



HAL
open science

Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ

Anne-Sophie Perrin, Romain Tscheiller, Wassila Riah-Anglet, Elodie Cusset, Matthieu Valé, Christophe Barbot, Pierre-Yves Roussel, Sylvie Recous, Thibaud Deschamps, Sabine Houot, et al.

► To cite this version:

Anne-Sophie Perrin, Romain Tscheiller, Wassila Riah-Anglet, Elodie Cusset, Matthieu Valé, et al.. Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. 2023, pp.15-30. 10.17180/ciag-2023-vol88-art02 . hal-04312284

HAL Id: hal-04312284

<https://hal.inrae.fr/hal-04312284v1>

Submitted on 28 Nov 2023

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

Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ

Perrin Anne-Sophie¹, Tscheiller Romain², Riah-Anglet Wassila⁴, Cusset Elodie⁴, Valé Matthieu⁵, Barbot Christophe⁶, Roussel Pierre-Yves⁷, Recous Sylvie⁸, Deschamps Thibaud³, Houot Sabine⁹, Lambert Yvon⁷, Leclerc Blaise¹⁰, Bouthier Alain³, Trinsoutrot-Gattin Isabelle⁴, Bennegadi-Laurent Nadia⁴

¹ Terres-Inovia, UMR Eco&sols, 2 place Viala, Institut Agro, 34060 Montpellier, France

² Arvalis, Station inter-instituts, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France

³ Arvalis, Domaine expérimental du Magneraud, 17700 Saint-Pierre-d'Amilly, France

⁴ UniLaSalle, AGHYLE Research Unit UP 2018.C101, 76134 Mont-Saint Aignan; SFR Normandie Végétal FED 4277, 76000, Rouen, France

⁵ Auréa AgroSciences, 270 avenue de la pomme de pin, 45160 Ardon, France

⁶ Chambre d'Agriculture d'Alsace, Espace Européen de l'Entreprise, 2 rue de Rome, CS 30022 Schiltigheim, 67013 Strasbourg, France

⁷ Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Avenue Borgnis Desbordes, BP 398, 56009 Vannes, France

⁸ Université de Reims Champagne-Ardenne, INRAE, UMR FARE, 51100 Reims, France

⁹ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, Avenue Lucien Bretignières, 78850, Thiverval-Grignon, France

¹⁰ ITAB, 149 Rue de Bercy, 75012 Paris, France

Correspondance : as.perrin@terresinovia.fr, r.tscheiller@arvalis.fr, wassila.riah-anglet@unilasalle.fr

Résumé

La transition agroécologique des systèmes en grandes cultures nécessite d'optimiser les pratiques permettant à la fois i) de stocker du carbone dans le sol sur le long terme et ii) d'augmenter la fourniture de nutriments aux cultures. Les outils de diagnostic en laboratoire manquent encore pour que les agriculteurs puissent évaluer la capacité du sol à assurer ces deux fonctions afin de les optimiser. Microbioterre vise à référencer des indicateurs analytiques de microbiologie des sols en lien avec les cycles du carbone et de l'azote (« bioindicateurs »), les plus matures scientifiquement et techniquement. L'objectif est de pouvoir les utiliser en routine comme des outils de pilotage de pratiques culturales. Le projet a évalué comment ces bioindicateurs répondent à différents modes de gestion des matières organiques en grandes cultures et en polyculture-élevage à partir de mesures dans des essais de moyenne-longue durée dans des systèmes de production diversifiés, et d'analyses bibliographiques. Les relations entre ces indicateurs et, d'une part les fonctions des sols et, d'autre part les pratiques culturales étudiées, ont aussi été explicitées. Un guide pratique sur ces bioindicateurs et leur interprétation pour le diagnostic est proposé à destination des conseillers agricoles et agriculteurs ainsi que différents modules de formation.

Mots-clés : analyse de terre, bioindicateurs, microbiologie du sol, carbone, azote, pratiques culturales, grandes cultures et polyculture élevage, diagnostic en agroécologie.

Abstract: Microbioterre - Reference soil microbiology indicators and integrate them into routine soil analysis, to improve the management of organic restitution in fields

The agroecological transition of field crop systems involves optimizing practices that both i) store carbon in the soil over the long term and ii) increase the supply of nutrients to crops. However, there is still a lack of laboratory-based diagnostic tools to enable farmers to assess the soils' capacity to perform these two functions, with a view to improving them. The aim of Microbioterre was to reference the most scientifically reliable and technically mature analytical indicators of soil microbiology linked to carbon and nitrogen cycles ("bioindicators"). The ultimate goal was to be able to use them as routine management tools to adapt farming practices. The project assessed the way in which these bioindicators respond to different organic matter management practices in arable and mixed cropping-livestock, based on measurements carried out in medium or long-term trials in diversified production systems and on literature reviews. The relationships between these indicators and soil functions, on the one hand, and the agricultural practices studied, on the other, were also assessed. A practical guideline on these bioindicators and their interpretation for diagnosis is proposed to agricultural advisors and farmers as well as various training modules.

Keywords : soil analyses, soil microbiology, bioindicators, carbon, nitrogen, agricultural practices, diagnosis in agroecology.

1. Introduction

Aujourd'hui, l'analyse de terre « de routine » fournit aux conseillers agricoles et aux agriculteurs des informations pour gérer la fertilisation minérale, les apports d'amendements minéraux basiques et un premier niveau de l'état organique du sol (teneur en matière organique et bilan humique) (Bouthier *et al.*, 2020). Elle concerne peu d'autres pratiques culturelles pourtant mises en évidence par l'agroécologie pour leur impact positif sur la fertilité biologique du sol comme les apports d'amendements et de fertilisants organiques, les couverts végétaux et la restitution des résidus de culture. La mise en œuvre opérationnelle de l'agroécologie nécessite l'adaptation des pratiques culturelles et des systèmes de production, notamment la réduction de l'utilisation des engrais de synthèse (Wezel *et al.*, 2009 ; Claveirole, 2016). Cela passe par une meilleure prise en compte de la contribution des matières organiques et de la fixation de l'azote atmosphérique, processus sous le contrôle direct des communautés biologiques des sols (ex. Berthelin, 2007). Cette optimisation du fonctionnement biologique du sol demande de nouveaux outils de diagnostic et de pilotage. Le projet Microbioterre, piloté par Arvalis, s'est donc attaché à intégrer des analyses microbiologiques en lien avec les cycles de l'azote et du carbone aux analyses de terre réalisées par des laboratoires. L'objectif général du projet était que les conseillers agricoles et les agriculteurs disposent d'outils de routine pour prendre en compte la composante microbiologique des sols. Le diagnostic, élargi à la microbiologie du sol, devait permettre de gérer au mieux le nécessaire compromis entre le stockage du carbone sous des formes stables (atténuation du changement climatique) et la dégradation des matières organiques par l'activité biologique du sol. Celle-ci contribue en effet à nourrir les cultures grâce au recyclage des nutriments, principalement l'azote, mais également le soufre et le phosphore. Microbioterre s'est concentré sur l'azote en raison de son impact majeur sur l'agronomie et l'environnement et du fait des travaux de recherche plus avancés sur les indicateurs microbiologiques. Le projet s'est basé sur le référencement de bioindicateurs. Un bioindicateur est ici défini comme « une variable issue d'un ou plusieurs paramètre(s) microbiologique(s) mesuré(s) sur un échantillon de terre renseignant l'état et le fonctionnement biologique du sol et pouvant aider à la gestion de pratiques culturelles favorables à l'expression de certaines fonctions du sol, en priorité les fonctions de transformations du carbone et de recyclage de l'azote ». Il s'agissait de déterminer ceux qui, seuls ou en combinaison, permettraient de rendre compte au mieux de la capacité du sol à assurer les fonctions visées. Les critères de choix des bioindicateurs reposaient sur leur capacité à discriminer des pratiques agricoles, mais aussi le coût de leur analyse et leur faisabilité en routine. Un schéma interprétatif

complet peut ainsi être proposé sous une forme adaptée à une utilisation par les laboratoires, conseillers agricoles et agriculteurs (Figure 1).

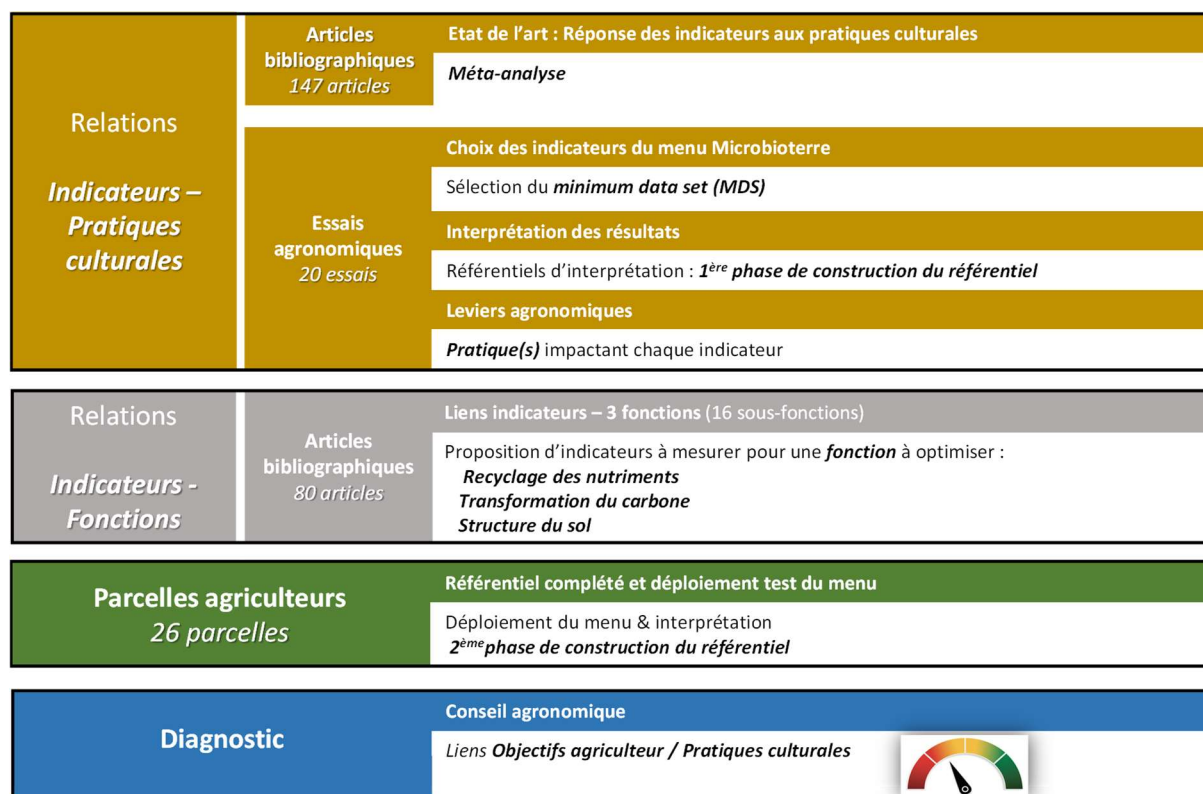


Figure 1 : Synthèse des travaux menés dans le projet

2. Matériel et méthodes

2.1 Revue bibliographique et méta-analyse

Un état des connaissances antérieures au projet a été réalisé sur les mesures existantes en lien avec la composante microbiologique des sols. Une revue approfondie de la bibliographie scientifique a été réalisée, comprenant deux axes d'analyses : étudier les relations entre les bioindicateurs et les fonctions du sol ; étudier le lien entre les bioindicateurs et les pratiques culturales (Figure 1).

2.2 Sites retenus et pratiques culturales étudiées

Après une prospection large des essais de moyen/long-terme de comparaison de pratiques existant en France métropolitaine, les sites à échantillonner ont été sélectionnés sur la base de critères définis dans un cahier des charges (Tableau 1).

Tableau 1 : Critères de sélection des sites expérimentaux

Types d'essais :
Essais implantés depuis plus de 5 ans
Essais de comparaison comportant un système de référence (conventionnel)
Essais à 2 ou 3 blocs de répétition (sauf exception)
Données antérieures requises :
Analyses physico-chimiques à l'échelle parcelle ou bloc (sites homogènes)
Biomasses des résidus de cultures et couverts restituées, quantités de produits résiduaux organiques apportés
Teneurs en carbone organique et azote total à au moins une date (couche de sol considérée connue)
Profondeur de travail du sol le plus profond
Présence ou non d'hydromorphie, de drainage
Historique simplifié sur 10 ans avant le début de l'essai
Présence ou non d'irrigation (années irriguées le cas échéant)

Vingt sites expérimentaux répartis sur l'ensemble du territoire français métropolitain ont été retenus (Figure 2). Ces essais, mis en place pour étudier les effets moyen/long-terme des pratiques agricoles, sont pilotés par INRAE, Arvalis, les Chambres d'Agriculture Grand Est, Pays de la Loire et Bretagne, Terres Inovia, la coopérative agricole Dijon Céréales et l'Ecole d'ingénieurs de Purpan. Les pratiques culturales évaluées sont l'allongement des rotations, la réduction du travail du sol, l'introduction de couverts intermédiaires, les apports de produits résiduaux organiques (PRO) ou la conversion en systèmes de culture « innovants » ou biologiques. Au total 61 modalités agronomiques ont été étudiées.

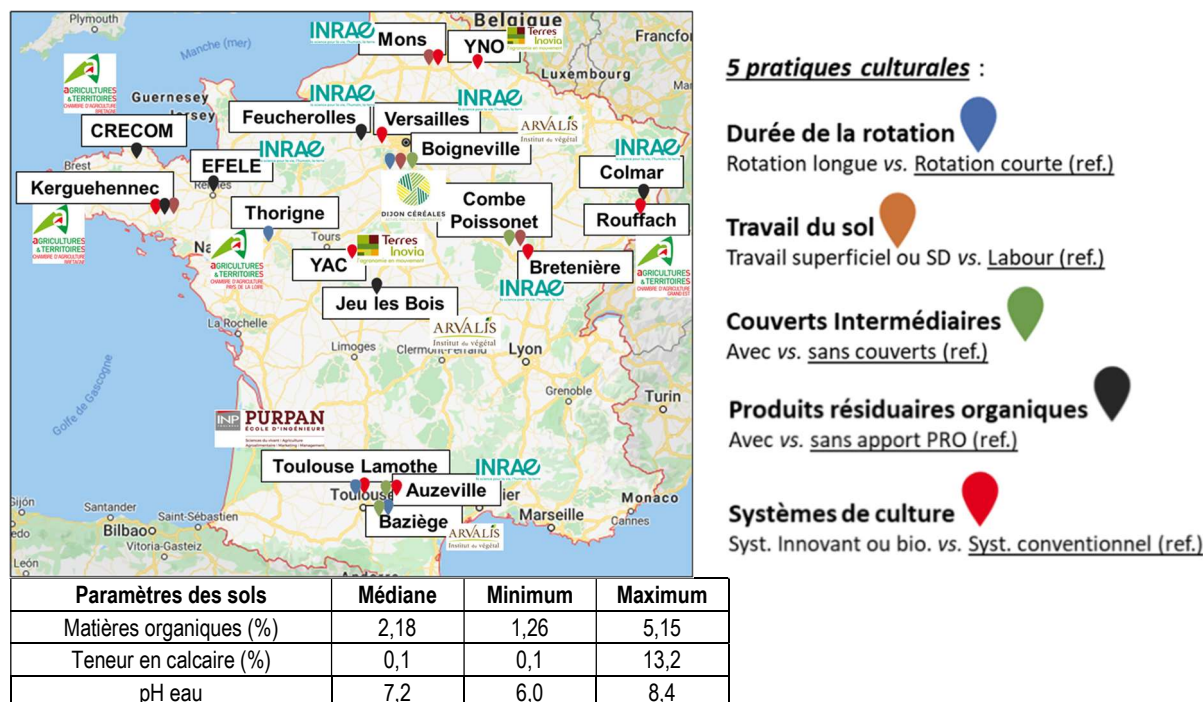


Figure 2 : Carte des sites expérimentaux ayant permis la récolte de données et tableau précisant les gammes de variation des situations pédologiques

2.3 Procédure d'échantillonnage et observations sur le terrain

La période d'observation et d'échantillonnage des sols s'est étalée du 30/03/2017 au 24/05/2018. Des préleveurs professionnels d'Auréa AgroSciences ont échantillonné les sols des essais en suivant les protocoles définis dans le projet et les recommandations sur la période d'intervention. Les sites de Crecom et Jeu-Les-Bois ont été échantillonnés en 2017 (dernière année des essais). Certaines analyses, réalisables sur sols secs, ont été menées sur les sols conservés des sites de Doignies (YNO) et Villedieu-sur-Indre (YAC). Dans chaque essai, trois échantillons de terre (répétitions spatiales) ont été prélevés pour chaque pratique culturale (Figure 2) sur la couche 0-20cm. L'impact de la profondeur d'échantillonnage sur les résultats d'analyses a été évalué sur les essais portant sur le travail du sol : Kerguéhennec Travail du sol, Toulouse Lamothe et Boigneville Environnement (une modalité labour et une modalité semis direct) (résultats non présentés dans cet article). Après tamisage à 6,3 mm, les échantillons frais de terre ont été envoyés (en glacière munie de pain de glace) le plus rapidement possible aux laboratoires en charge des analyses, dans un délai maximal de trois jours après le prélèvement. Une fiche d'observation spécifique a été rédigée à destination des préleveurs afin de collecter les informations relatives aux observations de terrain : position dans le paysage afin d'avoir une information des flux hydriques sur la parcelle, estimation visuelle du taux de cailloux, des taux et types de couverture du sol (par les résidus de végétaux et turricules), de l'état de surface du sol etc. Le niveau de compaction du sol a été évalué sur chaque essai en réalisant 3 tests bêche par parcelle, l'hypothèse étant que l'état structural influe sur les composantes biologiques étudiées. Le test bêche a été réalisé selon la méthode ISARA (Peigne, 2016), en incorporant des éléments de la méthode Görbing (Drangmeister, 2006). La profondeur des sols a été estimée en déterminant la profondeur de blocage de la tarière (sols profonds, moyennement profonds et superficiels). Les signes d'hydromorphie à moins de 60 cm ont également été signalés.

2.4 Méthodes de caractérisation des sols et analyses réalisées

Une caractérisation physico-chimique générale des sols a été réalisée (texture, capacité d'échange cationique, teneur en matières organiques MO, taux de calcaire, pH eau). Huit classes puis 3 groupes de classes de textures (pas de site en texture grossière) ont été définis selon le triangle des textures GEPPA (1963). L'humidité relative¹ au moment du prélèvement a été mesurée. A ces mesures, se sont ajoutées des analyses physico-chimiques plus spécifiquement liées aux cycles du carbone et de l'azote (Tableau 2) et des analyses microbiologiques (Tableau 3) déjà pratiquées en routine par les laboratoires ou suffisamment au point pour être transférées.

¹ Humidité en % de matière sèche divisée par l'humidité à la capacité au champ à pF 2,5. Cette variable renseigne sur le niveau d'humidité par rapport au niveau optimal d'humidité.

Tableau 2 : Analyses physico-chimiques liées aux cycles du C et du N réalisées dans le projet

	Variables	Abréviations	Descriptions	Méthodes de mesure	Laboratoires
Carbone (C)	Carbone Organique du sol	COS	Carbone organique total	Oxydation sulfochromique (NF ISO 14235)	AUREA
	COS fraction 50-200 µm	COS 50-200	Carbone organique labile	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	COS fraction 200-2000 µm	COS 200-2000			
	Carbone oxydable au permanganate	POXC		Oxydation par KMnO4 (Culman et al., 2012 ; Weil et al., 2003)	SEMSE
	COS fraction 0-50 µm	COS 0-50	Carbone organique stable	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
Azote (N)	Azote total du sol	NTS	Azote total	Méthode Dumas (NF ISO 13878)	AUREA
	NTS fraction 50-200 µm	NTS 50-200	Azote labile	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	NTS fraction 200-2000 µm	NTS 200-2000			
	NTS fraction 0-50 µm	NTS 0-50	Azote stable	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA

Tableau 3 : Analyses microbiologiques réalisées dans le projet.

	Variables	Abréviations	Descriptions	Méthodes de mesure	Laboratoires
Abondances microbiennes	ADN total	ADN total	Abondance des microorganismes totaux	Biomasse moléculaire totale par quantification de l'ADN total du sol (Gangneux et al., 2011)	UniLaSalle
	Carbone de la biomasse microbienne	MBC		Méthode par fumigation-extraction (NF ISO 14240-2)	AUREA
	Quantification de l'ADNr 16S bactérien	ADNr 16S	Abondance des bactéries totales	Quantification de l'ADN 16S ribosomal (Gangneux et al., 2011)	RITTMO / UniLaSalle
	Quantification de l'ADNr 18S fongique	ADNr 18s	Abondance des champignons totaux	Quantification de l'ADN 18S ribosomal (Gangneux et al., 2011)	RITTMO / UniLaSalle
	Ergostérols total et libre	Ergo total & libre		Quantification des ergostérols total et libre (Montgomery et al., 2000; Gong et al., 2001)	UniLaSalle
Activités microbiennes	Hydrolyse de la Fluoresceine di-acétate	FDA	Activité enzymatique globale	Hydrolyse FDA (substrat universel) (Adam et al., 2001)	SEMSE
	Activité bêta-glucosidase	B-GLU	Activité enzymatique du cycle C	Hydrolyse de liaisons osidiques (ISO 20130:2018)	UniLaSalle
	C minéralisé moyen	C mine.	Potentiel de minéralisation C	Potentiel de minéralisation C (NF EN ISO 16072)	CELESTA LAB
	Activité protéase	PROT	Activités enzymatiques du cycle N	Dégradation de protéines et peptides PROT (Greenfield et al., 2021)	Université Lorraine
	Activité leucine aminopeptidase	LAP		LAP (Clivot et al., 2020)	Université Lorraine
	Activité arylamidase	ARYLN		ArylN (ISO 20130:2018)	RITTMO / UniLaSalle
	Azote Potentiellement Minéralisable	APM	Potentiel de minéralisation N	Double distillation (tampon phosphate borate et KCl) (Giannello and Bremner, 1986)	AUREA
	Azote Biologiquement Minéralisable	ABM		Incubation anaérobie 7 jours, 40 °C (Keeney and Bremner, 1966)	AUREA
N minéralisé moyen	N mine.	Potentiel de minéralisation N (XP U44-163 et NF ISO 14238)		CELESTA LAB	

Note : Le calcul (ergostérol total – ergostérol libre) permet d'estimer la concentration en ergostérol lié qui donne une information sur la biomasse fongique "viable" (Laval et al., 2009)

En complément des analyses de laboratoire, des données sur le contexte climatique des essais (température moyenne, pluviométrie, évapotranspiration, rayonnement) ont été collectées. Les responsables de sites expérimentaux ont par ailleurs fourni l'historique détaillé des pratiques culturales (minimum des 5 dernières années).

3. Résultats

3.1 Mesures au champ et choix des indicateurs Microbioterre

La base de données ainsi construite sur les essais de moyenne-longue durée a été analysée en vue de définir les bioindicateurs à retenir, à partir des critères de choix détaillés ci-dessous.

Redondance : Deux types d'analyses ont été considérés comme redondants si la même information était apportée et si leur coefficient de corrélation (méthode Pearson) en valeur absolue était supérieur à 0,9. Aucune paire d'analyses microbiologiques n'était corrélée avec un $R > 0,9$. Aussi les autres critères de choix ont été appliqués à l'ensemble des analyses réalisées.

Variabilité spatiale : Pour être un indicateur pertinent, les paramètres mesurés doivent être relativement peu variables spatialement. La précision de chaque type d'analyse microbiologique, dans un contexte pédoclimatique donné, a été considérée comme d'autant plus élevée que la variabilité spatiale entre les blocs de répétition était faible, calculée à partir du coefficient de variation (CV). Les seuils de CV de 15% et 25% (fixés à dire d'expert, Bouthier et al., 2015) n'ont globalement pas été dépassés pour les variables physico-chimiques et pour les variables microbiologiques, respectivement (Figure 3). Bien que les biomasses fongiques et bactériennes déterminées à partir du nombre de gènes de l'ADN ribosomique montrent des $CV > 25\%$, elles sont retenues. En effet, ces deux variables sont connues pour présenter une variabilité supérieure à celles des autres variables biologiques. Lors du programme ADEME bioindicateurs les CV médians étaient de 32% et 37% pour la biomasse bactérienne 16S et fongique 18S respectivement. Donc à ce stade, aucune analyse microbiologique n'a été écartée.

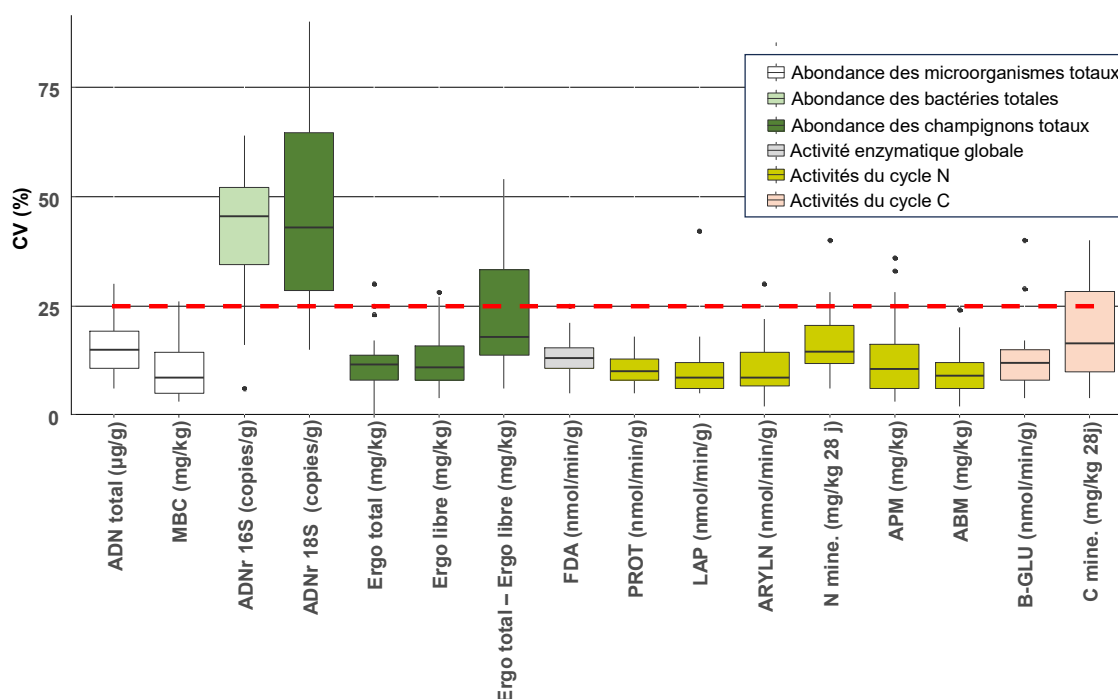


Figure 3 : Coefficients de variation (CV, ou % écart-type/moyenne) des résultats des différentes analyses microbiologiques réalisées.

Capacité à différencier les pratiques culturales : Les analyses ont été classées en fonction de leur capacité à différencier des pratiques culturales. Pour cela, dans un premier temps, des groupes d'essais ont été constitués pour chacune des 5 pratiques culturales (PRO, couverts d'intercultures, travail du sol, rotations, systèmes de cultures) (Tableau 4). Pour chaque pratique, une modalité de « référence » et une modalité « pratique culturale » sur un même site ont été comparées. Dans chaque groupe par pratique et pour chaque essai, toutes les comparaisons de modalités pertinentes (toutes choses égales par ailleurs) ont été identifiées. Par pratique, entre 5 (rotation) et 13 (PRO) comparaisons intra-essais totales

ont ainsi été étudiées. Le classement des variables selon leur sensibilité à la pratique dépend du nombre de comparaisons significatives (tests de comparaisons de moyennes à 5%) de chaque variable. Cette méthode de scoring par pratique, tous sites confondus, a ensuite été menée toutes pratiques confondues (somme des scores par pratique). La sélection d'indicateurs à retenir a été réalisée sur ce dernier classement avec l'objectif de choisir les indicateurs les plus polyvalents possibles. Dans cette démarche, le modèle linéaire étudié permet d'expliquer la variation de chaque paramètre mesuré par l'effet modalité. Le facteur « bloc de répétition » est pris en compte dans le modèle.

Les essais avec **apport de PRO** évalués dans ce projet ont été mis en place depuis 6 à 33 ans. Comme le montre le Tableau 4, ces essais sont ceux où les indicateurs discriminent le plus la pratique témoin (fertilisation minérale) des pratiques avec apports de PRO. Différents types et quantités de PRO ont été apportés selon les cas d'étude. Il semble y avoir un *effet âge* de la pratique d'après le nombre de variables évoluant significativement dans les essais récents (6 ans) par rapport aux essais les plus anciens (≥ 18 ans). L'effet quantité de PRO apportée peut être observé dans l'essai de Jeu les Bois puisque le compost de fumier a été apporté avec deux quantités différentes (0,06 et 0,13 t C/ha/an respectivement). Dans cette comparaison, même si l'essai est récent (6 ans), il semble y avoir un effet quantité de C apportée notamment sur certains indicateurs microbiologiques. En effet, dans la modalité avec la quantité de C la plus importante, certains indicateurs microbiologiques répondent à la pratique (biomasse microbienne par fumigation, ergostérol et activité arylamidase) alors qu'ils ne répondaient pas dans la modalité avec une quantité plus faible. En revanche, aucun essai ne permet de comparer l'effet type de PRO à quantité de C équivalente.

L'effet de la **réduction du travail du sol** dans les essais récents (< 10 ans) comme Mons et Combe Poisonnet est faible. Dans les systèmes plus anciens (≥ 18 ans), l'effet est plus variable. Même si l'essai A1 de Boigneville est ancien (47 ans), peu d'effets du semis direct (SD) ont été observés par rapport au labour sur la profondeur analysée. Cela s'explique par le fait que des quantités de matière organique fraîche identiques sont introduites dans les deux modalités ; la modalité labourée se voit implanter des couverts de niveau de biomasse équivalent au SD. Ainsi, sur la profondeur de labour, le taux de carbone organique reste équivalent dans cette situation, malgré une répartition différente dans l'horizon (concentration du carbone sur l'horizon de surface en SD). De même pour l'essai de Kerguehenec de 18 ans avec apport de fumier en SD. Quand les restitutions organiques entraînent une entrée de C dans le sol (par des apports de fumier incorporés sur 12 cm ou par les couverts), un nombre supérieur de variables varie significativement lors de la réduction du travail du sol. C'est le cas dans les essais Kerguehenec pour l'essai Travail du sol et Boigneville pour l'essai Environnement.

Les **couverts végétaux** d'interculture des essais ont des biomasses différentes mais globalement faibles à moyennes et de différents types (crucifères ou autres, en mélange ou non avec des légumineuses). Le nombre de mesures influencées par les pratiques baisse significativement dans les essais récents (7,8 et 9 ans) par rapport à l'essai le plus ancien (> 27 ans). Cet effet « âge de la pratique » est cependant moins marqué que pour la pratique apport de PRO. L'effet biomasse du couvert pour un même mélange n'a pas pu être évalué dans notre étude, ni l'effet type de couvert à biomasses de couverts équivalentes, par manque d'effectifs. Sur l'essai de Boigneville Environnement, il semble y avoir un effet croisé avec le travail du sol et de la gestion des résidus. En effet, en semis direct lorsque les résidus de cultures sont laissés en surface, plus de paramètres varient significativement par rapport au labour conventionnel avec résidus enfouis sur une profondeur supérieure à 20cm.

Par ailleurs, notre jeu de données ne nous permet pas d'évaluer l'effet des **systèmes de cultures** sur les indicateurs puisque les systèmes comparés sont très différents (Tableau 4).

Concernant la **durée de la rotation**, les mesures effectuées sur des essais récents (< 10 ans) ont peu évolué lorsque la durée de la rotation augmentait. Des variations plus significatives ont été observées pour les essais les plus anciens (Boigneville A1/A2) en labour comparant des rotations de 2 ans versus 4 ans.

Toutes pratiques confondues : Les variables à retenir comme bioindicateurs Microbioterre doivent présenter un seuil de discrimination égal ou supérieur à celui des indicateurs de références dans l'analyse de terre qui sont les taux de carbone organique et l'azote total. Les indicateurs mobilisables pour réaliser un diagnostic « standard » visent par ailleurs à être le plus polyvalents possible dans la réponse aux différentes pratiques culturales. Un bilan a été dressé avec la méthode de scoring pour l'ensemble des pratiques (Tableau 4).

Des indicateurs répondant plus spécifiquement à certaines pratiques peuvent être ajoutés pour un diagnostic plus approfondi (réalisable notamment par des conseillers agricoles).

Ainsi, au final, en plus des indicateurs de références, 3 types d'analyses physico-chimiques et 7 analyses microbiologiques ont été retenues comme bioindicateurs (précision : plusieurs variables sont issues de l'analyse par fractionnement granulométrique).

Tableau 4 : Aptitude des indicateurs à discriminer les pratiques agricoles évaluées (plus les cases du tableau sont vert foncé plus le score de l'indicateur est élevé pour une pratique donnée ou toutes pratiques confondues, comp. : comparaison).

Variables du sol	Pratiques culturales					Toutes pratiques culturales
	Apport de PRO 13 comp.	Introduction de couverts intermédiaires 10 comp.	Réduction du travail du sol 11 comp.	Allongement des rotations 5 comp.	Conversion en systèmes innovants ou biologiques 7 comp.	
Variables physico-chimiques						
COS (%)						
COS 0-50 (%)						
COS 50-200 (%)						
COS 200-2000 (%)						
COS 50-2000 (%)						
POXC (mg/kg)						
NTS (%)						
NTS 0-50 (%)						
NTS 50-200 (%)						
NTS 200-2000 (%)						
NTS 50-2000 (%)						
Variables microbiologiques						
ADN total (µg/g)						
MBC (mg/kg)						
ADNr 16S (Nombre de copies/g)						
ADNr 18S (Nombre de copies/g)						
Ergo total (mg/kg)						
Ergo libre (mg/kg)						
Ergo total - ergo libre (mg/kg)						
ADNr 18S : ADNr 16S						
FDA (nmol/min/g)						
PROT (nmol/min/g)						
LAP (nmol/min/g)						
ARYLN (nmol/min/g)						
N mine. (mg/kg 28 j)						
APM (mg/kg)						
ABM (mg/kg)						
B-GLU (nmol/min/g)						
C mine. (mg/kg 28 j)						

 2 indicateurs de « référence » mesurés en routine

 Variables retenues comme indicateurs du menu Microbioterre selon leur aptitude discriminante **toutes pratiques confondues**

Aptitude à discriminer les pratiques culturales :  Aptitude élevée — Aptitude faible

Notes : COS, Carbone organique du sol ; NTS, Azote total du sol; MBC, Carbone de la biomasse microbienne ; FDA, Hydrolyse de la Fluoresceine di-acétate; PROT, Protéase ; LAP, Leucine aminopeptidase ; ARYLN, Arylamidase ; APM, Azote Potentiellement Minéralisable ; ABM, Azote Biologiquement Minéralisable ; B-GLU, Béta-glucosidase

Les indicateurs à retenir dans l’outil Microbioterre devaient également s’appuyer, en plus de leur capacité à différencier les pratiques, sur des critères de faisabilité (ex. délai d’analyse ou encore niveau d’acceptabilité des coûts par les agriculteurs ou conseillers). Une échelle de notation de 1 à 3 a été définie par les partenaires du projet pour chaque indicateur à partir d’un ensemble de critères présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Résultats de l’évaluation des coûts, technicité et faisabilité technique des mesures réalisées

1 : indicateur peu coûteux à mesurer, faisabilité élevée (peu d’appareillage) et avec délai d’analyse court

3 : indicateur coûteux à mesurer, faisabilité plus faible (appareillage important) et avec délai d’analyse élevé

Indicateurs de l'outil Microbioterre	Critères de coût & de faisabilité technique						Norme disponible ? 1 : Norme 2 : Méthodes publiées mais pas de norme 3 : Différentes méthodes
	Variabilité spatiale 1 : Faible variabilité spatiale 2 : Variabilité spatiale élevée	Technicité et appareillage 1 : Facile à 3 : Difficile	Délai de l'analyse 1 : Court délai à 3 : Long délai	Coût 1 : Coût faible à 3 : Coût élevé	Sol sec ou sol brut	Contraintes pour envoi / réception 1 : Faibles contraintes à 3 : Fortes contraintes	
Indicateurs physico-chimiques							
COS (%)	1	1	1	1	Sol sec	1	1
COS 0-50 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
COS 50-200 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
COS 200-2000 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
COS 50-2000 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
POXC (mg/kg)	1	1	1	1	Sol sec	1	2
NTS (%)	1	1	1	1	Sol sec	1	1
NTS 0-50 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
NTS 50-200 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
NTS 50-2000 (%)	1	2	1	2	Sol sec	1	1
Indicateurs microbiologiques							
MBC (mg/kg)	1	3	2	3	Sol brut	2	1
ADNr 18S (Nombre de copies/g)	2	2	1	3	Sol brut	3	3
PROT (nmol/min/g)	1	2	1	2	Sol brut	3	2
LAP (nmol/min/g)	1	2	1	2	Sol brut	3	2
ARYLN (nmol/min/g)	1	1	1	2	Sol brut	3	1
ABM (mg/kg)	1	1	1	2	Sol brut	2 à 3	2
B-GLU (nmol/min/g)	1	1	1	2	Sol brut	3	1

Les indicateurs microbiologiques sont globalement plus contraignants à mesurer ; ils doivent notamment être mesurés sur sol frais et le délai d’envoi des échantillons au laboratoire doit être réduit. Certains indicateurs sont plus coûteux comme la mesure de l’ADN ribosomique 18S et la biomasse microbienne par fumigation/extraction.

3.2 Construction du schéma interprétatif

Les 3 principales fonctions des sols agricoles (Kibblewhite *et al.*, 2008 ; Thoumazeau, 2019) ont été étudiées dans le projet : recyclage des nutriments, transformation du carbone et maintien de la structure du sol. Une étude bibliographique a été menée sur 80 articles par les partenaires du projet pour clarifier les liens entre les indicateurs mesurés et ces fonctions. Les résultats d’indicateurs disponibles dans la littérature étaient majoritairement mis en lien avec ce que nous nommerons ici « des processus » physiques ou biologiques et non avec les fonctions ciblées. Les processus concernés ont été rattachés

par expertise aux trois fonctions (Tableau 6). Les sens de relations ont été clarifiés pour un grand nombre de couples indicateurs/processus.

Tableau 6 : Relations entre les variables mesurées et les fonctions et processus (ex. ammonification) étudiés

Indicateurs du menu Microbioterre	Fonctions du sol													
	Recyclage des nutriments				Transformation du carbone				Structure du sol					
	Fourniture N			Perte N	Transformation MO		Perte MO	Augmentation MO		Erosion Battance	Porosité		Stockage eau	
	Ammonification	Nitrification	Fixation symbiotique	Réduction du NO3	Volatilisation	Fragmentation	Biodégradation	Minéralisation (CO2)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Agrégation (Macro)	Agrégation (Micro)	Aération/Circulation eau - air	Infiltration en eau
Indicateurs physico-chimiques														
COS (%)	+	+		+			+	+	+	+	+	+	+	+
COS 0-50 (%)								+						
COS 50-200 (%)							+			+				
COS 200-2000 (%)						+								
COS 50-2000 (%)														
POXC (mg/kg)				+			+			+		+	+	+
NTS (%)	+	+	-											
NTS 0-50 (%)														
NTS 50-200 (%)	+	+												
NTS 50-2000 (%)														
Indicateurs microbiologiques														
MBC (mg/kg)							+			+				
ADNr 18S (Nombre de copies/g)										+				
LAP (nmol/min/g)	+	+												
ARYLN (nmol/min/g)	+		-							+				
PROT (nmol/min/g)	+						+			+				
ABM (mg/kg)					+					+				
B-GLU (nmol/min/g)	+	+					+				+			

Relation Indicateur / Fonction du sol	Relation	
	Positive	Négative
Relation forte r > 0,8	+	-
Relation moyenne r entre 0,4 et 0,8	+	-
Relation faible r < 0,4	+	-
Avis d'experts	+	-
Relation non identifiée		

Pour certaines de ces relations extraites des publications scientifiques, des équations ont été répertoriées, reliant plus étroitement les résultats d'analyses à des processus. Mais ce n'est pas le cas de la majorité des indicateurs, complexifiant l'interprétation des résultats de mesures pour le conseil. Des travaux de recherche restent à mener pour établir ces équations.

Une méta-analyse a été réalisée à partir de 147 publications afin d'identifier les liens entre les variables évaluées en tant qu'indicateurs dans le projet et les pratiques culturales étudiées, ainsi que l'influence d'autres paramètres sur les variations de ces mesures. Ces résultats ont permis à la fois d'élargir la gamme de contextes pédo-climatiques vis-à-vis des analyses réalisées dans le cadre du projet, d'enrichir les données sur les effets de certaines pratiques culturales peu représentées dans le projet et d'étudier quelques indicateurs non retenus dans Microbioterre. Pour chaque comparaison (modalité « pratique culturale » vs. modalité « référence »), l'effet de la pratique a été étudié en déterminant la valeur relative². La réponse d'une variable physico-chimique ou microbiologique à une pratique a été évaluée, tous contextes pédo-climatique et agronomique confondus, puis par contexte agropédo-climatique. Pour cela, des classifications ont été effectuées par zone climatique, classe de texture, teneur en matière organique et par pratique culturale (Figure 4).

² Valeur relative = [modalité « Pratique culturale » - modalité « Référence »] / modalité « Référence » x100

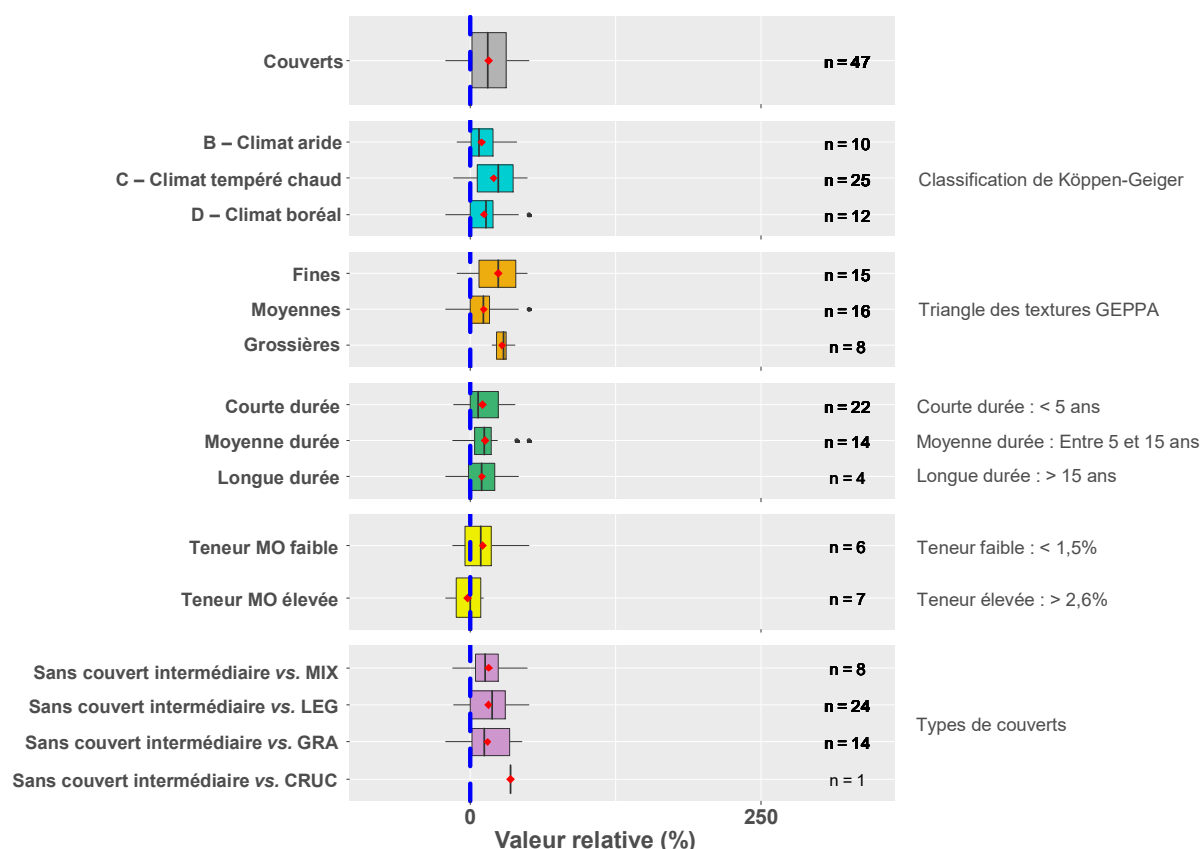


Figure 4 : Exemple de résultat de la méta-analyse. Augmentation relative (%) du carbone de la biomasse microbienne en présence de couverts d'interculture, en fonction du climat, de la texture des sols, de l'âge des pratiques, des teneurs en matières organiques et des types de couverts.

Cette méta-analyse conforte les résultats obtenus au sein des essais évalués pour Microbioterre. L'apport de PRO est la pratique ayant l'effet le plus significatif sur de nombreux indicateurs microbiologiques. A titre d'exemple, cette pratique entraîne en moyenne une augmentation +48,7% de la valeur de biomasse microbienne (toutes situations confondues), contre +15,9% via l'introduction de couverts végétaux (Figure 4).

4. Discussion

4.1 Construction du référentiel d'interprétation Microbioterre

L'ensemble des données mesurées et collectées a permis la constitution d'un référentiel pour chacun des bioindicateurs évalués ; l'objectif étant de déterminer leur gamme de variation dans divers contextes agronomiques et pédoclimatiques. La base de données correspond à 183 observations/prélèvements (couche 0-20 cm) pour les essais expérimentaux. Ce nombre comprend les 3 répétitions spatiales de chaque modalité (données non moyennées). Cette base regroupe les résultats de 25 mesures réalisées ainsi que des variables calculées dans le projet (ex. rapport C/N des fractions granulométriques etc..).

Le référentiel global peut permettre **2 niveaux d'interprétation**.

Le premier niveau d'interprétation consiste à déterminer si la valeur de la mesure sur une parcelle à diagnostiquer est comprise ou non dans le référentiel global (Figure 5).

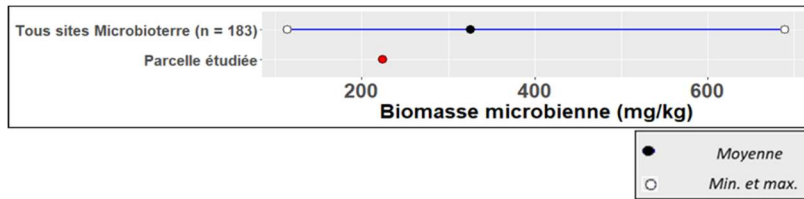


Figure 5 : Illustration d'une valeur de biomasse microbienne d'une parcelle à diagnostiquer (point rouge) replacée dans le référentiel global (segment bleu).

Le deuxième niveau d'interprétation permet de qualifier le niveau de l'indicateur mesuré si sa valeur est comprise dans le référentiel global. Pour définir les classes de niveau de chaque indicateur, la méthodologie proposée par l'Université de Cornell en 2017 a été utilisée (Moebius-Clune et al., 2016). Pour chaque indicateur, cette méthode a permis de classer les données en 5 niveaux (de très faible à très élevé) d'effectifs équivalents (20% des observations dans chaque classe de niveau) (Figure 6).

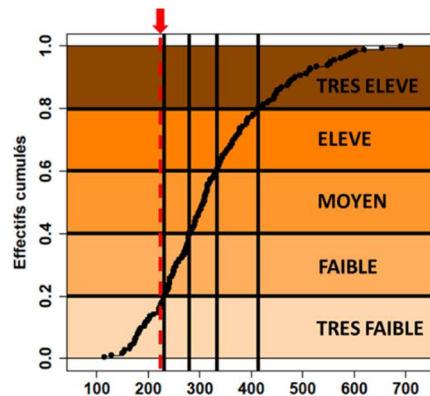


Figure 6 : Illustration d'une valeur de biomasse microbienne d'une parcelle à diagnostiquer (flèche rouge) replacée dans le référentiel global. La biomasse microbienne mesurée a une valeur très faible.

Bien que l'on puisse ainsi se situer au sein d'un référentiel, le **niveau souhaitable** des valeurs d'indicateurs n'a pas pu être déterminé dans ce projet. L'étude bibliographique n'a pas permis de le mettre en évidence, et l'analyse des résultats techniques sur les sites expérimentaux non plus. En effet, il est difficile de conclure sur l'état d'un seul indicateur via les résultats observés car les changements de pratiques impliquent tous les facteurs de la fertilité. Cette limite constituera un axe de recherche à développer pour affiner l'interprétation et les conseils qui pourront en découler.

Sous référentiels

En complément du référentiel tous sites et toutes pratiques confondues, il a été proposé de construire des sous-référentiels. Pour cela, les facteurs d'entrée de ces sous-référentiels ont été déterminés ; l'objectif étant de choisir les facteurs prédominants dans l'explication de la variabilité globale des indicateurs. Le choix de ces facteurs s'est basé sur des résultats d'analyses en composantes principales (ACP) et de classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces analyses ont été menées pour chacune des pratiques culturales. Le premier niveau d'analyse a été de déterminer si les facteurs prédominants sont liés au pédoclimat ou à la pratique elle-même. Par exemple, l'ACP prenant en compte les variables microbiologiques des sites sur lesquels ont été ajoutés des PRO permet d'observer une discrimination des sols selon le site de prélèvement, plutôt que par modalité de pratique (apport ou non de PRO). Cet effet prédominant du pédoclimat par rapport à la pratique culturale a été observé pour chacune des pratiques. Le facteur « site » étant prédominant, le pédoclimat a été retenu comme facteur d'entrée des sous-référentiels. Ces résultats sont en cohérence avec ceux observés dans la méta-analyse (partie 2.1) qui montre que l'effet climat et l'effet texture sont prépondérants. Etant donné le trop faible nombre d'observations du jeu de données Microbiotierre pour permettre une classification selon le climat, il a été choisi d'étudier l'effet texture, en retenant 3 groupes de classes de textures selon le triangle des textures

GEPPA (1963). Le facteur « **texture du sol** » a donc été retenu comme clef d'entrée des sous-référentiels.

Les effectifs de chaque sous-référentiel étant trop restreints, notamment en texture très fine, il n'est pas pertinent de déterminer les classes de niveaux de chaque indicateur dans chaque sous-référentiel. Du fait de ce faible nombre d'observations, ces sous-référentiels restent à compléter pour permettre un conseil agronomique plus précis. A souligner également, l'absence de données pour le groupe de classe de texture très grossière. Cette étude met en lumière le besoin d'augmenter les effectifs, ainsi que de diversifier les contextes pédoclimatiques afin de renforcer et donc d'affiner le référentiel Microbioterre.

Le domaine de validité du référentiel global s'inscrit dans les gammes de variations des teneurs en MO, en calcaire et du pH eau du sol mesurées dans le référentiel. En effet, ces paramètres ont également une influence sur les indicateurs microbiologiques. La gamme de variation de la teneur en MO des sols analysés s'étend de 1,26% à 5,15% (Figure 2). La teneur en calcaire des sols prélevés est comprise entre 0,1% et 13,2%. Le référentiel est cependant peu robuste pour les sols calcaires car seul le site de Colmar a un taux de calcaire > 5%. Le pH eau des sols analysés est compris entre 6 (valeur minimale mesurée sur le site Crecom) et 8,4. Ce référentiel est donc peu robuste pour des sols avec un pH acide. En France métropolitaine, il est estimé via le réseau RMQS que pour les sols en successions culturales, 23% des situations ont des teneurs en carbonates >5% et 22% ont un pH <6 sur l'horizon superficiel (Brus et Saby, 2016).

4.2 Test et validation sur des parcelles d'agriculteurs

Afin de démontrer la faisabilité de l'approche et de disposer de cas pour illustrer le guide de diagnostic, 26 parcelles d'agriculteurs ont été sélectionnées pour mettre en œuvre la démarche Microbioterre. Les parcelles sont localisées en Poitou-Charentes, en Alsace, en Bretagne, dans le Sud-Ouest et en Normandie. Les prélèvements ont été réalisés par les différents partenaires entre le 23/03/2021 et le 19/05/2021. Ce déploiement a aussi permis de vérifier que les valeurs d'indicateurs mesurées en parcelles agricoles sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en essais agronomiques.

4.3 Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs et création de modules de formation

Afin de formaliser les acquis du projet sous une forme utilisable par les acteurs du secteur agricole, un guide d'interprétation a été rédigé (téléchargeable : <http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=154>). Chaque indicateur retenu dans l'outil Microbioterre est détaillé avec ses normes, son référentiel, ainsi que ses relations avec les fonctions du sol pour aider à l'interprétation. L'effet des pratiques culturales étudiées dans le projet sur l'indicateur est également détaillé. Le guide propose aussi une méthodologie de prélèvement permettant d'assurer la représentativité du résultat, une démarche pour choisir les indicateurs à privilégier en cas de diagnostic simplifié et un exemple d'interprétation.

Deux formules de formations sont proposées à l'issue du projet Microbioterre : une formation initiale, destinée aux élèves-ingénieurs et étudiants BTS agricoles et une formation continue à destination des conseillers, formateurs et agriculteurs.

Conclusion

Microbioterre a répondu à de nombreuses attentes formulées dans le projet. Premièrement, l'évaluation des analyses de laboratoire en lien avec la microbiologie des sols et les études bibliographiques ont permis de 1) discriminer et sélectionner les indicateurs dont l'information est la plus fiable et utile pour

caractériser les pratiques agricoles étudiées dans le projet ; 2) mieux comprendre le lien entre ces mesures et les fonctions attendues du sol ; 3) référencer l'effet des pratiques culturales sur ces indicateurs. Cependant, il était attendu *a priori* de répertorier davantage de corrélations entre les indicateurs microbiologiques et les fonctions ou processus biologiques. Le manque de références bibliographiques à ce sujet traduit un besoin de recherche scientifique pour aller jusqu'à un conseil appliqué, à moins de trouver des indicateurs plus directement liés aux fonctions. Deuxièmement, le référentiel et la méthodologie de prélèvement développés donnent un cadre permettant un premier niveau d'interprétation de la fertilité biologique d'une parcelle cultivée en France en systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. Mais les limites de validité du référentiel ne permettent pas de balayer toute la diversité des contextes de cultures. De plus, bien qu'il ait été montré que le pédoclimat a un effet sur de nombreux indicateurs, le faible effectif de l'étude n'a pas permis de créer de sous-référentiels suffisamment robustes pour préciser les interprétations. Ces deux constats militent pour une augmentation du nombre de références sur les indicateurs sélectionnés afin de consolider cette base de données. Enfin, les différents livrables, notamment le guide d'interprétation, permettront de s'appuyer sur les références acquises pour interpréter des analyses, réaliser des conseils objectifs sur la fertilité biologique et organique du sol et tendre vers des systèmes de cultures plus agroécologiques.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement tous nos contacts des sites d'expérimentations sur lesquels le projet a pu s'appuyer, Nicolas Munier-Jolin de l'INRAE Dijon, Vincent Vaccari et Martin Lechenet de Dijon Céréales, Cyrielle Deswarte et Simon Giuliano de l'école d'ingénieurs de Purpan, Catherine Bonnet et Didier Raffailac de l'UMR AGIR - INRAE, Jean Luc Verdier et Gilles Eschenbrenner d'Arvalis, François Boissinot de la CRAPL, Thierry Morvan de l'INRAE (Le Rheu), Patrice Cotinet et Aurélien Dupont de la CRAB, Denis Montenach de l'INRAE (Colmar), Anne Schaub de la CRA Grand-Est à Schitigheim, Camille Resseguier de l'INRAE (Feucherolles), Michel Bertrand de l'INRAE Versailles, Guillaume Vitte de l'INRAE Mons, Jérôme Labreuche et Aurélie Geille d'Arvalis, Stéphane Cadoux de Terres Inovia. Merci également à tous leurs collègues expérimentateurs, qui mettent en place et suivent ces essais depuis de nombreuses années et permettent de nous appuyer sur des dispositifs différenciés dans le cadre de cette étude. Merci également pour leur patience dans les travaux de remontées de données.

Merci aux laboratoires Célesta-Lab (Xavier Salducci et Thibaut Desplanches), RITMO (Najat Nassr), SEMSE (Rémi Chaussod) et à l'Université de Lorraine (Séverine Piutti) pour le partage d'expertise sur les indicateurs biologiques. Merci aux membres du comité de pilotage du RMT Fertilisation et Environnement, RMT Bouclage, RMT Sols et Territoires et RMT Systèmes de Culture Innovants pour leur soutien. Merci aux membres du comité de pilotage du projet (ACTA, ADEME, DGER, GEMAS, IDELE, OFB).

Références bibliographiques

- Adam G. & Duncan H., 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil biology and biochemistry*, 33(7-8), 943-951.
- Berthelin J., 2007. Les micro-organismes, clé des recyclages biogéochimiques. In : PEDRO G., Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux, Académie des sciences, Les Ulis, 267-296.
- Bouthier et al., 2015. Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et en polyculture-élevage, 12ème Rencontres de la fertilisation raisonnée, Comifer-Gemas <https://bit.ly/ind-microbio-bouthier>
- Bouthier et al., 2020. Interprétation de l'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires - Guide pratique. Editions Arvalis.
- Brus D. J., & Saby N. P., 2016. Approximating the variance of estimated means for systematic random sampling, illustrated with data of the French Soil Monitoring Network. *Geoderma*, 279, 77-86.

- Claveirole C., 2016. La transition agroécologique : défis et enjeux. Avis du Conseil économique, social et environnemental.
- Clivot, H. et al., 2020. Early effects of temperate agroforestry practices on soil organic matter and microbial enzyme activity. *Plant and Soil*, 453, 189-207.
- Culman S. W. et al., 2012. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494-504.
- Drangmeister H., 2006. Bewertungsbögen zur Spatendiagnose - Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn (D). D'après les travaux de Theodor Diez -1991 (Institut LfL Bavière, Munich). Traduction et adaptation de la méthode Görbing (Spatenprobe/Test bêche) par Christophe Barbot (CA Alsace) en 2011 : <https://bit.ly/GOERBING-D1> et <https://bit.ly/GOERBING-D2>
- Gangneux C. et al., 2011. Fungal, bacterial and plant dsDNA contributions to soil total DNA extracted from silty soils under different farming practices: relationships with chloroform-labile carbon. *Soil biology and biochemistry*, 43(2), 431-437.
- GEPPA, 1963. Travaux de la commission cartographie. Annexe 4. Expression de la texture des sols, détermination et dénomination de classes en relation avec un diagramme granulométrique. 5 p.
- Gong P. et al., 2001. A rapid method to extract ergosterol from soil by physical disruption. *Applied Soil Ecology*, 17(3), 285-289.
- Greenfield L. M. et al., 2021. Synthesis of methods used to assess soil protease activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 158, 108277.
- Keeney D. R., & Bremner, J. M., 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability 1. *Agronomy journal*, 58(5), 498-503.
- Kibblewhite M.G. et al., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>.
- Laval K. et al., 2009. Un premier pas vers la compréhension des données biologiques.. *Étude et Gestion des Sols*, 2009, 16 (3/4), pp.275-287. (hal-02660817v2).
- Moebius-Clune, B.N. et al. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework*, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- Montgomery H. J. et al., 2000. Determination of soil fungal biomass from soil ergosterol analyses. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(8-9), 1207-1217.
- Peigne J., et al. 2016. Test Bêche. Guide d'utilisation. ISARA Lyon. <https://bit.ly/guide-test-beche-ISARA>
- Thoumazeau, A. et al. 2019. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators* 97, 100–110.
- Weil R. R. et al., 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3-17.
- Wezel, A. et al. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for sustainable development*, 29(4), 503-515.



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

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

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