

# Les outils de diagnostic et les indicateurs pour évaluer la santé des sols agricoles \*

ANTOINE PIERART <sup>1</sup>; CHRISTOPHE CALVARUSO <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> ADEME, 20 Avenue du Grésillé, 49000 Angers

<sup>2</sup> EcoSustain, bureau d'études R D, 31, rue de Volmerange 57330 Kanfen

<sup>3</sup> Genesis, agence de notation de la santé des sols, 93, rue Vieille du Temple, 75003 Paris

Email: antoine.pierart@ademe.fr  
chriscalva@hotmail.com

## 1. Les sols, une ressource vitale menacée

Le sol est un maillon central du fonctionnement des écosystèmes et des grands cycles globaux de l'eau, de l'air et des éléments. Il est porteur d'une grande diversité de fonctions et contribue aux multiples services que ces écosystèmes rendent à nos sociétés, i.e., approvisionnement, support, régulation, auto-entretien, patrimoine (Figure 1). L'Homme dépend ainsi du sol pour l'essentiel de son alimentation, de son approvisionnement en eau de qualité, de sa santé et de son bien-être. Pourtant, le sol est une ressource non renouvelable (à l'échelle de la vie humaine) menacée en de nombreux endroits, principalement du fait des activités humaines, i.e., imperméabilisation, aménagements fonciers, pratiques sylvicoles et agricoles inadaptées, pollutions... qui peuvent altérer sa santé. Le récent rapport spécial du GIEC "Changement climatique et terres émergées" rappelle que près des trois quarts de la surface du sol subissent l'exploitation et/ou l'occupation humaine et qu'un quart est déjà considéré comme dégradé.

Pour répondre notamment à une demande alimentaire exponentielle (ex. : utilisation massive de fertilisants, irrigation, mécanisation, exportation massive de biomasse), à l'urbanisation (ex. perte de terre à fort potentiel agronomique due à l'imperméabilisation du sol) mais également du fait du réchauffement climatique (ex. : impact des fortes précipitations sur l'érosion) induit en partie par la façon dont les sociétés humaines gèrent les sols (ex. : déstockage de carbone), les pressions exercées sur ces milieux ont considérablement augmenté au cours des cinquante dernières années. Force est de constater que la sensibilité des sols face à ces nouvelles pressions est particulièrement dépendante de leurs caractéristiques intrinsèques et des conditions climatiques locales. Cette dégradation de la santé des sols et de leur fonctionnement se traduit d'ores et déjà par des baisses de rendement dans certaines régions du globe, associées à des pertes de sol, de matières organiques et/ou de biodiversité <sup>2</sup>.

**Il est donc urgent d'agir pour préserver les sols et leurs multiples bénéfices, le coût de l'inaction dépassant largement le coût de la mise en œuvre de mesures immédiates <sup>3</sup>.**

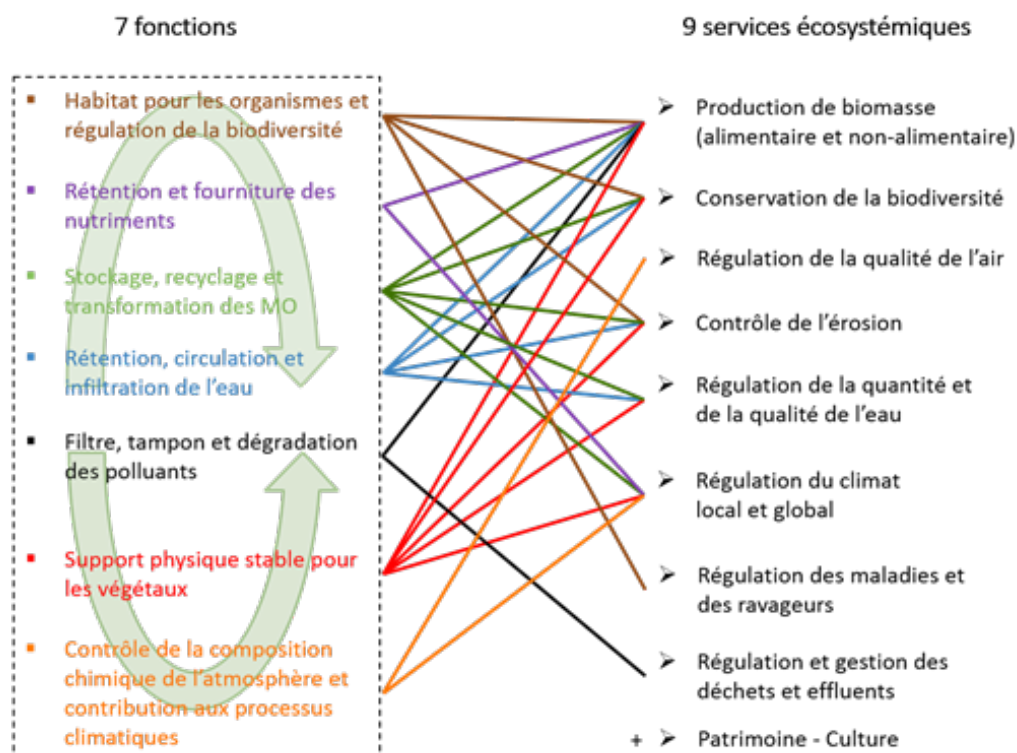


Figure 1 - Les fonctions du sol et leurs contributions aux services rendus par les écosystèmes (Calvaruso et al., 2019)

Dans ce contexte de pressions croissantes, et de climat changeant, la préservation de la santé des sols pour leur pleine participation à la gestion durable des systèmes agricoles (entre autres) requiert donc la mise en œuvre de diagnostics approfondis pour évaluer leur état et leur sensibilité, et ainsi identifier les pratiques les plus adaptées au maintien et/ou à la restauration de leur santé.

L'union européenne s'est récemment dotée d'une stratégie pour la protection des sols à l'horizon 2030, dont les déclinaisons législatives devraient permettre d'offrir un cadre juridique aux sols à l'échelle de l'Union Européenne au même titre que l'air, l'eau et l'environnement marin. En France, la récente loi «Climat et résilience» du 22 août 2021 vient déjà renforcer ce besoin d'indicateurs opérationnels de suivi des fonctions écologiques (hydriques, climatiques, biologiques) et du potentiel agronomique des sols en intégrant la lutte contre l'artificialisation des sols et la nécessité de suivre sa mise en œuvre.

## 2. Evaluer l'état de santé des sols : une mesure essentielle mais complexe

La santé du sol peut se définir comme la capacité de ce sol à fournir durablement l'ensemble des fonctions écologiques (Figure 1) requises pour toutes les formes de vie. Un sol est considéré comme dégradé lorsqu'une ou plusieurs de ses fonctions est significativement altérée (niveau en-deçà du seuil critique; Figure 2), affectant le fonctionnement global du sol et sa durabilité.

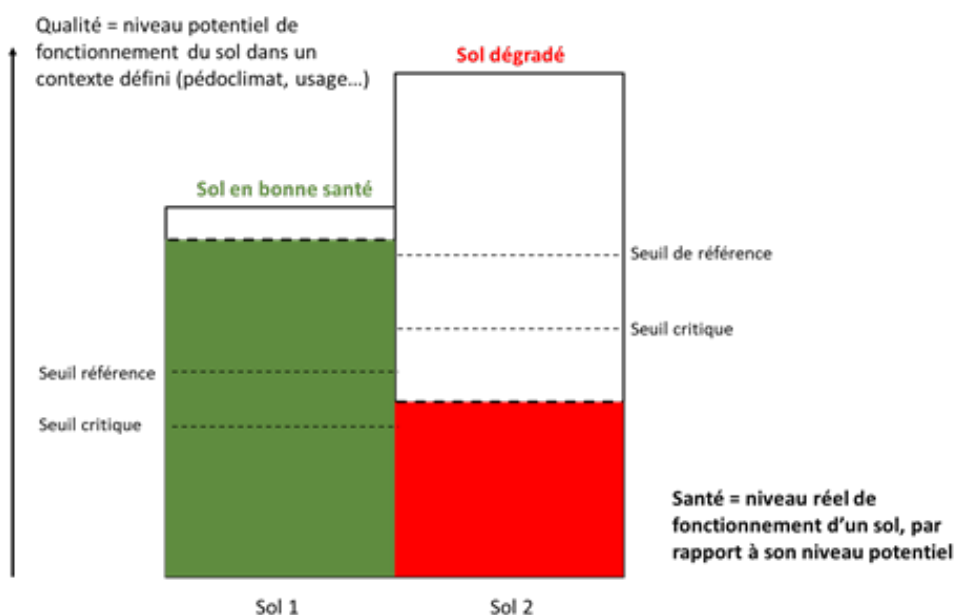
La mesure de l'état de santé des sols et son interprétation sont complexes pour diverses raisons, dont les principales sont présentées ci-dessous :

- Avoir une mesure représentative de la zone étudiée et limiter l'incertitude de la mesure. Pour que la mesure soit fiable, la méthodologie appliquée doit être robuste et standardisée à chaque étape, i.e., prélèvement (nombre et localisation des points, profondeur, périodicité...), préparation et conser-

vation des échantillons et méthodes d'analyses. Les sols sont caractérisés par une hétérogénéité spatiale naturelle (horizontale et verticale), plus ou moins importante, induite par les conditions de leur formation (pédogénèse), sur laquelle se superpose l'impact de l'homme au travers des usages et des pratiques successivement mises en œuvre. Il est essentiel de construire un plan d'échantillonnage qui prenne en compte cette variabilité spatiale, notamment si l'on veut mesurer l'impact d'une pratique et/ou suivre dans le temps l'évolution de l'état du sol. Lors d'un suivi pluriannuel, il est aussi recommandé de réaliser les observations/prélèvements aux mêmes emplacements (géoréférencement des points) et idéalement à la même période.

- Avoir des référentiels d'interprétation robustes. La réalisation d'un diagnostic et le passage au conseil de gestion agroenvironnementale des sols nécessitent d'une part la définition des niveaux d'états "normal" (ou "souhaitable") et "dégradé" des fonctions renseignées par les indicateurs (respectivement, seuils de référence et critique, Figure 2), et d'autre part l'identification des leviers d'action possibles pour atteindre ce niveau "souhaitable". La complexité réside dans le fait que ces niveaux dépendent du potentiel intrinsèque de fonctionnement (et la sensibilité) du sol. Par exemple, le niveau "souhaitable" de carbone organique d'un sol est dépendant de sa teneur en argile granulométrique. Le développement des référentiels nécessite donc l'acquisition d'une grande quantité de données dans des contextes pédoclimatiques diversifiés (voir point d de la partie "Des freins et des leviers à adresser").

Force est de constater, toutefois, que de nombreux processus au sein des sols, souvent issus d'interactions complexes, sont encore mal connus et nécessitent une recherche plus approfondie afin d'affiner la qualité des diagnostics.



Adapté de Kibblewhite et al., 2008.

Figure 2 - Illustration de la notion de santé du sol. Sur la gauche, est représenté un sol (sol 1) en bonne santé (niveau de fonctionnement supérieur au seuil de référence) alors que sur la droite est représenté un sol (sol 2) dégradé (niveau de fonctionnement en-deçà du seuil critique)

### 3. Proposition d'un outil de diagnostic de la santé des sols

Une récente analyse de la littérature scientifique internationale couplée à des échanges avec des experts techniques et scientifiques a permis d'identifier une grande diversité d'indicateurs aux caractéristiques très diverses (Calvaruso et al., 2019). Cette étude a abouti à une première liste de 75 indicateurs (i.e., physiques, chimiques et biologiques ou d'interactions) mobilisables pour évaluer l'état de santé des sols. Cette étude a en particulier montré l'importance de développer un outil intégrant des indicateurs couvrant l'ensemble des composantes physiques, chimiques, biologiques et leurs interactions pour avoir une vision systémique de l'état de santé des sols. Néanmoins, ces indicateurs présentent des niveaux d'opérationnalité variables, notamment en ce qui concerne la robustesse des référentiels d'interprétation, le coût ou la simplicité de mise en œuvre.

Le choix des indicateurs doit être adapté au contexte et aux objectifs de l'évaluation de la santé des sols ainsi qu'aux moyens disponibles. En figure 3, un jeu simple (minimal) et un jeu plus complet permettant de tenir compte d'enjeux spécifiques (ex. : niveau de biodiversité, stockage de carbone, pollutions...) sont proposés. Le jeu simple, dont la mise en œuvre est présentée dans l'encart ci-dessous, a pour but d'apporter un premier niveau d'information sur le fonctionnement des sols. Ce diagnostic de base se caractérise par :

- Un coût raisonnable, de l'ordre de 600 euros par diagnostic, i.e., pour une unité homogène de sol

et pour un horizon superficiel (30 cm), hors temps de travail de l'agriculteur pour les observations, les prélèvements, le conditionnement des échantillons... ;

- Des méthodologies de terrain simples et éprouvées (ex. : test-bêche pour l'analyse de la structure du sol), des analyses physico-chimiques de routine en laboratoire (ex. : pH<sub>eau</sub>, texture, C organique et N total, capacité d'échange cationique,...), et des observations/analyses biologiques sur le terrain et en laboratoire (abondance et diversité des vers de terre, biomasse moléculaire microbienne...);
- Une relative facilité de mise en œuvre et d'interprétation : prélèvements et observations réalisables par l'agriculteur (environ une journée de travail par diagnostic), analyses par l'agriculteur ou le conseiller ou via le support du laboratoire d'analyses.

Lorsque cela est possible, le diagnostic peut aussi s'appuyer sur des bases de données, comme la typologie agronomique de sol Typterres développée dans le cadre du RMT Sol et Territoires <sup>6</sup> qui fournit des informations sur des propriétés des sols (ex. : la texture, l'épaisseur ou la teneur en calcaire).

Ce jeu minimal peut ensuite être complété par des indicateurs plus spécifiques et réalisés sur une plus grande profondeur de sol pour affiner l'analyse en cas de dysfonctionnement observé/mesuré, pour répondre à des objectifs plus spécifiques (ex. : séquestration de carbone, risques de pollution) ou pour s'adapter à des contextes pédoclimatiques particuliers.

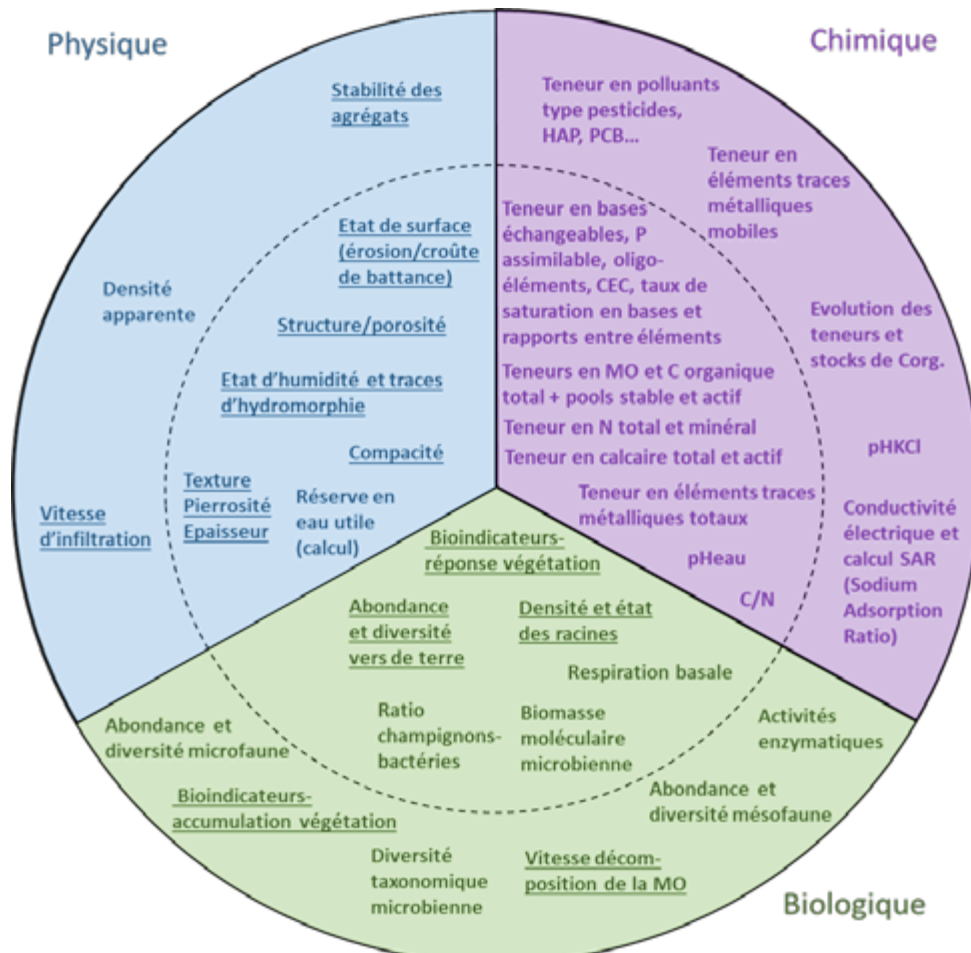


Figure 3 : Indicateurs retenus dans le cadre de l'étude DOUDI-QS (version révisée). Les indicateurs soulignés sont des indicateurs de terrain qui ne nécessitent pas d'équipements spécifiques pour la mesure. Nous proposons la constitution d'un jeu minimal (à l'intérieur du cercle pointillé) et d'un jeu plus complet (à l'extérieur du cercle pointillé).

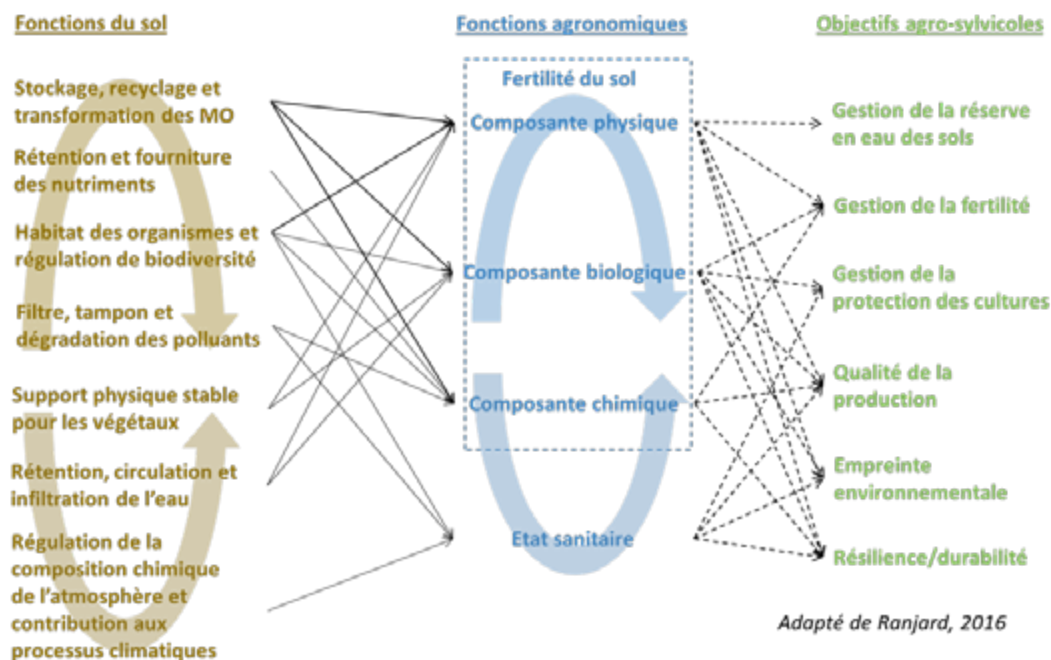
## Le diagnostic à l'aide du jeu simple d'indicateurs

Ce diagnostic comprend :

- **La collecte d'information sur le climat, la topographie, la géologie et la pédologie (si disponible) via les bases de données existantes** : par exemple la 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. **La réalisation de sondages à la tarière hélicoïdale** (0-100 cm si possible) avec observation de la texture, de l'état d'humidité et traces d'hydromorphie (Diagnostic Humus), de la présence de calcaire actif et d'éléments grossiers permet d'appréhender plus finement l'hétérogénéité spatiale du sol de la parcelle ;
- **La collecte d'information sur l'usage des terres et les pratiques** incluant si possible l'historique ;
- **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);
- **Du test-bêche** (0-30 cm) : 3 à 5 points par unité homogène de sol (suivant la surface), 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 à la tige pénétrométrique** : Minimum de 10 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 suivis d'analyses** : Minimum de 5 points de prélèvements (0-30 cm, peut être adapté suivant l'usage et/ou le type d'analyses) par unité homogène de sol puis mélange pour former un échantillon composite, durée 1 heure. L'échantillon composite est ensuite envoyé dans des laboratoires spécialisés pour analyses physico-chimiques (texture, teneur en cations échangeables, en phosphore assimilable et en oligo-éléments, CEC et taux de saturation en bases, pHeau, teneurs en N total et minéral, teneurs en carbone organique total (et MO, par calcul) et différentes formes de C organique, teneur en éléments traces métalliques totaux), et biologiques (respiration basale, biomasse moléculaire microbienne et ratio bactéries/champignons), coût approximatif 400 euro. Attention, l'échantillon de sol pour les analyses biologiques doit être conservé à moins de 4°C et analysée dans les trois à cinq jours après le prélèvement (conservation plus longue pour un échantillon congelé);

*NB : Les temps indiqués pour la réalisation des différentes étapes sont estimatifs et varient évidemment en fonction de la superficie et de l'accessibilité de la parcelle étudiée.*

- Les informations de contexte pédoclimatique et de pratiques collectées permettent de définir un plan d'observation et d'échantillonnage optimal afin que le diagnostic soit le plus représentatif possible de l'état de santé de la parcelle étudiée. Il est à noter qu'une même parcelle peut être scindée en plusieurs unités en fonction de l'hétérogénéité de la parcelle (géologie, pente, typologie de sol, pratiques...) et des objectifs visés. Dans le cas d'une parcelle de vignes, dont les pratiques diffèrent considérablement entre le rang et l'inter-rang (par exemple l'enherbement), il peut être judicieux de prélever dans les deux compartiments et de réaliser deux diagnostics indépendants.
- Les limites de ce diagnostic résultent notamment de la caractérisation insuffisante des horizons de sol plus profonds, partiellement appréhendée par le profil tarière s'il est fait, ce qui est limitant pour l'évaluation du fonctionnement global du sol qui comprend des transferts de matières à l'état solide, liquide et gazeux entre ces horizons. Des alternatives seraient la réalisation de mini-profil ou de fosse pédologique. Mais le coût et la durée du diagnostic augmenteraient considérablement.



Adapté de Ranjard, 2016

Figure 4 : Relations entre fonctions du sol, fonctions agronomiques et objectifs agro-sylvicoles.

#### 4. Les perspectives :

*Des outils de diagnostic et des démarches d'aide à la décision à développer*

Le jeu d'indicateurs utilisé doit permettre d'évaluer le niveau de fonctionnement du sol dans un contexte défini et de guider les gestionnaires vers les usages/pratiques qui permettent de répondre au mieux à leurs objectifs tout en préservant sur le long terme la santé des sols qu'ils exploitent. La figure 4 ci-dessus précise les relations entre les fonctions du sol, les fonctions agronomiques et les objectifs agro-sylvicoles.

Le diagnostic doit s'intégrer dans une démarche comprenant 4 étapes principales (Figure 5 page suivante) :

- (1) Description et analyse de la zone étudiée, et identification des objectifs de gestion ;
- (2) Définition du protocole d'échantillonnage et choix des indicateurs au sein du jeu selon le contexte et les objectifs ;
- (3) Diagnostic de l'état de santé du sol ;
- (4) Recommandations en termes de pratiques visant au maintien ou à la restauration du fonctionnement du sol.

Il n'existe pas de consensus sur les relations quantitatives entre indicateurs et fonctions. Depuis quelques années, en contexte agricole, on observe l'apparition d'outils synthétiques qui permettent d'évaluer le fonctionnement global du sol en agrégeant plusieurs indicateurs physiques, chimiques et dans certains cas biologiques. Ces outils proposent généralement des règles d'agrégation des indicateurs pour aboutir à une notation de la santé des sols (ex. : Global Indice of Soil Quality (GISQ)<sup>7</sup> et Soil Quality Index de l'outil Biofunctool<sup>®8</sup>), à une notation par fonction (ex. : Soil Navigator<sup>9</sup> du projet européen Landmark pour les sols agricoles prairiaux et cultivés) ou à d'autres indicateurs de synthèse

(ex. : indicateurs d' « assurance écologique » et de « fertilité biologique » utilisés dans le cadre du REVA).

La limite majeure de ces approches d'agrégation d'indicateurs est l'importance du dire d'experts dans la pondération des indicateurs et l'interprétation de la ou des notes finales. En effet l'agrégation d'indicateurs peut représenter une perte d'information et affecter l'interprétation du diagnostic. C'est pourquoi, il est clé de conserver les informations élémentaires par indicateur.

*Des innovations technologiques, notamment dans le secteur de la biologie et la mesure in situ*

La recherche internationale a réalisé ces dernières décennies des avancées majeures sur la compréhension des processus régissant le fonctionnement des sols, notamment le rôle central de la dynamique de la matière organique et de l'activité biologique, ainsi que sur l'impact des pratiques sur l'évolution de la santé des sols. Ces progrès sont notamment associés au développement de nouvelles technologies de mesures de terrain ou de laboratoire dont certaines ont abouti à la création de nouveaux indicateurs. La recherche française est à la pointe dans ces domaines avec le développement par exemple d'outils d'analyses de paramètres biologiques (abondance et diversité microbienne, microfaune, mésofaune, macrofaune, activités enzymatiques), de méthodes de terrain et de laboratoire pour l'évaluation de l'activité biologique et de la dynamique de la matière organique (SituResp pour évaluer sur le terrain la respiration basale du sol, la pyrolyse Rock-Eval pour mieux caractériser les différentes formes de carbone, i.e., actif et stable). Ces innovations sont à différents niveaux de maturité, du développement méthodologique à l'intégration dans des outils d'aide à la décision à destination des gestionnaires.

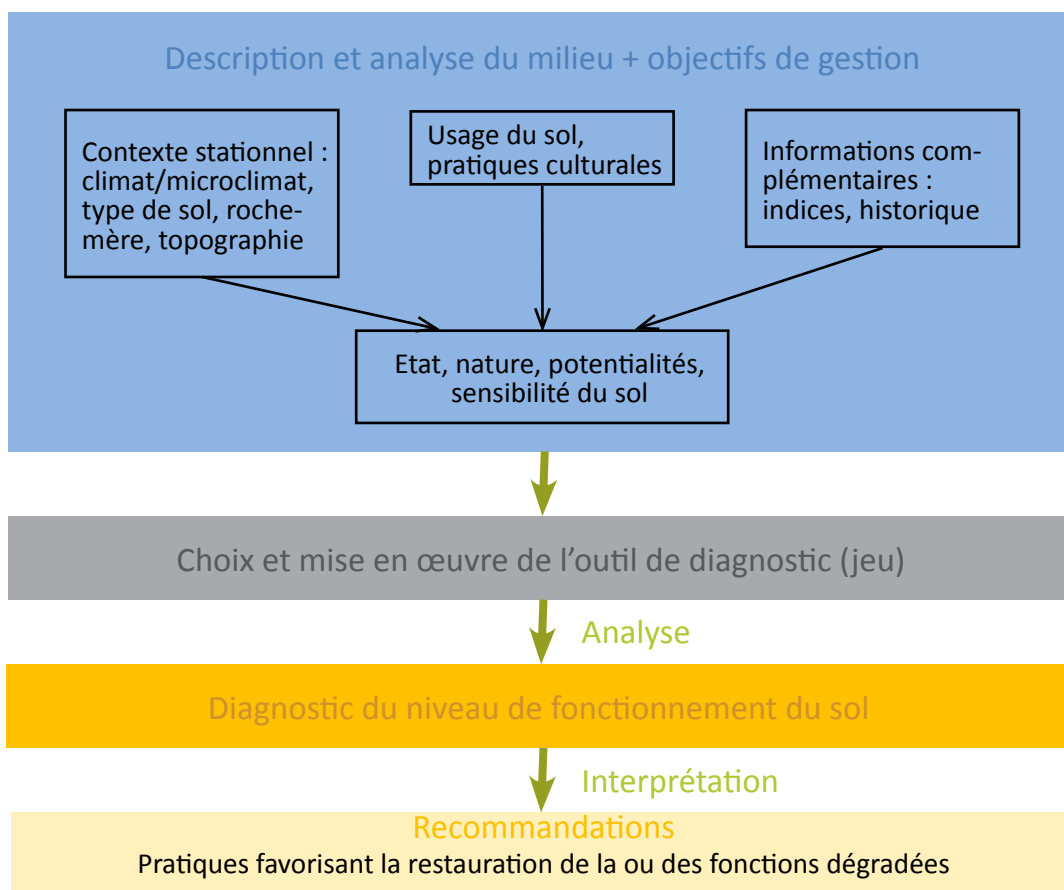


Figure 5 : Intégration du jeu d'indicateurs dans une démarche de diagnostic de la santé des sols

### Des freins et des leviers à adresser

#### a. Déploiement du diagnostic de santé des sols : sensibilisation et information

Pour déployer ce type de diagnostic, il est essentiel de sensibiliser tous les acteurs du monde agricole, et même plus largement les citoyens, au rôle des sols (fonctions et services) et l'impact potentiel de pratiques inadaptées sur leur fonctionnement. Il faut également informer les utilisateurs potentiels sur les outils de diagnostic robustes existants ainsi que les méthodologies de mise en œuvre de ces outils. C'est notamment l'ambition de la plateforme e-sol, une plateforme numérique collaborative et multi-acteurs pour la gestion durable des sols.

Enfin, il est important d'organiser la collecte des données pour implémenter les bases de données et améliorer nos connaissances sur l'état des sols et l'impact des pratiques mais aussi d'affiner les référentiels d'interprétation des outils d'aide à la décision.

#### b. Valider les indicateurs et les maintenir à jour

Les indicateurs retenus dans le jeu minimal/complet doivent 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, et de pratiques

- Adossés à un référentiel d'interprétation (qualitatif ou quantitatif) permettant de diagnostiquer l'état d'un paramètre, d'un processus ou d'une fonction
- Économiquement abordables, avec une valeur de l'information fournie par l'indicateur qui doit être supérieure à son coût d'acquisition
- Opérationnels sur le terrain et/ou au laboratoire (analyses en routine)

En fonction des avancées scientifiques et techniques, de nouveaux indicateurs apparaissent. Il est donc important de maintenir une veille sur ces indicateurs. Par exemple, les attentes sont fortes sur l'évaluation de la diversité fonctionnelle des organismes du sol et sur un indicateur de structure du sol.

Des initiatives aux niveaux français (étude INRAE) et européen (EU Soil Mission) visent à définir une liste des indicateurs clés pour le suivi de la santé des sols avec pour finalité la normalisation de la procédure de diagnostic de la santé des sols.

### c. Travailler sur le coût

L'un des principaux freins à la réalisation d'un diagnostic de la santé des sols basé sur une approche multifonctionnelle est le coût de sa mise en œuvre. L'investissement requis pour le diagnostic doit rester inférieur aux bénéfices résultant des informations acquises. Le diagnostic doit être valorisé auprès des gestionnaires en démontrant que les recommandations issues de ce diagnostic permettent de produire mieux, durablement (notion de résilience, d'assurance écologique) voire d'améliorer la rentabilité économique (économies en engrais, en produits phytosanitaires et en mécanisation induites par l'ajustement des pratiques aux caractéristiques du sol et plus généralement du site). Le coût du diagnostic doit être adapté au contexte et aux objectifs. Les spécificités associées aux parcelles viticoles peuvent générer un surcoût du diagnostic dans la mesure où les rangs et inter-rangs, dont la gestion est souvent différenciée (travail du sol, amendements/fertilisations, traitements phytosanitaires, couverture...), devraient être échantillonnés et analysés séparément. Le coût doit être mis au regard du mécanisme de financement associé à la stratégie appliquée (ex : prix des aides à l'hectare de la PAC dans le cas de la conditionnalité des aides pour le volet agricole). La récente stratégie européenne suggère par exemple que les États membres développent une initiative «Testez votre sol gratuitement». La Commission aidera alors les États membres à mettre en place, avec leurs fonds propres, un système permettant de tester les sols gratuitement au profit des utilisateurs des terres intéressés, qui recevront les résultats des analyses. Dans cette optique, le type de jeu (simple à complet), la méthodologie d'échantillonnage (approche, nombre d'échantillons), les échéances de temps (dans le cas d'un monitoring) devront être ajustés pour répondre au mieux aux objectifs.

### d. Développer les référentiels (mutualisation des données)

Enfin, développer des référentiels nationaux est un enjeu crucial, qui se traduit 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, des bureaux d'étude, des entreprises, lorsqu'elles sont disponibles. Les laboratoires vivants et les observatoires de sciences participatives pourraient également enrichir les bases de données et permettre de mieux cartographier les sols aux échelles locales. Il apparaît toutefois nécessaire de valider la qualité des données en amont de leur exploitation à des fins de recherche ou de conseil. 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). Les conditions juridiques de mise à disposition devront toutefois être clarifiées.

### Références

<sup>1</sup> Les éléments de cet article sont adaptés de : Calvaruso et al., 2019. *Synthèse - Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement*. 21 pages. Ils intègrent des actualisations liées aux connaissances acquises depuis sa publication.

<sup>2</sup> <https://www.ipcc.ch/report/srcc/>

<sup>3</sup> Nkonya et al. (2016), *Economics of Land Degradation and Improvement - A Global Assessment for Sustainable Development*

<sup>4</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ENTXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>

<sup>5</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORF-TEXT000043956924>

<sup>6</sup> <https://www.sols-et-territoires.org/produits-du-reseau/projets-affilies-au-rmt-st/typerres/>

<sup>7</sup> Velasquez et al., 2007

<sup>8</sup> Thoumazeau et al., 2019

<sup>9</sup> <http://www.soilnavigator.eu>