

Juillet
2019

DIAGNOSTIC DE LA QUALITE DES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS

Indicateurs de suivi et
stratégies de déploiement

RAPPORT FINAL



Etude réalisée par :

ekolog
conseil, recherche et formation


EcoSustain

 **INRA**
SCIENCE & IMPACT



LABORATOIRE SOLS
& ENVIRONNEMENT

 **UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'étude, à son suivi et à la relecture du rapport dans le cadre de son comité de pilotage ou du conseil scientifique du Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les sols (RNEST).

Les membres du comité de pilotage

- Marie-Françoise Slak (Ministère en charge de l'agriculture)
- Nolwenn bougon (AFB)
- Catherine Julliot (Ministère en charge de l'environnement)
- Elizabeth Pagnac (Ministère en charge de l'environnement)
- Pauline Cazes (Ministère en charge de l'agriculture)
- Isabelle Feix (ADEME)
- Jérôme Mousset (ADEME)

Les membres du Conseil Scientifique d'RNEST dont ceux qui ont participé au groupe de travail dédié :

- Lionel Ranjard (INRA)
- Yves François
- Yves Le Bissonnais
- Cécile Claveirole (CESE)
- Lauric Cécillon (IRSTEA)
- Lionel Alletto (Chambre d'agriculture Occitanie)
- Marie-Christine Dictor (BRGM)
- Anne-Sophie Perrin (Terres Inovia)

Les participants aux ateliers de co-construction.

Les experts ayant contribué aux entretiens complémentaires :

- Lionel Ranjard (INRA)
- Cécile Claveirole (CESE)
- Patrick Le Gouée (Vigisol)
- Alexis Bourdon (SAFER de Normandie)
- Guillaume Jouan (FNSAFER)
- Adrienne Grêt-Regamey (ETH Zürich)

Egalement :

- Antonio Bispo (INRA)
- Delphine Derrien (INRA)
- Stéphane Uroz (INRA)

CITATION DE CE RAPPORT

Christophe Calvaruso, Anne Blanchart, Sophie Bertin, 2019. Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 16MAR000225

Coordination technique - ADEME : EGLIN Thomas et PIERART Antoine

Service Forêts, Alimentation, Bio-économie, Direction Productions et Energies Durables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
1. Contexte et objectifs de l'étude	7
1.1. Contexte de l'étude	7
1.2. Définitions des mots clés de l'étude	8
1.3. Objectifs de l'étude	9
2. Approche mise en œuvre – Méthodologie de l'étude	10
2.1. Démarche générale	10
2.2. Calendrier de l'étude	10
2.3. Atelier de cadrage	11
2.4. Etat de l'art.....	11
2.4.1. Etat de l'art des indicateurs et outils de diagnostic de la qualité des sols	12
2.4.2. Etat des lieux sur les stratégies de déploiement potentielles	13
2.5. Ateliers de co-construction avec des professionnels des sols agricoles et forestiers...	13
2.5.1. Atelier 1 : questionnaire en ligne	14
2.5.2. Atelier 2 : stratégies de déploiement	15
2.5.3. Atelier 3 : outil de diagnostic de la qualité des sols	15
2.5.4. Atelier 4 : restitution des résultats et co-construction des pistes de valorisation de l'étude.....	16
2.6. Entretiens complémentaires.....	16
3. Résultats	16
3.1. Glossaire.....	16
3.2. Etat de l'art.....	17
3.2.1. Fonctions des sols et services auxquels contribuent les sols	17
3.2.1.1. Relations entre fonctions du sol, fonctions agronomiques et objectifs agro-sylvicoles.....	19
3.2.1.2. Propriétés et indicateurs de fonctions	22
3.2.1.3. Indicateurs biologiques.....	24
3.2.1.4. Outils de diagnostics intégrés.....	26
3.2.2. Identification de stratégies de déploiement	29
3.2.3. Bilan intermédiaire des résultats de l'état de l'art	34
3.3. Ateliers de co-construction avec les acteurs des sols agricoles et forestiers	35
3.3.1. Atelier 1 : questionnaire en ligne	35
3.3.2. Atelier 2 : stratégies de déploiement	39
3.3.3. Atelier 3 : outil de diagnostic de la qualité des sols	41
3.3.4. Atelier 4 : restitution des résultats et co-construction des pistes de valorisation de l'étude.....	44
3.3.5. Bilan intermédiaire des résultats des ateliers	46
3.4. Entretiens complémentaires.....	48
3.4.1. Entretien 1.....	48
3.4.2. Entretien 2.....	49
3.4.3. Entretien 3.....	50
3.4.4. Entretien 4.....	53
4. Recommandations et suites opérationnelles (perspectives)	54
4.1. Cadre général des stratégies de déploiement identifiées.....	54



4.2. Démarche globale autour des stratégies	58
4.2.1. Formation et sensibilisation	59
4.2.2. Un jeu d'indicateurs partagé	59
4.2.3. Amplifier la capitalisation des analyses dans une base de données (BDD) sol commune	72
4.2.4. Dynamiser les échanges entre les acteurs de différents secteurs et usages des sols	72
4.2.5. Réaliser des expérimentations pilotes avant de généraliser	73
4.2.6. Création d'un centre de ressources et d'une coordination nationale sur les sols	74
5. Conclusion générale	75
Index des tableaux et figures	76
Sigles et acronymes	77
Annexes	78
<i>Annexe A : Glossaire</i>	<i>78</i>
<i>Annexe B : Atelier de cadrage</i>	<i>78</i>
<i>Annexe C : Liste des références bibliographiques</i>	<i>78</i>
<i>Annexe D : Tutoriel de l'atelier 1</i>	<i>78</i>
<i>Annexe E : Questionnaire en ligne de l'atelier 1</i>	<i>78</i>
<i>Annexe F : Atelier 2</i>	<i>78</i>
<i>Annexe G : Atelier 3</i>	<i>78</i>
<i>Annexe H : Atelier 4</i>	<i>78</i>
<i>Annexe I : Guide d'entretien complémentaire</i>	<i>78</i>
<i>Annexe J : Compte-rendu de l'atelier de cadrage</i>	<i>78</i>
<i>Annexe K : Indicateurs physiques, chimiques et biologiques</i>	<i>78</i>
<i>Annexe L : Compte-rendu de l'atelier 2</i>	<i>78</i>
<i>Annexe M : Compte-rendu de l'atelier 3</i>	<i>78</i>
<i>Annexe N : Compte-rendu de l'atelier 4</i>	<i>78</i>

RÉSUMÉ

Le sol est une ressource non renouvelable et limitée qui remplit une multitude de fonctions conditionnant sa contribution à de nombreux services environnementaux essentiels pour la viabilité des sociétés humaines (production de denrées alimentaires, régulation du changement climatique, habitat pour la biodiversité des sols, etc.). Mais le sol est un milieu fragile, aujourd'hui menacé en de nombreux endroits, principalement du fait des activités humaines (e.g. aménagements fonciers, pratiques sylvicoles et pratiques agricoles, retombées atmosphériques, pollutions) qui peuvent modifier l'état du sol, dégrader certaines de ses fonctions et affecter les services qu'il peut rendre. Il est donc urgent d'agir pour préserver cette ressource. La présente étude s'inscrit dans cette optique et vise à contribuer à l'action 51 du Plan Biodiversité, en favorisant le déploiement à large échelle d'outils de diagnostic qui permettent d'évaluer l'état et le fonctionnement des sols (approche multifonctionnelle) et de guider les acteurs des sols vers le choix de pratiques adaptées et durables. Les sols à usages agricole et forestier sont ciblés prioritairement mais cette approche peut être étendue aux sols urbains. **Les objectifs de cette étude sont d'identifier d'une part des outils de diagnostic permettant d'évaluer la qualité des sols (notion de santé) et d'autre part des stratégies de déploiement qui permettraient de promouvoir l'utilisation de ces outils par les acteurs des sols agricoles et forestiers.** Pour répondre à ces objectifs, 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 co-construit avec des « acteurs de terrain » a été conduite lors d'ateliers, afin d'élaborer des outils qui soient à la fois pertinents pour l'évaluation de la qualité des sols et qui répondent aux besoins/attentes des utilisateurs potentiels de ces outils. Cette étude a permis de mettre en exergue un jeu d'indicateurs (37) pouvant être mobilisé pour un diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers et pouvant se décliner sous la forme de différents outils de diagnostic en fonction du contexte et des objectifs de gestion. Un jeu simple d'indicateurs (20 en milieu agricole et 23 en milieu forestier 1), peu coûteux et faciles à mettre en œuvre (observation de surface, sondage tarière, test-bêche ver de terre, canne pénétromètre...) et des analyses chimiques et biologiques en routine a également été proposé. L'étude a permis d'identifier 5 modalités de déploiement d'intérêt pour les actions de préservation des sols, i. e. transactions foncières, baux ruraux, conditionnalité ou aides publiques, initiatives privées-paiement pour services environnementaux et planification territoriale, pouvant promouvoir à grande échelle le diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers, via ce jeu d'indicateurs. A titre d'exemple, un cadre technique permettant l'intégration volontaire de ce type de diagnostic dans l'état des lieux des baux ruraux pourrait déjà être proposé. Il ressort également de cette analyse la nécessaire adaptation des jeux d'indicateurs aux stratégies et contextes dans lesquels ils sont appliqués.

Cette étude propose que ces modalités de déploiement s'intègrent dans une stratégie plus globale qui comprendrait :

- (i) la sensibilisation des acteurs aux enjeux environnementaux ;
- (ii) la formation à la réalisation de diagnostic basé sur ces jeux d'indicateurs ;
- (iii) le soutien à l'expérimentation des stratégies en coordonnant les expérimentations pour qu'elles nourrissent les politiques publiques ;
- (iv) la structuration du réseau d'acteurs avec notamment une structure porteuse qui centraliserait l'information. Cela pourrait prendre la forme d'un centre de ressources et d'une plateforme d'innovation multi-acteurs visant à optimiser le pilotage des actions et des ressources affectées.

ABSTRACT

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 (food production, climate change regulation, biodiversity habitat, etc.). Soil is now threatened in many places, mainly due to human activities (e.g. land use, forestry and agricultural practices, pollution) that can change the state of the soil, degrade some of its functions and affect the ecosystem services it can provide. Nowadays it is urgent to take action to preserve this resource. This study is in line with this objective and aims to contribute to Action 51 of the Biodiversity Plan, by promoting the wide-scale deployment of diagnostic tools that make it possible to assess the condition and functioning of soils (multifunctional approach) and to guide soil stakeholders towards the choice of adapted and sustainable practices. Soils for agricultural and forestry uses are targeted as a priority. **The objectives of this study are to identify diagnostic tools to assess the soil quality through a multifunctional approach, and deployment strategies to promote the use of these tools by agricultural and forest soil stakeholders.** 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 / expectations of potential users of these tools. This study highlighted a set of indicators (37) that can be mobilized for a diagnosis of the multifunctional quality of agricultural and forest soils and that can take the form of different diagnostic tools depending on the context and management objectives. A minimal set of indicators (20 in agriculture and 23 in forest), inexpensive and using simple methodologies (surface observation, auger sounding, worm test-spade, penetrator cane, etc.) and routine chemical and biological analyses were also proposed. The study identified 5 deployment options, i. e. land transactions, rural leases, conditionality of public aid, private-payment initiatives for environmental services, and territorial planning, that can promote the dissemination and use of this diagnostic tool. For example, a technical framework allowing the voluntary integration of this type of diagnosis in the rural leases could already be proposed. This analysis also shows the necessary adaptation of the sets of indicators to the strategies and contexts in which they are applied.

This study proposes that these deployment options fit into a more global strategy that would include:

- (i) raising the awareness of stakeholders,
- (ii) training in the realization of diagnostics based on these sets of indicators
- (iii) support and coordination for the experimentation of strategies so that they feed into public policies, and
- (iv) structuring the network of actors and the information. This could take the form of a resource centre and a multi-stakeholder innovation platform on soil indicators.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

Le sol, ressource non renouvelable et limitée, joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes et les services qu'ils rendent à nos sociétés. En effet, les sols contribuent aux services écosystémiques rendus par les écosystèmes :

- Des **services d'approvisionnement** ou **de support** aux activités humaines : production de denrées alimentaires, de bois et autres biomatériaux ou bioénergies, réservoir de gènes et de ressources minérales, support physique pour les habitations et les infrastructures, etc. ;
- Des **services de régulation** : régulation du cycle de l'eau, épuration des eaux de ruissellement et des eaux usées domestiques (assainissement non collectif), recyclage des produits résiduels organiques, contrôle de l'érosion, régulation de la biodiversité, atténuation du changement climatique (stockage de carbone) et adaptation à ses effets (prévention des inondations, lutte contre les îlots de chaleur), etc. ;
- Des **services d'auto entretien** (fonctionnement des écosystèmes) : la formation des sols, le rôle dans les cycles biogéochimiques dont le cycle du carbone, celui de l'azote, le patrimoine biologique, etc.

Mais le sol est un milieu fragile qui est aujourd'hui menacé en de nombreux endroits, principalement du fait des activités humaines (e.g. aménagements fonciers, itinéraires sylvicoles et pratiques agricoles inadaptés, pollutions) qui peuvent modifier l'état du sol et son fonctionnement. Dix menaces majeures pèsent sur les sols dans le Monde, à savoir l'érosion (éolienne et hydrique), la perte de biodiversité, la perte de carbone organique, la pollution, l'imperméabilisation, le tassement, la salinisation, l'acidification et le déséquilibre nutritif. Cette détérioration rapide des sols de la planète pourrait être inversée, pour autant que les pays saisissent l'ampleur de l'urgence écologique pesant sur les sols et prennent l'initiative de promouvoir des pratiques de gestion durable de ce milieu. Pourtant le sol reste encore trop peu considéré. Ainsi au niveau européen, si l'eau et l'air font l'objet de directives de protection (respectivement, depuis 1975 et 1980), il n'existe pas de directive communautaire sur les sols. La préservation des sols et le suivi de certaines de ses propriétés sont néanmoins considérés dans les politiques visant à lutter contre le changement climatique (ex : stockage de carbone dans les critères de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les biocarburants¹ ou la stratégie nationale bas carbone de la France, propriétés relatives à la régulation du cycle de l'eau et à la biodiversité dans le plan national d'adaptation au changement climatique) et à améliorer la qualité de l'air (ex : surveillance de propriétés dynamiques du sol indicatrices de l'acidité du sol, de la perte d'éléments nutritifs et de biodiversité²).

Il est donc devenu urgent d'agir pour préserver la ressource sol. La France a engagé des réflexions pour élaborer une politique nationale de gestion durable des sols. En 2018, la nécessité de gérer durablement les sols a été inscrite dans le plan biodiversité, notamment dans l'action 51 :

« Nous promouvrons l'établissement de diagnostics d'état des sols, afin qu'acquéreurs et fermiers bénéficient d'une information sur l'état des sols qu'ils exploitent et exploiteront, pour qu'ils en assurent une gestion pertinente, au bénéfice de la biodiversité, de la qualité des productions et de l'environnement ».

Cette action rejoint les préoccupations de l'ADEME, inscrites dans son plan d'action sur les sols, qui considère qu'il y a nécessité de développer et de déployer des outils et indicateurs de diagnostic (et de suivi) de la qualité des sols agricoles et forestiers. Une des pistes identifiées est la proposition de diagnostics de qualité des sols à usages agricole et/ou forestier, agrégeant plusieurs indicateurs, adossés à un référentiel et pouvant être accompagnés de recommandations de gestion. Ces diagnostics s'appuieraient sur des indicateurs existants (opérationnel ou en cours de mise en opérationnalité). Le principe étant de se placer dans une approche globale visant la préservation

¹ DIRECTIVE (UE) 2018/2001 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

² Annexe V de la DIRECTIVE (EU) 2016/2284 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques, modifiant la directive 2003/35/CE et abrogeant la directive 2001/81/CE



de la ressource « sols » et de ses potentialités, sans se limiter par exemple à l'évaluation du niveau de contamination par des polluants ou à la qualité agronomique. Les modalités d'utilisation et les stratégies de déploiement les plus pertinentes pour ces diagnostics sont également à définir.

Le travail du Groupement (ECOSUSTAIN-EKOLOG-INRA) s'inscrit dans cette optique avec l'ambition d'identifier les outils de diagnostic, aujourd'hui ou à court terme utilisables, qui permettent d'évaluer (et de suivre) le fonctionnement global des sols et d'informer les gestionnaires et propriétaires des sols agricoles et forestiers sur l'état de leur sol au regard des enjeux de production de biomasse (alimentaire et non-alimentaire) et des enjeux environnementaux.

1.2. Définitions des mots clés de l'étude

Afin de faciliter la lecture du document, plusieurs termes clés sont définis au préalable :

Durabilité : l'utilisation durable d'un écosystème désigne l'utilisation humaine d'un écosystème de sorte que cet écosystème puisse fournir continuellement des bienfaits aux générations actuelles tout en maintenant son potentiel pour répondre aux besoins et aspirations des générations futures.

Fonctions : interactions entre les composantes physiques et chimiques du milieu et les êtres vivants, qui sont à l'origine du fonctionnement du sol.

Indicateurs : mesure qualitative ou quantitative de l'état et/ou des fonctions des sols qui permet d'évaluer de manière valide et fiable la qualité des sols à un instant t et ses variations dans le temps. Les indicateurs ont pour but de détecter des changements du sol qui perturberaient les services qu'ils rendent à la société. Un indicateur doit être adossé à un référentiel d'interprétation. Dans cette étude, pour simplifier le texte, nous appellerons « indicateurs » à la fois les paramètres simples du sol (ou indicateurs d'état ; par exemple la texture, la pierrosité...) et les indicateurs de fonctionnement (par exemple l'infiltration de l'eau, la capacité de rétention en nutriments...) qui peuvent être à la fois simples ou composite (par exemple la réserve utile, le stock de carbone...).

Outil de diagnostic : outil permettant aux gestionnaires de mettre en œuvre les différentes méthodes de diagnostic pour évaluer des indicateurs de suivi* et les discuter par rapport à un référentiel, afin qu'ils soient en mesure d'interpréter la qualité de leurs sols.

Qualité d'un sol : concept qui n'a pas de définition consensuelle et dont l'appréciation peut varier selon les attentes (exemple : potentiel agronomique, réservoir de biodiversité, capacité à réguler les flux d'eau, stockage de carbone). Dans cette étude, il s'agit d'une part de se placer dans une approche globale visant la préservation de l'ensemble des fonctions du sol et les services induits et d'autre part d'appréhender la qualité du sol selon le concept de santé des sols (soil health; Kimblewhite *et al.*, 2008), c'est-à-dire sa capacité à maintenir, dans un contexte pédoclimatique et d'usage donné, un fonctionnement normal grâce à une diversité de processus et d'organismes qui réalisent ces processus (Figure 1). Par fonctionnement normal, il est entendu un niveau de fonctionnement suffisant pour maintenir sur le long terme l'ensemble des fonctions du sol.

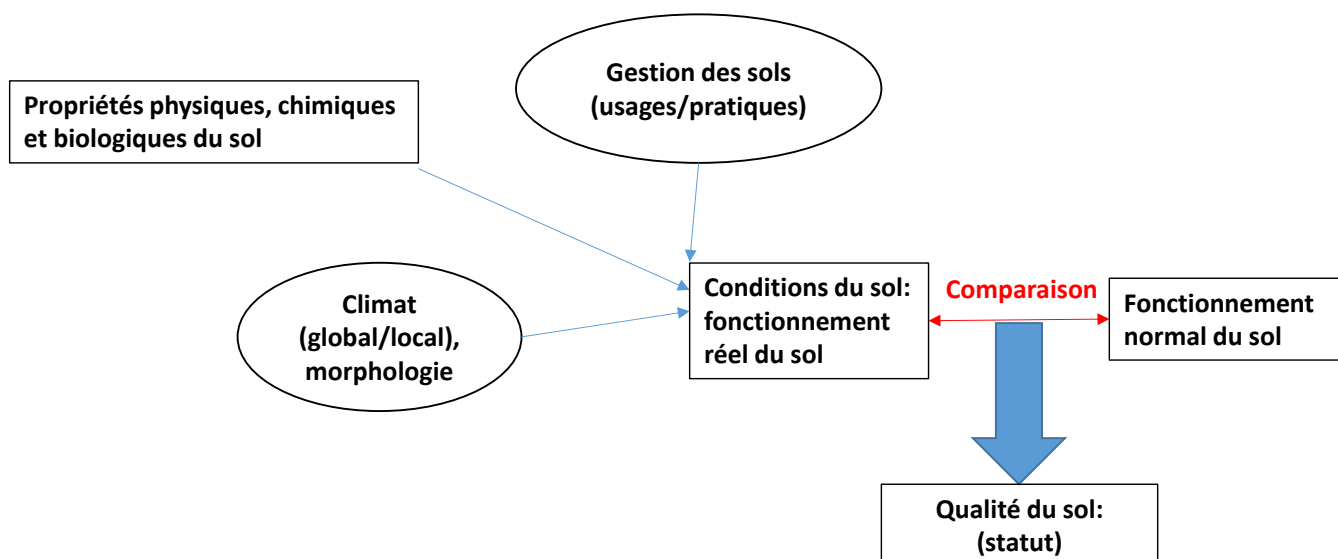


Figure 1 : Le concept de qualité des sols

Référentiel : document technique servant de référence (i.e. valeur moyenne d'état) pour interpréter les indicateurs et in fine évaluer les résultats d'un diagnostic de la qualité des sols. Plus la base de donnée composant le référentiel est grande et intègre des contextes pédoclimatiques diversifiés, plus le référentiel est robuste. Le référentiel peut être amendé au cours du temps (recherche, acquisition de nouvelles données). Le référentiel doit être national mais peut également comporter des précisions plus locales, liées par exemple aux contextes pédoclimatiques ou à l'historique des usages.

Résilience écologique: capacité d'un système vivant (écosystème, biome, population, biosphère) à retrouver les structures et les fonctions de son état de référence après une perturbation (cinétique de réhabilitation).

Services écosystémiques : biens et services que les Hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être (nourriture, qualité de l'eau, paysages, etc.).

Sol à usage agricole : Sol sur lequel s'exerce une activité agricole au sens de l'article L311-1 du code rural et de la pêche maritime.³

Sol à usage forestier : sol dont l'occupation est caractérisée à la fois par la présence d'arbres d'essences forestières et par l'absence d'autre utilisation du sol (Jabiol et al., 2009). Dans une région donnée, les sols forestiers actuels sont toujours ceux qui n'ont pas été retenus pour d'autres usages, en particulier l'agriculture, ne convenant pas car trop hydromorphes ou trop secs, trop acides ou trop carbonatés, trop en pente, trop pierreux (Badeau et al., 1999). Du fait de leurs caractéristiques intrinsèques et d'une gestion historiquement extensive des écosystèmes forestiers, les sols forestiers présentent un fonctionnement singulier par rapport aux sols agricoles (Ranger, 2018)

Stratégie de déploiement : ensemble des outils et moyens financiers, aides réglementaires et plans d'actions sur lesquels s'appuyer ou à mettre en place pour faire connaître et faire réaliser par le plus grand nombre un diagnostic* de la qualité des sols. Une stratégie intègre toujours de la sensibilisation et de la formation des différents intervenants.

1.3. Objectifs de l'étude

³ D'après MAAF, 2014 ; Panorama de la quantification nationale de l'évolution nationale des surfaces agricoles <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/144000288.pdf>

Les objectifs de la présente étude sont :

- De faire l'inventaire et comparer des méthodes d'évaluation de la qualité des sols, utilisables dès aujourd'hui par les gestionnaires pour qualifier l'état de l'ensemble des fonctions des sols. Cet inventaire doit aboutir à la sélection d'un jeu d'indicateurs ;
- D'identifier et d'analyser des stratégies favorisant un déploiement à grande échelle de ces outils ;
- De proposer des associations pertinentes entre outils de diagnostic et stratégies.

Les sols à usages agricole et forestier sont ciblés prioritairement. Des recommandations en termes de suites opérationnelles mais aussi de recherche seront exprimées à l'issue de cette étude.

2. Approche mise en œuvre – Méthodologie de l'étude

2.1. Démarche générale

L'étude comprend deux phases principales:

- Une revue systématique de la littérature scientifique et des entretiens d'experts visant à établir un inventaire
 - des paramètres, indicateurs et outils de diagnostics utilisés pour l'évaluation des principales fonctions des sols (Paragraphe 2.4.1.) ;
 - des stratégies de déploiement existantes et sur lesquelles il est possible de s'appuyer pour encourager l'utilisation d'un outil de diagnostic de la qualité des sols (Paragraphe 2.4.2.) ;
- Une phase d'échanges sous forme d'ateliers avec des professionnels impliqués dans l'utilisation et la diffusion des indicateurs et outils de diagnostics de l'état des sols, afin de proposer une démarche à la fois pertinente pour l'évaluation du fonctionnement global du sol (approche multifonctionnelle de la qualité des sols) et appropriables par les utilisateurs potentiels.

Compte tenu des objectifs de l'étude et du fait qu'elle s'adresse à un panel d'acteurs jouant un rôle direct ou non sur les sols agricoles et forestiers et intervenant ainsi à des niveaux différents de mise en œuvre opérationnelle, une approche générale située à l'interface du monde de la recherche et de la mise en œuvre opérationnelle a été retenue pour mener à bien cette étude.

2.2. Calendrier de l'étude

Cette étude a débuté fin juillet 2018 et s'est terminée fin juillet 2019 (Figure 2).

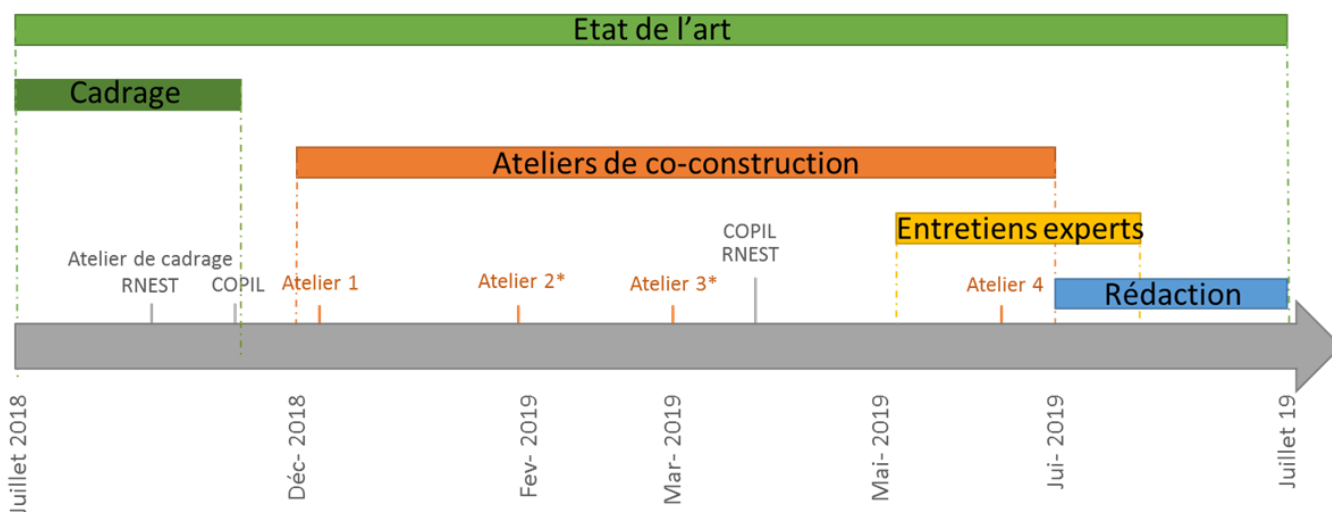


Figure 2 : Calendrier général de l'étude

Quatre phases majeures se sont ainsi succédées et complétées dans le temps, faisant intervenir au cours de l'étude des acteurs opérationnels et des professionnels de la Recherche (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- **Temps de cadrage** : il s'agissait pour le Groupement (EcoSustain, Ekolog, INRA) et l'ADEME, de définir précisément le contour et les objectifs de l'étude ainsi qu'un vocabulaire commun. A ce titre, un glossaire a été édité (Annexe A : Glossaire). Les termes définis dans ce glossaire sont suivis d'un astérisque (*) la première fois qu'ils sont cités dans ce rapport ;
- **Etude bibliographique** : dans l'objectif de valoriser l'existant, une importante étude bibliographique a été menée, afin d'obtenir des informations à l'échelle nationale et internationale sur les outils de diagnostics de la multifonctionnalité des sols ainsi qu'un benchmark sur les stratégies de déploiement existantes sur le territoire français ;
- **Temps d'échanges et de co-construction** : mené au travers d'ateliers réalisés avec un panel de professionnels intervenant dans la gestion des sols agricoles et forestiers. Ce temps de co-construction a permis de développer un jeu d'indicateurs intégré à un outil de diagnostic de la qualité des sols et de préciser des stratégies de déploiement potentielles de cet outil ;
- **Conduite d'entretien d'experts et présentations de l'état d'avancement de l'étude devant le comité de pilotage (COFIL) et le Conseil Scientifique et Technique du Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique (RNEST) sur les sols** : ces dernières ont permis de compléter cette approche « terrain » et d'amender les résultats issus de l'état de l'art.

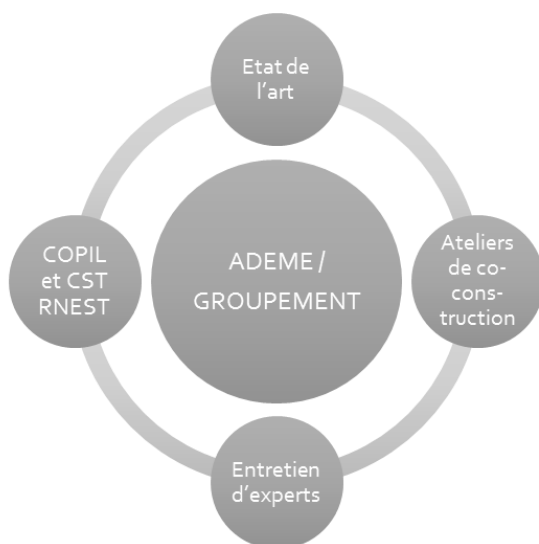


Figure 3 : Démarche générale mise en œuvre pour mener à bien l'étude, à l'interface entre recherche sur les sciences du sol et acteurs de sols agricoles et forestiers

2.3. Atelier de cadrage

Objectifs :

- Préciser les attentes des commanditaires afin d'aboutir à une vision commune sur ce que visait le diagnostic de qualité des sols, les stratégies de déploiement à y associer, en particulier au regard des cibles et des usages des sols ;
- Partager un vocabulaire commun et poser les bases du glossaire présenté en Annexe A : Glossaire.

Méthodologie :

L'atelier a été animé par le Groupement sous la forme d'un atelier post-it (Annexe B : Atelier de cadrage). Les principales idées ont été restituées sous forme de mots clefs sur un paperboard.

2.4. Etat de l'art

2.4.1. Etat de l'art des indicateurs et outils de diagnostic de la qualité des sols

Objectifs :

- Réaliser une revue de la littérature scientifique et technique sur les indicateurs et outils de diagnostics ;
- Hiérarchiser les indicateurs/outils au regard de leur pertinence et de leur opérationnalité.

Méthodologie :

La construction d'un outil de diagnostic nécessite d'identifier les fonctions (et les services) rendus par les sols ainsi que les indicateurs pertinents pour évaluer ces fonctions. Dans cette optique, nous nous sommes appuyés sur l'approche développée par le TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), en complément de celle du Millenium Ecosystem Assessment (MEA), qui 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 4). Le champ d'investigation de notre étude se limite aux propriétés/processus et aux fonctions du sol (cadre blanc de la Figure 4). C'est d'ailleurs pour cette raison que l'approche EFESE n'a pas été retenue, car elle est plus axée sur l'évaluation des services écosystémiques et des bénéfices (cadres bleu et violet de la Figure 4).

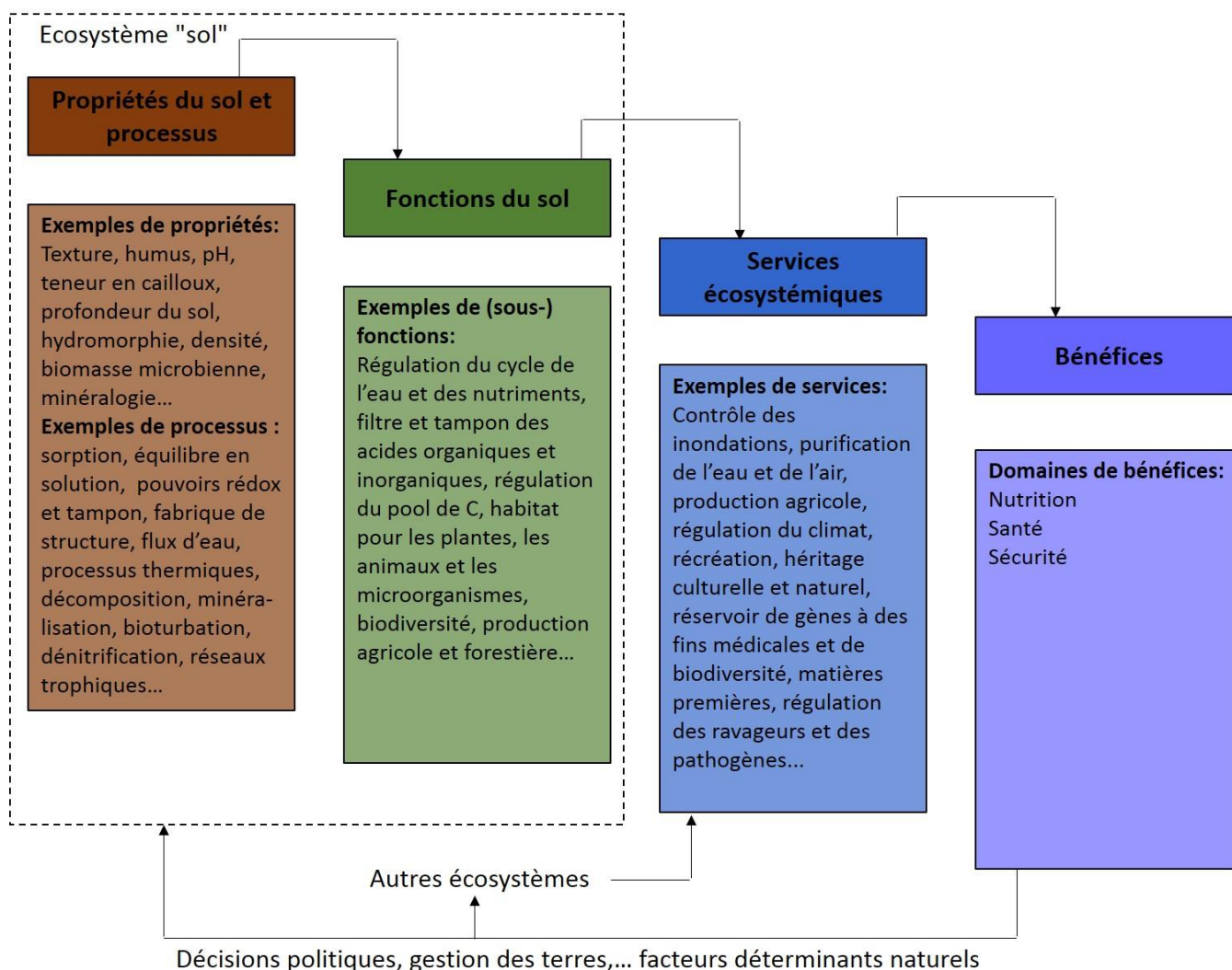


Figure 4 : Evaluation des contributions des fonctions du sol aux services écosystémiques suivant le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin (2008). Notre étude est centrée sur les relations propriétés/processus du sol et fonctions du sol (intérieur du cadre en pointillés)

Une revue de la littérature scientifique et technique internationale relative à la qualité "multifonctionnelle" des sols agricoles, forestiers et urbains a été réalisée tout au long de l'étude. Au total, plus de 200 articles et plus de 20

"grands" projets internationaux ont été consultés (Annexe C : Liste des références bibliographiques). Les mots clés utilisés pour effectuer la recherche sont (en français et en anglais) :

- Qualité/santé des sols ;
- Indicateurs de qualité/santé des sols ;
- Paramètres de la qualité/santé des sols ;
- Évaluation de la qualité/santé des sols ;
- Diagnostic de la qualité/santé des sols ;
- Outils de diagnostic de la qualité/santé des sols ;
- Suivi/monitoring de la qualité/santé des sols ;
- Outil d'aide à la décision pour la gestion durable des sols ;
- Fonctions/services écosystémiques rendus par les sols ;
- Fonctionnement du sol ;
- Multifonctionnalité du sol.

Cette étude bibliographique a été complétée par la participation à plusieurs conférences/webinaires, des échanges avec des chercheurs (notamment lors d'un séminaire d'animation R&D ADEME/INRA dédié aux méthodes d'évaluation des fonctions des sols et des services écosystémiques auxquels contribuent les sols agricoles et urbains⁴), des utilisateurs et les membres des comités de pilotage et scientifique.

2.4.2. Etat des lieux sur les stratégies de déploiement potentielles

Objectifs :

- Identifier les principales stratégies de déploiement existantes en France et à l'étranger.

Méthodologie :

La méthodologie initialement retenue était la webographie et la revue de littérature. Au regard de la multitude des possibles, cette approche seule n'était pas suffisante en soi. Il a donc été décidé de préciser le périmètre de recherche à partir des premières pistes élaborées au cours de l'atelier de cadrage avec le commanditaire.

2.5. Ateliers de co-construction avec des professionnels des sols agricoles et forestiers

Objectifs :

- Analyser et enrichir les éléments issus de l'état de l'art ;
- Co-construire et évaluer différentes études de cas et stratégies de déploiement ;
- Co-construire les indicateurs et l'outil de diagnostic de la qualité des sols au regard de stratégies de déploiement identifiées ;
- Anticiper des biais dans l'implémentation des approches ;
- Mieux faciliter les échanges d'expériences et d'expertise entre les acteurs.

Méthodologie :

Quatre ateliers de co-construction ont été organisés avec des acteurs professionnels potentiellement impliqués dans l'utilisation et le déploiement des diagnostics de qualité des sols. Ces derniers pouvaient s'exprimer librement sur des sujets définis en amont par le Groupement et le commanditaire.

Compte tenu des objectifs de l'étude, il ne s'agissait pas, au cours de ces ateliers de co-construction, d'avoir un groupe de participant représentatif de l'ensemble des acteurs et des usages en agriculture et en foresterie, mais d'initier des discussions et des réflexions sur le diagnostic de la qualité des sols et les stratégies de déploiement pour promouvoir leur utilisation à grand échelle. Le choix a donc été de travailler avec un groupe restreint d'acteurs

⁴ Anne Blanchart, Christophe Calvaruso, Thomas Eglin, Antoine Piérart et Cécile Grand, 2019. Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols, Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque.



diversifiés et sensibilisés au sujet de la qualité de sols. Cette cartographie d'acteurs n'est ainsi pas exhaustive et ne couvre ni l'ensemble des acteurs potentiels, ni l'ensemble des usages en agriculture et en foresterie (différents modes de production agricoles, différentes pratiques, différents contextes stationnels, etc.).

La composition de ce panel d'acteurs participant aux ateliers de co-construction a été décidée par le Groupement et le commanditaire. Par la suite, le Groupement les a contactés afin de leur présenter l'étude et les convier à participer aux différents ateliers. Au total, c'est une trentaine d'acteurs qui a accepté d'y participer. Leur typologie est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Typologie des acteurs participant aux 4 ateliers, répartis selon leurs champs d'activités

Acteurs des sols agricoles	Acteurs des sols forestiers	Acteurs transverses
- Propriétaire foncier privé - Exploitants agricoles - Conseiller agricole privé - Etablissements au service du développement de l'agriculture et du territoire - Etablissements de formation - Entreprises agro-alimentaires	- Propriétaire foncier privé et public - Gestionnaire forestier privé et public - Entreprise de travaux forestiers - Conseillers forestiers à l'échelle du territoire et à l'échelle nationale - Associations opératrices de projets forestiers de terrain	- Financier - Société de conseils et opérateur de projets terrain en agriculture et foresterie pour le compte de clients

Les ateliers ont été menés entre décembre 2018 et juin 2019, en présentiel et à distance (Tableau 2).

Tableau 2 : Présentation des 4 ateliers de co-construction et de leurs objectifs

Atelier	Organisation	Objectifs	Lieu	Date
Atelier 1	A distance	Enquête en ligne visant à recueillir le point de vue des participants sur les enjeux, l'état de l'art réalisé et les indicateurs, et les stratégies de déploiement	-	Envoi de l'enquête le 21 décembre 2018
Atelier 2	En présentiel	Présentation des résultats de l'enquête et groupes d'échanges pour faire émerger des stratégies de déploiement	ADEME, Paris	05 février 2019
Atelier 3	En présentiel	Poursuite de travail en précisant les indicateurs clés au regard des stratégies de déploiement envisagées en Atelier 2 Echanges sur les enjeux de la sensibilisation et de la formation	ADEME, Paris	14 mars 2019
Atelier 4	A distance	Restitution des résultats de l'étude et échanges sur les enseignements et principales recommandations à en tirer	-	6 juin 2019

2.5.1. Atelier 1 : questionnaire en ligne

Le premier atelier a été réalisé à distance et tous les acteurs présentés précédemment (Paragraphe 2.5.) ont été invités à y participer. Son principal objectif était de présenter à ces acteurs le contexte et les enjeux de l'étude, le vocabulaire commun défini lors de l'atelier de cadrage, leur rôle dans cette étude et de tirer des premiers enseignements permettant de préparer les ateliers suivants.

Tutoriel

En complément du questionnaire, le Groupement a rédigé un tutoriel, transmis par e-mail aux participants (Annexe D : Tutoriel de l'atelier 1). Ce tutoriel décrit les objectifs de l'étude et les attentes du Groupement, et accompagne les participants dans le remplissage du questionnaire.

Questionnaire en ligne

Le questionnaire (Annexe E : Questionnaire en ligne de l'atelier 1), avait pour ambition de collecter les points de vue, les retours d'expériences et les réflexions des participants sur les outils de diagnostic de la qualité des sols et les stratégies de déploiement de ces outils. Le questionnaire s'est articulé en 4 parties distinctes :

- Lien de l'enquête avec le sol ;
- Sa perception et ses attentes de l'étude ;
- Sa connaissance des indicateurs de diagnostic des sols ;
- Sa contribution à la construction de stratégies de déploiement via des études de cas.

2.5.2. Atelier 2 : stratégies de déploiement

Le deuxième atelier, en présentiel avait pour principaux objectifs (i) de présenter les résultats issus du questionnaire complété lors de l'atelier 1 (premier temps) et (ii) de co-construire et d'évaluer différentes cas d'études et stratégies de déploiement pouvant permettre une utilisation d'outils de diagnostic de la qualité des sols par un nombre important d'acteurs de sols agricoles et forestiers (deuxième temps).

Ce deuxième temps de l'atelier 2 s'est déroulé sous la forme de sessions « post-it » de réflexion. Les 24 participants ont été divisés en 2 groupes, selon leur appartenance au milieu « forestier » ou « agricole ». Chacun de ces 2 groupes a été subdivisé en 3 sous-groupes de 3 à 5 personnes.

Chaque participant a pu prendre connaissance de deux scénarii (Annexe F : Atelier 2) construits par le Groupement à partir des tendances émergentes de l'atelier 1 :

- Scénario 1 : un scénario règlementaire et coercitif (avec deux options en milieu agricole : achat/vente (1a) et location (1b) ; et une option en milieu forestier : achat/vente) ;
- Scénario 2 : un scénario incitatif avec de l'aide publique.

Chaque sous-groupe a disposé de 30 minutes pour travailler sur chaque scénario. Un temps de restitution par groupe a eu lieu après ce travail et pour chaque scénario durant une session d'échanges d'environ 15 minutes.

2.5.3. Atelier 3 : outil de diagnostic de la qualité des sols

Le troisième atelier, également en présentiel avait pour principal objectif de co-construire un jeu d'indicateurs pouvant être mobilisés dans un outil de diagnostic de la qualité des sols en milieu agricole et forestier (premier temps). Il a été également l'occasion de réfléchir conjointement à la diffusion d'informations et à la sensibilisation des professionnels au sujet de l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols et des outils associés (deuxième temps).

Pour le premier temps, les 20 participants ont été divisés en 2 groupes sur le même principe qu'à l'atelier 2.

Les échanges sur les indicateurs et fonctions ont été animés à l'aide d'un plateau de jeu représentant une ligne temporelle en abscisse et les fonctions du sol en ordonnées, un jeu de cartes intégrant l'ensemble des « indicateurs » identifiés dans l'état de l'art, des documents (liste des indicateurs proposés et méthodologie d'évaluation associée) et une proposition de contexte de déploiement (Annexe G : Atelier 3). Il a ensuite été demandé à chaque sous-groupe de :

- Phase 1 : prendre connaissance et, éventuellement, amender le contexte proposé (état stationnel, sol, usage, pratique culturale, etc.) ;
- Phase 2 : positionner les cartes « indicateurs » selon une démarche de diagnostic dite « actuelle » (correspondant à de bonnes pratiques pour des objectifs de production) en choisissant d'abord les fonctions nécessaires à évaluer pour répondre au contexte puis en sélectionnant les cartes 'indicateurs' à



mobiliser pour évaluer la fonction concernée. Les coûts associés à ces diagnostics ont également été évalués ;

- Phase 3 : ajouter les cartes « indicateurs » nécessaires pour aller vers une approche « multifonctionnelle », permettant d'évaluer l'ensemble des fonctions des sols. Les coûts associés à ces diagnostics ont également été évalués.

Les sous-groupes ont travaillé séparément durant deux heures, et deux temps de restitution par groupe ont eu lieu respectivement après les phases 2 et 3.

Pour le second temps de l'atelier (sensibilisation et diffusion d'informations), la réflexion a été menée grâce à un atelier « post-it ». Les groupes « forêt » et « agriculture » sont toujours restés séparés. Les échanges ont été guidés par une liste de questions proposée par le Groupement et remise à chaque groupe (Annexe G : Atelier 3).

2.5.4. Atelier 4 : restitution des résultats et co-construction des pistes de valorisation de l'étude

Ce dernier atelier s'est déroulé à distance et a pris la forme d'un Webinaire interactif à l'attention des mêmes acteurs (Annexe H : Atelier 4). Les principaux objectifs de cet atelier ont été de restituer les résultats de l'étude (état de l'art, ateliers 1, 2 et 3, entretiens d'experts) aux participants et de les faire réagir sur ces résultats (premier temps) puis de les laisser s'exprimer sur les recommandations relatives au déploiement opérationnel du jeu d'indicateurs proposé.

2.6. Entretiens complémentaires

L'objectif des entretiens complémentaires a été de discuter avec divers experts sur des sujets en lien avec leur domaine d'expertise :

- L'approche utilisée dans cette étude ;
- Les fonctions identifiées et les indicateurs retenus ;
- Les stratégies de déploiement retenues ;
- Les avancées, les manques et les limites dans le domaine du diagnostic de la qualité des sols.

Cinq acteurs ou groupes d'acteurs ont été sollicités avec une proposition d'entretiens à distance ou en présentiel afin d'aborder les points de vue suivant :

- Volet « outils de diagnostic » :
 - Indicateurs de qualité des sols : approche intégrative/multifonctionnelle ;
 - Point de vue étranger sur les indicateurs.
- Volet « stratégies de déploiement » :
 - Politiques publiques ;
 - Formation ;
 - Réglementaire et foncier.

Les entretiens ont été conduits de manière semi-directive en abordant les principales thématiques et en laissant une place importante à l'expression libre. Un exemple de guide d'entretiens pour le volet « stratégies de déploiement » est présenté en Annexe I : Guide d'entretien complémentaire.

3. Résultats

3.1. Glossaire

L'atelier de cadrage (Annexe J : Compte-rendu de l'atelier de cadrage) a permis de poser les bases d'une terminologie commune à travers la rédaction d'un glossaire qui a ensuite été enrichi tout au long de l'étude et présenté en Annexe A : Glossaire.

3.2. Etat de l'art

3.2.1. Fonctions des sols et services auxquels contribuent les sols

Si l'on se réfère à la littérature scientifique considérant les fonctions du sol comme les interactions entre les composantes biotiques et abiotiques du sol, il existe globalement un consensus international sur les fonctions jouées par les sols. Ainsi nous avons pu identifier 7 fonctions :

- **Habitats pour les organismes du sol et régulation de la biodiversité des sols**: support d'habitat pour les organismes du sol et interactions entre les organismes influençant leurs abondances et leur diversité (patrimoine biologique);
- **Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux** : rétention et fourniture d'éléments nutritifs essentiels aux organismes vivants et à leur développement : N, P, oligo-éléments, etc. ;
- **Stockage, recyclage et transformation des matières organiques** : stockage, décomposition et transformation des matières organiques qu'elles soient endogènes ou exogènes ;
- **Rétention, circulation et infiltration de l'eau** : rétention, circulation infiltration et de l'eau dans le sol (réserve utile, lixiviation, ruissellement, percolation, etc.) ;
- **Filtre, tampon et dégradation des polluants** : filtration, rétention et dégradation de tous types de polluants organiques et inorganiques. Notons que la rétention de polluants dans le sol, si elle permet d'épurer l'eau, induit un risque de transfert de ces polluants vers la végétation (exemple des éléments-traces métalliques) ;
- **Support physique stable pour les végétaux** : support physique stable permettant l'implantation et le développement de végétaux (ancrage et croissance des racines) ;
- **Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques** : contrôle des échanges gazeux et d'énergie entre le sol et l'atmosphère affectant par conséquent les processus climatiques.

Bien que cette étude se focalise sur les fonctions des sols et les indicateurs associés à ces fonctions, il nous apparaît opportun d'identifier les services auxquels contribuent les sols, qui sont plus fréquemment utilisées pour les évaluations écosystémiques, ainsi que les liens entre les fonctions et les services.

Contrairement aux fonctions, force est de constater l'absence de consensus concernant les services auxquels contribuent les sols. Nous avons synthétisé l'information collectée dans la littérature pour aboutir à l'émergence de 9 services écosystémiques :

- **Production de biomasse alimentaire et non alimentaire** (en termes de quantité et de qualité) : production agricole végétale et cueillette, élevage et chasse, jardins familiaux, jardins partagés et autres jardins collectifs, agriculture urbaine et matériau (tourbe, argile pour la poterie, terre crue et briques pour la construction, bois d'œuvre, etc.), bioénergie (biocarburant, bois-bûche, etc.), fibres (pour le papier, pour le textile, etc.), molécules/organismes bénéfiques à la médecine, etc. ;
- **Conservation de la biodiversité** : le sol est un important réservoir de biodiversité microbienne, faunistique, floristique, etc. ;
- **Régulation de la qualité de l'air** : limitation des émissions de polluants atmosphériques gazeux et particulaires (absorption) ;
- **Régulation de l'érosion et des glissements de terrain** : régulation de l'érosion éolienne et hydrique, des coulées boueuses et des glissements de terrain ;
- **Régulation des flux d'eau et de la qualité de l'eau** : capacité du sol à stocker et restituer l'eau aux cultures, régulation des inondations et des crues, soutien de l'étiage, recharge des nappes, gestion des eaux pluviales urbaines, adaptation des secteurs agricoles et sylvicoles au changement climatique. Protection des zones de captage d'eau, épuration, dégradation, rétention, atténuation naturelle, etc. par



rapport aux polluants organiques et inorganiques. Les sols et les végétaux sont reconnus pour leur capacité d'épuration, de filtration et de traitement de l'eau ;

- **Régulation du climat local et global** : rafraîchissement grâce à l'évaporation. Séquestration de carbone, régulation des flux de N_2O ou de CH_4 , albédo contribuant à l'atténuation du changement climatique ;
- **Régulation des maladies et des ravageurs** : régulation des pathogènes et espèces invasives défavorables à la production agricole et sylvicole ;
- **Régulation et gestion des déchets et effluents** : capacité à recevoir des épandages type boues de station d'épuration, composts, ordures ménagères, effluents industriels, effluents d'élevage, assainissement autonome des eaux usées domestiques, etc. ;
- **Patrimoine – culture** : Grande diversité de sols, préservation de témoignages du passé (archéologie, paléontologie), sols sont support d'espaces qui jouent sur la qualité esthétique du paysage et sur le lien social.

La Figure 5 propose des liens entre les 7 fonctions et les sols et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes. Il est important de préciser qu'une fonction peut réguler plusieurs services et qu'un service peut être induit par plusieurs fonctions.

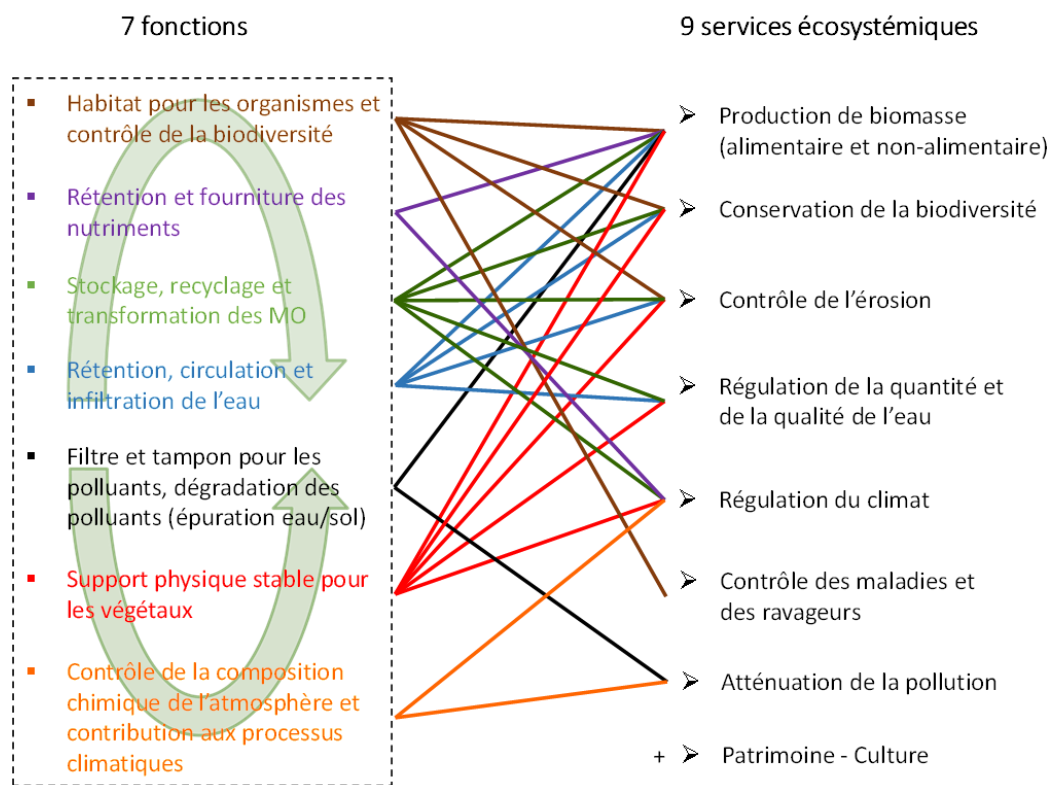


Figure 5 : Identification des fonctions du sol et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes. Le lien entre les fonctions du sol et le service "Patrimoine-Culture" est encore peu décrit dans la littérature.

La flèche vert clair de la Figure 5 indique que les fonctions doivent être considérées comme interconnectées. Les interactions/rétroactions entre les différentes fonctions sont illustrées sur la Figure 6. Cette figure met en évidence la nécessité de considérer à la fois les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et les processus induits par les activités biologiques, dans l'évaluation de la qualité des sols. Ainsi, le type de matière organique et le niveau d'activités biologiques ont un rôle important dans la structuration du sol (exemple : rôle des vers de terre dans la formation de la porosité, rôle des matières organiques dans la stabilité structurale). En retour, la structure du sol va affecter la qualité de l'habitat (exemple : diversité des organismes et activités, complexité des réseaux trophiques), la dynamique des matières organiques (exemple : production de biomasse et accessibilité des matières organiques) et également le pouvoir épurateur du sol (exemple : accessibilité des polluants organiques par les microorganismes), sa capacité d'infiltration de l'eau (favorisée dans un sol aéré avec présence d'agrégats et une connectivité importante des pores) ainsi que les échanges gazeux avec l'atmosphère (induits par les activités biologiques et la bonne circulation des gaz dans le sol).

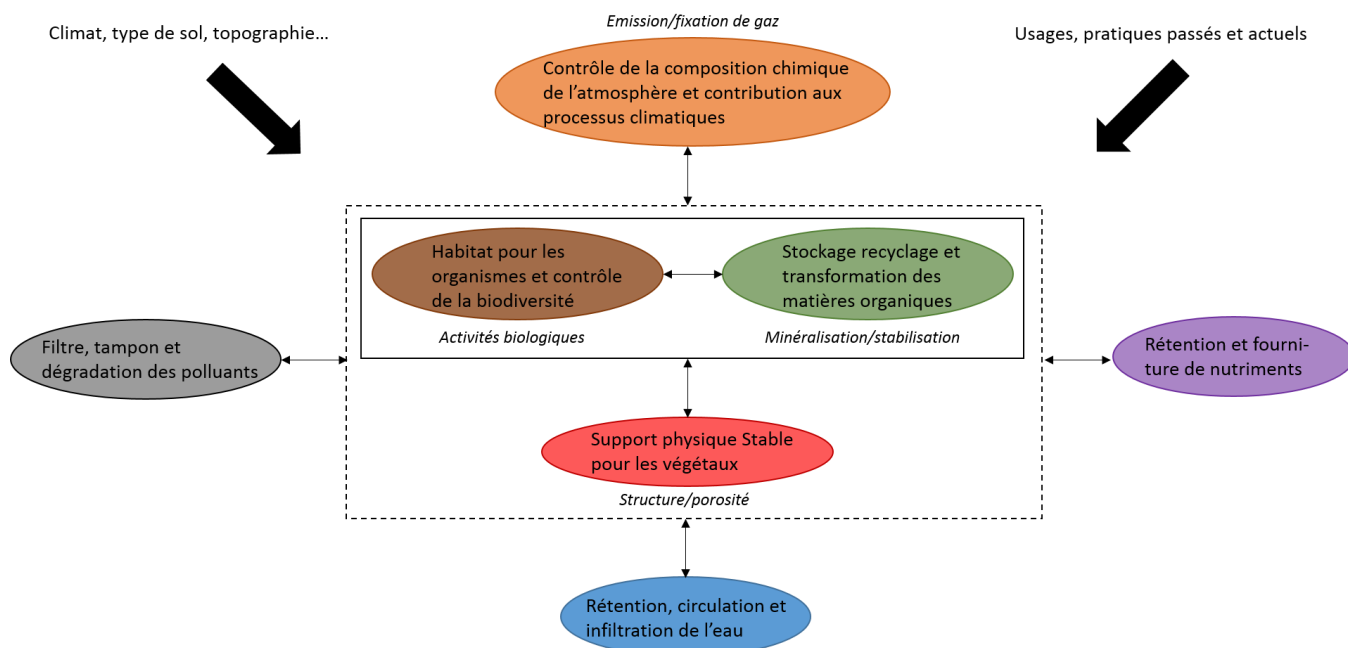
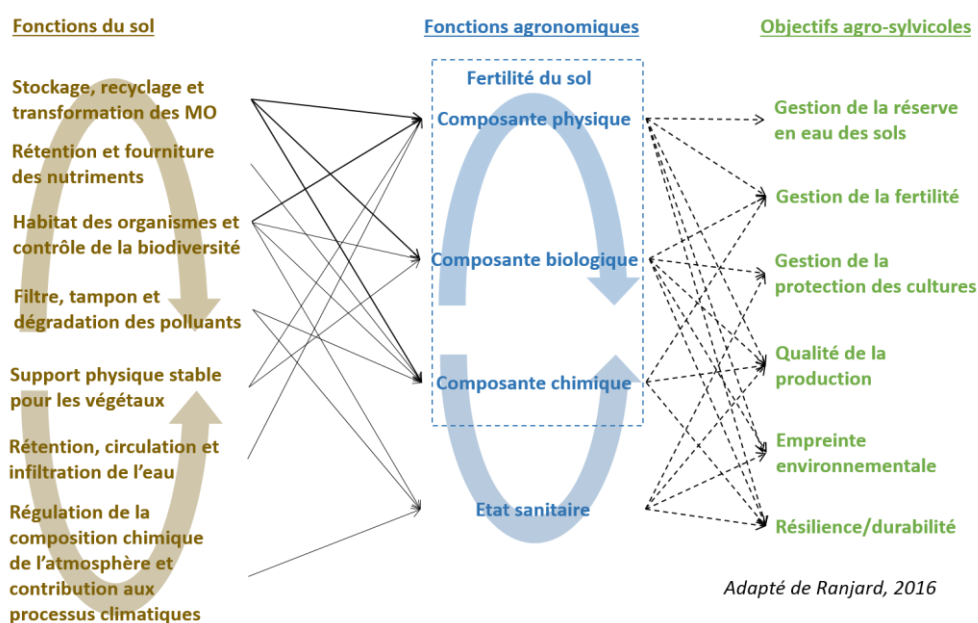


Figure 6 : Relations entre les différentes fonctions dans le sol. La double flèche indique des interactions et rétroactions entre les différentes fonctions. Les paramètres stationnels (climat, type de sol, topographie) ainsi que les usages et pratiques ont une influence sur l'expression de ces fonctions.

3.2.1.1. Relations entre fonctions du sol, fonctions agronomiques et objectifs agro-sylvicoles

Les fonctions du sol peuvent également se traduire en fonctions agronomiques et en objectifs de gestion pour les gestionnaires des sols agricoles et forestiers (Figure 7). L'objectif du diagnostic de la qualité des sols via une approche intégratrice est de fournir aux gestionnaires une information sur la qualité de leurs sols et des recommandations en termes d'usage et/ou de pratiques afin de maintenir ou de restaurer le fonctionnement de leur sol, tout en conciliant leurs besoins. Le diagnostic doit pouvoir se traduire par des actions concrètes sur le sol que pourra mettre en œuvre le gestionnaire. Quelques exemples mettant en avant le lien fort entre fonctions écologiques du sol, pratiques agricoles ou sylvicoles et objectifs agro-sylvicoles sont proposés dans le Tableau 3.



Adapté de Ranjard, 2016

Figure 7 : Synthèse des principales relations entre fonctions du sol, fonctions agronomiques et objectifs agro-sylvicoles.

Tableau 3 : Exemples d'actions et pratiques associées pour maintenir voire restaurer les différentes fonctions du sol et objectifs agronomiques liés aux pratiques. Liste non exhaustive.

Fonctions	Exemples d'actions pour maintenir/restaurer la fonction	Exemples de pratiques agricoles et/ou sylvicoles	Objectifs agronomiques liés aux pratiques
Habitat pour les organismes et régulation de la biodiversité des sols	- Protéger la surface du sol : régule la température et l'humidité du sol, protège de la dégradation des habitats - Améliorer/prévenir la dégradation de la structure du sol (exemple : éviter la compaction) - Limiter les substances toxiques pour les organismes	- Maintien d'un couvert végétal - Apports (recyclage) d'amendements organiques - Intervenir au champ lorsque la portance du sol est suffisante (éviter le tassement) - Limiter les apports de contaminants métalliques et organiques, notamment via les produits phytosanitaires et les matières fertilisantes (y compris amendements issus de l'économie circulaire) - Travail du sol adapté	- Gestion de la protection des cultures - Gestion de la fertilité - Qualité de la production - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité
Rétention et fourniture des nutriments	- Maintenir/Augmenter la teneur en matières organiques - Varier les cycles des éléments (ex : cultures ont des effets différents sur le cycle des éléments) - Stimuler l'activité biologique et améliorer la disponibilité des éléments nutritifs - Améliorer la structure du sol et augmenter le volume de sol prospectable par les racines	- Apports d'amendements organiques et minéraux - Limitation des exportations des résidus de cultures, litières et menus-bois en forêt - Diversification des cultures en particulier, en introduisant des légumineuses (culture, association ou couvert) - Mycorhization à l'implantation des arbres (colonisation forte) - Chaulage pour gérer le pH - Décompactage	- Gestion de la fertilité - Qualité de la production - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité
Stockage, recyclage et transformation des matières organiques	- Maintenir/Augmenter la teneur en matières organiques - Protéger la surface du sol (limiter les risques d'érosion)	- Maintien d'un couvert végétal - Apports (recyclage) d'amendements organiques - Limitation des exportations des résidus de cultures, litières et menus-bois - Travail du sol adapté	- Gestion de la réserve en eau des sols - Gestion de la fertilité - Qualité de la production - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité
Rétention, circulation et infiltration de l'eau	- Protéger la surface du sol (ex : limiter la formation de croûte de battance) - Améliorer la structure du sol - Stimuler l'activité biologique (exemple : activité des vers de terres endogés, colonisation du sol par les racines)	- Maintien d'un couvert végétal - Travail du sol adapté et interventions dans des conditions qui permettent d'éviter le tassement - Plantes à fort et profond enracinement	- Gestion de la réserve en eau - Qualité de la production - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité

Filtre, tampon et dégradation des polluants	- Favoriser l'activité biologique (dégradation des polluants) - Maintenir/Augmenter la teneur en matières organiques - Réduire la mobilité des polluants	- Apports (recyclage) d'amendements organiques - Travail du sol adapté (éviter le tassement) - Chaulage pour gérer le pH	- Qualité de la production - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité
Support physique stable pour les végétaux	- Améliorer la structure du sol : structure aérée permettant un bon enracinement - Favoriser l'activité des ingénieurs du sol (vers de terre, etc.)	- Maintien d'un couvert végétal - Apports d'amendements organiques - Travail du sol adapté	- Qualité de la production - Gestion de la fertilité - Empreinte environnementale - Résilience/durabilité
Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques	- Améliorer la structure du sol : favorise les échanges gazeux - Présence d'un couvert : absorption énergie, albédo, évapotranspiration - Stockage de carbone	- Maintien d'un couvert végétal - Apports (recyclage) d'amendements organiques - Chaulage pour gérer le pH et limiter les émissions de N₂O	- Empreinte environnementale - Résilience/durabilité



3.2.1.2. Propriétés et indicateurs de fonctions

Sur cette thématique, la sémantique est variable, autant dans la littérature française qu'internationale, notamment concernant l'emploi du terme « indicateurs ». Afin de simplifier le texte, nous appellerons « indicateurs » à la fois les paramètres simples du sol (indicateurs d'état comme la texture, la pierrosité, etc.) et les indicateurs de fonctionnement (comme l'infiltration de l'eau, la capacité de rétention en nutriments, etc.).

A partir de la synthèse bibliographique et des discussions avec les différents experts, nous avons également pu déterminer les critères permettant d'évaluer la qualité d'un indicateur de la qualité des sols. Un bon indicateur de la qualité des sols peut se définir ainsi :

- Doit représenter (seul ou agrégé à d'autres indicateurs) une ou des fonctions importantes ;
- Etre fiable, précis et standardisé, notamment;
- Etre adossé à un référentiel d'interprétation : il est ainsi possible de comparer des données entre elles et avec des valeurs-référence. Ce référentiel doit être validé pour une grande diversité de conditions (type de sol, climat, etc.)
- Sa mesure doit être aisée et à coût raisonné : la valeur de l'information fournie doit être supérieure au coût de son acquisition ;
- Sa mesure doit être représentative du fonctionnement "réel" du sol (notamment pour les indicateurs biologiques très sensibles au changement de conditions) ;
- Etre sensible aux changements de pratiques à des échelles spatio-temporelles compatibles avec les politiques publiques : évaluer les résultats des choix (pour les indicateurs de fonctionnement)
- Etre facile à mettre en œuvre et à interpréter.

En conséquence, il est difficile d'obtenir un indicateur qui réponde parfaitement à l'ensemble des critères et la sélection des indicateurs devra se faire sur la base de compromis, l'objectif final étant que la qualité de la mesure soit suffisante pour informer l'utilisateur sur l'état des fonctions du sol. Sur ces bases, nous avons mis en place une procédure d'évaluation du niveau d'opérationnalité des indicateurs et de sélection pour intégrer le jeu. Cette procédure, sous forme d'arbre de décision, est présentée dans la Figure 8. L'opérationnalité d'un indicateur est donc définie sur la base de (i) sa capacité à représenter au moins une des fonctions identifiées, (ii) son rapport coût/bénéfice, plus l'information fournie est d'intérêt (par exemple réponse rapide de l'indicateur aux pressions) relativement au coût de sa mise en œuvre, plus l'indicateur est performant, (iii) la fiabilité de la méthodologie (échantillonnage, mesures, analyses) et notamment la robustesse du référentiel d'interprétation, et (iv) sa facilité de mise en œuvre et d'interprétation dans une démarche de conseils agronomiques. Nous avons également intégré dans l'évaluation de ce niveau d'opérationnalité des critères complémentaires qui bonifient l'indicateur tels que l'aspect pédagogique (acceptabilité par les gestionnaires, sensibilisation) et le potentiel de développement de l'indicateur en lien avec l'amendement des référentiels, l'amélioration et l'automatisation des techniques de mesures, la baisse des coûts induite, etc.

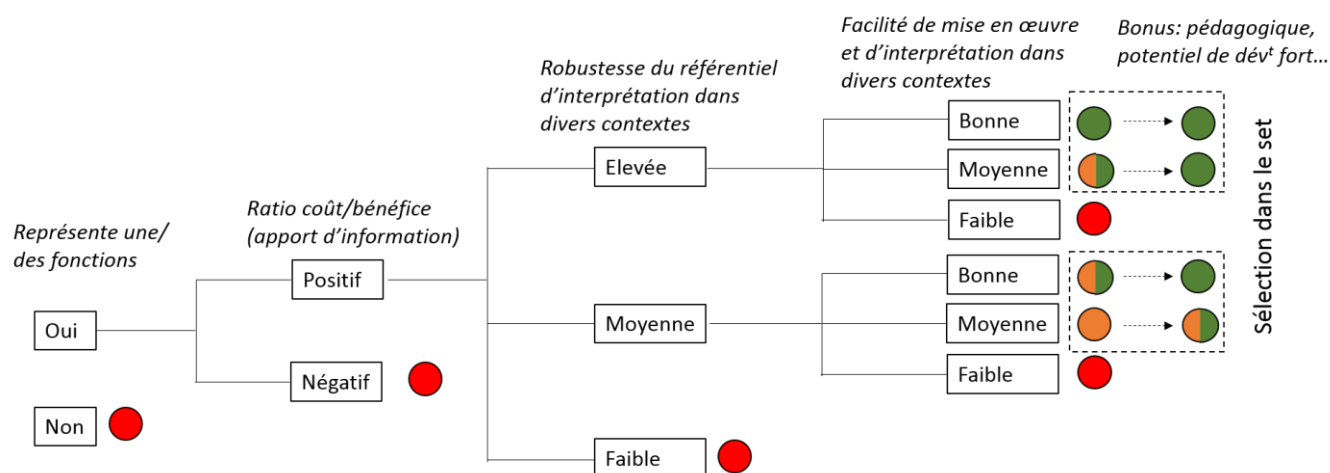


Figure 8 : Procédure d'évaluation du niveau d'opérationnalité des indicateurs de la qualité des sols. En vert, orange/vert, orange et rouge, les indicateurs à opérationnalité élevée, bonne, moyenne et nulle, respectivement. La démarche intègre également des critères complémentaires qui permettent de bonifier le niveau d'opérationnalité de l'indicateur.

La revue de littérature a mis en évidence l'existence d'une importante diversité d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques déjà disponibles. Ceux-ci sont listés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Liste des indicateurs physiques, chimiques et biologiques issus de la revue de la littérature – Liste non exhaustive, les indicateurs trop contexte-dépendant ont été éliminés en amont

Indicateurs physiques (20)	Indicateurs chimiques (30)	Indicateurs biologiques (24)
- Traces d'érosion - Croûte de battance - Densité apparente - Compacité – Résistance pénétration - Texture (granulométrie 3 fractions avec ou sans décarbonatation) - Pierrosité/taux d'éléments grossiers - Epaisseur de sol - Structure du sol - Porosité du sol - Stabilité de l'agrégat - Vitesse d'Infiltration de l'eau - Conductivité hydraulique - Teneur en eau - Traces d'hydromorphie - Résistivité - Réserve utile - Niveau hydrique (outil forêt Wallonne) - Least Limiting Water Range (gamme de teneur en eau non limitante) - Érodibilité - Sensibilité à la compaction des sols forestiers (voir guide outil Prosol dans le guide Pratic'sols).	- Teneur en matières organiques (MO) - Teneur en C organique - Stock de C organique et de MO - Evolution des stocks de C organique - Ratio $C_{microbien}/C_{organique}$ - Azote (N) total - N disponible (formes NO_3^- et NH_4^+) - N potentiellement minéralisable - Coefficient de minéralisation (K2) - Rapport C/N - Fractions de la MO : labile, intermédiaire et stable - Pool de C au turnover rapide - Caractérisation des MO - pH_{eau} et pH_{KCl} - P total - P_2O_5 assimilable méthodes Olsen (agriculture) et Duchaufour (forêt) - Capacité d'échange cationique (CEC) - Taux de saturation du complexe argilo-humique (S/T) - Teneurs en Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al échangeables (cobaltihexammine) - Stocks d'éléments disponibles - Calcaire total - Calcaire actif - Teneurs en oligo-éléments - Teneur en métaux lourds - Teneur en polluants organiques : HAP (16), HCT (4), PCB (7), COHV - Teneur en métaux lourds par susceptibilité magnétique - Mobilité des métaux lourds - Niveau trophique (forêt Wallonne) - Sensibilité exportation de rémanents forestiers (outil Insensé pour forêt) - Forme d'humus - Epaisseur couche A	- Profondeur d'enracinement et forme/orientation des racines - Présence de galeries ou de turricules de vers de terre - Bio-indicateur - réponse végétaux - Abondance lombricienne totale et 4 groupes fonctionnels, diversité et structure taxonomiques - Abondance, diversité de collemboles - Abondance, diversité, indice de structure, enrichissement nématodes - Tests écotoxicologiques Vers de Terre - Tests écotoxicologiques Collembolles - Respiration basale du sol (= activité microbienne du sol) - Biomasse microbienne - Biomasse moléculaire microbienne - Rapport densité champignons/densité des bactéries - Diversité taxonomique microbienne - Diversité fonctionnelle microbienne - Réseaux trophiques, habitats microbiens - Activité enzymatique ciblant éléments - Biomarqueur acide gras phospholipide fongique - Activité biologique (dégradation de la matière organique) - Lamina Bait - Litter bag, tea bag, Leva bag - Indice oméga 3 - Indice SET (somme des excès de transferts) escargot - Indice d'accumulation des métaux CMT dans les végétaux - Concentration foliaire en Ca, K, Mg, P - Morphochromatographie

De nombreux indicateurs, notamment chimiques et biologiques, nécessitent des analyses en laboratoire. Une des tendances actuelles est le développement de méthodes d'acquisition de terrain qui permettent :



- De diminuer le coût d'acquisition ;
- De multiplier les points de mesures avec ainsi une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale du sol ;
- De limiter la perturbation de l'échantillon notamment pour les mesures biologiques ;
- De pouvoir ré-échantillonner facilement si besoin.

Citons par exemple :

- Le test-bêche/vers de terre pour évaluer la structure du sol et la macrofaune de plus en plus formalisé et recommandé par les acteurs du développement agricole (voir sur le site de l'institut technique des grandes cultures Arvalis - <https://www.arvalis-infos.fr/evaluer-la-structure-du-sol-avec-le-test-b-che-@/view-26701-arvarticle.html> ou dans le cadre du projet Sol D'Phy porté par AgroTransfert et Territoires - <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/08/Guide-m%C3%A9thode-beche-web.pdf>) ;
- La spectroscopie de proche infrarouge (SPIR) qui permet d'évaluer des propriétés physico-chimiques comme la teneur en matière organique ;
- Les mesures de respiration basale du sol et de carbone labile *in situ* dans le kit Biofunctool développé par l'IRD et le CIRAD (<https://www.biofunctool.com/>)

Notons également le développement par le RMT Sols et Territoires d'une typologie agronomique simplifiée des sols dite « TypTerres »⁵. Celle-ci permet de partager des informations sur les types de sols et certaines propriétés peu dynamiques (ex : texture, calcaire total, profondeur de sol). Cette représentation simplifiée mais représentative de la diversité pédologique pourra simplifier l'accès à certains indicateurs et nourrir les diagnostics de qualité des sols.

3.2.1.3. Indicateurs biologiques

En contexte forestier, très peu d'indicateurs biologiques ont été développés même si des travaux commencent à émerger (exemple du projet RESPIRE: Récolte des menus bois en forêt ; Saint-André *et al.* 2019).

En contexte agricole, on note une multiplication des indicateurs biologiques depuis 15-20 ans, notamment au niveau français, avec des équipes de recherche très dynamiques sur les différents groupes d'organismes, i.e., microorganismes, micro-, méso- et macro-faune et utilisant différentes approches analytiques (présence, diversité, structure, activité, etc.). Une synthèse récente des projets de recherche français sur les indicateurs de la qualité des sols montre que 50% des indicateurs en développement sont biologiques (Séminaire ADEME « Evaluation des fonctions et services des sols » organisé à Orléans le 12 juin 2019⁶). Cette explosion des indicateurs biologiques est notamment liée :

- A la mise en place en 2004 du programme Bio-indicateurs de la qualité des sols porté par l'ADEME. Le programme a permis la création d'une communauté scientifique nationale et le développement d'outils de caractérisation taxonomique et fonctionnelle des communautés (micro-, méso-, macro-faune) et de mesure de leurs activités (décomposition MO, cycles éléments...).
- Au développement des technologies d'analyses, notamment de l'ADN du sol 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 ;
- A 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 ;

⁵ TypTerres : une typologie de sols prenant en compte les attentes des agronomes :

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/05-typertes-typologie-sols-pr-agronomes.pdf>

⁶ Anne Blanchart, Christophe Calvaruso, Thomas Eglin, Antoine Piérart et Cécile Grand, 2019. Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols, Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque.

- A la compréhension accrue du rôle central des organismes et de leur activité dans le fonctionnement des sols, faisant émerger la notion d'assurance écologique (
- Figure 9).
-

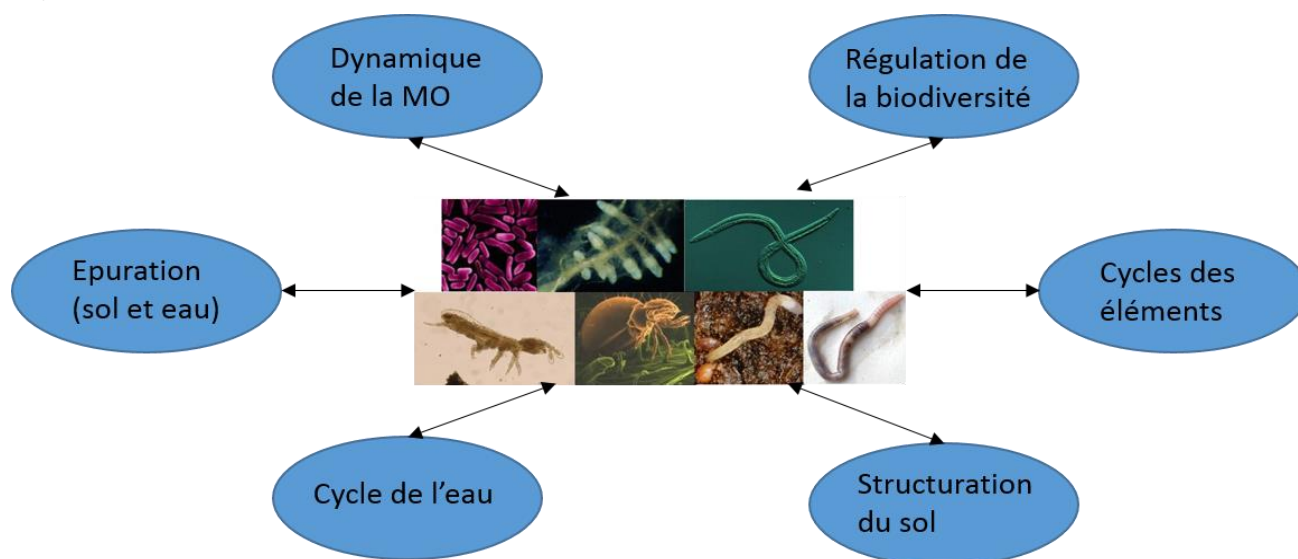


Figure 9 : Le rôle central des organismes dans le fonctionnement du sol

Toutefois, on constate que les indicateurs biologiques sont encore sous-représentés dans les réseaux de suivi de la qualité des sols (projet LANDMARK, van Leeuwen *et al.*, 2017⁷), ce qui pose question sur leur opérationnalité car leurs référentiels sont souvent peu documentés (peu de contextes représentés) et leur plus-value dans les démarches de conseil auprès des gestionnaires reste encore à préciser. Des outils de diagnostics intégrant plusieurs indicateurs biologiques et visant à représenter la dynamique du système, *i.e.*, carbone et azote labiles, flux d'éléments biodisponibles, se développent également afin d'évaluer le fonctionnement réel de l'écosystème, limitant ainsi les biais induits par le transport et l'analyse des échantillons biologiques hors de leur milieu. Enfin, on observe depuis près de dix ans une forte dynamique dans la normalisation de protocoles sur les indicateurs biologiques au niveau de l'ISO dans le cadre du « Comité Technique 190 / Sous-comité 4 / Caractérisation Biologique » avec 49 normes publiées en 2019 (dont 20 depuis 2016) et 7 nouveaux projets⁸.

⁷ Van Leeuwen *et al.* 2017. Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. Environ. Res. Lett. 12.

⁸ <https://www.iso.org/fr/committee/54366.html>

3.2.1.4. Outils de diagnostics intégrés

Depuis quelques années, **en contexte agricole principalement**, on observe l'apparition d'outils synthétiques qui permettent d'évaluer le fonctionnement global du sol en agrégeant plusieurs indicateurs (Tableau 5). A l'exception du projet AGRINNOV, on note généralement pour ces nouveaux outils un manque de référentiels et de validation sur une gamme de contexte variés. On observe également une grande diversité dans le choix et le nombre d'indicateurs biologiques considérés même si certains sont récurrents.

Tableau 5 : Différents outils de diagnostic agrégeant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques

Outil	Domaine de validité affiché	Fonctions considérées	Indicateurs
Soil Quality Test KIT USDA⁹	Sols agricoles	- Toutes les fonctions	- Respiration du sol - Test d'infiltration - Densité apparente - Conductivité Electrique - pHeau - Teneur en nitrate et nitrite - Stabilité des agrégats - Slake test - Quantification des vers de terres - Observation du profil de sol - Salinité de la solution du sol
Global Indice of Soil Quality (GISQ ; Velasquez et al., 2007)	Tous types de sol	- Toutes les fonctions mais une qualité globale de sol évaluée	- Macrofaune : vers de terre, termites, fourmis coléoptères, etc.) - Paramètres chimiques (Cations - échangeables, P total et assimilable, Stocks de matière organique (C et N total, minéralisation du C organique, etc.) - Paramètres physiques (densité apparente et réelle, humidité, résistance à la pénétration); - Variables morphologiques. : différents types d'agrégats
LANDMARK – Soil Navigator¹⁰	Tous types de sols. Le « Soil Navigator » a été développé pour les sols agricoles (prairies, cultures)	- Production de nourriture, d'aliments pour les animaux, de fibres et de (bio)carburants - Régulation et purification de l'eau - Séquestration du carbone et régulation du climat - Biodiversité du sol et aménagement d'habitat - Recyclage des nutriments (externes) / produits agro-chimiques	- 81 indicateurs (se référer aux 5 rapports de synthèse LANDMARK (D3.1 à D3.5) : http://landmark2020.eu/list-of-deliverables/
DESTISOL¹¹	Sols urbains	- Toutes les fonctions	- Pente, profondeur de sol - Couleur - Densité racinaire - Activité biologique - Structure, texture - Compacité

⁹ https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=nrcs142p2_053873, consulté le 22/10/2019

¹⁰ <http://www.soilnavigator.eu/> consulté le 22/10/2019

¹¹ Anne Blanchart. Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel. Agronomie. Université de Lorraine, 2018. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02075744/document>

			- Classification GTR - % éléments grossiers, % artefacts - Trace d'hydromorphie - Traces de pollution - pH_{eau}, P_{Olsen}, teneur en MO, N_{tot} $CaCO_3$, rapport C/N - Eléments traces métalliques totaux, composés traces organiques totaux
AGRINNOV¹²	Sols agricoles	- Toutes les fonctions	- Abondance lombricienne totale - Abondance des 4 groupes fonctionnels de lombriciens (épigé, épi-anécique, anécique, endogé) - Diversité et structure taxonomiques des communautés lombriciennes - Biomasse moléculaire microbienne - Rapport densité champignons / densité des bactéries - Diversité taxonomique des bactéries et des champignons - Abondance des nématodes libres - Diversité taxonomique des nématodes - Abondance des nématodes phytoparasites - Indice de structure des nématodes - Indice d'enrichissement des nématodes - Test bêche - Caractéristiques physico-chimiques - Teneur en polluants métalliques - + 2 indicateurs de synthèse : Patrimoine biologique/Assurance écologique et fertilité biologique.
Diagnostic HUMUS de Terres de Liens	Sols agricoles	Exprimé en finalités : - Préservation des sols contre l'érosion - Préservation de la structure du sol - Maintien et augmentation de la biodiversité du sol - Maintien et augmentation du taux de matières organiques - Rétention du sol en éléments minéraux	- Traces d'érosion - Croûte de battance - Compacité - Etat d'humidité - Traces d'hydromorphie - Structure - Porosité - Vers de terre - Densité racinaire - Faune épigée - Faune endogée - Taux de matière organique - Rapport carbone / azote - Capacité d'échange cationique - Taux de saturation - Quantité de macroéléments - Quantité d'oligo-éléments
Visual Soil Assessment (VSA ; Shepherd et al., 2000)	Sols agricoles	Qualité globale du sol en lien avec les propriétés physiques et l'impact sur les plantes	- Structure et consistance du sol - Porosité du sol - Couleur du sol - Nombre et couleur des mottes - Nombre de vers de terre - Degré de développement des mottes - Degré d'érosion du sol

¹² Cannavacciuolo M. et al. 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 : 41-54
<https://www6.inra.fr/ciag/content/download/6029/44832/file/Vol55-4-Cannavacciuolo.pdf>



			- Indicateurs liés à l'état des plantes (hauteur et maturité de la récolte, développement et maladies des racines...)
BIOFUNCTOOL¹³	Sols agricoles et forestiers (tropicaux à l'heure actuelle)	- Maintien de la structure du sol - Cycle des nutriments - Transformation des matières organiques	- Stabilité des agrégats - Vitesse d'infiltration méthode Beerkan - Respiration basale - Teneur en nitrate - Azote du sol disponible - Structure du sol (test VESS) - Activité biologique (Bait Lamina, litter index) - Carbone labile - Respiration basale du sol - Disponibilité des nutriments

Ces outils proposent généralement des règles d'agrégation des indicateurs pour aboutir à une notation de la qualité globale des sols (exemple du Global Index of Soil Quality ; GISQ) ou des indicateurs de synthèse (par exemple l'indicateur d'assurance écologique du projet Agrinnov). Un exemple de démarche d'agrégation est présenté sur la Figure 10. Elle consiste à donner une note à chaque indicateur (pour les différentes fonctions) puis à sommer ces notes pour obtenir un indice global de qualité des sols. Les notes de chaque indicateur peuvent éventuellement être pondérées par du dire d'experts (ex : GISQ). Cette méthode ne fait pas consensus (Rossi *et al.*, 2009) notamment car le passage des données de base à l'indice engendre une perte d'information et parce que l'attribution des facteurs de pondération peut-être particulièrement subjective. Les indices définis dans l'outil Biofunctool s'affranchissent de cette limite en calculant les facteurs de pondération à partir d'une analyse en composante principale de plusieurs milliers de mesures d'indicateurs obtenues sur une gamme de conditions pédo-climatiques et agronomiques.

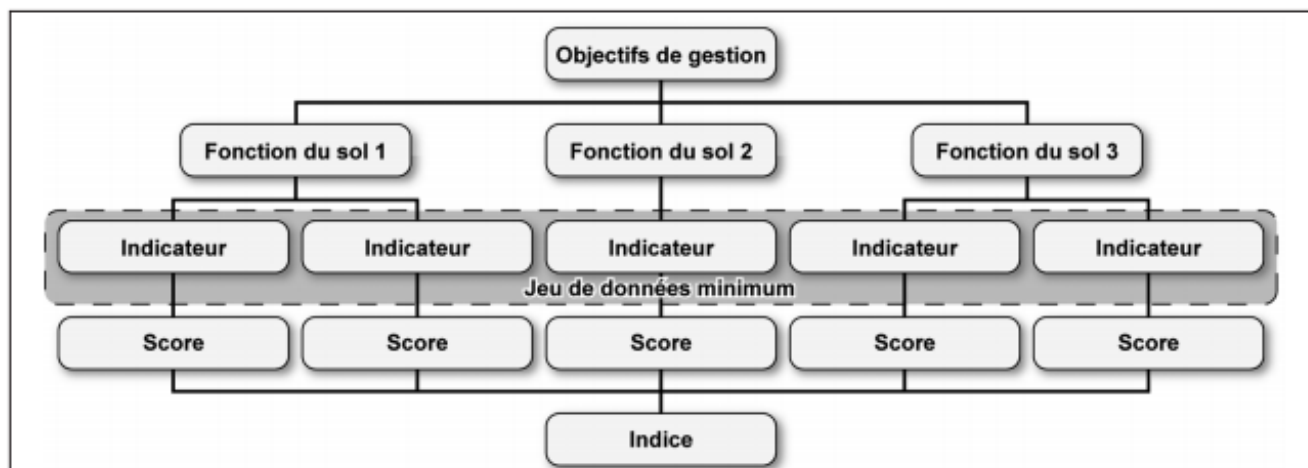


Figure 10 : Démarche de construction de l'indice additif pour l'évaluation de la qualité des sols (d'après Karlen *et al.*, 2003)

En contexte forestier, ont vu le jour depuis quelques années des indicateurs pour répondre spécifiquement à une menace et guider les gestionnaires dans le choix des pratiques durables. Citons par exemple les outils d'aide à la décision décrits dans le guide PRATIC'SOLS¹⁴ pour évaluer la sensibilité de parcelles forestières au tassement (à partir de la texture, de la pierrosité, des traces d'hydromorphie et de l'état d'humidité du sol) et INSENSE¹⁵ pour évaluer la sensibilité à l'exportation de rémanents (à partir de la texture, de la forme d'humus, du calcaire actif et du contexte stationnel). Ces diagnostics sont présentés en Annexe K.

¹³ 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

¹⁴ ONF, FNEDT, 2017. PRATIC'SOLS – Guide sur la praticabilité des parcelles forestières.
https://www.fcba.fr/sites/default/files/files/GUIDE%20PRACTIC'SOLS_WEB%20vdef.pdf

¹⁵ Augusto *et al.* 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>

3.2.2. Identification de stratégies de déploiement

Le Groupement est parti des résultats de l'atelier de cadrage (Annexe J : Compte-rendu de l'atelier de cadrage), couplé à des recherches bibliographiques et webographiques afin de lister des grands types de stratégies de déploiement associés à des exemples concrets, lorsque cela était possible :

La sensibilisation et la formation

La sensibilisation et la formation des acteurs du monde agricole et forestier, et plus largement du grand public est fondamentale pour mettre en œuvre les différents types de stratégies décrits ci-après. L'ajout de programmes relatifs à la préservation de la qualité des sols dans les programmes scolaires (e.g. école d'agronomie, lycée, collège, primaire) est également un élément clé pour une sensibilisation accrue de la population aux enjeux des sols (ex : se rapprocher des travaux du groupe de réflexion REV'urbain sur la constitution d'un tableau de bord d'indicateurs de la qualité biologique des sols pour les primaires et secondaires). Il s'agit à la fois de sensibiliser aux enjeux, de mettre à disposition des ressources adaptées (exemple : les guides et vidéos du kit de santé des sols¹⁶ mis à disposition par le département sols du service de conservation des ressources naturelles de l'USDA) et de former à l'utilisation des diagnostics. La formation à l'utilisation des outils de diagnostics fait partie du travail des organismes de développement/conseil comme c'est déjà le cas en agriculture pour la production, la gestion de l'eau et de l'azote (exemple : Resolia : le service commun de formation et d'accompagnement du réseau des Chambres d'agriculture), et en forêt pour la gestion (exemple : les cycles FOGFOR de formation à la gestion forestière animés par les organismes de la forêt privée).

Inclure le diagnostic dans des outils et démarches de conseil

Des démarches visant à proposer un diagnostic global de la qualité des sols sont actuellement en développement en France pour le conseil agricole. Par exemple :

- **Le projet AgroEcosol¹⁷** piloté par le laboratoire d'analyse de sols AUREA vise le développement pour 2021 d'une offre de conseil agroécologique incluant des bioindicateurs de la qualité des sols. Il s'agit d'industrialiser des processus inédits d'analyse de terre, pour délivrer un conseil de gestion globale des sols agricoles aux agriculteurs. Les services rendus seront aussi bien agronomiques qu'environnementaux ;
- **Le réseau d'expérimentation et de veille à l'innovation agricole (REVA)¹⁸** porté par l'observatoire des sols vivants diffuse aux agriculteurs adhérents des outils de diagnostics de l'état des sols, en intégrant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques dans des indicateurs de synthèse 'Patrimoine biologique/assurance écologique' et 'Fertilité biologique'.

La reconnaissance des méthodes par des instances nationales (exemple : COMIFER pour la méthode du bilan azoté) et/ou la normalisation peut faciliter la diffusion des méthodes.

Encourager la réalisation de diagnostics de qualité des sols dans le cadre des programmes pour le climat et l'environnement

L'idée est de conditionner l'octroi d'aides à la réalisation d'un diagnostic de la qualité des sols. Elles peuvent notamment s'inscrire dans le cadre de **paiements pour services environnementaux (PSE)**. Quelques exemples :

- **Les aides agricoles :**
 - La mesure agro-environnementale et climatique (MAEC) SOL_01 « conversion au semis direct sous couvert » établie par la France en 2016 dans le cadre de la mise en œuvre du second pilier de politique agricole commune (PAC) prévoit la réalisation d'analyse des sols en 1^{ère} et 5^{ème} année d'engagement afin de réaliser un bilan humique, ainsi qu'un comptage de vers de terre ;

¹⁶ https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=nrcs142p2_053870

¹⁷ <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/aurea.pdf>

¹⁸ <https://www.ofsv.org/le-reva>



- Le mécanisme dit d'« ecoscheme » en discussion dans le cadre des évolutions des paiements liés au premier pilier de la PAC pourrait également être une opportunité pour valoriser les services environnementaux (exemple : stockage de carbone) fournis par les agriculteurs, sur la base de l'obtention de résultats.
- **Les aides forestières :**
 - A notre connaissance, il n'existe pas aujourd'hui d'aides forestières pour réaliser un diagnostic de la qualité des sols.

Les mécanismes de financement privés

Les acteurs privés peuvent mettre également en place des mécanismes favorisant les diagnostics de la qualité des sols, comme par exemple :

- **Des PSE privés** s'inscrivant dans des démarches de filière telles que pratiquées par certains grands groupes agroalimentaires. Le PSE Vittel est souvent cité à titre d'exemple de PSE privé. Il vise à la protection de l'eau des bassins versants de Vittel qui constitue la base de l'activité économique de la société des eaux minérales de Vittel (Nestlé Waters). Il porte sur la rémunération des restrictions de pratiques agricoles en amont des bassins versants afin de parvenir à une meilleure protection de ces ressources en eau ;
- **Le développement de la compensation carbone volontaire (stockage de carbone) et biodiversité** et les standards développés en parallèle (exemple : Label bas carbone au niveau national) : la compensation carbone volontaire consiste à financer un projet de réduction ou de séquestration d'émission de GES dont le financeur (entreprise, citoyen) n'est pas directement responsable. Un financeur souhaitant s'engager dans cette démarche s'adresse alors à un opérateur spécialisé pour acquérir un nombre d'unités « carbone » (correspondant au volume des émissions de GES qu'il souhaite compenser), en versant une somme qui contribue alors au financement d'un projet spécifique de réduction des émissions ou de séquestration de carbone ;
- **La responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE)** illustrée par le projet LIFE Carbon Dairy¹⁹. A travers ce projet, les élevages bovins laitiers se sont impliqués dans le plan carbone de la production laitière française avec l'objectif de réduire de 20% l'empreinte carbone de leur lait entre 2015 et 2025. Pour ce faire, un diagnostic environnemental a été réalisé par différents conseillers et Chambres d'agriculture en 2017 grâce à l'outil CAP'2ER®.

Les transactions foncières

L'idée est ici de pratiquer un diagnostic de la qualité des sols au moment d'une transaction foncière, en s'inspirant de mécanismes actuellement pratiqués à l'étranger ou dans d'autres secteurs tels que présentés ci-après. Ce type de stratégie permettrait à *minima* d'informer les propriétaires et les gestionnaires sur la qualité de leur sol :

- **Le certificat de sol (bodematte)** de Flandres²⁰ : en Flandres, un certificat de sol est requis pour chaque transaction foncière (construit et non bâti). Il est obligatoire. Il s'agit d'un formulaire qui indique si un terrain est pollué ou non. Il est délivré par l'Agence flamande de gestion des déchets (OVAM). Il doit être postérieur au 1^{er} juin 2008. Pour les terrains qui ne sont pas considérés comme des terrains à haut risque, les certificats de sol restent valables tant que la situation du terrain reste la même et que ses données administratives et environnementales ne changent pas. Pour les terrains à haut risque, la validité du certificat dépend de la validité de l'enquête sur l'orientation du sol. Lorsque le terrain n'est pas repris dans le registre de l'OVAM, une attestation de sol en blanc est délivrée, ce qui signifie que l'OVAM ne dispose pas de données pertinentes sur le sujet. Lorsque le terrain est bel et bien repris dans le registre, le propriétaire qui demande le certificat doit d'abord faire effectuer une étude d'orientation du sol avant de pouvoir transférer le terrain. Cela signifie qu'il s'agit d'un terrain comportant un risque, où des activités à risque sont/ont été pratiquées pouvant éventuellement causer la pollution du sol ;

¹⁹ <http://www.carbon-dairy.fr>

²⁰ Ceenaeme J. et al. 2016. The soil certificate – a Flemish tool helping raise awareness about soil. In Global soil Security – Towards more science-society interfaces. CRC Press. 137p.

- Le diagnostic de performance énergétique (DPE)²¹ : il est destiné à informer l'éventuel acquéreur d'un bien immobilier sur sa performance énergétique en évaluant sa consommation énergétique et ses émissions de gaz à effet de serre (GES). Il est imposé aux propriétaires vendeurs. La lecture du DPE est facilitée par deux étiquettes à 7 classes de A à G : l'étiquette énergie et l'étiquette climat (Figure 11). Il est établi par un diagnostiqueur certifié ayant souscrit à une assurance. Des organismes de certification de personnes, accrédités par le Comité Français d'accréditation (COFRAC) vérifient les compétences des candidats. Un DPE est valable 10 ans ;

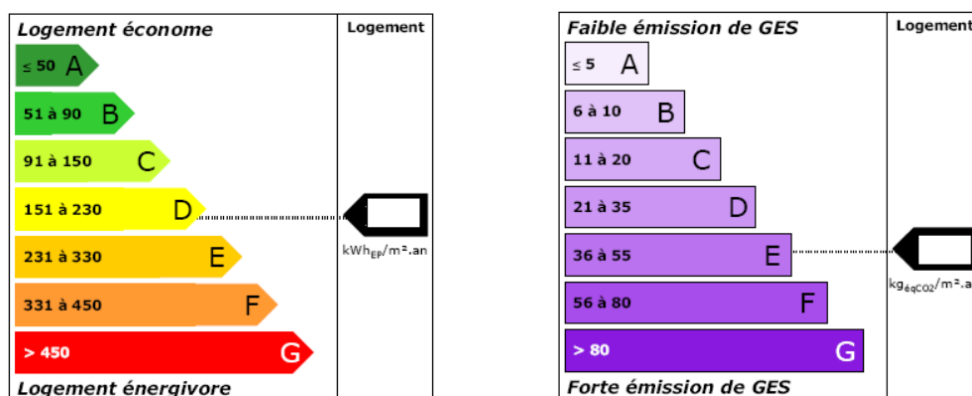


Figure 11 : L'étiquette énergie² pour connaître la consommation d'énergie primaire (à gauche) et l'étiquette climat pour connaître la quantité de gaz à effet de serre émise (GES) (à droite)

Les baux ruraux

L'exemple suivant est directement applicable au diagnostic de la qualité des sols :

- Les Baux Ruraux à clauses Environnementales (BRE²²) et le diagnostic humus de l'association « Terres de Liens »²³** : créés par la loi d'orientation agricole de 2006, le bail rural à clauses environnementales permet d'inclure dans les baux une ou des clauses sur le respect de l'état environnemental des terres louées. Ces clauses environnementales visent à orienter les pratiques agricoles vers, notamment, la préservation de la ressource sol. L'association Terres de Liens est aujourd'hui le principal prescripteur de BRE en France. Elle œuvre pour faciliter l'accès à la terre agricole tout en prêtant particulièrement attention à la conservation d'un environnement durable. Les terres, en propriété de Terre de Liens, sont louées à des agriculteurs via la signature d'un BRE qui traduit l'expression de l'engagement des parties au respect et à la mise en valeur notamment des sols. Pour élaborer ce BRE, Terres de Liens a développé un outil de diagnostic, HUMUS (voir également tableau 5), afin de déterminer l'état environnemental des sols des fermes, et mesurer les effets à long terme des mesures mises en place par le BRE dans le domaine environnemental. HUMUS ne constitue pas un outil de conseil agronomique mais ses résultats permettent à l'agriculteur de connaître l'état de ses sols et d'envisager, accompagné ou non par des organismes de conseil techniques, les mesures correctives ou à poursuivre pour en maintenir et développer ses qualités. La réalisation quinquennale d'un diagnostic HUMUS, via les dix-sept indicateurs qui le composent, permet d'assurer un suivi des clauses du bail.

La certification environnementale

Ce type de stratégie a fait ses preuves et fonctionne quels que soient les domaines. Toutefois, ce n'est pas une stratégie suffisamment englobante. Elle va toucher seulement une petite partie de la cible. Les exemples de certification sont nombreux :

²¹ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>

²² Mesure créée par le ministère de l'Environnement via une loi d'orientation agricole datant de 2006.

²³ Source : Petitdidier et Rochette, 2018. HUMUS Diagnostic participatif des sols. Notice d'utilisation. Apports théoriques et mise en œuvre. Terres de Liens, Mission Utilité sociale et environnementale, 106 pages.



- **Flamme verte**²⁴ : le label du chauffage au bois lancé en 2000 par les fabricants d'appareils domestiques avec le concours de l'ADEME. Les adhérents du label apposent sur leurs équipements une étiquette énergétique qui précise la classe de performance. L'achat d'un produit labellisé donne droit à des aides (Crédit d'impôt transition énergétique...) ;
- **PEFC**²⁵ et **FSC**²⁶ : ces marques de certifications forestières ont pour objectif d'attester du respect et de promouvoir une bonne gestion forestière ;
- **Haute Valeur Environnementale (HVE)**²⁷ : parmi les trois niveaux de certification environnementale des exploitations agricoles, HVE est le niveau le plus élevé (niveau 3). Il est fondé sur des indicateurs de résultats relatifs à la biodiversité, la stratégie phytosanitaire, la gestion de la fertilisation et de l'irrigation, mais n'intègre pas de diagnostics de qualité des sols ou des mesures directes d'indicateurs de qualité des sols ;

Indexer le prix du foncier

A l'heure actuelle, le prix du foncier évolue selon différents critères : nature du sol (principalement l'épaisseur de la couche arable) induisant les possibilités culturales, localisation de la parcelle, nombre de transactions dans la zone...

Il s'agirait de mettre en avant une notion de « durabilité du fonctionnement des sols » définie sur la base d'un diagnostic de la qualité des sols. Les terres dont le fonctionnement est de bonne qualité pourraient être valorisées. Ce type de stratégie n'existe pas actuellement. Toutefois la mise en œuvre peut s'avérer difficile car d'une part cela nécessite un nombre de transactions foncières suffisamment élevé pour faire bouger les lignes et ce nouveau critère n'aura peut-être pas l'impact attendu auprès des cibles. Cette approche devrait être testée dans le projet TI « Alimentation durable 2030 » de Dijon métropole lauréat en 2019 de l'appel à projet des Investissements d'avenir « Territoire d'Innovation et de Grande Ambition ».

La réglementation

Le sol ne dispose pas aujourd'hui de réglementation cadre propre et spécifique pour le protéger. Il existe certes des réglementations nationales relevant de plusieurs codes (e.g. environnemental, rural, forestier) et des réglementations européennes (e.g. directive relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (86/278/CEE), règlement fertilisants), mais qui ne concernent pas directement la préservation de la qualité des sols. Cette réglementation pourrait permettre, entre autres, de promouvoir un outil de diagnostic de la qualité des sols à l'échelle nationale. Elle pourrait s'inspirer des réglementations cadres suivantes :

- **La directive cadre sur l'eau (DCE)** : La directive-cadre sur l'eau s'inscrit dans un contexte législatif français déjà riche, dont elle est en partie inspirée. Les grands principes de cette politique ont été posés dès les années 1960. La directive cadre sur l'eau renforce cette politique en fixant des objectifs environnementaux portant notamment sur l'atteinte du bon état. La DCE poursuit plusieurs objectifs : (i) a non-dégradation des ressources et des milieux, (ii) le bon état des masses d'eau, sauf dérogation motivée, (iii) la réduction des pollutions liées aux substances, et (iv) le respect de normes dans les zones protégées. En France, les ressources en eau sont gérées par bassin hydrographique, délimités par les lignes de partage des eaux superficielles. Ils sont au nombre de 12. Pour chaque bassin, le comité de bassin arrête les grandes orientations dans le cadre des politiques nationales et européennes de l'eau. Cette assemblée est composée d'une représentation large de toutes les catégories d'acteurs de l'eau (40 % d'élus des collectivités (communes et leurs groupements, départements, régions, 40 % de représentants des usagers de l'eau (industriels, agriculteurs, associations de défense de l'environnement, de pêche, de consommateurs... et 20 % de représentants de l'État) favorisant ainsi le débat et la concertation entre les acteurs de l'eau au niveau des bassins.

²⁴ <https://www.flammeverte.org/>

²⁵ <https://www.pefc-france.org/>

²⁶ <https://fr.fsc.org/fr-fr>

²⁷ <https://agriculture.gouv.fr/certification-environnementale-mode-demploi-pour-les-exploitations>

- **La législation sur la pollution de l'air²⁸** : la qualité de l'air est reconnue comme un enjeu majeur pour la santé et l'environnement. Des directives au niveau européen fixent des normes sanitaires à respecter qui se traduisent par l'obligation :
 - De surveiller la qualité de l'air ;
 - D'informer les populations sur la qualité de l'air ;
 - De respecter les normes sanitaires fixées ;
 - De mettre en œuvre des plans d'actions dans les zones lesquelles des dépassements des normes sanitaires sont observés afin qu'elles soient respectées dans les délais les plus courts.

Il existe un dispositif national de surveillance de la qualité de l'air dont les acteurs sont les suivants, et dont la structuration pourrait servir de base à un équivalent sur les sols :

- **Le ministère en charge de l'environnement** : il est responsable de la définition de la politique nationale de surveillance, de la prévention et de l'information du public sur l'air. Il définit les réglementations relatives aux polluants atmosphériques et organise la surveillance de la qualité de l'air en garantissant le respect des modalités de surveillance conformément aux dispositions européennes ;
- **Les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA)** : elles ont pour mission de mettre en œuvre la surveillance à l'échelle régionale et d'informer sur la qualité de l'air, notamment en cas d'épisodes de pollution atmosphérique. Elles sont au nombre de 26. Elles sont fédérées et représentées par Atmo France²⁹ qui contribue en plus à la diffusion de l'information et la conduite d'actions de sensibilisation auprès des différents acteurs nationaux ;
- **Le laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA³⁰)** : il assure la coordination scientifique et technique de la surveillance de la qualité de l'air. Il apporte un appui stratégique, scientifique et technique au ministère et aux AASQA en réalisant les développements techniques nécessaires à la surveillance de la qualité de l'air, l'analyse des résultats et l'appui méthodologique à cette surveillance. C'est un groupement d'intérêt scientifique (GIS) qui regroupe trois partenaires (LNE, INERIS, IMT Lille Douai) ;
- **Le système PREV'AIR³¹** : il s'agit d'une plate-forme nationale de prévision de la qualité de l'air, qui vient en complément des informations fournies par les réseaux de mesures et d'observation physiques gérés par le AASQA. Elle est gérée au quotidien par INERIS qui travaille avec Météo France, le CNRS et le LCSQA.

Les différents types de stratégies décrits ci-dessus ne sont pour la plupart pas suffisamment efficace seuls. Ils constituent davantage des briques qu'il est possible d'agréger ensemble ou d'intégrer dans une stratégie plus large. La stratégie varie aussi en fonction de la cible et du type d'outil de diagnostic à promouvoir. A ce stade de l'état de l'art, il subsiste donc de nombreuses incertitudes pour être en mesure de sélectionner des stratégies précises et leur validation devra nécessairement passer par une phase de test sur le terrain, dans des territoires ou région pilotes par exemple avant d'être étendues à l'échelle nationale.

Ainsi, à partir des éléments recueillis, cinq scénarios de stratégies de déploiement ont été construits et utilisés comme base de discussion avec les acteurs dans le premier atelier (Paragraphes 2.5.1 et 3.3.1) :

- Scénario « Initiatives privées » ;
- Scénario « Certificats » ;
- Scénario « Locations et transactions foncières » ;
- Scénario « Aides au diagnostic » ;
- Scénario « Location, transactions foncières et transmission ».

²⁸ Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/politiques-publiques-reduire-pollution-lair>

²⁹ <https://atmo-france.org/>

³⁰ <https://www.lcsqa.org/fr>

³¹ <http://www2.prevoir.org/>



Ces scénarios et les démarches et exemples à partir desquels ils s'inspirent sont détaillés dans les Annexe D : Tutoriel de l'atelier 1 et Annexe E : Questionnaire en ligne de l'atelier 1.

3.2.3. Bilan intermédiaire des résultats de l'état de l'art

Fonctions des sols et services auxquels contribuent les sols, et indicateurs de la qualité des sols

Les principaux résultats de cet état de l'art sont les suivants :

- Le fonctionnement des sols, quel que soit leur usage, peut être décrit par un ensemble de fonctions (7 identifiées) en interactions. Le lien entre ces fonctions des sols et leur rôle dans les services rendus par les écosystèmes est plutôt bien établi. L'évaluation de la qualité des sols nécessite donc une approche globale, prônée dans un grand nombre de projets de recherche appliquée récents tels qu'Agrinnov, AgroEcoSol et Biofunctool à l'échelle nationale, impliquant de combiner des indicateurs physiques, chimiques et biologiques ;
- 75 indicateurs permettant l'évaluation de ces sept fonctions ont été répertoriés. Un même indicateur peut évaluer plusieurs fonctions. Il s'agit à la fois d'indicateurs d'état (paramètres du sol, par exemple la teneur en cations échangeables) et de fonctionnement (processus du sol, par exemple, la minéralisation du carbone). Cela comprend 20 indicateurs physiques, 30 indicateurs chimiques et 25 indicateurs biologiques. Il faut également noter qu'un même indicateur peut être évalué par différentes méthodes en fonction du contexte ou des objectifs de la mesure ;
- Le niveau d'opérationnalité des indicateurs (coût, référentiel, méthode d'acquisition, etc.) est très variable. Des indicateurs physiques et chimiques ayant fait leurs preuves sont pour la plupart opérationnels et des indicateurs biologiques très divers (lié à la diversité des organismes mais également des approches) en plein essor dont les niveaux d'opérationnalité sont très contrastés ;
- Des développements méthodologiques importants ont été réalisés ces dernières années et vont se poursuivre les années à venir, pour répondre à des nouveaux objectifs/défis (précision de la mesure, baisse des coûts, acceptabilité, etc.) ;
- Pour certains indicateurs, des liens clairs avec les fonctions et les objectifs agro-sylvicoles, permettent de traduire les résultats du diagnostic en conseil pour les acteurs des sols agricoles et forestiers. Mais ce n'est pas le cas pour tous les indicateurs, notamment biologiques.

L'évaluation de ces résultats met en exergue quelques limites :

- La (trop) grande diversité d'indicateurs dont l'opérationnalité est très variable (et d'ailleurs difficilement accessible de prime abord) complique singulièrement le choix pour le gestionnaire qui souhaite réaliser un diagnostic de la qualité de ses sols ;
- La difficulté à évaluer la robustesse de l'indicateur et son niveau d'opérationnalité par manque d'information mais également parce qu'un indicateur performant doit regrouper un ensemble de critères qui peuvent parfois être antinomique (par exemple la précision de la mesure et le coût) ;
- Des indicateurs biologiques à fort potentiel (sensibles aux pratiques, ubiquité...) mais dont le niveau d'opérationnalité est très variable, notamment en lien avec la finesse de leur référentiel d'interprétation. Ce qui implique une difficulté pour passer au conseil ;
- La difficulté à interpréter les résultats indépendamment de toute expertise subjective (par exemple dire d'experts) résultant généralement de l'absence d'un référentiel robuste ou de l'agrégation de plusieurs indicateurs.

Les besoins identifiés sont d'aboutir à la sélection d'un jeu d'indicateurs opérationnels permettant d'évaluer le fonctionnement global des sols agricoles et forestiers quel que soit le contexte et les objectifs de gestion. Un critère majeur de choix est l'existence d'un référentiel qui doit permettre de passer du diagnostic au conseil avec la formulation de recommandations aux gestionnaires des sols agricoles et forestiers.

Stratégies de déploiement

L'état de l'art relatif aux stratégies de déploiement, qui ne se limitait pas au domaine de la qualité des sols, a révélé une diversité importante de stratégies sur le territoire national mais également international qui pourraient être transposées pour promouvoir le diagnostic de la qualité des sols à grande échelle.

Cependant, cet état de l'art a rencontré plusieurs limites :

- Le faible nombre de stratégies de déploiement concernant directement l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols ;
- Le manque de retour d'expérience sur les stratégies de déploiement identifiées et non forcément liées à la qualité des sols ;
- L'absence au moment de cette phase d'un jeu d'indicateur commun sur lequel s'appuyer, rendant difficile l'identification des stratégies de déploiement les plus pertinentes à mobiliser pour l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols.

A la suite de cet état de l'art, les besoins identifiés sont de co-construire des stratégies de déploiement adaptées à un jeu d'indicateur unique et à un contexte spécifique (importance de renforcer le lien stratégie-outils). Ceci pourrait être mis en place dans le cadre d'expérimentations pilotes (paragraphe 4.2.5).

3.3. Ateliers de co-construction avec les acteurs des sols agricoles et forestiers

3.3.1. Atelier 1 : questionnaire en ligne

Les objectifs de ce premier atelier étaient d'une part de présenter aux participants le contexte et les enjeux de l'étude ainsi que le vocabulaire commun relatif aux thématiques abordées et défini lors de l'atelier de cadrage, et d'autre part de définir leur rôle au sein de cette étude et de tirer des premiers enseignements permettant de préparer les ateliers suivants.

Profil des participants et intérêts pour l'étude

Les premiers résultats permettent de cerner les profils des participants ainsi que leur intérêt à participer à cette étude. Parmi les 29 répondants, 58% indiquent travailler en milieu « agricole », 32% en milieu « forestier » et 10% dans un autre secteur. 85% d'entre eux affirment également participer à cette étude pour échanger avec d'autres acteurs sur la thématique de la qualité des sols et pour acquérir des connaissances complémentaires sur les outils de diagnostic de cette qualité. Enfin, 70% d'entre eux se disent également intéressés par l'identification de stratégies de déploiement de ces outils de diagnostic.

Connaissance et utilisation des indicateurs de diagnostic de qualité des sols

Les acteurs des sols agricoles et forestiers interrogés ont globalement une bonne connaissance des indicateurs présentés (évaluée entre 63% et 67% pour les milieux forestier et agricole, respectivement) (Tableau 6). Il s'avère également que 30 des 40 indicateurs proposés sont « connus » par au minimum 50% des participants. Si les indicateurs physiques et chimiques sont pour la plupart connus de tous, les indicateurs biologiques en lien avec la micro- mésofaune et les microorganismes ainsi que les activités de décomposition sont assez bien connus en milieu agricole mais peu en milieu forestier.

Tableau 6 : Niveau de connaissance des participants des indicateurs proposés par le Groupement. Le % représente la proportion des participants qui connaît l'indicateur. Les fonctions définies initialement pour cet atelier diffèrent légèrement des fonctions finales proposées dans le paragraphe 3.2.1, résultant des discussions avec les participants aux ateliers, les membres des Copil et du comité scientifique et les experts interrogés.

	Connu	Agri	Forêt
Réserve utile	I1 : Réserve en eau utile	94%	88%
Circulation et infiltration de l'eau	I2 : Traces d'érosion	78%	88%
	I3 : Croûte de battance	94%	75%
	I4 : Vitesse d'infiltration de l'eau	72%	63%
	I5 : Traces d'hydromorphie	83%	88%
	I6 : Humidité du sol	100%	100%
Habitat de biodiversité et d'activités biologiques	I7 : Abondance de turricules	89%	88%
	I9 : Densité. état racines. prof. enracinement	100%	100%
	I10 : Abondance et diversité vers de terre	100%	75%
	I11 : Abondance et diversité de la mésofaune	61%	25%
	I12 : Biomasse microbienne	78%	38%
	I16 : Vitesse de décomposition MO	78%	38%
Stabilité physique et support physique pour les végétaux	I18 : Diversité taxonomique microbienne	39%	38%
	I20 : Epaisseur de sol	83%	88%
	I21 : Texture du sol	100%	100%
	I22 : Pierrosité	83%	100%
	I23 : Structure/porosité	94%	88%
	I24 : Stabilité des agrégats	67%	38%
	I25 : densité apparente/compacité	94%	88%
Rétention et fourniture de nutriments	I9 : Densité. état racines. prof. enracinement	100%	100%
	I26 : Sensibilité à la compaction		75%
	I27 : Capacité d'échange cationique	61%	63%
	I28 : pH eau	83%	75%
	I29 : Teneurs Ca/Mg/K/Na/P/Mn/Al/Fe biodisponibles	67%	50%
	I30 : Taux de saturation	50%	63%
	I31 : Teneur calcaire total	67%	63%
Dynamique de la matière organique	I32 : Taux calcaire actif	56%	63%
	I34 : Teneur oligoéléments	72%	50%
	I35 : Sensibilité aux exportations (forêt)		50%
	I36 : Forme d'humus		88%
	I37 : Horizon A	39%	75%
	I38 : Teneur en MO et C organique	89%	63%
	I39 : Stock C organique	72%	50%
	I40 : Evolution des teneurs et stocks de C org.	44%	
	I41 : Teneur N total	78%	50%
	I42 : Rapport C/N	89%	75%
Séquestration CO ₂ et émission de GES	I43 : Teneur N pott minéralisable (APM)	39%	
	I44 : Coeff. de minéralisation de l'humus (K2)	61%	
Rétention et dégradation des polluants	I45 : Fractionnement C et teneur en C labile	39%	25%
	I46 : Vitesse de décomposition MO	78%	38%
	I47 : Potentiel de stockage du C	22%	38%
	I47 : Potentiel d'émission de GES	11%	13%
	I48 : Teneur en métaux lourds. HAP. PCB...	44%	13%
	I49 : Mobilité des métaux lourds. HAP. PCB...	6%	13%
	I50 : Bioindicateurs	22%	50%
	I38 : Teneur en MO et C organique	89%	63%
	I18 : Diversité taxonomique microbienne	39%	38%
	I16 : Vitesse de décomposition MO	78%	38%
	I23 : Structure/porosité	94%	88%

Concernant l'utilisation des indicateurs, en moyenne, 45% des indicateurs proposés sont utilisés en milieu agricole et 40% en milieu forestier (Tableau 7). Les indicateurs physiques (et visuels) sont les plus utilisés dans les deux milieux et les indicateurs chimiques sont plus utilisés en milieu agricole qu'en milieu forestier. Concernant les indicateurs biologiques (hors racines et macrofaune), ils sont peu utilisés en milieu agricole et jamais utilisés en milieu forestier, bien qu'ils soient assez bien connus.

Tableau 7 : Niveau d'utilisation par les participants des indicateurs proposés par le Groupement lors du questionnaire. Le % représente la proportion des participants qui connaît l'indicateur. Les fonctions définies initialement pour cet atelier diffèrent légèrement des fonctions finales proposées dans le paragraphe 3.2.1, résultant des discussions avec les participants aux ateliers, les membres des Copil et du comité scientifique et les experts interrogés.

	Utilisé	Agri	Forêt
Réserve utile	I1 : Réserve en eau utile	71%	71%
Circulation et infiltration de l'eau	I2 : Traces d'érosion	53%	29%
	I3 : Croûte de battance	71%	14%
	I4 : Vitesse d'infiltration de l'eau	29%	29%
	I5 : Traces d'hydromorphie	71%	86%
	I6 : Humidité du sol	71%	71%
Habitat de biodiversité et d'activités biologiques	I7 : Abondance de turricules	41%	43%
	I9 : Densité. état racines. prof. enracinement	65%	100%
	I10 : Abondance et diversité vers de terre	41%	0%
	I11 : Abondance et diversité de la mésofaune	35%	0%
	I12 : Biomasse microbienne	29%	0%
	I16 : Vitesse de décomposition MO	41%	0%
Stabilité physique et support physique pour les végétaux	I18 : Diversité taxonomique microbienne	12%	0%
	I20 : Epaisseur de sol	53%	86%
	I21 : Texture du sol	88%	86%
	I22 : Pierrosité	53%	86%
	I23 : Structure/porosité	71%	71%
	I24 : Stabilité des agrégats	41%	14%
	I25 : densité apparente/compacité	71%	57%
	I9 : Densité. état racines. prof. enracinement	65%	100%
Rétention et fourniture de nutriments	I26 : Sensibilité à la compaction		29%
	I27 : Capacité d'échange cationique	53%	29%
	I28 : pHeau	71%	57%
	I29 : Teneurs Ca/Mg/K/Na/P/Mn/Al/Fe biodisponibles	47%	29%
	I30 : Taux de saturation	53%	29%
	I31 : Teneur calcaire total	53%	43%
	I32 : Taux calcaire actif	53%	57%
Dynamique de la matière organique	I34 : Teneur oligoéléments	41%	14%
	I35 : Sensibilité aux exportations (forêt)		43%
	I36 : Forme d'humus		86%
	I37 : Horizon A	18%	57%
	I38 : Teneur en MO et C organique	77%	43%
	I39 : Stock C organique	35%	43%
	I40 : Evolution des teneurs et stocks de C org.	29%	
	I41 : Teneur N total	65%	43%
	I42 : Rapport C/N	65%	57%
	I43 : Teneur N pott minéralisable (APM)	35%	
Séquestration CO ₂ et émission de GES	I44 : Coeff. de minéralisation de l'humus (K2)	29%	
	I45 : Fractionnement C et teneur en C labile	29%	14%
Rétention et dégradation des polluants	I16 : Vitesse de décomposition MO	41%	0%
	I46 : Potentiel de stockage du C	12%	14%
	I47 : Potentiel d'émission de GES	0%	0%
	I48 : Teneur en métaux lourds. HAP. PCB...	18%	0%
	I49 : Mobilité des métaux lourds. HAP. PCB...	0%	0%
	I50 : Bioindicateurs	18%	57%
	I38 : Teneur en MO et C organique	77%	43%
	I18 : Diversité taxonomique microbienne	12%	0%
	I16 : Vitesse de décomposition MO	41%	0%
	I23 : Structure/porosité	71%	71%



Le questionnaire a également permis d'identifier et de hiérarchiser les critères requis pour définir un « bon » indicateur de la qualité des sols. Les critères sont présentés dans le paragraphe 0, les quatre premiers critères cités étant respectivement que l'indicateur soit :

- (i) facile à mettre en œuvre et à interpréter;
- (ii) capable d'évaluer une ou des fonction(s) du sol qui les intéresse ;
- (iii) fiable, précis et standardisé ;
- (iv) soit caractérisé par une mesure aisée et à coût raisonné.

Enfin, concernant la fréquence et le coût de mise en œuvre des diagnostics, les résultats diffèrent considérablement en fonction de l'origine des participants. La fréquence d'utilisation des indicateurs dépend également des caractéristiques de l'indicateur, du type de culture, des enjeux territoriaux, des documents de gestion ainsi que des problèmes rencontrés sur la parcelle et surtout du coût du diagnostic de la qualité des sols. Concernant le coût acceptable, l'analyse révèle une extrême variabilité : entre 0 et 5 000 euros tous les dix ans. La proposition par le Groupement, au travers d'un cas d'étude, d'un diagnostic de l'ensemble des fonctions du sol sur une unité homogène de sol à 3200 euros est jugée inacceptable par la plupart des participants si le financement est uniquement à la charge du gestionnaire privé. Le milieu agricole est prêt à investir plus que le milieu forestier. Logiquement, le coût acceptable est fortement dépendant des moyens du propriétaire et des enjeux de gestion ainsi que de la plus-value que le diagnostic peut apporter au travail du gestionnaire (intérêt communicant, financier, etc.).

La construction d'un outil de diagnostic de qualité des sols : capitaliser !

Les participants ont insisté sur le fait qu'il existe déjà des outils performants qui ne demandent qu'à être utilisés ("capitaliser sur l'existant"). Mais il est indispensable de communiquer sur ces outils de diagnostic de la qualité des sols et de former les gens à leur utilisation.

Les utilisateurs sont centraux en termes de développement d'indicateurs pertinents et il faut se baser encore plus sur ce qui est fait sur le terrain pour coller aux besoins des gestionnaires/utilisateurs.

Enfin, les participants ont également montré l'intérêt de capitaliser les résultats des diagnostics de la qualité des sols avec des indicateurs « standardisés » sur l'ensemble du territoire dans une seule base de données ou dans des bases de données interopérables, afin de tendre vers une cartographie et un suivi de la qualité multifonctionnelle des sols, en particulier dans le domaine forestier où cela est manquant. Cette cartographie des sols nécessiterait de faire appel à la notion de typologie des sols, pouvant s'inspirer de celles de référentiels régionaux pédologiques, de la typologie agronomique Typterres ou encore du référentiel pédologique français.

Stratégies de déploiement

Sur cette partie, le taux de répondants a été plus faible (15 participants). Ceci peut être dû à (i) un intérêt moindre des participants, (ii) un manque de connaissance sur le sujet et/ou (iii) au fait que cette partie arrivait en fin de questionnaire et qu'elle était assez longue et plus fastidieuse. Les réponses des participants ont révélé des positions très contrastées concernant à la fois l'évaluation des 5 scénarii proposés par le Groupement mais également les propositions faites par les répondants eux-mêmes dans les scénarii qu'ils ont pu construire et exprimer librement. Une proposition intéressante a par exemple été de fixer le montant des aides publiques pour la réalisation de diagnostics de la qualité des sols en fonction de la capacité du sol à stocker entre autre les gaz à effet de serre.

Quelques consensus ont cependant pu être mis en évidence :

- La nécessité de trouver un équilibre entre le volontariat (scénario incitatif) et l'obligation (scénario coercitif) et une volonté de ne pas seulement pénaliser ceux qui dégradent la qualité de leur sol mais aussi récompenser ceux qui l'améliorent ;
- Que les diagnostics de la qualité des sols ne doivent pas uniquement être à la charge du locataire et à la demande du propriétaire ;
- L'importance d'adapter le calendrier des diagnostics selon le contexte, qui est donc sensiblement différent entre le milieu agricole et le milieu forestier. Les participants soulignent d'une part la nécessité que les

diagnostics de qualité des sols soient réalisés plus fréquemment que lors des transactions foncières et d'autre part l'instauration d'un suivi sur le long terme de la qualité des sols ;

- Que quel que soit le milieu considéré, un effort de sensibilisation, de formation et de vulgarisation est nécessaire pour communiquer sur les bénéfices de la réalisation d'un tel diagnostic de la qualité multifonctionnelle des sols ;
- Que des aides financières (publiques et/ou privées) soient envisagées, notamment pour la formation.

Ainsi, ce premier atelier révèle une forte motivation des participants pour s'investir dans cette étude, et que même si une partie des résultats indique une variabilité de points de vue, des tendances fortes au niveau de l'acceptation ou non de certaines propositions ont pu émerger. De plus, des différences notables de connaissance et d'utilisation des outils de diagnostic notamment entre le monde agricole et le monde forestier ont été mises à jour. Ce qui a conduit à séparer les participants lors des ateliers suivants en deux groupes : un groupe « agricole » et un groupe « forestier ».

3.3.2. Atelier 2 : stratégies de déploiement

Les objectifs de l'atelier 2 étaient d'une part de présenter les résultats de l'atelier 1 et d'autre part de co-construire et évaluer deux stratégies visant à promouvoir la réalisation de diagnostic de la qualité des sols. Ces deux stratégies ont été présentées sous la forme de trois cas d'études, *i.e.* deux scénarii coercitifs (location et achat) et un scénario incitatif (Annexe F : Atelier 2). Ces stratégies ont été retenues car elles avaient été les plus citées dans les réponses à l'atelier 1. Un compte-rendu est disponible (Annexe L : Compte-rendu de l'atelier 2).

Acceptation des scénarii par les participants

Pour rappel, le scénario 1 était relatif à un cadre réglementaire et coercitif, et s'est traduit en deux cas d'étude :

- Scénario 1a : option achat ou vente ; les 3 sous-groupes « forêt » ainsi qu'un sous-groupe « agriculture » ont travaillé sur ce scénario ;
- Scénario 1b : option « location » ; 2 sous-groupes « agriculture » ont travaillé sur ce scénario.

Ce scénario, dans ses deux déclinaisons, a relativement été rejeté par l'ensemble des groupes et notamment par les groupes « forestier », car jugé non pertinent, non adéquat avec la réalité de leur métier et trop contraignant. Le fait que ce scénario envisageait une obligation réglementaire de réaliser des diagnostics de la qualité des sols a expliqué son fort rejet de la part des participants. Une deuxième explication a été avancée au cours de ce deuxième atelier : le fait qu'il n'était pas prévu d'aide financière pour la réalisation des diagnostics de la qualité des sols. Enfin, il a été proposé dans la construction de ce scénario que les résultats des diagnostics de la qualité des sols aient une incidence sur le prix de vente/achat ou location de la parcelle de terrain concernée. Cet élément n'a pas été apprécié par les participants, qui ont exprimé une peur de développement d'une spéculation foncière. Les éléments proposés par les participants pour parvenir à une meilleure acceptation de ce scénario ont été de ne pas rendre obligatoire la réalisation des diagnostics de qualité des sols ; mais de laisser le bon vouloir des acteurs des sols s'exprimer ; ainsi que le fait de pouvoir intégrer, notamment en milieu forestier, ce scénario au Plan Simple de Gestion (PSG) et de trouver des aides publiques (*e.g.* Etat, Fonds Européens) pour la réalisation de ces diagnostics de qualité des sols.

Concernant le Scénario 2, il était envisagé d'inciter les professionnels et les propriétaires des sols à la réalisation de diagnostics multifonctionnels pour maintenir et restaurer la qualité des sols, avec un cadre « incitatif » et la conditionnalité de souscrire à un Plan de Gestion Durable des Sols pour recevoir une aide publique aidant à la réalisation de ces diagnostics. Ce scénario a globalement été bien accepté par l'ensemble des participants, qui ont cependant fait quelques propositions à la marge pour favoriser son acceptation. Ces points sont développés dans les items ci-dessous.

Identité et rôles de la structure porteuse

Les acteurs des sols agricoles et forestiers s'accordent à dire que les structures porteuses de telles stratégies de déploiement au sujet de l'évaluation de la qualité des sols doivent être des structures déjà existantes, avec qui ils ont déjà l'habitude de travailler et qu'ils parviennent déjà à identifier. En milieu agricole sont par exemple cités les



chambres d'agriculture, les coopératives, les structures de formation telle que RESOLIA, les instituts techniques comme Arvalis ou l'ACTA ainsi que des instituts de recherche tel que l'Inra. Du côté du monde forestier, les coopératives forestières, l'ONF et le CNPF ressortent également.

Ces structures devraient selon eux permettre la formation, mais également la certification et le contrôle des professionnels étant en mesure de réaliser les diagnostics de la qualité multifonctionnelle des sols. Cette notion de certification a émergé au cours de cet atelier 2, les participants s'accordant à dire qu'il serait aujourd'hui nécessaire de mettre en place une formation certifiante obligatoire auprès des professionnels, s'inspirant de la démarche Certiphyto, s'appelant « Certisol », afin que les professionnels réalisant les diagnostics de qualité des sols pour les acteurs des sols agricoles et forestiers soient clairement référencés et facilement identifiables.

Le contenu du Plan de Gestion Durable des Sols (PGDS)

L'atelier 2 a permis de réfléchir à la mise en place d'un PGDS et de définir les éléments qui doivent le constituer. A ce titre, les groupes « agricole » et « forestier » se sont accordés à dire que ce PGDS devait comporter à minima les résultats des analyses effectuées lors du diagnostic de la qualité des sols ; ainsi que les objectifs identifiés des diagnostics, afin de mettre en exergue les actions à mettre en œuvre, la temporalité à respecter et les indicateurs de suivi à analyser lors des diagnostics futurs, dans l'optique d'améliorer voire restaurer la qualité multifonctionnelle des sols de la parcelle. Concernant l'échelle de mise en place de ce PGDS deux idées sont ressorties : l'intégration du PGDS à l'échelle de l'exploitation ou son inscription dans un schéma plus régional qui doit définir les objectifs de qualité des sols au niveau local. Pour les groupes « forêt », ce PGDS doit constituer une sous-section du Plan Simple de Gestion (PSG) ou du document d'aménagement. Ce PGDS est, selon les participants, rédigé par un professionnel certifié conseiller « Certisol ».

Temporalité des diagnostics de la qualité multifonctionnelle des sols

Les participants ont réfléchi à la durée de ce PGDS et à l'intervalle des différents diagnostics qui constituent ce plan de gestion durable. Pour les groupes « agriculture », il s'avère que ce PGDS s'inscrit dans une temporalité de 5 à 10 ans ou encore dans la durée du bail, avec des diagnostics initiaux, intermédiaires et finaux distant de 5 à 7 ans. Pour les groupes « forêt », sa durée est celle du Plan Simple de Gestion, c'est-à-dire une temporalité de 15 à 20 ans, avec également des diagnostics initiaux, intermédiaires et finaux séparés de 5 ans.

Aides publiques et éligibilité

Il ressort de l'atelier 2 que les aides publiques pourraient prendre la forme de subventions / exonérations des moyens mis en œuvre nécessaire au PGDS (matériel, analyse, expertise, etc.). Certains groupes « agriculture » envisageaient que le montant de ces aides pourrait être supérieur à 50 euros par hectare et par an. D'autres ont proposé que les montants des aides publiques soient fonction des résultats du suivi de la qualité des sols. Un autre groupe a proposé que ce montant soit fonction non pas des résultats mais des moyens mis en œuvre pour réaliser ce PGDS. Du côté des groupes « forêt », il ressort que ces aides devraient prendre la forme d'un « crédit impôt » avec un montant minimal de 100 euros, augmenté par tranches selon la superficie de la parcelle diagnostiquée. Pour que ces aides publiques soient mobilisées, il faudrait identifier les voies possibles de prise en compte de son financement dans les politiques publiques.

L'importance de la formation et de la sensibilisation

L'un des critères nécessaires, selon les participants à l'atelier 2, pour la réussite des deux scénarii proposés, est avant tout la formation et la sensibilisation de l'ensemble du « grand public » à la thématique des sols. Les participants avancent en effet qu'il est nécessaire de réfléchir à la mise en place de sessions de formation et d'ateliers de sensibilisation à l'école, au collège et au lycée. Il est également ressorti le besoin de mettre en place des formations professionnalisantes et certifiantes pour les professionnels.

Vers la définition de stratégies de déploiement en milieu agricole et en milieu forestier

In fine, cet atelier 2 a permis de poser des bases de construction de grandes stratégies de déploiement qui ont été ensuite travaillées et complétées dans les deux ateliers suivants. Pour les groupes « forêt », il s'avère que la base des scénarios doit être leur raccrochement au PSG (durée, échelle, acteurs, etc.). Pour le milieu « agricole », cette base se dessine autour du bail rural (environnemental dans un premier temps). Enfin, il ressort de l'atelier 2 que

quels que soient les scénarios identifiés, la formation et la sensibilisation sont d'une importance cruciale pour leur acceptation.

3.3.3. Atelier 3 : outil de diagnostic de la qualité des sols

L'objectif principal de l'atelier 3 était de laisser les participants construire, à partir d'un jeu d'indicateurs fourni par le Groupement, un outil de diagnostic leur permettant d'évaluer la qualité des sols dans un contexte prédéfini (usage, pratiques, contexte stationnel, objectifs agro-sylvicoles). Il leur a été proposé de réaliser deux types de diagnostic, dans un premier temps un diagnostic de base dit « actuel » (celui qu'il ferait à l'heure actuelle) et par la suite un diagnostic permettant d'évaluer l'ensemble des fonctions, dit « multifonctionnel ». Cette approche avait pour but de les faire évoluer vers une perception globale du fonctionnement des sols et de son évaluation.

Ce travail a été réalisé via l'utilisation d'un jeu de cartes des indicateurs de la qualité des sols et de plateaux spécialement conçus pour l'occasion (Annexe M : Compte-rendu de l'atelier 3).

La seconde partie de l'atelier avait pour objectif de réfléchir conjointement sur des approches clés pour promouvoir le diagnostic de qualité des sols et qui avaient été identifiés lors des précédents ateliers, à savoir la diffusion d'informations et la sensibilisation des professionnels relatives à l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols et les outils associés.

Le jeu de carte et les résultats de l'atelier sont présentés plus en détails ci-dessous, et un compte-rendu de l'atelier 3 est également disponible en annexe (Annexe M : Compte-rendu de l'atelier 3).

Construction d'un outil de diagnostic selon une approche « actuelle » et une approche « multifonctionnelle »

En approche « actuelle », le premier résultat d'intérêt est la divergence marquée entre les deux usages agricole et forestier.

- Le milieu agricole propose un outil de diagnostic en version « actuelle » composé de 21 à 24 indicateurs avec la réserve utile, l'abondance et diversité des vers de terre, l'épaisseur, la texture, la pierrosité, la structure, la densité apparente, le pH, la teneur en cations échangeables et le taux de saturation, les teneurs en calcaire total, C organique, N total et le C/N toujours cités ; représentant 6 à 7 fonctions (la fonction « Filtre, tampon et dégradation des polluants » n'est jamais proposée) ;
- Le milieu forestier se limite à 10-11 indicateurs avec les traces d'hydromorphie, l'épaisseur, la texture, la pierrosité, la sensibilité à la compaction, la sensibilité aux exportations, la forme d'humus, l'horizon A, les bioindicateurs végétation toujours cités ; représentant 4 à 6 fonctions (les fonctions « Filtre, tampon et dégradation des polluants » et « Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques » ne sont jamais proposées).

Ceci reflète notamment le fait que les agriculteurs prennent en considération la biologie des sols et les échanges gazeux avec l'atmosphère notamment en lien avec le carbone et l'azote (confirmant les résultats du questionnaire). D'autre part, contrairement aux agriculteurs, les forestiers font très peu d'analyses en laboratoire, qu'elles soient physiques et surtout chimiques. Ils se basent plutôt sur des observations visuelles telles que le type et l'état de la végétation et la forme de l'humus (bioindicateurs de fonctionnement des sols) et se limitent à des sondages tarière. S'ajoute à cela le fait que les forestiers réalisent leurs diagnostics au moment du Plan Simple de Gestion (tous les 15-20 ans environ) et éventuellement un diagnostic intermédiaire au moment de l'exploitation et uniquement en présence d'indice ou de risque de perturbation (principalement en lien avec la compaction des sols). Le milieu agricole, du fait d'une exploitation plus intensive des sols, privilégie des diagnostics plus complets et plus fréquents (allant de 3 sur 9 ans à 4 sur 20 ans). Ces choix ont évidemment un impact sur le coût du diagnostic qui est bien plus élevé en milieu agricole que forestier, entre 3 000 et 5 100 euros contre 1 000 à 1 200 euros pour une unité homogène de sol (Tableau 8). Ces coûts élevés en milieu agricole sont dus au choix des participants, en tous cas pour deux des trois groupes, soit de réaliser pour les diagnostics initiaux et finaux des fosses pédologiques (coût supplémentaire de location de mini pelle avec chauffeur compris entre 400 et 500 euros la journée), soit de réaliser



à chaque diagnostic des mesures sur trois horizons de sol. La répartition des coûts entre l'expertise (prestataire), le matériel (incluant la location de la mini pelle) et les analyses varient, entre les usages mais également entre groupes pour le milieu agricole. Le coût de ces diagnostics constitue aujourd'hui un des principaux freins à leur mise en œuvre. En effet, ces valeurs comprises entre 3 000 et 5 000 euros équivalent au prix moyen d'un hectare de terre agricole en France.

Ces pratiques associant fosses et analyses ne sont pas habituelles dans la plupart des diagnostics réalisés actuellement en milieu agricole, qui se limitent généralement à une évaluation sur un horizon 0-20 ou 0-30 cm. Les coûts des diagnostics se trouvent ainsi singulièrement plus élevés que ce qui est pratiqué « dans la réalité ».

Le passage à un diagnostic multifonctionnel nécessite l'ajout de 2 à 5 indicateurs et engendre un coût supplémentaire d'environ 1 000 euros en milieu agricole et 1 400 euros en forêt. Cette transition n'engendre donc pas de changement majeur. Toutefois, l'augmentation du coût du diagnostic est bien plus marquée en milieu forestier du fait de l'ajout d'analyses chimiques et biologiques (et le matériel nécessaire) représentant un coût de 500 euros par diagnostic. Pour les deux usages, le coût élevé ne peut pas être porté uniquement par le propriétaire, des subventions devraient venir compléter. En milieu agricole, il est également proposé que le coût du diagnostic intermédiaire soit porté par le locataire à hauteur de 50%.

Au travers des discussions découlant de ce travail, d'autres informations ont émergé. Les forestiers ont une méconnaissance du coût des analyses et cette étude leur a montré que dans certains cas l'apport d'une analyse, de par la qualité/précision de la donnée, constitue une réelle plus-value car elle permet d'affiner le diagnostic (exemple du carbone, une mesure plus précise devrait permettre de quantifier le niveau supplémentaire de stockage du C dans le sol induit par un changement de pratiques par exemple). De manière générale, les mesures/analyses réalisées doivent constituer un apport d'information qui doit permettre de répondre à un objectif et/ou d'orienter les décisions. D'ailleurs, en milieux agricole et forestier, il est précisé que le contexte stationnel et l'historique des parcelles doit être un premier niveau de diagnostic afin de définir des potentiels risques et définir l'outil de diagnostic (et les indicateurs qui le constituent) adapté pour le diagnostic. 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. Les forestiers considèrent également que l'approche unique par sondages tarière n'est pas suffisante pour le diagnostic et ils considèrent que la réalisation de fosses pédologiques pourrait être bien mieux intégrée dans leurs pratiques, notamment lors de la réalisation de dessertes.

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des coûts détaillés pour la réalisation des diagnostics de la qualité des sols selon les approches « actuelle » et multifonctionnelle » par les différents groupes de l'atelier 3, en réponse aux contextes qui leur ont été proposés. Pour le matériel, la valeur entre parenthèses correspond au coût de location de la mini pelle. Les coûts sont en euro TTC. Pour le diagnostic « multifonctionnel », les deux groupes forêts ont travaillé ensemble.

Diagnostic	Groupe	Durée	Coûts	Coût diag. Initial (€)	Coût diag. interm. (€)	Coût diag. final (€)	Coût total (€)
Approche « actuelle »	Groupe 1 « agricole »	20 ans: T=0, 7, 14, 20 3 horizons	Expertise	1 100	800+800	1 000	3 700
			Matériel	500 (400)	0	400 (400)	900
			Analyses	200	100+100	100	500
			Autres	-	-	-	
			Total	1 800	900+900	1 500	5 100
	Groupe 2 « agricole »	10 ans: T=0, 5, 10 3 horizons	Expertise	800	800	800	2 400
			Matériel	300	200	200	700
			Analyses	900	500	500	1 900
			Autres	-	-	-	-
			Total	2 000	1 500	1 500	5 000
	Groupe 3 « agricole »		Expertise	400	400	400	1 200

Diagnostic	Groupe	Durée	Coûts	Coût diag. Initial (€)	Coût diag. interm. (€)	Coût diag. final (€)	Coût total (€)
		9 ans: T=0, 3, 9 1 horizon	Matériel	670 (500)	100	670 (500)	1 440
			Analyses	230	50	145	425
			Autres	-			
			Total	1 300	550	1 215	3 065
	Groupe 1 « forestier »	20 ans (PSG): T=0, ?, 20 1 horizon	Expertise	500 (1 jour d'ingénieur)	0-200	500 (1 jour d'ingénieur)	1000-1200
			Matériel	-	-	-	-
			Analyses	-	-	-	-
			Autres	-	-	-	-
			Total	500	0-200	500	1000-1200
	Groupe 2 « forestier »	21 ans (PSG): T=0, ?, 20 1 horizon	Expertise	500 (1 jour d'ingénieur)	200	500 (1 jour d'ingénieur)	1 200
			Matériel	-	-	-	-
			Analyses	-	-	-	-
			Autres	-	-	-	-
			Total	500	200	500	1 200
Approche « multifonctionnelle »	Groupe 1 « agricole »	20 ans: T=0, 7, 14, 20 3 horizons	Expertise	1 100	800+800	1 000	3 700
			Matériel	500 (400)	0	400 (400)	900
			Analyses	650	150+150	500	1 450
			Autres	850 (abonnement météo)	850+850 (abonnement météo)-	850 (abonnement météo)-	3 400 (abonnement météo)
			Total	3 100	1800+1800	2 750	9 450
	Groupe 2 « agricole »	10 ans: T=0, 5, 10 3 horizons	Expertise	800	800	800	2 400
			Matériel	260	130	250	640
			Analyses	1 300	650	600	2 550
			Autres	-	-	-	-
			Total	2 360	1 580	1 650	5 590
	Groupe 3 « agricole »	9 ans: T=0, 3, 9 1 horizon	Expertise	400	200	400	1 000
			Matériel	690 (500)	60	500 (500)	1 250
			Analyses	560	310	450	1 320
			Autres				
			Total	1 650	570	1 350	3 570
	Groupe 1 « forestier »	20 ans (PSG): T=0, ?, 20 1 horizon	Expertise	500 (1 jour d'ingénieur)	0-200	500	1000-1 200
			Matériel	200	-	200	400
			Analyses	500	-	500	1 000
			Autres	-	-	-	-
			Total	1200	0-200	1200	2400-2600



Diagnostic	Groupe	Durée	Coûts	Coût diag. Initial (€)	Coût diag. interm. (€)	Coût diag. final (€)	Coût total (€)
	Groupe 2 « forestier »	21 ans (PSG): T=0, ?, 20 1 horizon	Expertise	500 (1 jour d'ingénieur)	0-200	500	1000-1200
			Matériel	200		200	
			Analyses	500	-	500	1 000
			Autres	-	-	-	-
			Total	1200	0-200	1200	2400-2600

Diffusion d'informations et sensibilisation liée à l'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols agricoles et forestiers

Concernant la partie « diffusion », des consensus assez marqués entre le groupe « agricole » et le groupe « forestier » ont pu être mis en avant. Les participants ont en effet exprimé leur besoin d'accompagnement, de conseils et de formation. Ils souhaiteraient que soient mises en place des structures de formation aux outils de diagnostic et d'accompagnement dans la sélection des indicateurs adaptés à leur contexte. A court terme, cela doit leur donner une autonomie pour réaliser des diagnostics en routine sur leur parcelle. Ils s'accordent également à dire, qu'il est nécessaire de s'appuyer sur des structures déjà existantes (chambres d'agriculture, coopératives, structures de formation, instituts techniques et de recherche). L'ensemble des participants souligne que ces structures devraient jouer un rôle de centralisation de l'information, afin que celle-ci leur soit accessible et qu'ils ne perdent plus de temps à « faire le tri ». A ce titre, leurs principales sources d'information au sujet des sols sont aujourd'hui les sites Web et la presse spécialisés, ainsi que la participation à des journées terrain organisées lors de sessions de formation. Enfin, l'ensemble des participants s'accorde à dire que le principal manque pour tendre vers un déploiement des outils de diagnostics multifonctionnels de la qualité des sols est l'absence d'une structure nationale capable de jouer un rôle central dans la certification des outils, des formateurs et des experts.

Pour la partie « sensibilisation », les résultats traduisent un consensus entre les acteurs des sols agricoles et forestiers. Selon eux, la majorité des professionnels du monde agricole et forestier sait que les sols sont importants, mais l'hétérogénéité des niveaux de connaissances sur le sujet est problématique. Pour renforcer leur connaissance à ce sujet, il faudrait développer les échanges entre le monde de la recherche et les professionnels, en particulier en développant les méthodologies de transfert de connaissance vers l'opérationnalité. Des canaux de sensibilisation tels que les modules de formation, des supports de cours ou encore des vidéos devraient également être privilégiés. Enfin, la promulgation d'une loi sur la protection des sols faciliterait la considération de leur qualité multifonctionnelle dans les prises de décision liées à leurs usages.

3.3.4. Atelier 4 : restitution des résultats et co-construction des pistes de valorisation de l'étude

Le quatrième atelier avait pour objectif de restituer les résultats de l'étude aux participants et de co-construire les recommandations sur les déploiements opérationnels du jeu d'indicateurs défini au préalable. Une synthèse des échanges est présentée en annexe (Annexe N : Compte-rendu de l'atelier 4).

Retours sur les résultats de l'étude

Un premier point abordé par les participants a été l'identification d'un manque pour les stratégies de déploiement : il serait en effet nécessaire de considérer, pour les structures potentiellement porteuses de déploiement du jeu d'indicateurs, les structures privées (exemple : bureaux d'étude) qui existent déjà aujourd'hui, et qui sont agréées pour fournir du conseil auprès des acteurs de sols agricoles et forestiers. Il serait donc opportun de recenser de telles structures actuellement présentes sur le territoire métropolitain.

Ensuite, un focus a été fait sur le jeu d'indicateurs retenus à la suite des ateliers et sur la construction de l'outil de diagnostic (nombre de diagnostics, temporalité, fonctions évaluées, indicateurs retenus et coût envisagé) émanant des discussions par groupe lors du « jeu de cartes ». Tout d'abord, les participants au Webinaire sont revenus sur

le fait qu'il est nécessaire de considérer la saisonnalité dans la mise en œuvre d'un suivi de la qualité multifonctionnelle des sols, sachant qu'elle peut jouer un rôle prépondérant sur les résultats des analyses, particulièrement en ce qui concerne les indicateurs biologiques. La période favorable la réalisation de diagnostic serait entre septembre-octobre à mars-avril suivant l'année.

Des discussions ont ensuite eu lieu concernant les coûts de mise en œuvre du suivi de la qualité multifonctionnelle des sols. Pour rappel, les coûts évalués lors de l'atelier 3 pour l'approche « multifonctionnelle » correspondaient à la mise en œuvre d'un diagnostic initial, un diagnostic final et éventuellement un ou deux diagnostics intermédiaires, sur un profil de sol comportant trois horizons caractéristiques (tous analysés ; choix des participants). Certains groupes, en agriculture uniquement, ont opté pour une fosse pédologique (pour une unité homogène de sol) sur les diagnostics initiaux et finaux (impliquant donc un coût supplémentaire de 500 euros pour la location de la mini pelle avec opérateur). Un groupe a également proposé de prendre un abonnement pour un accès aux données météorologiques. Ces coûts compris entre 3 500 sur une période de 9 ans et 6 000 euros sur une période de 20 ans pour une unité homogène de sol agricole, sont jugés « démesurés et non acceptables » par une partie des participants à l'atelier. Cela constitue un surcoût considérable par rapport à la dépense actuelle, qui varie pour certains entre 500 et 1 500 euros (pour le milieu agricole). Ces valeurs ne sont toutefois pas très différentes de celles d'un diagnostic sur la base du jeu d'indicateurs du REVA dont le coût est d'environ 1 500 euros tous les 3 ans pour une unité homogène de sol. Des premières pistes de recherche de réduction des coûts ont alors été discutées, comme notamment le fait de pouvoir évaluer directement sur le terrain certaines fonctions, sans avoir à passer par le laboratoire, ou encore amortir les coûts dans le temps en s'associant par exemple avec le gestionnaire de la parcelle voisine pour réaliser les diagnostics intermédiaires, si le diagnostic initial traduit une homogénéité des sols entre les deux parcelles et que leurs pratiques des gestionnaires sont identiques.

Il a également été souligné que davantage de formation et de sensibilisation permettrait de faire évoluer le coût potentiellement acceptable, les gestionnaires de sols étant par la suite connaisseurs du gain apporté à réaliser un suivi de la qualité « multifonctionnel » de leurs sols.

Enfin, selon certains participants, trouver une valorisation de l'amélioration de la qualité multifonctionnelle des sols (paiement pour services écosystémiques, label bas carbone, valorisation 4p1000, etc.) permettrait que le coût des diagnostics ne soit plus un frein à leur mise en œuvre. Cette idée a été discutée et critiquée notamment parce que les paiements pour services écosystémiques restent trop aléatoires pour certains.

Recommandations sur les déploiements opérationnels

Un des premiers points exprimés par les participants à ce 4^{ème} atelier a été la nécessité d'une adaptation par étapes (simple puis approfondie) de la démarche d'évaluation de la qualité multifonctionnelle des sols et donc de la sélection des indicateurs retenus. Il est en effet fortement ressorti l'envie de constituer un premier cercle d'indicateurs basiques, simples et peu coûteux à évaluer, qui permette certes de renseigner l'ensemble des fonctions du sol, mais qui pourrait ensuite être complétés par un autre pool d'indicateurs plus évolués si les premiers résultats décèlent un potentiel problème. De plus, il ne faut pas s'adresser à tous les gestionnaires des sols agricoles ou forestiers avec le même niveau de conseil et de recommandations : certains d'entre eux sont en effet moins familiers de la démarche, ce qui demande donc de les sensibiliser et leur fournir une formation simple au préalable. Pour les plus sensibilisés et formés d'entre eux, il est ensuite possible de discuter d'indicateurs plus évolués, pour réaliser un suivi de la qualité multifonctionnelle des sols plus approfondi.

Concernant cette prestation de conseils et de recommandations auprès des acteurs de sols agricoles et forestiers, la nécessité de structurer des instances qui soient à l'interface du monde de la recherche et du monde professionnel, pour réaliser un véritable transfert de connaissances et accompagner les acteurs des sols a été proposée. Les participants se sont accordés à dire qu'aujourd'hui la priorité est de former les acteurs des sols, en leur montrant des résultats concrets, dans la pratique, sans trop s'astreindre à la théorie. Selon eux, beaucoup d'acteurs des sols, notamment en milieu agricole, attendent le transfert de protocoles d'évaluation de qualité des sols, de méthodes d'échantillonnage et d'analyses associées et de référentiels pour aller jusqu'à la recommandation. Certains d'entre eux s'accordent à dire que cette expertise pourrait donner lieu à création d'un nouveau métier.



Concernant les référentiels, un manque a été mis en avant et un moyen d'y répondre a été proposé : constituer une base de données commune, contenant l'ensemble des résultats des analyses de sols effectuées par les acteurs des sols agricoles et forestiers sur le territoire français, renseignant la multifonctionnalité des sols. A ce titre, certains participants soulignent que des bases de données sont en cours de construction à différentes échelles (Bases du GIS Sol, REVA, Coopératives, etc.) et que certaines sont déjà partagées avec les acteurs de sol adhérents à leurs démarches respectives, mais celles-ci ne couvrent généralement pas la multifonctionnalité des sols ni l'ensemble des indicateurs précédemment identifiés comme pertinents, se concentrant pour la plupart sur des fonctions bien définies et liées aux objectifs initiaux des projets (ex : évaluation biologique). Si l'idée de constituer cette base de données commune semble partagée par l'ensemble des participants, certains soulignent cependant quelques points de vigilance. Une base de données commune implique notamment de définir en amont quelles données pourraient être partagées, quelles sont celles que les opérateurs économiques ne souhaitent pas partager, et quelles sont celles qui risquent de mener à des spéculations foncières.

Un dernier point de recommandations de déploiement opérationnel discuté a été l'idée de créer un Centre de Ressources sur les sols, permettant de centraliser un panel d'informations sur les sols (ressources pédagogiques, coordonnées des organismes de formations continues et certifiantes, etc.), de mener des actions de communication au sens large (événement de sensibilisation, rédaction d'articles de vulgarisation, etc.) et d'être à l'interface entre les politiques publiques, la recherche et les opérateurs de terrain, telle qu'elle existe par exemple en Allemagne. Pour les participants, cette structure devrait également porter un guide de gestion des sols et accompagner les démarches en faisant le lien avec les autres fondations et instituts déjà existants.

Enfin, une valorisation de cette démarche de co-construction, qui pourrait s'apparenter à un premier déploiement opérationnel de l'étude, est le fait qu'elle a permis la mise en réseau d'un certain nombre d'acteurs travaillant sur les sols agricoles et forestiers, et souhaitant poursuivre, à plusieurs, le déploiement de la démarche. Lors de ce dernier atelier, un des participants a par exemple proposé de porter cette démarche aux coopératives forestières en s'inspirant des projets agricoles déjà menés, ce à quoi certains acteurs de sols agricoles ont répondu favorablement.

3.3.5. Bilan intermédiaire des résultats des ateliers

L'atelier de cadrage ainsi que les quatre ateliers réalisés en co-construction avec des acteurs de sols agricoles et forestiers ont permis de mettre en exergue des indicateurs à mobiliser pour l'évaluation des 7 fonctions proposées, ainsi que des premiers éléments de construction d'une stratégie de déploiement (voir ci-dessous). Ces éléments sont d'ordre généraux et sont à affiner afin d'être en mesure de proposer des stratégies de déploiement adaptées aux contextes étudiés.

Le cadre se dessinant autour des stratégies de déploiement d'un outil de diagnostic de la qualité des sols à l'issue des 4 ateliers est le suivant :

- **Formation et sensibilisation**
 - Clé pour favoriser l'acceptabilité de la réalisation de diagnostic de la qualité des sols par une approche globale (ensemble des fonctions) ;
 - Importance de favoriser les structures qui existent déjà et les offres de formation et sensibilisation existantes sur le territoire ;
 - Besoin de nouveaux développements également, notamment pour mobiliser les cibles de ces formations : sensibiliser et former les acteurs « directs » des sols agricoles et forestiers mais également les acteurs « indirects » (ex : prescripteurs), tels que par exemple les étudiants des écoles de commerce, qui sont, pour certains, les futurs décideurs des entreprises agro-alimentaires ou qui seront directement ou indirectement des acteurs du foncier ;
 - Besoin de former les acteurs « directs » des sols agricoles et forestiers au choix des indicateurs nécessaires à l'évaluation de la qualité des sols, à la mise en œuvre sur le terrain des échantillonnages et mesures ainsi qu'à l'interprétation du résultat et les recommandations opérationnelles induites ;

- Former sur les indicateurs biologiques, moins connus et moins mobilisés par les acteurs des sols agricoles et forestiers ;
 - Convaincre les acteurs des sols forestiers de l'intérêt de compléter leur diagnostic actuel avec des indicateurs biologiques et des mesures quantitatives.
- **L'outil de diagnostic**
 - Identifier clairement les liens entre indicateurs et fonctions afin de mobiliser les paramètres nécessaires à évaluer pour (i) répondre aux besoins des gestionnaires des sols et (ii) évaluer le fonctionnement global des sols ;
 - Développer un jeu d'indicateurs composé d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques et distinguer deux niveaux d'indicateurs au sein du jeu, un outil « simple » (jeu minimum d'indicateurs pour appréhender l'ensemble des fonctions) peu coûteux, facilement mobilisable par le gestionnaire dans un premier temps pour avoir une évaluation de base de la qualité du sol et un outil « complet » avec des indicateurs complémentaires, à mobiliser si nécessaire pour affiner le diagnostic au regard des enjeux stationnels.
- **Le coût du diagnostic de la qualité des sols**
 - Le coût total du diagnostic est le principal frein. Il s'agira de préciser le coût potentiellement acceptable et les incitations nécessaires. Dans le cadre de cette étude et considérant une surface homogène, les ateliers ont abouti à des montants de 5 000 euros sur 20 ans pour le milieu agricole : 3 000 euros pour le milieu forestier ;
 - A la charge du propriétaire et/ou du locataire des parcelles de sols ;
 - Adosser la mise en œuvre d'un outil de diagnostic de la qualité des sols à une politique publique, permettant éventuellement des financements publics.
 - Des développements opérationnels d'indicateurs et de méthodologies d'acquisition sont nécessaires afin de rendre le coût de réalisation d'un diagnostic acceptable ;
 - Lorsque cela est pertinent, proposer des regroupements entre agriculteurs ou forestiers qui ont des parcelles contigües et présentant un même contexte pédoclimatique (étude des cartes locales), afin de partager les coûts liés aux mesures des propriétés non affectées par les pratiques des gestionnaires (propriétés intrinsèques du sol par opposition aux propriétés extrinsèques, dynamiques affectées par les activités anthropiques).
- **Cadre réglementaire :**
 - Non apprécié par les participants, en particulier pour l'usage forêt (« ne pas rajouter des couches aux mille-feuilles réglementaires»). Il s'agira de favoriser un cadre incitatif. Il conviendra aussi d'identifier sur un panel plus large d'acteurs, les verrous, et les leviers permettant d'accompagner sereinement les changements induits par d'hypothétiques nouvelles réglementations ;
 - Pénaliser les acteurs qui dégradent et valoriser les acteurs qui améliorent la qualité des sols.
- **Structure porteuse :**
 - S'appuyer dans la mesure du possible sur les structures existantes et déjà identifiées/connues par les acteurs des sols agricoles et forestiers.
- **Modalités de réalisation :**
 - Forêt : adossé au plan simple de gestion (PSG) pour la forêt privée et au document d'aménagement en forêt publique ;
 - Agriculture : adossé au bail rural.
- **Temporalité**
 - Adosser aux modalités de réalisation, soit un pas de temps autour de 20 ans, avec un diagnostic complet à t_0 et t_{final} et des diagnostics intermédiaires (échéances à définir en agriculture, en adéquation avec les périodes d'exploitation en forêt).



- **Diagnostic**
 - Pas de consensus. Différentes options possibles.

3.4. Entretiens complémentaires

3.4.1. Entretien 1

Entretien téléphonique d'une durée de 2 heures et 10 minutes réalisé le 02 janvier 2019 avec Lionel Ranjard, directeur de recherche dans l'unité mixte de recherche Agro écologie de l'INRA de Dijon. Il est spécialiste en écologie microbienne du sol. Il a notamment travaillé sur l'évaluation de la qualité microbiologique des sols du réseau RMQS dont est issu un atlas français des bactéries du sol. Il a coordonné le projet Agrinnov et est impliqué dans le réseau REVA dont l'objectif est le déploiement d'un outil de diagnostic de la qualité des sols en milieu agricole, agrégeant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques et intégrant des indicateurs de synthèse. Son expertise dans le domaine des indicateurs de la qualité des sols, sa connaissance des attentes des gestionnaires et également des moyens de promouvoir l'utilisation de ces outils par les gestionnaires est d'un grand enseignement pour notre étude.

Les principaux enseignements issus de cette discussion sont les suivants :

- **Les questionnements des agriculteurs : du diagnostic aux recommandations**
 - Dans quel état est mon sol ? Ai-je de la biodiversité dans mon sol (notion de patrimoine écologique plébiscitée par les agriculteurs du REVA) ? Si non, pourquoi ? Que faire pour y remédier ? Comment réduire les intrants ? Globalement, les agriculteurs ont besoin d'être rassurés sur l'impact des pratiques qu'ils mettent en œuvre sur la qualité de leur sol. Le diagnostic doit se traduire en actions pour les gestionnaires.
- **Promouvoir le diagnostic de la qualité des sols pour préserver les sols**
 - Nécessité de faire des lois sur les sols. Le niveau de fonctionnement du sol pourrait être mieux intégré dans le prix de la parcelle. Il faut éviter les stratégies basées sur la coercition qui risquent de dissuader les gestionnaires ;
 - Le diagnostic doit être valorisé auprès des gestionnaires en mettant en avant qu'un sol bien géré permettra de produire mieux et longtemps (notion d'assurance écologique et de durabilité de l'écosystème) avec des économies en engrais, en produits phytosanitaires, en mécanisation induites par l'ajustement des pratiques aux caractéristiques du sol nettement supérieur à l'investissement réalisé pour le diagnostic.
- **Le choix du jeu d'indicateurs**
 - Nécessité d'une prise de décision sur le choix des indicateurs à intégrer dans un outil de diagnostic de la qualité des sols. Sélectionner les indicateurs à fort potentiel pour le diagnostic de la qualité des sols et les développer. C'est l'approche prônée dans Agrinnov avec une sélection basée sur des critères d'opérationnalité ;
 - La proposition d'un jeu d'indicateurs similaire (hormis trois indicateurs spécifiques à la forêt) pour les milieux forêt et agriculture (et urbain) mais avec des référentiels (valeurs seuils) différenciés car les fonctions du sol sont les mêmes mais les objectifs/besoins différent selon l'usage et les problématiques (ex : zones hydromorphes, fertilité, niveau de pollution...) ;
 - Le choix des indicateurs mis en œuvre doit être précisé avec et pour les utilisateurs : l'agriculteur est plus à même d'identifier les besoins. Il faut équiper/former les agriculteurs à utiliser les indicateurs et les laisser agir. Ce sont eux qui connaissent le mieux leurs terres ;
 - Le principal critère de sélection des indicateurs doit être la qualité du référentiel (le diagnostic ne peut être posé que si on peut comparer les valeurs obtenues à des valeurs-seuils, des optimums dans un contexte pédoclimatique défini). Il faut développer ces référentiels notamment en aidant les laboratoires/les équipes qui ont la donnée, l'expertise pour développer des indicateurs, des modèles prédictifs, etc.

- **La méthodologie de diagnostic et l'interprétation**
 - En amont du diagnostic, sélection d'unité de sol homogène et représentative de la parcelle: zone "moyenne" déterminée sur le terrain par l'absence de dépréciation de la production par exemple ;
 - Lorsque plusieurs indicateurs interviennent pour l'évaluation d'une même fonction (on parle d'agrégation d'indicateurs), l'interprétation devient plus complexe car nécessite notamment la pondération des indicateurs au sein d'une note globale. Dans le tableau de bord Agrinnov, deux outils de synthèse sont interprétés par dire d'experts actuellement. Nécessité donc de développer des modèles prédictifs lorsque cela est possible pour s'affranchir de cette subjectivité.
- **Le déploiement technique des d'indicateurs**
 - Nécessité de déployer des indicateurs opérationnels et finalisés sinon les agriculteurs ne vont pas y adhérer. Le tableau de bord des indicateurs doit être assez simple, combinant des indicateurs techniques et pédagogiques qui parlent aux gestionnaires, voire éducatifs (par exemple l'abondance et la diversité des vers de terre) et des indicateurs plus complexes et plus précis (par exemple la diversité taxonomique par une approche moléculaire). En tout état de cause, nécessité de former les gestionnaires sur les bases de la biologie des sols et l'utilisation des indicateurs.
- **L'émergence de nouveaux indicateurs biologiques... vers une baisse des coûts**
 - Méthodologies d'avenir pour les indicateurs biologiques: inférence fonctionnelle, la molécularisation (metabarcoding). Dans 5 ans, le metabarcoding pourrait être opérationnel. Les laboratoires suivront car le jeu d'acteurs est prêt à investir. Ce type d'analyse va faire considérablement baisser les coûts.
- **Un nouveau métier...**
 - La filière agricole à bout de souffle est en pleine mutation. Un nouveau métier basé sur le conseil agronomique et moins sur la vente d'intrants est en train de voir le jour.

3.4.2. Entretien 2

Entretien réalisé le 29 mai 2019 avec la co-rapporteuse du CESE sur la bonne gestion des sols agricoles³². C'est donc exclusivement le volet agricole qui est traité ici.

Les principaux enseignements issus de cette discussion sont les suivants :

- **Intervenir auprès des élus :**
 - Nécessité de mobiliser et motiver les élus sur les enjeux autour de la qualité du sol. Leur donner des outils pour qu'ils s'en inquiètent à travers des formations ;
 - Attention, pour s'occuper de la qualité des sols, il faut qu'il en reste. Important que les élus arrêtent de construire sans se préoccuper de la qualité du sol au préalable. Les meilleurs sols doivent être préservés pour la production agricole. ;
 - Reprendre la logique du TIGA à Dijon : sensibiliser les élus : laisser de la terre en périphérie des villes pour créer du lien entre agriculteurs et urbains ;
 - Ces démarches ne peuvent pas passer sans réglementaire. Mais il faut expliquer le réglementaire, car il est souvent possible d'y déroger en France. Il existe des exemples très vertueux, mais ils s'appuient sur des gens déjà sensibilisés.
- **Formation sur la qualité des sols agricoles**

³² <https://www.lecese.fr/travaux-publies/la-bonne-gestion-des-sols-agricoles-un-enjeu-de-soci-t>



- Concernant la formation sur la qualité des sols agricoles, les options pourraient être de faire de la formation de formateurs en lycée agricole, de la formation d'agriculteurs, mais pas uniquement. Il faudrait aussi faire de la formation dans les coopératives, les banques, etc., soit les acteurs qui interagissent à différents niveaux avec les agriculteurs ;
 - Les formateurs « expert » existent. Les leviers sont là. Il reste néanmoins à structurer ce réseau. Cela va dépendre du ministère de l'agriculture, or le sol ne fait pas partie des priorités publiques. Si cela est fait de façon indépendante, comment faire ? ;
 - Il faut remettre de l'agronomie au cœur des formations.
- **Conditionner les aides publiques au respect de la qualité des sols**
 - Les aides publiques ne devraient pas être versées si les conditions de production et de protection du sol ne sont pas respectées. Il faut faire un saut sur les conditionnalités, en particulier avec la PAC ;
 - Il conviendrait d'inverser le raisonnement : que l'agriculteur ne se dise pas qu'il a un manque à gagner mais un bénéfice : qu'on rémunère celui qui travaille bien, non pas celui qui travaille mal ;
 - Avoir un objectif de résultat (comme par exemple pour la qualité de l'eau), d'où l'intérêt d'avoir une démarche de territoire, et avoir des indicateurs de résultat associés concernant la qualité du sol. L'objectif n'est pas nécessairement d'avoir un indicateur « haut » mais une évolution vers le « haut » en partant de l'existant. Mettre en place des moyens et rémunérer cela (par exemple en vérifiant au bout de 5 ans si les résultats sont là et en allouant un bonus s'il y a une production de tant) ;
 - Sur la qualité du sol on manque d'indicateurs globaux, d'où l'importance du tableau de bord du projet TIGA à Dijon. Il est non utilisable en l'état mais il faut en faire ressortir quelque chose ;
 - L'environnement ne doit pas être vu comme une contrainte mais comme un atout.
 - **Divers**
 - Reprendre l'idée de P. Billet qui dit que quand on aura des indicateurs opérationnels et reconnus par les politiques publiques, on pourra les utiliser pour donner une valeur supplémentaire aux échanges de terre ;
 - L'échelle la plus pertinente pour utiliser les indicateurs va être fonction du contexte : échelle de l'exploitation pour l'agriculteur et les aides PAC, échelle du territoire communal pour les élus. Il y aura des dynamiques différentes ;
 - Importance d'avoir des indicateurs communs et une initiative nationale. Si les agriculteurs ont une multiplication des cahiers des charges pour évaluer la qualité des sols, ce sera ingérable pour eux.

3.4.3. Entretien 3

Entretien réalisé le 20 juin 2019 dans les locaux de la FNSAfer avec un représentant de la FNSAfer, un représentant de la SAFER de Normandie et Patrick Le Gouée, enseignant-chercheur spécialisé dans la géographie des sols à l'Université de Caen Normandie et Vice-Président de VIGISOL.

L'entretien a débuté par une présentation des résultats intermédiaires de l'étude en s'appuyant sur les supports de présentation de l'atelier 4 (Annexe H). Le représentant de la SAFER de Normandie et Patrick Le Gouée ont ensuite présenté la démarche VIGISOL qu'ils ont mis en place. Une discussion a suivi sur les synergies possibles entre la démarche VIGISOL et la démarche autour des stratégies de déploiement des outils de diagnostic de la qualité des sols préconisée dans cette étude.

● **Origine et présentation de la démarche Vigisol**

VIGISOL est une association de loi 1901 créée en 2011. Elle est issue d'un partenariat entre la SAFER de Normandie et Patrick Le Gouée. VIGISOL est une structure à caractère technique, scientifique et opérationnel. Elle produit des données et des outils innovants afin de répondre aux enjeux d'aménagement et d'environnement des

territoires et de leurs acteurs dans l'objectif de protéger les terres agricoles et de maintenir les équilibres environnementaux (Figure 12).

A l'origine, c'est la rencontre de deux intérêts :

- Pour Patrick le Gouée, c'est la possibilité de développer des recherches hors cadre universitaire et d'avoir à disposition des moyens ;
- Pour la SAFER de Normandie, c'est la possibilité de disposer de données non existantes pour alimenter les bases de données sur les opérations foncières et l'observation des territoires (qualité des terres consommées : mesure de la consommation de l'espace et de l'impact agro-environnemental ; produire de la connaissance sur la conservation des sols agricoles face à l'urbanisation).

La création d'une association loi 1901 permet d'organiser le cadre partenarial de production et d'utilisation des données.

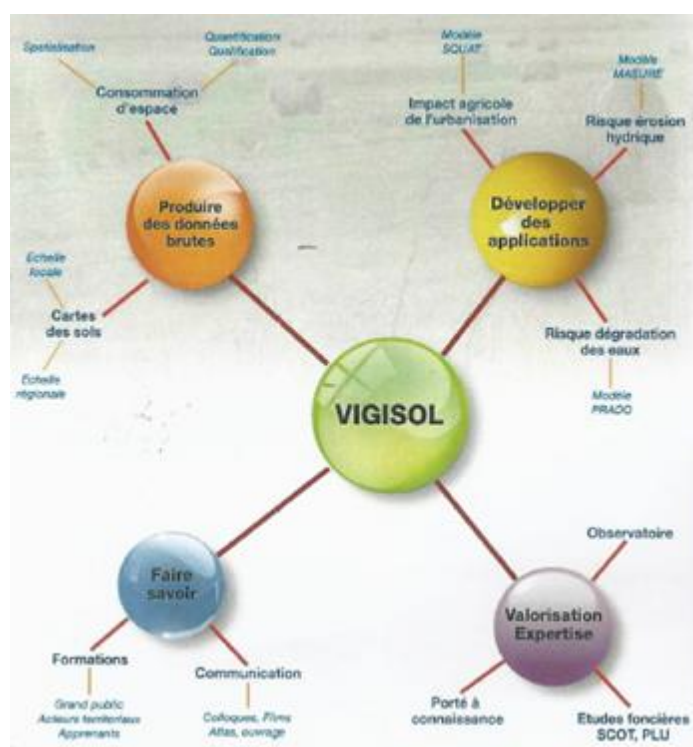


Figure 12 : Présentation de la démarche VIGISOL

• Production des données brutes VIGISOL

Le territoire concerné est celui de la SAFER de Normandie. Au départ, les données ont été récoltées sur le département du Calvados, puis étendue sur les 2 autres départements de l'ex Basse-Normandie (Manche, Orne). Une nouvelle programmation est en cours pour couvrir les 2 autres départements de l'ex Haute-Normandie, Eure et Seine-Maritime).

Il s'agit de produire de la donnée brute s'intéressant au territoire afin de :

- Connaître le potentiel agronomique de la terre agricole consommée ;
- Préciser le potentiel de production agricole dans le cadre de projets futurs de consommation foncière ;
- Produire des données pour avoir des informations sur les aires d'alimentation des captages, l'érosion, etc. ;
- Explorer la problématique de la résilience au changement climatique ;
- Répondre aux interrogations sur la multifonctionnalité des sols.

A cet effet, deux programmes régionaux majeurs récoltent de la donnée brute :

- Le programme « mesures de la consommation d'espace » :

Ce programme acquiert des données sur la consommation de l'espace à partir de la photo-interprétation de photos aériennes (BD ortho de l'IGN à 50cm ou 20cm selon les années, ou autres sources équivalentes issues des collectivités territoriales). Il s'agit de comparer deux photos aériennes prises à différentes dates (campagnes tous les trois ans environ), et de réaliser des croisements avec les limites cadastrales. Le coût (hors coût photos et hors matériel informatique, uniquement moyens humains) pour traiter la donnée est à titre indicatif de l'ordre de 15 000 euros HT/département/campagne. Une piste est actuellement expérimentée pour collecter de l'image satellitaire. La même méthode que la photo-interprétation est appliquée avec l'avantage que la donnée satellitaire est gratuite et qu'elle permet de s'affranchir des dates de prise de vue des photos aériennes. L'utilisation localement des images satellitaires, de manière complémentaire au programme régional à partir des photos aériennes, permet d'avoir des résultats parfaitement actualisés en plus d'être très précis. La superposition des données permet de spatialiser à l'échelle parcellaire, de quantifier les surfaces consommées, de qualifier les usages des sols avant et après urbanisation, de suivre l'évolution dans les temps du rythme d'urbanisation depuis 2000 à un pas de temps de 3 à 5 ans.

- Le programme « inventaire et cartographie des sols » :

Ce programme acquiert des données sur le sol pour caractériser le potentiel agronomique du sol (et non l'état de santé actuel du sol) afin d'avoir une information pertinente et comparable à l'échelle du territoire (dénominateurs communs) issues de sondages à la tarière. Le choix a été fait de ne pas prélever des indicateurs physico-chimiques car ils dépendent beaucoup de la conduite des parcelles. Les travaux de Stéphane Bruckert (1989) en Franche-Comté sur le classement des terres agricoles à partir des potentialités intrinsèques des sols ont été utilisés. Le coût pour produire la donnée brute est de 1 euro HT/ha (il s'agit principalement de donnée de terrain : texture, épaisseur, pierrosité, charge caillouteuse, hydromorphie, pédogénèse + appui sur des données existantes). Cette donnée sol est au 50 000-ème (soit 10 000 à 12 000 sondages par département, soit environ 1 sondage pour 30-40 ha de SAU). Les points de sondage sont positionnés en fonction des caractéristiques topographiques et géologiques des territoires (travail du géographe pédologue). Cette donnée est complémentaire de la donnée recueillie pour construire les Référentiels RPP qui sont au 250 000-ème (soit environ 1000 sondages par département, fosses pédologiques et analyses physico-chimiques en laboratoire). A l'échelle du 50 000-ème, VIGISOL permet de renseigner sur la répartition géographique des types de sol, ce qui n'est pas le cas à l'échelle du RPP (uniquement information sur la probabilité des types de sol présents). Des données climatiques sont par ailleurs récoltées (ETP et précipitations), ainsi que le déficit hydrique. Les données récoltées servent à produire des cartes thématiques (ex : épaisseur) et analytiques (ex : potentialités agronomiques, contrainte hydromorphique, risque érosif, risque de contamination de la ressource en eau).

- Valorisation des résultats recueillis dans VIGISOL

Ces deux programmes permettent de créer des indicateurs agrégés. Les indicateurs produits sont valorisés auprès des collectivités locales dans le cadre de SCOT (Schéma de Cohérence Territoriale), PLUI (Plan Local d'Urbanisme Intercommunal) etc. sous la forme d'un service payant. L'objectif est de les déployer auprès d'un maximum d'acteurs. Aujourd'hui, les collectivités locales sont intéressées. Les données appartiennent à l'association Vigisol qui les a acquises sur des fonds privés. La mise à disposition des résultats dépend du financeur. L'objectif de la SAFER de Normandie est d'avoir un retour sur investissement pour pérenniser son modèle économique permettant de mener nouvelles actions (mise à jour, innovation, ...). Afin de rentrer dans un processus de labellisation du programme 1/50 000, Vigisol travaille également sur la saisie de ses données dans le logiciel national de l'INRA Donesol. Ce travail chronophage et coûteux est actuellement réalisé sur la base d'un échantillon de données.

- Déploiement de VIGISOL à une échelle nationale et synergies possibles avec la démarche présentée dans cette étude

VIGISOL aura fini de couvrir l'ex Basse-Normandie en 2019. La structure commence maintenant le même travail en Haute-Normandie. Elle recherche à cet effet des cofinancements auprès des collectivités, etc. La démarche utilisée par VIGISOL en Normandie est généralisable à l'échelle du territoire métropolitain avec une mise en routine possible, ce qui permettrait de produire une donnée homogène sur l'ensemble du territoire. Toutefois, cela nécessite des moyens financiers, humains et matériels que n'a pas aujourd'hui VIGISOL. Il faut aussi tenir compte du fait que chaque SAFER (société privée de mission de service public) fonctionne de manière indépendante. Ce sont des sociétés privées qui contribuent financièrement à un fond commun pour sécuriser les SAFER dans leurs capacités à exercer toutes leurs actions publiques sur le territoire. Ainsi, la FNSafer est la tête de réseau national qui permet le partage et la valorisation des retours d'expérience des différentes SAFER.

Pour aboutir à un maillage national, il serait donc intéressant que la démarche VIGISOL soit reprise dans une démarche globale autour de la qualité des sols et pilotée par un Institut national recommandé dans cette étude. La FNSafer serait dans ce cadre un bon levier au niveau du transfert de compétence. En l'absence de réglementation, l'échelon régional est intéressant. En effet, s'il y a une volonté politique forte des régions de mettre des moyens financiers pour produire des données homogènes sur le territoire, les données pourraient alors être mises à disposition gratuitement auprès des collectivités. Cela permettrait d'intégrer la dimension sol dans la politique

d'aménagement. Des plateformes tels que Géonormandie, Géoportail, ainsi que les plateformes des DREAL pourraient être utilisées et mutualisées.

Un levier financier qui pourrait par ailleurs être envisagé est celui de la compensation collective agricole. « Les maîtres d'ouvrage de projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés susceptibles d'avoir des conséquences négatives importantes sur l'économie agricole d'un territoire sont [...] tenus de produire une étude préalable comportant notamment les mesures envisagées pour éviter ou réduire la consommation des terres agricoles. En cas d'impact notable de la construction sur l'économie agricole du territoire concerné, ils devront proposer la mise en place de mesures de compensation collective visant à consolider l'économie agricole. » Il existe trois formes possibles :

- Compensation foncière collective : reconstitution du potentiel de production
- Financement de projets collectifs : mise en place d'un projet ou d'une politique locale de développement
- Si aucune compensation en nature n'est envisageable ou voir insuffisante : création ou participation à un fond de compensation.

Dans le cadre de la création de fonds de compensation, les financements pourraient être logiquement utilisés pour valoriser la qualité des sols en vue d'une meilleure préservation des sols dans le cadre de nouveaux projets d'urbanisation. Une partie pourrait par exemple être utilisée dans VIGISOL ce qui permettrait de déployer la démarche à une plus grande échelle. Pour information, l'ordre de grandeur est de 0,8 à 1,3 €/m² urbanisé à compenser. A titre d'exemple, 48 ha impactés correspondent à une compensation collective d'environ 500 000 euros, ce qui peut permettre de couvrir la connaissance des sols d'un département à l'échelle 1/50 000.

3.4.4. Entretien 4

Entretien réalisé avec Adrienne Grêt-Regamey, professeure associée dans la chaire d'aménagement du paysage et des systèmes urbains à l'ETH Zurich. Elle travaille essentiellement sur l'intégration des considérations environnementales dans les processus d'aménagement spatial, la prise de décision basée sur le risque pour le développement du paysage, les approches participatives dans l'aménagement du paysage et de l'environnement. Après consultation du rapport final provisoire, elle a été interrogée sur sa vision des recommandations au regard de son expérience en Suisse, notamment auprès du canton de Vaud.

- Les fonctions identifiées et les indicateurs sélectionnés dans l'étude lui paraissent pertinents ;
- Les travaux qu'elle a menée établissent les liens entre fonctions et services sur la base de dires d'expert³³ ;
- Les services écosystémiques parlent plus aux décideurs que les fonctions. Ne pas oublier le service « patrimoine-culturel-aménité » ;
- Attention au mode d'agrégation des indicateurs qui pourrait varier en fonction des objectifs. Un groupe d'experts doit définir un set et il faut s'y tenir (faire preuve de courage) ;
- La création d'un organisme de coordination nationale lui semble une bonne idée ;
- Les différentes stratégies de déploiement proposées lui semblent intéressantes hormis les paiements pour services environnementaux car elle estime difficile d'avoir des valeurs absolues des services environnementaux, très dépendant des contextes.
- La réglementation est clé avec intégration du diagnostic dans les documents des plans d'aménagement. Les diagnostics de la qualité des sols doivent être un critère pour définir les choix d'aménagements et doit donc être fait en amont (ce qui n'est pas le cas actuellement en Suisse et en France également).

³³ Drobniak et al. 2018. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. Ecological Indicators 94:151-169



4. Recommandations et suites opérationnelles (perspectives)

4.1. Cadre général des stratégies de déploiement identifiées

Cette étude a permis d'identifier les premières bases de cinq grandes stratégies de déploiement (Tableau 9) :

- **Transactions foncières** (stratégie identifiée essentiellement à partir des ateliers) ;
- **Baux ruraux** (stratégie identifiée essentiellement à partir des ateliers) ;
- **Conditionnalités ou aides publiques** (stratégie identifiée essentiellement à partir des ateliers) ;
- **Initiatives privées – paiements pour services environnementaux** (stratégie identifiée essentiellement à partir de l'état de l'art) ;
- **Intégration de la qualité des sols dans la planification territoriale** (stratégie identifiée à partir des entretiens d'expert).

Ces cinq stratégies s'appuieraient sur la démarche présentée en Figure 13 et détaillée dans le paragraphe 4.2. Bien que non traité dans l'étude, le sol urbain serait intégré car il constitue aujourd'hui un milieu sur lequel travaillent de nombreux gestionnaires des sols. Il est clef pour la considération de la qualité multifonctionnelle des sols dans l'adaptation des usages, en particulier sur la frontière urbain/péri-urbain/campagne où les sols sont soumis à une pression considérable.

Tableau 9 : Présentation des cinq stratégies de déploiement construites à l'issue de l'étude

Stratégies	Transactions foncières (ventes/achats)	Baux ruraux	Conditionnalité ou aides publiques	Initiatives privées – paiements pour services environnementaux	Planification territoriale
Objectif	Connaître l'état de son sol (n'oblige pas le vendeur à remettre en état la qualité de son sol)	Connaître l'état de son sol et maintenir ou améliorer sa qualité (bonus-malus)	Maintenir ou améliorer la qualité des sols (diagnostic associé à la mise en œuvre de bonnes pratiques et/ou des objectifs de résultats)	Optimiser les services fournis par les sols avec une contrepartie financière privée (ex : compensation carbone et/ou biodiversité du sol par le propriétaire du sol ; élargissement stratégie RSE d'une entreprise au travers de cahiers des charges incitant, via des bonifications, la mise en œuvre de diagnostics de qualité des sols et de bonnes pratiques)	Adapter l'usage à la qualité des sols en amont de toute décision de développement territorial
Réglementation	Obligatoire ou recommandé	Obligatoire ou recommandé	Incitatif (aides)	Incitatif (ex : reconnaissance d'un cadre méthodologique)	Obligatoire ou recommandé
Usage	Agricole	Agricole	Agricole et forestier	Agricole et forestier	Urbain, agricole et forestier
Description du diagnostiqueur	Diagnostiqueur certifié accrédité (ex : cofrac)	Diagnostiqueur certifié accrédité (ex : cofrac)	Le diagnostiqueur peut être le gestionnaire des parcelles. Il doit avoir suivi une formation	Variable en fonction de l'initiative	Diagnostiqueur certifié accrédité (ex : cofrac)
Contrôle des résultats	Non	Oui : organisme contrôle	Oui : organisme contrôle	Oui : organisme contrôle	Non
Responsable de la réalisation du diagnostic	Vendeur	Propriétaire pour le diagnostic d'entrée et locataire pour le diagnostic de sortie	Propriétaire ou gestionnaire (agriculture)	Propriétaire ou locataire	Collectivités
Aide publique	Non	Non	Aides de l'état ou de l'union européenne	Non	Non
Echelle /surface	Parcelles cadastrales	Parcelles cadastrales	Parcelles cadastrales	Parcelles cadastrales	Territoire
Temporalité	A un instant t (diagnostic avec une durée de validité, par exemple 5 ans)	Au moment du bail et à la fin (diagnostic intermédiaire possible)	Selon temporalité des aides (tous les 5 ans - agriculture à tous les 20 ans - forêt)	Variable	A chaque modification d'un document d'urbanisme

Stratégies	Transactions foncières (ventes/achats)	Baux ruraux	Conditionnalité ou aides publiques	Initiatives privées – paiements pour services environnementaux	Planification territoriale
Conditions de réalisation du diagnostic	Vente de parcelles cadastrales	Location	- Forêt : dans le cadre de la réalisation d'un plan simple de gestion (forêt privé) ou d'un plan d'aménagement (forêt publique) - Agriculture : dans le cadre d'aides du second pilier de la PAC (ex : MAEC)	A la demande du propriétaire ou locataire ou du financeur	A chaque modification d'un document d'urbanisme (PLUI, SCOT, etc.)
Formation nécessaire (paragraphe 4.2.6.)	Non	Non	Oui pour le diagnostiqueur	Variable fonction de l'initiative	Non pour les élus Oui pour les agents des services urbanisme et développement durable des collectivités
Sensibilisation – (paragraphe 4.2.1.)	Oui auprès du grand public	Oui auprès des agriculteurs	Oui auprès des propriétaires, locataires et gestionnaires		Oui auprès des élus
Outil – jeu d'indicateur retenu : simple, complété, à la carte - (paragraphe 4.2.2.)	- Jeu identique pour toutes les parcelles - Simple complété d'indicateurs liés à des enjeux territoriaux (pollutions, érosion, perte de MO, etc.)	- Jeu identique pour toutes les parcelles - Simple complété d'indicateurs liés à des enjeux territoriaux (pollutions, érosion, perte de MO, etc.)	- Jeu identique pour toutes les parcelles - Simple complété d'indicateurs liés à des enjeux territoriaux (érosion) ou liés à d'autres objectifs de politiques publiques (stockage de C)	- Jeu à la carte adapté à une ou plusieurs fonctions spécifiques (ex : stockage de carbone et/ou biodiversité du sol dans le cadre de la compensation), éventuellement multifonctionnel	- Jeu identique pour toutes les parcelles - Simple complété d'indicateurs liés à des enjeux territoriaux (pollutions, érosion, perte de MO, etc.)
Accessibilité de la donnée (paragraphe 4.2.3.)	Privée mais accessible à l'Etat pour produire des référentiels, suivre les évolutions	Privée mais accessible à l'Etat pour produire des référentiels, suivre les évolutions	Privée mais accessible à l'Etat pour produire des référentiels, suivre les évolutions	Privée mais inciter à faire remonter la donnée dans des bases de données nationales utilisables dans les politiques publiques (ex : GIS Sol)	Publique

Une analyse SWOT a été réalisée pour chacune de ces différentes stratégies, dans l'objectif d'analyser leur potentiel actuel à permettre le déploiement des diagnostics de la qualité des sols à l'échelle du territoire national (Tableau 10, Tableau 11, Tableau 12, Tableau 13, Tableau 14).

Tableau 10 : Analyse SWOT de la stratégie « Transactions foncières »

<u>FORCES</u> - Couverture nationale - Sensibilisation large à la considération de la qualité des sols	<u>FAIBLESSES</u> - Peu de transactions foncières annuelles pour les sols agricoles et forestiers - Coût du diagnostic élevé par rapport au prix à l'hectare actuel des transactions foncières
<u>OPPORTUNITES</u> - Objectivation de l'intégration de la qualité du sol dans le prix du foncier - Développement de « diagnostiqueurs » (structures de conseils) certifiés - Possibilité d'expérimentation dans le cadre d'une approche volontaire	<u>MENACES</u> - Risque de spéculation sur les terres - Risque de tension sur le marché pour certaines terres présentant la qualité optimale pour un usage spécifique et recherché - Réglementation actuelle non favorable car ni obligatoire ni incitative

Tableau 11 : Analyse SWOT de la stratégie « Baux ruraux »

<u>FORCES</u> - Couverture nationale - Si obligatoire : développement rapide - Sensibilisation large du monde agricole	<u>FAIBLESSES</u> - Uniquement sols agricoles - Coût du diagnostic pouvant être élevé par rapport au prix à l'hectare actuel des transactions foncières
<u>OPPORTUNITES</u> - Développement de « diagnostiqueurs » (structures de conseils) certifiés - Possibilité d'expérimentation dans le cadre d'une approche volontaire (baux ruraux à clauses environnementales) - Evolution du cadre des baux (concertation) notamment pour la prise en compte de la qualité des sols dans l'article relatif à l'état des lieux tel que défini par l'article L411-4 du code rural et de la pêche maritime	<u>MENACES</u> - Réglementation actuelle non favorable car ni obligatoire ni incitative

Tableau 12 : Analyse SWOT de la stratégie « Conditionnalité ou Aides publiques »

<u>FORCES</u> - Couverture potentiellement nationale - Favorise la considération de la qualité des sols (via la mise en place d'objectifs de moyens et de résultats) - Incitatif car associé à des aides	<u>FAIBLESSES</u> - Spécificité des aides à des contextes/usages de sols - Manque d'incitativité au maintien des bonnes pratiques et de la qualité des sols avec l'arrêt ou la réduction des aides - Coût du contrôle
<u>OPPORTUNITES</u> - Cibles potentielles importantes - Réglementation actuelle favorable - Développement de « diagnostiqueurs » (structures de conseils) certifiés - Possibilité d'adaptation à des contextes locaux et des enjeux spécifiques de politiques publiques	<u>MENACES</u> - Décalage entre le versement des aides et les investissements initiaux pour réaliser le diagnostic - Nécessite une bonne évaluation du rapport entre incitativité de l'aide et contraintes réelles ou perçues (ex : MAEC Sol_01)

Tableau 13 : Analyse SWOT stratégie "Initiatives privées - paiement pour services environnementaux"

<u>FORCES</u> - Multitude de cibles possibles (possibilité d'agir à tous les niveaux) - Sensibilisation voire formation des différents acteurs de la chaîne de valeur à la qualité des sols jusqu'au consommateur - Adaptabilité des diagnostics (objectifs / coûts)	<u>FAIBLESSES</u> - Initiatives volontaires qui peuvent être ponctuelles et partielles - Protocoles de compensation à définir - Coûts de la vérification (ex : stockage de carbone) - Multiplicité possible des cahiers des charges et donc des jeux d'indicateurs utilisés ce qui peut introduire de la confusion - Couverture relativement limitée
<u>OPPORTUNITES</u> - Possibilité d'expérimentations rapides	<u>MENACES</u> - Si la cible n'est pas sensibilisée à l'enjeu de la qualité des sols, elle peut mésinterpréter les messages. - Manque possible de transparence

Tableau 14 : Analyse SWOT de la stratégie « Planification »

<u>FORCES</u> - Couverture nationale - Obligatoire - Plans d'urbanismes souvent révisés - Sensibilisation des élus et des acteurs territoriaux - Formation des agents des services des collectivités territoriales	<u>FAIBLESSES</u> - Manque de sensibilisation actuelle des élus - Coût du diagnostic pouvant être élevé selon le niveau d'ambition - Rajoute un item dans les démarches d'urbanisme
<u>OPPORTUNITES</u> - Réglementation actuelle favorable - Expérimentations déjà en cours dans le cadre de projet de recherche - Développement de « diagnostiqueurs » (structures de conseils) certifiés	<u>MENACES</u> - Risque de corruption pour modifier l'usage préconisé

4.2. Démarche globale autour des stratégies

Ces stratégies s'appuieraient sur une démarche globale avec une coordination nationale afin de piloter les axes suivants (Figure 13) :

- La formation et sensibilisation (Paragraphe 4.2.1) ;
- Un jeu d'indicateurs partagés (Paragraphe 4.2.2) ;
- La construction et l'animation d'une base de données (BDD) sol commune (Paragraphe 4.2.3) ;
- L'animation d'un réseau d'acteurs (Paragraphe 4.2.4) ;
- Des expérimentations pilotes (Paragraphe 4.2.5).

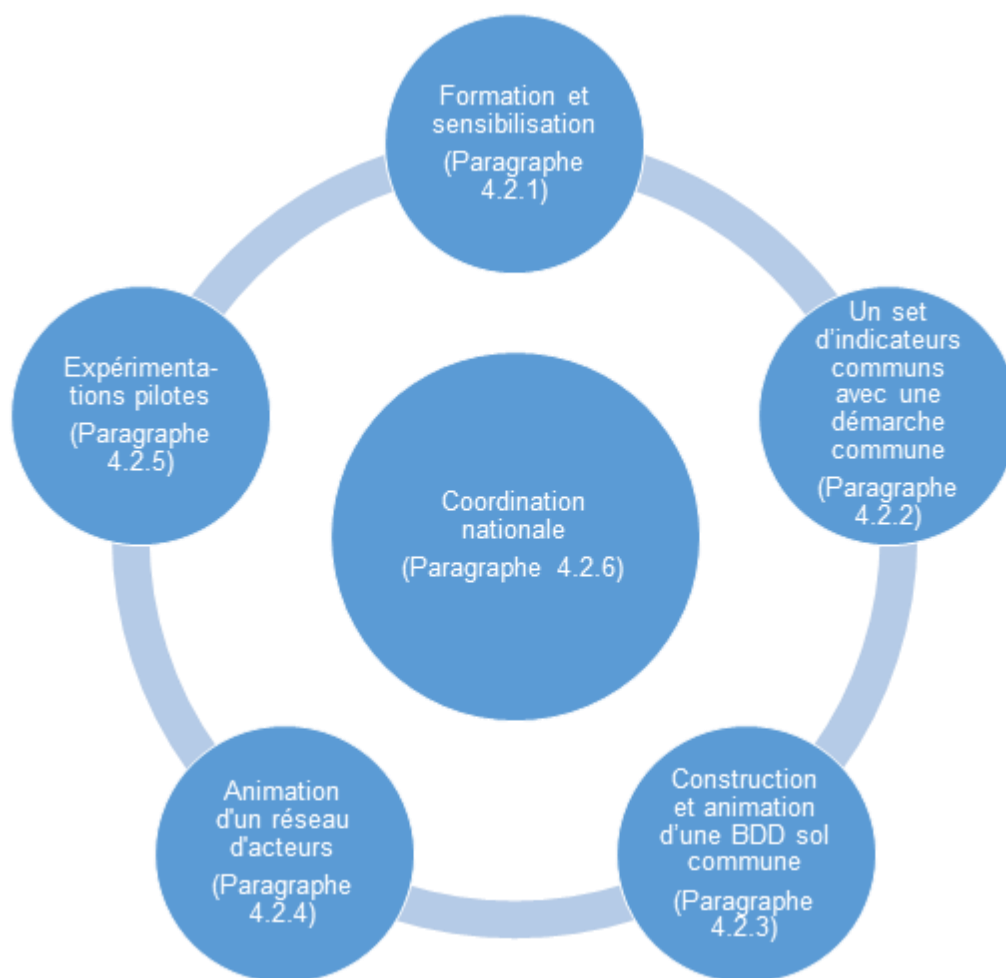


Figure 13 : Démarche globale autour des stratégies identifiées

4.2.1. Formation et sensibilisation

C'est un point clé pour favoriser l'acceptabilité de la réalisation de diagnostic multifonctionnel de la qualité des sols (paragraphe 3.3.5). Tous les acteurs, y compris le grand public sont ciblés. Cela intègre de la formation et de la sensibilisation qui seraient coordonnées à l'échelle nationale (voir les approches proposées dans le paragraphe 4.2.6).

4.2.2. Un jeu d'indicateurs partagé

Un jeu commun d'indicateurs permettant une évaluation de la qualité de l'ensemble des fonctions du sol serait préconisé comme socle à tous les acteurs des sols agricoles et forestiers (également adapté aux sols urbains).

Définir le jeu d'indicateurs opérationnel

Sur la base de cette étude, un jeu d'indicateurs est proposé dans le Tableau 15. Il comprend 37 indicateurs, dont 11 physiques, 13 chimiques et 13 biologiques, permettant d'évaluer l'ensemble des 7 fonctions des sols identifiées (paragraphe 3.2.1). A partir de la liste d'indicateurs identifiés dans l'état de l'art, la sélection des indicateurs composant le jeu a été basée sur leur niveau d'opérationnalité (voir l'arbre de décision présenté Figure 8) et leur complémentarité pour évaluer l'ensemble des fonctions du sol. Des redondances partielles peuvent exister entre certains indicateurs mais la volonté a été de garder un jeu d'indicateurs opérationnels relativement large afin de pouvoir répondre à des diagnostics dans différents contextes et pour différents objectifs de gestion. Les critères de sélection suivants ont été retenus :

- Être associés à des paramètres ou des processus du sol en lien avec des fonctions agronomiques et des objectifs agro-sylvicoles ;

- Être validés scientifiquement en termes de robustesse de la méthodologie d'échantillonnage, de mesure, d'analyses et de traitement/interprétation de la donnée pour une grande diversité de contextes pédoclimatiques, d'usages, de pratiques, et si possible avoir des retours d'expérience ;
- Disposer d'un référentiel d'interprétation (qualitatif ou quantitatif) permettant de diagnostiquer l'état d'un paramètre, d'un processus ou d'une fonction ;
- Être économiquement abordables, avec une valeur de l'information fournie par l'indicateur qui doit être supérieure à son coût d'acquisition ;
- Être opérationnels sur le terrain et/ou au laboratoire (analyses en routine).

L'évaluation de la qualité des indicateurs est parfois complexe au regard des informations à disposition, notamment en ce qui concerne la documentation des référentiels. Un groupe d'experts scientifiques et techniques, incluant des professionnels, pourrait être mobilisés régulièrement afin de mettre à jour ce jeu d'indicateurs, selon l'avancée des connaissances, les innovations des technologies d'acquisition et l'amendement des référentiels d'interprétation.

Le Tableau 15 présente successivement :

- **Le numéro de la fiche descriptive** de l'indicateur (Annexe K : Indicateurs physiques, chimiques et biologiques) ;
- **Le nom de l'indicateur** ;
- **Les différentes approches** : des observations ou mesure de terrain, des prélèvements de sol avec analyses sur le terrain, des prélèvements de sol avec analyses en laboratoire. Pour certains indicateurs, plusieurs méthodologies d'analyses ont été retenues (terrain ou laboratoire). Le choix se porterait sur la méthodologie la plus adaptée aux objectifs du diagnostic (type d'analyse requis, niveau de précision de la mesure requis...), au matériel à disposition et aux compétences du gestionnaire ;
- **Les fonctions évaluées par cet indicateur**. Attention l'indicateur peut également être lié "indirectement" à d'autres fonctions qui ne seraient pas évaluées directement ;
- **L'opérationnalité** telle que définie dans le paragraphe précédent ;
- **Le risque** que le gestionnaire ne puisse pas utiliser l'indicateur (n'inclut pas les aléas climatiques) ;
- **La qualité du référentiel et sa disponibilité**. Cette évaluation est d'autant plus complexe qu'on n'a pas accès aux informations ;
- **Le coût des analyses** (en euro HT par échantillon), parfois difficile à évaluer, et dont l'évolution pourrait être rapide du fait des innovations et optimisations techniques (ex : analyses biologiques en cours d'industrialisation dans le cadre du projet AgroEcoSol) ;
- **L'existence d'un laboratoire d'analyses avec des protocoles standardisés ou normés** pour l'indicateur considéré ;
- **Les atouts** identifiés des indicateurs ;
- **Les limites** identifiées des indicateurs ;
- **Les améliorations en cours** : il s'agit ici d'indiquer de manière succincte le développement en cours relatif à un indicateur et permettant d'améliorer ses performances ;
- **Des références** (liste non exhaustive) sur l'indicateur pour trouver des informations complémentaires.

Tableau 15 : Le jeu d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques pour l'évaluation de la qualité de l'ensemble des fonctions du sol. En bleu, les indicateurs physiques, en violet, les indicateurs chimiques et en vert, les indicateurs biologiques. Pour l'opérationnalité : en vert, orange/vert et orange, les indicateurs à niveau d'opérationnalité élevée, bonne et moyenne

Numéro [Fiche Indicateur - Annexe K]	Nom de l'indicateur	Approche	Opérationnalité (au 04 juillet 2019)	Interprétation	Fonction(s) évaluée(s)	Risque que le gestionnaire ne sache pas utiliser l'indicateur	Disponibilité d'un référentiel	Coût analyse / échantillon (euro, HT)	Laboratoire d'analyse / normes	Atouts	Limites	Améliorations en cours	Références
1	Texture	Observation sur profil de sol (tarière) et analyse en laboratoire.		Cette propriété intrinsèque du sol va influencer sur la structure du sol et la qualité des habitats, sur la taille du réservoir en eau et la dynamique des matières organiques et des polluants	Toutes les fonctions	Faible	+ (Bases de données du GIS Sol (référentiels pédologiques, analyses de terres, ...))	10 €	Normes existantes au terrain et au laboratoire (ex: ISO 11277-2009; NF X31-107) avec prestation laboratoire	- Facile à mettre en oeuvre - Information essentielle pour interpréter ou calculer les autres indicateurs		Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baize) https://wiki.aures.eu/index.php/Accueil
2	Pierrosité	Observation et analyse laboratoire ou évaluation sur le terrain (charte). Idéalement sur fosse en forêt		Cette propriété intrinsèque du sol va influencer sur la structure du sol et la qualité des habitats, sur la taille du réservoir en eau, ...	Toutes les fonctions	Faible	+ (Bases de données du GIS Sol (référentiels pédologiques))	10 €	Normes existantes (AFNOR X 31-003 1998) avec prestation laboratoire	- Facile à mettre en oeuvre - Information utile pour interpréter ou calculer les autres indicateurs			Guide des analyses pédologiques (Baize) https://wiki.aures.eu/index.php/Accueil
3	Epaisseur de sol	Observation sur profil de sol (tarière ou baramine). Idéalement sur fosse en forêt.		Cette propriété intrinsèque du sol va influencer sur la taille des réservoirs en eau et en nutriments	Toutes les fonctions	Nul mais moyen/élevé si nécessité de creuser une fosse pédologique (en forêt)	- Référentiels pédologiques (GIS Sol)	/	/				Guide des analyses pédologiques (Baize)
4	Etat d'humidité et traces d'hydromorphie	Observation sur profil de sol (tarière). Idéalement sur profil de sol de type fosse pédologique en forêt.		La présence de tâches colorées renseignent sur des phénomènes d'engorgement temporaire ou continu du sol. Peut indiquer une mauvaise infiltration de l'eau. De manière générale, l'engorgement des sols a une incidence sur la fonctionnalité globale du sol en affectant notamment l'activité biologique. Se référer au guide pour la description des sols de Delauouis.	- Support physique stable pour les végétaux - Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Nul mais moyen/élevé si nécessité de creuser une fosse pédologique (en forêt)	+ (classes)	/	/	- Facile à interpréter - Faible coût	- Dépend des conditions climatiques donc à ne pas faire à certaines périodes (sol trop sec ou trop humide)	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge (teneur en eau) → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Notice humus Guide de description des sols de Delauouis
5	Etat de surface (traces d'érosion/croûte de battance)	Observation de surface		La présence de traces et de formes spécifiques à la surface du sol renseignent sur l'existence et l'intensité des phénomènes d'érosion et de battance. Donnant ainsi une information sur la dynamique de l'eau. Se référer au guide pour la description des sols de Delauouis.	- Support physique stable pour les végétaux - Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Faible (reconnaissance des formes suivant abasques)	+ (classes)	/	Pas de protocole normé	- Pédagogique - Mesure aisée - Facile à interpréter - Faible coût	- Qualitatif		- Notice Humus
6	Densité apparente (compacité)	Mesures sur profil de sol (mini-fosse ou fosse)		Renseigne sur la compaction et la porosité du sol. Va influencer sur la qualité d'enracinement des plantes, la qualité des habitats mais également sur la capacité des sols à retenir l'eau et les nutriments et l'infiltration de l'eau	- Support physique stable pour les végétaux - Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Nul à faible suivant le contexte	/	/	ISO-11272:1998	- Protocoles normalisés - Facile à interpréter - Permet de calculer la réserve utile et les stocks d'éléments	- Temps d'estimation long (y compris temps de séchage des échantillons) - Incertitudes généralement importantes sur la mesure et sensible aux conditions pédoclimatiques - Peut s'avérer compliqué sur certains sites caillouteux	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baize)
7	Structure/porosité	Observations test-bêches ou mini-fosse. En forêt idéalement fosse		Renseigne sur l'agencement des constituants du sol, notamment le type d'agrégats. Va influencer sur la qualité d'enracinement des plantes, la qualité des habitats mais également sur la capacité des sols à retenir l'eau et les nutriments et l'infiltration de l'eau	- Support physique stable pour les végétaux - Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Nul mais moyen/élevé si nécessité de creuser une fosse pédologique (en forêt)	+ (existence de guide)	/	Pas de normes (proposition faite à l'ISO TC 190)	- Mesure aisée et à coût raisonné - Sensible aux changements de pratiques	- A ne pas réaliser après un travail du sol - Peut nécessiter le creusement d'une fosse pédologique		Guide Sol D'phy Guide des analyses pédologiques (Baize) Notice Humus
8	Stabilité des agrégats	Prélèvement manuel + mesure de terrain (test de stabilité)		La stabilité des agrégats renseigne sur la stabilité de la structure du sol. Va influencer sur la qualité d'enracinement des plantes, la qualité des habitats mais également sur la capacité des sols à retenir l'eau et les nutriments et l'infiltration de l'eau	- Support physique stable pour les végétaux	Nul	+/- (référentiels non publics)	/	/	- Pédagogique - Sensible aux changements de pratiques - Facile à interpréter - Faible coût avec notamment le développement d'application sur téléphone (https://play.google.com/store/apps/details?id=slaker.sydneyuni.au.com.slaker&hl=en_US)	- Très dépendant de l'opérateur	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol) Application smartphone pour évaluer la vitesse de désagrégation	Thoumaseux et al. (2018); Fajardo et al. (2016) Soil slaking assessment using image recognition; Soil and Tillage Research 163:119-129

Numéro (Fiche Indicateur - Annexe K)	Nom de l'indicateur	Approche	Opérationnel N° (au 04 juillet 2019)	Interprétation	Fonction(s) évaluée(s)	Risque que le gestionnaire ne sache pas utiliser l'indicateur	Disponibilité d'un référentiel	Coût analyse / échantillon (euro, HT)	Laboratoire d'analyse / normes	Atouts	Limites	Améliorations en cours	Références
9	Réserve en eau utile	Modèle: fonction de pédotransfert		Renseigne sur la capacité du sol à retenir l'eau (réservoir) et à en fournir aux plantes	- Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Faible (utilisation de la fonction de pédo- transfert)	+ [Référentiels pédologiques du GIS Sol]	/	/	- Valable pour une grande diversité de conditions - Modèles assez fiables - Déjà intégré dans le conseil agricole	- Variabilité spatiale peut être forte, nécessitant des référentiels et fonctions de pédo-transfert plus locaux	Amélioration des référentiels	Article Toth et al. (2014) Projet RMQS-RU https://www.ademe.fr/rmq-ru-ameliorer-estimation-proprietes-hydriques-sols-francais
10	Vitesse d'infiltration de l'eau	Mesure à la surface du sol (test d'infiltration)		La vitesse d'infiltration d'eau dans les sols renseigne sur la capacité du sol à retenir les ruissellements (et limiter l'érosion), à recharger les nappes. Cette caractéristique donne également des indications sur la qualité générale des sols.	- Rétention, infiltration et circulation de l'eau	Nul	- [Comparaison avec parcelle "témoin" ou suivi dans le temps]	/	Pas de protocole normé	- Mesure aisée - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Faible coût	- Pas de référentiel absolu (comparaison avec témoin) - Peut être assez long à mettre en œuvre		- Article Thoumazes et al. (2019)
11	Sensibilité à la compaction	Observations + données pédoclimatiques du site		Cet indicateur renseigne sur les périodes durant lesquelles le passage d'engins est acceptable sur la parcelle (sans risque de tassement)	- Habitat et régulation des populations biologiques - Support physique stable pour les végétaux	Nul	+	/	/	- Facile à mettre en œuvre et à interpréter (guides existants) - Peu coûteux - Valable pour une grande diversité de conditions	/		Guide "Prosol" (forêt)
12	pH _{eau} ou pH _{KCl}	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur la richesse en macro et micronutriments du sol ainsi que sa capacité de rétention en nutriments. Le pH joue également un rôle sur la réduction du N ₂ O en N ₂ .	- Habitat et régulation des populations biologiques - Rétention et fourniture des nutriments - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques	Nul car nombreuses clés d'interprétation existantes	++ [guides, bases de données du GIS Sol]	10 €	Normes et prestations de laboratoires existantes	- Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Sensible aux changements de pratiques	/	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baize) https://wiki.aures.eu/
13	Teneurs en MO et C organique	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur le statut organique du sol et permet d'estimer les stocks correspondants. Jouent sur le fonctionnement global du sol.	- Stockage, recyclage et transformation des MO - Rétention et fourniture des nutriments - Support physique stable pour les végétaux	Nul	+ [bases de données du GIS Sol]	5 €	Normes et prestations de laboratoires existantes	- Sensible aux changements de pratiques - Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Intégrée dans le conseil agricole	/	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baize)
14	Teneur en N total	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur la teneur en azote du sol et permet d'estimer le stock correspondant.	- Rétention et fourniture des nutriments - Stockage, recyclage et transformation des MO	Nul	+ [bases de données du GIS Sol]	10 €	Normes (NF ISO 13878- ISO 11261) et prestations de laboratoires existantes	- Sensible aux changements de pratiques - Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Intégrée dans le conseil agricole en lien la gestion de la fertilisation	/	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baize)
15	Rapport C/N	Calcul (données requises: C organique et azote total)		Renseigne sur la qualité et le type de MO incorporé dans le sol. Influence sur la dynamique de la MO (minéralisation/humification) et sur l'activité biologique	- Rétention et fourniture des nutriments - Stockage, recyclage et transformation des MO	Nul	+ [guides, bases de données du GIS Sol]	/	/	- Sensible aux changements de pratiques - Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Intégrée dans le conseil agricole en lien la gestion de la fertilisation	/		Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols" Notice Humus
16	N minéral (labile)	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire ou mesure de terrain (test NminSol)		La teneur en azote minéral (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺) informe sur la quantité d'azote disponible rapidement pour les plantes et les organismes du sol	- Rétention et fourniture des nutriments - Stockage, recyclage et transformation des MO	Nul	+ [nombreux guides, recommandations]	10 €	Normes et prestations de laboratoires existantes	- Sensible aux changements de pratiques - Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Intégrée dans le conseil agricole en lien la gestion de la fertilisation	/		Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols"

Numéro [fiche indicateur - Annexe K]	Nom de l'indicateur	Approche	Opérationnel RÉ (au 04 juillet 2019)	Interprétation	Fonction(s) évaluée(s)	Risque que le gestionnaire ne sache pas utiliser l'indicateur	Disponibilité d'un référentiel	Coût analyse / échantillon (euro, HT)	Laboratoire d'analyse / normes	Atouts	Limites	Améliorations en cours	Références
17	Teneur en éléments assimilables (Ca, K, Mg, Na, P...), oligo-éléments, capacité d'échange cationique (CEC) et taux de saturation en base	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur la richesse en macro et micronutriments du sol ainsi que sa capacité de rétention en nutriments.	- Habitat et régulation des populations biologiques - Rétention et fourniture des nutriments	Nul car nombreuses clés d'interprétation existantes	++ (guides, bases de données du GIS Sol)	50 €	Normes et prestations de laboratoires existantes	- Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Mesure aisée et à coût raisonné - Sensible aux changements de pratiques	/	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge -> Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Guide des analyses pédologiques (Baïe) https://wiki.aures.eu/
18	Teneur en calcaire actif	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire ou mesure de terrain (test d'effervescence à HCl)		La présence de calcaire actif à certains niveaux peut perturber l'assimilation d'autres éléments tels que N, Fe et Mn. Certaines plantes dites calcifuges y sont très sensibles. L'excès de Ca dans le sol ralentit aussi la minéralisation de la matière organique et son incorporation dans le sol d'où un impact sur la fertilité physique.	- Habitat et régulation des populations biologiques - Rétention et fourniture des nutriments	Faible	+ (classes)	5 €	NF X 31-106 avec avec prestation laboratoire	- Facile à interpréter - Faible coût	/		Guide des analyses pédologiques (Baïe) https://wiki.aures.eu/index.php/Accueil
19	Teneur en carbone labile	Prélèvement tarière + analyse terrain ou labo 3 méthodologies: (i) Fractionnement granulométrique (laboratoire), (ii) pyrolyse Rock-Eval (laboratoire), et oxydation au permanganate (terrain et laboratoire)		La teneur en carbone labile informe sur la quantité d'énergie disponible pour les microorganismes du sol	- Habitat et régulation des populations biologiques - Stockage, recyclage et transformation des MO - Rétention et fourniture des nutriments	Faible (disposer des équipements de mesure)	+/- (référentiels en développement dans le cadre du GIS Sol)	<10€ (permanganate terrain; lecture smartphone ou saques), 15€ pyrolyse, 40€ fractionnement granulométrique	NF X 31-116 pour les fractionnements granulométriques avec prestation laboratoire Projet de norme pour les analyses thermiques à l'ISO TC 190	- Interprétation déjà proposée par des laboratoires - Référentiels en développement au niveau national	- Qualité du référentiel ? - Coût relativement élevé au laboratoire - Procédure lourde si analyse de terrain	Application smartphone pour évaluer le changement de couleur du réactif et donc quantifier le C labile Développement de l'approche par pyrolyse Rock-Eval Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols", Thoumazes et al. (2019)
20	Teneur en carbone stable	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		La teneur en carbone stable renseigne sur la fertilité chimique et physique du sol. La MO stable jouant un rôle clé dans la formation d'agrégats stables et dans la rétention d'eau et de nutriments. Elle donne aussi une information sur la persistance dans le temps long du carbone stocké dans les sols.	- Stockage, recyclage et transformation des MO - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques	Nul	+/- (référentiels en développement dans le cadre du GIS Sol)	<30€	NF X 31-116 pour les fractionnements granulométriques avec prestation laboratoire Projet de norme pour les analyses thermiques à l'ISO TC 190	- Interprétation déjà proposée par des laboratoires - Référentiels en développement au niveau national	- Qualité du référentiel ? - Coût relativement élevé au laboratoire - Procédure lourde si analyse de terrain	Développement de l'approche par pyrolyse Rock-Eval Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols", Cécillon et al. (2018)
21	Stocks de MO et C organique	Calcul		Calcul du stock de MO et de C organique dans le sol	- Stockage, recyclage et transformation des MO	Nul	+ (Bases de données du GIS Sol)	/	- Norme en cours de développement à l'ISO TC 190	- Sensible aux changements de pratiques	/	Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols"
22	Evolution des teneurs et stocks de C organique	Modèles		Renseigne sur la dynamique de stockage de la matière organique dans le sol selon les pratiques, notamment en lien avec la lutte contre le changement climatique	- Stockage, recyclage et transformation des MO - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques	Faible (utilisation du modèle)	+/- (référentiel national en cours d'acquisition dans le cadre de la seconde campagne du RMQS)	/	/	- Sensible aux changements de pratiques - Approches de modélisation permettant de tester des scénarios	- Modèles plus ou moins robustes suivant les contextes (bien validés en grandes cultures, moins en forêts et sur des systèmes ayant changé d'occupation du sol dans les dernières décennies)	Nouvelle approche couplant la pyrolyse Rock-Eval et les modèles de dynamique des stocks de C dans les sols	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols" Outil SIMES-AMG : http://www.agro-transfert-rt.org/outils/simes-amg-2/
23	Sensibilité aux exportations (forêt)	Observations + données du site		Cet indicateur renseigne sur la capacité du sol à supporter un certain niveau d'exportation des rémanents (résidus d'exploitation)	- Rétention et fourniture des nutriments	Faible (traitement de la donnée)	+ (projet INGENE porté par l'INRA et l'ONF)	/	/	- Facile à mettre en œuvre et à interpréter (guides existants) - Peu coûteux - Validé pour une grande diversité de conditions	/		Outil "insensé" (forêt)
24	Teneur et mobilité en métaux lourds et contaminants organiques...	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur le niveau de contamination du sol.	Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants	Nul	+ (bases de données du GIS Sol, du BRGM, en développement pour les contaminants organiques et les pesticides)	200 €	Normes et prestations de laboratoires existantes	- Fiable, précis et standardisé - Facile à mettre en œuvre et à interpréter - Analyse à adapter selon types de polluants	- Coût pouvant être élevé selon type d'analyse		Livre "Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols"



Numéro (Fiche Indicateur - Annexe K)	Nom de l'indicateur	Approche	Opérationnel à (au 04 juillet 2019)	Interprétation	Fonction(s) évaluée(s)	Risque que le gestionnaire ne sache pas utiliser l'indicateur	Disponibilité d'un référentiel	Coût analyse / échantillon (euro, HT)	Laboratoire d'analyse / normes	Atouts	Limites	Améliorations en cours	Références
25	Forme d'humus (forêt)	Observation de surface		La forme d'humus renseigne sur l'activité biologique et le recyclage des nutriments et l'aération du sol. Cette couche d'humus joue également un rôle de protection du sol et de rétention de l'eau.	- Stockage, recyclage et transformation des MO - Habitat et régulation des populations biologiques - Rétention et fourniture des nutriments - Rétention, infiltration et circulation de l'eau - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques	Faible (reconnaissance des formes d'humus suivant abaque)	+ (classes)	/	Pas de protocole normé	- Intégrateur - Facile à interpréter - Faible coût	- Milieu forestier uniquement		- Guide "l'humus sous toutes ses formes"
26	Densité, état des racines et profondeur d'enracinement	Observations test-bêche ou mini-profil En forêt idéalement sur profil de sol (type fosse pédologique)		La colonisation racinaire renseigne principalement sur la qualité physique du sol (mais également sur la présence éventuelle de pollution).	- Support physique stable pour les végétaux	Nul mais moyen/élevé si nécessité de creuser une fosse pédologique (en forêt)	/	/	Pas de normes (proposition faite à l'ISO TC 190)	- Facile à interpréter - Faible coût - Mesure aisée et à coût raisonné	- Idéalement sur profil de sol		Guide Sol D'phy Guide des analyses pédologiques (Baize) Notice Humus
27	Respiration basale, et minéralisation du carbone et de l'azote	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire ou mesure de terrain (test SituaResp)		Renseigne sur l'activité de minéralisation de la matière organique du sol	- Habitat et régulation des populations biologiques - Stockage, recyclage et transformation des MO - Rétention et fourniture des nutriments	Faible (disposer des équipements de mesure)	+/- (référentiels non publics)	< 10€ (permanganate terrain; lecture smartphone ou abaque) à 30€	ISO 16072:2002 (laboratoire)	- Interprétation déjà proposée par des laboratoires	- Qualité du référentiel ? - Procédure lourde et protocole non normalisé au terrain	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol) Application smartphone pour évaluer le changement de couleur du réactif et donc quantifier le C labile	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols", article Thoumazes et al. (2019)
28	Vitesse de décomposition MO	Incubation dans le sol (LEVA-bag ou tes bags ou Balt lamina) et mesure ou analyse au laboratoire (ex: pesée, analyse de la chimie des matières organiques)		La vitesse de décomposition de la matière organique renseigne sur l'intensité de l'activité biologique dans le sol	- Stockage, recyclage et transformation des MO - Habitat et régulation des populations biologiques - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques	Faible à élevé suivant le contexte (zone d'incubation ne doit pas être perturbée durant plusieurs semaines)	+/- (en construction, non publics)	de quelques euros (tes-bag test) jusqu'à plus de 100€ (LEVA-Bag)	Prestation de laboratoire fournie pour le LEVA-BAG, pas de protocole normé	- Pédagogique - Mesure aisée - Représentative du fonctionnement "réel" du sol sensible aux conditions du sol (climat, effet des pratiques, ...)	- Qualité du référentiel ? - Manque de standard (ex: temps d'incubation dans le sol, substrat) - Coût élevé pour les LEVA bags - Maintien de la composition du substrat sur le long terme	Développement d'une plateforme de production des LEVA-bags pourrait faire baisser les coûts	- Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols"
29	Biomasse microbienne	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Témoigne de l'abondance des microorganismes dans le sol. Attention le plus n'est pas toujours le mieux.	- Habitat et régulation des populations biologiques - Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants	Nul	+ (référentiel existant et public)	50 €	ISO 14240-1:1997 ISO 14240-2:1997 Prestation laboratoire	- Sensible aux changements de pratiques - Référentiel acquis pour une grande diversité de conditions - Protocole normalisé	- Coût (mais va baisser dans le futur) - N'informe pas sur la diversité des espèces présentes - Sensible aux changements de pratiques mais interprétation en terme de conseil à affiner	Mesure de terrain au spectromètre proche infra-rouge → Gain de temps, économie, plus de mesures (meilleure prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol)	Livre "La biologie moléculaire au service du diagnostic environnemental", livre "Atlas français des bactéries du sol" Programme "Bioindicateurs", projet Agrinnov
30	Diversité taxonomique microbienne	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Témoigne de la richesse des microorganismes dans le sol. Idéalement on cherche à maximiser cet indice (notion d'assurance écologique).	- Habitat et régulation des populations biologiques - Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants	Nul	+ (référentiel en développement)	300 €	- En développement notamment dans le cadre du projet Agro-EcoSol porté par le laboratoire d'analyse AUREA	- Référentiel acquis pour une grande diversité de conditions - Industrialisation en cours	- Coût (mais va baisser dans le futur) - Interprétation en terme de conseil à affiner - Traitement des données complexe	Développement des méthodes de metabarcoding et d'inférence fonctionnelle	Livre "La biologie moléculaire au service du diagnostic environnemental", livre "Atlas français des bactéries du sol" Programme "Bioindicateurs", projet Agrinnov
31	Activités enzymatiques ciblant des éléments	Prélèvement tarière + analyse en laboratoire		Renseigne sur la présence de microorganismes produisant des composés capables de mobiliser des éléments impliqués dans le cycle biogéochimique (N, C, P, S). Ils donnent donc une vision sur l'ensemble de ces cycles de manière très sensible et très sélectif. Leur interprétation doit être faite en lien avec un référentiel ou en lien avec un échantillon témoin avoisinant.	- Rétention et fourniture des nutriments - Stockage, recyclage et transformation des MO - Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants - Contrôle de la composition chimique atmosphère et contribution aux processus climatiques (dénitrification)	Nul	+/-	?	- Protocoles normés dans le cadre de l'ISO TC 190 (ex: ISO 20130:2018) - Plateforme d'analyse existante en France; industrialisation en cours dans le cadre du projet Agro-EcoSol porté par le laboratoire d'analyse AUREA	- Sensible aux pressions anthropiques - Lien établi avec des processus spécifiques - Facile à mettre en oeuvre - Peu coûteux et en cours d'industrialisation	- Manque de disponibilité de référentiel - Non réalisable dans certaines conditions climatiques - Mesures d'activités biologiques hors du contexte: quels effets ? - Interprétation en terme de conseil à affiner, et indice multi-enzymatique à construire	Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols" Programme "Bioindicateurs"

Numéro (Fiche Indicateur - Annexe K)	Nom de l'indicateur	Approche	Opérationnel RÉ (au 04 juillet 2019)	Interprétation	Fonction(s) évaluée(s)	Risque que le gestionnaire ne sache pas utiliser l'indicateur	Disponibilité d'un référentiel	Coût analyse / échantillon (euro, HT)	Laboratoire d'analyse / normes	Atouts	Limites	Améliorations en cours	Références
32	Rapport champignons / bactéries	Calcul		Un déséquilibre de ce rapport traduit des problèmes de structure du sol, de quantité et de type de matière organique ou de pollution.	-Habitat et régulation des populations biologiques -Stockage, recyclage et transformation des MO -Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants -Support physique pour les végétaux	Nul	+/- (non publics)	/	- En développement notamment dans le cadre du projet Agro-EcoSol porté par le laboratoire d'analyse AUREA	- Intégrateur - Sensible aux changements de pratiques	- Manque de disponibilité et d'information sur la qualité du référentiel (Microsol de la plateforme Genosol) - Interprétation en terme de conseil à affiner	Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols"
33	Abondance et diversité de la microfaune (nématofaune)	Prélèvement tarière + analyse labo		La nématofaune renseigne sur l'état biologique des sols et leur biodiversité. Notamment différentes fonctions du sol : le niveau d'activité biologique globale, la disponibilité des nutriments, la stabilité /niveau de perturbation du sol, le risque lié aux nématodes parasites des cultures et la taille du compartiment microbien	- Habitat et régulation des populations biologiques - Stockage, recyclage et transformation des MO - Rétention et fourniture des nutriments	Nul (identification par un laboratoire spécialisé)	+ (non public)	260 €	ISO 23611-4:2007 Prestation laboratoire (https://www.elisol.fr/)	- Interprétation déjà proposée par un laboratoire - Référentiel acquis pour une grande diversité de conditions	- Coût élevé - Référentiel public peu développé	Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols" Programme "Bioindicateurs"
34	Abondance et diversité de la mésofaune (carabes, cloportes...)	Prélèvement tarière + analyse labo		Renseigne sur la biodiversité des milieux. Joue un rôle clé sur la régulation des populations d'organismes dans le milieu mais également sur la dynamique des MO.	- Habitat et régulation des populations biologiques - Stockage, recyclage et transformation des MO	Nul (identification par un laboratoire spécialisé)	-	/	ISO 23611-5:2011 Prestation laboratoire	- Pédagogique	- Analyses non industrialisées - Référentiel public peu développ	Amélioration des référentiels	Guide "Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols"
35	Abondance et diversité des vers de terre	Observations test-bêche ou test moutarde		Renseigne sur l'activité biologique dans le sol. Les vers épiques et anépiques participent au fractionnement de la matière organique morte et à son enfouissement et les endogés créent une structure du sol grumeleuse participant ainsi à la rétention et l'infiltration de l'eau dans le sol.	- Habitat et régulation des populations biologiques - Rétention, infiltration et circulation de l'eau - Support physique stable pour les végétaux	Faible à moyen (difficultés d'identification des espèces de vers de terre)	+ (référentiel OPVT Observatoire Participatif des Vers de Terre)	<100€	ISO 23611-1:2018	- Pédagogique - Protocoles normalisés - Référentiel bien avancé sur sols agricoles en France	- A réaliser pendant les périodes d'activités des vers (principalement de janvier à avril) - A ne pas réaliser après travail du sol - Identification des espèces nécessite une bonne expertise	Amélioration des référentiels	Guide Sol O'phy Site de l'OPVT : https://ecobiosol.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php Notice Humus
36	Bioindicateurs - réponse-végétation	Observation de la végétation spontanée		La végétation présente et son état renseignent sur le niveau de disponibilité en nutriments, l'aération du sol, la présence de pollution ou de pathogènes.	- Rétention et fourniture des nutriments - Rétention, infiltration et circulation de l'eau - Support physique stable pour les végétaux	Faible (reconnaissance des plantes suivant abeques)	+ (Guides Plantes bio-indicatrices)	/	Pas de protocole normé	- Intégrateur du fonctionnement global - Pédagogique - Facile à interpréter - Faible coût	- Présence de végétation spontanée (usage principal en milieu forestier) - Niveau de précision (gamme de valeurs)	-	- Guides "Flore forestière française" - Fiches Bioindicateurs ADEME - Base de données "Bioindicateurs" (https://ecobiosol.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/bdu.php)
37	Bioindicateurs - accumulation - végétation/ animaux	Piégeage suivi d'analyses au laboratoire		Ces bioindicateurs (ex: indices CMT-Végétaux et SET-Escargots) renseignent sur la présence de métaux biodisponibles dans le sol. Plus la concentration en métaux est importante dans l'organisme, plus la contamination du sol est élevée (et inversement).	- Filtre et tampon pour les polluants, dégradation des polluants	Nul	+/- (en construction, pas tous publics)	?	normes développées et en développement à l'ISO Technical Committee ISO / Sub-Committee 4 "Biological Characterization"	- Facile à mettre en œuvre - Sensible aux changements de pratiques - Des protocoles normalisés ou en cours de normalisation	- Qualité du référentiel ? - Présence de végétation et/ou des animaux testés - Nécessite adaptation du protocole selon la contamination du site	Amélioration des référentiels	- Fiches Bioindicateurs ADEME - Base de données "Bioindicateurs" (https://ecobiosol.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/bdu.php)



Ce jeu d'indicateurs serait modulable et permettrait de nombreuses combinaisons en fonction du contexte, des objectifs du diagnostic et de la stratégie mise en œuvre (Tableau 9). Plusieurs combinaisons pourraient être proposées qui pourraient s'apparenter à différents outils de diagnostic. A titre d'exemple :

- **Jeu identique pour toutes les parcelles**

Un exemple de ces deux niveaux potentiels d'indicateurs au sein du jeu est présenté Figure 14 :

- **Simple** : Un premier niveau avec une sélection d'indicateurs simples (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 pour une unité homogène de sol, et nécessite entre ½ et une journée en fonction de la surface de l'unité homogène de sol. Le diagnostic issu de ce jeu est défini dans l'encart en-dessous de la Figure 13.
- **Simple complété** : en cas de problème détecté via le jeu simple, le diagnostic est complété par l'utilisation d'indicateurs complémentaires ciblant la propriété, le processus, la fonction « à risque ».
- **Jeu à la carte** : Une sélection d'indicateurs adaptés au projet (exemple : stratégie Initiative privée) mais permettant toutefois d'évaluer toutes les fonctions du sol. La sélection des indicateurs pourrait être facilitée par l'élaboration d'un arbre de décision.

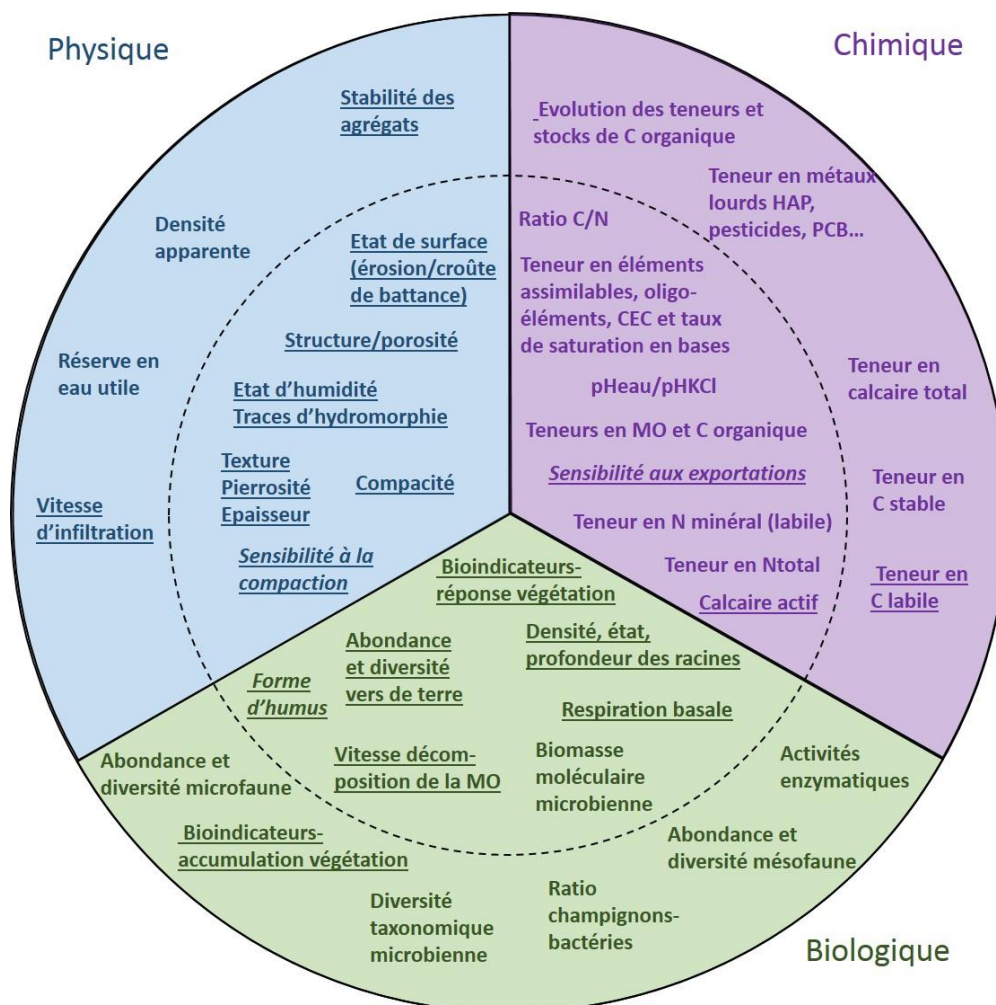


Figure 14 : Indicateurs retenus dans le cadre de l'étude. Les indicateurs soulignés sont des indicateurs de terrain qui ne nécessitent pas d'équipements spécifiques pour la mesure. Les mesures de C labile et de respiration basale peuvent également se faire sur le terrain mais nécessite l'utilisation d'un spectrophotomètre portable. Les indicateurs en italique sont utilisés spécifiquement en milieu forestier. Nous proposons la constitution d'un jeu simple (indicateurs à l'intérieur du cercle pointillé) et d'un jeu plus complet (indicateurs complémentaires à l'extérieur du cercle pointillé).

Le diagnostic à l'aide du jeu simple d'indicateurs

Ce diagnostic comprend :

- **L'acquisition d'information via les bases de données existantes** : par exemple typologie des sols Typterras incluant notamment la texture, la pierrosité, l'épaisseur de sol, la densité apparente, pas de coût d'analyse ou de matériel;
- **Une observation de la végétation** : flore bioindicatrice et état/réponse de la végétation (indices de contraintes), pas de coût d'analyse ou de matériel, durée 30 minutes/1 heure (Guide de la flore forestière, l'encyclopédie des plantes bioindicatrices);
- **Une observation de la surface du sol** : sur l'ensemble de la parcelle, pas de coût d'analyse ou de matériel, durée 30 minutes/1 heure, étude des formes d'érosion et la présence éventuelle de croûtes de battance (Diagnostic Humus), en forêt identification des formes d'humus (Guide l'humus sous toutes ses formes)
- **Du test-bêche (0-20 cm)** : 3 points par unité homogène de sol, pas de coût d'analyse ou de matériel spécifique, durée 1 heure, détermination de la structure/porosité du sol et de l'abondance, de la diversité et de l'activité des vers de terre, de la densité et l'état des racines en surface (Guide méthodologique du test bêche structure et action des vers de terre)
- **Du sondage tarière (0-100 cm si possible)** : 3 points par unité homogène de sol, pas de coût d'analyse, coût d'achat initial de la tarière hélicoïdale 200 euro, durée 1 heure, texture, état d'humidité et traces d'hydromorphie (Diagnostic Humus), présence de calcaire actif
- **Du sondage à la tige pénétrométrique** : 5 points de mesure, pas de coût d'analyse, coût d'achat initial de la tige 100 euro, durée 1 heure, compacité du sol (Guide méthodologique de la tige « pénétro » DPHY)
- **Des prélèvements de sol à la bêche (0-20 cm) suivi d'analyses** : 5 points de prélèvements puis mélange pour former un échantillon composite, durée 30 minutes/1 heure. L'échantillon composite est ensuite envoyé dans des laboratoires spécialisés pour analyses chimiques (teneur en éléments assimilables, oligo-éléments, CEC et taux de saturation en bases, pHeau/pHKCl, teneurs en MO. C organique et N total, teneurs en C et N labiles), et biologiques (respiration basale et biologie moléculaire microbienne), coût approximatif 300 euro. A noter que le C labile et la respiration peuvent être mesurés sur le terrain à condition de posséder (ou de louer) un spectrophotomètre.
- **Des incubations suivies d'analyses** : 3 sachets par unité homogène, coût 100 euro, durée, 30 minutes. Après plusieurs mois d'incubation, les sachets sont pesés (évaluation de la perte de biomasse) et envoyés pour des analyses élémentaires (C, N, K... ; coût inclus dans le prix d'achat des sachets)
- En milieu forestier, ce jeu peut être complété par l'utilisation des **outils INSENSE** (sensibilité des sols aux exportations de rémanents) et **PROSOL** (sensibilité des sols au tassement). Ces outils ne nécessitent aucune analyse physique, chimique ou biologique, pas de coût d'analyse ou de matériel spécifique, durée, 1 heure.

Les limites de ce diagnostic résultent notamment de l'absence de caractérisation des horizons plus profonds de sol (hormis quelques paramètres issus du sondage tarière), ce qui est tout de même limitant notamment en forêt pour l'évaluation du fonctionnement global du sol. Des alternatives seraient la réalisation de mini-profil ou de fosse pédologique. Mais le coût et la durée du diagnostic augmenteraient considérablement notamment du fait de la multiplication des analyses (physico-chimiques au moins car les analyses biologiques pourraient se limiter aux 20 premiers cm) induite par la diversité des horizons de sol.

Le diagnostic pourrait se dérouler en quatre étapes (Figure 15) :

- **Etape 1** : Description et analyse du milieu visant notamment à appréhender les potentialités et la sensibilité du sol en prenant en considération le contexte stationnel, les pratiques passées et actuelles, mais également à intégrer les objectifs de gestion :
 - Le contexte stationnel incluant le climat, le type de matériau parental, la typologie du sol, la pente (via l'utilisation de cartes ou de données satellitaires) va informer sur les potentialités agronomiques et la sensibilité des sols à l'érosion et aux glissements de terrain, au tassement, à la perte de fertilité chimique, à la qualité de la matière organique ;
 - La connaissance des pratiques actuelles et passées menées sur la parcelle (pouvant être recueillis via des entretiens avec le gestionnaire) va informer sur les risques de contamination en éléments traces métalliques, en pesticides, etc... des sols et in fine des plantes (ex : apports organiques et traitements prodigués), d'érosion (ex : couverture/sol nu, type de travail du sol), de tassement (ex : type d'engins, charge à l'essieu et période de passage), faibles teneurs en matières organiques (ex : exportation massive induisant un faible du retour au sol), biodiversité du sol réduite (ex : couverture/sol nu, type de travail du sol, traitements prodigués), perte de fertilité chimique (ex : intensité des exportations, notamment le petit bois en forêt). Des enquêtes complémentaires pourront permettre d'affiner la caractérisation du milieu, par exemple en identifiant l'existence de pollution dans un cours d'eau en aval de la parcelle (données accessibles sur <https://www.eaufrance.fr/les-rivieres>), en identifiant le taux et la périodicité de couverture du sol et la couleur du sol (influencée par le taux de MO dans le sol) par des observations satellitaires.



- **Etape 2** : Choix du jeu d'indicateurs selon le contexte et les objectifs, et mise en œuvre de l'outil de diagnostic ;
- **Etape 3** : Diagnostic sur l'état des 7 fonctions, basé sur l'interprétation des indicateurs avec, en fonction de la stratégie mise en œuvre, l'intégration d'un ou de plusieurs nouveaux indicateurs pour affiner le diagnostic ;
- **Etape 4** (facultative en fonction de la stratégie mise en œuvre) : Recommandations en termes de pratiques visant au maintien ou à la restauration des 7 fonctions écologiques considérées. Il s'agit d'établir un conseil sur la base du diagnostic.

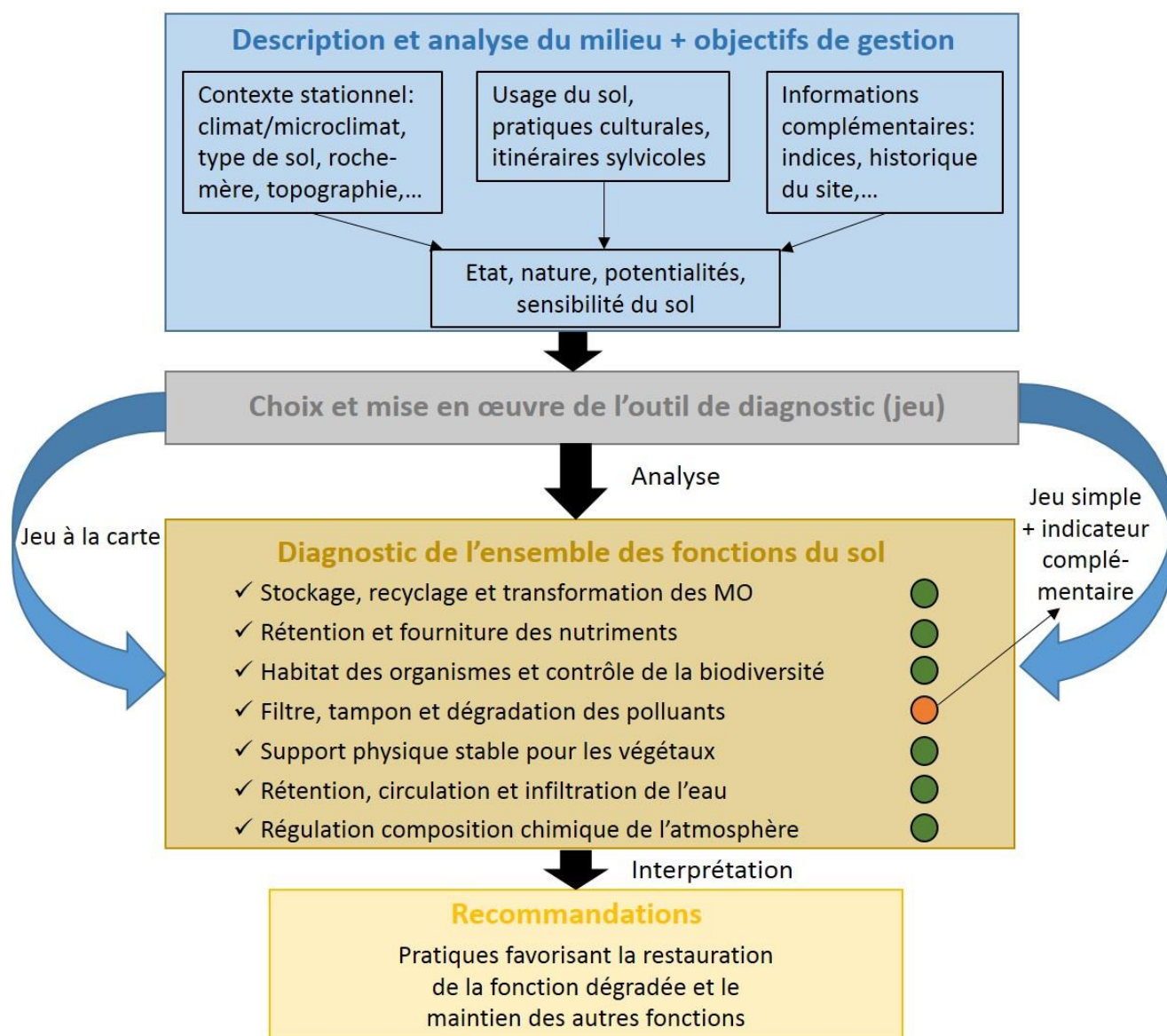


Figure 15 : Démarche en quatre étapes autour du diagnostic. L'étape « recommandations » est facultative en fonction de la stratégie mise en œuvre

Développer et standardiser/normer la méthodologie d'interprétation des données

A l'instar du rôle du Comité d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (Comifer) pour la fertilisation, il faudrait un organisme expertisant et certifiant les méthodologies d'interprétation des données. Notamment, il est important de progresser sur l'interprétation d'indicateurs agrégés.

A titre d'exemple, dans le cadre du projet Agrinnov (Tableau 5), les chercheurs ont développé des indicateurs de synthèse permettant d'avoir une vision plus synthétique de l'information fournie par l'ensemble des indicateurs (Canavacciolo *et al.*, 2019). Ils intègrent différents indicateurs élémentaires agronomiques et biologiques complémentaires pour diagnostiquer des grandes fonctions du sol d'intérêt agronomique. Il s'agit de :

- l'indicateur « **patrimoine biologique / assurance écologique** », qui renseigne sur la capacité d'un sol à héberger une forte abondance et diversité d'organismes vivants mais aussi sur les équilibres biologiques entre ces organismes. Il comprend les indicateurs élémentaires suivants : biomasse microbienne, diversité bactérienne, diversité de champignons, abondance de nématodes libres, diversité des nématodes, indice de structure des nématodes et diversité lombricienne ;
- l'indicateur « **fertilité biologique** », qui renseigne sur la capacité d'un sol à dégrader la matière organique endogène ou apportée par les pratiques culturales (amendements, résidus de culture), comprend les indicateurs élémentaires suivants : test-bêche (structure/porosité du sol), LEVA-bag (activité biologique-décomposition de la MO), diversité bactérienne, diversité de champignons, ratio champignons/bactéries, abondance de nématodes libres, indice d'enrichissement des nématodes, abondance des lombrics anéciques et endogés.

D'autres chercheurs ont développé des indices de qualité globale du sol tels que le Global Soil Quality Index (GSQI) (Velasquez *et al.* 2007) ou le « Soil Quality Index » (SQI) (Vasu *et al.*, 2016) qui agrègent une vingtaine d'indicateurs élémentaires (suivant le contexte et les objectifs) pour obtenir une note globale de la qualité des sols. Cette approche comprend 4 étapes:

- Définir les objectifs de gestion ;
- Sélectionner le jeu d'indicateurs minimal pour le diagnostic (par des approches statistiques type PCA ; Armenise *et al.*, 2013) ;
- Attribuer un facteur de pondération aux indicateurs sélectionnés ;
- Calculer l'indice de qualité globale du sol.

Le problème majeur de ces approches d'agrégation d'indicateurs est l'importance du dire d'experts dans le choix des indicateurs pour le jeu d'indicateur minimal, puis la définition des facteurs de pondération pour chaque indicateur du jeu et enfin l'interprétation de la donnée finale. En effet l'agrégation d'indicateurs peut représenter une perte d'information qui peut être importante pour l'interprétation du diagnostic. C'est pourquoi, il est clé de conserver les informations élémentaires par indicateur. Ces différentes étapes peuvent faire l'objet de travaux de recherche.

Dans le cadre proposé ici qui vise à promouvoir une approche multifonctionnelle de la qualité des sols, un indicateur agrégé serait produit par fonction de sol. Il résulterait de l'agrégation de plusieurs indicateurs élémentaires constituant la fonction. Une note serait attribuée par indicateur agrégé (Figure 16) qui résulterait de la note des indicateurs élémentaires éventuellement pondérés. Elle devrait faire l'objet d'une évaluation plus poussée avec les gestionnaires et des chercheurs afin de choisir indicateurs élémentaires essentiels pour évaluer la fonction. C'est l'approche proposée dans le cadre du Soil Navigator (<http://www.soilnavigator.eu/>) développé dans le projet Landmark.



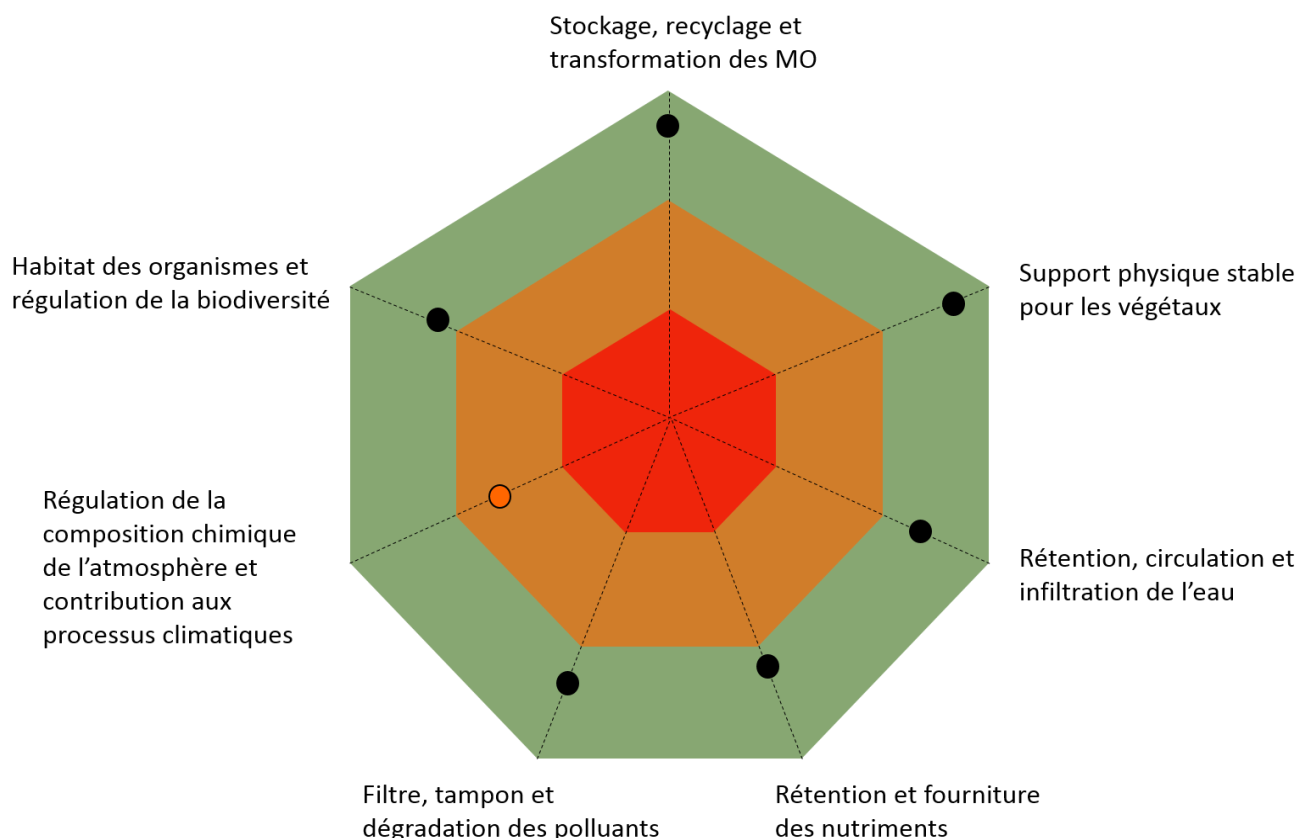


Figure 16 : Exemple de diagramme radar d'un diagnostic de la qualité des sols. Les points représentent la note issue du diagnostic pour chacune des sept fonctions (par comparaison à des seuils dans un contexte donné). En vert les fonctions sont en bon état. En orange et rouge, les fonctions sont moyennement à fortement dégradées.

Faire évoluer le jeu d'indicateurs pour intégrer des indicateurs à fort potentiel

Plusieurs indicateurs ou des technologies à fort potentiel pour l'avenir ont été identifiées mais n'ont pas été intégrées dans ce jeu car les techniques sont en développement, à titre d'exemple :

- **Indicateurs**

- Le metabarcoding environnemental pour inventorier la biodiversité d'un sol à partir d'échantillons de sol. Il s'agit d'obtenir des données génétiques standardisées à partir de spécimens référencés dans des collections et identifiés par des taxonomistes, pour identifier par la suite de façon fiable et rapide les espèces présentes ou ayant été présentes dans ces sols (ADN des êtres vivants et morts présents actuellement ou dans le passé, mais ADN en faible quantité dans ce dernier cas). Le code-barres ADN correspond au fragment standard d'ADN dont la séquence est caractéristique de l'espèce. (source : Encyclopédie de l'environnement). Cette méthode permet de détecter la présence d'organismes invisibles à l'œil nu (microorganismes) mais également d'espèces discrètes (par exemple les vers de terre) permettant ainsi d'avoir un inventaire complet des organismes présents et ayant été présents ;
- L'inférence fonctionnelle : l'inférence fonctionnelle vise à essayer de donner une (ou plusieurs) fonction(s) à un microorganisme sur la base de son affiliation phylogénétique. Exemple : méthode PICRUSt (Phylogenetic Investigation of Communities by Reconstruction of Unobserved State).

- **Méthodologies**

- La Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR) de terrain pour évaluer la texture, le pH, la CEC, le C organique et N total, le P, K et Mg, la teneur en eau, la densité apparente et des indicateurs biologiques tels que la biomasse microbienne et la respiration du sol. Cette technologie offrirait plusieurs avantages : elle est non destructive, ne requiert aucun traitement chimique, donne un résultat quasi instantané et reste facile à utiliser. Elle permet de multiplier les mesures sur la

parcelle donc d'intégrer la variabilité spatiale du sol. L'incertitude est encore importante selon les variables considérées, et des référentiels adaptés au contexte locaux sont à développer ;

- La méthode d'analyse thermique des matières organiques par pyrolyse Rock-Eval, utilisée depuis plusieurs décennies pour qualifier les hydrocarbures par l'industrie pétrolière, apparaît aujourd'hui intéressante pour évaluer la stabilité des matières organiques du sol. Des développements récents ont montré son intérêt pour quantifier les stocks de carbone persistants dans le sol et améliorer les capacités de prédiction des modèles de dynamiques de carbone dans les sols distinguant les matières organiques selon leur temps de résidence moyens (ex : modèles AMG, Century ou RothC). Elle permet déjà de quantifier également le carbone total, le calcaire total voire le carbone labile (thermiquement). Des projets de normes sont en développement à l'ISO. Il n'existe pas encore de prestation commerciale pour les analyses de sol.

Dans le futur, il faudrait être en mesure de présélectionner de nouveaux indicateurs en fonction d'un arbitrage autour de critères tels que :

- Coût acceptable ;
- Méthode d'acquisition simple et normalisée ;
- Référentiel existant et disponible ;
- Indicateur agrégé donnant le plus d'informations possibles, sensible aux changements de pratiques.

Cela présupposerait par ailleurs un partage d'acquis. L'intégration de ces nouveaux indicateurs devrait être validée par un groupe d'experts scientifiques et techniques.

Le développement de méthodes fiables d'acquisition de l'information *in-situ* et la réduction des coûts associés nécessite encore un effort de recherche et d'innovation.

Développement, normalisation et transfert des protocoles.

Un guide serait créé qui regrouperait l'ensemble des indicateurs du jeu permettant d'évaluer la multifonctionnalité des sols. Ce guide serait rendu public. Il prendrait la forme d'un catalogue. Il pourrait s'agir de développer un guide tel que pratiqué par l'USDA sur son kit ou Terres de Liens pour son diagnostic Humus.

Dans ce guide, chaque indicateur aurait un identifiant et une dénomination uniques et serait associé à une définition claire.

Les pratiques et méthodes d'échantillonnage seraient également homogénéiser et comparables entre elles. Ce travail pourrait s'appuyer sur les travaux du comité de normalisation ISO TC 190. Le guide utiliserait par ailleurs des méthodologies d'échantillonnage normées pour définir les zones de sols homogènes et la manière de récolter les échantillons sur le terrain. Il existe des normes d'échantillonnage nationales, comme par exemple la norme X31-100 « Méthode de prélèvement d'échantillons de sols », ou internationales (série NF-ISO 18400) à partir desquelles il serait possible de s'inspirer. Certaines sont spécifiques d'indicateurs (exemple : vers de terres).

La même démarche serait appliquée pour les protocoles d'analyses et de mesures afin de développer et de mettre à disposition des protocoles d'analyses et de mesures pour évaluer les paramètres du sol, gage de reproductibilité des mesures quel que soit le contexte. Le développement de nouvelles mesures étant sans cesse en cours, de nouveaux protocoles d'analyses et de mesures pourraient intégrer le catalogue défini au préalable.

Développer les référentiels des indicateurs retenus aux échelles locales et nationales

Il serait fondamental d'avoir un référentiel national pour les indicateurs du jeu. Le développement des référentiels devrait passer par la valorisation des données déjà existantes et l'accumulation de nouvelles données en s'appuyant par exemple sur des réseaux de suivi tels que le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) et/ou les données des laboratoires d'analyses, lorsqu'elles sont disponibles.

Les observatoires de sciences participatives pourraient également enrichir les bases de données et permettre de mieux cartographier les sols aux échelles territoriales. C'est d'ailleurs un objectif du projet de sciences participatives



« Clés de sol » porté par l'INRA qui vise à caractériser les sols et leurs fonctions. Pour s'assurer de la qualité des données recueillies par des non-spécialistes, il est fondamental d'une part de fournir des protocoles rigoureux (échantillonnage, mesure, observation...) et d'autre part de mettre en place une procédure de validation des données. Ce travail de capitalisation nationale, de conception et de mise à disposition des référentiels pourrait être amplifié dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol).

4.2.3. Amplifier la capitalisation des analyses dans une base de données (BDD) sol commune

Alimenter une base de données sol commune pour améliorer les référentiels

Un jeu d'indicateurs commun faciliterait l'alimentation d'une base de données sol commune et constituerait un puissant levier pour parvenir à créer des référentiels d'interprétation s'autoalimentant de façon régulière.

Cette base serait amendée par les résultats des analyses de sols effectuées dans le cadre des différentes stratégies (Tableau 9). Les analyses réalisées dans le cadre de la réglementation, avec des aides publiques ou dans le cadre de marchés publics devraient systématiquement prévoir une clause d'alimentation de la base de données. Il s'agirait aussi d'inciter les laboratoires et organismes privés français à rendre accessible leurs données pour les intégrer dans les référentiels, en tenant compte des méthodologies d'acquisition pratiquées par les laboratoires, des questions juridiques relatives à la propriété des données et de l'impact sur le modèle économique des acteurs privés (ex : laboratoires d'analyse). Le recours aux sciences participatives pourrait permettre également l'acquisition d'une importante masse de données pour amender les référentiels. Une standardisation des procédures devrait être mise en place pour s'assurer de la qualité de la donnée.

Par ailleurs, de nombreuses bases de données sont déjà existantes qu'il conviendrait de centraliser et d'harmoniser, ou du moins de rendre interopérables. Ce travail pourrait se faire dans le cadre du GIS Sol, notamment en lien avec la base de données DONESOL³⁴, la base de données nationale structurant et regroupant les données ponctuelles et surfaciques des études pédologiques.

Favoriser la mise à disposition « publique » des référentiels

Seulement une partie de la donnée serait rendue publique en fonction des stratégies (Tableau 9). Pour la donnée publique, il s'agirait au moins d'avoir un référentiel public minimal avec les indicateurs clés (exemple : teneur et fractionnement des matières organiques, texture, réserve utile, stocks de carbone, teneurs en contaminants métalliques et organiques). Cette mise à disposition publique pourrait se faire à travers des tables de valeurs de références (exemple : seuils de détection d'anomalies en éléments traces métalliques disponibles ou stocks de carbone dans les sols cultivés de France métropolitaine par grandes régions pédoclimatiques ou via des plateformes d'échange de données géographiques nationales (exemple : L'outil cartographique Geosol) qui pourront être relayées à des échelons régionaux comme les plateformes Sols de Bretagne ou Geonormandie ou tout autre échelon adéquat. Il faudra bien s'assurer du champ de validité des référentiels.

4.2.4. Dynamiser les échanges entre les acteurs de différents secteurs et usages des sols

L'étude a fait émerger un réseau d'acteurs professionnels variés et motivés par la question de la qualité des sols tant sur les sols agricoles que les sols forestiers. Il conviendrait de maintenir ce réseau actif et de le faire interagir avec d'autres réseaux déjà existants comme le RNEST, l'ACTA, le REVA et le RMT Sols et Territoires. Ce réseau devrait aussi être élargi afin de couvrir l'ensemble des acteurs en lien avec la thématique de la qualité des sols. Cela pourrait se faire au travers de l'identification des typologies d'acteurs jouant un rôle sur les sols agricoles, forestiers et urbains. Les citoyens devraient en faire partie car ils constituent, chacun à leur manière, des acteurs des sols. L'animation pourrait se faire autour d'une plateforme d'innovation en lien avec une coordination nationale. La plateforme aurait principalement pour objectif d'alimenter le centre de ressources national (Paragraphe 4.2.6) et de favoriser la réalisation des expérimentations pilotes (Paragraphe 4.2.5). Elle comprendrait deux composantes :

³⁴ <https://www.gissol.fr/outils/donesol-web-336>

- Une composante physique correspondant à des lieux permettant aux acteurs de se rencontrer et d'avoir des interactions directes ;
- Une composante digitale avec un espace web permettant des interactions virtuelles et un accès aux ressources.

Au démarrage, cela pourrait être léger avec par exemple un atelier de co-construction annuel sur une journée (sous forme de world café couplé à une visite de terrain, ou autre), l'envoi d'une lettre d'information biannuelle et la mise en place d'une liste de diffusion permettant aux acteurs de poser des questions et d'échanger.

4.2.5. Réaliser des expérimentations pilotes avant de généraliser

Pour permettre le développement des stratégies présentées dans le paragraphe 4.1 et dans le Tableau 9, il serait judicieux de mettre en place des projets et sites pilotes afin d'affiner le choix des indicateurs retenus au sein du jeu et d'identifier les modèles de diffusion les plus pertinents.

Ces pilotes devraient couvrir un large éventail d'usages, de contextes biophysiques et institutionnels, et s'appuyer sur des exemples réussis de combinaisons innovantes d'instruments publiques et/ou d'initiatives privées. Les territoires présentant des enjeux particuliers, par exemple des sols rares ou qui jouent un rôle clé en terme de lutte contre l'érosion ou à fort potentiel pour l'avenir, pourraient également être sélectionnés. Ces sites seraient un lieu pour expérimenter, tester et évaluer. Ils s'appuieraient sur la plateforme d'innovation de la qualité des sols présentée dans le paragraphe 4.2.4 afin de faciliter les échanges et l'innovation.

Il s'agirait donc d'identifier les structures, les territoires, les régions dynamiques et intéressées par ces thématiques afin de co-construire des projets-pilotes. A ce titre, des premiers exemples d'expérimentation pilote ont été identifiés :

- Projet TIGA « Dijon, alimentation durable 2030 » porté par Dijon Métropole et soumis en 2019 au Grand Plan d'Investissement. Ce projet développe une approche globale autour d'un système alimentaire territorial durable. Il intègre des actions sur la connaissance et la préservation de la qualité des sols en lien avec la promotion de l'agro-écologie (acquisition d'un référentiel territorial pour un jeu d'indicateurs de la qualité des sols, et intégration dans les indicateurs de durabilité associés aux productions agricoles dont l'empreinte carbone) et l'intégration de la qualité des sols dans la planification territoriale (SCOT, PLU, ...). Une des propositions est également de se baser sur l'évaluation de la qualité des sols pour alimenter une plus-value foncière dans les échanges de terre, ventes et successions. Le partenariat inclut collectivité, associations, laboratoires de recherche, organismes de formation et acteurs privés notamment de l'agro-alimentaire;
- Les projets SUPRA portés l'Université de Lorraine/INRA ainsi que le projet MUSE porté par le CEREMA³⁵ expérimentent sur plusieurs agglomérations (ex : Nancy, Nantes, Marseille, Chateauroux) des méthodes pour mieux intégrer la multifonctionnalité des sols (indicateurs mesurés et modélisés) dans les documents d'urbanisme et les projets d'aménagement;
- Terre de Liens expérimente depuis 2019 la diffusion de l'outil de diagnostic HUMUS (17 indicateurs ; voir Tableau 5) dans le cadre des baux ruraux à cses environnementales qu'elle contractualise avec les agriculteurs. La réalisation quinquennale du diagnostic Humus permettra d'assurer un suivi des clauses du bail ;

Voici ci-dessous une proposition de projet pilote type pour tester des mécanismes d'incitations (aides au diagnostic, label, compensation carbone, etc.) :

- **Objectifs**
 - Expérimenter à l'échelle d'une région, d'un territoire ou d'une agglomération le déploiement du jeu d'indicateurs. Par exemple dans le cadre d'un projet de développement du territoire tel que le projet alimentaire territorial, le plan climat, le plan bioéconomie, etc. ;

³⁵ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/projet-muse-integrer-multifonctionnalite-sols-documents>



- Certifier la qualité des diagnostics sur la base de critères tels que l'utilisation : d'un jeu simple d'indicateurs adossés à des référentiels, de standards, etc. Enrichir les référentiels. Cartographier la qualité des sols à l'échelle du territoire ;
- Tester les mécanismes d'incitations à l'échelle du territoire sélectionné.

- **Prérequis**

Suivant leur niveau de complexité, les prérequis présentés ci-dessous pourront être mis en place rapidement ou nécessiteront une mise en œuvre par paliers successifs.

- Centre de ressources (guide regroupant l'ensemble des indicateurs, standards, référentiels, vocabulaire commun) et formation des opérateurs ;
 - Sensibilisation aux enjeux et réseaux d'acteurs existant ;
 - Plateforme de capitalisation des données ;
 - Cellule de certification des diagnostics (Groupe d'experts à définir) ;
 - Actions d'information et de sensibilisation des gestionnaires des sols, des propriétaires, des intermédiaires ;
 - Budget disponible pour réaliser les actions ci-dessus et budget pour financer les incitations.
- **Partenaires** (liste non exhaustive) :
 - Conseil régional, collectivités territoriales ;
 - Etat : Services déconcentrés, Agence de l'eau, ADEME régionale, SAFER, etc. ;
 - Acteurs de la recherche et du développement ;
 - Représentants des professionnels : groupements d'agriculteurs, de gestionnaires forestiers, coopératives, conseil, industriels, etc. ;
 - Associations citoyennes et environnementales ;
 - Industries agro-alimentaires ;
 - Banques.

4.2.6. Création d'un centre de ressources et d'une coordination nationale sur les sols

Il existe déjà de nombreux éléments existants pour construire chacun des cinq axes évoqués dans les paragraphes 4.2.1 à 4.2.5 (Figure 13) : compétences, indicateurs identifiés, acteurs motivés, laboratoires, outils de capitalisation des données, etc. Toutefois il manque des moyens dédiés à la coordination transversale des acteurs sur les sols.

Cette coordination nationale aurait un rôle central dans le pilotage des stratégies présentées dans le paragraphe 4.1 et dans le Tableau 9 et dans l'articulation des cinq axes évoqués ci-dessus (Figure 13) :

- Coordination scientifique et technique, entre autres du jeu commun d'indicateurs ;
- Appui stratégique, scientifique et technique aux pouvoirs publics en réalisant les développements et les choix nécessaires au maintien et à l'évolution du jeu commun d'indicateurs ;
- Accréditation des diagnostiqueurs agréés ;
- Développement, centralisation des données et gestion de la base de données sol ;
- Analyse des résultats et appui méthodologique ;
- Coordination/Animation des projets et sites pilotes ;
- Centre de ressources nationales techniques et scientifiques où l'utilisateur serait guidé dans le choix des indicateurs au travers de l'animation d'une plateforme web nationale, l'accès à des ressources pédagogiques pour les formations, ...
- Appui à l'animation de la plateforme d'innovation et du réseau d'acteurs ;
- Actions de communication large :
 - Stands, campagnes de communications, conférences tout public ;
 - Rédaction d'articles de vulgarisation, de livres, de BD ;
 - Création de « kits » ludiques autour des sols.

Cette démarche serait portée et animée par une structure déjà existante qui serait en mesure de porter ce projet d'interfaces entre politiques publiques, recherche et opérateurs de terrain. Le GIS Sol et ses membres pourraient

être de bons candidats si les moyens financiers et humains qui alimentent cette structure sont pérennisés. Il comprendrait des référents à l'échelon régional qui seraient fédérés au niveau national. Il faudrait aussi avoir une coordination scientifique et technique.

5. Conclusion générale

Les derniers rapports d'experts montrent l'urgence d'agir pour préserver les sols. Mieux gérer les sols nécessite de mieux évaluer leur état. Dans cette optique ce rapport propose à l'ensemble des acteurs sur les sols, y compris les pouvoirs publics diverses pistes pour déployer à large échelle le diagnostic de la qualité des sols dans notre pays.

Cette étude a permis de mettre en exergue un jeu d'indicateurs (37) pouvant être mobilisé pour un diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers et pouvant se décliner sous la forme de différents outils de diagnostic en fonction du contexte et des objectifs de gestion. Un jeu simple d'indicateurs (20 en milieu agricole et 23 en milieu forestier), peu coûteux et faciles à mettre en œuvre (observation de surface, sondage tarière, test-bêche vers de terre, canne pénétromètre...) et des analyses chimiques et biologiques en routine a également été proposé. L'étude a permis d'identifier 5 modalités de déploiement d'intérêt pour les actions de préservation des sols, i. e. transactions foncières, baux ruraux, conditionnalité ou aides publiques, initiatives privées-paiement pour services environnementaux et planification territoriale, pouvant promouvoir à grande échelle le diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers, via ce jeu d'indicateurs. A titre d'exemple, un cadre technique permettant l'intégration volontaire de ce type de diagnostic dans l'état des lieux des baux ruraux pourrait déjà être proposé. Il ressort également de cette analyse la nécessaire adaptation des jeux d'indicateurs aux stratégies et contextes dans lesquels ils sont appliqués.

Cette étude propose que ces modalités de déploiement s'intègrent dans une stratégie plus globale qui comprendrait :

- (i) la sensibilisation des acteurs aux enjeux environnementaux ;
- (ii) la formation à la réalisation de diagnostic basé sur ces jeux d'indicateurs ;
- (iii) le soutien à l'expérimentation des stratégies en coordonnant les expérimentations pilotes pour qu'elles nourrissent les politiques publiques ;
- (iv) la structuration du réseau d'acteurs avec notamment une structure porteuse qui centraliserait l'information. Cela pourrait prendre la forme d'un centre de ressources et d'une plateforme d'innovation multi-acteurs visant à optimiser le pilotage des actions et des ressources affectées.

La bonne coordination des différents acteurs et initiatives est clé pour la réussite du projet.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

FIGURES

Figure 1 : Le concept de qualité des sols.....	9
Figure 2 : Calendrier général de l'étude	10
Figure 3 : Démarche générale mise en œuvre pour mener à bien l'étude, à l'interface entre recherche sur les sciences du sol et acteurs de sols agricoles et forestiers	11
Figure 4 : Evaluation des contributions des fonctions du sol aux services écosystémiques suivant le modèle en cascade de Haines-Young et Potschin (2008).....	12
Figure 5 : Identification des liens avec les services écosystémiques.....	18
Figure 6 : Relations entre les différentes fonctions dans le sol	19
Figure 7 : Les relations entre fonctions du sol, fonctions agronomiques et objectifs agro-sylvicoles.....	19
Figure 8 : Procédure d'évaluation du niveau d'opérationnalité des indicateurs de la qualité des sols identifiés...	22
Figure 9 : Le rôle central des organismes dans le fonctionnement du sol	25
Figure 10 : Démarche de construction de l'indice additif pour l'évaluation de la qualité des sols	28
Figure 11 : L'étiquette énergie ² pour connaître la consommation d'énergie primaire (à gauche) et l'étiquette climat pour connaître la quantité de gaz à effet de serre émise (GES) (à droite)	31
Figure 12 : Démarche globale autour des stratégies identifiées	59
Figure 13 : Une proposition de constitution de jeu simple et de jeu complété	66
Figure 14 : Démarche en quatre étapes autour du diagnostic	68
Figure 15 : Exemple de diagramme radar d'un diagnostic de la qualité des sols.	70

TABLEAUX

Tableau 1 : Typologie des acteurs participant aux 4 ateliers, répartis selon leurs champs d'activités	14
Tableau 2 : Présentation des 4 ateliers de co-construction et de leurs objectifs	14
Tableau 3 : Exemples d'actions et pratiques associées pour maintenir voire restaurer les différentes fonctions du sol et objectifs agronomiques liés aux pratiques. Liste non exhaustive.....	20
Tableau 4 : Liste des indicateurs physiques, chimiques et biologiques issus de la revue de la littérature	23
Tableau 5 : Les différents outils de diagnostic agrégeant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques..	26
Tableau 6 : Niveau de connaissance des participants des indicateurs proposés par le Groupement.....	36
Tableau 7 : Niveau d'utilisation par les participants des indicateurs proposés par le Groupement	37
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des coûts détaillés pour la réalisation des diagnostics de la qualité des sols selon les approches « actuelle » et multifonctionnelle » par les différents groupes de l'atelier 3, en réponse aux contextes qui leur ont été proposés.	42
Tableau 9 : Présentation des cinq stratégies de déploiement construites à l'issue de l'étude	55
Tableau 10 : Analyse SWOT de la stratégie « Transactions foncières ».....	57
Tableau 11 : Analyse SWOT de la stratégie « Baux ruraux »	57
Tableau 12 : Analyse SWOT de la stratégie « Conditionnalités d'aides publiques ».....	57
Tableau 13 : Analyse SWOT stratégie "Initiatives privées - paiement pour services environnementaux".....	58
Tableau 14 : Analyse SWOT de la stratégie « Planification »	58
Tableau 15 : Le jeu d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques pour l'évaluation de la qualité de l'ensemble des fonctions du sol.....	61

SIGLES ET ACRONYMES

AASQA	Association agréée de surveillance de la qualité de l'air
ACTA	Association de coordination technique agricole
BRE	Baux ruraux à clauses environnementales
CNPF	Centre national de la propriété forestière
COFRAC	Comité Français d'accréditation
COPIL	Comité de pilotage
DPE	Diagnostic de performance énergétique
EFESE	Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
FAO	Food and agriculture organization
FN SAFER	Fédération nationale des SAFER
FSC	Forest Stewardship Council
GES	Gaz à effet de serre
GIS	Groupeement d'intérêt scientifique
HVE	Haute valeur environnementale
LCSQA	laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
MAEC	mesure agro-environnementale et climatique
MEA	Millennium ecosystem assessment
MOOC	massive open online course
ISO	International Organization for Standardization
ONF	Office national des forêts
OFS	Observatoire français des sols vivants
PAC	Politique agricole commune
PGDS	Plan de gestion durable des sols
PSG	Plan simple de gestion
PSE	Paiement pour services environnementaux
PEFC	Programme for the endorsement of forest certification schemes
R&D	Recherche et développement
RNEST	Réseau national d'expertise scientifique et technique
RMT	Réseau mixte technologique
RSE	Responsabilité sociétale des entreprises
SAFER	Société d'aménagement foncier et d'établissement rural
TEEB	The economics of ecosystems and biodiversity
TIGA	Territoire d'innovation – grande ambition
UMR	Unité mixte de recherche
USDA	United states department of agriculture



ANNEXES

[Annexe A : Glossaire](#)

[Annexe B : Atelier de cadrage](#)

[Annexe C : Liste des références bibliographiques](#)

[Annexe D : Tutoriel de l'atelier 1](#)

[Annexe E : Questionnaire en ligne de l'atelier 1](#)

[Annexe F : Atelier 2](#)

[Annexe G : Atelier 3](#)

[Annexe H : Atelier 4](#)

[Annexe I : Guide d'entretien complémentaire](#)

[Annexe J : Compte-rendu de l'atelier de cadrage](#)

[Annexe K : Indicateurs physiques, chimiques et biologiques](#)

[Annexe L : Compte-rendu de l'atelier 2](#)

[Annexe M : Compte-rendu de l'atelier 3](#)

[Annexe N : Compte-rendu de l'atelier 4](#)

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





Diagnostic de la qualité des sols pour les gestionnaires des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégie de déploiement

Le sol est un milieu fragile, aujourd'hui menacé en de nombreux endroits, principalement du fait des activités humaines. La diffusion de méthodes de suivi de la qualité du sol peut contribuer à guider les acteurs de la gestion des sols vers des pratiques plus durables.

Cette étude a identifié des indicateurs et outils de diagnostic opérationnels permettant d'évaluer le fonctionnement des sols. Diverses options, parfois déjà expérimentées par des acteurs, pourraient permettre de promouvoir leur utilisation, notamment dans le cadre des baux ruraux (à clauses environnementales), des démarches RSE des filières agro-alimentaires, des plans simples de gestion ou d'aménagement en forêt et dans la planification territoriale.

Il ressort néanmoins un besoin d'intégrer ces actions dans une stratégie plus globale visant (i) à développer un centre de ressources pour faire connaître et guider les utilisateurs dans le choix des indicateurs, (ii) à améliorer et rendre plus abordables (coûts, technicité) les outils de diagnostics, (iii) à soutenir et coordonner les expérimentations pilotes au niveau national pour qu'elles puissent essaimer et nourrir les politiques publiques, et (iv) à amplifier la formation et la sensibilisation de l'ensemble des parties prenantes de la gestion des sols, y compris le citoyen et le consommateur.

Essentiel à retenir

- *Des indicateurs de suivi sont déjà opérationnels. Les référentiels d'interprétation sont à développer en particulier pour les indicateurs biologiques.*
- *Diverses démarches de diffusion de diagnostic existent déjà et peuvent être expérimentées plus largement pour alimenter les politiques publiques.*
- *Un centre de ressources national permettrait de mieux guider les acteurs de la gestion des sols dans le choix des indicateurs et démarches les plus pertinents au regard de leurs enjeux.*

