

Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol

A. Brauman⁽¹⁾ et A. Thoumazeau^(2, 3)

1) Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.

2) CIRAD, UPR Systèmes de Pérennes, F-34398 Montpellier, France.

3) Systèmes de Pérennes, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

* : Auteur correspondant : alain.brauman@ird.fr ; alexis.thoumazeau@cirad.fr

RÉSUMÉ

L'évaluation de la santé des sols devient un enjeu sociétal important, notamment dans le cadre de la transition agroécologique. Cependant, la notion de santé des sols et les moyens pour la mesurer ne font pas consensus au sein de la communauté scientifique. La définition la plus partagée est celle basée sur sa capacité à fonctionner (Karlen *et al.*, 1997) et à fournir des services écosystémiques. Pourtant, les méthodes actuelles sont basées principalement sur des indicateurs de stocks (C, N, biomasse microbienne etc.) et n'intègrent pas, ou très peu, d'indicateurs fonctionnels basés sur le rôle des organismes du sol. Lorsqu'elles existent, les mesures fonctionnelles sont effectuées majoritairement en conditions de laboratoire sur des sols secs et tamisés limitant notre capacité à prendre en compte la réalité de la fonction sur le terrain. Pour pallier ces limites méthodologiques, une nouvelle méthode d'évaluation fonctionnelle de la santé des sols est proposée selon une approche intégrative prenant en compte les liens entre les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique des sols. Cette méthode intitulée Biofunctool® intègre neuf indicateurs de terrain, rapides et de faibles coûts, permettant d'évaluer trois fonctions principales du sol : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol. La capacité de l'ensemble des indicateurs à évaluer l'impact de la gestion des terres sur la santé des sols a été validée sur de nombreux terrains (> 600 points) principalement tropicaux et dans des contextes pédoclimatiques divers. Un index de qualité intégrant les indicateurs a été construit afin de synthétiser l'impact global de la gestion des terres sur la santé du sol. L'objectif est que Biofunctool® puisse être utilisé par des utilisateurs non spécialisés. Nous illustrons cette approche par deux exemples de mesure de la santé des sols effectués en milieu tropical (Thaïlande) au sein (i) d'associations culturales (légumineuses, manioc) dans des plantations d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) (ii) de monoculture d'hévéa de différents âges dans divers contextes pédoclimatiques. Les avantages et limites de l'approche sont discutés et des voies d'amélioration de l'outil sont exposées. Biofunctool® devrait permettre de mieux appréhender l'impact des pratiques agricoles sur les fonctions du sol associées à la biodiversité et pourrait servir de base pour intégrer la santé des sols dans les analyses environnementales.

Mots-clés

Qualité des sols, biodiversité du sol, carbone, cycle des nutriments, structure du sol.

Comment citer cet article :

Brauman A. et Thoumazeau A.,
2020 - Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 289-303

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>

Comment consulter/télécharger

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

SUMMARY**BIOFUNCTOOL, AN IN FIELD APPROACH TO ASSESS SOIL HEALTH RELATED TO FUNCTIONS PROVIDED BY SOIL BIOTA ACTIVITIES**

The assessment of soil health is becoming an important societal issue, particularly in the context of the agroecological transition. However, the concept of soil health does not reach consensus within the scientific community. The most shared definition is based on the ability of soil to function (Karlen et al., 1997) and to provide ecosystem services. However, most current methods focus on stock measurements (C, N, microbial biomass, etc.) and rarely include a true measurement of functions driven by soil biota. When they exist, the functions measured are performed on soil which has previously been sieved and dried, rather reflecting a potential level of the function than the reality in the field. To overcome these methodological limitations, a new framework based on functional evaluation of soil health is proposed using an integrative approach, considering the links between physicochemical properties and the biological activity of soils. This method, namely Biofunctool[®], incorporates nine rapid and low-cost field indicators to evaluate three main soil functions: carbon transformation, nutrient cycling, structure maintenance. The capacity of all the indicators to assess the impact of land management on soil health has been validated on various tropical and pedoclimatic contexts. A quality index integrating the indicators was constructed to synthesize the overall impact of land management on soil health. The final objective is that Biofunctool[®] could be used by non-experts. In this study, we illustrate this approach with two examples of soil health measurement carried out in tropical environments (Thailand) within (i) cultural associations (legumes, cassava) in rubber plantations (*Hevea brasiliensis*) (ii) monocultures of *Hevea* of different ages in various pedoclimatic contexts. The advantages and limitations of Biofunctool[®] are discussed and ways to improve the tools are exposed. Biofunctool[®] may allow a better understanding of the impact of agricultural practices on soil functions provided by soil biodiversity and could be in the future included in larger environmental assessment frameworks.

Key-words

Soil quality, soil biodiversity, carbon, nutrient cycling, soil structure.

RESUMEN**BIOFUNCTOOL[®] : UNA HERRAMIENTA DE CAMPO PARA EVALUAR LA SALUD DE LOS SUELOS, BASADA SOBRE LA MEDICIÓN DE FUNCIONES RESULTANTES DE LA ACTIVIDAD DE LOS ORGANISMOS DEL SUELO**

La evaluación de la salud de los suelos llega a ser un desafío societal importante, en particular en el marco de la transición ecológica. Sin embargo, la noción de salud de los suelos y los medios para medirla no hacen consenso en el seno de la comunidad científica. La definición más compartida se basa sobre su capacidad para funcionar (Karlen et al., 1997) y abastecer servicios ecosistémicos. No obstante los métodos actuales están basados principalmente sobre indicadores de stock (C, N, biomasa microbiana, etc....) y no integran, o muy poco, indicadores funcionales basados sobre el papel de los organismos del suelo. Cuando existen, las mediciones funcionales se efectúan mayormente en condiciones de laboratorio sobre suelos secos y tamizados limitando nuestra capacidad a tomar en cuenta la realidad de la función en el campo. Para paliar estas limitaciones metodológicas, se propone un nuevo método de evaluación funcional de la salud de los suelos según un enfoque integrador que toma en cuenta los vínculos entre las propiedades físico-químicas y la actividad biológica de los suelos. Este método titulado Biofunctool[®] integra nueve indicadores de campo, rápidos y de bajos costos, que permite evaluar tres funciones principales del suelo: la dinámica del carbono, el ciclo de los nutrientes y el mantenimiento de la estructura del suelo. La capacidad del conjunto de los indicadores para evaluar el impacto de la gestión de las tierras sobre la salud de los suelos se evaluó en numerosos terrenos (> 600 puntos) principalmente tropicales y en contextos pedoclimáticos diversos. Se construyó un índice de calidad que integra los indicadores para sintetizar el impacto global de la gestión de las tierras sobre la salud del suelo. El objetivo es que Biofunctool[®] pudiera ser utilizado por usuarios no especializados. Ilustramos este enfoque por dos ejemplos de medición de la salud de los suelos efectuados en medio tropical (Tailandia) en el seno (i) de asociaciones de cultivos (leguminosas, yuca) en plantaciones de hevea (*Hevea brasiliensis*) (ii) de monocultivo de hevea de diferentes edades en diversos contextos pedoclimáticos. Se discuten ventajas y limitaciones del enfoque y de las vías de mejoramiento de la herramienta. Biofunctool[®] debería permitir encarar mejor el impacto de las prácticas agrícolas sobre las funciones del suelo asociadas a la biodiversidad y podría servir de base para integrar la salud de los suelos en los análisis ambientales.

Palabras clave

Calidad de los suelos, biodiversidad, carbono, ciclo de nutrientes, estructura del suelo.

Les notions de qualité environnementale, que ce soient celles de l'air ou de l'eau, sont liées à la notion de santé humaine ou animale (niveau de pollutions chimiques ou biologiques). En revanche, la notion de qualité ou santé des sols est plus multidimensionnelle et sa définition fait encore débat au sein de la communauté scientifique (Bünemann *et al.*, 2018 ; Rinot *et al.*, 2019). Or la caractérisation de cette qualité devient un enjeu sociétal face aux menaces qui pèsent sur les sols (artificialisation, dégradation des terres) mais aussi aux attentes liées à son rôle dans la production de services écosystémiques variés (production alimentaire, filtration de l'eau, service récréatif etc.). Cette nouvelle vision du rôle des sols a entraîné une évolution du concept de qualité, qui d'une vision très agronomique est passé à celle d'une vision plus agro-environnementale prenant en compte les multiples fonctions et services écosystémiques portés par le sol (Bastida *et al.*, 2008). C'est cette vision d'un sol multifonctionnel, dont le fonctionnement est issu des interactions entre son compartiment biotique et abiotique (Wagg *et al.*, 2014) qui explique l'émergence du concept de santé des sols (Ng et Zhang, 2019). Cette dernière est préalablement définie par Karlen *et al.* (1997) comme « la capacité d'un sol vivant à fonctionner, dans les limites des écosystèmes naturels ou gérés, pour soutenir la productivité des plantes et des animaux, pour maintenir ou accroître la qualité de l'air et de l'eau et améliorer la santé des plantes et des animaux ». Pourtant cette vision fonctionnelle de la qualité se reflète peu dans la littérature sur la qualité des sols (Pheap *et al.*, 2019 ; Wienhold *et al.*, 2004). En effet, la majorité des études est basée sur une vision additive des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ces mesures sont ensuite souvent agrégées grâce aux dires d'experts, ou d'analyses statistiques multivariées (Velasquez *et al.*, 2007). Cependant, certains auteurs relèvent que ces méthodes additives, basées sur les propriétés des sols, ne permettent pas de capter et d'évaluer le fonctionnement dynamique d'un sol (Kibblewhite *et al.*, 2008 ; Vogel *et al.*, 2018). Des approches plus intégrées prenant en compte les fonctions portées par les assemblages biologiques du sol doivent être développées. Ces méthodes d'évaluations intégrées ne permettent pas d'estimer le rôle spécifique de chaque taxon, elles évaluent juste le résultat de leurs interactions. Ainsi, par exemple, la stabilité des agrégats dépend à la fois de la composition des assemblages biologiques comme les vers de terre (Lavelle *et al.*, 2006), les champignons et les bactéries (Maron *et al.*, 2018) mais aussi de leurs interactions avec le milieu sol (structure, pH etc.). Pour répondre à cette vision fonctionnelle proposée par Kibblewhite *et al.* (2008), nous avons développé un set d'indicateurs pour évaluer les fonctions portées par les assemblages biologiques des sols. La sélection des indicateurs s'est faite aux champs lors d'un atelier thématique organisé à Chachoengsao en Thaïlande en 2015 réunissant un panel d'experts (10) représentatif des différents champs disciplinaires des sciences du sol (physicien du sol, écologue, microbiologiste, biogéochimiste, cf. liste dans remerciements). Cette sélection s'est faite sur la base des critères suivants : (i) ils devaient être liés à au moins une des 3 fonctions exposées par Kibblewhite *et al.* (2008) : dynamique du carbone,

maintien de la structure du sol et recyclage des nutriments (ii) ils devaient pouvoir être mis en place sur le terrain (*in situ*) pour capter les dynamiques des processus sur un sol non perturbé ; ce point est crucial car le respect de l'intégrité physique du sol permet de mieux prendre en compte le fonctionnement réel et non pas potentiel (cas des mesures enzymatiques par exemple) du système sol, (iii) les indicateurs devaient être à la fois simples d'emploi et rapides à mettre en œuvre pour pouvoir facilement transférer les outils aux différents acteurs de terrain. Ces critères excluaient des indicateurs très utilisés comme le pH (il n'est pas lié à une fonction précise), le carbone organique (lié au stock et pas à la dynamique du C) ou les sacs à litière ou sachets de thés (temps d'incubation trop long). La connaissance complémentaire du contexte pédologique (texture notamment) est cependant importante pour l'interprétation des résultats. Un autre avantage de la simplicité d'emploi et du faible coût est de pouvoir multiplier les répétitions, pour prendre en compte la variabilité spatiale du système, souvent minorée dans les prises d'échantillons composites. La plupart des indicateurs choisis provenait de méthodes connues dans la littérature. D'autres ont nécessité un développement méthodologique, à l'image du développement de la méthode SituResp® pour évaluer la respiration basale du sol *in situ* (Thoumazeau *et al.*, 2017). Sur la base de ces différents critères, un set de neuf indicateurs de terrain intitulé Biofunctool® a été proposé. Ce set a été validé sur de nombreux terrains (Thoumazeau *et al.*, 2019b, 2019a) et sur différents systèmes agricoles pérennes (*ibid*) et annuels (Pheap *et al.*, 2019). Il a été aussi comparé aux autres méthodes classiques d'évaluation de la qualité des sols (Renevier *et al.*, en préparation). Dans cet article, nous illustrons l'approche Biofunctool® à travers un exemple de mesure de la santé des sols au sein de plantations d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) en milieu tropical (Thaïlande). Nous discuterons ensuite des avantages et limites de cette approche et des voies d'amélioration potentielles de l'outil.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Principe expérimental des indicateurs

La démarche Biofunctool® vise à comparer l'impact d'usages des terres ou pratiques agricoles sur la santé des sols. Elle est donc adaptée à des comparaisons dans un même contexte pédo-climatique dans lequel les paramètres intrinsèques du sol (ex : texture) sont relativement homogènes. Toutes les mesures sont aussi effectuées dans un laps de temps court pour éviter un co-effet des pluies sur les mesures. L'ensemble des indicateurs et leur complémentarité pour évaluer les trois fonctions du sol sont représentés dans le *tableau 1* et illustrés en *figure 1*. L'ensemble des protocoles est décrit en français dans le matériel

supplémentaire¹ (et bientôt sur le site web de Biofunctool <https://www.biofunctool.com/>) et en anglais dans l'article Thoumazeau *et al.* (2019b).

Maintien de la structure du sol

Stabilité des agrégats (AggSoil et AggSurf)

La stabilité des agrégats est étroitement liée à de nombreux services du sol tels que la séquestration du carbone, la rétention des nutriments et la limitation de l'érosion. Pour un contexte pédo-climatique donné, la stabilité des agrégats dépend du contexte physique du sol, de la teneur en matière organique et des interactions des organismes vivants du sol qui, par leur digestion, agrègent les particules organiques et minérales. (Amézqueta, 1999). La méthode utilisée (Herrick *et al.*, 2001) repose sur l'attribution d'un score lié à la stabilité des agrégats dans l'eau (slack test). Les agrégats sont prélevés à deux profondeurs : 0-2 cm (AggSurf) et 2-10 cm (AggSoil). Le score est attribué en fonction de la désagrégation ou de la dispersion de l'agrégat dans l'eau au cours du temps à travers deux étapes successives. Tout d'abord, les agrégats, auparavant séchés à l'air, sont immergés dans l'eau durant 5 minutes (étape 1). Ensuite, ils sont sortis-immersés à travers un mouvement de va-et-vient dans l'eau (étape 2).

Vitesse d'infiltration (Beerkan)

La capacité du sol à infiltrer l'eau est particulièrement importante dans les agrosystèmes car elle limite largement les processus d'érosion et de saturation en eau lors de précipitations importantes (Ilstedt *et al.*, 2007). La vitesse de déplacement de l'eau dans le sol affecte aussi le cycle des nutriments et leur disponibilité pour la plante. L'infiltration est largement favorisée par l'activité des organismes du sol, et particulièrement les ingénieurs du sol (Lavelle *et al.*, 2006). La méthode « Beerkan », adaptée de la méthode proposée par Lassabatère *et al.* (2006) a pour but de mesurer le potentiel d'infiltration du sol *in situ*. Un volume d'eau fixe de 1 cm de hauteur d'eau (310 ml pour cylindre de diamètre de 20 cm) est versé sur la surface du sol. Le temps d'infiltration dans le sol est mesuré pour chaque volume d'eau. Il est alors possible de calculer le taux d'infiltration de l'eau en ml par minute grâce à la courbe d'infiltration de l'eau à son état d'équilibre (voir figure dans protocole Beerkan au sein du matériel supplémentaire).

Évaluation visuelle de la structure (VESS)

Cet indicateur, proche de l'indicateur issu du test bêche, propose d'évaluer la structure du sol liée à l'activité biologique et à la culture étudiée (racines) en considérant la forme, la taille, la facilité à briser les agrégats de différentes profondeurs d'un

bloc de sol (Guimarães *et al.*, 2011). La méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) se base sur une description visuelle de la structure des différentes couches de sol entre 0 et 25 cm. La description est guidée par une fiche descriptive (voir "matériel supplémentaire" p. 300) comprenant des photos de différentes typologies d'agrégats et de mottes. Cette description permet d'attribuer un score global entre 1 (sol très friable sans structure) et 5 (sol très compact). Des mesures de pénétrométrie peuvent aider à la distinction des couches et à la mesure de la compaction du sol.

Cycle de nutriments

Dynamique des nutriments (AEMNO3)

La disponibilité des nutriments dans le sol est une fonction à l'interface du compartiment biotique et abiotique et est liée à l'activité de l'ensemble des organismes participant aux cycles des nutriments. La méthode des membranes échangeuses d'ions évalue la dynamique des nutriments dans le sol (Qian et Schoenau, 2002). La capacité d'adsorption des membranes des cations et anions disponibles dans le sol est considérée comme mimant l'action des racines des plantes (Le Cadre *et al.*, 2018). Les membranes anioniques et cationiques de 6x2 cm sont préalablement chargées avec des solutions ionisées puis déposées dans le sol entre 15 et 20 jours. Au cours de cette période, elles peuvent adsorber soit les cations, soit les anions disponibles dans le sol. Les membranes sont ensuite éluées et les ions fixés sur la membrane sont mesurés au laboratoire (unité : $\mu\text{g cm}^{-2}\text{ j}^{-1}$). Pour notre étude, seules les membranes anioniques ont pu être mises en place.

Mesure de l'azote assimilable (Nmin)

Le cycle de l'azote est l'un des rares flux de nutriment sous la dépendance quasi exclusive des bactéries du sol et qui résultent des très fortes interactions entre la composante biotique et abiotique du sol (Graham *et al.*, 2014 ; van Groenigen *et al.*, 2015). La mesure s'intéresse à la quantification de diverses formes azotées (NO_3^- et NH_4^+) disponibles dans les sols suite à une extraction du sol dans une solution de KCl.

Dynamique du carbone

Activité de la faune du sol (Lamina)

La méthode des bait lamina permet de mesurer le degré d'activité de consommation d'un substrat organique par la mésofaune du sol (organismes de 200 μm à 2 mm) dont le rôle est majeur sur le cycle du carbone (Wall *et al.*, 2008). Cette méthode a été développée par von Törne (1990) et cet indicateur a été reconnu comme un indicateur biologique prometteur (Griffiths *et al.*, 2016). Les bait lamina sont des languettes en PVC composées de seize trous remplis avec un substrat organique qui peut être fabriqué ou fourni (Terra Protecta, Allemagne). Sept bait lamina par point

¹ Site de téléchargement des protocoles : https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/06/Protocoles_BIOFUNCTOOL.pdf

Tableau 1 : Présentation des indicateurs Biofunctool®, des variables mesurées et des assemblages biologiques ciblés.**Table 1:** List of biofunctool indicators, measured variables and biologic assemblage targeted.

Fonction du sol	Nom de l'indicateur	Variable mesurée	Assemblages biologiques	Référence	
Maintien de la structure	AggSoil	Stabilité des agrégats (2-10 cm)	Macrofaune, champignons	Herrick <i>et al.</i> , 2001	
	AggSurf	Stabilité des agrégats (0-2 cm)	Macrofaune, champignons	Herrick <i>et al.</i> , 2001	
	Beerkan	Vitesse d'infiltration	Ingénieurs du sol	Adapté de Lassabatère <i>et al.</i> , 2006	
	VESS	Evaluation visuelle de la structure du sol	Ingénieurs du sol	Guimarães <i>et al.</i> , 2011	
Cycle des nutriments	AEMNO3	NO ₃ ⁻ fixé sur membranes échangeuses d'ions	Tous les micro-organismes	Le Cadre <i>et al.</i> , 2018 ; Qian et Schoenau, 2002	
	NminSoil	Azote disponible (NO ₃ ⁻ and NH ₄ ⁺)	Tous les micro-organismes	Maynard et Kalra, 1993	
Dynamique du carbone	Cast	Densité de turricules de vers de terre	Vers de terre	Appliqué dans Thomas <i>et al.</i> , 2008	
	Lamina	Lamina baits	Mésafaune	Von Törne <i>et al.</i> , 1990	
	POXC	Carbone oxidable au permanganate	Tous les micro-organismes	Weil <i>et al.</i> , 2003	
	SituResp	Respiration basale du sol	Micro-organismes	Thoumazeau <i>et al.</i> , 2017	
	COMPLEMENT SYST. PERENNES	Fragment	Biomasse de litière fragmentée	Macrofaune	Adapté de Loranger <i>et al.</i> , 2002 ; Ponge <i>et al.</i> , 2002 ; Zanella <i>et al.</i> , 2018
		Skeleton	Biomasse de litière skeletonisée	Macrofaune/Mésafaune	

d'échantillonnage sont enfouies dans le sol durant une période d'incubation à déterminer en fonction des conditions environnementales (1 à 3 semaines en général). L'activité des organismes du sol est évaluée à travers la consommation de ce substrat, en comptant le nombre de trous ayant subi une dégradation visible du substrat suite à la période d'incubation dans le sol.

Pool de carbone labile (POXC)

Le POXC, Permanganate Oxydizable Carbon, consiste à mesurer le pool de carbone labile du sol, qui correspond à la matière organique accessible par les microorganismes hétérotrophes (Culman *et al.*, 2012). La teneur en carbone labile du sol (mgC kg⁻¹ sol) est quantifiée à travers une oxydation partielle de la matière organique par le permanganate de potassium. La lecture du résultat se fait par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre de terrain, qui permet d'estimer la concentration restante de la solution en KMnO₄ qui n'a pas été réduit par la matière organique (Weil *et al.*, 2003).

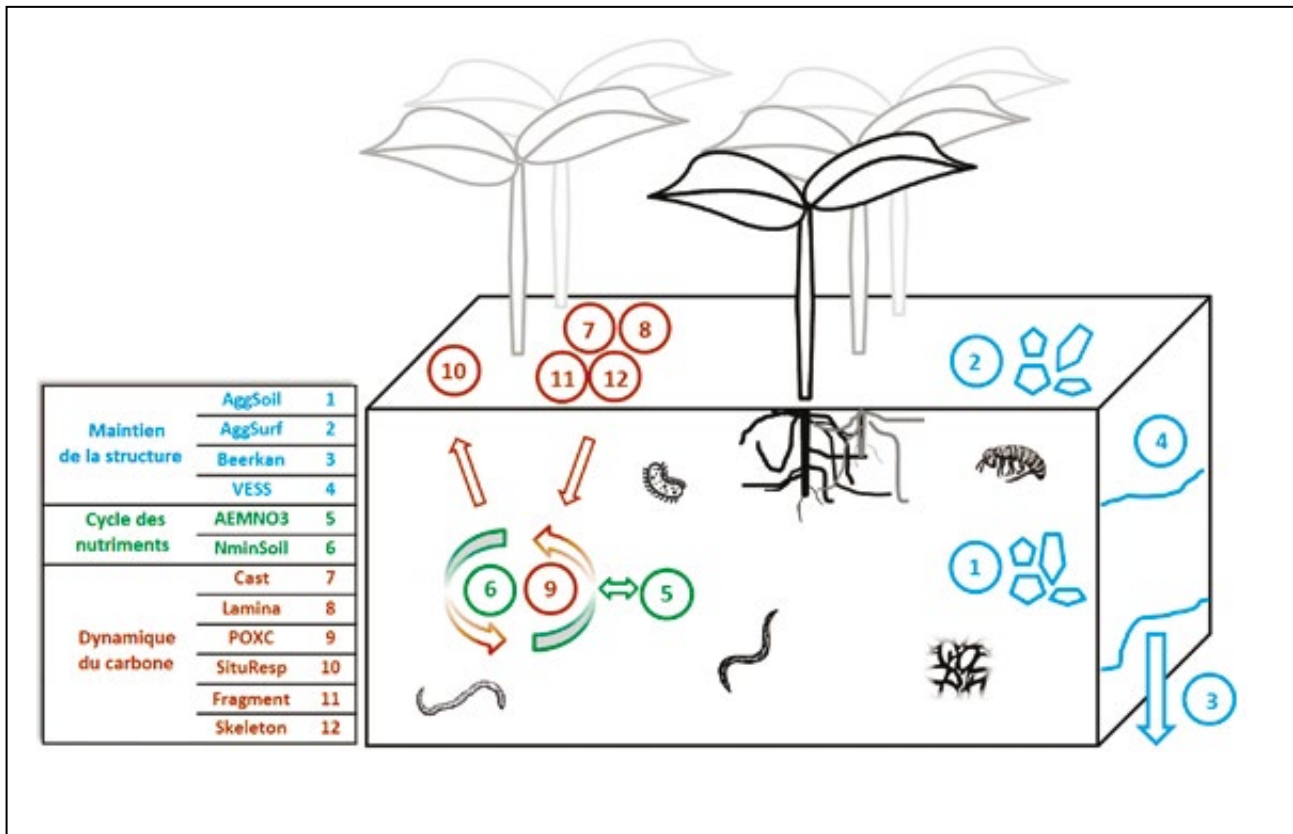
Respiration basale (SituResp®)

La respiration du sol est liée à la minéralisation de la matière organique du sol par l'activité des micro-organismes. Le CO₂ dégagé dans l'atmosphère constitue la dernière étape du cycle du carbone dans le sol. La technique SituResp® permet d'évaluer la respiration basale du sol sur le terrain. Un gel coloré, contenant un indicateur pH (rouge de crésol), va changer de couleur suite à l'acidification par le CO₂ émis par le sol. La lecture de la densité optique (DO) du gel, effectuée par spectrophotométrie, permet une évaluation de l'activité métabolique des micro-organismes du sol (Thoumazeau *et al.*, 2017) (unité: do correspondant à la différence d'absorbance entre T0 et T24h).

Complément - Masse de turricules de vers de terre (Cast)

Les vers de terre sont reconnus pour leur rôle important dans le cycle de la matière organique du sol (Blouin *et al.*, 2013; Jégou *et al.*, 1998; Lavelle *et al.*, 2004). À travers les turricules qu'ils

Figure 1 : Représentation schématique de la cohérence et la complémentarité des indicateurs sélectionnés dans le set Biofunctool®
Figure 1: Schematic drawing of Biofunctool® indicators showing their consistence and complementarities.



produisent, les vers de terre participent à la fragmentation, la transformation et le stockage de carbone organique dans les sols (Thomas *et al.*, 2008). Bien que des travaux de validation soient encore à mener, nous proposons d'utiliser la masse de turricules à la surface du sol comme un bio-indicateur de l'activité des vers de terre. Il est obtenu en collectant les turricules dans une surface donnée (quadrat) et en pesant la masse sèche (48 heures à 60 °C) de ces turricules. Cette mesure est un complément et ne fait pas partie des 9 indicateurs Biofunctool® « de base ». En effet, l'observation des turricules à la surface des sols nécessite, dans certaines conditions, une expertise pour reconnaître les turricules des agrégats de sols issus d'autres transformations.

Complément pour les cultures pérennes – Niveau de dégradation de la litière

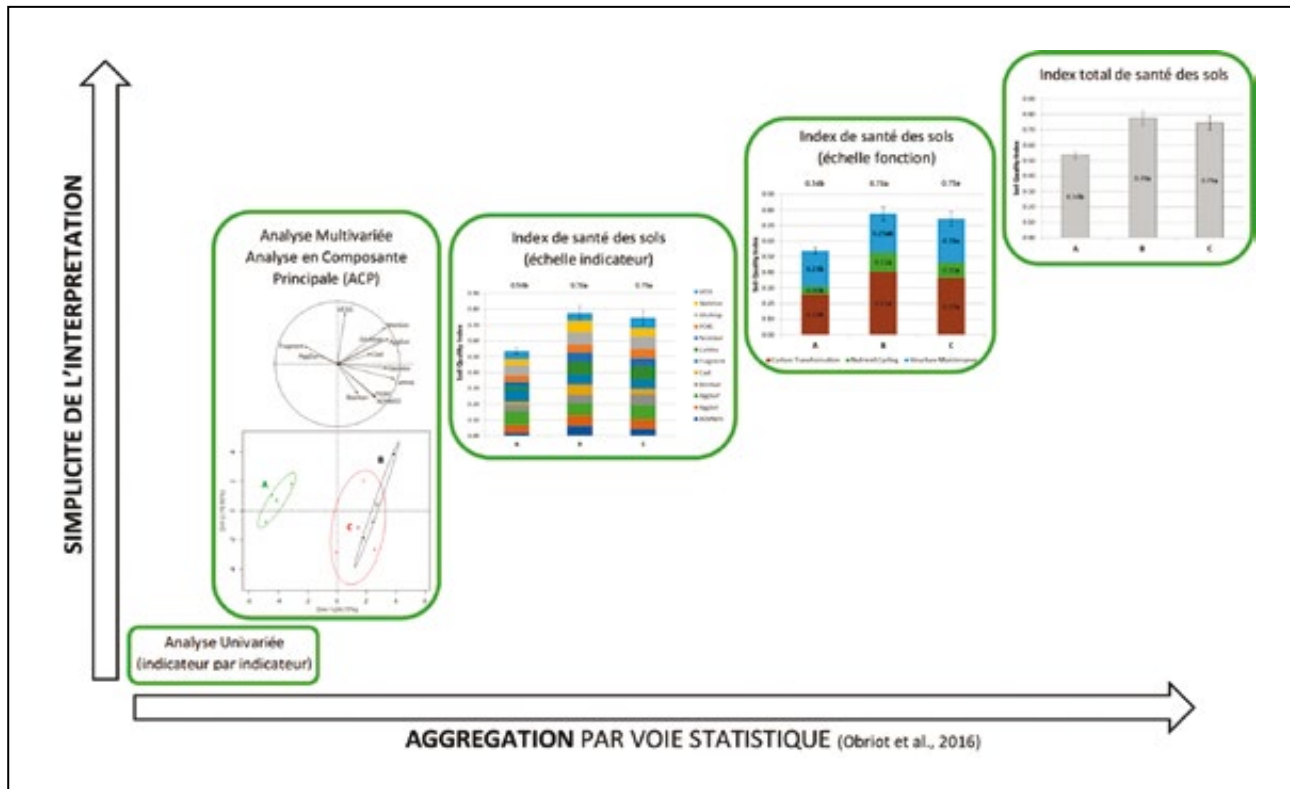
La litière à la surface du sol constitue une ressource majeure pour les organismes décomposeurs (Loranger *et al.*, 2002; Ponge *et al.*, 2002; Zanella *et al.*, 2018). L'index litière est un index morpho-fonctionnel de l'état de la litière à la surface du sol. Cette méthode consiste en la classification de l'état de dégra-

de la litière à la surface du sol en deux catégories : la litière fragmentée et la litière squelettisée (dont il ne reste que la nervure). Le ratio entre la biomasse sèche de feuilles squelettisées ou fragmentées par la biomasse totale de litière est alors utilisé comme indicateur de l'activité des organismes décomposeurs. Comme la mesure des turricules, cet indicateur ne fait pas partie du set de base de Biofunctool®, et n'est utilisé que dans les milieux contenant de la litière (forestiers ou contenant des cultures pérennes notamment).

Analyse statistique et agrégation

Dans un contexte donné et pour un jeu de comparaison de pratiques agricoles donné, l'ensemble des mesures obtenues sur le terrain peut être analysé avec différents niveaux d'agrégation (figure 2).

Le niveau d'agrégation doit correspondre au public ciblé et au niveau de complexité requis pour analyser l'agrosystème. Dans le cas où l'utilisateur souhaite comprendre l'intégralité des évolutions des indicateurs en fonction des pratiques testées (A, B, C et l'exemple en figure 2), il devra traiter l'ensemble des données de manière indépendante (analyse univariée) ou de

Figure 2 : Différents niveaux d'agrégation des données Biofunctool®**Figure 2:** Different levels of data aggregation from Biofunctool® indicators.

manière combinée (analyse multivariée, ACP). Ces analyses peuvent cependant être complexes à interpréter, et demandent une bonne connaissance des outils statistiques. Pour faciliter l'analyse et produire un indicateur de santé des sols compréhensible par tous, nous avons produit un index synthétique de santé des sols. La méthode d'agrégation pour transformer les données repose sur une analyse statistique proposée par Obriot *et al.* (2016). À partir de données extraites de l'analyse multivariée (ACP), un index synthétique est calculé. Ce calcul s'établit en différentes étapes. Tout d'abord, les données sont normalisées entre 0 et 1. Dans le cadre de cette normalisation des données, il est nécessaire de déterminer le type d'évolution de chaque paramètre favorisant la santé des sols. Cette étape fait appel à des dires d'experts et aux connaissances extraites de la littérature. Deux cas de figure sont utilisés pour Biofunctool® : i) pour la majorité des indicateurs (tous sauf un), une évolution du type « plus grand, mieux c'est » est suivie ; par exemple, pour le POXC, nous considérons que plus il y a de POXC dans le sol, plus ce sera favorable pour sa santé ; ii) pour l'indicateur VESS, une évolution du type « plus petit, mieux c'est » a été suivie dans cette étude. De récentes références indiquent néanmoins qu'un optimum au score 2,5 pourrait être plus adapté (Johannes *et al.*, 2019). Ensuite, les contributions des variables à la construc-

tion des axes et les pourcentages d'inertie de l'ACP sont utilisés pour calculer les valeurs de l'index. Différents niveaux d'agrégation des contributions des indicateurs sont ensuite possibles, en fonction du niveau de précision requis (cf. *figure 2*: échelle indicateur, échelle fonction, score total). Une simple addition des contributions au score total est alors mise en œuvre. Dans la plupart des analyses, on privilégie l'agrégation à l'échelle « fonction » dans l'objectif d'adopter une approche multifonctionnelle. Les index obtenus pour une pratique donnée varient entre 0 et 1 et permettent d'avoir une image synthétique de la santé des sols plus simple à interpréter et qui correspond aux attentes des praticiens de terrain.

EXEMPLES DE CAS D'ÉTUDE

Échelle locale : impact d'associations en plantations d'hévéa, Thaïlande

L'exemple proposé s'intéresse à l'effet de l'intégration de cultures en associations dans des plantations d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) en Thaïlande. Cette étude a eu lieu dans la province

de Buriram (15°13'N; 103°18'E) dans un contexte tropical (précipitations annuelles 1 400 mm, température annuelle 27 °C). La texture du sol est sableuse (68 % sable, 24 % limon, 8 % argile) et le carbone total relativement faible (<10 g kg⁻¹ de sol). Ces travaux sont issus de l'article Thoumazeau *et al.* (2019a). Cinq traitements ont été testés : dans des plantations de 4 ans, les hévéas ont été plantés seuls (T1), ou en association avec une légumineuse (*Mucuna bracteata*) (T2), ou en association avec du manioc (*Manihot esculenta*) (T3). Ensuite, les plantations d'hévéa de 9 ans étaient soit en monoculture (T4), soit associées avec du *Mucuna* (T5). L'ensemble des indicateurs Biofunctool® ont été appliqués sur ces sites.

La *figure 3* présente les résultats de l'analyse en composante principale (ACP) avant la transformation des variables à travers leur courbe de réponse au fonctionnement du sol. Sur le graphique des individus, nous pouvons observer que les dimensions des deux premiers axes sont assez équilibrées (32,34 % - 22,83 %). Les individus se distinguent globalement les uns des autres avec quatre clusters principaux : plantations de 4 ans avec légumineuses (T2), plantations de 4 ans sans légumineuse (avec ou sans manioc) (T1 et T3), plantations de 9 ans sans légumineuse (T4) et plantations de 9 ans avec légumineuses (T5) (*figure 3*).

Les variables permettant d'expliquer ces distinctions peuvent être regroupées selon les propriétés fonctionnelles du sol. Ces observations se reflètent dans l'index de santé des sols. A l'âge de 4 ans, l'association de légumineuses (T2) favorise l'infiltration ainsi que le maintien de la structure des premiers centimètres du sol. Ce résultat peut s'expliquer par le rôle des légumineuses sur l'infiltration des sols *via* leur influence sur la structure du sol (Broughton, 1976; Unger et Vigil, 1998). Les plantations de 9 ans (T4 et T5) se distinguent des plus jeunes par une amélioration de la dynamique du carbone du sol, qui peut être liée à la phénologie des arbres, et principalement à la chute de litière plus importante dans les plantations de 9 ans (Blagodatsky *et al.*, 2016). Enfin, le *Mucuna* intensifie le cycle des nutriments dans les plantations de 9 ans (T5) grâce à sa capacité à fixer l'azote. L'approche Biofunctool® permet donc d'avoir une évaluation multifonctionnelle des sols, et de comprendre les compromis entre l'évolution des fonctions du sol, plus ou moins affectées par les traitements étudiés.

Échelle régionale, impact de l'âge des hévéas, Thaïlande

Afin de déterminer le degré de généralité des résultats acquis localement, nous avons regroupé les résultats obtenus dans trois sites étudiés le long d'un gradient pédoclimatique en Thaïlande (*figure 4*).

Le long de ce gradient, les précipitations moyennes annuelles varient de 1 149 mm à 1 390 mm et le pourcentage d'argile dans les sols varie de 8 % à 21 %. Même si l'âge des arbres étudiés

varie d'un site à l'autre, on constate sur tous les sites une évolution positive de la santé des sols en fonction de l'âge des arbres (*figure 4*). L'âge des plantations où on constate une amélioration significative de la santé des sols est compris entre 6-9 ans et 15 ans environ (*figure 4*), ce qui correspond au stade de maturité (arrêt d'association de culture, fermeture de la canopée et démarrage de la saignée des arbres). La contribution respective des fonctions du sol à la construction de l'index de santé des sols (SQI) montre que c'est la fonction liée à la dynamique du carbone qui explique le plus cette amélioration. Les fonctions liées au cycle des nutriments et au maintien de la structure contribuent de manière moins prononcée aux phases d'évolution de la santé des sols. L'entrée de carbone liée à la chute de la litière au sol qui augmente avec l'âge des arbres semble être le facteur prépondérant expliquant l'évolution positive de la santé des sols en hévéaculture. La généralité des résultats obtenus indique que Biofunctool® est une méthode robuste et adaptée à l'étude de transitions dans divers contextes (*figure 4*).

DISCUSSION

Les exemples de cet article illustrent les avantages de l'approche multifonctionnelle de la santé des sols. Ses avantages sont (i) la mesure concomitante de plusieurs fonctions : ainsi Biofunctool® (*figure 3*) a permis de montrer des compromis entre fonctions à travers l'étude de la légumineuse d'inter-rang qui influe à la fois sur les fonctions de maintien de la structure du sol et de la dynamique des nutriments mais pas sur celles liées à la dynamique du carbone ; (ii) sa sensibilité aux pratiques agricoles, car l'impact de la légumineuse se distingue rapidement et distinctement dans un même contexte pédoclimatique ; (iii) la généralité potentielle de certains résultats : l'impact positif de l'âge des arbres sur la santé des sols se vérifie dans des contextes pédoclimatiques variés.

Depuis cette étude séminale de 2019, Biofunctool® a été utilisé dans différents contextes agro-écologiques et géographiques (plus de 600 points sur 4 continents ; Europe, Afrique, Asie, Océanie). Cette approche a permis de déterminer l'effet de diverses pratiques agricoles sur la santé des sols comme l'agriculture de conservation au Cambodge et en Nouvelle Calédonie (Pheap *et al.*, 2019; Kulagowski *et al.*, submitted), les rotations culturales en France, l'agroforesterie en Thaïlande, les blocs agro-écologiques à Madagascar... Si Biofunctool® a été mis au point dans des contextes tropicaux, son transfert au contexte tempéré pour évaluer différentes pratiques (agroforesterie, rotations culturales etc.) n'a pas nécessité de changement de variables ou de protocoles. La variété des contextes agro-pédologiques étudiés, couplée à celle des utilisateurs (étudiants, partenaires académiques, instituts techniques, ONG, fondations, etc.) nous permet après 4 ans d'utilisation de faire un premier bilan opérationnel de l'approche proposée et d'en cerner les avantages et les limites opérationnelles.

Figure 3 : Analyse multivariée des indicateurs Biofunctool® pour évaluer l'impact de différentes associations culturales avec des hévéas sur la santé des sols. Données issues de l'article Thoumazeau *et al.* (2019a).

Figure 3: Multivariate analysis of Biofunctool® indicators to assess the impact of different crops associations with rubber trees on soil health. Data issue from Thoumazeau *et al.* (2019a).

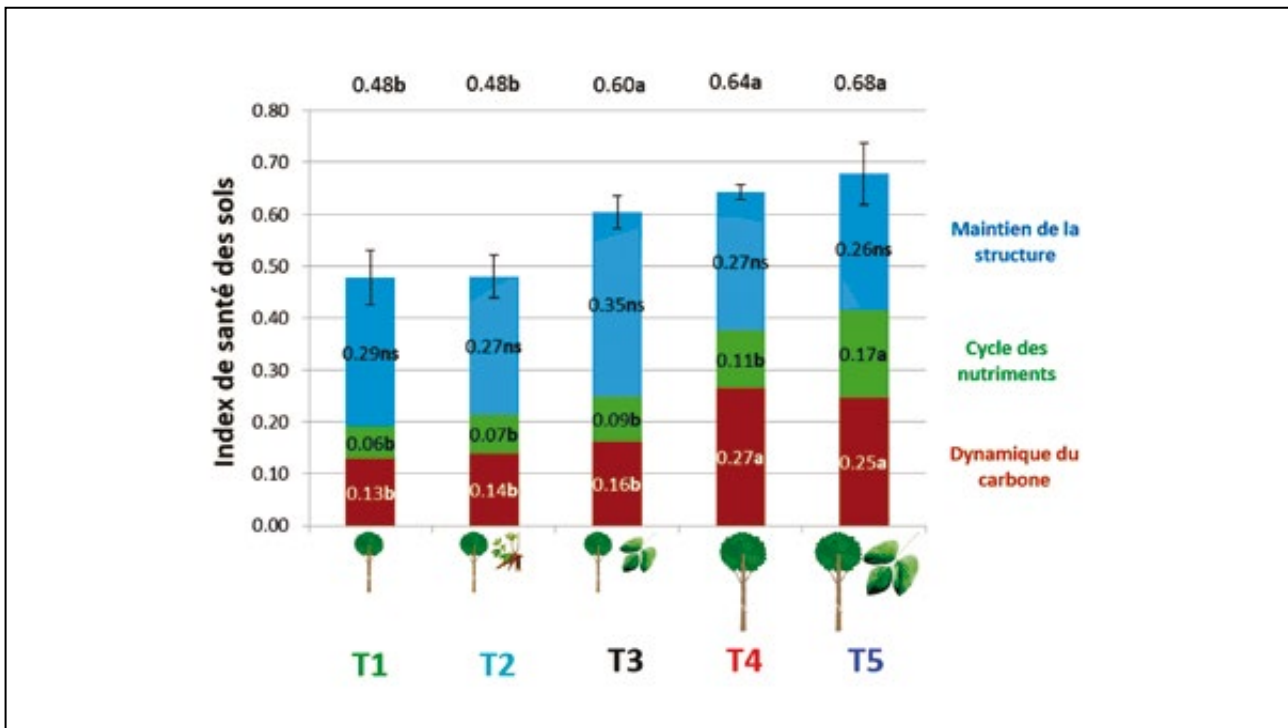
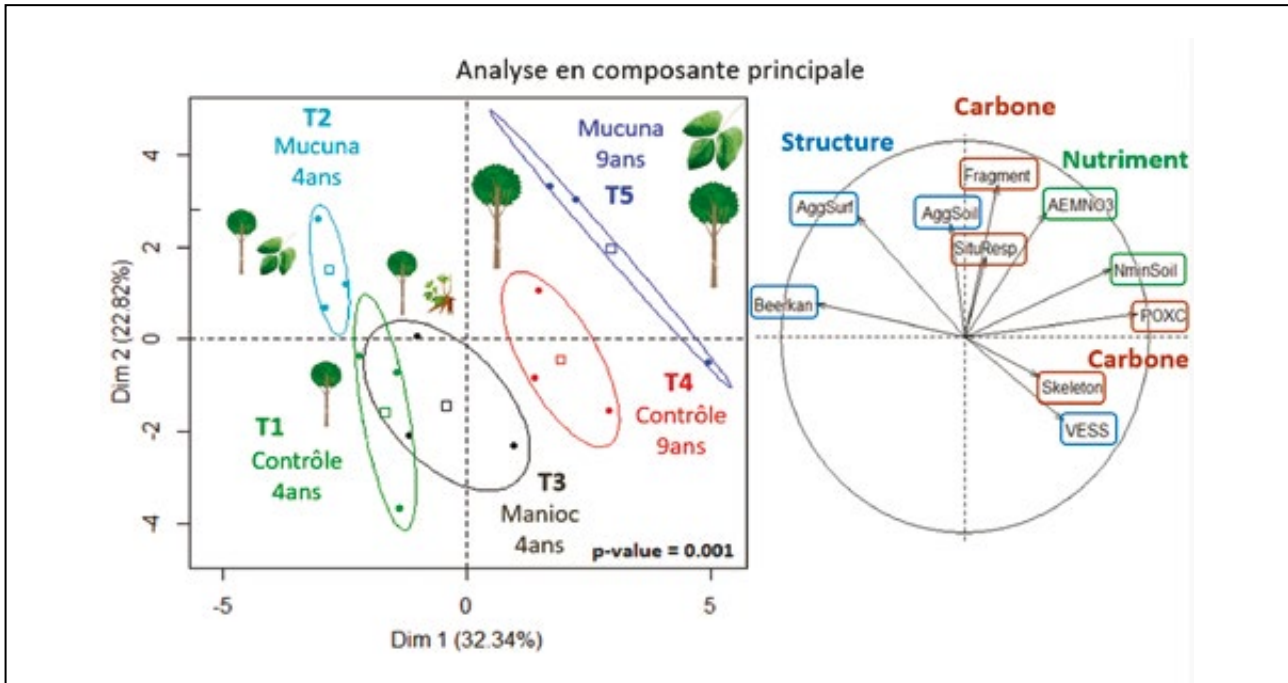
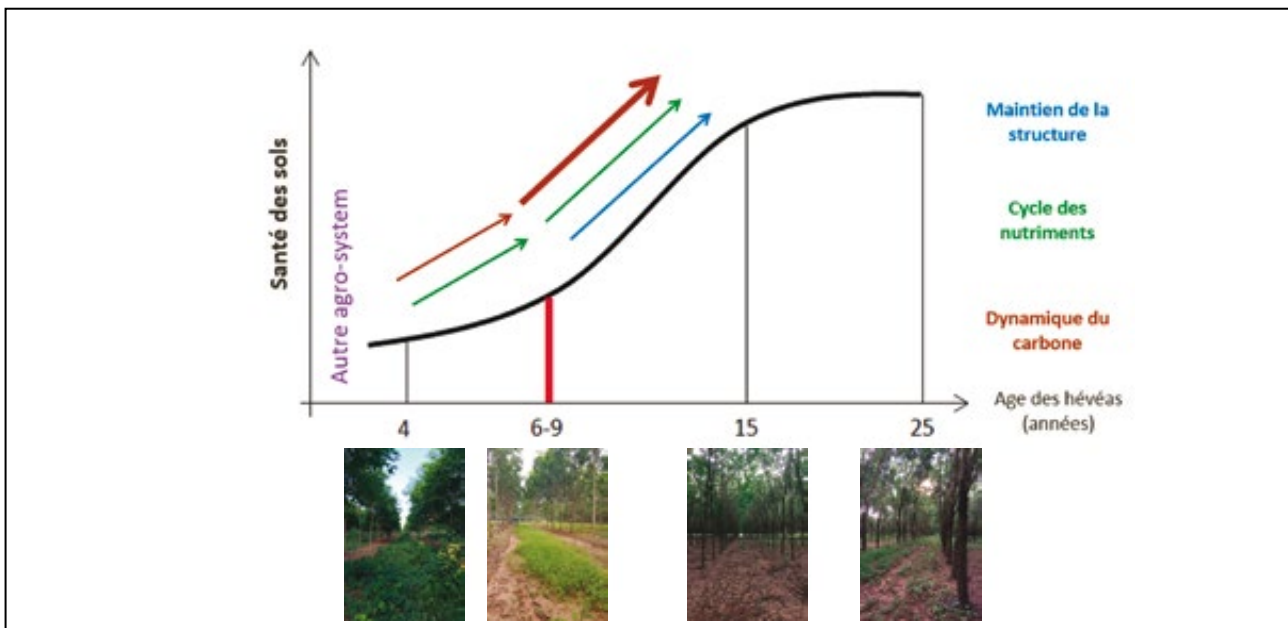
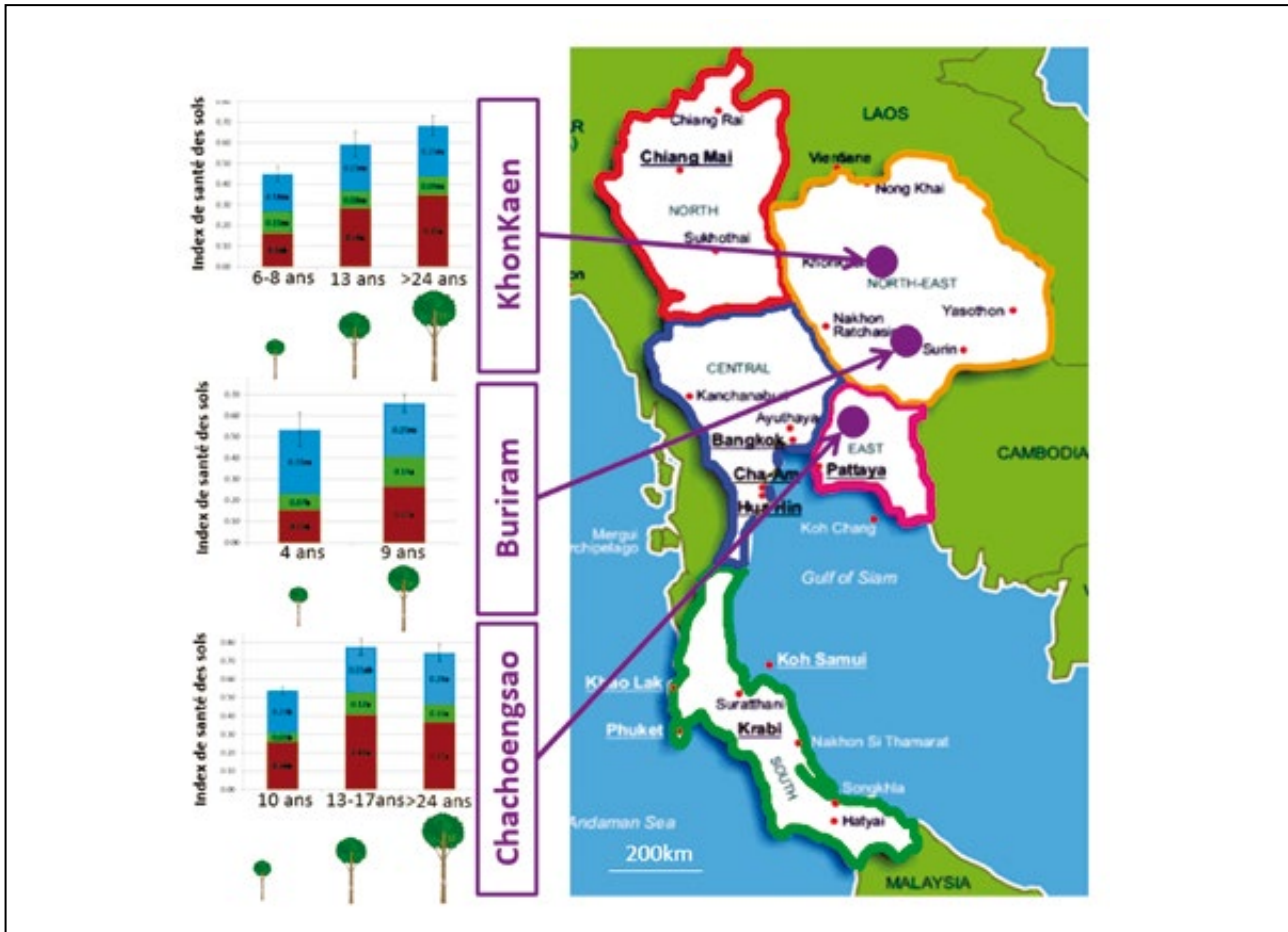


Figure 4 : Analyse régionale des données de Biofunctool® en Thaïlande : impact de l'âge des hévéas sur la santé de sols.

Figure 4: Impact of stand age of Rubber on soil health; a regional analysis of Biofunctool® data.



Biofunctool® est-il restreint à une approche comparative ?

L'ensemble des études effectuées avec Biofunctool® a été basé sur une approche relative où une pratique était comparée soit à une référence non anthropisée (cas de la forêt), soit à une autre pratique (cas des pratiques conventionnelles pour l'évaluation des systèmes agroécologiques). Cette comparaison ne pouvait avoir lieu qu'au sein d'un contexte pédoclimatique cohérent. Pour sortir de cette approche comparative, il s'avère nécessaire de construire un référentiel comme établi dans le cadre du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (<http://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqqs>) pour certains indicateurs physico-chimiques ou biologiques (Horrigue *et al.*, 2016). Ce référentiel, pour être exploitable, devra inclure des données complémentaires comme le contexte pédoclimatique et la description des pratiques culturales. La construction de ce référentiel est actuellement en cours à travers (i) le déploiement de partenariats à la fois publics et privés, (ii) la digitalisation de l'outil qui permettra de construire une base de données pour comparer les résultats obtenus aux références existantes. Le partage de ces données, que l'on souhaite, sera cependant subordonné à la volonté des utilisateurs ainsi qu'à l'origine des bailleurs (public-privé). Cependant l'analyse de la santé du sol sera toujours plus précise avec l'approche relative car la modélisation générique ne pourra jamais prendre en compte l'ensemble des co-variables (texture, climat, pratiques, topographie etc.) qui impactent la santé des sols à des degrés divers.

Est-il toujours nécessaire d'utiliser les 9 outils ?

L'utilisation d'un set de 9 indicateurs peut sembler complexe et chronophage, elle demande environ 1h30 par parcelle incluant 3 répétitions internes, avec une équipe d'environ 3 à 4 personnes. Nos études montrent clairement l'absence de redondance entre les résultats des 9 outils, ou quand ces redondances existent, elles sont ponctuelles et dépendent du site d'étude (Thoumzeau *et al.*, 2019b). Chacun des 9 outils apporte donc, au moins dans un contexte, une information importante à intégrer dans l'évaluation de la santé des sols. De plus, l'intérêt de cette approche multifonctionnelle réside dans la prise en compte des synergies/compromis entre les fonctions du sol ; restreindre le set d'indicateurs ne serait donc plus compatible avec le concept initial de l'approche Biofunctool®. En revanche, en fonction des questions posées, il peut être important de compléter ces mesures par des mesures de biodiversité du sol si l'utilisateur est intéressé par le lien entre assemblages biologiques et fonctionnement du sol ou des mesures plus agronomiques pour expliciter le lien entre santé du sol et performances agronomiques.

Pourquoi ne mesurer que 3 fonctions ? Peut-on inclure d'autres fonctions ?

Biofunctool® a été élaboré pour répondre au besoin d'évaluation multifonctionnelle de la santé des sols (Bünemann *et al.*, 2018). Nous avons sélectionné les trois fonctions clefs du sol selon Kibblewhite *et al.* (2008). Cependant, d'autres fonctions importantes ne sont pas prises en compte, comme la régulation des ravageurs (bio contrôle) ou la dynamique des polluants dans les sols. S'il existe des outils ou techniques pour caractériser ces fonctions, aucun ne s'avère être compatible avec les critères de sélection de Biofunctool® (généricité, facilité d'emploi, mesures de terrains, faible coût etc.). Ainsi la pression des pathogènes des sols dépend fortement du type de plante traité, ce qui limite la potentialité générique des indicateurs. Les mesures du degré de pollution ne rentrent pas dans le cadre de l'approche fonctionnelle mais le degré de pollution d'un sol à des conséquences fonctionnelles (Gall *et al.*, 2015 ; Giller *et al.*, 2009). C'est pourquoi, dans le cas où ces paramètres sont prégnants (ex : cas des friches industrielles pour la pollution des sols), la mesure de ces paramètres pourrait servir de co-variables explicatives des mesures fonctionnelles effectuées.

Existe-t-il une période privilégiée de mesures ?

Comme les mesures fonctionnelles sont très fortement liées au degré d'activité de la composante biotique des sols, qui dépend fortement des conditions climatiques (température et humidité du sol notamment), il est important de cibler une période de mesure qui permette l'expression de cette activité. La période favorable dépend des contextes climatiques locaux mais, en milieu tropical, nos mesures ont été effectuées en grande majorité à la fin de la saison des pluies et en milieu tempéré à l'intersaison (printemps ou automne). Il est aussi important de mesurer la température et l'humidité du sol en complément des mesures Biofunctool®. Ces variables servent de co-variable d'ajustement notamment pour d'éventuelles comparaisons inter-sites.

Peut-on mesurer une évolution temporelle de la santé des sols avec Biofunctool® ?

L'ensemble des exemples donnés dans cet article concerne des approches comparatives de pratiques et synchroniques (mesures à un temps *t*, comparant des parcelles d'âges différents le long d'une chronosequence). Pour sortir de cette approche relative, il est possible de suivre l'évolution temporelle de la santé des sols d'une même parcelle selon une approche dite diachronique. Cette approche est actuellement testée avec succès en Côte d'Ivoire. Les premiers résultats sur deux années d'expérimentation démontrent la robustesse de cette approche (mêmes tendances sur divers sites pédologiquement différents).

Cette approche par l'évaluation de fonctions du sol semble donc pertinente pour évaluer des phases de transitions agricoles (ex : transitions agroécologiques) car elle permettrait de suivre l'aggradation fonctionnelle du système sol soumis aux changements de pratiques.

Biofunctool®, un outil de terrain utilisable par tous ?

Dans la sélection des indicateurs, les critères liés à la facilité d'emploi sur le terrain et le faible coût étaient des critères primordiaux. Biofunctool® devait, en priorité, être transférable à des non spécialistes de terrain. Les nombreuses formations effectuées autour de cet outil vers des étudiants, instituts techniques, ONG ont démontré que Biofunctool® répondait bien à cet objectif de transférabilité et d'opérationnalité de terrain avec cependant certaines limites :

1. Disposer d'un laboratoire de base (balance, étuve, agitateur etc.) pour la préparation de certains outils, comme SituResp® (pour mesurer la respiration du sol), les solutions de POXC (mesure de C labile), le remplissage des lamina baits et le chargement des membranes échangeuses d'ions.
2. Accéder à un laboratoire d'analyse des sols. Même si la grande majorité des données est issue des mesures directes sur le terrain, celles liées à la mesure du cycle des nutriments (azote minéral) issues de la désorption des membranes échangeuses d'ions (nitrates, ammonium, etc.) nécessitent encore l'accès à un laboratoire d'analyses.
3. Avoir des connaissances en statistiques unies et multivariées. En effet, si les mesures de terrain restent à la portée de tous les utilisateurs, les analyses du jeu de données obtenues pour l'obtention de l'index de qualité du sol nécessitent une bonne connaissance des outils statistiques.

L'objectif à court et moyen termes est de pallier ces limites pour, *in fine*, se passer du laboratoire (au moins en aval) et d'experts pour l'analyse des résultats. Pour ce faire, nous sommes en train de tester des solutions permettant l'analyse directe extemporanément et sur le terrain de la concentration des solutions en nutriments ciblés. Pour l'analyse statistique des résultats, la stratégie adoptée est de développer une application numérique sur tablette ou smartphone permettant l'obtention directe des résultats et de l'index de qualité.

Biofunctool®, un outil pédagogique pour initier les étudiants ou le grand public à la préservation des sols ?

L'expérience acquise au cours des diverses formations de terrain nous a démontré la force pédagogique de l'outil *via* sa simplicité d'utilisation sur le terrain. L'obtention rapide (dans la journée) de la majorité des résultats permet d'enrichir les échanges avec les différents utilisateurs (étudiants, agriculteurs, techniciens

de terrains, etc.) Ces échanges permettent une appréhension partagée des facteurs potentiellement explicatifs des résultats obtenus. La méthode est donc une excellente entrée pour sensibiliser les utilisateurs à l'importance de la vie des sols sous un angle fonctionnel et facilement compréhensible.

CONCLUSION - PERSPECTIVES

Biofunctool® est une méthode d'évaluation de la multifonctionnalité des sols. Son premier intérêt est de pouvoir faire une évaluation de l'impact de pratiques agricoles ou de divers agroécosystèmes sur le fonctionnement des sols. Biofunctool® peut aussi être combiné à d'autres méthodes d'évaluation pour mieux comprendre certains mécanismes du sol, ou apporter une évaluation plus exhaustive des systèmes. D'un point de vue écologique, il peut participer à une meilleure compréhension du lien biodiversité-fonctionnement du sol (Lavelle *et al.*, 2006) en mettant en lien les fonctions mesurées avec les différents assemblages ou réseaux d'interactions (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020). D'un point de vue plus agronomique, Biofunctool® peut être utilisé comme un outil d'évaluation voire de conception d'agrosystèmes. Par exemple, la méthode peut être combinée avec d'autres indicateurs environnementaux (biodiversité, pertes en nutriments, utilisation de pesticides...), agronomiques (rendements, état nutritionnel des plantes...), socio-économiques (profitabilité, main-d'œuvre...) pour fournir une évaluation multicritère des agrosystèmes à l'échelle du système de culture. L'évaluation multicritère permettra alors de caractériser la complexité des compromis entre les composantes de l'agrosystème. Enfin, Biofunctool® enrichit le set de méthodes potentiellement intégrables dans les méthodes d'évaluation environnementales. Des freins méthodologiques sont actuellement rencontrés dans divers cadres méthodologiques, comme l'Analyse Cycle de Vie (Garrigues *et al.*, 2012). À travers des changements d'échelles et la création de référentiels, Biofunctool® pourrait contribuer à la définition de nouveaux facteurs, intégrant la santé des sols dans l'ACV. Ces facteurs seraient alors basés sur la dérivation de données de terrain, à l'inverse des modèles empiriques actuellement proposés qui rencontrent, dans le cadre de l'ACV, de nombreuses limites de sensibilité et robustesse (Thoumazeau *et al.*, 2019c).

MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

L'outil est téléchargeable sur : https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/06/Protocoles_BIOFUNCTOOL.pdf

REMERCIEMENTS

Le développement de l'outil a été financé dans le cadre du LMI LUSES, le projet ANR HEVEAADAPT (ANR-14-CE03-0012) et le projet HEVEABIODIV, financé par les professions hévéicoles et l'Institut Français du Caoutchouc. Nous tenons à remercier Nancy Rakotondrazafy (IRD, UMR Eco&Sols) pour son aide indispensable dans le déploiement de l'outil et pour la rédaction des protocoles en annexe de cet article. Nous remercions l'ensemble des experts ayant participé au workshop organisé en 2015 pour la sélection des outils Biofunctool® : Thibaud Decaëns et Raphaël Marichal (écologie du sol), Nicolas Bottinelli, Jean-Luc Maeght, Benoît Jaillard (physique du sol), Louis Mareschal (biogéochimie), Philippe Thaler, Nopmanee Suvannang (cycle du carbone), Alain Brauman, Pascal Alonso (microbiologie). Nous remercions nos partenaires thaïlandais, en particulier les chercheurs du Land Development Department, Nopmanee Suvannang, Phantip Panklang, Audjima Phongjinda et Prapatsorn Polwong, pour leurs aides techniques et opérationnelles, Teerawit Aungpadorn pour son apport dans les mesures de terrains. Merci également à nos collègues du Cirad : Frédéric Gay, Philippe Thaler (UMR Eco&Sols), Cécile Bessou, Victor Baron et Thibaut Perron (UPR Systèmes de pérennes) et nos collègues de l'IRD Jean-Louis Janeau (IESS Paris), Jean Trap, Claude Hammecker (UMR Eco&Sols) pour leur aide dans la conception du set. Enfin, un grand merci aussi à l'ensemble des étudiants de Master qui ont contribué à la validation de cet outil dans différents contextes (Marie-Sophie Renevier et Aurore Béral en Thaïlande, Clara Lefèvre au Cambodge, Tobias Sturm en Nouvelle-Calédonie, Julia Denier à Madagascar et Charlotte Simon en Côte d'Ivoire). Les auteurs remercient aussi les deux relecteurs, Guenola Peres et Antonio Bispo qui ont contribué à l'amélioration de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- Amézqueta E., 1999 - Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14, 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- Bastida F., Zsolnay A., Hernández T., García C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Blagodatsky S., Xu J., Cadisch G., 2016 - Carbon balance of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations: A review of uncertainties at plot, landscape and production level. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 221, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.025>
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., Cluzeau D., Brun J.-J., 2013 - A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science* 64, 161–182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Broughton W.J., 1976 - Effect of various covers on soil fertility under *Hevea brasiliensis* muell. arg. and on growth of the tree. *Agro-Ecosystems* 3, 147–170. [https://doi.org/10.1016/0304-3746\(76\)90113-X](https://doi.org/10.1016/0304-3746(76)90113-X)
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Flesskens 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>
- Culman S.W., Snapp S.S., Freeman M.A., Schipanski M.E., Beniston J., Lal R., Drinkwater L.E., Franzluebbers A.J., Glover J.D., Grandy A.S., Lee J., Six J., Maul J.E., Mirsky S.B., Spargo J.T., Wander M.M., 2012 - Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of America Journal* 76, 494–504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
- Delgado-Baquerizo M., Reich P.B., Trivedi C., Eldridge D.J., Abades S., Alfaro F.D., Bastida F., Berhe A.A., Cutler N.A., Gallardo A., García-Velázquez L., Hart S.C., Hayes P.E., He J.-Z., Hseu Z.-Y., Hu H.-W., Kirchmair M., Neuhauser S., Pérez C.A., Reed S.C., Santos F., Sullivan B.W., Trivedi P., Wang J.-T., Weber-Grullon L., Williams M.A., Singh B.K., 2020 - Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nat Ecol Evol* 4, 210–220. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-y>
- Gall J.E., Boyd R.S., Rajakaruna N., 2015 - Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environ Monit Assess* 187, 201. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4436-3>
- Garrigues E., Corson M.S., Angers D.A., van der Werf H.M.G., Walter C., 2012 - Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. *Ecological Indicators* 18, 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.014>
- Giller K.E., Witter E., McGrath S.P., 2009 - Heavy metals and soil microbes. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 2031–2037. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.04.026>
- Graham E.B., Wieder W.R., Leff J.W., Weintraub S.R., Townsend A.R., Cleveland C.C., Philippot L., Nemerugut D.R., 2014 - Do we need to understand microbial communities to predict ecosystem function? A comparison of statistical models of nitrogen cycling processes. *Soil Biology and Biochemistry* 68, 279–282. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.023>
- Griffiths B.S., Römcke J., Schmelz R.M., Scheffczyk A., Faber J.H., Bloem J., Pérès G., Cluzeau D., Chabbi, A., Suhadolc, M., Sousa, J.P., Martins da Silva, P., Carvalho, F., Mendes, S., Morais P., Francisco R., Pereira C., Bonkowski M., Geisen S., Bardgett R.D., de Vries F.T., Bolger T., Dirilgen T., Schmidt O., Winding A., Hendriksen N.B., Johansen A., Philippot L., Plassart P., Bru D., Thomson B., Griffiths R.I., Bailey M.J., Keith A., Rutgers M., Mulder C., Hannula S.E., Creamer R., Stone D., 2016 - Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological Indicators* 69, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.023>
- Guimarães R.M.L., Ball B.C., Tormena C.A., 2011 - Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management* 27, 395–403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>
- Herrick J.E., Whitford W.G., de Souza A.G., Van Zee J.W., Havstad K.M., Seybold C.A., Walton M., 2001 - Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *CATENA, Soil aggregation in arid and semi-arid environments* 44, 27–35. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00173-9)
- Horrigue W., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Maron P.-A., Ranjard L., 2016 - Predictive model of soil molecular microbial biomass. *Ecological Indicators* 64, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.004>
- Iltstedt U., Malmer A., Verbeeten E., Muriyoso D., 2007 - The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management, Planted Forests and Water* 251, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014>

- Jégou D., Cluzeau D., Balesdent J., Tréhen P., 1998 - Effects of four ecological categories of earthworms on carbon transfer in soil. *Applied Soil Ecology* 9, 249–255. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(97\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(97)00057-7)
- Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P., 2019 - Soil structure quality indicators and their limit values. *Ecological Indicators* 104, 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.040>
- 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.
- Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J., 2008 - Soil health in agricultural systems. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 363, 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Lassabatère L., Angulo-Jaramillo R., Soria Ugalde J.M., Cuenca R., Braud I., Haverkamp R., 2006 - Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70, 521–532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>
- Lavelle P., Charpentier F., Villenave C., Rossi J.-P., Derouard L., Pashanasi B., André J., Ponge J.-F., Bernier N., 2004 - Effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics at a landscape scale over decades, in: Edwards, C.A. (Ed.), *Earthworm Ecology*, 2nd Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 145–160. <https://doi.org/10.1201/9781420039719.pt4>
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P., Rossi J.-P., 2006 - Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, ICSZ 42, S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Le Cadre E., Kinkondi M., Koutika L.-S., Epron D., Mareschal L., 2018 - Anionic exchange membranes, a promising tool to measure distribution of soil nutrients in tropical multispecific plantations. *Ecological Indicators* 94, 254–256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.041>
- Loranger G., Ponge J.-F., Imbert D., Lavelle P., 2002 - Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality. *Biol Fertil Soils* 35, 247–252. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0467-3>
- Maron P.-A., Sarr A., Kaisermann A., Lévêque J., Mathieu O., Guigou J., Karimi B., Bernard L., Dequiedt S., Terrat S., Chabbi A., Ranjard L., 2018 - High Microbial Diversity Promotes Soil Ecosystem Functioning. *Appl Environ Microbiol* 84. <https://doi.org/10.1128/AEM.02738-17>
- Ng E.L., Zhang J., 2019 - The Search for the Meaning of Soil Health: Lessons from Human Health and Ecosystem Health. *Sustainability* 11, 3697. <https://doi.org/10.3390/su11133697>
- Obriot F., Stauffer M., Goubar Y., Cheviron N., Peres G., Eden M., Revallier A., Vieublé-Gonod L., Houot S., 2016 - Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.004>
- Pheap S., Lefèvre C., Thoumazeau A., Leng V., Boulakia S., Koy R., Hok L., Lienhard P., Brauman A., Tivet F., 2019 - Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia. *Soil and Tillage Research* 194, 104349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104349>
- Ponge J.-F., Chevalier R., Loussot P., 2002 - Humus Index: an integrated tool for the assessment of forest floor and topsoil properties. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1996–2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1996>
- Qian P., Schoenau J.J., 2002 - Practical applications of ion exchange resins in agricultural and environmental soil research. *Can. J. Soil. Sci.* 82, 9–21. <https://doi.org/10.4141/S00-091>
- Rinot O., Levy G.J., Steinberger Y., Svoray T., Eshel G., 2019 - Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of The Total Environment* 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
- Swift M.J., Heal O.W., Anderson J. M., Anderson J. M., 1979 - *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. University of California Press.
- Thomas F., Rossi J.-P., Decaëns T., Grimaldi M., Lavelle P., Fernando da Silva Martins P., Garnier-Zarli E., 2008 - Comparative analysis of *Andiodrilus pachoensis* casts in forests and pastures of South-Eastern Amazon (Brazil). *European Journal of Soil Biology*, Special Section of the 7th International Apterygota Seminar 44, 545–553. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.09.003>
- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M.-S., Panklang P., Puttaso P., Peerawat M., Heepngoen P., Polwong P., Koonklang N., Sdoodee S., Chantuma P., Lawongsa P., Nimkingrat P., Thaler P., Gay F., Brauman A., 2019a - Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index. *Ecological Indicators* 97, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.028>
- 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., 2019b - 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>
- Thoumazeau A., Bustany C., Rodrigues J., Bessou C., 2019c - Using the LANCA® Model to Account for Soil Quality Within LCA: First Application and Approach Comparison in Two Contrasted Tropical Case Studies. *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability* 3.
- Thoumazeau A., Gay F., Alonso P., Suvannang N., Phongjinda A., Panklang P., Chevallier T., Bessou C., Brauman A., 2017 - SituResp®: A time- and cost-effective method to assess basal soil respiration in the field. *Applied Soil Ecology* 121, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.006>
- Unger P.W., Vigil M.F., 1998. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation* 53, 200–207.
- van Groenigen J.W., Huygens D., Boeckx P., Kuyper T.W., Lubbers I.M., Rütting T., Groffman P.M., 2015 - The soil N cycle: new insights and key challenges. *SOIL* 1, 235–256. <https://doi.org/10.5194/soil-1-235-2015>
- Velasquez E., Lavelle P., Andrade M., 2007 - GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 3066–3080. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>
- Vogel H.-J., Bartke S., Daedlow K., Helming K., Kögel-Knabner I., Lang B., Rabot E., Russell D., Stöbel B., Weller U., Wiesmeier M., Wollschläger U., 2018 - A systemic approach for modeling soil functions. *SOIL* 4, 83–92. <https://doi.org/10.5194/soil-4-83-2018>
- von Törne E., 1990. Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests. *Pedobiologia* 34, 89–101.
- Wagg C., Bender S.F., Widmer F., van der Heijden M.G.A., 2014 - Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *PNAS* 111, 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Wall D.H., Bradford M.A., John M.G.S., Trofymow J.A., Behan-Pelletier V., Bignell D.E., Dangerfield J.M., Parton W.J., Rusek J., Voigt W., Wolters V., Gardel H.Z., Ayuke F.O., Bashford R., Beljakova O.I., Bohlen P.J., Brauman A., Flemming S., Henschel J.R., Johnson D.L., Jones T.H., Kovarova M., Kranabetter J.M., Kutny L., Lin K.-C., Maryati M., Masse D., Pokarzhevskii A., Rahman H., Sabará M.G., Salamon J.-A., Swift M.J., Varela A., Vasconcelos H.L., White D., Zou X., 2008 - Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology* 14, 2661–2677. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01672.x>
- Weil R.R., Islam I.R., Stine M.A., Gruver J.B., Samson-liebig S.E., 2003 - Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture* 3–17.
- Wienhold B.J., Andrews S.S., Karlen D.L., 2004 - Soil Quality: A Review of the Science and Experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health* 26, 89–95. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039571.59640.3c>

Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B., Sartori G., Kolb E., Gobat J.-M., Bayon R.-C.L., Aubert M., Waal R.D., Delft B.V., Vacca A., Serra G., Chersich S., Andreetta A., Cools N., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K., Brêthes A., Nicola C.D., Testi A., Bernier N., Graefe U., Juilleret J., Banas D., Garlato A., Obber S., Galvan P., Zampedri R., Frizzera L., Tomasi M., Menardi R., Fontanella F., Filoso C., Dibona R., Bolzonella C., Pizzeghello D., Carletti P., Langohr R., Cattaneo D., Nardi S., Nicolini G., Viola F., 2018 - Humusica 1, article 4: Terrestrial humus systems and forms—Specific terms and diagnostic horizons. Applied Soil Ecology, HUMUSICA 1 - Terrestrial Natural Humipedons 122, 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.07.005>

