

Rapport de synthèse des résultats



Référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et polyculture élevage

2017-2021

Analyse de la sensibilité et de la pertinence des indicateurs vis-à-vis des fonctions

Juin 2022

Contact rapport : Wassila Riah-Anglet, Nadia Laurent et Elodie Cusset (Unité AGHYLE – UP 2018- C101- UniLSalle Rouen), Romain Tscheiller (Arvalis - institut du végétal)

Pilote

ARVALIS
Institut du végétal

Partenaires financés

UniLaSalle
Terre & Sciences

60 ans Terres Inovia
l'agronomie en mouvement

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE BRETAGNE

ITAB
Institut Technique de l'Agriculture Biologique

auréa
Agrisciences

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Partenaires non financés

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE NORMANDIE

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE ANJOU

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE ALPES

Soutien

REPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE LA PÊCHE, DE LA FORET ET DE LA MER
Des conventions pluriannuelles de coopération opérationnelle et de développement rural

BOUCLAGE
Recyclage, Fertilisation, Impacts Environnementaux

Sommaire

Introduction.....	4
1. Contexte et objectifs de Microbioterre.....	4
2. Organisation du projet	5
3. Stratégie méthodologique.....	7
3.1. Sites étudiés, dispositifs expérimentaux et pratiques culturales.....	7
3.1.1. Critères de choix des dispositifs expérimentaux retenus dans le projet	7
3.1.2. Sites expérimentaux échantillonnés et pratiques culturales étudiées	7
3.1.3. Description des différents types de dispositifs expérimentaux suivis	8
3.2. Caractérisation physico-chimique et variables mesurées	9
3.2.1. Caractérisation physico-chimique du sol & humidité relative au moment du prélèvement	9
3.2.2. Variables physico-chimiques mesurées.....	10
3.2.3. Variables microbiologiques mesurées.....	10
3.3. Stratégie d'échantillonnage & observations terrain	11
4. Choix des indicateurs du menu Microbioterre.....	12
4.1. Liens Indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)	12
4.1.1. Fonctions et processus étudiés pour leur relation avec les variables physico-chimiques et microbiologiques mesurées	12
4.1.2. Revue bibliographique – objectifs et principaux résultats	12
4.1.3. Modélisations AMG	13
4.2. Liens indicateurs – pratiques culturales.....	15
4.2.1. Données issues de la bibliographique - Méta-analyse	15
4.2.2. Données issues des essais Microbioterre de moyennes et longues durées	20
5. Construction & évaluation du référentiel d'interprétation Microbioterre	31
5.1. Qu'est-ce qu'un référentiel et pourquoi a-t-on besoin d'un référentiel ?.....	31
5.2. Construction du référentiel à partir des données des essais agronomiques prélevés en 2018 31	
5.2.1. Référentiel global	31
5.2.1.1. Données prises en compte	31
5.2.1.2. Structure du référentiel.....	31
5.2.1.3. Interprétation du référentiel (2 niveaux d'interprétation).....	32
5.2.1.4. Domaines de validité du référentiel	33
5.2.2. Sous-référentiels	35
5.2.2.1. Choix des facteurs d'entrée de sous-référentiels	35

5.2.3.	Construction des sous-référentiels	36
5.3.	Référentiel complété avec les données de parcelles agriculteurs prélevées en 2021	37
5.3.1.	Choix des parcelles agriculteurs sélectionnées	37
5.3.2.	Description des parcelles agriculteurs étudiées.....	37
5.3.3.	Positionnement des valeurs des parcelles agriculteurs dans le référentiel essais agronomiques.....	37
6.	Diagnostic et conseil agronomique : cas d'étude.....	39

Introduction

Date	PROCEDURE	Version	Nombre de pages
19/06/2022	Rapport de synthèse explicitant le référencement des bioindicateurs vis-à-vis des fonctions de stockage du carbone et de minéralisation de l'azote	1.0	51

Ce rapport détaille les résultats issus de l'action 3 de Microbioterre, qui vise à proposer un schéma interprétatif complet des bioindicateurs, s'appuyant à la fois sur l'action 1 et l'action 2. Il est le fruit d'un travail conséquent de mise en base de données et consolidation, ainsi que d'analyses. Il constitue le livrable principale de cette tâche.

1. Contexte et objectifs de Microbioterre

Microbioterre a pour objectif opérationnel de mettre au point et de diffuser un référentiel d'interprétation de l'analyse de terre élargie à la microbiologie du sol. Le projet s'appuie sur des laboratoires habitués à travailler directement avec les agriculteurs pour qu'ils puissent s'approprier un outil à coût raisonnable. Il s'agit d'optimiser les pratiques permettant à la fois de stocker suffisamment de carbone (ou à minima le maintenir) de manière durable et d'augmenter l'activité de dégradation de carbone qui conduit à la fourniture d'azote, de phosphore et de soufre aux cultures. Le champ de ce projet couvre les systèmes de grande culture et de polyculture élevages qu'ils soient conventionnels, conduits selon les principes de l'agriculture de conservation ou de l'agriculture biologique.

Aujourd'hui, l'analyse de terre « de routine » se limite à fournir aux agriculteurs des informations pour gérer la fertilisation minérale, les apports d'amendements minéraux basiques et le bilan humique. Elle concerne peu d'autres pratiques culturales pourtant mises en évidence par l'agroécologie pour leur impact positif sur l'activité biologique du sol comme les apports d'amendements et de fertilisants organiques, les couverts végétaux et la restitution des résidus de culture. Le projet Microbioterre vise à intégrer des analyses microbiologiques aux analyses de terre réalisées par des laboratoires et aux observations de terrain (comme le test « bêche »). Il s'agit *in fine* d'élargir le diagnostic et le conseil pour la gestion des pratiques culturales restituant du carbone au sol. Les agriculteurs disposeront ainsi d'outils de routine pour s'approprier la vie microbiologique de leurs sols dans leurs pratiques culturales.

Ce diagnostic, élargi à la microbiologie du sol, devrait permettre de gérer au mieux le nécessaire compromis entre le stockage du carbone sous des formes stables (lutte contre l'effet de serre) et la minéralisation des apports organiques par l'activité des microorganismes 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. De plus les travaux de recherche sur les indicateurs microbiologiques qui le concernent sont les plus avancés.

Le projet s'est basé sur le référencement de bioindicateurs. Un bioindicateur est ici défini comme « une variable issue d'un ou plusieurs paramètres biologiques mesurés sur un échantillon de terre renseignant l'état et le fonctionnement biologique du sol et pouvant aider à la gestion de pratiques culturales favorables à l'expression de certaines fonctions du sol, en priorité les fonctions de stockage du carbone et de minéralisation de l'azote ». Les bioindicateurs ont été référencés à partir d'essais au

champ déjà en place. il s’agissait de déterminer ceux qui, seuls ou en combinaison, permettaient de rendre compte au mieux de la capacité du sol à assurer les fonctions visées. Les critères de choix des bioindicateurs reposaient sur leur pertinence et leur sensibilité mais aussi le coût et la facilité de leur analyse et le nombre de références. Le nombre de paramètres microbiologiques à analyser était d’ailleurs restreint pour maintenir le coût de l’analyse de terre à un niveau acceptable pour les agriculteurs.

2. Organisation du projet

Le projet comporte 4 actions subdivisées en différentes tâches. Cette organisation est détaillée dans le tableau suivant (Tableau 1) :

Tableau 1 : Organisation du projet Microbioterre

Actions	Tâches	Objet de la tâche	Responsables de tâches
Action 1	Tâche 1	Elaboration du cadre conceptuel du référencement à partir des expériences antérieures	UniLaSalle
	Tâche 2	Mise au point d’un mode opératoire (prélèvement, conservation des échantillons de terre) en vue d’analyses microbiologiques	AUREA-AGROSCIENCES
Action 2	Tâche 1	Construction du dispositif expérimental / plan d’échantillonnage	ARVALIS, CRAB, TERRES INOVIA
	Tâche 2	Acquisition de données sur les essais factoriels et systèmes	AUREA-AGROSCIENCES
Action 3	Tâche 1	Mise en base de données	UniLaSalle , TERRES INOVIA
	Tâche 2	Analyse de la sensibilité et de la pertinence des bioindicateurs vis-à-vis des fonctions retenues	UniLaSalle , ARVALIS
	Tâche 3	Bilan des tests méthodologiques complémentaires	AUREA-AGROSCIENCES
Action 4	Tâche 1	Rédaction d’un guide de diagnostic Microbioterre	CRAB, ARVALIS
	Tâche 2	Communication des résultats du projet	ARVALIS, TERRES INOVIA
	Tâche 3	Création de modules de formation	UniLaSalle

Une démarche globale a été suivie afin de (i) constituer la Base de Données (BDD) Microbioterre et (ii) pour la partie « traitements des données et étude bibliographique ». Cette démarche est synthétisée dans le schéma suivant (Figure 1) :

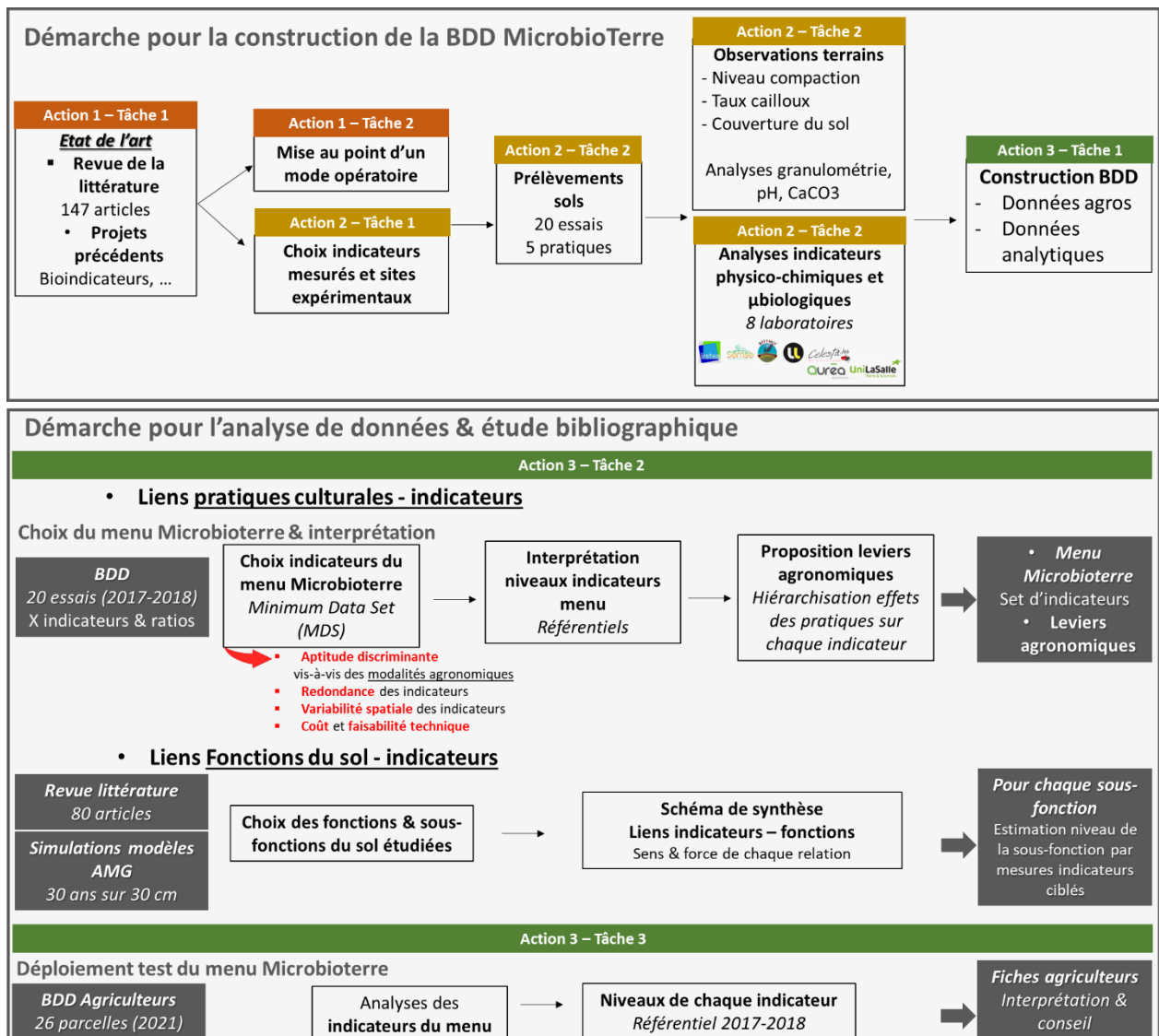


Figure 1 : Schéma des démarches méthodologiques prévues

3. Stratégie méthodologique

3.1. Sites étudiés, dispositifs expérimentaux et pratiques culturales

3.1.1. Critères de choix des dispositifs expérimentaux retenus dans le projet

Le choix des sites échantillonnés dans le cadre du projet a été mené en prospectant divers essais agronomiques existants. Les essais retenus devaient répondre à un cahier des charges correspondant aux critères suivants :

- Essais \geq 5 ans
- Sols homogènes
- Essais à 2 ou 3 blocs (sauf exceptions)
- Essais comportant un système de référence (conventionnel)
- Connaissance précise de la gestion des matières organiques : restitutions cultures et couverts, quantité de PRO, etc...
- \geq 1 date d'analyses de teneurs en carbone organique & azote total du sol
- Profondeur de prélèvement et travail du sol le plus profond
- Analyses physico-chimiques (parcelle ou bloc)
- Présence d'hydromorphie, drainage
- Historique simplifié sur 10 ans avant le début de l'essai
- Années où présence d'irrigation

3.1.2. Sites expérimentaux échantillonnés et pratiques culturales étudiées

Les données du projet Microbioterre proviennent de 18 sites expérimentaux répartis sur l'ensemble du territoire français. Trois essais sont étudiés respectivement pour les sites de Kerguehenec et Boigneville ; 20 essais sont étudiés au total (Figure 2).

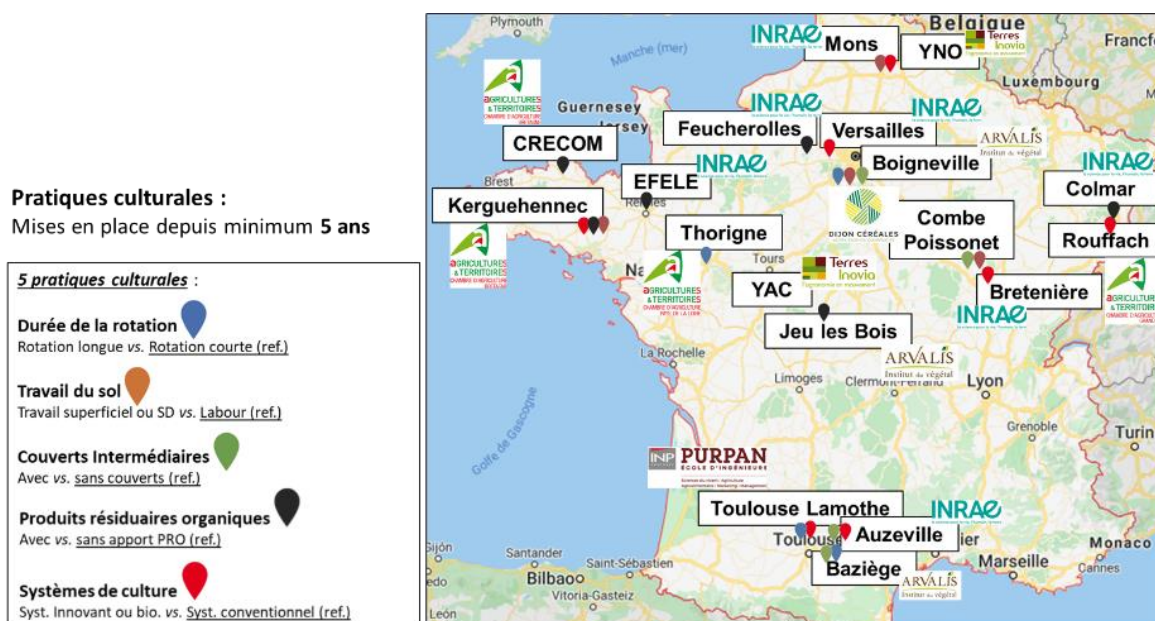


Figure 2 : Carte des sites expérimentaux échantillonnés, partenaires contributeurs et pratiques culturales étudiées

Ces essais ont permis l'étude de 5 pratiques culturales : Produits Résiduels Organique (PRO), Couverts intermédiaires, Travail du sol, Rotation, Systèmes de culture.

3.1.3. Description des différents types de dispositifs expérimentaux suivis

Dans chaque essai, trois répétitions spatiales ont été étudiées pour chaque modalité. Dans tous les essais, ces répétitions ne correspondent pas au même dispositif expérimental. Les trois répétitions spatiales correspondent à 3 vrais blocs, à 2 vrais blocs et à un bloc R composite (mélange des deux échantillons de terre des deux premiers blocs) ou à trois prélèvements sur une bande dans les essais qui se présentent en bande (Figure 3, Tableau 2).

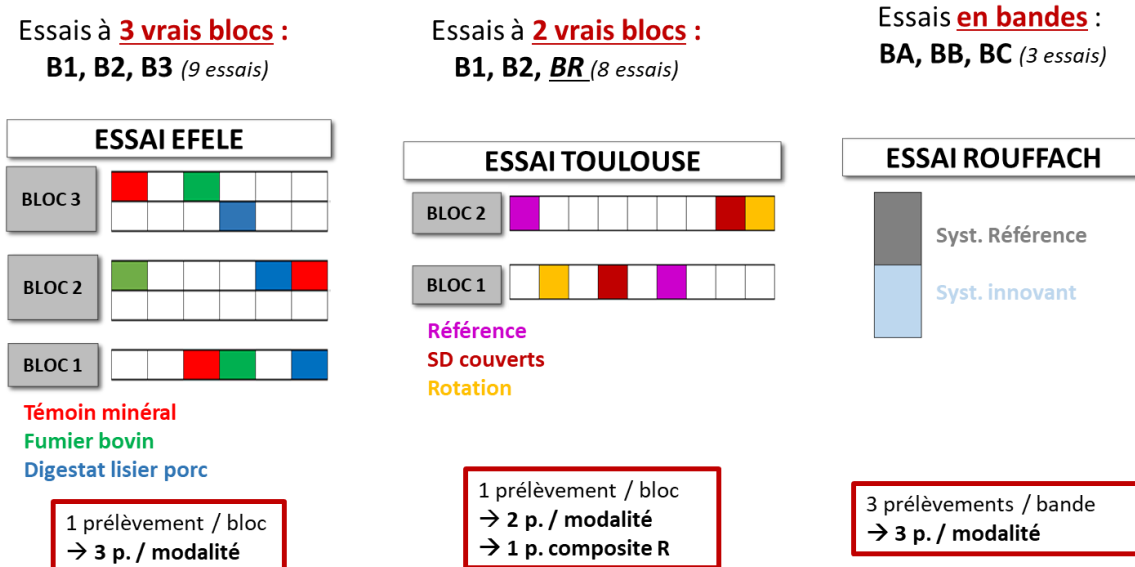


Figure 3 : Schéma représentatif des 3 types de dispositifs expérimentaux étudiés

Tableau 2 : Pratiques culturales étudiées dans chaque essai et son dispositif expérimental (3 blocs, 2 blocs ou en bandes)

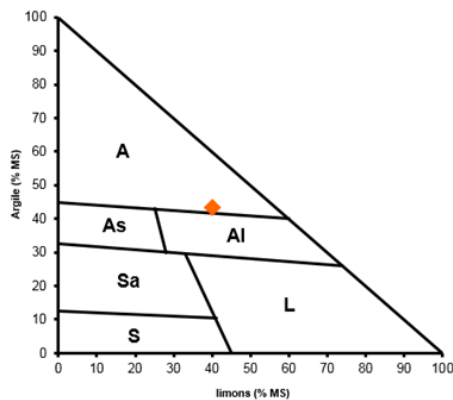
Essai	Pratiques étudiées					Dispositif expérimental		
	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes	Essai en bandes	2 blocs	3 blocs
COLMAR	X							X
CRECOM	X				X			X
EFELE	X							X
FEUCHEROLLES	X							X
JEU LES BOIS	X							X
KERGUEHENNEC TRAVAIL DU SOL	X		X					X
AUZEVILLE		X			X		X	
BOIGNEVILLE A1		X	X	X			X	
BOIGNEVILLE A2				X			X	
BOIGNEVILLE ENVIRONNEMENT		X	X					X
COMBE POISSONNET		X	X				X	
BAZIEGE		X		X			X	
MONS			X		X			X
TOULOUSE LAMOTHE				X	X		X	
THORIGNE				X				X
VERSAILLES					X		X	
KERGUEHENNEC CONV_INNO					X	X		
KERGUEHENNEC ROTAB					X	X		
ROUFFACH					X	X		
BRETIENIERE					X		X	

3.2. Caractérisation physico-chimique et variables mesurées

3.2.1. Caractérisation physico-chimique du sol & humidité relative au moment du prélèvement

Une caractérisation physico-chimique des sols a été réalisée. La texture, teneur en Matière Organique (MO), taux de calcaire, pH eau et humidité relative au moment du prélèvement ont été pour cela analysés.

La texture du sol a été analysée (% sable, limon, argile). Des classes (6 classes) puis des groupes de classes de textures (4 groupes de classes) ont été définis selon le triangle des textures GEPPA (Figure 4).



Groupes de classes de texture	Classes de texture	Symboles
Très fines	Argileuses	A
	Argilo-limoneuses	Al
Fines	Argilo-sableuses	As
	Limoneuses	L
Moyennes	Sablo-argileuses	Sa
	Sableuses	S
Grossières		

Figure 4 : Triangle des textures GEPPA pour la détermination des groupes de classes de texture (très fine, fines, moyennes et grossières)

L'humidité relative au moment du prélèvement a été analysée. Cette variable renseigne sur le niveau d'humidité par rapport au niveau optimal d'humidité et est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Humidité relative au moment du prélèvement} = \frac{\text{Humidité (\% MS)}}{\text{Humidité à la capacité au champ (pF=2,5)}}$$

3.2.2. Variables physico-chimiques mesurées

Dans ce projet, 15 variables physico-chimiques ont été mesurées pour renseigner la teneur et la forme du carbone et de l'azote dans le sol (Tableau 3).

Tableau 3 : indicateurs physico-chimiques mesurés et méthodes de mesure/calcul

	Variable	Description de la variable	Méthode de mesure ou de calcul	Laboratoire
Carbone C (10 indicateurs)	Carbone Organique	C org. total	Oxydation sulfochromique + spectrophotométrie (NF ISO 14235)	AUREA
	Carbone Organique Rock-Eval		Analyseur thermique Rock-Eval 6 (Vinci Technologies)	IRSTEA
	C fraction 50-200 µm	C org. labile	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	C fraction 200-2000 µm			AUREA
	C fraction 50-2000 µm		Modèle Soucérianadin et al. (en préparation) (Rock-Eval 6)	IRSTEA
	Concentration de carbone labile à 20 ans		C org. - C stable 100 ans (Rock-Eval)	IRSTEA
	Carbone actif Rock-Eval *	C org. oxydé	Oxydation par KMnO4 + spectrophotométrie	SEMSE
	Carbone oxydé		Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	C fraction 0-50 µm	C org. stable	Modèle Soucérianadin et al. (en préparation) (Rock-Eval 6)	IRSTEA
	Concentration de carbone stable à 100 ans			
Azote N (5 indicateurs)	Azote Dumas	N total	Méthode Dumas (NF ISO 13878)	AUREA
	N fraction 50-200 µm	N fraction labile	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	N fraction 200-2000 µm			AUREA
	N fraction 50 2000 µm			AUREA
N fraction 0-50 µm	N fraction stable	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA	
C / N	C/N	Rapports Carbone / Azote Total & fractions		AUREA
	C/N fraction 0-50 µm			
	C/N fraction 50-200 µm			
	C/N fraction 200-2000 µm			
	C/N fraction 50-2000 µm			

Variable calculée *

- Fractions labiles de la MO
- Fractions stables de la MO

3.2.3. Variables microbiologiques mesurées

De plus, 13 variables microbiologiques ont été mesurées pour renseigner le compartiment microbiologique au travers de leur abondance, diversité et fonction dans le sol (Tableau 4).

Tableau 4 : indicateurs microbiologiques et méthodes de mesure/calcul

	Variable	Description de la variable	Indicateur étudié	Laboratoire
Abondances microbiennes	ADN total	Microorganismes totaux	Biomasse moléculaire totale	UniLaSalle
	Biomasse microbienne (TOC)		C Org. total des micro-organismes (NF ISO 14240-2)	AUREA
	Biomasse bactérienne 16S	Bactéries totales	ADN r spécifiques des bactéries	RITTIMO / UniLaSalle
	Biomasse fongique 18S	Champignons totaux	ADN r spécifiques des champignons	RITTIMO / UniLaSalle
	Ergostérols total (MAE) & libre (GONG)		Biomasse fongique totale & morte	UniLaSalle
Activités microbiennes	Hydrolyse de la Fluoresceine di-acétate (FDA)	Activité enzymatique globale	Hydrolyse FDA (substrat universel)	SEMSE
	Activité β-glucosidase (Glu)	Activités enzymatiques Cycle C	Hydrolyse de liaisons osidiques (ISO 20130:2018)	UniLaSalle
	C minéralisé moyen	Potentiel de minéralisation C	Potentiel de minéralisation C (NF EN ISO 16072)	CELESTA LAB
	Activité protéase	Activités enzymatiques Cycle N	Dégradation de protéines et peptides ArylN (ISO 20130:2018)	Université Lorraine
	Activité leucine aminopeptidase (LAP)			Université Lorraine
	Activité arylamidase (arylN)			RITTIMO / UniLaSalle
	Azote Potentiellement Minéralisable	Potentiel de minéralisation N	Double distillation (tampon phosphate borate et KCl) (Giannello et Bremner, 1986) Incubation anaérobie 7 jours, 40 °C Potentiel de minéralisation N (XP U44-163 et NF ISO 14238)	AUREA
	Azote Biologiquement Minéralisable			AUREA
N minéralisé moyen	CELESTA LAB			

3.3. Stratégie d'échantillonnage & observations 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 essais en suivant les protocoles définis dans le projet et les recommandations sur la période d'intervention¹. 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 répétitions spatiales ont été étudiées par modalité. Ces répétitions correspondent à 3 vrais blocs, à 2 vrais blocs ou à un bloc R composite (mélange des deux échantillons de terre des deux premiers blocs) ou à trois prélèvements sur une bande (cas particulier des 3 essais en bandes retenus dans le projet) (voir Tableau 2).

Les échantillons de terre ont été prélevés sur la couche 0-20cm. Afin d'évaluer l'impact de la profondeur d'échantillonnage sur les résultats d'analyses pour les essais implantés en semis direct, un prélèvement supplémentaire, sur 0-10 cm a été réalisé sur 3 essais avec différents modes de travail du sol (Kerguéhennec, Auzeville et Boigneville sur une modalité labour et une modalité semis direct).

Après tamisage à 6.3 mm, les échantillons frais de terre ont été envoyés (en glacière munis 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 idée des flux hydriques sur la parcelle, taux de cailloux, taux et types de couverture du sol (par les résidus de végétaux et turricules), état de surface du sol etc. Le niveau compaction du sol a été évalué sur chaque essai en réalisant 3 tests bêche par parcelle. En effet, l'état de compaction du sol peut influencer les paramètres biologiques analysés. Le test bêche a été réalisé selon la méthode ISARA, en incorporant des éléments de la méthode Görbing. 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 notés.

¹ Intervenir sur sols ressuyés, avant tout apport de carbone ou d'amendement minéral basique, impérativement avant un labour ou autre travail profond et si possible avant un travail superficiel, après 3 semaines minimum de tout apport d'engrais minéral et une pluie de 15-20 mm après l'apport.

4. Choix des indicateurs du menu Microbioterre

4.1. Liens Indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)

4.1.1. Fonctions et processus étudiés pour leur relation avec les variables physico-chimiques et microbiologiques mesurées

3 fonctions du sol ont été étudiées :

- Recyclage des nutriments
- Transformation du carbone
- Maintien de la structure du sol

Ces 3 fonctions ont été par la suite déclinées en 16 processus biologiques et physiques (Tableau 5).

Tableau 5 : Fonctions et processus étudiés dans le projet Microbioterre

3 fonctions du sol	Processus	Processus qui conduit vers
Recyclage des nutriments	Ammonification	Fourniture d'azote (ions NH ₄ & NO ₃ ⁻)
	Nitrification	
	Fixation symbiotique	
	Lixiviation	Perte d'azote (Percolation, N forme gazeuse)
	Réduction du NO ₃ (émission N ₂ O) Volatilisation	
Transformation du carbone	Fragmentation	Transformation de la MO (MO particulières & substrats transformés)
	Biodégradation	
	Minéralisation (CO ₂)	Perte de MO
	Stabilisation chimique / humification	Augmentation de MO (Protection par adsorption ou agrégats)
	Stabilisation physique / protection	
Structure du sol	Agrégation (Macro)	Erosion et la battance (Assemblage des particules du sol)
	Agrégation (Micro)	
	Aération / circulation eau - air	Porosité (« Vides » du sol)
	Infiltration en eau	
	Rétention en eau	Stockage d'eau

Les 16 processus ont été étudiés dans une étude bibliographique concernant leur lien avec les variables physico-chimiques et microbiologiques mesurées.

En plus de l'étude bibliographique, la fonction transformation du carbone a été étudiée dans les essais prélevés dans le cadre du projet.

4.1.2. Revue bibliographique – objectifs et principaux résultats

L'objectif de cette revue bibliographique est de documenter les relations de chaque variable physico-chimique ou microbiologique mesurée avec un des 16 processus du sol étudié (Figure 5). Dans cet objectif, 80 articles bibliographiques ont été analysés. En complément, certaines relations variable mesurée – processus ont été renseignées à dire d'experts (partenaires Microbioterre).

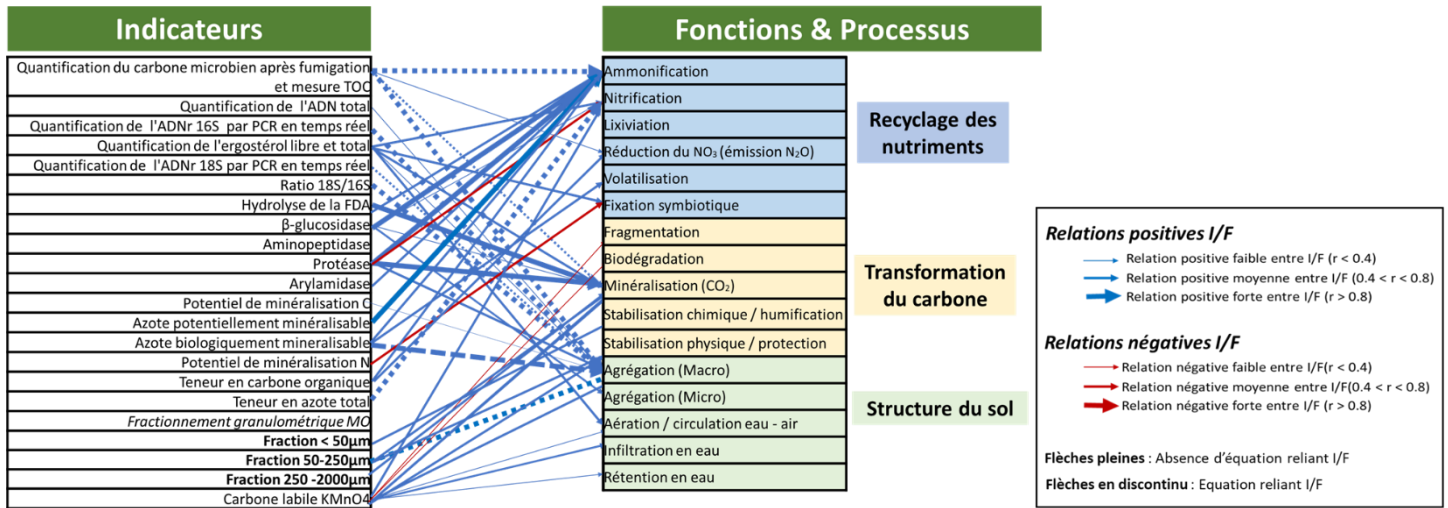


Figure 5 : Schéma récapitulant les aptitudes des indicateurs à renseigner les niveaux des fonctions du C & N

Ces résultats ont été valorisés pour proposer un diagnostic sur des parcelles agricoles.

4.1.3. Modélisations AMG

Le modèle AMG (version 6.2) a été utilisé sur 56 modalités agronomiques (18 essais) afin d'estimer le niveau de la fonction de stockage de C. Les simulations ont été effectuées sur 30 ans et sur les 30 premiers centimètres de sol. Pour chaque modalité, un calcul de la variation de stock de carbone sur cette période a été fait. Les résultats ont été exprimés en t C/ha (Figure 6 - A) puis en % du stock initial (Figure 6 – B) puisque les stocks de C initiaux étaient très variables entre modalités (entre 35,7 t C/ha et 114 t C/ha).

Ces résultats ont également été mis en relation avec les variables mesurées sur les sols pour déterminer s'il est possible de déterminer le sens de la relation entre chaque variable mesurée et le niveau de la fonction de stockage.

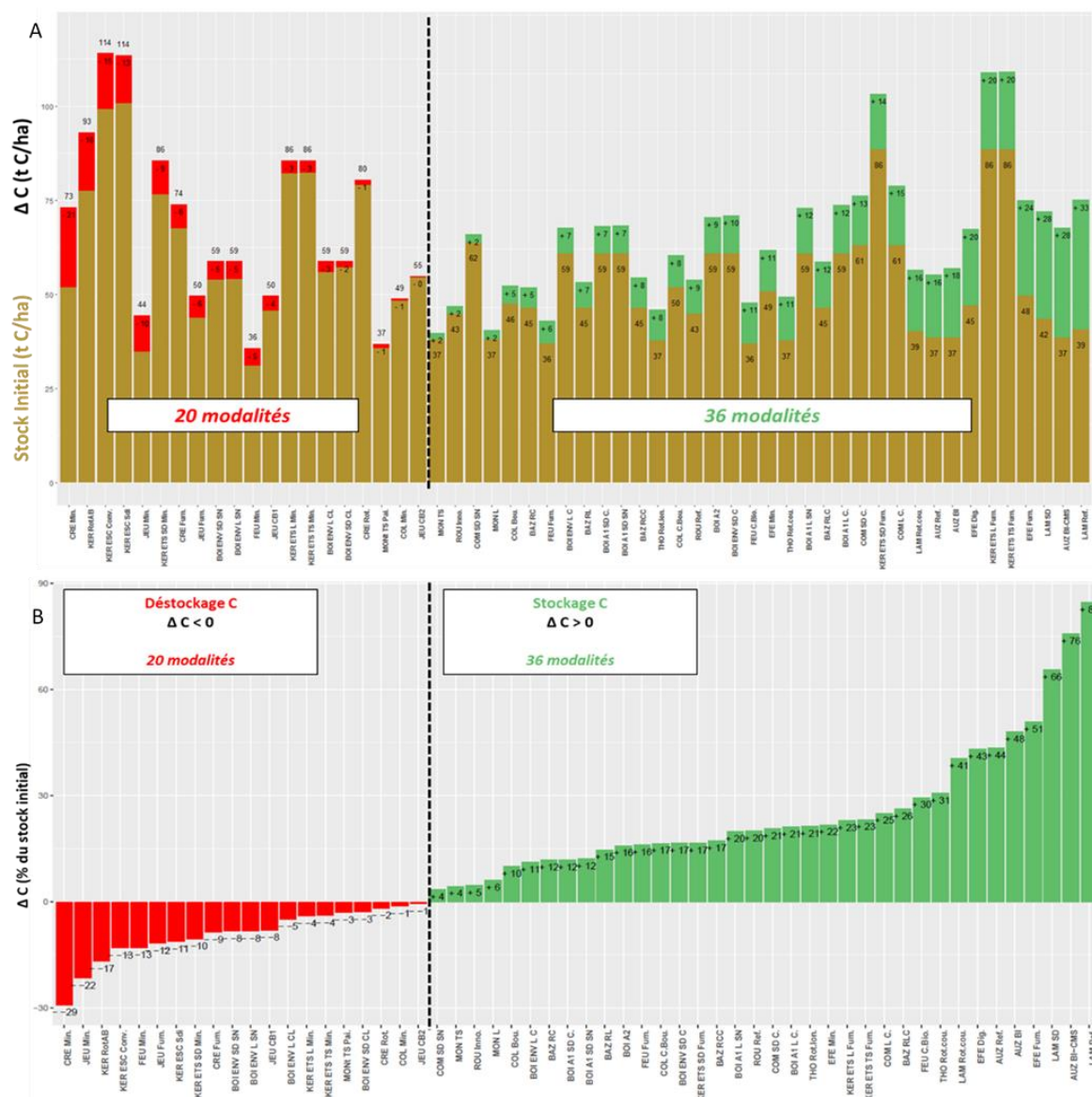


Figure 6 : Résultats des modélisations AMG (sur 30 ans et 30 cm). La variation de stock de C est exprimée en t C/ha (A) ou en % (B).

Les corrélations de ces variations de stock de C avec les différentes variables mesurées n'a pas permis de mettre en évidence de tendances claires du fait de plusieurs limites :

- **Simulations AMG plus ou moins précises**
 - o Certaines données agronomiques d'entrée du modèle étaient manquantes
 - o Valeur de C org mesuré au début de l'essai était manquante dans certaines modalités
- **Profondeurs étudiées différentes** : Evolution stock C AMG sur 30 cm / mesures sur 20 cm
- **Corrélation évolution stock ou teneur vs. une mesure** : les variations de stock de C sont corrélées à une valeur d'une mesure ponctuelle (2017 ou 2018)

Les relations variables mesurées – fonction de stockage de C étudiées ici avec AMG n'ont pas permis de compléter les relations documentées grâce à l'étude bibliographique.

4.2. Liens indicateurs – pratiques culturales

4.2.1. Données issues de la bibliographique - Méta-analyse

4.2.1.1. Objectif de la méta-analyse, recherche bibliographique et sélection des articles retenus

L'objectif de la méta-analyse est d'étudier l'aptitude discriminante d'un panel de variables physico-chimiques et microbiologiques du sol vis-à-vis de 6 pratiques culturales dans différents contextes pédoclimatiques. Les pratiques culturales étudiées sont l'apport de PRO, l'implantation de couverts intermédiaires, le type de travail du sol, la durée des rotations, les types de systèmes et la gestion des résidus. Cette analyse a permis de synthétiser les résultats d'une série d'études indépendantes en lien avec cette question.

Cette méta-analyse a constitué une première étape du travail concernant l'étude des liens entre les variables physico-chimiques et microbiologiques mesurés. Ces résultats ont été mis en relation avec ceux issus des essais prélevés dans le projet.

Cette analyse présente plusieurs intérêts :

- Large gamme de contextes pédoclimatiques (*études internationales*)
- Etude d'une pratique peu représentée dans le projet (*ex : Gestion des résidus de culture*)
- Etude d'indicateurs non analysés dans le projet (*ex : Acides gras PhosphoLipidiques-PLFA*)

Une vingtaine de variables physico-chimiques et microbiologiques a été étudiées (Tableau 6) :

Tableau 6 : Variables physico-chimiques et microbiologiques prises en compte dans la méta-analyse

Informations apportées		Variables mesurées	
Variables physico-chimiques	Carbone	C org	
		C oxydé KMnO4	
	Azote	N total	
Carbone & Azote		Fractions granulométriques de la MO	
Variables microbiologiques	Abondance des microorganismes totaux	C biomasse microbienne	
		PLFA totaux*	
		ADN total	
	Abondances des bactéries	Biomasse bactérienne 16S	
		PLFA bactéries*	
	Abondances des champignons	Biomasse fongique 18S	
		PLA fongique*	
	Activités des microorganismes	Activité globale	Ergostérol
			FDA
		Activités du cycle N	Leucine amino-peptidase
			Arylamidase
			Protéase
Uréase*			
		Azote Potentiellement minéralisable (APM)	
	Azote Biologiquement minéralisable (ABM)		
Activités du cycle C	Béta-glucosidase		

* Variables non analysées dans les essais Microbioterre

La recherche bibliographique a été menée à partir de plusieurs plate-formes d'éditeurs de revues scientifiques (ScienceDirect, Springer, Wiley, Google Scholar) avec les mots-clés principaux « soil microbial activities » et « soil microbial biomass ». A ces mots clés généraux, d'autres liés à chacune des pratiques ont été ajoutés (Figure 7).

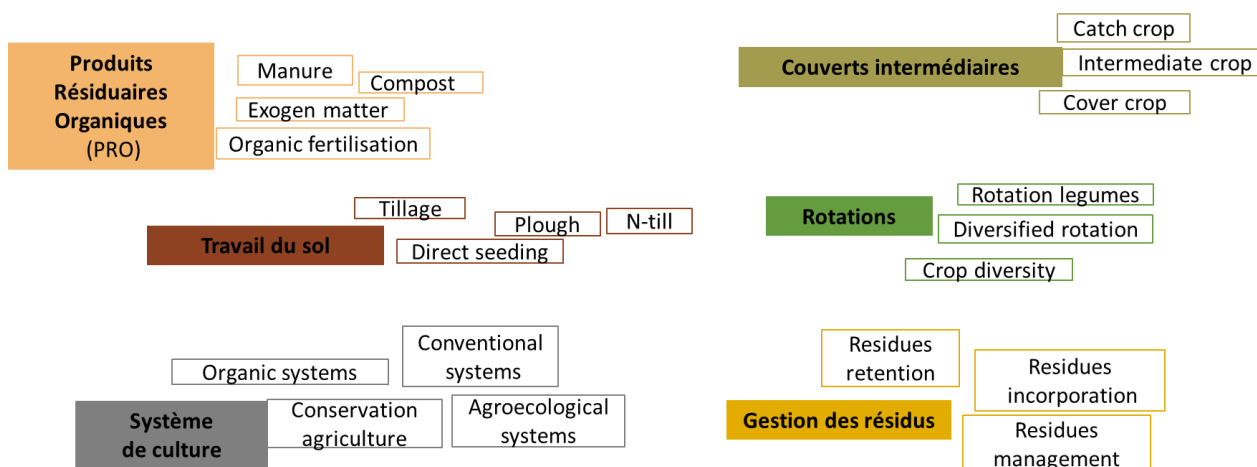


Figure 7 : Mots-clés utilisés, en lien avec les pratiques culturales, pour les recherches bibliographiques

Les articles identifiés ont été ensuite triés afin de retenir les articles répondant aux critères suivants :

- Publiés entre **2007** et 2021
- Essais **au champ**
- **Grandes cultures**
- Profondeurs de sol analysées entre **0-30 cm**
- **Modalité pratique vs. modalité référence**
- Indicateurs **physico-chimiques & microbiologiques**
- **Données quantitatives** brutes

C'est ainsi que 147 articles toutes pratiques confondues ont été retenus. Sur ce total, de nombreux articles traitent de la question du travail du sol et des apports de résidus (Figure 8). Une grande majorité de ces 147 articles se ventilent entre l'Amérique du Nord et du Sud, l'Asie et enfin l'Europe (Figure 9)

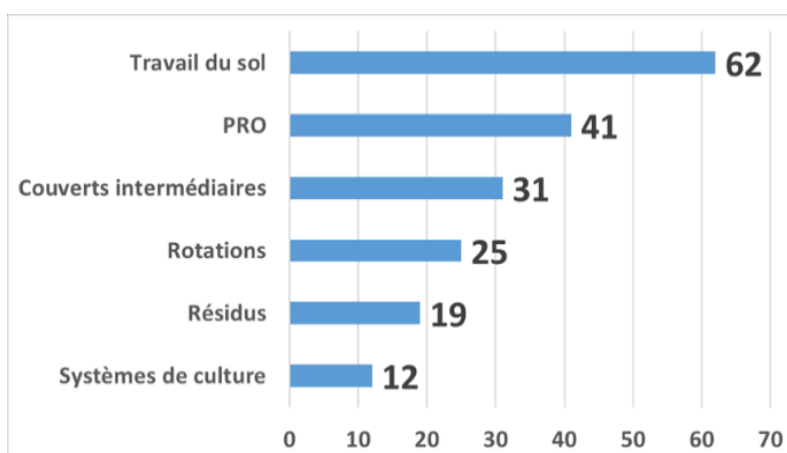


Figure 8 : Nombres d'articles étudiés par pratique culturale



Figure 9 : Cartographie des essais étudiés dans les articles retenus

4.2.1.2. Classifications des variables liées au contexte agropédoclimatique

La réponse d'une variable physico-chimique ou microbiologique à une pratique est étudiée dans tous les contextes agropédoclimatiques confondus puis par contexte pédoclimatique et agronomique. Pour cela, des classifications ont été effectuées par contexte pédoclimatique et agronomique.

- **Par contexte pédoclimatique**
 - **Classes de climats (Figure 10)**

Les zones climatiques ont été définies à partir de la classification de Köppen-Geiger² mise à jour en 2006.

² Arkus, Ottek, Uergen, Rieser, Christoph, Eck, Runo, Udolf, Ranz, & Ubel (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, disponible en ligne [<https://www.semanticscholar.org/paper/World-Map-of-the-K%C3%B6ppen-Geiger-climate-updated-%E2%80%94-Arkus-Ottek/7dbfd41edc7d2d22d36e4c30bdd856af67bb16d0>]

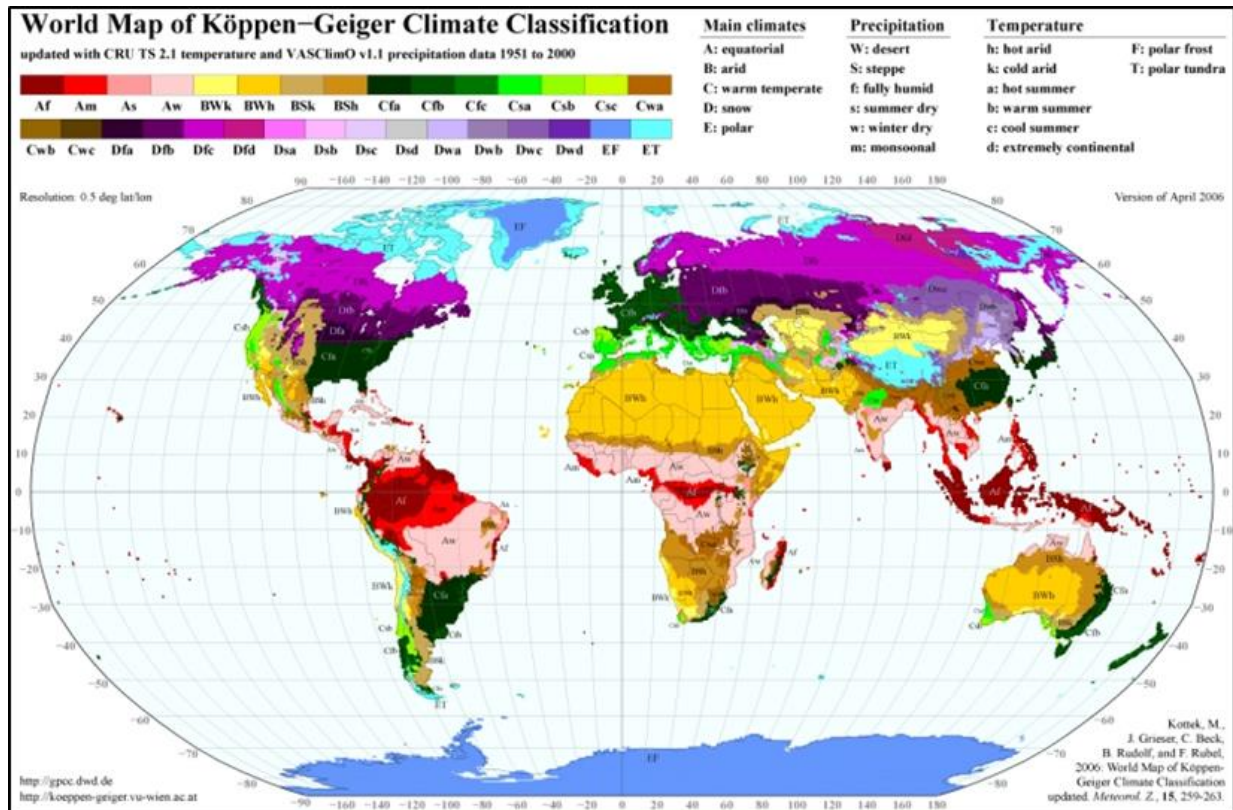


Figure 10 : Zones climatiques de la classification de Köppen-Geiger²

Les essais ont été classés selon leur localisation en 5 climats principaux suivant cette classification :

A: Equatorial; B: Arid; C: Warm temperate; D: Snow; E: Polar

- **Groupes de classes de texture du sol (Figure 11)**

Les groupes de classes de texture ont été définis à partir du triangle des textures GEPPA.

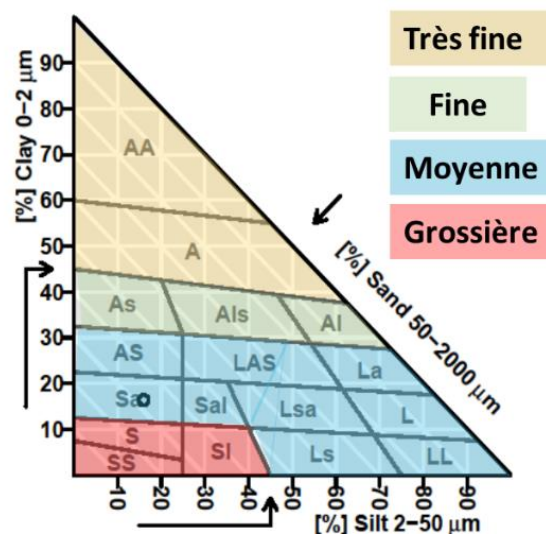


Figure 11 : Triangle des textures GEPPA

- **Classes de teneurs en MO du sol (Figure 12)**

Les classes de teneur du sol en MO ont été définies selon la distribution des données tous sites et toutes pratiques culturales confondus. Les trois classes déterminées (teneur en MO faible, moyenne et élevée) ont présenté un nombre d'effectifs équivalent.

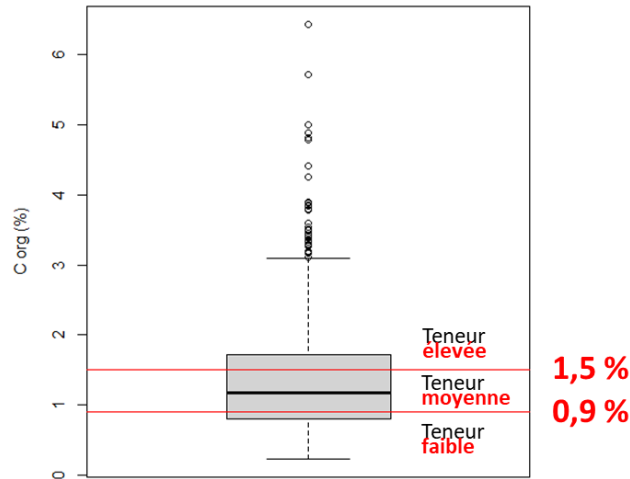


Figure 12 : Boxplot montrant la distribution des valeurs de C org (%) (tous sites et toutes pratiques confondues)

Classes obtenues :

- Teneur en MO faible : < 1,5% (Corg :
- Teneur en MO moyenne : entre 1,5 et 2,6% (Corg : entre 0,9 et 1,5%)
- Teneur en MO élevée : > 2,6% (Corg > 1,5)

• **Par contexte agronomique (Figure 13)**

- **Classes d'âges de la pratique culturale**

A dire d'experts (partenaires Microbioterre) :

- Courte durée : < 5 ans
- Moyenne durée : entre 5 et 15 ans
- Longue durée : > 15 ans
- **Type de pratique (types PRO, couverts, ...)**

Modalité référence	Modalité "pratique"
Sans couvert intermédiaire	Légumineuses (LEG)
	Graminées (GRA)
	Crucifères (CRUC)
	MIX
	Autres

Modalité référence	Modalité "pratique"
Résidus exportés	Résidus laissés en surface
	Résidus enfouis

Figure 13 : Méthode de classification de pratiques (exemple pour la pratique couverts intermédiaires à gauche et gestion des résidus à droite)

4.2.1.3. Traitements de données et exemples de résultats

Pour chaque comparaison (Modalité pratique vs. modalité référence), l'effet de la pratique est étudié en déterminant la valeur relative (Figure 14):

$$\text{Valeur relative} = \frac{\text{Modalité pratique} - \text{Modalité réf.}}{\text{Modalité réf.}} * 100$$

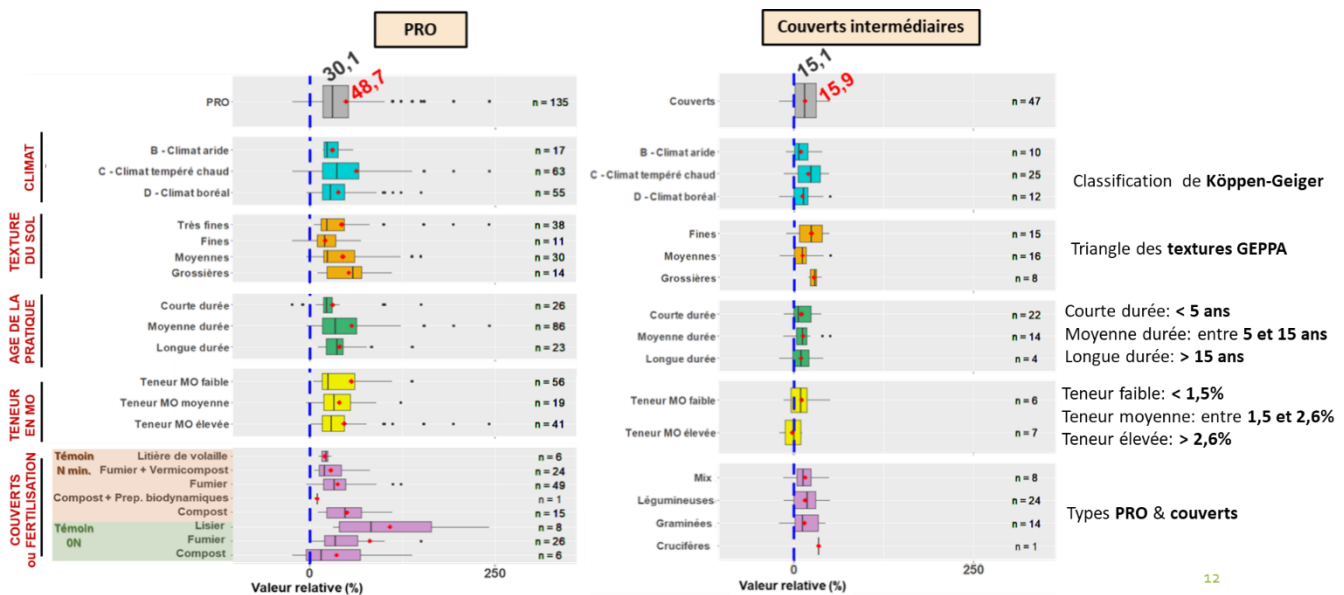


Figure 14 : Effet de l'apport de PRO et de l'implantation de couverts intermédiaires sur l'indicateur carbone de la biomasse microbienne.

Les résultats indiquent un effet prédominant de l'apport de PRO par rapport à l'implantation de couverts. En effet, quel que soit la situation étudiées, l'apport de PRO entraîne en moyenne une augmentation de +48,7% de la valeur du C microbien (carbone de la biomasse microbienne). Cette augmentation est plus faible (+15,9%) en réponse à l'implantation à des couverts intermédiaires. Cette méthodologie de traitement de données a été suivie pour évaluer la variation des 20 variables en réponse aux six pratiques culturales étudiées.

4.2.2. Données issues des essais Microbioterre de moyennes et longues durées

Deux niveaux de diagnostics Microbioterre seront proposés :

- **Un diagnostic standard** : usage adopté par le plus grand nombre d'agriculteurs
- **Un diagnostic approfondi** : un outil de formation et d'animation de groupes basé sur la mesure de plusieurs paramètres microbiologiques

Un ensemble de critères de choix a permis de sélectionner les indicateurs à retenir pour les diagnostics standard et approfondi. Ces critères sont :

- La redondance de l'information entre indicateurs
- La variabilité spatiale des indicateurs
- La réponse des indicateurs aux pratiques culturales

- Le coût et faisabilité technique de chacun des indicateurs

Les indicateurs inclus dans les menus doivent constituer un Minimum Data Set (MDS). Cette démarche est proche de celle suivie dans un article de Obriot et al (Obriot et al., 2016).

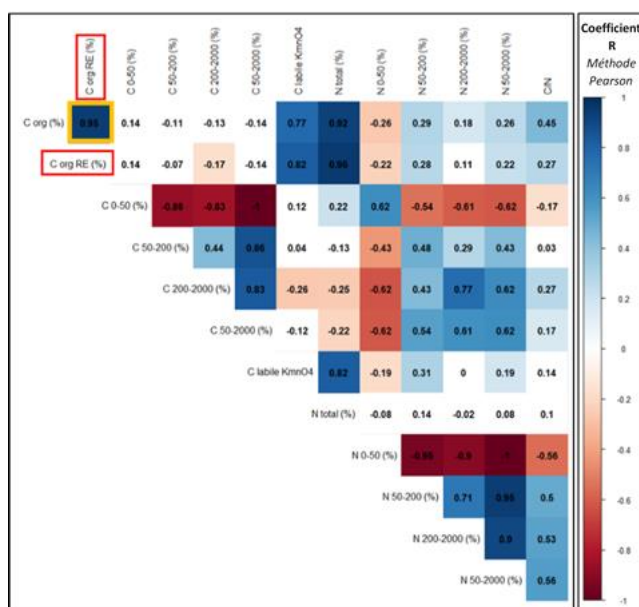
L'ensemble du traitement de données a été mené avec le logiciel R.

- Critère de redondance de l'information

Le premier critère de sélection des indicateurs est la redondance. L'objectif est de sélectionner des indicateurs qui n'apportent pas d'informations redondantes. Pour cela, la corrélation (méthode Pearson) entre chaque paire d'indicateurs a été étudiée. Cette étude de redondance a été menée sur l'ensemble des sites et des pratiques culturales pour la même profondeur de prélèvement (0-20 cm), ce qui correspond à 183 observations.

Deux indicateurs sont considérés comme redondants s'ils apportent la même information et si leur coefficient de corrélation en valeur absolue est supérieur à 0,9. Ce seuil a été choisi entre partenaires du projet. Il est supérieur à celui fixé dans la publication d'Obriot et al. ($R > 0,8$) pour ne pas supprimer dès le début de l'étude des indicateurs finalement pertinents à inclure dans les menus selon les autres critères. Ces corrélations ont été étudiées entre tous les indicateurs par paire. Ici, sont présentées uniquement les matrices de corrélation entre les indicateurs physico-chimiques et microbiologiques respectivement (Figures 15 et 16).

- Redondance des indicateurs physico-chimiques



Critères de redondance de l'information :

$|R| > 0,9$ & même information
Une paire d'indicateurs

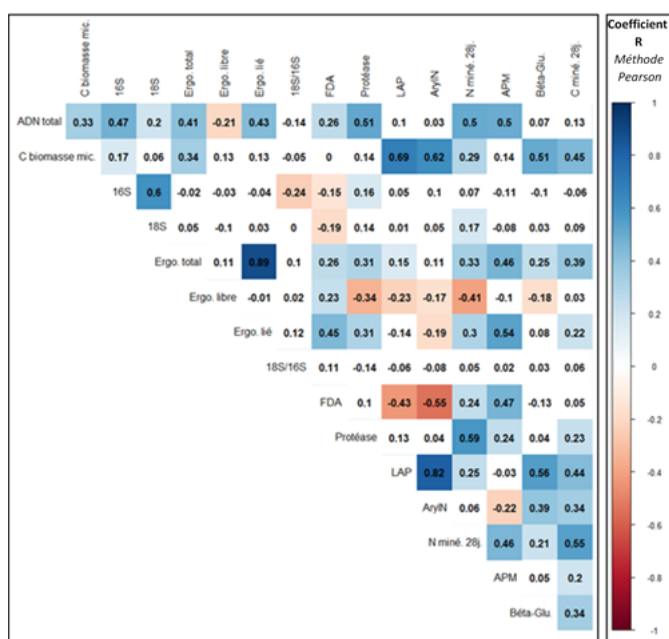
Choix entre les indicateurs co-corrélés :

Sélection d'un indicateur (critère de coût)
C org méthode Rock-Eval non étudié

Figure 15 : Coefficients de corrélation entre les différents indicateurs physico-chimiques (méthode Pearson)

Concernant les co-corrélations des indicateurs physico-chimiques et selon les critères de redondance, la teneur en Corg mesurée avec la méthode Rock-Eval n'a pas été retenue pour la suite de l'étude. En effet, cet indicateur est corrélé positivement ($R > 0,9$) à la teneur en Corg mesuré selon la norme NF ISO 14235. Il apporte donc une information redondante et lors du projet, son cout d'analyse était élevé au moment de l'étude. Cet arbitrage dans Microbioterre ne présage pas de la pertinence de la méthode rock Eval en sa globalité, qui est plus complète et a évolué depuis cette étude.

- Redondance des indicateurs microbiologiques



Critères de redondance de l'information :

$|R| > 0,9$ & même information
Aucune paire d'indicateurs

Choix entre les 2 indicateurs co-corrélés :

Sélection d'un indicateur (critère de coût)
Tous indicateurs étudiés

Figure 16 : Coefficients de corrélation entre les différents indicateurs physico-chimiques (méthode Pearson)

Aucune paire d'indicateurs microbiologiques n'est corrélée avec un coefficient R supérieur au seuil fixé. L'ensemble de ces indicateurs a été retenu pour la suite des analyses.

- Critère de variabilité spatiale

Le second critère de choix des indicateurs est la précision des indicateurs. Cette précision correspond à la sensibilité des indicateurs à la variabilité spatiale entre blocs d'une même modalité agronomique sur le même site d'étude. La précision de l'indicateur dans un contexte agropédoclimatique est considérée comme d'autant plus élevée que la variabilité spatiale inter-blocs est faible. La variabilité spatiale est étudiée en calculant le coefficient de variation (CV en %) par modalité pour chaque essai. Des seuils de CV ont été définis afin de sélectionner les indicateurs avec des CV inférieurs au seuil, c'est-à-dire avec une variabilité spatiale et donc une précision acceptable. Ces seuils (15% pour les variables physico-chimiques et 25% pour les variables microbiologiques) ont été fixés en se basant sur des travaux antérieurs de Bouthier *et al.* (2015).

La variabilité inter-blocs a été étudiée uniquement sur des prélèvements de sol non composites (indépendants). Pour cela, les blocs composites R n'ont pas été pris en compte pour le calcul des coefficients de variation.

Pour chaque variable mesurée, un CV a été calculé par modalité agronomique sur chaque essai. Une valeur moyenne de CV a ensuite été calculée par essai pour estimer la variabilité spatiale correspondant à un pédoclimat donné. Les valeurs de CV par site et par indicateurs ont été représentés sous forme de boxplots (Figure 17).

- Indicateurs physico-chimiques :

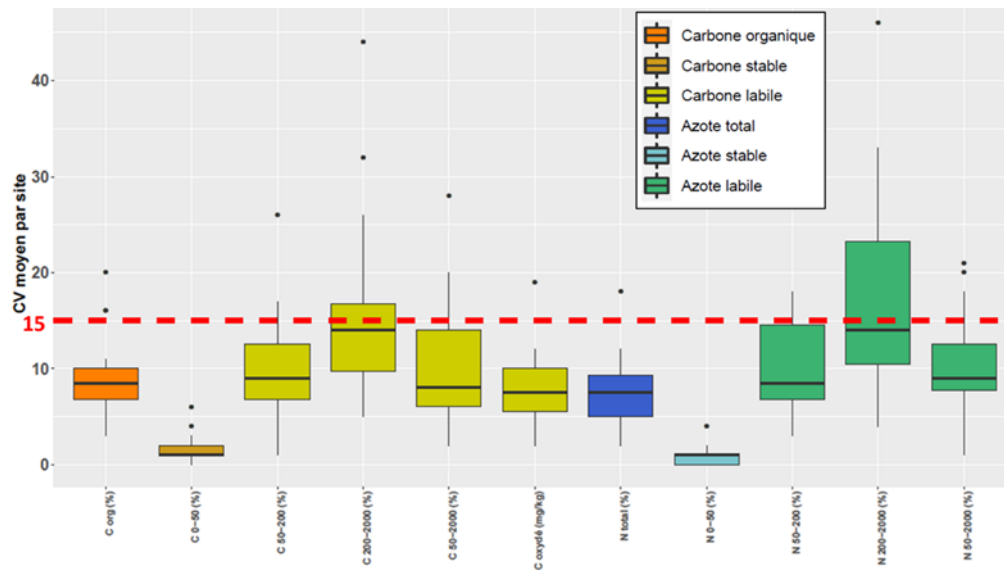


Figure 17 : Coefficients de variation des résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées

Tous les indicateurs physico-chimiques ont un CV médian inférieur au seuil fixé de 15%, montrant que la variabilité spatiale de ces indicateurs dans un contexte agropédoclimatique donné est correcte selon les seuils fixés.

- Indicateurs microbiologiques :

Parmi les indicateurs microbiologiques, deux ont un CV médian supérieur au seuil de 25% : les biomasses bactérienne (16S) et fongique (18S). Ceci pourrait notamment être dû au fait que ces indicateurs soient exprimés en échelle logarithmique. De ce fait, ces deux indicateurs n’ont pas été écartés à ce stade de l’analyse.

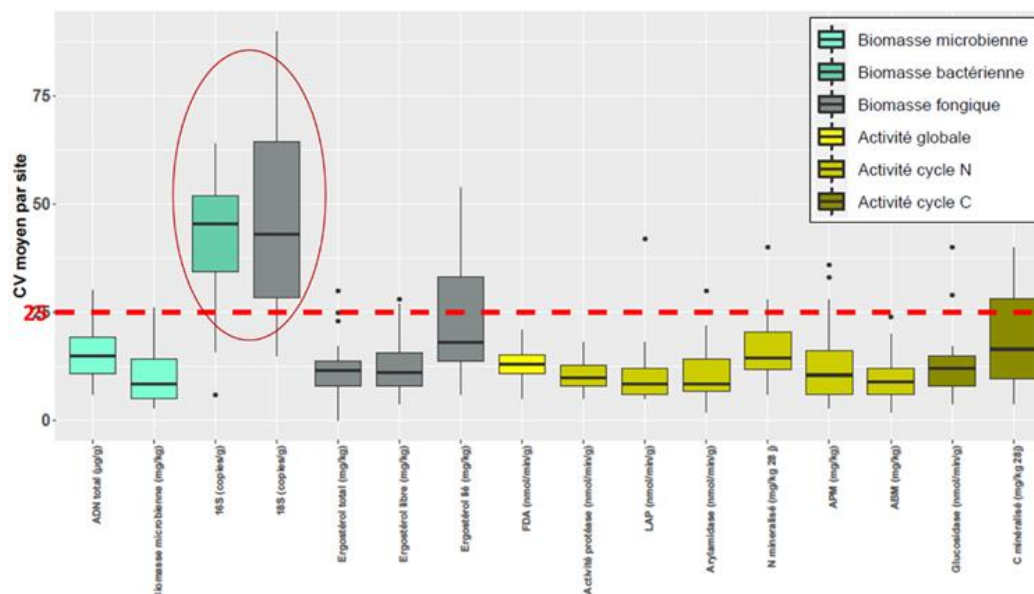


Figure 18 : Coefficients de variation des résultats des différentes analyses microbiologiques réalisées

- Critère d'aptitude discriminante vis-à-vis des pratiques culturales

Dans une démarche agroécologique par exemple, le diagnostic Microbioterre doit permettre d'évaluer l'effet sur le sol d'un changement de pratiques culturales via l'analyse d'un ensemble d'indicateurs physico-chimiques et microbiologiques. Les indicateurs ainsi mesurés doivent donc avoir l'aptitude de discriminer différentes pratiques dans un contexte pédoclimatique donné.

L'analyse de l'aptitude discriminante des indicateurs vis-à-vis des pratiques culturales a été menée par site. Il a été montré que le pédoclimat a un effet prédominant sur les indicateurs mesurés (Büchi et al., 2022³). Le choix de mener l'analyse par site a ainsi été fait dans l'objectif de limiter un important biais pédoclimat potentiel.

Le principal objectif de cette partie des analyses est de classer les indicateurs en fonction de leur aptitude discriminante vis-à-vis des pratiques culturales.

Pour cela, dans un premier temps, des groupes d'essais ont été constitués pour chacune des 5 pratiques culturales (PRO, Couverts intermédiaires, travail du sol, rotations, systèmes de cultures). Pour chaque pratique, une modalité de référence et une modalité pratique a été comparée.

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, « n » comparaisons inter-essais totales seront ainsi étudiées. Ces comparaisons n'ont pas pris en compte les blocs composites R puisque les tests de comparaisons utilisés supposent l'indépendance des échantillons.

Le classement des indicateurs selon leur sensibilité à la pratique dépend du nombre de comparaisons significatives (tests de comparaisons de moyennes à 5%) pour chaque indicateur. Cette méthode de scoring par pratique, tous sites confondus, a ensuite été menée pour toutes les pratiques confondues (somme des scores par pratique). La sélection des indicateurs du menu a été réalisée sur ce dernier classement avec l'objectif de choisir les indicateurs les plus polyvalents possibles (Figure 19).

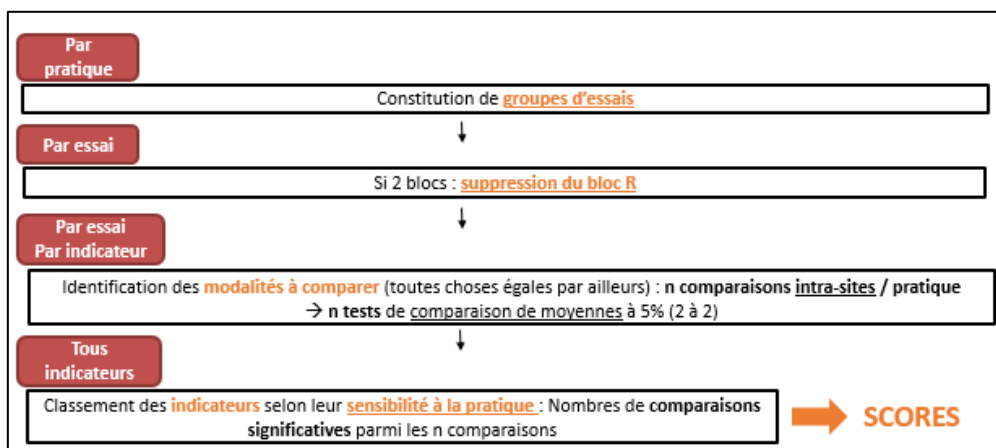


Figure 19 : Démarche suivie pour l'étude de l'aptitude discriminante des indicateurs vis-à-vis des pratiques culturales

Dans cette démarche, le modèle linéaire étudié permet d'expliquer la variation de chaque variable mesurée par l'effet modalité. Le facteur « bloc » est pris en compte dans le modèle. Dans les essais en bande, le modèle étudié est différent car il ne prend pas en compte l'effet bloc.

³ Büchi L., Walder F., Banerjee S., Colombi T., van der Heijden M. G.A., Keller T., Charles RO, Six J. (2022).

Pedoclimatic factors and management determine soil organic carbon and aggregation in farmer fields at a regional scale, Geoderma, Volume 409.

Nous avons donc considéré dans cette méthode de scoring que les essais avec 3 blocs ou les essais avec 2 blocs (en ne prenant pas en compte le bloc R non indépendant des 2 premiers). Le fait de retirer les données du bloc R a pu impacter négativement l'aptitude discriminante des indicateurs dans les sites concernés (Figure 20).



	PRO 6 essais	Travail du sol 5 essais	Couverts intermédiaires 5 essais	Systèmes 6 essais	Rotations 4 essais
Modalité Référence	Ferti. Min.	Labour	Sol nu	Système de référence	Rotation courte
Modalité « Pratique »	PRO	TS ou SD	Avec couverts	Système innovant ou bio.	Rotation longue
Nombre comparaisons	13	11	10	7	5

Figure 20 : Nombres d'essais et de comparaisons pris en compte dans la méthode du scoring pour l'étude de l'aptitude discriminante des variables vis-à-vis des pratiques culturales

La pratique la plus représentée est la pratique apport de PRO et la moins représentée est la pratique rotation des cultures. Cette différence dans le nombre de comparaisons entre pratiques va influencer les résultats puisque la pratique PRO aura un poids supérieur dans le scoring.

• **Apport de Produits Résiduels Organiques**

L'âge des essais relatifs à l'apport de PRO s'étale de 6 à 33 ans. Différentes origines et quantités de PRO (t C/ha/an) ont été apportées selon les essais (Tableau 7).

Tableau 7 : Influence de l'âge des essais et des quantités de C apportées par les PRO sur les variables mesurées

Quantité C apportée (moyenne 5 ans) + Age de l'essai

	6 ans					18 ans			20 ans		33 ans			
	JEU LES BOIS		EFELE		KER W Sol			COLMAR		FEU	CRECOM			
PRO	Type de PRO		Digestat lisier		SD Fumier			Boues		Fumier				
	Compost fumier	Fumier	Compost fumier	Digestat lisier	Fumier	SD Fumier	Lab. Fumier	TS Fumier	Boues	Compost boues	Fumier	Capost biodéchets		
	Quantité moyenne C (5 ans) (t C/ha/an)													
	0,06	0,09	0,13	0,6	1,9	2,5			0,5	1	1,6	1,9	2,6	
	ISMO moyen													
	81	80	81	53	61	NA			56	75	55	68	NA	
Variables physico-chimiques	C org (%)	*	**										**	
	C org Rock-Eral (g/kg)	*		*						*	***	***	**	
	C stable 100 ans (g/kg)										***	***	**	
	C 0-50 (%)						*	**	***	***	***	***	*	
	C 50-200 (%)				*	***	*	**	***	***	***	***	***	
	C 200-2000 (%)				**	*				*	**	**	**	
	C 50-2000 (%)									*	**	**	**	
	Carbone actif (g/kg)	**	*	***						*	**	***	***	*
	C oxydé (mg/kg)				*	*	*	**	*	*	*	***	***	*
	C labile 20 ans (g/kg)			**						*	*	***	***	*
	N total (%)		*	**						*	*	***	***	**
	N 0-50 (%)						*	*	*	*	*	***	***	**
N 50-200 (%)			*			*	*	*	*	*	***	***	**	
N 200-2000 (%)				*	*	*	*	*	*	*	***	***	**	
N 50-2000 (%)						*	*	*	*	*	***	***	**	
Variables biologiques	ADN total (µg/g)												**	
	Biomasse microbienne (mg/kg)	*	*				**	**			*	**	**	
	35S (copie/g)						**	**			*	**	**	
	38S (copie/g)					**	**	**			*	**	**	
	Ergostérol total (mg/kg)	*	*	*				*			*	*	*	
	Ergostérol libre (mg/kg)	*	*	*				*			*	*	*	
	Ergostérol lié (mg/kg)			*				*			*	*	*	
	35S/38S						*	*			*	*	*	
	FDN (nmol/min/g)						*	*			*	*	*	
	Activité protéase (nmol/min/g)					**	**	**	***		*	*	**	
	LAP (nmol/min/g)				*	*	*	*	*		***	***	***	
	Amylase (nmol/min/g)		**	*		**	***	*	***		**	**	***	
N minéralisé (mg/kg 28j)		*	*		*	*	*	*		*	*	*		
APM (mg/kg)										*	*	*		
ABM (mg/kg)							**	***	*	*	**	***		
Glucosidase (nmol/min/g)								**				**		
C minéralisé (mg/kg 28j)												**		

Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants
* : 5%
** : 1%
*** : 0,1%

↑ vs. Témoin sans PRO
↓ vs. Témoin sans PRO
Non significatif

■ **Effet âge de l'essai :**

L'Age des essais semble avoir un effet significatif sur la réponse des variables étudiées. En effet, plus l'essai est ancien et plus la réponse des indicateurs à l'apport de PRO comparativement à la pratique de référence (sans apport de PRO) est élevée.

■ **Effet quantité de C apportée par les PRO :**

Le gradient d'apport en PRO impacte la réponse des indicateurs. Dans l'essai de Jeu les Bois (essai 6 ans), 2 quantités en C ont été apportées (0,06 et 0,13 t C/ha/an respectivement) lors d'apport en compost de fumier

Dans la modalité avec la quantité de C la plus importante, certains indicateurs microbiologiques répondent positivement à la pratique (biomasse microbienne par fumigation, ergostérol et activité arylamidase) alors qu'ils ne répondaient pas dans la modalité avec une quantité de PRO plus faible.

■ **Effet type de PRO :**

Aucun essai ne permet de comparer l'effet type de PRO à quantité de C équivalente.

● **Travail du sol (Tableau8) :**

■ **Effet âge de la pratique :**

Dans les essais récents (< 10 ans) comme Mons et Combe, l'effet de la réduction du travail du sol est faible. Ce changement de pratique a un effet plus important dans les essais plus anciens (≅18 ans) comme Kerghuenec Travail du sol ou Boigneville Environnement. Même si l'essai de Boigneville est ancien, peu d'effet du semis direct a été observé par rapport au labour sur la profondeur analysée.

Tableau 8 : Influence du travail du sol apportés sur les variables mesurées

		Age de l'essai											
		6 ans		7 ans		18 ans				27 ans		47 ans	
		MONS		COMBE		KER W sol				BOI ENV		BOI A1	
Wsol	Modalité	TS	Couverts SD	Min SD	Min TS	Fum SD	Fum TS	SN SD	Cruc SD	CrucLeg SD	SN SD	Couv SD	
	Type de travail	Labour : 20 cm TS : 8cm	Labour : 20 - 30 cm SD : 3cm	Labour : 25 cm SD : 3 cm	Labour : 25 cm TS : 12cm	Labour : 25 cm SD : 3 cm	Labour : 25 cm TS : 12 cm	Labour : 20 cm SD : 5 cm	Labour : 20 cm SD : 5 cm	Labour : 20 cm SD : 5 cm	Labour : 20 cm SD : 5 cm	Labour : 20 cm SD : 0 cm	Labour : 20 cm SD : 0 cm
Variables physico-chimiques	C org (%)					*				*			
	C org Rock-Eval (g/kg)												
	C stable 300ans (g/kg)												
	C 0-50 (%)						*		***	***			
	C 50-200 (%)						*		*	*	*	*	
	C 200-2000 (%)	**							**	**			
	C 50-2000 (%)						*		***	***			
	Carbone actif (g/kg)												
	Coxydé (mg/kg)	*											
	C labile 20 ans (g/kg)						*						
	N total (%)										*		
	N 0-50 (%)						*			**			
	N 50-200 (%)						*			*			
	N 200-2000 (%)	*								*			
N 50-2000 (%)						*			**				
Variables biologiques	ADN total (µg/g)						**		**				
	Biomasse microbienne (mg/kg)					**	**		***			*	
	16S (copies/g)						*		***				
	18S (copies/g)	*				*	*		**				
	Ergostérol total (mg/kg)			**			*		*				
	Ergostérol libre (mg/kg)			**			*		*				
	Ergostérol lié (mg/kg)						*		*				
	18S/16S						*		*				
	FDA (nmol/min/g)						*	*		*		*	
	Activité protéase (nmol/min/g)				*			***		**			
	LAP (nmol/min/g)		*									*	
	Arylamidase (nmol/min/g)			**				***		***			
	N minéralisé (mg/kg 28 j)					*	*	*		*		*	
	APM (mg/kg)						*	*		*		*	
ABM (mg/kg)					*	*	*		*		*		
Glucosidase (nmol/min/g)		**				*	*		***	***	*		
C minéralisé (mg/kg 28j)					*	*	*		*		*		

Travail superficiel (TS)
Semis Direct (SD)

Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants
* : 5%
** : 1%
*** : 0,1%

↑ vs. Témoin labour
↓ vs. Témoin labour
Non significatif

- **Effet apport de C & réduction travail du sol :**

Quand la pratique (apport de PRO ou implantation de couverts intermédiaires) entraîne une entrée de C dans le sol, de nombreux d'indicateurs varient significativement à la réduction du travail du sol. C'est le cas dans les essais Kerguehenec Travail du sol et Boigneville Environnement. Ces résultats suggèrent qu'un travail du sol réduit, diminue le contact de la MO apportée avec les microorganismes du sol. Cette MO est donc moins soumise à l'action des microorganismes, ce qui entraîne une cinétique de dégradation moins rapidement.

- **Couverts intermédiaires (Tableau 9) :**

Les essais avec apport de PRO ont été mis en place entre 7 à 27 ans. Les couverts intermédiaires des essais varient selon leurs biomasses (t MS/ha) et de type de couvert.

- **Effet âge de l'essai :**

Les essais présentés dans le tableau 9 sont classés du plus récent au plus ancien. Si on compare le nombre d'indicateurs variant significativement dans les essais récents (7, 8 et 9 ans) par rapport à l'essai le plus ancien (>27 ans), il semble y avoir un effet âge de la pratique. Cet effet âge est cependant moins marqué que pour la pratique apport de PRO.

- **Effet gestion des résidus de culture :**

Comme très peu d'indicateurs ont varié significativement à l'implantation de couverts intermédiaires, il est difficile de conclure quant à l'effet de la gestion des résidus. Néanmoins dans l'essai Boigneville Environnement, il semble y avoir du travail du sol et donc de la gestion des résidus. En effet, en SD avec résidus de culture laissés en surface, plus d'indicateurs varient significativement par rapport au labour conventionnel avec résidus enfouis.

■ **Effet biomasse du couvert & Effet type de couverts :**

Dans ce projet, l'effet biomasse du couvert et son type n'ont pas pu être étudiés.

Tableau 9 : Influence de l'âge des essais et des couverts d'interculture sur les variables mesurées

Biomasse couverts (moyenne 5 ans) + Age de l'essai

Couverts	7 ans		8 ans		9 ans		48 ans (10 ans couverts)		27 ans	
	Essai		Essai		Essai		Essai		Essai	
	COMBE	AUZEVILLE	BAZIEGE	BOI A1	BOI ENV	SD Couverts	SD Couverts	SD Couverts	SD Couverts	
Modalités couverts	SD Couverts	Bl - Couverts Multi-Services	Rot.courte Couverts	Rot. Longue Couverts	Labour Couverts	SD Couverts	Labour CrucLeg	Labour Cruc	SD CrucLeg	SD Cruc
Type de couverts	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres	Autres	Autres	Légumineuses + autres	Légumineuses + autres
Classe de biomasse couverts	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne
Gestion des résidus	En surface	Enfouis	Enfouis	Enfouis	Enfouis	En surface	Enfouis	Enfouis	En surface	En surface
Variables physico-chimiques	C org (%)									
	C org Rock-Eval (g/kg)									
	C stable 100 ans (g/kg)									
	C 0-50 (%)									b ***
	C 50-200 (%)						b *		a *	a **
	C 200-2000 (%)									a ***
	C 50-2000 (%)									a ***
	Carbone actif (g/kg)									
	C oxydé (mg/kg)									
	C labile 20 ans (g/kg)		*							
	N total (%)									
	N 0-50 (%)									
N 50-200 (%)									b *	
N 200-2000 (%)									a **	
N 50-2000 (%)									a *	
Variables biologiques	ADN total (µg/g)									
	Biomasse microbienne (mg/kg)									a *
	16S (copies/g)									
	18S (copies/g)									
	Ergostérol total (mg/kg)							a *	a *	
	Ergostérol libre (mg/kg)									
	Ergostérol lié (mg/kg)								a *	
	18S/16S									
	FDA (nmol/min/g)									
	Activité protéase (nmol/min/g)									a *
	LAP (nmol/min/g)									a *
	Arylamidase (nmol/min/g)									a ***
	N minéralisé (mg/kg 28 j)				**					
	APM (mg/kg)								b *	
	ABM (mg/kg)									
Glucosidase (nmol/min/g)	*								b ***	
C minéralisé (mg/kg 28j)									b ***	

■ Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants

* : 5%

** : 1%

*** : 0,1%

↑ vs. Témoin sans C.I.

↓ vs. Témoin avec C.I.

□ Non significatif

● **Systèmes de culture (tableau 10) :**

Le tableau ci-dessous, présente l'ensemble des résultats relatifs aux systèmes de cultures étudiés dans ce projet.

Tableau 10 : Influence de l'âge des essais et du système de culture sur les variables mesurées

- **Âge essai** +

Variables	6 ans		7 ans		8 ans		17 ans		22 ans		33 ans	
	Essai		Essai		Essai		Essai		Essai		Essai	
	MONS - Pailles	Toulouse	AUZEVILLE - Niveau intrants	BRETIENIERE	VERSAILLES	CRECOM	TS Pailles exportées	Monoculture maïs grain - Labour	Syst. Ref	Syst. Ref	Syst. Prod.	Syst. Prod.
Modalité pratique	TS Pailles enfouies	Rotation 3 ans	Sans couverts Bl	SD couverts	Système blo	Système SD	Rotation maïs/prairie					
Variables physico-chimiques	C org (%)											
	C org Rock-Eval (g/kg)											
	C stable 100 ans (g/kg)			*								**
	C 0-50 (%)											*
	C 50-200 (%)											*
	C 200-2000 (%)	*										*
	C 50-2000 (%)											*
	Carbone actif (g/kg)											*
	C oxydé (mg/kg)										*	**
	C labile 20 ans (g/kg)										*	*
	N total (%)										**	***
	N 0-50 (%)											
N 50-200 (%)												
N 200-2000 (%)												
N 50-2000 (%)												
Variables biologiques	ADN total (µg/g)											*
	Biomasse microbienne (mg/kg)									*	*	**
	16S (copies/g)								*	*		
	18S (copies/g)	*										
	Ergostérol total (mg/kg)		*	*	*							
	Ergostérol libre (mg/kg)											
	Ergostérol lié (mg/kg)		*	*	*							
	18S/16S				**							
	FDA (nmol/min/g)									*	*	**
	Activité protéase (nmol/min/g)		*	*	*					*	*	**
	LAP (nmol/min/g)									*	*	**
	Arylamidase (nmol/min/g)		*	*	*					*	*	**
	N minéralisé (mg/kg 28 j)									*	*	**
	APM (mg/kg)									*	*	**
	ABM (mg/kg)		*	*	*					*	*	**
Glucosidase (nmol/min/g)											**	
C minéralisé (mg/kg 28j)											**	

■ Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants

* : 5%

** : 1%

*** : 0,1%

↑ vs. Syst. référence

↓ vs. Syst. référence

□ Non significatif

Les indicateurs dans l'essai de Bretenières n'ont pas été discriminants vis-à-vis des pratiques dans cet analyse sans le bloc R. L'essai étudie 2 modalités, sans les données du bloc R, seules 4 valeurs ont été étudiées ici (2 par modalité). Cette étude a également été menée en tenant compte des blocs R (cf séminaire Paris février 2020 avec gestionnaires des sites). En tenant compte du bloc R (seuil de 5%), aucune variable physico-chimique n'est discriminante ; 4 variables microbiologiques sont significativement plus élevées dans la modalité SDC (LAP, Arylamidase, Biomasse microbienne et ergostérol libre).

■ **Effet âge de l'essai :**

Pour la pratique système de culture, il est difficile de conclure quant à l'effet âge de la pratique sur les indicateurs puisque les systèmes comparés sont très différents (rotation culture – prairie (CRECOM), gestion des pailles (MONS)).

Dans l'essai de Bretenières, 2 modalités sont étudiées avec 2 blocs pour chacune (blocs R non étudiés). Au total, 4 valeurs par indicateur sont analysées dans l'essai. Du fait du non-respect des conditions d'applications des tests paramétriques, l'utilisation d'un test non paramétrique (Kruskal-Wallis) n'a pas permis de détecter de différences sur ce faible effectif de données.

● **Rotation (Tableau 11) :**

Le tableau ci-dessous, présente l'ensemble des résultats relatifs à la durée de la rotation culturale étudiés dans ce projet.

Tableau 11 : Influence de la durée de rotation sur les variables mesurées

		Âge des essais	7 ans		9 ans		47 ans
		Essai	THORIGNE	TOULOUSE	BAZIEGE Couverts	BAZIEGE Sol nu	BOI A1/BOI A2 Labour Couverts
Rotation	Durée rotations		Rot. Courte : 3 ans Rot. Longue : 6 ans	Rot. Courte : 1 an Rot. Longue : 3 ans	Rot. Courte : 2 ans Rot. Longue : 6 ans	Rot. Courte : 2 ans Rot. Longue : 6 ans	Rot. Courte : 2 ans Rot. Longue : 4 ans
Variables physico-chimiques	C org (%)						
	C org Rock-Eval (g/kg)						
	C stable 100 ans (g/kg)						
	C 0-50 (%)						**
	C 50-200 (%)						**
	C 200-2000 (%)						**
	C 50-2000 (%)						**
	Carbone actif (g/kg)						
	C oxydé (mg/kg)						
	C labile 20 ans (g/kg)						
	N total (%)						*
	N 0-50 (%)						*
	N 50-200 (%)						*
	N 200-2000 (%)						*
	N 50-2000 (%)						*
Variables biologiques	ADN total (µg/g)						
	Biomasse microbienne (mg/kg)		*				
	16S (copies/g)						
	18S (copies/g)						
	Ergostérol total (mg/kg)			*			
	Ergostérol libre (mg/kg)				*		*
	Ergostérol lié (mg/kg)			**	*		*
	18S/16S						
	FDA (nmol/min/g)						
	Activité protéase (nmol/min/g)						
	LAP (nmol/min/g)					**	
	Arylamidase (nmol/min/g)						
	N minéralisé (mg/kg 28 j)						**
	APM (mg/kg)						
	ABM (mg/kg)						**
Glucosidase (nmol/min/g)							
C minéralisé (mg/kg 28j)							

■ Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants
 * : 5%
 * : 1%
 * : 0,1%

■ vs. Rotation courte ↑
 ■ vs. Rotation courte ↓

■ **Effet âge de l'essai :**

Dans les essais récents (<10 ans), peu de réponses des indicateurs. Plus d'effet dans l'essai plus ancien (Boigneville A1/A2)

• **Toutes pratiques confondues (Tableau 12) :**

On constate dans ce tableau, que certaines variables semblent être de bons indicateurs toutes pratiques confondues. En effet, en prenant comme référence l'indicateur historique le carbone et l'azote, toute réponse supérieure ou équivalente à ces deux variables, est retenue comme indicateur dans ce projet. Ce qui permet de retenir 17 indicateurs (dont C et N) (tableau 12).

Tableau 12 : Aptitude des indicateurs à discriminer les pratiques agricoles évaluées

2 indicateurs de « référence » mesurés en routine (Benintende et al., 2014)

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

Aptitude à discriminer les pratiques

Aptitude **élevée**

Aptitude **faible**

Variables	PRO 13 comp.	Couverts intermédiaires 10 comp.	Travail du sol 11 comp.	Rotations 5 comp.	Systèmes de culture 7 comp.	Toutes pratiques
C org (%)						
C org Rock-Eval (g/kg)						
C stable 100 ans (g/kg)						
C 0-50 (%)						
C 50-200 (%)						
C 200-2000 (%)						
C 50-2000 (%)						
Carbone actif (g/kg)						
C oxydé (mg/kg)						
C labile 20 ans (g/kg)						
N total (%)						
N 0-50 (%)						
N 50-200 (%)						
N 200-2000 (%)						
N 50-2000 (%)						
ADN total (µg/g)						
Biomasse microbienne (mg/kg)						
16S (copies/g)						
18S (copies/g)						
Ergostérol total (mg/kg)						
Ergostérol libre (mg/kg)						
Ergostérol lié (mg/kg)						
18S/16S						
FDA (nmol/min/g)						
Activité protéase (nmol/min/g)						
LAP (nmol/min/g)						
Arylamidase (nmol/min/g)						
N minéralisé (mg/kg 28 j)						
APM (mg/kg)						
ABM (mg/kg)						
Glucosidase (nmol/min/g)						
C minéralisé (mg/kg 28j)						

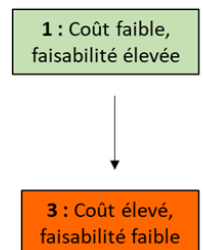
- Critère de coût et faisabilité technique

Afin d'affiner le nombre d'indicateurs, des contraintes de cout et de faisabilité technique ont été prise en compte (Tableau 13). Ainsi, le nombre d'indicateurs retenus pour le menu Microbioterre passe de 25 à 12.

Tableau 13 : Résultats de l'évaluation des coûts, technicité et faisabilité technique des indicateurs mesurés

Indicateurs du menu Microbioterre		Technicité et appareillage 1 : facile à 3 : difficile	Délai analyse 1 : faible délai à 3 : délai élevé	Coût 1 : coût faible à 3 : coût élevé	Sol sec ou brut	Envoi / réception	Norme disponible 1 : Norme 2 : Méthodes publiées mais pas de norme 3 : Différentes méthodes
Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)	1	1	1	Sol sec	1
		C 0-50 (%)	2	1	2	Sol sec	1
		C 50-200 (%)	2	1	2	Sol sec	1
		C 200-2000 (%)	2	1	2	Sol sec	1
		C 50-2000 (%)	2	1	2	Sol sec	1
	C oxydé (mg/kg)	1	1	1	Sol sec	1	
	Azote	N total (%)	1	1	1	Sol sec	1
		N 0-50 (%)	2	1	2	Sol sec	1
		N 50-200 (%)	2	1	2	Sol sec	1
N 50-2000 (%)		2	1	2	Sol sec	1	
Indicateurs microbiologiques	Abondances	Biomasse microbienne (mg/kg)	3	2	3	Sol brut	2
		18S (copies/g)	2	1	3	Sol brut	3
	Activités	Protéase (nmol/min/g)	2	1	2	Sol brut	3
		LAP (nmol/min/g)	2	1	2	Sol brut	3
		Arylamidase (nmol/min/g)	1	1	2	Sol brut	3
		ABM (mg/kg)	1	1	2	Sol brut	2 à 3
		Glucosidase (nmol/min/g)	1	1	2	Sol brut	3

Notation de coût et faisabilité technique :



5. Construction & évaluation du référentiel d'interprétation Microbioterre

5.1. Qu'est-ce qu'un référentiel et pourquoi a-t-on besoin d'un référentiel ?

Un référentiel est un ensemble de valeurs mesurées pour une variable (indicateur) pouvant déterminer la gamme de variation de cet indicateur dans divers contextes agronomiques et pédoclimatiques. La mise au point de référentiels permet d'interpréter le niveau d'un indicateur mesuré sur une nouvelle parcelle en remplaçant la valeur dans les référentiels disponibles.

5.2. Construction du référentiel à partir des données des essais agronomiques prélevés en 2018

5.2.1. Référentiel global

5.2.1.1. Données prises en compte

Dans la base de données Microbioterre 2017-2018, 183 observations correspondantes à des prélèvements sur 0-20 cm de profondeur, 15 observations correspondent à des prélèvements sur 0-15 cm de profondeur et 18 observations correspondent à des prélèvements sur 0-10 cm. Il a été montré que les indicateurs varient significativement selon la profondeur de prélèvement (résultats du projet). Pour cette raison, il a été choisi de construire un référentiel par profondeur de prélèvement. Le nombre d'observations sur 0-10 et 10-15 cm étant respectivement faibles, le référentiel le plus complet correspond à la profondeur 0-20 cm. C'est le référentiel sur cette profondeur qui constitue un livrable du projet. Il prend en compte toutes les répétitions intra-modalités agronomiques (données non moyennées).

Le référentiel global comprend 183 observations, tous pédoclimats et pratiques culturales confondus.

5.2.1.2. Structure du référentiel

Le référentiel comprend les données correspondant à 61 indicateurs (mesurés et calculés) et indique pour chacun de ces indicateurs :

- o La valeur minimale
- o La valeur maximale
- o La valeur médiane
- o La valeur moyenne
- o L'écart-type
- o La variance
- o Le coefficient de variation (CV)
- o Les quantiles (q20, q25, q40, q60, q75, q80)

5.2.1.3. Interprétation du référentiel (2 niveaux d'interprétation)

Le référentiel global peut permettre 2 niveaux d'interprétation. Pour illustrer ces niveaux d'interprétation, l'exemple de l'indicateur microbiologique carbone microbien mesuré par fumigation-extraction a été choisi (Figure 21).

Le premier niveau d'interprétation consiste à déterminer si la valeur de carbone microbien mesurée sur une parcelle à diagnostiquer est comprise ou non dans le référentiel global.

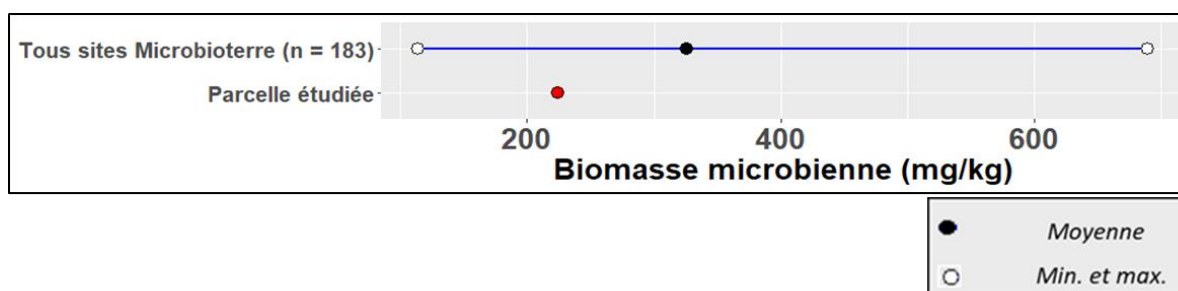


Figure 21 : Illustration d'une valeur de biomasse microbienne d'une parcelle à diagnostiquer (point rouge) replacée dans le référentiel global (segment bleu)

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 adaptée. 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 22).

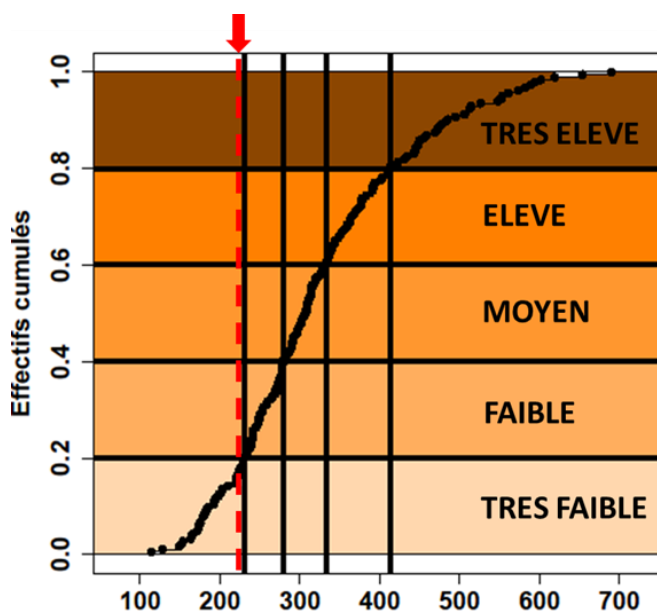


Figure 22 : Illustration d'une valeur de biomasse microbienne d'une parcelle à diagnostiquer (flèche rouge) replacée dans le référentiel global. La biomasse microbienne mesurée a une valeur très faible.

5.2.1.4. Domaines de validité du référentiel

Les domaines de validité du référentiel global vis-à-vis des teneurs en MO, en calcaire et du pH eau du sol correspond aux gammes de variations de ces variables mesurées dans le référentiel.

La gamme de variation de la teneur en MO des sols analysés s'étend de 1,26% (site de Jeu-les-Bois) à 5,15% (site de Kerguehenec) (Figure 23).

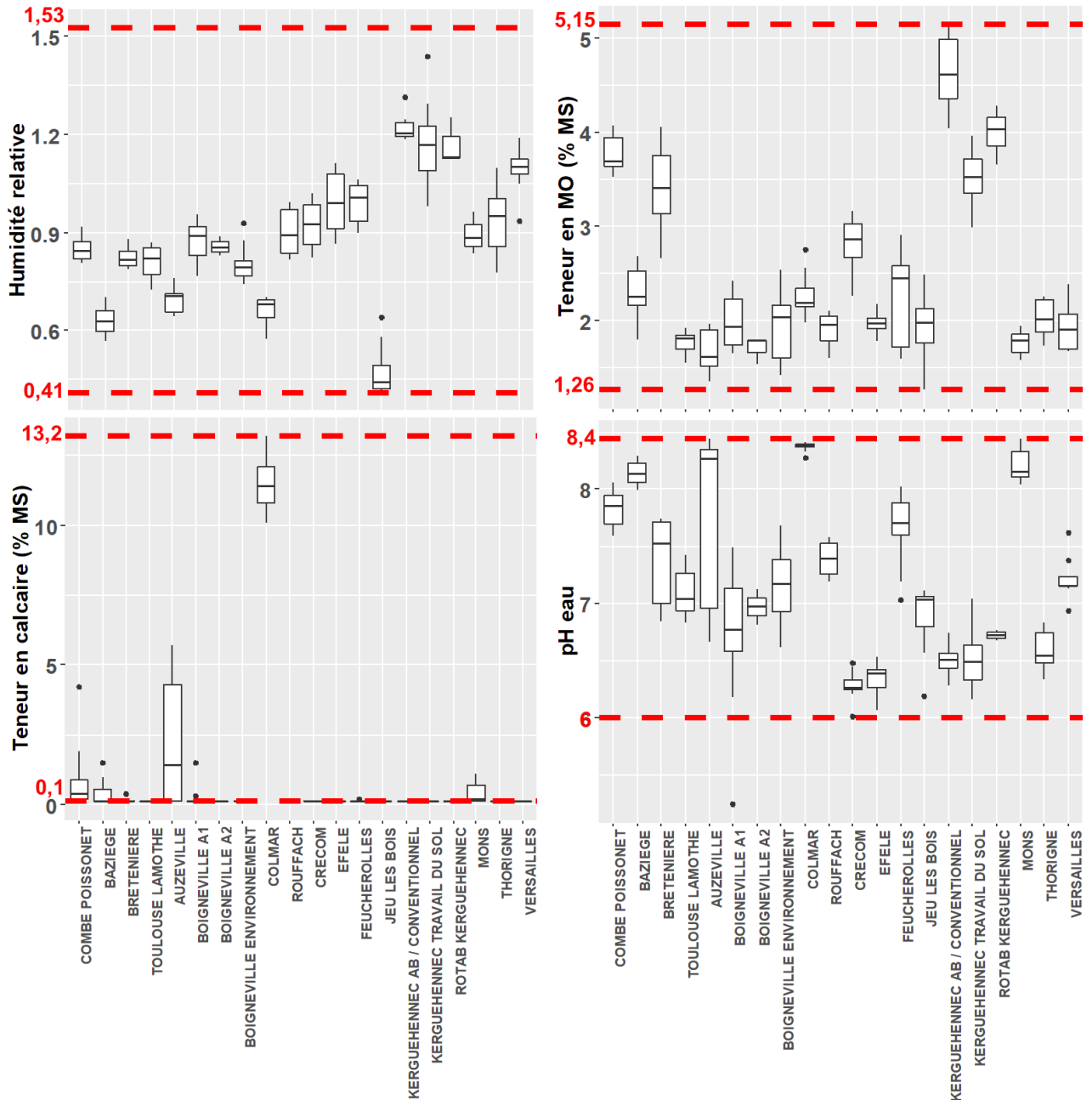


Figure 23 : Boxplots de la teneur en MO des sols (en % MS). Les pointillés horizontaux (valeurs minimale et maximale respectivement) permettent de délimiter le domaine de validité du référentiel Microbioterre vis-à-vis de la teneur en MO du sol

Concernant la teneur en calcaire des sols prélevés, cette teneur est comprise entre 0,1% et 13,2% (site de Colmar). En se basant sur la base sol Arvalis, seul le site de Colmar peut être considéré comme calcaire (taux de calcaire > 5%). Le référentiel est donc peu robuste pour les sols calcaires avec seulement 10 observations correspondant à un taux de calcaire supérieur à 5%.

Le pH eau des sols analysés sont compris entre 5,2 (site de Boigneville) et 8,4 (site de Mons). La valeur de 5,2 pouvant être considérée comme un artéfact puisque non cohérente avec les valeurs des 2 autres blocs, le référentiel correspond à des sols avec des pH eau égaux ou supérieurs à 6 (valeur minimale mesurée sur le site Crecom). Ce référentiel est donc peu robuste pour des sols avec un pH acide.

L'humidité relative du sol au moment du prélèvement varie entre 0,41 et 1,53 (Figure 23).

Selon le triangle GEPPA, trois groupes de classes de textures sont retrouvés dans la base de données Microbioterre : très fine, fine et moyenne (Figure 24 - A). Cette classification a été retravaillée en subdivisant le groupe de texture « moyenne » en deux sous-groupes : textures « moyenne fine » et « moyenne grossière » (Figure 24 - B).

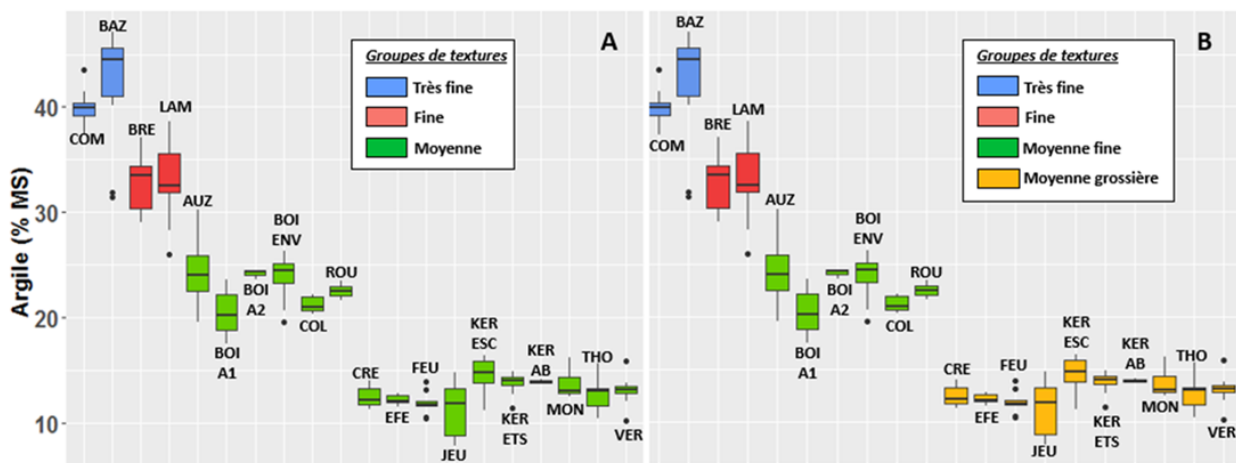


Figure 24 : Groupes de classes de texture des sites prélevés.

Concernant les textures du sol représentées dans le référentiel, la majorité des observations a été faite en sol de texture moyenne. Le référentiel Microbioterre reste à consolider pour des sols de textures fines et grossières (figure25).

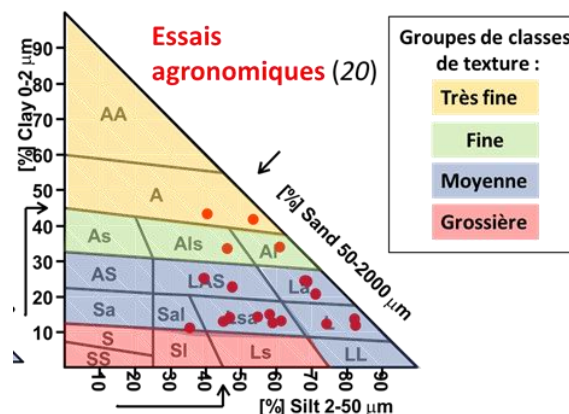


Figure 25 : Groupes de classes de texture des essais agronomiques pris en compte dans le référentiel Microbioterre. Chaque point représenté sur le triangle des textures GEPPA correspond à un essai prélevé

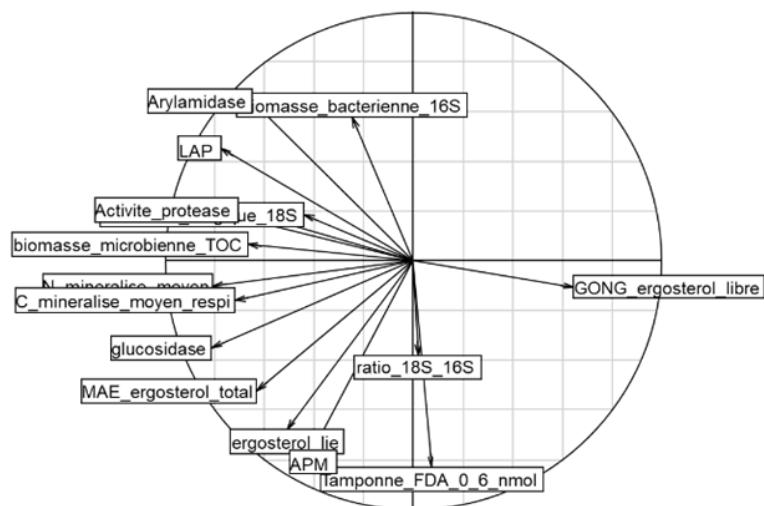
5.2.2. Sous-référentiels

5.2.2.1. Choix des facteurs d'entrée de 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 des sous-référentiels ont été déterminés ; l'objectif étant de choisir comme facteurs d'entrée les facteurs prédominants dans l'explication de la variabilité globale des indicateurs. Le choix de ces facteurs d'entrée 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. L'ACP prenant en compte les variables microbiologiques des sites PRO (Figure 26) permet d'observer une discrimination des sols selon le site de prélèvement. Ce facteur « site » permet d'expliquer un pourcentage significatif de la variabilité des axes 1 et 2 respectivement. Le facteur « pratique culturale » (apport de PRO vs. sans apport de PRO) permet d'expliquer un pourcentage significatif de la variabilité des observations uniquement sur l'axe 1. Selon l'axe 1, le facteur « sites » est prédominant dans l'explication de la variabilité totale. La prédominance du facteur « site » ayant été observé sur les sites étudiant chacune des pratiques culturales, le facteur pédoclimat a été retenu comme facteur d'entrée des sous-référentiels.

Parmi les facteurs pédoclimatiques, un choix a été fait entre le facteur texture du sol (4 groupes de classes de textures selon le triangle des textures GEPPA) et le facteur zone climatique. Etant donné le trop faible nombre d'observations de la BDD pour permettre une classification selon le climat, il a été choisi d'étudier l'effet texture. Un effet texture a été démontré notamment sur l'ACP prenant en compte les variables microbiologiques des sites PRO (Figure 26). Ce facteur « texture du sol » a été retenu comme clé d'entrée des sous-référentiels.



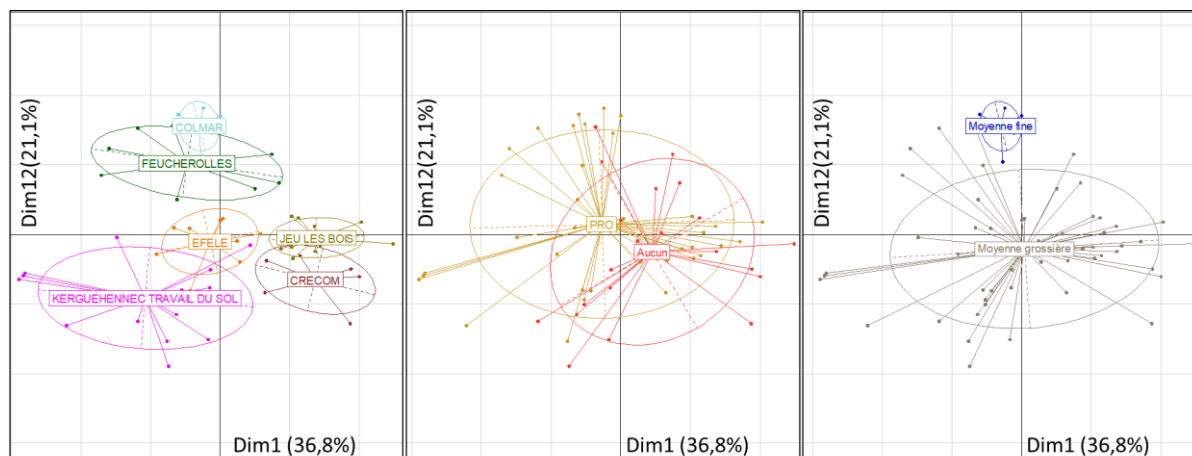


Figure 26 : Analyses en composantes principales (ACP) pour les sites PRO sur les variables microbiologiques mesurées.

Les facteurs « site » et « pratique » (apport de PRO vs. sans apport de PRO) expliquent respectivement 60,7% et 6,6% de la variabilité l’axe 1 de l’ACP. Le modèle avec la texture du sol n’est pas significatif. Les facteurs « site » et « texture » expliquent respectivement 83,8% et 37,4% de la variabilité l’axe 2 de l’ACP. Le modèle avec la pratique n’est pas significatif.

5.2.3. Construction des sous-référentiels

Quatre sous-référentiels ont été construits (un par groupe de classe de texture). Les effectifs de chaque sous-référentiels étant trop restreints, il n’est pas pertinent de déterminer les classes de niveaux de chaque indicateur dans chaque sous-référentiel. Du fait du faible nombre d’observations, ces sous-référentiels restent à compléter pour une utilisation plus robuste et plus pertinente dans le conseil agronomique (Figure 27).

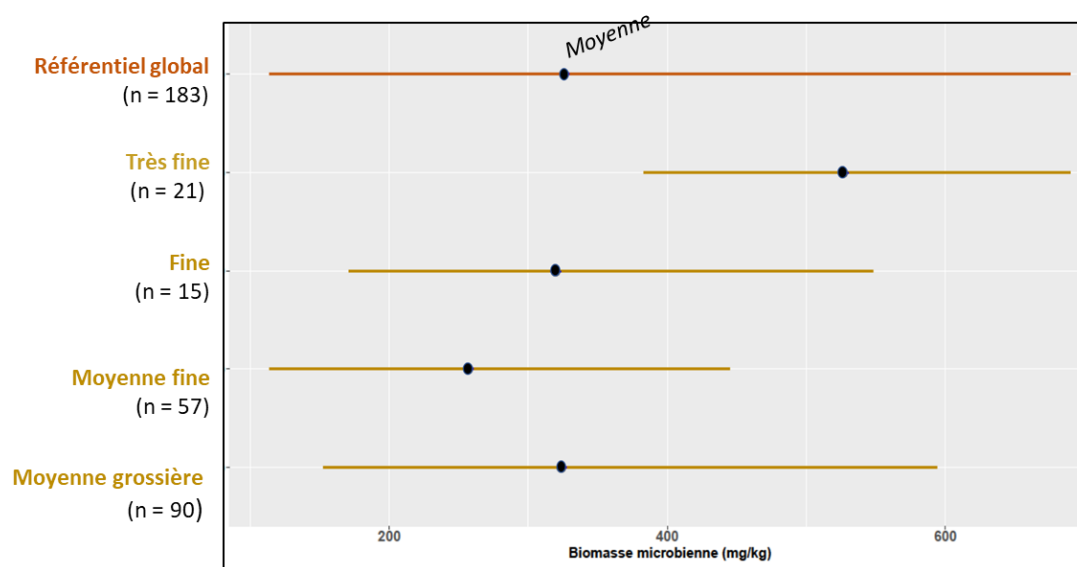


Figure 27 : Représentation du référentiel global et des sous-référentiels pour l’indicateur microbiologique carbone de la biomasse microbienne

5.3. Référentiel complété avec les données de parcelles agriculteurs prélevées en 2021

26 parcelles agriculteurs ont été sélectionnées afin de déployer le menu Microbioterre au printemps 2021. Ce déploiement a aussi permis de déterminer si les valeurs d'indicateurs mesurées en parcelles agricoles sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en essais agronomiques.

5.3.1. Choix des parcelles agriculteurs sélectionnées

Les parcelles complémentaires ont été choisies en retenant les critères suivants :

- Parcelles conduites par des agriculteurs
- Parcelles voisines avec des pratiques discriminantes (travail du sol, apport de PRO, systèmes)
- Minimum 5 ans de différenciation entre les modalités
- Contextes pédoclimatiques variés
- Priorité aux parcelles avec couverts d'intercultures afin de mieux référencer cette pratique

5.3.2. Description des parcelles agriculteurs étudiées

Parmi les 26 parcelles échantillonnées, 10 correspondaient à des pratiques agricoles conventionnelles et 16 à des pratiques innovantes ou biologiques (Figure 28).



Figure 28 : Localisations des 26 parcelles agricoles échantillonnées en 2021

5.3.3. Positionnement des valeurs des parcelles agriculteurs dans le référentiel essais agronomiques

A l'issue des résultats obtenus des parcelles agriculteurs, la valeur de chaque variable a été rajoutée dans le référentiel global. La Figure 29 (en bas), montre bien que pour l'Arylamidase (par exemple), le nouveau référentiel diffère très peu du référentiel global.

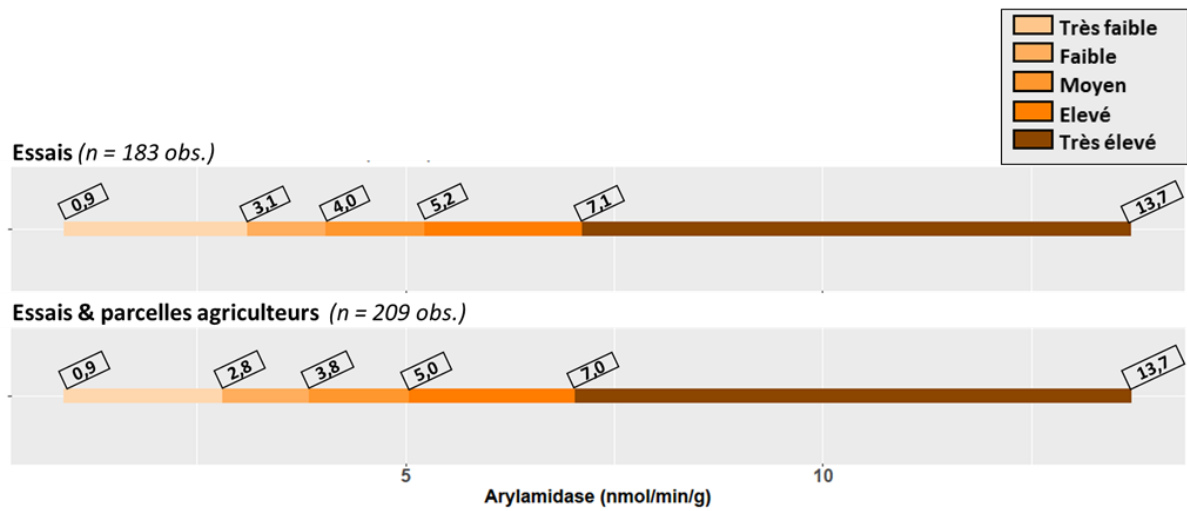


Figure 29 : Représentation des référentiels globaux des essais agronomiques uniquement (183 observations) (en haut) et des essais agronomiques et parcelles agricoles (en bas). Les valeurs encadrées correspondent à la valeur minimale, aux quantiles (20, 40, 60, 80) et à la valeur maximale du référentiel pour l'indicateur d'activité enzymatique arylamidase (cycle N)

6. Diagnostic et conseil agronomique : cas d'étude

1. Présentation de la parcelle : *Essai travail du sol Kerguehennec - Modalité TCS fumier volaille (figure 30)*

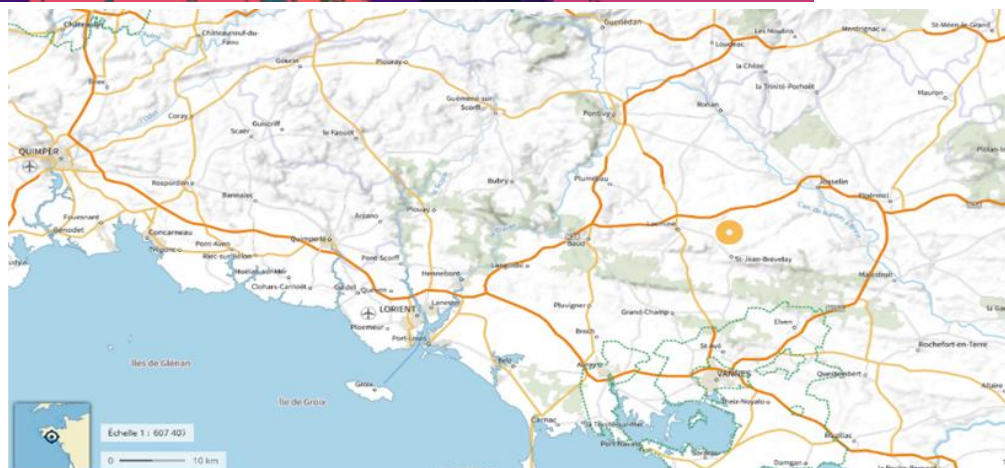
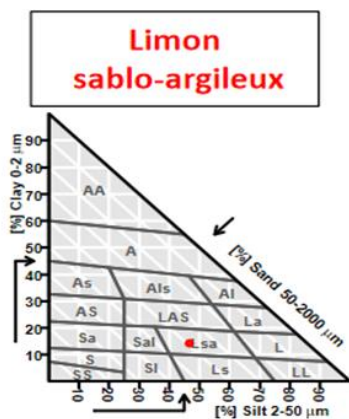
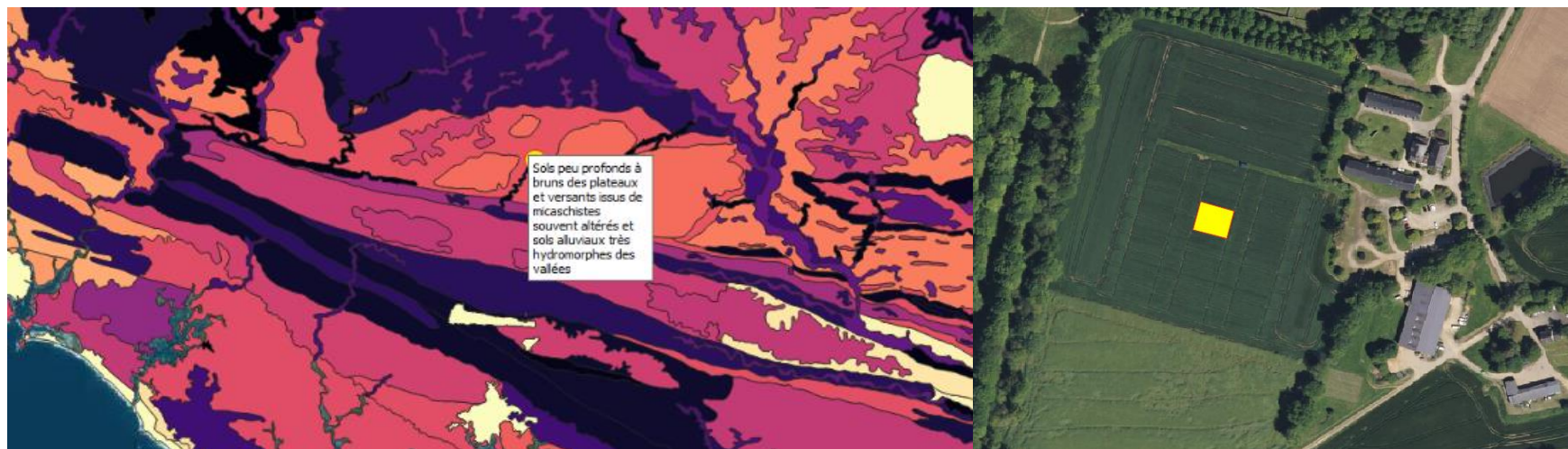


Figure 30 : Localisation et caractéristiques de la parcelle

2. Fiche de renseignement ITK et objectifs exploitant

	Année récolte	n-3	n-2	n-1	n	Objectifs exploitant
	culture	maïs grain	blé tendre hiver	colza hiver	blé tendre hiver	Maintien de la rotation, rendements moyens sur colza (semis plus précoce à prévoir)
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus	Déchaumage	déchaumage	déchaumage	déchaumage	Maintien en non labour. Limitation du nb de passages de travail du sol.
	Profondeur travail le plus	12	10	10	10	
	Type d'outil	Canadien	Canadien	Canadien	Canadien	
	Nb de passages de travail du sol entre récolte précédent et	3	2	2	2	
Travail du sol après semis	Type	aucun	aucun	aucun	aucun	Introduction du désherbage mécanique sur maïs ?
	Nombre de passages					
Culture principale	Type d'organe récolté	Grain	Grain	Grain	Grain	Exportation/valorisation extérieure des pailles ?
	Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes	12.33	7.53	2.42	8.91	
	Devenir des résidus	cannes broyées	paille broyée	paille broyée	paille broyée	
CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses	Composition	Phacélie	non concerné	repousses de céréales	repousses de colza	Tester l'introduction de couverts courts (sarrasin entre blé et colza) Augmenter la biomasse du couvert entre blé et maïs en semant plus tôt. Viser un semis plus précoce de couvert après céréales.
	Estimation de la biomasse	Moyenne (2Tms/ha)		Faible (1Tms/ha)	Faible (1.5Tms/ha)	
	Date de levée	1/9		5/8	5/8	
	Date destruction	1/3		4/9	01/10	
	Mode de destruction	Chimique		chimique	chimique	
	Devenir de la biomasse	restituée		restituée	restituée	
	Mode incorporation dans le sol	canadien		canadien	canadien	
Couvert associé à la culture	Couvert ou culture	Aucun	aucun	aucun	aucun	
	Type de PRO	fumier volaille	fumier volaille	fumier volaille	fumier	Manque de disponibilité du fumier de volaille à moyen terme. Echange paille/fumier à renégocier.
Produits résiduels organiques (PRO) : produit 1	Quantité apportée (t/ha de matière brute MB)	9	9	6	8.5	
	% M.S.	52.2	50.6	44.4	79.7	
	C total ‰ de MB	336	392	140	305	
	N total ‰ de MB	23.9	21.5	21	22.8	
	C/N	14	18.2	6.6	13.3	
	mois d'épandage de PRO	avril	mars	septembre	Mars	
Amendement	Type	pas d'amendement				pH entretenu par les apports de fumier de volaille
Fertilisation minérale	N (kg/a)	0	60	90	70	Ajuster les apports minéraux après analyse du lot de fumier de volaille épandu et/ou vérifier les niveaux de rendements sur zone témoin sans apport
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	0	0	0	
	K ₂ O (kg/ha)	0	0	0	0	

3. Test bêche – Mars 2018 dans le colza

- Classe 1 sur 1 seul horizon entre 0 et 22 cm.
- Forte proportion de terre fine et de mottes Γ témoin d'une structure aérée, peu tassée. Elle est favorable l'exploration par les racines du colza.

Horizon 1 test bêche					
Profondeur sup	Profondeur inf	% terre fine + mottes Γ	% de mottes Δb	% de mottes Δ	Classe
0	22	80	10	10	1
0	22	85	10	5	1
0	22	85	10	5	1



4. Simulation d'évolution carbone à 30 ans : modélisation AMG

Essais système étudiés	Carbone humifié PRO	Carbone humifié COUVERT	Carbone humifié RESIDUS	Carbone MINERALISE TOTAL	Evolution tx MO 30 ans
TCS fumier volaille	51		4	87	↑ 0.8

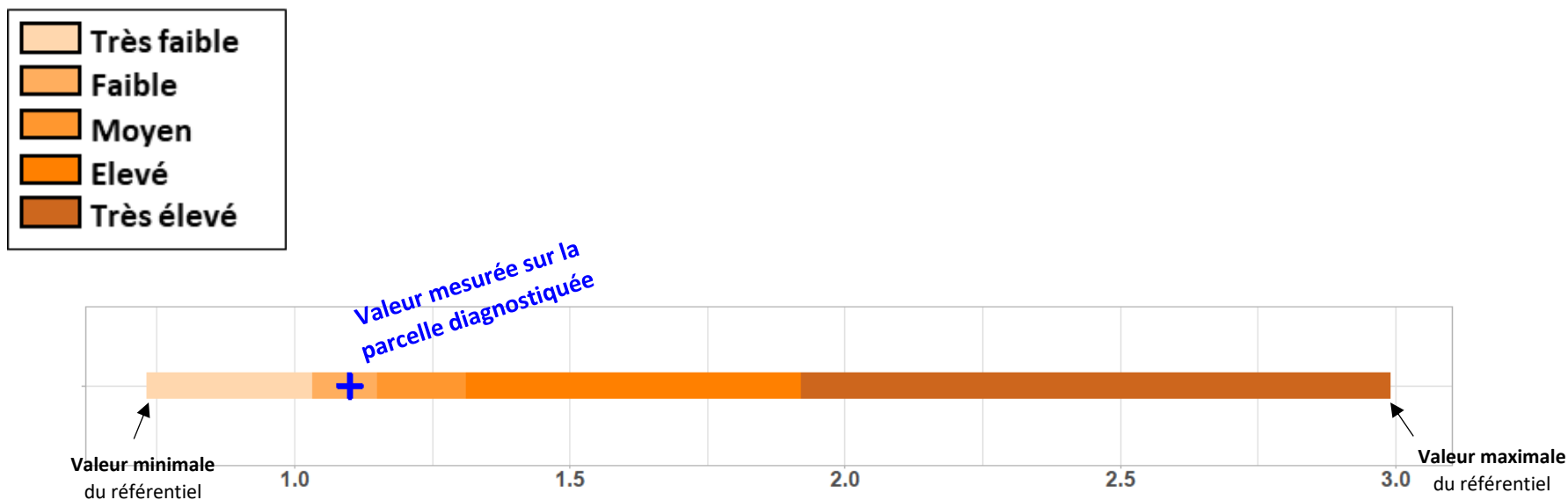
- L'apport de fumier de volaille sur chaque culture,
 - La restitution systématique des résidus de culture,
 - Les rendements corrects de la parcelle (productions racinaires),
- sont les 3 leviers à l'origine d'un stockage additionnel de carbone.

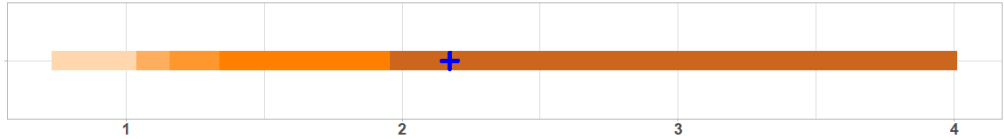
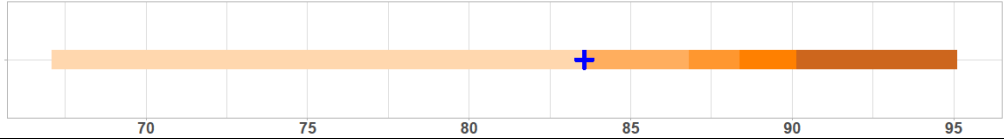
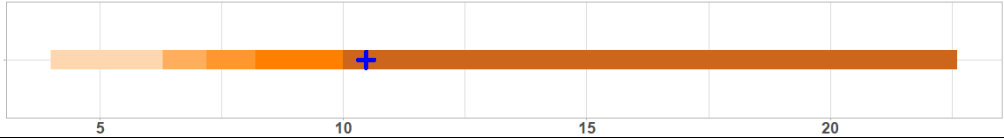
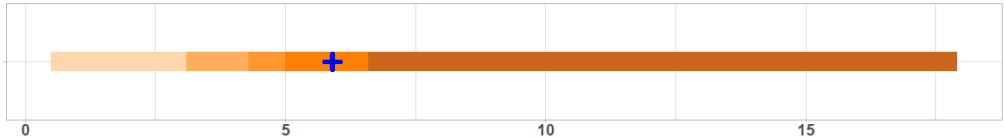
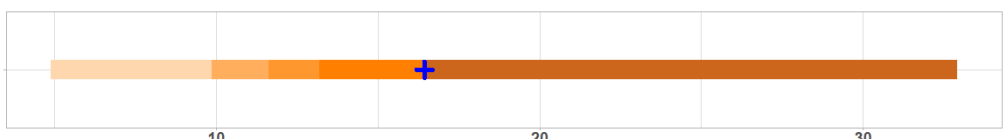
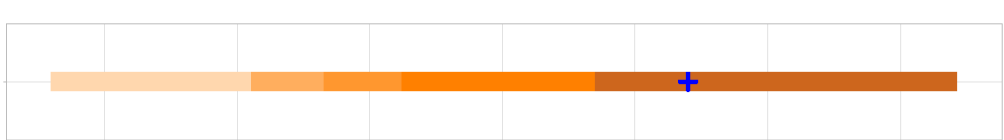
5. Indicateurs mesurés : Valeurs & niveaux des indicateurs dans le référentiel

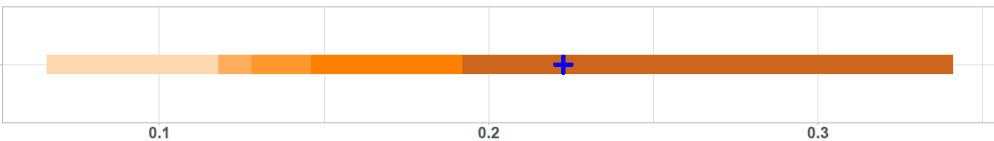
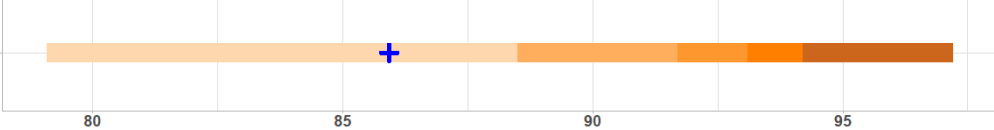
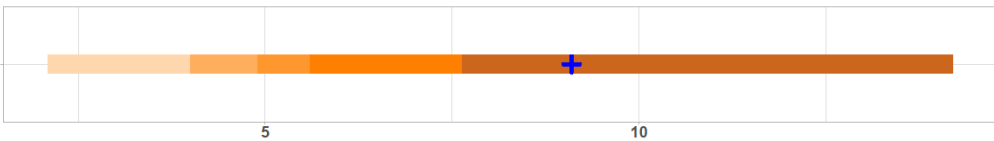
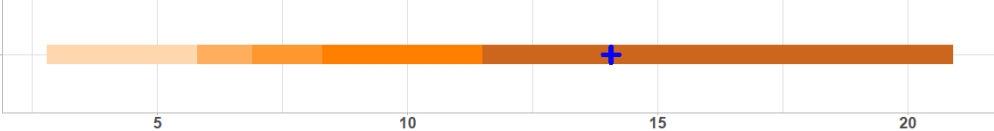
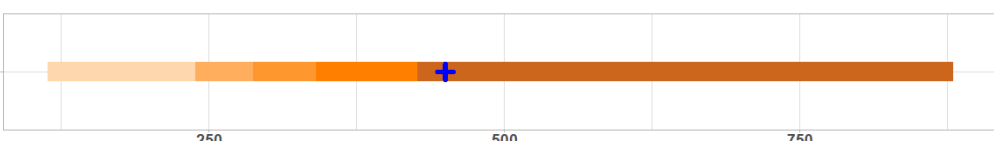
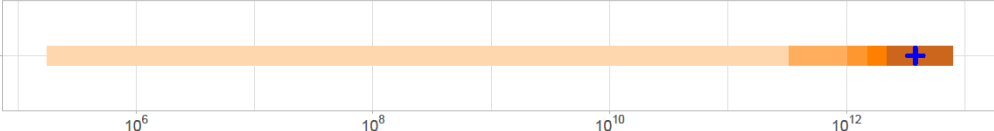
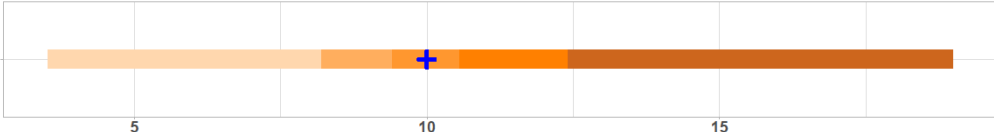
La valeur de chaque indicateur a été replacée dans le référentiel Microbioterre (acquis en 2017-2018 dans des essais agronomiques ; n=183 observations).

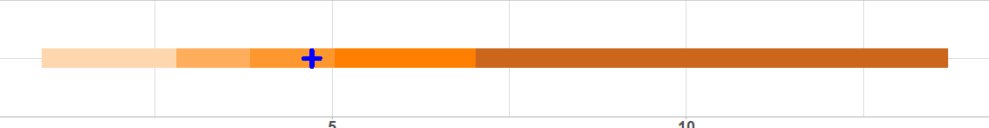
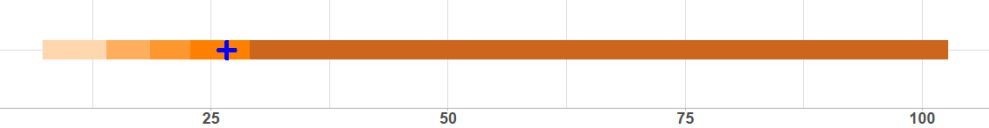
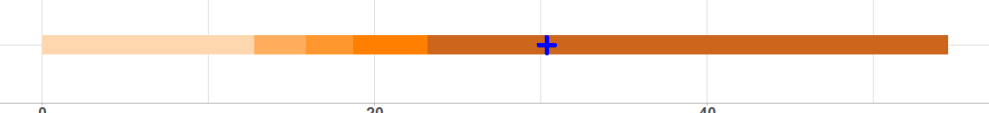
Le niveau de l'indicateur correspondant à cette valeur (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé) a été ensuite déterminé.

Exemple de représentation des résultats :



Indicateur mesuré	Référentiel (Essais agronomiques & parcelles agriculteurs) <i>n = 209 observations</i>	Valeur	Niveau	Information apportée par l'indicateur & Commentaires
C org (%)		2,17	Très élevé	Carbone présent dans la matière organique du sol Teneur très élevée
C 0-50 µm (%)		83,57	Faible	Carbone présent dans les matières organiques liées du sol Teneur faible
C 50-200 µm (%)		10,47	Très élevé	Carbone présent dans les matières organiques libres du sol Teneur très élevée
C 200-2000 µm (%)		5,90	Elevé	Carbone présent dans les matières organiques libres du sol Teneur élevée
C 50-2000 µm (%)		16,43	Elevé	Carbone présent dans les matières organiques libres du sol Teneur élevée
Carbone oxydable (mg/kg)		1110,00	Très élevé	Carbone disponible, assimilable pour les microorganismes du sol Teneur très élevée

<p>Azote total (%)</p>		<p>0,22</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Somme de l'azote organique et azote minéral Teneur très élevée</p>
<p>N 0-50 µm (%)</p>		<p>85,93</p>	<p>Très faible</p>	<p>Azote présent dans les matières organiques liées du sol Teneur très faible</p>
<p>N 50-200 µm (%)</p>		<p>9,10</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Azote présent dans les matières organiques libres du sol Teneur très élevée</p>
<p>N 50-2000 µm (%)</p>		<p>14,07</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Azote présent dans les matières organiques libres du sol Teneur très élevée</p>
<p>C microbien (mg/kg)</p>		<p>449,90</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Quantité des microorganismes totaux dans le sol Quantité très élevée</p>
<p>18S (copies/g)</p>		<p>3,83E+12</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Quantité de champignons dans le sol Quantité très élevée</p>
<p>LAP (nmol/min/g)</p>		<p>10,00</p>	<p>Moyen</p>	<p>Activité impliquée dans la minéralisation de l'azote Activité à un niveau moyen</p>

<p>ARYLN (nmol/min/g)</p>		<p>4,71</p>	<p>Moyen</p>	<p>Activité impliquée dans la minéralisation de l'azote Activité à un niveau moyen</p>
<p>Azote minéralisable (mg/kg)</p>		<p>26,67</p>	<p>Elevé</p>	<p>Quantité d'azote potentiellement minéralisable Quantité élevée</p>
<p>B-Glu (nmol/min/g)</p>		<p>30,33</p>	<p>Très élevé</p>	<p>Activité impliquée dans la minéralisation du carbone Activité à un niveau très élevé</p>

6. Relations entre les indicateurs mesurés et les fonctions du sol

Indicateurs	Valeurs indicateurs	Niveaux indicateurs Référentiel (n = 209 obs.)	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	Rétention en eau
C org (%)	2.2	Très élevé	+	+		+			+	+	+	+	+	+	+	+	
C 0-50 µm (%)	83.6	Faible								+							
C 50-200 µm (%)	10.5	Très élevé							+			+					
C 200-2000 µm (%)	5.9	Elevé						+		+							
C KMnO4 (mg/kg)	1110.0	Très élevé				+			+			+		+	+	+	
N total (%)	0.22	Très élevé	+	+	-												
N 0-50 µm (%)	85.9	Très faible															
N 50-200 µm (%)	9.1	Très élevé	+	+													
C microbien (mg/kg)	449.9	Très élevé							+			+					
18S (copies/g)	3.8E+12	Très élevé										+					
Protéase (nmol/min/g)	10.6	Très élevé	+	+													
LAP (nmol/min/g)	10.0	Moyen	+														
ARYLN (nmol/min/g)	4.7	Moyen	+	-					+			+					
ABM (mg/kg)	26.7	Elevé	+				+					+					
B-Glu (nmol/min/g)	30.3	Très élevé	+	+					+				+				

7. Leviers agronomiques possibles

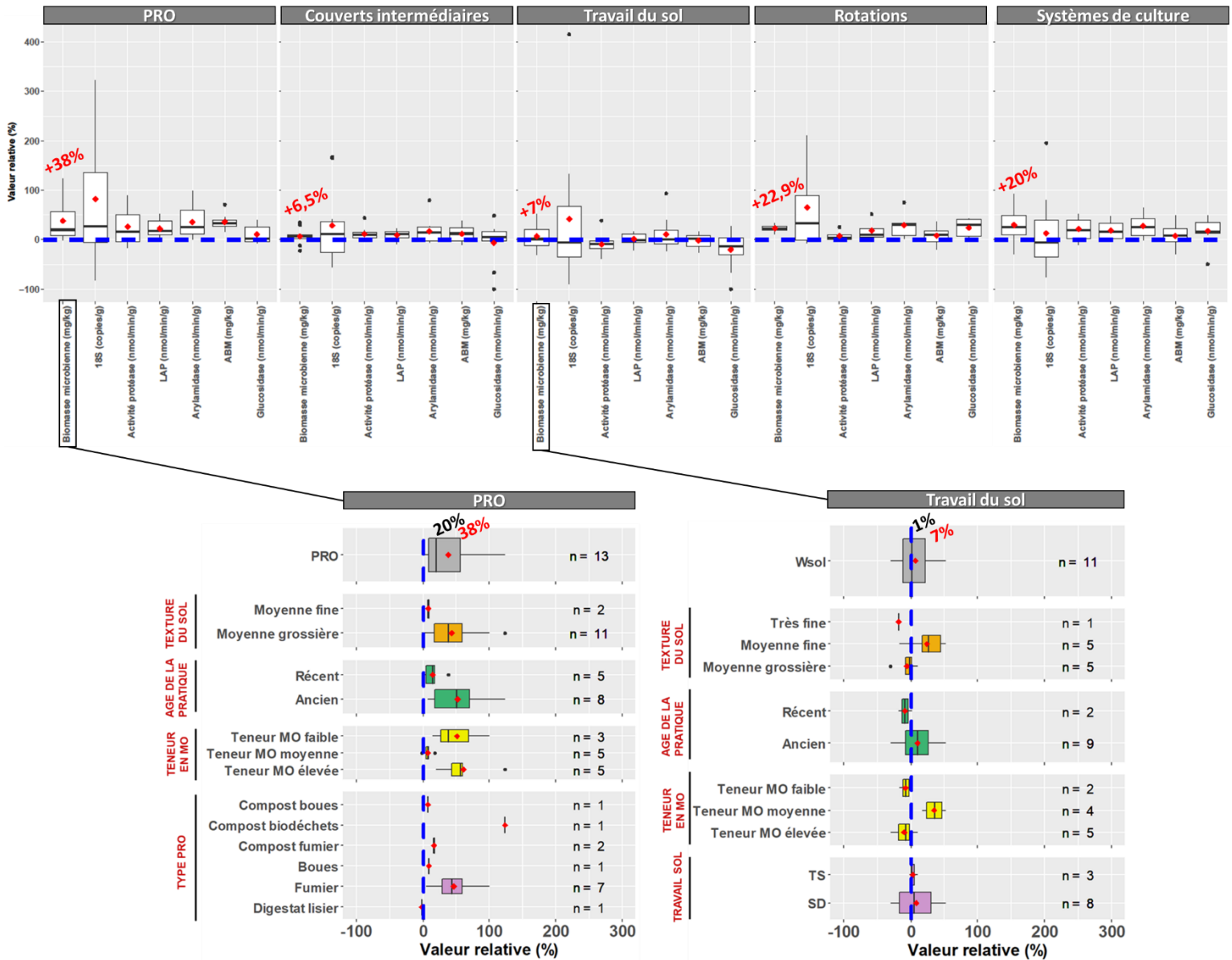


Figure 31 : A – Valeurs relatives de chacun des 7 indicateurs microbiologiques retenus dans le menu Microbioterre. B – Détail de l'effet de 2 pratiques culturales (apport de PRO et travail du sol) sur l'indicateur carbone de la biomasse microbienne sur différents facteurs (texture du sol, âge de la pratique, teneur en MO du sol et types de PRO ou travail du sol). Les valeurs noire et rouge représentent respectivement les valeurs médiane et moyenne.

Suite au diagnostic et en vue de proposer des leviers agronomiques permettant d'optimiser les indicateurs mesurés, la valeur relative entre la modalité « pratique » et la modalité « référence » de chaque pratique a été étudiée pour chaque indicateur du menu Microbioterre (Figure 30 – A). Par exemple, un apport de PRO entraîne en moyenne une augmentation de 38% de l'indicateur carbone de la biomasse microbienne ; la réduction du travail du sol entraîne une hausse de 7% de ce même indicateur. Ces résultats permettent de montrer que le levier apport de PRO est plus impactant sur la biomasse microbienne que le type de travail du sol dans les essais étudiés.

L'ensemble des valeurs relatives pour un indicateur donné permet de hiérarchiser l'effet des pratiques sur cet indicateur. Par exemple, pour la biomasse microbienne : PRO > Rotations > Systèmes > Travail sol > Couverts intermédiaires (Figure 30 – A)

En plus de ces valeurs relatives globales, l'effet de chaque pratique sur chaque indicateur a été étudié par classes de facteurs liés au pédoclimat et à la pratique culturale (classes de texture du sol, d'âge de la pratique, de teneur en MO du sol et types de PRO ou travail du sol) (Figure 30 – B). Le faible nombre d'observations dans chaque cas étant très faible, la proposition de leviers agronomiques ne peut pas pour le moment être proposé selon la texture du sol par exemple.

Tables des illustrations

Figure 1 : Schéma des démarches méthodologiques prévues.....	6
Figure 2 : Carte des sites expérimentaux échantillonnés, partenaires contributeurs et pratiques culturelles étudiées	7
Figure 3 : Schéma représentatif des 3 types de dispositifs expérimentaux étudiés.....	8
Figure 4 : Triangle des textures GEPPA pour la détermination des groupes de classes de texture (très fine, fines, moyennes et grossières).....	9
Figure 5 : Schéma récapitulatif des aptitudes des indicateurs à renseigner les niveaux des fonctions du C & N.....	13
Figure 6 : Résultats des modélisations AMG (sur 30 ans et 30 cm). La variation de stock de C est exprimée en t C/ha (A) ou en % (B).....	14
Figure 7 : Mots-clés utilisés, en lien avec les pratiques culturelles, pour les recherches bibliographiques.....	16
Figure 8 : Nombres d'articles étudiés par pratique culturelle	16
Figure 9 : Cartographie des essais étudiés dans les articles retenus	17
Figure 10 : Zones climatiques de la classification de Köppen-Geiger ²	18
Figure 11 : Triangle des textures GEPPA	18
Figure 12 : Boxplot montrant la distribution des valeurs de C org (%) (tous sites et toutes pratiques confondues).....	19
Figure 13 : Méthode de classification de pratiques (exemple pour la pratique couverts intermédiaires à gauche et gestion des résidus à droite).....	19
Figure 14 : Effet de l'apport de PRO et de l'implantation de couverts intermédiaires sur l'indicateur carbone de la biomasse microbienne.	20
Figure 15 : Coefficients de corrélation entre les différents indicateurs physico-chimiques (méthode Pearson).....	21
Figure 16 : Coefficients de corrélation entre les différents indicateurs physico-chimiques (méthode Pearson).....	22
Figure 17 : Coefficients de variation des résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées	23
Figure 18 : Coefficients de variation des résultats des différentes analyses microbiologiques réalisées	23
Figure 19 : Démarche suivie pour l'étude de l'aptitude discriminante des indicateurs vis-à-vis des pratiques culturelles.....	24
Figure 20 : Nombres d'essais et de comparaisons pris en compte dans la méthode du scoring pour l'étude de l'aptitude discriminante des variables vis-à-vis des pratiques culturelles.....	25
Figure 21 : Illustration d'une valeur de biomasse microbienne d'une parcelle à diagnostiquer (point rouge) replacée dans le référentiel global (segment bleu).....	32
Figure 22 : 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.	32
Figure 23 : Boxplots de la teneur en MO des sols (en % MS). Les pointillés horizontaux (valeurs minimale et maximale respectivement) permettent de délimiter le domaine de validité du référentiel Microbioterre vis-à-vis de la teneur en MO du sol	33
Figure 24 : Groupes de classes de texture des sites prélevés.	34
Figure 25 : Groupes de classes de texture des essais agronomiques pris en compte dans le référentiel Microbioterre. Chaque point représenté sur le triangle des textures GEPPA correspond à un essai prélevé.....	34

Figure 26 : Analyses en composantes principales (ACP) pour les sites PRO sur les variables microbiologiques mesurées.	36
Figure 27 : Représentation du référentiel global et des sous-référentiels pour l'indicateur microbiologique carbone de la biomasse microbienne	36
Figure 28 : Localisations des 26 parcelles agricoles échantillonnées en 2021.....	37
Figure 29 : Représentation des référentiels globaux des essais agronomiques uniquement (183 observations) (en haut) et des essais agronomiques et parcelles agricoles (en bas). Les valeurs encadrées correspondent à la valeur minimale, aux quantiles (20 ,40 ,60, 80) et à la valeur maximale du référentiel pour l'indicateur d'activité enzymatique arylamidase (cycle N).....	38
Figure 30 : Localisation et caractéristiques de la parcelle	39
Figure 31 : A – Valeurs relatives de chacun des 7 indicateurs microbiologiques retenu dans le menu Microbioterre. B – Détail de l'effet de 2 pratiques culturales (apport de PRO et travail du sol) sur l'indicateur carbone de la biomasse microbienne sur différents facteurs (texture du sol, âge de la pratique, teneur en MO du sol et types de PRO ou travail du sol). Les valeurs noire et rouge représentent respectivement les valeurs médiane et moyenne.	48
Tableau 1 : Organisation du projet Microbioterre	5
Tableau 2 : Pratiques culturales étudiées dans chaque essai et son dispositif expérimental (3 blocs, 2 blocs ou en bandes).....	8
Tableau 3 : indicateurs physico-chimiques mesurés et méthodes de mesure/calcul	10
Tableau 4 : indicateurs microbiologiques et méthodes de mesure/calcul	10
Tableau 5 : Fonctions et processus étudiés dans le projet Microbioterre.....	12
Tableau 6 : Variables physico-chimiques et microbiologiques prises en compte dans la méta-analyse	15
Tableau 7 : Influence de l'âge des essais et des quantités de C apportées par les PRO sur les variables mesurées	25
Tableau 8 : Influence du travail du sol apportés sur les variables mesurées.....	26
Tableau 9 : Influence de l'âge des essais et des couverts d'interculture sur les variables mesurées... ..	28
Tableau 10 : Influence de l'âge des essais et du système de culture sur les variables mesurées	28
Tableau 11 : Influence de la durée de rotation sur les variables mesurées.....	29
Tableau 12 : Aptitude des indicateurs à discriminer les pratiques agricoles évaluées.....	30
Tableau 13 : Résultats de l'évaluation des coûts, technicité et faisabilité technique des indicateurs mesurés	30