



**HAL**  
open science

## Evaluer la qualité des sols à l'aide d'indicateurs : une revue

Christian Bockstaller, Isabelle Cousin

► **To cite this version:**

Christian Bockstaller, Isabelle Cousin. Evaluer la qualité des sols à l'aide d'indicateurs : une revue. Innovations Agronomiques, 2024, 94, pp.414-430. 10.17180/ciag-2024-vol94-art28 . hal-04724735

**HAL Id: hal-04724735**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04724735v1>**

Submitted on 7 Oct 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



# Evaluer la qualité des sols à l'aide d'indicateurs : une revue

Christian BOCKSTALLER<sup>1</sup>, Isabelle COUSIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, INRAE, LAE, 68000 Colmar, France

<sup>2</sup> INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, France

**Correspondance** : christian.bockstaller@inrae.fr

## Résumé

Le sol est au cœur de l'écosystème agricole et joue un rôle majeur dans la production de biens et dans la fourniture de différents services écosystémiques qui régulent la production. La transition agroécologique passe par une transformation des systèmes agricoles basée une substitution d'intrants par des services écosystémiques. Ceci nécessite d'être soutenu par des démarches d'évaluation tout au long du processus, à la fois pour un diagnostic initial de la situation de départ et pour évaluer les changements produits par la transition. Il n'est généralement pas possible de mesurer directement ni la qualité, ni la santé des sols et il faut donc se fier à des indicateurs indirects d'une évaluation environnementale qui prennent généralement des formes variées. L'objectif de cet article est de dresser la revue des indicateurs disponibles pour évaluer les impacts des pratiques agricoles sur la fertilité, la qualité et la santé des sols. Pour ces enjeux, les indicateurs les plus utilisés reposent sur des mesures de terrain. Ils sont complétés par d'autres indicateurs prédictifs prisés par les agronomes qui cherchent à travailler à l'amélioration des systèmes de culture ou la conception de systèmes innovants. Plusieurs questions restent à approfondir comme celle des valeurs de références, de la qualité prédictive des indicateurs, notamment en lien avec les services écosystémiques comme celui de régulation des bioagresseurs.

**Mots-clés** : transition agroécologique, fertilité des sols, santé des sols, service écosystémique, activité biologique, modèle, indice biologique

## **Abstract: Assessing soil quality by means of indicators: a review**

The soil is at the heart of the agricultural ecosystem and plays a major role in producing and in the provision of the various ecosystem services that regulate production. The agroecological transition involves a transformation of farming systems based on replacing these inputs with ecosystem services. This needs to be supported by assessment methods, both for an initial diagnosis of the situation at the final situation, and of the changes produced by the transition. Clearly, it is not possible to measure soil quality and health directly, which leads to the use of indicators. Those generally take various forms in environmental assessment. The aim of this article will be to produce a review of the indicators available for assessing the impact of agricultural management on soil fertility, quality and health. For these issues, the most commonly used indicators are based on field measurements. Secondly, we will look at the predictive indicators used by agronomists aiming to improve cropping systems or design innovative systems. Several issues remain to be addressed more deeply like the reference value and the predictive quality of indicators in relation to ecosystem services like pest regulation.

**Keywords**: agroecological transition, soil fertility, soil health, ecosystem service, biological activity, model, biological index

## 1. Introduction

Le sol est au cœur de l'écosystème agricole et joue un rôle majeur dans la production de biens et dans la fourniture de différents services écosystémiques qui régulent la production (Obiang Ndong, et al., 2020a). La montée des préoccupations environnementales dans la perspective de la durabilité puis de



la transition agroécologique a ainsi conduit à une croissance exponentielle de publications scientifiques portant sur les liens entre l'état de ce compartiment et la couverture de ces enjeux. Plusieurs concepts clés successifs ont été introduits, avec depuis les années 50 le terme ancien de 'fertilité', terme qui reste le plus utilisé. Dans les années 90, émerge celui de 'qualité des sols' puis de 'santé des sols'. Ces concepts reliés entre eux présentent cependant des nuances. Ainsi, la fertilité des sols a été définie comme l'ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques venant soutenir la croissance des cultures et leur productivité. D'autres enjeux sont venues s'ajouter progressivement comme la qualité des produits et la réduction des impacts environnementaux (Bünemann et al., 2018). Cet élargissement des critères à considérer a conduit au concept de qualité des sols, définie comme la « capacité du sol à remplir ses fonctions pour permettre la production animale et végétale, maintenir la qualité de l'eau et de l'air et soutenir la santé humaine » (Karlen et al., 1997). Le développement du cadre des services écosystémiques, définis comme les processus ou composantes dont l'homme peut tirer un avantage (Tibi & Therond, 2017) a fait émerger le concept de santé des sols. Ainsi au niveau européen un sol est considéré en bonne santé physique, chimique, biologique s'il est en capacité de fournir différents services écosystémiques dont les principaux sont : production de biomasse, protection des masses d'eaux, soutien à la biodiversité, séquestration de carbone.<sup>1</sup> Il est cependant à noter qu'en système anthropisé ce qui recouvre le cas de l'agriculture, une distinction s'impose entre ce qui relève vraiment d'un service écosystémique et ce qui est provient de l'activité de l'homme et découle des apports d'intrants exogènes (Soulé, et al., 2023).

La transition agroécologique vise à transformer les systèmes agricoles pour limiter l'utilisation d'intrants exogènes consommateurs de ressources non renouvelables et nuisibles pour l'environnement, ceci par une substitution de ces intrants par des services écosystémiques (Therond et al., 2017). Une telle évolution ne peut se concevoir que par l'acquisition de nouvelles connaissances sur le fonctionnement agroécologique des systèmes agricoles. Elle conduit à envisager une reconception des systèmes qui aille au-delà d'une amélioration de l'efficacité ou de la simple substitution d'intrants. Cela nécessite d'être soutenu par des démarches d'évaluation tout au long du processus, à la fois pour un diagnostic initial de la situation de départ, mais aussi pour suivre les changements opérés par la transition, pour éventuellement proposer des réajustements de la trajectoire. Les qualificatifs attachés aux sols de 'fertilité', de 'qualité' et de 'santé' ne peuvent généralement pas être appréhendés par une mesure directe, ce qui conduit à devoir se rabattre sur l'utilisation d'indicateurs qui prennent généralement des formes variées en évaluation environnementale (Bockstaller et al., 2015a). L'objectif de cet article sera de dresser une revue des indicateurs disponibles (et mobilisés ?) pour rendre compte des impacts des pratiques agricoles sur la fertilité, qualité et santé des sols. Pour cela, nous nous appuyons notamment sur la revue de Bünemann et al. (2018), et sur notre expertise.

Pour organiser la présentation des indicateurs existants, nous nous appuyons sur la typologie de Bockstaller et al. (2015) qui distingue :

- Les *indicateurs de cause* qui présentent en général l'avantage d'être mis facilement en œuvre (sous réserve que les données soient mises à disposition) mais fournissent une information de faible qualité prédictive sur un effet donné (compaction des sols, érosion, etc.). Ils portent généralement sur des variables causales ou des combinaisons simples de variables causales. Celles-ci touchent aux pratiques ou aux variables pédoclimatiques.
- Les *indicateurs d'effet mesurés*, issus de mesures, comptages ou observations, qui sont généralement bien plus difficiles à appréhender mais donnent une « photo plus précise » de l'effet.
- Les *indicateurs d'effet prédictifs*, issus de modèles opérationnels (avec peu de variables d'entrée accessibles) et des modèles complexes. Ces indicateurs présentent un compromis

<sup>1</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>



entre les deux catégories précédentes, en présentant le double avantage de pouvoir relier les causes aux effets et de mener des évaluations *ex ante* (*a priori*).

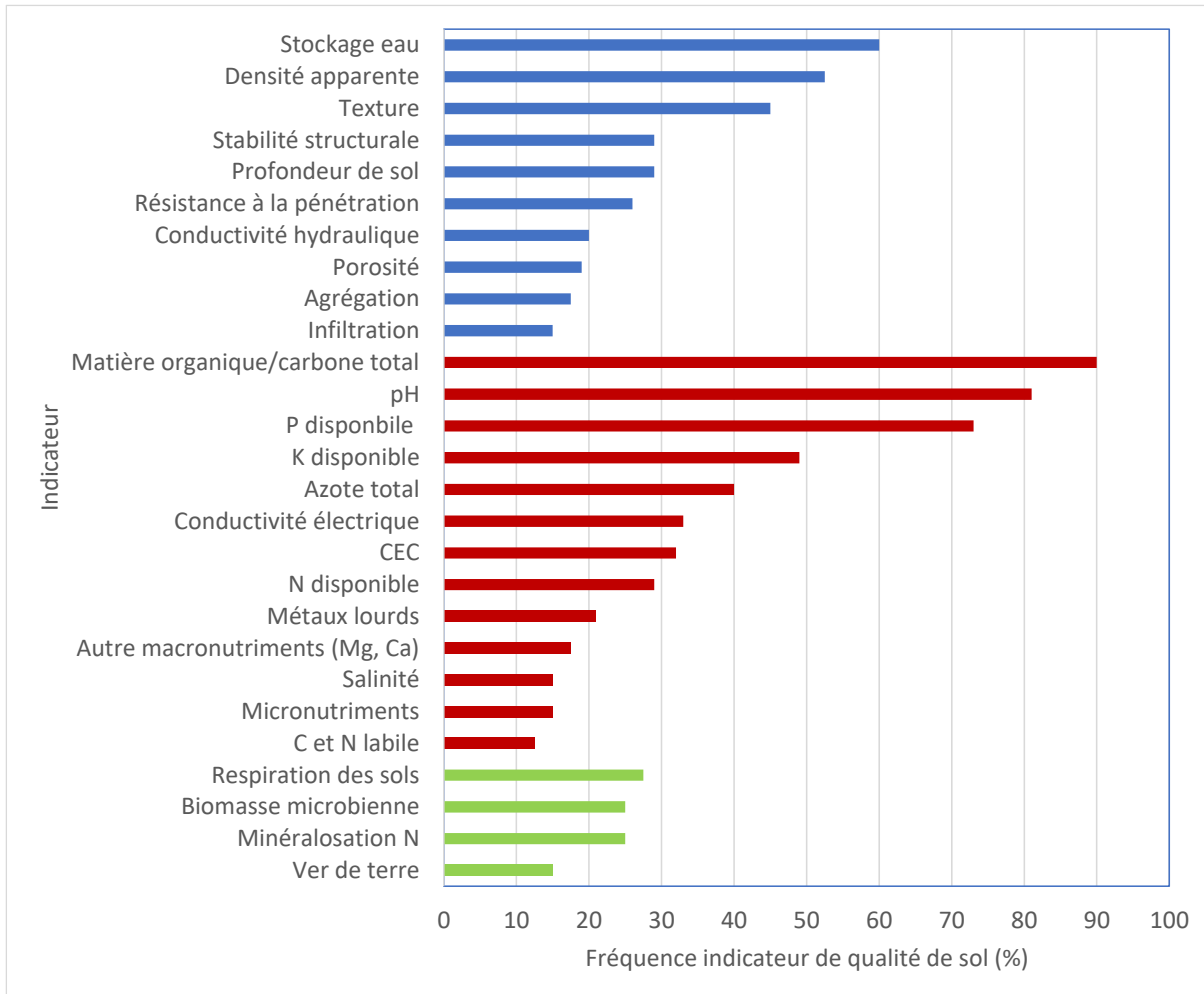
Pour cet enjeu de qualité des sols, les indicateurs les plus couramment utilisés sont les indicateurs reposant sur des mesures de terrain. Dans la suite de cette revue, nous nous intéresserons aux indicateurs prédictifs prisés par les agronomes qui cherchent à travailler à l'amélioration des systèmes de culture ou la conception de systèmes innovants pour répondre aux enjeux de durabilité et notamment via un effort réalisé envers le maintien ou la restauration de la qualité des sols. L'article a donc pour objectif de passer de donner une vue d'ensemble des indicateurs disponibles en faisant un point sur les forces et faiblesses, et les fronts de recherche.

## **2. Les indicateurs d'effet mesurés depuis des indicateurs chimiques et physiques jusqu'aux indicateurs biochimiques et biologiques**

### **○ Les indicateurs chimiques**

Bünemann et al. (2018) dans un article de revue ont identifié et classés les indicateurs de 65 batteries d'indicateurs de qualité des sols en excluant tous les articles centrés juste sur un indicateur biologique (Figure 1). Les trois indicateurs les plus fréquemment utilisés sont des indicateurs chimiques issus des analyses de terre, taux de matière organique (90 % des cas), pH (environ 80 % des cas) et phosphore disponible (un peu plus de 70 %). Deux autres indicateurs chimiques, le potassium disponible et l'azote, total tous deux aussi mesurés au travers des analyses de terres sont présents respectivement dans 40 % et 50 % des cas. Viennent ensuite avec plus de 30 % de cas, les indicateurs reposant sur une mesure de conductivité électrique qui nécessitent une technologie particulière et intègrent les teneurs en argile, en eau et en ions (Busselen, 2018). Leur interprétation reste parfois délicate.

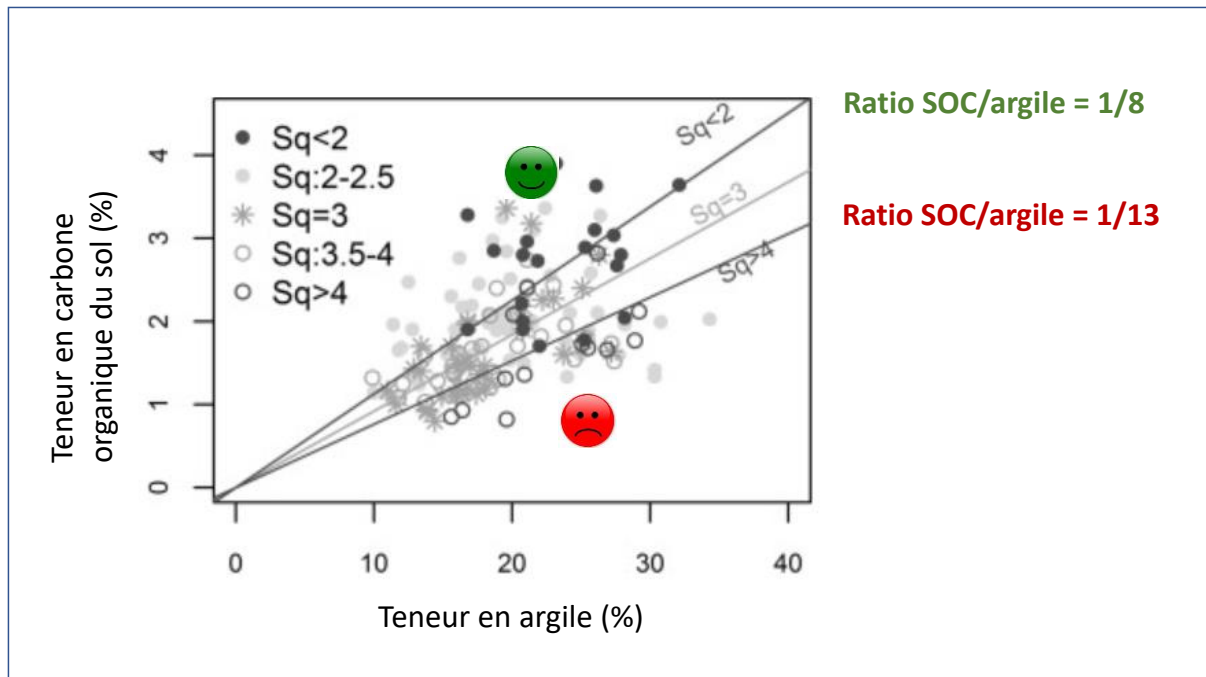
Le taux de matière organique du sol a aussi reconnu par les agriculteurs comme l'indicateur clé pour évaluer la qualité du sol, dans le cadre d'une enquête auprès de 28 agriculteurs du Wisconsin (USA) qui ont aussi classé cet indicateur à la première place parmi 50 propriétés du sol (Romig et al., 1995). L'analyse de terre est la méthode la plus courante au travers de la mesure de la teneur en carbone organique. Une estimation plus grossière peut se faire par des observations visuelles (McGarry, 2005). Ce rôle clé de la matière organique est confirmé par sa position centrale dans la fourniture de services écosystémiques liés au sol tels que la structuration du sol, la maîtrise de l'érosion, la fourniture d'eau et d'azote aux cultures (Therond & Duru, 2019).



**Figure 1** : Fréquence d'apparition des indicateurs de qualité de sol dans la revue de Bünemann et al. (2018) portant sur 65 batteries d'indicateurs. Les articles traitant uniquement d'un indicateur biologique ont été exclus de la revue.

○ **Un indicateur de qualité des sols dérivé de la caractérisation de la matière organique du sol**

Des travaux de Johannes et al., (2017) sur des échantillon de sol de 161 sites en Suisse, il ressort que le ratio teneur en carbone organique du sol (SOC) sur argile est plus discriminant que la teneur en matière organique du sol mesurée pour rendre compte de la qualité de la structure du sol (évaluée avec la méthode VESS cf. Tableau 1). L'approche a été adaptée aux échantillons de sol selon une échelle qualitative allant de 1 (très bonne structure) à 5 (très mauvaise structure). Deux valeurs seuils et une valeur cibles ont été proposées pour ce ratio : Un ratio SOC/argile de 1 à 8 est la limite au-dessus de laquelle, une majorité de sols ont une très bonne structure ( $sq < 2$  sur la Figure 2) tandis que la limite inférieure du ratio de 1 à 13 délimite une majorité de sols ayant une très mauvaise structure ( $sq > 4$ , Figure 2). Cet indicateur a été utilisé par d'autres auteurs (Misslin et al., 2022). Il est à noter que cette étude a été menée sur une gamme de teneur en argile entre 10 et 34 % ce qui exclue les sols lourds comme ceux observés en Lorraine. Il a fait l'objet d'une analyse critique par plusieurs auteurs, notamment par rapport au critère santé des sols (Mäkipää et al., 2024).



**Figure 2 :** Détermination des seuils du ratio « teneur en carbone organique du sol/argile » pour discriminer des sols par rapport à leur qualité (note visuelle Sq entre 1 (très bonne) et 5 (très mauvaise) pour 161 sites en Suisse), (Johannes et al., 2017).

### 2.1. Les indicateurs physiques

Pour la qualité physique, les trois indicateurs les plus cités dans la revue de Bünemann et al. (2018) sont : le stockage de l'eau (60 %), la densité apparente (un peu plus de 50 %) et la texture (45 %). Trois autres indicateurs sont cités un peu moins souvent (20-30 %) : la stabilité structurale, la profondeur de sol et la résistance à la pénétration.

Si la texture est facilement accessible par une mesure d'analyse de sol, les autres le sont beaucoup moins et n'ont pas fait jusqu'à maintenant l'objet de mesures de routine. Des fonctions dites de pédotransfert ont été notamment proposées pour estimer la réserve utile du sol en eau, un des indicateurs de teneur en eau utilisé par les agronomes. Elles font appel à des propriétés du sol relativement faciles à mesurer (teneur en éléments texturaux, matière organique, densité apparente, etc.) et prennent différentes formes : régression linéaire, arbre de décision, réseau de neurone (Wösten et al., 2001). La densité apparente et la résistance à la pénétration sont des indicateurs du tassement du sol mais ne sont pas si faciles à réaliser et à interpréter. Pour pallier ces difficultés métrologiques, plusieurs méthodes visuelles ont été proposées pour estimer la structure du sol avec du matériel d'agronome (couteau, bêche, etc.) que l'on décrit avec des descripteurs visuels comme la forme et l'état des mottes.

Bünemann et al. (2018) ont comparé 7 méthodes (Tableau 1) dont celle du profil cultural développée depuis les années 80 en France. Celle-ci nécessite le creusement d'une tranchée et la méthode allemande une fosse tandis que les autres s'effectuent à la bêche. En plus de la structure, un ensemble de variables supplémentaires sont estimées dont la texture (au toucher), la taille et la forme des agrégats, etc. des variables liées à l'eau, aux traces biologiques (enracinement, vers de terre). La méthode VS-Fast inclut une mesure de pH et de C labile (sur le terrain) et des observations de l'état de surface (croue de battance) comme la méthode VSA. Celle-ci inclut des observations d'érosion et la méthode M-SQR une observation sur la pente.



**Tableau 1** : Caractérisation de 7 méthodes de terrain d'estimation de la structure du sol et d'autres propriétés (adapté de Bünemann et al. (2018))

NOM DE LA METHODE	SOILPAK	PROFIL CULTURAL	VS-FAST	PEERLKAMP*	VSA	VESS	M-SQR
PAYS	Australie	France	Australie	UK	Nouvelle Zélande	Brésil/UK	Allemagne
REFERENCE **	McKenzie (2001)	Roger-Estrade et al. (2004)	McGarry (2006)	Ball et al. (2007)	Sheperd et al. (2008)	Guimarães et al. (2011)	Müller et al. (2014)
OBJECTIF	Structure du sol et compatibilité pour la culture	Structure du sol	Dégradation des terres	Structure du sol	Qualité des sols	Structure du sol	Propriétés des sols en lien avec le rendement potentiel
TYPE DE TEST	Bêche	Tranchée	Bêche	Bêche	Bêche	Bêche	Fosse
TEMPS NECESSAIRE (MN)	25-90	60-180	?	5-15	25	5-15	10-40
AUTRE OBSERVATION QUE LA STRUCTURE							
TEXTURE			X		X		X
TAILLE DES AGREGATS			X	X	X	X	X
FORME DES AGREGATS	X						
CONSISTANCE	X		X				
POROSITE	X			X	X	X	
COULEUR			X		X		
EAU DISPONIBLE INFILTRATION EAU			X				X
DEVELOPPEMENT RACINAIRE	X	X	X	X		X	
PROFONDEUR POTENTIELLE D'ENRACINEMENT					X		X
VERS DE TERRE			X		X		

\* cette méthode est devenue la méthode VESS

\*\* Les références sont à chercher dans (Bünemann et al., 2018). L'année de publication ne correspond pas forcément à l'année de conception de la méthode

## 2.2. Les indicateurs biochimiques et biologiques

Une limitation majeure des indicateurs chimiques les plus utilisés (Figure 1) est leur manque de sensibilité au changement de pratique du fait de leur temps de réponse très étalé. Or les praticiens ont besoin d'indicateurs les alertant précocement pour pouvoir mettre en œuvre des mesures correctives précocement (Christel et al., 2021; Paz-Ferreiro & Fu, 2016). Si les méthodes d'évaluation de la structure du sol permettent d'observer des effets sur la qualité du sol, elles en restent généralement à



des paramètres physiques qui n'intègrent pas le fonctionnement global du sol. Par ailleurs elles demandent un certain investissement et savoir-faire et sont destructives. Ceci a conduit depuis 40 ans à des travaux sur les indicateurs biotiques faisant appel soit à des mesures des activités enzymatiques du sol ou de l'abondance et la diversité d'organismes vivants. Bünemann et al. (2018) dans son article de revue ont identifié les quatre les plus utilisés, mais bien moins que les indicateurs chimiques et physiques (Figure 1) : la respiration microbienne (environ 30 %), la biomasse microbienne, la minéralisation de l'azote (toutes deux autour de 25 %) et l'abondance/diversité des vers de terre (15 %).

Le carbone de la biomasse microbienne mesuré au moyen d'une méthode de fumigation au chloroforme a été considéré dans les années 90 par Chaussod (1996) comme un des seuls indicateurs biologiques fiable, opérationnel, et interprétable. Cet indicateur a aussi été exprimé de manière relative par rapport à la quantité de carbone organique. Ainsi, le quotient microbien rend compte de la disponibilité de substrat organique pour le compartiment microbien (Chaussod, 1996; Paz-Ferreiro & Fu, 2016). Pour la respiration microbienne mesurée par les émissions de CO<sub>2</sub> par quantité de sol, un indicateur basé sur le quotient métabolique a aussi été développé et il exprime un taux de renouvellement de la biomasse microbienne. Un certain nombre d'activités enzymatiques (protéase, uréase, phosphatase, etc.) ont fait l'objet d'un développement pour en faire des indicateurs de qualité biologique des sols (Petitjean et al., 2019). Pour ces différents indicateurs des seuils ont été fixés même s'ils doivent encore être précisés pour les activités enzymatiques. Ainsi pour le quotient microbien, un seuil de 2 % a été proposé, en dessous duquel le sol est en situation d'épuisement de la matière organique. On conçoit aisément que cette batterie de mesures qui rend compte à la fois de la vie biologique du sol et de la restitution de nutriments minéraux à disposition pour les plantes (à travers l'activité enzymatique microbienne) puisse servir d'évaluation objective du potentiel d'activité biologique, très en phase avec les attentes de l'agroécologie.

Les progrès des techniques de biologie moléculaire, notamment la démocratisation des techniques de PCR permettent aujourd'hui de doser les quantités d'une séquence génétique, notamment des régions du gène ARNr 16S pour les bactéries, ce qui a permis d'estimer de manière plus facile et plus rapide qu'avec l'approche par fumigation les tailles respectives des compartiments bactérien et fongique. De même, les techniques de pyroséquençage permettent d'avoir accès à la diversité totale des communautés microbiennes. Les approches de bioinformatique développées en parallèle permettent des analyses de données très puissantes sur de larges jeux de données, au niveau taxonomique notamment. Ainsi les communautés bactériennes ont été cartographiées au niveau de France via les échantillons du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols et groupés en 16 habitats en fonction i) du pH, ii) du ratio C/N et iii) du type d'occupation des sols (Karimi et al., 2020). D'autres études ont abordé une dimension fonctionnelle pour étudier les réseaux d'interactions des bactéries via des études de co-occurrence, ce qui a permis de différencier des structures de réseau qui se différencient selon l'occupation du sol (forêt, prairie, grande culture, viticulture), (Karimi et al., 2019), et distinguent même si le système de culture est biologique ou conventionnel, labouré ou pas (Hartman et al., 2018). Dans tous les cas, bien que ces approches moléculaires toujours plus poussées ouvrent de nouveaux champs d'investigation, leur qualité prédictive fait encore l'objet de discussions (Bünemann et al., 2018).

De la revue de Bünemann et al. (2018), il ressort encore que d'autres indicateurs reposant sur des comptages et identification d'organismes comme les vers de terre, sont aussi couramment utilisés (cf. Figure 1). En France, l'analyse de ce groupe taxonomique est utilisée avec d'autres taxons, notamment dans l'Observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB)<sup>2</sup>, le réseau des 500 parcelles dans le cadre du plan Ecophyto, évaluant les effets non intentionnels de pesticides (500 ENI)<sup>3</sup>, l'Association Noé<sup>4</sup> comme au niveau Européen, le projet BioBio (Bockstaller et al., 2019). Les données sur d'autres organismes du

<sup>2</sup> <https://www.observatoire-agricole-biodiversite.fr/>

<sup>3</sup> <https://ecophytopic.fr/pic/exposition-et-impacts/reseau-500-eni-biovigilance>

<sup>4</sup> <https://noe.org/noe-publie-recueil-indicateurs-biodiversite-agricoles>





sol sont exploitées tel que les nématodes, micro et mésoarthropodes (collembolles, etc.) et macroarthropodes (carabes, staphylins, etc.). Une méta-analyse récente comparant les effets des formes d'agriculture, conventionnelle, biologique et de conservation sur la qualité des sols donne une vue élargie de leur utilisation (Christel et al., 2021). Ces mesures de terrain nécessitent des techniques de piégeage plus ou moins élaborées et un travail d'identification encore coûteux en temps et nécessitant des compétences spécifiques pour l'identification au niveau de l'espèce. On peut penser que les progrès du numérique pourraient permettre de progressivement limiter ces contraintes méthodologiques. Il peut y avoir à engager la réflexion sur comment la connaissance étendue de la biodiversité hébergée d'un sol pourra être mise à profit de tous les agriculteurs pour les appuyer dans leur choix de conduite. Actuellement on est en mesure de montrer que des pratiques agricoles plus ou moins intensives laissent une signature sur le compartiment vivant. En revanche, la capacité à montrer que la biodiversité présente dans un champ offre une garantie que les régulations naturelles seront suffisantes pour permettre une gestion agroécologique des parcelles reste largement à mener.

### **2.3. Les indices de qualité de sol**

La revue de Bünemann et al. (2018) portait sur des études utilisant un ensemble d'indicateurs chimiques, physiques et biologiques, de même que l'étude de Petitjean et al. (2019) comprenait la mesure de plusieurs activités enzymatiques. Un autre exemple est celui de Biofunctool® qui repose sur 12 indicateurs en lien avec trois « fonctions agrégées » du sol : maintenance de la structure du sol, cycle des nutriments, transformation du carbone (Thoumazeau et al., 2019). De telles approches multi-indicateurs soulèvent toujours la question de comment on synthétise des résultats qui peuvent être contradictoires. Une possibilité est une approche multivariée telle que mise en œuvre par Petitjean et al. (2019), mais ces résultats dépendront de la gamme de variation des indicateurs échantillonnés. Pour pallier cet inconvénient, d'autres auteurs ont proposé d'agrèger plusieurs indicateurs en des indices composites. Des exemples tirés de l'article de revue de Paz-Ferreiro & Fu (2016) sont présentés dans le Tableau 2. Cela vient illustrer les niveaux de complexité avec des calculs de moyennes géométriques, de somme pondérée, et de formules plus complexes. En revanche, deux approches d'évaluation visuelle de structures des sols décrites par Bünemann et al. (2018), VS Fast et M-SQR reposent sur une somme pondérée des notations des critères visuels. Toutes ces approches réussissent à fournir une valeur unique pour qualifier la qualité de sol. Cela facilite le suivi dans le temps et la comparaison entre situations mais questionne aussi la validité scientifique des pondérations et le degré de précision de la valeur prédictive.



**Tableau 2 :** Exemples d'indice biologique adapté de (Paz-Ferreiro & Fu, 2016). Les références sont à chercher dans l'article d'origine.

REFERENCES	EXPRESSION MATHÉMATIQUES	UNITE
HINOJOSA ET AL. (2004)	$GMea = (\text{acid phosphatase} \times \text{alkalyne phosphatase} \times \beta\text{-glucosidase} \times \text{arylsulphatase} \times \text{urease})^{1/5}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .
BASTIDA ET AL. (2006)	$MDI = [0.89(1/(1 + (\text{dehydrogenase}/4.87)^{-2.5})) + [0.86(1/(1 + (\text{WSCh}/11.09)^{-2.5})) + [0.84(1/(1 + (\text{urease}/1.79)^{-2.5})) + [0.75(1/(1 + (\text{WSC}/95.03)^{-2.5})) + [0.72(1/(1 + (\text{respiration}/18.01)^{-2.5}))]$	dehydrogenase and urease ( $\text{mg product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), WSCh and WSC ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) respiration ( $\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ soil}$ ).
PUGLISI ET AL. (2006)	$AI_1 = -21.30 \cdot \text{arylsulphatase} + 35.2 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 10.20 \cdot \text{phosphatase} - 0.52 \cdot \text{urease} - 4.53 \cdot \text{invertase} + 14.3 \cdot \text{dehydrogenase} + 0.003 \cdot \text{phenoxidase}$ $AI_2 = 36.18 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 8.72 \cdot \text{phosphatase} - 0.48 \cdot \text{urease} - 4.19 \cdot \text{invertase}$ $AI_3 = 7.87 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 8.22 \cdot \text{phosphatase} - 0.49 \cdot \text{urease}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .
GARCIA-RUIZ ET AL. (2008, 2009)	$GMea = (\text{acid phosphatase} \times \text{alkalyne phosphatase} \times \beta\text{-glucosidase} \times \text{arylsulphatase} \times \text{dehydrogenase} \times \text{PN})^{1/6}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .
PAZ-FERREIRO ET AL. (2012B)	$GMea = (\text{phosphatase} \times \beta\text{-glucosidase} \times \text{arylsulphatase} \times \text{dehydrogenase})^{1/4}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

\*GMea : moyenne géométrique pour plusieurs activités enzymatiques ; MDI : indice microbiologique de dégradation des sols ; WSCh : carbohydrates solubles dans l'eau ; WSC : carbone soluble dans l'eau ; PN : Taux potentiel d'oxydation d'ammonium du sol ; AI : indice d'activité enzymatique

#### 2.4. Les indicateurs d'effet prédictifs

Pour l'évolution de la matière organique des sols, Manzoni & Porporato, (2009) ont recensé 74 modèles de prédiction dont celui de Hénin Dupuis en 1945. De même, la contribution de l'érosion à la dégradation des sols et de leur qualité a aussi été largement couverte. Ainsi, 435 modèles et leurs différentes versions ont été revus par Borrelli et al., (2021). Il existe en revanche bien moins de modèles pour la modélisation de l'évolution de la structure du sol (Roger-Estrade et al., 2009).

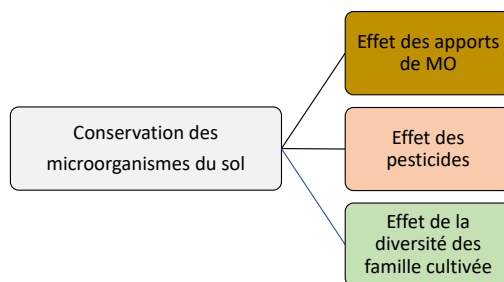
En parallèle à tous ces travaux réalisés par des spécialistes de la qualité des sols, les agronomes impliqués dans l'évaluation des systèmes de cultures ont développé des indicateurs prédictifs reposant sur des modèles simplifiés pour relier les pratiques agricoles à leurs effets sur les composantes de la qualité des sols, notamment biologiques des sols. Plusieurs indicateurs plus ou moins apparentés ont été développés à l'aide de l'outil DEXi (Bohanec et al., 2008) pour évaluer les impacts directs au champ, ceci pour accompagner des travaux de conception de systèmes innovants. D'autres travaux se sont inscrits dans le champ de l'analyse de cycle de vie (ACV) ce qui a nécessité des approches plus quantitatives. En effet l'ACV traite des impacts environnementaux tout au long du cycle d'un produit, procédé incluant les impacts directs dus à la production mais aussi aux impacts indirects, en amont pour la production des intrants et en aval liés à l'utilisation du produit et au traitement des déchets. L'ACV permet ainsi de conduire des bilans environnementaux globaux et de repérer des transferts d'impact le long du cycle de vie. Elle repose sur un inventaire des émissions, un degré de consommation des ressources et une intégration des autres effets des activités (humaines), le tout agrégé dans un indicateur d'impact.



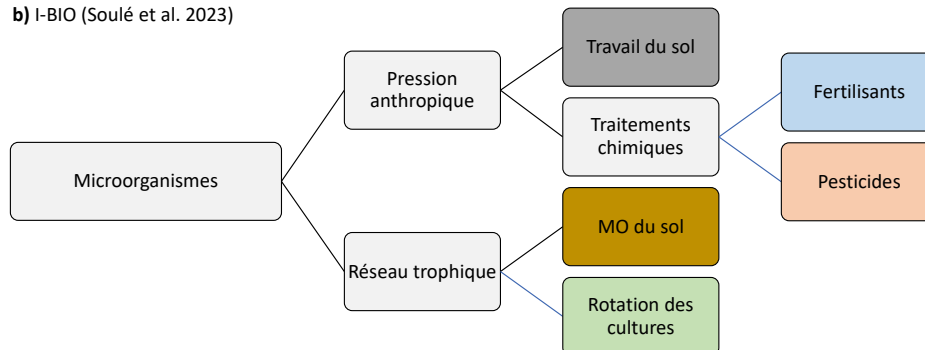
## 2.5. Les indicateurs développés avec l'outil DEXi

La Figure 3 vient souligner une prise en compte croissante des mécanismes impliqués dans le fonctionnement du sol, depuis l'approche développée pour MASC 2.0 (Craheix et al., 2012) ou I-BIO (Soulé, Hawes, et al., 2023), et DEXiSol (Thibault et al., 2018). La matière organique du sol (avec ou sans apports), les pesticides et la diversité des cultures sont pris en compte par les trois méthodes. Dans I-BIO et DEXiSol, l'effet de la fertilisation et du travail du sol sont aussi intégrés. Dans I-BIO, il n'est pas fait de différence entre les communautés bactériennes et fongiques alors que DEXiSol les différencie et adapte les variables suivies en conséquence. En revanche, I-BIO distingue les effets directs sur le réseau trophique des pratiques exercés par le travail du sol et les intrants, des effets indirects via la matière organique du sol et la diversité des substrats racinaires des cultures de la rotation. Un gradient similaire, voire plus important peut être observé pour la macrofaune du sol. Il est à noter que DEXiSol intègre aussi des indicateurs pour la fertilité organique, phosphatée et acido-basique comme le fait MASC 2.0.

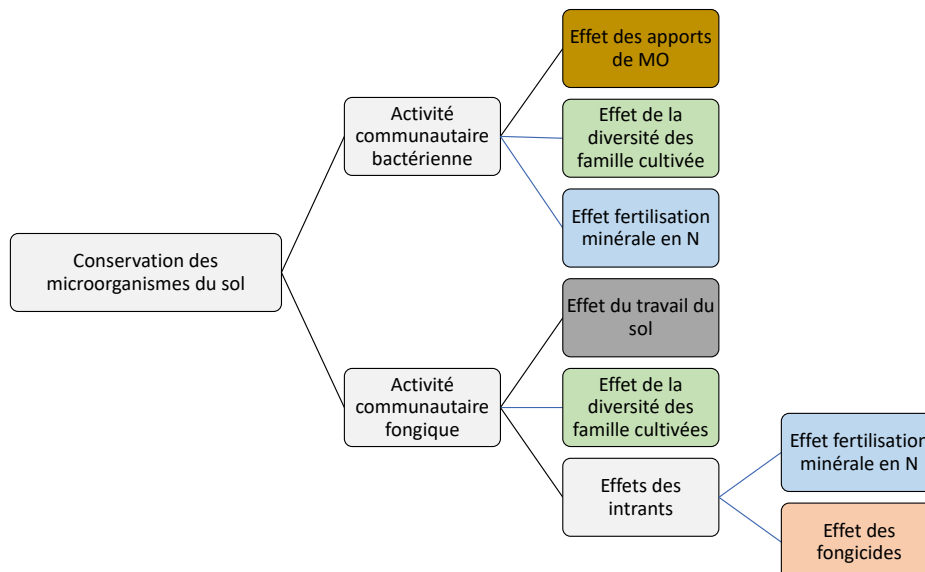
a) MASC 2.0 (Craheix et al. 2012)



b) I-BIO (Soulé et al. 2023)



c) DEXi sol (Thibault et al. 2018)





**Figure 3** : Structure de trois indicateurs prédictifs évaluant les impacts des pratiques agricoles sur les microorganismes du sol, basés sur l'outil DEXi (arbres de décision avec règle de décision « si alors ») et classes qualitatives (ex : faible/moyen/élevé), (Bohanec et al., 2008). MO : matière organique.

## **2.6. Indicateurs de qualité de sol proposés en analyse de cycle de vie (ACV)**

Nous avons recensé deux approches très différentes, développées dans le cadre de l'analyse de cycle de vie. La méthode SALCA soil quality (SALCA-SQ) développée à Agroscope Zurich repose sur une prise en compte d'un grand nombre de pratiques et quelques variables du milieu qui génèrent des notes d'impacts selon des règles de décision simplifiée, elles-mêmes agrégées en 9 indicateurs d'impacts, trois couvrant la dimension physique, trois la dimension chimique et trois la dimension biologique (Oberholzer et al., 2012). A l'inverse de cette approche simplifiée, Garrigues et al., (2012) à INRAE Rennes ont adaptés des modèles plus ou moins mécanistes pour 3 impacts, le modèle Roth-C pour la matière organique, RUSLE pour l'érosion et COMPSoil pour la structure du sol. Dans tous les cas, ces approches ne portent que sur les impacts directs au champ et peuvent être mises en œuvre dans un contexte hors ACV.

## **2.7. Les indicateurs de services écosystémiques de sol**

Comme évoqué en introduction<sup>1</sup>, les services écosystémiques (SE) sont au centre de la définition de la santé des sols portée au niveau européen. Dans la revue d'Obiang Ndong, et al. (2020a), la couverture d'une production agricole revient dans 100 % des articles, la régulation du climat dans 83 % des articles, la régulation de la quantité d'eau dans 65 % des articles, les aspects récréatifs et touristiques dans 55 % des articles, la régulation des nutriments dans 43 % des articles, la maîtrise de l'érosion dans un plus de 30 % des articles. Dans une application au cas des grandes cultures dans la zone Centre-Nord de France, Obiang Ndong, Villerd, et al., (2020b) ont prédit à l'aide du modèle STICS la production agricole et calculé 5 indicateurs de SE liés au sol : la quantité d'azote fournie aux cultures, la quantité d'eau (verte) fournie aux cultures, la quantité d'eau (bleue) drainée, la quantité d'azote non lixiviée et la quantité de carbone séquestrée. Ils ont identifié à l'aide d'un arbre de régression multivarié 5 profils de fourniture de SE et défini les seuils minimaux à respecter sur le territoire étudié, soit une surface en culture intermédiaire de plus ou moins 16 %, un pH du sol supérieur à 6,75 et pour les situations à plus de 16 % de culture intermédiaire et un pH supérieur à 6,75, une fréquence de plus ou moins 36 % en betterave sucrière dans la rotation.

Dans le cadre méthodologique associant indicateurs d'impacts et de service écosystémique Soulé, Charbonnier, et al. (2023) ont utilisé le modèle AMG (Clivot et al., 2019) pour évaluer la capacité de séquestration du carbone, des indicateurs semi-quantitatifs notant le SE potentiel lié à la rotation des cultures pour la structure du sol, la protection contre l'érosion, la fourniture d'azote, la consommation d'eau (Keichinger et al., 2021), et un indicateur nouvellement développé pour évaluer l'albedo du sol et du couvert, c.-à-d. en peu de mots la capacité du sol et du couvert à renvoyer le rayonnement ce qui a un effet positif sur le bilan de gaz à effet de serre. A travers ce dernier développement, on voit donc se préciser le lien que des caractéristiques d'utilisation du sol et des intrants peuvent entretenir avec un effort de limitation du changement climatique.

## **3. Discussion**

Cet article aborde la question de l'évaluation de la qualité et la santé des sols par des indicateurs, toute mesure directe étant inaccessible vu la complexité du concept. Cette thématique a été jusqu'à maintenant peu prise en compte dans les méthodes d'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes agricoles. Une revue de 262 méthodes d'évaluation environnementale des systèmes agricoles a montré que dans les dix thématiques les plus traitées, deux étaient liées à la qualité des sols, mais que celle-ci n'était pas abordée telle quelle (Soulé et al., 2021). Ainsi l'érosion des sols était



classé cinquième dans le top 5 après la biodiversité, les gaz à effet de serre, la gestion des pesticides et des fertilisants. La matière organique des sols venait en neuvième position, corroborant les observations de Bünemann et al. (2018). Ainsi l'évaluation de la qualité des sols a fait surtout l'objet de travaux de spécialistes car les interactions entre propriétés de sol sont complexes (Garrigues et al., 2012).

Nous avons basé cette revue sur la typologie des indicateurs de Bockstaller et al. (2015) qui différencient les indicateurs de cause et d'effet, et dans cette dernière catégorie, les indicateurs d'effet mesurés et les indicateurs d'effet prédictifs tirés des modèles. Nous avons laissé de côté les indicateurs de cause qui ont une faible valeur prédictive (voir plus bas cette question) et sont reliés à différents impacts. Au sein de chaque catégorie, il existe une diversité d'indicateurs comme cela a été détaillé en début d'article pour la catégorie des indicateurs que l'on peut approcher par des mesures directes. Les chercheurs ont proposé de nombreux modèles pour rendre compte des composantes physico-chimiques sur la qualité des sols (surtout appréhendée via la matière organique et la sensibilité à l'érosion). Leur application ne reste pas toujours facile même si certains ont fait l'objet d'une adaptation à une utilisation par les praticiens tel AMG pour le carbone du sol (Bouthier et al., 2014). La dimension biologique a été très peu pris en considération en raison de la complexité des processus impliqués. Quelques approches d'indicateurs prédictifs sont disponibles et portent sur l'évaluation de l'impact des pratiques sur des composantes biologiques et physico-chimiques (cf. Tableaux 3 et 4).

Face à ce foisonnement, la question du choix du type d'indicateurs et des indicateurs proprement dits se pose aux utilisateurs potentiels et selon les finalités poursuivies. Plusieurs articles insistent sur la nécessité de définir précisément la situation d'usage ou encore les choix préalables de chaque utilisateur pour orienter le choix et aider à trouver une méthode qui réponde aux besoins exprimés (Bockstaller et al., 2015; Leclerc et al., 2011). La finalité de l'évaluation et les bénéficiaires concernés constituent les deux descripteurs importants de l'usage. Ainsi si la finalité est de rendre compte d'une action visant à réduire les impacts environnementaux, ou faire un suivi de l'évolution d'un état de l'environnement, des indicateurs d'effets mesurés sont certainement les plus appropriés à mettre en œuvre. En effet, l'objectif de ces indicateurs est de fournir une « photo aussi juste que possible » de la réalité. Dans un second temps, d'autres questions permettront d'affiner le choix des méthodes/indicateurs, et notamment celle des échelles, nombres de parcelles à évaluer. De même au niveau temporel, il est important de se poser la question du temps de réponse de la variable derrière l'indicateur qui permet de mettre en évidence des effets. Selon cet objectif, l'intérêt des indicateurs biologiques prévaut sur les indicateurs chimiques ou physiques qui sont peu réactifs (Christel et al., 2021; Paz-Ferreiro & Fu, 2016). Enfin, l'utilisateur devra composer avec les moyens dont il dispose en temps et en argent. En revanche, si l'utilisateur est engagé dans un travail de conception de nouveaux systèmes de culture ou d'accompagnement des agriculteurs dans une démarche de progrès, des indicateurs prédictifs permettant de relier les impacts aux causes lui seront bien plus utiles, notamment dans une phase d'évaluation *ex ante* ou *a priori* sur des systèmes virtuels. De telles approches lui permettront d'identifier les pratiques à améliorer ou de répondre à des questions du type « que se passe-t-il si je change telle pratique ? ».

Cependant, pour qu'un indicateur puisse être utilisé, il faut qu'il puisse être interprété et qu'une valeur de référence soit disponible (Bünemann et al., 2018). Pour les indicateurs chimiques, des valeurs seuils ont été proposées depuis bien longtemps avec des révisions à différentes périodes, en fonction de l'évolution de l'état des connaissances et des objectifs fixés aux systèmes agricoles. Ainsi avec la nécessité de réduction des intrants imposée à la fois par des contraintes économiques et environnementales, les seuils de compensation des exportations en éléments P et K ont été largement diminués (Jordan-Meille et al., 2021). Pour des indicateurs biologiques et des indices, le manque de références constitue une des principales limitations. Or, il est établi que dans tous les cas, ces références dépendent des conditions pédoclimatiques et de la situation d'usage. Cela demande donc un investissement dans des campagnes de terrain pour établir des références qui restent cependant le



plus souvent statistique (valeur moyenne, médiane, quartile). Cela pose la question de la signification de cette référence, « être meilleur ne signifie pas être durable ». Le travail de Johannes et al., (2017) est un exemple de tentative d'établir les seuils sur des valeurs absolues fondées sur des mesures de terrain, bien qu'il ait fait l'objet de critiques entre temps .

Un autre point soulevé par Bünemann et al., (2018) est celui de la validité ou qualité prédictive des indicateurs, c.-à-d. le lien entre la valeur de l'indicateur et un état ou processus mesuré expérimentalement. Cette question se pose tout particulièrement pour les approches basées sur la biologie moléculaire. De manière générale, il est rare que cette étape de cadrage de la validité soit mise en œuvre. Quelques exceptions sont à noter. Van Eekeren et al., (2010) ont identifié sur 20 parcelles en prairies des indicateurs qui pouvaient être reliés aux services écosystémiques liés aux sols : maintien de la structure du sol, approvisionnement en eau et en nutriments, production agricole. Comme exemple, l'activité des vers de terre a été reliée à la maintenance de la structure du sol, tandis que la teneur en matière organique et la réserve en eau à la production en herbe. Pour les indicateurs prédictifs utilisant la méthode DEXi, seuls Soulé, Hawes, et al. (2023) ont confronté les résultats des indicateurs à des mesures de terrain. Ils ont observé une corrélation qualitative entre les sous indicateurs retraçant l'effet sur les microorganismes ou les vers de terres et comptages de ces organismes au champ. De même, SALCA-SQ (Oberholzer et al., 2012) a été confronté à des données d'un essai long-durée en Suisse et à des calculs pour des itinéraires techniques types pour évaluer la cohérence des sorties de l'indicateur. Une analyse très poussée a été menée, tenant compte aussi de la simplicité du modèle et des jeux de données. Globalement, l'indicateur permet de différencier les situations avec fumure organique des situations avec fumure minérale ou sans apports de fertilisants conformément aux mesures de terrain.

#### 4. Conclusion

En conclusion, l'offre en indicateurs basée sur de mesures de terrain est riche et comprend par ailleurs quelques indicateurs prédictifs, plus à destination des agronomes travaillant sur la conception de nouveaux systèmes de culture. Un point important est que tout utilisateur potentiel devra clarifier ses besoins et sa situation d'usage (finalité, échelle, moyens, etc. La méthode Biofunctool® est une proposition avec une description de protocoles précis et abordables qui relèvent du domaine de la R&D (Thoumazeau et al., 2019). Les agriculteurs qui n'ont pas le temps pour mettre en œuvre de telles mesures se tourneront plutôt vers des offres de service proposées par des laboratoires comme celles proposée par Auréa issu d'un projet de R&D mené avec Arvalis et d'autres partenaires<sup>5</sup>. Si ces méthodes reposent sur un ensemble d'indicateurs opérationnels, le traitement des questions d'agrégation et de l'étude des synergies et antagonismes entre ces indicateurs reste un chantier à poursuivre. Par ailleurs l'évaluation des fonctions telle que la régulation des bioagresseurs du sol reste un front de recherche de même que les clés d'interprétation des énormes masses de données fournies par les nouvelles approches moléculaires. Finalement, l'acquisition des références sur la contribution du sol et la manière de fiabiliser les SE qui lui sont assez directement liés, reste un défi en l'absence de conduites agroécologiques généralisées.

---

<sup>5</sup> <https://www.aurea.eu/conseil-2/agroecosol-2/>

**Ethique**

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

**Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles**

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

**Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.**

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

**ORCID des auteurs**

CB : : 0000-0001-8880-4908

IC : 0000-0002-8114-7113

**Contributions des auteurs**

CB : conceptualisation, rédaction, édition, IC : conceptualisation

**Déclaration d'intérêt**

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

**Remerciements**

Les auteurs remercient le relecteur qui a contribué à améliorer et enrichir l'article.

**Déclaration de soutien financier**

Aucun



## Références bibliographiques

- Bockstaller, C., Feschet, P., & Angevin, F. (2015a). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *OCL - Oilseeds and Fats*, 22(1). <https://doi.org/10.1051/ocl/2014052>
- Bockstaller, C., Feschet, P., & Angevin, F. (2015b). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oléagineux Corps Gras Lipides*, 22(1). <https://doi.org/10.1051/ocl/2014052>
- Bockstaller, C., Lassere-Joulin, F., Meiss, H., Sausse, C., van der Werf, H., Denoirjean, T., Ranjard, L., Angevin, F., Manneville, V., Michel, N., Tosser, V., & Plantureux, S. (2019). Les indicateurs de biodiversité pour accompagner les agriculteurs : embarras du choix ou pénurie ? *Innovations Agronomiques*, 75, 73–86.
- Bohanec, M., Messean, A., Scatasta, S., Angevin, F., Griffiths, B., Krogh, P. H., Znidarsic, M., & Dzeroski, S. (2008). A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling*, 215(1–3), 247–261. <https://doi.org/doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.02.016>
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment*, 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146494>
- Bouthier, A. , Duparque, A., Mary, B., Sagot, S., Trochard, R., Levert, M., Houot, S., Damay, N., Denoroy, P., Dinh, J.-L., Blin, B., & Ganteil, F. (2014). Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. *Innovations Agronomiques*, 34, 125–139.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2018.01.030>
- Busselen, T. (2018). Cartographie de la conductivité électrique de la zone racinaire du sol par géoradar aéroporté opérant à basses fréquences. Université catholique de Louvain.
- Chaussod, R. (1996). La qualité biologique des sols : Évaluation et implications - AFES - Association Française pour l'Étude du Sol. *Etude et Gestion Des Sols*, 3, 261-é78. <https://www.afes.fr/ressources/la-qualite-biologique-des-sols-evaluation-et-implications/>
- Christel, A., Maron, P.-A., & Ranjard, L. (2021). Impact of farming systems on soil ecological quality: a meta-analysis. *Environmental Chemistry Letters* 2021, 1, 1–23. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01302-Y>
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2019.04.004>
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., & Doré, T. (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35-48 . *Innovations Agronomiques*, 20, 35–48.
- Garrigues, E., Corson, M. S., Walter, C., Angers, D. A., & van der Werf, H. M. G. (2012). Soil-quality indicators in LCA: method presentation with a case study. 8eme International Conference on LCA in the Agri-Food Sector, 343–348.
- Hartman, K., van der Heijden, M. G. A., Wittwer, R. A., Banerjee, S., Walser, J.-C., & Schlaeppli, K. (2018). Cropping practices manipulate abundance patterns of root and soil microbiome members paving the way to smart farming. *Microbiome*, 6(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s40168-017-0389-9>
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>





- Jordan-Meille, L., Mollier, A., Montagnier, C., Véricel, G., Tauvel, P., & Denoroy, P. (2021). Réévaluation des seuils de réponse des cultures à la teneur en phosphore biodisponible du sol. *RencontresComifer-Gemas*, Nov2021.
- Karimi, B., Dequiedt, S., Terrat, S., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., Bispo, A., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Ranjard, L. (2019). Biogeography of Soil Bacterial Networks along a Gradient of Cropping Intensity. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40422-y>
- Karimi, B., Villerd, J., Dequiedt, S., Terrat, S., Chemidlin-Prévost Bouré, N., Djemiel, C., Lelièvre, M., Tripied, J., Nowak, V., Saby, N. P. A., Bispo, A., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., & Ranjard, L. (2020). Biogeography of soil microbial habitats across France. *Global Ecology and Biogeography*, 29(8), 1399–1411. <https://doi.org/10.1111/GEB.13118>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4–10. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1997.03615995006100010001X>
- Keichinger, O., Viguier, L., Hellou, G., Messéan, A., Angevin, F., & Bockstaller, C. (2021). Un indicateur évaluant la diversité globale des rotations : de la diversité des cultures aux services écosystémiques. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 11(1), 1–19.
- Leclerc, C., Attoumani-Ronceux, A., Bockstaller, C., & Galan, M. B. (2011). Usages des méthodes d'évaluation environnementale. *Ecologisation Des Politiques et Des Pratiques Agricoles*, 1–8.
- Mäkipää, R., Menichetti, L., Martínez-García, E., Törmänen, T., & Lehtonen, A. (2024). Is the organic carbon-to-clay ratio a reliable indicator of soil health? *Geoderma*, 444, 116862. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2024.116862>
- Manzoni, S., & Porporato, A. (2009). Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1355–1379. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2009.02.031>
- McGarry, D. (2005). A methodology of a visual soil-field assessment tool, *Natural Resources Sciences*. Queensland, 50 p;
- Misslin, R., Clivot, H., Levavasseur, F., Villerd, J., Soulié, J. C., Houot, S., & Therond, O. (2022). Integrated assessment and modeling of regional recycling of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134725. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134725>
- Oberholzer, H. R., Knuchel, R. F., Weisskopf, P., & Gaillard, G. (2012). A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(3), 639–649. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0072-7>
- Obiang Ndong, G., Therond, O., & Cousin, I. (2020a). Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature. In *Ecosystem Services* (Vol. 43, p. 101120). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101120>
- Obiang Ndong, G., Villerd, J., Cousin, I., & Therond, O. (2020b). Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France. *Science of The Total Environment*, 142815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142815>
- Paz-Ferreiro, J., & Fu, S. (2016). Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. *Land Degradation & Development*, 27(1), 14–25. <https://doi.org/10.1002/LDR.2262>
- Petitjean, C., Philibert, A., Manneville, V., Amiaud, B., Perrin, A.-S., Charrier, X., Gastal, F., de Vliegheer, A., Willekens, K., Montenach, D., Houot, S., Morvan, T., & Piutti, S. (2019). Biomasse microbienne carbonée et activités enzymatiques : gammes de valeurs obtenues pour différents sols agricoles français et belges - AFES - Association Française pour l'Étude du Sol. *Etude et Gestion Des Sols*, 26, 81–92. <https://www.afes.fr/ressources/biomasse-microbienne-carbonee-et-activites-enzymatiques-gammes-de-valeurs-obtenues-pour-differents-sols-agricoles-francais-et-belges/>
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Dexter, A. R., Boizard, H., De Tourdonnet, S., Bertrand, M., & Caneill, J. (2009). Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 135–142. <https://doi.org/10.1051/agro:2008052>



- Romig, D. E., Garlynd, M. J., Harris, R. F., & McSweeney, K. (1995). How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(3), 229–236.
- Soulé, E., Charbonnier, R., Schlosser, L., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (2023). A new method to assess sustainability of agricultural systems by integrating ecosystem services and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137784. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137784>
- Soulé, E., Hawes, C., Young, M., Henckel, L., Michel, N., Michonneau, P., & Bockstaller, C. (2023). A predictive indicator assessing effect of cropping system and surrounding landscape on biodiversity. *Ecological Indicators*, 151, 110289. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110289>
- Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129291. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129291>
- Therond, O., & Duru, M. (2019). Agriculture et biodiversité: les services écosystémiques, une voie de réconciliation. *Innovations Agronomiques*, 75, 29–47.
- Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>
- Thibault, C., Cavan, N., Labreuche, J., Métails, P., & Angevin, F. (2018). Multicriteria Assessment of the Effects of Tillage Practices on Cropping Systems: Development of the Decision Support Tool DEXiSol. 21st International Soil TillageO) Research Organization (ISTRO) September 2018, 1–2.
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M. S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, 97, 100–110. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.09.023>
- Tibi, A., & Therond, O. (2017). Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE.
- Van Eekeren, N., de Boer, H., Hanegraaf, M., Bokhorst, J., Nierop, D., Bloem, J., Schouten, T., de Goede, R., & Brussaard, L. (2010). Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1491–1504. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2010.05.016>
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.