



HAL
open science

Synthèse des outils, indicateurs, référentiels disponibles pour comprendre et piloter la biologie des sols

Antonio Bispo, Nathalie Schnebelen

► To cite this version:

Antonio Bispo, Nathalie Schnebelen. Synthèse des outils, indicateurs, référentiels disponibles pour comprendre et piloter la biologie des sols. Innovations Agronomiques, 2018, 69, pp.91-100. 10.15454/DCZJMP . hal-02061151

HAL Id: hal-02061151

<https://hal.science/hal-02061151>

Submitted on 7 Mar 2019

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

Synthèse des outils, indicateurs, référentiels disponibles pour comprendre et piloter la biologie des sols

Bispo A.¹ et Schnebelen N.²

¹ INRA Unité InfoSol,

² INRA Unité département Environnement et Agronomie, Centre de recherche Val de Loire, site d'Orléans, 2163 avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 Ardon, F-45 075 Orléans Cedex 2

Correspondance : Antonio.Bispo@inra.fr

Résumé

Depuis plus de quinze ans, l'intérêt pour la composante biologique des sols est croissant, que ce soit pour des questions liées à la connaissance et la protection de cette biodiversité encore méconnue ou pour être en mesure de piloter les organismes du sol dans le cadre de différentes pratiques. Plusieurs projets européens et nationaux ont financé le développement et la validation des méthodes d'accès à cette information biologique. Cela a notamment permis de développer de nouvelles approches d'identification moléculaire basées sur l'ADN extrait des sols et de former de jeunes spécialistes. Plusieurs méthodes sont désormais disponibles et normalisées. Les résultats de ces projets ont mis en évidence l'intérêt d'utiliser des indicateurs biologiques en complément des indicateurs physicochimiques et agronomiques. Leur compilation en bases de données a permis de générer de premiers référentiels d'interprétation. Compte tenu du nombre de situations renseignées, il est désormais possible de poser un diagnostic sur la qualité biologique des sols. Au-delà du monde de la recherche, ces outils sont utilisables (et déjà utilisés) par des agriculteurs ou pour la surveillance des sols. Reste désormais à progresser dans le développement du conseil agronomique pour entretenir, améliorer et piloter cette biodiversité.

Mots-clés : Techniques d'analyse ; Bio-indicateurs ; Références ; Interprétation ; Outils d'aide à la décision.

Abstract : Understanding and managing soil biology: a synthesis of operational indicators

For more than fifteen years, the biological component of soils has gained a strong interest because it is an unknown and threaten part of the terrestrial biodiversity but also to take advantage of its proper management for agriculture. Several European and national projects supported the development and the validation of the various methods able to access to this biological information. It allowed in particular the development of new approaches based on the molecular identification of the DNA extracted from soils and the training of young scientists. As a result, several methods are now available and even standardized. All projects highlighted the interest to use biological indicators as a supplement to the classical physico-chemical and agronomic indicators. Laboratories have started the development of reference values by compiling biological results into national databases in order to better interpret the analyses. Considering the experience gained on numerous soil types, land uses and agricultural practices it is now possible to make a diagnosis of the biological quality of soils. These indicators are now used by non-research operators (e.g. commercial laboratories) and are available to land users (as farmers) or for monitoring soil quality. The next step is now to better identify the agricultural practices allowing to maintain, drive and improve soil biodiversity and activity e.g. in order to reduce the use of mineral fertilizers or pesticides.

Keywords : Analytical methods ; Bioindicators ; Reference values ; Interpretation ; Decision support

Introduction

Qu'entendons-nous par biologie des sols ? C'est l'étude de l'ensemble des organismes vivants résidant dans le sol, de leurs interactions et de leur(s) fonction(s). La diversité de ces organismes est immense, et nous sommes très loin d'en avoir un inventaire exhaustif. C'est pourquoi il est essentiel de mieux l'appréhender et de protéger la biodiversité tellurique associée. Celle-ci englobe des organismes allant de plusieurs centimètres pour les invertébrés les plus gros (ex : escargots, vers de terre), au millimètre pour les acariens, les collemboles et les champignons, et enfin à l'échelle du micromètre (millionième de m) pour les bactéries. Ces organismes se caractérisent aussi par des distributions très hétérogènes, allant de quelques dizaines d'individus par gramme de sol pour les nématodes à plusieurs millions pour les champignons et les bactéries. Ces caractéristiques propres à chaque classe d'organismes du sol, et le fait qu'ils se développent dans une matrice complexe rendent ardue leur étude, et sont autant de défis scientifiques à relever. Malgré ces difficultés, les vingt dernières années ont vu le développement de nombreuses avancées conceptuelles, technologiques et collaboratives dans le domaine de la biologie des sols (Uroz *et al.* 2014).

1. Un intérêt croissant pour la biologie des sols

Au niveau international, la Convention sur la diversité biologique (1993) a notamment pour objectifs la conservation de la diversité biologique et l'utilisation durable de ses constituants. En 2006, une initiative liée à cette convention concernant la protection et l'utilisation durable de la biodiversité des sols a été lancée avec pour objectifs l'acquisition de connaissances sur ses rôles ainsi que l'intégration de sa conservation dans les pratiques de gestion des terres et des sols.

Au niveau européen, en 2002, une communication de la Commission européenne [COM(2002)179] faisait état de la dégradation des sols, reconnaissant officiellement le besoin de protection des sols et notamment de la biodiversité des sols.

Au niveau national, ont été publiés en 2015 un avis du Conseil Economique, Social et Environnemental sur les sols (CESE, 2015), le rapport conjoint du Conseil général de l'environnement et du développement durable et du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGEED/CGAAER, 2015). Les orientations pour une agriculture innovante et durable mettent en avant la question des sols (Agriculture Innovation 2025, 2015) et notamment de la biodiversité des sols. D'un point de vue opérationnel, ce plan appelle le développement i) de procédures et référentiels de diagnostic biologique des sols, ii) de méthodes de caractérisation de la biodiversité microbienne sur la base de leur ADN, iii) de systèmes agricoles valorisant biodiversité et interactions biotiques, incluant la sélection d'espèces et de variété végétales favorisant les populations bénéfiques, iv) de modèles de prédiction de l'effet du type de sol et du mode d'usage sur la biodiversité et son fonctionnement, comme support d'aide à la décision. Ce plan demande également, au plan académique, une meilleure connaissance i) de la biodiversité de sols de référence par une approche de métagénomique, avec identification de nouveaux gènes de fonctions, ii) du déterminisme des patrons d'assemblage des populations en communautés, de la distribution de la diversité et des conséquences sur les activités telluriques, iii) des caractères microbiens et végétaux impliqués dans les interactions plantes-microorganismes, et iv) des réseaux trophiques entre plantes, faune et microorganismes et modélisation.

Ainsi, tous ces textes insistent sur l'intérêt de la composante biologique des sols, le besoin de mieux la connaître, la mesurer et en tirer parti pour promouvoir l'agroécologie.

2. Des programmes de recherche pour développer des indicateurs biologiques (ou bio-indicateurs) et un transfert vers les utilisateurs

Au cours des vingt dernières années, plusieurs appels d'offres centrés spécifiquement sur les fonctions environnementales et la biodiversité des sols ont été lancés (voir Uroz *et al.*, 2014 ; pour une description détaillée de ces projets). Le premier appel à projets national intitulé « Programme Gessol (www.gessol.fr) », initié en 1998 par le ministère en charge de l'Écologie, ciblait des fonctions environnementales des sols (exemple : la régulation du cycle des éléments, la séquestration du carbone, le support de la biodiversité et des paysages) ainsi que les principales dégradations (exemple : érosion, tassement, contamination). Cet appel a permis entre autre d'initier les méthodes de caractérisation de l'ADN microbien des sols et le développement d'indicateurs biologiques basés sur la macrofaune des sols. En accord avec la Stratégie européenne de protection des sols, l'ADEME a mis en place en 2004 un appel à projets de recherche dédié au développement et à la validation de bio-indicateurs de qualité des sols (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur>) en collaboration avec le programme Gessol, mais également avec les actions thématiques Ecoger et EcoDyn de l'INSU. Ainsi, dans ce cadre, plusieurs indicateurs biologiques ont été testés et éprouvés sur divers sites expérimentaux mais également à l'échelle régionale ou nationale, sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS, programme du GIS Sol, <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>). Suite à la publication de la stratégie européenne de protection des sols en 2017, différents programmes de recherche européens ont ciblé et financé des travaux spécifiquement sur la biodiversité des sols (exemple : ENVASSO¹, EcoFINDER², LandMark³).

Tous ces travaux de recherche ont ainsi permis l'émergence, la validation et la fiabilisation de nombreux indicateurs biologiques pour caractériser l'état des sols. Les protocoles ont été stabilisés et normalisés permettant leur appropriation par des laboratoires mais également par les utilisateurs. Ce transfert vers le monde agricole a notamment été possible à travers le projet AgrInnov⁴ (CASDAR 2011-2015). A l'initiative de l'Observatoire Français des Sols Vivants (www.ofsv.org) ce projet visait à valider des bio-indicateurs, ainsi qu'un mode opératoire à l'intention des agriculteurs afin de constituer un réseau de veille à l'innovation agricole. A travers ce réseau, il s'agissait de faire collaborer le monde de la recherche et les agriculteurs afin d'évaluer l'impact des pratiques agricoles et viticoles sur la vie biologique des sols.

3. Une évolution importante des techniques d'analyse, d'accès de plus en plus aisé

Les projets de recherche et d'innovation précédemment évoqués ont notamment permis de dépasser certaines des difficultés liées à l'accessibilité et à l'identification des organismes du sol, qui ont longtemps été des verrous importants en écologie terrestre. Plusieurs stratégies sont possibles pour collecter et caractériser les organismes du sol (Figure 1 et Tableau 1) :

- **Pour la microflore des sols**, avant les années 2000, les échantillons de sol étaient mis en culture sur différents milieux pour permettre le développement et l'identification des colonies de bactéries et de champignons (approche dite pasteurienne). Les techniques d'étude des microorganismes du sol ont depuis beaucoup évolué et il est désormais possible de déterminer, dans des échantillons de sol, les espèces et leurs abondances grâce aux analyses de l'ADN extrait des sols et l'utilisation de gènes marqueurs (exemple : ADNr 16S ou 18S respectivement pour les bactéries et les champignons). Ces approches ont donné lieu à des méthodes de mesure permettant de quantifier

¹ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso>

² <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/ecoFinders>

³ <http://landmark2020.eu/>

⁴ https://www.ofsv.org/images/documentations/rapport_agrinov_final_8_juin_2016.pdf

ces organismes directement à partir d'échantillons de sol (PCR quantitative), et à des méthodes de séquençage à haut débit (méthode de pyroséquençage, Illumina...) permettant d'accéder à la diversité d'organismes de l'échantillon considéré. Ces approches moléculaires ont ainsi permis d'accéder à des organismes qui n'étaient pas ou très difficilement cultivables (moins de 10 % des bactéries du sol étant cultivables) et qui restaient donc inconnus. Si les méthodes d'extraction de l'ADN des sols sont désormais normalisées (Tableau 1), les techniques de séquençage évoluant tellement vite, il n'a pas encore été jugé opportun de proposer des protocoles standardisés à la normalisation.

- **Pour la faune du sol**, les organismes de plus grande taille sont collectés sur le terrain (exemple : macrofaune totale, vers de terre) par un tri manuel, à l'aide d'extractants chimiques (exemple : formol, moutarde) ou de pièges ; pour la mésofaune (par exemple les collemboles, acariens, nématodes), des échantillons de sol sont prélevés puis extraits au laboratoire par élutriation (nématodes, enchytréides) ou par un gradient thermique (exemple : collemboles, acariens). La plupart de ces méthodes de prélèvement et d'extraction sont normalisées (Tableau 1). Extraits, ces animaux sont ensuite identifiés sur des critères morphologiques à l'aide de clés détermination, à l'œil nu, sous loupe binoculaire ou au microscope. La séparation des organismes de la matrice sol est une étape clé qui peut s'avérer parfois compliquée, tout comme l'identification qui peut être très consommatrice de temps et de connaissances en raison du nombre très important d'espèces contenues dans une simple poignée de sol. Il est alors indispensable de faire appel à plusieurs spécialistes. Comme pour les microorganismes du sol, les approches basées sur l'ADN se développent (Bienert *et al.*, 2012). Là encore, l'ADN est extrait du sol puis séquencé. Cette approche de métagénomique massive (analyse globale de l'ensemble de l'ADN contrairement à une analyse ciblée) nécessite cependant d'avoir accès à des bibliothèques de référence constituées grâce au séquençage de spécimens dûment identifiés par des spécialistes (Porco *et al.*, 2010) pour comparer l'ADN de l'échantillon analysé aux ADNs connus. Cette comparaison permet l'assignation taxonomique des organismes.

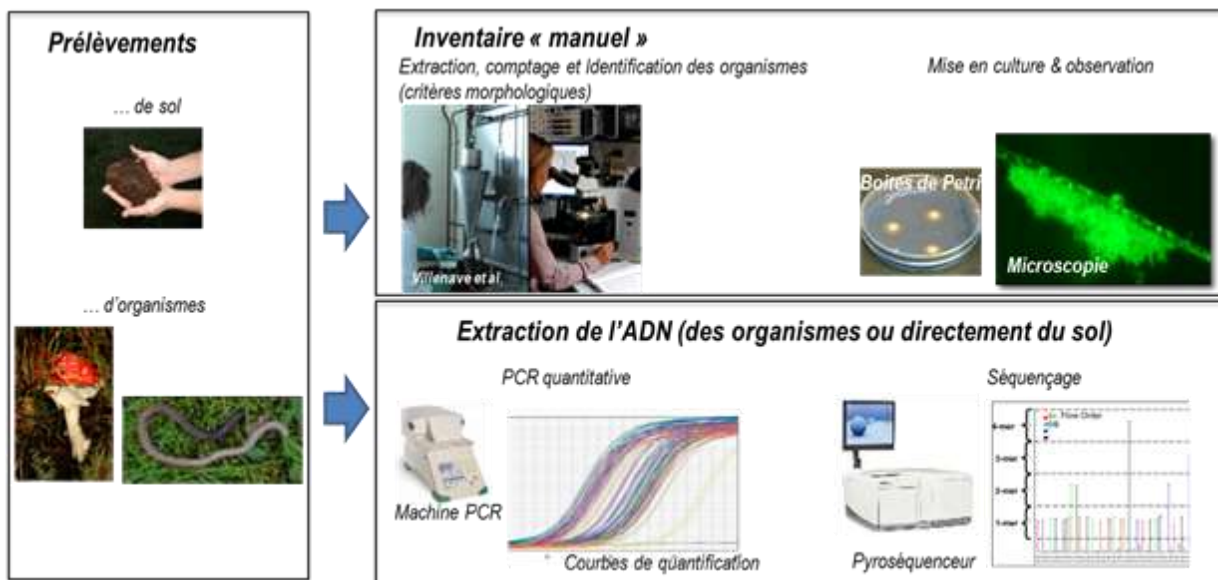


Figure 1 : Du prélèvement à l'analyse de la biodiversité des sols (adapté de Uroz *et al.*, 2013)

Tableau 1 : Synthèse des bio-indicateurs actuellement disponibles pour les sols agricoles

Indicateur	Type de mesure	Norme	Existence d'un référentiel national	Idee de l'optimum	Existence de laboratoires (Privé/Public)	Lien avec les services rendus par les sols	Intérêt pour le conseil agricole	TRL Global (de 1 à 9)
Faune	Lombriciens (prélèvement et extraction)	NF EN ISO 23611-1	Oui	+/-	Publics	Habitat Recyclage de la MO Production végétale Entretien du sol Régulation des flux d'eau	Oui	7
	Collembolés/acariens (prélèvement et extraction)	NF EN ISO 23611-2	?	Non	Publics	Habitat Recyclage de la MO Production végétale	?	6
	Enchytréides (prélèvement et extraction)	NF EN ISO 23611-3	?	Non	Publics	Habitat Recyclage de la MO Entretien du sol	?	4
	Nématodes (prélèvement et extraction)	NF EN ISO 23611-4	En cours	+/-	Privé	Habitat Recyclage de la MO Production végétale Régulation des ravageurs	Oui	8
	Macrofaune totale (prélèvement et extraction)	NF EN ISO 23611-5	?	Non	Publics	Habitat Recyclage de la MO Production végétale Régulation (eau, ravageurs)	Oui	5
	Faune totale par analyse de l'ADN	-	Non	Non	Publics	Habitat Recyclage de la MO Production végétale Régulation (eau, ravageurs)	Oui	3
	Bait lamina	ISO 18311	?	Non	Publics	Recyclage de la MO Entretien du sol	Oui	5
	Présence de galeries ou de turricules	-	Non	Non	Publics	Régulation des flux d'eau Recyclage de la MO	Oui	4
	Extraction ADN	NF EN ISO 11 063	Oui	+/-	Oui	Recyclage de la MO Potentiel d'épuration	Oui	7
	PCR quantitative à partir d'ADN extrait du sol	NF ISO 17 601	Oui	Non	Publics	Habitat Recyclage de la MO Potentiel d'épuration	Oui	6
Micro-organismes	Analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA)	XP CEN ISO/TS 29 843-1 et -2	?	Non	Publics	Habitat Potentiel d'épuration	Oui	4
	Séquençage massif	-	Oui	Non	Publics	Habitat Potentiel d'épuration Régulation	Oui	6
	Respiration microbienne du sol	NF EN ISO 16 072	Oui	+/-	Publics	Recyclage de la MO Potentiel d'épuration	Oui	7
	Cycle des éléments	ISO 14238, ISO/TS 22939, ISO 23753-1, ISO 23753-2	En cours	Non	Publics	Recyclage de la MO Cycle de nutriments Potentiel d'épuration	Oui	7
	Activités enzymatiques ciblant des éléments (ex : N, P, S)	-	En cours	Non	Publics	Recyclage de la MO Cycle de nutriments Potentiel d'épuration	Oui	7

Au-delà de ces approches taxonomiques qui visent à nommer les espèces et les décrire, il faut également être en mesure d'estimer l'activité de ces organismes. En effet, s'il est important de savoir qui est là et combien ils sont, il s'agit aussi d'être capable de préciser ce qu'ils font. Des approches fonctionnelles se sont donc développées, basées par exemple sur la respiration, sur des activités enzymatiques (spécifiques ou globales), la dégradation de la litière, ou encore les activités de forage des organismes quantifiées par la macroporosité du sol ou la production de déjections à la surface. Certaines de ces méthodes ont été normalisées et sont donc disponibles pour conduire ces caractérisations (Tableau 1). De même, les aspects liés à la définition des plans d'échantillonnage pour prélever les invertébrés (ISO 23611-6, 2012) ou caractériser les microorganismes (ISO 10381-6, 2009) ont été standardisés.

4. Un besoin de références pour l'interprétation

Disposer « d'outils » normalisés et fiables est un préalable mais ne suffit pas pour interpréter des analyses et des caractérisations de sol. Il s'agit d'être en mesure de resituer le résultat par rapport à des références existantes. Ainsi, l'élaboration d'un indicateur opérationnel, utilisable en routine, nécessite d'avoir un référentiel d'interprétation s'appuyant sur un nombre suffisamment important de mesures réalisées dans des contextes pédoclimatiques, des occupations de sols et des pratiques de gestion variés. Ainsi, les différents programmes de recherche précédemment présentés ont permis d'étudier un grand nombre de bio-indicateurs et d'aboutir à des valeurs de référence pour certains d'entre eux (Bispo *et al.*, 2017). Le Tableau 1 précise les indicateurs biologiques qui disposent de référentiels nationaux plus ou moins complets, ce qui peut déjà permettre de préciser les niveaux attendus d'organismes et d'activités dans certaines situations. Il faut cependant encore accroître ces données, à travers des analyses réalisées dans différents contextes pédoclimatiques mais également en ciblant des usages de sol et des pratiques variés. Accroître ces référentiels peut se faire à travers de nouveaux projets de recherche ou d'innovation (ainsi l'AFB a lancé en 2018 un nouvel appel ciblant par exemple spécifiquement l'évaluation de pratiques agricoles agro écologiques⁵) mais également, à travers des recherches participatives.

Concernant le développement de nouvelles références, il est attendu que le séquençage à haut débit, avancée technologique majeure de ces dernières années, permette d'acquérir à moindre coût (tarif régressant de 10 à 0,006 euros la séquence en une dizaine d'années) la diversité des organismes du sol, avec une résolution sans précédent. Ces approches vont donc probablement se développer très vite, générant un nombre important de séquences à stocker, sécuriser et interpréter, ce qui implique en parallèle des outils ou pipelines bio-informatiques pour filtrer, trier, classer, regrouper et affilier les séquences produites (ex : le développement de plateformes collaboratives, d'outils web partagés et de systèmes déportés de type Cloud permettent de répondre à ces enjeux) (Bouchez *et al.*, 2017).

Concernant les approches participatives, un observatoire des lombriciens a par exemple été mis en place depuis 2010. Cet Observatoire Participatif des Vers de Terre (OPVT ; https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php) a ainsi initié la création d'un référentiel sur les vers de terre en sollicitant la participation du plus grand nombre de personnes (agriculteurs, scolaires, naturalistes, jardiniers, gestionnaires de milieux). L'OPVT propose plusieurs protocoles d'évaluation simplifiés de la biodiversité des vers de terre (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/participer>) qui répondent à différents niveaux d'accessibilité et de précision des résultats souhaités (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/quel-protocole-choisir>). D'autres indicateurs basés sur l'activité biologique des sols se développent également tels que des approches visant à mesurer la décomposition de la matière organique par la faune du sol à travers des « bait lamina » (Kratz, 1998) ou des sachets de thé enfouis dans le sol (Keuskamp *et al.*, 2013). Récemment Thoumazeau *et al.*, (2018) ont proposé une batterie d'indicateurs

⁵ <https://www.afbiodiversite.fr/fr/actualites/appele-projets-de-recherche-biodiversite-des-sols-et-agro-ecologie>

simplifiés, utilisables *in situ*, par des conseillers, pour évaluer le fonctionnement des sols (Biofunctool®). Ces démarches permettent d'acquérir beaucoup plus rapidement de nombreuses données mais également d'inventorier des milieux peu explorés jusqu'à présent comme les sols de jardins urbains. Cependant, elles posent la question de la récupération des données, leurs hétérogénéités et de leurs fiabilités afin de réfléchir à la manière dont on peut ensuite les utiliser pour créer des référentiels.

5. Des bio-indicateurs d'intérêt aux bio-indicateurs opérationnels et aux outils d'aide à la décision

Les protocoles de mesure pour différents bio-indicateurs sont disponibles et de plus en plus utilisés pour caractériser l'état biologique des sols. Ils sont par ailleurs reconnus et demandés par les acteurs du monde agricole et commencent à être connus plus largement par le grand public. Il n'en reste pas moins que les protocoles potentiellement utilisables sont nombreux et qu'il s'agit de faire un choix. Idéalement, lors de leur sélection, les éléments suivants devraient être considérés (Doran et Zeiss, 2000) :

- Corrélation aux propriétés et fonctions du sol.
- Validation scientifique (e.g., les variations naturelles de l'indicateur liées par exemple au type de sol et au climat doivent être connues).
- Sensibilité aux options de gestion des sols.
- Disponibilité des méthodes acceptées et partagées par tous (e.g., normalisées),
- Facilité d'utilisation (échantillonnage et détermination) et d'interprétation (existence de bases de données et de références).
- Coûts.
- Possibilité de développer un conseil agro-écologique sur la base du diagnostic proposé.

Dans le cadre du programme ADEME « Bio-indicateur », un groupe de travail constitué de chercheurs et d'utilisateurs potentiels (bureaux d'étude, gestionnaires de sites, laboratoires d'analyse) a discuté de la pertinence et la transférabilité des bio-indicateurs proposés, en se basant notamment sur leur coût et leur simplicité d'utilisation et d'interprétation. Ce travail a abouti à un premier outil, accessible directement sur internet (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/dev.php>), permettant de choisir des indicateurs notamment en fonction de différentes applications (e.g., étude de sols pollués, évaluation de pratiques agricoles, surveillance des sols).

Outre la liste des indicateurs et des méthodes, le tableau 1 propose également une vision quant aux services que renseignent ces indicateurs, la présence de laboratoires qualifiés pour réaliser ces prestations et l'intérêt de tels indicateurs pour la profession et le conseil agricole. Une évaluation globale du degré de maturité des bio-indicateurs a été rajoutée, selon une échelle TRL⁶ d'après Blieux *et al.* (2017) modifié:

- Les TRL 1 à 3 correspondent à des bio-indicateurs d'intérêt, permettant de rendre compte d'un fonctionnement ou d'une modification de l'environnement. Ils sont généralement mis en œuvre par des laboratoires universitaires.
- Les TRL 4 à 6 traduisent une mise en œuvre du bio-indicateur dans un contexte expérimental, de développement et d'industrialisation. Il s'agit de bio-indicateurs opérationnels pouvant déjà être applicables en routine.

⁶ Technology Readiness Level

- Les TRL 7 à 9 visent des bio-indicateurs mis en œuvre dans un contexte réel, répondant à un marché et pour lequel des prestataires sont en mesure de les proposer en routine. Ceci suppose l'existence de référentiels pour pouvoir faire des diagnostics comparatifs, et de conseils adaptés face aux diagnostics établis. Ils sont utilisés comme outils d'aide à la décision.

Dans le Tableau 1, le positionnement des bio-indicateurs dans cette échelle de maturité est issu de la connaissance des auteurs et intègre l'intégralité de la chaîne de la prestation, du prélèvement à l'interprétation. Ainsi, elle considère ici non seulement la technologie d'analyse de l'indicateur mais également sa capacité à appuyer le conseil agronomique.

- Plusieurs indicateurs présentent des notes de 7 à 8 et pourraient, si leurs référentiels progressent, atteindre la note maximale. Les indicateurs basés sur les lombriciens, les nématodes, la biomasse bactérienne mesurée par l'ADN, les activités respiratoires et enzymatiques sont dans cette situation : des référentiels existent, les chercheurs/utilisateurs disposent d'informations sur les niveaux attendus mais ne sont pas encore complètement en mesure de proposer des pratiques améliorantes ou garantissant le bon fonctionnement biologique des parcelles évaluées.
- D'autres indicateurs, comme par exemple le séquençage massif des organismes du sol (animaux et microorganismes), conduisant à des listes taxonomiques, ne disposent ni de normes ni réellement de référentiels. Ils sont logiquement beaucoup plus éloignés d'un marché potentiel (notes entre 3 et 6), même si compte tenu de l'accès de plus en plus aisé à ces techniques moléculaires, leur croissance pourrait être très rapide.

Le développement et l'utilisation de ces bio-indicateurs nécessite non seulement l'industrialisation des analyses mais également du diagnostic et du conseil ultérieur basé sur ces analyses. Le projet PIA AgroEcoSol, soutenu par l'ADEME et piloté par Auréa Agro Sciences, poursuit ces divers objectifs, à savoir :

- L'industrialisation des méthodes d'analyse pour aboutir à la production des bio-indicateurs fiables, précis, interprétables (une réduction des coûts est également attendue).
- La gestion des données récoltées et constitution de la base de données afin d'accroître les référentiels et d'affiner progressivement les diagnostics (boucle de progrès).
- La formulation du conseil agro-écologique à partir des résultats des bio-indicateurs et du référentiel.
- La formation des utilisateurs afin de présenter ces outils et leurs potentialités.

Ce projet de 4 ans, démarré en 2018, devrait donc permettre d'accélérer l'accès à ces outils biologiques de caractérisation des sols ainsi que le diagnostic et le conseil en agroécologie.

Conclusion

L'intérêt pour la composante biologique des sols est croissant, que ce soit pour des questions liées à la connaissance et la protection de cette biodiversité encore méconnue ou pour être en mesure de piloter les organismes du sol dans le cadre de pratiques agroécologiques (e. g., biocontrôle des ravageurs, nutrition des plantes). Sa prise en compte dépend essentiellement de deux facteurs : l'industrialisation des techniques de mesure et du conseil, et l'enrichissement des référentiels permettant à terme d'établir les diagnostics en vue du conseil.

Ce chapitre se concentre sur les applications pour les sols agricoles, mais pour les sols forestiers (Uroz *et al.*, 2014) tout comme pour les sites et sols pollués (Grand *et al.*, 2018), les bio-indicateurs de terrain décrits précédemment sont également utilisés. Dans le cadre des sites pollués, à cette évaluation de

l'état et de l'activité des communautés en place, s'ajoute des mesures d'accumulation des contaminants issus du sol.

Un diagnostic de l'état biologique des sols est donc d'ores et déjà disponible pour tous les sols : les outils sont validés, les prestataires existent et il est possible de situer l'état de son sol par rapport à des références nationales qui s'enrichissent régulièrement à travers les différents programmes de recherche, de développement et des sciences participatives.

Il reste désormais à progresser sur les liens entre les fonctions écologiques des sols et la production agricole. Cela devrait alors permettre de proposer un conseil agronomique pour entretenir et améliorer la biodiversité des sols et son fonctionnement, voire orienter les activités biologiques. En effet, même si les grandes options de manipulation de la biologie des sols sont connues (exemples : apport de matière organique, rotations avec insertion de prairies temporaires, travail du sol...), le conseil au cas par cas reste encore à développer et devra s'appuyer tant sur des sites expérimentaux de longue durée que sur des réseaux de parcelles agricoles et des expériences locales mises en place par les agriculteurs eux même.

Références bibliographiques

Bienert F., De Danieli S., Miquel C., Coissac E., Poillot C., Brun J.-J., Taberlet P., 2012. Tracking earthworm communities from soil DNA. *Molecular Ecology*, 21, 2017-2030.

Bispo A., Jolivet C., Ranjard L., Cluzeau D., Hedde M., Pérès G., 2017. Mise en place d'outils et bio-indicateurs pertinents de qualité des sols. Les sols et la vie souterraine : des enjeux majeurs en agroécologie, Chapitre 9, QUAE, 328 p.

Blieux A.L., Dequiedt S., Sibourg O., Ferreira S., 2017. Chapitre III : Opérationnalité des techniques de diagnostic en microbiologie moléculaire environnementale. In: L. Ranjard, P.-A. Maron, P. Cuny et E. d'Oiron Verame (Eds.), *La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental*, ADEME Editions, p. 136-145.

Bouchez T., Blieux A.-L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon J.-J., Hellal J., Jouliau C., Quaiser A., Martin-Laurent F., Mauffret A., Monier J.-M., Peyret P., Schmitt-Koplin P., Sibourg O., d'Oiron E., Bispo A., Deportes I., Grand C., Cuny P., Maron P.-A., Ranjard L., 2017. *La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental*. *Etude et Gestion des Sols*, 24, 9-31

Bournigal J.M., Houllier F., Lecouvey P., Pringuet P., 2015. *Agriculture & Innovations 2025 - 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement*. Rapport aux Ministres en charge de l'agriculture et en charge de la recherche. 135 p.

Doran J.W., Zeiss M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology*, 15(1), 3-11.

Grand C., Andres S., Battaglia-Brunet F., Cluzeau D., De Vaufleury A., Faure O., Guerin V., Guernion M., Harris-Hellal J., Jouliau C., Karimi B., Le Guedard M., Pandard P., Pauget B., Peres G., Pucheux N., Ranjard L., Roux L., Villenave C., Bispo A., 2018. Étude de la qualité des milieux terrestres : caractérisation des impacts écotoxiques dans les sols. Chapitre 3. In *Détection des impacts toxiques dans l'environnement : du terrain à la réglementation* (Vol. 4). Burgeot T., Minier C., Cuny D., Cuny M.A., Bispo A., Grand C. (Eds). ISTE Editions., p. 217-279.

ISO 23611-6, 2012. Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 6 : Lignes directrices pour la conception de programmes d'échantillonnage des invertébrés du sol

ISO 10381-6, 2009. Échantillonnage – Partie 6 : Lignes directrices pour la collecte, la manipulation et la conservation, dans des conditions aérobies, de sols destinés à l'évaluation en laboratoire des processus, de la biomasse et de la diversité microbiens.

Keuskamp J.A., Dingemans B.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M., 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(11), 1070-1075

Kratz W., 1998. The bait-lamina test. General aspects, applications and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 5(2), 94-96.

Porco D., Rougerie R., Deharveng L., Hebert P., 2010. Coupling non-destructive DNA extraction and voucher retrieval for small soft-bodied arthropods in a high-throughput context: The example of collembola. *Molecular Ecology Resources*, 10, 942-945.

Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M.S., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Suvannang N., 2018. 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.

Uroz S., Bispo A., Buée M., Cebron A., Cortet J., Decaens T., Hedde M., Peres G., Vennetier M., Villenave C., 2014. Aperçu des avancées dans le domaine de la biologie des sols forestiers. *Revue Forestière Française*, Vol. 66, 4, p. 467-478.

Uroz S., Bispo A., Buée M., Cebron A., Cortet J., Decaens T., Hedde M., Peres G., Vennetier M., Villenave C., 2013. Aperçu des avancées dans le domaine de la biologie des sols forestiers. Atelier REGEFOR 'La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ?', du 10 au 12 Juin 2013, Nancy.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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* », la date de sa publication, et son URL)