

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/345671267>

# Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ?

Article · November 2020

CITATIONS

7

READS

2,773

6 authors, including:



**Calvaruso Christophe**

EcoSustain, Environmental Engineering Office

151 PUBLICATIONS 2,004 CITATIONS

SEE PROFILE



**Anne Blanchart**

University of Lorraine

16 PUBLICATIONS 134 CITATIONS

SEE PROFILE



**Sophie Bertin**

Startup

12 PUBLICATIONS 38 CITATIONS

SEE PROFILE



**Antoine Pierart**

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

53 PUBLICATIONS 1,147 CITATIONS

SEE PROFILE

# Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ?

Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs

Ch. Calvaruso<sup>(1\*)</sup> et A. Blanchart<sup>(2\*)</sup>, S. Bertin<sup>(3)</sup>, C. Grand<sup>(4)</sup>, A. Pierart<sup>(4)</sup>  
et T. Eglin<sup>(4)</sup>

- 1) EcoSustain, Bureau d'études et conseils en diagnostic environnemental et gestion des écosystèmes, Recherche et Développement, 31, rue de Volmerange, Kanfen, 57330, France.
- 2) Sol &co, Bureau d'études et de conseils en gestion des sols urbains, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.
- 3) Ekolog, Société de conseil, recherche et formation en environnement, Plateforme 39, 39 boulevard de Magenta, 75010 Paris, France.
- 4) ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 20 avenue du Grésillé, 49000 Angers, France.

\* Ces deux auteurs ont contribué de manière équivalente à la rédaction de cet article  
Auteur correspondant : [chriscalva@hotmail.com](mailto:chriscalva@hotmail.com)

## RÉSUMÉ

Le sol est une ressource non renouvelable et limitée qui assure des bienfaits essentiels à la viabilité des sociétés humaines (e.g. production de denrées alimentaires, régulation du changement climatique, habitat pour la biodiversité). Mais le sol est un milieu fragile, menacé en de nombreux endroits, principalement du fait des activités humaines (e.g. aménagements fonciers, pratiques sylvicoles et agricoles, pollutions) qui peuvent modifier son état, dégrader certaines de ses fonctions et affecter les services qu'il peut fournir. Il est donc urgent d'agir pour préserver cette ressource. Le présent article vise à encourager le déploiement à large échelle d'outils de diagnostic permettant d'évaluer l'état et le fonctionnement des sols et de guider les gestionnaires des sols forestiers, agricoles et urbains vers le choix d'usages et de pratiques adaptés et durables. Les objectifs sont d'identifier et d'analyser les différents paramètres de la qualité des sols puis de construire de manière collaborative un outil de diagnostic pour l'évaluation de l'ensemble des fonctions qu'ils fournissent et des services qui y sont liés. Dans cette optique, un recueil de la connaissance existante sur ces thématiques a été réalisé grâce à une analyse de la littérature et des entretiens avec différents experts. En parallèle, une articulation de ces connaissances scientifiques dans un dialogue pluridisciplinaire et interactif avec des professionnels et des acteurs de la recherche et du développement a été conduite lors d'ateliers de

Comment citer cet article :

*Calvaruso Ch. et Blanchart A., Bertin S., Grand C., Pierart A. et Eglin T., 2021 - Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ? Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs Etude et Gestion des Sols, 28, 3-29*

Comment télécharger cet article :

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>

Comment consulter/télécharger

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

co-construction, afin d'élaborer des outils qui soient pertinents pour l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols et qui répondent également aux besoins des utilisateurs potentiels de ces outils. Un jeu de paramètres pouvant être mobilisé lors de la réalisation d'un diagnostic de la qualité des sols et pouvant se décliner sous la forme de différents outils de diagnostic en fonction du contexte et des objectifs de gestion est proposé.

### **Mots-clés**

Multifonctionnalité des sols, paramètres du sol, atelier participatif, sol urbain, sol agricole, sol forestier

### **SUMMARY**

#### **WHICH SOIL PARAMETERS TO MEASURE FOR ASSESS SOIL FUNCTIONS AND ASSOCIATED ECOSYSTEM SERVICES? LITERATURE REVIEW AND PARAMETER SELECTION THROUGH PARTICIPATORY WORKSHOPS**

*The soil is a non-renewable and limited resource that fulfils a multitude of functions and contributes to a range of environmental services essential for the sustainability of human societies (e.g. food production, climate change regulation, biodiversity habitat). Soil is now threatened in many places, mainly due to human activities (e.g. land use, forestry and agricultural practices, pollution) that can change this state, degrade some of its functions and affect the ecosystem services provided. It is urgent to take action to preserve this resource. This paper is in line with this objective and aims to promote the wide-scale deployment of diagnostic tools that make it possible to assess the condition and functioning of soils and to guide soil stakeholders towards the choice of adapted and sustainable land-use and practices. The objectives of this paper are to identify and analyze the different indicators of the soil quality then to build in a collaborative way a diagnostic tool to assess all soil functions. To meet these objectives, a collection of existing knowledge on these themes was compiled through a literature review and interviews. In parallel, an articulation of this scientific knowledge in a multidisciplinary and co-constructed dialogue with "field actors" was conducted during workshops, in order to build tools that are both relevant for the evaluation of the overall functioning of the soil and that meet the needs of potential users of these tools. A set of soil parameters that can be mobilized for a diagnosis of the multifunctional soil quality and that can take the form of different diagnostic tools depending on the context and management objectives is proposed.*

### **Key-words**

Soil multifunctionality, soil parameters, participatory workshops, urban, agricultural and forest soils

### **RESUMEN**

#### **¿QUÉ PARÁMETROS DEL SUELO MEDIR PARA EVALUAR LAS FUNCIONES Y LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS? REVISTA DE LA LITERATURA Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS EN TALLERES PARTICIPATIVOS.**

*El suelo es un recurso no renovable y limitado que asura beneficios esenciales a la viabilidad de las sociedades humanas (e.g. producción de bienes alimenticios, regulación del cambio climático, hábitat para la biodiversidad). Pero el suelo es un medio frágil, amenazado en numerosos lugares, principalmente del hecho de las actividades humanas (e.g. ordenación de tierras, prácticas silviculturas y agrícolas, contaminaciones) que pueden modificar su estado, deteriorar ciertas de sus funciones y afectar los servicios que pueden prestar. Es urgente actuar para preservar este recurso. El presente artículo quiere fomentar el despliegue a larga escala de herramientas de diagnóstico que permite evaluar el estado y el funcionamiento de los suelos y guiar los gestores de los suelos forestales, agrícolas y urbanos hacia la elección de usos y de prácticas adaptados y sostenibles. Los objetivos son identificar y analizar los diferentes parámetros de la calidad del suelo luego construir de manera colaborativa una herramienta de diagnóstico para la evaluación del conjunto de las funciones que prestan y de servicios relacionados. En esta óptica, se realizó una recopilación del conocimiento existente sobre estas temáticas mediante un análisis de la literatura y entrevistas con diferentes expertos. En paralelo, se desarrolló una articulación de estos conocimientos científicos en un diálogo pluridisciplinario e interactivo con profesionales y actores de la investigación y del fomento durante talleres de co-construcción, para elaborar herramientas que sean pertinentes para la evaluación de la calidad multifuncional de los suelos y que responden igualmente a las necesidades de los usuarios potenciales de estas herramientas. Se propone un juego de parámetros que pueden ser movilizados durante la realización de un diagnóstico de la calidad de los suelos y que pueden declinarse bajo forma de diferentes herramientas de diagnóstico en función del contexto y de los objetivos de gestión.*

### **Palabras clave**

Multifuncionalidad de los suelos, parámetros del suelo, talleres participativos, suelos urbanos, agrícolas y forestales

## INTRODUCTION

Le sol est un maillon central du fonctionnement des écosystèmes et des cycles de l'eau, de l'air et des éléments, et est un écosystème en tant que tel (Tilman, 1999). Il est porteur de multiples fonctions (e.g. rétention de l'eau et des nutriments) qui sont à l'origine de nombreux services pour les sociétés humaines (e.g. approvisionnement) (de Groot *et al.*, 2002; Schindelbeck *et al.*, 2008; Dominati *et al.*, 2010; Adhikari et Hartemink, 2015). À l'échelle de la vie humaine, le sol est une ressource non renouvelable et menacée, principalement du fait des activités humaines. Le rapport du GIEC « Changement climatique et terres émergées » rappelle que les trois quarts de la surface du sol subissent notre exploitation et/ou notre occupation et qu'un quart est déjà considéré comme dégradé (IPCC, 2019). La Food and Agriculture Organisation (FAO) parle même de 33 % des terres dégradées (FAO et ITPS, 2015). Dix menaces majeures pèsent ainsi actuellement sur les sols: l'érosion (éolienne et hydrique), la perte de biodiversité et de carbone organique, la pollution, l'imperméabilisation, la compaction, la salinisation, l'engorgement, l'acidification et le déséquilibre des éléments nutritifs (FAO et ITPS, 2015).

Cette dégradation des sols pourrait être stoppée voire inversée pour certaines d'entre elles, telles que la perte de carbone organique ou l'imperméabilisation, si les politiques publiques prennent l'initiative de promouvoir des pratiques de gestion durable de cet écosystème (IPCC, 2019). En effet, si l'eau et l'air font l'objet de directives cadres au niveau européen, il n'existe pas d'équivalent pour les sols. Bien que la préservation des sols soit parfois considérée dans les politiques visant à lutter contre le changement climatique et à améliorer la qualité de l'air, et que les lois et les objectifs d'aménagement évoluent, force est de constater que la considération des sols se limite le plus souvent à leur caractère pollué (Yoshida, 2002), s'abstrayant de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques (Blanchart, 2018). Dans l'optique de promouvoir une gestion durable des sols, il est indispensable de proposer aux gestionnaires et propriétaires des sols à enjeux de production de biomasse (dont alimentaire) et à enjeux environnementaux, des méthodes permettant d'évaluer l'état des fonctions de leurs sols et des services écosystémiques auxquels ils contribuent pour *in fine* adapter leurs pratiques et leur mode de gestion. Ces notions pourraient ainsi être mobilisées pour orienter les pratiques agricoles ou sylvicoles (Schulte *et al.*, 2015) mais également au niveau de l'affectation des sols à tel ou tel usage, par exemple *via* les documents d'urbanisme (Keller *et al.*, 2012).

Cet article synthétise les résultats présentés dans deux études complémentaires menées pour l'ADEME (Blanchart *et al.*, 2019; Calvaruso *et al.*, 2019) visant (i) à faire un état des lieux des démarches de diagnostics de la qualité des sols applicables en parcelles forestières, agricoles et urbaines, en identifiant les paramètres du sol les plus consensuels et (ii) à préciser les stratégies pour favoriser le déploiement de ces démarches. Le cadre de l'étude est une approche multifonctionnelle de la qualité des sols,

c'est-à-dire visant à diagnostiquer l'état des différentes fonctions du sol. Les études ont été conduites en deux étapes :

- une revue de la littérature internationale sur les paramètres mesurables du sol et les démarches de diagnostic proposés pour l'évaluation des fonctions des sols et des services écosystémiques associés ;
- des ateliers participatifs visant à préciser la terminologie sur les fonctions et services, et à identifier une liste commune de paramètres déjà utilisables. Ces ateliers ont impliqué une diversité de professionnels et de chercheurs travaillant sur les sols forestiers, agricoles et urbains au niveau français.

En l'absence d'une terminologie stabilisée dans le domaine de l'évaluation de la qualité des sols, l'*encadré 1* propose des définitions pour les principaux termes utilisés dans cet article.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Cadre d'analyse

Pour identifier les fonctions et les services rendus par les sols ainsi que les paramètres pertinents pour évaluer ces fonctions, nous nous sommes appuyés sur le cadre conceptuel développé par le TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), en complément de celle du Millenium Ecosystem Assessment (MEA). Celui consiste à lier des propriétés (chimiques, physiques et biologiques) et des processus clés du sol à des fonctions du sol qui sont elles-mêmes liées aux services écosystémiques et aux bénéfices induits (*figure 2*).

### Revue de littérature

La revue de littérature a porté sur plus de 200 articles (voir liste dans Calvaruso *et al.*, 2019; <https://www.ademe.fr/diagnostic-qualite-sols-agricoles-forestiers>), dont plusieurs synthèses bibliographiques, et plus de 50 projets (achevés ou en cours) ont été consultés. La liste des projets analysés est présentée en *annexe I*. Plus de détails sont disponibles dans Blanchart *et al.* (2019) et Calvaruso *et al.* (2019).

### Ateliers de co-construction

#### **Ateliers de co-construction avec des acteurs professionnels de la gestion des sols agricoles et des sols forestiers**

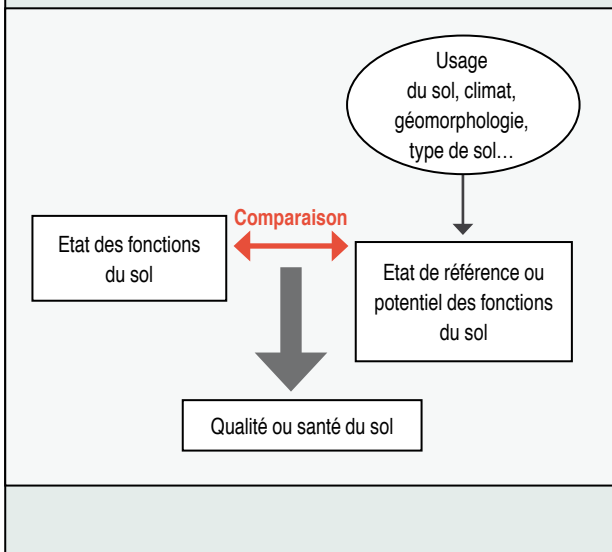
Ces ateliers avaient pour principal objectif d'identifier un jeu ou plusieurs jeux de paramètres minimum pouvant être mobilisés par les professionnels dans une démarche de diagnostic des fonctions des sols agricoles et forestiers. Dans l'objectif de regrouper un panel très divers de participants (type d'acteurs et origine géographique), une trentaine d'acteurs sensibilisés aux sols et intervenant dans différentes régions de France et en

## Encadré 1 : Définitions

**Qualité d'un sol** : la qualité d'un sol est un concept qui n'a pas de définition consensuelle (Rabot *et al.*, 2017) et dont l'appréciation peut varier selon les attentes (*e.g.* potentiel agronomique, réservoir de biodiversité, capacité à réguler les flux d'eau, stockage de carbone). Dans cet article, nous la définissons comme la capacité d'un sol à soutenir des services écosystémiques à travers le bon état des fonctions du sol associées (Tóth *et al.*, 2007). Cette approche rejoint le concept de santé des sols défini par Kibblewhite *et al.* (2008) pour un sol agricole, comme l'aptitude du sol à réaliser et maintenir des fonctions clés (recyclage des nutriments, régulations des populations biologiques, maintien de la structure du sol, transformation des matières organiques) pour la fourniture des services écosystémiques. Cette aptitude est à considérer selon le contexte pédoclimatique et d'usage du sol (*figure 1*).

**Figure 1** : Concept de qualité des sols utilisé dans cet article (d'après Calvaruso *et al.*, 2019). Cette approche reprend celle de l'écart à la référence décrit dans Rabot *et al.* (2017) ou proposée par Ay *et al.* (2020) pour évaluer la contribution des sols aux services écosystémiques. Il nécessite de définir un état de référence pour un sol donné. Celui-ci-peut-être construit à partir d'analyses de bases de données sur les propriétés des sols (*e.g.* Brauman et Thoumzeau, 2020), de dires d'experts (*e.g.* Debeljak *et al.*, 2019) voire être co-construit avec les acteurs en absence de données objectives (*e.g.* Ay *et al.*, 2020).

**Figure 1**: Soil quality concept used in this article (based on Calvaruso *et al.*, 2019). This approach echoes that of the deviation from the baseline described in Rabot *et al.* (2017) or proposed by Ay *et al.* (2020) to assess the contribution of soils to ecosystem services. It requires defining a reference state for a given soil. It may be built from analyses of databases on soil properties (*e.g.* Brauman and Thoumzeau, 2020), according to experts (*e.g.* Debeljak *et al.*, 2019) or even be co-built with actors in the absence of objective data (*e.g.* Ay *et al.*, 2020).



**Fonctions du sol** : les fonctions du sol peuvent être définies comme « ce que fait le sol » (Seybold *et al.*, 1998), indépendamment de tout intérêt humain (Rabot *et al.*, 2017). Un exemple de fonction du sol est le recyclage des nutriments. Selon Kibblewhite *et al.* (2008), les fonctions du sol sont la manifestation de processus résultant des interactions entre les organismes du sol et leur environnement (composantes physiques et chimiques du sol). On parle de multifonctionnalité des sols car un sol a au sein des écosystèmes un nombre important de fonctions induites par ses propriétés et les processus qui y règnent (*voir également figure 3*).

**Services écosystémiques** : les services écosystémiques se définissent comme les services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes (Constanza *et al.*, 1997 ; MEA, 2005 ; Puydarrieux et Beyou, 2017). Un exemple de service écosystémique est la « régulation du climat ». Pour la version 5.1 de la classification internationale « Common International Classification of Ecosystem Services » (CICES ; <https://cices.eu/>) parue le 18 mars 2018, ce service écosystémique s'appuie sur la fonction de « séquestration de carbone » des écosystèmes, notamment dans les sols (Barré *et al.*, 2020).

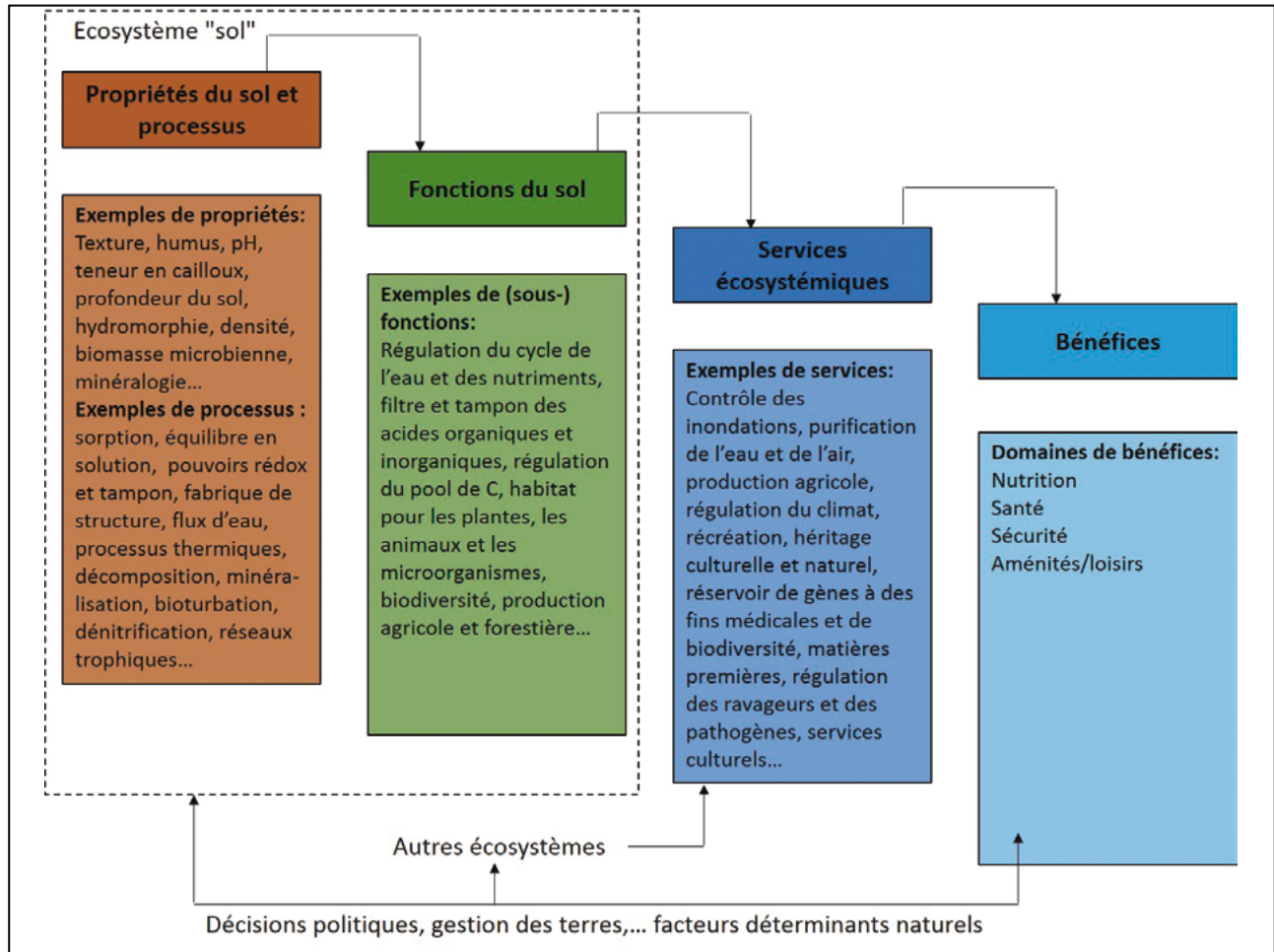
**Paramètres et indicateurs** : mesures qualitatives ou quantitatives qui permettent d'évaluer l'état des fonctions des sols à un instant t et ses variations dans le temps. Dans cet article, le terme de « paramètre » renvoie à la fois à la mesure de propriétés (*e.g.* texture, pierrosité) et de processus (*e.g.* infiltration de l'eau). Dans la littérature, un paramètre peut être utilisé, seul ou agrégé, comme un indicateur de l'état des fonctions des sols s'il suit les critères suivants (Nortcliff, 2002 ; Bremer et Ellert, 2004) :

- il permet de représenter une ou des fonctions importantes ;
- il est fiable, précis et standardisé ;
- il est adossé à un référentiel d'interprétation solide ;
- sa mesure est facile à mettre en œuvre et à interpréter et son coût raisonnable : la valeur de l'information fournie est supérieure au coût de son acquisition ;
- sa mesure, si elle est réalisée *ex situ*, traduit le fonctionnement « *in situ* » du sol (notamment pour les paramètres biologiques très sensibles au changement de conditions) ;
- il est sensible aux changements de pratiques et permet ainsi d'évaluer les résultats de choix de gestion ;

**Référentiel** (d'interprétation) : document technique servant de référence (*i.e.* valeur moyenne d'état) pour interpréter les paramètres (ou indicateurs) et *in fine* évaluer les résultats d'un diagnostic par rapport à la référence. Plus la base de données composant le référentiel est grande et intègre des contextes pédoclimatiques et usages diversifiés, plus le référentiel est robuste. Le référentiel peut être amendé au cours du temps (recherche, acquisition de nouvelles données).

**Figure 2 :** Evaluation des contributions des fonctions du sol aux services écosystémiques suivant le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin (2010). Notre étude est centrée sur les relations propriétés/processus du sol et fonctions du sol (intérieur du cadre en pointillés).

**Figure 2:** Assessment of contributions of soil functions to ecosystem services using the Haines-Young and Potschin (2010) cascading model. Our study focuses on the relationships of soil properties/processes and soil functions (inside the dotted frame).



Belgique (Wallonie) ont été impliqués. Plusieurs acteurs avaient un périmètre d'action national (ex : laboratoire d'analyse de sol, entreprise agro-alimentaire). Quelques acteurs avaient déjà collaboré dans le cadre de projets de recherche, mais cela constituait une minorité. La typologie des acteurs est présentée dans le *tableau 1*.

L'étude comprenait quatre étapes conduites chacune sous forme d'un atelier. La description précise du contenu et de l'organisation de ces quatre ateliers est proposée dans le rapport de Calvaruso *et al.*, 2019 (disponibles en ligne sur le site de l'Ademe : <https://www.ademe.fr/diagnostic-qualite-sols-agricoles-forestiers>). Brièvement, les quatre ateliers se décomposaient successivement en :

- i. un questionnaire en ligne visant à recueillir le point de vue des participants sur l'intérêt du diagnostic de la qualité des sols à des fins de gestion durable des sols, les fonctions du sol à

enjeux, les paramètres qu'ils connaissent, utilisent et/ou qu'ils souhaiteraient voir se développer, et les stratégies à mettre en œuvre pour favoriser le déploiement des démarches de diagnostic à l'échelle du territoire français. Un glossaire, basé sur la revue de littérature, était fourni aux participants afin qu'ils puissent s'approprier et avoir une compréhension commune de la terminologie ;

- ii. deux ateliers en présentiel pour co-construire collectivement les jeux de paramètres constitutifs de la démarche de diagnostic, sur la base des informations collectées dans la littérature et de l'expertise propre aux différents participants ;
- iii. des échanges en ligne (webinaire) sur les résultats clés de l'étude et les recommandations issues des ateliers.

Sur les bases des résultats du questionnaire, les ateliers de co-construction ont été conduits de manière séparée entre



**Tableau 1** : Typologie des acteurs participant aux 4 ateliers et répartis selon leurs champs d'activités.**Table 1:** *Typology of actors participating in the 4 workshops and divided according to their fields of activity.*

Acteurs des sols agricoles	Acteurs des sols forestiers	Acteurs transverses
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriétaire foncier privé</li> <li>- Exploitant agricole</li> <li>- Conseiller agricole / pédologue (public et privé)</li> <li>- Laboratoire d'analyse agricole</li> <li>- Coopérative agricole</li> <li>- Entreprises agro-alimentaires</li> <li>- Enseignement agricole et laboratoire de recherche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriétaire foncier privé et public</li> <li>- Gestionnaire forestier privé et public</li> <li>- Entreprise de travaux forestiers</li> <li>- Conseiller forestier</li> <li>- Associations opératrices de projets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organisme de financement de projets</li> <li>- Société de conseils et opérateur en agriculture et foresterie pour le compte de clients</li> </ul>

acteurs des sols forestiers et des sols agricoles, en raison de perceptions et de pratiques jugées différentes. Deux ou trois sous-groupes ont été formés au sein de chaque atelier pour que chacun des acteurs puisse bénéficier d'une prise de parole aisée.

Pour la co-construction des jeux de paramètres, l'animation des ateliers s'est appuyée sur un jeu de cartes, créé pour l'occasion, présentant l'ensemble des paramètres retenus à l'issue de l'état de l'art, ainsi que, sur un plateau de jeu, une ligne temporelle en abscisse et les fonctions du sol en ordonnée. Les cartes paramètres précisaient la/les fonction(s) évaluée(s) par le paramètre, le niveau d'expertise requis pour l'utiliser et l'interpréter, l'existence ou non d'un référentiel et sa robustesse (estimée à dire d'expert), la méthodologie et le matériel nécessaire pour sa mise en œuvre, le coût de son utilisation. Ces différents documents ont été distribués aux participants avec une carte contexte qui précisait les conditions dans lesquelles devait se dérouler le diagnostic. Deux contextes issus d'échanges lors des premiers ateliers ont ainsi été proposés : pour les sols agricoles, l'intégration d'un diagnostic dans le cadre du bail rural et pour les sols forestiers, dans le cadre des plans de gestion (*annexe 2*). Chaque groupe a ensuite proposé une démarche de diagnostic (i) selon les pratiques actuellement utilisées en termes de diagnostic, et (ii) dans le cadre d'une approche de diagnostic visant à évaluer l'ensemble des fonctions du sol, telles que définies dans la *figure 2* (dite multifonctionnelle). Ces démarches ont été inscrites dans une chronologie (suivi temporel) et les coûts de leur mise en œuvre ont été évalués.

### **Ateliers de co-construction avec des acteurs de la recherche et du développement sur les sols agricoles et urbains (Blanchart et al., 2019)**

Une cinquantaine d'acteurs œuvrant dans le domaine agricole et dans le domaine de l'aménagement du foncier (e.g. organismes de recherche, centres d'étude et de conseil, société d'ingénierie du paysage, bureau d'études sites et sols pollués, laboratoire d'analyses) impliqués dans l'évaluation des fonctions et des services des sols ont été réunis pour (i) mieux caractériser l'opérationnalité des méthodes de diagnostics de l'état des

fonctions des sols et (ii) identifier les verrous scientifiques et/ou techniques qui persistent sur le sujet. Des ateliers de co-construction ont été mis en place pour identifier les services, les fonctions et les paramètres essentiels à leur évaluation. Deux contextes ont été prédéfinis (*Annexe 3*) : un contexte agricole de protection d'une aire de captage et un contexte urbain de réaménagement intégrant les fonctions des sols. Les participants ont été répartis en deux ateliers (agricole et urbain) selon leurs compétences respectives, et en trois groupes au sein de chaque atelier. Au sein de chaque groupe, les compétences techniques ont été croisées (e.g. physique, chimie et biologie des sols). Comme pour les ateliers précédents, l'animation s'est appuyée sur un jeu de cartes prédéfini à partir de l'état de l'art et constitué de cartes « paramètres du sol », « fonctions du sol » et « services écosystémiques auxquels contribuent les sols ». Une fiche présentant le contexte de l'évaluation a été fournie à chaque groupe.

## RÉSULTATS

### Etat de l'art

#### **Définition des fonctions des sols et des services écosystémiques auxquels ils contribuent**

La littérature scientifique montre un fort consensus sur les fonctions des sols à considérer quel que soit l'usage du sol, i.e., forestier, agricole, urbain (Bünemann et al., 2018 ; Blanchart et al., 2018), même si les formulations et le grain (niveau de regroupement) peuvent varier. Dans le cadre de ce travail, 7 fonctions ont été retenues suite à l'état de l'art. Celles-ci n'ont pas été remises en cause ni complétées dans les différents ateliers (*figure 3*). Contrairement aux fonctions, force est de constater l'absence de consensus concernant les services auxquels contribuent les sols. Si la notion de services écosystémiques a été clarifiée dans le cadre de l'étude EFES (Puydarrieux et Beyou, 2017), l'identification des services écosystémiques dans la littérature diverge suivant l'usage du sol et les enjeux de son

mode de gestion comme par exemple le rôle du sol dans sa capacité à stabiliser les polluants ou à favoriser l'infiltration de l'eau. L'information collectée dans la littérature a été synthétisée pour aboutir à la sélection de 9 services écosystémiques (figure 3).

**Les démarches et outils d'évaluation**

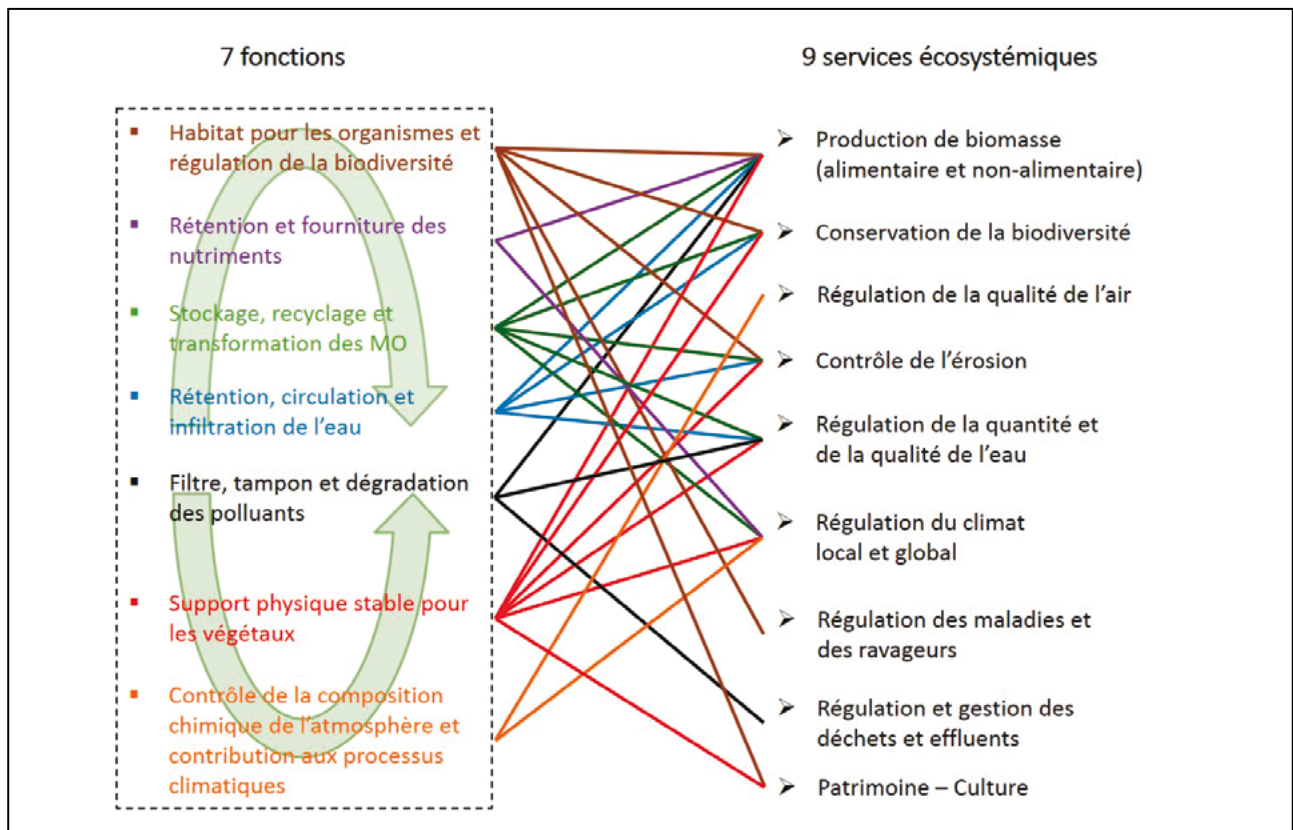
Les démarches d'évaluation des fonctions et des services s'appuient généralement sur la mesure ou l'observation de paramètres (propriétés et/ou processus du sol) qui sont reliés de manière qualitative ou quantitative aux fonctions. La figure 4 synthétise les liens possibles entre paramètres, fonctions et ser-

vices identifiés dans le cadre de la bibliographie (Blanchart *et al.*, 2019). Les paramètres du sol peuvent être appréhendés à partir de mesures ou d'observations du sol (Baize et Jabiol, 2011). Les fonctions du sol peuvent à leur tour être évaluées par une mesure/observation directe d'un ou plusieurs paramètres (agrégation) (Schindelbeck *et al.*, 2008), ou encore *via* la modélisation. Enfin, les services écosystémiques peuvent être évalués par une mesure/observation directe d'un ou plusieurs paramètres (agrégation), l'agrégation de plusieurs fonctions ou encore *via* la modélisation (de Groot *et al.*, 2002 ; Tibi et Thérond, 2017).

Il s'avère que parmi les projets de recherche étudiés (*annexe I*), retenus parce que traitant des méthodes d'évaluation de

**Figure 3 :** Identification des fonctions du sol et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes. Les liens « majeurs » entre ces fonctions et services sont également proposés. Le lien entre les fonctions du sol et le service « Patrimoine-Culture » est encore peu décrit dans la littérature. Les fonctions sont interconnectées ; cela est représenté par la flèche circulaire gris-clair reliant les différentes fonctions (Calvaruso *et al.*, 2019, adapté de Bünemann avec notamment la reformulation du nom de certaines fonctions et services et l'ajout de la fonction « contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques » et des services « Régulation de la qualité de l'air » et « Régulation de la gestion des déchets et effluents »).

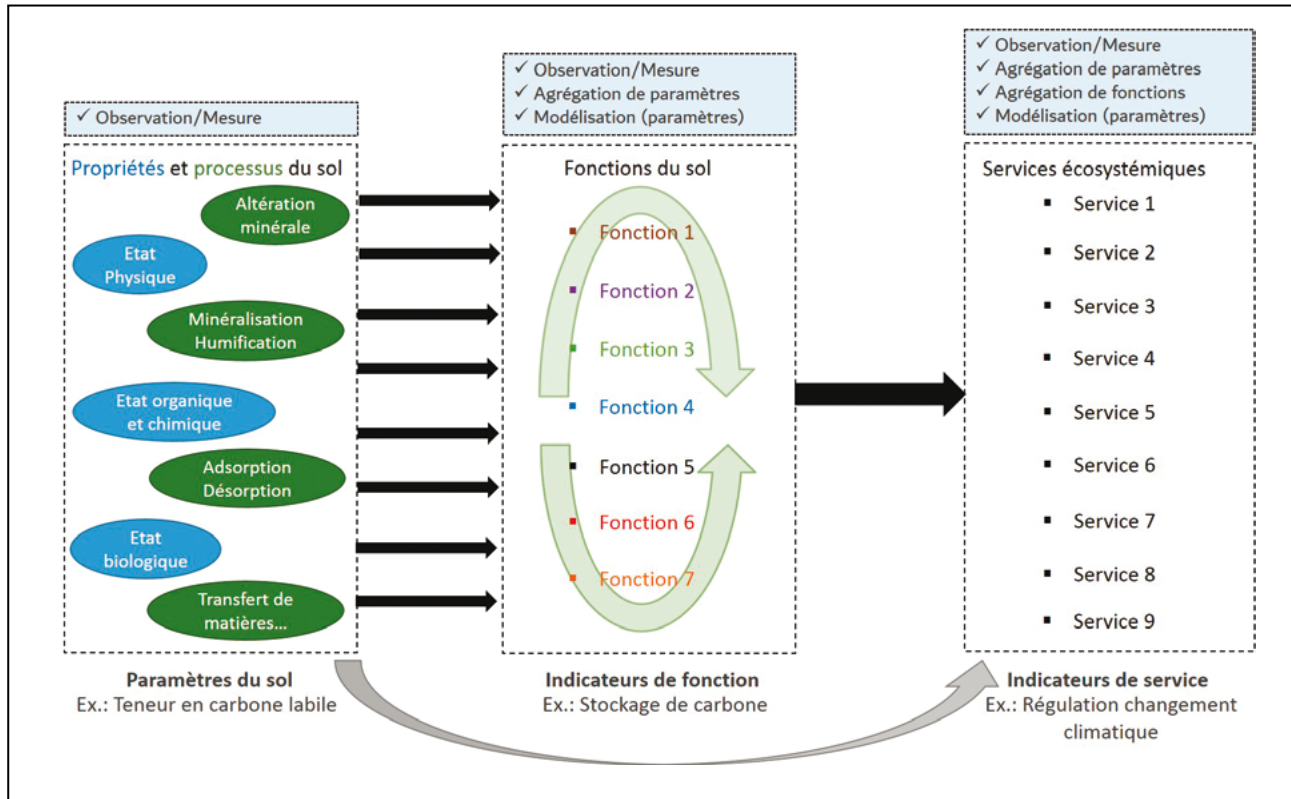
**Figure 3:** Identification of soil functions and their role in ecosystem services. The "main" links between these functions and services are also proposed. The link between soil functions and the "Heritage-Culture" service is still little described in the literature. The functions are interconnected; this is represented by the light grey circular arrow linking the different functions (Calvaruso *et al.*, 2019, adapted from Bünemann with in particular the modification of the name of certain functions and services and the addition of the function of « control of the chemical composition of the atmosphere and contribution to climate processes », and the services of « Regulation of air quality » and of « Regulation of Waste and Effluent Management »).





**Figure 4 :** Liens paramètres du sol - fonctions du sol - services écosystémiques et méthodes d'évaluation (Blanchart et al., 2019).

**Figure 4:** Links soil parameters - soil functions - ecosystem services, and assessment methods (Blanchart et al., 2019).



la qualité des sols, peu vont jusqu'à l'évaluation d'un service écosystémique, la plupart se limitent à l'évaluation des fonctions. Les projets de recherche visant à l'évaluation des services écosystémiques intègrent généralement une étape intermédiaire d'évaluation des fonctions. Quelques projets tels qu'EFESE-EA (Tibi et Therond, 2017) et Soilserv (<https://www6.inra.fr/soilserv/site>) proposent quant à eux des modélisations permettant l'évaluation des services sans passer explicitement par celle de fonctions, et pouvant s'appuyer directement sur les paramètres du sol.

En contextes agricole et urbain, on observe l'apparition de nouveaux outils de diagnostics qui proposent d'évaluer des fonctions du sol en agrégeant plusieurs paramètres, sous forme d'un tableau de bord (par exemple, le Soil Navigator proposé par Debeljak et al. (2019) pour évaluer 5 fonctions d'un sol agricole ou l'outil Destisol proposé pour les projets d'aménagement en milieu urbain par Blanchart et al. (2018)). Certains de ces outils proposent des règles d'agrégation jusqu'à aboutir à une notation de la qualité globale des sols (exemple du Global Index of Soil Quality - GISQ (Velasquez et al., 2007)) ou à des indices synthétiques (par exemple la « Fertilité biologique » et le « Patrimoine biologique - Assurance écologique » développés par Cannavaciolo et al. (2019)). Les agrégations et notations, que ce soit au

niveau des fonctions ou des indices synthétiques, impliquent généralement une part importante de dire d'experts. L'outil Biofunc-tool® (Thoumazeau et al., 2019 ; Brauman et Thoumazeau, 2020) propose de s'affranchir de cette limite en calculant les facteurs de pondération à partir d'une analyse en composante principale de plusieurs milliers de mesures obtenues sur une gamme de conditions pédo-climatiques et agronomiques. Le *tableau 5* du rapport Calvaruso et al. (2019) fournit davantage de détails sur ces outils agrégés.

En contexte forestier, aucun outil dédié à l'évaluation de plusieurs fonctions des sols n'a été identifié. En revanche, des démarches de diagnostics ont vu le jour depuis quelques années pour répondre spécifiquement à une menace et guider les gestionnaires forestiers dans le choix des pratiques durables. Peuvent par exemple être cités les outils d'aide à la décision décrits dans le guide PRATIC'SOLS (ONF, FNEDT, 2017) pour évaluer la sensibilité de parcelles forestières au tassement et IN-SENSE (Augusto et al., 2018) pour évaluer la sensibilité à l'exportation de rémanents.

## Sélection des paramètres pour l'évaluation des fonctions et des services

L'analyse de la littérature a permis d'identifier plus de 100 paramètres dans les différents projets et outils analysés (*Annexe 4*). Une grande diversité de paramètres en termes d'approche de mise en œuvre (*e.g.* mesures de terrain, analyse en laboratoire, expérimentation, modélisation), de domaine d'application (paramètre spécifique à un usage/contexte/objectif jusqu'à des paramètres ubiquistes) et d'opérationnalité technique (phase de recherche à utilisation en conseil) peut être citée. Les travaux visant à évaluer les fonctions des sols considèrent tous les paramètres physiques, chimiques et, de plus en plus, biologiques des sols. Les 10 paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols les plus fréquemment cités dans les projets de recherche nationaux et internationaux étudiés sont présentés en *tableau 2*. Ce résultat est en accord avec la synthèse de la littérature la plus récente à ce sujet (Bünemann *et al.*, 2018).

Si on interclasse les paramètres, les 12 premiers paramètres qui ressortent comme étant les plus utilisés dans les projets étudiés sont : le pH, la biomasse microbienne et la diversité microbienne, l'abondance et la diversité des communautés lombriciennes, la compacité (ou la densité apparente), le ratio C/N, l'abondance, la diversité et la structure des nématodes, la teneur en ETM totaux, le taux de matière organique, la teneur en éléments échangeables, la capacité d'échange cationique et la texture. Comparativement à la synthèse de Bünemann *et al.* (2018), les paramètres biologiques sont davantage utilisés dans les projets de recherche récents (français et internationaux) intégrés dans notre analyse. Cela traduit un intérêt accru

de la recherche, notamment française sur le sujet de l'évaluation biologique des sols au cours de ces dernières années, avec la constitution d'équipes de recherche très actives dans ce domaine en lien avec la mise en place de programmes de recherche (par exemple, en 2004 le programme Bio-indicateurs de la qualité des sols porté par l'ADEME). Cet intérêt résulte de la prise en compte du rôle central des organismes et de leur activité dans le fonctionnement des sols, de la sensibilité des organismes face aux modifications des conditions du milieu qui en font des candidats potentiels pour une évaluation précoce de la dégradation du fonctionnement des sols (bien que les liens qualitatifs et quantitatifs avec les fonctions soient encore à établir et à valider), et le développement de technologies d'analyses, en particulier de l'ADN du sol (Bouchez *et al.*, 2016, Dequiedt *et al.*, 2020), qui proposent une évaluation de l'abondance des organismes microbiens, la caractérisation des interactions entre organismes (réseaux trophiques, symbiose par exemple) et leur activité (décomposition, altération...) pour des coûts de plus en plus abordables.

Quarante-quatre paramètres (physiques, chimiques et biologiques) ont finalement été retenus pour les ateliers de co-construction (*Annexe 5*). Cette sélection s'est réalisée en concertation avec plusieurs experts en sciences du sol et a tenu compte de leur niveau d'opérationnalité pour une mise en œuvre par les professionnels (actuellement ou à court terme pour les paramètres en développement). Évidemment le niveau d'opérationnalité des paramètres résulte d'un compromis entre plusieurs critères, dans notre étude, la facilité de mise en œuvre et d'interprétation dans divers contextes, la fiabilité de sa mesure (et donc du référentiel associé) et son coût (ou plutôt le ratio coût/bénéfice de l'information). Ainsi ont été exclus les para-

**Tableau 2** : Liste des 10 paramètres physiques, chimiques et biologiques les plus fréquemment utilisés dans les projets de recherche étudiés. Les paramètres en rouge sont fréquemment cités dans les projets de recherche étudiés, mais le sont moins dans la synthèse du projet ISQAPER (Bünemann *et al.*, 2018).

**Table 2:** List of the 10 most frequently used physical, chemical and biological parameters in the research projects studied. The red parameters are frequently cited in the research projects studied, but less represented in the synthesis of the ISQAPER project (Bünemann *et al.*, 2018).

Physique	Chimique	Biologique
Compacité	pH	Biomasse moléculaire microbienne
Texture	Teneur en ETM totaux	Abondance/diversité/structure vers de terre
Structure	Teneur en éléments assimilables	Abondance/diversité/structure nématodes
Épaisseur de sol	Ratio C/N	Diversité microbienne
Infiltration de l'eau	Teneur en CTO totaux	SET escargots
Réserve utile en eau	Teneur en oligo-éléments	Indice oméga-3
Stabilité des agrégats	Capacité d'échange cationique	Densité racinaire
Hydromorphie	Teneur en matière organique	Activités enzymatiques
Porosité	Stockage de C organique	Biomasse microbienne
État d'humidité	Teneurs en C organique et en N total	Respiration basale

mètres très coûteux/complexes à mettre en œuvre en milieu agricole et forestier, ne possédant pas de référentiel d'interprétation et/ou sans potentiel de développement fort comme par exemple la perméabilité ou la conductivité hydraulique. À titre d'exemple, plusieurs paramètres biologiques (*e.g.* activités enzymatiques, diversité taxonomique microbienne) ou le pool de carbone stable ont été conservés en raison des perspectives actuelles de développement de référentiels au niveau national dans le cadre du GIS Sol, et d'industrialisation des analyses via le projet AgroEcoSol porté par le laboratoire d'analyse et de conseil agro-environnemental Auréa en partenariat avec l'INRA (UMR Agroécologie, UMR ECOSYS, US Infosol) et l'Institut du végétal Arvalis, dans le cadre du programme des investissements d'avenir.

## Ateliers de co-construction

### Ateliers de co-construction avec des acteurs professionnels de la gestion des sols agricoles et des sols forestiers (Calvaruso *et al.*, 2019)

Lors de ces ateliers, les participants ont dû associer à chaque fonction les paramètres qui leur paraissaient essentiels à leur évaluation. Les paramètres sélectionnés par fonction sont présentés dans le *tableau 3*. Toutes les fonctions ont pu être associées à des paramètres. Pour l'atelier « sols agricoles », chaque groupe a sélectionné entre 18 à 24 paramètres. 15 paramètres sont communs à tous les groupes. Les plus cités et ceux qui font le plus consensus, sont relatifs aux propriétés physiques et chimiques des sols. Les paramètres biologiques sont principalement sélectionnés en lien avec la fonction « Habitat d'organismes et régulation de la biodiversité » (indice vers de terre) et la fonction « Filtre, Tampon et Dégradation des polluants » (diversité taxonomique bactérienne). L'évaluation des paramètres s'appuie sur des observations et des mesures de terrain (*e.g.* pierrosité, traces d'hydromorphie (couleur), vitesse d'infiltration de l'eau, épaisseur du sol, traces d'érosion, utilisation du test-bêche) ainsi que sur des analyses en laboratoire (*e.g.* teneur en C organique, CEC). Les participants de l'atelier « sols forestiers » ont sélectionné 16 paramètres communs aux deux groupes. Leur évaluation s'appuie principalement sur des observations de terrain (*e.g.* forme d'humus, bio-indicateurs végétaux, traces d'hydromorphie, effervescence à l'acide), et quelques analyses biologiques (*e.g.* microfaune, biomasse microbienne) pour les fonctions « Habitat pour les organismes et régulation de la biodiversité » et « Filtre, Tampon et Dégradation des polluants ». 10 paramètres sont communs avec l'atelier « sols agricoles ». Enfin, quel que soit le milieu, les participants ont rappelé que le contexte stationnel et l'historique des parcelles doivent être un premier niveau de diagnostic afin de définir des potentiels risques et les paramètres à évaluer. Par exemple, les participants du groupe « forêt » estiment qu'il est inutile de faire des

analyses de polluants dans des sols forestiers dont l'historique d'usage est uniquement l'exploitation forestière.

### Ateliers de co-construction avec des acteurs de la recherche et du développement sur les sols agricoles et urbains (Blanchart *et al.*, 2019)

Dans le cadre des ateliers de co-construction, les participants (répartis en trois groupes par atelier) ont d'abord identifié les services, puis les fonctions, et enfin les paramètres à leur associer. Les résultats sont présentés par fonction dans le *tableau 4*. La plupart des fonctions proposées à l'issue de l'état de l'art et utilisées dans les ateliers avec les professionnels ont été reprises, sauf la fonction « Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques » pour l'atelier « Sols agricoles » en raison du contexte ne mettant pas en avant cet enjeu. Les participants de l'atelier « Sols urbains » ont quant à eux ajouté une fonction « Altération et formation du sol ». Les services sélectionnés sont plus divers, et ont été parfois renommés/complétés par rapport à la proposition initiale, traduisant l'importance du contexte dans leur sélection et leur définition, ce qui est cohérent avec l'absence de consensus identifié dans la littérature sur leurs définitions et appellations. À l'issue de ces ateliers, l'association des fonctions aux services a été disparate (données non présentées). 22 paramètres ont été sélectionnés par au moins deux groupes de l'atelier « Sols agricoles ». Cette sélection intègre des paramètres physiques, chimiques et biologiques. Elle est très proche de celle obtenue avec les professionnels, malgré la différence de contexte. En contexte urbain, 18 paramètres ont été cités par au moins 2 groupes dans les ateliers. Ceux retenus sont principalement d'ordre physiques et chimiques, proches de ceux retenus en contexte agricole. Les paramètres biologiques sont moins considérés que dans l'atelier « Sols agricoles ». La contamination des sols par des polluants (mobilité des ETM) est davantage prise en compte.

## DISCUSSION

L'objectif de cette étude, à savoir proposer aux gestionnaires des sols forestiers et agricoles et aux aménageurs urbains un jeu de paramètres à mesurer pour évaluer les fonctions des sols et services écosystémiques associés, était ambitieux car les préoccupations sont très diverses suivant l'usage mais également suivant le contexte pédoclimatique, social et économique. Pour répondre au mieux à cet objectif, la stratégie menée a consisté dans un premier temps en une revue de littérature internationale la plus exhaustive possible des méthodologies d'évaluation. Dans un second temps, des ateliers participatifs avec un large panel d'acteurs des secteurs forestier, agricole et urbain, ont eu pour objectif d'identifier un jeu de paramètres communs. Cependant, cette approche par ateliers a pu présenter certains biais, en particulier car tous les usages n'ont pas pu être intégrés, par exemple

**Tableau 3** : Paramètres sélectionnés par les acteurs professionnels pour les ateliers « sols agricoles » et « sols forestiers ». Les paramètres en italique sont communs aux deux ateliers. Entre parenthèses est précisé le nombre de groupes ayant sélectionné le paramètre dans la fonction ciblée.

**Table 3:** *Parameters selected by the professional actors for the workshops «agricultural soils» and «forest soils». The parameters in italics are common to both workshops. In parentheses is specified the number of groups that selected the parameter in the targeted function.*

		<b>Atelier «Sols agricoles»</b>	<b>Atelier «Sols forestiers»</b>
<b>Contexte</b>		Bail rural à clauses environnementales	Plan simple de gestion
<b>Nombre de groupes</b>		3	2
<b>Fonctions</b>	<b>Rétention et fourniture de nutriments</b>	Capacité d'échange cationique et taux de saturation en cations échangeables (3) pH <sub>eau/KCl</sub> (3) Teneurs en éléments échangeables (3) <i>Teneur en Calcaire total et actif (3)</i> Teneur en éléments assimilables (1)	Forme d'humus (2) <i>Calcaire actif (effervescence) (2)</i> <i>Texture du sol (2)</i>  <i>NB : ces trois paramètres permettent notamment d'évaluer la sensibilité aux exportations de minéraux</i>
	<b>Support physique stable pour les végétaux</b>	<i>Epaisseur du sol (3)</i> <i>Texture du sol (3)</i> <i>Pierrosité (3)</i> Structure/porosité (3) Compacité (3) Stabilité des agrégats (1)	<i>Epaisseur de sol (2)</i> <i>Texture du sol (2)</i> <i>Pierrosité (2)</i> <i>Traces d'hydromorphie (2)</i> Etat d'humidité du sol (2) <i>NB : Texture, pierrosité, traces d'hydromorphie et état d'humidité du sol permettent d'évaluer la sensibilité à la compaction</i>
	<b>Stockage, recyclage et transformation des matières organiques</b>	<i>Teneur en Corg et MO (3)</i> <i>Teneur en Ntotal (3)</i> Rapport C/N (3) Pools C labile et stable (1) Vitesse décomposition MO (1) Teneur en N potentiellement minéralisable (1)	Forme d'humus (2)
	<b>Rétention, Circulation et Infiltration de l'eau</b>	<i>Réserve utile en eau (2)</i> Etat de surface : Traces d'érosion et croûte de battance (2) <i>Traces d'hydromorphie (2)</i> Vitesse d'infiltration de l'eau (2)	<i>Réserve utile en eau (2)</i> Bioindicateurs réponse végétation (= plantes bio-indicatrices) (2) <i>Traces d'hydromorphie (2)</i>
	<b>Habitat pour les organismes et régulation de la biodiversité</b>	Abondance et diversité des vers de terre (3) <i>Abondance et diversité microfaune (nématodes) (3)</i> <i>Densité, état racines et profondeur d'enracinement (2)</i>  Biomasse moléculaire microbienne (2) Vitesse décomposition MO (1) Diversité taxonomique microbienne (1)	<i>Densité, état racines et profondeur d'enracinement (2)</i> <i>Abondance et diversité microfaune (nématodes) (2)</i>
	<b>Filtre, tampon et dégradation des polluants</b>	Teneurs en contaminants (2) Diversité taxonomique microbienne (1)	Biomasse moléculaire microbienne (2) Teneurs en contaminants (2) Mobilité des éléments traces métalliques (2)
	<b>Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques</b>	<i>Evolution des teneurs et des stocks de C (modélisation) (3)</i> Stock de C (1)  Pools C labile et stable (1)	<i>Evolution des teneurs et des stocks de C (2)</i>

**Tableau 4** : Services écosystémiques, fonctions et paramètres sélectionnés par les acteurs des ateliers « sols agricoles » et « sols urbains ». Seuls sont présentés les paramètres ayant fait l'objet d'une sélection par au moins deux groupes. Les éléments communs aux deux ateliers sont en italique. Les contextes sont présentés en *Annexe 2*.

**Table 4:** *Ecosystem services, functions and parameters selected by the actors of the workshops «agricultural soils» and «urban soils». Only parameters that have been selected by at least two groups are presented. The elements common to both workshops are in italics. The contexts are presented in Appendix 2.*

	<b>Atelier «Sols agricoles»</b>	<b>Ateliers «Sols urbains»</b>
<b>Contexte</b>	Protection d'une aire de captage	Renouvellement urbain
<b>Services</b>	<i>Production de biomasse (alimentaire et non alimentaire)</i> <i>Contrôle de l'érosion</i> <i>Régulation des maladies et des ravageurs</i> <i>Gestion des déchets et des effluents</i>	<i>Production de biomasse (alimentaire)</i> Support de construction et d'infrastructure <i>Régulation des zoo et phytopathogènes et espèces invasives</i> Régulation de la qualité des écosystèmes Régulation climat local Régulation de la quantité et de la qualité de l'eau <i>Contrôle érosion / glissements de terrain</i> <i>Gestion des déchets et des effluents</i> Régulation qualité de l'air Services culturels (loisirs, esthétique, éducation)
<b>Fonctions</b>	<i>Stockage, recyclage et transformation des matières organiques</i> <i>Support physique stable pour les végétaux</i> <i>Rétention, circulation et infiltration de l'eau</i> <i>Habitat pour les organismes et contrôle de la biodiversité</i> <i>Rétention et fourniture de nutriments</i> <i>Filtre, tampon et dégradation des polluants</i>	<i>Support physique stable pour les végétaux</i> <i>Filtre, tampon et dégradation des polluants</i> <i>Rétention et fourniture de nutriments</i> <i>Habitat pour les organismes et contrôle de la biodiversité</i> <i>Rétention, circulation et infiltration de l'eau</i> <i>Stockage, recyclage et transformation des matières organiques</i> Altération et formation de sol Contrôle composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques
<b>Paramètres</b>	<i>Epaisseur du sol</i> <i>Texture du sol</i> <i>Pierrosité</i> <i>Réserve utile en eau</i> <i>Traces d'hydromorphie</i> <i>Vitesse d'infiltration de l'eau</i> <i>Teneur en N total et disponible</i> <i>Teneur en MO et C organique</i> Teneur en éléments assimilables (K, Mg, Ca, Na, P...) <i>Capacité d'échange cationique et taux de saturation en cations échangeables</i> <i>pH<sub>eau/KCl</sub></i> <i>Etat de surface : traces d'érosion...</i> Rapport C/N N et C labiles Compacité/densité apparente <i>Densité, état racines et profondeur d'enracinement</i> <i>Abondance et diversité vers de terre</i> Diversité taxonomique microbienne Abondance et diversité microfaune (nématodes) Biomasse (moléculaire) microbienne Abondance et diversité macrofaune (cloportes) <i>Teneurs en contaminants (ETM, pesticides)</i>	<i>Epaisseur du sol</i> <i>Texture du sol</i> <i>Pierrosité</i> <i>Réserve utile en eau</i> <i>Traces d'hydromorphie</i> <i>Vitesse d'infiltration de l'eau</i> <i>Humidité du sol</i> <i>Perméabilité</i> Densité apparente/compacité Stabilité des agrégats Structure/porosité <i>Etat de surface : traces d'érosion, ...</i> <i>Teneur en MO et C organique</i> <i>Teneur en N total et disponible</i> <i>pH<sub>eau/KCl</sub></i> Teneur en éléments assimilables (K, Mg, Ca, Na, P...) <i>Capacité d'échange cationique et taux de saturation en cations échangeables</i> Teneur en calcaire total et actif <i>Densité, état, racines et profondeur d'enracinement</i> <i>Abondance et diversité des vers de terre</i> <i>Teneurs en contaminants</i> Mobilité des ETM



avec l'absence de professionnels de la viticulture, et car la sélection des paramètres s'est appuyée sur des mises en situation contextualisées (bail rural, plan de gestion forestier, aménagement urbain, protection d'une aire de captage) orientant le choix des participants vers des paramètres adaptés à ces problématiques. Bien que le panel des sondés et des contextes pourrait être enrichi, l'approche multifonctionnelle du diagnostic consistant en une évaluation de l'ensemble des 7 fonctions du sol pré-identifiées à partir de la littérature permet de s'affranchir en grande partie de ces biais. Par ailleurs, la cohérence des paramètres identifiés dans le cadre des deux ateliers menés sur les sols agricoles rassure sur la représentativité des résultats.

Un nombre croissant de travaux de recherche développe des approches d'évaluation des fonctions des sols et des services auxquels ils contribuent. Ils s'appuient généralement sur des propriétés observables ou mesurables du sol. Certains projets, portant sur les sols agricoles et/ou urbains, ont abouti à la proposition d'outils d'aide à la décision à destination des gestionnaires, avec des paramètres physiques, chimiques et biologiques permettant d'évaluer plusieurs fonctions. L'analyse de la littérature a permis de lister un nombre important de paramètres proposés dans ces approches, récemment complété avec l'introduction de nouveaux paramètres biologiques. Il est à noter que le mode d'agrégation de ces paramètres en indicateurs de fonctions diffère entre les outils et intègre une part importante de subjectivité liée au dire d'experts encore indispensable dans l'interprétation des résultats. Sur le sujet, Rabot *et al.* (2017) réalise une revue des méthodes multiparamétriques permettant l'estimation d'indices de la qualité des sols (IQS), dans un contexte d'aménagement territorial.

Des ateliers de co-construction avec des professionnels et des acteurs de la recherche et du développement ont ensuite été conduits afin d'identifier les paramètres qui peuvent dès aujourd'hui être utilisés pour l'évaluation des fonctions et services liés aux sols en milieux agricole, forestier et urbain. Le nombre de paramètres issus de ces ateliers reste important (> 30). Les paramètres physiques font pour la plupart l'objet d'un consensus, quel que soit le milieu. Les analyses chimiques sont principalement mises en avant en milieux agricole et urbain, alors que les acteurs forestiers s'appuient principalement sur des observations de terrain intégrant de la bioindication (*e.g.* végétaux, forme d'humus). Une récente étude de Hanson *et al.* (2020) sur une large gamme de sols acides semble donner raison à ces derniers en démontrant que les analyses chimiques de sols forestiers sont de mauvais indicateurs pour prédire la productivité d'un peuplement forestier. Enfin, l'utilisation des paramètres biologiques est plus variable et discutée. Elle est principalement identifiée dans les groupes « sols agricoles » pour évaluer les fonctions « Habitat d'organisme et régulation de la biodiversité » et « Filtre, tampon et dégradation des polluants ». Ceci dénote un déficit de connaissance et de recul sur l'interprétation de ces paramètres encore très récents, et pour lesquels on manque de référentiels. Il paraît donc important de poursuivre les travaux de R&D sur les référen-

tiels d'interprétation et les méthodes d'intégration des paramètres, notamment biologiques, pour évaluer les fonctions et les services.

Une première liste restreinte de paramètres est proposée (Figure 5) combinant des paramètres qui ont fait l'objet d'un consensus à la fois dans le domaine agricole, forestier et de l'aménagement urbain, et de paramètres plus prospectifs mais dont le potentiel paraît fort à moyen terme (< 5 ans) avec l'industrialisation en cours des analyses biologiques (par exemple le projet AgroEcoSol) et le développement de nouveaux référentiels, notamment grâce à la mise en place du Réseau de Mesure de la Biodiversité des sols (Imbert *et al.*, 2020) et d'un référentiel sur la stabilité du carbone (analyses thermiques par pyrolyse Rock-Eval) dans le cadre du GIS Sol. Comme l'ont illustré les travaux menés dans le cadre de ces études, l'utilisation des paramètres est à moduler notamment en fonction du contexte (*e.g.* caractéristiques stationnelles, occupation du sol, historique des pratiques), des objectifs du diagnostic et des moyens disponibles. Un point clé du diagnostic est la représentativité de l'échantillon collecté ou de la zone étudiée compte tenu de la potentielle forte variabilité spatiale des sols. C'est pourquoi il est indispensable de s'appuyer sur des normes d'échantillonnage comme la série des normes ISO 18400 relative à l'échantillonnage des sols ou la norme AFNOR NF X31-100 relative aux méthodes de prélèvement d'échantillons de sol pour analyses physico-chimiques en vue d'une interprétation agronomique.

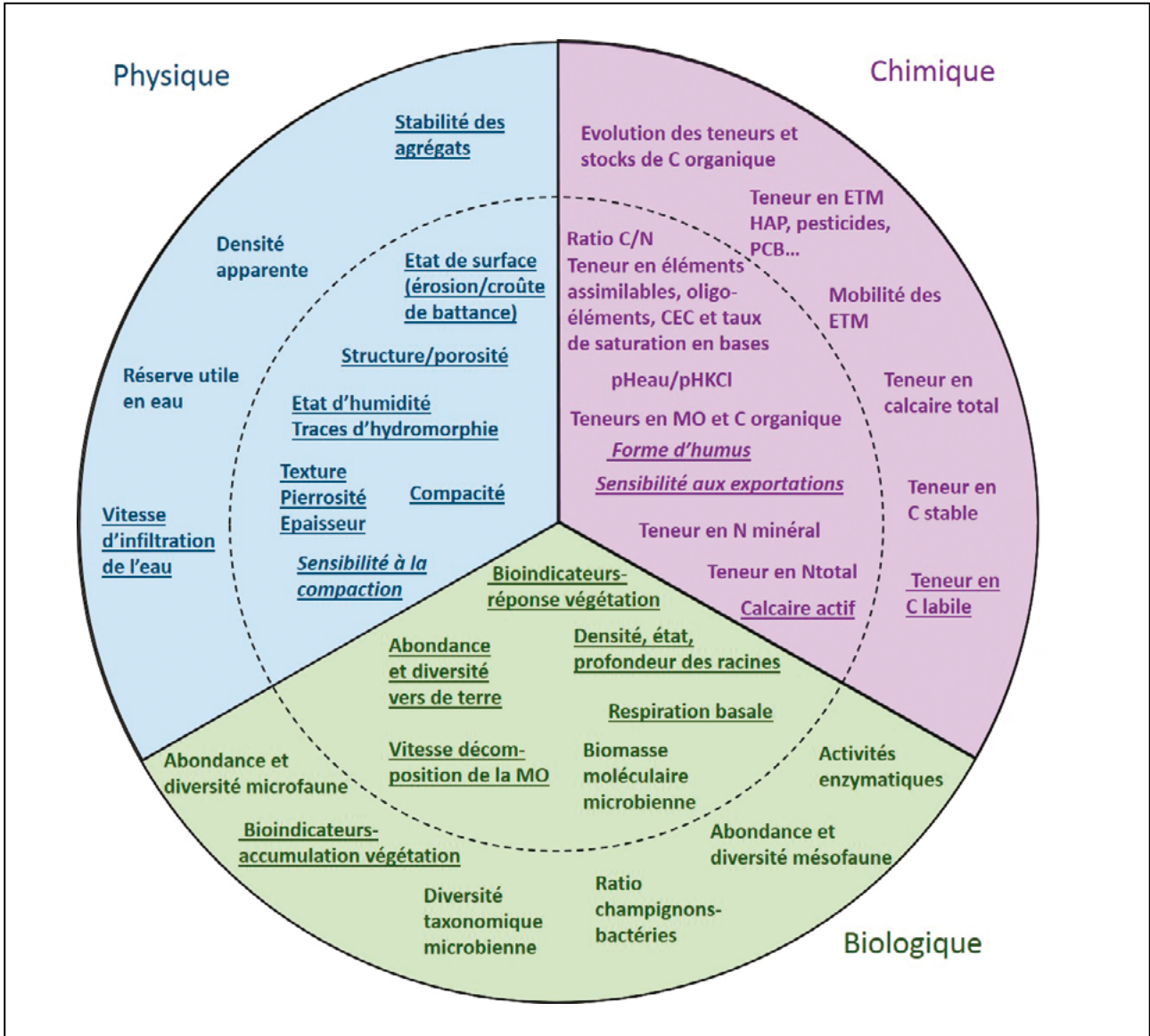
À titre d'exemple, l'utilisation de ce jeu de paramètres dans le cadre des baux ruraux à clauses environnementales ou des plans de gestions en forêt pourrait être menée comme suit :

- Un premier niveau de diagnostic avec une sélection de paramètres (20 en milieu agricole et 23 en milieu forestier) peu coûteux à évaluer, principalement de terrain, avec peu d'analyses en laboratoire, faciles à mettre en œuvre et permettant de renseigner l'ensemble des fonctions du sol. Le coût d'un diagnostic de la qualité des sols basé sur ce jeu simple est inférieur à 500 euros par unité de sol homogène (incluant l'analyse d'un échantillon composite de sol), et nécessite entre une demie et une journée de travail en fonction de la surface de l'unité.
- Un second niveau de paramètres complémentaires mobilisables en cas de problème identifié à partir du premier niveau de diagnostic ou dans le cas d'une problématique spécifique (*e.g.* évaluation du stockage de carbone, contaminations potentielles).

Évidemment compte tenu des nombreux projets de recherche sur le sujet et des avancées technologiques rapides, ce jeu de paramètres est destiné à évoluer pour intégrer de nouveaux paramètres plus robustes, plus précis, moins coûteux. Une baisse du coût du diagnostic permettrait par exemple d'augmenter la fréquence des mesures et/ou de multiplier les points de mesures avec ainsi une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale du sol.

**Figure 5 :** Paramètres retenus par Calvaruso *et al.* (2019) pour l'évaluation de l'état des fonctions des sols avec un jeu simple (paramètres à l'intérieur du cercle pointillé) et un jeu plus complet (paramètres complémentaires à l'extérieur du cercle pointillé). Les paramètres soulignés sont des paramètres de terrain qui ne nécessitent pas d'équipements spécifiques pour la mesure. Les mesures de C labile et de respiration basale peuvent également se faire sur le terrain mais nécessitent l'utilisation d'un spectrophotomètre portable. Les paramètres en italique sont utilisés spécifiquement en milieu forestier.

**Figure 5:** Parameters selected by Calvaruso *et al.* (2019) for assessing the state of soil functions with a simple set (parameters inside the dotted circle) and a more complete set (complementary parameters outside the dotted circle). The underlined parameters are field parameters that do not require specific equipment for the measurement. Labile C and basal respiration measurements can also be performed in the field but require the use of a portable spectrophotometer. The parameters in italics are used specifically in the forest environment.



## CONCLUSION

Il ne fait aujourd'hui plus aucun doute que les usages et pratiques inadaptés aux propriétés des sols aboutissent à des dégradations potentiellement irréversibles de cette ressource fondamentale. Quel que soit le milieu, *i.e.*, forestier, agricole, urbain, les attentes sont fortes en ce qui concerne la mise à disposition de démarches d'évaluation de la qualité des sols à la fois robuste, facile à mettre en œuvre et à coût raisonné, et qui permette aux différents acteurs de gérer durablement les sols mais également de répondre à leurs attentes en termes de connaissances des sols.

La notion de qualité de sol est reliée dans la littérature à la notion de « fonctions du sol » qui est une notion moins bien connue mais qui est plus explicite et qui renvoie aux bénéfices environnementaux (et par conséquent aux services) liés à une gestion des sols adaptée à son usage. Cet article résume deux études menées pour l'Ademe, reposant toutes deux sur une analyse bibliographique et sur des ateliers de co-construction avec des acteurs des sols forestiers, agricoles et urbains. Ces études ont souligné la forte dynamique de la recherche sur cette thématique, particulièrement par des équipes françaises, avec notamment un grand nombre de projets de recherche visant à développer des paramètres robustes pour évaluer la qualité (et les fonctions) des sols. L'amélioration des diagnostics s'oriente vers la conciliation de mesures physiques, chimiques et biologiques. Dans le cadre de ce travail, un jeu de paramètres minimal qui permet d'appréhender un ensemble de 7 fonctions des sols pour un coût raisonné (environ 500 euros) a été proposé.

Pour favoriser la réalisation de diagnostics de la qualité des sols à grande échelle, la constitution de ce jeu de paramètres est une première étape. Elle doit être combinée à la mise en œuvre de diverses stratégies de promotion à destination des acteurs des sols forestiers, agricoles et urbains. Les échanges issus des ateliers de co-construction ont à ce titre montré que la formation et la sensibilisation des acteurs (et plus généralement du Grand Public en ce qui concerne le rôle des sols et l'importance de leur préservation) sont des paramètres clés car elles favoriseraient d'une part l'acceptabilité de la réalisation du diagnostic et d'autre part leur fourniraient les connaissances préalables nécessaires pour comprendre la pertinence de ce type de diagnostic. Lors de ces ateliers de co-construction, cinq grandes stratégies de déploiement ont également pu être identifiées en complément des approches de conseil : intégration de diagnostic de qualité des sols dans les transactions foncières, dans les baux ruraux, comme conditionnalité à des aides publiques, dans les contractualisations privées (ex : compensation carbone ou biodiversité) et dans la planification territoriale (Calvaruso *et al.*, 2019). Ces différentes stratégies sont déjà explorées dans le cadre de plusieurs initiatives comme le diagnostic « Humus » expérimenté par Terres de Liens dans le cadre des baux ruraux à clauses environnementales ou en lien avec le développement de référentiels territoriaux de la qualité des sols à l'échelle de communautés de communes

(par exemple, Dijon Métropole dans le cadre du projet « Vers un système alimentaire durable pour 2030 », lauréat de l'appel à projet « Territoire d'Innovation de Grande Ambition », ou le SCOT du Grand Rovaltain Drôme-Ardèche, qui développe un observatoire de la santé des sols Rovalterra™). Les participants aux ateliers ont ainsi mis en avant l'intérêt d'une coordination accrue au niveau national, qui intégrerait plusieurs axes : le développement de la sensibilisation et de la formation, la reconnaissance de démarches de diagnostics et le partage de référentiels en particulier sur les paramètres clés (ex : bases de données, référentiels d'interprétation des valeurs) mais aussi sur la terminologie (ex : fonctions, services), et le développement d'une plateforme d'innovation nationale pour animer le réseau d'acteurs, tout en capitalisant expertises et retours d'expériences.

Ces deux études ont également mis en exergue quelques pistes de développement à moyen terme. Par exemple, il a été jugé nécessaire de faire un effort sur la clarification de la terminologie relative à l'évaluation des fonctions et des services rendus par les sols, et sur l'intégration des paramètres en indicateurs de fonctions et de services. Un des points essentiels d'amélioration des outils est le besoin d'acquérir des retours d'expériences sur la mise en œuvre des méthodes « émergentes » de caractérisation des sols, et ce quel que soit le milieu. L'intégration de ces retours d'expérience devrait avoir lieu dans un cadre coopératif en impliquant le plus en amont possible l'ensemble des parties prenantes. Plusieurs démarches coopératives de co-construction de jeux et impliquant professionnels et acteurs de la recherche et du développement sont déjà en cours, principalement dans le milieu agricole : on peut citer le réseau REVA, qui développe une démarche pour le conseil agricole, ou encore le diagnostic « Humus », expérimenté par Terres de Liens dans le cadre des baux ruraux à clauses environnementales, ou encore le projet SUPRA, qui vise à améliorer la prise en compte de la qualité des sols dans la planification et l'aménagement du territoire. Ces démarches devraient être encouragées et partagées, notamment pour couvrir d'autres types d'usage des sols. Ainsi, la mise en réseau et le partage d'une information faisant référence dans le domaine de l'évaluation de la qualité des sols sont deux des principales attentes exprimées par les participants des ateliers menés avec les professionnels. La mise en place d'un centre de ressources national associé à un groupe d'experts pourrait y répondre.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E., 2015 - Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262. pp. 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Augusto L., Pousse N., Legout A., Seynave I., Jabiol B., Levillain J., 2018 - INsensé : INDicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. <https://www.ademe.fr/insense-indicateurs-sensibilite-ecosystemes-forestiers-soumis-a-recolte-accrue-biomasse>.
- Ay J.-S., Pousse N., Rigou L., Thannberger L., 2020 - Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols : Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas. *Etude et gestion des sols*, 27. pp. 147-162.
- Baize D., Jabiol, B., 2011 - Guide pour la description des sols. Ed. Quae.
- Barré P., Cécillon L., Chenu C., Martin M., Vidal-Beaudet L., Eglin T., 2020 - La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification. *Etude et gestion des sols*, 27. pp. 305-320.
- Blanchart A., Séré G., Chérel J., Warot G., Stas M., Consalès J. N., Morel J. L., Schwartz C., 2018 - Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils, *Landscape and Urban Planning*, 176. pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
- Blanchart A., 2018 - Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnelle. Thèse de doctorat, Université de Lorraine. 256 p. + annexes.
- Blanchart A., Calvaruso C., Eglin T., Pierart A., Grand C., 2019 - Méthodologie d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols. Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. 31 p. [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)
- Bouchez T., Bliex A.L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon J. J., Hellal J., Joulain C., Quaiser A., Martin-Laurent F., Mauffret A., Monier J. M., Peyret, P., Schmitt-Koplin P., Sibourg O., D'oiron E., Ranjard L., 2016 - Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environmental Chemistry Letters*, 14(4). pp. 423-441. doi:10.1007/s10311-016-0581-3
- Bremer E., Ellert K., 2004 - Soil quality indicators: A review with implication for agriculture ecosystems in Alberta. Alberta environmentally sustainable agriculture soil quality program, Alberta agriculture, food and rural development. Alberta, 32 p.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., de Goed R., Flessens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L., 2018 - Soil quality : a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120. pp. 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cannavacciuolo M., Cassagne N., Riou V., Mulliez P., Chemidlin N., Dequiedt S., Villenave C., Cérémonie H., Cluzeau D., Cyllly D., Vian J.-F., Peigné J., Gontier L., Fourrié L., Maron P.-A., D'oiron Verame E., Ranjard L., 2019 - Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols. *Innovations Agronomiques* 55, pp. 41-54. <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/6029/44832/file/Vol55-4-Cannavacciuolo.pdf>
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S., 2019 - Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 p. + annexes. Ouvrage prochainement disponible en ligne : [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)
- Debeljak M., Trajanov A., Kuzmanovski V., Schröder J., Sandén T., Spiegel H., Wall D.P., Van de Broek M., Rutgers M., Bampa F., Creamer R.E., Henriksen C.B., 2019 - A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7-115. doi: 10.3389/fenvs.2019.00115
- de Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J., 2002 - A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41. pp. 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré, N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A., Ranjard L., 2020 - Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français, *Etude et Gestion des Sols*, 27. pp. 51-71.
- Dobarco M.R., Cousin I., Le Bas C., Martin M.P., 2019 - Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336. pp. 81-95.
- Dominati E., Patterson M., Mackay A., 2010 - A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69. pp.1858-1868. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002
- Doran J.W., Parkin T.B., 1994 - Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Wisconsin, USA : SSSA Inc. pp. 3-21.
- FAO et ITPS, 2015 - État des ressources en sols du monde - Résumé technique. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Groupe technique intergouvernemental sur les sols, Rome, Italie.
- Haines-Young R.H., Potschin M.B., 2010 - The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In : D. Raffaelli & C. Frid (Eds.), *Ecosystem Ecology: A New Synthesis (Ecological Reviews*, pp. 110-139). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511750458.007
- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Auclerc A., Bougon N., Capowiez Y., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Deronzier G., Hedde M., Lévêque A., Maunoury-Danger F., Palka L., Pérès G., Ranjard L., Vanhée B., Villenave C., Wroza S., Bispo A., 2020 - A soil biodiversity survey coupled with the National Soil Quality Monitoring Network? Global symposium on soil biodiversity I FAO HQ I Rome, Italy, 10-12 May 2020
- Hanson K., Laclau J.-P., Saint-André L., Mareschal, L., van der Heijden, G., Nys, C., Nicolas, M., Ranger, J., Legout, A., 2020 - Chemical fertility of forest ecosystems. Part 1 : Common soil chemical analyses were poor predictors of stand productivity across a wide range of acidic forest soils. *Forest Ecology and Management*, 461 pp. 117843
- IPCC, 2019 - Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold., J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- Keller C., Lambert-Habib M.-L., Robert S., Ambrosi J.-P., Rabot E., 2012 - Méthodologie pour la prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme : application à deux communes du bassin minier de Provence, Sud-Ouest européen, 33, pp. 11-24
- Kibblewhite M., Ritz K., Swift M., 2008 - Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363 (1492). pp. 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Nortcliff S., 2002 - Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88. pp. 161-168. bONF, FNEDT, 2017 - PRATIC'SOLS - Guide sur la praticabilité des parcelles forestières [https://www.fcba.fr/sites/default/files/files/GUIDE%20PRACTIC%20SOLS\\_WEB%20vdef.pdf](https://www.fcba.fr/sites/default/files/files/GUIDE%20PRACTIC%20SOLS_WEB%20vdef.pdf).
- Puydarrieux P., Beyou W., 2017 - EFESÉ, évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques : cadre conceptuel. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Rabot E., Keller C., Ambrosi J.-P. Robert S., 2017 - Revue des méthodes mul-

- tiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols dans le cadre de l'aménagement du territoire. *Etude et Gestion des Sols*, 24. pp. 59-72.
- Schindelbeck R.R., Van Es H.M., Abawi G.S., Wolfe D.W., Whitlow T.L., Gugino B.K., Idowu O.J., Moebius-Clune B.N., 2008 - Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 88. pp. 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.006>
- Schulte R.P.O., Bampa F., Bardy M., Coyle C., Creamer R.E., Fealy R., Gardi C., Bahadur G.B., Jordan P., Laudon H., O'Donoghue C., Ó'Uallacháin D., O'Sullivan L., Rutgers M., Six J., Toth G.L., Vrebos D., 2015 - Making the Most of Our Land : Managing Soil Functions from Local to Continental Scale. *Frontiers in Environmental Science*, 3. 81 p. doi:10.3389/fenvs.2015.00081
- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M-S., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Decaëns T., Bottinelli N., Jaillard B., Chevallier T., Suvannang N., Sajjaphan K., Thaler P., Gay F., Brauman A., 2019 - Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A : concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators* 97. pp. 100-110.
- Tibi A., Therond O., 2017 - Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 118 p. Disponible sur <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/EFESE-servicesecosystemiques-rendus-par-les-ecosystemes-agricoles#>
- Tilman D., 1999 - The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology* 80 :1455-1474.
- Tóth G., Stolbovoy V., Montanarella L., 2007 - Soil quality and sustainability evaluation. An integrated approach to support soil-related policies of the European Union. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 22721 EN, Luxembourg, 4
- Tóth G., Weynant M., Nemes A., Makó A., Bilas G., Tóth G., 2015 - New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66 pp. 226-238.
- Velasquez E., Lavelle P., Andrade M., 2007 - GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 39. pp. 3066-3080.
- Yoshida F., 2002 - *The Economics of Waste and Pollution Management in Japan*. Springer. Doi: 10.1007/978-4-431-67032-2. pp. 163-183.



## Annexe 1 :

## Liste des projets utilisés pour l'analyse bibliographique

- Agrinnov. (2016).** Tester les Indicateurs de l'état biologique des sols en lien avec les pratiques agricoles (Compte rendu final de projet) (p. 80).
- AgroEcoSol. (2017).** Aurea, Développement d'une filière technique et économique sur le diagnostic et le conseil pour une gestion agroécologique des sols cultivés. <https://www.ademe.fr/agro-eco-sol>
- Agro Transfert & Sol d'Phy (Éd.). (s. d.).** Fiche de Notation de la structure du sol par horizon issue du guide méthodique test bêche structure et action des vers de terre. <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/08/Guide-m%C3%A9thode-beche-web.pdf>
- Appoline. (2014).** Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bioindicateur nématofaune. Ademe. <https://www.emse.fr/~bouchardon/recherche/GESIPOL/Appoline/Appoline.htm>
- AP3C. (2017).** Adaptation des Pratiques Culturelles au Changement Climatique. Sidam, chambres d'agriculture. <https://www.sidam-massifcentral.fr/wp-content/uploads/2017/07/AP3C-PlaquetteEtape1.pdf>
- Biofunctool®: Thoumazeau et al. (2019).** Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. Ecological Indicators 97:100-110. <http://agritrop.cirad.fr/589429/>
- BioIndicateurs de qualité des sols. (2008).** Validation de bioindicateurs floristiques pour la surveillance de l'état nutritionnel des sols forestiers français à partir des données de l'inventaire forestier national - Programme Ademe - IFN - ENGREF.
- BioIndicateurs II. (2009).** Développement d'indicateurs biologiques pour décrire la qualité d'un sol. Programme ADEME. <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>
- BioDISSPOL. (2015).** Développement de biomarqueurs microbiens pour le diagnostic et le suivi de sites pollués par les solvants chlorés. Ademe, BRGM, Université de Strasbourg.
- BioTrAs : Biomarqueurs dynamiques du transfert de l'arsenic du sol vers les eaux : application au cas du site d'Auzon : Joulain, C., Mercier, A., Hellal, J., Laperche, V. (2010).** [https://www.researchgate.net/publication/320083819\\_BioTrAs\\_Biomarqueurs\\_dynamiques\\_du\\_transfert\\_de\\_l%27arsenic\\_du\\_sol\\_vers\\_les\\_eaux\\_application\\_au\\_cas\\_du\\_site\\_d%27Auzon\\_Rapport\\_final](https://www.researchgate.net/publication/320083819_BioTrAs_Biomarqueurs_dynamiques_du_transfert_de_l%27arsenic_du_sol_vers_les_eaux_application_au_cas_du_site_d%27Auzon_Rapport_final)
- BioTubes. (2016).** Ademe. <https://www.elisol.fr/le-projet-bio-tubes-fetes-1-ans/>
- BLE EHLG. (2013).** Les espèces indicatrices : Les plantes comme signal d'alarme. [https://ehlgbai.org/wp-content/uploads/2016/07/plantes-indicatrices2013\\_EHLG.pdf](https://ehlgbai.org/wp-content/uploads/2016/07/plantes-indicatrices2013_EHLG.pdf)**Clés de sol : un projet de sciences participatives pour caractériser les sols et leurs fonctions : Jondreville, C., Lemercier, B., Gascuel, C. (2018).** Fondation de France. [https://sciencesparticipatives.inra.fr/wp-content/uploads/sites/22/2018/09/18\\_06\\_22\\_projet\\_cl%C3%A9s\\_de\\_sol.pdf](https://sciencesparticipatives.inra.fr/wp-content/uploads/sites/22/2018/09/18_06_22_projet_cl%C3%A9s_de_sol.pdf)
- Climagri®. (2016).** Climagri : un outil et une démarche pour co-construire des stratégies territoriales d'atténuation des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre d'origine agricole sur les territoires. Ademe. DOI: 10.4267/pollution-atmospherique.5664
- COMBINE : coupler des indicateurs chimiques et biologiques pour une évaluation intégrative des risques sanitaires et environnementaux. (2017).** Ademe. [https://upds.org/wp-content/uploads/2019/07/UPDS\\_Mag\\_6-aout2019\\_TESORA.pdf](https://upds.org/wp-content/uploads/2019/07/UPDS_Mag_6-aout2019_TESORA.pdf)
- DANE : développement d'un outil d'aide à la décision dédié à la qualité biologique des sols agricoles, naturels ou pollués. (2016).** Programme d'Investissements d'Avenir initiative PME. <https://www.elisol.fr/tag/pia-pme-biodiversite/>
- DESTISOL. (2018).** Prendre en compte les potentialités des sols dans l'aménagement urbain - Programme Ademe - Gesipol.
- EcoFINDERS. (2015).** <https://projects.au.dk/ecofinders/>
- EFESE : évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques : Puydarrieux, P., Beyou, W. (2017).** Cadre conceptuel. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- ENVIASSO. (2006).** Environmental Assessment of Soil for mOnitoring. Scientific support to policy - European Commission 6th Framework Programme. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Envasso/>
- ERITME : évaluation des risques de transfert de métaux : Pauget B., Coeurdassier M., de Vaufléury A., 2010.** Rapport du programme bioindicateurs 2 - Utilisation et intérêt des escargots pour la bioindication de la qualité des sols. <http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?10>
- Gerboise. (2017).** GEstion raisonnées de la Récolte de BOIS Energie. GIP Ecofor, Ademe. 134 p. <https://www.ademe.fr/gerboise-gestion-raisonnee-recolte-bois-energie>
- Gestion et Conservation de l'État Organique des Sols. (2017).** SIMEOS-AMG Outil de Simulation de l'État Organique des Sols. [http://www.simeos-amg.org/images/Guide\\_utilisation\\_SIMEOS-AMG\\_v1.3\\_28-01-03.pdf](http://www.simeos-amg.org/images/Guide_utilisation_SIMEOS-AMG_v1.3_28-01-03.pdf)
- HUMUS Diagnostic participatif des sols (Notice d'utilisation) (2018).** Petittidier, E., & Rochette, T., association Terre de Liens. <https://terredeliens.org/la-notice-du-diagnostic-humus-fait.html>
- IBQS.** Indice biologique de la qualité des sols : Bio-indicateur de la qualité des sols basés sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Institut de Recherche pour le Développement. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/indice-biologique-qualite-sols-ibqs-2011.pdf>
- INSENSE (2018).** Indicateurs de SENSibilité des Écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse ». Ademe. 262 p. <https://www.ademe.fr/insense-indicateurs-sensibilite-ecosystemes-forestiers-soumis-a-recolte-accrue-biomasse>
- InVEST. (2015).** Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs. Natural capital project. <https://ipbes.net/policy-support/tools-instruments/integrated-valuation-ecosystem-services-tradeoffs-invest>
- ISQAPER. (2015).** Interactive Soil Quality Assessment in Europe and China for Agricultural Productivity and Environmental Resilience. EU framework programme for research and innovation horizon 2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/635750/fr>
- LANDMARK. (2017).** Schulte, R.P.O., Bampa, F., Bardy, M., Coyle, C., Creamer, R.E., Fealy, R., Gardi, C., Bahadur, G.B., Jordan, P.,

Laudon, H., O'Donoghue, C., Ó'hUallacháin, D., O'Sullivan, L., Rutgers, M., Six, J., Toth, G.L. and Vrebois, D. (2015), Making the Most of Our Land: Managing Soil Functions from Local to Continental Scale. *Frontiers in Environmental Science*, 3, 81. doi:10.3389/fenvs.2015.00081

**Les bio-indicateurs de l'état des sols : Principe et exemples d'utilisation.** (2017). Ademe. 30 p. [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bio-indicateurs\\_010216.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bio-indicateurs_010216.pdf)

**MUSE : intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme.** (2017). Ademe - Modeval Urba. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/projet-muse-integrer-multifonctionnalite-sols-documents>

**PICLEG (2018) Lecompte, F. (s. d.).** Fertilité des sols cultures légumières - Note de synthèse PICLEG

Proposal for a European soil monitoring and assessment framework. (2001). European Environment Agency.

**PHYTOPERF : l'évaluation intégrée de la phytostabilisation à une échelle industrielle.** (2007). <http://extranet.groupeirhenvironnement.com/phytoperf/>

**PRATICSOLS.** (2017). Guide sur la praticabilité des parcelles forestières. ONF. 48 p. ISBN : 978-2-84207-500-10. <https://www.onf.fr/onf/lonf-agit/4/192::praticols-guide-sur-praticabilite-des-parcelles-forestieres.html>

**P2C (2019) Morvan-Bertrand Annette, Amiaud Bernard, Mischler Pierre, Klumpp Katja, Vécrin Régis, Husse Sébastien, Louault Frédérique, Cliquet Jean-Bernard, Lemauviel-Lavenant Servane.** P2C, la plante : pilote de la capture et du transfert de carbone vers le sol des prairies - Rapport final. ADEME. 41 pages

**RAMSOIL.** (2012). Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe - Status and options for harmonization for risks by erosion, compaction, salinization, organic matter decline and landslides.

**RECORD : mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés.** (2018). [http://vertigolab.eu/wp-content/uploads/2018/11/Synth\\_record17-1021\\_1A.pdf](http://vertigolab.eu/wp-content/uploads/2018/11/Synth_record17-1021_1A.pdf)

**RESOBIO.** (2015). Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Ademe, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, GIP Ecofor. 243 p. <https://www.ademe.fr/projet-resobio-gestion-remanents-forestiers-preservation-sols-biodiversite>

**RESPIRE - Récolte des menus bois en forêt - Potentiel, Impact, Indicateurs et remédiations par épandage de cendres de bois.** 111 p. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/synthese-respire-recolte-bois-foret-2019.pdf>

**RMQS : réseau de mesure de la qualité des sols : Jolivet, C., Boullonne, L., Ratié, C.** (2006). Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p. - [https://www.gissol.fr/publis/RMQS\\_manuel\\_31032006.pdf](https://www.gissol.fr/publis/RMQS_manuel_31032006.pdf)

**SoIAB (Éd.). (s. d.).** Fiche Évaluer la capacité d'infiltration d'un sol. <http://www.itab.asso.fr/programmes/solab.php>

**Soil Quality Indicators.** (2015). Physical, chemical, and biological indicators for soil quality assessment and management. USDA Natural Resources Conservation Services.

**Soil Quality Indicators: The Next Generation.** (2013). AgResearch. 155 p. - <https://envirolink.govt.nz/assets/Envirolink/Soil20Quality20Indicators-20The20next20generation-Final-June16-ED.pdf>

**Soil Health.** (2016). <https://soilhealthinstitute.org/>

**SoilServ.** (2018). Evaluation multi-échelle des services écosystémiques des sols au sein d'agroécosystèmes - ANR : Dynamique des éco-

systèmes en vue de leur gestion durable. <https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE32-0005>

**Soil's role in restoring ecosystem services.** (2014). An ecosystem services approach to the evaluation of soil conservation policy in New Zealand hill country. <https://scisoc.confex.com/scisoc/2014SES/webprogram/Paper84559.html>

**Status of the World's Soil Resources.** (2015). FAO. 607 p. ISBN 978-92-5-109004-6. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>

**S20.** (2018). Food and Nutrition Security: Improving Soils and Increasing Productivity (S20 soils final version executive summary and signatures) (p. 6). Argentina.

**Sol-D'Phy : Tomis, V., Turillon, C., & Duparque, A. (s. d.).** Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol (Guide complémentaire aux 3 méthodes) (p. 12). Projet Sol-D'Phy.

**SUPRA : sols urbains et projets d'aménagement.** (2017). Ademe - Graine. [http://www.gissol.fr/wp-content/uploads/2018/07/potentialites-sols-amenagement-urbain-SUPRA-Destisol\\_GSere\\_IGCS-Nancy2018-2.pdf](http://www.gissol.fr/wp-content/uploads/2018/07/potentialites-sols-amenagement-urbain-SUPRA-Destisol_GSere_IGCS-Nancy2018-2.pdf)

**Talveg 2 : Talus Végétalisés.** (2011). [http://websie.cefe.cnrs.fr/talveg2/?page\\_id=25](http://websie.cefe.cnrs.fr/talveg2/?page_id=25)

**Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols.** (2017). Ministère de l'agriculture. <https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols>

**UqualiSol-ZU.** (2012). Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine - Application du Bassin Minier de Provence. Programme GESSOL.

**Urban SMS.** (2008). Bodenmanagement-Strategie für städtische Räume. INTERREG IV B der Europäischen Union Programm. Zentraleuropäischer Kooperationsraum (Central Europe). <https://www.stuttgart.de/urban-sms>

## Annexe 2 :

Contextes agricole et forestier proposés pour l'atelier 3 sur la construction de l'outil de diagnostic de la qualité des sols et la sélection des paramètres liés avec les acteurs professionnels de la gestion des sols agricoles et des sols forestiers

### Proposition de contexte - Milieu agricole

---

*Vous êtes nouvel exploitant (locataire) d'une parcelle agricole actuellement exploitée en conventionnel. Vous venez de signer un bail à long terme avec une clause vous imposant d'améliorer la qualité de vos sols. Vous souhaitez conduire un diagnostic de la qualité de vos sols, afin de savoir si vos pratiques sont conciliables avec la préservation de la qualité des sols. Pour cela, vous avez d'ores et déjà identifié des unités de sols homogènes, au sein desquelles conduire votre diagnostic. Votre parcelle agricole présente les caractéristiques suivantes :*

#### **Contexte stationnel :**

- Région : Nord de la France - Picardie
- Climat : Océanique
- Roche-mère : Craies marneuses
- Altitude : 33 mètres
- Pente : 0 %

#### **Indice**

Pas d'indice de carence, production "normale"

#### **Production et usages / pratiques du sol :**

- Rendement en conventionnel "normal"
- Production végétale de grandes cultures (blé, maïs grain, etc.)
- Objectifs de conversion à l'agriculture biologique

#### **Questions :**

- **Temps : actuellement, quel diagnostic mettez-vous en œuvre, au sein d'une unité de sols homogènes, pour vous assurer que les pratiques envisagées sont conciliables avec la préservation de la qualité de vos sols ?**
- **Restitution temps 1 : déterminez les fonctions évaluées avec ce diagnostic "actuel" et indiquez les fonctions non évaluées**
- **Temps 2 : enrichir votre diagnostic "actuel" en considérant l'évaluation de nouveaux indicateurs pour parvenir à une évaluation multifonctionnelle de la qualité de vos sols**

## Annexe 2 (suite) :

Contextes agricole et forestier proposés pour l'atelier 3 sur la construction de l'outil de diagnostic de la qualité des sols et la sélection des paramètres liés avec les acteurs professionnels de la gestion des sols agricoles et des sols forestiers

### Proposition de contexte - Milieu forestier

---

*Vous êtes gestionnaire pour le compte d'un propriétaire forestier d'un massif forestier supérieur à 25 hectares dans un contexte de renouvellement de PSG. Vous souhaitez conduire un diagnostic de la qualité de vos sols, afin de savoir si vos pratiques sont conciliables avec la préservation de la qualité des sols. Pour cela, vous avez d'ores et déjà identifié des unités de sols homogènes, au sein desquelles conduire votre diagnostic. Votre massif forestier présente les caractéristiques suivantes :*

#### **Contexte stationnel :**

- SER: Bocage normand et pays de Fougères (SER A)
- Roche-mère : Grès Armoricaïn
- Altitude : 353 mètres
- Pente : 10 %
- Sol brun à brun Acide (3 horizons)
- Humus de type mull
- Essence :

#### **Indice**

Pas d'indice de carence, production "normale"

#### **Usages pratiques du sol :**

- Peuplement adulte
- Sylviculture actuelle sans impact sur le sol
- Objectif dans le nouveau PSG : accroître les exportations de biomasse

#### **Questions :**

- **Temps : actuellement, quel diagnostic mettez-vous en œuvre, au sein d'une unité de sols homogènes, pour vous assurer que les pratiques envisagées sont conciliables avec la préservation de la qualité de vos sols ?**
- **Restitution temps 1 : déterminez les fonctions évaluées avec ce diagnostic "actuel" et indiquez les fonctions non évaluées**
- **Temps 2 : enrichir votre diagnostic "actuel" en considérant l'évaluation de nouveaux indicateurs pour parvenir à une évaluation multifonctionnelle de la qualité de vos sols**

## Annexe 3 :

### Contextes urbain et agricole proposés pour l'atelier avec les acteurs de la recherche et du développement sur les sols urbains et agricoles

#### Proposition de contexte - vers un développement urbain intégrant la qualité des sols

---

Pour répondre à un besoin de réaménagement urbain, une commune de 500 000 habitants décide de compléter les diagnostics déjà réalisés sur 50 hectares de friches urbaines afin de favoriser leur reconversion et proposer un nouvel usage adapté à la qualité des sols en place. Ces friches urbaines sont les vestiges d'activités industrielles ou d'activités tertiaires. Les premiers diagnostics ont mis en évidence la présence de polluants métalliques et organiques avec une répartition très hétérogène de cette pollution en fonction de leur passé historique. Les besoins de la commune en termes de développement urbain sont les suivants : développement de 20 hectares de surfaces construites (bâtiments, routes, etc.), et de 30 hectares d'espaces verts avec une amélioration d'une zone d'expansion des crues liées à la présence d'une rivière qui s'écoule juste en périphérie de la friche. Parmi ces 30 hectares, une partie doit être allouée à une production maraichère (jardins partagés, familiaux, etc.) et une autre partie doit être allouée à la réalisation d'un parc urbain avec la volonté d'en faire un parc à la fois récréatif et à la fois éducatif (observatoire pour oiseaux, prairies pâturées pour des vaches Highland Cattle, race adaptée aux zones humides). La partie du parc aménagée en zone humide sera également un espace de préservation et d'observation de la faune. Ces espaces cultivés devront constituer, à l'échelle de la commune, une véritable trame verte et bleue. L'idée de développement d'une trame brune est également réfléchie au sein de la commune, puisque les axes prioritaires de développement sont la régulation du climat, la régulation de la qualité de l'air et le retour de la biodiversité des sols en milieu urbain.

Dans ce contexte, vous représentez un bureau d'études mandaté par la commune pour évaluer la qualité des sols des friches urbaines et pour orienter leurs différents usages ;

Le projet de réaménagement doit concilier plusieurs objectifs :

#### **A l'échelle de la zone urbaine :**

- Définir les zones susceptibles d'être reconverties en zone résidentielle (20 ha) qui peuvent faire l'objet de constructions (Bâtiments) et de voies d'accès pour favoriser la fréquentation du parc localisé à proximité (route, parking).
- Définir les zones susceptibles d'être reconverties en parc urbain (zone naturelle de 30 ha) avec le développement de nouveaux usages (promenade, loisirs, jardins familiaux) afin de préserver la continuité écologique des 3 trames (verte, bleue et brune), la régulation du climat global (poumon vert au cœur de la ville) et la régulation de la qualité de l'air.

#### **A l'échelle locale :**

- Développer de nouveaux usages axés sur la détente, les loisirs et la promenade associant une zone humide (sans accès au public) et un lieu de promenade (avec présence d'animaux, terrain réservé aux jeux de plein air) ;
- Proposer sur une autre partie de la friche la mise en place de jardins familiaux pour une production maraichère, après avoir vérifié l'absence de transfert des polluants vers les végétaux consommés ; proposer le choix des espèces à privilégier en priorité ainsi que la manière dont la macrofaune et microfaune du sol pourraient reconquérir cette ancienne friche urbaine localisée sur des sols de faible qualité agronomique.



## Annexe 3 (suite):

### Contextes urbain et agricole proposés pour l'atelier avec les acteurs de la recherche et du développement sur les sols urbains et agricoles

Pour chacune de ces études (à l'échelle de la zone urbaine ou à l'échelle locale), quelles seraient les fonctions rendues par les sols à étudier et à privilégier ainsi que les services associés que vous souhaiteriez mettre en avant auprès de cette commune ?

### Proposition de contexte - vers la protection d'une aire de captage

---

Dans un souci de maintien de la qualité de l'eau qui alimente sa ville, une commune envisage la création d'un filtre naturel épurateur d'eau plutôt que la construction onéreuse d'usines de traitements des eaux. Pour se faire, la commune souhaite utiliser le pouvoir filtrant du sol. Elle envisage alors de mettre en place une politique de contractualisation avec les gestionnaires des terres partiellement ou totalement situées sur la zone de captage (représentant un total de 1 000 hectares de terres agricoles et forestières) afin que ceux-ci passent en exploitation biologique. Le distributeur d'eau potable et la commune proposent à ces gestionnaires une compensation financière ainsi qu'une assurance de vendre leurs produits dans les propres services de la commune (crèche, école, etc.), à condition qu'ils adoptent des pratiques qui maintiennent la qualité du sol et par conséquent de l'eau. Le contrat prévoit aussi l'adhésion obligatoire des agriculteurs à une association d'agriculture biologique.

*Dans ce contexte, vous représentez un bureau d'études mandaté par la commune pour s'assurer que :*

- *à l'échelle d'une parcelle agricole : cette politique de contractualisation entre agriculteur et commune n'a pas d'effet sur la production des terres de l'agriculteur, notamment à court terme lors du passage en agriculture biologique.*
- *à l'échelle de l'aire de captage : les sols présentent toutes les qualités pour épurer naturellement l'eau ;*

#### **Contexte stationnel :**

- Région : Nord de la France - Picardie
- Climat : Océanique
- Altitude : 33 mètres
- Pente : 20 %
- Risque constaté : glissement de terrain

## Annexe 4 :

Liste des 135 paramètres physiques, chimiques et biologiques retenus pour la première étape du projet.

Nom du paramètre	Type de paramètre
Activités enzymatiques (phosphatase, uréase...)	Biologique
Diversité taxonomique bactéries et champignons	Biologique
Diversité microbienne fonctionnelle	Biologique
Biomasse microbienne (moléculaire ...)	Biologique
Ratio champignons/bactéries	Biologique
Indice Omega-3	Biologique
Densité racinaire	Biologique
SET escargot	Biologique
Diversité mésofaune (collemboles, cloportes, carabes...)	Biologique
Diversité et structure taxonomique des communautés de vers de terre	Biologique
Indice de décomposition de MO	Biologique
Diversité de spores	Biologique
Maintien des habitats	Biologique
Régulation des ravageurs	Biologique
Abondance, diversité, structure, enrichissement des nématodes	Biologique
Potentiel de pollinisation	Biologique
Richesse des morpho espèces des pollinisateurs	Biologique
Abondance potentielle banque graines adventices	Biologique
Niveau de régulation potentielle des pucerons	Biologique
Activité mésofaune (ex. test lamina)	Biologique
Respiration basale	Biologique
Potentiel de nitrification / dénitrification	Biologique
Abondance oxydants d'ammoniac et dénitrifiants chez archées et bactéries	Biologique
C microbien, N microbien	Biologique
Rapport C microbien / C total	Biologique
Indice CMT végétaux	Biologique
Expression génique de la métallothionine (MT) par les vers de terre	Biologique
Bioaccumulation des éléments métalliques par les micromammifères	Biologique
Indicateur floristique de la richesse chimique et aération du sol	Biologique
Indicateur odonates-lépidoptères	Biologique
Densité, forme des racines et profondeur d'enracinement	Biologique
Type d'humus	Biologique
Concentrations foliaires en Ca, Mg, K et P	Biologique
pH <sub>eau</sub> , PH <sub>KCl</sub>	Chimique
Phosphore assimilable	Chimique
Taux de matière organique	Chimique
Capacité d'échange cationique (CEC)	Chimique

Nom du paramètre	Type de paramètre
Taux de saturation en cations échangeables (S/CEC)	Chimique
N total	Chimique
N potentiellement minéralisable (APM)	Chimique
Rapport C/N (total)	Chimique
CaCO <sub>3</sub> total et actif	Chimique
N non lixivié par rapport aux entrées	Chimique
Teneur en C organique	Chimique
Disponibilité en nutriments N	Chimique
Variation annuelle moyenne du stock C organique	Chimique
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> fixé sur une membrane échangeuse d'anions	Chimique
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> fixé sur une membrane échangeuse de cations	Chimique
Carbone labile	Chimique
Teneur en cations échangeables (K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> )	Chimique
Teneur en oligoéléments (Fe, Zn, Cu, B...)	Chimique
Dépassement charges critiques Soufre et Azote	Chimique
Taux de sodium échangeable	Chimique
Traces de pollution, Odeurs	Chimique
ETM Totaux	Chimique
Composés Traces Organiques Totaux	Chimique
Indice de sensibilité des sols aux exportations de biomasse (INSENSE)	Chimique
Structure/porosité du sol (ex. test-bêche)	Physique
Texture	Physique
Compacité/densité apparente	Physique
Taux d'éléments grossiers	Physique
Hydromorphie	Physique
Stockage de C organique	Physique
Stabilité des agrégats (ex. slake-test)	Physique
Atténuation des îlots de chaleur	Physique
Contribution à la recharge des nappes	Physique
Contribution au maintien des débits d'étiage et à la régulation des crues	Physique
Réserve utile	Physique
Aléa érosif	Physique
Etat de surface (traces d'érosion et indice de battance)	Physique
Etat d'humidité	Physique
Perméabilité (conductivité hydraulique)	Physique
Conductivité électrique	Physique
Minéralogie de l'argile	Physique
Classe de drainage	Physique
Indice de sensibilité des sols au tassement (PRATIC'SOLS)	Physique
Epaisseur de sol	Morphologique
Couleur	Morphologique
Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers)	Géotechnique
Résistance au cisaillement	Géotechnique

## Annexe 5 :

Paramètres physiques (orange), chimiques (violet) et biologiques (bleu) retenus pour les ateliers. Te-Obs : observation terrain - Te-Me : mesure terrain - La-An : analyse laboratoire - Me-La : mesure laboratoire - Ca : calcul - Mo : modélisation (Adapté de Calvaruso *et al.*, 2019 et Blanchart *et al.*, 2019). La robustesse du référentiel est représentée par + pour les paramètres possédant des référentiels assez bien documentés et +/- pour les paramètres possédant des référentiels encore trop peu documentés (utilisation par méthode comparative de la parcelle avec placette non perturbée à proximité).

	Nom du paramètre	Méthodologie d'évaluation	Robustesse du référentiel
Physique	Réserve en eau utile	Mo (Tòth <i>et al.</i> , 2015 ; Dobarco, 2019)	+
	Etat de surface (érosion, battance)	Te-Obs	+
	Vitesse d'infiltration de l'eau	Te-Me	+/-
	Traces d'hydromorphie	Te-Obs	+
	Humidité du sol	Te-Obs ou Me-La	+
	Densité, état racine, prof. Enracinement	Te-Obs	+
	Structure/porosité	Te-Obs	+
	Stabilité des agrégats	Te-Me	+/-
	Densité apparente/compacité	Te-Obs ou Te-Me	+
	Sensibilité à la compaction	Te-Obs + Mo (ONF, FNETD, 2017)	+
	Epaisseur de sol	Te-Obs	/
	Texture du sol	Te-Obs ou La-An	/
	Pierrosité	Te-Obs ou La-An	/
Chimique	Capacité d'échange cationique et taux de saturation	La-An	+
	pHeau/pHKCl	Te-Me ou La-An	+
	Teneur en éléments assimilables (Ca, Mg, K, Na, P)	La-An ou Te-Me	+
	Teneur oligoéléments	La-An	+
	Teneur et stocks en MO et Corganique	Te-Obs ou La-An	+
	Evolution teneurs et stocks de Corganique	Mo (Barré <i>et al.</i> , ce numéro)	+
	Pool carbone labile	Te-Me ou La-An	+/-
	Pool carbone stable	La-An	+/-
	Teneur N totale	La-An	+
	N labile	Te-Me et/ou La-An	+
	Rapport C/N	Ca	+
	Teneur métaux lourds, HAP, PCB, ... (agri)	La-An	+
	Mobilité métaux lourds (agri)	La-An	+
	Teneur calcaire total et calcaire actif	La-An et Te-Obs	+
Sensibilité aux exportations	Te-Obs + Mo (Augusto <i>et al.</i> , 2018)	+	

## Annexe 5 (suite) :

Paramètres physiques (orange), chimiques (violet) et biologiques (bleu) retenus pour les ateliers. Te-Obs : observation terrain - Te-Me : mesure terrain - La-An : analyse laboratoire - Me-La : mesure laboratoire - Ca : *calcul* - Mo : modélisation (Adapté de Calvaruso *et al.*, 2019 et Blanchart *et al.*, 2019). La robustesse du référentiel est représentée par + pour les paramètres possédant des référentiels assez bien documentés et +/- pour les paramètres possédant des référentiels encore trop peu documentés (utilisation par méthode comparative de la parcelle avec placette non perturbée à proximité).

<b>Biologique</b>	Abondance et diversité vers de terre	Te-Obs	+
	Abondance et diversité mésofaune (collembole)	La-An	+/-
	Abondance et diversité mésofaune (cloporte-carabe)	La-An	+/-
	Abondance et diversité microfaune (nématode)	La-An	+
	Biomasse microbienne	La-An	+
	Biomasse moléculaire microbienne	La-An	+
	Respiration basale	Te-Me ou La-An	+
	Vitesse décomposition MO	Te-Me	+/-
	Diversité taxonomique microbienne	La-An	+/-
	Ratio champignons/bactéries	Ca	+/-
	Activités enzymatiques ciblant des éléments	La-An	+/-
	Bioindicateurs - réponse - végétation	Te-Obs	+
	Bioindic - accumulation - indice SET - végétaux	La-An	+
	Bioindic - accumulation - indice SET - escargots	La-An	+
	Indice Oméga 3	La-An	+
Niveau d'activité biologique	Te-Me	+/-	



