



HAL
open science

Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société

Pierre Renault, Chantal Gascuel, Isabelle Cousin, Véronique Antoni, Antonio Bispo, Nolwenn Bougon, Maylis Desrousseaux, Isabelle Feix, Irénée Joassard, Patricia Laville, et al.

► To cite this version:

Pierre Renault, Chantal Gascuel, Isabelle Cousin, Véronique Antoni, Antonio Bispo, et al.. Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société. *Étude et Gestion des Sols*, 2023, 30, pp.207-222. hal-04018969

HAL Id: hal-04018969

<https://hal.inrae.fr/hal-04018969v1>

Submitted on 8 Mar 2023

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

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

Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société

P. Renault^(1*, 2), I. Cousin⁽³⁾, C. Gascuel-Oudou^(2,4), V. Antoni⁽⁵⁾, A. Bispo⁽³⁾, N. Bougon⁽⁶⁾, M. Desrousseaux⁽⁷⁾, I. Feix⁽⁸⁾, I. Joassard⁽⁵⁾, P. Laville⁽⁹⁾, A. Pierart⁽⁸⁾ et T. Caquet⁽²⁾

- 1) INRAE, Université d'Avignon, UMR 1114 EMMAH, 84914 Avignon Cedex 9, France
- 2) INRAE, Direction scientifique Environnement, 75338 Paris Cedex 07, France
- 3) INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans Cedex 2, France
- 4) INRAE, Institut Agro, UMR 1069 SAS, 35042 Rennes Cedex, France
- 5) Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, Service des données et études statistiques, 45061 Orléans Cedex 2, France
- 6) OFB, DRAS, 94300 Vincennes, France
- 7) CNAM, GeF, 72000 Le Mans, France
- 8) ADEME, 49000 Angers, France
- 9) Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Service Compétitivité et performance environnementale, 75349 Paris 07 SP, France

* Auteur correspondant : pierre.renault@inrae.fr

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ADEME : Agence de la transition écologique
AOC : Appellation d'Origine Contrôlée
AOP : Appellation d'Origine Protégée
BCAE : Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales
CDB : Convention sur la diversité biologique
CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CNULCD : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification
COP : Conférence des Parties
DCE : Directive-cadre sur l'eau
DEPE : Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études
DERU : Directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires
FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FEADER : Fonds européen agricole pour le développement rural

Comment citer cet article :

Renault P., Cousin I., Gascuel-Oudou C., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A. et Caquet T., 2023 - Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société - *Étude et Gestion des Sols*, 30, 207-221

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

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

FEAGA :	Fonds européen agricole de garantie
FNE :	France Nature Environnement
FREC :	Feuille de Route de l'Economie Circulaire
GIS Sol :	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol
GSP :	Global Soil Partnership (Partenariat Mondial des Sols)
ICPE :	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IGP :	Indication Géographique Protégée
INRA :	Institut national de la recherche agronomique
INRAE :	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IPBES :	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques)
LBC :	Label bas-carbone
MAEC :	Mesures agro-environnementales et climatiques
MESALES :	Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols
NEC :	National Emissions reduction Commitments
OCDE :	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD :	Objectif de Développement Durable
OFB :	Office Français de la Biodiversité
OMD :	Objectifs du Millénaire pour le développement
ONG :	Organisation non gouvernementale
ONU :	Organisation des Nations Unies
PAC :	Politique agricole commune de l'Union Européenne
PAE :	Programme d'action pour l'environnement de l'Union Européenne
PAT :	Projet alimentaire territorial
PCAET :	Plan climat air énergie territorial
PESERA :	Pan-European Soil Erosion Risk Assessment
PIA :	Programme d'investissements d'avenir
PLU :	Plan local d'urbanisme
PLUi :	Plan local d'urbanisme inter-communal
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le développement
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PRÉPA :	Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques
PPA :	Plan de protection de l'atmosphère
SCOT :	Schéma de cohérence territoriale
SEEA :	System of Environmental-Economic Accounting (Système de comptabilité économique et environnementale)
SNB :	Stratégie Nationale pour la Biodiversité
SNBC :	Stratégie Nationale Bas Carbone
SRADDET :	Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SSP :	Sites et Sols Pollués
STEP :	station d'épuration des eaux usées
STICS :	Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard
UE :	Union européenne
UNESCO :	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture)
USDA :	United States Department of Agriculture (Département de l'Agriculture des Etats-Unis)
ZAN :	Zéro Artificialisation Nette
ZSCN :	Zones soumises à des contraintes naturelles
ZSCS :	Zones soumises à des contraintes spécifiques

RÉSUMÉ

Les sols assurent de multiples services écosystémiques. Leur faible vitesse de formation en fait une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. À l'interface entre géosphère et atmosphère, essentiels pour l'hydrosphère et la biosphère, à la fois écosystèmes et compartiments d'autres écosystèmes, les sols sont indispensables à la vie mais fragiles et exposés à de nombreuses pressions (érosion, pollutions, salinisation, tassement, imperméabilisation...). À l'échelle globale, 13 % de l'ensemble des sols sont déjà dégradés et, en absence d'actions, plus de 90 % pourraient l'être d'ici 2050. La prise de conscience de cette dégradation a amené différentes instances internationales, européennes, nationales et territoriales à mettre à leur agenda la connaissance, la protection et la restauration des sols.

Des indicateurs de qualité, de fonctions, de services, de vulnérabilité et/ou de pressions sont nécessaires pour la mise en œuvre, le pilotage et l'évaluation des politiques publiques de gestion durable des sols et des services écosystémiques associés. Si de nombreux indicateurs ont déjà été proposés, peu d'études ont discuté de leur pertinence et de leur déclinaison opérationnelle selon l'échelle et le contexte d'usage. Le GIS Sol s'est emparé de cette question en 2020, et ambitionne de croiser les besoins prioritaires des politiques publiques avec une analyse des indicateurs de qualité des sols proposés dans la littérature scientifique, pour identifier les lacunes et évaluer les possibilités de déclinaison opérationnelle (accessibilité des données et méthodes, modèles, variabilité liée à la qualité caractérisée vs variabilité résiduelle, etc.). Cet article présente un état des lieux des besoins et des démarches envisagées puis dresse des perspectives de travail sur ce champ pour le GIS Sol.

Mots-clés

Sol, qualité des sols, propriétés, services écosystémiques, indicateur, vulnérabilité, menace, exposition, restauration, gestion durable, politique publique

SUMMARY

FROM SOIL PROPERTIES TO QUALITY INDICATORS TO SUPPORT PUBLIC POLICIES AND MEET THE NEEDS OF SOCIETY

Soils provide ecosystem services. Their low formation rate makes them a non-renewable resource at the human scale. At the interface between geosphere and atmosphere, an essential part of hydrosphere and biosphere, both ecosystems and compartments of other ecosystems, soils are essential to life but fragile and exposed to many threats (erosion, pollution, salinization, compaction, impermeabilization etc.). At the planetary level, 13% of all the soils are already degraded and without any action more than 90% could be degraded by 2050. The consideration of their current or future degradation has led various international, European, national or local bodies to promote soil knowledge, protection and restoration on their agenda. Indicators of soil quality, functions, services, vulnerability and/or threats are necessary to implement, manage and evaluate public policies for a real sustainable soil management and ecosystem services preservation. Despite many indicators have already been proposed, few studies have developed operational application adapted to scale, data availabilities, and local context in order to support public policies. The GIS Sol has a decisive role to play in this area to go beyond the simple provision of soil data by delivering soil quality indicators. This paper analyses current public policies at various levels and their needs for soil quality indicators. It then discusses the opportunities and challenges in this domain for the GIS Sol.

Key-words

Soil, soil quality, properties, ecosystem services, indicator, vulnerability, threat, exposition, restoration, sustainable management, policy.

RESUMEN

DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO A LOS INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO, EN APOYO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS Y EN RESPUESTA A LAS NECESIDADES DE LA SOCIEDAD

Los suelos proporcionan múltiples servicios ecosistémicos. Su baja velocidad de formación los convierte en un recurso no renovable a escala humana. En la interfaz entre la geosfera y la atmósfera, esenciales para la hidrosfera y la biosfera, a la vez ecosistemas y compartimentos de otros ecosistemas, los suelos son indispensables para la vida pero frágiles y expuestos a numerosas presiones (erosión, contaminación, salinización, compactación, impermeabilización...). A escala mundial, el 13 % de todos los suelos ya están degradados y, en ausencia de medidas, más del 90 % podría estarlo de aquí a 2050. La toma de conciencia de esta degradación llevó a diferentes instancias internacionales, europeas, nacionales y territoriales a poner en su agenda el conocimiento, la protección y la restauración de los suelos. Se necesitan indicadores de calidad, funciones, servicios, vulnerabilidad y/o presiones para la aplicación, el pilotaje y la evaluación de las políticas públicas de ordenación sostenible de la tierra y los servicios ecosistémicos asociados. Aunque ya se propusieron muchos indicadores, son pocos los estudios que discutieron su pertinencia y su declinación operativa según la escala y el contexto de uso. El GIS Sol se hizo cargo de esta cuestión en 2020, y aspira a cruzar las necesidades prioritarias de las políticas públicas con un análisis de los indicadores de calidad de los suelos propuestos en la literatura científica, para identificar las deficiencias y evaluar las posibilidades de declinación operativa (accesibilidad de los datos y métodos, modelos, variabilidad relacionada con la calidad caracterizada frente a variabilidad residual, etc.). Este artículo presenta un inventario de las necesidades y de los enfoques previstos y presenta las perspectivas de trabajo en este campo para el GIS Sol.

Palabras clave

Suelo, calidad del suelo, propiedades, servicios ecosistémicos, indicador, vulnerabilidad, amenaza, exposición, restauración, gestión sostenible, política pública.

Les sols assurent de multiples fonctions, notamment l'ancrage des plantes, leur alimentation en eau et en éléments nutritifs, et d'autres fonctions propices à leur développement (aération...). Ils hébergent plus de 25 % de la biodiversité mondiale (Bach *et al.*, 2020) et les multiples organismes qui y vivent participent à leur genèse (Verboom et Pate, 2013; Dey et Bhattacharyya, 2019), à leur structuration et à l'exploration du milieu par les plantes (Ganugi *et al.*, 2019; Young *et al.*, 1998) ainsi qu'aux cycles biogéochimiques (Smith *et al.*, 2015); ils interagissent aussi entre eux (Heinen *et al.*, 2018). Les propriétés des sols déterminent la taille du réservoir en eau utilisable par les plantes, le partage entre ruissellement, infiltration et drainage, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, notamment leur composition en nutriments (N, P, K, S...), ainsi que les niveaux de contamination par des composés dangereux pour la vie du sol, des plantes et de l'Homme (Gavrilescu, 2021). Leurs propriétés impactent aussi leur capacité à stocker du carbone (Pellerin *et al.*, 2020) et régulent les flux de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) (Pedersen *et al.*, 2021). En assurant ces fonctions, les sols contribuent ainsi à de nombreux services écosystémiques (Dominati *et al.*, 2010).

Depuis plusieurs décennies, les sols font face à des pressions d'une intensité sans précédent (FAO, 2015) : érosion, contaminations chimiques, salinisation, désertification, tassement et imperméabilisation, artificialisation. À l'échelle planétaire, on estime qu'environ 13 % des sols sont dégradés (FAO, 2021) et que 90 % des sols pourraient l'être en 2050 en absence de mesure adéquate; au niveau de l'Union européenne, on estime qu'environ deux tiers des sols sont dégradés (Veerman *et al.*, 2020). Leur vitesse de formation étant négligeable à l'échelle humaine (Verheijen *et al.*, 2009), il est indispensable de les protéger, de les utiliser de manière durable mais aussi de les restaurer lorsqu'ils sont dégradés. Les politiques publiques s'y engagent de plus en plus, cet engagement appelant en retour des appuis scientifiques de différentes formes, notamment en termes d'inventaire des sols, de suivi de leurs évolutions, et d'identification des pressions auxquelles ils sont exposés (Bellec *et al.*, 2015).

Cet article s'inscrit dans ce contexte d'évolution des politiques publiques et du nécessaire appui qu'elles suscitent. Il décrit (i) la place et la vision des sols dans les agendas des politiques publiques internationales, européennes et françaises, puis (ii) les besoins en indicateurs qui en résultent. Il discute ensuite des difficultés à caractériser l'état des sols, leurs évolutions lentes, les besoins nouveaux en termes de résolution spatiale et de fréquence d'observations, la nécessité d'harmoniser les méthodes d'estimation des indicateurs de qualité des sols, les incertitudes et le cadre d'interprétation qui leur sont associés. Doran et Parkin (1997) définissent la qualité d'un sol comme « *la capacité d'un sol à fonctionner pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et promouvoir la santé des plantes et des animaux, dans les*

limites de l'écosystème et de l'utilisation des terres ». Bunemann *et al.* (2018) ont proposé une large revue du concept de qualité des sols. Récemment, ce concept s'est élargi pour traiter d'évaluation des sols, de leur mode de gestion, des risques, des évolutions des sols et de leur restauration.

LES SOLS À L'AGENDA DES POLITIQUES PUBLIQUES INTERNATIONALES, EUROPÉENNES ET FRANÇAISES

Politiques internationales

Depuis 40 ans, les sols ont progressivement pris une place importante dans les politiques internationales, avec notamment la publication par la FAO de la Charte Mondiale sur les Sols qui liste les principales voies de dégradation des sols ainsi que de nombreux défis à relever (FAO, 1981). Cette chartre a été actualisée en 2015 avec la mise en avant des services écosystémiques assurés par les sols autres que les seuls services de production (FAO, 2015). D'autres enjeux ont été soulignés lors du 3^e Sommet de la Terre (ou Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement) tenu à Rio de Janeiro en 1992; les sols sont alors inscrits à la croisée des 3 conventions issues de ce sommet (Convention sur la diversité biologique – CDB; Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques – CCNUCC; Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification – CNULCD) (Grubb *et al.*, 2019; Parson *et al.*, 1992). Les sols sont aussi présents dans Agenda 21, plan d'action adopté lors de ce même Sommet et composé de 27 principes réunissant 2 500 recommandations pour un développement durable au XXI^e siècle, mais dont la plupart n'ont jamais été mises en œuvre (Vaillancourt, 2002).

Le concept de « Une seule santé » (*OneHealth*) a émergé dans les années 2000 avec la prise de conscience des liens étroits entre santé humaine et santé animale (domestique et sauvage), complété ultérieurement d'une prise en compte de l'environnement (et donc des sols), notamment du fait des apports de l'écologie de la santé, discipline qui étudie le rôle des facteurs environnementaux ou écologiques dans l'origine et la transmission de certaines pathologies (Destoumieux-Garçon *et al.*, 2018; Morand *et al.*, 2020). En 2000, le Sommet du Millénaire à New-York a défini 8 objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) à atteindre en 2015, dont un visait à assurer un environnement durable sans toutefois d'allusion spécifique aux sols. Leur ont succédé les 17 objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU – avec 169 cibles pour 2030 – rassemblés dans l'Agenda 2030 et adoptés en 2015 par l'Assemblée générale de l'ONU comme l'aboutissement d'un processus lancé lors du 5^e sommet de la Terre (« Rio +20 ») à Rio de Janeiro en 2012 (Degron, 2020). Quatre de ces ODD

impliquent très directement les sols: l'ODD 2 « Faim zéro », l'ODD 13 sur les changements climatiques, l'ODD 6 sur la qualité de l'eau et l'ODD 15 sur la vie terrestre. Mais les sols ont une influence directe sur l'ensemble des autres ODD, notamment les ODD 1 « Pas de pauvreté », 3 « Bonne santé et bien-être », 7 « Énergie propre et d'un coût abordable », et 12 « Consommation et production responsables ». De ce fait, l'évaluation des avancées sur ces ODD repose sur des indicateurs incluant peu ou prou une information sur les sols.

Fin 2013, l'Assemblée générale de l'ONU a déclaré l'année 2015 comme « année internationale des sols », et le 5 décembre de chaque année comme la « journée mondiale des sols ». Au niveau de l'ONU, d'autres organes que la FAO jouent un rôle important dans la politique internationale sur les sols: le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) créé en 1972 suite au premier sommet de la Terre (ou Conférence des Nations-Unies sur l'environnement humain de Stockholm) (UNEP, 2016); la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) créée en 2012, les sols étant au cœur de ses thématiques tant par la biodiversité qui y vit que par les fonctions des sols et les interactions entre biodiversité et fonctions; le Partenariat Mondial des Sols (*Global Soil Partnership – GSP*) créé lui aussi en 2012 et qui vise à développer/renforcer les collaborations entre toutes les parties prenantes, des utilisateurs des sols aux décideurs politiques, pour promouvoir la gestion durable des sols et de leurs services écosystémiques. D'autres structures des Nations Unies sont concernées par les sols: le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD); l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO); le système de comptabilité économique et environnementale (SEEA), établi dès 1993 pour relier environnement et économie (Obst, 2015), pour lequel les sols sont considérés comme une ressource (ou un actif au sens comptable s'insérant dans le cadre plus large de la comptabilité des écosystèmes) (ONU, 2016).

Indépendamment de l'ONU, il faut mentionner l'implication de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), créée en septembre 1961, comme acteur à l'international des politiques liées aux sols avec des activités tournées vers l'agriculture et l'environnement et la mise en place d'indicateurs environnementaux pour l'agriculture (OECD, 2001).

POLITIQUE EUROPÉENNE

Dès 1972, une charte européenne des sols (révisée en 2003) a été adoptée (CE, 1972; CMCE, 1972; Billet, 2017, 2018; Bertrand, 2018; Boer *et al.*, 2017) et plusieurs initiatives ont vu le jour en Europe avant 2000, notamment: le protocole d'application dans le domaine des sols de la Convention Alpine de 1991 (Cuyppers et Randier, 2009) dit protocole « Protection

des Sols » de 1998 ; et la directive sur l'utilisation des boues de station d'épuration des eaux usées (STEP) en agriculture (CCE, 1986) pour préserver les sols de contaminations. Les menaces suivantes sur les sols ont alors été explicitement identifiées par la Commission de la Communauté européenne (CEC, 2002): érosion, diminution de la matière organique, contaminations, salinisation, tassement, appauvrissement de la biodiversité, imperméabilisation, inondations et glissements de terrain.

En 2004, une Directive du Parlement européen et du Conseil sur la responsabilité environnementale a inclus un volet « sol » focalisé sur les contaminations chimiques, voire biologiques, susceptibles d'avoir un impact sur la santé humaine. En 2006, une proposition de directive cadre sur les sols reprenant plus largement les menaces identifiées en 2002 a été soumise par la Commission des Communautés européennes au Parlement européen et au Conseil (CE, 2006a, 2006b; CCE, 2006). Le projet comportait deux grands axes: (i) le recensement des zones à risques de dégradation des sols et la prise de mesures pour ces zones; et (ii) un inventaire des sites contaminés et la mise en œuvre de mesures d'assainissement. Adoptée en première lecture par les députés européens en 2007, la proposition de Directive a été rejetée la même année par quatre pays (Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas et Autriche), la France s'abstenant. La Commission européenne a définitivement retiré ce texte en 2014, sans donner de raison officielle, mais probablement en raison d'inquiétudes sur les enjeux sous-jacents (politique industrielle, activités agricoles) et sur les coûts liés aux obligations de police et de réhabilitation des sites pollués (Chen, 2019; Jourda et Pellevat, 2021). Ce projet de directive était l'un des 4 piliers de la stratégie européenne sur la protection des sols, les 3 autres, bien développés (CE, 2012), étant l'intégration de la protection des sols dans d'autres politiques thématiques européennes (PAC notamment), la communication/sensibilisation et la recherche.

Diverses initiatives européennes ont concerné directement ou indirectement les sols à la même époque et un peu plus tard, avec notamment la Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources en 2011, le 7^e Programme d'action pour l'environnement (2013-2020), la Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, la Directive EU 2016/2284 dite « Directive NEC 2 » sur la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques (dont NH₃, les NO_x et les PM_{2.5}) dont certaines à partir des sols, le règlement UE 2018/841 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des sols, du changement d'affectation des sols et de la foresterie, et le règlement UE 2019/1009 relatif à la mise sur le marché de produits fertilisants. D'autres politiques européennes protègent indirectement ou implicitement les sols en limitant d'un côté les contaminants dans les eaux et dans les boues de station d'épuration des eaux usées, dont environ 70 % sont épandues sur les sols agricoles avec initialement la

Directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (DERU) et la Directive-cadre 2000/60/CE sur l'Eau (DCE). On peut ajouter à celles-ci la Directive 91/676/CEE Nitrates (CCE, 1991) qui, promouvant les couverts végétaux pour préserver la qualité des eaux, contribue à différents services écosystémiques des sols.

Depuis 2019, l'Union européenne affiche une très forte ambition autour des sols (Toth *et al.*, 2018). Le Pacte vert de l'Union européenne (2019) poursuit différents objectifs dont certains impliquent les sols. À titre d'exemple, il a débouché : en 2020, sur le Plan d'objectifs climat pour 2030 et sur la stratégie en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030, en y incluant les sols (lutte contre l'étalement urbain et leur imperméabilisation, contre leur pollution, contre la déforestation et le surpâturage, réhabilitation de friches contaminées) ; en 2021, sur le règlement UE 2021/1119 pour parvenir à la neutralité climatique, sur un plan d'action zéro pollution pour l'eau, l'air et les sols, et sur la stratégie 'de la ferme à la table' avec notamment des considérations sur l'usage des pesticides.

Parallèlement, en 2019, un Comité de mission 'Santé des sols et alimentation' a été mis en place. Il a produit à l'automne 2020 le rapport 'Caring for soil is caring for life' qui a amené la Commission européenne à adopter la nouvelle Mission intitulée 'A soil deal for Europe' (Panagos *et al.*, 2022). Cette Mission vise la préservation et la restauration des sols. Son action repose pour partie sur l'élaboration d'un cadre harmonisé de suivi des sols. Enfin, l'Observatoire des sols de l'Union européenne a été lancé fin 2020. Il doit contribuer à la production de données utiles pour différentes politiques européennes et leurs déclinaisons nationales (Maréchal *et al.*, 2021).

Deux textes très importants préfigurent une nouvelle proposition réglementaire en 2023 de la Commission européenne pour la protection, l'utilisation durable et la restauration des sols : la résolution du Parlement européen du 28 avril 2021 sur la protection des sols et la communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil du 17/11/2021 'EU Soil strategy for 2030; reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate'. Divers objectifs sont mis en avant dans ces deux textes : la protection et la restauration des sols ; l'atténuation du changement climatique (stockage de C) ; l'évaluation des sols et de leurs potentialités de production (agriculture et forêt ; e.g., zones soumises à des contraintes naturelles ou à des contraintes spécifiques – ZSCN et ZSCS) ; les paiements pour services environnementaux (éco-régimes ou *eco-schemes*, paiement vert...) ; les investissements verts et les labels européens « verts » portant sur les investissements, la qualité des produits et/ou sur leur impact environnemental (e.g., label bio) ; la valeur patrimoniale des sols et de leur biodiversité. Ces deux textes insistent sur le besoin d'indicateurs harmonisés pertinents de la qualité des sols.

Enfin, la PAC 2023-2027 devrait contribuer à renforcer la préservation des sols, notamment par l'introduction de

différentes aides : les éco-régimes nouvellement définis dans le premier pilier (FEAGA), diverses mesures dans le second pilier (FEADER), la conditionnalité des aides associées aux bonnes conduites agricoles et environnementales (BCAE). L'évaluation future de la PAC, qui intègre désormais l'évolution du carbone du sol, devrait valider cette ambition, alors que l'évaluation de l'impact de la PAC sur la période précédente montre qu'elle n'a pas été très efficace en termes de gestion durable des sols (Alliance Environnement, 2020).

Politique française

Au niveau de la France et de ses territoires (régions, grandes métropoles...), il n'y a pas à proprement parler de cadre législatif global et intégratif pour la protection, l'utilisation durable et/ou la restauration des sols, mais diverses politiques sectorielles intégrant les sols. Les textes réglementaires sont insérés principalement dans le Code de l'environnement, le Code rural, le Code de l'urbanisme, le Code général des collectivités territoriales, le Code forestier, et le Code général de la propriété des personnes publiques. S'y ajoutent des stratégies nationales et autres feuilles de routes pouvant donner lieu à diverses déclinaisons régionales, intercommunales ou communales comme les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme et plans locaux d'urbanisme inter-communales (PLU et PLUi), les plans climat air énergie territoriaux (PCAET), ou encore les projets alimentaires territoriaux (PAT).

Divers objectifs et diverses stratégies – correspondant souvent à des déclinaisons françaises de directives européennes – sont poursuivis dans ces textes. Ils visent principalement :

- (i) l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN), issu de la loi Climat et Résilience, avec trois décrets très récents sur l'artificialisation des sols (décrets n°2022-762 et n°2022-763 du 29 avril 2022 ; décret n°2022-1312 du 13 octobre 2022), en cohérence avec la feuille de route « pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources » de 2011, et plus généralement la gestion foncière (Gitton et Fallon, 2020) ;
- (ii) l'utilisation des sols pour stocker du carbone (en lien notamment avec l'initiative 4p1000 lancée lors de la COP21 et contribuer à l'atteinte des objectifs climatiques de la France, en cohérence avec la stratégie nationale bas carbone (SNBC) de 2015 (révisée en mars 2020 et faisant l'objet actuellement d'une nouvelle révision) et en lien avec la démarche du label bas-carbone (LBC) ;
- (iii) la transition agroécologique, avec la loi n°2018-938 dite loi Egalim visant également à mieux répondre aux attentes sociétales et environnementales, et le plan stratégique national de mise en œuvre en France de la PAC 2023-2027 qui tente peu ou prou de soutenir cette transition, avec notamment l'introduction des éco-régimes dans le

- premier pilier (FEAGA), avec des mesures agro-environnementales et climatiques – MAEC – dans le deuxième pilier (FEADER)), et avec la conditionnalité des aides liées à de Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE), la plupart de ces dernières étant très liées au sol ;
- (iv) la prévention de la pollution des sols par (1) les intrants agricoles, comme les produits phytosanitaires, (2) les matières fertilisantes de synthèse (autorisations de mise sur le marché dans le code rural), (3) les effluents d'élevage (autorisation sur les additifs, notamment des oligoéléments, dans les aliments pour animaux d'élevage), (4) les déchets comme les boues de STEP (code de l'environnement, partie relative à l'eau), (5) les effluents et déchets industriels (code de l'environnement, partie relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)). A cet item peut être rattaché le volet agricole de la Feuille de Route de l'Economie Circulaire qui vise à protéger les sols agricoles lors de l'épandage de matières fertilisantes (issues ou non de déchets) ;
 - (v) la gestion des sols pollués avec la loi relative aux ICPE de 1976, la loi sur la prévention des risques technologiques et naturels et la réparation des dommages de 2003, le guide relatif aux modalités de gestion des Sites et Sols Pollués (SSP) de 2007, la prise en compte des sols dans l'article 173 de la loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (dite loi ALUR), et la gestion des sols excavés (avec des guides actualisés) ;
 - (vi) la préservation de la biodiversité avec la loi Biodiversité de 2016, le plan Biodiversité de 2018, la 3^e stratégie nationale biodiversité (SNB3) pour 2022-2030 dont un premier volet dit « SNB 1er volet pré-COP15 » est sorti, mais qui reste à finaliser après la COP15 et à décliner en feuille de route avec des mesures précises. La SNB 3 envisage notamment diverses mesures concernant les sols (notamment sa mesure 1.3 « Élaborer une stratégie nationale pour la protection et la restauration des sols ») ;
 - (vii) la limitation des contaminants dans les eaux et dans les boues de STEP apportés aux sols, avec le dispositif des agences de l'eau, en lien au niveau européen principalement avec la DCE et la DERU ;
 - (viii) la protection des sols de montagne contre l'érosion avec le Livre IV : Forêts de protection - Lutte contre l'érosion du Code forestier ;
 - (ix) la prévention de la pollution, de l'acidification et de l'eutrophisation des sols par les retombées atmosphériques (Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PRÉPA), Plans de protection de l'atmosphère (PPA), réglementation relative aux ICPE, aux émissions des véhicules à moteur, aux combustibles destinés au chauffage, etc.) ;
 - (x) la préservation, la limitation ou la compensation des impacts sur les sols des projets et des documents de pla-

nification (les évaluations environnementales et les études d'impacts doivent comprendre un volet « sol », ce volet étant malheureusement souvent négligé dans les faits).

La prise en compte des potentialités des sols agricoles, forestiers et naturels s'insère par ailleurs dans l'action foncière (paysage, urbanisation), qui intègre peu ou prou la description de la patrimonialité du sol et sa qualification socio-économique via les zonages de type Appellation d'Origine Contrôlée ou Protégée (AOC/AOP) et Indication Géographique Protégée (IGP). Elle est aussi mobilisée pour l'évaluation environnementale des documents de planification territoriale (énergie-climat, urbanisme) et les études d'impacts des projets opérationnels (aménagements, photovoltaïsme, éolien, géothermie...). Enfin, il faut noter que les potentialités des sols sont aussi intégrées dans des initiatives hors politiques publiques, par exemple celles concernant les transactions foncières ou les assurances. Les services écosystémiques auxquels contribuent les sols sont désormais inclus dans le volet ZAN de la loi Climat et Résilience ; à notre connaissance, ils ne sont pas mentionnés dans d'autres textes réglementaires français.

UNE FORTE DEMANDE D'INDICATEURS DE QUALITÉ DES SOLS POUR LES POLITIQUES PUBLIQUES

Une diversité d'attendus et un foisonnement d'initiatives

L'ambition de qualifier l'état et le fonctionnement des sols, d'évaluer leurs fonctions ou les pressions auxquelles ils sont exposés, correspond ainsi à un besoin réel et partagé de nombreuses politiques publiques. Ce besoin est aussi identifié par les professionnels du monde agricole et de l'environnement et plus largement par la société tel qu'exprimé par différentes organisations (Terre de Liens, FNE...), en soi et en lien avec l'application des politiques publiques. Cette demande fait bien écho aux politiques publiques évoquées précédemment autour des grands enjeux suivants :

- (i) la transformation des systèmes agricoles selon les principes de l'agroécologie, incluant la réduction des consommations d'eau, de pesticides et d'engrais de synthèse, la mise en exergue de fonctions assurées par l'écosystème, de la structure des sols et de leur stabilité structurale, eu égard à leur portance, de leur protection contre l'érosion, de l'infiltrabilité et de la rétention d'eau, de leur aération et la colonisation racinaire et la préservation du foncier agricole ;
- (ii) la gestion et l'adaptation des forêts dans le contexte du changement climatique, dont la gestion de la fertilité et de la portance des sols forestiers ;

- (iii) l'atténuation du changement climatique via le stockage de C dans les sols, et plus globalement via la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre, et la préservation de la biodiversité dans tous les écosystèmes (agricoles, urbains, forestiers...);
- (iv) l'aménagement rural et urbain, les changements d'usage, l'artificialisation des sols (Desrousseaux *et al.*, 2019), la restauration des sols en lien avec la reconquête agricole et des friches (pour des jardins urbains...) et la gestion des terres excavées, les restrictions d'usages des sols et l'orientation des modes de gestion;
- (v) la santé humaine en lien avec celle des écosystèmes (One Health) : plans alimentaires territoriaux, définition de valeurs seuils de contamination en lien avec la qualité des produits agricoles et la santé humaine, prise en compte d'un cumul d'expositions (exposome) etc, la responsabilité environnementale et les directives sur les émissions industrielles (cf. directive UE sur les émissions industrielles et directive UE sur les émissions nationales (NEC2).

À titre de premier exemple, dans certains cas lors d'une cessation d'activité industrielle, le site doit être remis dans un état tel qu'il ne présente plus de risque pour la santé humaine et pour l'environnement en s'adaptant à l'utilisation future selon l'approche française en vigueur d'après la directive européenne sur les émissions industrielles. À titre de deuxième exemple, la directive européenne sur les émissions nationales de certains polluants atmosphériques demande aux états membres de surveiller les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, dont l'acidification et l'eutrophisation des sols forestiers et « naturels ».

Plus généralement, tous ces enjeux demandent de qualifier les sols, leur état, leurs fonctions ou les services qu'ils rendent, leurs évolutions (changements d'états), les pressions et menaces dont ils font l'objet, et dans certains cas les impacts de leur dégradation, par des indicateurs robustes et fiables allant au-delà de leurs simples propriétés, reposant sur des bases scientifiques, transparents dans leur mode de calcul et dans la mobilisation des données.

De nombreuses initiatives des collectivités territoriales (Territoires d'innovation de la 3^e vague du Programme d'investissements d'avenir – PIA), d'instituts techniques (méthodes label bas-carbone par exemple), d'entreprises privées et d'ONG relaient ces besoins en indicateurs ou les anticipent en produisant elles-mêmes des indicateurs. Il y a un véritable bourgeonnement d'indicateurs et de multiples façons de les calculer et de les mettre en œuvre, avec des bases scientifiques plus ou moins bien explicitées. La littérature scientifique elle-même fleurit de cadres conceptuels pour définir des indicateurs (voir par exemple Andrews *et al.*, 2004 et Calzolari *et al.*, 2016), mais peu d'études ont testé leur application, démontré leur opérationnalité ou leur intérêt pour l'usage, ou bien encore discuté de leur pertinence selon l'échelle et le contexte d'usage.

Il y a donc un besoin important d'une définition de cadres de référence opérationnels, basés sur des travaux scientifiques, contextualisés et éprouvés si possible par l'usage, et sur lesquels l'ensemble des initiatives pourra s'appuyer. De tels cadres doivent inclure :

- (i) un choix d'indicateurs, avec leur contexte d'utilisation (finalité(s), échelle(s), politique publique concernée...) et leur définition;
- (ii) des méthodes, pour les construire et les calculer (choix des variables, manière de les assembler, bases de données sollicitées...);
- (iii) des cadres d'interprétation incluant des valeurs de référence, voire des seuils, qui peuvent dépendre du contexte d'étude.

Les indicateurs portant sur les sols peuvent qualifier des états réels, des états potentiels, sous réserve de changements, ou des évolutions. Le besoin de plus en plus exprimé d'évaluer des changements d'état sous condition de gestion des sols nécessite des dispositifs de surveillance bien documentés et des modèles de simulation. Par ailleurs, la production d'indicateurs s'inscrit dans une approche interdisciplinaire, tant du point de vue de la conception des indicateurs que de leur usage (*Figure 1*).

Des indicateurs de qualité des sols en lien avec la notion de services écosystémiques

Le concept de service écosystémique appliqué aux sols établit des relations, allant des propriétés des sols, aux processus et fonctions, jusqu'aux services rendus à la société ou à des acteurs spécifiques (Greiner *et al.*, 2017) (*Figure 2*; Dominati *et al.*, 2010; Fossey *et al.*, 2020). Les services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols sont nombreux (*Tableau 1*).

Un cadre conceptuel pour traiter des services écosystémiques des sols peut prendre explicitement en compte leurs usages et les modes de gestion qui les modulent (Fossey *et al.*, 2020). Il permet alors ainsi de distinguer des indicateurs de services écosystémiques effectifs (i.e., liés aux modes de gestion actuels) et des indicateurs de services écosystémiques potentiels (i.e., sous condition de gestion des sols). Les indicateurs de qualité des sols, ou de services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols peuvent être d'origines très variées. Ce sont :

- (i) des observations ou des mesures, mais la littérature scientifique souligne le faible nombre de propriétés des sols prises en compte (Adhikari et Hartemink, 2016; Ellili-Bargaoui *et al.*, 2021); il peut s'agir de données issues de recherches participatives,
- (ii) des « proxies », c'est-à-dire des mesures de variables (teneur en argiles par exemple) qui sont utilisées à la place d'autres variables dont la mesure serait trop difficile ou

Figure 1 : Modèle conceptuel connectant les arènes sociale, scientifique et politique, et les domaines anthropocentrique et environnemental (d'après Fossey et al. (2020)).

Figure 1: Conceptual model connecting social, scientific and policy arenas, and anthropocentric and environmental domains (de Fossey et al. (2020)).

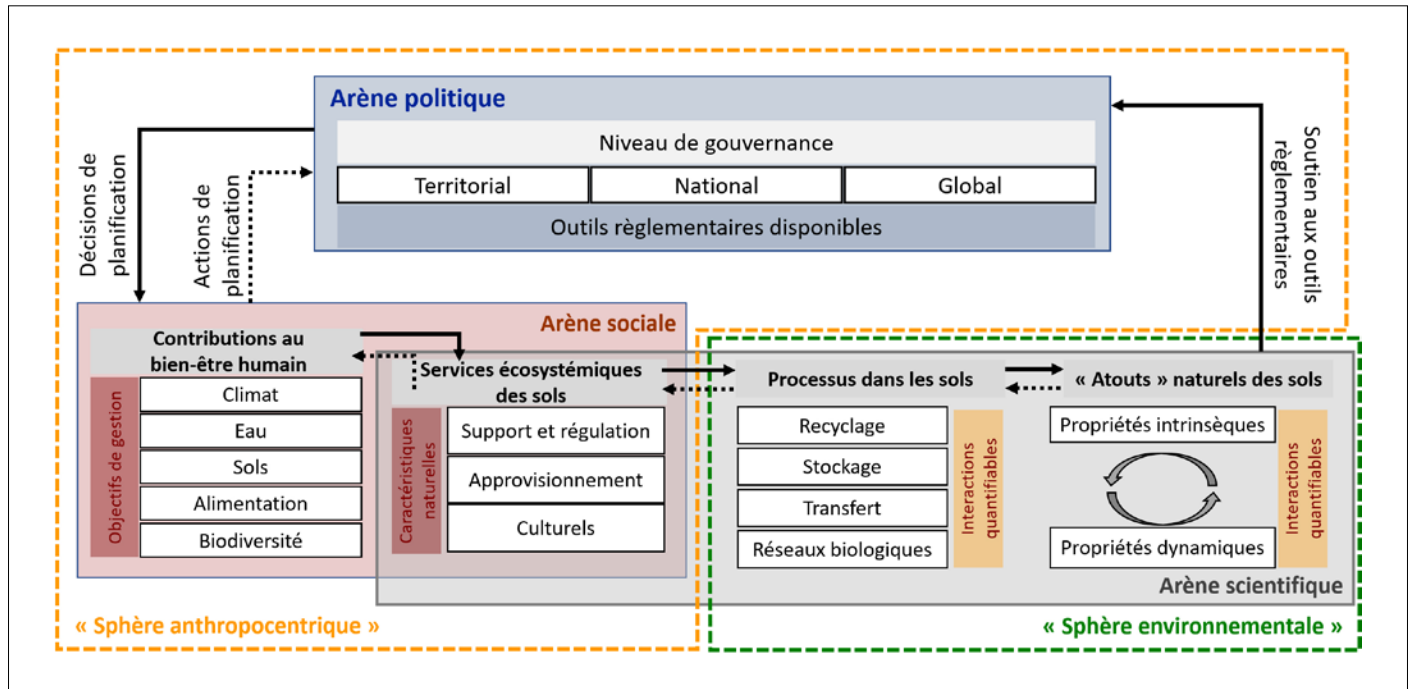


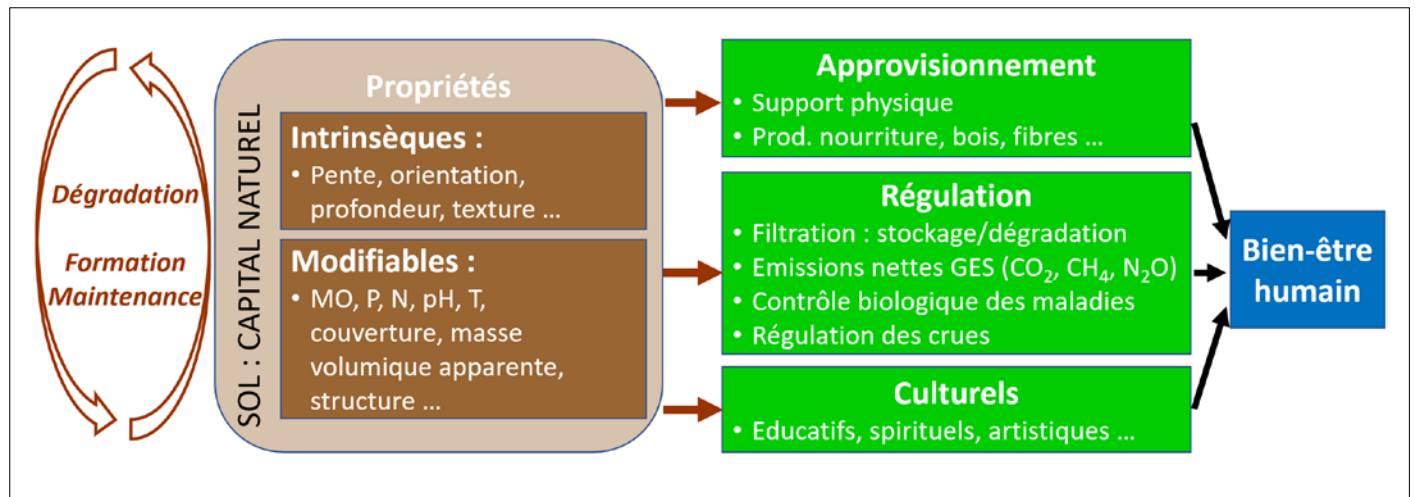
Tableau 1 : Services écosystémiques.

Table 1: Ecosystem services.

Service	Commentaire
Approvisionnement / fourniture	en aliments, bioénergies, biomatériaux, eau..., en lien avec la disponibilité en eau et en nutriments et avec les régulations biologiques (ravageurs, maladies et auxiliaires des cultures...)
	en matériaux (briques crues ou cuites, argile pour la poterie, tourbe pour les supports de culture...)
	en organismes et gènes pour l'industrie (pharmaceutique, agroalimentaire, du traitement des pollutions, bioraffinerie...)
Régulation	du climat, en lien avec le stockage de C dans le sol, les émissions nettes de gaz à effet de serre (CO ₂ , N ₂ O, CH ₄) et l'évapotranspiration
	de l'eau en quantité (régulation des risques d'inondation...) et en qualité (rétention, dégradation, purification...)
	de la qualité de l'air (particules fines formée en présence de NH ₃ , O ₃ en équilibre avec les NO _x et en lien avec la présence de composés organiques volatils dont CH ₄ ...)
Gestion et recyclage	des effluents et déchets
Support physique	pour l'activité humaine (bâtiments, routes...) et, de façon plus anecdotique, de régulation de la température dans les bâtiments
Culturels	esthétique des paysages, mémoire du passé...

Figure 2 : Passer des propriétés aux fonctions et services des sols (simplifié d'après Dominati et al., 2010).

Figure 2: From soil properties to soil services (simplified from Dominati et al., 2010).



trop onéreuse (voir par exemple Bailey et al., 2018), ou des estimations issues de fonctions de pédotransfert ou de méthodes de télédétection ou d'apprentissage, etc. (voir par exemple Diaz-Gonzalez et al., 2022).

- (iii) des valeurs simulées issues de modèles souvent fondés sur des processus. Ainsi en France, le modèle STICS a été beaucoup utilisé pour évaluer certains services écosystémiques en lien avec le fonctionnement des sols agricoles (voir par exemple Demestihis et al., 2018; Obiang Ndong et al., 2021);
- (iv) des données de différents types, fondées sur des données sols mais associant aussi des données de topographie, de climat, de paysage...

On peut distinguer des indicateurs de qualité, au sens d'état des sols (pH, masse volumique, teneur en carbone...), des indicateurs au sens de « bon état » et qui requièrent un cadre d'interprétation (potentiel de séquestration du carbone, biodiversité...), ou bien encore des jeux d'indicateurs ou des associations d'indicateurs. La plus-value de l'utilisation de plusieurs indicateurs complémentaires peut être mise en valeur dans des diagrammes de type « radar » (Calzolari et al., 2016; Kuzyakov et al., 2020). Des indicateurs intégrés, souvent appelés "soil quality index" (Andrews et al., 2004; Drobnik et al., 2018; Lima et al., 2013; Martin et al., 2016) ont aussi été proposés pour prendre en compte la multifonctionnalité des sols. Le concept de « sécurité des sols » ou *soil security* (McBratney et al., 2014) s'inscrit dans cette perspective. Il souligne l'importance de l'intégration des sols dans les politiques publiques, comme condition à leur bon déploiement (McBratney et al., 2012). Peu de développements d'indicateurs et d'étude de cas l'ont mobilisés (Yang et al., 2018).

Des indicateurs de qualité en lien avec la notion de menace ou santé des sols

Le concept de menace sur les sols est relativement ancien et vise à préserver les sols de différentes formes de dégradation. Dès 2002, la Commission de la Communauté européenne identifiait les principales menaces affectant les sols (CEC, 2002). Certaines d'entre elles ont fait l'objet d'une évaluation nationale au niveau français comme Roger-Estrade et al. (2011) pour le risque de tassement, ou Daroussin et al. (2019) pour le risque d'érosion. Les indicateurs liés aux menaces sur les sols, s'ils subsistent, sont progressivement associés, voire remplacés, par des indicateurs liés aux fonctions ou services rendus par les sols développés ci-dessus.

Le concept de santé des sols est apparu plus récemment dans la littérature scientifique. Doran et Zeiss (2000) définissent la santé des sols comme « la capacité d'un sol à fonctionner comme un système vivant essentiel pour soutenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air et promouvoir la santé des plantes et des animaux, dans les limites de l'écosystème et de l'utilisation des terres », mettant l'accent sur la biologie des sols dans le concept de santé des sols. Il est désormais présent dans les textes des politiques publiques. Ainsi, dans le plan d'implémentation européen du pacte pour des sols sains en Europe (publié en septembre 2021), la santé des sols est définie comme « la capacité continue des sols à soutenir les services écosystémiques ». Presque au même moment, la loi française « Climat et Résilience » définissait l'artificialisation des sols 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 ».

Si les concepts de qualité et de santé des sols peuvent avoir des définitions spécifiques, les différences entre ces concepts sont ténues, dépendantes des communautés de recherche et de développement. Ils se réfèrent de manière commune aux services écosystémiques associés aux sols ou aux fonctions des sols. Le terme de santé des sols est de plus en plus utilisé, parce qu'il est parlant pour le grand public, qu'il semble pertinent pour certains agriculteurs (Richelle, 2019), et qu'il fait écho à un courant actuel autour du concept de « une seule santé » (santé des hommes, des animaux, et de l'environnement, y compris les sols). C'est ainsi que le *Soil Mission Board* mis en place à l'échelle européenne l'a adopté ("*Healthy soils*" à l'horizon 2030). Certains auteurs proposent désormais de réserver le terme « qualité » aux propriétés inhérentes d'un sol, et le terme « santé » aux évaluations des propriétés dynamiques affectées par la gestion du sol (Moebius-Ciune *et al.*, 2016 ; Kibblewhite, 2018). De cette façon, les indicateurs de qualité refléteraient les propriétés intrinsèques d'un sol qui soutiennent les fonctions (écologiques), tandis que les indicateurs de santé représenteraient mieux la performance réelle de la fourniture de services (écosystémiques), dans une fourchette définie par la qualité.

VERS UN RÉFÉRENTIEL OPÉRATIONNEL D'INDICATEURS DE QUALITÉ DES SOLS

L'exemple des indicateurs de l'érosion hydrique des sols

Des travaux déjà anciens et constamment remis à jour ont permis de proposer des indicateurs de l'aléa 'érosion hydrique des sols', c'est-à-dire d'un potentiel de perte en sol. Les indicateurs relatifs à l'aléa érosion prennent en compte certaines propriétés des sols (texture, teneur en matières organiques, test de stabilité structurale...) selon la disponibilité des données, et des variables relatives à la couverture des sols, au climat et à la topographie. Ces indicateurs et les méthodes associées pour les calculer s'appuient sur des bases de données et des modèles différents selon l'échelle considérée. À l'échelle mondiale, on peut mentionner l'approche de l'USDA, et à l'échelle Européenne le modèle PESERA (Panagos *et al.*, 2020). À l'échelle nationale, le modèle MESALES a permis à INRAE de produire la première carte nationale de l'aléa érosion (Le Bissonnais *et al.*, 2002), mise à disposition par le GIS Sol, puis plus récemment la carte du service de contrôle de l'érosion (Daroussin *et al.*, 2019). À l'échelle régionale, on peut signaler un travail dans l'ex-région Languedoc-Roussillon en collaboration avec les chambres d'agriculture dans le cadre du GIS Sol et une initiative similaire en région Bretagne portée par l'Institut Agro (Colmar *et al.*, 2010), s'appuyant toutes les deux sur le modèle MESALES. Les indicateurs sont différents selon que l'on s'attache à un potentiel

de perte en sol, à une émission de particules de sol dans les cours d'eau qui fait intervenir des notions de connectivité hydraulique, à des pertes réelles en sol qui mobilisent des observations et/ou des modèles sur différents pas de temps, ou bien encore à la prévention des risques de mouvement de terrain. Dans tous ces cas, des propriétés des sols sont utilisées, mais ce ne sont pas les mêmes données ou les mêmes bases de données qui sont mobilisées, car les échelles varient, et elles ne sont pas combinées avec les mêmes données de l'environnement (climat, usages des sols...). La démarche de validation peut varier aussi, voire être associée à un dire d'experts, comme c'est par exemple le cas en Bretagne (Colmar *et al.*, 2010). Cet exemple illustre la multiplicité des questions autour du même enjeu, celui de l'érosion hydrique, puis de la multiplicité des modèles et bases de données mobilisées qu'appellent ces questions, selon les échelles et les contextes d'application.

Vers un référentiel d'indicateurs opérationnels

Le ministère en charge de l'agriculture a proposé en 2017 un « Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols ». Plus récemment, l'ADEME a engagé un travail conséquent sur l'inventaire des indicateurs de qualité des sols et des cadres dans lesquels ils pourraient être utilisés (Calvaruso *et al.*, 2019). L'Agence a aussi mis en place une animation autour des nombreux projets de recherche sur les indicateurs des fonctions et services des sols, pour favoriser une convergence des approches et une offre pour les gestionnaires. INRAE a engagé des travaux de recherche pour qualifier les sols depuis plusieurs dizaines d'années, mobilisant depuis 2010 le cadre conceptuel des services écosystémiques. Différents projets, à différentes échelles et dans différents contextes, ont porté sur la caractérisation des états et des menaces et, plus récemment, des fonctions et services des sols (sans être exhaustif, on peut citer les projets européens Landmark, puis plus récemment SIREN et PREPSOIL, le projet ANR Soilserv, les projets du Cerema MUSE et DESTISOL, l'étude INRAE EFESE-EA (Tibi et Théron, 2017)). Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications et d'applications avec des partenaires (conseils régionaux, métropoles, etc.).

Le GIS Sol a lui-même soutenu depuis quelques années la construction et le déploiement d'indicateurs de certaines fonctions des sols, à partir de mesures et d'observations réalisées sur différentes propriétés des sols (concentrations en contaminants, nutriments, carbone organique, pH), de la végétation et du milieu (géologie, topographie) (Antoni *et al.*, 2011). Des travaux ont été développés sur des indicateurs comme l'aléa érosion, le réservoir en eau utilisable ou la biodiversité des sols.

Tous ces projets montrent que l'agrégation de propriétés des sols demande une expertise importante sur les

modèles ainsi que sur les bases de données à mobiliser. Les bases scientifiques, la cohérence des modèles et des données associées, la transparence de la méthodologie, la compréhension des fondements et l'opérationnalité de la mise en œuvre sont des critères importants pour développer ces indicateurs. Ces derniers commencent à intégrer de mieux en mieux les incertitudes, ce qui constitue encore un champ de recherche (Benke *et al.*, 2022 ; Robinson *et al.*, 2018 ; Wesseling *et al.*, 2020).

Une première réflexion a été développée dans le cadre des instances du GIS Sol et la coordination d'une étude a été confiée à la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d'INRAE, pour développer un référentiel en appui aux politiques publiques jugées par les financeurs de l'étude (ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture, ADEME et OFB) comme prioritaires. Les grandes lignes du cahier des charges sont les suivantes : faire l'inventaire et l'analyse des politiques publiques ayant trait à la protection des sols et/ou susceptibles d'avoir des impacts indirects sur les sols et des productions scientifiques pouvant éclairer ces politiques publiques ; identifier les indicateurs disponibles, les lacunes et les besoins sur quelques thématiques prioritaires ; produire un référentiel d'indicateurs sur ces thématiques, tant en termes d'objectif des indicateurs thématiques que d'échelles ; déployer de manière opérationnelle quelques indicateurs. Cette élaboration d'un cadre de référence opérationnel d'indicateurs de qualité de sols ne s'inscrit pas dans une approche normative ; bien au contraire, elle devra constituer une aide au choix des modèles et des données en s'appuyant sur des exemples d'utilisation, illustrant les atouts et les limites des approches utilisées. Cette étude a été lancée en 2022 et sera rendue courant 2024.

CONCLUSIONS

En raison de leur importance pour l'Homme et la Terre ainsi que des pressions sans précédents qui s'exercent sur eux, les sols sont de mieux en mieux intégrés dans les politiques publiques internationales, européennes, nationales et territoriales. Au niveau européen, cette intégration peut se faire comme proposé dans le plan de mise en œuvre de la Mission « Un pacte pour des sols sains en Europe » en combinant quatre types d'actions : (i) le renforcement des compétences et des connaissances pour la gestion des sols, (ii) la cocréation et la valorisation d'innovations locales pour améliorer la santé des sols partout, (iii) le développement de la surveillance des sols, et (iv) des interactions accrues avec la communauté des utilisateurs des sols et la société dans son ensemble.

Cette stratégie va de pair avec un besoin récurrent et très large d'indicateurs de qualité et/ou de santé des sols, ces deux concepts devant être considérés comme proches et liés au souci

de mieux communiquer sur les sols auprès de la société. Au vu du foisonnement actuel d'initiatives issues d'acteurs très divers dans le domaine du suivi de la santé des sols, et en prévision d'une probable stratégie globale prochaine à l'échelle de l'Union européenne pour la protection et l'utilisation durable des sols, voire pour la restauration des sols dégradés, il est nécessaire de fiabiliser les indicateurs et leur mode d'interprétation et d'aller dans la mesure du possible vers une harmonisation des propositions.

Le GIS Sol peut et doit jouer un rôle de référent dans l'inventaire, le partage d'informations, et pour partie la production opérationnelle d'indicateurs. Le défi pour le GIS Sol est triple : (i) passer d'une offre de données sur les propriétés morphologiques, physiques, chimiques et biologiques des sols à une offre de données sur des indicateurs de fonctions et de services des sols ; (ii) passer d'une offre de données à un référentiel de modèles, à mettre en œuvre pour estimer ces indicateurs, et à un cadre d'aide et d'interprétation à leur usage ; et (iii) proposer une offre plus opérationnelle et plus adaptée aux contextes territoriaux d'application pour le développement de ces indicateurs. Cette trajectoire répond à la demande sociétale. Elle impliquera la collaboration avec de nombreux acteurs (élus et services de l'État aux échelles nationale, territoriale et locale ; propriétaires, gestionnaires et exploitants de sols ; ONG diverses), ce dont le GIS Sol a l'expérience et le savoir-faire.

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>).
- Alliance Environnement (2020). Étude de soutien à l'évaluation de l'impact de la PAC sur la gestion durable des sols ; Résumé exécutif. 16 pp. (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bb039be3-6698-11eb-aeb5-01aa75ed71a1/language-fr>).
- Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1945-1962.
- Bach E.M., Ramirez K.S., Fraser T.D., Wall D.H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12, 2662. (<https://doi.org/10.3390/su12072662>).
- Bailey V.L., Bond-Lamberty B., DeAngelis K., Grandy A.S., Hawkes C.V., Heckman K., Lajtha K., Phillips R.P., Sulman B.N., Todd-Brown K.E.O., Wallenstein M.D. (2018). Soil carbon cycling proxies: Understanding their critical role in predicting climate change feedbacks. *Global Change Biology*, 24, 895-905. (DOI:10.1111/gcb.13926).
- Bellec P., Lavarde P., Lefebvre L., Madignier M.L. (2015). Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. Rapport CGEDD n°010068-01 et CGAAER n°14135 (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt), 136 pp.
- Benke K., Robinson N., Norng S., Rees D., O'Leary G. (2022). Epistemic uncertainties in the assessment of regional soil acidification. *Environments*, 9, 97. (<https://doi.org/10.3390/environments9080097>).
- Bertrand M. (2018). La protection des sols dans le cadre de l'Union européenne.

- Sciences de l'Homme et Société. Université Lyon 3 J. Moulin, 2018. fftet-02573013 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02573013/document>).
- Billet P. (2017). De la source au puits : aspects juridiques de la protection des sols dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. *Revue Juridique de l'Environnement*, HS17, 215-227. (<https://www.cairn.info/revue-juridique-de-l-environnement-2017-HS17-page-215.htm>).
- Billet P. (2018). The land's legal status pertaining to human uses: An inventory and prospects. *Annales des Mines-Responsabilité et Environnement*, 91, 24-28.
- Blanchart A., Sere G., Cherel J., Warot G., Stas M., Consaes J.N., Schwartz C. (2017). Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain – une revue. *Environnement Urbain / Urban Environment*, 11 (<http://journals.openedition.org/eue/1809>).
- Boer B.W., Ginzky H., Heuser I.L. (2017). International soil protection law: history, concepts and latest developments. In: Ginzky H., Heuser I., Qin T., Ruppel O., Wegerdt P. (Eds.) *International Yearbook of Soil Law and Policy 2016*. Springer, Cham (https://doi.org/10.1007/978-3-319-42508-5_7).
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem van Groenigen J., Brussaard L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S. (2019). Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 pp.
- Calzolari C., Ungaro F., Filippi N., Guermandi M., Malucelli F., Marchi N., Staffilani F., Tarocco P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261,190-203. (<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (1986). Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, 181, 6-12 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=FR>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (1991). Directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, 375, 1-8 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FRA/TXT/?uri=celex:31991L0676>).
- CCE - Conseil des Communautés européennes (2006). Proposition de Directive du parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE (présentée le 22.9.2006 par la Commission). COM (2006) 232 final. 31 p. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232&from=FR>).
- CE - Conseil de l'Europe (1972). Charte européenne des sols. Conseil de l'Europe, Strasbourg, août 1972. *Revue Juridique de l'Environnement*, n°3-4, 1976. Travaux du premier Congrès de la SFDE (Strasbourg, les 6, 7 et 8 mai 1975), 421-424. (https://www.persee.fr/doc/rjenv_0397-0299_1976_num_1_3_1185).
- CE - Commission Européenne (2006a). Soil protection—the story behind the strategy. 26 pp. (<https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/soilight.pdf>).
- CE - Commission Européenne (2006b). Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE, COM (2006) 232 final, Bruxelles, 25 septembre 2006.
- CE - Commission Européenne (2012). Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions ; Mise en œuvre de la stratégie thématique en faveur de la protection des sols et activités en cours. 17 pp. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0046&from=EN>).
- CEC - Commission of the European Communities (2002). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the economic and social committee and the Committee of the Regions; Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. 35 pp. (Brussels, 16.4.2002, COM(2002) 179 final). (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52002DC0179&from=EN>).
- Chen Y. (2019). Withdrawal of European Soil Framework Directive: Reasons and recommendations. *Journal of Sustainable Development*, 13, 1. (DOI:10.5539/jsd.v13n1p1).
- CMCE - Comité des Ministres du Conseil de l'Europe (1972). Charte européenne des sols. Résolution (72)19 adoptée le 30 mai 1972 lors de la 211e réunion des Délégués des Ministres. 5 pp. (<https://rm.coe.int/CoERMPublicCommonSearchServices/DisplayDCTMContent?documentId=09000016804e57ea>).
- Colmar A., Walter C., Le Bissonnais Y., Daroussin J. (2010). Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. *Etude et gestion des sols*, 17, 19-32.
- Cuyppers S., Randier C. (2009). L'application juridique de la convention sur la protection des Alpes : la situation en Allemagne, Autriche, France, Italie et Slovénie. *Revue Européenne de Droit de l'Environnement*, 13, 3-32.
- Daroussin J., Cousin I., Tibi A., Le Bissonnais Y., Girardin A., Meillet A., Choler P., Therond O. (2019). Evaluating the "Soil stabilisation and control of erosion" ecosystem service provided by agricultural ecosystems over the French territory. *Global Symposium on Soil Erosion, FAO Conference* (<https://www.fao.org/3/ca5582en/CA5582EN.pdf>).
- Degron R. (2020). Les Objectifs de développement durable 2015-2030 : Un cadre international d'actions sous forte contrainte financière. *Gestion & Finances Publiques*, 3, 72-82. (DOI:10.3166/gfp.2020.3.009).
- Demestihias C., Plénet D., Génard M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Launay M., Ripoché D., Beaudoin N., Simon S., Charreyron M., Raynal C., Lescourret F. (2018). Analyzing ecosystem services in apple orchards using the STICS model. *European Journal of Agronomy*, 94, 108-119. (<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.009>).
- Dey S., Bhattacharyya R. (2019). The mycorrhizosphere effect on pedogenesis and terrestrial biomes. In : Varma A, Choudhary D.K. (Eds.) *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*, pp. 275-296. Springer, Singapore.
- Desrousseaux M., Schmitt B., Billet P., Béchet B., Bissonnais Y.L., Ruas A. (2019). Artificialised land and land take: What policies will limit its expansion and/or reduce its impacts? In Ginzky H., Dooley E., Heuser I.L., Kasimbazi E., Markus T., Qin T. (Eds.) *International Yearbook of Soil Law and Policy 2018*, pp. 149-165. Springer, Cham.
- Destoumieux-Garzón D., Mavingui P., Boetsch G., Boissier J., Darriet F., Duboz P., Fritsch C., Giraudoux P., Le Roux F., Morand S., Paillard C., Pontier D., Sueur C., Voituren Y. (2018). The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Frontiers in Veterinary Sciences*, 5, 14. (DOI:10.3389/fvets.2018.00014).
- Diaz-Gonzalez F.A., Vuelvas J., Correa C.A., Vallejo V.A., Patino D. (2022). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review. *Ecological Indicators*, 135, 108517. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>).
- Dominati E., Patterson M., Mackay A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69, 1858-1868.
- Doran J.W., Parkin T.B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In: Doran J.W., Jones A.J., *Methods for Assessing Soil Quality*, Soil Science Society of America Special Publications 49, pp. 25-37.
- Doran J.W., Zeiss M.R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11.
- Drobnik T., Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A. (2018). Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(1), 151-169. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>).
- Elli-Bargaoui Y., Walter C., Lemerrier B., Michot D. (2021). Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field

- measurement of soil properties. *Ecological Indicators*, 121, 107211. (<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211>).
- FAO (1981). World soil charter, 8 pp.
- FAO (2015). Charte mondiale des sols révisée. (juin 2015), 12 pp.
- FAO (2021). L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde - Des systèmes au bord de la rupture. Rapport de synthèse 2021. Rome. 93 pp. (<https://doi.org/10.4060/cb7654fr>)
- Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Oudou C., Jaffrezic A., Pérès G., Besse C., Walter C. (2020). A framework to consider soil ecosystem services in territorial planning. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 28. (<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028>).
- Ganugi P., Masoni A., Pietramellara G., Benedettelli S. (2019). A review of studies from the last twenty years on plant–arbuscular mycorrhizal fungi associations and their uses for wheat crops. *Agronomy*, 9, 840.
- Gavrillescu M. (2021). Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13, 2746. (<https://doi.org/10.3390/w13192746>).
- GIS Sol. (2011). Synthèse sur l'état des sols de France. Paris, FRA : Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols. 28 pp.
- Gitton C., Fallon G. (2020). Étude de parangonnage sur les dispositifs d'information concernant la qualité des sols agricoles. Rapport CGEDD 013156-01 et CGAAER n° 19104, 92 pp.
- Grubb M., Koch M., Thomson K., Sullivan F., Munson A. (2019). The 'Earth Summit' Agreements: A Guide and Assessment. An Analysis of the Rio '92 UN Conference on Environment and Development. Routledge Library Editions: Environmental Policy, 202 pp.
- Heinen R., Biere A., Harvey J.A., Bezemer T.M. (2018). Effects of soil organisms on aboveground plant-insect interactions in the field: Patterns, mechanisms and the role of methodology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 106. (<https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00106>).
- IPBES (2018). The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Rounsevell, M., Fischer, M., Torre-Marín Rando, A. and Mader, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 894 pp.
- Jourda G., Pellevat C. (2021). Proposition de résolution en application de l'article 73 quinquies du Règlement, demandant la relance du processus d'élaboration d'une directive européenne sur la protection des sols et la prévention de leur dégradation par les activités industrielles et minières. 35 p. Rapport n°698 (2020-2021) déposé le 17 juin 2021. (<http://www.senat.fr/rap/120-698/120-698.html>).
- Kibblewhite M.G. (2018). Soil and soil health: an overview (evolution and definitions of soil health concepts). In: Reicosky D. (Ed.), *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture*. Volume 1: Fundamentals. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, 14 pp.
- Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K., Tian J., Luo Y., Xu X.L., Yudina A., Aponte H., Alharbi H., Ovspeyan L., Kurganova I., Ge T.D., Guillaume T. (2020). New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7, 282-288. (<https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>).
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Lima A.C.R., Brussaard L., Totola M.R., Hoogmoed W.B., de Goede R.G.M. (2013). A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194-200. (<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>).
- Maréchal A., Jones A., Panagos P., Belitrandi D., De Medici D., De Rosa D., Martin Jimenez J., Koeninger J., Labouyrie M., Liakos L., Lugato E., Matthews F., Montanarella L., Muntwyler A., Orgiazzi A., Scarpa S., Schillaci C., Wojda P., Van Liedekerke M., Simoes Vieira D. (2022). EU Soil Observatory 2021, EUR 31152 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, DOI:10.2760/582573.
- Martin E., Bispo A., Chenu C., Corson M.S., Keller C., Podesta G., Robert S., Sapjanskas J. (2016). Des outils intégrés d'aide à la décision pour une meilleure gestion des sols. In: Bispo A, Guellier C., Martin E., Sapjanskas J., Soubelet H., Chenu C. (Coord.) *Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable*, Quae, pp.285-310.
- McBratney A., Field D.J., Koch A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>).
- McBratney A.B., Minasny B., Wheeler I., Malone B.P. (2012). Frameworks for digital soil assessment. In: Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. (Eds.), *Digital Soil Assessment and Beyond*. Taylor & Francis Group, London, pp. 9-14.
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shaylor H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. (2016). Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY, 123 pp.
- Morand S., Guégan J.-F., Laurans Y. (2020). De *One Health* à *Ecohealth*, cartographie du chantier inachevé de l'intégration des santé humaine, animale et environnementale. Iddri, Décryptage n°04/20.
- Obiang Ndong G., Villerd J., Cousin I., Therond O. (2021). Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France. *Science of the Total Environment*, 764, 142815. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142815>)
- Obst C.G. (2015). Reflections on natural capital accounting at the national level: Advances in the system of environmental-economic accounting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 6, 315-339. (DOI:10.1108/SAMPJ-04-2014-0020).
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2001). Environmental indicators for agriculture; Methods and results. Executive Summary. OECD Publications, Paris (France).
- ONU. (2016). Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale, 2012. 377 pp. (https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seearev/cf_trans/seea_cf_final_fr.pdf).
- Panagos P., Montanarella L., Barbero M., Schneegans A., Aguglia L., Jones A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, e00510.
- Panagos P., Ballabio C., Poesen J., Lugato E., Scarpa S., Montanarella L., Borrelli P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European Union. *Remote Sensing* 12, 1365 (<https://doi.org/10.3390/rs12091365>).
- Parson E.A., Haas P.M., Levy M.A. (1992). A summary of the major documents signed at the Earth Summit and the Global Forum. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 34, 12-36. (<https://doi.org/10.1080/00139157.1992.9931468>)
- Pedersen J.S.T., Santos F.D., van Vuuren D., Gupta J., Coelho R.E., Aparicio B.A., Swart R. (2021). An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. *Global Environmental Change*, 66, 102199. (<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199>).
- Pellerin S., Bamière L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinaël R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.I., Guenet B., Houot S., Klump K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Grateau R., Le Perche S., Savini I., Réchauchère O. (2020). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude. Étude réalisée pour l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. INRA, 528 pp. hal-03163517.
- Richelle L. (2019). De la fertilité des sols à la santé de la terre. Retour sur un processus d'apprentissage collectif visant l'évaluation de la santé des sols cultivés en agriculture paysanne. Thèse de l'Université de Namur, 639 pp.

- Robinson N., Norrg S., Rees D.B., Benke K.K., Davey M. (2018). Assessment of error sources in measurements of field pH: effect of operator experience, test kit differences, and time-of-day. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49, 269-285. (DOI:10.1080/00103624.2017.1395442).
- Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Baranger E., Bartoli M., Boizard H., Brêthes A., Brisson N., Capowiez Y., Chanzy A., Chaplain V., Cousin I., Cosenza P., Cui K., Cui Y.J., Debuisson D., Défossez P., Gérard F., Jayet P.A., Labreuche J., Le Bas C., Lefèvre Y., Léonard J., Lévêque E., Lévêque F., Mary B., Mumen M., Ranger J., Tabbagh A., Tabbagh J., Tang A.M., Tessier D., Richard G. (2011). Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 187-199.
- Smith P., Cotrufo M.F., Rumpel C., Paustian K., Kuikman P.J., Elliott J.A., McDowell R., Griffiths R.I., Asakawa S., Bustamante M., House J.I., Sobocká J., Harper R., Pan G., West P.C., Gerber J.S., Clark J.M., Adhya T., Scholes R.J., Scholes M.C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil*, 1, 665-685. (<https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>).
- Tibi A., Théron O. (2017). Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFES. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 118 pp.
- Tóth Z. (2018). International dimensions of EU soil policy—the main binding and non-binding legal instruments. *Hungarian Journal of Legal Studies*, 59, 290-303. (DOI:10.1556/2052.2018.59.3.4).
- UNEP (2016). Unlocking the Sustainable Potential of Land Resources: Evaluation Systems, Strategies and Tools. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. Herrick J.E., Arnalds O., Bestelmeyer B., Bringezu S., Han G., Johnson M.V., Kimiti D., Yihe Lu, Montanarella L., Pengue W., Toth G., Tukahirwa J., Velayutham M., Zhang L., 89 pp.
- Vaillancourt J.G. (2002). Action 21 et le développement durable. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 3 (<https://doi.org/10.4000/vertigo.4172>).
- Veerman C., Correia T.P., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Cienciala E., Emmett B., Frison E.A., Grand A., Filchew L.H., Kriauciūnienė Z., Pogrzeba M., Soussana J.-F., Vela Olmo C., Wittkowski R. (2020). Caring for soil is caring for life: ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate: interim report of the mission board for soil health and food, 52 pp. (https://ec.europa.eu/info/publications/caring-soil-caring-life_en).
- Verboom W.H., Pate J.S. (2013). Exploring the biological dimension to pedogenesis with emphasis on the ecosystems, soils and landscapes of southwestern Australia. *Geoderma*, 211, 154-183. (10.1016/j.geoderma.2012.03.030).
- Verheijen F.G.A., Jones R.J.A., Rickson R.J., Smith C.J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94, 23-38.
- Wesseling J., Kroes J., Campos Oliveira T., Damiano F. (2020). The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part I: Theory, methods and case descriptions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105054. (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105054>).
- Yang R.-M., Minasny B., Ma Y.-X., Field D., McBratney A., Wu C.-F. (2018). A preliminary soil security assessment of agricultural land in middle-eastern China. *Soil Use and Management*, 34, 584-596 (<https://doi.org/10.1111/sum.12463>).
- Young I.M., Blanchart E., Chenu C., Dangerfield M., Fragoso C., Grimaldi M., Ingram J., Monrozier L.J. (1998). The interaction of soil biota and soil

