi de dépôts de déchets et de décombres. Ces mouvements de sols en déblai et en remblai sont à l'origine de sols anthropisés : les ANTHROPOSOLS (Baize et Girard 2008).

Au-delà des facteurs naturels de formation du sol (pédogenèse), précédemment présentés, les sols peuvent être classés selon leur **niveau d'anthropisation**, c'est-à-dire l'ampleur des transformations du sol liées aux activités humaines.

Cette notion recouvre un continuum allant de sols peu modifiés (naturels, agricoles, sylvicoles) à des sols parfois très transformés (urbains, industriels).

On peut ainsi schématiquement séparer **trois grandes catégories de sols** (Figure 19) : Cette distinction pédologique ne se superpose pas exactement aux catégories mobilisées pour le ZAN : la nomenclature annexée à l'article R. 101-1 du Code de l'urbanisme classe les surfaces selon leur couverture et leur usage réels, indépendamment de leur situation en zone urbaine, agricole ou naturelle dans les documents d'urbanisme. Un sol urbain peu remanié, comme un parc ou un jardin de pleine terre, est ainsi généralement non artificialisé au sens du décret, bien qu'il relève ici des « sols urbains ».

- > **Sols naturels** : peu ou pas modifiés par l'activité humaine, ils conservent une organisation pédologique originelle cohérente et remplissent une large gamme de fonctions écologiques (stockage et transfert de nutriments aux organismes vivants, régulation hydrique, support de biodiversité, stock de carbone, etc.) ;
- > **Sols agricoles ou forestiers** : partiellement transformés par les pratiques culturales ou sylvicoles dans les couches superficielles (labour, fertilisation, amendements, etc.), ils remplissent principalement un service de production de biomasse, mais conservent une certaine activité biologique et des capacités de régulation de l'eau ainsi qu'un potentiel important de fonctions écologiques ;
- > **Sols urbains** : leur forme originelle a le plus souvent totalement disparu sous le bâti ou les infrastructures, mais l'impact des activités humaines y est très inégal ; ils présentent donc des faciès extrêmement variés. Au sein des territoires urbanisés se trouvent à la fois des sols **pseudo-naturels**, c'est-à-dire proches de leur forme originelle avec des horizons superficiels peu impactés, et des sols très fortement **anthropisés**. Ces derniers, modifiés par les terrassements qu'ils ont

subis en déblai ou en remblai, avec parfois l'apport de matériaux exogènes, se caractérisent par une forme pédologique souvent désorganisée, voire chaotique, ce qui limite en général fortement leur fonctionnalité (Figure 19). Cependant, a contrario, on constate que certaines zones végétalisées en ville ont fait l'objet d'une reconstitution de sol complète, en plusieurs horizons complémentaires choisis pour leur qualité agronomique optimale, afin de garantir le développement d'un patrimoine arboré et paysager à forte valeur d'usage, contribuant ainsi aux trames écologiques du territoire. La fonctionnalité des sols urbains est donc très variable : d'un niveau élevé, parfois proche de celui des sols naturels lorsque les ANTHROPOSOLS reconstitués (sols façonnés à partir de matériaux pédologiques transportés et remaniés, par exemple en jardins et espaces verts, Baize et Girard 2008) sont mis en œuvre dans de bonnes conditions, à quasi nul pour les ANTHROPOSOLS artificiels (sols entièrement constitués de matériaux non pédologiques rapportés par l'Homme, tels que gravats ou déblais, Baize et Girard 2008).

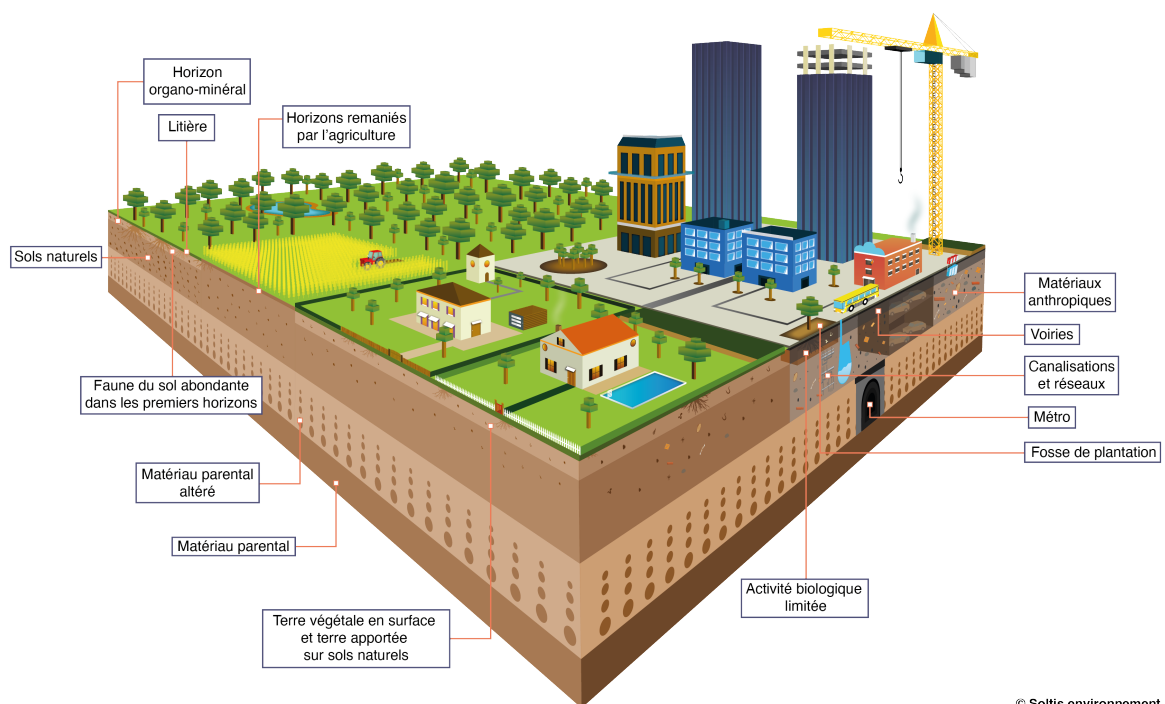


Figure 19. Organisation des horizons pédologiques en milieu rural et en milieu urbain.

Les sols naturels se caractérisent généralement par une organisation en horizons pédologiques superposés, résultant de processus de formation progressifs et conférant à chaque horizon des propriétés spécifiques. En milieu urbain, les sols de pleine terre présentent le plus souvent une organisation remaniée, marquée par des perturbations liées aux aménagements (décapage, apport de matériaux, mélange d'horizons). Ils peuvent inclure de la terre végétale issue de la couche arable des sols naturels, mais leur structure, leur continuité verticale (et latérale) et leur fonctionnement diffèrent fréquemment de ceux des sols non anthropisés.

La transformation des sols du fait des activités humaines est désignée par de multiples termes, parfois utilisés de manière interchangeable, alors qu'ils relèvent de logiques différentes (scientifiques, réglementaires, techniques). Cette diversité lexicale peut gêner la compréhension des enjeux, notamment dans l'application des politiques publiques ou la lecture des documents d'urbanisme. Il faut donc bien distinguer les termes suivants :

- > **L'urbanisation** : notion géographique, elle désigne l'expansion du tissu urbain, souvent en périphérie des villes. Ce processus correspond à un changement d'affectation et d'usage du sol au profit d'activités humaines permanentes. L'urbanisation entraîne généralement une artificialisation des sols, avec une imperméabilisation partielle ou totale des surfaces concernées ainsi qu'une anthropisation des sols (Béchet et al. 2017) ;
- > **L'artificialisation des sols** : notion réglementaire, l'artificialisation des sols est encadrée par l'article L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme, qui la définit comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Ce même article L. 101-2-1 définit la renaturation, ou désartificialisation, comme « des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé », et l'artificialisation nette des sols comme « le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatées sur un périmètre et sur une période donnés ». Ce solde s'apprécie en surfaces, selon la nomenclature annexée à l'article R. 101-1 du Code de l'urbanisme. Il fonde l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) à l'horizon 2050, fixé par la loi Climat et Résilience du 22 août 2021 et dont les modalités opérationnelles ont été ajustées par la loi du 20 juillet 2023 ;
- > **L'imperméabilisation** : notion technique et réglementaire, liée à la gestion territoriale de l'eau, elle complète celle de l'artificialisation, en mettant l'accent sur la fonction hydrique des sols. Un sol est dit imperméabilisé lorsque l'eau ne peut plus s'y infiltrer, c'est-à-dire lorsqu'il est bâti ou recouvert par une infrastructure dont le revêtement est imperméable. Elle ne concerne donc qu'une partie des espaces urbanisés ou artificialisés (Béchet et al. 2017) ; elle est mobilisée par des outils réglementaires locaux comme le zonage pluvial ou les coefficients d'imperméabilisation des PLU(i), ainsi que par les SDAGE et SAGE qui encadrent la gestion des eaux pluviales ; à l'échelle européenne, la directive (UE) 2025/2360 relative à la surveillance et à la résilience des sols la définit comme « le recouvrement des sols par des matériaux totalement ou partiellement imperméables » (article 3).
- > **La consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF)** : notion géographique et réglementaire, exprimée en deux dimensions (2D). La consommation d'ENAF est définie par la loi Climat et Résilience (article 194). Elle désigne « la création ou l'extension effective d'espaces urbanisés sur le territoire concerné », sans nécessairement impliquer une imperméabilisation complète. Cette notion est utile pour quantifier l'étalement urbain ; c'est cette consommation d'ENAF, mesurée à partir des fichiers fonciers (Cerema) et suivie sur le portail national de l'artificialisation des sols, qui sert d'indicateur pour la première tranche de la trajectoire ZAN (2021-2031) ; l'artificialisation nette, au sens du décret, prend le relais comme indicateur à partir de 2031. La dimension « 2D » signifie que seule l'emprise au sol est comptabilisée, sans tenir compte de la profondeur du sol, à la différence de l'anthropisation, étudiée en trois dimensions (3D, voir ci-dessous).
- > **L'anthropisation des sols** : notion scientifique et pédologique, l'anthropisation décrit en trois dimensions (3D), c'est-à-dire en intégrant la profondeur du sol et non la seule emprise au sol, la perturbation des sols du fait des activités historiques humaines : modifications directes liées à l'urbanisation (apports de matériaux, terrassements, constructions, dépôts, extractions) ou indirectes (pratiques agricoles, amendements, drainage, irrigation, pollution) (Gobat et al. 2010). L'anthropisation fait partie de la boîte à outils du pédologue en situation urbaine pour traduire un niveau de perturbation des sols, en relation, ou non, avec une dégradation de leurs fonctions écologiques. Ainsi, des ANTHROPOSOLS reconstitués, considérés comme fortement anthropisés car produits par l'Homme, peuvent atteindre de hauts niveaux de fonctionnalité et répondre à des objectifs de renaturation, dans le cadre de projets d'aménagement paysagers ou écologiques en milieu urbanisé.

⚠ Ces notions ne sont pas équivalentes et ne s'appliquent pas toutes dans les mêmes contextes :

En milieu urbain, l'anthropisation des sols est la conséquence du processus d'urbanisation. Lors du développement des villes, les projets de construction ou d'aménagement génèrent des chantiers qui impactent les sols originels des espaces naturels, agricoles ou forestiers (ENAF).

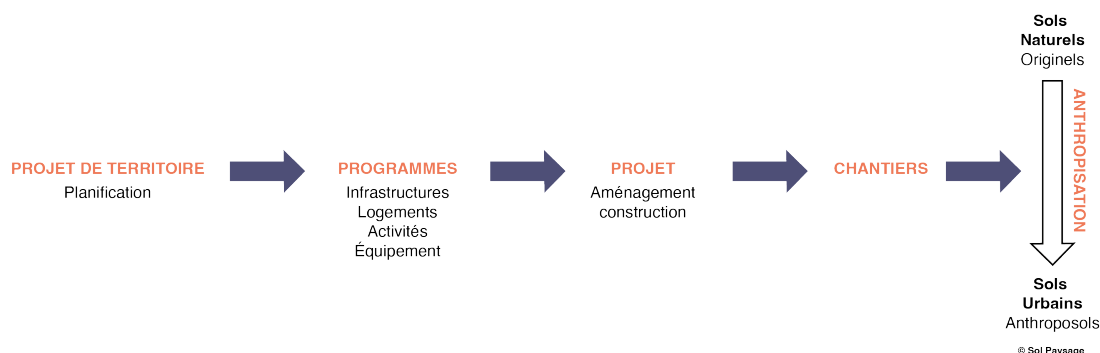


Figure 20. Les moteurs de l'anthropisation (d'après la communication de Sol Paysage aux JES 2025 à Genève).

ⓘ À savoir

En France, **environ 8,4 % de la superficie totale du territoire (départements et régions d'outre-mer inclus) est recensée comme « sols artificialisés »** par l'enquête Teruti du service statistique du ministère de l'Agriculture (SSP/Agreste), en moyenne triennale sur les collectes 2022-2023-2024. Cette catégorie statistique regroupe les sols bâtis, les sols revêtus (routes, parkings), les sols stabilisés (voies ferrées, chantiers, décharges, carrières) et les « autres sols artificialisés », qui incluent notamment les jardins, pelouses, parcs et espaces verts urbains.

La transformation des sols sous l'effet des activités humaines pose deux questions principales : celle de l'anthropisation et celle de l'artificialisation. Dans les territoires urbains où la surface des sols anthropisés est importante, éviter l'anthropisation renvoie à l'enjeu de la préservation des sols originels, naturels, agricoles ou forestiers, qui n'ont pas encore subi de transformation. Ainsi, les sols identifiés comme non ou peu anthropisés peuvent être considérés comme un patrimoine écologique dont il faut prendre soin et qu'il convient de maintenir en l'état, ce qui suppose d'interdire ou de limiter leur urbanisation. Concernant l'artificialisation, des programmes d'aménagement en rénovation urbaine peuvent produire une transformation positive pour accueillir de nouvelles activités humaines tout en reconstituant des sols fonctionnels de nouvelle génération, à l'aide d'outils opérationnels comme le zonage A ou N, les orientations d'aménagement et de programmation (OAP), ou le coefficient de biotope par surface ou de pleine terre dans les PLU(i). Au sens du ZAN, une opération ne compte toutefois comme renaturation que si elle fait passer la surface d'un statut artificialisé à un statut non artificialisé selon la nomenclature du décret (article R. 101-1 du Code de l'urbanisme), et non sur la seule base d'une amélioration qualitative des fonctions du sol.

1.3.2 Mesurer le degré d'anthropisation du sol dans un contexte urbain

⚠ Cette section ne porte que sur l'évaluation de l'anthropisation des sols par modification directe liée à l'urbanisation (apports de matériaux, terrassements, constructions, dépôts, extractions). L'anthropisation des sols agricoles liée à des modifications indirectes (pratiques agricoles, amendements, drainage, irrigation) n'est pas traitée ici spécifiquement.

L'anthropisation regroupe l'ensemble des processus dus à l'humain qui sont à l'origine des ANTHROPOSOLS (Baize et Girard 2008) et des sols anthropisés. Cette anthropisation entraîne une nouvelle organisation du sol avec des conséquences directes sur la capacité du sol à assurer ses fonctions. Elle peut être partielle ou totale, et son degré s'évalue selon la profondeur affectée et le nombre d'horizons perturbés (Figure 21).

De nombreux qualificatifs peuvent être utilisés pour décrire l'anthropisation d'un sol : ¹⁷décapé, nivelé, tronqué, compacté ou remblayé (qualificatifs repris dans la suite de cette section).

Les processus de transformation et de modification des sols dans un contexte urbain se caractérisent par des opérations d'excavation et de remblaiement, nivellement, compactage par les engins, transport de terre sur petites distances, apport de matériaux, etc. Cela rend donc parfois difficile l'interprétation sur le terrain de l'anthropisation d'un sol. En ville et dans sa périphérie impactée par l'urbanisation, le pédologue rencontre lors de ses observations des situations beaucoup plus variables que dans les sols naturels, agricoles ou forestiers (Ducommun et al. 2023).

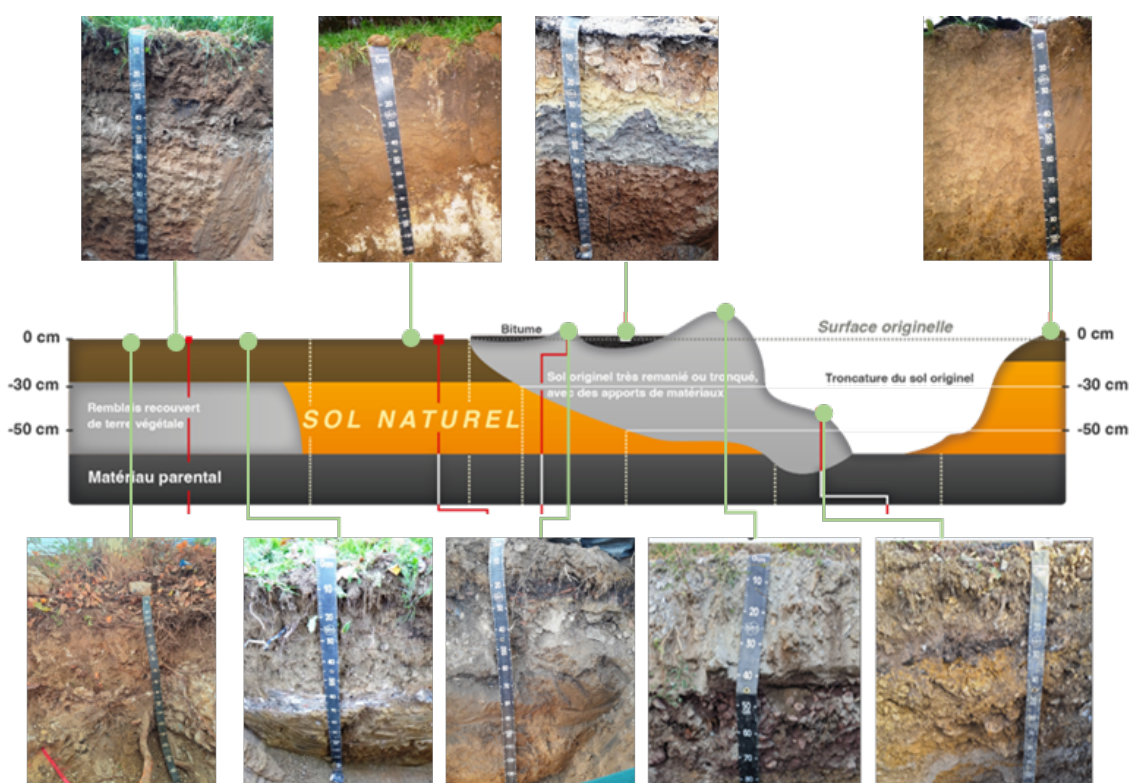


Figure 21. Schéma illustrant différentes formes d'anthropisation d'un sol en milieu urbain et périurbain (modifié d'après Ducommun et al. 2023).

¹⁷ Le terme rudérique désigne ce qui est lié aux milieux fortement perturbés par l'activité humaine, en particulier les zones où les sols ont été remaniés, enrichis ou dégradés par des apports anthropiques.

Les sols anthropisés sont très hétérogènes et reflètent une large gamme de réalités pédologiques, allant des sols pseudo-naturels dans des zones urbanisées aux sols plus ou moins tronqués et/ou enrichis en matériaux d'origine anthropique, jusqu'à des sols scellés ou bâtis, qualifiés de sols imperméabilisés (Encadré 6).

Encadré 6. Évaluation du degré d'anthropisation des sols

L'AMI-ZAN de la Ville de Ris-Orangis (ADEME – 2025) et le projet Tram'Biosol (DGALN PUCA – 2024) ont permis à Sol Paysage de proposer une **méthodologie d'évaluation du degré d'anthropisation des sols (méthode détaillée en ANNEXE 2)**.

Cette méthodologie d'évaluation du degré d'anthropisation s'appuie sur trois étapes :

- (1) Identification de la profondeur de sol modifiée par l'Homme ;
- (2) Détermination de la note « matériaux » ;
- (3) Croisement de la profondeur modifiée et de la note « matériaux ».

À titre d'exemple, l'évaluation du degré d'anthropisation a été réalisée pour les profils de sol P01, P02, P03, P04 et P05 (Figure 22).

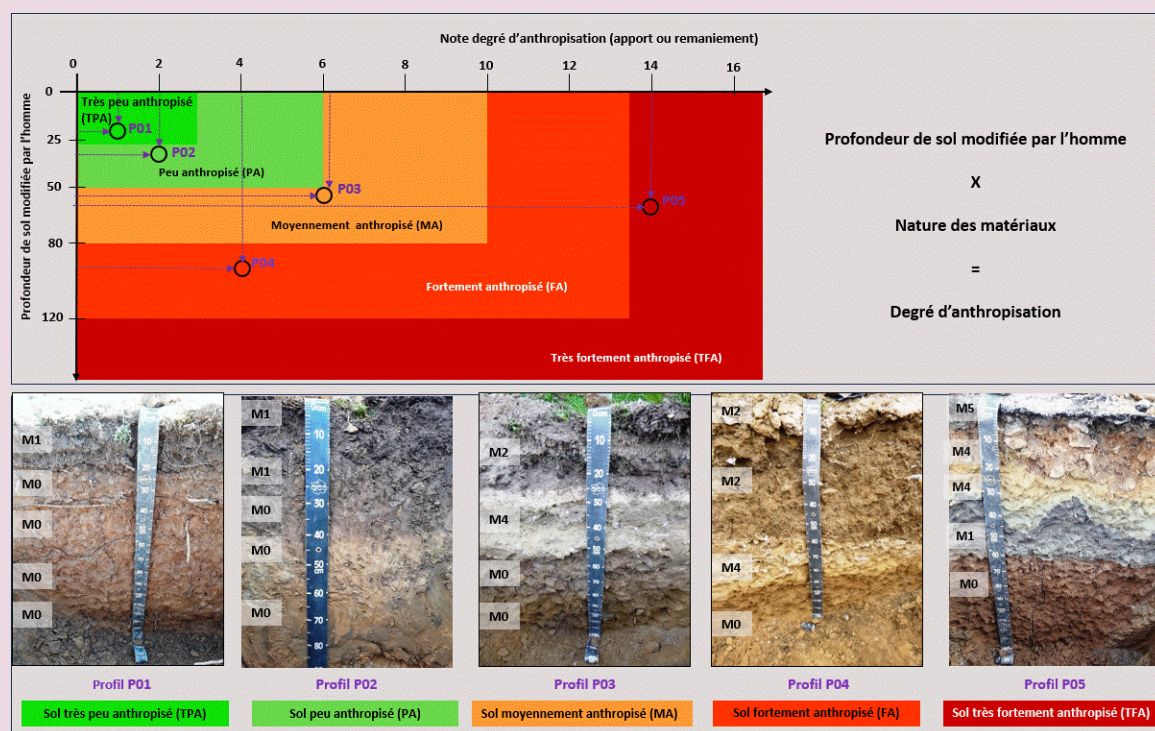


Figure 22. Grille d'évaluation du degré d'anthropisation d'un sol (Sol Paysage 2025). L'axe des x correspond à la note « matériaux ». En fonction de l'épaisseur totale des horizons remaniés, on déduit un niveau d'anthropisation de Très Peu Anthropisé (TPA) à Très Fortement Anthropisé (TFA).

1.4 La cartographie du sol

1.4.1 Cartographie du sol en milieu hors contexte urbain

Les données collectées à l'échelle d'une observation à la tarière ou d'une fosse pédologique peuvent être agrégées et analysées pour produire des représentations spatiales. Ces représentations ne peuvent être construites indépendamment de leur finalité. **La définition préalable de l'objectif de l'étude est une étape déterminante, car elle conditionne à la fois l'échelle de restitution cartographique et les jeux de données mobilisés. Une cartographie destinée à éclairer des choix stratégiques à petite échelle ne repose pas sur les mêmes niveaux de précision qu'une cartographie visant à accompagner un projet local ou opérationnel.**

En France, la connaissance pédologique s'appuie sur un dispositif national structurant : **le programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), qui représente la connaissance des sols à différentes échelles, associé à la base de données publique DoneSol**. Piloté par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol), ce dispositif vise à centraliser, harmoniser et pérenniser les données relatives aux sols sur l'ensemble du territoire.

Un des volets du programme IGCS est le Référentiel Régional Pédologique (RRP) qui repose sur une couche cartographique produite à l'échelle du 1/250 000 associée à une base de données descriptive et analytique. L'ensemble du territoire national métropolitain est couvert à cette échelle, excepté les grands centres urbains (Figure 23).

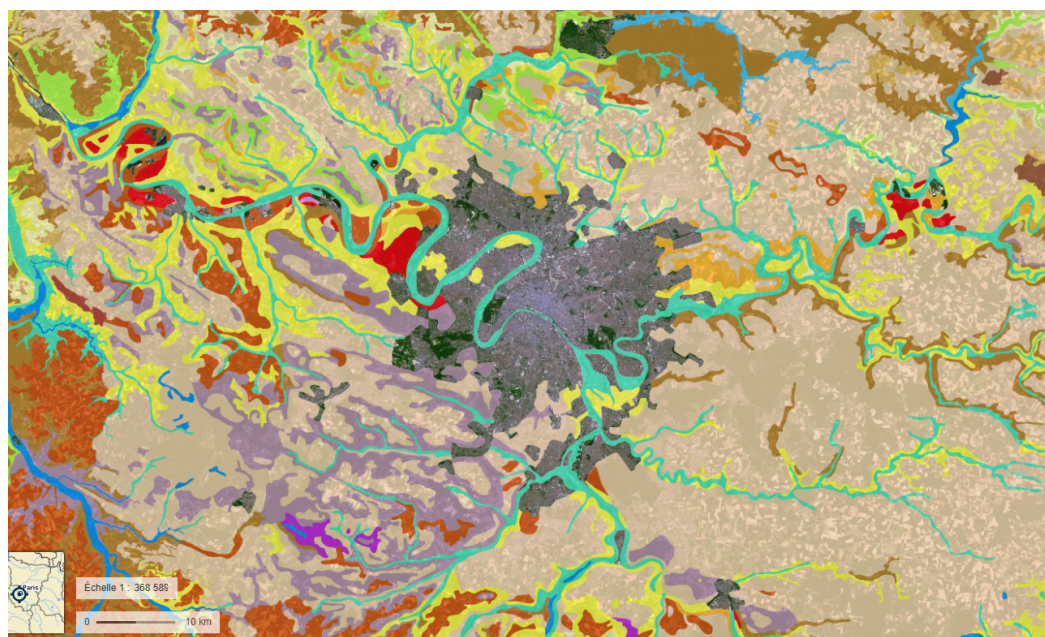


Figure 23. Illustration de la cartographie des sols en Île-de-France au 1/250 000 – INRAE 2000. Dans la partie centrale de l'agglomération tout autour de Paris, aucune donnée pédologique du RRP n'est disponible pour rendre compte de l'anthropisation des sols (source : Géoportail).

La carte pédologique régionale au 1/250 000 permet de caractériser les grands ensembles pédologiques et d'élaborer des cartes à portée régionale ou départementale. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse des tendances générales et à l'appui aux politiques publiques à large emprise, mais elle ne se prête pas à des usages nécessitant une lecture fine des sols. Dans le cadre des autres volets du programme IGCS, des études pédologiques sont disponibles à d'autres échelles comme le 1/100 000 et le 1/50 000, voire localement à de plus grandes échelles, en lien avec des contextes d'études spécifiques, et grâce à

des acquisitions de données complémentaires. Elles sont répertoriées dans REFERSOLS, le répertoire national des études cartographiques de sol.

Les sols sont représentés sous la forme d'**Unités Cartographiques de Sol (UCS)**¹⁸. Chaque UCS correspond à une partie d'un pédo-paysage. Ce dernier résulte de la combinaison de plusieurs facteurs, pédologiques, géologiques, topographiques, climatiques, biologiques et liés aux usages, qui structurent la distribution des sols à l'échelle du paysage (Figure 24). À petites échelles, chaque UCS regroupe une ou plusieurs **Unités Typologiques de Sol (UTS)**, lesquelles décrivent les caractéristiques précises des sols à partir des observations de terrain et des analyses de laboratoire. Les UTS sont directement issues des descriptions de profils et de sondages à la tarière menés sur le terrain par le pédologue. Ces observations ponctuelles sont précisément localisées. Pour délimiter une UCS à partir de plusieurs observations pédologiques regroupées en UTS, un processus d'extrapolation cartographique « du point à une portion de territoire » est nécessaire. Ainsi, la présence des UTS au sein d'une UCS est exprimée en pourcentage de surface dans la base de données : une UCS simple ne contient qu'une seule UTS (100 % de sa surface), tandis qu'une UCS complexe en regroupe plusieurs, chacune occupant une part de sa surface. Ce dispositif permet ainsi de passer d'observations ponctuelles à une représentation spatiale cohérente des sols, mobilisable pour des analyses territoriales et des évaluations fonctionnelles à petite échelle (du 1/250 000 au 1/100 000) comme à grande échelle (du 1/50 000 au 1/10 000). À grande échelle, cette représentation s'appuie sur les études pédologiques locales du programme IGCS (au 1/100 000, au 1/50 000, voire plus fin), disponibles uniquement là où elles ont été réalisées et répertoriées dans REFERSOLS.

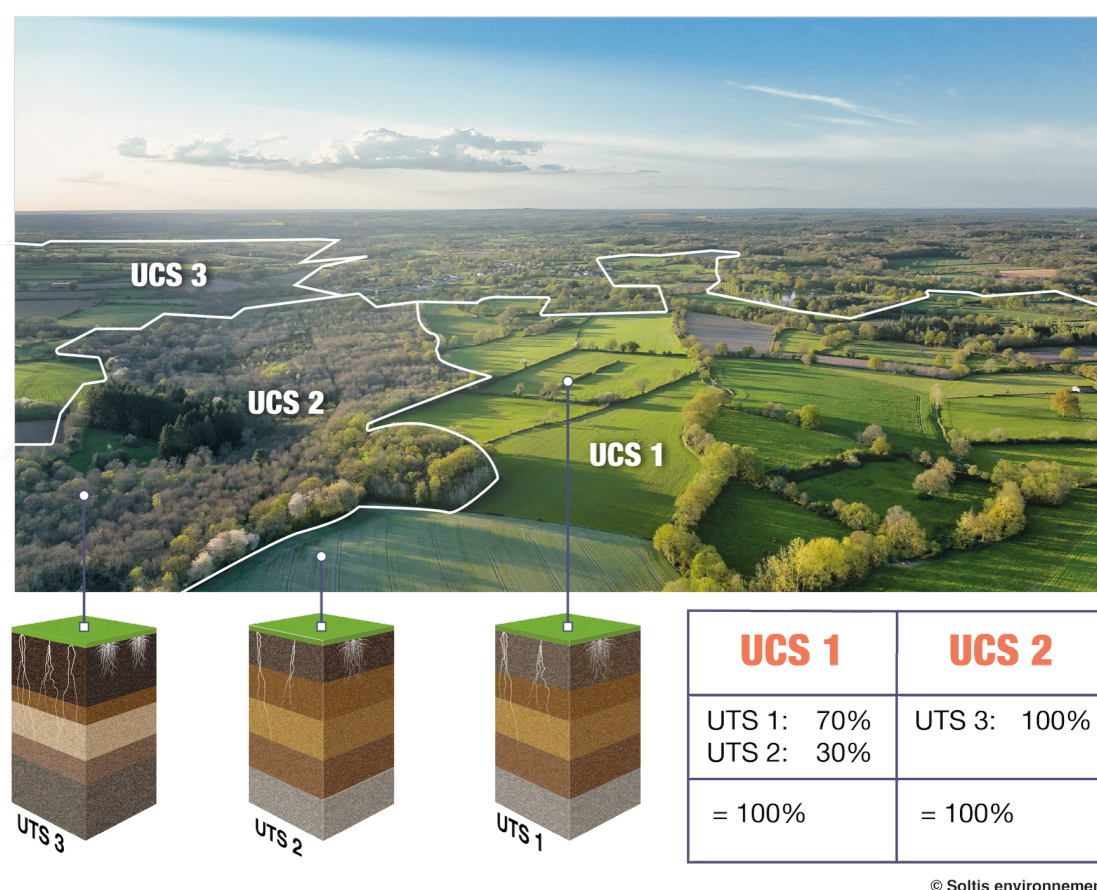


Figure 24. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS).

Chaque Unité Cartographique de Sol (UCS) est composée d'une ou plusieurs Unités Typologiques de Sol (UTS), à chacune desquelles est attribué un pourcentage reflétant sa proportion dans l'ensemble de l'UCS.

¹⁸ <https://www.geoportail.gouv.fr>

La somme des pourcentages attribués aux différentes UTS d'une UCS est égale à 100 % (une UCS simple, qui ne contient qu'une seule UTS, en représente donc la totalité). Ces pourcentages ne renseignent toutefois pas sur la position des UTS à l'intérieur de l'UCS : les UTS ne sont pas délimitées géographiquement, si bien que la carte ne permet pas de savoir, à elle seule, quelle UTS se trouve sur une parcelle donnée. Les données qualitatives et quantitatives sont issues de la base de données DoneSol. Elles sont associées dans leur majorité aux UTS. La représentation cartographique est issue du Référentiel Régional Pédologique (RRP).

Si l'agrégation des données à l'échelle des UCS constitue un outil robuste pour la cartographie pédologique à petite échelle, elle atteint rapidement ses limites dès lors que l'on cherche à travailler à des échelles plus grandes, entre 1/25 000 et 1/10 000. À ces niveaux, la variabilité spatiale des sols, les effets du relief, des remaniements anthropiques ou des dynamiques hydriques locales ne peuvent plus être correctement appréhendés à partir du seul RRP au 1/250 000. C'est pourquoi les données cartographiques au 1/250 000 ne peuvent pas être directement extrapolées à ces échelles (excepté par le biais de modèles géostatistiques associés à une incertitude).

À titre indicatif, l'échelle de carte des sols mobilisable dépend du document de planification visé :

- > l'échelle 1/250 000 convient à l'échelle régionale (SRADDET) ;
- > les échelles intermédiaires, du 1/100 000 au 1/50 000, conviennent aux exercices intercommunaux comme le SCoT ;
- > les échelles plus fines, du 1/25 000 au 1/5 000, conviennent aux PLU(i), aux OAP et aux projets d'aménagement, sous réserve de la disponibilité d'études IGCS locales à ces échelles (voir REFERSOLS).

Le passage d'une cartographie régionale à une cartographie à grande échelle implique alors le recours à des approches complémentaires, combinant plusieurs sources d'information et niveaux d'analyse (Ducommun et al. 2023). Parmi ces approches complémentaires figure la descente d'échelle des cartes pédologiques : à partir du Référentiel Régional Pédologique et de variables décrivant le milieu (relief, géologie, occupation du sol), des modèles statistiques estiment les propriétés du sol à une résolution plus fine que celle du référentiel d'origine (Vincent et al. 2018). Il s'agit du principe de la cartographie par modélisation statistique – CSMS¹⁹. Ces estimations sont assorties d'une incertitude et nécessitent une validation de terrain, mais elles permettent d'affiner un diagnostic à l'échelle intercommunale et de cibler les secteurs où des investigations sont nécessaires. La descente d'échelle est surtout conditionnée à un retour sur le terrain avec une densité adaptée à l'échelle recherchée (voir norme française NF X31-560 publiée en septembre 2007 qui fixe les règles d'acquisition et de gestion informatique des données pédologiques pour la cartographie des sols à toutes les échelles²⁰).

1.4.2 Cartographie du sol en milieu urbain : les spécificités

En ville, les sols portent la marque de l'histoire de la construction. Chaque phase d'urbanisation a creusé, déplacé, stocké ou étalé des terres : les centres anciens reposent souvent sur les remblais des constructions antérieures, et les extensions urbaines des XIX^e et XX^e siècles ont remanié les sols à des degrés très variables selon les quartiers. Le territoire urbain se répartit ainsi entre trois types d'espaces aux sols très différents : (1) le bâti, dont les fondations ont nécessité une excavation profonde du terrain ; (2) la voirie, où des couches compactées et un revêtement recouvrent le matériau d'origine décapé ou remblayé ; et (3) les espaces végétalisés (parcs, jardins publics et privés, terrains de sport, etc.), qui correspondent le plus souvent aux espaces dits « de pleine terre ». Cette notion, mobilisée par le coefficient de pleine terre dans de nombreux PLU(i), désigne d'abord une absence de construction, y

¹⁹ <https://cartograph-e.hub.inrae.fr/les-bases-de-la-csms/qu-est-ce-que-la-csms/le-principe>

²⁰ À l'échelle du 1/10 000, la densité d'observation est de l'ordre d'un sondage pour 0,5 à 3 hectares et d'un profil pour 10 à 50 hectares. Au 1/25 000, elle s'établit à un sondage pour 5 à 20 hectares et un profil pour 50 à 200 hectares. Ces valeurs sont indicatives : la densité de sondage dépend de la complexité du terrain, et plus les variations de sols sont rapprochées, plus elle doit augmenter (Legros 1996).

compris en sous-sol, et non une capacité biologique. Or certains végétaux peuvent aussi se développer hors de ces espaces, par exemple dans des sols reconstitués en Mélange Terre Pierres sous des trottoirs imperméabilisés (voir plus haut).



À savoir

C'est principalement sur les espaces végétalisés de pleine terre que la cartographie des sols en milieu urbain est réalisée (échelles du 1/50 000 au 1/10 000).

La démarche de cartographie des sols suit les mêmes grandes étapes qu'en milieu rural, mais avec des adaptations propres au contexte urbain. Le découpage préalable du territoire ne repose plus sur des unités pédo-paysagères (UPP) mais sur des **Unités Cartographiques Urbaines (UCU)**, concept développé dans le cadre du projet SOL ZAN cofinancé par le programme IGCS (Sol Paysage 2025). Les UCU sont obtenues en croisant l'analyse du tissu urbain (formes urbaines, succession des usages, dates de première et de dernière urbanisation) avec les données topographiques et géologiques disponibles. Elles distinguent par exemple les quartiers pavillonnaires, l'habitat collectif, les zones d'activités ou les parcs. Cette lecture urbaine et historique du territoire mobilise des compétences d'urbanisme : elle peut être conduite par les services de la collectivité, par un bureau d'études (par exemple dans le cadre d'un SCoT ou d'un PLU(i)) ou intégrée à la mission du pédologue. Cette analyse mobilise notamment les fichiers fonciers (Cerema, à partir des données de la DGFIP), les photographies aériennes historiques (service « Remonter le temps » de l'IGN), la BD TOPO® de l'IGN et les cartes géologiques disponibles. Elle aboutit à un zonage du territoire en UCU, livrable cartographique préalable à la campagne de terrain.

La campagne de terrain combine, comme ailleurs, sondages à la tarière et fosses pédologiques, mais elle est contrainte par l'accès aux parcelles, publiques comme privées, et par la procédure réglementaire de déclaration de projet de travaux (DT) et de déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT), qui impose d'interroger au préalable le guichet unique des réseaux avant tout sondage à proximité de réseaux enterrés (eau, gaz, électricité, télécommunications), ainsi que par les autorisations d'accès à obtenir auprès des propriétaires ou gestionnaires des parcelles privées. Les observations se concentrent sur les espaces végétalisés et ne peuvent donc pas être réparties de façon régulière dans l'espace, ce qui rend la lecture d'ensemble plus délicate qu'en milieu rural.

La synthèse des observations permet ensuite d'identifier les Unités Typologiques de Sol (UTS) et de les regrouper en Unités Cartographiques de Sol (UCS). Chaque UCU définie en amont regroupe une ou plusieurs UCS (Figure 25). En milieu urbain, du fait de la forte hétérogénéité des sols, ce sont les UCS complexes, composées de plusieurs UTS, qui dominent.

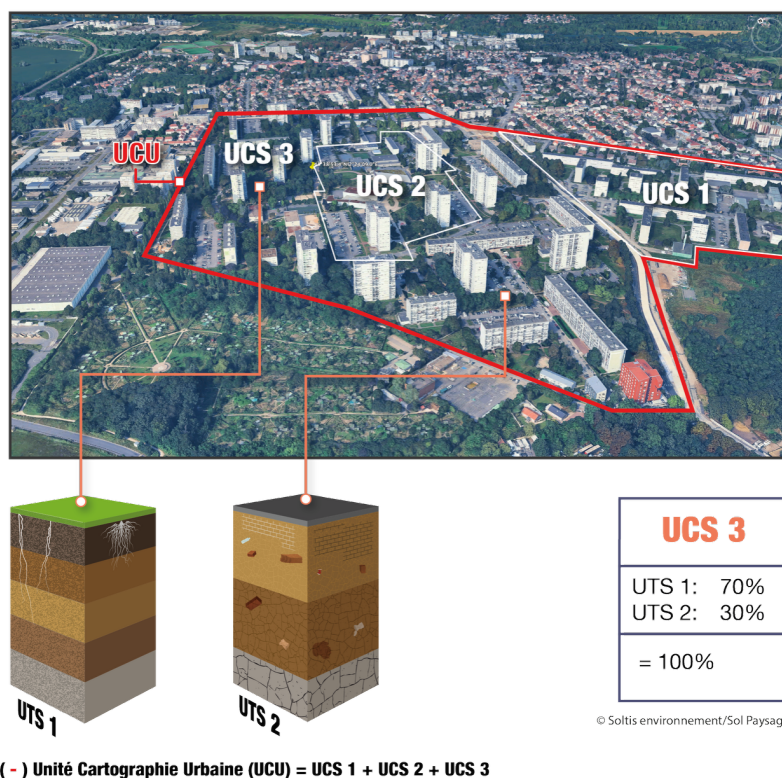


Figure 25. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS) en milieu urbain.

Le résultat prend la forme d'une carte des sols accompagnée de sa légende et d'une notice explicative. À partir de cette carte peuvent être produites la carte du degré d'anthropisation des sols (ANNEXE 2) et les cartes de fonctions (chapitre 2.3), directement exploitables par les collectivités et les aménageurs dans leurs systèmes d'information géographique. L'ensemble des données de terrain a vocation à être versé dans une base de données pérenne, DoneSol ou BDSolU (Encadré 7).

Encadré 7. De l'importance de capitaliser les données pédologiques

La capitalisation des données à l'échelle locale : une étape clé dans la construction de la connaissance des sols au service des stratégies territoriales

La capitalisation des données constitue une étape essentielle dans la construction de la connaissance des sols à l'échelle territoriale. Les informations recueillies lors des investigations de terrain doivent être **collectées, structurées et analysées** afin d'être intégrées dans un **système d'information géographique (SIG)** dédié aux sols.

En pratique, les données mobilisées sont de nature très hétérogène. Elles proviennent notamment :

- > Des études pédologiques disponibles ;
- > Des études géotechniques (rapports PDF, fichiers SHP, fichiers DWG, logs de forages) ;
- > Des bases de données nationales ou institutionnelles (Géoportail, référentiels géologiques) ;
- > Des bases de données locales (fichiers Excel, CSV ou DBF, base PostgreSQL) ;
- > Des données raster (cartes géologiques, modèles numériques de terrain) ;
- > Et des relevés de terrain issus des diagnostics pédologiques (tableurs de données).

La centralisation de ces informations au sein d'une **base de données locale structurée** permet de rendre le sol pleinement mobilisable dans les démarches territoriales, et d'en assurer la représentation cartographique à différentes échelles en fonction des objectifs poursuivis.

La mise en place d'un SIG local nécessite au préalable une analyse des besoins de restitution de l'information (Figure 26). Cette étape vise à définir les modalités de représentation et d'exploitation des données relatives aux sols en mobilisant différents formats de données :

Données de type « vecteur »

- > Des **points** pour les sondages, forages ou essais ponctuels ;
- > Des **polygones** pour les zones de sols homogènes ou les unités cartographiques ;
- > Des **lignes** pour les données liées aux réseaux par exemple.

Données de type « raster »

- > Des **images** pour représenter des propriétés continues ou modélisées (perméabilité, aléas, risques) ;
- > Des **photos** relatives aux relevés de terrain.

Chaque donnée géoréférencée intégrée au SIG doit être associée à des **attributs clairement définis, normalisés et documentés (métadonnées)**. Ces attributs peuvent porter par exemple sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols, leur profondeur, leur portance, leur niveau de contamination ou leurs contraintes d'usage.

Cette structuration constitue une condition déterminante pour garantir la fiabilité et la qualité des analyses ultérieures, assurer la comparabilité des résultats et la pérennité des données dans le temps.

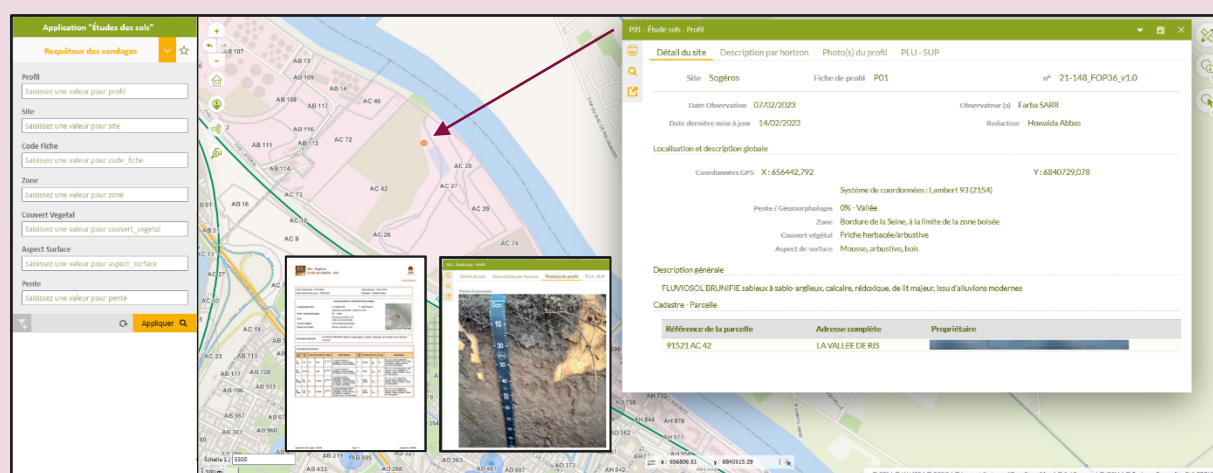


Figure 26. Exemple de SIG mis en place par la communauté d'agglomération Grand Paris Sud Seine-Essonne-Sénart (source : SCOT Grand Paris Sud Seine-Essonne-Sénart).

Dans le portail cartographique web de l'intercommunalité, l'équipe SIG de Grand Paris Sud a développé un outil permettant d'automatiser la remontée des données dans une fiche d'information associée à chaque sondage. Ce dispositif facilite la centralisation des données métiers spécifiques tout en permettant leur croisement avec des données déjà présentes dans le SIG de la collectivité.

Ces données complémentaires peuvent être locales ou issues de sources nationales accessibles via des API ou des flux de données WFS/WMS. Il peut s'agir, par exemple, des données cadastrales, du plan local d'urbanisme (PLU), du Mode d'Occupation des Sols (MOS), de l'Occupation du Sol à Grande Échelle (OCS GE), des données gérées par le BRGM via le portail InfoTerre ou encore des informations diffusées via le portail Géorisques (notamment les aléas de retrait-gonflement des argiles).

Cette interopérabilité renforce la capacité d'analyse, favorise une lecture croisée des enjeux et consolide l'aide à la décision dans les démarches territoriales.

Capitalisation des données à l'échelle nationale : une étape importante pour le partage de la connaissance sur les sols

Les données publiquement disponibles pour la France sont principalement stockées dans le Système d'information national sur les sols coordonné par le GIS Sol. Ces données ou les produits qui sont issus de leur traitement sont diffusés sur les différents canaux : infrastructures INRAE ou Géoplateforme. Plusieurs programmes et bases de données alimentent ce système : le programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), la Base de données des analyses de terre (BDAT), la Base de données des éléments traces métalliques (BDETM) et la base de données BDSolU (gérée par le BRGM) dédiée aux sols urbains.

L'inscription, dans les cahiers des charges des appels d'offres, de l'obligation de verser les données acquises dans les bases nationales **DoneSol** ou **BDSolU** permet de favoriser leur réutilisation et de limiter la nécessité de re-caractériser des secteurs déjà documentés.

De nombreux acteurs, au-delà du **GIS Sol**, acquièrent et détiennent des données relatives aux sols dans le cadre de projets d'aménagement, d'études environnementales ou de diagnostics spécifiques. La **capitalisation et le partage de ces données** constituent un enjeu majeur pour améliorer la connaissance des sols à l'échelle nationale et éviter la multiplication d'acquisitions redondantes (voir REFERSOLS).

Cette démarche de mutualisation s'inscrit notamment dans la perspective du développement d'un **portail national des données sur les sols**, destiné à centraliser et rendre accessibles les informations produites par la diversité des acteurs. Les acteurs publics disposent, dans ce contexte, d'un levier structurant à travers la commande publique : l'inscription, dans les cahiers des charges des appels d'offres, de l'obligation de verser les données acquises dans les bases nationales DoneSol ou BDSolU permet de favoriser leur réutilisation et de limiter la re-caractérisation de secteurs déjà documentés. Une clause type de CCTP peut, par exemple, prévoir que « le titulaire s'engage à verser les données pédologiques acquises dans le cadre du marché dans la base nationale DoneSol, ou BDSolU pour les sols urbains, selon les modalités en vigueur auprès du GIS Sol, dans un délai de six mois après la remise du rapport final ».

L'ensemble de ces dispositifs contribue à renforcer la **traçabilité, la pérennité et la valorisation des données sur les sols**, et constitue un socle indispensable pour appuyer les stratégies territoriales, les politiques publiques et les démarches de planification.

Sources : Base de données nationale DoneSol (<https://dw4.gissol.fr/>), BDSolU <https://www.bdsolu.fr/> (<https://www.bdsolu.fr/>).

CHAPITRE 2.

POURQUOI ET COMMENT EVALUER LES FONCTIONS DU SOL ?

UNE DEMARCHE EN 4 ETAPES

Le chapitre précédent a montré pourquoi le sol doit être pris en compte dans les politiques de planification et d'aménagement. Reste à savoir comment : quelles fonctions évaluer, à quelle échelle, avec quelles données et pour aboutir à quel résultat ?

La méthode « 4 fonctions » répond à ces questions par une démarche en quatre étapes successives, applicable quels que soient le territoire et l'échelle de travail (Figure 27).

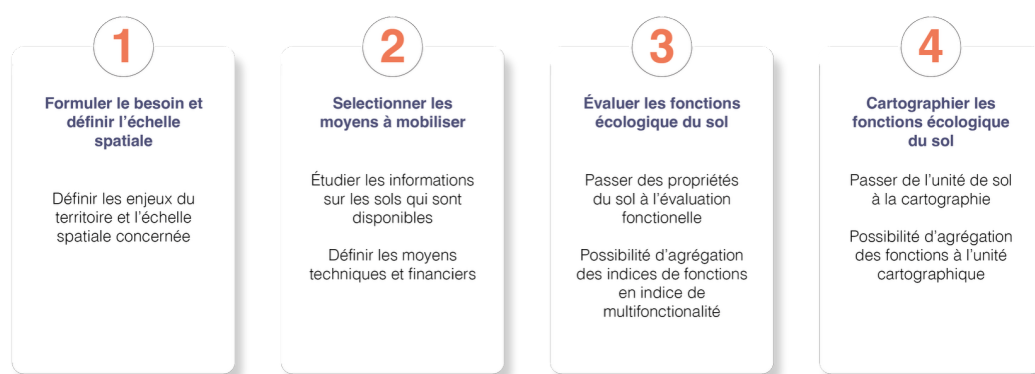


Figure 27. Présentation de la démarche « 4 fonctions » en 4 étapes.

La première étape consiste à formuler la question posée par la collectivité ou l'aménageur et à en déduire l'échelle spatiale pertinente, de l'échelle régionale au projet d'aménagement. Ce travail conduit à choisir la ou les fonctions écologiques à évaluer parmi les quatre retenues par ce guide, en cohérence avec l'enjeu identifié. **La seconde étape** précise les moyens à mobiliser : données existantes ou à acquérir, contraintes de délais de réalisation, compétences professionnelles à mobiliser et, enfin, les moyens financiers alloués à l'étude des sols. **La troisième** constitue le cœur de la méthode : elle traduit les propriétés mesurables du sol en indicateurs notés de 1 à 5, puis en indices de sous-fonctions et de fonctions et, le cas échéant, en indices multifonctionnels tels que le potentiel agronomique ou le potentiel de régulation climatique. **La dernière étape**, enfin, restitue ces résultats sous forme cartographique, afin que les décideurs puissent se les approprier et les intégrer aux documents de planification ou à la conception des projets d'aménagement.

Ces étapes ne sont pas indépendantes : le besoin exprimé à l'étape 1 conditionne le choix des fonctions, l'échelle détermine les données mobilisables, et la qualité de ces données fixe le niveau de confiance des cartes produites. **La démarche est donc itérative, et il est fréquent de revenir sur une étape antérieure lorsque les moyens disponibles ne permettent pas de répondre à la question initiale avec la précision attendue.**

Le chapitre 3 détaille, pour chaque échelle, les données et les méthodes permettant de mettre en œuvre cette démarche.

2.1 ÉTAPE 1 : Formuler le besoin, définir l'échelle spatiale et les fonctions prioritaires

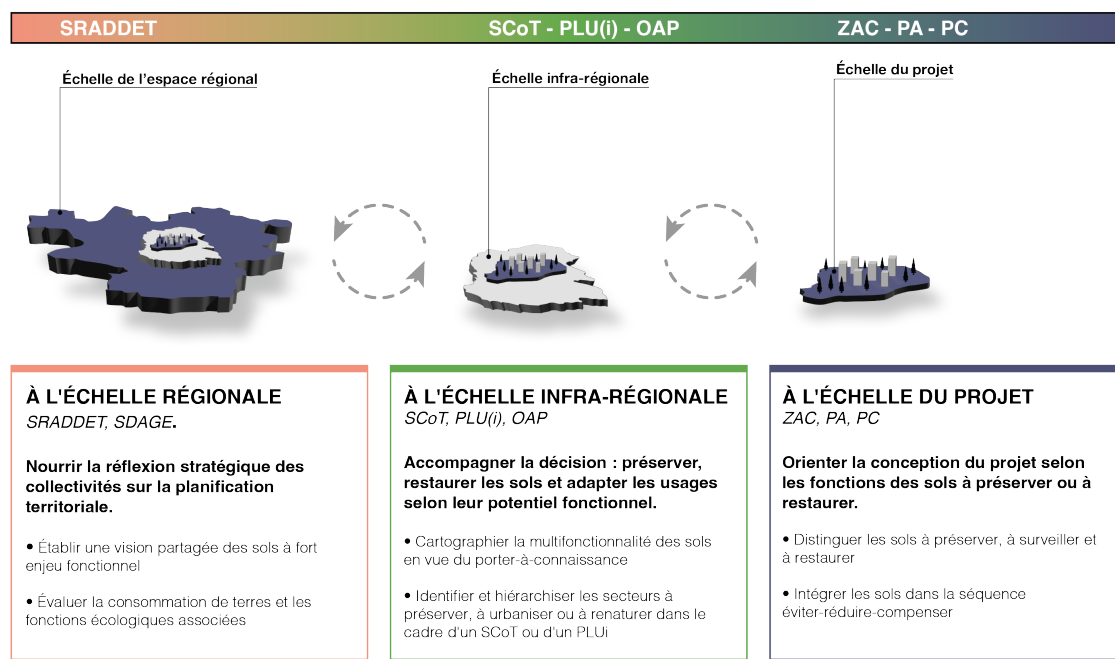


Cette section vise à aider les utilisateurs à préciser leurs besoins en matière de connaissance des sols, identifier l'échelle pertinente d'analyse, et sélectionner l'approche la plus adaptée pour intégrer les sols dans les démarches d'aménagement.

L'intégration des fonctions du sol dans les stratégies territoriales répond à des enjeux variés, qui diffèrent selon le contexte et l'échelle de décision. Trois échelles principales ont été identifiées pour l'application de la méthode « 4 fonctions » :

- > L'échelle régionale ;
- > L'échelle infra-régionale ;
- > L'échelle projet.

Comme l'illustre la Figure 28, ces trois échelles sont complémentaires et interdépendantes. Les données disponibles à l'échelle régionale permettent d'établir une vision d'ensemble et d'orienter les politiques publiques. Les analyses conduites à des échelles plus fines (infra-régionale ou projet) permettent d'affiner les diagnostics, de caractériser les sols de manière plus précise et d'appuyer les décisions opérationnelles.



© Soltis environnement

Figure 28. Représentation des trois niveaux d'échelle spatiale et de l'intérêt d'intégrer les sols dans les stratégies de planification et d'aménagement en fonction de ces échelles²¹.

²¹ SDAGE – Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, SRADDET – Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires, SCoT – Schéma de Cohérence Territoriale, PLU(i) – Plan Local d'Urbanisme Intercommunal, PLU – Plan Local d'Urbanisme, ZAC – Zone d'Aménagement Concerté, OAP – Orientation d'Aménagement et de Programmation, PA – Permis d'Aménager, PC – Permis de Construire.

Avant d'appliquer la méthode « 4 fonctions », la collectivité ou l'aménageur identifie les questions auxquelles doit répondre l'étude sur les sols.

Par exemple, cette étude vise-t-elle à :

- > Inscrire le sol dans la stratégie territoriale, au même titre que l'eau et la biodiversité ?
- > Identifier des secteurs à enjeux écologiques et notamment les zones préférentielles de renaturation ?
- > Reconsidérer le zonage des zones d'urbanisation future ?
- > Adapter le projet d'aménagement à la qualité fonctionnelle des sols en place ?

À partir de l'objectif du projet porté par le territoire et selon sa superficie, la collectivité ou l'aménageur choisit l'échelle spatiale de l'étude ainsi que la ou les fonctions à évaluer en priorité.

Le tableau 3 ci-dessous oriente selon le besoin les fonctions, sous-fonctions ou encore indices de multifonctionnalité à évaluer en priorité. Ces propositions ne sont pas exhaustives et doivent être affinées selon le contexte de chaque territoire.

Tableau 3. Objectifs de l'intégration des sols dans les stratégies d'aménagement selon l'échelle de travail et sélection des fonctions, sous-fonctions et indices de multifonctionnalité à cibler.

Échelle		Exemples	Fonction, sous-fonction et/ou indices de multifonctionnalité à cibler en priorité
Espace régional		Vision partagée des sols à fort enjeu multifonctionnel	Ensemble des 4 fonctions
		Argumentaire pour inscrire les fonctions des sols dans les politiques publiques	Ensemble des 4 fonctions
		Évaluation de la consommation des terres et de la perte des fonctions associées à l'échelle régionale	Ensemble des 4 fonctions
		Appui au dialogue entre acteurs (élus, services, agriculture, environnement)	Ensemble des 4 fonctions
		Ciblage des sols à fort potentiel de stockage de carbone (volet climat du SRADDET, démarche 4 pour 1000)	Potentiel de régulation climatique (atténuation) (voir étape 3)
		Schéma régional des carrières Éviter les sols à fort potentiel agronomique	Ensemble des sous-fonctions permettant l'évaluation du potentiel agronomique (voir étape 3)
Échelle infra-régionale		Cartographie des fonctions et de la multifonctionnalité des sols à l'échelle intercommunale ou à l'échelle du SCoT. Favoriser les échanges et la prise de conscience de l'importance des sols	Ensemble des 4 fonctions
		Zonage des sols à enjeux fonctionnels spécifiques (agronomie, biodiversité, hydrologie, carbone) Identification des parcelles à préserver en zone agricole dans le cadre d'un PLUi	Ensemble des 4 fonctions ou fonction prise individuellement en fonction de l'enjeu visé
		Hierarchisation des secteurs à préserver, à restaurer ou à réhabiliter	Ensemble des 4 fonctions ou fonction prise individuellement en fonction de l'enjeu visé

Échelle	Exemples	Fonction, sous-fonction et/ou indices de multifonctionnalité à cibler en priorité
	Identification des secteurs à forte naturalité à préserver	
	Éléments d'aide à la définition des objectifs de réduction de l'artificialisation dans les SCoT, PLUi, ou PLU Intégration des sols à forte valeur multifonctionnelle dans la trajectoire de réduction de l'artificialisation	Ensemble des 4 fonctions
	Contribution à la territorialisation de la Trame verte et bleue (TVB) Appui à la localisation des cœurs de biodiversité et/ou des corridors écologiques dans le cadre d'une Trame verte et bleue	Fonctions biologique et hydrique en priorité
	Trame brune Continuités écologiques du sol	Fonctions biologique, hydrique et nutritive
	Appui à la définition de stratégies de compensation écologique ou de renaturation Détermination de zones à réhabiliter en lien avec des friches dont les sols présentent aujourd'hui des indices de fonction faibles	Fonctions biologique et hydrique en priorité
	Ciblage des zones pertinentes pour le développement des énergies renouvelables (EnR) Par exemple, identifier les zones à faible potentiel agricole pour l'implantation de panneaux photovoltaïques	Ensemble des sous-fonctions permettant l'évaluation du potentiel agricole (voir étape 3)
	Contribution à l'élaboration d'OAP²² thématiques Intégration des sols avec fort potentiel de rafraîchissement (infiltration + couverture végétale) ou des zones d'intérêt telles que les zones humides.	Sous-fonctions du potentiel de régulation climatique au sens de l'adaptation (voir étape 3), complétées par la sous-fonction infiltration de l'eau pour la gestion des pluies intenses
	Contribution à l'élaboration d'OAP sectorielles Définition des zones prioritaires (sols à préserver ou sous contraintes, zones d'intérêt telles que les zones humides)	Fonctions biologique et hydrique en priorité
	Zonage des eaux pluviales Délimiter les zones où limiter l'imperméabilisation et celles où l'infiltration est possible	Sous-fonction infiltration de l'eau
Échelle du projet	Carte des fonctions du sol à l'échelle du projet Guider le plan d'aménagement et adapter les usages aux fonctions écologiques des sols en place (optimisation des coûts, alimentation des études d'ingénierie)	Ensemble des 4 fonctions à affiner en fonction des enjeux du projet : <ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'infiltrer à la parcelle → sous-fonction infiltration de l'eau - Projet de plantations → évaluation du potentiel de régulation climatique

²² OAP : Orientation d'Aménagement et de Programmation

Échelle	Exemples	Fonction, sous-fonction et/ou indices de multifonctionnalité à cibler en priorité
		(adaptation) pour la lutte contre les îlots de chaleur
	Hiérarchisation des zones à enjeux à l'échelle de l'emprise du projet Zones à éviter (enjeux de biodiversité), zones à surveiller, zones à restaurer.	À préciser selon les enjeux
	Perte de stock de carbone du sol dans le bilan carbone du projet	Potentiel de régulation climatique (atténuation) (voir étape 4)
	Conception des espaces verts Choix des essences selon la profondeur de sol et la réserve utile	Ensemble des sous-fonctions permettant l'évaluation du potentiel de régulation climatique (adaptation) pour la lutte contre les îlots de chaleur (voir étape 3)
	Scénarios de réutilisation des terres excavées en économie circulaire Réemploi de matériaux pédologiques amendés avec du compost vert comme horizon de croissance pour créer un îlot de fraîcheur dans le futur aménagement paysager.	Ensemble des sous-fonctions permettant l'évaluation du potentiel de régulation climatique (adaptation) (voir étape 3) pour la lutte contre les îlots de chaleur
	Appui à la réhabilitation des friches ou des sols artificialisés Reconstitution de profils fonctionnels sur un ancien parking imperméabilisé.	Ensemble des 4 fonctions

2.2 ÉTAPE 2 : Identifier les moyens à mettre en place

Chaque échelle spatiale répond à des objectifs spécifiques, et mobilise des informations différentes.

Une fois l'échelle spatiale définie, le travail de recherche des moyens à mettre en place peut commencer. Ceci dépend de plusieurs critères :

- > Les objectifs de l'étude et l'échelle spatiale retenue conditionnent le niveau de précision des données et le type d'interprétation possible (par exemple : gestion des conflits d'usage, planification territoriale (SCoT, PLUi, etc.), identification de zones à enjeux, accompagnement de projets d'aménagement ou d'activités économiques) (Tableau 4) ;
- > Les informations disponibles (bases de données existantes, données pédologiques régionales ou locales, possibilité de réaliser des investigations de terrain) ;
- > Les moyens mobilisables (notamment financiers, techniques et temporels).

On distingue 3 approches pouvant être mises en œuvre selon les informations disponibles et les échelles spatiales.

- > L'approche 1 repose principalement sur des données nationales et/ou régionales ;
- > L'approche 2 repose principalement sur des données locales ;
- > L'approche 3 repose sur l'occupation du sol.

La Figure 29 rend compte de ces 3 approches. À l'échelle régionale, l'intégration des sols peut s'appuyer sur des bases de données nationales ou régionales existantes, permettant l'application d'une approche adaptée à des analyses à large emprise spatiale (approche n° 1). À des échelles infra-régionales ou de projet, une approche basée sur des données locales peut être mobilisée lorsque des données pédologiques, agronomiques et biologiques ou des relevés de terrain sont disponibles à l'échelle requise (approche n° 2). En revanche, lorsque ces données sont absentes, une approche alternative reposant notamment sur l'occupation du sol peut être envisagée (approche n° 3).

Les approches n° 1 et n° 2 sont fondées sur des données pédologiques : ce sont les seules à pouvoir proposer une évaluation fonctionnelle fiable pour l'aide à la décision.

L'approche n° 3 reste indicative, l'interprétation de l'occupation du sol sans données pédologiques ne permettant ni évaluation fonctionnelle ni continuité avec les approches n° 1 et n° 2. Elle fournit cependant une première estimation de la capacité fonctionnelle des sols selon le couvert végétal et le taux d'imperméabilisation des tissus urbains étudiés et peut, dans certaines situations, constituer une approche initiale du potentiel de fertilité des espaces verts en ville. Cet outil propose une aide à la décision en première intention.



À savoir

Les moyens à mettre en place diffèrent selon l'approche retenue. Les trois approches se complètent et ne s'excluent pas. Elles peuvent être déployées à des moments différents suivant l'avancement des travaux de planification ou d'aménagement.

	Frise des échelles		
			
	1/250 000		1/1 000
	Planification territoriale		Aménagement opérationnel
	Échelle régionale	Échelle infra-régionale	Échelle du projet
Approche 1	X	X	—
Approche 2	—	X	X
Approche 3	—	X	—

Figure 29. Modalités d'application des approches n° 1, 2 et 3 suivant les échelles spatiales.

Cette étape 2 permet d'adapter le choix de l'approche suivant la question posée, l'échelle de décision et les moyens disponibles. Plus la décision est locale et engageante, plus la connaissance directe du sol devient nécessaire.

Tableau 4. Présentation des trois approches.

	Approche 1	Approche 2	Approche 3
Sources	Référentiel Régional Pédologique (1/250 000) et DoneSol ; occupation du sol ; ALDO ; OPVT Données modélisées ou issues de modélisations statistiques (descente d'échelle des données pédologiques régionales avec terrain complémentaire le cas échéant)	Sondages, fosses et analyses de terrain ; carte des sols à grande échelle (données détaillées localement) ; données environnementales locales	Couches Copernicus et occupation du sol
Propriétés du sol mobilisées	Propriétés pérennes ; carbone et organismes du sol estimés à partir de l'occupation du sol	Propriétés pérennes précisées et propriétés dynamiques mesurées	Aucune propriété du sol
Résultat produit	Notes des sous-fonctions et indices de synthèse, par unité cartographique de sol	Notes des sous-fonctions et indices de synthèse, par unité de sol locale ou par parcelle	Un indice global, sans distinction des fonctions
Échelle de restitution	Régionale et intercommunale ; validité cartographique au 1/250 000 en l'absence de données plus résolutes (échelle du RRP).	Du 1/25 000 au 1/5 000	Locale, notamment en milieu urbain
Acquisition de terrain	Non	Oui	Non
Durée de validité	Plusieurs décennies pour les sous-fonctions fondées sur les propriétés pérennes ; à actualiser avec l'occupation du sol pour le carbone et les organismes du sol	Longue pour les propriétés pérennes ; quelques années pour les propriétés dynamiques	Liée au millésime de l'occupation du sol
Principale limite	Ne rend pas compte des variations locales ni de l'état actuel des sols	Coût et délai d'acquisition ; emprise limitée	Repose sur l'hypothèse que le couvert végétal reflète le fonctionnement du sol

2.3 ÉTAPE 3 : Évaluer les fonctions à partir des propriétés du sol

Si le cadre de la méthode « 4 fonctions » permet de définir ce que l'on cherche à évaluer (étape 2), il reste à préciser comment traduire des éléments pédologiques mesurables et comparables en fonctions écologiques.

En pratique, une fonction du sol ne peut pas être observée directement. Elle est appréhendée à partir de propriétés mesurées, transformées en indicateurs, puis agrégées en indices de fonction et de sous-fonction mobilisables pour l'aide à la décision.

Les sections suivantes décrivent successivement ces opérations.

→ Comment mesurer une fonction ?

Toute démarche d'évaluation fonctionnelle débute par une étape fondamentale : préciser ce que l'on cherche à mesurer. Il ne s'agit pas d'évaluer le sol en général, mais une ou plusieurs fonctions précises (par exemple : infiltration de l'eau). Tout indicateur doit ainsi être explicitement relié à la fonction du sol que l'on souhaite évaluer (Cousin et al. 2025). En l'absence de cette clarification préalable, le choix des indicateurs peut devenir arbitraire, peu pertinent, voire inadapté aux objectifs poursuivis, qu'il s'agisse de la planification territoriale, de la gestion des espaces végétalisés ou de la conception d'un projet d'aménagement.

→ Clarifier le vocabulaire : de la propriété à l'indice

L'évaluation d'une fonction passe par la mesure de propriétés du sol, leur utilisation comme paramètres, leur traduction en indicateurs grâce à un référentiel d'interprétation, puis l'agrégation des indicateurs en indices.

Dans la littérature, les termes **propriétés**, **paramètres**, **indicateurs** ou **indices** sont souvent employés de manière **hétérogène**. Il est donc essentiel de bien saisir la distinction entre ces termes afin d'assurer une interprétation rigoureuse et cohérente des résultats (Tableau 5) :

Une **propriété** désigne une grandeur mesurée telle que le pH, la profondeur d'enracinement, etc. (Calvaruso et al. 2021). C'est une donnée « primaire » observée ou mesurée directement sur le terrain ou en laboratoire.

Un **paramètre** intervient dans un calcul ou un modèle (ex. : masse volumique apparente des sols utilisée pour calculer un stock de carbone). Il peut être issu directement d'une mesure de propriété ou dérivé de plusieurs propriétés.

Un **indicateur** peut être fondé sur un seul paramètre ou sur une combinaison de plusieurs paramètres adossés à un référentiel d'interprétation. Il doit être fiable, précis, standardisé et représentatif de la fonction ou de la sous-fonction évaluée.

Un **indice** correspond à une agrégation d'indicateurs pour fournir une vision synthétique.

Deux termes complémentaires doivent par ailleurs être définis :

Une **note** est la valeur prise par un indicateur ou un indice sur l'échelle de 1 à 5, 1 correspondant à l'expression la plus faible de la fonction et 5 à la plus élevée.

Le mot **potentiel** désigne, dans ce guide, un indice de synthèse qui qualifie une aptitude du sol : potentiel agronomique, potentiel de régulation climatique.

Tableau 5. Exemple pour illustrer les notions de propriété, paramètre, indicateur et indice telles qu'elles sont mobilisées dans le cadre de ce guide.

Notion	Exemple	Commentaire
Propriété du sol	Texture, masse volumique apparente, profondeur, teneur en matière organique, etc.	Caractéristique intrinsèque du sol, observée ou mesurée directement sur le terrain ou en laboratoire. Elle constitue une donnée primaire décrivant l'état physique, chimique ou biologique du sol.
Paramètre	Masse volumique apparente utilisée dans le calcul du stock de carbone	Variable utilisée dans un calcul ou un modèle.
Indicateur	Indicateur de conductivité hydraulique à saturation	Variable ordonnée définie à partir d'un référentiel d'interprétation du paramètre ou des paramètres explicitement reliés à une fonction (sous-fonction) du sol. Dans le cadre de la méthode « 4 fonctions », l'indicateur prend la forme d'une note de 1 à 5, 5 correspondant à une performance fonctionnelle maximale par rapport à la fonction visée.
Indice de fonctions ou de sous-fonctions	Indice de la sous-fonction « infiltration de l'eau »	Dans le cadre de la méthode « 4 fonctions », l'indice est la moyenne des indicateurs de la sous-fonction, c'est-à-dire leur somme équipondérée ramenée sur l'échelle de 1 à 5. Deux sous-fonctions font exception : l'« infiltration de l'eau », où un indicateur très défavorable est déclassant, et l'« enracinement de la végétation », où la note d'hydromorphie plafonne la moyenne.
Indice de synthèse	Indice de multifonctionnalité des sols	Valeur intégratrice combinant plusieurs indices de fonction (ou sous-fonction) afin de fournir une appréciation globale du fonctionnement des sols à l'échelle d'un site ou d'un territoire. Elle correspond à la somme des indices des fonctions (ou sous-fonctions) concernées, classée en cinq niveaux à l'aide de seuils fixes, sans division : le potentiel agronomique est la somme de trois sous-fonctions, de 3 à 15 ; l'indice de multifonctionnalité est la somme des six sous-fonctions, de 6 à 30. Les seuils figurent en ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

→ Distinguer les propriétés pérennes des propriétés dynamiques

Toutes les propriétés d'un sol n'évoluent pas au même rythme (Cousin *et al.*, 2025).

Les propriétés pérennes sont celles que le sol a héritées de sa formation et qui ne changent pas, ou très lentement, à l'échelle d'une vie humaine : le type de sol, sa profondeur, sa texture, sa charge en éléments grossiers et, dans une certaine mesure, l'hydromorphie des sols. Elles déterminent ce que le sol peut faire. Un usage ne les modifie pas ; seule une intervention lourde (décapage, remblai, imperméabilisation) les fait disparaître, de façon généralement irréversible.

Les propriétés dynamiques sont celles qui réagissent à l'occupation du sol et aux pratiques, et qui peuvent évoluer en quelques années : le pH, la teneur en matière organique, les éléments nutritifs, l'abondance et la diversité des organismes du sol, etc. Elles déterminent ce que le sol fait aujourd'hui. Elles peuvent se dégrader, mais aussi s'améliorer par la gestion.

Cette distinction guide le choix des données : les propriétés pérennes sont décrites par les cartes pédologiques, valables plusieurs décennies ; les propriétés dynamiques par des analyses et des suivis, à actualiser régulièrement. Elle guide également le choix de l'approche : l'approche à partir de bases de données nationales ou régionales repose pour l'essentiel sur les propriétés pérennes ; l'approche à partir de données locales y ajoute les propriétés dynamiques mesurées ; l'approche fondée sur l'occupation du sol ne mobilise ni les unes ni les autres.

À noter que certaines propriétés dynamiques figurent dans les bases pédologiques, comme le pH ou la capacité d'échange cationique, sous forme de valeurs représentatives d'un type de sol. Elles décrivent alors un état moyen, et non l'état actuel d'une parcelle.

Tableau 6. Exemples de propriétés pérennes et dynamiques et bases de données disponibles en France métropolitaine.

	Propriétés pérennes	Propriétés dynamiques
Exemples	Type de sol, profondeur, horizons, texture, éléments grossiers, hydromorphie, etc.	Structure, pH, matière organique, N, P, K, oligo-éléments, abondance et diversité des organismes des sols, activités enzymatiques, etc.
Exemples de bases de données disponibles	Données pédologiques (DoneSol / IGCS)	Données agronomiques et biologiques (BDAT, RMQS, analyses locales)

→ Mesurer une propriété : plusieurs approches complémentaires

Une propriété du sol peut être évaluée selon plusieurs voies d'acquisition complémentaires, dont le choix dépend des objectifs de l'étude, des moyens disponibles et du niveau de précision recherché.

On distingue ainsi :

- > **Observation directe des sols sur le terrain**, essentiellement morphologique (épaisseur des horizons, couleur, structure, texture, compacité, etc.). Cette approche indispensable est la plus coûteuse en temps et en moyens humains et/ou mécaniques : sondages à la tarière manuelle ou fosses pédologiques. Elle permet au pédologue un diagnostic précis et détaillé du fonctionnement du sol *in situ* et conditionne l'approche analytique qui nécessite des prélèvements représentatifs. La fosse pédologique permet de décrire plus de propriétés que le sondage à la tarière. Cette approche nécessite un travail préalable au bureau (plan de sondages) pour définir une stratégie d'implantation permettant d'assurer la représentativité des observations sur l'ensemble de l'emprise d'étude et selon sa variabilité. La densité des observations est encadrée par la norme NF X31-560 et par l'échelle de restitution des données ;
- > **Mesure directe sur le terrain : cette approche** est recommandée pour l'obtention de certains paramètres clés (ex. : évaluer la sous-fonction « infiltration de l'eau » par la mesure de la conductivité hydraulique à saturation du sol par différents tests reproductibles de perméabilité : Beerkan, Guelph, Matsuo, etc.) ;
- > **Approche analytique en laboratoire : cette approche** permet, si l'échantillonnage, le prélèvement et la conservation ont été correctement réalisés, d'obtenir des valeurs valides et comparables (normes d'analyse). La localisation, le type et les conditions de prélèvement, ainsi que la conservation de l'échantillon, doivent être maîtrisés pour réduire les marges d'erreur et sécuriser l'interprétation des résultats. Les analyses doivent être faites dans un laboratoire agréé (agrément du ministère chargé de l'agriculture, éventuellement accréditation COFRAC) ;
- > **Modélisation par fonction de pédotransfert** : elle nécessite de prendre en compte le type de sol et le contexte pédoclimatique. Elle présente néanmoins un biais lié à l'application d'équations de pédotransfert génériques, établies sur des jeux de données de référence qui ne couvrent pas toute la diversité des sols. Ces équations sont couramment utilisées pour estimer la masse volumique apparente, ou encore la réserve utile (Bruand et al., 2004) ou la conductivité hydraulique à saturation (Tóth et al., 2015 ; Szabó et al., 2021).
- > **Télédétection : cette approche** mobilise des outils et compétences spécifiques et permet d'accéder à certaines informations spatialisées sur de vastes territoires, mais cela reste des mesures indirectes pour de nombreux paramètres pédologiques. Elle n'est pas mobilisée ici pour

estimer directement des propriétés du sol. En revanche, l'approche fondée sur l'occupation du sol s'appuie sur des couches issues de la télédétection pour déduire une capacité fonctionnelle présumée (approche n° 3, chapitre 3).

⚠ Ces approches ne s'excluent pas mutuellement : elles sont le plus souvent combinées afin d'obtenir une vision du fonctionnement du sol la plus complète possible.

Les propriétés ainsi obtenues constituent des données brutes, qui doivent être transformées pour devenir interprétables au regard des fonctions du sol. En cela, les propriétés deviennent des paramètres puisqu'elles sont alors mobilisées dans un calcul ou un modèle puis transformées en indicateurs grâce à un référentiel d'interprétation.

→ Construire les indicateurs fonctionnels / noter les indicateurs de 1 à 5

Pour rendre comparables les résultats, **chaque paramètre est transformé en indicateur** explicitement relié à une fonction du sol. Dans le cadre de la méthode « 4 fonctions », on systématise une échelle de 1 à 5, où 1 correspond à un faible niveau de fonctionnalité et 5 à un niveau élevé. Cette transformation repose sur des référentiels d'interprétation fondés sur des seuils, valeurs cibles ou références techniques existantes. Cette étape marque le passage de la mesure d'une propriété du sol à une information interprétable pour son évaluation fonctionnelle.

Les liens entre propriétés, paramètres, indicateurs et fonctions sont présentés de manière synthétique dans la figure suivante (Figure 30).

De la mesure de terrain à la carte

Une fonction du sol ne s'observe pas directement : elle se déduit, étape par étape, de grandeurs mesurables.

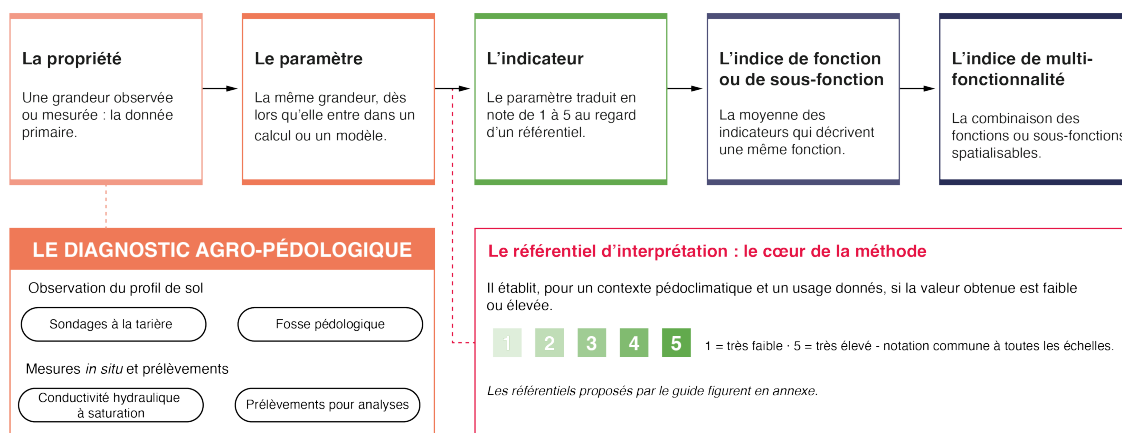


Figure 30. Illustration du lien entre paramètre, indicateur, fonction et indice de multifonctionnalité (adapté de Branchu et al. 2022).

Le choix des indicateurs à intégrer dans le calcul d'un indice d'une fonction est délicat, tant pour le nombre, la sensibilité et l'interprétabilité des paramètres à mobiliser que pour le coût de leur acquisition (terrain ou laboratoire). Le choix des indicateurs constitue un élément central de la démarche.

L'objectif est donc de trouver un compromis, avec un nombre minimal d'indicateurs permettant de capter la variabilité de la fonction : cela permet de réduire les coûts, d'améliorer l'interprétation et la lisibilité des résultats, et d'éviter des effets de redondance et de colinéarité. Les indicateurs doivent être « sensibles » dans le sens où ils doivent être en mesure d'illustrer un changement (usage, type de sol, par exemple) ou aider à discriminer des options. Ce compromis peut être trouvé soit selon un rapport coût/précision d'un travail de terrain et d'analyses de laboratoire proposé par le bureau d'études et accepté par le maître d'ouvrage (collectivité, aménageur, association...), soit, de façon purement statistique, via des approches multivariées (ACP, modèles, etc.).

Dans le cadre de la méthode « 4 fonctions », deux niveaux d'indicateurs sont distingués :

- > **Les indicateurs de niveau 1**, considérés comme « données minimales de base », regroupent les indicateurs présentant le meilleur compromis entre simplicité, mesurabilité et robustesse scientifique. Ils sont généralement utilisés en routine dans les études pédologiques, et disposent le plus souvent de référentiels d'interprétation robustes et largement mobilisables. **Ils sont donc considérés « incontournables » dans une évaluation des fonctions du sol ;**
- > **Les indicateurs de niveau 2** correspondent à des analyses d'approfondissement thématiques, mobilisées selon le contexte et les problématiques pour répondre aux besoins spécifiques de l'étude. Leur utilisation vient compléter et affiner les calculs des indices de fonction.

Une liste d'indicateurs mobilisables est fournie ci-dessous (**Tableau 7**). Elle est prescriptive pour le niveau 1 afin de garantir un minimum de données d'entrée indispensable à l'évaluation des 4 fonctions, mais reste indicative et non exhaustive pour le niveau 2. Les indicateurs sont regroupés par type d'approche d'acquisition retenue : prospection pédologique de terrain (description pédologique et mesures *in situ*), analyses en laboratoire sur échantillons prélevés lors des observations, ou encore fonctions de pédotransfert mobilisant des données de terrain et/ou des données analytiques pour produire un indicateur synthétique disposant d'un référentiel d'interprétation.

Tableau 7. Liste des indicateurs de niveau 1 et de niveau 2 pour appliquer la méthode « 4 fonctions ».

Tableau des indicateurs d'évaluation fonctionnelle des sols selon la méthode 4 fonctions										
Fonctions - >	(1) Fonction biologique		(2) Fonction climatique	(3) Fonction nutritive		(4) Fonction hydrique				
Sous-fonctions - >	Supporter les organismes du sol		Enracinement de la végétation	Stockage du carbone		Fourniture des nutriments		Infiltration de l'eau	Stockage et transfert de l'eau à la plante	
Niveaux d'investigation : Niveau 1 = base commune "incontournable" ; Niveau 2 = approfondissement thématique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 1	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 1	Niveau 1	Niveau 2
Indicateurs d'observation	Approche pédologique de terrain (relevés d'observation et essai à la tarière ou en fosse)									
Porosité	❶	❶ *	❶					❶		
Compacité (pénétromètre, test couteau)			❶					❶		
Classe hydromorphie (GEPPA)			❶					❶		
Epaisseur des horizons	❶								❶	❶ *
Charge en éléments grossiers	❶		❶	❶	❶ *				❶	❶ *
Etat structural des couches supérieures (VESS)	❶		❶							
Epaisseur utile à l'enracinement			❶							
Texture du sol	❶		❶					❶	❶	❶ *
Présence et profondeur d'apparition d'une couche imperméable			❶						❶	
Conductivité hydraulique à saturation (Beerkan, Guelph, Matsuo)								❶		
Abondance de bioturbations lombriciennes		❷								
Indicateurs de laboratoire	Approche analytique (de laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain)									
Masse volumique apparente sèche			❶	❶	❶ *					❷
Granulométrie tamisée à 2 mm	❶						❷	❶		❷
pH eau	❶					❶		❶		
Carbone organique ou matière organique	❶			❶	❶ *	❶				❷
Capacité d'échange cationique						❶		❶		
Rapport C/N	❶					❶				
Phosphore assimilable						❶				
Potassium échangeable						❶				
Rapport MO/Argile	❶									
Magnésium échangeable						❶	❶ *			
Calcium échangeable						❶	❶ *			
Sodium échangeable						❶	❶ *			
Potentiels de succion à pF2, pF2.3 et pF4.2										❷
Stabilité structurale		❷								
Rock Eval (stabilité du carbone)					❷		❷			
Respiration basale							❷			
pH KCl							❷			
Matière organique perte au feu							❷			
Taux de saturation de la CEC							❷			
5 oligoéléments							❷			
Conductivité électrique							❷			
Biomasse microbienne par fumigation		❷					❷			
Fractionnement de la matière organique		❷		❷			❷			
Potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote		❷								
Abondance, diversité et biomasse des vers de terre		❷								
Abondance et répartition des groupes fonctionnels de nématodes et indices nématofauniques		❷								
Autres bio-indicateurs taxonomiques (collembolles, carabes,...)		❷								
Diversité et abondance des bactéries		❷								
Diversité et abondance de champignons		❷								
Equilibre microbien bactéries / champignons		❷								
Indicateurs de pédo-transfert	Approche par modélisation (Fonctions de pédotransfert : FPT)									
Réservoir en eau utilisable par FPT									X _A	X _A
Infiltration de l'eau par FPT								X _A		
Stockage du carbone par FPT				X _A						
Indice de battance		X _A						X _A		

X_A : indicateur obtenu à par fonction de pédotransfert

❶ * Indicateur de niveau 1 mesuré dans l'horizon H2

⚠ À noter que la granulométrie est ici considérée comme la répartition quantitative des particules d'un échantillon selon leur taille, déterminée par analyse, alors que la texture constitue une classe texturale ou un ensemble des caractéristiques texturales déduites de la granulométrie des fractions minérales (notamment sable, limon et argile), selon une classification de référence (triangle de l'Aisne, Jamagne, 1967 ; triangle du GEPPA, 1963). Sur le terrain, c'est donc la texture qui est estimée et en laboratoire la granulométrie. La granulométrie étant réalisée sur la terre fine (< 2 mm), elle ne rend pas compte des éléments grossiers. Leur observation reste donc indispensable en complément : en réduisant le volume de terre fine, ils diminuent notamment la réserve utile et influencent le drainage et l'enracinement.

→ Interpréter les indicateurs : le rôle des référentiels

Un indicateur n'est interprétable qu'au regard d'un **référentiel d'interprétation**, qui associe une gamme de valeurs à une signification. Selon la finalité de l'évaluation, deux types de référentiels peuvent être mobilisés (INDIQUASOLS, Cousin et al. 2025) :

- > **Finalité descriptive : il n'y a pas** de jugement sur la valeur mesurée. Les références reposent sur la distribution statistique des valeurs observées ou modélisées dans un contexte pédoclimatique et d'usage donné. Cette approche est particulièrement utile lorsqu'aucune valeur seuil ou valeur cible n'est disponible ; dans ce cas, il est possible de proposer **des classes de valeurs** ;
- > **Finalité normative : le référentiel comporte** des **valeurs seuils** ou **valeurs cibles**. Ces valeurs seuils permettent d'identifier un état dégradé susceptible de justifier des actions correctrices, tandis que les valeurs cibles correspondent à l'état souhaité par le gestionnaire ou les politiques publiques. Ces références peuvent provenir de textes réglementaires, de recommandations professionnelles ou d'analyses statistiques.

 **Le choix du référentiel conditionne directement la lecture des résultats et les décisions susceptibles d'en découler.**

Par exemple, le pH dispose de classes de valeurs connues en usage agricole ou forestier. En revanche, la biomasse microbienne ne dispose pas de telles classes de valeurs. Les valeurs disponibles sur l'ensemble du territoire français reposent donc sur un modèle prédictif construit sur la base des 2 173 points du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS). Dans ce contexte, les classes de valeurs dépendent des conditions pédoclimatiques, de l'usage et des pratiques de gestion. Les données du RMQS par usage peuvent alors être utilisées, en prenant pour valeurs de référence les quantiles de la distribution statistique.

Dans le cadre de ce guide, les référentiels d'interprétation poursuivent le plus souvent une finalité descriptive. Quelques référentiels empruntent toutefois des seuils normatifs issus des référentiels agronomiques, notamment pour le pH et le phosphore assimilable.

Un même paramètre peut renseigner plusieurs fonctions et donner lieu à des indicateurs différents, car il est interprété au regard de processus écologiques distincts. La texture en est l'exemple le plus net : les deux référentiels sont inversés, puisqu'une texture sableuse favorise l'infiltration de l'eau mais pénalise la fourniture en nutriments. Le référentiel d'interprétation peut également différer selon l'usage. Par exemple, on n'attendra pas d'un sol le même niveau de fertilité si l'usage est strictement agricole ou si l'objectif vise simplement à maintenir un couvert végétal dans un parc.



Des référentiels sont proposés en annexe pour interpréter certains paramètres.

L'ANNEXE 7 est un document indépendant, mis à disposition en complément du guide : seules y figurent les calibrations suffisamment établies, ce qui explique que le texte du guide cite davantage d'indicateurs que ceux listés dans l'ANNEXE 7.

Plusieurs types de référentiels sont proposés et varient suivant l'indicateur (Figure 31). Certains indicateurs évoluent de façon croissante, la note augmentant avec la valeur mesurée, comme la capacité d'échange cationique ou la teneur en matière organique. D'autres évoluent de façon décroissante, la note diminuant lorsque la valeur augmente, comme la densité apparente ou la teneur en éléments grossiers. D'autres enfin présentent une réponse optimale, la note étant maximale pour une plage de valeurs intermédiaires et décroissant de part et d'autre, comme le pH ou le rapport C/N. Les paramètres qualitatifs, tels que l'état structural, la classe d'hydromorphie ou la classe texturale, sont quantifiés en les associant directement à des classes de valeur, sans courbe de réponse.

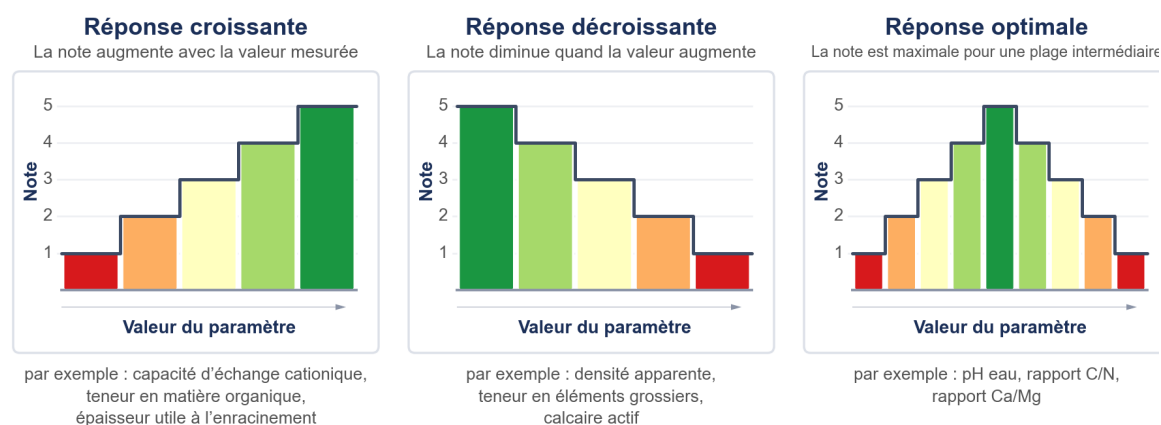


Figure 31. Illustration de trois types de référentiels d'interprétation d'un indicateur donné.

→ Agréger les indicateurs en indice de fonction ou de sous-fonction

L'évaluation d'une fonction ou d'une sous-fonction nécessite de combiner plusieurs indicateurs en une valeur unique, appelée **indice de fonction (ou de sous-fonction)**, permettant d'émettre une appréciation globale et de suivre son évolution dans le temps (Cousin et al. 2025).

L'agrégation de ces notes est généralement réalisée à l'aide de moyennes arithmétiques, pondérées ou non. Lorsqu'une fonction réunit deux sous-fonctions, comme la fonction hydrique, son indice est la moyenne de ces deux sous-fonctions. **Par souci de genericité, ce guide retient la moyenne arithmétique non pondérée des notes des indicateurs : l'indice de sous-fonction est ainsi compris entre 1 (très faible) et 5 (très élevé).** Deux sous-fonctions font exception. Pour l'« infiltration de l'eau », un paramètre très défavorable est déclassant : il place le sol dans la classe la plus basse, quelle que soit la moyenne des autres. Pour l'« enracinement de la végétation », la note d'hydromorphie plafonne la moyenne, un sol profond mais engorgé ne pouvant pas la dépasser. Ces deux règles reproduisent celles de la méthode MUSE (Branchu et al. 2022) et sont détaillées en ANNEXE 7²³.

⚠ Il convient toutefois de souligner que l'agrégation entraîne une perte d'information, en masquant les valeurs détaillées et en limitant l'identification des causes de dégradation. Il est donc recommandé de conserver, en complément des indices synthétiques, les valeurs intermédiaires des indicateurs.

Les indices de sous-fonction ainsi calculés permettent, par exemple, de :

- > **Établir un état des lieux de la santé des sols** (échelle du pilotage de politiques publiques pour la surveillance globale de la qualité des sols) ;
- > Suivre **l'évolution de la santé des sols** dans le temps en cas de modification du couvert végétal ;
- > Accompagner la décision des gestionnaires des sols sur **des choix d'usage ou de pratiques de gestion du sol**.

Pour garantir leur comparabilité entre territoires, les méthodes de mesure, de calcul et d'interprétation doivent être **documentées, harmonisées et, autant que possible, standardisées**.

Enfin, il est important de souligner que dans certains cas, l'indicateur est identique à l'indice de sous-fonction, lorsqu'un seul paramètre la renseigne : c'est le cas du stock de carbone, et de la réserve utile pour la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante ».

²³ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

→ Définition et objectifs des évaluations de la multifonctionnalité écologique des sols

L'évaluation multifonctionnelle d'un sol est basée sur une approche multicritère permettant de fournir une vision globale et dynamique du sol liée à la mesure de divers processus écologiques. Cette approche repose sur une évaluation intégrée de plusieurs fonctions (ou de plusieurs sous-fonctions) afin d'aboutir à une note globale de fonctionnement du sol.

L'évaluation des fonctions des sols peut être conduite de manière individuelle, en analysant séparément chaque fonction, ou de manière intégrée, en combinant plusieurs fonctions pour répondre à des objectifs opérationnels.

Cette approche intégrée correspond à l'évaluation de la multifonctionnalité des sols, entendue comme la capacité d'un sol à assurer simultanément plusieurs fonctions écologiques. Cette évaluation est complémentaire à une évaluation fonction par fonction mais ne la remplace pas.

Dans le cadre de ce guide, la **multifonctionnalité repose sur la somme** des indices de plusieurs fonctions ou sous-fonctions (eux-mêmes issus de l'agrégation d'indicateurs) afin de produire des indices synthétiques adaptés aux besoins des utilisateurs. Dans ce cas les indices de sous-fonctions peuvent à leur tour être agrégés en indices de synthèse. **Cette seconde agrégation ne procède pas par moyenne mais par somme, classée ensuite en cinq niveaux à l'aide de seuils fixes** : le potentiel agronomique est la somme de trois sous-fonctions, comprise entre 3 et 15 ; l'indice de multifonctionnalité est la somme des six sous-fonctions, comprise entre 6 et 30. Les seuils figurent en ANNEXE 7.

Plusieurs types d'évaluations multifonctionnelles peuvent ainsi être définis, en fonction des finalités de l'étude.

Par exemple :

- > **Le potentiel agronomique**, somme de trois sous-fonctions relevant chacune d'une fonction différente : « fourniture en nutriments » pour la fonction nutritive, « stockage et transfert de l'eau à la plante » pour la fonction hydrique et « enracinement de la végétation » pour la fonction biologique. Il traduit la capacité du sol à soutenir durablement la production végétale ;
- > **Le potentiel de régulation climatique au sens de l'adaptation**, qui mobilise les trois mêmes sous-fonctions, mais avec des référentiels d'interprétation adaptés à la palette végétale visée. Il traduit la capacité du sol à soutenir le développement et la pérennité de la végétation en contexte urbain, et à contribuer ainsi à la régulation microclimatique (rafraîchissement, limitation des effets d'îlot de chaleur, réduction des pertes hydriques), sans objectif de maximisation de la production de biomasse ;
- > **Le potentiel de régulation climatique au sens de l'atténuation**, qui repose sur la seule sous-fonction « stock de carbone », le cas échéant rapprochée d'autres sous-fonctions concourant au fonctionnement global du sol.

Ces agrégations ne sont pas uniques : elles se définissent en fonction des objectifs poursuivis, qu'il s'agisse de planification territoriale, de gestion des espaces végétalisés ou de conception de projets d'aménagement.

Ainsi, la multifonctionnalité ne se réduit pas au calcul d'une somme : le choix des sous-fonctions retenues, et des référentiels qui leur sont appliqués, est une décision orientée vers les destinataires de l'évaluation et la question posée. C'est ce choix, et non l'opération arithmétique, qui donne son sens au résultat.

Dans cette perspective, plusieurs principes doivent être respectés :

- > Transparence des choix d'agrégation (fonctions retenues, méthode de calcul, propriétés évaluées ou mesurées) ;
- > Cohérence avec les objectifs de l'évaluation ;
- > Maintien de l'accès aux résultats détaillés, afin de conserver la capacité d'analyse fine.

À noter enfin que cette approche permet d'articuler différentes échelles d'analyse : une évaluation globale de la multifonctionnalité peut être complétée par une lecture détaillée des fonctions individuelles, afin d'identifier les leviers d'action et les éventuelles limitations.

Exemple d'évaluation du potentiel agronomique d'un sol

Le potentiel agronomique correspond à la capacité d'un sol à soutenir durablement la production végétale. Son évaluation renseigne sur deux dimensions complémentaires : la capacité du sol à fournir les éléments nutritifs nécessaires à la plante, ainsi que sa résilience face au stress hydrique, laquelle dépend notamment de sa structure, de ses capacités de stockage et de transfert de l'eau, et de sa profondeur.

Elle repose sur une évaluation multifonctionnelle, c'est-à-dire sur l'évaluation de trois sous-fonctions (Figure 32) :

- > **Sous-fonction « fourniture en nutriments » ;**
- > **Sous-fonction « enracinement de la végétation » ;**
- > **Sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante ».**

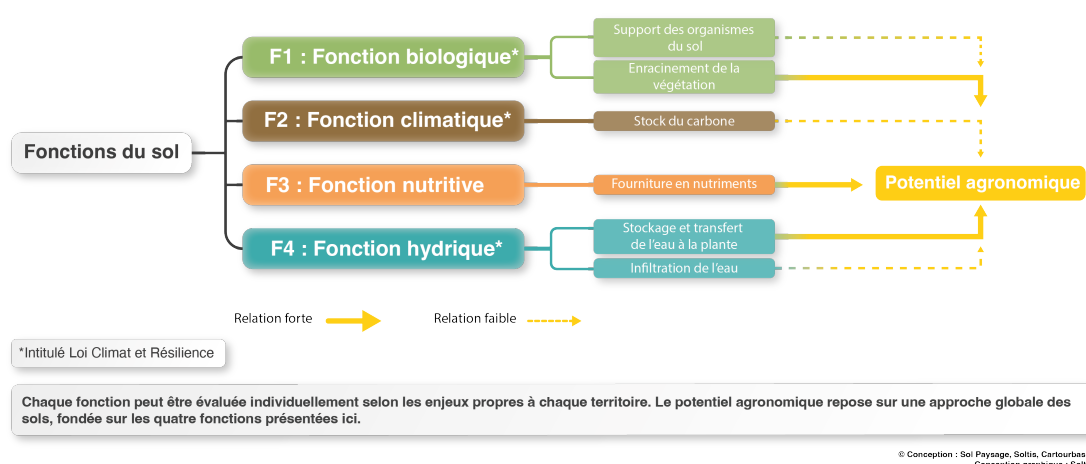


Figure 32. Présentation des sous-fonctions principales associées à l'évaluation du potentiel agronomique.

Dans le cadre de la méthode « 4 fonctions », chaque sous-fonction présente, à l'issue de son évaluation, une note comprise entre 1 et 5, 5 étant la valeur maximale. Ces notes sont par la suite sommées pour aboutir à une note sur 15 pour évaluer le potentiel agronomique. Enfin, cette somme est convertie en niveau qualitatif à l'aide du tableau ci-dessous (Tableau 8).

Tableau 8. Correspondance entre l'indice agrégé calculé à partir des sous-fonctions et le potentiel agronomique. La somme des notes est comprise entre 3 et 15. Le niveau « Très faible » correspond ainsi à une somme comprise entre 3 (inclus) et 6 (exclus), tandis que le niveau « Très élevé » correspond à une somme comprise entre 12 (inclus) et 15 (inclus).

Somme des notes	Indice « Potentiel agronomique »	Niveau correspondant
$3 \leq \text{somme} < 6$	1	Très faible
$6 \leq \text{somme} < 8$	2	Faible
$8 \leq \text{somme} < 10$	3	Moyen
$10 \leq \text{somme} < 12$	4	Élevé
$12 \leq \text{somme} \leq 15$	5	Très élevé

⚠ Certaines contraintes, telles que la pente ou la salinité, n'ont pas été intégrées dans le système de notation proposé. Il est donc indispensable de compléter l'interprétation de la note obtenue en tenant

compte de ces paramètres, sans les intégrer au calcul de la note elle-même. La méthode MUSE procède de la même façon, en les signalant comme contraintes supplémentaires (Branchu *et al.* 2022). Pour la pente, la donnée mobilisable est un modèle numérique de terrain, par exemple le RGE ALTI de l'IGN ; MUSE retient le seuil de 10 %, qui correspond aux terrains non mécanisables et sans labour en période hivernale, et signale qu'à 25 mètres de résolution les terrasses ne sont pas détectées, ce qui peut déclasser à tort des terrains aménagés en terrasse pour améliorer leur culture. Pour la salinité, MUSE considère comme non salés les sols dont la conductivité ne dépasse pas 2 mS/cm, soit 2 dS/m. Ces deux contraintes sont à restituer par une carte de superposition des secteurs à pente ou à salinité contraignante.

Exemple d'évaluation du potentiel de régulation climatique (au sens de l'adaptation ou de l'atténuation)

Le potentiel de régulation climatique correspond à la capacité d'un sol à absorber les chocs climatiques (sécheresse, pluies intenses, canicules) et à faire preuve de résilience face aux modifications des conditions climatiques. Cette évaluation peut être abordée sous un angle multifonctionnel mais aussi monofonctionnel.

Un sol capable de soutenir une végétation dense et vigoureuse contribue directement à la régulation thermique des milieux, notamment en milieu urbain, par le biais de l'évapotranspiration et de l'**ombrage**. **L'évaluation de ce « potentiel de végétalisation » repose sur les mêmes sous-fonctions que le potentiel agronomique, dans la mesure où la production de biomasse végétale est étroitement liée à la fertilité du sol et à sa capacité à alimenter la plante en eau et en nutriments.**

Les sous-fonctions mobilisées sont les suivantes (Figure 33) :

- > Sous-fonction « fourniture en nutriments » ;
- > Sous-fonction « enracinement de la végétation » ;
- > Sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante ».

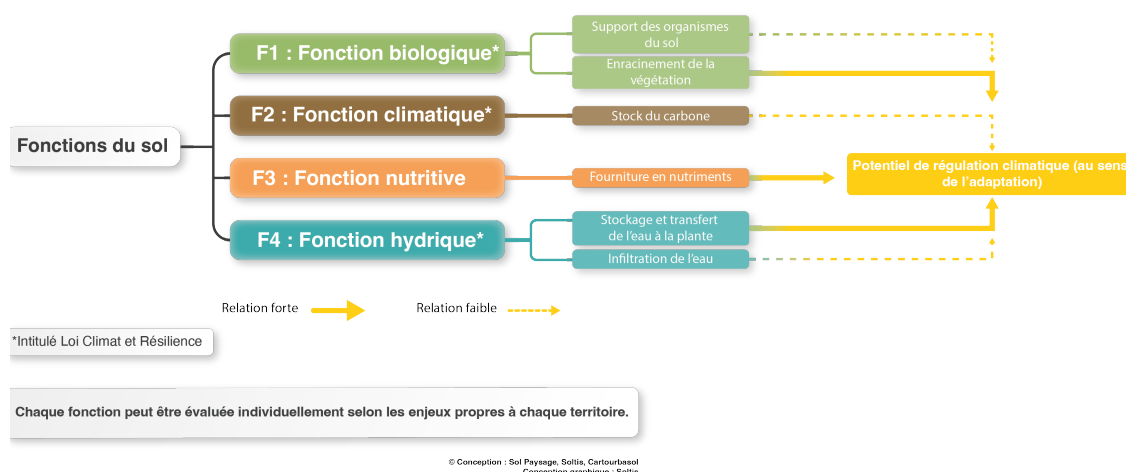


Figure 33. Présentation des sous-fonctions principales associées à l'évaluation du potentiel de régulation climatique au sens de l'adaptation (création d'îlots de fraîcheur dans un contexte d'adaptation au changement climatique).

Le système de notation et les seuils de classification sont identiques à ceux du potentiel agronomique (Tableau 8), avec une note finale sur 15 aboutissant à cinq niveaux allant de Très faible à Très élevé. **Toutefois, certaines sous-fonctions, notamment « fourniture en nutriments » et « enracinement de la**

végétation », peuvent faire l’objet d’une évaluation sensiblement différente de celle conduite dans le cadre du potentiel agronomique, en fonction de la palette végétale envisagée (herbacée, arbustive ou arborée), dont les exigences varient tant en termes de profondeur de sol que de fertilité.

D’autres dimensions de l’adaptation au changement climatique peuvent être évaluées de manière ciblée, au travers d’approches monofonctionnelles dédiées à une problématique spécifique. La sous-fonction « infiltration de l’eau », par exemple, renseigne sur la capacité du sol à absorber les précipitations et à limiter le ruissellement de surface. Cette sous-fonction est particulièrement pertinente dans le cadre de la gestion des événements extrêmes de type inondation, en évaluant la capacité du sol à réduire les pics de crue et à recharger les nappes phréatiques.

Sur la problématique de l’atténuation du changement climatique, la sous-fonction « stock de carbone » peut renseigner sur la capacité du sol à séquestrer le carbone organique si le stock de carbone organique est mesuré selon un protocole adapté (teneur en carbone organique convertie en stock, exprimé en tonnes de carbone par hectare), complété si besoin par des indicateurs de qualité de la matière organique, comme le détaille la Figure 34. Cette sous-fonction contribue à la réduction des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre et constitue à ce titre un levier essentiel dans les stratégies de lutte contre le réchauffement climatique.

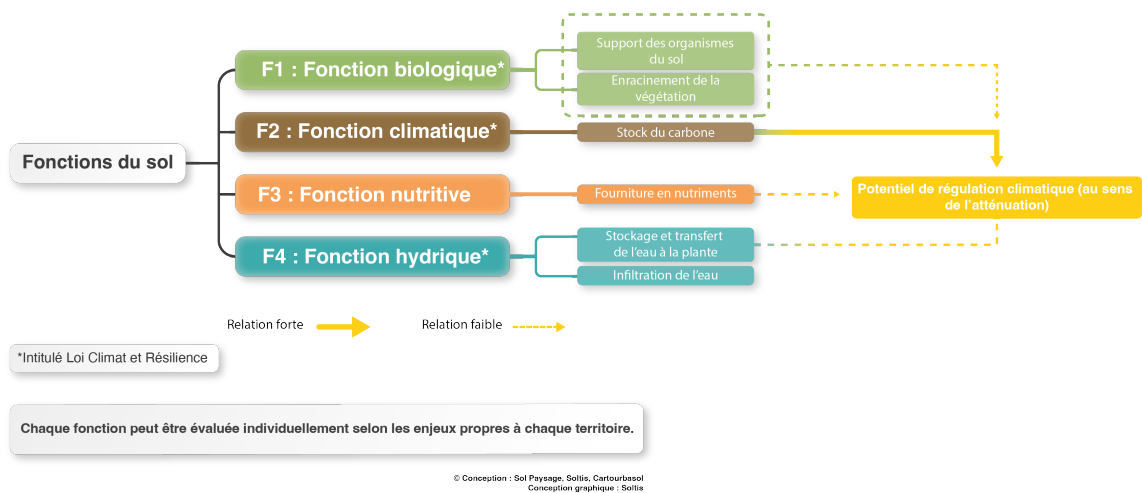


Figure 34. Présentation de la sous-fonction principale permettant l’évaluation du potentiel de régulation climatique (stockage du carbone dans un contexte d’atténuation du changement climatique).

Tableau 9. Correspondance entre la note de sous-fonction et le potentiel de régulation climatique (stockage du carbone dans un contexte d’atténuation du changement climatique).

Note	Niveau correspondant
1	Très faible
2	Faible
3	Moyen
4	Élevé
5	Très élevé

Ces approches monofonctionnelles, bien que plus ciblées, constituent des compléments indispensables à une évaluation globale de la résilience des sols face aux enjeux climatiques. Elles permettent de traiter des questions spécifiques pour lesquelles une agrégation multifonctionnelle ne serait pas adaptée.

→ Comment assurer la cohérence des indicateurs fonctionnels entre échelles ?

L'évaluation des fonctions des sols peut être mise en œuvre à différentes échelles territoriales, depuis des approches régionales reposant sur des bases de données existantes jusqu'à l'échelle du projet fondée sur des observations et mesures de terrain (voir section suivante). Dans ce contexte, les sources de données mobilisées peuvent varier, tant en nature qu'en précision.

L'enjeu méthodologique consiste donc à garantir la cohérence des indicateurs utilisés, indépendamment de l'échelle spatiale ou temporelle et de l'origine des données.

Dans le cadre de ce guide, cette cohérence repose sur **le choix d'indicateurs identiques et indépendants des sources d'informations disponibles** (ressources documentaires, modélisation, mesures de terrain) et des échelles spatiales investiguées.

Cette approche permet de :

- > **Maintenir une continuité méthodologique entre échelles ;**
- > **Faciliter le passage d'une analyse globale à un diagnostic local ;**
- > **Assurer la comparabilité des résultats de l'évaluation fonctionnelle dans le temps et dans l'espace.**

Cette approche implique toutefois une vigilance particulière quant à :

- > La qualité et la résolution des données mobilisées ;
- > Les incertitudes associées aux données estimées ou modélisées ;
- > La compatibilité des méthodes de calcul utilisées ;
- > Les méthodes d'analyse employées par les laboratoires pour certains paramètres pédologiques (CEC, carbone, etc.) ;
- > La cohérence des unités de mesure des paramètres entre des études pédologiques différentes.

Ainsi, si les indicateurs sont identiques, leur niveau de précision peut varier selon l'échelle et les données disponibles. Il est donc recommandé de documenter systématiquement l'origine des données, les méthodes d'acquisition et les éventuelles hypothèses de calcul.

Par exemple, la sous-fonction « infiltration de l'eau » repose sur un indicateur de perméabilité des sols, lequel peut être estimé à partir de ressources ou de méthodes différentes, telles que :

- > Données pédologiques issues du RRP à une échelle régionale ;
- > Mesures locales de certains paramètres (texture, % éléments grossiers, profondeur de sol, etc.) acquises à une échelle plus fine permettant de calculer la perméabilité par des équations de pédotransfert ;
- > Mesures directes de la perméabilité sur le terrain.

Ainsi, cette approche basée sur des indicateurs normalisés entre 1 et 5 permet de construire des dispositifs d'évaluation évolutifs, dans lesquels une première estimation à petite échelle peut être affinée à grande échelle à l'aide de données ou informations plus locales, sans remettre en cause la structure globale de l'évaluation.

2.4 ÉTAPE 4 : Cartographier les fonctions et les sous-fonctions du sol

La représentation spatialisée de l'intensité des fonctions et/ou sous-fonctions facilite leur appropriation par les décideurs publics, les aménageurs ou encore les associations, pour qui le choix de l'unité spatiale et des modes d'évaluation constitue un élément central du processus décisionnel.

À l'échelle projet ou dans le cas des UCS simples (UCS présentant une seule UTS), l'Unité Typologique de Sol (UTS) demeure l'unité de référence (voir Chapitre 1, section 2F) : les indices de fonction et de sous-fonction sont d'abord établis à ce niveau, puis affectés aux polygones de la carte des sols par jointure attributaire entre la table des indices par UTS et la couche de polygones, sur l'identifiant unique de l'UTS commun aux deux.

La moyenne arithmétique des notes des paramètres de chaque fonction ou sous-fonction permet d'attribuer à chaque UTS, selon les référentiels, une note comprise entre 1 et 5 (1 correspondant au niveau le plus faible, 5 au plus élevé).

À l'échelle régionale ou infrarégionale, la représentation spatiale des indices de fonction et de sous-fonction est généralement réalisée au niveau de l'Unité Cartographique de Sol (UCS). Il est donc nécessaire d'agréger les indices de fonction et de sous-fonction des UTS pour les affecter à l'UCS. Deux méthodes d'agrégation sont possibles (Encadré 8) :

- > **Agrégation par dominance.** Les valeurs de l'indice représenté, défini à l'UTS, doivent être agrégées en une seule qui sera représentative de l'UCS et présente sur la carte. Dans le cas de la méthode par la dominante, les pourcentages de représentation des UTS portant la même note sont alors additionnés. L'indice retenu pour l'UCS est la note dont le pourcentage cumulé est le plus élevé. En cas d'égalité des pourcentages de surface, la plus élevée est retenue. Le pourcentage de représentation de la note retenue doit accompagner la représentation spatiale : le complément à 100 % correspond à des sols auxquels la méthode attribue une autre note (Encadré 8). Ainsi, une UCS composée d'une UTS notée 5 sur 40 % de sa surface et de deux UTS notées 2 sur 30 % chacune reçoit la note 2, représentative de 60 % de sa surface, et non la note 5 de l'UTS la plus étendue ;
- > **Agrégation par la moyenne pondérée par la surface.** L'indice de l'UCS est calculé selon la formule : $\text{indice UCS} = (\text{somme, pour chaque UTS, de l'indice de l'UTS multiplié par son pourcentage de représentation dans l'UCS}) \div 100$.

Nous privilégions dans ce guide **l'agrégation par la dominance** car elle répond mieux aux besoins d'aide à la décision si des incertitudes de représentativité et de variabilité subsistent (Encadré 8). En effet, la moyenne pondérée lisse les notes des UTS minoritaires et peut donner une impression de précision que la représentativité et la variabilité réelles du terrain ne garantissent pas toujours, alors que la dominance restitue directement l'état majoritairement observé, plus lisible pour la décision. Cependant, il faut toujours garder à l'esprit que le choix de la méthode d'agrégation dépendra de l'échelle, de la fonction évaluée, du territoire et de la finalité de l'évaluation.

Concernant l'ordre des opérations pour un indice composite comme le potentiel agronomique, nous recommandons par ailleurs de calculer d'abord la note composite (par exemple la somme des trois sous-fonctions) à l'échelle de l'UTS, puis d'agréger cette note composite à l'UCS (par dominance ou moyenne pondérée), plutôt que d'agréger chaque sous-fonction séparément à l'UCS avant de les sommer. Les deux ordres peuvent en effet donner des résultats différents, en particulier avec la dominance, où l'UTS dominante peut varier d'une sous-fonction à l'autre.

 **L'agrégation à l'UCS soulève souvent des questions de représentativité, pertinence et fiabilité de l'information spatialisée. C'est pourquoi les cartes des évaluations fonctionnelles doivent, si le jeu de données le permet, s'accompagner de cartes de représentativité, de confiance ou encore d'incertitude statistique de l'information spatialisée.**

Encadré 8. Démarche globale d'évaluation des fonctions écologiques des sols : exemple de la sous-fonction « stock de carbone »

Le calcul de l'indice associé à une fonction repose sur trois étapes :

- > Choisir, pour chaque sous-fonction évaluée, les paramètres à mobiliser et la source des données correspondantes, selon le contexte du territoire et les moyens disponibles (voir étape 2) ;
- > Traduire les valeurs mesurées de ces paramètres en notes de 1 à 5, à l'échelle de l'Unité Typologique de Sol (UTS), à l'aide des référentiels d'interprétation (voir étape 3) ;
- > Agréger ces notes à l'échelle de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) : les UTS portant la même note sont regroupées et leurs pourcentages de représentation additionnés ; la note dont le pourcentage cumulé est le plus élevé est retenue pour l'UCS (étape 4).

Ce processus conduit à la valeur de l'indice à l'échelle de l'UCS. La Figure 35 illustre la méthode de calcul.

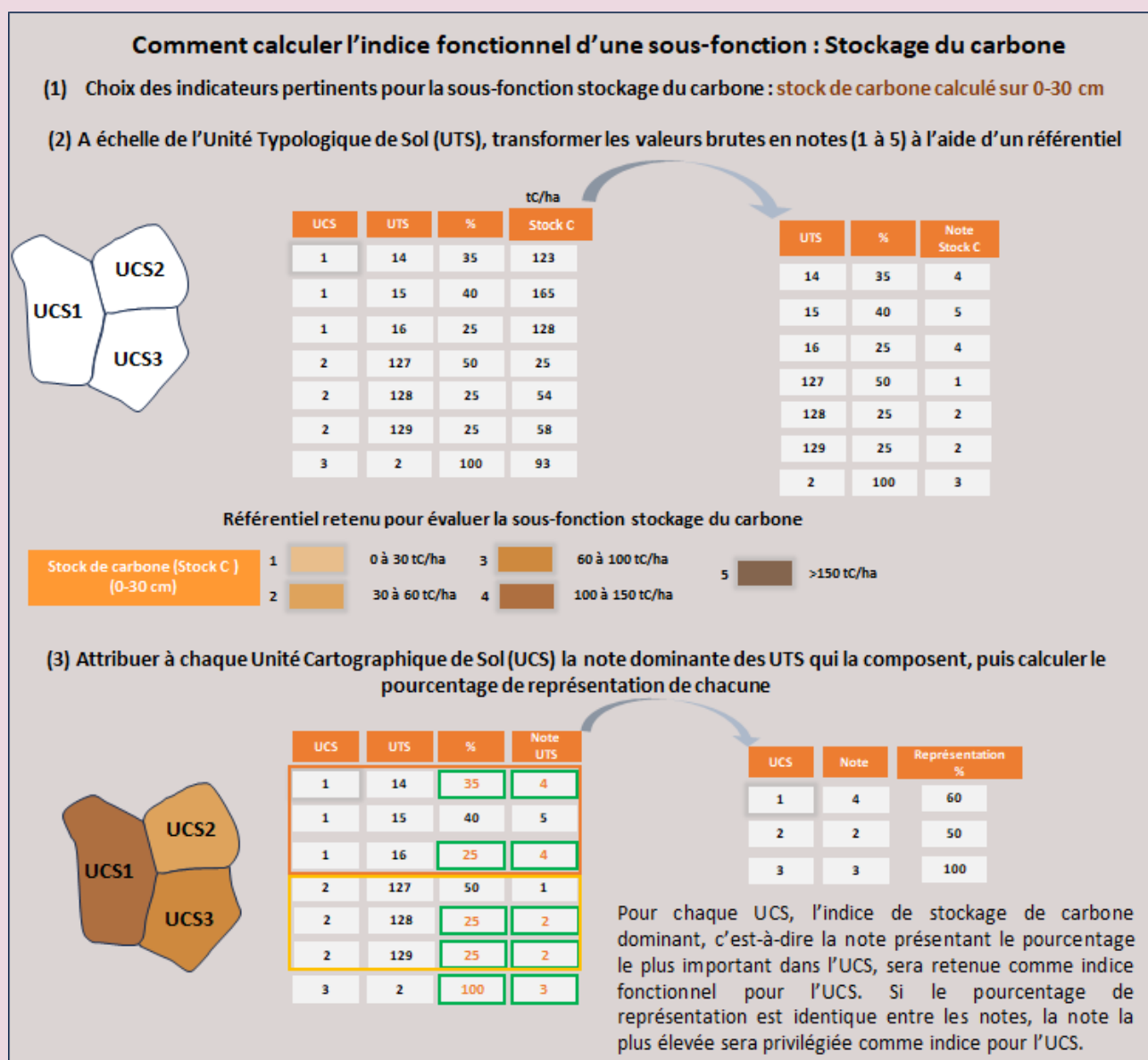


Figure 35. Méthodologie d'évaluation de la sous-fonction « stock de carbone » par la méthode de la dominance.

CHAPITRE 3.

MISES EN PRATIQUE SUR LES TERRITOIRES

3.1 APPROCHE À PARTIR DE BASES DE DONNÉES NATIONALES OU RÉGIONALES



À retenir

Cette première approche (approche 1) mobilise des données déjà disponibles, sans acquisition de terrain. Elle repose pour l'essentiel sur les propriétés pérennes des sols, décrites par les référentiels pédologiques : elle évalue donc le potentiel des sols, à des échelles régionale et intercommunale, et non leur état actuel à la parcelle. Seules deux sous-fonctions, « stock de carbone » et « support des organismes du sol », font appel à des propriétés dynamiques, estimées indirectement à partir de l'occupation du sol et des bases de données de l'OPVT et de ALDO.

Cette première approche, adaptée de la méthode MUSE pilotée par le Cerema (Branchu et al. 2022), repose sur l'utilisation du Référentiel Régional Pédologique (RRP) au 1/250 000 associé à la base de données DoneSol, des bases de données d'occupation du sol (Corine Land Cover, OCS GE, OCS GE 2, etc.), ainsi que des données issues de l'outil ALDO (ADEME) et de l'Observatoire participatif des vers de terre (OPVT) (voir liste et descriptif des bases de données en ANNEXE 4 et ANNEXE 5). La correspondance entre chaque paramètre de cette approche et les tables et champs DoneSol mobilisés (UCS, UTS, strates, pourcentage d'UTS par UCS) figure en ANNEXE 6.



Cette approche, fondée sur l'exploitation de bases de données existantes et non sur des observations de terrain directes, ne permet pas de mobiliser l'ensemble des paramètres pédologiques potentiellement associés à l'expression des fonctions et sous-fonctions (ex. : teneur en matière organique, azote) (voir « Intérêts et limites »). Néanmoins, chaque fonction et chaque sous-fonction est renseignée par au moins un indicateur pertinent, permettant une évaluation cohérente à l'échelle considérée.

Les quatre fonctions (et leurs sous-fonctions) peuvent être évaluées indépendamment les unes des autres (Figure 36).

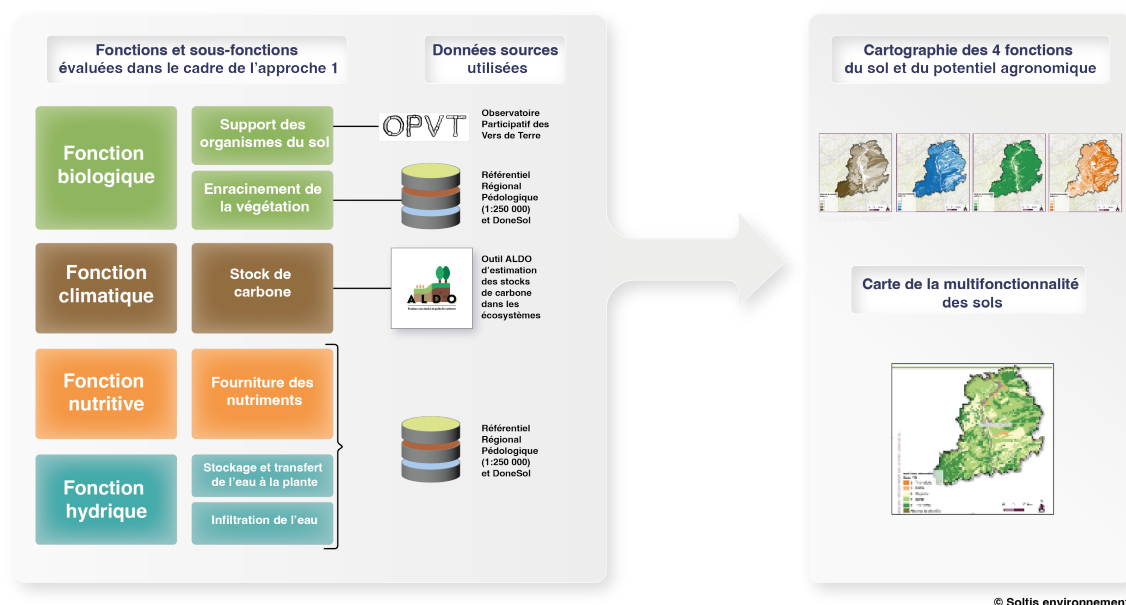


Figure 36. Présentation de l'approche 1 applicable à l'échelle régionale.

Elles font ensuite l'objet d'une agrégation (calcul d'un indice), aboutissant, par exemple, au potentiel agronomique, qui additionne les notes des sous-fonctions « fourniture en nutriments », « stockage et transfert de l'eau à la plante » et « enracinement de la végétation », ou encore à l'indice de multifonctionnalité, qui additionne les notes des six sous-fonctions évaluées. Le détail des méthodes de calcul est présenté ci-dessous.

Fonction 1 : fonction biologique

Sous-fonction biologique « support des organismes du sol »



À retenir

La sous-fonction « support des organismes du sol » est estimée à partir d'indicateurs d'abondance et de diversité de vers de terre issus de l'Observatoire participatif des vers de terre (OPVT).

Tous deux font partie **des indicateurs de niveau 2** tels que décrits dans le chapitre 2, section 1.

Ces deux indicateurs sont évalués à partir de la base de données de l'OPVT²⁴ (issue du travail d'EcoBioSol). Elle regroupe des données au niveau national et propose des valeurs moyennes de (1) l'abondance et (2) la diversité de vers de terre en fonction de l'occupation du sol (Figure 37). La relative ancienneté (2006-2015) et la répartition des données utilisées pour le calcul de ces indicateurs peuvent constituer des biais importants pour l'évaluation de cette sous-fonction. Aussi l'apport de données ou d'expertises complémentaires peut être intéressant pour compléter cette information.

En rattachant ces estimations à la nomenclature OCS GE, OCS GE 2 ou Corine Land Cover (ou toute autre nomenclature d'occupation des sols utilisée localement), il est ainsi possible d'évaluer ces deux paramètres par unité de surface.

Enfin, ces deux notes sont sommées pour générer une note finale correspondant à l'indicateur de la sous-fonction « support des organismes du sol ». Plus cette note est élevée, plus la sous-fonction s'exprime sur une unité de surface donnée. Cette somme, comprise entre 2 et 10, est ramenée à une note finale de 1 à 5 selon la grille de correspondance donnée en ANNEXE 7²⁵.

Deux modes de représentation spatiale sont possibles : la sous-fonction peut être cartographiée à l'échelle de l'occupation du sol, ou bien agrégée à l'échelle de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) afin de contribuer à la représentation de l'**indice de multifonctionnalité**. Dans ce second cas, l'agrégation à l'UCS est une moyenne des notes pondérée par la surface qu'occupe chaque poste d'occupation du sol au sein de l'UCS.

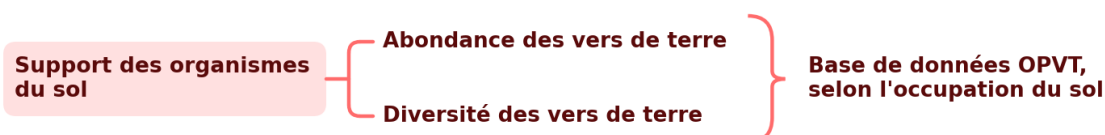


Figure 37. Présentation des indicateurs utilisés dans l'évaluation de la sous-fonction « support des organismes du sol » estimée à l'échelle de l'occupation du sol (d'après Branchu et al. 2022). La calibration de ces indicateurs est présentée en ANNEXE 7.

²⁴ Observatoire participatif des vers de terre.

²⁵ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

Les vers de terre constituent ici un proxy de la biodiversité des sols et non une mesure exhaustive de celle-ci. Ils ne représentent qu'une composante de la macrofaune, alors que la biodiversité du sol comprend également les micro-organismes, la microfaune, la mésofaune et de nombreux autres groupes de macrofaune. Pour cette sous-fonction, il est envisageable d'intégrer d'autres groupes taxonomiques du sol, par exemple la macrofaune de surface, afin d'élargir la représentativité biologique, sous réserve de disposer de référentiels d'interprétation reconnus. Toute donnée ajoutée doit être calibrée sur l'échelle de 1 à 5 de la méthode « 4 fonctions ». L'ajout modifie toutefois le calcul : la calibration employée ici est construite pour la somme de deux notes seulement. Dès qu'un troisième paramètre est retenu, la note de la sous-fonction devient la moyenne des notes des paramètres, conformément à la règle générale du guide. Les résultats ne sont alors plus directement comparables à ceux obtenus avec les deux seuls indicateurs lombriciens, ce qui doit être signalé lors de l'interprétation.

Les données relatives aux périmètres de protection de la biodiversité, zonages réglementaires ou habitats protégés, relèvent d'une autre logique : elles ne décrivent pas une propriété du sol mais le statut juridique ou écologique du site. À l'image de la pente et de la salinité pour le potentiel agronomique, elles gagnent à être restituées sous forme d'une carte d'enjeux superposée, plutôt qu'intégrées à la note de la sous-fonction.

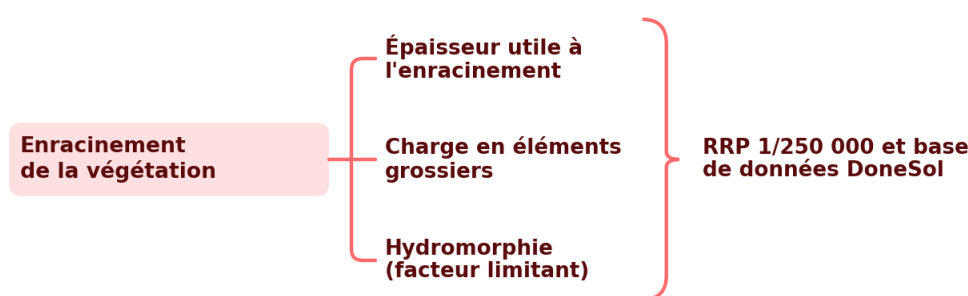
Sous-fonction biologique « enracinement de la végétation »



À retenir

La sous-fonction « enracinement de la végétation » est estimée à partir des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) au 1/250 000 au format DoneSol disponibles sur la quasi-totalité du territoire métropolitain, avec des conditions de diffusion variables selon les régions.

Trois indicateurs sont mobilisés pour évaluer cette sous-fonction : (1) l'épaisseur utile à l'enracinement qui détermine le volume de sol accessible à la végétation, (2) la charge en éléments grossiers de l'horizon de surface et (3) l'hydromorphie des sols, qui peut limiter ou interrompre la prospection racinaire (Figure 38). Les deux premiers sont ceux que la méthode MUSE retient pour le potentiel agronomique ; l'hydromorphie, que MUSE ne retient pas, est ajoutée ici comme facteur limitant propre à l'enracinement (Branchu et al. 2022). À noter que ce dernier indicateur n'est pas pertinent pour la végétation hygrophile inféodée aux zones humides.



L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note d'enracinement.

Figure 38. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « enracinement de la végétation » à partir des bases de données pédologiques (d'après Branchu et al. 2022). À noter que dans DoneSol, l'indicateur « Épaisseur utile à l'enracinement » correspond à la variable « profondeur de sol » qu'il faut plafonner à 120 cm (voir ANNEXE 7).

Ces trois indicateurs sont évalués à partir des données pédologiques disponibles dans DoneSol, en les rattachant aux Unités Cartographiques de Sol (UCS) correspondantes. La note de la sous-fonction « enracinement de la végétation » est la moyenne des notes de l'épaisseur utile à l'enracinement et de la charge en éléments grossiers, plafonnée par la note d'hydromorphie : un sol profond et peu caillouteux, mais engorgé, ne peut pas obtenir une note supérieure à celle de son hydromorphie. Plus cette note est élevée, plus les conditions pédologiques sont favorables à un enracinement profond et fonctionnel sur l'unité de surface considérée.

Fonction 2 : fonction climatique

Sous-fonction climatique « stock de carbone »



À retenir

La sous-fonction « stock de carbone » est évaluée à l'aide des données issues de l'outil ALDO, développé par l'ADEME. Cette évaluation repose sur une estimation dérivée de données nationales (RMQS), agrégées à l'échelle d'un Établissement Public de Coopération Intercommunale (EPCI). Elle ne correspond donc pas à une mesure directe de la teneur réelle en carbone des sols.

Les informations utilisées pour le calcul de cette sous-fonction reposent sur deux entrées principales : (1) le type d'occupation du sol, renseigné selon la nomenclature Corine Land Cover, OCS GE, OCS GE 2 ou toute autre nomenclature utilisée localement, et (2) l'EPCI de rattachement. À partir de ces entrées, l'outil ALDO fournit un stock de référence de carbone organique des sols, exprimé en tonnes de carbone par hectare (tC/ha), sur une profondeur de 30 cm.

Ce stock est ensuite traduit en une note comprise entre 1 et 5 selon le référentiel fixé par la méthode MUSE. Plus le stock de carbone estimé est important, plus la note est élevée, et plus la sous-fonction « stock de carbone » s'exprime sur une unité de surface donnée.

La figure suivante présente l'indicateur utilisé pour le calcul de cette sous-fonction (Figure 39).

Stock de carbone

**Stock de carbone sur 0-30 cm
(ou sur la totalité du profil)**

**Outil ALDO (ADEME),
selon l'occupation du sol
et l'EPCI**

Figure 39. Présentation de l'indicateur utilisé dans l'approche 1 pour l'évaluation de la sous-fonction « stock de carbone » à partir des données issues de l'outil ALDO, lui-même fondé sur les données du RMQS (d'après Branchu et al. 2022).

Le stock est estimé sur les 30 premiers centimètres, les référentiels d'interprétation des stocks de carbone sur la totalité du profil étant moins aboutis que ceux disponibles pour les 30 premiers centimètres.

Fonction 3 : fonction nutritive

Sous-fonction nutritive « fourniture en nutriments »

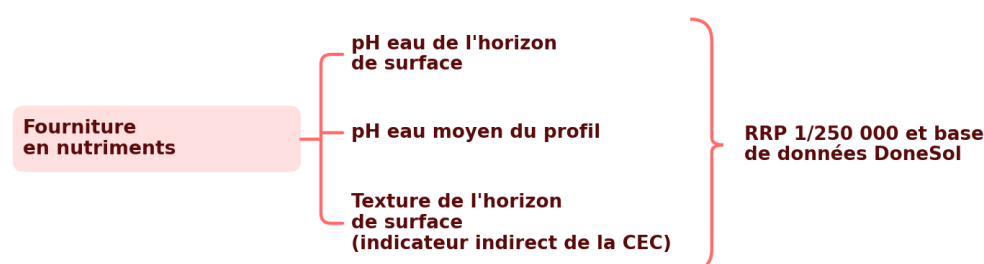


À retenir

La sous-fonction nutritive « fourniture en nutriments » est calculée à partir des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) au 1/250 000 au format DoneSol disponibles sur la quasi-totalité du territoire métropolitain.

Les indicateurs considérés pour calculer l'indice de cette sous-fonction proviennent des données quantitatives et qualitatives brutes au format DoneSol. Ces données sont transformées en indicateurs selon des classes en général comprises entre 1 et 5. Deux indicateurs sont retenus ici : le pH (eau) et la texture de l'horizon de surface, cette dernière servant d'indicateur indirect de la capacité d'échange cationique (CEC). Le pH (eau) est lui-même apprécié par deux critères, notés chacun de 0,5 à 2,5 : le pH (eau) de l'horizon de surface, qui traduit l'effet des pratiques culturales, et le pH (eau) moyen du profil, pondéré par l'épaisseur des strates et calculé hors matériau parental. Leur somme donne une note de pH (eau) comprise entre 1 et 5. La note de la sous-fonction est la moyenne de la note de pH (eau) et de la note de texture, également comprise entre 1 et 5 (Figure 40). Plus cette note est élevée, plus la capacité du sol à fournir des nutriments à la végétation s'exprime sur l'unité de surface considérée. Les grilles de conversion des paramètres en notes figurent en ANNEXE 7²⁶.

La figure suivante présente les indicateurs utilisés pour le calcul de cette sous-fonction (Figure 40).



Les notes du pH de surface et du pH moyen du profil sont sommées pour donner une note de pH de 1 à 5 (méthode MUSE).

Figure 40. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « fourniture en nutriments » (d'après Branchu et al. 2022) : pH (eau) de l'horizon de surface, pH (eau) moyen du profil et texture de l'horizon de surface.

La texture de l'horizon de surface sert d'indicateur indirect de la capacité d'échange cationique (Seybold et al. 2005). La texture est classée selon le triangle de l'Aisne, ou à défaut celui du GEPPA.

Fonction 4 : fonction hydrique

Sous-fonction hydrique « infiltration de l'eau »



À retenir

La sous-fonction hydrique « infiltration de l'eau » est calculée à partir des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) au 1/250 000 au format DoneSol, disponibles sur la quasi-totalité du territoire métropolitain. Trois de ses quatre paramètres sont lus directement dans la base ; la conductivité hydraulique à saturation, elle, est estimée par une fonction de pédotransfert appliquée à ces mêmes données.

Les indicateurs utilisés pour le calcul de l'indice de cette sous-fonction proviennent des données quantitatives et qualitatives brutes au format DoneSol. Ces données sont transformées en notes selon des classes en général comprises entre 1 et 5. La note de la sous-fonction est la moyenne, à poids égal, des notes des quatre paramètres, arrondie sur l'échelle de 1 à 5. Plus la note est élevée, plus la sous-fonction « infiltration de l'eau » s'exprime sur l'unité de surface considérée.

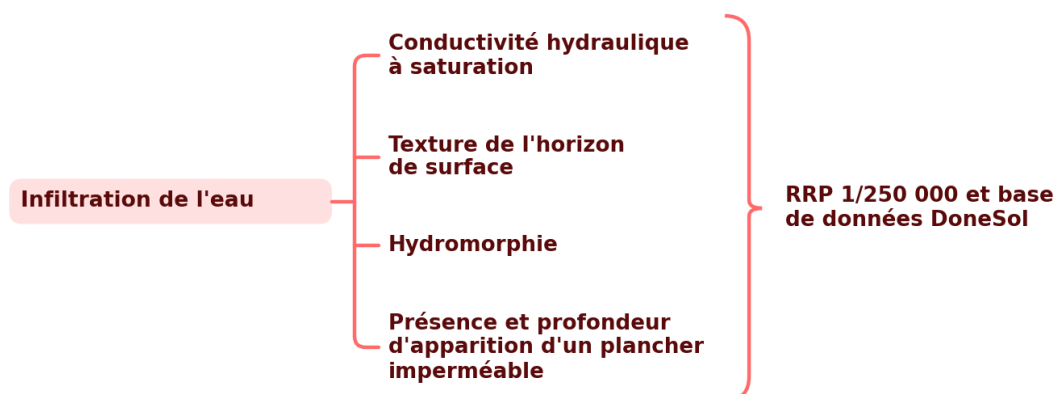
Comme dans la méthode MUSE, un indicateur très défavorable est déclassant : un plancher imperméable à moins de 25 cm, une texture de surface argileuse, une hydromorphie apparaissant avant 25 cm ou une

²⁶ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

conductivité hydraulique à saturation inférieure à 10^{-7} m/s place le sol dans la classe d'infiltration très faible, quelle que soit la note des autres paramètres. Il en va de même pour les HISTOSOLS et les RÉDUCTISOLS. Les grilles de conversion des paramètres en notes figurent en ANNEXE 7²⁷.

La pente n'entre pas dans la notation, alors qu'elle conditionne le partage entre infiltration et ruissellement : elle doit être considérée en parallèle, à partir d'un relevé sur le terrain ou d'une carte des pentes, pour interpréter le résultat.

La figure suivante présente les indicateurs utilisés pour le calcul de l'indice de cette sous-fonction (Figure 41).



Un indicateur très défavorable est déclassant : il place le sol dans la classe d'infiltration très faible, quelle que soit la note des autres indicateurs.

Figure 41. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « infiltration de l'eau » (d'après Branchu et al. 2022).

La texture est classée selon le triangle de l'Aisne, ou à défaut celui du GEPPA.

²⁷ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

Sous-fonction hydrique « stockage et transfert de l'eau à la plante »



À retenir

La sous-fonction hydrique « stockage et transfert de l'eau à la plante » est calculée à partir des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) au 1/250 000 au format DoneSol, disponibles sur la quasi-totalité du territoire métropolitain. Elle repose sur un seul indicateur, la réserve utile, estimée par une fonction de pédotransfert.

Cette sous-fonction est renseignée par la réserve utile du sol. Celle-ci n'est pas mesurée mais calculée par classes de pédotransfert, à partir de la classe texturale, de l'épaisseur des horizons et de la charge en éléments grossiers de chaque strate, cumulées sur la profondeur du sol dans la limite de 120 cm.

Dans le cas de cette sous-fonction spécifiquement, la texture, l'épaisseur et les éléments grossiers ne sont donc pas notés séparément : ils alimentent le calcul de la réserve utile, seule notée. Sa note, comprise entre 1 et 5, est obtenue à partir de la grille donnée en ANNEXE 7²⁸. Plus la note est élevée, plus la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » s'exprime sur l'unité de surface considérée.

La figure suivante présente les indicateurs utilisés pour le calcul de l'indice de cette sous-fonction (Figure 42).

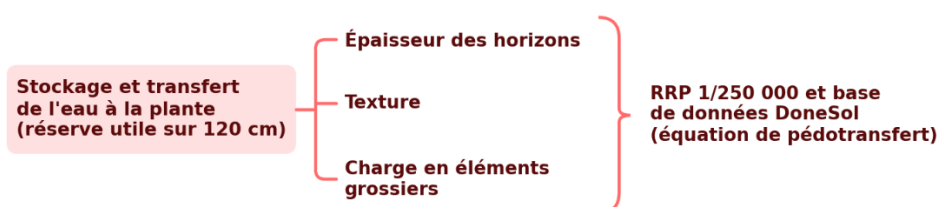


Figure 42. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » (d'après Branchu et al. 2022). La texture est classée selon le triangle de l'Aisne, imposé par la méthode de pédotransfert retenue.

²⁸ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

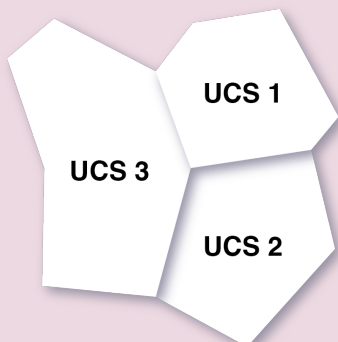
Encadré 9. Démarche globale d'évaluation des fonctions écologiques des sols : exemple de la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante »

Comment noter un paramètre à partir des données de la base de donnée DoneSol

Notation de l'indicateur de la sous fonction « Stockage et transfert de l'eau à la plante » à partir des données de la base de données DoneSol

Cet exemple présente le calcul de l'indicateur de la sous-fonction « Stockage et transfert de l'eau à la plante » par la méthode d'agrégation par moyenne pondérée par la surface (voir chapitre 2, section 1). D'autres méthodes peuvent être utilisées comme l'agrégation par dominance ou par la moyenne.

1 Calcul à l'échelle de l'Unité Typologique des Sols (UTS)

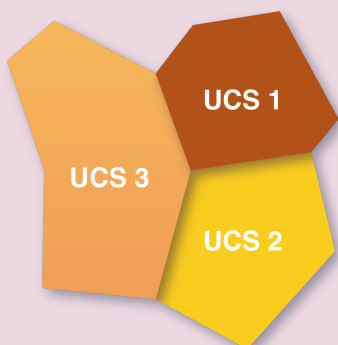


UCS	UTS	%	RU (mm)	Note
1	11	35	52	2
1	12	40	170	4
1	13	25	60	2
2	35	10	150	4
2	37	90	25	1
3	2	100	55	2

Pour l'exemple présenté, le RU est réparti suivant 5 notes :

- | | | |
|----------------|-----------------|------------|
| 1 0 à 50 mm | 3 100 à 150 mm | 5 >200 mm |
| 2 50 à 100 mm | 4 150 à 200 mm | |

2 Représentation à l'échelle de l'Unité Cartographique des Sols (UCS)



UCS	Valeur	Ecart type	Note
1	101,2	66	3
2	37,5	88	1
3	55	0	2

1. Calcul des valeurs du paramètre
2. Affectation d'une note
3. Cartographie

Exemple de calcul de la sous-fonction pour l'UCS 1 :

$$52 \times 35\% + 170 \times 40\% + 60 \times 25\% = 101,2 \text{ mm}$$

Le Réservoir utilisable (RU) calculé par la moyenne pondérée des UTS composant l'UCS est de **101,2 mm**, ce qui correspond à un **note de 3**.

La sous-fonction « Stockage et transfert de l'eau à la plante » est calculée par la moyenne pondérée des UTS composant l'UCS. Le résultat est de **101,2 mm**, ce qui correspond à une **note de 3**.

Indice de multifonctionnalité

L'indice de multifonctionnalité est la somme, à l'échelle des UCS, des notes des six sous-fonctions décrites ci-dessus, sans pondération : il est compris entre 6 et 30.

Deux méthodes de classement peuvent ensuite être utilisées pour traduire cette somme en cinq niveaux.

La première consiste à utiliser sous **SIG les seuils naturels de Jenks**. Cette méthode permet de classer les valeurs continues (comme les indices de multifonctionnalité) en classes homogènes, tout en minimisant les différences internes à chaque classe et en maximisant les différences entre classes.

La seconde consiste à appliquer des seuils fixes prédéfinis : ces seuils sont génériques, indépendants du territoire ; ils correspondent, pour six sous-fonctions, aux mêmes notes moyennes par sous-fonction (2 ; 2,67 ; 3,33 ; 4) que les seuils du Tableau 8 pour le potentiel agronomique (trois sous-fonctions), ce qui garantit la cohérence entre les deux indices.

- > Indice de multifonctionnalité < 12 : Multifonctionnalité très faible (note 1) ;
- > Indice de multifonctionnalité ≥ 12 et < 16 : Multifonctionnalité faible (note 2) ;
- > Indice de multifonctionnalité ≥ 16 et < 20 : Multifonctionnalité moyenne (note 3) ;
- > Indice de multifonctionnalité ≥ 20 et < 24 : Multifonctionnalité forte (note 4) ;
- > Indice de multifonctionnalité ≥ 24 : Multifonctionnalité très forte (note 5).

Dans le contexte de la méthode « 4 fonctions », l'approche par les seuils de Jenks présente plusieurs avantages :

- > **Objectivité statistique** : les seuils ne sont pas choisis arbitrairement mais calculés à partir de la distribution réelle des valeurs observées sur le territoire étudié ;
- > **Adaptabilité territoriale** : elle tient compte de la **variabilité locale** des sols et des conditions environnementales, permettant d'obtenir des classes pertinentes pour chaque territoire ;
- > **Amélioration de la lecture cartographique** : les classes ainsi définies offrent une **progression plus lisible et cohérente** entre zones de faible et de forte multifonctionnalité.

La méthode alternative, fondée sur des **seuils fixes prédéfinis** (12, 16, 20 et 24), permet une comparabilité entre territoires et entre campagnes d'évaluation, mais au prix d'une simplification statistique : elle ne tient pas compte de la distribution réelle des valeurs et peut parfois regrouper artificiellement des zones contrastées.

Ainsi, les seuils de Jenks sont particulièrement adaptés à une analyse exploratoire locale, tandis que les seuils fixes conviennent mieux à une approche comparative et standardisée à petite échelle (échelle régionale par exemple).

Selon les enjeux territoriaux, il est également possible de privilégier certaines fonctions (par exemple, la préservation des zones à forte biodiversité) en produisant des cartographies monofonctionnelles ou encore de donner un poids plus ou moins important à une ou plusieurs fonctions pour leur agrégation en un indice global. Dans ce cas, l'indice ne varie plus de 6 à 30 et les seuils fixes (12, 16, 20 et 24) ne s'appliquent plus : il convient alors d'utiliser la méthode des seuils naturels de Jenks, qui s'adapte à la distribution réelle des valeurs quelle que soit leur amplitude.



Figure 43. Présentation de l'approche 1 pour établir une note de multifonctionnalité. Cette méthode est applicable à l'échelle régionale principalement.

Intérêts et limites

Cette approche présente plusieurs intérêts :

- > Mobilisation de données pédologiques harmonisées, issues d'observations déjà bancarisées ;
- > Sensibilisation d'un grand nombre d'acteurs, à toutes les échelles de décision, à la diversité des sols et de leurs fonctions écologiques : la multifonctionnalité fonde une vision du sol en volume (3D), et non plus seulement en surface (2D) ;
- > Méthode reproductible sur l'ensemble du territoire français.

Différentes limites méthodologiques et biais sont néanmoins susceptibles d'influencer l'interprétation des résultats :

- > **Données pédologiques bancarisées (DoneSol – IGCS) :** les données proviennent de mesures de terrain réalisées par plusieurs générations de pédologues depuis des décennies. Certaines sont donc anciennes et ne reflètent pas l'évolution récente des usages ou des pratiques culturales. Cette ancienneté peut induire un biais temporel, notamment dans les secteurs où les dynamiques d'occupation du sol ont été marquées (urbanisation, remembrement, changement de culture, etc.) ; ce biais concerne surtout les sols remaniés ou artificialisés depuis les levés ; il affecte peu les propriétés pérennes des sols en place, dont la validité reste, comme indiqué au Tableau 6, de plusieurs décennies ;
- > **Paramètres estimés par équation de pédotransfert :** la conductivité hydraulique à saturation est calculée à partir de l'équation de pédotransfert (Szabó et al. 2021) et le réservoir utilisable est calculé à partir de l'équation de pédotransfert (Bruand et al. 2004). Ces modèles, bien que robustes, reposent sur des relations statistiques établies à partir d'un jeu de données de référence, et non sur des mesures locales. Ils introduisent donc une incertitude liée à la variabilité des contextes pédoclimatiques et aux conditions de calibration initiales ;

- > **Données de biodiversité estimées à partir du mode d'occupation du sol (OPVT) : les données de l'Observatoire** participatif des vers de terre (OPVT) proviennent d'observations réalisées entre 2006 et 2015, localisées notamment en Bretagne. Leur représentativité spatiale est donc limitée à certaines conditions pédologiques et climatiques, ce qui peut biaiser l'extrapolation des résultats à d'autres territoires (par ex. zones méditerranéennes, montagnardes ou continentales) ;
- > **Stocks de carbone estimés à partir de l'occupation du sol par zone pédoclimatique et à l'échelle de l'EPCI (ALDO / RMQS) : les valeurs de stock** de carbone issues de l'outil ALDO sont extrapolées à partir des données du RMQS, prélevées sur un maillage national de 16 x 16 km. Cette maille relativement large engendre une résolution spatiale limitée, qui peut masquer la variabilité fine des sols à l'échelle locale. De plus, l'extrapolation repose sur des hypothèses « d'homogénéité pédologique et d'usage du sol ».

La méthode utilisée consiste à agréger les Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS), par dominance ou par moyenne pondérée. Chacune entraîne ses propres biais.

- > **Par dominance** : perte d'information et effet de seuil. Seule la note la plus représentée est retenue, si bien que les surfaces portant une autre note, qui peuvent approcher la moitié de l'UCS, disparaissent de la carte : le pourcentage de représentation doit donc accompagner la restitution. La note bascule en outre dès que les pourcentages s'inversent, et deux UCS de composition voisine peuvent recevoir des notes éloignées ;
- > **Moyenne pondérée** : perte d'hétérogénéité interne. L'agrégation lisse les contrastes entre UTS et minore les extrêmes : une UCS composée pour moitié de sols très favorables et pour moitié de sols très dégradés ressort moyenne ;
- > **Effet d'échelle, commun aux deux méthodes.** L'agrégation suppose une homogénéité fonctionnelle à l'échelle de l'UCS, alors que certaines sous-fonctions, comme l'infiltration de l'eau ou le stock de carbone, varient fortement en son sein.

Enfin, de manière générale, les fonctions évaluées restent déconnectées des pressions et des pratiques actuelles pouvant être à l'origine de dégradations récentes (pollutions, intrants phytosanitaires, travail du sol, etc.). Cette limite réduit clairement l'opérationnalité directe des cartes à grande échelle : la pratique du labour induit par exemple un déstockage du carbone en surface, tandis que l'exportation des résidus de culture réduit la teneur en matière organique, sans que ces effets soient représentés.

Une partie de ces limites d'échelle peut être atténuée par la descente d'échelle des cartes pédologiques, présentée en introduction des trois approches : les propriétés du sol y sont estimées par modélisation statistique à une résolution plus fine que le 1/250 000, au prix d'une incertitude qu'il faut expliciter et, autant que possible, contrôler par quelques observations de terrain (voir exemple sur la métropole de Rennes).

Exemples d'application

 Par souci de lisibilité, les exemples sont volontairement synthétiques : seuls apparaissent les éléments essentiels à la compréhension de la démarche. **Des fiches exemples plus détaillées constituent un document indépendant, mis à disposition en complément du guide.**

Exemple d'application de l'approche 1 sur le territoire du SCoT RIVES DU RHÔNE



Présentation du territoire d'étude et centralisation des données

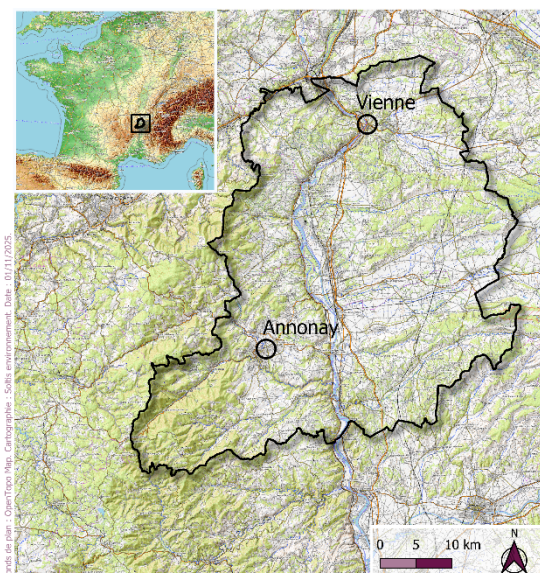
Nom du territoire : Syndicat Mixte des Rives du Rhône (SMRR)

Superficie : 1 866 km²

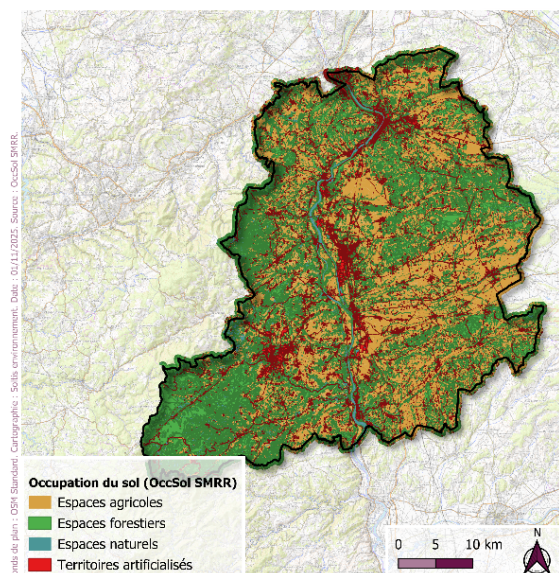
Contexte de l'étude : Le SMRR souhaite disposer d'une cartographie à grande échelle de la multifonctionnalité des sols pour identifier les zones à enjeu au regard de la stratégie ZAN et des zones de renaturation préférentielles. Il souhaite ensuite réaliser des sondages agro-pédologiques dans les secteurs à enjeu pour affiner les arbitrages d'aménagement.

Type de données mobilisées	Source	Résolution
Données pédologiques	RRP sur 5 départements (2000)	1/250 000
Occupation du sol	Occupation du sol OccSol du SMRR millésimes 1990 et 2020	1/7 000

Localisation du territoire d'étude



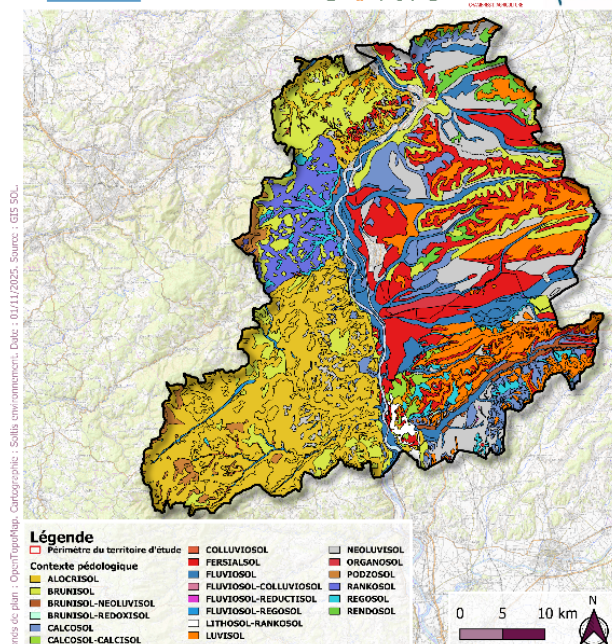
Occupation du sol



Contexte pédologique



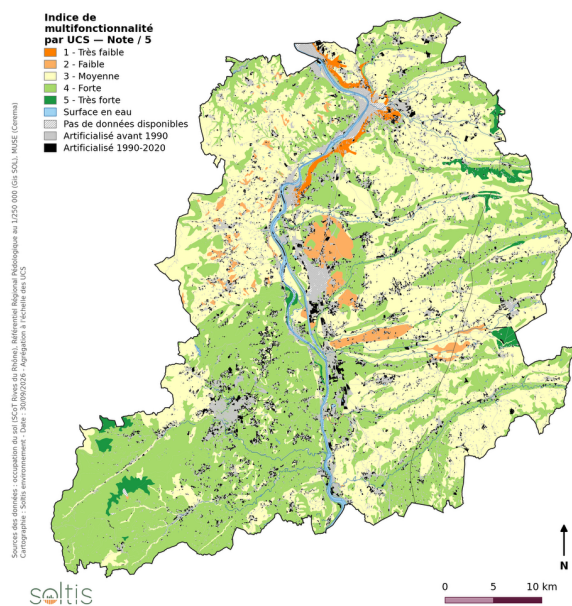
Cette carte montre la grande diversité des types de sols du territoire des Rives du Rhône (Référentiel Régional Pédologique – RRP au 1/250 000).



EXEMPLES D'UTILISATION OPÉRATIONNELLE DES RÉSULTATS

La quantification de l'artificialisation repose sur la comparaison des modes d'occupation du sol établis par le territoire pour 1990 et 2020 ; la fonctionnalité des sols est issue du Référentiel Régional Pédologique (RRP).

Évaluation de l'artificialisation des terres à fort potentiel fonctionnel entre 1990 et 2020



Les surfaces artificialisées entre 1990 et 2020, représentées en noir, sont superposées à la carte de multifonctionnalité des sols agrégée à l'échelle des UCS ; les sols déjà artificialisés avant 1990 figurent en gris.

Entre 1990 et 2020, 5 624 hectares ont été artificialisés sur le territoire, dont 92 % étaient des espaces agricoles en 1990. Cela représente une perte fonctionnelle potentielle importante*.

En croisant ces surfaces avec la note de multifonctionnalité de l'UCS avant artificialisation, on estime que :

- > 49 % de l'artificialisation a porté sur des sols à multifonctionnalité forte à très forte (notes 4 et 5) ;
- > 46 % a porté sur des sols à multifonctionnalité moyenne, notée 3 ;
- > 5 % a porté sur des sols à multifonctionnalité faible à très faible, notée 1 ou 2.

Ainsi, près de la moitié des surfaces artificialisées entre 1990 et 2020 (2 756 ha, soit 49 %) présentait une multifonctionnalité forte à très forte, et 95 % une multifonctionnalité au moins moyenne.

**Hypothèses de travail : la note de multifonctionnalité est celle de l'UCS. Les sous-fonctions « enracinement de la végétation », « fourniture en nutriments », « stockage et transfert de l'eau à la plante » et « infiltration de l'eau » sont établies à partir des propriétés pérennes du sol (RRP, DoneSol) et ne dépendent pas de l'occupation du sol. Les sous-fonctions « stock de carbone » et « support des organismes du sol » dérivent de l'occupation du sol, que seul le millésime 2020 renseigne au niveau de détail requis. Pour reconstituer l'état de 1990, on suppose que chaque surface artificialisée portait alors la composition de l'espace agricole ou forestier qui subsiste aujourd'hui dans la même commune, affectée des notes actuelles de carbone et de biodiversité. Cette hypothèse suppose que l'urbanisation a consommé chaque type de terre en proportion de sa présence actuelle.*

Exemple d'application de l'approche 1 sur le territoire de RENNES MÉTROPOLE



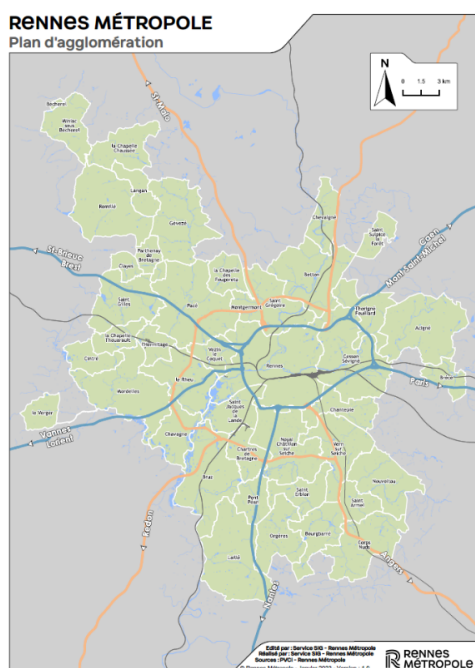
Présentation du territoire d'étude et centralisation des données

Nom du territoire : Rennes Métropole

Superficie : 711 km²

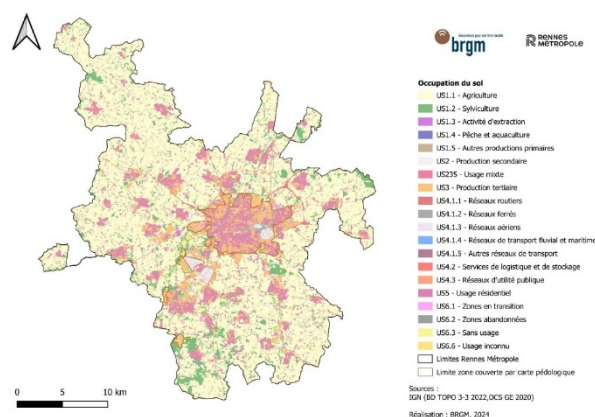
Contexte de l'étude : Définition d'une trajectoire ZAN à l'échelle du territoire ainsi que d'un programme d'actions à prioriser pour lutter contre l'artificialisation, en identifiant les sols à préserver, à renaturer ou à densifier. Alimentation des travaux relatifs aux enjeux sur le climat, l'énergie, l'économie circulaire, la renaturation, le plan alimentaire territorial, l'eau et la biodiversité, le foncier et les jumeaux numériques.

Type de données mobilisées	Source	Résolution
Données pédologiques	Référentiel Régional Pédologique de Bretagne avec descente d'échelle à l'UTS (Institut Agro Rennes Angers) et données DoneSol	Mailles de 50 m ; données par UTS
Occupation du sol	OCS GE 2020, RPG 2020 et BD TOPO (IGN)	1/5 000
Données thématiques	Capacité d'infiltration : projet Phoebus (BRGM) ; stock de carbone : ALDO (ADEME) ; vers de terre : statistiques OPVT (ONB, 2015)	1/50 000 ; EPCI ; nationale



Localisation du territoire d'étude

Occupation du sol



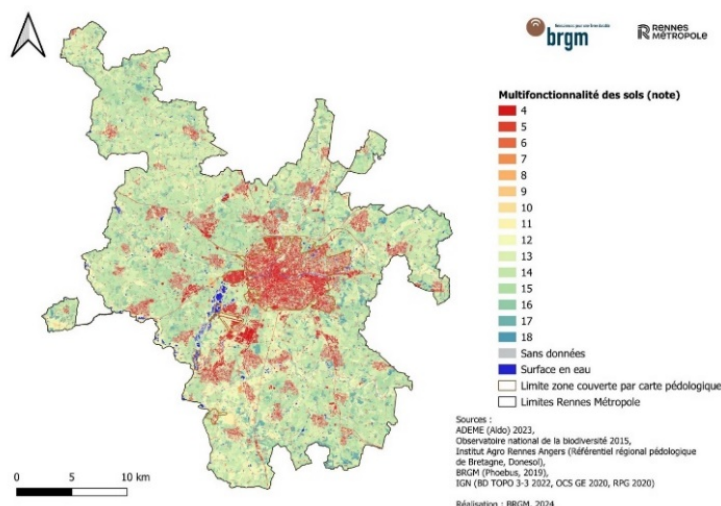
Évaluation de la multifonctionnalité des sols avec l'approche 1

Les cartes ci-dessous ont été établies à partir i) du Référentiel Régional Pédologique de Bretagne après descente d'échelle (mailles de 50 m de côté) par désagrégation à l'aide de variables décrivant le milieu (relief, géologie, occupation du sol) et des caractéristiques des sols associées (issues de DoneSol), ii) de l'occupation du sol (OCS GE 2020 et RPG 2020), des statistiques de stockage de carbone (ALDO) et sur les vers de terre (OPVT), ainsi que de la carte d'infiltrabilité établie selon la méthode Phoebus (BRGM). Le rapport complet (Le Guern et al. 2025) est accessible en ligne sur Infoterre.

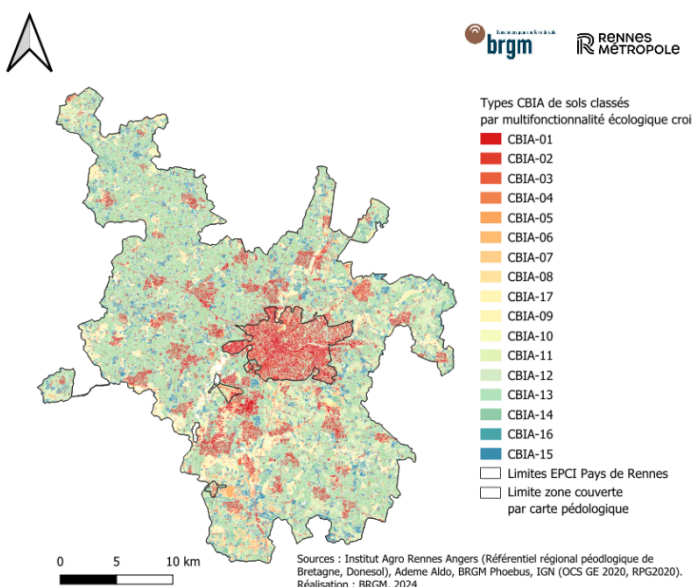
Dans cet exemple, l'indice de multifonctionnalité est la somme des notes des quatre fonctions et varie donc de 4 à 20 ; les valeurs observées sur la métropole rennaise s'étendent de 4 à 18. Une somme inférieure à 6 signifie qu'au moins trois fonctions sont dans la classe très faible ; une somme supérieure à 16 implique qu'au moins trois fonctions ont un niveau fort à très fort.

Le cumul des notes 13 à 15 représente 66 % du territoire ; ces notes sont réparties de manière assez uniforme sur l'ensemble du territoire. À l'inverse, une multifonctionnalité très faible (somme de 4 en rouge) concerne 14 % du territoire : il s'agit essentiellement des zones imperméabilisées.

Carte de multifonctionnalité des sols



Carte de typologie de sols multifonctionnels



La typologie de sols multifonctionnels classe les sols selon les combinaisons de notes des quatre fonctions (C : stock de carbone ; B : biodiversité ; I : infiltration ; A : potentiel agronomique).

Le type CBIA-12 (stock de carbone estimé faible, stock de biodiversité et valeur agronomique estimés forts, capacité d'infiltration estimée moyenne à forte) couvre 48 % du territoire. Viennent ensuite CBIA-01 (toutes fonctions faibles, sols imperméabilisés) sur 11 % du territoire ; CBIA-08 (stock de carbone et capacité d'infiltration faibles, stock de biodiversité et valeur agronomique estimés forts), 8,2 % ; CBIA-10 (stock de carbone faible, stock de biodiversité et capacité d'infiltration forts, valeur agronomique moyenne à faible), 8,1 % ; CBIA-15 (toutes fonctions fortes, capacité d'infiltration moyenne à forte), 7,3 % ; CBIA-13 (stock de carbone et capacité d'infiltration moyens à forts, stock de biodiversité moyen, valeur agronomique forte), 7,1 %. Les autres types représentent chacun entre 0,007 et 2,7 % de la surface du territoire.

EXEMPLES D'UTILISATION OPÉRATIONNELLE DES RÉSULTATS

Une notation de l'usage du sol (surfaces artificialisées notées 0, surfaces non artificialisées notées de 10 à 15, avec des bonus de +1 à +2 pour les surfaces en agriculture biologique, les zones humides et les infrastructures bleues et vertes) est croisée avec la carte de multifonctionnalité des sols.

La note globale obtenue sert à tester des scénarios de planification visant le zéro artificialisation nette tout en intégrant la qualité des sols, dans une logique de dégradation neutre des terres. La typologie de sols multifonctionnels alimente par ailleurs les travaux du territoire relatifs au climat, à l'énergie, à l'économie circulaire, à la renaturation, au plan alimentaire territorial, à l'eau et à la biodiversité, au foncier et aux jumeaux numériques.

Source : Le Guern et al. (2025), rapport BRGM/RP-74153-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-74153-FR.pdf> ; cartes BRGM, 2024.

3.2 APPROCHE À PARTIR DE DONNÉES LOCALES ET INVESTIGATION DE TERRAIN



À retenir

Cette deuxième approche (approche 2) repose sur des données locales existantes ou sur l'acquisition d'observations, de mesures de terrain et d'analyses en laboratoire. Elle décrit plus finement les propriétés pérennes des sols, à l'échelle de la parcelle, et y ajoute leurs propriétés dynamiques (pH, matière organique, nutriments, état biologique des sols). Elle renseigne donc à la fois sur le potentiel des sols et sur leur état actuel, à l'échelle du PLU(i) par exemple ou du projet d'aménagement.

À l'échelle de la planification infrarégionale des Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) ou des Plans Locaux d'Urbanisme (PLUi, PLU), voire à l'échelle du projet d'aménagement, les données issues du Référentiel Régional Pédologique (RRP) ne sont pas suffisantes pour évaluer les fonctions écologiques des sols. En effet, la résolution cartographique à petite échelle (1/250 000 du RRP, ou cartes au 1/100 000 ou au 1/50 000) ne permet pas de prendre en compte les variations locales et parcellaires des propriétés du sol. Or, ce sont précisément ces variations fines de la distribution spatiale des sols et de leurs propriétés qui conditionnent leurs fonctions écologiques. C'est pourquoi il est nécessaire de produire des cartes de sol à grande échelle (du 1/25 000 au 1/5 000) pour éclairer les décisions des acteurs, qu'il s'agisse d'établir les documents d'urbanisme réglementaire ou de définir les projets opérationnels.

Dans ce contexte, l'approche 2 est recommandée (Figure 44). Elle vise à intégrer les spécificités locales des sols et leur variabilité en mobilisant un jeu de données plus précis, établi sur la base d'investigations pédologiques de terrain, combinées à des données environnementales sur l'emprise d'étude et, le cas échéant, à des ressources pédologiques déjà disponibles à plus petite échelle (ANNEXE 4). Cette approche permet d'adapter l'évaluation des fonctions des sols aux enjeux écologiques identifiés localement et aux besoins spécifiques du projet de territoire ou du projet d'aménagement.

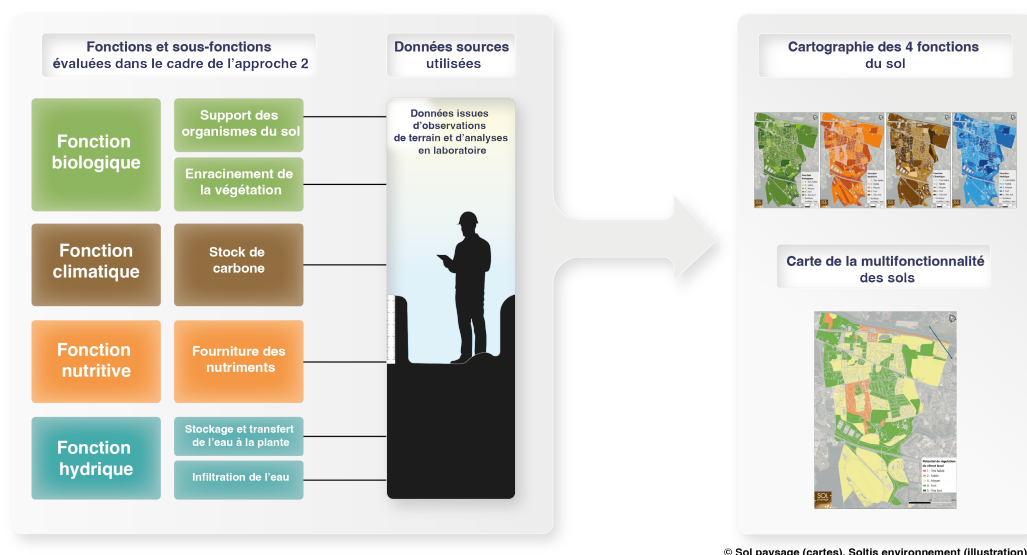


Figure 44. Présentation de l'approche 2 applicable aux échelles infra-régionale et projet.

Comme dans le cas de l'approche 1, les quatre fonctions écologiques peuvent être évaluées indépendamment les unes des autres ou conjointement pour aboutir à des indices synthétiques de multifonctionnalité des sols (potentiel agronomique, potentiel d'adaptation aux effets du changement climatique, etc.).

Comme pour l'approche 1, chaque fonction ou sous-fonction est évaluée distinctement à partir de la mesure de plusieurs paramètres traduits en indicateurs notés de 1 à 5. Ils font ensuite l'objet d'une agrégation fondée sur une moyenne arithmétique (pondération équivalente des paramètres), aboutissant à un **indice de fonction**, allant de 1 à 5. Deux sous-fonctions dérogent à cette règle, comme dans l'approche 1 : pour l'« infiltration de l'eau », un paramètre très défavorable est déclassant ; pour l'« enracinement de la végétation », la note d'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne mais la plafonne (voir ci-après). Selon les moyens mobilisables, le nombre de paramètres entrant dans le calcul fonctionnel peut varier en fonction du niveau d'information disponible et de la complémentarité des indicateurs (voir chapitre 2, section 1).

Une fois les indicateurs choisis, un second arbitrage concerne l'épaisseur et/ou le nombre d'horizons à considérer dans l'évaluation fonctionnelle. Certaines sous-fonctions (par exemple « support des organismes du sol » ou « stock de carbone ») peuvent être évaluées, dans une première approche, à partir de paramètres mesurés sur les premiers horizons (0-30 cm ou 0-50 cm). Pour d'autres fonctions, notamment la sous-fonction « infiltration de l'eau », l'évaluation peut nécessiter d'intégrer un ou plusieurs horizons sous-jacents. Les mesures traduites en indicateur et répétées sur un ou plusieurs horizons supplémentaires constituent alors une évaluation de niveau 2 plus complète. Dans ce cas, le calcul de l'indice qui renseigne la fonction ou la sous-fonction correspond à la moyenne arithmétique des indices obtenus sur chaque horizon.

❗ À retenir

IMPORTANT : l'acquisition sur le terrain des paramètres nécessaires aux indicateurs repose largement sur l'expertise pédologique : description des sols (tarière, fosses), mesures directes et méthodes d'échantillonnage, qui conditionnent la qualité des prélèvements et la fiabilité des analyses en laboratoire.

La densité de sondage dépend de la complexité du terrain. Plus les sols présentent une variation spatiale, plus la densité augmente. À titre indicatif, une densité d'observation pédologique pour 2 échelles spatiales a déjà été référencée (Legros 1996).

Tableau 10. Densité de sondage préconisée en fonction de l'échelle cartographique attendue.

Échelle	Nombre d'ha / sondage	Nombre d'ha / profil
1/10 000	0,5 – 3	10 – 50
1/25 000	5 – 20	50 – 200

Fonction 1 : fonction biologique

Sous-fonction biologique « support des organismes du sol »



À retenir

L'évaluation de la sous-fonction « support des organismes du sol » est construite à deux niveaux : indicateurs de niveau 1 et indicateurs de niveau 2. Les indicateurs de niveau 1 caractérisent les propriétés physico-chimiques « stables » qui déterminent le « potentiel d'habitabilité » des sols pour les organismes qui y vivent : huit paramètres déterminants sont ainsi ciblés.

Les indicateurs de niveau 2 caractérisent soit les effets de l'activité biologique sur la composition de la matière organique ou sur la structure des agrégats, soit l'activité biologique elle-même. On mesure

alors directement les niveaux d'abondance, de diversité ou de biomasse des organismes présents dans le sol. Les réponses des bioindicateurs évoluent tout au long de l'année et leur variabilité spatiale est élevée, ce qui nécessite des protocoles et des calendriers de prélèvement adaptés à chaque bioindicateur : vers de terre, insectes et araignées, nématodes, collemboles, champignons, bactéries, activités enzymatiques, ADNe, etc. (Romain Tscheiller, RMT Bouclage - Fiches Bioindicateurs, 2025).

Indicateurs de niveau 1

Cette sous-fonction intègre à la fois la notion d'habitat (ou habitabilité), entendu comme niche écologique, et celle des organismes qui y vivent (Figure 45).

La granulométrie est la mesure de la taille et de la répartition des particules d'un sol (graviers, sables, limons et argiles). Elle est essentielle car elle influence directement les propriétés physiques et le comportement du sol. Elle constitue la mesure quantitative sur laquelle repose la détermination de la **texture du sol**, cette dernière étant souvent estimée sur le terrain à partir de critères tactiles.

La porosité globale, la structure et le ratio matière organique / argile renseignent sur la qualité de l'habitat physique offert aux organismes du sol, notamment en termes de connectivité porale, de circulation des fluides et d'activité biologique.

L'état de la **porosité globale** du sol est apprécié visuellement sur une fosse pédologique en prenant en compte le mode d'assemblage et l'état interne des mottes, les fissures et macropores d'origine biologique dans chaque horizon du sol. Cette analyse visuelle permet d'évaluer cette propriété du sol en 5 classes : non poreux ou très peu poreux / peu poreux / moyennement poreux / poreux / très poreux.

L'état **structural** des horizons supérieurs s'évalue avec les « méthodes bêche » : VESS (Visual Evaluation of Soil Structure), TI-Test (Terres Inovia test) ou VSA (Visual Soil Assessment).

Enfin, **trois paramètres chimiques influencent la répartition et la composition des communautés des organismes du sol** : le pH (eau), la teneur en matière organique et le rapport carbone/azote (C/N). La charge en éléments grossiers, paramètre physique, complète cette liste.

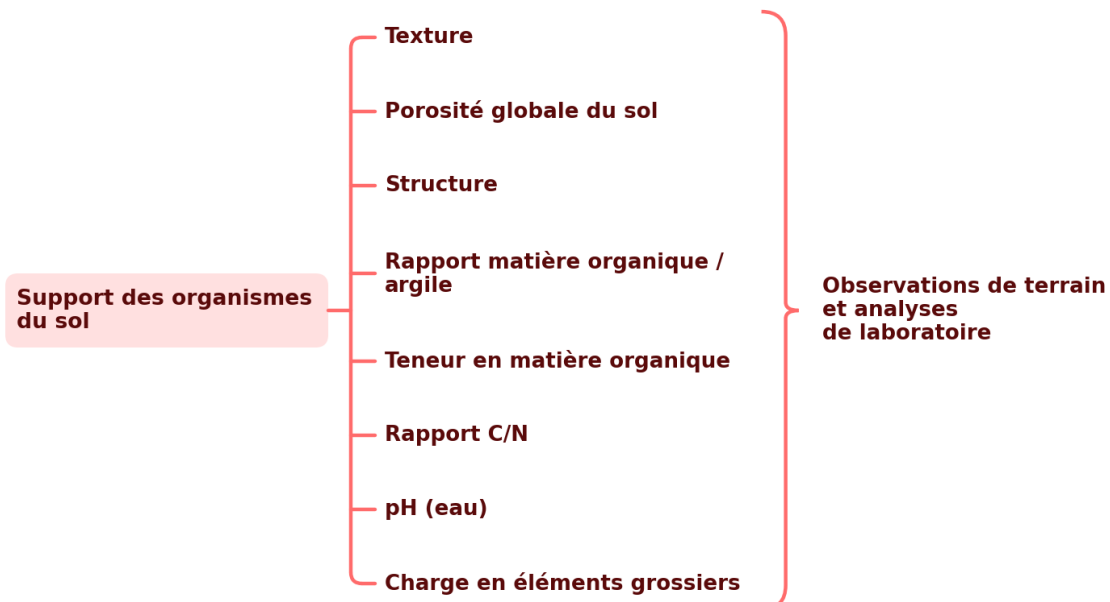


Figure 45. Indicateurs de niveau 1 proposés dans l'approche locale pour évaluer la sous-fonction « support des organismes du sol ».

Exemples d'indicateurs de niveau 2

La **biomasse microbienne** représente la quantité de micro-organismes présents dans le sol (principalement bactéries et champignons). Elle permet de connaître la taille du compartiment microbien du sol. Cette fraction vivante des matières organiques réagit plus rapidement aux modifications de l'environnement que les organismes de grande taille (lombriciens, nématodes), ce qui en fait un indicateur pertinent dans les sols urbains. Elle s'exprime en pourcentage du carbone organique (rapport biomasse microbienne/carbone organique) et témoigne d'un bon potentiel d'activité biologique du sol lorsque ce rapport est compris entre 2 et 4 %. Elle constitue un indicateur biologique fiable, peu coûteux et bénéficiant de références établies. Elle présente généralement une sensibilité plus élevée que la matière organique aux évolutions du fonctionnement du sol.

Le **potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote** peut aussi être un indicateur pertinent dans l'évaluation de la sous-fonction « support des organismes du sol ». Il permet simultanément d'apprécier la quantité et la qualité de la matière organique, la taille et la vitalité de la biomasse microbienne et la capacité du sol à fournir durablement énergie et nutriments aux organismes vivants.

L'analyse du **fractionnement granulométrique de la matière organique, ou celle du carbone actif**, permet de distinguer les fractions labiles, rapidement dégradables et potentiellement nutritives à court terme, des fractions stables, plus résistantes à la décomposition.

L'**indice de battance** évalue la sensibilité de l'horizon de surface à la formation d'une croûte de battance sous l'effet des pluies. Il se calcule à partir de la granulométrie, de la teneur en matière organique et du pH : les sols limoneux, pauvres en argile et en matière organique, y sont les plus sensibles. La formation d'une croûte réduit l'infiltration de l'eau et les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère ; elle constitue à ce titre une contrainte pour les organismes du sol, mais de façon indirecte. Sa mobilisation suppose de tenir compte de l'état de la couverture du sol : l'indice ne s'exprime que sur un sol nu ou faiblement couvert.

Un test de **stabilité structurale** peut être réalisé en laboratoire à coût modéré suivant la méthode Le Bissonnais²⁹ (Le Bissonnais et al. 1995). Il permet d'appréhender la dynamique structurale à l'échelle des agrégats.

Encadré 10. Indicateurs biologiques : une biodiversité des sols qui ne se résume pas à un indicateur unique

La biodiversité des sols est une notion complexe qui comprend des dimensions génétiques, taxonomiques, fonctionnelles et écologiques. Les organismes du sol étant très divers, les méthodes utilisées pour les étudier ne mesurent pas toutes les mêmes aspects de la biodiversité (Geisen et al. 2019, Römcke et al. 2018).

Lorsque les données biologiques manquent, des paramètres comme la matière organique, la texture, la profondeur ou l'occupation du sol peuvent servir de proxys (Pulleman et al. 2012). Cependant, ces paramètres indiquent surtout les conditions potentielles d'habitat et ne permettent pas de mesurer directement la diversité des organismes du sol. De plus, un sol pauvre en nutriments n'est pas nécessairement pauvre en biodiversité, car certaines communautés sont adaptées aux milieux naturellement oligotrophes.

Dans la plupart des cas, connaître le nombre d'espèces présentes dans un sol ne suffit pas pour évaluer correctement la biodiversité d'un sol. Il faut également tenir compte des différences entre les communautés présentes dans les différents sols (biodiversité bêta) (Ranjard et al. 2013). La présence d'espèces rares ou particulières peut aussi donner une grande valeur écologique à un sol, même si le nombre total d'espèces est faible (Griffiths et al. 2016). Les interactions entre organismes, notamment les relations trophiques, la prédation, la compétition et les symbioses, constituent une autre dimension essentielle (Briones 2014). De même, la diversité fonctionnelle (diversité des traits et préférences écologiques) est une approche pertinente pour évaluer la biodiversité des sols (Vincent et al. 2022).

²⁹ https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/04/EGS_2_1_bissonnais.pdf

Ainsi, plusieurs bioindicateurs peuvent être utiles pour évaluer la biodiversité et le fonctionnement des sols. Une bonne évaluation doit donc combiner différents organismes, plusieurs indicateurs à considérer selon les contextes des sols et d'usages.

Sous-fonction biologique « enracinement de la végétation »

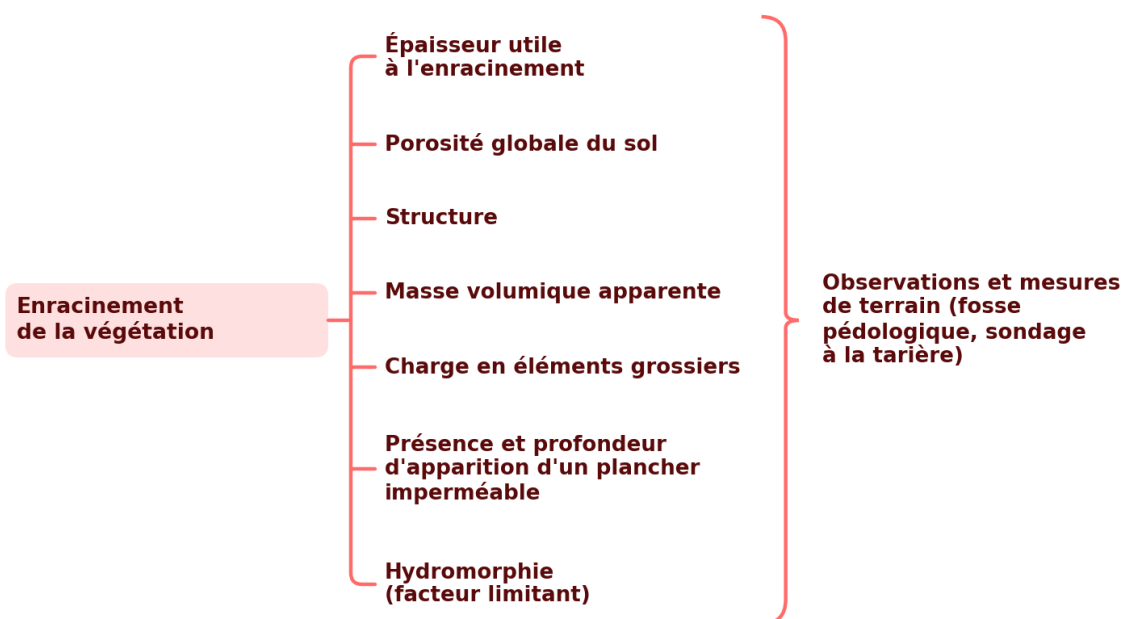


À retenir

La sous-fonction « enracinement de la végétation » est évaluée à partir des seuls paramètres physiques du sol, observés ou mesurés *in situ*. L'évaluation se concentre sur les propriétés conditionnant l'ancrage et le développement racinaire dans les différents horizons, déterminés par l'équilibre air/eau au sein de la porosité du sol.

Indicateurs de niveau 1

La sous-fonction « enracinement de la végétation » est déterminée par la capacité du sol à permettre l'enracinement de la végétation. Elle est approchée au travers de six paramètres physiques du sol (Figure 46) : (1) l'épaisseur utile à l'enracinement, (2) la porosité globale du sol, (3) l'état structural des horizons supérieurs, (4) la masse volumique apparente comme indicateur de la compacité, (5) la charge en éléments grossiers et (6) la présence et profondeur d'apparition d'un horizon dit « imperméable ». Comme dans l'approche 1, l'hydromorphie est prise en compte comme facteur limitant : elle n'entre pas dans la moyenne, mais la note d'enracinement ne peut pas dépasser la note d'hydromorphie. Ce plafonnement ne s'applique pas à la végétation hygrophile des zones humides.



L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note d'enracinement.

Figure 46. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « enracinement de la végétation ». L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note d'enracinement.

Pour la sous-fonction « enracinement de la végétation », aucun indicateur de niveau 2 destiné à des analyses d'approfondissement ne figure dans cette méthode.

Fonction 2 : fonction climatique

Sous-fonction climatique « stock de carbone »



À retenir

La sous-fonction « stock de carbone » est évaluée à partir de l'estimation du stock de carbone contenu dans les 30 premiers centimètres du sol. Ce stock est calculé en multipliant la concentration en carbone organique par la masse de terre fine du volume considéré.

Indicateurs de niveau 1

Le stock de carbone organique correspond à la quantité totale contenue dans un volume de sol donné. Il est généralement exprimé en kgC/m^2 ou en tonnes de carbone par hectare ($1 \text{ kgC/m}^2 = 10 \text{ tC/ha}$), pour une profondeur de référence de 30 cm. Son estimation peut s'appuyer sur une fonction de pédotransfert intégrant plusieurs paramètres descriptifs et analytiques : épaisseur des horizons, proportion d'éléments grossiers, masse volumique apparente et teneur en carbone organique du sol (SOC). Dans ce cas, seul le stock de carbone est renseigné, et non ses flux.

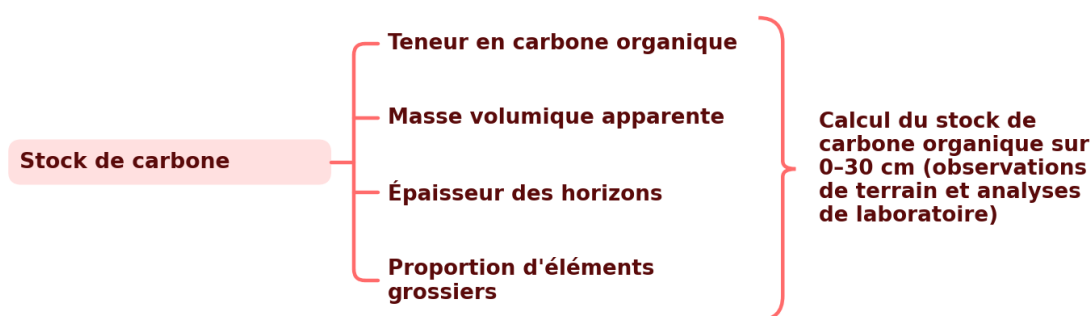


Figure 47. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « stock de carbone ».

Indicateurs de niveau 2

L'évaluation du **stock de carbone peut être réalisée sur l'épaisseur totale** du sol étudié ou standardisée sur un mètre, ce qui est particulièrement pertinent dans les contextes présentant une forte proportion de sols organiques ou tourbeux.

Le flux de carbone, qui renseigne sur le recyclage de la matière organique, nécessite des investigations complémentaires. Dans ce cas, des indicateurs caractérisant la stabilité du carbone peuvent être mobilisés, notamment le **fractionnement granulométrique de la matière organique**, permettant de distinguer les fractions labiles et stables. La **méthode Rock-Eval**³⁰ offre également une caractérisation fine de la stabilité thermique et chimique de la matière organique, et constitue ainsi un outil pertinent pour appréhender la dynamique du stock de carbone à long terme (Sebag et al. 2016, Cécillon et al. 2021).

³⁰ ROCK-EVAL : au service de l'étude des sols pour l'enjeu climatique - <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/breve/rock-evalr-au-service-letude-des-sols-lenjeu-climatique>

Fonction 3 : fonction nutritive

Sous-fonction nutritive « fourniture en nutriments »



À retenir

La sous-fonction « fourniture en nutriments » traduit la capacité du sol à mettre à disposition de la biocénose (organismes du sol et plantes) les éléments nutritifs dont elle a besoin. Au niveau 1, elle est évaluée à partir de quinze paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés en laboratoire : pH, matière organique, C/N, biomasse microbienne, texture de surface, phosphore assimilable, calcaire total et actif, CEC, cations échangeables (K, Mg, Ca, Na) et leurs équilibres (Ca/Mg, K/Mg). Des indicateurs de niveau 2 (respiration basale, diversité microbienne, conductivité électrique, oligoéléments) la complètent selon le contexte.

Indicateurs de niveau 1

La sous-fonction « fourniture en nutriments » renvoie à la capacité du sol à mettre à disposition les éléments nutritifs nécessaires au développement de la biocénose, incluant les organismes du sol et les plantes. Les paramètres sélectionnés permettent d'appréhender à la fois la quantité de minéraux fertilisants présents dans le sol, leur assimilation par les plantes et l'évolution potentielle de ce stock via la minéralisation de la matière organique.

Elle est estimée à partir de quinze paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés en laboratoire (Figure 48) : pH (eau), teneur en matière organique, rapport C/N, biomasse microbienne, texture de surface (0–30 cm), phosphore assimilable, calcaire total et calcaire actif (CaCO_3), capacité d'échange cationique (CEC), répartition des cations échangeables (K, Mg, Ca, Na) au sein de la CEC, ainsi que leurs équilibres (rapports Ca/Mg et K/Mg).

Les teneurs en matière organique constituent un indicateur clé du potentiel nutritif du sol. Elles renseignent à la fois sur le stock d'éléments contenus dans la matière organique et sur les flux libérés lors de sa décomposition, en fonction de la proportion de fractions labiles et stables.

Le rapport C/N (carbone/azote) permet d'évaluer si les conditions sont favorables à la décomposition et à la minéralisation de la matière organique, qui libère ainsi progressivement des éléments nutritifs dans la solution du sol.

La capacité d'échange cationique (CEC) reflète l'aptitude du sol à adsorber et retenir les éléments nutritifs sous forme ionique. Elle dépend principalement de la teneur en matière organique, de la nature des argiles et de la proportion de limons fins. Cet indicateur, largement normalisé, constitue une mesure de référence dans les analyses de sol.

En physiologie végétale, **l'azote, le phosphore et le potassium** représentent les trois macronutriments essentiels, chacun jouant un rôle déterminant dans les processus métaboliques, structuraux et énergétiques. Dans la liste des quinze paramètres, l'azote n'est représenté que par le rapport C/N, le potassium par le potassium échangeable, et le phosphore par le phosphore assimilable. Il est important de préciser la méthode d'extraction retenue en laboratoire (Olsen, Joret-Hébert, etc.) et son domaine de validité, plusieurs méthodes coexistant selon le contexte pédologique.

Le pH du sol influence directement la spéciation chimique des nutriments et leur disponibilité pour les organismes vivants.

L'analyse des rapports entre cations échangeables (Ca/Mg, K/Mg) permet d'identifier les déséquilibres susceptibles d'entraîner des phénomènes d'antagonisme ou de blocage des nutriments.

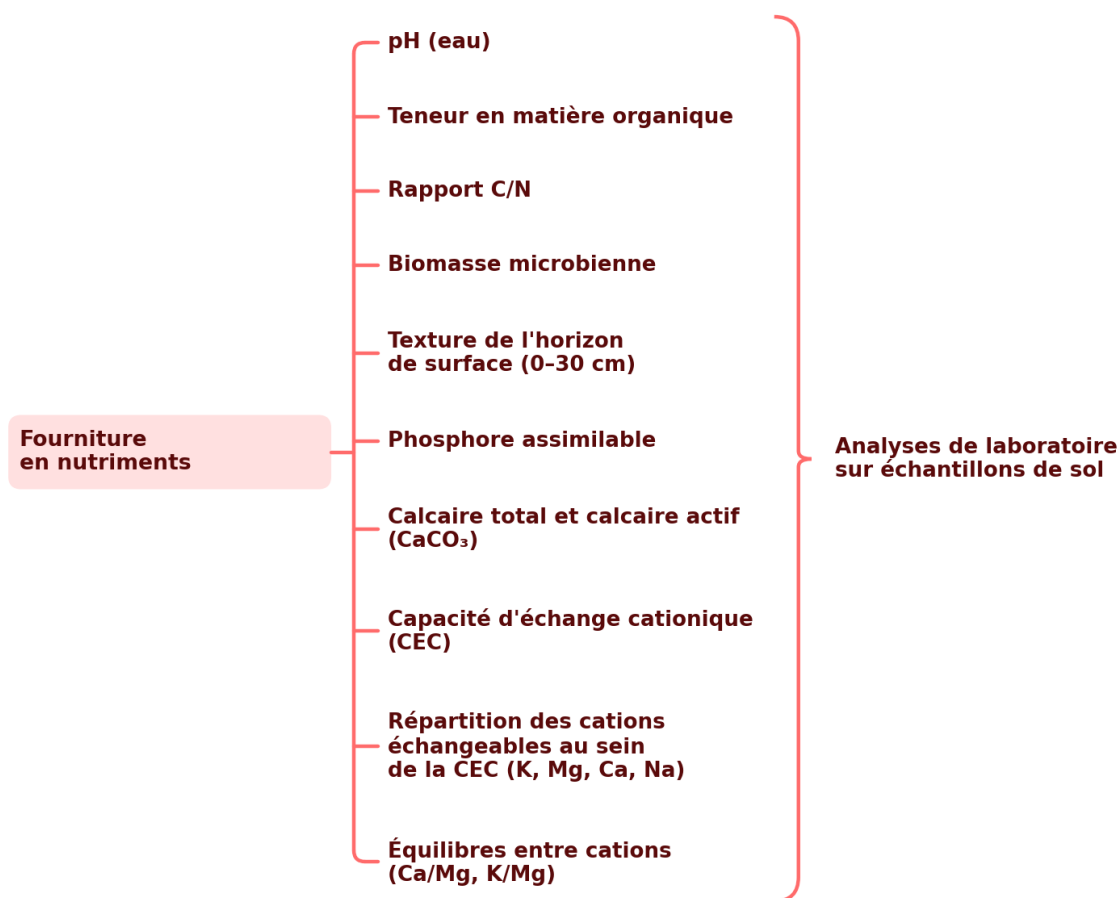


Figure 48. Indicateurs sélectionnés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « fourniture en nutriments ».

Exemples d'indicateurs de niveau 2

La **respiration basale**, la **diversité des champignons et des bactéries**, ainsi que le **ratio champignons/bactéries** sont des indicateurs de la qualité biologique du sol. Ils reflètent l'activité microbienne, la capacité du sol à minéraliser la matière organique, la disponibilité potentielle en nutriments et la structure du réseau trophique microbien.

La **conductivité électrique** peut également constituer un indicateur pertinent dans certains contextes, notamment dans les sols soumis à la salinité.

Les oligoéléments jouent également un rôle dans la nutrition végétale. Toutefois, leurs déséquilibres se manifestent principalement dans des contextes particuliers, tels que les sols acides ou salins. L'importance agronomique des oligoéléments demeure généralement secondaire par rapport à celle de l'azote, du phosphore et du potassium, sauf pour certaines cultures (pomme de terre, betterave, colza, vigne, arbres fruitiers, etc.).

Fonction 4 : fonction hydrique

Sous-fonction hydrique « infiltration de l'eau »



À retenir

Sur le terrain, la mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol permet l'évaluation directe de la sous-fonction « infiltration de l'eau ». Elle repose sur des mesures de la conductivité hydraulique à saturation. Plusieurs méthodes éprouvées permettent d'obtenir ces mesures de manière fiable : Beerkan, double anneau, Guelph, Matsuo ou Porchet. À défaut de mesures directes, il est possible de recourir à des fonctions de pédotransfert, sous réserve de respecter leur domaine de validité et de garder à l'esprit qu'elles ne fournissent qu'une estimation indirecte, variable selon les contextes et beaucoup moins précise que les mesures de terrain.

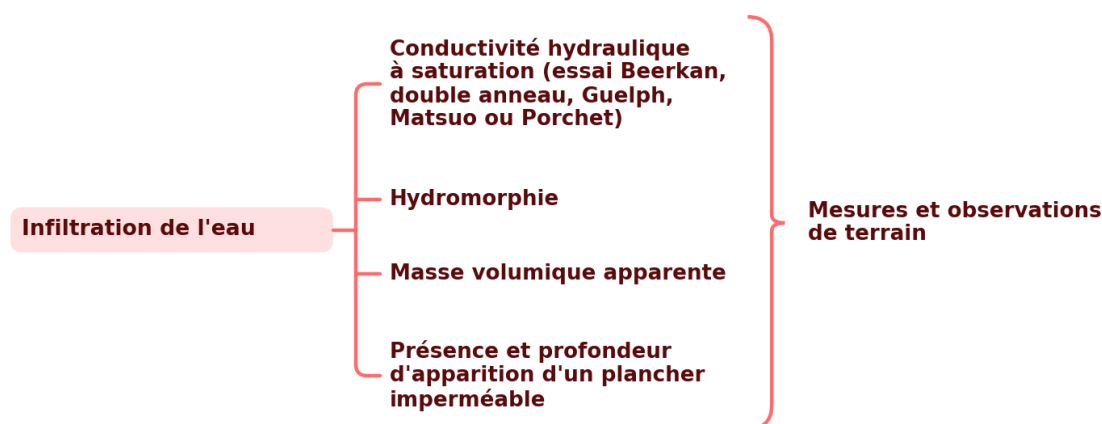
Indicateurs de niveau 1

L'infiltration de l'eau est évaluée directement sur le terrain à travers la mesure de la **conductivité hydraulique à saturation** (Figure 49). Les essais de terrain tels que les méthodes de Guelph, double anneau, Beerkan, Matsuo ou Porchet offrent des résultats fiables sur la perméabilité du sol à différentes profondeurs. Le choix et le nombre de mesures sont à adapter en fonction du contexte du site.

L'hydromorphie et le plancher imperméable sont des indicateurs obligatoires, associés à la mesure de conductivité hydraulique à saturation, car ils entrent dans la règle déclassante et caractérisent des processus liés à l'infiltration : l'**hydromorphie** informe sur le comportement hydrique du sol à une échelle temporelle plus large qu'une mesure ponctuelle, témoignant de phénomènes d'engorgement saisonniers.

La **masse volumique apparente** comme indicateur de la compacité représente le tassement du sol. Elle constitue également un indicateur important, car elle informe sur la connectivité porale et sur la présence éventuelle d'horizons peu perméables en profondeur.

La **présence et la profondeur d'apparition d'une couche imperméable** viennent moduler l'évaluation fonctionnelle de certains sols à forte perméabilité potentielle dans les horizons superficiels mais limités par cette couche à faible profondeur. Comme dans l'approche 1, un paramètre très défavorable est déclassant : une conductivité hydraulique à saturation mesurée inférieure à 10^{-7} m/s, un plancher imperméable apparaissant à moins de 25 cm de profondeur ou une hydromorphie apparaissant avant 25 cm place le sol dans la classe d'infiltration très faible, quelle que soit la moyenne des autres indicateurs. La pente n'entre pas dans la notation, alors qu'elle conditionne le partage entre infiltration et ruissellement : elle doit être considérée en parallèle, à partir d'un relevé sur le terrain ou d'une carte des pentes, pour interpréter le résultat.



Comme dans l'approche 1, un indicateur très défavorable est déclassant : il place le sol dans la classe d'infiltration très faible, quelle que soit la moyenne des autres indicateurs.

Figure 49. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « infiltration de l'eau ». Un paramètre très défavorable est déclassant.

Exemples d'indicateurs de niveau 2

À défaut de mesure directe, l'infiltration de l'eau peut être estimée par une fonction de pédotransfert, comme le rappelle l'encadré « À retenir » : cette estimation reste moins précise qu'une mesure de terrain. La fonction retenue et ses variables d'entrée restent à préciser ; les fonctions de pédotransfert pour la conductivité hydraulique mobilisent d'ordinaire la texture, la masse volumique apparente et la teneur en matière organique.

Par ailleurs, la présence de croûtes de battance (structurales ou sédimentaires), évaluée sur le terrain, indique une faible capacité d'infiltration de l'eau en surface. La battance peut également être estimée via des fonctions de pédotransfert, ce qui constitue un indicateur robuste et pertinent.

Sous-fonction hydrique « stockage et transfert de l'eau à la plante »



À retenir

La sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » est évaluée, au niveau 1, à partir de deux indicateurs : la réserve utile maximale, estimée par fonctions de pédotransfert sur l'ensemble du profil, et l'épaisseur des horizons organo-minéraux ; la charge en éléments grossiers vient réduire ce réservoir. Au niveau 2, des mesures de rétention en eau au laboratoire (pF), par horizon, associées à la masse volumique apparente, à la granulométrie et à la teneur en matière organique, précisent l'estimation.

Indicateurs de niveau 1

Deux indicateurs principaux peuvent être mobilisés (Figure 50).

> Un indicateur basé sur la mesure de la réserve utile maximale (RUM)

(A) Estimation de la réserve utile (RU) à partir de la texture.

Le premier consiste en une estimation de la réserve utile en eau à l'aide de fonctions de pédotransfert (Bouthier, A, et al. 2022). Plusieurs fonctions de pédotransfert existent, avec des niveaux de fiabilité variables. Cette approche, peu coûteuse, permet d'évaluer le réservoir hydrique mobilisable sur l'ensemble du profil sans nécessiter d'analyses détaillées par horizon. Elle

peut être estimée à partir de la texture du sol et chaque classe texturale du triangle de texture de l'Aisne ayant été associée à une valeur de RU estimée.

(B) Mesure au laboratoire de la réserve utile (RU)

La réserve utile du sol correspond au volume d'eau maximal disponible pour les végétaux, à savoir l'eau suffisamment retenue dans la microporosité du sol, et néanmoins absorbable par les racines. La RU est la capacité de rétention en eau entre pF_{2,3} et pF_{4,2} ; le pF représente le potentiel matriciel de rétention de l'eau par le sol (il est exprimé par le logarithme décimal de la hauteur d'eau en cm) :

- Humidité à pF 2,3 : Capacité au champ. Le sol est ressuyé, la macroporosité du sol est occupée par l'air. L'eau présente dans la microporosité est « retenue » par le sol, l'eau disponible pour la plante est maximale.
- Humidité à pF 4,2 : Point de flétrissement permanent. L'eau restante est « liée » aux argiles du sol, elle n'est pas disponible pour la plante.

Ainsi, la RU est estimée entre la « capacité au champ » (sol ressuyé de l'excès d'eau non retenue) et le « point de flétrissement permanent » (eau liée par capillarité, non disponible). Ces résultats sont exprimés en % massique et ne prennent pas en compte la proportion d'éléments grossiers dans les matériaux (ce qui surestime les résultats). Par conséquent, le calcul nécessite la prise en compte supplémentaire de la masse volumique apparente sèche (MVAS) du sol et du % en éléments grossiers.

RU (exprimée en mm d'eau) = (Humidité à pF_{2,3} – Humidité à pF_{4,2}) * MVAS * épaisseur de l'horizon * (1-%éléments grossiers)

- > Un indicateur qui repose sur l'épaisseur des horizons organo-minéraux, qui renseigne également sur le potentiel de stockage de l'eau, car la matière organique présente des composants capables de retenir l'eau qui percole. Les éléments grossiers peuvent diminuer la réserve utile maximale en eau des sols pour les plantes.

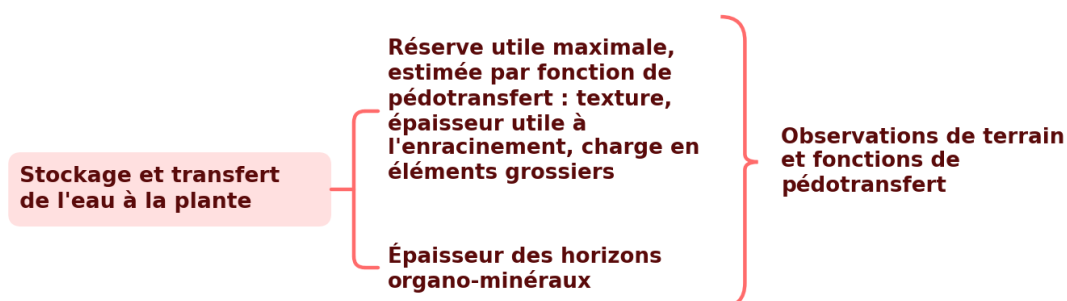


Figure 50. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante ».

Indicateurs de niveau 2

Les analyses du potentiel de succion (pF₂, pF_{2,3}, pF_{4,2}) sont des mesures directes de laboratoire, plus précises que l'estimation par pédotransfert du niveau 1, fondée sur la seule texture du sol. Cette méthode implique toutefois des analyses de laboratoire pour chaque horizon, ce qui nécessite un budget adapté. Elle requiert également une mesure de la **masse volumique apparente**.

Enfin, la teneur en matière organique peut influencer sur la réserve utile en eau d'un sol grâce à ses propriétés amphiphiles. Avec l'analyse granulométrique au laboratoire, elle complète les paramètres optionnels d'évaluation de cette sous-fonction.

Intérêts et limites

L'approche 2 produit une cartographie d'évaluation fonctionnelle à partir de données d'observation et de laboratoire directement acquises par des campagnes de terrain sur l'emprise d'étude. Elle présente de nombreux intérêts :

- > Complémentarité avec l'approche 1 et reproductibilité assurée par la hiérarchisation des paramètres incontournables, les plus simples à opérer sur le terrain, les plus robustes dans leur interprétation et leur extrapolation cartographique ;
- > Mobilisation des acteurs locaux pour établir et partager un outil d'aide à la décision fiable à partir de données produites sur leur propre territoire, à leur échelle, considérant les enjeux de l'artificialisation et de la renaturation des sols ;
- > Optimisation des investigations sur les milieux urbains et périurbains selon des budgets variables en ciblant des enjeux par secteurs (ex : orientations d'aménagement et de programmation (OAP) sectorielles ou OAP thématiques : agriculture en circuit court, gestion de l'eau pluviale, adaptation au changement climatique, biodiversité, trame brune) ;
- > Application d'une même méthode et d'un même outil cartographique depuis les phases stratégiques de prospectives territoriales pré-opérationnelles et réglementaires jusqu'aux phases opérationnelles de projet, avec réemplois successifs de données de terrain capitalisées ;
- > Exemplarité : à partir d'un jeu de données initiales à l'échelle de leur territoire, possibilité pour les collectivités de conduire leurs aménageurs à poursuivre l'effort de connaissance des sols en appliquant une même méthodologie reproductible à l'échelle parcellaire du projet. Inversement, capacité du processus de projet opérationnel à fournir aux collectivités de nouvelles données d'état initial et d'état final sur les emprises aménagées ;
- > Possibilité d'utilisation complémentaire de la connaissance pédologique pour définir les opportunités de réemploi des matériaux constituant les sols en économie circulaire, afin de répondre au besoin de reconstitution de sols fonctionnels pour le projet.

Différentes limites méthodologiques et biais sont néanmoins susceptibles d'influencer l'interprétation des résultats :

- > En milieu urbain et périurbain, la stratégie de répartition des observations et des analyses pédologiques sur le territoire d'étude nécessite une compréhension des formes urbaines et de l'historique de l'occupation du sol. En l'absence de ces connaissances préalables, l'application des données ponctuelles des Unités Typologiques de Sol (UTS) en extrapolation sur des entités cartographiques cohérentes génère des incertitudes sur l'évaluation fonctionnelle attribuée aux Unités Cartographiques de Sol (UCS) ;
- > Pour mémoire, la norme NF X 31-560 prévoit au 1/10 000 : 1 profil pour 10 à 50 ha et 1 sondage à la tarière pour 0,5 à 3 ha. En milieu urbain, il convient de définir autant que possible des stratégies d'échantillonnage de forte densité pour rendre compte de la complexité supplémentaire de la spatialisation et de la variabilité de l'anthropisation. À titre d'ordre de grandeur pour le milieu urbain, l'exemple de Ris-Orangis (257 observations dont 31 fosses pour 520 ha d'espaces végétalisés) correspond à une observation pour 2,4 ha environ et une fosse pour 20 ha environ, une densité qui reste dans la fourchette de la norme NF X 31-560.
- > En milieu urbain (comme en milieu rural), l'accessibilité au terrain est conditionnée par les autorisations d'accès délivrées par les propriétaires. Cette accessibilité étant aléatoire et potentiellement variable d'un secteur à l'autre de l'emprise d'étude, le degré de confiance sur l'extrapolation cartographique à partir de données ponctuelles d'observation est également variable.

Exemples d'application

 Par souci de lisibilité, les exemples sont volontairement synthétiques : seuls apparaissent les éléments essentiels à la compréhension de la démarche. **Des fiches exemple plus détaillées constituent un document indépendant, mis à disposition en complément du guide.**

Exemple d'application de l'approche 2 sur le territoire de Ris-Orangis



Présentation du territoire d'étude et centralisation des données

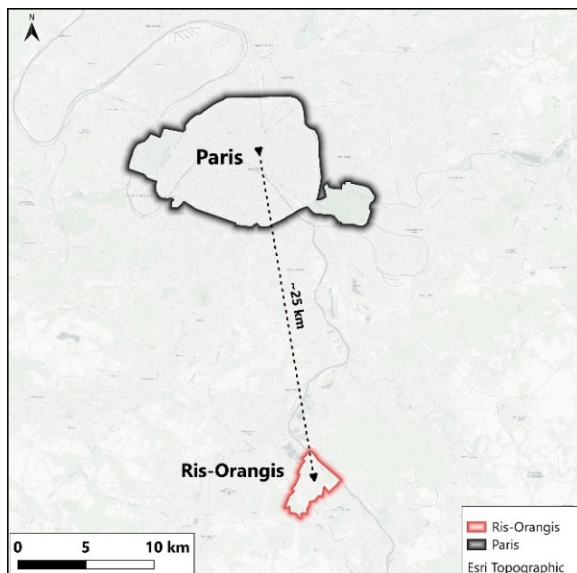
Nom du territoire : Commune de Ris-Orangis

Superficie : 870 ha

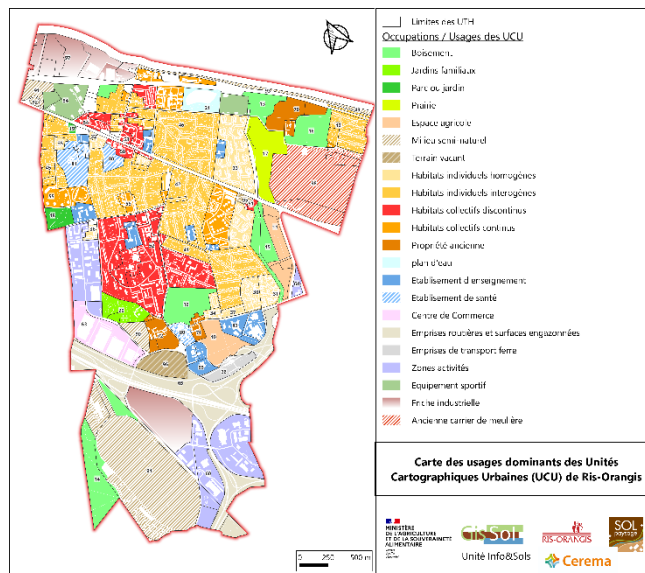
Contexte de l'étude : Définition d'une trajectoire ZAN à l'échelle du territoire ainsi que d'un programme des actions à prioriser pour lutter contre l'artificialisation en identifiant les sols à préserver, renaturer ou densifier.

Type de données mobilisées	Source	Résolution
Données pédologiques	Secteur de Référence Urbain : Ris-Orangis	1/10 000
Topographie	MNT	5 m
	EVOLUMOS (Institut Paris Région)	1/5 000
	Images aériennes (depuis 1933) Remonter le temps (IGN)	-
Historique d'urbanisation et d'occupation du sol	Unités d'occupation Territoriale et Historique (UTH)	1/5 000
	Unités Cartographiques Urbaines (UCU)	1/10 000

Localisation du territoire d'étude



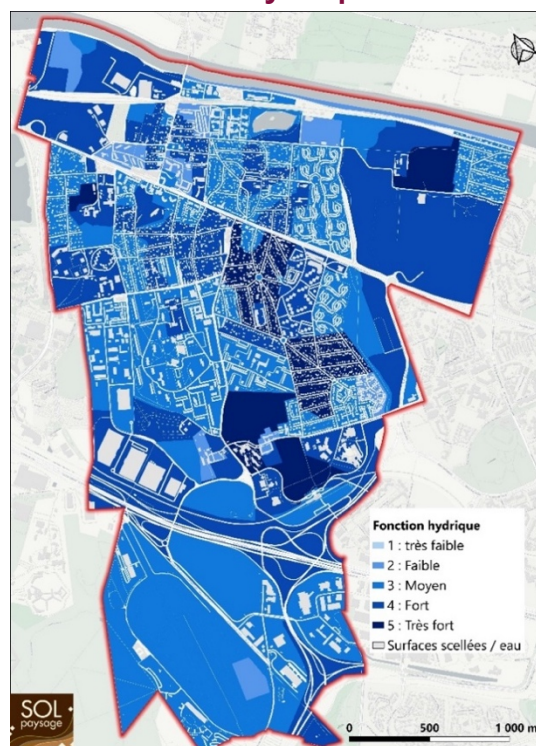
Carte des unités cartographiques urbaines (UCU)



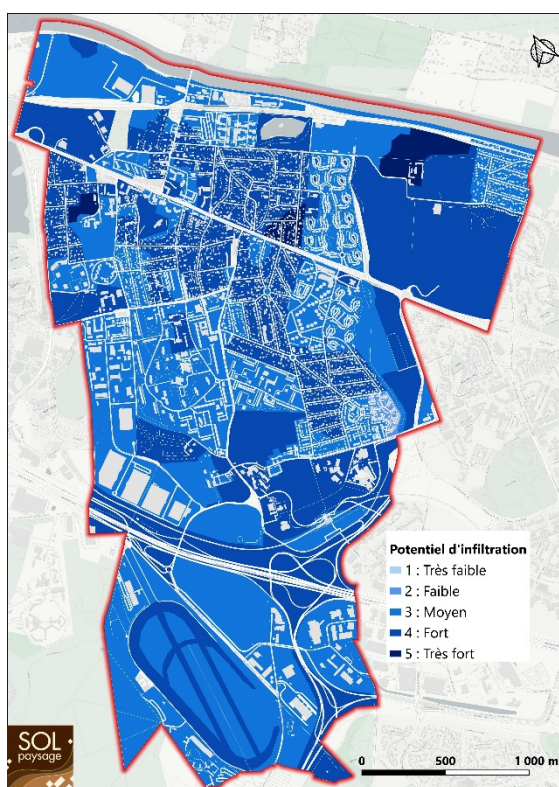
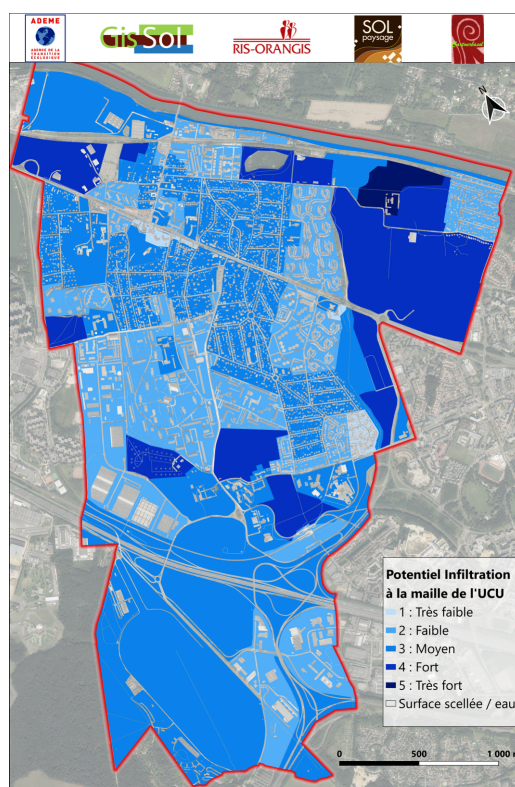
La carte ci-contre rend compte de l'état de la fonction hydrique des sols de la commune de Ris-Orangis. Elle constitue une carte de synthèse établie par la moyenne des valeurs d'indice de deux sous-fonctions : l'infiltration et le stockage et le transfert de l'eau à la plante. Elle traduit le potentiel des sols de la commune à réguler le cycle de l'eau : capacité d'infiltration par leur macroporosité et stockage de l'eau utile aux plantes dans leur microporosité.

- > 48 % des sols du territoire rissois présentent un fort potentiel de régulation du cycle de l'eau (notes 4 et 5).
- > Les capacités faibles à moyennes de stockage de l'eau utilisable par les plantes (notes 1 à 3) s'expliquent par la faible épaisseur de certains sols et/ou par leur texture sablo-caillouteuse et compacte.

Fonction hydrique



La capacité d'infiltration de l'eau de pluie par les sols végétalisés du territoire rissois est analysée selon deux mailles spatiales : les Unités Cartographiques de Sol (UCS, carte de gauche) et les Unités Cartographiques Urbaines (UCU, carte de droite intégrant le taux d'imperméabilisation).



La représentation de la capacité d'infiltration des sols à la maille des UCU repose sur la moyenne pondérée, par la surface, des notes attribuées aux UCS qui la composent. Cette approche cartographique permet de lisser, voire de supprimer, l'effet des variabilités pédologiques au sein des UCU. On obtient ainsi une évaluation moyenne déterminée pour chaque type de tissu urbain, avec une perte d'information limitée. Elle offre une lecture simplifiée, plus pertinente pour les décideurs et les aménageurs, qui peuvent prendre en compte la sous-fonction « infiltration de l'eau » pour définir des objectifs de régulation de l'eau pluviale, quartier par quartier, à l'échelle des UCU.

Exemple d'application de l'approche 2 dans le cadre d'un projet d'aménagement au sein du quartier des Alpains à Bourg-Saint-Maurice

Présentation du territoire d'étude et centralisation des données

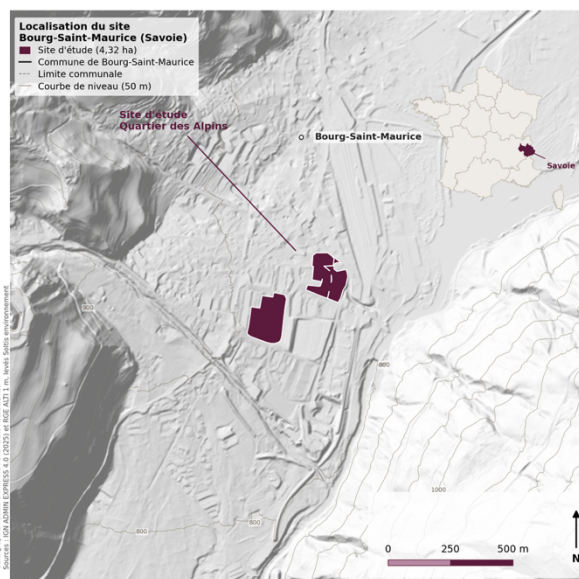
Nom du territoire : Commune de Bourg-Saint-Maurice

Superficie : environ 4 ha

Contexte de l'étude : Évaluation des fonctionnalités des sols du site d'étude et identification du potentiel de réemploi des terres dans une perspective d'économie circulaire

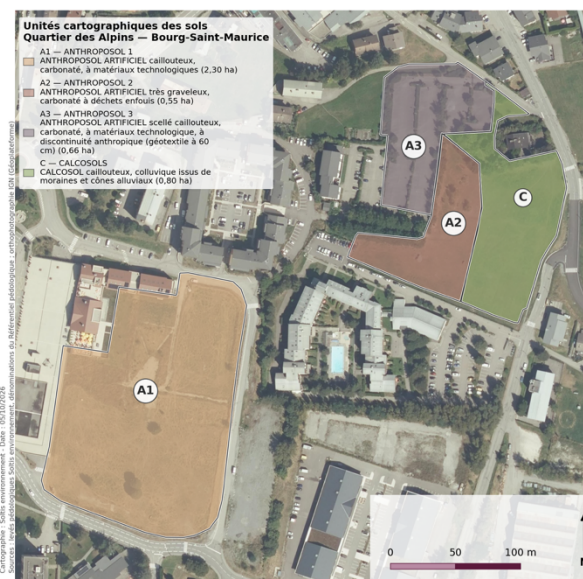
Type de données mobilisées	Source	Résolution
Données pédologiques	Intervention de terrain et analyses physico-chimiques et sanitaires	Densité d'environ 2 fosses à l'hectare
Topographie	RGE Alti – IGN	1 m
Historique du site	Images aériennes, Remonter le temps (IGN)	Selon les millésimes disponibles

Localisation du territoire d'étude



soltis
environnement

Carte des unités cartographiques de sol

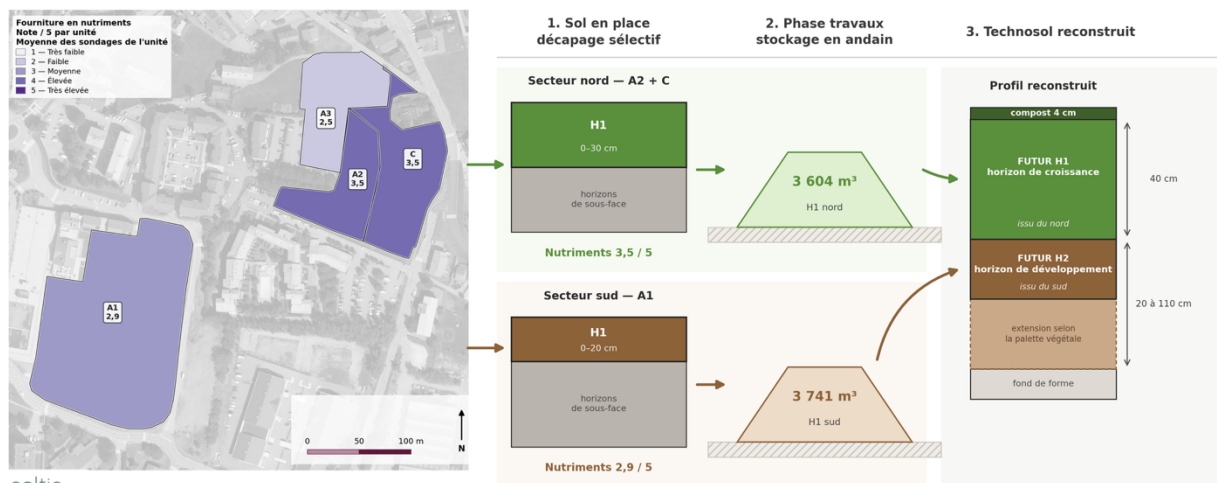


soltis
environnement

Les quatre fonctions et leurs six sous-fonctions ont été évaluées sur l'ensemble du site y compris les matériaux situés sous l'enrobé de l'ancien parking (au nord-ouest). L'objectif de l'étude, à savoir déterminer quelles terres peuvent être réemployées sur place, a conduit à placer la fonction nutritive au premier rang.

Le Calcosol et l'Anthroposol A2, au nord, obtiennent les meilleures notes pour la sous-fonction « fourniture en nutriments » (3,5), grâce à des horizons de surface mieux pourvus en matière organique et en azote total (Figure ci-dessous). L'Anthroposol A1, au sud, est noté 2,9. Les matériaux sous enrobé sont écartés de la reconstruction, et leur emprise a finalement servi d'aire de stockage pendant les travaux. Les autres sous-fonctions indiquent un niveau d'« infiltration de l'eau » élevé partout (notes 4 et 5), un « stockage et transfert de l'eau à la plante » faible (notes 1 à 2), faute de réserve utile dans une texture sableuse à sablo-limoneuse.

Le schéma, ci-dessous, illustre la reconstruction qui en a découlé : l'horizon de surface du secteur nord devient l'horizon de croissance ; celui du secteur sud, plus filtrant, passe en sous-face comme horizon de développement dans le cadre des futurs aménagements du site (parc et espaces verts).



Ce réemploi évite l'achat d'environ 9 600 m³ de terre et l'évacuation d'un volume équivalent, soit de l'ordre de 1 300 rotations de poids lourds à travers la commune. Aux prix du marché, l'économie nette atteint une centaine de milliers d'euros HT au titre des seuls matériaux non achetés, et de l'ordre de 450 000 € HT si l'on y ajoute l'évacuation que ces terres auraient subie en l'absence de revalorisation.



Stockage des terres en andains



Ensemencement des andains durant la phase de stockage

3.3 APPROCHE À PARTIR DE L'OCCUPATION DU SOL



À retenir

Cette troisième approche (approche 3) ne mobilise aucune donnée sur le sol lui-même. Elle ne renseigne donc ni sur ses propriétés pérennes ni sur ses propriétés dynamiques : elle déduit de l'occupation du sol et du couvert végétal, observés par télédétection, une capacité fonctionnelle *présumée*. Elle fournit un premier repérage, notamment en milieu urbain, lorsque les données pédologiques manquent ou sont trop coûteuses à acquérir, mais elle ne remplace pas une évaluation des fonctions.

L'approche proposée dans ce guide repose sur l'hypothèse selon laquelle l'occupation végétale du sol conditionne sa capacité potentielle à assurer des fonctions écologiques.

Dans ce contexte, la méthode ne produit pas des indicateurs fonctionnels distincts, mais un **indice global**, l'« **indice de capacité fonctionnelle** », interprété comme une représentation indirecte de la multifonctionnalité des sols. Cet indice s'appuie sur le concept de « pleine terre » (Branchu et al. 2022), dont la définition est détaillée dans l'encadré ci-dessous (Neaud, 2024).



À savoir

Dans le cadre de travaux du Cerema et de l'OFB menés pour la direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, une **nouvelle définition du concept de pleine terre a été proposée**. Un sol urbain peut être caractérisé comme un sol de « **pleine terre** » en planification urbaine lorsqu'il respecte les critères cumulatifs suivants (Neaud, 2024) :

- > **Absence de tout revêtement en surface** (y compris perméable) ;
- > **Présence de végétation** (herbacée, arbustive ou arborée) ;
- > **Existence d'au moins deux horizons dont un organique en surface sur une profondeur minimale de 30 cm** ;
- > **Absence de plancher imperméable anthropique en profondeur** (dalles, niveaux compactés, indurés, membrane, etc.) ;
- > **Composition majoritaire de matériaux terreux** (matériaux fins d'origine pédologique).

Des sols reconstitués par génie pédologique peuvent également être reconnus comme **sols de pleine terre**, sous réserve qu'ils répondent à l'ensemble de ces critères (Neaud, 2024). Parmi ces cinq critères, seuls les deux premiers (absence de revêtement, présence de végétation) sont observables par télédétection ; les trois autres (horizons, absence de couche imperméable en profondeur, matériaux terreux) ne le sont pas. L'indice de capacité fonctionnelle n'estime donc qu'une probabilité de présence de sols de pleine terre au sens de cette définition, comme le précise la partie « Intérêts et limites ».

À noter que le terme « pleine terre » est également défini, indépendamment de la définition retenue ici, par chaque document d'urbanisme (PLU ou PLUi) qui l'emploie, notamment pour le calcul du coefficient de biotope par surface (CBS) : la définition locale peut différer proposée ici.

Le calcul de l'indice de capacité fonctionnelle repose sur l'utilisation de données d'occupation du sol. **Pour être pertinente, cette couche doit avoir une résolution suffisante pour distinguer les espaces végétalisés des espaces imperméabilisés.**

Différentes sources de données sont actuellement disponibles en France métropolitaine (ANNEXE 5) :

- > **Les données Corine Land Cover (CLC)** (*format vectoriel*), à une échelle de 1/100 000 (unité minimale de collecte : 25 ha, à ne pas confondre avec la résolution des couches raster citées plus loin). Ce niveau de détail est insuffisant pour le milieu urbain.
- > **Les données OCS GE** (Occupation du Sol à Grande Échelle) (*format vectoriel*), qui croisent occupation du sol et usage, disponibles à une échelle de 1/5 000, adaptée à la planification urbaine et territoriale.
- > **Les données OCS Grand Est (OCS GE 2)**, produites par DataGrandEst et téléchargeables sur <ftp.datagrandest.fr/opendata/ocs-grand-est/> un produit régional distinct de l'OCS GE nationale de l'IGN malgré la proximité des noms, proposent une occupation du sol à l'échelle du 1/2 000, avec un **niveau 5** distinguant trois catégories principales :
 - Imperméable non bâti ;
 - Imperméable bâti ;
 - Perméable.
- > **Les données High Resolution Layers (HRL) de Copernicus** (*format raster*), téléchargeables sur le portail du Copernicus Land Monitoring Service (land.copernicus.eu), avec un millésime de référence propre à chaque couche et qui incluent :
 - Imperviousness (taux d'imperméabilisation) – [Copernicus HRL Imperviousness](#) : taux d'imperméabilisation au sol (%), à une résolution de **10 m**.
 - Forests & Tree Cover Density (densité du couvert arboré) – [Copernicus HRL Forests](#) : proportion (%) de surface recouvertes par la canopée des arbres (> 5 m), à une résolution de **10 m**.
 - Small Woody Features (petits éléments ligneux) – [Copernicus HRL SWF](#) : haies, bosquets, alignements et petits massifs arborés ou arbustifs (< 5 000 m²), à une résolution de **5 m**.

Ces trois taux ne sont pas complémentaires et leur somme n'a pas vocation à valoir 100 % : le taux d'imperméabilisation décrit ce qui est scellé au sol, tandis que la densité de couvert arboré décrit la canopée projetée, qui peut surplomber une surface imperméabilisée. Un alignement d'arbres au-dessus d'une chaussée est ainsi comptabilisé dans les deux couches.

Les taux sont par ailleurs arrondis à l'entier le plus proche avant d'être confrontés aux bornes de l'arbre de décision, de sorte que les classes 0–25 %, 26–50 % et 51–100 % soient exhaustives et mutuellement exclusives.

Encadré 11. Analyse comparative de l'OCS GE et de l'OCS GE 2.

Les couches OCS GE et OCS GE 2 (cette dernière disponible uniquement en région Grand Est) ont été comparées. Pour cela, la classe CS2 de l'OCS GE, qui correspond à l'ensemble des surfaces de sol couvertes par la végétation, a été confrontée au niveau 5 de l'OCS GE 2, qui différencie les milieux perméables et imperméables ; l'appellation « niveau 5 » est celle retenue dans tout le guide pour cet objet, à la place de « cinquième déclinaison ».

Il ressort de cette comparaison qu'en milieu urbain, une large part des polygones de l'OCS GE (en jaune hachuré) se superpose à ceux de l'OCS GE 2 (en bleu). **L'OCS GE 2 permet toutefois une distinction plus fine des espaces de pleine terre, notamment au niveau des jardins urbains qui sont considérés comme des zones bâties dans l'OCS GE.**

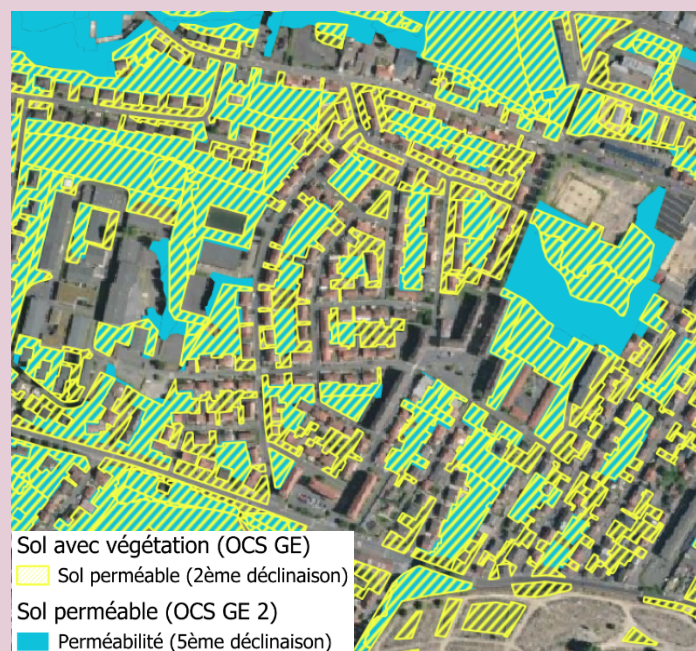
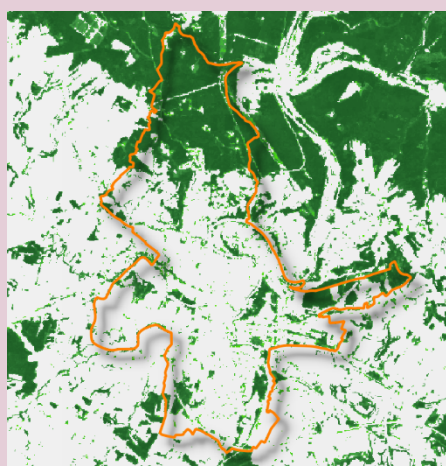


Figure 51. Comparaison de l'OCS GE et de l'OCS GE 2 sur les zones végétalisées ou perméables.

Les deux figures ci-dessous comparent par ailleurs les données Copernicus (raster) et les données OCS GE (vecteur). Si les deux sources sont très cohérentes, les données Copernicus apportent une information complémentaire : un taux continu (0 à 100 %) à l'intérieur de chaque maille, là où l'OCS GE ne donne qu'une classe, et le repérage d'arbres isolés en dehors des polygones « formation arborée ».



Couvert arboré 0 à 100 % (Copernicus)



Formation arborée déclinaison CS2.1.1 (OCS GE)

Figure 52. Comparaison entre les données Copernicus et OCS GE.

Pour le calcul de l'indice de capacité fonctionnelle des sols, il est préconisé d'utiliser en priorité les données Copernicus au format raster puis, si besoin, de vectoriser les informations à partir de l'occupation du sol proposée par l'OCS GE (ou l'OCS GE 2 en région Grand Est).



À savoir

L'objectif n'est pas ici de détailler davantage les types d'occupation du sol, mais d'affiner la distinction entre surfaces imperméabilisées et non imperméabilisées, tout en identifiant, au sein de ces dernières, les secteurs majoritairement herbacés, arbustifs et/ou arborés.

Ainsi, trois critères sont extraits des trois couches Copernicus présentées ci-dessus :

- > Taux d'**imperméabilisation** (0 à 100 %) ;
- > Taux de **couverture arborée** (0 à 100 %) ;
- > **Présence ou absence de petits éléments ligneux** (0 % ou 100 %).

L'indice de capacité fonctionnelle est calculé sur la base de l'arbre de décision présenté en Figure 53. Les notes vont de 0 à 5 : 5 correspond à la capacité fonctionnelle présumée la plus élevée et 0 à une maille majoritairement imperméabilisée. Contrairement aux deux autres approches, où les notes vont de 1 à 5, l'échelle commence ici à 0, note réservée aux surfaces imperméabilisées (Figure 53). Cette notation prend en compte le **taux d'imperméabilisation** et la **couverture végétale prédominante** au sein de chaque maille de 10 × 10 mètres, avec une précision portée à 5 mètres là où la couche Copernicus des petits éléments ligneux signale leur présence. La dominance végétale est déterminée lorsque l'un des types de végétation couvre au moins 51 % du pixel.

Les couches sont examinées dans l'ordre suivant, qui est celui de l'arbre de décision (Figure 53) :

- > Le **taux d'imperméabilisation** ;
- > Le **taux de couverture arborée** ;
- > La **présence** ou l'absence de petits éléments ligneux.

La combinaison de ces trois couches conduit à sept cas, présentés dans l'arbre de décision et repris dans le tableau ci-dessous. Les trois classes de végétation se lisent dans l'ordre indiqué : un couvert arboré d'au moins 51 % donne une formation arborée ; à défaut, la présence de petits éléments ligneux donne une formation arbustive ; sinon, la formation est herbacée.

Deux combinaisons reçoivent la note 3 : une maille dont un quart au plus est imperméabilisé mais dépourvue d'arbres comme de petits éléments ligneux, et une maille dont la moitié peut être imperméabilisée mais que recouvre une canopée. La première offre davantage de sol non scellé, la seconde davantage de végétation ligneuse. L'indice les tient pour équivalentes : à partir des seules données d'occupation du sol, rien ne permet de départager une surface disponible d'un couvert arboré qui la surplombe. Cette équivalence est un choix assumé, et elle rappelle que l'approche 3 fournit une capacité fonctionnelle présumée et non une mesure des fonctions du sol *sensus stricto*.

Tableau 11. Règle de notation de l'indice de capacité fonctionnelle, d'après l'arbre de décision de l'approche 3. La densité de couvert arboré et la présence de petits éléments ligneux sont issues des couches Copernicus. La note 0 correspond aux pixels dont plus de la moitié de la surface est imperméabilisée : l'échelle va donc ici de 0 à 5, et non de 1 à 5 comme dans les deux autres approches.

Taux d'imperméabilisation	Densité de couvert arboré	Petits éléments ligneux	Note
51 – 100 %	—	—	0
26 – 50 %	0 – 50 %	absents	1
26 – 50 %	0 – 50 %	présents	2

Taux d'imperméabilisation	Densité de couvert arboré	Petits éléments ligneux	Note
26 – 50 %	51 – 100 %	indifférent	3
0 – 25 %	0 – 50 %	absents	3
0 – 25 %	0 – 50 %	présents	4
0 – 25 %	51 – 100 %	indifférent	5

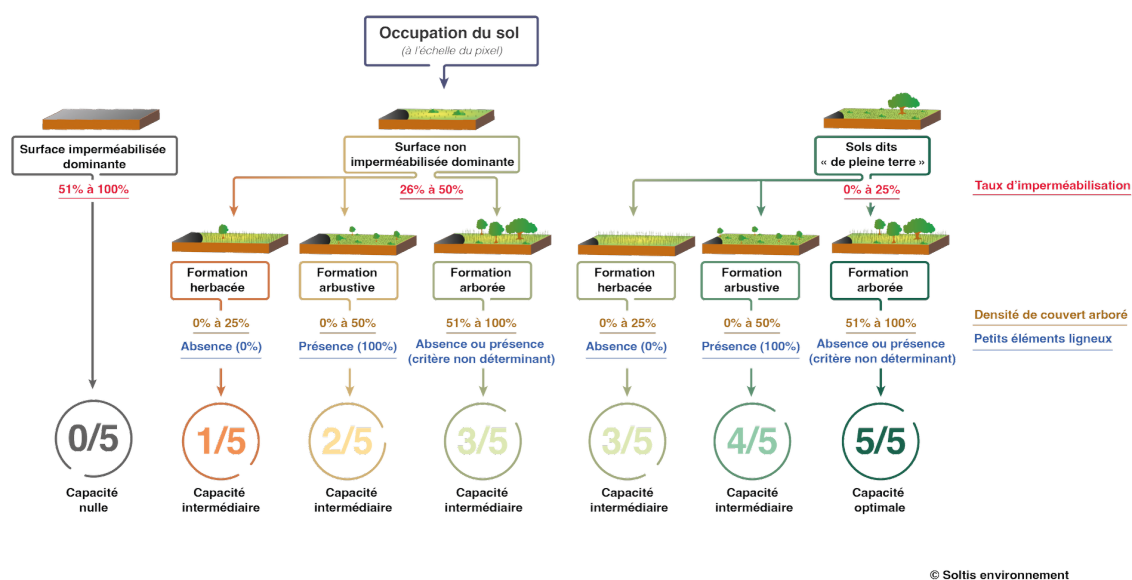


Figure 53. Présentation de l'approche 3 à l'échelle infra-régionale.

Le potentiel de capacité fonctionnelle des sols urbains est déterminé via un système de notation fondé sur trois couches raster : le taux de couverture arborée (0 à 100 %), la présence ou non de petits éléments ligneux (0 % ou 100 %) et le taux d'imperméabilisation (0 à 100 %) (données Copernicus).

L'exemple ci-dessous, appliqué à un quartier de Charleville-Mézières (08), montre les résultats obtenus avec les données Copernicus puis la production de l'indice de capacité fonctionnelle selon la règle de combinaison des couches définie par l'arbre de décision (Figure 53). Cet indice au format raster peut ensuite être agrégé par polygone (valeur médiane des pixels) sur la couche OCS GE, disponible sur la quasi-totalité du territoire métropolitain, ou avec la couche OCS GE 2, disponible uniquement en région Grand Est, dont fait partie le département des Ardennes (Figure 54).

Illustration des différentes étapes de travail pour produire l'indice de capacité fonctionnelle à l'échelle d'un quartier de la ville de Charleville-Mézières (08)



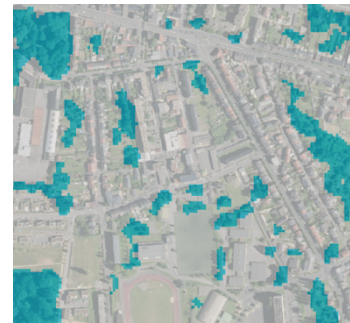
Orthophotographie d'un quartier de Charleville-Mézières (08) (année 2025) (source : IGN).



Taux d'imperméabilisation des surfaces (%), à une résolution de 10 m. [Copernicus HRL Imperviousness](#)



Proportion (%) de surface couverte par des arbres (> 5 m), à une résolution de 10 m. [Copernicus HRL Forests](#)

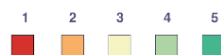


Haies, bosquets, alignements et petits massifs arborés ou arbustifs (< 5 000 m²), à une résolution de 5 m. [Copernicus HRL SWF](#)



Indice de capacité fonctionnelle calculé sur la base de l'arbre de décision présenté en Figure 53 à partir des données Copernicus (au format raster). Nota : les polygones tracés en noir correspondent aux vecteurs d'occupation du sol de l'OCS GE 2. La couleur bordeaux correspond aux surfaces imperméabilisées (note 0).

Note de l'indice de capacité fonctionnelle



Indice de capacité fonctionnelle calculé sur la base de l'arbre de décision présenté en Figure 53 à partir des données Copernicus, intersectées et agrégées sur les polygones de l'OCS GE 2 (valeur médiane, au format vectoriel). La couleur bordeaux correspond aux surfaces imperméabilisées (note 0).

Note de l'indice de capacité fonctionnelle



Figure 54. Illustration des différentes étapes de travail pour produire l'indice de capacité fonctionnelle à l'échelle de la ville de Charleville-Mézières (08) sur la base de l'approche 3.

Intérêts et limites

Cette approche permet de produire des cartographies à une résolution fine, de l'ordre de 5 à 10 mètres, notamment pour l'identification des petits éléments ligneux. Elle repose sur une méthodologie adaptée aux territoires urbanisés pour lesquels les données pédologiques sont souvent inexistantes.

L'un de ses atouts majeurs réside également dans sa souplesse d'application, l'unité de restitution des cartographies (pixel ou polygone de l'occupation du sol de l'OCS GE, comme à Charleville-Mézières) pouvant être ajustée en fonction de l'échelle et du périmètre étudiés, qu'il s'agisse d'une métropole, d'une commune ou d'un quartier, la résolution des couches HRL (5 à 10 mètres) restant quant à elle fixe.

Toutefois, cette méthode présente également des limites qu'il convient de prendre en compte dans l'interprétation des résultats. L'évaluation de la multifonctionnalité des sols repose sur des indicateurs indirects, fondés **sur le taux d'imperméabilisation et sur le type de couvert végétal**. Si l'indice de capacité fonctionnelle permet d'estimer la probabilité de présence de sols de pleine terre en milieu urbain, il ne permet pas d'interpréter directement l'expression des fonctions des sols, contrairement à ce qui peut être réalisé à partir de données pédologiques.

Par ailleurs, un décalage spatial peut apparaître entre les couches raster utilisées pour l'analyse et les images issues de fonds cartographiques de type Google Satellite. Ce décalage, lié aux sources, à la temporalité et aux résolutions des données, impose une vigilance systématique lors des phases de contrôle, notamment en vérifiant la bonne superposition des différentes couches avant toute analyse ou restitution cartographique. Deux autres limites appellent un contrôle visuel. Un arbre planté dans un revêtement (alignement, parking) ou un espace vert sur dalle obtient une note élevée alors que le sol n'est pas de pleine terre. Par ailleurs, les trois couches Copernicus mobilisées n'ont pas nécessairement le même millésime que l'orthophotographie utilisée pour le contrôle, ce qui impose d'en vérifier la cohérence temporelle avant toute interprétation.

CONCLUSION

La prise en compte du sol dans l'aménagement du territoire constitue aujourd'hui un enjeu majeur à l'interface des politiques environnementales, économiques et sociales. Longtemps considéré comme un simple support physique des activités humaines, le sol apparaît désormais comme un écosystème vivant, complexe et multifonctionnel, au cœur des équilibres écologiques et de la résilience des territoires face aux changements climatiques.

Ce guide méthodologique propose une évolution concrète des pratiques d'aménagement en faisant du sol un paramètre structurant des décisions territoriales. Face aux enjeux d'adaptation au changement climatique et d'érosion de la biodiversité, il ne s'agit plus seulement de mieux connaître le sol, mais bien de l'intégrer de manière systématique dans les processus de planification et de conception de projet.

L'un des apports majeurs de ce guide réside dans la proposition d'un cadre méthodologique harmonisé, adaptable à différentes échelles – du niveau régional au projet opérationnel – et tenant compte des données disponibles ainsi que des besoins des acteurs. En s'appuyant notamment sur des méthodes existantes et sur leur adaptation à des contextes variés, il permet de rendre les fonctions des sols compréhensibles, comparables et spatialisées. Cette traduction opérationnelle facilite leur intégration dans les documents de planification et les projets d'aménagement, tout en favorisant une meilleure articulation entre connaissance scientifique et décision publique.

En rendant les fonctions écologiques du sol plus faciles à comprendre, à quantifier et à spatialiser, le guide permet d'outiller les collectivités pour objectiver leurs choix, hiérarchiser les enjeux et arbitrer entre différentes options d'aménagement.

À l'échelle stratégique, l'intégration des sols permet d'identifier les secteurs à forts enjeux (biologiques, climatiques, nutritifs ou hydriques) et d'orienter les documents de planification vers des trajectoires plus sobres en consommation d'espace. À l'échelle opérationnelle, elle constitue un appui direct à la conception des projets et à leur adaptation fine aux caractéristiques du site, en facilitant l'évitement des impacts, la réduction des perturbations, la mise en œuvre de solutions de restauration ou de refonctionnalisation des sols, ainsi que l'adaptation des aménagements au site (gestion des eaux, choix des plantations, réutilisation des matériaux, limitation des terrassements).

Pour être pleinement efficace, cette démarche suppose toutefois de structurer son déploiement.

Cinq leviers apparaissent prioritaires.

- > **S'appuyer sur une expertise dès l'amont**, pour définir les enjeux stratégiques du territoire, apprécier sa vulnérabilité au changement climatique³¹ et délimiter les zones à enjeux environnementaux. Ce cadrage conditionne les fonctions écologiques à examiner en priorité, la stratégie d'échantillonnage des sols et le niveau d'exigence des études³².
- > **Identifier les données disponibles** sur le territoire, en vérifiant leur qualité, leur résolution et leur millésime.
- > **Capitaliser la donnée « sol »** dans les systèmes d'information géographique, et la croiser avec les autres enjeux territoriaux : eau, biodiversité, climat.
- > **Renforcer la montée en compétence des acteurs** et la diffusion d'outils partagés.

³¹ La méthode TACCT (Trajectoires d'adaptation au changement climatique des territoires), développée par l'ADEME et reconnue par le Plan national d'adaptation au changement climatique, propose un cheminement méthodologique pour guider les territoires dans leur démarche d'adaptation : tacct.ademe.fr/ressources.

³² ADEME, 2026. *Élaborer des stratégies territoriales en faveur de l'objectif zéro artificialisation nette*. Collection « Clés pour agir », réf. 013263. Cet ouvrage présente neuf recommandations issues d'ateliers menés avec des acteurs territoriaux : librairie.ademe.fr

> **Inscrire les résultats dans les cadres réglementaires et les documents d'urbanisme.**

Au-delà de la méthode, ce guide méthodologique invite à faire du sol un atout environnemental, qui oriente les choix stratégiques à l'échelle de la planification comme à celle du projet d'aménagement, et non plus une contrainte à gérer *a posteriori*. Cette évolution permet de limiter les impacts de l'aménagement, mais aussi de valoriser les potentialités des sols comme levier de durabilité, de résilience et de qualité des territoires.

En ce sens, ce guide fournit une démarche directement utilisable par les acteurs de la planification et de l'aménagement, et constitue une base de travail évolutive. Son appropriation sur le terrain, enrichie par les retours d'expérience, sera déterminante pour ancrer durablement la prise en compte des sols dans les stratégies territoriales ; de la planification au projet d'aménagement.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des collectivités interrogées dans le cadre de l'élaboration du guide.	12
Figure 2. Les 4 fonctions écologiques du sol considérées dans le guide.....	13
Figure 3. Représentation des trois niveaux d'échelle spatiale et de l'intérêt d'intégrer les sols dans les stratégies de planification et d'aménagement en fonction de ces échelles.	14
Figure 4. Structuration du guide en 3 chapitres.	15
Figure 5. Chronologie des principales réglementations influençant la gestion du sol dans la planification territoriale. Cette illustration, ainsi que les paragraphes associés, mettent en évidence uniquement les avancées réglementaires majeures en lien avec le sol.....	19
Figure 6. Illustration des principaux engagements nationaux et européens visant la préservation et la restauration des sols.....	23
Figure 7. Principaux facteurs influençant la pédogenèse.....	26
Figure 8. Illustration du processus de pédogenèse (adaptée d'une proposition de Vassili Vassilievitch Dokoutchaïev).	26
Figure 9. Illustrations de la faune du sol.	28
Figure 10. Illustration de deux profils de sol naturel sur la commune d'Annet-sur-Marne (77) (source : F. Baptist, Soltis environnement). À gauche, le sol est un FLUVIOSOL BRUNIFIÉ-RÉDOXISOL (Baize et Girard 2008). À droite, le sol est un FLUVIOSOL BRUNIFIÉ (Baize et Girard 2008).....	30
Figure 11. Fosse réalisée à la minipelle (source : Soltis environnement).	31
Figure 12. Fosse manuelle (source : Soltis environnement).	31
Figure 13. Sondage pédologique à la tarière manuelle (source : Soltis environnement).	31
Figure 14. Périmètre des 6 fonctions des sols retenues dans le cadre de l'étude INDIQUASOLS (Cousin et al. 2025).	33
Figure 15. Présentation des 4 fonctions et 6 sous-fonctions évaluées dans le cadre de ce guide.	34
Figure 16. Services écosystémiques auxquels contribuent les sols.	37
Figure 17. Chaîne fonctionnelle reliant les propriétés et processus du sol aux fonctions écologiques, puis aux services écosystémiques et enfin aux bénéfices pour l'être humain (adaptée de Cousin et al., 2025, d'après le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin, 2010).	38
Figure 18. Emploi des termes « qualité » et « santé » des sols.	39
Figure 19. Organisation des horizons pédologiques en milieu rural et en milieu urbain.	41
Figure 20. Les moteurs de l'anthropisation (d'après la communication de Sol Paysage aux JES 2025 à Genève).	43
Figure 21. Schéma illustrant différentes formes d'anthropisation d'un sol en milieu urbain et périurbain (modifié d'après Ducommun et al. 2023).	44
Figure 22. Grille d'évaluation du degré d'anthropisation d'un sol (Sol Paysage 2025). L'axe des x correspond à la note « matériaux ». En fonction de l'épaisseur totale des horizons remaniés, on déduit un niveau d'anthropisation de Très Peu Anthropisé (TPA) à Très Fortement Anthropisé (TFA).	45
Figure 23. Illustration de la cartographie des sols en Île-de-France au 1/250 000 – INRAE 2000. Dans la partie centrale de l'agglomération tout autour de Paris, aucune donnée pédologique du RRP n'est disponible pour rendre compte de l'anthropisation des sols (source : Géoportail).	46
Figure 24. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS).	47
Figure 25. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS) en milieu urbain.....	50
Figure 26. Exemple de SIG mis en place par la communauté d'agglomération Grand Paris Sud Seine-Essonnes-Sénart (source : SCoT Grand Paris Sud Seine-Essonnes-Sénart).....	51
Figure 27. Présentation de la démarche « 4 fonctions » en 4 étapes.....	55
Figure 28. Représentation des trois niveaux d'échelle spatiale et de l'intérêt d'intégrer les sols dans les stratégies de planification et d'aménagement en fonction de ces échelles.	56
Figure 29. Modalités d'application des approches n° 1, 2 et 3 suivant les échelles spatiales.....	60
Figure 30. Illustration du lien entre paramètre, indicateur, fonction et indice de multifonctionnalité (adapté de Branchu et al. 2022).	65
Figure 31. Illustration de trois types de référentiels d'interprétation d'un indicateur donné.....	69
Figure 32. Présentation des sous-fonctions principales associées à l'évaluation du potentiel agronomique.	71

Figure 33. Présentation des sous-fonctions principales associées à l'évaluation du potentiel de régulation climatique au sens de l'adaptation (création d'îlots de fraîcheur dans un contexte d'adaptation au changement climatique).....	72
Figure 34. Présentation de la sous-fonction principale permettant l'évaluation du potentiel de régulation climatique (stockage du carbone dans un contexte d'atténuation du changement climatique).....	73
Figure 35. Méthodologie d'évaluation de la sous-fonction « stock de carbone » par la méthode de la dominance.....	77
Figure 36. Présentation de l'approche 1 applicable à l'échelle régionale.....	79
Figure 37. Présentation des indicateurs utilisés dans l'évaluation de la sous-fonction « support des organismes du sol » estimée à l'échelle de l'occupation du sol (d'après Branchu et al. 2022). La calibration de ces indicateurs est présentée en ANNEXE 7.	80
Figure 38. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « enracinement de la végétation » à partir des bases de données pédologiques (d'après Branchu et al. 2022). À noter que dans DoneSol, l'indicateur « Épaisseur utile à l'enracinement » correspond à la variable « profondeur de sol » qu'il faut plafonner à 120 cm (voir ANNEXE 7).	81
Figure 39. Présentation de l'indicateur utilisé dans l'approche 1 pour l'évaluation de la sous-fonction « stock de carbone » à partir des données issues de l'outil ALDO, lui-même fondé sur les données du RMQS (d'après Branchu et al. 2022).....	82
Figure 40. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « fourniture en nutriments » (d'après Branchu et al. 2022) : pH (eau) de l'horizon de surface, pH (eau) moyen du profil et texture de l'horizon de surface.	83
Figure 41. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « infiltration de l'eau » (d'après Branchu et al. 2022).....	84
Figure 42. Indicateurs mobilisés dans l'approche 1 pour évaluer la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » (d'après Branchu et al. 2022). La texture est classée selon le triangle de l'Aisne, imposé par la méthode de pédotransfert retenue.	85
Figure 43. Présentation de l'approche 1 pour établir une note de multifonctionnalité. Cette méthode est applicable à l'échelle régionale principalement.	88
Figure 44. Présentation de l'approche 2 applicable aux échelles infra-régionale et projet.....	95
Figure 45. Indicateurs de niveau 1 proposés dans l'approche locale pour évaluer la sous-fonction « support des organismes du sol ».	97
Figure 46. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « enracinement de la végétation » L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note d'enracinement.....	99
Figure 47. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « stock de carbone ».	100
Figure 48. Indicateurs sélectionnés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « fourniture en nutriments ».	102
Figure 49. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « infiltration de l'eau ». Un paramètre très défavorable est déclassant.....	104
Figure 50. Indicateurs proposés dans l'approche 2 pour évaluer la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante ».	105
Figure 51. Comparaison de l'OCS GE et de l'OCS GE 2 sur les zones végétalisées ou perméables.....	113
Figure 52. Comparaison entre les données Copernicus et OCS GE.....	113
Figure 53. Présentation de l'approche 3 à l'échelle infra-régionale.....	115
Figure 54. Illustration des différentes étapes de travail pour produire l'indice de capacité fonctionnelle à l'échelle de la ville de Charleville-Mézières (08) sur la base de l'approche 3.	116
Figure 55. Approches portées par les collectivités selon les objectifs visés.....	134
Figure 56. Grille d'évaluation du degré d'anthropisation d'un sol (Sol Paysage 2025). L'axe des x correspond à la note « matériaux ». En fonction de l'épaisseur totale des horizons remaniés, on déduit un niveau d'anthropisation de Très Peu Anthropisé (TPA) à Très Fortement Anthropisé (TFA).	136
Figure 57. Délimitation des UCU à partir des IMU et des UTH (Sol Paysage 2025).....	139
Figure 58. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS) en milieu urbain.....	141
Figure 59. Démarche proposée pour la cartographie des sols en milieu urbain (adapté de Sol Paysage 2025).	142

Figure 60. Carte des degrés d'anthropisation des sols de la ville de Ris-Orangis établie au 1/10 000.	143
Figure 61. Carte des Unités Cartographiques de Sol (UCS) sur la commune de Ris-Orangis (source : Sol Paysage 2025).	144
Figure 62. Hiérarchisation des données de la base de données DoneSol, à partir desquelles le calcul des fonctions s'effectue.....	150
Figure 63. Représentation des UTS au sein des UCS dont les données sont disponibles sous le format de données DoneSol. Source : © Soltis environnement.....	151
Figure 64. Sous-fonction « enracinement de la végétation » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol. L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note.	180
Figure 65. Sous-fonction « fourniture en nutriments » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol.	180
Figure 66. Sous-fonction « infiltration de l'eau » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol. Un paramètre très défavorable est déclassant.....	181
Figure 67. Sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol.....	181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. De la formalisation du besoin à l'aboutissement des études pour chaque échelle de travail..	14
Tableau 2. Aide à la lecture du guide.	16
Tableau 3. Objectifs de l'intégration des sols dans les stratégies d'aménagement selon l'échelle de travail et sélection des fonctions, sous-fonctions et indices de multifonctionnalité à cibler.....	57
Tableau 4. Présentation des trois approches.	61
Tableau 5. Exemple pour illustrer les notions de propriété, paramètre, indicateur et indice telles qu'elles sont mobilisées dans le cadre de ce guide.	63
Tableau 6. Exemples de propriétés pérennes et dynamiques et bases de données disponibles en France métropolitaine.	64
Tableau 7. Liste des indicateurs de niveau 1 et de niveau 2 pour appliquer la méthode « 4 fonctions ».	67
Tableau 8. Correspondance entre l'indice agrégé calculé à partir des sous-fonctions et le potentiel agronomique. La somme des notes est comprise entre 3 et 15. Le niveau « Très faible » correspond ainsi à une somme comprise entre 3 (inclus) et 6 (exclus), tandis que le niveau « Très élevé » correspond à une somme comprise entre 12 (inclus) et 15 (inclus).	71
Tableau 9. Correspondance entre la note de sous-fonction et le potentiel de régulation climatique (stockage du carbone dans un contexte d'atténuation du changement climatique).....	73
Tableau 10. Densité de sondage préconisée en fonction de l'échelle cartographique attendue.....	96
Tableau 11. Règle de notation de l'indice de capacité fonctionnelle, d'après l'arbre de décision de l'approche 3. La densité de couvert arboré et la présence de petits éléments ligneux sont issues des couches Copernicus. La note 0 correspond aux pixels dont plus de la moitié de la surface est imperméabilisée : l'échelle va donc ici de 0 à 5, et non de 1 à 5 comme dans les deux autres approches.	114
Tableau 12. Informations relatives à deux UTH sur le territoire de Ris-Orangis (Sol Paysage 2025).	139
Tableau 13. Données générales à collecter pour appliquer les approches 1 à 3. L'absence de croix signifie « donnée facultative » pour l'application des 3 approches. Elles n'en demeurent pas moins intéressantes pour la compréhension globale du territoire étudié.	145
Tableau 14. Tables et champs de la base DoneSol mobilisés par l'approche 1, et règles d'extraction (d'après les fiches techniques CartoMUSE, 2025).	181

BIBLIOGRAPHIE

- AGAM – Agence d’urbanisme de l’agglomération marseillaise (2019). *La typomorphologie, un outil indispensable à la compréhension du territoire*. Regards territoire n° 89.
- Andrianjara, I., Lemot, A., Laroche, B., Branchu, P. & Martin, M. (2025). *Fiches techniques du calcul des indicateurs MUSE – approche en milieu rural*. Version décembre 2025 issue du projet CartoMUSE, 51 p.
- Anthony, M. A., Bender, S. F. & van der Heijden, M. G. A. (2023). Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33), e2304663120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
- Atanasova, M. (2024). *Proposition de méthode de cartographie pédologique appliquée au milieu urbain : application à des secteurs de la ville de Ris-Orangis à l’échelle du 1:10 000* (Mémoire de M2). AgroParisTech / Sol Paysage.
- AUCAME – Agence d’urbanisme de Caen Normandie (2021). *L’analyse des formes urbaines : comprendre et faire évoluer la ville* (n° 131).
- AURA – Agence d’urbanisme de la région angevine (2022). *Îlots morphologiques urbains*.
- Baize, D. & Girard, M.-C. (2008). *Référentiel pédologique 2008*. Éditions Quae.
- Banque mondiale (2022). *Population urbaine (% de la population totale) – France*. Données ouvertes de la Banque mondiale (indicateur SP.URB.TOTL.IN.ZS). <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=FR>
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Béchet B., Le Bissonnais Y., Ruas A. (coord.) (2017). *Sols artificialisés et processus d’artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d’action*. Rapport d’expertise scientifique collective, INRA-IFSTTAR, 609 p.
- Bert, V. (2025). *Méthodologie pour encadrer l’usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d’étape*. INERIS (213291-2772344 v2).
- Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort J.L., Cousin I. (2022). *Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures*, éditions Arvalis.
- Branchu, P., Marseille, F., Béchet, B. et al. (2022). *MUSE – Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d’urbanisme*. ADEME. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/5415>
- Briones, M. J. I. (2014). Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 7.
- Bruand, A., Duval, O. & Cousin, I. (2004). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d’horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), 323.
- 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 : 10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- Calvaruso, C., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A. & Eglin, T. (2021). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ? *Étude et Gestion des Sols*, 28. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/04/EGS_2021_28_Calvaruso_03-29.pdf
- Cécillon, L., Baudin, F., Chenu, C., Houot, S., Jolivet, R., Kätterer, T., Lutfalla, S., Macdonald, A., van Oort, F., Plante, A. F., Savignac, F., Soucémarianadin, L. N. & Barré, P. (2018). A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences*, 15, 2835-2849. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2835-2018>
- Cerema (2026). *Rapport d’analyse des déterminants de la consommation d’ENAF. Période du 1er janvier 2009 au 1er janvier 2023*. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/601069/>
- Cherel, J., Séré, G., Boithias, L., Warot, G., Schwartz, C. & Morandas, P. (2017). *Destisol : les sols, une opportunité pour un aménagement durable*. ADEME. <https://librairie.ademe.fr>

- Commissariat général au développement durable (CGDD) (2020). *Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) – Rapport de première phase (2012-2018)*. Ministère de la Transition écologique.
- Commission européenne (2012). *Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols*. Document de travail des services de la Commission, SWD(2012) 101 final/2. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne.
- Cordeau E. (2016). *Les îlots morphologiques urbains (IMU) : délimitation et caractérisation des « IMU 2012 » en Île-de-France*. Avec la collaboration de J. Boucher, C. Mauclair et M. Reynaud. Paris, IAU Île-de-France, 126 p. ISBN 978-2-7371-1964-4.
- Cousin, I., Desrousseaux, M., Leenhardt, S. et al. (2025). *Préserver la qualité des sols, vers un référentiel d'indicateurs. Synthèse du rapport d'étude*. INRAE. <https://www.inrae.fr/actualites/indicateurs-qualite-sols-au-service-politiques-publiques>
- di-Salvo, M. & Cadot, R. (2026). Analyse de la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers : période du 1er janvier 2011 au 1er janvier 2025. Cerema, pour le compte de la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN).
- Ducommun, C., Duvigneau, C. & Vidal-Beaudet, L. (2023). Cartographie des sols urbains : méthode de caractérisation d'une couverture pédologique soumise à différentes formes de dénaturation et d'anthroposolisation. *Étude et Gestion des Sols*, 30, 127-143.
- Eglin, T., Cousin, I. & Walter, C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols*, 28, 143-146.
- FAO (s. d.). Section 3. Saline soils and their management. Document en ligne, d'après Richards, L. A. (éd.) (1954), *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, USDA Agriculture Handbook 60.
- Fèvre, M. (2017). Les « services écosystémiques », une notion fonctionnelle. *Droit et Ville*, 84(2), 95-118. <https://doi.org/10.3917/dv.084.0095>
- Geisen S. et al. (2019). A methodological framework to embrace soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 136, 107536.
- GEPPA (1963). Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée, commission de cartographie. Triangle des textures, 17 classes.
- Girard, M.-C. (2014). *Définition des sols*. AFES Édition.
- Gobat, J.-M., Aragno, M. & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols* (3e éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- Griffiths B.S., Römbke J., Schmelz R.M., Scheffczyk A. et al. (2016). Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological Indicators*, 69, 213-223.
- Haines-Young, R. & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In Raffaelli, D.G. & Frid, C.L.J. (eds.), *Ecosystem Ecology: A New Synthesis*, Cambridge University Press, pp. 110-139.
- Jamagne M. (1967). *Bases et techniques d'une cartographie des sols*. Annales agronomiques, vol. 18, numéro hors-série, INRA, Versailles, 142 p.
- Kome, G. K., Enang, R. K., Yerima, B. P. K. & Van Ranst, E. (2024). Quantitative relationships between Munsell colour attributes and organic carbon in highly weathered tropical soils. *Geoderma Regional*, 39, e00898. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00898>
- Konen, M., Burras, L. & Sandor, J. (2003). Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in North Central Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, 67. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1823>
- Laroche B., Doux J. (2007). Vérifications de la qualité des Référentiels Régionaux Pédologiques en France : état des lieux et enseignements. *Étude et Gestion des Sols*, 14(3), 219-236.
- Le Bissonnais, Y. & Le Souder, C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols*, 2(1).
- Legros, J.-P. (1996). *Cartographie des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 317 p.

- Le Guern C., Deslandes B., Boivin B., Lucassou F., Clozel B., Rillard J., Péan A., Bouriau E., Tresse F. (2025). Prise en compte de la qualité des sols dans la trajectoire Zéro Artificialisation Nette (QUASOZAN) – Développements méthodologiques appliqués à Rennes Métropole. Rapport final BRGM/RP-74153-FR, 20 février 2025. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-74153-FR.pdf>
- Lemercier B., Laroche B., Armand R., Chafchafi A., Détriché S., Ducommun C., Jalabert S., Lehmann S. (2017). Guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques. Version 1. RMT Sols et Territoires. INRA, Unité InfoSol, Orléans, 110 p. ISBN 2-7380-1408-9.
- Lucassou F., Chrétien P., Pinson S., Barrière J., Le Guern C. (2024). Mapping the intrinsic potential of water infiltration in urban subsurface: feedback from France. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 13(3). <https://doi.org/10.7343/as-2024-776>
- Maréchal, J., Marié, X., Cluzeau, D., Lénack, E. & Desrousseaux, M. (2025). *Intégration de la trame brune des sols dans les programmes d'aménagement urbain (Tram'Biosol)*. Plan Urbanisme Construction Architecture.
- Neaud, C. (2024). *Les coefficients de surfaces non imperméabilisées et éco-aménageables : des outils de planification pour préserver les sols en milieu urbain (Livable 3)*. Cerema, octobre. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/etude-coefficients-surfaces-non-impermeabilisees-ou-eco>
- Pinson S., Bault V., avec la collaboration de Braibant G., Ridet L., Batut K., Bodere G., Bentivegna G., Decouchon E., Boucherat Y., Koch F., Breuil C., Grandemange A. (2019). *Profondeur des entités hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole – Projet PHOEBUS*. Rapport final BRGM/RP-68599-FR, 74 p., 3 ann. En ligne : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68599-FR.pdf>
- Pulleman M.M., Creamer R.E., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G. & Rutgers M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services: an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 529-538.
- Ranjard L., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N. et al. (2013). Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nature Communications*, 4, 1434.
- Reid, W., Mooney, H., Cropper, A. et al. (2005). Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire (MEA). <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.447.aspx.pdf>
- Römbke J. et al. (2018). Soil biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(6), 717-725.
- Tscheiller, R. & Riah-Anglet, W. (coord.), Brauman, A., Cahurel, J.-Y., Delporte, F., Dizien, C., Gontier, L., Le Net, J., Nassr, N., Obriot, F., Perrin, A.-S., Revalier, C., Thioye, B. & Valé, M. (2025). *Indicateurs de fonctionnement biologique des sols agricoles – Fiches pratiques* (Recueil de fiches issues des travaux du Réseau Mixte Technologique).
- Schwartz, C., Bispo, A., Blanchart, A., Brunet, J.-F., Cambou, A., Cannavo, P., Consales, J.-N., De Fouquet, C., Ducommun, C., Lattelais, C., Le Guern, C., Saby, N., Sauvaget, B., Séré, G. & Vidal-Beaudet, L. (2022). *Sols urbains et projets d'aménagement (SUPRA) : de l'échantillonnage des sols urbains à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols*. ADEME. <https://bibliothèque.ademe.fr>
- Sebag, D., Verrecchia, E. P., Cécillon, L. et al. (2016). Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices. *Geoderma*, 284, 185-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.025>
- Séré, G., Le Guern, C., Bispo, A., Layet, C., Ducommun, C., Clesse, M., Schwartz, C., Vidal-Beaudet, L. (2024). Selection of soil health indicators for modelling soil functions to promote smart urban planning. *Science of the Total Environment* 924 - 171347
- Seybold, C. A., Grossman, R. B. & Reinsch, T. G. (2005). Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 856-863. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0026>
- Sol Paysage (2024). Définition des unités cartographiques urbaines (UCU) pour la caractérisation des sols urbains.
- Sol Paysage (2025). *Évaluation du degré d'anthropisation des sols et trajectoires d'urbanisation* (projet ZAN, programme IGCS du GIS Sol). Communication aux Journées d'Étude des Sols (JES), Genève.
- Souami, T. (2023). « Zéro artificialisation nette » en aménagement : compter et conter la nature en ville pour changer les pratiques ? *Développement durable et territoires*, 14(3). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.23244>

- Szabó, B., Weynants, M. & Weber, T. K. D. (2021). Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), 151-175. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>
- Tóth B., Weynants M., Nemes A., Makó A., Bilas G., Tóth G., 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226-238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- Vincent, S., Lemerrier, B., Berthier, L., & Walter, C. (2018). Spatial disaggregation of complex soil map units at the regional scale based on soil-landscape relationships. *Geoderma*, 311, 130-142.
- Vincent Q., Mangin N., Rigolot R. et Blanchart A. (2022). Étude de la biodiversité des sols (macrofaune épigée) urbains et péri-urbains dans le cadre de la création d'une trame brune. *Étude et Gestion des Sols*, 29, 275-294.
- Vincent, Q. & Le Rouzic, V. (2024). *Quali-ZAN : un outil opérationnel au service de la Zéro Artificialisation Nette*. Conférence Cerema. <https://www.epamarne-epafrance.fr/actualites/qualizan-loutil-operationnel-au-service-de-la-strategie-zan/>
- Vincent, Q., Auclerc, A. & Leyval, C. (2023). La biodiversité des sols. *Encyclopédie de l'Environnement*. <https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/04/horsegs275.pdf>
- Vincent, Q. & Blanchart, A. (2023). *Faciliter le transfert des résultats de la recherche en outils opérationnels – Thématique de la multifonctionnalité des sols*. Rapport, 97 p.

GLOSSAIRE

Anthropisation des sols : l'anthropisation désigne la perturbation des sols, en surface comme en profondeur, du fait des activités humaines, passées ou actuelles : modifications directes liées à l'urbanisation (apports de matériaux, terrassements, constructions, dépôts, extractions) ou indirectes (pratiques agricoles, amendements, drainage, irrigation, pollution).

ANTHROPOSOL : un ANTHROPOSOL est un sol dont les caractères et le fonctionnement sont dominés par l'origine anthropique des matériaux ou des transformations qui l'affectent, sur une épaisseur importante (de l'ordre de 50 cm ou plus depuis la surface). Il résulte soit d'un apport de matériaux par l'Homme, soit d'une transformation si intense des sols préexistants que le profil originel en devient méconnaissable.

Artificialisation : l'artificialisation est l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique, par son occupation ou son usage (loi Climat et Résilience, 2021).

Biocénose : ensemble des êtres vivants (animaux, végétaux, champignons, bactéries) qui partagent un même milieu et interagissent entre eux.

Biodiversité : variabilité entre les organismes vivants (intra- et inter-espèces, intra- et inter-écosystèmes) et interactions entre les organismes vivants et entre ces organismes et leurs milieux de vie (d'après la Convention sur la diversité biologique, 1992).

Capacité d'échange cationique (CEC) : la capacité d'échange cationique est la quantité de cations (calcium, magnésium, potassium, sodium, aluminium, etc.) qu'un sol peut retenir de façon réversible sur ses surfaces argileuses et organiques, puis échanger avec la solution du sol. Exprimée en cmol+/kg (ou meq/100 g), elle renseigne sur l'aptitude du sol à retenir les éléments nutritifs et à en limiter le lessivage. Elle dépend principalement de la teneur en argile, de la teneur en matière organique et du pH.

Compensation écologique : la compensation écologique est l'ensemble des mesures destinées à contrebalancer les effets négatifs résiduels d'un projet ou d'une activité sur les écosystèmes, après que toutes les mesures d'évitement et de réduction ont été mises en œuvre (séquence Éviter-Réduire-Compenser ; Code de l'environnement, art. L. 163-1).

Conductivité hydraulique à saturation (Ks) : la conductivité hydraulique à saturation désigne l'aptitude d'un sol entièrement saturé en eau à laisser circuler cette eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique. Exprimée en unité de vitesse (mm/h, cm/j ou m/s), elle mesure la perméabilité du sol à l'eau. Elle est déterminée par des essais in situ (méthodes Beerkan, double anneau, Guelph, Porchet ou Matsuo) ou en laboratoire sur échantillon, et peut être estimée par des fonctions de pédotransfert. Elle constitue un paramètre clé de la sous-fonction « infiltration de l'eau ».

Continuité écologique : une continuité écologique correspond, au sens du Code de l'environnement, à l'ensemble formé par les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques qui les relient. Elle désigne les milieux et liaisons fonctionnelles permettant aux populations d'espèces de circuler, de se disperser et d'accéder aux ressources nécessaires à leur cycle de vie (alimentation, reproduction, repos), garantissant ainsi les échanges génétiques au sein de territoires plus ou moins fragmentés (Code de l'environnement, art. L. 371-1).

Désartificialisation : la désartificialisation consiste en des actions ou opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé (loi Climat et Résilience, 2021).

Désimperméabilisation : la désimperméabilisation est une action ayant pour but de « rétablir en partie l'ancien profil du sol en éliminant les couches imperméables (ex. asphalté ou béton), en ameublissant le sol sous-jacent, en éliminant les matières étrangères et en restructurant le profil. » (Commission européenne, 2012).

DoneSol : DoneSol est à la fois la base de données nationale qui rassemble les données pédologiques françaises et le format dans lequel ces données sont structurées. Elle est alimentée par les études du programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS) et gérée par le GIS Sol.

Écosystème : un écosystème est un ensemble complexe et dynamique formé d'une communauté de plantes, d'animaux, de champignons et de micro-organismes ainsi que de leur environnement non vivant, interagissant comme une unité fonctionnelle (Règlement (UE) 2024/1991 sur la restauration de la nature).

Éléments grossiers : les éléments grossiers sont les fragments minéraux de plus de 2 mm (graviers, cailloux, pierres, blocs) contenus dans un horizon. Leur abondance, appelée charge en éléments grossiers et exprimée en pourcentage, réduit d'autant le volume de terre fine disponible pour la rétention de l'eau, la fourniture en nutriments et l'enracinement.

Épaisseur utile à l'enracinement : l'épaisseur utile à l'enracinement est l'épaisseur de sol effectivement colonisable par les racines, comptée depuis la surface jusqu'à l'obstacle qui les arrête (roche, horizon compacté, plancher imperméable, nappe permanente). Elle se distingue de la profondeur totale du sol, qui peut inclure des couches inexploitable.

Fonction de pédotransfert : une fonction de pédotransfert est une relation statistique qui estime une propriété du sol difficile ou coûteuse à mesurer à partir de propriétés couramment disponibles (granulométrie, teneur en matière organique, masse volumique apparente). Le guide y recourt pour la réserve utile et pour la conductivité hydraulique à saturation.

Fonction (écologique) du sol : résultat d'un processus pédologique, ou d'une combinaison de processus, qui régit la dynamique de la structure et de la composition de l'écosystème et qui, à ce titre, sous-tend les services écosystémiques rendus par le sol. Le guide retient quatre fonctions du sol : biologique, climatique, nutritive et hydrique (d'après ISO/TS 18718:2026).

Granulométrie : la granulométrie est la répartition quantitative des particules minérales d'un échantillon selon leur taille, déterminée par mesure en laboratoire. Elle sert à déterminer la texture, en projetant les taux d'argile, de limon et de sable dans un triangle de référence. Deux triangles de référence sont utilisés en France : celui de l'Aisne (Jamagne, 1967) et celui du GEPPA (1963).

Habitat : un habitat est « un ensemble indissociable constitué d'une faune, avec des espèces ayant tout ou partie de leurs diverses activités vitales sur l'espace considéré, une végétation (herbacée, arbustive et arborescente) et un compartiment stationnel (conditions climatiques, sols et matériau parental et leurs propriétés physico-chimiques) » (Inventaire national du patrimoine naturel – INPN).

Horizon d'un sol : un horizon est une couche de sol sensiblement parallèle à la surface, individualisée au cours de la pédogenèse, présentant des caractères morphologiques (couleur, texture, structure, teneur en matière organique, etc.) homogènes et distincts de ceux des couches sus- et sous-jacentes. La succession verticale des horizons constitue le profil (ou solum) du sol (d'après le Référentiel pédologique, AFES, 2008).

Hydromorphie : l'hydromorphie désigne l'ensemble des processus et des traits morphologiques résultant de la saturation en eau, temporaire ou permanente, d'un sol ou de certains de ses horizons. L'engorgement provoque un déficit en oxygène (anaérobiose) à l'origine de processus alternés de réduction et d'oxydation du fer et du manganèse, qui se traduisent par des traits rédoxiques (taches de rouille, décolorations), la présence d'un horizon réductique (de teinte gris-bleu à verdâtre) ou encore la présence de milieux tourbeux (Référentiel pédologique, AFES – Baize & Girard, 2008).

Imperméabilisation : l'imperméabilisation est le recouvrement du sol par des matériaux totalement ou partiellement imperméables. Elle constitue la forme la plus complète de l'artificialisation, mais ne s'y confond pas : un sol peut être artificialisé sans être imperméabilisé (directive (UE) 2025/2360, article 3).

Indicateur : un indicateur est une grandeur qui renseigne sur l'état ou le niveau d'une fonction ou sous-fonction du sol. Il peut être fondé sur un seul paramètre ou sur une combinaison de plusieurs paramètres adossés à un référentiel d'interprétation ; il est d'autant plus utile qu'il est fiable, précis, standardisé et capable de représenter une ou des fonctions importantes. Il s'inscrit dans la chaîne propriété → paramètre → indicateur → indice (voir ces entrées).

Indice : un indice correspond à une agrégation de notes – d'indicateurs pour un indice de sous-fonction, de sous-fonctions pour le potentiel agronomique ou l'indice de multifonctionnalité – pour fournir une vision synthétique d'une fonction, d'une sous-fonction ou de la multifonctionnalité des sols. Dans l'approche 3, l'indice de capacité fonctionnelle fait exception : il correspond à une note globale déduite directement de l'occupation du sol, sans indicateur ni fonction identifiée.

Indice de capacité fonctionnelle : l'indice de capacité fonctionnelle est la note globale, de 0 à 5, attribuée par l'approche fondée sur l'occupation du sol. Déduite du taux d'imperméabilisation et du type de couvert végétal, elle estime la probabilité qu'un sol de pleine terre fonctionnel soit présent, sans identifier de fonction ni de sous-fonction : elle ne se compare donc pas directement aux indices obtenus par les deux autres approches.

Masse volumique apparente sèche : la masse volumique apparente sèche (MVAS) est la masse de sol sec rapportée au volume total du sol en place, espace poral compris ; elle s'exprime en g/cm³ (ou t/m³). Elle renseigne sur l'état de compaction et la porosité du sol et intervient dans le calcul des stocks (eau, carbone).

Multifonctionnalité : la multifonctionnalité est la capacité d'un sol à assurer simultanément plusieurs fonctions écologiques. Dans le guide, elle est traduite par l'indice de multifonctionnalité, somme des indices des six sous-fonctions, comprise entre 6 et 30 et classée en cinq niveaux.

Note : la note est la valeur prise par un indicateur ou un indice sur l'échelle du guide, de 1 (très faible) à 5 (très élevé). L'approche fondée sur l'occupation du sol fait exception, avec une échelle de 0 à 5.

Occupation du sol : l'occupation du sol est la couverture physique observée à la surface de la Terre (culture, forêt, bâti, surface en eau, etc.). Elle se distingue de l'usage du sol, qui désigne la fonction socio-économique qui lui est attachée. Deux sols de même occupation peuvent avoir des usages différents, et inversement.

Paramètre : un paramètre est une grandeur qui intervient dans un calcul ou un modèle (ex. : masse volumique apparente des sols utilisée pour calculer un stock de carbone). Il peut être issu directement d'une mesure de propriété ou dérivé de plusieurs propriétés.

Pédogenèse : la pédogenèse désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques, biologiques et climatiques qui transforment un matériau parental brut (roche mère) en un sol différencié et structuré en horizons (d'après le Référentiel pédologique, AFES, 2008).

Plancher imperméable : un plancher imperméable est une couche continue peu ou pas perméable (dalle, remblai compacté, horizon induré, substrat imperméable) qui interrompt la circulation verticale de l'eau. Plus il apparaît près de la surface, plus il limite l'infiltration : dans le guide, un plancher situé à moins de 25 cm est déclassant pour la sous-fonction « infiltration de l'eau ».

Pleine terre : un sol de pleine terre est un sol urbain qui satisfait cinq critères cumulatifs (définition proposée par le Cerema et l'OFB pour la direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, retenue dans ce guide) : absence de tout revêtement en surface, y compris perméable ; présence de végétation herbacée, arbustive ou arborée ; existence d'au moins deux horizons, dont un horizon organique en surface, sur une profondeur minimale de 30 cm ; absence de plancher imperméable anthropique en profondeur ; composition majoritaire de matériaux terreux. Des sols reconstitués par génie pédologique peuvent y répondre. Seuls les deux premiers critères étant observables par télédétection, l'approche 3 n'établit qu'une présomption de pleine terre d'où la notion de capacité fonctionnelle présumée. Cette définition se distingue du coefficient de pleine terre inscrit dans certains documents d'urbanisme, dont la définition, en particulier la profondeur minimale, est propre à chaque territoire.

Potentiel agronomique : le potentiel agronomique est la capacité d'un sol à soutenir durablement la production végétale. Dans le guide, il est obtenu par la somme des indices de trois sous-fonctions : « fourniture en nutriments », « stockage et transfert de l'eau à la plante » et « enracinement de la végétation », comprise entre 3 et 15 et classée en cinq niveaux.

Processus du sol : interactions (physiques, chimiques ou biologiques) entre les composants du sol qui sous-tendent la formation des sols, leurs fonctions et les services écosystémiques, et qui peuvent être utilisées pour leur quantification (source : ISO/TS 18718:2026, Soil functions and related ecosystem services).

Propriété : une propriété désigne une grandeur mesurée telle que le pH, la profondeur d'enracinement, etc., mesurée directement sur le terrain ou en laboratoire ; à défaut de mesure directe, elle peut être estimée par des fonctions de pédotransfert (exemple de la conductivité hydraulique à saturation).

Référentiel d'interprétation : un référentiel d'interprétation est la grille qui associe une gamme de valeurs d'un paramètre à une note. La réponse peut être croissante, décroissante ou optimale, ou associer

directement une note à une classe qualitative. Les référentiels retenus par le guide sont présentés en ANNEXE 7³³.

Référentiel Régional Pédologique (RRP) : le Référentiel Régional Pédologique est la carte des sols d'une région, établie à l'échelle du 1/250 000 dans le cadre du programme IGCS et diffusée au format DoneSol. Il couvre la quasi-totalité du territoire métropolitain et constitue la source principale de l'approche à partir de bases de données.

Refonctionnalisation : la refonctionnalisation désigne les interventions qui visent à rétablir tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol dégradé, sans nécessairement lui rendre son profil d'origine : décompactage, apport de matière organique, reconstitution d'un horizon de surface, revégétalisation. Elle se distingue de la restauration, qui vise le rétablissement de l'écosystème dans son ensemble, et de la désimperméabilisation, qui n'en constitue qu'un préalable.

Renaturation : la renaturation d'un sol « consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé » (loi Climat et Résilience, 2021).

Réserve utile : la réserve utile (RU) est la quantité d'eau, exprimée en millimètres, que le sol peut stocker puis restituer aux plantes. Elle correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent, intégrée sur la profondeur d'enracinement, en général plafonnée à 120 cm lorsque celle-ci est plus profonde. Mesurée en laboratoire ou estimée par des fonctions de pédotransfert, elle constitue un indicateur clé de la sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » et du potentiel agronomique du sol.

Restauration : la restauration consiste à contribuer activement ou passivement au rétablissement d'un écosystème afin d'améliorer sa structure et ses fonctions, dans le but de conserver ou de renforcer la biodiversité et la résilience des écosystèmes (Règlement (UE) 2024/1991 sur la restauration de la nature).

Santé du sol : performance relative d'un sol à un moment donné, comparée à son potentiel maximal (source : ISO/DTS 18718, Soil functions and related ecosystem services).

Service écosystémique : bénéfice que les êtres humains tirent d'un ou plusieurs écosystèmes (source : ISO/DTS 18718, Soil functions and related ecosystem services).

Sol : le sol est la couche superficielle de la croûte terrestre, située entre le substrat rocheux et la surface terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants (proposition de directive européenne sur la surveillance des sols, 2023 ; cf. Bert, 2025).

Sous-fonction du sol : une sous-fonction est une composante d'une fonction du sol, évaluée séparément. Le guide en retient six : « support des organismes du sol » et « enracinement de la végétation » pour la fonction biologique, « stock de carbone » pour la fonction climatique, « fourniture en nutriments » pour la fonction nutritive, « infiltration de l'eau » et « stockage et transfert de l'eau à la plante » pour la fonction hydrique.

Technosol : un Technosol est un sol dont les propriétés et la pédogenèse sont dominées par son origine anthropique, contenant une proportion importante de matériaux technogéniques ou d'artefacts issus des activités humaines (World Reference Base for Soil Resources, IUSS ; travaux SUITMA – Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas). Le Technosol de la classification internationale WRB recouvre une notion proche de l'ANTHROPOSOL du Référentiel pédologique français (voir cette entrée).

Texture : la texture est la classe attribuée à un horizon selon les proportions d'argile, de limon et de sable qu'il contient, d'après une classification de référence. Sur le terrain, elle est estimée au toucher ; en laboratoire, elle est déduite de la granulométrie. Deux triangles de référence sont utilisés en France : celui de l'Aisne (Jamagne, 1967) et celui du GEPPA (1963).

Trame brune : la trame brune désigne la composante édaphique des continuités écologiques : le réseau formé par les sols vivants et fonctionnels et les espaces de pleine terre connectés, qui assure la circulation de la faune et des micro-organismes du sol ainsi que la connectivité des habitats souterrains. Complémentaire de la Trame verte et bleue, elle intègre le sol comme support de continuité écologique

³³ ANNEXE 7 mise à disposition sur la librairie ADEME.

à part entière dans les démarches de planification et d'aménagement (concept encore mouvant, notamment issu du projet Tram'Bio Sol, programme BAUM PUCA-OFB ; Maréchal et al. 2025).

Trame verte et bleue : la Trame verte et bleue (TVB) est un réseau écologique cohérent, défini à différentes échelles du territoire, formé de continuités écologiques terrestres (trame verte) et aquatiques (trame bleue). Elle est constituée de réservoirs de biodiversité — espaces où les espèces accomplissent tout ou partie de leur cycle de vie — et des corridors écologiques qui les relient. Outil d'aménagement du territoire, elle vise à enrayer la perte de biodiversité en préservant et en restaurant les continuités nécessaires aux déplacements des espèces et au bon fonctionnement des écosystèmes (Code de l'environnement, art. L. 371-1 ; lois Grenelle I et II, 2009-2010).

Unité Cartographique de Sol (UCS) : une unité cartographique de sol est définie comme un morceau de la couverture pédologique. Elle a pour but de représenter l'extension géographique d'un ou de plusieurs types de sol. Elle constitue donc le regroupement d'une ou plusieurs Unités Typologiques de Sol (UTS) de façon à pouvoir en faire une représentation cartographique à une échelle donnée (Laroche et Doux, 2007).

Unité Typologique de Sol (UTS) : une unité typologique de sol est un volume de la couverture pédologique présentant en tous lieux de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être localement absent (Laroche et Doux, 2007).

ANNEXE 1. COMPTE RENDU ISSU DES ENTRETIENS RÉALISÉS AUPRÈS DES COLLECTIVITÉS

L'intégration des sols dans la planification territoriale demeure limitée, en raison de la complexité des démarches, du déficit de données localisées, de la diversité des contextes et de freins organisationnels (Vincent et Blanchart 2023). Elle pâtit également d'un manque d'outils opérationnels et d'une culture technique encore peu ancrée au sein des services d'urbanisme.

Pour mieux comprendre les besoins concrets des territoires et identifier les leviers d'action, une série d'entretiens a été conduite, dans le cadre de l'élaboration de ce guide, auprès de 11 collectivités de profils variés. Ces retours confirment que la réussite de l'intégration des sols dans la planification territoriale repose sur des outils robustes et partagés, un accompagnement renforcé, la sensibilisation des élus et la traduction territorialisée des enjeux pédologiques, écologiques et climatiques.

Les principales conclusions issues de ces entretiens sont présentées ci-dessous, organisées en cinq grands axes :

Difficultés d'intégration dans les politiques publiques

- > La prise en compte des sols dans les documents de planification (SCoT, PLU, SRADDET) reste globalement limitée. Les sols y sont souvent abordés uniquement sous l'angle de l'occupation, de la possession et/ou du statut des parcelles, ou au travers d'approches géotechniques (portance) et de pollution, sans réelle évaluation de leur santé ou de leur multifonctionnalité ;
- > La sensibilisation des élus demeure insuffisante. Certains perçoivent encore les enjeux liés aux sols, à l'instar de ceux concernant la biodiversité, comme des contraintes plutôt que comme des leviers d'action territoriale ;
- > Les outils de planification souffrent d'un manque de coordination entre les différents niveaux de gouvernance (métropoles, territoires ruraux). Une tension est souvent relevée entre les priorités locales (maintien de l'activité agricole, développement économique) et les exigences plus stratégiques (ZAN, stratégies environnementales).

Pressions croissantes sur les sols

- > Des conflits d'usage persistent entre agriculture, urbanisme et dynamiques économiques, rendant la gestion des sols particulièrement complexe, notamment dans les zones touristiques de montagne, littorales ou les périphéries urbaines en forte croissance.

Qualité et accès aux données

- > Les bases de données disponibles sont jugées hétérogènes et inadéquates pour guider des décisions locales. Par exemple, les données pédologiques françaises disponibles à l'échelle 1/250 000 sont trop générales pour une application opérationnelle et les données à une échelle plus fine n'existent pas toujours. Par ailleurs, elles ne sont pas directement exploitables par des non-spécialistes ;
- > Les couches d'occupation du sol présentent parfois un niveau de précision insuffisant pour permettre certains traitements de données exigés par les méthodologies d'évaluation de la fonctionnalité des sols. Plusieurs collectivités soulignent l'intérêt d'utiliser une couche

d'occupation propre à la localité (mode d'occupation du sol, MOS), qui reste plus précise que certaines bases nationales ;

- > Toutefois, certaines collectivités disposent de bases de données historiques locales (pédologie, hydrogéologie), qui permettent une meilleure analyse de la multifonctionnalité des sols à l'échelle parcellaire et facilitent leur intégration dans les outils de planification.

Méthodologies et outils insuffisamment accessibles

- > Des méthodes d'évaluation fonctionnelle des sols ont été expérimentées par plusieurs collectivités (ex. AMI ZAN). Bien qu'efficaces, elles restent difficiles à mobiliser pour les plus petites, faute de ressources techniques. Par ailleurs, la diversité des outils proposés par les institutions (notamment l'ADEME) complexifie le choix de la méthode la plus adaptée (Vincent et Blanchart 2023) ;
- > Dans les territoires ayant déployé MUSE (ex. Métropole Savoie), l'absence de données OCS GE a nécessité l'utilisation de bases de données locales. La collectivité souhaite d'ailleurs disposer d'une expertise pour interpréter certains résultats fonctionnels produits par la méthode MUSE ;
- > La notation fonctionnelle peut parfois être perçue comme une donnée figée, alors qu'elle doit impérativement être replacée dans une dynamique environnementale. Elle doit être accompagnée d'une contextualisation fine (pédologie, hydrogéologie, usage historique du sol), d'une gestion de l'incertitude, et d'une lecture critique des cartes produites, en lien avec l'expertise territoriale ;
- > Enfin, la mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation fonctionnelle des sols peut engendrer un coût important, qui constitue parfois le premier frein à son déploiement sur le territoire.

Avancées et leviers identifiés

- > Un besoin fort de **sensibilisation des élus** a été exprimé : il est jugé essentiel de produire des supports pédagogiques adaptés, permettant de rendre accessibles des enjeux souvent complexes. L'objectif de ce guide a d'ailleurs été globalement salué par les collectivités rencontrées ;
- > Un **accompagnement technique** est nécessaire pour aider les territoires à mettre en œuvre une méthode homogène d'intégration des sols dans la planification ;
- > Des **études de coûts** ont été demandées pour appuyer la prise de décision politique ;
- > La prise en compte des **spécificités territoriales**, notamment en lien avec les enjeux de résilience climatique et de séquestration du carbone, a été soulignée.

En synthèse

Dans le cadre de ces entretiens, les priorités des collectivités étaient principalement orientées par l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN), qui constituait le principal levier d'intégration des sols dans les politiques publiques. Elles insistaient sur la nécessité d'aller au-delà d'une approche centrée uniquement sur les objectifs quantitatifs du ZAN. Les sols ne doivent pas être envisagés comme une clé d'entrée unique, mais comme un des paramètres structurants d'une planification intégrée, en interaction avec d'autres enjeux territoriaux majeurs tels que la biodiversité, l'eau, l'agriculture ou le climat.

Cette posture appelle à une approche équilibrée : il ne s'agit pas de hiérarchiser les enjeux, mais de reconnaître la valeur des sols à la fois comme indicateur de vulnérabilité et comme support de multifonctionnalité.

Une vision globale est donc nécessaire, articulant trois actions complémentaires :

- > Accompagner les territoires avec des diagnostics adaptés à leurs enjeux spécifiques (agronomiques, écologiques, urbains) et à l'échelle de l'action ;
- > Construire des méthodologies cohérentes avec les autres politiques environnementales (ex. Trame verte et bleue) et intégrables dans les documents d'urbanisme existants. Cette approche systémique est indispensable pour faire des sols un véritable support d'aide à la décision territoriale ;
- > Mettre en œuvre l'objectif de sobriété foncière.

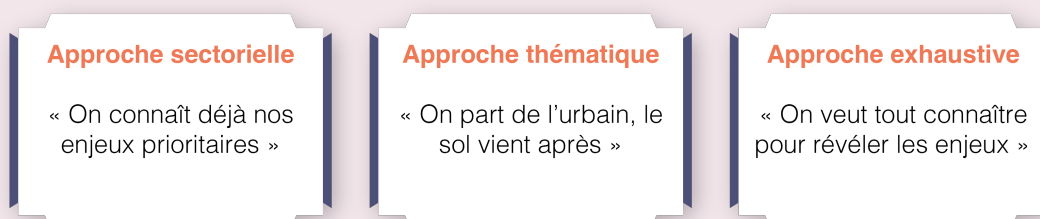
Point de vigilance : quels que soient les outils et analyses mobilisés, la décision finale concernant les choix d'aménagement du territoire est toujours du ressort des élus.

Encadré 12. Approche des collectivités pour intégrer les sols dans la planification

Cet encadré s'appuie sur un **travail d'analyse qualitative réalisé à l'issue de 11 entretiens menés auprès de collectivités territoriales**. Ces échanges ont permis d'identifier différentes manières d'intégrer les sols dans les démarches de planification et d'aménagement.

Trois grandes approches se dégagent, en fonction des objectifs poursuivis (Figure 55) :

- > **Approche sectorielle** : la collectivité mobilise l'analyse des sols de manière ciblée pour répondre à un ou plusieurs enjeux prioritaires identifiés (par exemple la prévention des inondations, la préservation des ENAF ou la réduction des îlots de chaleur), sans chercher une couverture exhaustive du territoire ;
- > **Approche thématique** : à la différence de l'approche sectorielle, qui cible un ou quelques enjeux, la collectivité croise ici plusieurs enjeux à la fois pour orienter les choix d'aménagement, hiérarchiser les secteurs à préserver, à urbaniser ou à renaturer, et assurer la cohérence entre les documents de planification. Il s'agit par exemple d'intégrer les sols dans des OAP thématiques (cours oasis, îlots de chaleur urbains, etc.) ;
- > **Approche exhaustive** : la collectivité vise une caractérisation systématique et homogène des sols à l'échelle de l'ensemble de son territoire, afin de disposer d'un socle de connaissances complet sur leurs fonctions et leur multifonctionnalité à mobiliser, par exemple, dans les PLU(i) pour contribuer aux choix stratégiques.



© Soltis environnement

Figure 55. Approches portées par les collectivités selon les objectifs visés.

Bibliographie citée

Vincent Q., Blanchart A. 2023. « Le bilan de la recherche sur la multifonctionnalité des sols », ADEME / Sol & Co, collection Expertises, 12/2023.

ANNEXE 2. ÉVALUATION DU DEGRÉ D'ANTHROPISATION DES SOLS

La méthodologie d'évaluation du degré d'anthropisation, développée par Sol Paysage (2025), s'appuie sur trois critères distincts :

- > La profondeur de sol modifiée par l'Homme ;
- > La nature des matériaux concernés par cette modification (pédologique, géologique ou anthropique) ;
- > La charge en artefacts et/ou déchets d'origine humaine.

L'évaluation se déroule en trois étapes.

(1) Identification de la profondeur de sol modifiée par l'Homme

Il s'agit de déterminer la profondeur affectée par un remaniement, un apport ou une troncature. L'observateur détermine la profondeur d'apparition du premier horizon non anthropisé pour en déduire la classe de profondeur de remaniement.

Cinq classes de profondeur sont retenues, en cohérence avec les standards d'interprétation du Référentiel pédologique (2008) :

- > [0-25 cm[: sol non modifié, ou modifié par l'Homme sur une profondeur inférieure à 25 cm ;
- > [25-50 cm[: sol modifié par l'Homme jusqu'à une profondeur comprise entre 25 et 50 cm ;
- > [50-80 cm[: sol modifié par l'Homme jusqu'à une profondeur comprise entre 50 et 80 cm ;
- > [80-120 cm[: sol modifié par l'Homme jusqu'à une profondeur comprise entre 80 et 120 cm ;
- > ≥ 120 cm : sol modifié par l'Homme sur plus de 120 cm.

(2) Détermination de la note « matériaux »

Les deux derniers critères (nature des matériaux et charge en artefacts) sont combinés pour établir une typologie de six catégories de matériaux, classées selon leur empreinte anthropique. Ces catégories, notées M0 à M5, reçoivent chacune une note de 0 à 5.

Une note de 0 à 5 est attribuée à chaque matériau :

- > M0 (note = 0) : horizons pédologiques non remaniés ;
- > M1 (note = 1) : matériaux terreux (pédologiques, géologiques) apportés ou horizons (naturels) travaillés ;
- > M2 (note = 2) : matériaux terreux mélangés à des matériaux anthropiques en proportion < 20 % du volume total ;
- > M3 (note = 3) : matériaux terreux mélangés à des matériaux anthropiques en proportion comprise entre 20 % et 50 % ;
- > M4 (note = 4) : matériaux anthropiques ≥ 50 % (remblais divers, déchets, etc.) et/ou remblais compactés, couches techniques, sable de réseaux ;
- > M5 (note = 5) : matériaux anthropiques scellés ou peu perméables (bitume, dalle, pavé à joints fermés, stabilisé).

La note « matériaux » correspond à la somme des notes élémentaires des matériaux (horizons) constituant le profil de sol observé.

(3) Croisement de la profondeur modifiée et de la note « matériaux »

Le degré d'anthropisation du sol est alors déterminé en croisant la profondeur de sol modifiée par l'Homme et la note « matériaux ». La grille de croisement permet de classer le sol selon un niveau d'anthropisation.

À titre d'exemple, l'évaluation du degré d'anthropisation a été réalisée pour les profils de sol P01, P02, P03, P04 et P05 (Figure 56).

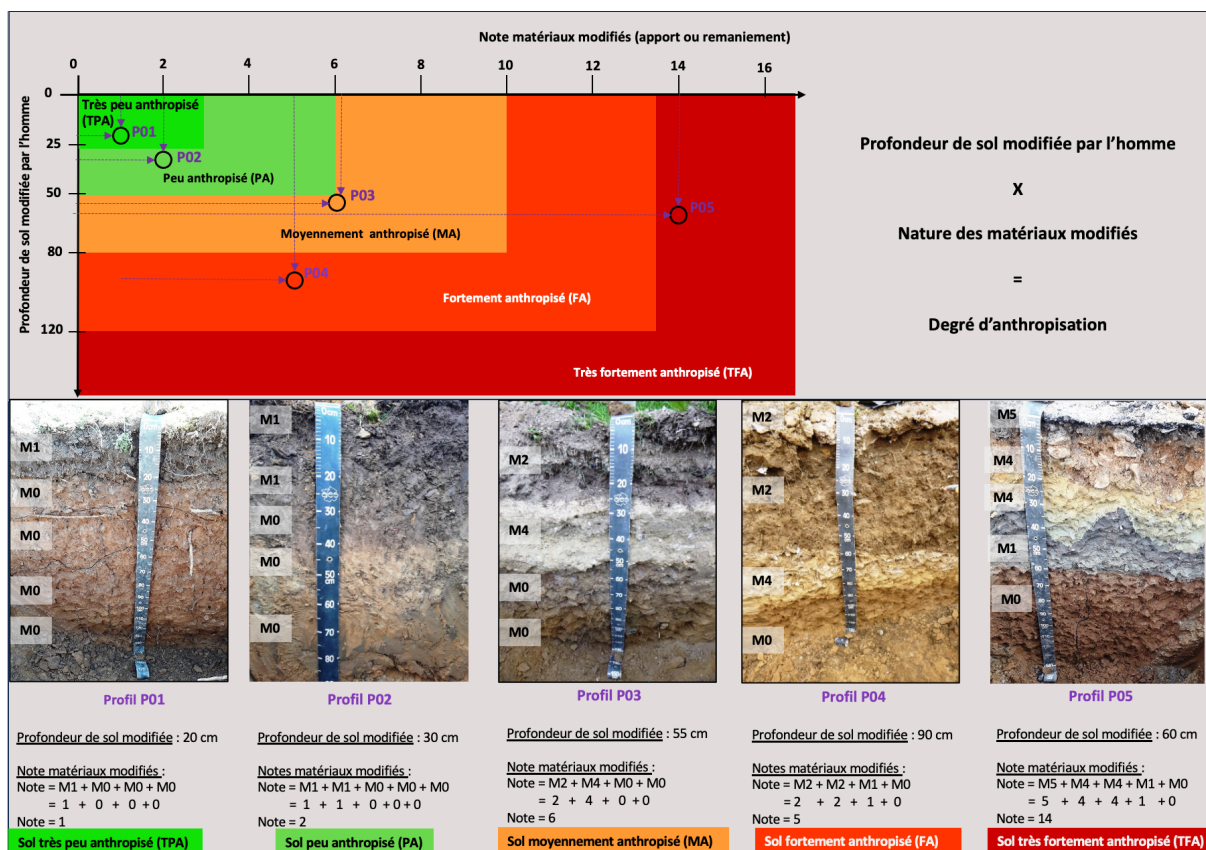


Figure 56. Grille d'évaluation du degré d'anthropisation d'un sol (Sol Paysage 2025). L'axe des x correspond à la note « matériaux ». En fonction de l'épaisseur totale des horizons remaniés, on déduit un niveau d'anthropisation de Très Peu Anthropisé (TPA) à Très Fortement Anthropisé (TFA).

En milieu urbain, la référence ANTHROPOSOLS correspond le plus souvent à des sols présentant un degré d'anthropisation allant de Moyennement Anthropisé (MA) à Très Fortement Anthropisé (TFA).

ANNEXE 3. MÉTHODOLOGIE DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS À GRANDE ÉCHELLE EN MILIEU URBAIN ET PÉRIURBAIN

Cette annexe détaille la démarche de cartographie des sols urbains présentée de façon synthétique au chapitre 3, consacré notamment à la cartographie des sols selon la norme NF X 31-560. Elle décrit d'abord les spécificités des sols urbains, puis la délimitation préalable des Unités Cartographiques Urbaines, l'acquisition des données de terrain et la synthèse cartographique, et se termine par le retour d'expérience de la carte des sols de Ris-Orangis (91).

Les sols urbains : trois types d'espaces

En milieu urbain, les sols sont conditionnés en grande partie par les actions d'urbanisation. Les centres des villes anciennes (époque romaine et Moyen Âge) se sont souvent construits sur les remblais des constructions antérieures. Les villes se sont ensuite étendues sur leurs campagnes alentour, surtout à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle avec le développement du chemin de fer et de l'industrialisation, puis plus globalement au XX^e siècle par le développement économique à l'échelle mondiale. La construction des bâtiments a par ailleurs nécessité le creusement du site, le déblaiement des terres excavées, leur mise en tas puis possiblement leur étalement autour des bâtiments. Suivant la densité des bâtiments et l'époque de leur réalisation, les mouvements de terre ont été plus ou moins importants. Les processus de remblais – déblais, transport – stockage ont concerné des volumes d'importance variable.

Le cartographe pédologue a pour but de rendre compte de cette complexité des sols urbains, en hiérarchisant leurs facteurs anthropo-génétiques.

En milieu urbain, trois types d'espaces peuvent ainsi être identifiés : le bâti, la voirie, les espaces végétalisés. Leurs proportions varient selon les quartiers de la ville.

Chacun de ces espaces présente des caractéristiques propres :

- > **Le bâti** : les constructions sont géométriques et minérales, elles s'ancrent dans les couches profondes géologiques ou pédologiques, d'autant plus que des volumes souterrains sont présents (caves, parkings, etc.). Ces espaces ont subi par leurs fondations des excavations importantes de matériaux variés ;
- > **La voirie** est constituée des rues, des places et des stationnements. En surface, le plus souvent, un revêtement bitumineux de roulement recouvre des couches de support graveleuses dites d'assise et de forme. Ces couches reposent sur le matériau en place, compacté et décapé de ses couches superficielles, ou sur des remblais compactés ;
- > **Les espaces végétalisés** présentent des sols dont les propriétés sont plus ou moins propices à l'installation de végétaux. Ce sont les sols des parcs et jardins publics et privés, des installations sportives de plein air, et autres situations « de pleine terre »³⁴ permettant le développement de la végétation.



À savoir

C'est principalement sur les espaces végétalisés de pleine terre que la cartographie de sols en milieu urbain est réalisée (au 1/10 000, voire à une échelle plus fine pour un projet d'aménagement).

³⁴ <https://ofb.gouv.fr/doc/le-coefficient-de-pleine-terre-un-outil-de-planification-au-service-de-la-transition-ecologique>

Délimitation préalable des Unités Cartographiques Urbaines (UCU)

En milieu urbain, la cartographie des sols débute par une phase d'analyse spatiale visant à structurer le territoire en unités homogènes : les **Unités Cartographiques Urbaines (UCU)**. **Ce concept de pédologie urbaine a été défini dans le projet de recherche appliquée SOL ZAN, cofinancé par le programme IGCS du GIS Sol (Sol Paysage 2025).** Les UCU distinguent, par exemple, les quartiers d'habitation pavillonnaires ou collectifs, les zones industrielles et artisanales, les parcs et jardins, etc.

La définition des UCU s'appuie sur une analyse urbaine réalisée en amont par l'urbaniste, qui superpose les données relatives au tissu urbain pour délimiter des unités homogènes de formes urbaines : les Îlots Morphologiques Urbains (IMU). Ces unités spatiales résultent de différentes dynamiques d'occupation du sol et des trajectoires d'urbanisation à travers l'histoire du territoire. La forme pédologique résultant de l'anthropisation dépend des règles constructives, des conditions économiques et des moyens techniques utilisés lors des chantiers d'aménagement qui ont modifié les sols lors des différentes phases de développement urbain. C'est pourquoi, en amont de la cartographie des sols en milieu urbain, il est utile de définir la carte des Unités d'occupation Territoriales et Historiques (UTH), complétant les Îlots Morphologiques Urbains (IMU) (Encadré 13).

Ces unités homogènes de tissu urbain (IMU, UTH, etc.) sont croisées avec les informations **topographiques, morphologiques et lithologiques** disponibles. Ce croisement de données permet de définir des **unités cartographiques urbaines (UCU)** (Atanasova M., Sol Paysage 2024, Ducommun et al. 2023). Les UCU constituent l'équivalent des **unités pédo-paysagères (UPP)** utilisées en milieu rural. Chaque UCU est ainsi caractérisée par la répartition des surfaces bâties, de voirie et d'espaces végétalisés, mais également par des éléments dynamiques historiques tels que le nombre de changements d'occupation du sol, les dates de première et de dernière urbanisation, ainsi que par les conditions morpho-lithologiques locales. Cette chaîne d'unités emboîtées — IMU, puis UTH, puis UCU — est détaillée dans l'encadré suivant.

Encadré 13. Des Îlots Morphologiques Urbains (IMU) aux Unités d'occupation Territoriales et Historiques (UTH) pour établir les Unités Cartographiques Urbaines du pédologue

Les îlots morphologiques urbains (IMU) sont des unités spatiales issues de l'analyse de la morphologie urbaine. Ils structurent l'espace à partir des formes et des caractéristiques physiques de la ville : réseau viaire, découpage parcellaire, emprise et volume du bâti, densité, occupation du sol et présence d'espaces végétalisés.

En contexte urbain, un IMU correspond le plus souvent à un pâé de maisons, délimité par des voies routières, des infrastructures ferroviaires ou des cours d'eau. Dans les espaces ouverts ou peu bâtis, il peut correspondre à une occupation du sol dominante (artificialisée, agricole, naturelle ou boisée). Chaque IMU regroupe une ou plusieurs parcelles formant une entité géographique cohérente, sans nécessairement être homogène du point de vue des usages.

Les IMU peuvent être dotés d'une large batterie d'indicateurs (souvent plus d'une quarantaine) qui caractérisent non seulement la morphologie physique (surface, périmètre, rugosité, densité du bâti), mais aussi des éléments socio-économiques ou liés à l'environnement, tels que la végétation, les densités humaines, l'âge du bâti, l'accessibilité des réseaux de transport, etc.

Ce référentiel a été développé notamment par l'Institut Paris Région pour l'Île-de-France (Cordeau 2016) et par d'autres agences d'urbanisme en France (AURA 2022, AUCAME 2021, AGAM 2019 et 2020).

Les IMU constituent ainsi un référentiel de lecture morphologique du tissu urbain, mobilisé en urbanisme pour décrire, comparer et analyser les formes urbaines à une échelle intermédiaire, pertinente pour la planification et l'aménagement.

Les **Unités d'occupation Territoriales et Historiques (UTH)** prolongent l'approche morphologique des IMU en y intégrant explicitement les dynamiques d'occupation du sol et les trajectoires d'urbanisation (Atanasova M., Sol Paysage 2024). Alors que les IMU décrivent avant tout la forme urbaine, les UTH caractérisent les territoires urbains et périurbains selon :

- > La forme du tissu urbain : habitat pavillonnaire homogène ou hétérogène, habitat collectif continu ou discontinu, zone artisanale et industrielle, etc. ;
- > La succession des usages, par l'étude de photographies aériennes historiques ;
- > La date de la première urbanisation ;
- > La date de la dernière transformation significative ;
- > Les grandes phases historiques de développement urbain, etc.

Selon les contextes, des critères supplémentaires pourraient être intégrés, notamment l'ancienneté des centres urbains (données archéologiques disponibles auprès de la DRAC et de l'INRAP³⁵) ou encore l'existence de données topographiques fines (remblaiement, etc.).

Les UTH permettent ainsi de distinguer des secteurs morphologiquement proches mais issus d'**histoires d'urbanisation différentes**, un point déterminant pour cartographier les sols en contexte urbain.

Un exemple est présenté ci-dessous (Tableau 12, Figure 57).

Tableau 12. Informations relatives à deux UTH sur le territoire de Ris-Orangis (Sol Paysage 2025).

N° UTH	Occupation du sol initiale (T0)	Date à laquelle cette observation est faite	Occupation du sol à T1	Date de dernière urbanisation	Occupation du sol actuelle	Nombre de changements d'occupation du sol
31	Espace agricole	1960	Entrepôt logistique	2005	Habitat individuel homogène	2
37	Espace agricole	1983	Parc de stationnement	1986	Habitat individuel homogène	2

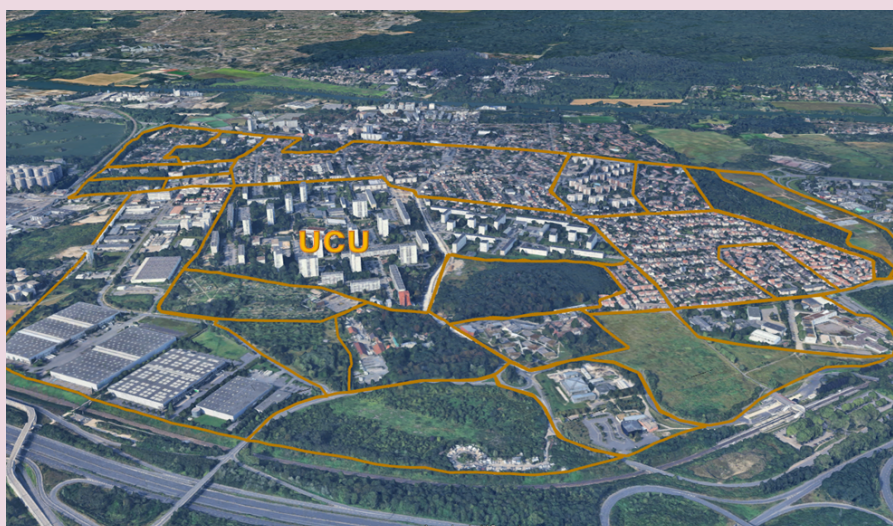


Figure 57. Délimitation des UCU à partir des IMU et des UTH (Sol Paysage 2025).

⚠ À noter que le travail d'identification des IMU ou des UTH requiert des compétences spécifiques en urbanisme. Il doit être mené par des spécialistes qui connaissent bien le territoire, ses enjeux environnementaux, sociaux, économiques et son histoire. Il peut être réalisé en interne par les services de la collectivité ou rattaché à une mission confiée à un bureau d'études, par exemple en tant que volet d'étude préalable dans une mission d'accompagnement à l'élaboration d'un SCoT ou d'un PLU. En l'absence d'une telle expertise, le prestataire pédologue peut intégrer la prestation de définition des UTH, en croisant les données urbanistiques disponibles (tissus urbains, îlots morphologiques urbains, etc.) avec celles des usages du sol (passés et actuels).

³⁵ INRAP : Institut national de recherches archéologiques préventives

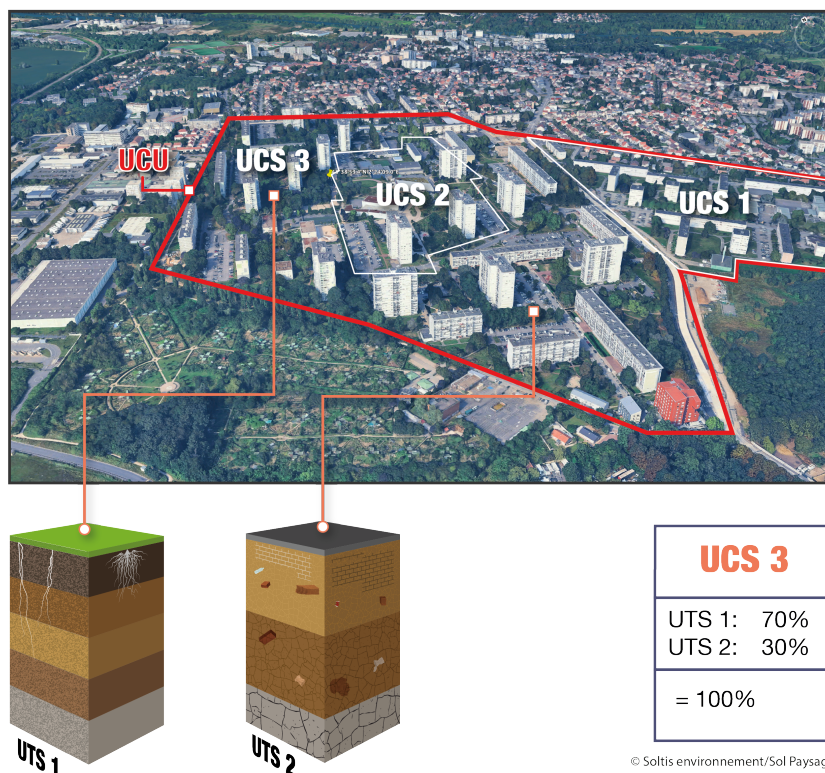
Acquisition des données de terrain et synthèse cartographique

Une fois ces UCU définies, la deuxième étape consiste à préparer les campagnes de terrain en tenant compte des moyens humains et financiers dédiés à l'étude, tout en respectant les densités d'observations prévues par la norme NF X 31-560. Un plan prévisionnel d'implantation des observations est établi en ciblant prioritairement les espaces végétalisés, qu'ils soient publics ou privés. La densité des observations est directement liée à l'échelle de cartographie recherchée : à titre d'exemple, **pour une cartographie au 1/10 000, les points d'observation sont espacés en moyenne de 150 m, correspondant à une densité d'environ un sondage pour 2 hectares.**

Dans le contexte urbain, cette phase préparatoire intègre des contraintes spécifiques. Comme en milieu rural, la réalisation de sondages à la tarière ou de fosses pédologiques nécessite en effet l'obtention d'autorisations d'accès, tant pour les espaces privés que pour certains espaces publics. Elle suppose également la localisation préalable des réseaux (eau, gaz, électricité, télécommunications), obtenue par la procédure réglementaire de déclaration de travaux (DT-DICT) auprès du guichet unique en ligne des réseaux et canalisations, condition indispensable à la sécurité des interventions ; les délais de réponse des exploitants de réseaux (plusieurs jours) doivent être intégrés au planning de la campagne.

La troisième étape correspond à la campagne de terrain proprement dite, combinant des prospections à la tarière manuelle et des descriptions de fosses pédologiques. En milieu urbain, les observations portent en général sur les **espaces végétalisés**, sans prise en compte directe des surfaces bâties et de voirie. La localisation des sondages dépend souvent des contraintes d'accès et des autorisations, ce qui implique que les points d'observation ne peuvent pas être réalisés de manière régulière et continue dans l'espace. Cette discontinuité d'implantation des observations rend la lecture globale des sols urbains plus complexe que dans les contextes ruraux. L'ensemble des descriptions issues des sondages et des fosses est centralisé au sein d'une **banque de données**, en privilégiant DoneSol ou BDSolU, permettant une exploitation cohérente des informations recueillies. Les phases d'observation en fosses pédologiques peuvent s'intercaler entre les périodes de sondages à la tarière afin d'assurer une continuité interprétative entre les différents modes d'observation.

La quatrième et dernière étape consiste en la synthèse des observations de terrain. Elle permet d'identifier les Unités Typologiques de Sol (UTS) et de les regrouper en Unités Cartographiques de Sol (UCS) (Figure 58). Ainsi, une Unité Cartographique Urbaine (UCU) définie en amont regroupe une ou plusieurs Unités Cartographiques de Sol (UCS).



(-) Unité Cartographie Urbaine (UCU) = UCS 1 + UCS 2 + UCS 3

Figure 58. Organisation des Unités Typologiques de Sol (UTS) au sein des Unités Cartographiques de Sol (UCS) en milieu urbain.

Suivant la complexité de la couverture pédologique et l'échelle de la carte, les UCS contiennent une (UCS simple) ou plusieurs UTS (UCS complexe) ; en milieu urbain ce sont les UCS complexes qui dominent. La spatialisat on constitue donc une  tape majeure de la m thode. Cette phase aboutit   la r alisation de la carte des sols et de sa l gende, ainsi qu'  la r daction de la notice explicative, qui formalise les r sultats et les cl s de lecture de la cartographie produite. Les livrables attendus comprennent la carte des sols et sa l gende, la notice explicative, les couches SIG des UCU, des UCS et des points d'observation, ainsi que la base de donn es associ e (DoneSol ou BDSolU) et les fiches de description des sondages et des fosses, conform ment aux exigences de la norme NF X 31-560.

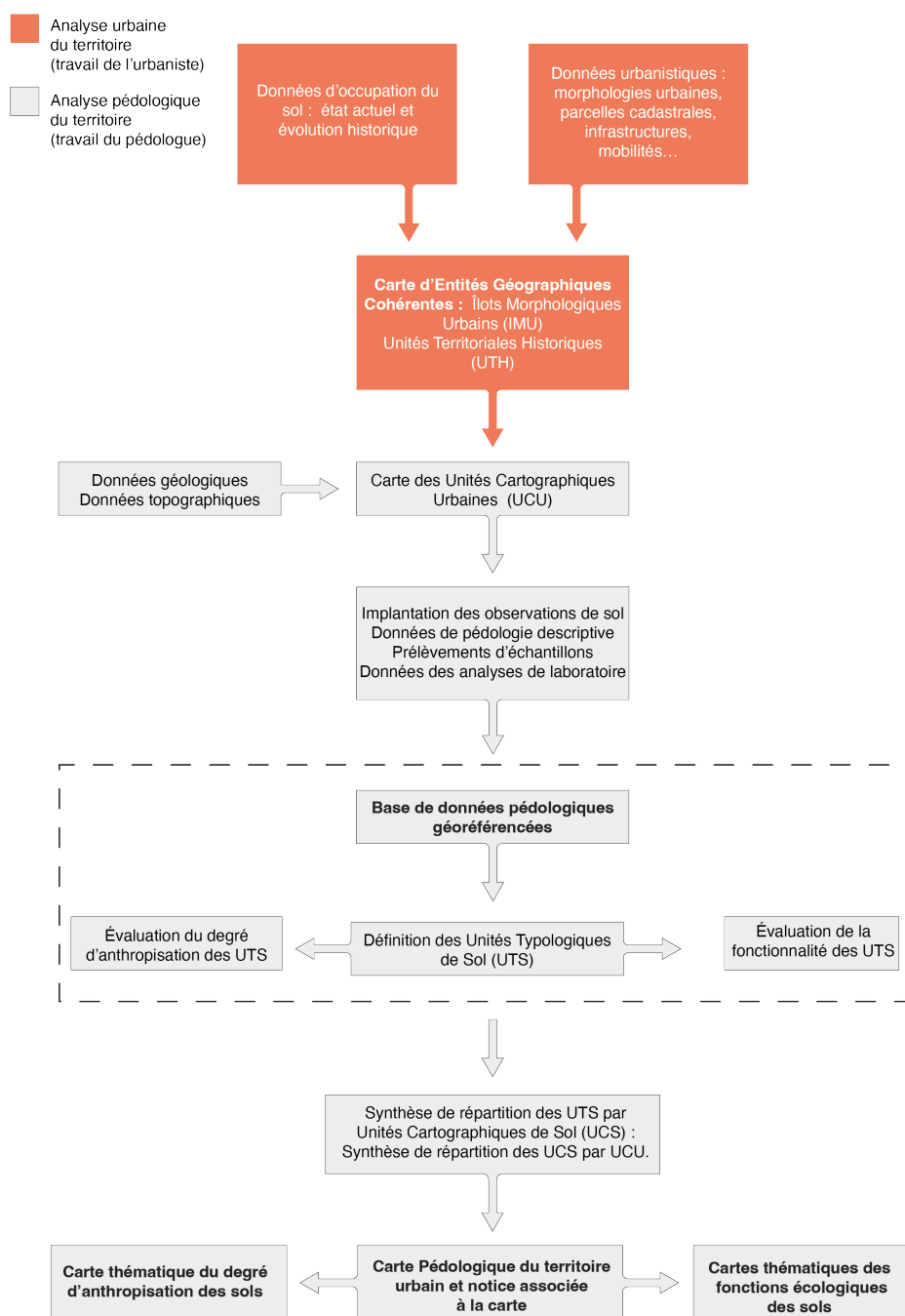


Figure 59. Démarche proposée pour la cartographie des sols en milieu urbain (adapté de Sol Paysage 2025).

Retour d'expérience : la carte pédologique au 1/10 000 des sols de la ville de Ris-Orangis (91)

La carte des sols de la ville de Ris-Orangis au 1/10 000 a été établie sur 870 hectares à partir de 257 sondages, sur des terrains publics ou privés répartis pour optimiser leur représentativité au sein des 58 Unités Cartographiques Urbaines (UCU) du territoire. La légende de la carte décrit 97 Unités Cartographiques de Sol (UCS) qui regroupent 154 Unités Typologiques de Sol (UTS). Les nombres importants d'UTS et d'UCS témoignent de la complexité de la distribution spatiale des sols en situation urbaine dense.

La carte des UCS de la ville de Ris-Orangis est présentée plus loin dans cette annexe (Figure 61).

La forte mobilisation des élus, mais aussi des citoyens et des services de la commune, a permis de produire, en 2025, la première carte pédologique à grande échelle de l'intégralité d'une commune française en situation urbaine dense. À partir de la carte des sols, il est possible de produire la carte de

l'anthropisation et les cartes de fonctions. Elles ³⁶offrent une lecture opérationnelle des résultats pour les collectivités et les aménageurs, capitalisable dans leurs Systèmes d'Information Géographique.

L'application de la **méthodologie d'évaluation du degré d'anthropisation des sols** (annexe 2) à partir des 154 UTS de la base de données pédologiques a permis de produire la carte de ce degré d'anthropisation pour la commune. Cet éclairage a permis de sensibiliser les élus, les habitants et les services municipaux à l'enjeu de préservation des sols naturels ou peu anthropisés qui représentent aujourd'hui moins de 30 % des espaces végétalisés du territoire contre plus de 70 % d'ANTHROPOSOLS issus de plus de 150 ans d'urbanisation.

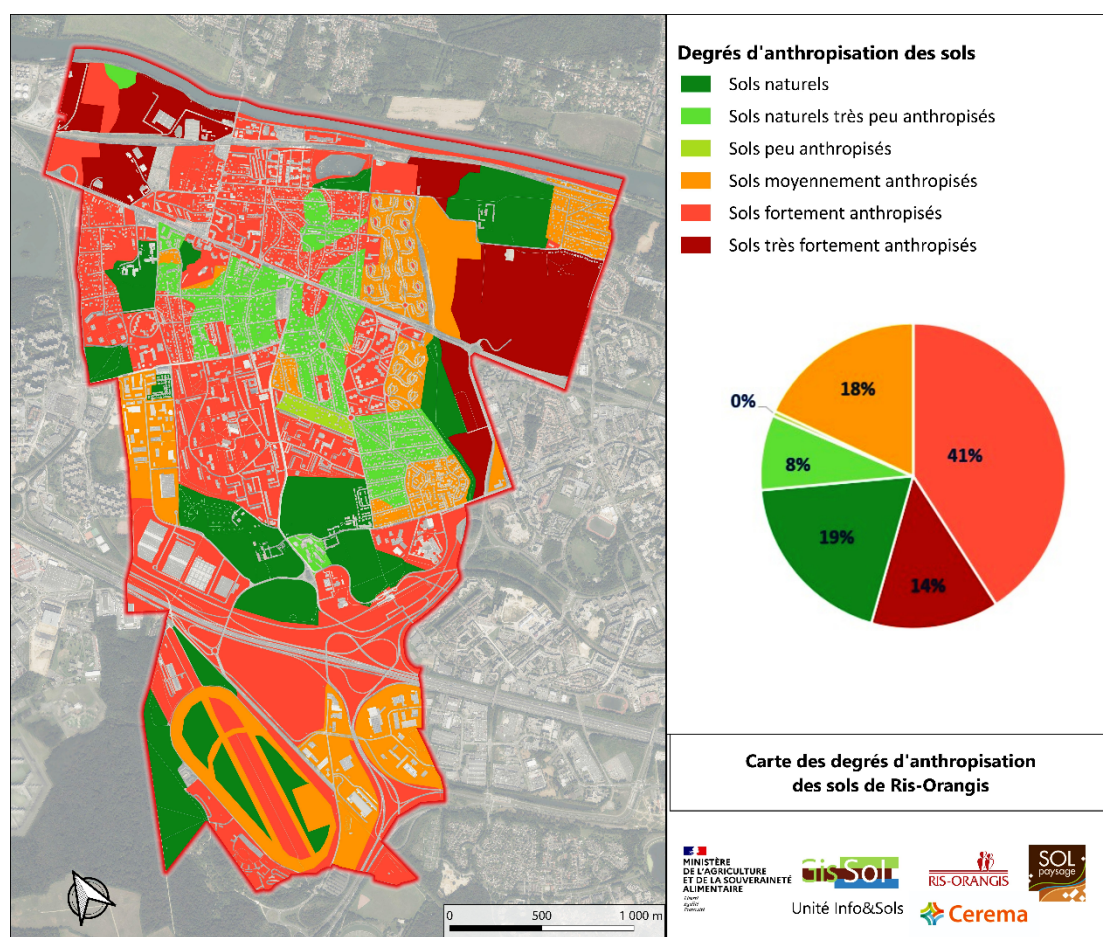


Figure 60. Carte des degrés d'anthropisation des sols de la ville de Ris-Orangis établie au 1/10 000.

En comparant ces résultats avec les cartes de fonctions présentées au chapitre 3, on constate que des sols très fortement anthropisés peuvent néanmoins présenter des fonctions écologiques élevées. L'anthropisation n'entraîne pas toujours une dégradation fonctionnelle, notamment dans le cas d'ANTHROPOSOLS reconstitués à des fins d'aménagement paysager ou de remise en culture après remblaiement de carrière.

³⁶ Elle est issue de l'AMI ZAN ADEME porté par la Ville de Ris-Orangis et ses partenaires Cerema et Sol Paysage, prolongé par le projet scientifique SOL ZAN porté par Sol Paysage et cofinancé par le programme IGCS du GIS Sol.



Figure 61. Carte des Unités Cartographiques de Sol (UCS) sur la commune de Ris-Orangis (source : Sol Paysage 2025).

ANNEXE 4. DONNÉES À COLLECTER POUR APPLIQUER LES APPROCHES 1 À 3

Tableau 13. Données générales à collecter pour appliquer les approches 1 à 3. L'absence de croix signifie « donnée facultative » pour l'application des 3 approches. Elles n'en demeurent pas moins intéressantes pour la compréhension globale du territoire étudié.

Données générales sur le territoire d'étude	Source de la donnée	Approche 1 – fondée sur des bases de données À collecter obligatoirement	Approche fondée sur des bases de données et des données de terrain À collecter obligatoirement	Approche fondée sur l'occupation du sol À collecter obligatoirement
Données générales				
Territoire ou site d'étude	Maître d'ouvrage	X	X	X
MNT 1 m / 5 m (RGE Alti)	https://geoservices.ign.fr/rgealti		X	X
Déclaration de travaux à proximité de réseaux (DT-DICT)	INERIS		X	
Occupation du sol				
Corine Land Cover 2018 niveau 3 – 1/100 000 (unité minimale de cartographie : 25 ha)	https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0	Au moins l'une des trois sources	Au moins l'une des trois sources	Au moins l'une des trois sources
Données d'occupation du sol à une échelle plus fine (OCS GE, 1/5 000 ; OCS GE2, 1/2 000 en zone urbaine en Grand Est)	https://geoservices.ign.fr/ocsge			
Données d'occupation des sols propres au territoire (MOS)	Maître d'ouvrage			
Données historiques d'occupation du sol (cartes et photographies aériennes)	https://remonterletemps.ign.fr/	X	X	
Données pixelisées du taux d'imperméabilisation (Copernicus HRL Imperviousness, résolution 10 m)	https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-imperviousness			X
Données pixelisées de la densité du couvert arboré (Copernicus)	https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover			X
Données pixelisées de la présence de petits éléments ligneux (Copernicus)	https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-small-woody-features			X
Hydrographie et zones humides				
Cours d'eau - Métropole 2024 - BD Topage®	www.data.gouv.fr/datasets/bd-topage-r			
Plans d'eau - Métropole 2024 - BD Topage®				



Données générales sur le territoire d'étude	Source de la donnée	Approche 1 – fondée sur des bases de données À collecter obligatoirement	Approche fondée sur des bases de données et des données de terrain À collecter obligatoirement	Approche fondée sur l'occupation du sol À collecter obligatoirement
Bassins hydrographiques - Métropole 2024 - BD Topage®				
Bassins versants topographiques - Métropole 2024 - BD Topage®				
Milieus potentiellement humides modélisés – 1/100 000 (US InfoSol – UMR SAS) (LETG-UMR 6554 CNRS- Université de Rennes 2 - PatriNat OFB-MNHN - Institut Agro Rennes-Angers - INRAE - Agence de l'eau RMC - Tour du Valat)	https://sig.reseau-zones-humides.org/visualiseur/?idlyr=12906			
Probabilité de présence des milieux humides et des zones humides 1/10 000 (PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD), l'Université de Rennes 2, l'Institut Agro Rennes-Angers, l'INRAE et la Tour du Valat)				
IDPR (Indice de développement et de persistance des réseaux) – BRGM – 1/50 000	https://infoterre.brgm.fr/act\$valites/territoires-favorables-infiltration-eaux-infoterre-grace-lidpr			
Délimitation des zones humides sur le territoire d'étude (résolution variable selon données disponibles)	Maître d'ouvrage			
Géologie et hydrogéologie				
BD CHARM 1/50 000 vectorisée et harmonisée (BRGM)	https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50	X	X	
Fond pédogéochimique	Teneurs naturelles en éléments traces métalliques des sols français (programme ASPITET, INRA/INRAE) : https://www.denis-baize.fr/etm/webetmso.html ; pour les sols urbains, voir la base de données des analyses de sols urbains (BDSolU, BRGM) : https://www.bdsolu.fr/fr			
Sensibilité aux remontées de nappe et risque de submersion – 1/100 000 ³⁷ (Géorisques)	https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/inondations/les-inondations-par-remontee-de-nappe			
Plan de prévention des risques d'inondation	Géorisques ou services de l'État (DREAL/DDT)			

³⁷ Des données plus fines existent localement, proposées par le BRGM.



Données générales sur le territoire d'étude	Source de la donnée	Approche 1 – fondée sur des bases de données À collecter obligatoirement	Approche fondée sur des bases de données et des données de terrain À collecter obligatoirement	Approche fondée sur l'occupation du sol À collecter obligatoirement
Pédologie et qualité des sols				
Référentiel Régional Pédologique – 1/250 000 incluant la base de données DoneSol	<p>Géoportail (sans la donnée DoneSol, uniquement données spatiales sur cartes.gouv.fr)</p> <p>https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/referentiel-regional-pedologique</p> <p>Pour accéder à la base de données DoneSol, contacter INRAE pour connaître l'organisme détenteur des données : infosol@inrae.fr. <u>Les délais de mise à disposition varient selon la complexité de la convention à établir avec le ou les organismes détenteurs des données ; à anticiper suffisamment tôt dans le planning de l'étude.</u></p> <p>Une convention de partage des données est en général demandée.</p>	X	X (sans la base de données DoneSol, uniquement données sur Géoportail)	
Données GIS Sol (BDAT)	https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62			
European Soil Database v2.0	https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-soil-database-v20-vector-and-attribute-data			
CARHAB	https://geoservices.ign.fr/habitats-carhab			
Base de données OPVT	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php	X		
Base de données / Outil ALDO© (ADEME) (stocks de référence par occupation du sol, à l'échelle de l'EPCI, et non une donnée cartographique à la parcelle)	https://aldo-carbone.ademe.fr/	X		
Sites et sols (potentiellement) pollués				
Inventaire historique urbain	Local			
SIS (secteurs d'information sur les sols)	https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-		X	



Données générales sur le territoire d'étude	Source de la donnée	Approche 1 – fondée sur des bases de données À collecter obligatoirement	Approche fondée sur des bases de données et des données de terrain À collecter obligatoirement	Approche fondée sur l'occupation du sol À collecter obligatoirement
	industriels/secteurs-information-sols			
CASIAS (ancien BASIAS)	https://www.georisques.gouv.fr/articles- risques/pollutions-sols-sis- anciens-sites- industriels/basias		X	
BASOL : base de données recensant les sites et sols (potentiellement) pollués	https://www.data.gouv.fr/datasets/base-des-sols-pollues		X	
Installations classées : ensemble des sites soumis à autorisation et enregistrement (en fonctionnement ou cessation d'activité)	https://www.georisques.gouv.fr/risques/installations/donnees?page=1		X	
Données agricoles et forestières				
Registre parcellaire graphique (RPG) (IGN)	Géoportail https://geoservices.ign.fr/rpg			
Inventaire forestier national	https://inventaire-forestier.ign.fr			
Biodiversité				
Périmètre de protection de la biodiversité	Site de l'INPN : https://inpn.mnhn.fr			
Données issues de l'inventaire national du patrimoine naturel (INPN)	Site de l'INPN : https://inpn.mnhn.fr			
Atlas de la biodiversité communale	https://atlas.biodiversite.fr			
Trame verte et bleue	Géoportail / portails régionaux SIG (DREAL, Régions)			



ANNEXE 5. BASES DE DONNÉES DISPONIBLES POUR CARACTÉRISER LA MULTIFONCTIONNALITÉ DES SOLS

A. Les données pédologiques

Il existe plusieurs bases de données référençant des données pédologiques. Afin de centraliser les inventaires de sols réalisés à différentes échelles, le programme **Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS)** a été mis en place par le **GIS Sol** (Bispo et al. 2025) (groupement de recherche et d'expertise réunissant plusieurs partenaires institutionnels comme INRAE, le BRGM, les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, l'ADEME, l'IRD et l'IGN). Il propose une structure informatique normalisée nationale de stockage de l'information sur les sols, nommée **DoneSol**, permettant d'organiser de manière cohérente et centralisée l'ensemble des données collectées.

L'une des bases de données mobilisées dans le cadre de la méthode MUSE est le Référentiel Régional Pédologique (RRP). **Il est utilisé à l'échelle des grands territoires, ainsi qu'à celle de la planification, où il constitue un support cartographique pour la qualification des fonctions des sols.** Lorsque des données plus précises sont disponibles, elles sont identifiables via l'outil REFERSOLS. Le RRP constitue par ailleurs l'une des références mobilisées par l'approche 1 (approche fondée sur des bases de données) de la méthode « 4 fonctions », présentée dans l'annexe précédente.

Les modalités de stockage des données sur la plateforme DoneSol WEB et de gestion des permissions d'accès sont précisées ci-dessous.

Les données qualitatives et quantitatives des **Unités Typologiques de Sol (UTS)**, disponibles au format **DoneSol**, sont organisées par étude et accessibles sous format tableur (CSV, Access). Dans ce format, les données DoneSol sont structurées et hiérarchisées en fonction des clés primaires, permettant une organisation logique et cohérente des informations (Étude, UCS, UTS, strate_qual, strate_quant, etc.) visibles sur la Figure 62.

La représentation spatiale des sols, sous forme d'Unités Cartographiques de Sol (UCS), est quant à elle disponible au format shapefile, exploitable dans un Système d'Information Géographique (SIG). Ces données appartiennent aux organismes qui ont réalisé les campagnes d'échantillonnage, souvent des acteurs locaux. Il convient donc de se référer à ces propriétaires, généralement rattachés à INRAE (**Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**), à la Chambre d'Agriculture ou au Conservatoire des Espaces Naturels de la région concernée.

Il est conseillé de se rapprocher de l'unité Info&Sols d'INRAE pour obtenir ces informations.



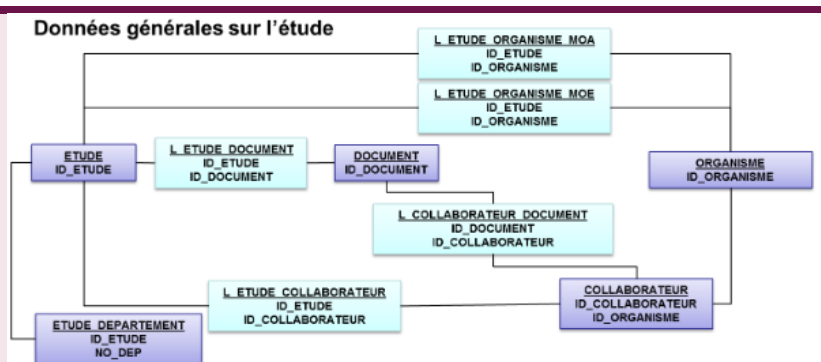


Figure 9 : partie du schéma conceptuel de Done Sol spécifique au programme IGC S concernant les données générales (les tables de liaison sont en bleu clair).

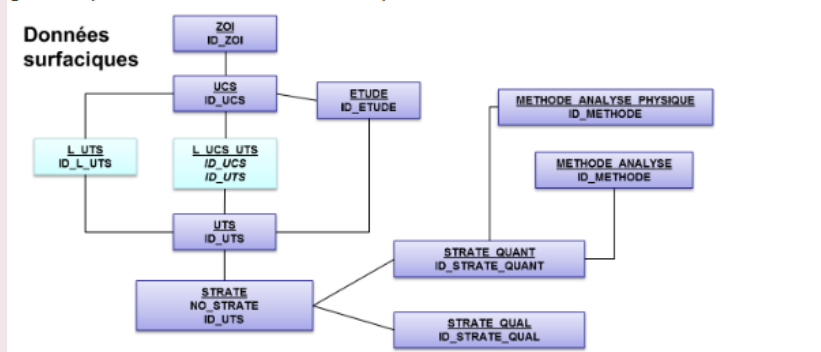


Figure 62. Hiérarchisation des données de la base de données DoneSol, à partir desquelles le calcul des fonctions s'effectue.

Référentiel Régional Pédologique (RRP)

Gestion technique : GIS Sol



Contexte : Le Référentiel Régional Pédologique (RRP) s'inscrit dans le cadre du programme IGCS (« Inventaire, Gestion et Conservation des Sols »), piloté par le GIS Sol, en collaboration avec des partenaires régionaux. L'objectif est de rassembler et de valoriser des informations précises sur les sols afin d'appuyer la gestion durable et l'aménagement des territoires, via une base de données géographique documentée et mise à jour.

L'enjeu réside aujourd'hui dans la mise à disposition, la valorisation et l'actualisation de ces données, souvent sous-utilisées faute de diffusion ou de traduction dans des formats accessibles aux collectivités et aux bureaux d'études.

Producteur : Cette base de données est élaborée par INRAE en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, notamment via le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) et divers experts régionaux (Conservatoire d'espaces naturels, Chambre d'Agriculture, etc.).

Système de projection : Lambert 93 pour la couche des Unités Cartographiques de Sol (UCS) en métropole ; systèmes de référence propres à chaque territoire ultramarin (par exemple RGAF09 pour les Antilles, RGR92 pour La Réunion, RGM04 pour Mayotte, RGFG95 pour la Guyane).

Contenu et format : Les données qualitatives et quantitatives de DoneSol (épaisseur du sol, texture, éléments grossiers, hydromorphie, pH, etc.) sont accessibles en format tableur après convention avec INRAE ; les données spatialisées sont fournies sous forme de shapefiles.

Périodicité de mise à jour : Variable selon les territoires ; le RRP est produit depuis 1990 dans le cadre du programme IGCS, repris par le GIS Sol en 2001, et REFERSOLS s'enrichit au fil des nouvelles études.

Échelle métrique : Les données sont conçues pour une restitution cartographique, avec un degré de précision géographique au 1/250 000.

Périmètre : Métropolitain et outre-mer.

Méthodologie : Les données résultent d'opérations d'inventaire qui décrivent, de façon ponctuelle, des Unités Typologiques de Sol (UTS) pour les regrouper en Unités Cartographiques de Sol (UCS) couvrant une surface définie pour leur représentation spatiale (Figure 63).

Atouts : Carte des types de sols librement consultable sur le Géoportail ; couverture disponible sur

l'ensemble du territoire français, avec un niveau de détail variable selon les secteurs (l'accès aux données DoneSol elles-mêmes reste soumis à convention avec INRAE).

Limites : L'échelle d'acquisition des données n'est pas assez précise pour répondre à des besoins opérationnels. À noter néanmoins que certaines collectivités ont réalisé leur propre carte des sols. Certaines bases de données présentent par ailleurs un accès plus restreint, nécessitant une demande préalable auprès de l'organisme détenteur des données.

Les informations qualitatives et quantitatives **peuvent être incomplètes** en fonction de la localité.

Enfin, les données ont été acquises à des dates très variables selon les secteurs.

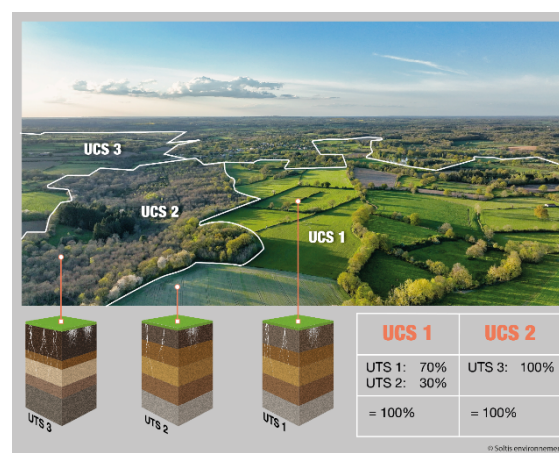


Figure 63. Représentation des UTS au sein des UCS dont les données sont disponibles sous le format de données DoneSol. Source : © Soltis environnement.

Accès aux données : La nomenclature du type de sol (CALCOSOL, LUVISOL, etc.) provient du Référentiel pédologique (Baize et Girard, coord., 2008) et non du RRP lui-même ; elle est consultable sur cartes.gouv.fr, qui remplace le Géoportail. L'ensemble des autres données, quantitatives ou qualitatives, fait l'objet d'une demande auprès d'INRAE à l'adresse suivante : infosol@inrae.fr.

Pour aller plus loin : Un dictionnaire DoneSol a été élaboré pour faciliter l'utilisation de la base de données. Il est disponible à l'adresse suivante :

https://dw4.gissol.fr/fichiers/dictionnaire_donesol_igs_latest.pdf

Contactez le responsable du programme pour des informations supplémentaires : Bertrand Laroche – bertrand.laroche@inrae.fr

La base de données REFERSOLS

Gestion technique : INRAE Info&Sols



Contexte

Contexte : REFERSOLS est une base de données destinée à fournir des informations détaillées sur la composition et les propriétés des sols en France métropolitaine. Cette base de données regroupe une multitude d'études réalisées, de façon indépendante, sur l'ensemble du territoire depuis les années 1960. REFERSOLS n'est qu'un répertoire des études disponibles : les données elles-mêmes doivent ensuite être demandées à Info&Sols ou à l'organisme qui les détient.

Il est possible d'identifier les études disponibles sur un secteur en consultant l'application REFERSOLS : <https://refersols.gissol.fr/>

Producteur

Producteur : Cette base de données est gérée par INRAE en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, notamment via le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol et divers experts régionaux (Conservatoire d'espaces naturels, Chambre d'Agriculture, bureaux d'études, etc.).

Système de projection

Système de projection : Lambert 93 pour les Unités Cartographiques de Sol (UCS); selon les études, l'échelle va du 1/1 000 000 au 1/5 000.

Nomenclature de la donnée

(1) Les données qualitatives et quantitatives de DoneSol sont accessibles en format tableur après convention avec INRAE, pour les données dont INRAE est propriétaire, tandis que (2) les données spatialisées sont fournies sous forme de shapefiles lorsque ceux-ci sont disponibles.

Périodicité de mise à jour : Unique.

Échelle métrique : Dépendante de chaque étude réalisée.

Périmètre : Territoire national, hexagonal et ultramarin.

Méthodologie : La méthodologie à l'origine des données pédologiques disponibles varie selon chaque étude réalisée.

Atouts : Centralisation de nombreuses études sur les sols incluant des données très anciennes.

Limites : Format national unique, mais études très diverses et d'échelles différentes. Données non homogènes (échelle, données quantitatives et qualitatives disponibles, qualité de la donnée, etc.).

Réseau de Mesure et de Qualité des Sols (RMQS)

Gestion technique : GIS Sol



Contexte : Le RMQS a été mis en place en 2001 dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol). Le réseau repose sur le suivi de 2 240 sites répartis uniformément sur le territoire français (métropole et outre-mer), selon une maille carrée de 16 km de côté. Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont effectués tous les 15 ans au centre de chaque maille. Le RMQS vise à évaluer et à suivre à long terme la qualité des sols en France, à partir de l'analyse de propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, associée à la recherche des sources de contamination diffuse et à la connaissance de l'historique de l'occupation et des pratiques de gestion de chaque site.

Producteur : Le RMQS est piloté par le GIS Sol, et coordonné par INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) à travers son unité Info&Sols.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : Le RMQS collecte des données sur diverses propriétés des sols, incluant des paramètres physiques (texture, densité apparente), chimiques (pH, teneur en carbone organique) et biologiques, ainsi que des mesures de contaminants (ETM, HAP, PCB, etc.).

Le RMQS Biodiv est un programme associé, fondé sur la même grille, qui caractérise la biologie des sols : biomasse microbienne, nématodes, collemboles et vers de terre. Il correspond au programme-pilote régional RMQS Biodiv, mené en Bretagne sur les 109 sites du RMQS classique ; ses données ne sont pas diffusées comme celles du RMQS national.

Ces données sont associées à des informations sur l'occupation des sols et les pratiques de gestion.

Périodicité de mise à jour : Chaque site du RMQS est échantillonné tous les 15 ans. La première campagne en métropole s'est déroulée de 2000 à 2009, et la seconde est en cours depuis 2016, avec une conclusion prévue en 2027.

Échelle métrique : Grille systématique de 16 km de côté. Un point tous les 16 km représente au mieux quelques sites par EPCI : le RMQS fournit des valeurs de référence, pas une donnée cartographique locale.

Périmètre : Le RMQS comprend 2 240 sites répartis sur tout le territoire national, avec 2 170 sites en métropole et 70 dans les départements d'outre-mer (Antilles, La Réunion, Mayotte et Guyane).

Méthodologie : Sur chaque site, des échantillons de sol sont prélevés selon un protocole standardisé (Jolivet et al. 2016), incluant des prélèvements à différentes profondeurs. Les échantillons sont ensuite analysés pour déterminer diverses propriétés physico-chimiques et biologiques. Les données recueillies sont complétées par des informations sur l'occupation du sol, les pratiques de gestion et l'environnement immédiat du site.

Atouts :

- > **Suivi à long terme :** Permet de détecter précocement les évolutions des sols, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique ;
- > **Couverture nationale :** Offre une vision d'ensemble de la qualité des sols sur l'ensemble du territoire français ;
- > **Base de données riche :** Fournit des données précieuses pour la recherche scientifique, la gestion environnementale et l'élaboration de politiques publiques.

Limites :

- > **Périodicité des échantillonnages :** Un intervalle de 15 ans peut ne pas permettre de détecter des changements rapides ou des événements ponctuels affectant la qualité des sols ;
- > **Densité du réseau :** Bien que la maille de 16 km offre une couverture nationale, elle ne permet pas de décrire les variations locales de la qualité des sols.

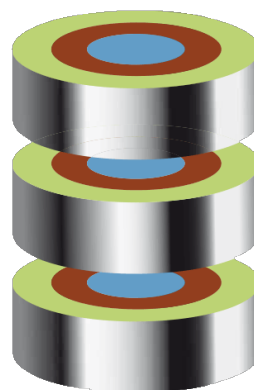
Fiche technique : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-34>

Accès aux données : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/gis-sol-rmq-34>

Pour aller plus loin : Les données du RMQS sont accessibles via le site du GIS Sol, qui propose des outils de consultation interactive et des publications associées. Pour une consultation directe des données et des ressources associées : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-34>

<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/gis-sol-rmq-34>

Contactez le responsable du programme pour des informations supplémentaires : Claudy Jolivet – claudy.jolivet@inrae.fr



Base de Données des Analyses de Terre (BDAT)

Gestion technique : GIS Sol



Contexte : La BDAT a été mise en place pour regrouper les résultats d'analyses de sols agricoles effectuées par des laboratoires agréés en France. Elle vise à fournir une source d'information sur la variabilité des horizons de surface des sols cultivés et à suivre l'évolution de leurs propriétés physico-chimiques sur l'ensemble du territoire national.

Producteur : Le programme est piloté par le GIS Sol, et coordonné par INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) à travers son unité Info&Sols.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : La BDAT regroupe 31 paramètres physico-chimiques des sols, en surface, tels que le pH, le calcaire total, le carbone organique, la capacité d'échange cationique, les teneurs en éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium, magnésium, sodium) et en métaux/métalloïdes (bore, cuivre, fer, manganèse, zinc), ainsi que la texture (argile, limon, sable).

Périodicité de mise à jour : La base est alimentée en continu depuis 1990. Les données sont disponibles par période quinquennale : 1990–1994, 1995–1999, 2000–2004, 2005–2009, 2010–2014, 2015–2019.

Échelle métrique : Les données sont agrégées au niveau cantonal, permettant des analyses à l'échelle régionale ou nationale.

Périmètre : La BDAT couvre l'ensemble du territoire français métropolitain. Cependant, la répartition des analyses est hétérogène, dépendante des analyses réalisées en France et de la volonté des laboratoires de transmettre les données, avec une densité plus élevée dans les grandes régions céréalières que dans les zones de montagne.

Méthodologie : Les analyses sont collectées auprès de laboratoires agréés. Les échantillons concernent l'horizon de surface des sols cultivés. Les résultats sont anonymisés et géoréférencés à la commune, puis agrégés au niveau cantonal pour garantir la confidentialité lors de leur diffusion.

Atouts :

- > **Volume de données :** Avec plus de 2 millions d'échantillons analysés, la BDAT offre une base solide pour l'étude des sols agricoles en France ;
- > **Suivi temporel :** La collecte continue des données permet de suivre l'évolution des propriétés des

sols agricoles sur plusieurs décennies et d'alerter sur l'évolution de caractéristiques agronomiques ;

- > **Diversité des paramètres :** La variété des analyses disponibles permet une compréhension approfondie de la fertilité et de la santé des sols.

Limites :

- > **Hétérogénéité spatiale :** La distribution inégale des échantillons peut limiter la représentativité des analyses pour certaines régions. Les analyses ne concernent que les sols cultivés, et uniquement l'horizon de surface ;
- > **Biais d'échantillonnage :** Les échantillons étant collectés auprès des laboratoires partenaires, ils peuvent ne pas être représentatifs de l'ensemble des sols agricoles.

Fiche technique : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62>

Accès aux données : Les statistiques cantonales issues de la BDAT se consultent et se téléchargent sur Geosol : <https://webapps.gissol.fr/geosol/>

Pour aller plus loin :

Consulter le bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses :

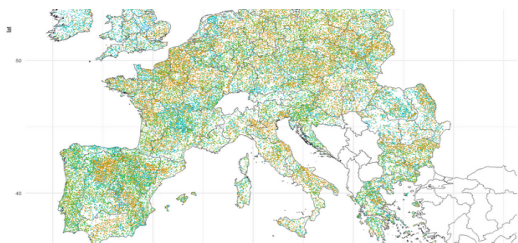
Saby, N.P.A., Lemerrier, B., Arrouays, D., et al. (2014). Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Étude et Gestion des Sols*, 21(1), 141-150.

Explorer les cartes thématiques issues de la BDAT : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-danalyses-des-terres-bdat-62> ;

Utiliser les webservices pour intégrer les données dans des outils SIG : <https://www.gissol.fr/donnees/webservices>.

Land Use/Cover Area frame Statistical Survey (LUCAS)

Gestion technique : Eurostat (Commission européenne), en partenariat avec Copernicus et l'Agence européenne pour l'environnement.



Contexte : LUCAS Soil est le module « sol » de l'enquête européenne LUCAS (Land Use/Cover Area frame Statistical Survey). Il fournit des données harmonisées sur les propriétés physico-chimiques des sols agricoles et naturels à l'échelle de l'Union européenne, utilisées notamment pour le suivi des politiques environnementales.

Producteur : Eurostat, en collaboration avec les agences statistiques nationales et le Joint Research Centre (JRC) de l'UE, coordonne et réalise les enquêtes LUCAS.

Système de projection : WGS84. Les données LUCAS sont basées sur des points géoréférencés issus d'un échantillonnage statistique ; lors de leur intégration dans un Système d'Information Géographique (SIG), elles peuvent être reprojetées selon les systèmes de référence locaux ou nationaux.

Nomenclature de la donnée : Les données sont codifiées selon un référentiel harmonisé de propriétés du sol (incluant des mesures de granulométrie, pH, teneur en carbone organique, CaCO_3 , nutriments, CEC, etc.) et des identifiants uniques pour chaque point de prélèvement, permettant d'associer les résultats analytiques aux coordonnées géographiques des sites.

Périodicité de mise à jour : L'enquête LUCAS a lieu tous les trois ans, mais le module « sol » n'est pas systématique : il a été *a priori* réalisé en 2009, 2015, 2018 et 2022 (campagne 2012 limitée à la Bulgarie et à la Roumanie).

Échelle métrique : Les points LUCAS suivent une grille de base de 2 km x 2 km, mais seule une fraction de ces points fait l'objet d'un prélèvement de sol (de l'ordre de 20 000 points en Europe, soit quelques milliers en France selon les campagnes). Chaque prélèvement représente la couche supérieure du sol (0–20 cm).

Périmètre : Union européenne ; pour la France, métropole uniquement.

La couverture inclut l'ensemble des États membres de l'Union européenne, avec une extension à certains pays partenaires ou candidats.

Méthodologie : Un échantillonnage systématique est réalisé via une grille (master sample) sur l'UE, complété par des enquêtes de terrain menées par des équipes formées.

- > Chaque point fait l'objet d'une collecte de données standardisées sur le terrain (occupation et usage du sol, paramètres environnementaux, photographies orientées) qui sont ensuite harmonisées entre les campagnes grâce à un processus de recodage et de normalisation pluriannuel.
- > Un double contrôle qualité (interne et externe) garantit la fiabilité et la comparabilité des données.

Atouts :

- > **Harmonisation :** Une méthodologie uniforme est appliquée à travers tous les pays participants ;
- > **Couverture étendue :** Représente diverses conditions pédologiques et climatiques ;
- > **Accessibilité :** Les données sont disponibles pour la recherche et la formulation de politiques.

Limites :

- > **Représentativité locale limitée :** Bien que représentatives à l'échelle régionale, les données ne capturent pas toute la variabilité locale, notamment dans des zones à forte hétérogénéité ou sous-échantillonnées ;
- > **Couche superficielle uniquement :** L'enquête se limite à la couche supérieure (0–20 cm) et ne reflète pas les propriétés du sous-sol ;
- > **Biais d'échantillonnage :** Une forte proportion d'échantillons provient des terres arables, ce qui peut sous-représenter d'autres types d'occupation du sol.

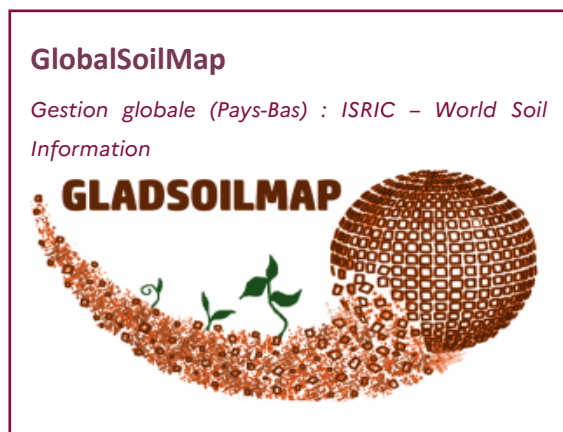
Fiche technique : Le Joint Research Centre (JRC) propose un résumé de cette base de données à l'adresse suivante :

https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR26102EN.pdf

Accès aux données : Les données de sol LUCAS sont téléchargeables gratuitement, après inscription en ligne, sur la plateforme ESDAC du JRC : <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas> (droit d'usage non exclusif et non transférable, avec obligation de citer la source).

Pour aller plus loin : Un article scientifique détaille le contenu et la méthode de la base de données LUCAS :

<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1/ejss.12499>



Contexte : Le projet GlobalSoilMap vise à produire des cartes de propriétés des sols à haute résolution à l'échelle mondiale pour répondre aux besoins en sécurité alimentaire, régulation du climat, gestion durable des ressources, etc. Il s'appuie sur la cartographie numérique des sols (DSM) et le traitement de données pédologiques existantes pour fournir des cartes quantitatives continues, harmonisées et accessibles.

Producteur : Consortium international coordonné par INRAE (Unité Info&Sols) pour la France, avec des contributions d'acteurs mondiaux tels que ISRIC, CSIRO, FAO, universités et instituts de recherche.

Système de projection : Coordonnées géographiques (WGS84).

- > Résolution de 90 m x 90 m ;
- > Coordonnées géographiques (WGS84) implicites dans la grille, bien que les projections locales puissent être utilisées selon les pays pour les produits nationaux.

Nomenclature de la donnée :

- > Texture (argile, limon, sable), teneur en éléments grossiers ;
- > pH, carbone organique du sol (SOC), CEC effective ;
- > Profondeur du sol, profondeur utile pour les racines ;
- > Densité apparente, réserve utile disponible (réserve utile) ;
- > Profils à 6 profondeurs standards : 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, 100–200 cm.

Périodicité de mise à jour : Le projet a été lancé en 2009, avec une phase initiale prévue jusqu'en 2013. Les mises à jour dépendent des contributions des partenaires régionaux et des avancées technologiques.

Échelle métrique :

Les cartes sont produites à une résolution spatiale de **90 mètres**, permettant une analyse détaillée des propriétés du sol à l'échelle mondiale.

Méthodologie :

- > Compilation de données pédologiques historiques (« soil legacy data ») ;

- > Harmonisation des profils de sol ;
- > Utilisation de covariables spatiales (télédétection, modèles numériques de terrain, etc.) ;
- > Modélisation spatiale (ex. : Random Forest, spline, quantile regression forest) ;
- > Estimation des incertitudes sur chaque propriété et profondeur ;
- > Production sous forme de grilles raster.

Atouts :

- > Première base mondiale harmonisée, quantitative et continue de propriétés des sols prédites ;
- > Résolution de 90 m adaptée à la planification territoriale, mais non à l'échelle de la parcelle, les prédictions s'appuyant en grande partie sur les données de l'IGCS (RRP au 1/250 000) ;
- > Intégration d'approches avancées en science des données, en intelligence artificielle et en télédétection ;
- > Produit librement accessible, en open data ;
- > Estimation de l'incertitude disponible à chaque point.

Limites :

- > Dépendance à la qualité des données héritées (legacy data) ;
- > Inégale densité des données de terrain selon les régions du globe ;
- > Certains attributs dérivés (par ex. densité apparente) reposant sur peu de mesures in situ ;
- > Complexité des incertitudes croisées entre modèles, sources et échelles.

Fiche technique : Spécifications techniques du produit GlobalSoilMap (ISRIC, version 2.4, 2015) : https://files.isric.org/public/documents/GlobalSoilMap_specifications_december_2015_2.pdf

- > Profondeur de modélisation : 0 à 200 cm (6 couches) ;
- > Résolution : 3 arc-secondes (~90 m) ;
- > Propriétés : SOC, texture, pH, CEC, densité apparente, etc. ;
- > Format : Raster multibande + incertitude par bande ;
- > Méthodes : DSM (cartographie numérique des sols), fonctions de pédotransfert, IA, interpolation spatiale ;
- > Spécifications : validées par la communauté scientifique (peer-reviewed).

Accès aux données :

Open data via le projet GlobalSoilMap (coordonné par INRAE/ISRIC) ; pour le produit français, se rapprocher d'INRAE Info&Sols (entrepôt de données : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inf_o_et_sols)

Le projet GlobalSoilMap : passé, présent, futur et exemple national de France <https://institut-agro-rennes-angers.hal.science/hal-01969966v1/document>

B. Les données Géorisques

Pollution - CASIAS

Gestion technique : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

Producteur : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), pour le compte du ministère chargé de l'Environnement.

Système de projection : Non précisé par le producteur pour les fichiers téléchargeables ; les sites sont généralement localisés à partir de plans IGN à l'échelle 1/25 000.

Nomenclature de la donnée : Chaque fiche CASIAS comprend des informations telles que l'identification du site, sa localisation, l'historique des activités, les caractéristiques des activités pratiquées, l'utilisation actuelle ou projetée du site, et les sources documentaires utilisées.

Périodicité de mise à jour : La base de données CASIAS a été élaborée par le BRGM à partir d'archives et des inventaires historiques régionaux.

Échelle métrique : 1/25 000 (plans IGN utilisés pour la localisation des sites).

Périmètre : Territoire français métropolitain, couvrant plus de 340 000 sites industriels ou d'activités de services, en activité ou non.

Méthodologie : Les données proviennent des Inventaires Historiques Régionaux (IHR), réalisés à l'échelle départementale entre 1994 et 2001. Ces inventaires ont été menés par des comités de pilotage régionaux, composés de financeurs tels que les agences de l'eau, l'ADEME, le BRGM, les conseils régionaux, les préfetures et le ministère de l'Environnement. Les informations ont été collectées principalement à partir des archives administratives (communales, départementales, préfectorales) et des cartes topographiques de l'IGN.

Atouts :

- > **Mémoire industrielle :** Conserve l'historique des activités industrielles et de services sur le territoire français ;
- > **Outil d'aide à la décision :** Est utile aux acteurs de l'aménagement, de l'urbanisme et de la gestion des risques environnementaux ;
- > **Accessibilité :** Se consulte gratuitement et publiquement via le portail Géorisques.

Limites :

- > **Données non exhaustives :** La base ne prétend pas recenser tous les sites industriels ou de services ayant existé ;
- > **Précision variable :** La localisation des sites peut être approximative, notamment pour les sites anciens ou ceux pour lesquels les archives sont lacunaires.

Fiche technique :

Chaque fiche contient des informations détaillées sur le site concerné, notamment :

- > **Date de création de la fiche** et date de validation des informations ;
- > **Identification du site** (nom, raison sociale, identifiants dans d'autres bases de données) ;
- > **Localisation** (adresse, commune, coordonnées géographiques, références cadastrales) ;
- > **Historique des activités** et état d'occupation du site ;
- > **Caractéristiques des activités pratiquées** (dates, produits mis en œuvre) ;
- > **Utilisation actuelle** ou projetée du site ;
- > Bibliographie et sources documentaires utilisées.

Accès aux données :

Depuis octobre 2021, les informations de BASIAS sont intégrées dans la base de données CASIAS (Carte des Anciens Sites Industriels et Activités de Services). Les données de la CASIAS sont accessibles gratuitement sur le portail Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/inventaire-historique-de-sites-industriels-et-activites-de-service>), au format CSV et sous forme de couche géographique, sous licence ouverte.

Secteurs d'information sur les sols (SIS)

Gestion technique : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)



Producteur : Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique.

Système de projection : Les données géographiques associées aux sites et sols pollués utilisent généralement Lambert 93 (RGF93), standard en France.

Contexte : Les secteurs d'information sur les sols (SIS) sont les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution, pour préserver la sécurité, la santé, la salubrité publique et l'environnement (article L. 125-6 du code de l'environnement). Chaque SIS est délimité, à l'échelle cadastrale, par arrêté préfectoral, qui en fixe la liste des parcelles concernées et la date.

Périodicité de mise à jour : La base de données est enrichie au fil du temps par les services de l'État.

Échelle métrique : Chaque SIS est représenté par les parcelles cadastrales qui le délimitent.

Périmètre : Le territoire français métropolitain et d'outre-mer, couvrant les sites identifiés comme pollués ou potentiellement pollués.

Méthodologie : La gestion des sites et sols pollués repose sur une approche fondée sur l'usage, conformément aux articles L. 556-1 et suivants du code de l'environnement ; les secteurs d'information sur les sols sont institués par l'article L. 125-6 du même code. Les étapes clés comprennent :

- > **Identification et recensement :** Les sites sont identifiés à partir de différentes sources, notamment les anciennes installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), les activités industrielles passées et les signalements ;
- > **Évaluation des risques :** Une évaluation des risques est réalisée pour déterminer l'impact potentiel sur la santé humaine et l'environnement, en fonction de l'usage actuel ou futur du site ;
- > **Gestion et réhabilitation :** Des actions sont entreprises pour gérer les risques identifiés, pouvant inclure la surveillance, la restriction d'usages, ou la dépollution du site ;

- > **Suivi et pérennisation :** Un suivi est mis en place pour assurer la pérennité des mesures prises et prévenir toute réapparition des risques.

Atouts :

- > **Prévention des risques :** La politique de gestion vise à prévenir les risques pour la santé humaine et l'environnement en identifiant et en traitant les sites pollués ;
- > **Transparence et information du public :** La base de données offre un accès public aux informations sur les sites et sols pollués, favorisant la transparence et la sensibilisation ;
- > **Outil d'aide à la décision :** Les informations disponibles permettent aux acteurs publics et privés de prendre des décisions éclairées en matière d'aménagement du territoire et de gestion des risques.

Limites :

- > **Données partielles :** Les SIS se basent sur les informations disponibles, qui peuvent être incomplètes ou nécessiter des mises à jour ;
- > **Complexité administrative :** L'intégration des SIS dans les documents d'urbanisme peut représenter une charge pour les collectivités locales.

Fiche technique :

Les fiches techniques des sites et sols pollués sont disponibles via les bases de données BASOL et CASIAS. Elles contiennent des informations détaillées sur :

- > L'identification du site (nom, localisation, historique) ;
- > Les substances polluantes identifiées ;
- > Les actions entreprises (investigations, surveillance, réhabilitation) ;
- > Les restrictions d'usage éventuelles ;
- > Les documents associés (rapports, arrêtés préfectoraux, etc.).

Accès aux données :

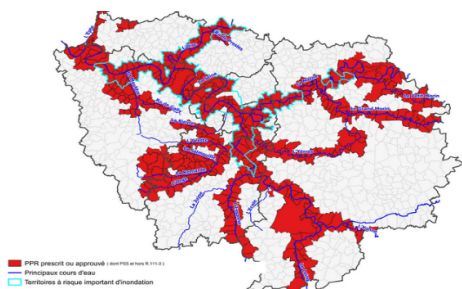
Les données des SIS sont accessibles au public sur le portail Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/secteurs-dinformations-sur-les-sols-sis>), au format CSV et sous forme de couche géographique (service WFS), sous licence ouverte.

Pour aller plus loin :

- > Guide méthodologique du BRGM : <https://ssp-infoterre.brgm.fr/guide/sis-attention-des-collectivites>.

Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI)

Gestion technique : DREAL, DDT



Contexte : Les PPRI sont des outils réglementaires visant à limiter l'exposition des personnes et des biens aux risques d'inondation. Ils sont élaborés pour encadrer l'urbanisation dans les zones à risque, conformément à la loi du 2 février 1995 dite « loi Barnier » et aux articles L. 562-1 à L. 562-9 du code de l'environnement.

Producteur : Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et Directions départementales des territoires (DDT).

Système de projection : Non spécifié sur le site. Toutefois, les données géographiques en France métropolitaine utilisent généralement le système de projection Lambert 93 (RGF93).

Nomenclature de la donnée : Les PPRI délimitent des zones d'exposition au risque d'inondation, classées selon le niveau d'aléa (faible, moyen, fort). Ces zones sont assorties de prescriptions réglementaires spécifiques concernant l'urbanisation et l'aménagement.

Périodicité de mise à jour : Les PPRI sont mis à jour en fonction de l'évolution des connaissances sur les risques et des modifications du territoire. Il n'existe pas de périodicité fixe, mais des révisions peuvent être engagées en cas de besoin.

Échelle métrique : Les cartes des PPRI sont généralement établies à des échelles allant du 1/5 000 au 1/25 000, selon la précision requise et la taille du territoire concerné.

Périmètre : Territoire français métropolitain, couvrant les zones identifiées comme exposées aux risques d'inondation.

Méthodologie : Les PPRI sont élaborés par les services de l'État, en concertation avec les collectivités territoriales. Le processus comprend :

- > **Études préalables :** analyse des phénomènes d'inondation historiques, modélisation hydraulique, identification des enjeux exposés ;
- > **Cartographie des aléas :** délimitation des zones inondables selon différents scénarios de crue (centennale, millénaire, etc.) ;

- > **Zonage réglementaire :** définition de zones réglementées avec des prescriptions spécifiques en matière d'urbanisme et d'aménagement ;
- > **Consultation et enquête publique :** recueil des avis des parties prenantes et du public ;
- > **Approbation :** approuvé par arrêté préfectoral, le PPRI vaut servitude d'utilité publique ; il est opposable aux tiers et annexé aux documents d'urbanisme locaux.

Atouts :

- > **Prévention des risques :** les PPRI permettent de réduire la vulnérabilité des territoires en encadrant l'urbanisation dans les zones à risque ;
- > **Outil réglementaire :** ils sont opposables aux tiers et intégrés aux documents d'urbanisme, assurant une cohérence des politiques d'aménagement ;
- > **Information du public :** les PPRI fournissent une cartographie précise des zones inondables, accessible aux citoyens et aux acteurs locaux.

Limites :

- > **Couverture partielle :** la cartographie des PPRI couvre des surfaces restreintes. Les zones inondées par remontée de nappe ou par ruissellement pluvial urbain n'y figurent pas ;
- > **Temporalité des données :** les PPRI peuvent devenir obsolètes si les connaissances sur les risques évoluent ou si le territoire subit des modifications significatives ;
- > **Complexité des documents :** la compréhension des cartes et des prescriptions peut nécessiter un accompagnement technique pour les non-spécialistes.

Fiche technique :

Chaque PPRI comprend :

- > Un rapport de présentation détaillant la méthodologie et les justifications des choix effectués ;
- > Une cartographie des aléas et un zonage réglementaire ;
- > Un règlement précisant les prescriptions applicables dans chaque zone.

Ces documents sont disponibles sur les sites des préfetures ou des directions départementales des territoires (DDT) du département concerné, ainsi que sur le portail Géorisques.

Accès aux données :

Les données des PPRI sont accessibles via les sites des DREAL et des DDT. Elles sont également consultables sur le portail <https://www.georisques.gouv.fr/>. Les documents disponibles (zonage réglementaire, cartographie des aléas) sont proposés selon les départements au format PDF ou en couche SIG, sous des conditions de licence qui peuvent varier : il convient de vérifier ces éléments sur le site de la DREAL ou de la DDT concernée.

Pour aller plus loin : <https://www.georisques.gouv.fr/>

Pollution - Sites et sols pollués ou potentiellement pollués (ex-BASOL)

Gestion technique : Bureau de Recherches Géologiques et

Producteur : Ministère chargé de l'Environnement ; informations saisies et mises à jour par les services déconcentrés (DREAL, DRIEAT, DEAL) et l'inspection des installations classées.

Système de projection : RGF93 / Lambert 93 pour les fichiers nationaux et régionaux (couche shapefile) ; chaque instruction est rattachée à la commune (code INSEE), au département et à la région, avec les coordonnées XY et la géométrie de l'emprise.

Nomenclature de la donnée : L'ancienne base BASOL, créée au début des années 1990, est diffusée depuis sa refonte sous l'intitulé « Information de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée ». Le jeu de données est organisé en deux tables :

- > **Instructions :** identifiant de l'instruction (code métier) et autre identifiant éventuel, nom, statut, dates de début et de fin, description, localisation du site (code INSEE, commune, département, région, XY, géométrie de l'emprise), code NAF de l'activité ;
- > **Actions :** identifiant de l'instruction, dates de début et de fin de l'action, description, milieu concerné, type d'étude, fréquence annuelle, paramètre et groupe Sandre (substances suivies), mesures de gestion, mesures de sécurité, traitements sur site ou hors site, traitements in situ.

Périodicité de mise à jour : les fiches sont alimentées au fil des instructions par les services de l'État.

Échelle métrique : Depuis la refonte du système d'information, les sites sont cartographiés à l'échelle de la parcelle cadastrale (emprise des instructions) ; la localisation des anciennes fiches BASOL s'appuyait sur le 1/25 000.

Périmètre : France métropolitaine et outre-mer. Le jeu recense les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif, connus de l'État.

BASOL : 10 400 sites pollués ou potentiellement pollués en France (2023).

Méthodologie : Un site entre dans l'inventaire à la suite d'une découverte fortuite lors de travaux, d'une action de contrôle de l'administration (installations classées), d'une pollution accidentelle, d'un diagnostic de cessation d'activité ICPE, d'une recherche historique, d'un changement d'usage ou d'un projet d'aménagement, ou d'analyses de la qualité des eaux demandées par l'administration. L'action des pouvoirs publics vise à caractériser la pollution et à en maîtriser les risques ; la fiche retrace les instructions et actions successives, les polluants suspectés ou suivis par milieu, les parcelles concernées et les obligations

réglementaires associées (Secteurs d'information sur les sols – SIS, servitudes d'utilité publique – SUP).

Atouts :

- > **Mémoire des pollutions et des réhabilitations :** traçabilité des sites, y compris après traitement, cohérente avec la politique nationale de gestion des sites et sols pollués fondée sur l'usage ;
- > **Géoréférencement à la parcelle :** compatible avec les documents d'urbanisme et les SIS ;
- > **Données ouvertes :** licence Etalab 2.0 ; téléchargement aux échelles nationale, régionale et départementale, aux formats XLSX et shapefile ; interrogation par l'API Géorisques.

Limites :

- > **Non exhaustif :** seuls les sites connus de l'État et appelant une action publique sont recensés ; une fiche reflète l'information disponible au moment de sa rédaction ;
- > **Donnée administrative :** la base décrit des instructions, non des mesures de qualité des sols.

Fiche technique :

Chaque fiche de site comprend :

- > Identification et localisation du site ;
- > Description du site et des mesures de gestion appliquées ;
- > Liste des polluants suspectés ou suivis, par milieu, d'après les études réalisées ;
- > Liste des parcelles cadastrales concernées et cartes de situation des périmètres ;
- > Obligations réglementaires liées aux parcelles (SIS, SUP).

Articulation avec les autres bases :

La base de données ex-BASOL (sites appelant une action publique) est complémentaire de la base de données CASIAS (inventaire historique, beaucoup plus large, des sites ayant pu mettre en œuvre des substances polluantes) et des SIS (terrains où l'État a connaissance d'une pollution justifiant des études de sols en cas de changement d'usage, art. L. 125-6 du code de l'environnement). Les trois sont diffusés sur Géorisques.

Accès aux données :

Consultation site par site et téléchargement sur le portail Géorisques :
<https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/sites-et-sols-pollues-ou-potentiellement-pollues> ; [dossier](https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/sites-et-sols-pollues-ou-potentiellement-pollues) thématique :
<https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-industriels/basol>.

BDSolU - Base de Données des analyses de Sols Urbains

Gestion technique : Bureau de Recherches Géologiques et

Producteur : BRGM, dans le cadre du programme BDSolU du GIS Sol, développé en partenariat avec INRAE et eOde, avec la collaboration de Mines Paris – PSL et le soutien de l'ADEME.

Système de projection : Non précisé. Les sondages sont rattachés à la Banque du sous-sol (BSS) du BRGM, en Lambert 93 pour la métropole.

Nomenclature de la donnée : Base relationnelle structurée en sites, sondages, échantillons et analyses, adossée à des référentiels reconnus : lexiques Sandre (substances, unités, méthodes), nomenclature Corine Land Cover (occupation du sol), identifiants BSS (sondages) et CASIAS/BASIAS (sites), base S3IC de l'inspection des installations classées. Les analyses portent sur les polluants inorganiques (éléments traces, majeurs) et organiques (HAP, PCB, hydrocarbures, dioxines-furanes...) habituellement dosés dans le domaine des sites et sols pollués.

Périodicité de mise à jour : au rythme des données acquises et transmises par les contributeurs conventionnés ; les valeurs de fond publiées sont datées. Effectif affiché en octobre 2026 : 1 757 sites, 3 070 sondages, 4 060 échantillons, 162 857 analyses.

Échelle métrique : Données ponctuelles (sondage, profondeur de prélèvement) ; valeurs de fond restituées par zone géographique (agglomération, bassin) et par domaine de profondeur : 0–5 et 0–30 cm pour le diagnostic de sol, au-delà de 30 cm pour la valorisation des terres excavées.

Périmètre : Territoire national ; les données sont concentrées dans les principales agglomérations (diagnostics « Établissements sensibles » menés depuis 2008 dans plus de 400 villes), le bassin parisien et la vallée de la Seine (projet GeoBaPa, Île-de-France et Normandie, plus de 7 700 échantillons) et Toulouse Métropole (projet FGU Toulouse).

Méthodologie : L'objectif est de déterminer, par agglomération, le fond pédogéochimique anthropisé urbain : concentrations habituelles des substances dans les sols urbains, résultant de la superposition du fond naturel et des apports diffus (retombées atmosphériques, trafic, chauffage, industrie).

Atouts :

- > **Référentiel urbain** : seul référentiel national de teneurs habituelles pour les sols urbains, construit avec les protocoles du domaine des sites et sols pollués ;
- > **Restitution opérationnelle** : tableau simplifié et tableau détaillé (CSV), fichier PDF avec histogrammes et cartes par substance, consultables par zone et par profondeur ;
- > **Valorisation directe** : diagnostic de sol (comparaison aux sols « sains » voisins) et

gestion des terres excavées (compatibilité site donneur / site receveur) ;

- > **Capitalisation** : les analyses produites par les projets d'aménagement peuvent être déposées par convention avec le BRGM.

Limites :

- > **Couverture hétérogène** : des valeurs de fond ne sont publiées que pour les zones disposant d'un effectif suffisant ;
- > **Aide à l'interprétation** : les valeurs de fond ne sont pas des seuils et ne garantissent pas l'absence de risque sanitaire ;
- > **Base géochimique** : elle ne renseigne pas les propriétés pédologiques (profondeur, texture, structure, hydromorphie) ni les fonctions du sol ; elle complète les bases pédologiques sans s'y substituer ;
- > **Accès aux données brutes** : réservé aux contributeurs conventionnés ; seules les valeurs de fond agrégées sont en accès libre ;
- > **Format propre** : bordereau tableau spécifique à BDSolU, distinct du format DoneSol du GIS Sol : les deux bases ne sont pas directement interoperables.

Fiche technique :

Pour chaque zone et domaine de profondeur sélectionnés, le tableau détaillé donne, par substance :

- > Effectif, moyenne, médiane, écart type, coefficient de variation, quantiles ;
- > Limites basse et haute de la gamme de fond lorsque l'effectif dépasse 30 ;
- > Indicateur de fiabilité (* peu fiable, ** moyennement fiable, *** fiable) ;
- > Dans les PDF : histogramme de répartition et carte des points de prélèvement.

Accès aux données :

<https://www.bdsolu.fr> :

- > consultation des valeurs de fond par carte ou par formulaire (zone géographique x profondeur) ;
- > dépôt de données par les contributeurs conventionnés (rubrique « Bancariser », modèle de convention BRGM de juin 2024).

C. Les données d'occupation des sols

Les bases de données décrivant l'occupation des sols ne sont pas encadrées par une réglementation spécifique. Parmi elles, la base de données **OCS GE** se distingue comme une des plus précises et homogènes à l'échelle nationale. Depuis 2025, l'OCS GE est disponible en 2

millésimes à l'échelle des 101 départements français. Les millésimes suivants sont en cours de production. Les collectivités disposent également, bien souvent, de leur propre base de données, utilisée pour la gestion de l'aménagement du territoire, l'élaboration des documents d'urbanisme et le suivi des dynamiques d'occupation des sols à l'échelle locale. Les bases de données existantes les plus connues sont présentées par la suite.

L'occupation du sol à grande échelle (OCS GE)

Gestion technique : Commanditaires locaux et IGN



Contexte : Le suivi de l'objectif « zéro artificialisation nette » (ZAN) s'appuie sur le portail de l'artificialisation des sols, qui utilise les données nationales d'occupation des sols (OCS GE). Ces données offrent un suivi global et harmonisé à l'échelle nationale, visant à garantir l'atteinte des objectifs, tout en préservant la pertinence des observatoires locaux (OCS, MOS), avec l'ambition de les articuler efficacement avec l'OCS GE à terme. Depuis début octobre 2025, la base de données couvre l'intégralité du territoire national, avec deux millésimes disponibles pour chacun des 101 départements.

Producteur : Commanditaires locaux et IGN.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : Double nomenclature. Croisement entre couverture x usage ; 14 déclinaisons pour la *couverture du sol* et 17 postes pour l'*usage du sol*.

Périodicité de mise à jour : Millésime produit tous les trois ans par l'IGN, dont la précision géométrique s'appuie sur le Référentiel à grande échelle (RGE). Deux millésimes sont désormais disponibles pour chaque département depuis début octobre 2025 ; le millésime le plus récent varie selon les départements.

Échelle métrique : Données sous forme vecteur, avec des unités minimales de collecte de 200 m² pour le bâti, 500 m² pour les autres objets en zone construite, et 2 500 m² hors zone construite.

Périmètre : Métropolitain et départements et régions d'outre-mer (DROM).

Méthodologie : Photo-interprétation des prises de vues aériennes assistée par l'intelligence artificielle, et croisement avec des bases de données externes : BD TOPO pour les éléments structurants du territoire, BD Forêt pour les zones arborées, et RPG (Registre Parcellaire Graphique) pour les classes agricoles.

Atouts : Données complètes et précises (couverture spatiale et usage du sol).

Limites : La couverture métropolitaine est complète depuis début octobre 2025. Pas de distinction entre production secondaire (industrie), production tertiaire et usage résidentiel (poste US235).

Fiche technique :

https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2022-11/DC_OCS_GE_1-1.pdf

Accès aux données : Accessible gratuitement, au format vecteur, sur le site de l'IGN, avec téléchargement par département, sous licence ouverte (Etalab 2.0) : <https://geoservices.ign.fr/ocsgc>.

Pour aller plus loin :

https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2022-11/DC_OCS_GE_1-1.pdf

Carte d'occupation des sols du CES OSO (THEIA)

Gestion technique : UMR CESBIO



Contexte : La carte d'occupation des sols est réalisée par le **Centre d'Expertise Scientifique sur l'Occupation des Sols (CES OSO)**, rattaché au pôle national **THEIA**, spécialisé dans les données et services sur les surfaces continentales. Cette donnée, disponible aux formats vecteur et raster, couvre l'ensemble du territoire métropolitain. Mise à jour chaque année, elle propose une nomenclature de 17 à 23 classes selon les millésimes. Son principal atout, par rapport à d'autres cartes d'occupation des sols, réside dans son exhaustivité territoriale et la fraîcheur des données.

Producteur : UMR CESBIO.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : La nomenclature comprend de 17 classes (jusqu'en 2017) à 23 classes selon le millésime.

Périodicité de mise à jour : Millésime produit tous les ans par l'UMR CESBIO.

Résolution : Les données sont produites au format raster, à une résolution de 10 mètres ; le format vecteur, obtenu par généralisation du raster, correspond à une résolution de 20 mètres.

Périmètre : Territoire métropolitain.

Méthodologie : Les cartes d'occupation des sols sont produites par la chaîne *iota2*, développée par le CESBIO, utilisant des séries temporelles des satellites Landsat-8, Sentinel-2 et Sentinel-1. Les données, prétraitées par le pôle THEIA (niveau 2A), sont corrigées des effets atmosphériques. La production, automatisée, repose sur des algorithmes de classification supervisée utilisant quatre sources d'échantillons : Corine Land Cover (CLC), BD TOPO IGN, RPG et le Randolph Glacier Inventory (RGI, utilisé pour les zones de glaciers et de neiges éternelles). Les données sont ensuite validées selon deux approches (carte de validité et carte de confiance). Les cartes OSO sont diffusées sous licence ouverte, compatible Etalab ; l'outil qui les produit, *iota2*, est quant à lui un logiciel libre sous licence AGPL v3.0.

Atouts : Données gratuites et homogènes sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Limites : Données difficiles d'accès sur le site web. Fiabilité *a priori* limitée dans la distinction des types et usages des classes urbaines (Bâtis denses, Bâtis diffus, Zones industrielles et commerciales, Surfaces routes). Données non présentes sur les territoires d'outre-mer.

Fiche technique :

<https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/oso-theia>

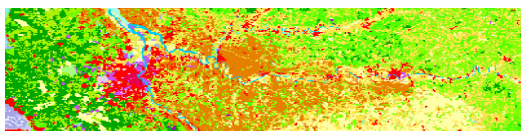
Accès aux données : Accessible sur le portail Geodes du CNES, qui a remplacé l'ancien catalogue THEIA (<https://geodes-portal.cnes.fr/>), sous licence ouverte compatible Etalab.

Pour aller plus loin : <https://www.data-terra.org/actualite/produit-theia-oso-2020-nouvelle-carte-doccupation-des-sols/>

Corine Land Cover

Gestion technique : Agence européenne pour l'environnement dans le cadre du programme Copernicus

Données sources : SDES avec l'IGN depuis 2018.



Contexte : La base de données Corine Land Cover (CLC) est un inventaire européen de l'occupation des sols, initié en 1985 dans le cadre du programme CORINE (Coordination of Information on the Environment). Elle fournit des données harmonisées sur l'ensemble du territoire européen, avec une classification en 44 classes, permettant d'analyser l'évolution de l'occupation des sols à différentes échelles. Mise à jour tous les six ans, la CLC est largement utilisée pour l'aménagement du territoire, la gestion environnementale et les études d'impact.

Producteur : Service des données et études statistiques (SDES), avec l'IGN depuis 2018.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : Nomenclature qui contient 44 postes répartis selon 5 types d'occupation du sol (territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau), et qui se déclinent en trois niveaux hiérarchiques. Pour les territoires d'outre-mer, six postes supplémentaires ont été créés au sein d'un 4e niveau.

Périodicité de mise à jour : Cinq millésimes disponibles depuis 1990, au rythme moyen d'un tous les six ans : 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018 (le plus récent).

Échelle métrique : Données sous forme de vecteur, au 1/100 000.

Périmètre : Territoire métropolitain et départements d'outre-mer. En Guyane uniquement, seuls une bande de 20 km de large le long du littoral et l'aval des fleuves frontaliers ont été cartographiés.

Méthodologie : La base de données Corine Land Cover est réalisée par photo-interprétation humaine d'images satellitaires d'une résolution de 20 mètres.

Atouts : Données gratuites et homogènes sur l'ensemble de l'Europe. Nomenclature très hiérarchisée.

Limites : La principale limite de la base de données réside dans sa faible résolution géométrique : l'unité minimale de 25 hectares et l'échelle au 1/100 000 ne permettent pas de capturer les détails nécessaires pour des études locales ou infrarégionales (SCoT, PLU). La

base de données sous-estime l'urbanisation et l'artificialisation.

De plus, la nomenclature CLC mélange couverture et usage des sols. Les évolutions législatives, technologiques et la nécessité d'un suivi continu plaident en faveur d'un produit à plus grande échelle, avec une actualisation plus automatisée et régulière.

Fiche technique :

<https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/corine-land-cover>

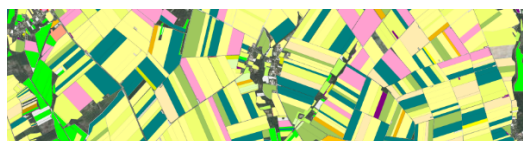
Accès aux données : Données accessibles gratuitement en téléchargement sur le portail de l'IGN (Géoservices) et sur le portail de l'artificialisation des sols, sous licence ouverte. Le millésime le plus récent actuellement disponible est celui de 2018.

Pour aller plus loin :

<https://www.geoportail.gouv.fr/depot/layers/LANDCOVER.CORINELANDCOVER/legendes/LANDCOVER.CORINELANDCOVER-legend.pdf>

Registre Parcellaire Graphique

Gestion technique : Agence de Services et de Paiement



Producteur : Agence de Services et de Paiement (ASP), sous la tutelle du ministère chargé de l'Agriculture.

Système de projection : Lambert 93. En métropole, les données sont diffusées en Lambert 93 ; dans les départements et régions d'outre-mer, chaque territoire utilise son propre système UTM local (RGAF09 / UTM 20 nord aux Antilles, RGFG95 / UTM 22 nord en Guyane, RGR92 / UTM 40 sud à La Réunion, RGM04 / UTM 38 sud à Mayotte).

Nomenclature de la donnée : La nomenclature de l'usage du sol comporte entre 24 et 28 grands groupes culturaux principaux. Depuis 2015, ces groupes sont subdivisés en 350 cultures principales associées à l'emprise parcellaire. Les cultures intercalées, dites dérobées (45 valeurs possibles), sont également renseignées.

Périodicité de mise à jour : Annuelle, basée sur les déclarations des exploitants agricoles souhaitant bénéficier des aides de la Politique Agricole Commune.

Échelle métrique : 1/5 000.

Périmètre : Territoire français métropolitain et d'outre-mer, couvrant les îlots culturaux et, depuis 2015, les parcelles des exploitants déposant une déclaration au titre de la Politique Agricole Commune.

Méthodologie : Les exploitants agricoles déclarent en ligne les contours de leurs îlots et parcelles (depuis 2015 pour ces dernières) au 1/5 000 à partir d'une orthophotographie de la BD Ortho® de l'IGN. Ils renseignent ensuite diverses caractéristiques des parcelles, telles que :

- > La culture principale (nom et indication si elle est commercialisée) ;
- > La culture dérobée (le cas échéant) ;
- > La conduite en agriculture biologique ;
- > L'engagement au titre des Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (MAEC) ;
- > La conduite en agroforesterie.

Ces données sont ensuite anonymisées et publiées par l'IGN selon des spécifications définies dans une convention tripartite entre le ministère chargé de l'Agriculture, l'ASP et l'IGN. Depuis 2015, l'IGN contribue annuellement à la rénovation et à l'entretien du RPG sur un tiers du territoire national.

Atouts :

- > **Précision géographique :** Représentation détaillée des îlots culturaux et des parcelles au 1/5 000 ;
- > **Actualisation régulière :** Mise à jour annuelle basée sur les déclarations des exploitants agricoles ;
- > **Richesse des informations :** Données détaillées sur les cultures principales et dérobées, ainsi que sur les pratiques agricoles spécifiques ;
- > **Accessibilité :** Données gratuites et ouvertes.

Limites :

- > **Dépendance aux déclarations :** La qualité et l'exhaustivité des données dépendent de la précision et de l'exactitude des déclarations des exploitants agricoles ;
- > **Couverture partielle :** Seules les parcelles des exploitants déposant une déclaration au titre de la Politique Agricole Commune sont référencées, le territoire agricole n'est donc pas entièrement couvert.

Fiche technique :

Une fiche détaillée du RPG est disponible [à l'adresse https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/registre-parcellaire-graphique](https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/registre-parcellaire-graphique), fournissant des informations complémentaires sur la structure des données, les modalités de collecte et les spécifications techniques.

Accès aux données :

<https://geoservices.ign.fr>

Fichiers fonciers

Gestion technique : Cerema pour le compte de la Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN), à partir des données fiscales de la Direction générale des

Contexte : Les fichiers fonciers regroupent les données cadastrales et fiscales (parcelles, locaux, propriétaires), issues de la DGFIP et retraitées par le Cerema ; ils distinguent le bâti du non-bâti. Produits annuellement depuis 2009, date du premier millésime de cette base retraitée, ils participent à la connaissance de la consommation d'espace.

Producteur : Cerema pour le compte de la Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) sur la base des données fiscales de la Direction générale des Finances publiques (DGFIP).

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : Déclinaison en deux postes, « naturel, agricole et forestier » (NAF) et « urbanisé », puis en 13 postes plus précis.

Périodicité de mise à jour : Mise à jour annuelle.

Échelle métrique : Unité de quelques mètres carrés à plusieurs hectares. Échelle de la parcelle.

Périmètre : Métropolitain et départements et régions d'outre-mer (DROM).

Méthodologie : La base de données brute, issue des déclarations fiscales, est produite par les services des impôts. Le Cerema, sous la DGALN, la restructure et l'enrichit.

Limites : Le classement urbanisé/non urbanisé, fondé sur la nature fiscale des parcelles, comporte des faux positifs (changement de classement fiscal sans changement réel d'occupation du sol), en particulier pour le suivi de la renaturation ; il est donc recommandé de se concentrer sur les parcelles changeant réellement d'usage plutôt que sur l'état à un instant donné.

Fiche technique : <https://doc-datafoncier.cerema.fr/doc/guide/conso-enaf>

Accès aux données : Accès gratuit sur demande pour les ayants droit (organismes publics ou de recherche), sous réserve de signer un acte d'engagement envers la DGALN et sous réserve de l'utilisation des données dans le champ des politiques d'aménagement du territoire. Accessible sur le site web : <https://datafoncier.cerema.fr/portail-des-donnees-foncieres>.

Pour aller plus loin : <https://datafoncier.cerema.fr/fichiers-fonciers>

La cartographie nationale des habitats naturels et semi-naturels terrestres (CarHab)

Gestion technique : MNHN



Contexte : Initié dans le cadre de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité 2011-2020, le programme CarHab vise à réaliser une cartographie nationale des habitats naturels et semi-naturels terrestres de France métropolitaine et d'outre-mer. L'objectif est de produire une modélisation cartographique à l'échelle du 1/25 000, afin de répondre aux enjeux de conservation de la biodiversité, d'aménagement du territoire et de gestion durable des ressources naturelles. Fin 2025, environ 91 % de la surface de la France hexagonale et de la Corse étaient couverts, dont huit régions cartographiées à 100 % ; la diffusion se poursuit en 2026 pour les départements restants et, depuis février 2026, à La Réunion, premier département d'outre-mer concerné.

Producteur : Le programme est porté par le ministère de la Transition écologique en partenariat avec l'OFB, PatriNat, l'IGN, les CBN, EVS Isthme, le CESBIO, le Cerema et le BRGM.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : La cartographie CarHab distingue trois objets d'étude :

- > **Biotopes :** Surfaces écologiquement homogènes définies par une combinaison de huit paramètres (caractère littoral, étage de végétation, ombroclimat, continentalité, variante bioclimatique, humidité du sol, acidité du sol et durée d'enneigement) ;
- > **Physionomies de végétation :** Principaux stades de développement des communautés végétales au cours de la dynamique temporelle naturelle des végétations, répertoriés au sein d'une typologie hiérarchisée ;
- > **Habitats CarHab :** Résultent du croisement des informations sur les biotopes et les physionomies de végétation, fournissant une description détaillée des habitats présents.

Périodicité de mise à jour : Les physionomies de végétation seront mises à jour tous les six ans, au rythme du rapportage européen des directives « Nature » ; les biotopes, plus pérennes, le seront tous les douze ans.

Échelle métrique : La cartographie est réalisée à une échelle de 1/25 000, offrant une résolution adaptée pour une utilisation à diverses échelles de planification territoriale.

Périmètre : Métropolitain et départements et régions d'outre-mer (DROM). À noter que la modélisation pour les DROM sera réalisée après 2026.

Méthodologie : CarHab utilise une approche de modélisation par machine learning, notamment l'algorithme Random Forest, pour prédire la distribution des habitats. Cette méthode permet d'intégrer des données quantitatives et qualitatives, offrant une modélisation robuste des biotopes et des physionomies de végétation.

Atouts : Fournit une cartographie détaillée des habitats à une échelle fine. Soutient les politiques de protection de la nature et l'intégration des enjeux de biodiversité dans la planification territoriale. Bénéficie de la collaboration de multiples institutions spécialisées, assurant une expertise diversifiée.

Limites : Les cartes produites sont des prédictions et peuvent nécessiter des validations de terrain pour confirmer la présence réelle des habitats. La périodicité de mise à jour ne permet pas de refléter les changements rapides des habitats dus à des perturbations récentes ou au changement climatique.

Fiche technique :

https://cbnbp.mnhn.fr/cbnbp/ressources/carhab/CarHab_Notice_2023_WEB.pdf

Accès aux données : Accessible gratuitement, par département, sur le visualisateur cartographique de l'INPN (Muséum national d'Histoire naturelle) : <https://inpn.mnhn.fr/viewer-carto/CarHab/>.

Pour aller plus loin :

<https://www.patrinat.fr/fr/cartographie-nationale-des-habitats-carhab-6671>

D. Les données thématiques

Au-delà des données pédologiques et d'occupation du sol, la compréhension fine des sols passe également par la mobilisation de données thématiques, qui renseignent sur des aspects plus spécifiques mais essentiels à la définition des fonctions des sols. Parmi celles-ci, figurent notamment le stock de carbone, la biodiversité ou encore la capacité d'infiltration des sols. Elles rassemblent aussi des fiches relevant de l'occupation du sol : zones humides, friches, îlots de chaleur, Teruti et les couches Copernicus à haute résolution (HRL).



Contexte : ALDO est un outil développé par l'ADEME pour aider les territoires à estimer les stocks et les flux de carbone dans les sols, les forêts et les produits bois. Il vise à intégrer la séquestration du carbone dans les diagnostics territoriaux, notamment dans le cadre des Plans Climat-Air-Énergie Territoriaux (PCAET).

Producteur : L'outil est conçu et maintenu par l'ADEME, en collaboration avec des partenaires tels que l'IGN et l'INRAE, qui fournissent des données essentielles à son fonctionnement.

Nomenclature de la donnée : ALDO centralise des données issues de différentes bases nationales, notamment celles de l'IGN et de l'INRAE. Ces données incluent des informations sur l'occupation des sols, la biomasse forestière, les stocks de carbone organique des sols et les produits bois. Les estimations sont fournies à l'échelle des Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) et des communes.

Périodicité de mise à jour : Les données d'ALDO sont mises à jour en fonction de la disponibilité des nouvelles données des sources partenaires. Par exemple, les données sur l'occupation des sols sont mises à jour en fonction des nouvelles versions de Corine Land Cover. Les mises à jour de l'outil sont annoncées sur le site officiel.

Échelle métrique : Les estimations fournies par ALDO sont disponibles à l'échelle de l'EPCI, comme dans le reste du guide.

Périmètre : ALDO couvre l'ensemble du territoire français métropolitain, y compris la Corse. Les territoires d'outre-mer ne sont pas inclus dans le périmètre actuel de l'outil.

Méthodologie : ALDO utilise des données centralisées provenant de bases nationales pour estimer les stocks et les flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois. Les utilisateurs peuvent sélectionner leur territoire et accéder aux estimations correspondantes. L'outil permet également la saisie de données locales pour affiner les estimations.

Atouts :

- > **Accessibilité :** Outil en ligne, gratuit et open-source, facilitant son utilisation par les collectivités et les bureaux d'études ;
- > **Personnalisation :** Possibilité d'intégrer des données locales pour affiner les estimations ;

- > **Transparence :** Accès aux données sources et aux méthodes de calcul pour une compréhension approfondie des estimations fournies.

Limites :

- > **Précision des données :** Les estimations sont basées sur des moyennes régionales et peuvent ne pas refléter les spécificités locales ;
- > **Périmètre :** Actuellement limité à la France métropolitaine, excluant les territoires d'outre-mer.

Fiche technique : Une documentation détaillée, incluant la méthodologie et les sources de données utilisées, est disponible sur le site officiel d'ALDO.

Source : <https://aldo.territoiresentransitions.fr/>.

Accès aux données : Les utilisateurs peuvent accéder à l'outil ALDO en ligne pour estimer les stocks et les flux de carbone de leur territoire. ALDO n'est pas une couche cartographique mais un outil de calcul qui restitue des tableaux de résultats par territoire. Les données sources sont accessibles sur le portail open data de l'ADEME (<https://data.ademe.fr/datasets/aldo-stocks-de-carbone>), sous licence ouverte, millésime actualisé au 5 mai 2026.

Pour aller plus loin : Un webinaire organisé par l'ADEME est disponible sur le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=8WzkcVd0gYo&t=3s>

L'Observatoire National de la Biodiversité (ONB)

Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT)

Gestion technique : Université de Rennes 1 (OSUR),
MNHN, etc.



Contexte : L'OPVT, lancé en 2011, évalue la biodiversité des sols en France via les vers de terre, indicateurs clés de leur qualité. Il sensibilise le public et collecte des données pour établir des référentiels nationaux. Les objectifs principaux de l'OPVT sont : La méthode mobilise plus précisément le référentiel constitué sur la période 2006-2015.

- > Proposer un outil simplifié d'évaluation de la biodiversité des sols à travers l'étude des vers de terre ;
- > Permettre à différents publics (agriculteurs, scolaires, naturalistes, jardiniers, gestionnaires de milieux naturels ou urbains) de participer à des observations à l'aide d'un protocole accessible ;
- > Établir progressivement des référentiels sur la diversité et l'abondance des vers de terre grâce à la participation citoyenne.

Producteur : L'OPVT est coordonné par l'Université de Rennes, au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR). Il est développé en collaboration avec le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) et d'autres partenaires institutionnels et associatifs (ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, Office français de la biodiversité, ARB Île-de-France, collectivités locales, associations, etc.).

Système de projection : Les observations sont géolocalisées : l'observateur les situe sur une carte ou saisit des coordonnées GPS, la commune étant calculée automatiquement.

Nomenclature de la donnée : Les données recueillies incluent :

- > Le nombre total de vers de terre observés ;
- > La répartition des vers selon les catégories écologiques : épigés, endogés et anéciques ;
- > Les conditions environnementales du site d'échantillonnage (type de sol, couverture végétale, usage du sol, etc.).

Périodicité de mise à jour : Les données sont mises à jour en continu, en fonction des contributions des participants.

Échelle métrique : Les observations sont réalisées à l'échelle locale, généralement sur des parcelles de quelques mètres carrés. Cependant, l'accumulation de ces données permet des analyses à des échelles plus larges, jusqu'au niveau national.

Périmètre : Initialement centré sur les systèmes agricoles, le projet s'est étendu depuis 2014 aux espaces urbains/périurbains, puis depuis 2017 aux habitats naturels.

Méthodologie : Le protocole principal utilisé est le « Test Bêche », qui consiste à :

- > Prélever un bloc de terre à l'aide d'une bêche sur une surface définie. Trier manuellement les vers de terre présents dans l'échantillon. Identifier les vers selon les grandes catégories écologiques (épigés, endogés, anéciques) avec des guides d'identification simplifiés. Noter les conditions environnementales du site.

Les données sont ensuite saisies sur la plateforme EcoBioSoil, où elles sont centralisées et analysées.

Atouts :

- > **Participation citoyenne :** Implique un large éventail de participants, favorisant la sensibilisation à la biodiversité des sols ;
- > **Base de données étendue :** La collecte massive de données permet d'établir des référentiels robustes sur la biodiversité lombricienne en France ;
- > **Outil pédagogique :** Le protocole simplifié est adapté à des fins éducatives, facilitant son intégration dans des programmes scolaires ou des ateliers de sensibilisation.

Limites :

- > **Variabilité des données :** La diversité des participants peut entraîner des variations dans la qualité des données collectées ;
- > **Représentativité spatiale :** Certaines zones géographiques peuvent être sous-représentées en fonction de la distribution des participants.

Fiche technique : https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2024/01/OPVT_17Nov2021.pdf

Accès aux données : Les données collectées sont accessibles via la plateforme EcoBioSoil : <https://opvt.cnrs.fr/> (nouvelle adresse de la plateforme ; le téléchargement des observations individuelles, la licence de réutilisation et l'emprise géographique exacte restent à confirmer auprès du gestionnaire).

Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)

Gestion technique : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Contexte : Cet indice qualifie l'aptitude des terrains à laisser les eaux de surface s'infiltrer ou ruisseler, ce qui éclaire la gestion territoriale et la planification. L'IDPR compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*persistance des réseaux, PR*).

Producteur : Le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) en partenariat avec les acteurs locaux.

Système de projection : Lambert 93.

Nomenclature de la donnée : L'IDPR est un indice numérique continu : une valeur inférieure à 1 000 indique une infiltration dominante, une valeur proche de 2 000, un ruissellement dominant.

Périodicité de mise à jour : La version nationale de l'IDPR actuellement diffusée sur InfoTerre date du 20 juillet 2018 (calcul dit « IDPR 2017 », qui remplace la version initiale de 2007) ; le BRGM n'annonce pas de fréquence de mise à jour fixe.

Échelle métrique : Les produits cartographiques sont réalisés à des échelles adaptées aux analyses régionales, typiquement entre 1/50 000 et 1/100 000.

Périmètre : France métropolitaine.

Méthodologie :

- > **Collecte et intégration des données :** Utilisation du réseau hydrographique naturel de la BD CARTHAGE® (IGN) pour la version initiale de la méthode (IDPR 2007), puis de la BD TOPO® (IGN), plus précise, pour la version nationale diffusée en 2018, d'un MNT au pas de 50 m pour la version initiale et de 25 m (BD ALTI® V2, IGN) pour la version 2018, et de données sur la géologie et les limites des masses d'eau souterraines ;
- > **Calcul de l'IDPR :** Comparaison entre un réseau théorique (dérivé du MNT et des talwegs) et le réseau observé afin de quantifier la capacité du sol à laisser infiltrer ou ruisseler l'eau ;
- > **Critères complémentaires :** Prise en compte de l'épaisseur de la zone non saturée, du type de nappe et d'autres paramètres hydrogéologiques via une approche multicritères intégrée dans un SIG (ArcGIS/ArcView) ;

- > **Sortie cartographique :** Livraison de la couche IDPR sous forme de raster téléchargeable, à la maille du modèle numérique de terrain et du réseau hydrographique mobilisés en entrée.

Atouts : L'IDPR est calculé à partir de modèles numériques de terrain (MNT), donc facilement généralisable sur de grandes surfaces. Il ne nécessite pas de données complexes ou coûteuses à acquérir. Il est aisément utilisable sur un Système d'Information Géographique (SIG).

Limites : La principale limite tient à la méthode d'élaboration des données d'entrée. L'échelle maximale est 1/50 000. Celle-ci est directement liée aux échelles de validité des données cartographiques exploitées (MNT, réseau hydrographique : BD CARTHAGE® pour la version initiale, BD TOPO® pour la version 2018).

Fiche technique :

<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55311-FR.pdf> (rapport de décembre 2006 présentant la méthode initiale, appliquée à la région Aquitaine, avec la BD CARTHAGE®).

Pour la version nationale diffusée en 2018 :

<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68563-FR.pdf>, qui décrit la construction de l'IDPR 2017.

Accès aux données : Données accessibles gratuitement sur le visualiseur InfoTerre du BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>, thème « Données Eaux > IDPR »), version diffusée le 20 juillet 2018.

Pour aller plus loin :

<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55311-FR.pdf>

La carte de prélocalisation des zones humides

Gestion technique : MNHN

Contexte : Ce projet s'inscrit dans le cadre de la cartographie nationale des milieux et zones humides. Il vise à prélocaliser, cartographier les habitats et évaluer les fonctions écologiques des milieux humides sur l'ensemble du territoire métropolitain. La démarche intègre des données abiotiques, des relevés de terrain, des données d'archives et l'imagerie satellitaire pour offrir une vision détaillée et évolutive du patrimoine naturel.

Producteur : Le projet est piloté et diffusé par le Collectif PatriNat, sous la coordination de l'INPN – Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) et en partenariat avec une équipe pluridisciplinaire (PatriNat, INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université Rennes 2 et la Tour du Valat). L'IRD et l'ONF ont rejoint le projet en 2024 pour continuer son déploiement en outre-mer.

Système de projection : Tout référentiel.

Nomenclature de la donnée :

La classification s'appuie sur les référentiels nationaux et sur des définitions reconnues :

- > **Milieux humides** définis selon la convention de Ramsar ;
- > **Zones humides** selon les prescriptions réglementaires (arrêté du 24 juin 2008 modifié).

Les habitats, quant à eux, sont identifiés selon la typologie EUNIS (niveau 3 pour le volet habitat).

Périodicité de mise à jour : La dernière couche disponible date de 2023. La périodicité est prévue en continu ; l'extension aux départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, Mayotte, La Réunion), engagée en 2024, n'a pas encore donné lieu à la publication de couches, les premiers résultats étant désormais annoncés à partir de 2026.

Échelle métrique : Les résultats sont produits sous forme de raster avec une résolution de 5 m pour la prélocalisation des milieux et zones humides, et de 10 m pour la cartographie des habitats.

Périmètre : France métropolitaine.

Méthodologie : La méthodologie repose sur :

- > **Collecte et agrégation des données :** Intégration de données abiotiques (pente, matériaux parentaux, reliefs issus de BD TOPAGE®, RGE ALTI®, BD Charm-50, etc.), de données satellitaires (images Sentinel, NDVI) et de relevés de terrain (flore, sol, inventaires) ;
- > **Modélisation spatiale :** Application de méthodes de photo-interprétation et

d'intelligence artificielle pour générer une probabilité de présence continue (valeurs de 0 à 1) par pixel ;

- > **Seuil et validation :** Un seuil défini par grande hydro-écorégion (HER-1) permet d'obtenir une carte binaire (présence/absence significative). La validation terrain et les ateliers consultatifs territoriaux complètent la démarche pour améliorer la précision et l'interprétation des résultats.

Atouts :

- > **Données nationales de qualité et gratuites :** Intégration d'informations issues de référentiels reconnus (BD Charm-50, BD TOPAGE®, RGE ALTI®, etc.) ;
- > **Haute résolution spatiale :** Une résolution de 5 m pour la prélocalisation offre une vision détaillée du territoire ;
- > **Méthodologie rigoureuse et collaborative :** Validation terrain et retours d'expérience recueillis lors d'ateliers consultatifs impliquant plus de 100 acteurs ;
- > **Approche intégrée et évolutive :** La cartographie couvre plusieurs volets (prélocalisation, habitat, fonctions) et s'adapte aux avancées scientifiques et aux besoins des utilisateurs.

Limites :

- > **Incertitudes inhérentes à la modélisation :** L'indice de qualité de la prélocalisation varie selon les hydro-écorégions (par exemple, des valeurs allant jusqu'à 0,73 pour certains milieux, mais pouvant descendre à 0,43 dans d'autres contextes) ;
- > **Méthodologie probabiliste :** La prélocalisation peut parfois détecter des zones humides dans des contextes inadaptés (zones urbanisées ou milieux dégradés) ou, au contraire, en omettre certaines, d'où la nécessité d'une validation terrain systématique ;
- > **Données hétérogènes :** La densité et la qualité des données disponibles varient localement, influençant la précision des résultats.

Fiche technique : Une brochure est disponible sur le lien suivant : <https://inpn.mnhn.fr/docs-web/docs/download/416298>

Accès aux données : Les données sont disponibles en téléchargement libre sur le site de l'INPN à l'adresse suivante :

<https://inpn.mnhn.fr/telechargement/cartes-et-information-geographique/mh/mh>

Cartofriches

Gestion technique : Cerema
<https://cartofriches.cerema.fr/cartofriches/>

Contexte : La réhabilitation des friches est un enjeu central de l'aménagement durable des territoires, en lien direct avec les politiques de lutte contre l'artificialisation des sols, de sobriété foncière, de revitalisation urbaine et de mise en œuvre du zéro artificialisation nette (ZAN). Le géostandard CNIG Friches vise à harmoniser la saisie et la caractérisation des friches pour faciliter leur inventaire et leur réutilisation.

Producteur : la plateforme Cartofriches est animée par le Cerema pour le compte de la DGALN et sur la base des données principalement des observatoires locaux de friches. Elle s'appuie sur le standard technique publié par le CNIG.

Système de projection : Non applicable.

Nomenclature de la donnée : La nomenclature porte sur la typologie des friches (industrielle, commerciale, habitat, etc.), leur état, leur usage, leur localisation, et les conditions de réemploi.

Périodicité de mise à jour : la base de données est mise à jour au fil du temps par les observatoires locaux.

Échelle métrique : Chaque friche est localisée par l'emprise de l'unité foncière (parcelle ou groupe de parcelles), sous forme d'un polygone dessiné localement ; la précision de localisation dépend du mode retenu.

Périmètre : Territoire national français. Le standard peut être mobilisé par tout acteur public ou privé souhaitant inventorier les friches sur un territoire donné.

Méthodologie : Le géostandard repose sur :

- > La définition réglementaire des friches (art. L. 111-26 du code de l'urbanisme) ;
- > Une structuration homogène de l'information dans un modèle de données (schéma JSON) ;
- > Une documentation littéraire (.pdf/.odt) et technique (schema.json) ;
- > Une approche interoperable et ouverte pour faciliter la mutualisation et la réutilisation des données.

Atouts :

- > Standard validé par le CNIG, garantissant qualité et interoperabilité ;
- > Outil essentiel pour atteindre les objectifs ZAN ;
- > Facilite l'identification des gisements fonciers mobilisables ;

- > Données ouvertes et partagées via des plateformes nationales (Cartofriches, data.gouv.fr) ;
- > Mobilisable par les collectivités, les agences d'urbanisme, les services de l'État, etc.

Limites :

- > Ne traite pas directement de la qualité environnementale ou sanitaire des friches ;
- > Donnée dynamique : nécessite un suivi dans le temps non systématiquement assuré ;
- > Dépend du niveau d'implication au sein des territoires pour la mise à jour.

Fiche technique :

Cartofriches se base sur le schéma friches publié sur le site <https://schema.data.gouv.fr/cnigfr/schema-friches>

Accès aux données :

<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/sites-references-dans-cartofriches/>

Base de données des Îlots de chaleur urbains (LCZ)

Gestion technique : Cerema

Contexte : Face à l'augmentation des vagues de chaleur et des Îlots de Chaleur Urbains (ICU), le Cerema développe une méthode de cartographie des Zones Climatiques Locales (LCZ) à partir de données satellitaires, pour diagnostiquer les typologies urbaines favorables à l'ICU dans les aires urbaines françaises de plus de 50 000 habitants.

Producteur : Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

Système de projection : RGF93 v1 / Lambert-93 (EPSG:2154), en ETRS89-extended / LAEA Europe (EPSG:3035) à l'origine.

Nomenclature de la donnée : Typologie LCZ selon une classification adaptée de (Stewart et Oke, 2012) :

- > 10 classes bâties (LCZ 1 à 10) ;
- > 7 classes non bâties (LCZ A à G).

Les classes sont attribuées selon des indicateurs morphologiques et d'occupation du sol.

Périodicité de mise à jour : Non précisée. La version décrite est basée sur l'imagerie SPOT de l'année 2022.

Échelle métrique : Résolution spatiale de 1,5 m (résultant du sous-échantillonnage des MNT/MNS d'origine).

Taille minimale recommandée des îlots : rayon de 200 m (environ 1 ha).

Périmètre : Aires urbaines de plus de 50 000 habitants en France métropolitaine (83 territoires).

Méthodologie :

- > Utilisation d'imagerie satellite SPOT 2022 (via DINAMIS) ;
- > Croisement avec la BD TOPO v3.3 de l'IGN, Urban Atlas 2018, HRL Imperviousness 2018 ;
- > Extraction de 8 indicateurs (morphologie et occupation du sol) ;
- > Attribution des classes LCZ via un arbre de décision ;
- > Production automatisée par scripts Python et modeleurs QGIS.

Atouts :

- > Méthode reproductible, fondée sur des données disponibles sur l'ensemble du territoire ;
- > Diagnostic climatique territorial objectivé à partir d'indicateurs urbanistiques et environnementaux ;
- > Adaptabilité de la méthode à d'autres territoires, y compris à l'international ;

- > Outils libres et scripts accessibles (GitHub).

Limites :

- > Non équivalente à une donnée d'occupation du sol classique ;
- > Sensibilité à la qualité géométrique des données (Urban Atlas notamment) ;
- > Présence possible d'erreurs ou de typologies aberrantes pour de petits îlots ;
- > Détection de la végétation dépendante de la date d'acquisition des images satellites ;
- > Classifications sensibles à de faibles variations d'indicateurs (effet de seuil).

Fiche technique :

- > Sources : SPOT 2022, BD TOPO v3.3, RGE ALTI 1 m, MNS-Correl, Urban Atlas 2018, HRL Imperviousness ;
- > Format : vecteur polygonal (polygones LCZ), produit à partir d'images d'entrée à 1,5 m de résolution ;
- > Traitements : Python (GDAL, OTB, PostGIS), QGIS ;
- > Scripts : disponibles en open source sur GitHub.

Accès aux données :

Document en accès libre, sous Licence Ouverte / Open Licence version 2.0. Lien de téléchargement du jeu de données LCZ :

<https://www.data.gouv.fr/datasets/cartographie-des-zones-climatiques-locales-lcz-des-93-territoires-de-plus-de-50-000-habitants-en-france>

Scripts de traitement sur le dépôt GitHub du Cerema : <https://github.com/CEREMA/dterocc.modeleursQgis3.classificationLCZ>

Agreste – Enquête Teruti

Gestion technique : Service de la statistique et de la prospective (SSP), ministère de l'Agriculture

Contexte : L'enquête Teruti permet de suivre l'évolution de l'occupation et de l'usage du sol depuis 1982. Elle est fondée sur un échantillon représentatif de points répartis sur tout le territoire national (y compris les DOM) et renseignés par observation de terrain, photo-interprétation ou bases géographiques. L'objectif est de quantifier la part des sols artificialisés, agricoles et naturels, et de mieux caractériser l'utilisation socio-économique du territoire.

Producteur : Service de la statistique et de la prospective (SSP), ministère de l'Agriculture – Bureau des statistiques structurelles, environnementales et forestières.

Système de projection : Non applicable : Teruti n'est pas diffusée sous forme de couche géographique. Seuls des tableaux de résultats aux échelles nationale, régionale et départementale sont publiés ; l'échantillon repose sur une grille régulière d'un point tous les 250 m.

Nomenclature de la donnée :

- > **Occupation du sol en 3 postes :** sols artificialisés, sols agricoles, sols naturels, ainsi qu'en 15 postes détaillés ;
- > **Utilisation du sol en 8 postes :** production végétale, élevage, habitat, industrie, loisirs, etc. La nomenclature repose sur la combinaison entre couverture du sol et usage socio-économique observé.

Périodicité de mise à jour : Annuelle, avec des résultats consolidés sur des cycles glissants de 3 ans (ex. 2019–2021 pour les données 2020).

Échelle métrique :

- > Grille d'échantillonnage : 1 point tous les 250 mètres ;
- > Chaque point représente en moyenne 6,25 hectares (250 m × 250 m) ;
- > Précision statistique suffisante jusqu'au niveau départemental.

Périmètre : France entière, y compris les départements d'outre-mer. Échantillon de :

- > 7,2 millions de points imputés automatiquement (~82 % du territoire) ;
- > 200 000 points observés sur le terrain ;
- > 45 000 points photo-interprétés.

Méthodologie :

- > Grille de points compatible INSPIRE ;

- > Qualification des points par croisement avec BD TOPO, BD Forêt, RPG, etc. ;
- > Enquête de terrain sur les zones instables (urbanisation, friches, littoraux, etc.) ;
- > Photo-interprétation pour zones peu accessibles ;
- > Pondération des points selon la méthode d'observation ;
- > Résultats exprimés en moyennes triennales, avec intervalles de confiance.

Atouts :

- > Profondeur historique (depuis 1982) ;
- > Méthode robuste, homogène sur tout le territoire ;
- > Bonne précision statistique à l'échelle nationale et départementale ;
- > Permet de suivre les dynamiques de l'artificialisation.

Limites :

- > Résultats non exploitables à une échelle infra-départementale ;
- > Résolution spatiale limitée (pas adaptée aux analyses locales fines) ;
- > Dépend de la disponibilité et de la qualité des bases géographiques ;
- > Des points peuvent être difficilement accessibles ou imprécis.

Fiche technique :

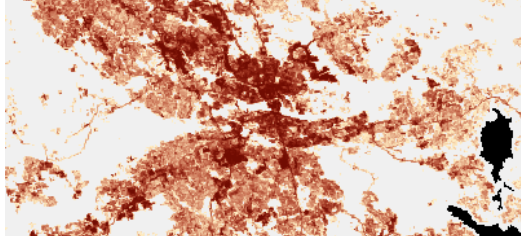
- > Nom de l'enquête : Teruti (renovée en 2017) ;
- > Territoire couvert : France métropolitaine et DOM ;
- > Unité de base : point géoréférencé tous les 250 m ;
- > Type de données : occupation et utilisation du sol ;
- > Période d'observation : résultats en moyenne triennale (ex. 2019-2020-2021) ;
- > Méthodes de collecte : terrain, photo-interprétation, bases administratives.

Accès aux données :

Diffusées par Agreste :
<https://agreste.agriculture.gouv.fr>

High Resolution Layer Imperviousness

Gestion technique : Copernicus Land Monitoring Service - Union européenne.



Accès aux données :

<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-imperviousness/imperviousness-density-2018>

Contexte : Cartographie détaillée des surfaces imperméabilisées pour évaluer l'impact de l'urbanisation.

Producteur : Copernicus Land Monitoring Service, mis en œuvre par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA) et le Joint Research Centre (JRC) pour le compte de la Commission européenne.

Système de projection : ETRS89 / LAEA Europe (EPSG:3035).

Nomenclature de la donnée : Taux d'imperméabilisation (0–100 %).

Périodicité de mise à jour : Millésime tous les 3 ans. Le dernier millésime disponible est 2024 (publié en juin 2026) ; les millésimes antérieurs à 2018 (2006, 2009, 2012, 2015) sont livrés à une résolution de 20 m, contre 10 m depuis 2018.

Échelle métrique : Taille de pixel de 10 m (version agrégée à 100 m également disponible).

Périmètre : Échelle européenne.

Méthodologie : Classification semi-automatisée d'images satellitaires (Sentinel-2, Landsat, SPOT...) fondée sur des indices (NDVI calibré) et des méthodes de segmentation pour estimer le taux d'imperméabilisation au pixel près.

Atouts : Haute résolution (10 m), homogénéité pan-européenne, mise à jour régulière, accès libre et ouvert.

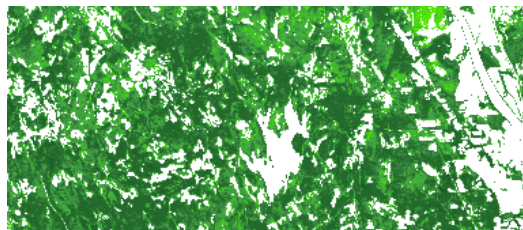
Limites : Couches de changement actualisées tous les 3 ans seulement. Sous-estimation possible des zones très imperméabilisées. Incertitudes liées à la qualité des images et à l'hétérogénéité des matériaux.

Fiche technique :

<https://land.copernicus.eu/en/technical-library/hrl-imperviousness-technical-document-prod-2015/%40%40download/file>

High Resolution Layer Tree Cover and Forests

Gestion technique : Copernicus Land Monitoring Service - Union européenne.



Contexte : Cartographie détaillée du couvert arboré.

Producteur : Copernicus Land Monitoring Service, mis en œuvre par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) et le Joint Research Centre (JRC) pour le compte de la Commission européenne.

Système de projection : ETRS89 / LAEA Europe (EPSG:3035).

Nomenclature de la donnée : Densité du couvert arboré (0-100 %).

Périodicité de mise à jour : Millésime produit tous les ans ; le dernier millésime disponible est 2021. Comme les autres couches HRL, cette couche couvre les pays de l'Espace économique européen et le Royaume-Uni, hors départements et régions d'outre-mer français.

Échelle métrique : Taille de pixel de 10 m (version agrégée à 100 m également disponible).

Périmètre : Échelle européenne.

Méthodologie : La densité de couvert arboré est estimée chaque année par un modèle statistique entraîné sur des images satellite Sentinel-2 et sur le type de feuillage dominant (DLT, feuillus ou conifères). Un ajustement d'histogramme et un lissage temporel limitent ensuite les variations abruptes d'une année sur l'autre.

Atouts : Haute résolution (10 m), homogénéité pan-européenne, mise à jour régulière, accès libre et ouvert.

Limites : Disponibilité restreinte des données optiques en cas de couverture nuageuse élevée.

Fiche technique :

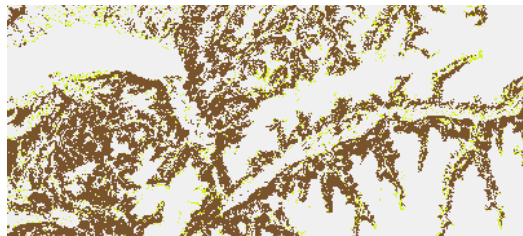
<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover/tree-cover-density-2021-raster-10-m-100-m-europe-yearly>

Accès aux données :

<https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/api/records/e677441e-fb94-431c-b4f9-304f10e4dfd8?language=all>

High Resolution Layer Small Woody Features

Gestion technique : Copernicus Land Monitoring Service - Union européenne.



Fiche technique :

<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-small-woody-features>

Accès aux données :

<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-small-landscape-features/small-woody-features>

Contexte : Cartographie pan-européenne des éléments ligneux linéaires (haies, ripisylves) et surfaciques (bosquets, îlots) souvent négligés en agriculture, pour soutenir la biodiversité, la séquestration de carbone et la gestion durable des paysages.

Producteur : Copernicus Land Monitoring Service, mis en œuvre par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA) et le Joint Research Centre (JRC) pour le compte de la Commission européenne.

Système de projection : ETRS89 / LAEA Europe (EPSG:3035).

Nomenclature de la donnée : Présence ou non de structures linéaires : largeur ≤ 30 m et longueur ≥ 30 m. Les structures surfaciques (bosquets, îlots boisés) sont retenues entre 200 m² et 5 000 m² ; le raster indique, pixel par pixel, la présence ou l'absence de l'un de ces éléments linéaires ou surfaciques.

Périodicité de mise à jour : Millésime produit tous les 3 ans.

Échelle métrique : Taille de pixel de 5 m.

Périmètre : Échelle européenne.

Méthodologie : Analyse géospatiale par GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis) via la chaîne Broceliande : exploitation d'images VHR optiques (Pléiades 1A/1B, SuperView-1, KOMPSAT-3/3A, PlanetScope), segmentation d'objets, classification fondée sur des critères spectraux, texturaux et géométriques.

Atouts : Très haute résolution (5 m) et double format (vectoriel + raster), homogénéité pan-européenne, mise à jour régulière, accès libre et ouvert.

Limites : Risques d'omission et de confusion entre structures boisées et non boisées proches des seuils de détection, dépendance à la date et à la qualité des images d'entrée (couverture nuageuse), et comparabilité limitée entre millésimes du fait des évolutions méthodologiques.

ANNEXE 6. CORRESPONDANCE ENTRE LES PARAMÈTRES DE L'APPROCHE 1 ET LES VARIABLES DE LA BASE DONESOL

Cette annexe s'adresse à la personne chargée d'extraire les données du Référentiel Régional Pédologique. Pour chaque sous-fonction évaluée à partir des propriétés du sol, une figure relie le terme employé dans le guide à la table et au champ correspondants de la base DoneSol ; un tableau récapitule ensuite les règles d'extraction. Ces règles sont celles des fiches techniques CartoMUSE (Andrianjara *et al.*, 2025), auxquelles on se reportera pour le détail des traitements. Les sous-fonctions « stock de carbone » et « support des organismes du sol » ne mobilisent pas DoneSol : elles reposent sur l'occupation du sol (outil ALDO ; valeurs moyennes par occupation du sol).

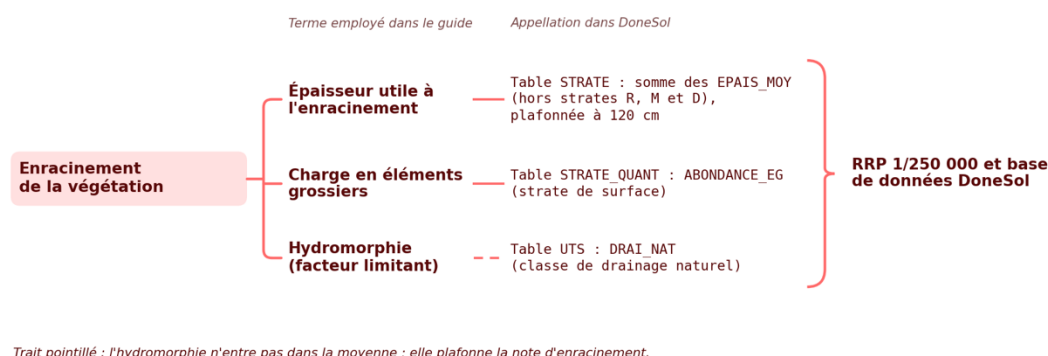


Figure 64. Sous-fonction « enracinement de la végétation » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol. L'hydromorphie n'entre pas dans la moyenne : elle plafonne la note.

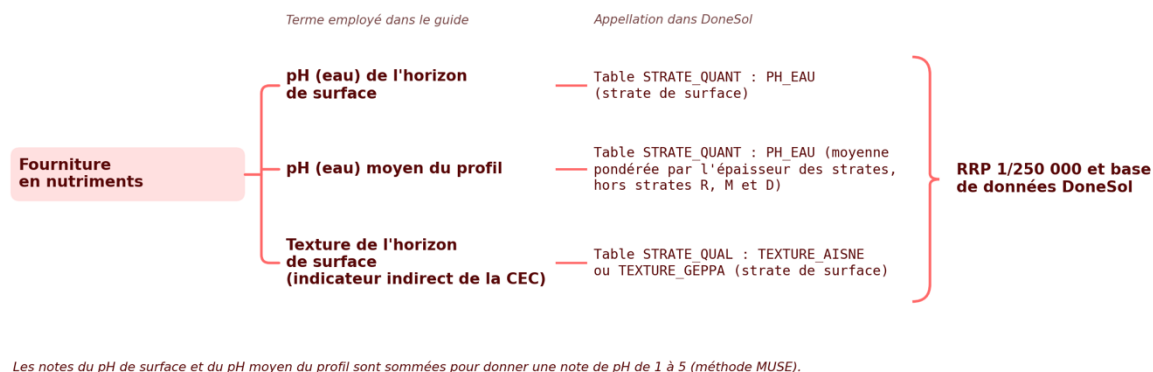
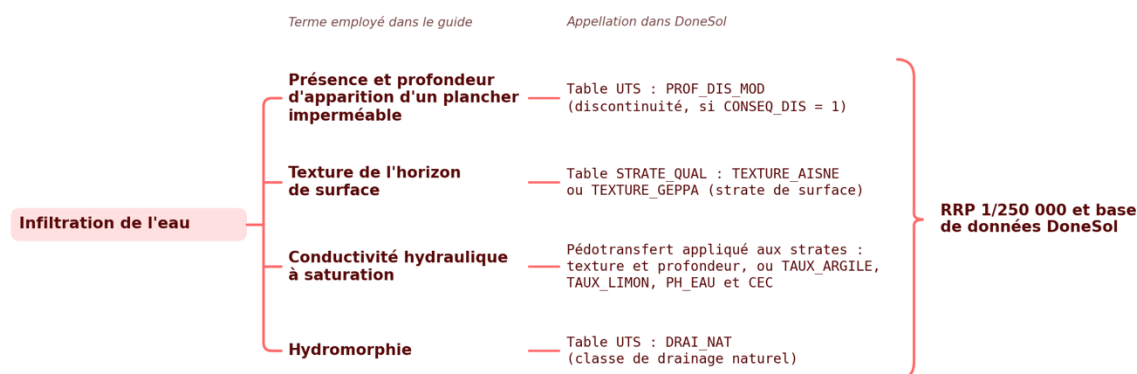
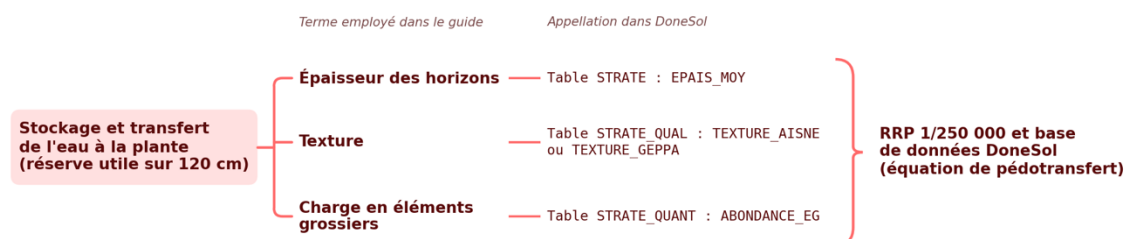


Figure 65. Sous-fonction « fourniture en nutriments » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol.



Un indicateur très défavorable est déclassant, comme dans la méthode MUSE : plancher imperméable à moins de 25 cm, texture de surface argileuse, hydromorphie apparaissant avant 25 cm, conductivité hydraulique à saturation inférieure à 10⁻⁷ m/s, HISTOSOL ou RÉDUCTISOL. Le sol est alors placé dans la classe d'infiltration très faible, quelle que soit la note des autres indicateurs.

Figure 66. Sous-fonction « infiltration de l'eau » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol. Un paramètre très défavorable est déclassant.



Ces trois indicateurs alimentent le calcul de la réserve utile par fonction de pédotransfert : c'est la réserve utile qui reçoit la note.

Figure 67. Sous-fonction « stockage et transfert de l'eau à la plante » : terme employé dans le guide, puis table et champ correspondants dans DoneSol.

Tableau 14. Tables et champs de la base DoneSol mobilisés par l'approche 1, et règles d'extraction (d'après les fiches techniques CartoMUSE, 2025).

Paramètre	Table et champ DoneSol	Règle d'extraction
Rattachement des UTS aux UCS	Table UCS : NO_UCS, ID_UCS ; table L_UCS_UTS : ID_UTS, POURCENT	POURCENT donne la part de chaque UTS dans l'UCS ; il sert à l'agrégation des notes des UTS à l'UCS.
Épaisseur utile à l'enracinement	Table STRATE : EPAIS_MOY (à défaut, moyenne de EPAIS_MIN et EPAIS_MAX) ; nom de la strate (RP_95_NOM, RP_2008_NOM)	Somme des épaisseurs des strates, hors strates du matériau parental (R, M et D) plafonnée à 120 cm.
Charge en éléments grossiers	Table STRATE_QUANT : NOM_VAR = ABONDANCE_EG (VAL_MOD ; à défaut, moyenne de VAL_MIN et VAL_MAX)	Valeur de la strate 1, hors strates H, R, M et D.
pH (eau)	Table STRATE_QUANT : NOM_VAR = PH_EAU (VAL_MOD ; à défaut, moyenne de VAL_MIN et VAL_MAX)	pH de surface : strate 1, ou strate 2 si la strate 1 est une strate organique (O). pH moyen : moyenne des strates pondérées par leur épaisseur, hors strates R, M et D.

Paramètre	Table et champ DoneSol	Règle d'extraction
Texture de l'horizon de surface	Table STRATE_QUAL : TEXTURE_AISNE, à défaut TEXTURE_GEPPA (MODE_PRIN) ; à défaut, table STRATE_QUANT : TAUX_ARGILE, TAUX_LIMON, TAUX_SABLE	Classe de texture principale de la strate de surface. Sans classe renseignée, les taux granulométriques sont projetés dans le triangle de texture.
Hydromorphie	Table UTS : DRAI_NAT	Classe de drainage naturel de l'UTS : code < 4, sol sain ; code = 4, hydromorphie entre 25 et 80 cm ; code > 4, hydromorphie avant 25 cm.
Plancher imperméable	Table UTS : CONSEQ_DIS, PROF_DIS_MOD (à défaut, moyenne de PROF_DIS_MIN et PROF_DIS_MAX)	La discontinuité n'est retenue que si CONSEQ_DIS = 1 (obstacle important à la pénétration de l'eau) ; sinon, le plancher est considéré comme absent.
Conductivité hydraulique à saturation	Table STRATE_QUAL : TEXTURE_AISNE ou TEXTURE_GEPPA, et table STRATE : EPAIS_MOY ; à défaut, table STRATE_QUANT : TAUX_ARGILE, TAUX_LIMON, PH_EAU et CEC	Fonction de pédotransfert européenne (Szabó et al., 2021, package R euptf2), horizon de surface (0–30 cm) et horizons profonds ; moyenne harmonique des strates pondérée par leur épaisseur.
Réserve utile	Classe de texture du triangle de l'Aisne, épaisseur et éléments grossiers des strates	Classes de pédotransfert de Bruand et al. (2004) : réserve utile par centimètre selon la texture, multipliée par l'épaisseur de la strate et par la part de terre fine (100 – % d'éléments grossiers), puis somme des strates. Attention le coefficient diffère selon le type d'horizon : un jeu pour l'horizon A, un autre pour les horizons E, B et C.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - , nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, du ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES

Le sol dans les stratégies territoriales : de la planification au projet d'aménagement

Le principal objectif de ce guide est de fournir aux collectivités un cadre méthodologique pour orienter les stratégies territoriales qui soit directement mobilisable, qui relie connaissance scientifique des sols, représentation cartographique et arbitrages d'aménagement, au service de la sobriété foncière et de la résilience des territoires. Les suites opérationnelles consistent à intégrer le diagnostic des sols dès l'amont des projets, à croiser les données pédologiques avec les enjeux eau-biodiversité-climat, à renforcer la montée en compétence des acteurs et à ancrer ces pratiques dans un cadre réglementaire.

Ce guide constitue une première étape vers la prise en compte des sols dans la planification territoriale et le projet d'aménagement. Il est appelé à évoluer, enrichi par les retours d'expérience et le développement de nouvelles méthodes de mesure (intégration de nouveaux indicateurs, nouvelles technologies etc.).

Essentiel à retenir

Le guide présente une méthode harmonisée, appelée « méthode 4 fonctions », adaptable aux enjeux environnementaux des territoires et aux données disponibles.

Son objectif est de relier les connaissances scientifiques, la cartographie des sols et les décisions d'aménagement pour favoriser la sobriété foncière et la résilience.