



INRAE



Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

Résumé du rapport scientifique de l'étude coordonnée par INRAE
Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE)
Novembre 2024

Les sols jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes continentaux sur lesquels repose l'essentiel des activités humaines. Ces dernières génèrent des tensions entre les différentes utilisations des sols (fourniture d'aliments, de matériaux, d'énergie sous différentes formes, d'espaces récréatifs, de paysages, de sites pour le logement, les infrastructures, l'industrie, le stockage de déchets ...). In fine, elles modifient le fonctionnement des sols et peuvent l'altérer lorsqu'elles sont inadaptées, au point qu'aujourd'hui **l'Union européenne (UE) estime que 60 % des sols de son territoire sont dégradés**¹.

Les sols contribuent fortement aux grands cycles régulant notamment l'eau, et les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. Ils participent également au maintien des écosystèmes, les sols abriteraient de l'ordre de 60 % des espèces de la biosphère². **Préserver la biodiversité et un climat viable pour les sociétés humaines et pour la biodiversité passe ainsi nécessairement par la préservation et la restauration d'un bon état écologique des sols.**

La prise de conscience progressive de l'importance des sols pour les écosystèmes s'est traduite par une multiplication des initiatives politiques. Au niveau international, ces initiatives restent souvent limitées à des approches volontaires ou à des reconnaissances symboliques comme **l'année internationale des sols en 2015**. Dans l'UE, **la proposition de directive sur les sols (directive du Parlement européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols)** publiée en 2023 réactive la mise en place d'un cadre européen pour la surveillance des sols. En France, l'adoption en 2021 de **la loi n° 1104 dite « Climat et résilience »** fixant un objectif de limitation de l'artificialisation des sols, a notamment permis d'ouvrir les discussions sur l'intégration dans le domaine de l'aménagement de la notion de fonctions des sols.

La régulation des tensions sur l'utilisation des sols appelle une coordination à un niveau global et des arbitrages à une échelle plus locale, sur la base d'informations étayées. Afin de faciliter la gouvernance de la préservation et de la restauration des sols, la présente étude a pour objectif de **rassembler et de mettre à disposition des décideurs et acteurs de terrain les ressources scientifiques disponibles** traitant des modalités d'évaluation de la qualité et de la santé des sols. Elle précise les principaux indicateurs éprouvés mobilisables ainsi que les méthodes permettant de les évaluer. Elle apporte en outre un éclairage sur ce qui constitue plus globalement le système dans lequel s'insère la mobilisation des indicateurs, et sur l'importance des choix à raisonner aux différentes étapes de l'évaluation. Des questions telles que la distinction entre qualité et santé, la situation de référence, la sélection des indicateurs et leur éventuelle agrégation ou encore leur spatialisation, sont passées en revue.

Périmètre abordé dans l'étude

Des guides et recommandations pour évaluer la qualité et la santé des sols existent pour chaque type d'usage (agricole, forestier, naturel, urbain). Mais cette évaluation est plus rarement abordée de **manière transversale à l'ensemble des usages**, approche qui est privilégiée dans la présente étude pour pouvoir traiter des effets des changements d'usages et du suivi territorial global.

Pour ce faire, les **fonctions écologiques** des sols ont été choisies comme focale de l'étude. Cette approche constitue un équivalent positif, plus mobilisateur pour les acteurs, à celle proposée au niveau européen sur la base des menaces de dégradations qui pèsent sur les sols¹.

La présente étude n'aborde pas la question des sites et sols pollués en tant que telle, cette dernière faisant l'objet en France d'une méthodologie spécifique, avec une gestion de la pollution au cas par cas qui repose sur l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux en fonction de l'usage, et non sur les fonctions écologiques.

De même, elle ne traite pas de la question générale des impacts sur les sols des pratiques agricoles, forestières ou urbaines, ni des pratiques de gestion des sols, l'étude étant centrée sur la question des indicateurs et de leurs modalités d'utilisation. Les pratiques de gestion ne sont abordées que dans la mesure où elles interviennent dans le raisonnement de la démarche d'évaluation. Produire une synthèse sur ces pratiques et leurs impacts n'était pas l'objet de la présente étude.

L'étude a été mise en œuvre par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), et cofinancée par l'Agence de la transition écologique (ADEME), l'Office français de la biodiversité (OFB), et les ministères en charge de l'Environnement et de l'Agriculture.

Principes méthodologiques

Suivant les principes formalisés pour les travaux de la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE, une étude DEPE consiste à établir l'état actualisé des connaissances scientifiques et à réaliser son analyse critique. Elle est fondée sur les références bibliographiques disponibles à l'échelle internationale, et met en évidence les principaux enseignements qui peuvent en être tirés en termes d'acquis, de débats et controverses, d'incertitudes et de lacunes de connaissances. Sur cette base, des propositions sont esquissées et leur pertinence est testée à partir du traitement de données existantes. L'étude n'a pas pour objet de formuler des recommandations en termes de politiques publiques.

La conduite de l'étude s'appuie sur une charte de l'expertise scientifique dont les principes généraux sont la compétence, l'impartialité, la pluralité et la transparence.

Le collectif d'experts rassemblé pour cette étude compte 19 scientifiques, chercheurs et enseignants-chercheurs (dont 74 % extérieurs à INRAE), issus de 10 organismes de recherche et établissements d'enseignement supérieur.

1 EUSO (European union soil observatory) - <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>

2 Anthony M.A., Bender S.F., van der Heijden M.G.A., 2023. Enumerating soil biodiversity. Colorado state university, 120 (33).

1. Adopter un langage commun

1.1. Diversité des perceptions de la qualité/santé des sols

Chaque catégorie d'acteurs perçoit la qualité ou la santé des sols au travers de préoccupations liées à son activité. Suivant les cas, le sol est considéré comme une surface support à répartir entre activités humaines (agriculture, industrie, logement, loisirs...), ou au regard de ses potentialités pour la production de ressources alimentaires, la régulation de la ressource en eau, le stockage de carbone, également en termes de gestion de risques (stabilité du terrain, inondations), ou encore à des fins de conservation, pour sa valeur patrimoniale.

Au sein d'une même catégorie d'acteurs, des spécificités peuvent être relevées. Ainsi, par exemple, les viticulteurs considèrent les caractéristiques du sol non seulement pour leur lien au potentiel productif, mais aussi pour la singularité qu'elles présentent en tant que composante du terroir marquant une identité de produit final. Des différences de perception sont aussi observées entre agriculteurs selon le modèle de production dans lequel ils sont engagés (par ex. : agriculture biologique, agriculture de conservation des sols, agriculture conventionnelle). De nombreux travaux qui cherchent à identifier les déterminants de ces différences de perceptions mettent en évidence le lien avec les caractéristiques matérielles des exploitations (taille, âge de l'exploitant, orientation technico-économique). Les travaux les plus récents soulignent le caractère primordial des systèmes de normes sociales et des réseaux de relations des agriculteurs.

À ces différences de perceptions correspondent des manières différentes de mobiliser et d'interpréter les informations disponibles sur les sols, dont les indicateurs et leurs valeurs de référence. Les indicateurs ne sont en effet pas simplement transférés du domaine scientifique vers les applications de terrain. Ils suivent une **trajectoire sociale** illustrée par la Figure 1, faite de **processus d'appropriation, de transformation et/ou de co-conception**. Les indicateurs constituent ainsi l'objet de nombreuses interactions entre acteurs, de la mise en place d'actions communes, du développement de modes de connaissance partagés, et de la mise en commun de supports de représentations.

1.2. Distinctions entre la qualité et la santé des sols

Un langage commun est ainsi à élaborer entre acteurs sur la qualité et la santé des sols. Dans la littérature scientifique, le débat sur les différences entre ces deux concepts reste d'actualité. Il s'enracine dans la très forte proximité de ces termes dans les définitions publiées à la fin des années 1990 et au début des années 2000, dans lesquelles le concept de santé n'est différencié que par une attention plus explicitement portée à la **dimension biologique du fonctionnement des sols**.

Un autre enjeu qui sous-tend la distinction entre qualité et santé, consiste à différencier la simple description des caractéristiques du sol, du **jugement porté sur son état** tel qu'il résulte des usages et des pratiques dont il fait l'objet.

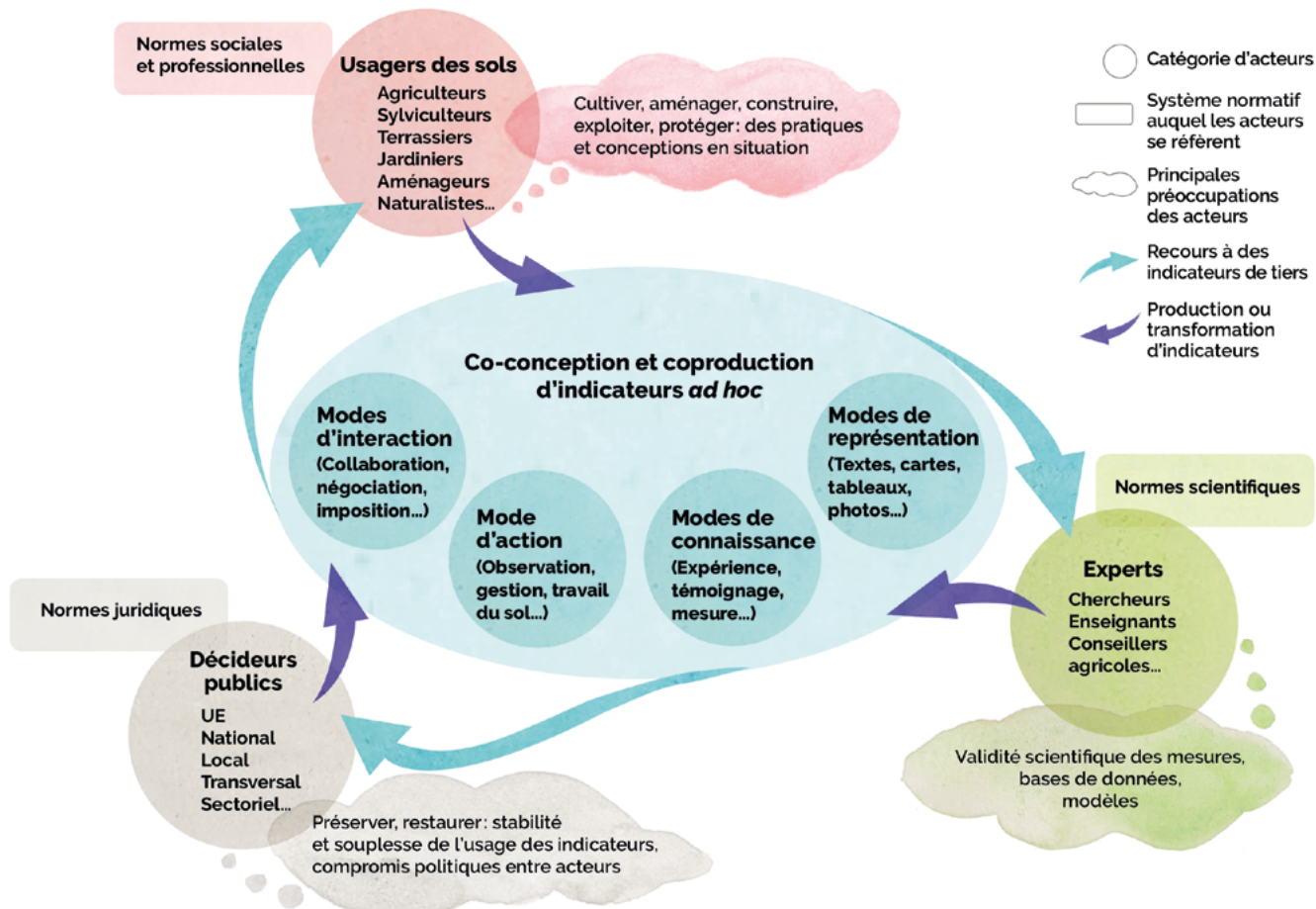


Figure 1. Production et usage des indicateurs de qualité ou de santé des sols

Dans une telle optique, la **qualité d'un sol** donné correspond à la description de **ce qu'il est ou de ce qu'il fait**. Les pédologues ont par exemple développé des systèmes de classement des types de sols, dont le plus utilisé en France est le Référentiel pédologique (<https://www.afes.fr/les-sols>). De telles descriptions peuvent être fondées sur les caractéristiques pérennes du sol, c'est-à-dire stables à l'échelle de quelques décennies en l'absence d'intervention humaine (par ex. la texture lorsque l'on parle de sol sableux ou argileux), ou des caractéristiques relatives aux fonctions (par ex. lorsque l'on parle de sol hydromorphe en référence aux propriétés hydro-dynamiques et aux fonctions hydrologiques). La **santé d'un sol** donné renvoie quant à elle à un jugement sur **ce que le sol vaut ou ce qu'il devrait être**. La bonne ou mauvaise santé du sol correspond alors au **degré de réalisation de son potentiel**. En pratique, ce potentiel est généralement considéré comme étant le niveau de performance moyen observé soit dans l'ensemble des sols comparables, soit sur un territoire d'étude (cf. Section 2.2). Suivant cette acception illustrée par la Figure 3, le sol B présente une meilleure santé que le sol A.

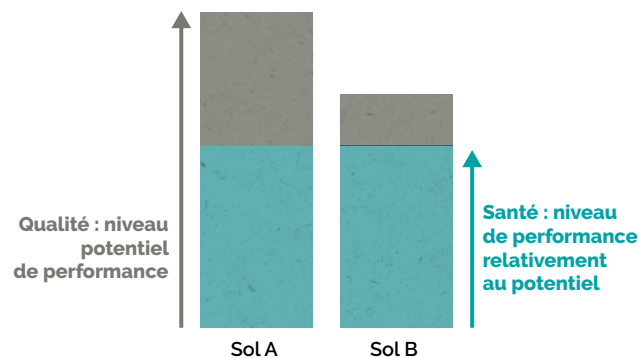


Figure 3. Distinction entre qualité du sol comme potentiel, et santé comme degré de réalisation de ce potentiel

1.3. Fonctions écologiques et dégradations des sols

■ Différentes dimensions de la santé des sols

Pour évaluer la santé d'un sol donné, la comparaison de la performance constatée à un potentiel (c'est-à-dire sa qualité) peut porter sur différentes dimensions. Les fonctions et les dégradations des sols peuvent être considérées comme deux approches relativement symétriques de la santé du sol.

Les dégradations sont jusqu'à présent l'objet du suivi assuré au niveau de l'observatoire européen des sols¹. L'évaluation de la santé des sols y est fondée sur huit principales menaces : l'artificialisation d'une part, et pour les sols non artificialisés, la perte de biodiversité, la perte de carbone organique, la pollution, l'excès de nutriments, le tassement, la salinisation et l'érosion. Le sol est considéré comme dégradé dès lors que l'une de ces menaces atteint un niveau considéré comme critique. Cette approche rencontre des résistances en partie liées au découragement qu'elle peut produire chez les acteurs. En effet, elle est

construite de telle sorte que le risque d'un diagnostic négatif augmente avec la progression de la connaissance sur les dégradations des sols, ce qui peut dissuader l'amélioration de la surveillance et du suivi. **Dans la présente étude, le choix a donc été fait de privilégier une approche de la santé des sols qui soit mobilisatrice, fondée sur les fonctions écologiques réalisées.**

■ Les fonctions écologiques des sols

La définition et l'énumération des fonctions des sols ne sont pas stabilisées dans la littérature scientifique. Il est toutefois largement consensuel de considérer une fonction comme un **assemblage de processus bio-physico-chimiques assurant une action intégrée qui permet au sol de fonctionner**. Les relations entre les propriétés du sol, les processus qu'elles permettent, les fonctions qui résultent de l'assemblage de processus, et les services écosystémiques qui en découlent au bénéfice des sociétés humaines, sont classiquement représentées sous la forme d'une cascade. La Figure 4 en donne une version adaptée au contenu de la présente étude.

Les contours des fonctions peuvent varier suivant les sources, ce qui conduit à une grande diversité de propositions de listes de fonctions. Une analyse textuelle du corpus scientifique traitant des fonctions des sols, a mis en évidence que les termes les plus fréquemment utilisés désignent soit des objets (par ex. l'eau, les nutriments), soit des actions

Sources analysées

Un corpus bibliographique de **1 800 références** est cité dans le rapport, constitué à partir de plateformes bibliographiques internationales telles que le Web of Science™ (WoS), complétées au besoin par la littérature francophone ainsi que des rapports et ouvrages non référencés dans ces outils. Les connaissances ciblées sont applicables aux contextes pédo-climatiques de la France hexagonale métropolitaine.

Les articles sont sélectionnés en privilégiant les synthèses déjà existantes lorsqu'elles sont pertinentes au regard de la question étudiée. Le corpus cité présente une large pluridisciplinarité montrée par la Figure 2 réalisée à partir des 1 280 sources référencées dans le WoS. Elle montre les 15 premières catégories.

WoS auxquelles sont rattachées les revues de publication des articles cités. À noter que les 500 références qui ne sont pas intégrées dans cette analyse des domaines de recherche relèvent essentiellement de la littérature grise et des articles de sciences humaines et sociales.

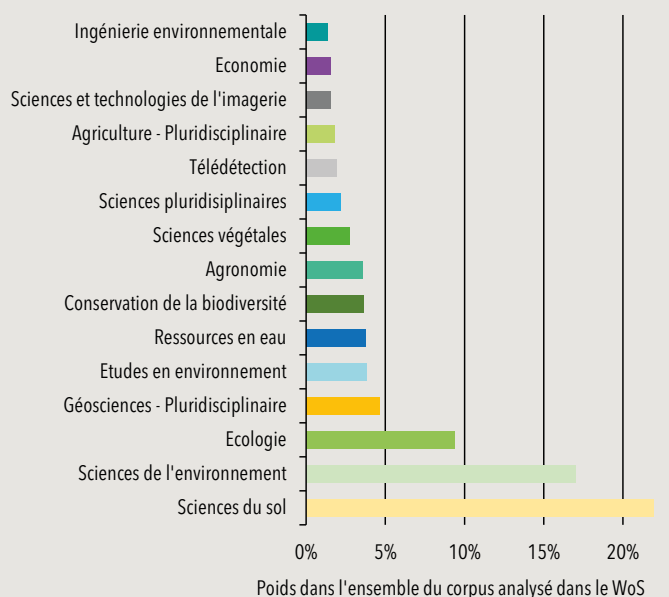


Figure 2. Domaines de recherche des 1 280 références classées dans les catégories WoS (15 premières catégories)

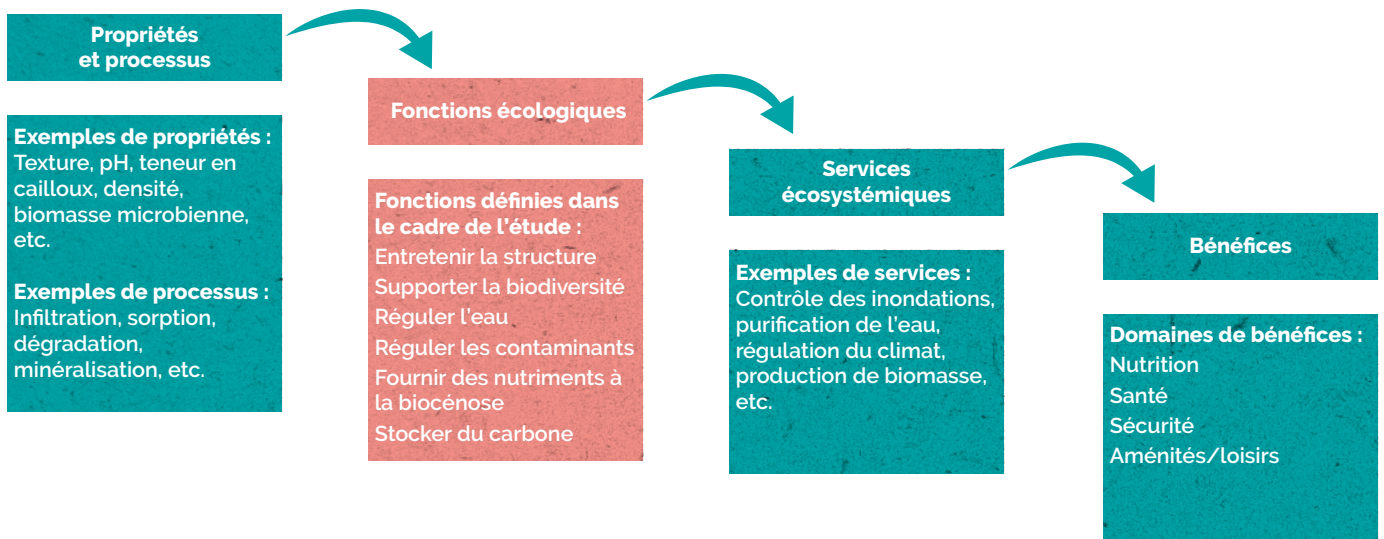


Figure 4. Cascade des services écosystémiques (adaptée à partir de (Greiner et al., 2017³))

(par ex. retenir, transférer). À partir de cette analyse, il a été convenu de **définir chaque fonction comme une action sur un objet** (pouvant être le sol lui-même), et la dénomination des six fonctions représentées par la Figure 5 a été composée à partir des termes les plus fréquemment retrouvés. Certaines fonctions sont ainsi décomposées en sous-fonctions correspondant à différentes étapes des cycles auxquelles elles participent.

La délimitation des fonctions est un outil conceptuel pour faciliter l'analyse. Toutefois, la multiplicité des processus ayant lieu dans le sol et l'emboîtement des échelles auxquelles ils sont réalisés, font que tout contour établi pour chaque fonction reste toujours discutable. L'enjeu de la nomenclature proposée est de couvrir l'ensemble du fonctionnement du sol, tout en respectant la terminologie employée dans la littérature.

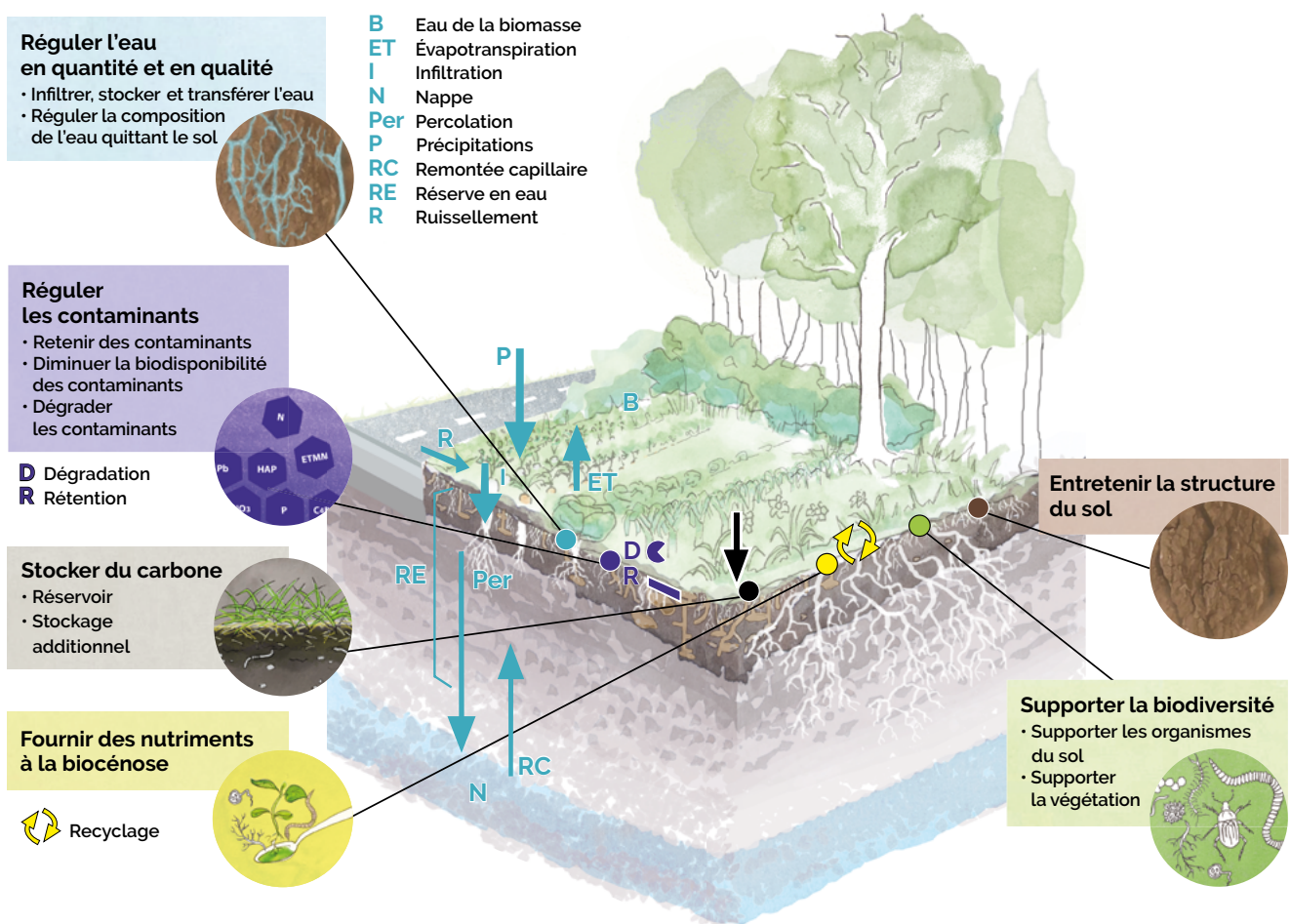


Figure 5. Périmètre des 6 fonctions des sols retenues pour cette étude

3 Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A., Papritz A. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. Land Use Policy 69 : 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>

1.4. Indicateur, référentiel et système d'indication

Un indicateur peut être défini comme servant à l'obtention et à la transmission d'une information sur un objet ou phénomène d'intérêt, appelé *indicandum*. Il se différencie de la simple mesure d'un paramètre par le sens qui lui est donné au regard de cet objet d'intérêt. **L'indicateur est donc considéré ici comme étant nécessairement « indicateur de quelque chose », et non pas comme une simple grandeur mesurée ou calculée.**

Ce qui donne du sens à l'indicateur est son référentiel d'interprétation, c'est-à-dire les critères suivant lesquels il sera possible de dire qu'une

valeur donnée de l'indicateur est faible ou élevée, bonne ou mauvaise. **Le référentiel est ainsi constitué de l'indicateur, de sa méthode de mesure, et des valeurs de référence permettant son interprétation** (cf. Section 2.2).

Au-delà de l'interprétation de chaque indicateur, une stratégie adéquate doit être établie en fonction de la finalité de l'évaluation, en ce qui concerne notamment la complémentarité entre les indicateurs utilisés, leur éventuelle pondération, l'échantillonnage des mesures, le traitement statistique et/ou cartographique des résultats (cf. Section 2.3). L'articulation de l'ensemble de ces éléments constitue le **système d'indication**.

2. Évaluer la qualité/santé des sols : indicateurs et démarche

2.1. Principaux indicateurs génériques

La présente étude a permis de sélectionner **une cinquantaine d'indicateurs** considérés comme pertinents pour suivre la qualité/santé des sols au vu de leur fréquence d'occurrence dans le corpus scientifique sur ce sujet. Ont notamment été retenus ceux qui apparaissent comme étant les plus mobilisés dans l'analyse des fonctions écologiques des sols. Ces indicateurs couvrent les composantes physiques, chimiques et biologiques des sols. Pour chacun d'entre eux, les principales méthodes de mesure et valeurs de référence ont été rassemblées dans le rapport de l'étude. Le Tableau 1 présente cette sélection en positionnant chaque indicateur au regard des fonctions écologiques et des menaces présentées en Section 1.3. Il précise également le cadre de l'évaluation de l'indicateur (sur un horizon de sol, ou un profil de sol, ou plus largement sur un bassin versant) et son utilisation identifiée dans la littérature économique.

Les indicateurs sont mis en relation avec les fonctions (à droite de ce tableau) et les dégradations (à gauche) suivant trois degrés : indicateur de la fonction ou dégradation, indicateur optionnel, et/ou déterminant (il s'agit alors d'une information nécessaire à la mesure ou à l'interprétation d'un indicateur). Par exemple, la fonction « entretenir la structure du sol » a pour indicateurs principaux la masse volumique et la stabilité structurale, tandis que la granulométrie et la teneur en carbone organique en sont des déterminants.

Cette mise en regard permet de montrer qu'un même indicateur peut avoir du sens pour une fonction et pour une menace. Par exemple, la teneur en azote total est un indicateur de l'excès de nutriments du côté des menaces, et de la fourniture de nutriments à la biocénose du côté des fonctions. Ce tableau montre également que des niveaux de précision différents peuvent être choisis. Par exemple, les fractions du carbone, qui ont du sens pour évaluer le degré de stabilité du carbone stocké dans le sol, sont retenues comme indicateurs optionnels de la fonction « stocker du carbone », mais n'apparaissent pas dans la proposition de directive. Enfin, des stratégies différentes ont pu être choisies pour obtenir des informations parfois équivalentes. Par exemple, l'analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) prévue dans la proposition de directive permet d'obtenir de manière équivalente le ratio champignons/bactéries qui apparaît du côté des fonctions. Mais la proposition de directive ne mentionne pas la description détaillée de la diversité des champignons, qui est nécessaire à l'évaluation de la fonction « supporter les organismes du sol ».

2.2. Référentiel d'interprétation

La valeur mesurée ou calculée d'un indicateur n'a de sens qu'au regard du référentiel d'interprétation qui précise la **méthode de mesure ou de calcul utilisée, et les valeurs de référence auxquelles le résultat doit être comparé**. Ces valeurs sont, d'une part, des valeurs d'existence, c'est-à-dire les valeurs de l'indicateur pour l'ensemble des sols comparables ou des sols d'un territoire donné, et, d'autre part, des valeurs seuils et cibles, c'est-à-dire des valeurs critiques qui vont permettre de porter un jugement sur la plus ou moins bonne santé du sol.

■ Valeurs d'existence

Identifier les valeurs d'existence nécessite de préciser la finalité de l'évaluation. Par exemple, si un sol donné est évalué au regard des pratiques de gestion mises en œuvre (par ex. le labour de terres arables, ou l'enherbement de l'inter-rang de vergers), les valeurs d'existence sont celles de l'ensemble des sols de même type pédoclimatique et de même type d'usage (grandes cultures ou verger). Si le sol est évalué au regard des usages possibles, les valeurs d'existence sont celles de l'ensemble des sols du même type pédoclimatique quel que soit l'usage, auxquelles on compare le niveau de l'indicateur estimé pour chacun des usages. Différents systèmes typologiques sont disponibles pour classer les types de sols, de climats, d'usages et de pratiques de gestion, avec des niveaux de détail variables. Néanmoins en pratique, la façon dont les données disponibles ont été recueillies et stockées détermine fortement les typologies utilisées.

■ Valeurs seuils et cibles

Les valeurs seuils et cibles permettent quant à elles de **juger du plus ou moins bon état de santé d'un sol**. Elles correspondent à la valeur de l'indicateur définissant ce qui est considéré comme un sol dégradé (valeur seuil), ou à positionner un sol par rapport à un objectif visé (valeur cible). Ces seuils et cibles peuvent être déclinés en un gradient de classes de plus ou moins bonne santé.

Différentes stratégies sont possibles pour déterminer ces valeurs :

- Partir d'un objectif politique (par ex. limiter les risques pour la population d'exposition à des polluants), comme cela peut être le cas lorsque des seuils sont inscrits dans des cadres réglementaires ;
- Partir d'un objectif de gestion (par ex. un objectif productif pour un exploitant agricole ou forestier) ;
- Viser l'état d'un sol de même type non perturbé (ou « naturel »), même si dans les faits une telle situation reste souvent fictive notamment dans

Tableau 1. Indicateurs sélectionnés pour évaluer les fonctions des sols identifiées dans cette étude, et indicateurs mentionnés dans la proposition de directive sur la surveillance et la résilience des sols (Soil Monitoring and Resilience Law - SMLR)

Menaces mentionnées dans la SMLR**

Fonctions définies dans cette étude

Perte de biodiversité	Perte de carbone organique	Contamination des sols	Excès de nutriments dans le sol	Acidification des sols	Réduction de la capacité à retenir l'eau	Tassement des horizons profonds	Tassement de l'horizon de surface	Salinisation	Erosion	Indicateurs				Supporter les organismes du sol	Supporter la végétation	Stocker du carbone	Réguler les contaminants	Fournir des nutriments à la biocénose	Réguler quantitativement l'eau	Réguler qualitativement l'eau	Entretien la structure du sol
										Indicateur commun aux 2 démarches	Cadre d'évaluation de l'indicateur	Méthode normalisée d'évaluation	Niveau d'opérationnalité								
										Profondeur	↕		●	x							
										Taux d'érosion	↕										
										Granulométrie – Texture		x	●	x							
					s					Masse volumique apparente		x	●								
										Teneur en éléments grossiers			●								
										Stabilité structurale			●								
										Conductivité électrique		x	●								
					s					Conductivité hydraulique à saturation			●	x							
					s					Air capacity											
										Réservoir en Eau Utilisable (RU) Maximum	↕		●	x							
										Water Holding Capacity (WHC)	↕										
										pH (eau)		x	●	x							
										Capacité d'échange cationique (CEC)			●	x							
										Teneur en N total		x	●	x							
										Teneur en P disponible		x	●	x							
										Teneur en K disponible		x	●								
										Teneurs totales en ETMM*			●								
										Teneurs partielles (extractibles) en ETMM			●								
										Teneurs en polluants organiques (HAP*)		x	●								
										Teneurs en polluants organiques (PCB*, dioxines/furanes)		x	●								
										Teneurs en polluants organiques (pesticides et métabolites)		x	●								
										Teneur en carbone organique		x	●								
										Rapport Corg/Arg			●								
										Stock de carbone (sur 30 cm)			●	x							
										Stock de carbone (sur 1 m)	↕		●								
										Fractions du carbone			●								
										Fraction de carbone oxydable			●								
										Rapport C/N			●								
										Type et composition (dont C/N) de l'humus forestier			●								
*										Biomasse moléculaire microbienne		x	●								
*										Biomasse microbienne		x	●		*						
*										Respiration basale du sol		x	●		*						
										Potentiel de minéralisation de N et C			●		*						
*										Acides gras phospholipidiques (PLFA)					*						
*										Diversité des bactéries du sol			●		*						
										Diversité des champignons du sol			●		*						
										Ratio champignons/bactéries			●		*						
										Abondance des enchytréides			●		*						
*										Abondance des lombriciens			●	x	*						
*										Diversité/groupes écologiques/fonctionnels des lombriciens			●		*						
*										Abondance des nématodes			●		*						
*										Diversité des nématodes			●		*						
*										Abondance des microarthropodes			●		*						
*										Diversité/groupes fonctionnels des microarthropodes			●		*						
*										Activités enzymatiques		x	●		*						
*										Abondance des fourmis					*						
*										Diversité des fourmis					*						

** Version en discussion au 24 mai 2024 - document 2023/0232 (COD) - 10236/24

* ETMM : éléments traces métalliques et métalloïdes
HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
PCB : polychlorobiphényles

	indicateur pour une fonction (à droite) ou pour une menace (dans la SMRL, à gauche)
	indicateur optionnel pour une fonction ou une menace
s	existence d'un seuil fixé par la SMRL
*	un ou plusieurs indicateurs sont à choisir sur la colonne pour caractériser la fonction ou l'état de dégradation
	déterminant pour une fonction ou une menace
	indicateur non retenu (dans l'étude ou la SMRL)

Niveau d'opérationnalité de l'indicateur :
● indicateur mature
● indicateur en maturation
● indicateur en développement

↕ indicateur à évaluer sur l'ensemble du profil de sol
↔ indicateur à évaluer sur un bassin versant et/ou un territoire
sinon, l'indicateur est à évaluer sur un horizon de sol

les territoires européens, tant les activités humaines et les évolutions des écosystèmes se sont conjuguées à travers l'histoire. La situation non perturbée considérée comme référence est ainsi bien souvent une situation reconstituée par modélisation ;

- Repérer scientifiquement les seuils de changement d'état de « l'écosystème sol ». Dans une approche par les fonctions, il s'agit de repérer les points de basculement écologique autour desquels celles-ci se trouvent significativement dégradées ou améliorées. Ce domaine de recherche est encore très ouvert, en lien avec les travaux en écologie sur la dynamique des écosystèmes.

En pratique, la plupart des seuils mentionnés dans la littérature scientifique proviennent de la distribution des valeurs d'existence. Un sol est alors considéré comme en « bonne santé » lorsqu'il est dans l'intervalle normal des valeurs existantes pour l'ensemble des sols comparables.

2.3. Choix relevant de l'utilisateur de l'évaluation

Au-delà des indicateurs et de leur référentiel d'interprétation, le système d'indication intègre une série de choix qui relèvent en grande partie de l'utilisateur de l'évaluation, et qu'il est essentiel d'explicitier. La co-construction du système mis en œuvre est ainsi un élément clé de sa pertinence et de son opérationnalité (cf. Section 2.4). Parmi l'ensemble des éléments de ce système, les étapes les plus cruciales de cette implication sont ici soulignées.

■ Définition de la finalité de l'évaluation

Explicitier la finalité de l'évaluation consiste à identifier l'*indicandum*, c'est-à-dire ce que l'on veut représenter (par ex. une fonction, ou la santé du sol), et au regard de quoi on l'évalue (par ex. l'évolution dans le temps, ou la variation entre différents usages, ou entre différentes pratiques mises en œuvre). Cette étape est cruciale car elle **détermine en partie la sélection des indicateurs à mobiliser, et le choix du référentiel d'interprétation**. Par exemple, une évaluation de la santé du sol au regard des pratiques mises en œuvre conduit à sélectionner les indicateurs les plus sensibles aux pratiques considérées. Cette étape de définition de la finalité de l'évaluation comporte un caractère potentiellement conflictuel compte tenu des différences de perceptions entre acteurs. Elle est souvent éludée.

■ Maille spatiale et temporelle

Le choix d'une maille spatiale et temporelle de suivi et de la stratégie d'échantillonnage *ad hoc*, tout comme celui d'un format de restitution (par ex. : tableau de bord, carte, indice), doit résulter d'une discussion entre acteurs et experts, dans laquelle intervient la quantification des incertitudes associées aux méthodes de mesure.

Les mailles du suivi sont choisies en fonction de la **variabilité spatiale et temporelle de l'objet évalué**. Par exemple, des pratiques telles que la mise en pâture d'une parcelle ou le retour au sol des résidus de culture peuvent avoir un effet à court terme sur l'abondance et la composition des communautés microbiennes, à moyen terme sur la dégradabilité de la matière organique, et à plus long terme sur le stock de carbone stabilisé.

■ Agrégation et pondération

Qu'elle soit abordée sous l'angle des fonctions ou sous celui des menaces, la qualité/santé des sols est un objet qui comporte de multiples dimensions. La question se pose dès lors de l'agrégation des différents indicateurs en un seul résultat, directement lisible. Par exemple, en ce qui concerne les fonctions, des processus d'agrégation sont parfois mis en œuvre pour produire un indice de multifonctionnalité des sols à partir des valeurs d'indicateurs obtenues pour chaque fonction.

Cette démarche est controversée car **elle présente l'avantage d'une lisibilité très directe, mais l'inconvénient de masquer l'information fournie par l'évaluation de chacune des fonctions**, au risque de commettre des erreurs d'interprétation liées par exemple à des phénomènes de redondance ou de compensation entre fonctions. L'agrégation masque également la diversité des fonctions et sa dynamique d'évolution.

Enfin et surtout, la méthode appliquée doit être explicitée. Deux grands types de méthodes d'agrégation sont les plus couramment mis en œuvre :

- Le **critère déclassant** : dès lors qu'une seule des dimensions de la santé (par ex. une fonction parmi plusieurs) est située sous le seuil critique, alors le sol est considéré comme étant en mauvaise santé.
- La **pondération entre critères** : un coefficient est associé à chaque critère pour calculer une valeur globale de la qualité/santé du sol. C'est cette valeur qui est ensuite comparée au seuil critique pour conclure sur la bonne ou la mauvaise santé du sol. Une telle pondération relève d'une hiérarchisation entre fonctions qui doit être assumée par l'utilisateur de l'évaluation. En effet, si des systèmes d'agrégation sont bien proposés dans la littérature scientifique pour apporter une réponse pragmatique à la demande d'assemblage des informations, il n'existe pour autant pas de fondement conceptuel quant à la hiérarchisation de l'importance relative des différentes fonctions.

En tout état de cause, l'attention est ainsi à porter sur la **diversité des fonctions assurées par les sols à l'échelle d'un territoire**, et non seulement sur la multifonctionnalité de chaque unité de sol considérée.

2.4. Opérationnalité des indicateurs

■ Critères d'opérationnalité

Pour qu'un indicateur soit performant, les conditions suivantes ont été identifiées et catégorisées à partir de la littérature scientifique traitant des indicateurs dans le domaine du suivi environnemental :

- La **pertinence scientifique** conférée par des bases conceptuelles et des méthodes stabilisées ;
- La **capacité à informer**, c'est-à-dire l'aptitude de l'indicateur à répondre aux questions posées par les utilisateurs de l'évaluation, et son adéquation aux décisions à prendre (par ex. : changement d'usage du sol, adaptation des pratiques) ;
- La **légitimité** de l'indicateur et son appropriation par les utilisateurs de l'évaluation, fondée en particulier sur les processus de co-construction entre experts et utilisateurs ;
- La **faisabilité technique et économique** d'un suivi régulier, permise par la disponibilité de bases de données consolidées et accessibles, ainsi que de moyens techniques, humains et financiers adaptés aux objectifs du suivi ;
- La **compatibilité** des indicateurs avec les systèmes d'information existants, notamment interétatiques, ou avec des outils de modélisation et d'aide à la décision.

Les auteurs qui s'appuient sur cette classification mettent surtout en évidence la complémentarité indispensable entre l'**opérationnalité technique**, qui relève de développements scientifiques et méthodologiques et de la consolidation de bases de données, et l'**opérationnalité d'usage**, qui porte sur l'appropriation des indicateurs par les utilisateurs, et leur adéquation aux enjeux et au contexte de mise en œuvre. Il est important de considérer conjointement ces deux aspects lors du choix des indicateurs dans une situation donnée, pour assurer un bon ajustement entre le degré de précision et de technicité et le coût du dispositif mis en place, par rapport aux besoins, à la sensibilité et aux connaissances des utilisateurs sur le terrain, ainsi qu'aux moyens disponibles.

■ Opérationnalité des indicateurs sélectionnés

Cette liste des critères d'opérationnalité a été appliquée à la cinquantaine d'indicateurs sélectionnés dans le cadre de l'étude, avec les résultats suivants (cf. Tableau 1) :

- **Près de la moitié peuvent être considérés comme matures** : leurs méthodes de mesure sont stabilisées, voire normalisées, et des bases de données ont été constituées à partir des valeurs mesurées dans des contextes variés. Ces indicateurs bénéficient d'un historique d'utilisation, ou des efforts d'acquisition et de capitalisation des données consentis au cours des 20 dernières années. L'enjeu est désormais d'affiner les mailles spatiales et temporelles de leur suivi pour mieux comprendre les causes de leur variation d'évolution ;

- **Un quart est en maturation**, et leur utilisation sur le terrain nécessite un accompagnement par des experts ou des conseillers. L'opérationnalité sera facilitée par une standardisation des méthodes de mesure et une consolidation de bases de données de référence couvrant l'ensemble du territoire ;

- **Un quart est en développement**, encore au niveau de la recherche. Les méthodes de mesure restent à élaborer ou stabiliser. La plupart des métriques permettant de quantifier directement la réalisation d'une fonction écologique relève de cette catégorie.

■ Données disponibles

L'opérationnalité des indicateurs dépend en partie des données existantes et de leur accessibilité pour l'utilisateur, notamment pour identifier les valeurs de référence et interpréter les mesures réalisées dans un contexte donné (cf. Section 2.2.).

En France, les données disponibles sur la qualité des sols sont rassemblées dans le cadre de plusieurs programmes et consolidées dans plusieurs bases de données, dont :

- la base Donesol du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) qui capitalise l'ensemble des observations réalisées sur des sols lors d'opérations de cartographie ; elle accueille également les données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) dont le maillage systématique à la résolution de 16 km permet une estimation non biaisée sur l'ensemble des occupations/usages sur le territoire ;

- la Base de Données des Analyses de Terres (BDAT), rassemble des analyses de sol sur l'horizon de surface de parcelles agricoles ;

- la base de données BDSolU concernant les sols urbains, rend compte du fond pédo-géochimique anthropisé pour les principaux contaminants dans les couches superficielles des sols exposés en raison d'émissions diffuses sur de longues périodes. Il est important de noter que le fond pédo-géochimique anthropisé renseigne sur un niveau de contamination, mais ne doit pas être assimilé à un niveau de pollution. La Base de Données Eléments Traces Métalliques (BDETM) rassemble quant à elle les résultats des analyses réalisées sur les terrains recevant des boues de station d'épuration.

Par ailleurs, les programmes de sciences et recherches participatives ouvrent la possibilité de déployer le recueil de données à un grain fin, dans une diversité de contextes, y compris dans des espaces privatifs peu accessibles pour la recherche et les institutions. Leur principale fragilité réside dans la difficulté à maîtriser les méthodes d'échantillonnage et de mesure mises en œuvre. Elle est en partie compensée lorsque les programmes sont largement déployés, par la masse des données recueillies qui permet l'application de méthodes basées sur les statistiques pour le repérage des anomalies.

Pour chaque indicateur sélectionné, le rapport de l'étude répertorie les valeurs de référence recensées à partir des bases de données précitées, lorsque l'information était disponible. Plus ponctuellement, des valeurs sont également issues de la littérature consultée pour l'étude ou de la proposition de directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols.

Le système français de recueil et de gestion des données disponibles sur les sols est mentionné dans les sources internationales pour son exemplarité. Toutefois, pour que ce système contribue pleinement à l'opérationnalité des indicateurs, **le libre accès à l'ensemble de ces données pour les utilisateurs reste à assurer.**

3. Mobiliser des indicateurs au service des politiques publiques sur la qualité/santé des sols

3.1. La portée juridique nouvelle de la qualité/santé des sols

■ Évolution du droit de l'environnement

Dans le domaine des politiques publiques environnementales, la qualité de vie et le bien-être humain ont longtemps prévalu sur la qualité écologique des milieux, donnant parfois lieu à des actions qui leur étaient défavorables comme par exemple l'assèchement des zones humides. À partir des années 1970, cette approche évolue vers une meilleure intégration des concepts écologiques, comme en témoignent aujourd'hui les règles qui encadrent la préservation de l'air, de l'eau ou des habitats naturels. La directive-cadre sur l'eau (2000), ses modifications et ses textes d'application, montrent par exemple un approfondissement progressif de l'évaluation de l'état écologique aujourd'hui déclinée en cinq classes pour les différents types de masses d'eau de surface. À partir d'un objectif

politique initial de préservation et de restauration, le système d'indication s'est progressivement articulé aux différents niveaux de gouvernance, ce qui n'existe pas encore aujourd'hui pour les sols.

■ Évolution de l'approche des sols en droit

Ni les sols, ni leur qualité ne sont définis de manière commune en droit, et leur préservation fait l'objet de dispositions dispersées dans différents codes (par ex. : de l'urbanisme, de l'environnement, rural, forestier). L'attention est essentiellement portée sur la capacité du sol à satisfaire l'usage auquel il est affecté (agricole, sylvicole, support de construction, etc.). **En l'absence d'indicateurs objectifs, les modalités de planification de l'urbanisme prennent très peu en compte la qualité des sols**, si ce n'est dans certains cas de collectivités associées à des projets de recherche ou d'accompagnement (par ex. : MUSE⁴, UQUALISOL-ZU⁵). Même lorsque le droit se veut attentif à la qualité des sols, comme dans le cadre des opérations d'aménagement foncier,

4 MUSE propose une méthode pour caractériser, quantifier et cartographier les fonctions et la multifonctionnalité des sols à l'échelle des documents d'urbanisme. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement>

5 La méthode UQUALISOL a été utilisée avec les municipalités de Gardanne et Rousset (Bouches-du-Rhône), pour cartographier les sols d'un territoire, les fonctions et les vocations qu'ils peuvent remplir. <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/CTecosystemes/fiches/methode23p8586.pdf>

sa prise en compte s'avère peu décisive dans les arbitrages finaux, relativement à d'autres enjeux tels que notamment la proximité des bassins urbains, des infrastructures, ou des filières économiques. La valeur économique des sols n'intègre que dans des cas très particuliers (certaines aires d'Appellation d'origine contrôlée par exemple) des indicateurs de qualité des sols.

Pour autant, **deux initiatives récentes montrent l'émergence d'une approche plus intégrée de la qualité/santé des sols : la loi Climat et résilience du 22 août 2021 et la proposition de directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols** publiée en 2023 et encore en discussion au sein des instances européennes.

Longtemps le droit de l'urbanisme a reposé sur un objectif de gestion économe de l'espace et de modération de la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers dans le cadre d'une politique de lutte contre l'étalement urbain. Le code de l'urbanisme (Art. L. 101-2-1) intègre désormais pleinement l'objectif de lutte contre l'artificialisation des sols, en la définissant comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, notamment de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Un parallèle est donc établi entre le phénomène de l'artificialisation et sa conséquence : la dégradation du sol ainsi artificialisé.

La proposition de directive européenne comporte au stade actuel une liste d'indicateurs visant à évaluer de manière globale les dégradations des sols, quel que soit le type d'activité en cause (cf. Section 1.3).

Sans qu'il soit encore possible de mesurer leurs effets, ces récentes évolutions indiquent un changement d'approche des sols en considérant leur fonctionnalité et en s'inscrivant dans une logique de préservation et de restauration. Mais à cette fin, il faut disposer d'informations objectives pour qualifier les sols à l'aide d'indicateurs.

3.2. L'indicateur dans les mécanismes d'intervention sur la qualité/santé des sols

Certains domaines du droit mobilisent d'ores et déjà des indicateurs de qualité/santé des sols, par exemple lorsqu'il s'agit de qualifier des espaces ou des milieux auxquels s'applique un régime spécifique (ex. : zones humides), ou d'attester de la fourniture d'aménités environnementales (ex. : mesures agroenvironnementales et climatiques). La qualité du sol est donc un critère, plus ou moins fort selon la législation concernée, utile à l'application d'un régime juridique.

La plupart des dispositifs d'intervention reposent sur des obligations de moyens plutôt que de résultats (ex. : label bas carbone). La relation ainsi supposée entre les pratiques de gestion encouragées, la qualité/santé des sols qui est censée en résulter, et les avantages attendus en termes de services écosystémiques, est rarement vérifiée. En effet, le calibrage des incitations repose le plus souvent sur des mesures effectuées en conditions expérimentales qui ne sont pas transposables à l'ensemble du territoire. Une meilleure connaissance pour chaque territoire des effets réels de ces dispositions sur la qualité/santé des sols reste à développer.

3.3. Restauration des sols dégradés

■ Des trajectoires diverses

La restauration des écosystèmes est identifiée au niveau international comme un moyen de réparer ce qui a été dégradé et s'inscrit aussi dans une logique de compensation afin de parvenir à un monde sans

dégradation nette. Elle concerne la biodiversité ainsi que les terres. Dès lors, se pose la question de savoir dans quelle mesure cet objectif de restauration est attentif à la notion de qualité des sols dégradés.

En droit français cohabitent des notions véhiculant des niveaux d'exigences très variés, allant de la réhabilitation d'un espace pour le rendre compatible à un usage, à la restauration écologique des milieux compris dans des espaces naturels protégés, en passant par un concept en construction, celui de la renaturation, et qui est susceptible d'impliquer différents procédés techniques. Au regard de l'objectif de refunctionalisation susmentionné, seule la désartificialisation des sols prévue à l'article L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme y fait expressément référence. Au niveau européen, la proposition de directive sur la surveillance et à la résilience des sols fixe un objectif de « régénération » et de « renaturation », visant à ramener les sols d'un état dégradé à un état sain.

■ Le suivi des opérations d'ingénierie

L'évolution de la qualité/santé d'un sol est observable sur des temporalités qui peuvent être très courtes pour certains aspects (par ex. les communautés microbiennes) et très longues pour d'autres (par ex. le stock de carbone). Il arrive ainsi que certaines altérations qui se produisent à bas bruit sur le long terme s'avèrent déjà irréversibles au moment où elles sont repérées. À l'inverse, la recolonisation de l'espace par la végétation et les organismes du sol est l'observation la plus accessible et souvent collectée. Or, à elle seule, elle ne suffit pas à attester d'une refunctionalisation complète des sols, laquelle est plus lente.

La littérature scientifique invite donc à la vigilance, par exemple sur les attendus d'une opération visant à désartificialiser le sol pour qu'un territoire ne subisse pas en réalité une perte de fonctions. En ce sens, la création d'un référentiel de la qualité/santé des sols sera utile au contrôle ainsi qu'au suivi des mesures de restauration des sols dégradés, quel que soit le cadre juridique dans lequel une telle action s'inscrit. Il permettra en outre d'influer sur la mise en adéquation des documents de planification avec les enjeux de préservation des espaces concernés.

La question des incertitudes associées à la réalité et à la pérennité du succès d'une action de restauration est donc posée de manière cruciale, tant en termes scientifiques (comment valider le caractère effectif de la restauration ?) que sur le plan politique (comment assurer la préservation dans le temps du sol restauré ?).

Si les indicateurs de qualité des sols sont opérationnels pour le suivi et l'évaluation d'actions de restauration, en complémentarité avec d'autres indicateurs environnementaux comme la biodiversité par exemple, ce protocole pourrait être enrichi d'indicateurs économiques, sociologiques et culturels. Ces derniers seront déterminants dans la pérennisation de la restauration, laquelle pourra notamment être garantie par le recours à des mécanismes de contractualisation ou de maîtrise foncière attentifs à la qualité du sol.

3.4. Niveaux territoriaux d'une gouvernance de la qualité/santé des sols

Les travaux traitant de la gouvernance de la qualité/santé des sols soulignent l'importance d'une territorialisation en lien avec la mobilisation des acteurs autour d'enjeux partagés. Ils mettent aussi en évidence différentes options pour délimiter l'aire géographique et les compétences associées à cette gouvernance, qui peuvent s'appuyer sur :

- des **unités administratives existantes** (par ex. l'échelle de la planification territoriale Région-SCoT-PLU), ce qui permet la cohérence avec la planification territoriale mais ne correspond pas nécessairement ni à la réalité des usages (notamment agricoles et forestiers), ni à la qualité des sols ;

- des **unités homogènes quant au type et à l'usage des sols** (les Petites régions agricoles sont un exemple de compromis entre l'homogénéité des types de sols et la prise en compte des usages) ;
- des unités pertinentes pour la **prise en compte intégrée des enjeux environnementaux**, comme celle des bassins versants.

Cette réflexion est également en cours au niveau européen dans le cadre des discussions sur la proposition de directive européenne *Soil monitoring and resilience*, qui prévoit la délimitation de *soil districts* (pour la gouvernance) et *soil units* (pour le suivi) au sein de chaque État membre. La définition de ces entités reste toutefois à ce stade encore très ouverte.

3.5. Enjeux de l'implication des acteurs

Il n'est pas possible de répondre à la question du référentiel et du système d'indication posée dans cette étude, sans passer par une

implication des acteurs dans la clarification de la finalité de l'évaluation. Évaluer la qualité/santé des sols d'un territoire implique ainsi une réflexion associant les usagers des sols et les scientifiques, partant d'une explicitation claire de la finalité de l'évaluation, et déclinant le référentiel en conséquence.

Face à la complexité du fonctionnement du sol et aux questions soulevées par la définition de sa santé, la littérature scientifique souligne l'intérêt des dispositifs participatifs. L'inclusion des acteurs dans l'élaboration, la réalisation et l'interprétation du suivi, favorisent une perception partagée de la qualité et de la santé des sols, et contribue à réguler les rapports de pouvoir. Le développement de kits et manuels pédagogiques de terrain peu coûteux en équipement, ainsi que la mise en place de structures d'animation (telles que des *living labs*, par exemple) sont attendus pour développer les possibilités d'implication et des lieux d'échange autour du sol, de ses usages et de sa santé.

4. Proposer des axes de recherche

4.1. Incitations fondées sur des moyens et/ou des résultats

Les incitations à la préservation des sols mises en œuvre dans le cadre des politiques publiques sont majoritairement fondées sur des obligations de moyens. Des développements théoriques promeuvent la mise en œuvre de paiements pour services écosystémiques ou services environnementaux, mais en pratique c'est le plus souvent la mise en œuvre de moyens, et non le résultat obtenu en termes de qualité/santé du sol, qui est contractualisée. Or, les fondements scientifiques sur lesquels repose la relation entre les incitations apportées et les résultats réels en termes de qualité/santé du sol sont encore fragiles. La modélisation est mise en avant dans cette perspective, avec un champ de recherche encore très ouvert.

4.2. Les seuils : concepts, évaluation, intérêts et limites

Les valeurs seuils sont un élément crucial de l'interprétation des indicateurs dans la perspective du suivi des politiques publiques. Ces

valeurs posent toutefois de nombreuses questions. La pertinence du recours à de tels outils est parfois contestée dans la mesure où le seuil introduit une rupture dans l'interprétation de phénomènes qui sont graduels. Ainsi, des situations en réalité proches peuvent être considérées comme très différentes (par ex. dégradé versus non dégradé) si elles se situent de part et d'autre du seuil. En s'inspirant du travail réalisé dans la présente étude sur la notion d'indicateur (définition, rôle, performance, opérationnalité), une exploration reste à réaliser sur la question des seuils. Cette réflexion est notamment à relier aux connaissances en écologie sur la dynamique des systèmes.

4.3. Liens entre déterminants et fonctions

De même, la littérature scientifique demeure lacunaire sur les relations entre les déterminants des fonctions (auxquels se rapportent la majorité des indicateurs existants) et la réalisation effective des fonctions. Le choix des indicateurs dans les travaux analysés est le plus souvent réalisé de manière empirique et suivant des usages communs en sciences du sol, sans description du lien entre l'indicateur et le phénomène étudié. Les métriques associées aux fonctions du sol restent ainsi à élaborer et à stabiliser.

Pour en savoir plus

Isabelle Cousin (coord.), Maylis Desrousseaux (coord.), Sophie Leenhardt (coord.), Denis Angers, Laurent Augusto, Jean-Sauveur Ay, Adrien Baysse-Lainé, Philippe Branchu, Alain Brauman, Marie-Caroline Brichler, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Claude Compagnone, Claire Froger, Raphaël Gros, Carole Hermon, Julie Itey, Catherine Keller, Bertrand Laroche, Virginie Lelièvre, Sybille de Mareschal, Germain Meulemans, David Montagne, Guénola Pérès, Nicolas Saby, Emmanuelle Vaudour, Jean Villerd, Cyrille Violle (2024). *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs*. Synthèse du rapport d'étude, INRAE (France).

Le rapport, la synthèse et le présent résumé sont disponibles en ligne sur le site internet d'INRAE et sur celui du GIS Sol.

Isabelle Cousin (coord.), Maylis Desrousseaux (coord.), Denis Angers, Laurent Augusto, Jean-Sauveur Ay, Adrien Baysse-Lainé, Philippe Branchu, Alain Brauman, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Claude Compagnone, Raphaël Gros, Carole Hermon, Catherine Keller, Bertrand Laroche, Germain Meulemans, David Montagne, Guénola Pérès, Nicolas Saby, Emmanuelle Vaudour, Jean Villerd, Cyrille Violle ; Virginie Lelièvre, Sybille de Mareschal ; Marie-Caroline Brichler, Claire Froger, Julie Itey ; Sophie Leenhardt (coord.) (2024). *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs*. Rapport d'étude, INRAE (France).



Centre-siège Paris Antony
Direction de l'expertise scientifique
collective, de la prospective et des études
147 rue de l'Université - 75338 Paris cedex 07
Tél. +33 (0)1 42 75 94 90

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

