

Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs



Juillet 2022

Partenaires techniques financés



Partenaires techniques non financés



Avec le soutien



Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Contexte

Ce guide est le produit du projet CASDAR MICROBIOTERRE. Il est à destination des techniciens, agriculteurs et laboratoires d'analyse de terre. Il a pour objectifs de :

- Connaître le cadre nécessaire au diagnostic (questionnement agriculteur sur ses objectifs et problématiques pour adapter le conseil)
- Interpréter les résultats : commenter et proposer des pratiques pour répondre aux objectifs de l'agriculteur
- Maîtriser le prélèvement, le stockage et l'envoi des échantillons de terre
- Faire connaître les autres sources d'informations (liens internet, brochure, ...)

Différents organismes ont participé au projet :

- Partenaires techniques financés : ARVALIS, AUREA, Chambre d'agriculture de Bretagne, INRAE, ITAB, TerresInovia et UniLaSalle.
- Partenaires techniques non financés : Chambre d'agriculture d'Alsace, du Grand Est et de Saône et Loire.
- Laboratoires prestataires : Celesta-lab, RITTMO, SEMSE, Université de Lorraine

Ce projet bénéficie du soutien des RMT BOUCLAGE et Sols et Territoires.

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rurale CASDAR.

Table des matières

Table des matières	3
1. Démarche de diagnostic.....	5
1.1. Intérêt du diagnostic microbiologique	5
1.2. Cycle des matières organiques	6
1.3. Positionnement des indicateurs biologiques dans le diagnostic global de fertilité	7
1.4. Recommandations pour la mobilisation des indicateurs microbiologiques	8
2. Bioindicateurs.....	9
2.1. Indicateur de microbiologie du sol.....	9
2.2. Indicateurs de qualité des matières organiques	9
2.3. Intérêt des bioindicateurs mesurés en laboratoire.....	9
2.4. Critères de choix des bioindicateurs retenus dans l'outil de diagnostic Microbioterre	10
2.5. Référentiel d'interprétation des indicateurs.....	11
2.6. Relation des indicateurs avec les fonctions et les processus des sols	11
2.7. Relation indicateurs / fonctions / processus.....	13
2.8. Relations indicateurs / leviers agronomiques	13
3. Fiches bioindicateurs.....	15
3.1. Interprétation des rubriques	15
3.2. Indicateur de qualité de la MO : Fractionnement granulométrique de la MO	17
3.3. Indicateur de qualité de la MO : mesure du C labile au permanganate de potassium.....	20
3.4. Indicateur de microbiologie : Biomasse microbienne.....	21
3.5. Indicateur de microbiologie : Biomasse fongique.....	22
3.6. Indicateur de microbiologie : Protéase	23
3.7. Indicateur de microbiologie : Arylamidase (ARYL)	24
3.8. Indicateur de microbiologie : Azote Biologiquement Minéralisable (ABM)	25
3.9. Indicateur de microbiologie : β -D-glucosidase (GLU).....	26
4. Mode opératoire de prélèvement, de conditionnement et d'envoi d'échantillons de terre en vue d'une analyse d'indicateurs microbiologiques.....	27
4.1. Renseignements nécessaires.....	27
4.2. Préparation des consommables	27
4.3. Matériels nécessaires et consommables.....	27
4.4. Période de prélèvement.....	28
4.5. Choix de la zone de prélèvement.....	28
4.6. Evaluation de la structure du sol.....	29
4.7. Prélèvement et mise en sachet	29

4.8. Gestion (stockage avant envoi) et envoi des échantillons	29
5. Laboratoires de routine proposant des analyses biologiques	29
6. Caractérisation des pratiques et objectifs de l'agriculteur	30
7. Exemple de démarche	33
7.1. Présentation de la parcelle : essai Travail du sol Kerguehenec – modalité TCS fumier volaille 33	
7.2. Fiche de renseignement ITK et objectifs de l'exploitant	34
7.3. Test bêche – mars 2018 dans le colza	35
7.4. Simulation de l'évolution du carbone organique dans les sols à 30 ans.....	35
7.5. Indicateurs mesurés : valeurs et niveaux des indicateurs dans le référentiel	36
7.6. Relations entre les indicateurs mesurés et les fonctions du sol	38
7.7. Interprétation & leviers agronomiques possibles	39
8. Sources	40

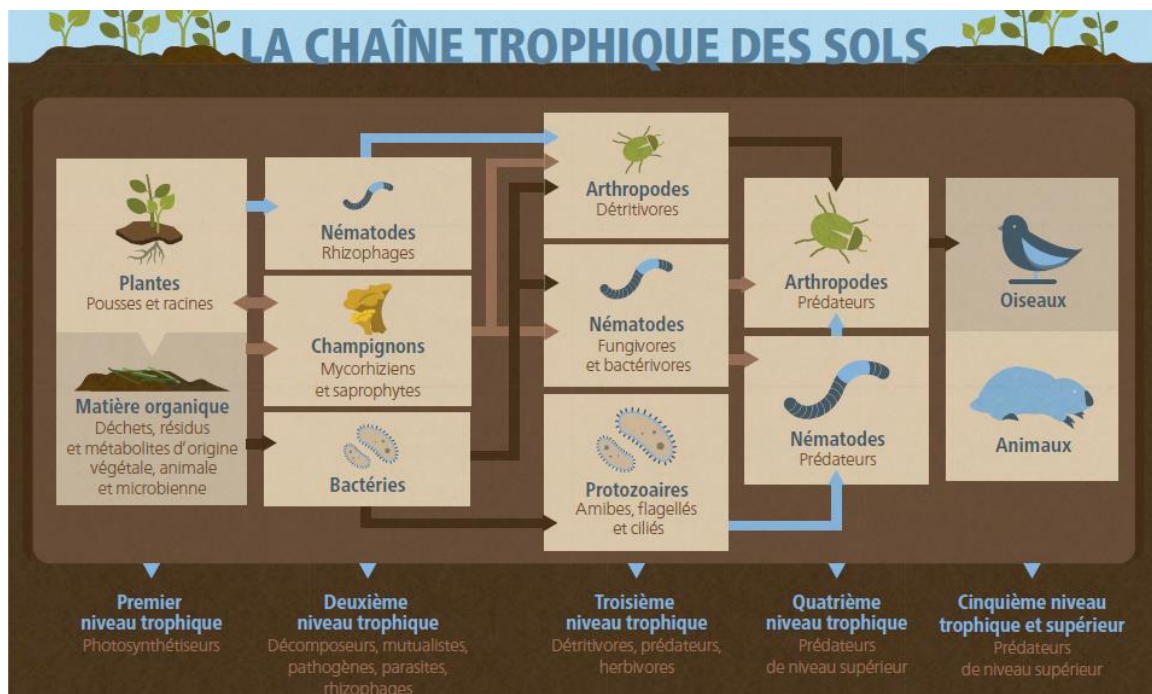
1. Démarche de diagnostic

1.1. Intérêt du diagnostic microbiologique

L'analyse de terre est un outil indispensable au pilotage du système de culture en lien avec les objectifs de l'agriculteur. Elle permet de caractériser la fertilité du sol dans ses différentes composantes. L'analyse telle que couramment pratiquée depuis de nombreuses années, renseigne surtout sur la fertilité chimique (pH eau, Capacité d'Echange Cationique ou CEC, bases échangeables, phosphore et potassium assimilables, ...) et la fertilité physique (granulométrie, stabilité structurale, ...).

Depuis plusieurs années, de nouveaux indicateurs permettent de caractériser la fertilité biologique et organique des sols, composantes moins bien connues mais indispensables à la compréhension des processus biologiques qui se jouent.

En effet, le sol abrite une très grande abondance d'êtres vivants qui interagissent entre eux à travers les différents niveaux d'une chaîne alimentaire.



(source FAO, 2015)

Ainsi, ces être-vivants présentent des fonctions diverses à savoir :

- **Les ingénieurs physiques** (ex : vers de terre, termites, fourmis) qui renouvellent la structure du sol, créent des habitats pour les autres organismes du sol et régulent la distribution spatiale des ressources en Matières Organiques (MO) du sol ainsi que le transfert de l'eau.
- **Les régulateurs** (nématodes, collemboles et acariens) contrôlent la dynamique des populations des microorganismes du sol et agissent sur leur activité. La présence d'une diversité de prédateurs permet par exemple de limiter la prolifération de certains champignons ou bactéries pathogènes des cultures.
- **Les ingénieurs chimistes**, principalement les microorganismes (les bactéries et les champignons microscopiques) assurent la décomposition de la MO en éléments nutritifs facilement assimilables par les plantes comme l'azote et le phosphore. Ils sont également responsables de la dégradation des polluants organiques comme les hydrocarbures et les pesticides.

1.2. Cycle des matières organiques

À travers cette chaîne alimentaire en constante évolution, les êtres vivants du sol sont ainsi à la base des processus biologiques qui vont transformer la MO issue du vivant (animaux morts, résidus de cultures, apports de produits résiduels organiques, ...) en MO humifiée (liée ou stable) et MO fraîche ou labile (Figure 1).



Figure 1 Les Matières Organiques du sol et leurs facteurs de variations

Cette transformation est à l'origine de multiples processus et fonctions associés dans le sol :

- recyclage des nutriments (fourniture, perte d'azote)
- transformation du carbone (stabilisation, minéralisation, fragmentation, ...)
- évolution de la structure du sol (agrégation, aération / circulation eau-air, infiltration, rétention d'eau)

Ainsi, l'étude de la fertilité biologique et organique du sol vise à (Figure 2) :

- caractériser la qualité et la quantité des MO humifiées (liées, stables) et labiles (fraîche, active) du sol : « le carburant »,
- mesurer les abondances microbiennes, « la taille du moteur »
- mesurer les processus de minéralisation / stockage du carbone et de l'azote, les activités microbiennes (activités enzymatiques) : « la vitesse »

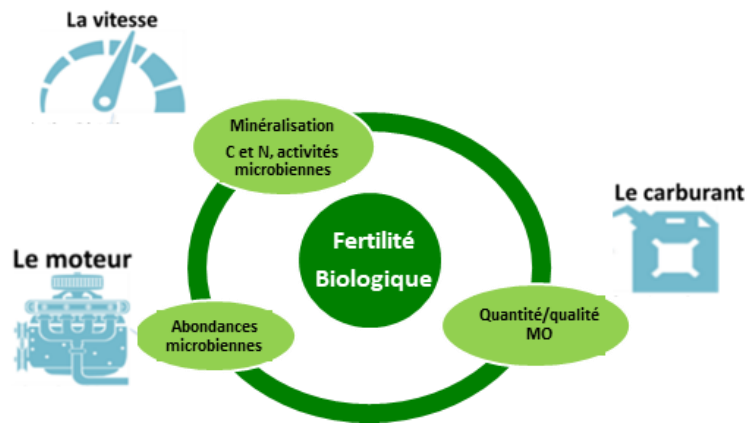


Figure 2 Représentation de la fertilité biologique et de sa dynamique

1.3. Positionnement des indicateurs biologiques dans le diagnostic global de fertilité

Les conditions favorables à la croissance des cultures reposent sur un bon état des composantes physique, chimique et biologique du sol (mise à disposition des éléments nutritifs, structure du sol, rétention de l'eau, ...) (Figure 3).

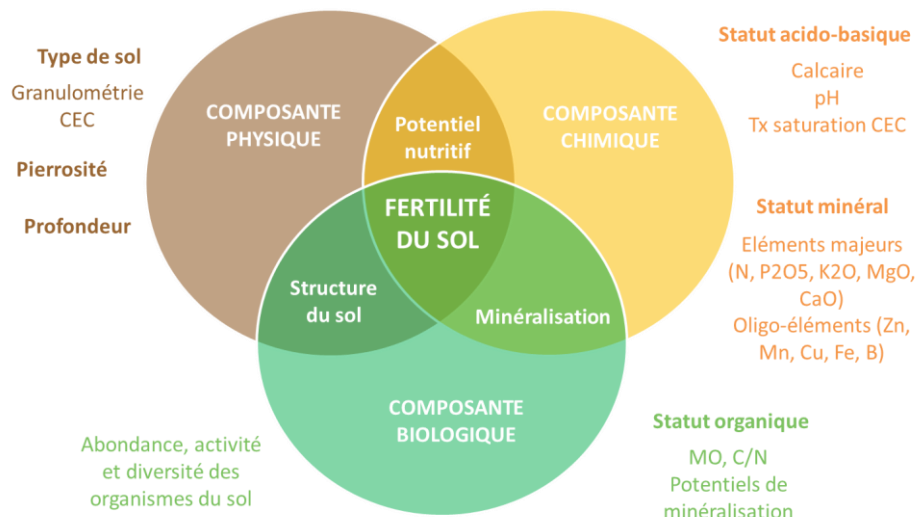


Figure 3 : Composantes de la fertilité du sol

Les indicateurs à mobiliser doivent donc renseigner sur ces 3 composantes. De plus, le compartiment biologique du sol est fortement influencé par le pédoclimat (texture, pH, température, humidité) et les pratiques culturales. La bonne valorisation des indicateurs biologiques repose donc sur la connaissance des indicateurs physico-chimiques issus de l'analyse de terre classique, mais également d'observations terrain (état de surface, structure de l'horizon superficiel et enracinement) et d'informations sur les pratiques culturales.

Dans ce contexte, le programme Microbioterre a permis un premier référencement des indicateurs microbiologiques mesurables, les plus pertinents pour les fonctions liées aux cycles du carbone et de l'azote. La bibliographie réalisée dans le cadre du projet a permis de mettre en relation ces indicateurs avec les fonctions évoquées précédemment.

Les indicateurs donnant un état des lieux à un instant « t », il est donc utile de mobiliser des modèles permettant de simuler une dynamique d'évolution à l'échelle d'une rotation culturale ou plus. Le modèle AMG permet d'estimer l'évolution des différents compartiments de carbone du sol (stockage, minéralisation) et donne à l'agriculteur une vision de son système de culture à moyen et long terme (30 ans). L'utilisation de ce modèle nécessite le renseignement d'informations assez détaillées sur les pratiques culturales. Ces informations sont également utiles pour caractériser le système de culture et définir les thématiques d'intérêt pour l'agriculteur

1.4. Recommandations pour la mobilisation des indicateurs microbiologiques

Pour réaliser un diagnostic pertinent, la mesure d'indicateurs microbiologiques doit obligatoirement s'appuyer sur la connaissance :

- des caractéristiques physico-chimiques de la parcelle (analyse de terre de moins de 5 ans avec granulométrie)
- de l'état structural au moment du prélèvement (test bêche)
- de l'historique détaillé des pratiques culturales (rotation, gestion des résidus, couverts d'interculture, fertilisation organique et minérale, travail du sol)

Le compartiment microbiologique est plus réactif que le stock de carbone, le statut acido-basique ou la richesse en éléments nutritifs. Dans le cadre d'un suivi de l'impact de changement de pratiques culturales, il est cependant peu pertinent de réaliser des mesures à moins de 2 voire 3 années d'écart, l'effet année (climat) pouvant perturber l'interprétation. De même, il est préférable de positionner les différents prélèvements dans un contexte comparable au sein de la rotation culturale et éloignée de la période d'apport d'amendement. Ainsi on évitera de comparer une analyse prélevée avant l'implantation d'une culture de printemps avec une analyse antérieure prélevée sur une culture d'hiver, même si la période de prélèvement est identique. L'état de couverture du sol devra également être semblable (ne pas comparer une analyse prélevée en sol nu avec un autre sous couvert d'interculture par exemple).

Les recommandations détaillées sur le choix de la période de prélèvement se trouvent dans le chapitre 4, avec le protocole de prélèvement.

Dans le cadre d'un suivi global de la fertilité d'une parcelle, la fréquence pourra se calquer sur celle des analyses de terre physico-chimique (une analyse pour 5 ans pour 5 à 10 ha).

2. Bioindicateurs

2.1. Indicateur de microbiologie du sol

Ce guide traite uniquement des bioindicateurs du sol ayant une relation avec les cycles de l'azote et du carbone, champ d'étude du projet CASDAR Microbioterre. Il existe bien d'autres indicateurs, portant sur d'autres fonctions (cycle du phosphore, ...). Selon les questions posées, d'autres indicateurs que ceux évoqués dans ce document pourront donc être mesurés pour compléter le diagnostic.

Un indicateur de microbiologie du sol, ou bioindicateur, est une caractéristique biologique mesurée sur un échantillon de terre, renseignant sur l'état et le fonctionnement biologique du sol. Il doit pouvoir aider à la mise en œuvre de pratiques culturales favorables au maintien ou à l'optimisation de certaines fonctions du sol. Les organismes microbiologiques sont des organismes invisibles à l'œil nu, comme par exemple les bactéries ou les champignons.

Idéalement, les caractéristiques d'un bioindicateur sont les suivantes :

- être lié ou corrélé à des fonctions du sol,
- intégrer des propriétés ou des processus physiques, chimiques et biologiques du sol,
- pouvoir rendre compte notamment des méthodes de gestion des sols,
- présenter des qualités de mesure (précision, fiabilité, robustesse),
- être référencé (connaître l'amplitude des réponses liées aux variations naturelles),
- être facile à utiliser et peu cher (échantillonnage et détermination)

Parmi les indicateurs de microbiologie du sol utilisés dans Microbioterre, on peut citer 2 grandes catégories :

- **Indicateurs d'abondance** : biomasse microbienne, ADN total, ainsi que les indicateurs bactériens (gènes codant l'ARNr16S) et fongique (gènes codant l'ARNr18S, ergostérol libre, et total).
- **Indicateurs d'activité** : activités enzymatiques impliquées dans le cycle du carbone et de l'azote, minéralisation de l'azote, minéralisation du carbone, azote potentiellement minéralisable, azote biologique minéralisable, ...

2.2. Indicateurs de qualité des matières organiques

La teneur en MO est un indicateur global obtenu à partir de la mesure du carbone organique. Si elle est facilement mesurable, elle ne réagit que très lentement à des changements de pratiques culturales. D'autres indicateurs, plus sensibles à des changements de pratiques, existent, comme par exemple le fractionnement granulométrique de la MO ou la mesure du carbone labile au permanganate de potassium (KMnO_4).

On peut regrouper les indicateurs de microbiologie du sol et les indicateurs de qualité de la MO sous le terme « bioindicateurs » lorsqu'ils peuvent renseigner l'état du sol (voir partie 3).

2.3. Intérêt des bioindicateurs mesurés en laboratoire

L'utilisation d'indicateurs de microbiologie du sol et de qualité de la MO mesurés en laboratoires de routine permet d'obtenir des résultats fiables et répétables, car une grande majorité des protocoles de mesure sont normés, réalisés dans des conditions de laboratoire, sur sol préparé et avec des moyens de contrôle de la répétabilité. Ce sont des indicateurs quantitatifs mobilisables pour le diagnostic et le conseil car ils peuvent renseigner sur les fonctions du sol (voir partie suivante). Enfin, la mesure de ces indicateurs permet de construire des référentiels d'interprétation et /ou de renforcer ceux qui existent déjà, ce qui contribue à rendre ces référentiels plus robustes.

2.4. Critères de choix des bioindicateurs retenus dans l'outil de diagnostic Microbioterre

Plusieurs critères ont été pris en compte pour faire le choix définitif des indicateurs à retenir dans l'outil de diagnostic Microbioterre. Le premier critère concernait **la réponse des indicateurs aux pratiques agricoles étudiées**. En effet, pour qu'un indicateur soit retenu, il doit être en mesure de discriminer les pratiques avec un seuil équivalent ou supérieur aux deux indicateurs de référence déjà mesurés en routine, c'est-à-dire le carbone organique et l'azote total du sol. Le second critère concernait **le coût et la faisabilité technique en lien avec la mesure de l'indicateur**. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable**. présente une synthèse de l'ensemble de critères de choix des indicateurs retenus dans l'outil de diagnostic Microbioterre.

Tableau 1 : Synthèse des critères de choix des indicateurs retenus dans l'outil de diagnostic Microbioterre

Variables	Scores toutes pratiques	Incertitude : variabilité spatiale et analytique 1 : Faible variabilité spatiale (< seuil CV) 2 : Forte variabilité spatiale (> seuil CV)	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
C 50-200 (%)	20	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
C 0-50 (%)	14	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
C 200-2000 (%)	14	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
C 50-2000 (%)	14	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
Arylamidase (nmol/min/g)	14	1	1	1	2	Sol brut	3	1
N 50-200 (%)	13	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
Biomasse microbienne (mg/kg)	13	1	3	2	3	Sol brut	2	1
C oxydé (mg/kg)	12	1	1	1 (2 à 3 semaines)	1	Sol sec	1	2
ABM (mg/kg)	12	1	1	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol brut	2 à 3	2
C org (%)	11	1	1	1 (2 semaines)	1	Sol sec	1	1
N 0-50 (%)	11	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
N 50-2000 (%)	11	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
Activité protéase (nmol/min/g)	11	1	2	1	2	Sol brut	3	2
LAP (nmol/min/g)	11	1	2	1	2	Sol brut	3	2
N total (%)	10	1	1	1 (2 semaines)	1	Sol sec	1	1
18S (copies/g)	10	2	2	1	3	Sol brut	3	3
Glucosidase (nmol/min/g)	10	1	1	1	2	Sol brut	3	1
C org Rock-Eval (g/kg)	9	1	3	3	3 (120 - 150 euros)	Sol sec	1	2
Carbone actif (g/kg)	8	1	3	3	3 (120 - 150 euros)	Sol sec	1	2
C labile 20 ans (g/kg)	8	1	3	3	3 (120 - 150 euros)	Sol sec	1	2
N 200-2000 (%)	8	1	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1
N minéralisé (mg/kg 28 j)	7	1	2	3	3 (70 - 100 euros)	Sol brut	2	1
Ergostérol total (mg/kg)	6	1	3	1	2	l congelé (-80°)	3	2
16S (copies/g)	5	2	2	1	3	Sol brut	3	3
APM (mg/kg)	5	1	2	2	2	Sol sec	1	2
C minéralisé (mg/kg 28j)	5	1	2	3	3 (70 - 100 euros)	Sol brut	2	1
ADN total (µg/g)	4	1	1	1	1	Sol brut	3	2
Ergostérol libre (mg/kg)	4	1	3	1	2	l congelé (-80°)	3	1
FDA (nmol/min/g)	4	1	1	1	1 à 2 (40 euros)	Sol brut	3	2
C stable 100 ans (g/kg)	2	1	3	3	3 (120 - 150 euros)	Sol sec	1	2

Notation de coût et faisabilité technique :
1 : Coût faible, faisabilité élevée

3 : Coût élevé, faisabilité faible

Légende

Le tableau 2 présente la liste des indicateurs proposée pour un diagnostic approfondi tel qu'il a été mené dans le cadre de Microbioterre.

Tableau 2 : liste des indicateurs retenus dans le menu approfondi de l'outil de diagnostic Microbioterre

Indicateurs du Menu Microbioterre		
Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)
		C 0-50 (%)
		C 50-200 (%)
		C 200-2000 (%)
		C 50-2000 (%)
		C labile oxydé KMnO4(mg/kg)
Indicateurs physico-chimiques	Azote	N total (%)
		N 0-50 (%)
		N 50-200 (%)
		N 200-2000 (%)
		N 50-2000 (%)
Indicateurs microbiologiques	Abondance	Biomasse microbienne (mg/kg)
		18S (copies/g)
	Activités	ABM (mg/kg)
		Protéase (nmol/min/g)
		Leucine amino-peptidase (nmol/min/g)
		Arylamidase (nmol/min/g)
	Glucosidase (nmol/min/g)	

2.5. Référentiel d'interprétation des indicateurs

Le programme Microbioterre a permis de créer un référentiel global pour chaque indicateur à partir de 183 parcelles d'essais en grandes cultures sans prairie. Les résultats ont été obtenus sur une profondeur de prélèvement de 20 cm.

Les domaines de validité du référentiel global vis-à-vis des teneurs en MO, en calcaire et du pH eau du sol sont les suivants :

Indicateurs	Mini	Maxi
MO (%)	1.26	5.15
Teneur en calcaire (%)	0.1	13.2
pH eau	6	8.4

Enfin, la majorité des observations ont été faites en sol de texture moyenne avec peu de sites avec un taux d'argile supérieur à 30%.

En adaptant une méthodologie proposée par l'Université de Cornell en 2017, le programme a permis de classer les données de chaque indicateur en 5 niveaux (de très faible à très élevé) d'effectifs équivalents (20% des observations dans chaque classe de niveau).

Exemple de représentation des résultats :

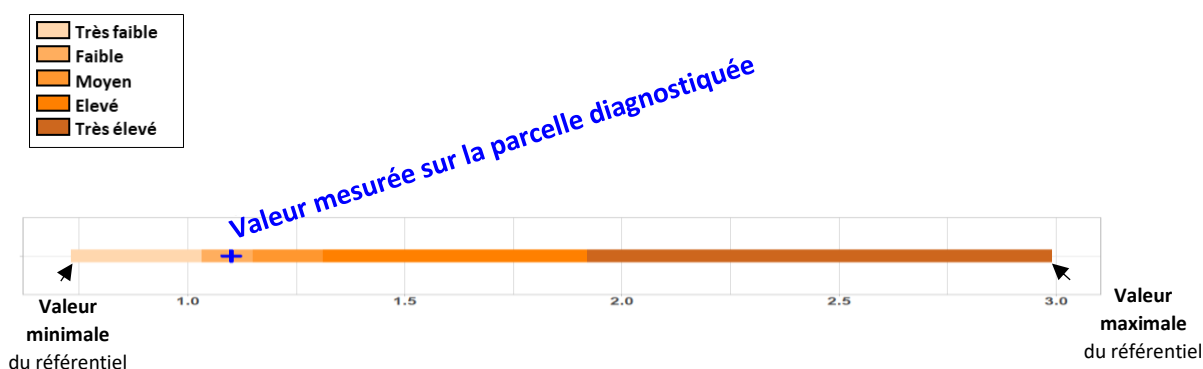


Figure 4 : Illustration d'une valeur replacée dans le référentiel global. La biomasse microbienne mesurée a ici une valeur très faible.

Ainsi, le niveau mesuré pour chaque indicateur permet de qualifier l'expression des différentes fonctions liées.

2.6. Relation des indicateurs avec les fonctions et les processus des sols

Seul, un indicateur de microbiologie du sol ou de qualité de la MO ne suffit pas pour interpréter et réaliser un conseil. Pour cela, il faut être en mesure de connaître la relation entre l'indicateur et les principales fonctions du sol. Dans le cadre de Microbioterre, 3 fonctions ont été étudiées (tableau 3) : recyclage des nutriments, transformation du carbone et maintien de la structure du sol. Ces trois fonctions se déclinent en un nombre plus important de processus biologiques et physiques, dont l'intensité oriente l'évolution (amélioration, dégradation) de ces fonctions dans les sols.

Tableau 3 : Fonctions et processus pris en compte dans le cadre du projet Microbioterre

Fonctions		Processus	Définition
Recyclage des nutriments	Fourniture d'azote	Ammonification	Transformation de l'azote organique des MO du sol en azote ammoniacal (ion NH_4^+)
		Nitrification	Transformation de l'azote ammoniacal (ion NH_4^+) en azote nitrique (ion NO_3^- , nitrate)
		Fixation symbiotique	Réduction de l'azote atmosphérique N_2 en ammoniac par des bactéries libres ou symbiotiques, ammoniac assimilé ensuite par la plante sous forme d'acides aminés
	Perte d'azote	Lixiviation	Entraînement du nitrate au-delà de la profondeur d'enracinement des cultures par percolation
		Réduction du NO_3 (émission N_2O)	Transformation du nitrate en N_2O puis en N_2 par respiration d'organismes microbiens en conditions d'anaérobiose
		Volatilisation	Transformation de l'azote en forme ammoniacale gazeuse NH_3
Transformation du carbone	Transformation de la MO	Fragmentation	Transformation par les organismes du sol des MO apportées (principalement résidus de cultures) en MO particulaire. Ce processus s'accompagne généralement de l'incorporation de la MO dans le sol
		Biodégradation	Processus biologique de déconstruction des structures organiques (biomasses végétales, produits organiques) sous l'influence de la faune et des microorganismes du sol, conduisant à des substrats et molécules transformées
	Perte de MO	Minéralisation (CO_2)	Dégradation biologique des composés carbonés organiques en composés simples, conduisant à la production de CO_2
	Augmentation de MO	Stabilisation chimique / humification	Protection du carbone par ses propriétés chimiques intrinsèques (récalcitrance de substrats organiques) et/ou par adsorption sur une particule minérale dans le sol.
		Stabilisation physique / protection	Protection du carbone par occlusion de MO du sol dans un agrégat
Structure du sol	Erosion et la battance	Agrégation	Processus d'assemblage des particules minérales et organiques du sol
	Porosité	Aération / circulation eau - air	Porosité du sol (« vides » du sol) permettant la circulation des gaz et de l'eau
		Infiltration en eau	Capacité d'un sol à laisser l'eau le pénétrer
	Stockage d'eau	Rétention en eau	Capacité d'un sol à retenir l'eau

2.7. Relation indicateurs / fonctions / processus

Le tableau 3 présente les relations qui existent entre les bioindicateurs, les fonctions et les processus du sol. Ces relations ont été établies à partir d'une revue bibliographique à partir de 80 articles scientifiques et de dire d'experts.

Tableau 4 : Relations entre les bioindicateurs et les fonctions et les processus du sol

Indicateurs du menu	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 (%)	+	+		+				+	+	+	+	+	+	+	+
C 0-50 µm (%)									+						
C 50-200 µm (%)								+			+				
C 200-2000 µm (%)						+		+							
C 50-2000 µm (%)															
C KMnO4 (mg/kg)				+				+			+		+	+	+
N total (%)	+	+	-												
N 0-50 µm (%)															
N 50-200 µm (%)	+	+													
N 50-2000 µm (%)															
C microbien (mg/kg)								+			+				
18S (copies/g)											+				
LAP (nmol/min/g)	+	+													
ARYLN (nmol/min/g)	+														
Protéase (nmol/min/g)	+	-						+			+				
ABM (mg/kg)	+				+						+				
B-Glu (nmol/min/g)	+	+						+				+			

Légende relation positive entre l'indicateur et la fonction
 relation négative entre l'indicateur et la fonction

Ces relations sont détaillées pour chaque indicateur au chapitre 3

2.8. Relations indicateurs / leviers agronomiques

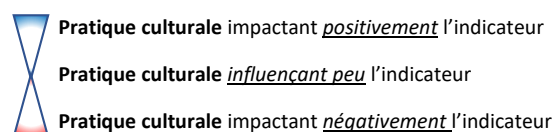
Le projet Microbioterre a permis, en parallèle, d'évaluer l'effet de 5 leviers agronomiques mobilisables sur les différents indicateurs :

- Apport de PRO (Produits Résiduaire Organiques)
- Intégration de couverts intermédiaires
- Réduction du travail du sol
- Allongement de la rotation
- Systèmes de cultures (bas intrants, ACS, ...)

Le tableau 5 présente les relations calculées :

Tableau 5 : effet des leviers agronomiques sur les indicateurs (comparaison levier/témoin)

Indicateurs du Menu Microbioterre		PRO	Couverts intermédiaires	Réduction travail du sol	Rotation	Systèmes de culture	
Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)	16%	6%	2%	2%	4%
		C 0-50 (%)	-4%	-3%	-2%	1%	-1%
		C 50-200 (%)	35%	42%	3%	-5%	10%
		C 200-2000 (%)	16%	27%	10%	-3%	13%
		C 50-2000 (%)	27%	37%	22%	-4%	10%
		C labile oxydé (mg/kg)	32%	2%	6%	13%	7%
	Azote	N total (%)	19%	5%	4%	13%	5%
		N 0-50 (%)	-3%	0%	0%	1%	-1%
N 50-200 (%)		40%	10%	6%	-8%	10%	
N 50-2000 (%)		34%	6%	5%	-12%	13%	
Indicateurs microbiologiques	Abondance	Biomasse microbienne (mg/kg)	38%	7%	7%	23%	20%
		18S (copies/g)	82%	29%	42%	65%	4%
	Activités	ABM (mg/kg)	36%	12%	-1%	8%	1%
		Protéase (nmol/min/g)	26%	11%	-9%	7%	15%
		Leucine amino-peptidase (nmol/min/g)	22%	9%	1%	18%	12%
		Arylamidase (nmol/min/g)	36%	17%	10%	30%	21%
		Glucosidase (nmol/min/g)	11%	-6%	-20%	24%	14%



Ces outils, mettant en lien fonctions et processus du sol, indicateurs mesurés et leviers agronomiques mobilisables permettent une base de discussion avec l'agriculteur quant à l'effet d'un changement de pratiques sur le sol via l'analyse d'un ensemble d'indicateurs physico-chimiques et microbiologiques.

3. Fiches bioindicateurs

Nous proposons dans cette partie un ensemble de fiches « indicateur ». Ces fiches synthétiques ont pour objectif d'aider à l'interprétation des indicateurs grâce à différentes rubriques. La première fiche présente le contenu des fiches.

3.1. Interprétation des rubriques

Définition	Cette rubrique donne des explications générales sur l'indicateur.																					
Unité	Ici est présentée l'unité de mesure.																					
Norme	Lorsqu'elle existe, la norme de mesure est indiquée, à défaut il s'agit de la méthode utilisée dans le projet.																					
Relation avec les fonctions du sol	<p>Cette rubrique présente les relations de l'indicateur avec les fonctions et processus présentés en partie 1.</p> <p>Le sens de la relation est précisé :</p> <ul style="list-style-type: none"> relation positive : l'indicateur varie dans le même sens que la fonction relation négative : l'indicateur varie dans le sens opposé de la fonction <p>La robustesse de la relation est indiquée grâce au coefficient de corrélation.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><i>Lien Indicateur / Fonction</i></th> </tr> <tr> <th></th> <th>Relation positive</th> <th>Relation négative</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Relation forte $r > 0,8$</td> <td style="background-color: #0056b3; color: white; text-align: center;">+</td> <td style="background-color: #d62728; color: white; text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>Relation moyenne r entre 0,4 et 0,8</td> <td style="background-color: #1f77b4; color: white; text-align: center;">+</td> <td style="background-color: #d62728; color: white; text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>Relation faible $r < 0,4$</td> <td style="background-color: #add8e6; color: blue; text-align: center;">+</td> <td style="background-color: #f08080; color: red; text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>Avis d'experts</td> <td style="background-color: #add8e6; color: blue; text-align: center;">+</td> <td style="background-color: #f08080; color: red; text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>Lien non identifié</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<i>Lien Indicateur / Fonction</i>				Relation positive	Relation négative	Relation forte $r > 0,8$	+	-	Relation moyenne r entre 0,4 et 0,8	+	-	Relation faible $r < 0,4$	+	-	Avis d'experts	+	-	Lien non identifié		
<i>Lien Indicateur / Fonction</i>																						
	Relation positive	Relation négative																				
Relation forte $r > 0,8$	+	-																				
Relation moyenne r entre 0,4 et 0,8	+	-																				
Relation faible $r < 0,4$	+	-																				
Avis d'experts	+	-																				
Lien non identifié																						
Gamme de variation	<p>Ici sont présentées :</p> <ul style="list-style-type: none"> les gammes de valeurs observées dans le référentiel Microbioterre (toutes les observations) les gammes de valeurs observées dans le référentiel Microbioterre par classe de texture. Le nombre de valeurs est précisé car certaines classes ne comportent que peu de données et le référentiel est donc à utiliser avec précaution. Dans la base de données Microbioterre (183 données), toutes les classes de texture ne sont pas représentées. Pour pallier à cette limite, nous avons utilisé le triangle des textures du GEPPA en 4 classes. A noter qu'aucune classe grossière n'était présente dans les données et que la classe moyenne était la plus représentée. Sur cette dernière, nous avons donc proposé de la diviser en 2 sous classes : moyenne fine et moyenne grossière. 																					

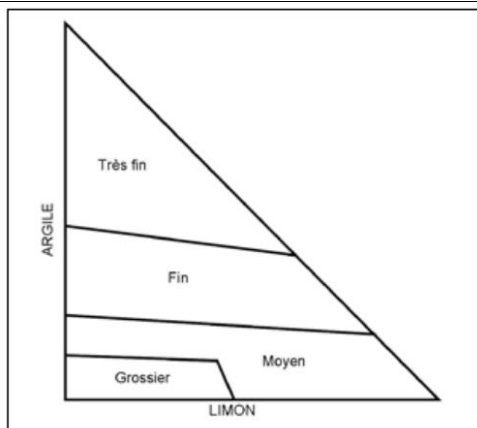


Figure 4 Triangle de texture du GEPPA 4 classes

- les gammes de valeurs observées dans d'autres référentiels français (dire d'experts, données laboratoires d'analyse, projets de recherche, ...).

Pratiques culturelles

Cette rubrique présente la hiérarchisation du poids des pratiques culturelles ayant un effet sur l'indicateur. Ces résultats sont issus du projet Microbioterre. Ils sont basés sur la comparaison entre l'effet d'un levier et un témoin :

- **PRO** : effet moyen de l'apport d'un PRO (fumier, compost, ...) par rapport à une fertilisation minérale
 - **Couvert** : effet moyen d'un couvert végétal pendant l'interculture par rapport à un sol nu
 - **Travail du sol** : effet moyen de la simplification du travail du sol (semis direct, ...) par rapport au labour
 - **Rotation** : effet moyen de l'allongement ou de la diversification de la rotation par rapport à une rotation courte (monoculture par rapport à rotation, rotation courte par rapport à une rotation longue, ...)
 - **Système** : effet moyen des systèmes innovants (bas niveaux d'intrants, agriculture de conservation, ...) par rapport à des systèmes dits « conventionnels ».
- L'intensité de l'effet est représentée en vert dans l'exemple ci-dessous.

Exemple :

PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes

Pour cet indicateur, la pratique ayant le plus d'effet est l'apport de PRO, puis la rotation et l'effet système. Le travail du sol et les couverts végétaux semblent avoir peu d'effet.

Interprétation

Ici est proposée une interprétation générale des résultats.

3.2. Indicateur de qualité de la MO : Fractionnement granulométrique de la MO

<p>Définition</p>	<p>Le fractionnement granulométrique de la MO distingue celle-ci selon sa taille, en fractions grossières (> 50 µm) et fractions fines (< 50 µm), au sein desquelles sont distribués l'azote et le carbone. La fraction fine correspond à une MO humifiée, c'est-à-dire la partie la plus stable de la MO, ce qui représente de 70 à 90 % du carbone total en climat tempéré (65 % dans AMG). La proportion de fraction fine permet d'identifier le stockage à plus long terme du carbone (durée de vie dans le sol de plusieurs 10^{aines} d'années). Elle correspond à la fraction stable et influence la rétention en eau et la capacité d'échange cationique.</p> <p>Les fractions grossières, encore appelées « MO particulaire », correspondent à des débris végétaux en cours de décomposition. Ces fractions constituent une source d'énergie pour les organismes vivants dans le sol. Elles constituent la partie labile de la MO.</p>																																																																																																																																																																																												
<p>Unité</p>	<p>g/kg de sol ou % du C</p>																																																																																																																																																																																												
<p>Norme</p>	<p>Norme : NF X 31-516</p>																																																																																																																																																																																												
<p>Relation avec les fonctions du sol</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Indicateurs du menu</th> <th colspan="5">Recyclage des nutriments</th> <th colspan="5">Transformation du carbone</th> <th colspan="5">Structure du sol</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Fourniture N</th> <th colspan="2">Perte N</th> <th colspan="2">Transformation MO</th> <th>Perte MO</th> <th colspan="2">Augmentation MO</th> <th colspan="2">Erosion Battance</th> <th colspan="2">Porosité</th> <th>Stockage eau</th> </tr> <tr> <th>Ammonification</th> <th>Nitrification</th> <th>Fixation symbiotique</th> <th>Réduction du NO3</th> <th>Volatilisation</th> <th>Fragmentation</th> <th>Biodégradation</th> <th>Minéralisation (CO2)</th> <th>Stabilisation chimique</th> <th>Stabilisation physique</th> <th>Agrégation (Macro)</th> <th>Agrégation (Micro)</th> <th>Aération/Circulation eau - air</th> <th>Infiltration en eau</th> <th>Rétention en eau</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C 0-50 µm (%)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> <td></td><td></td> <td></td> <td>+</td> <td></td> <td></td><td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C 50-200 µm (%)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> <td></td><td></td> <td>+</td> <td></td> <td></td> <td>+</td> <td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C 200-2000 µm (%)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> <td>+</td> <td></td> <td>+</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Indicateurs du menu</th> <th colspan="5">Recyclage des nutriments</th> <th colspan="5">Transformation du carbone</th> <th colspan="5">Structure du sol</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Fourniture N</th> <th colspan="2">Perte N</th> <th colspan="2">Transformation MO</th> <th>Perte MO</th> <th colspan="2">Augmentation MO</th> <th colspan="2">Erosion Battance</th> <th colspan="2">Porosité</th> <th>Stockage eau</th> </tr> <tr> <th>Ammonification</th> <th>Nitrification</th> <th>Fixation symbiotique</th> <th>Réduction du NO3</th> <th>Volatilisation</th> <th>Fragmentation</th> <th>Biodégradation</th> <th>Minéralisation (CO2)</th> <th>Stabilisation chimique</th> <th>Stabilisation physique</th> <th>Agrégation (Macro)</th> <th>Agrégation (Micro)</th> <th>Aération/Circulation eau - air</th> <th>Infiltration en eau</th> <th>Rétention en eau</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N 0-50 µm (%)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> <td></td><td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td><td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>N 50-200 µm (%)</td> <td>+</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td> <td></td><td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td><td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>N 50-2000 µm (%)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> <td></td><td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td><td></td> <td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table>	Indicateurs du menu	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 0-50 µm (%)									+							C 50-200 µm (%)								+			+					C 200-2000 µm (%)						+		+								Indicateurs du menu	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	N 0-50 µm (%)																N 50-200 µm (%)	+	+														N 50-2000 µm (%)															
Indicateurs du menu	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 0-50 µm (%)									+																																																																																																																																																																																				
C 50-200 µm (%)								+			+																																																																																																																																																																																		
C 200-2000 µm (%)						+		+																																																																																																																																																																																					
Indicateurs du menu	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																																																																																																																																																																														
N 0-50 µm (%)																																																																																																																																																																																													
N 50-200 µm (%)	+	+																																																																																																																																																																																											
N 50-2000 µm (%)																																																																																																																																																																																													
<p>Gamme de variation</p>	<p>Le fractionnement granulométrique est sensible à la texture du sol. Valeurs de références « Microbioterre » selon la texture :</p> <ul style="list-style-type: none"> <p>C 0 – 50 µm : 6 à 27 g C/kg sol ; 72 à 94 % C total :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>72</td> <td>84</td> <td>87</td> <td>90</td> <td>94</td> </tr> <tr> <td>Très fine (n = 21)</td> <td>88</td> <td>89</td> <td>90</td> <td>92</td> <td>94</td> </tr> <tr> <td>Fine (n = 15)</td> <td>83</td> <td>87</td> <td>88</td> <td>90</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>Moyenne fine (n = 57)</td> <td>72</td> <td>86</td> <td>87</td> <td>91</td> <td>94</td> </tr> <tr> <td>Moyenne grossière (n = 90)</td> <td>72</td> <td>83</td> <td>85</td> <td>88</td> <td>91</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">En % du C () : nombre de données du référentiel</p> <p>C 50 – 200 µm : 0,4 à 2,6 g C/kg sol ; 4,1 à 22,6 % C total</p> 		Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	72	84	87	90	94	Très fine (n = 21)	88	89	90	92	94	Fine (n = 15)	83	87	88	90	92	Moyenne fine (n = 57)	72	86	87	91	94	Moyenne grossière (n = 90)	72	83	85	88	91																																																																																																																																																								
	Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																																																																																																																																																																								
Toutes textures (n = 183)	72	84	87	90	94																																																																																																																																																																																								
Très fine (n = 21)	88	89	90	92	94																																																																																																																																																																																								
Fine (n = 15)	83	87	88	90	92																																																																																																																																																																																								
Moyenne fine (n = 57)	72	86	87	91	94																																																																																																																																																																																								
Moyenne grossière (n = 90)	72	83	85	88	91																																																																																																																																																																																								

	Min	Faible	Moy	Elevée	Max
Toutes textures (n = 183)	4.1	6.3	8.1	9.9	22.6
Très fine (n = 21)	5.0	6.1	6.6	7.1	7.6
Fine (n = 15)	5.1	5.9	7.0	7.8	9.9
Moyenne fine (n = 57)	4.1	5.7	7.9	8.8	22.6
Moyenne grossière (n = 90)	5.0	7.5	8.8	10.0	12.9

En % du C
() : nombre de données du référentiel

○ **C 200 – 2 000 µm** : 0,1 à 1,8 g C/kg sol ; 1,2 à 15,2 % C total

	Min	Faible	Moy	Elevée	Max
Toutes textures (n = 183)	1.2	3.3	5.1	6.6	15.2
Très fine (n = 21)	1.3	2.0	3.4	4.5	4.9
Fine (n = 15)	3.0	4.2	5.0	5.7	6.6
Moyenne fine (n = 57)	1.2	3.5	4.8	5.7	11.1
Moyenne grossière (n = 90)	2.2	3.8	5.7	7.0	15.2

En % du C
() : nombre de données du référentiel

○ **N 0 – 50 µm** : 0,5 à 2,7 g N /kg sol ; 80,4 à 97,2 % N total :


	Min	Faible	Moy	Elevée	Max
Toutes textures (n = 183)	80.4	88.6	91.8	94.4	97.2
Très fine (n = 21)	92.6	93.7	94.2	94.5	95.9
Fine (n = 15)	91.9	92.6	93.2	93.9	94.7
Moyenne fine (n = 57)	87.4	92.4	93.5	95.1	97.2
Moyenne grossière (n = 90)	80.4	87.6	89.9	93.0	94.9

En % du N
() : nombre de données du référentiel


○ **N 50 – 200 µm** : 0 à 0,2 g N/kg sol ; 2,1 à 11,0 % N total :

	Min	Faible	Moy	Elevée	Max
Toutes textures (n = 183)	2.1	3.9	5.5	7.4	11.0
Très fine (n = 21)	2.9	4.0	4.4	4.9	5.4
Fine (n = 15)	3.4	3.8	4.4	5.2	5.6
Moyenne fine (n = 57)	2.1	3.2	4.3	4.9	9.0
Moyenne grossière (n = 90)	4.1	5.1	6.7	7.9	11.0

En % du N
() : nombre de données du référentiel


	<p>○ N 200 – 2 000 µm : 0 à 0,1 g N/kg sol ; 0,7 à 8,8 % N total :</p>																														
		Min	Faible	Moy	Elevée	Max																									
	Toutes textures (n = 183)	0.7	1.4	2.7	4.2	8.8																									
																															
	Très fine (n = 21)	0.7	1.1	1.4	1.6	2.4																									
	Fine (n = 15)	1.6	2.0	2.4	2.8	3.0																									
	Moyenne fine (n = 57)	0.7	1.5	2.2	2.6	5.0																									
	Moyenne grossière (n = 90)	0.9	1.9	3.4	4.5	8.8																									
		<p>En % du N () : nombre de données du référentiel</p>																													
Pratiques culturales	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>PRO</th> <th>Couverts intermédiaires</th> <th>Travail du sol</th> <th>Rotations</th> <th>Systèmes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C 0-50 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C 50-200 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C 200-2000 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C 50-2000 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Variable	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes	C 0-50 (%)						C 50-200 (%)						C 200-2000 (%)						C 50-2000 (%)					
	Variable	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																									
	C 0-50 (%)																														
	C 50-200 (%)																														
	C 200-2000 (%)																														
	C 50-2000 (%)																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>PRO</th> <th>Couverts intermédiaires</th> <th>Travail du sol</th> <th>Rotations</th> <th>Systèmes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N 0-50 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>N 50-200 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>N 50-2000 (%)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Variable	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes	N 0-50 (%)						N 50-200 (%)						N 50-2000 (%)											
	Variable	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																									
	N 0-50 (%)																														
	N 50-200 (%)																														
N 50-2000 (%)																															
<p>Une valeur élevée du carbone de la fraction < 50 µm indique une stabilisation chimique élevée du C dans les sols, ce qui devrait favoriser le stockage de carbone. Une valeur élevée du carbone dans les fractions > 50 µm semble traduire une minéralisation importante de la MO du sol (perte sous forme de CO₂), mais favoriser la stabilisation physique de la MO et l'agrégation des macro-particules de sol.</p> <p>Une valeur élevée de l'azote dans les fractions > 50 µm semble être favorable à la fourniture d'azote pour les cultures.</p>																															
<p>Interprétation</p>																															

3.3. Indicateur de qualité de la MO : mesure du C labile au permanganate de potassium

Définition	Le carbone labile représente la fraction la moins stable du C. Elle est rapidement dégradable (quelques jours à quelques mois) et constitue une source d'énergie pour les organismes vivants dans le sol. La méthode d'extraction au permanganate de potassium (KMnO ₄) est une extraction rapide et peu coûteuse. Le carbone labile est aussi appelé carbone actif ou carbone oxydé.																										
Unité	mg C/kg sol ou % C total																										
Norme	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de norme. • Méthode adaptée de Weil et al., (2003) et Culman et al., (2012) (Extraction de terre séchée tamisée 2 mm avec KMnO₄ 0.02 M (ratio 1/8 m/v), dosage UV). 																										
Relation avec les fonctions du sol	<i>Recyclage des nutriments</i>					<i>Transformation du carbone</i>					<i>Structure du sol</i>																
	Fourniture N			Perte N		Transformation MO		Perte MO	Augmentation MO		Erosion Battance		Porosité		Stockage eau												
	Ammonification	Nitrification	Fixation symbiotique	Réduction du NO ₃	Volatilisation	Fragmentation	Biodégradation	Minéralisation (CO ₂)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Agrégation (Macro)	Agrégation (Micro)	Aération/Circulation eau - air	Infiltration en eau	Rétention en eau												
				+				+			+		+	+	+												
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> • Références Microbioterre : les valeurs s'étendent de 390 à 1 414 mg C/kg sol avec une moyenne à 769 mg/kg. Valeurs de référence selon la texture : <table style="margin-left: 40px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Min</td> <td style="text-align: center;">Faible</td> <td style="text-align: center;">Moy</td> <td style="text-align: center;">Elevée</td> <td style="text-align: center;">Max</td> </tr> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td style="text-align: center;">390</td> <td style="text-align: center;">602</td> <td style="text-align: center;">769</td> <td style="text-align: center;">937</td> <td style="text-align: center;">1414</td> </tr> </table>  <p style="text-align: right; margin-right: 20px;">En mg/kg () : nombre de données du référentiel</p> • Autres référentiels français : de 300 à 1 400 mg C/kg sol 																Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	390	602	769	937	1414
	Min	Faible	Moy	Elevée	Max																						
Toutes textures (n = 183)	390	602	769	937	1414																						
Pratiques culturales	PRO	Couverts intermédiaires			Travail du sol			Rotations			Systèmes																
Interprétation	Une valeur élevée va se traduire par une stabilité structurale et une circulation de l'eau et de l'air potentiellement élevées. La minéralisation de la MO sera aussi élevée.																										

3.4. Indicateur de microbiologie : Biomasse microbienne

<p>Définition</p>	<p>La biomasse microbienne est un indicateur d'abondance : il représente principalement la quantité de carbone dans les bactéries, champignons et protozoaires du sol Cet indicateur représente donc la fraction « vivante » du carbone organique. Il répond assez rapidement à des changements de pratique. La biomasse microbienne est aussi appelée carbone microbien car la mesure est basée sur le dosage du carbone microbien extrait d'un échantillon de terre. Proportionnellement à la teneur en carbone, cet indicateur peut donner une idée de la « taille du moteur par rapport à la taille de la voiture ». La biomasse microbienne est composée de nombreux éléments minéraux et se renouvelle rapidement dans le sol, contribuant ainsi à la nutrition des plantes.</p>																																																												
<p>Unité</p>	<p>mg C/kg de sol sec ou pourcentage du C organique.</p>																																																												
<p>Norme</p>	<p>NF ISO 14240-2 La méthode fumigation-extraction a été utilisée dans Microbioterre.</p>																																																												
<p>Relation avec les fonctions du sol</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Recyclage des nutriments</th> <th colspan="5">Transformation du carbone</th> <th colspan="5">Structure du sol</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Fourniture N</th> <th colspan="2">Perte N</th> <th colspan="2">Transformation MO</th> <th>Perte MO</th> <th colspan="2">Augmentation MO</th> <th colspan="2">Erosion Battance</th> <th colspan="2">Porosité</th> <th>Stockage eau</th> </tr> <tr> <th>Ammonification</th> <th>Nitrification</th> <th>Fixation symbiotique</th> <th>Réduction du NO3</th> <th>Volatilisation</th> <th>Fragmentation</th> <th>Biodégradation</th> <th>Minéralisation (CO2)</th> <th>Stabilisation chimique</th> <th>Stabilisation physique</th> <th>Agrégation (Macro)</th> <th>Agrégation (Micro)</th> <th>Aération/Circulation eau - air</th> <th>Infiltration en eau</th> <th>Rétenion en eau</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td style="background-color: #00b0f0; text-align: center;">+</td><td></td><td></td><td style="background-color: #0056b3; text-align: center;">+</td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table>	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	Rétenion en eau								+			+				
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	Rétenion en eau																																															
							+			+																																																			
<p>Gamme de variation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Références Microbioterre : de 114 à 690 mg C/kg terre, avec une moyenne de 326 mg C/kg. La texture du sol impacte l'indicateur : les textures fines présentent des valeurs plus élevées que les textures moyennes et grossières. Valeurs de références selon la texture : <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>114</td> <td>231</td> <td>326</td> <td>413</td> <td>690</td> </tr> <tr> <td>Très fine (n = 21)</td> <td>383</td> <td>469</td> <td>526</td> <td>582</td> <td>690</td> </tr> <tr> <td>Fine (n = 15)</td> <td>171</td> <td>238</td> <td>319</td> <td>363</td> <td>548</td> </tr> <tr> <td>Moyenne fine (n = 57)</td> <td>114</td> <td>198</td> <td>257</td> <td>363</td> <td>308</td> </tr> <tr> <td>Moyenne grossière (n = 90)</td> <td>152</td> <td>275</td> <td>324</td> <td>371</td> <td>594</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">En mg/kg () : nombre de données du référentiel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autres référentiels français : 70 à 1 300 mg C/kg. • Le rapport C microbien/C organique varie de 0,5 à 4,0 % C total. 		Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	114	231	326	413	690	Très fine (n = 21)	383	469	526	582	690	Fine (n = 15)	171	238	319	363	548	Moyenne fine (n = 57)	114	198	257	363	308	Moyenne grossière (n = 90)	152	275	324	371	594																								
	Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																																								
Toutes textures (n = 183)	114	231	326	413	690																																																								
Très fine (n = 21)	383	469	526	582	690																																																								
Fine (n = 15)	171	238	319	363	548																																																								
Moyenne fine (n = 57)	114	198	257	363	308																																																								
Moyenne grossière (n = 90)	152	275	324	371	594																																																								
<p>Pratiques culturelles</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PRO</th> <th>Couverts intermédiaires</th> <th>Travail du sol</th> <th>Rotations</th> <th>Systèmes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #008000;"></td> <td style="background-color: #008000;"></td> <td style="background-color: #008000;"></td> <td style="background-color: #008000;"></td> <td style="background-color: #008000;"></td> </tr> </tbody> </table>	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																							
PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																									
<p>Interprétation</p>	<p>Une valeur élevée indique que la quantité de microorganismes (bactéries, champignons et protozoaires) est élevée. Cela va se traduire par une minéralisation de la MO et une stabilité structurale potentiellement élevées.</p>																																																												


Définition	La biomasse fongique est un indicateur d'abondance de la quantité de champignons contenus dans le sol. Le compartiment fongique est estimé par biologie moléculaire à travers le dosage de l'ADNr 18S après extraction et quantification de l'ADN total du sol. Ce descripteur de la biomasse fongique a montré une sensibilité significative vis-à-vis des pratiques culturales et le mode d'utilisation des sols.																																																																										
Unité	nombre de copies de gène d'ADNr 18S/g de sol sec																																																																										
Norme	Pas de norme. La méthode de mesure est basée sur une quantification du nombre de copie de gène d'ADNr 18S par PCR en temps réel suivant le protocole de Gangneux et al., (2011).																																																																										
Relation avec les fonctions du sol	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="5">Recyclage des nutriments</th> <th colspan="5">Transformation du carbone</th> <th colspan="5">Structure du sol</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Fourniture N</th> <th colspan="2">Perte N</th> <th colspan="2">Transformation MO</th> <th>Perte MO</th> <th colspan="2">Augmentation MO</th> <th colspan="2">Erosion Battance</th> <th colspan="2">Porosité</th> <th>Stockage eau</th> </tr> <tr> <th>Ammonification</th> <th>Nitrification</th> <th>Fixation symbiotique</th> <th>Réduction du NO3</th> <th>Volatilisation</th> <th>Fragmentation</th> <th>Biodégradation</th> <th>Minéralisation (CO2)</th> <th>Stabilisation chimique</th> <th>Stabilisation physique</th> <th>Agrégation (Macro)</th> <th>Agrégation (Micro)</th> <th>Aération/Circulation eau - air</th> <th>Infiltration en eau</th> <th>Rétention en eau</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td style="background-color: #00a0e3; color: white;">+</td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table>															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											+				
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																																																													
										+																																																																	
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> Références Microbioterre : de 1,8E+05 à 7,9E+12 copies / g sol sec, avec une moyenne de 1,6E+12 copies / g sol sec. Les analyses n'ont pas montré d'effet significatif de la teneur en argile du sol (%) sur la biomasse fongique mesurée. Valeurs de références selon la texture : <table style="width:100%; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>1,8 E+5</td> <td>7,5 E+11</td> <td>1,6 E+12</td> <td>2,3 E+12</td> <td>7,9 E+12</td> </tr> </tbody> </table>  <p style="text-align: right; margin-right: 50px;">En copies / g sol sec () : nombre de données du référentiel</p> Autres référentiels français : de 1,00E+05 à 1,00E+13 copies / g sol sec 																Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	1,8 E+5	7,5 E+11	1,6 E+12	2,3 E+12	7,9 E+12																																																
	Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																																																						
Toutes textures (n = 183)	1,8 E+5	7,5 E+11	1,6 E+12	2,3 E+12	7,9 E+12																																																																						
Pratiques culturales	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>PRO</th> <th>Couverts intermédiaires</th> <th>Travail du sol</th> <th>Rotations</th> <th>Systèmes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #00a0e3;"></td> <td style="background-color: #00a0e3;"></td> <td style="background-color: #00a0e3;"></td> <td style="background-color: #00a0e3;"></td> <td style="background-color: #00a0e3;"></td> </tr> </tbody> </table>															PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																							
PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																																							
Interprétation	Une valeur élevée indique que la quantité de champignons est élevée. Cela va se traduire par une stabilité structurale potentiellement élevée.																																																																										

3.6. Indicateur de microbiologie : Protéase

Définition	La protéase est une enzyme permettant aux microorganismes du sol de se fournir en carbone. L'activité de la protéase est impliquée dans le cycle de l'azote en participant à la décomposition et minéralisation des molécules organiques azotées, tels que les protéines et les peptides, en acides aminés.																																																												
Unité	nanomole par minute et par gramme de sol sec																																																												
Mesure	La méthode de mesure est basée sur un dosage en colorimétrie suivant le protocole de Ladd & Butler, (1972).																																																												
Relation avec les fonctions du sol	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="5">Recyclage des nutriments</th> <th colspan="5">Transformation du carbone</th> <th colspan="5">Structure du sol</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Fourniture N</th> <th colspan="2">Perte N</th> <th colspan="2">Transformation MO</th> <th>Perte MO</th> <th colspan="2">Augmentation MO</th> <th colspan="2">Erosion Battance</th> <th colspan="2">Porosité</th> <th>Stockage eau</th> </tr> <tr> <th>Ammonification</th> <th>Nitrification</th> <th>Fixation symbiotique</th> <th>Réduction du NO3</th> <th>Volatilisation</th> <th>Fragmentation</th> <th>Biodégradation</th> <th>Minéralisation (CO2)</th> <th>Stabilisation chimique</th> <th>Stabilisation physique</th> <th>Agrégation (Macro)</th> <th>Agrégation (Micro)</th> <th>Aération/Circulation eau - air</th> <th>Infiltration en eau</th> <th>Rétention en eau</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #003366; color: white;">+</td> <td style="background-color: #cc0000; color: white;">-</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="background-color: #003366; color: white;">+</td> <td></td> <td></td> <td style="background-color: #003366; color: white;">+</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	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	+	-						+			+				
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																																															
+	-						+			+																																																			
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> Références Microbioterre : les valeurs s'étendent de 2,3 à 17,3 nmol/min/g sol, avec une moyenne à 6,6 nmol/min/g sol. La texture du sol a un impact sur les valeurs observées : plus la teneur en argile (texture fine) est élevée et plus l'indicateur est faible. Valeurs de références selon la texture : <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>2.3</td> <td>4.6</td> <td>6.6</td> <td>8.6</td> <td>17.3</td> </tr> <tr> <td>Très fine (n = 21)</td> <td>3.9</td> <td>4.5</td> <td>5.0</td> <td>5.4</td> <td>6.2</td> </tr> <tr> <td>Fine (n = 15)</td> <td>2.3</td> <td>4.1</td> <td>4.8</td> <td>5.7</td> <td>7.0</td> </tr> <tr> <td>Moyenne fine (n = 57)</td> <td>2.5</td> <td>5.1</td> <td>6.1</td> <td>7.2</td> <td>8.7</td> </tr> <tr> <td>Moyenne grossière (n = 90)</td> <td>2.4</td> <td>5.4</td> <td>7.6</td> <td>9.6</td> <td>17.3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; font-size: small;">En nmol/min/g () : nombre de données du référentiel</p> <ul style="list-style-type: none"> Autres référentiels français : pas de référence. 		Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	2.3	4.6	6.6	8.6	17.3	Très fine (n = 21)	3.9	4.5	5.0	5.4	6.2	Fine (n = 15)	2.3	4.1	4.8	5.7	7.0	Moyenne fine (n = 57)	2.5	5.1	6.1	7.2	8.7	Moyenne grossière (n = 90)	2.4	5.4	7.6	9.6	17.3																								
	Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																																								
Toutes textures (n = 183)	2.3	4.6	6.6	8.6	17.3																																																								
Très fine (n = 21)	3.9	4.5	5.0	5.4	6.2																																																								
Fine (n = 15)	2.3	4.1	4.8	5.7	7.0																																																								
Moyenne fine (n = 57)	2.5	5.1	6.1	7.2	8.7																																																								
Moyenne grossière (n = 90)	2.4	5.4	7.6	9.6	17.3																																																								
Pratiques culturales	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>PRO</th> <th>Couverts intermédiaires</th> <th>Travail du sol</th> <th>Rotations</th> <th>Systèmes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #009966;"></td> <td style="background-color: #009966;"></td> <td style="background-color: #009966;"></td> <td style="background-color: #009966;"></td> <td style="background-color: #009966;"></td> </tr> </tbody> </table>	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																							
PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes																																																									
Interprétation	Une valeur élevée va se traduire par une fourniture en azote, une minéralisation de la MO et une stabilité structurale potentiellement élevées.																																																												

Définition	L'arylamidase est une enzyme impliquée dans le cycle de l'azote. Cette enzyme secrétée par les microorganismes du sol, intervient dans les étapes initiales de minéralisation de l'azote. Cette enzyme dégrade les acides aminés pour fournir de l'azote minéral.																																																		
Unité	nanomole par minute et par g de sol sec																																																		
Mesure	La méthode de mesure est basée sur un dosage en colorimétrie suivant un protocole normé Norme : ISO 20130 : 2018																																																		
Relation avec les fonctions du sol	<i>Recyclage des nutriments</i>					<i>Transformation du carbone</i>					<i>Structure du sol</i>																																								
	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																																				
	+																																																		
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> Références Microbioterre : les valeurs s'étendent de 0,9 à 13,7 nmol/min/g sol, avec une moyenne à 5,2 nmol/min/g sol. La texture du sol a un impact sur les valeurs observées : plus la teneur en argile (texture fine) est élevée et plus l'indicateur est élevé. Valeurs de références selon la texture : <table border="1" style="margin-left: 20px; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>0.9</td> <td>3.1</td> <td>5.2</td> <td>7.1</td> <td>13.7</td> </tr> <tr> <td>Très fine (n = 21)</td> <td>7.4</td> <td>9.4</td> <td>10.3</td> <td>11.1</td> <td>13.7</td> </tr> <tr> <td>Fine (n = 15)</td> <td>1.8</td> <td>3.8</td> <td>4.6</td> <td>5.4</td> <td>7.9</td> </tr> <tr> <td>Moyenne fine (n = 57)</td> <td>2.9</td> <td>4.4</td> <td>5.5</td> <td>6.6</td> <td>13.4</td> </tr> <tr> <td>Moyenne grossière (n = 90)</td> <td>0.9</td> <td>2.4</td> <td>3.8</td> <td>5.0</td> <td>9.0</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-right: 20px;">En nmol/min/g () : nombre de données du référentiel</p>																Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	0.9	3.1	5.2	7.1	13.7	Très fine (n = 21)	7.4	9.4	10.3	11.1	13.7	Fine (n = 15)	1.8	3.8	4.6	5.4	7.9	Moyenne fine (n = 57)	2.9	4.4	5.5	6.6	13.4	Moyenne grossière (n = 90)	0.9	2.4	3.8	5.0	9.0
		Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																													
	Toutes textures (n = 183)	0.9	3.1	5.2	7.1	13.7																																													
	Très fine (n = 21)	7.4	9.4	10.3	11.1	13.7																																													
Fine (n = 15)	1.8	3.8	4.6	5.4	7.9																																														
Moyenne fine (n = 57)	2.9	4.4	5.5	6.6	13.4																																														
Moyenne grossière (n = 90)	0.9	2.4	3.8	5.0	9.0																																														
<ul style="list-style-type: none"> Autres référentiels français : pas de référence. 																																																			
Pratiques culturales	PRO	Couverts intermédiaires			Travail du sol			Rotations			Systèmes																																								
Interprétation	Une valeur élevée est signe d'une fourniture potentielle d'azote élevée.																																																		

3.8. Indicateur de microbiologie : Azote Biologiquement Minéralisable (ABM)

Définition	L'ABM est une mesure de la minéralisation de l'azote en conditions contrôlées (incubation anaérobie à 40 °C pendant 7 jours). La variation de teneur en azote ammoniacal entre J0 et J7 peut se traduire comme la fraction minéralisable de l'azote. Cet indicateur est comparable au potentiel de minéralisation aérobie 28 jours à 28°C, mais plus simple et rapide à mettre à œuvre.																										
Unité	mg N minéralisable /kg sol																										
Mesure	Pas de norme. Méthode adaptée de Keeney & Bremner (1966), reprise par Schomberg et al. (2009) (extraction de terre brute tamisée 5 mm avec du KCl 1 M (ratio 1/5 m/v), dosage N-NH ₄ par colorimétrie en flux continu, mesure avant et après 7 jours d'incubation en anaérobie à 40°C).																										
Relation avec les fonctions du sol	<i>Recyclage des nutriments</i>					<i>Transformation du carbone</i>					<i>Structure du sol</i>																
	Fourniture N			Perte N		Transformation MO		Perte MO	Augmentation MO		Erosion Battance		Porosité		Stockage eau												
	Ammonification	Nitrification	Fixation symbiotique	Réduction du NO ₃	Volatilisation	Fragmentation	Biodegradation	Minéralisation (CO ₂)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Agrégation (Macro)	Agrégation (Micro)	Aération/Circulation eau - air	Infiltration en eau	Rétention en eau												
	+				+						+																
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> Références Microbioterre : les valeurs s'étendent de 7,3 à 46,4 mg N/kg sol, avec une moyenne de 19,6 mg N/kg sol. L'ABM semble peu sensible à la texture du sol. <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>Min</td> <td>Faible</td> <td>Moy</td> <td>Elevée</td> <td>Max</td> </tr> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>7.3</td> <td>13.8</td> <td>19.6</td> <td>24.6</td> <td>46.4</td> </tr> </table>  <p style="text-align: right;">En mg/kg () : nombre de données du référentiel</p> <ul style="list-style-type: none"> Autres référentiels français : de 5 à 45 mg/kg. 																Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	7.3	13.8	19.6	24.6	46.4
		Min	Faible	Moy	Elevée	Max																					
Toutes textures (n = 183)	7.3	13.8	19.6	24.6	46.4																						
Pratiques culturales	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>PRO</td> <td colspan="2">Couverts intermédiaires</td> <td>Travail du sol</td> <td>Rotations</td> <td>Systemes</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #0070C0; height: 15px;"></td> <td colspan="2" style="background-color: #0070C0; height: 15px;"></td> <td style="background-color: #0070C0; height: 15px;"></td> <td style="background-color: #0070C0; height: 15px;"></td> <td style="background-color: #0070C0; height: 15px;"></td> </tr> </table>															PRO	Couverts intermédiaires		Travail du sol	Rotations	Systemes						
PRO	Couverts intermédiaires		Travail du sol	Rotations	Systemes																						
Interprétation	Une valeur élevée aura pour conséquences potentielles une fourniture en azote élevée, des pertes d'azote par volatilisation de l'azote apporté élevées et une bonne stabilité structurale du sol.																										

3.9. Indicateur de microbiologie : β -D-glucosidase (GLU)

Définition	La β -D-glucosidase joue un rôle important dans le cycle du carbone, elle intervient dans l'étape finale de dégradation des grosses molécules constituant la MO, comme la cellulose. Cette enzyme est retrouvée en plus grande abondance dans les sols comparativement à d'autres enzymes participant au recyclage du carbone, ce qui suggère que les produits de l'hydrolyse impliquant la β -D-glucosidase sont une source d'énergie importante pour les microorganismes des sols.																																																		
Unité	nanomole par minute et par g de sol sec																																																		
Mesure	La méthode de mesure est basée sur un dosage en colorimétrie suivant un protocole normé Norme : ISO 20130 : 2018																																																		
Relation avec les fonctions du sol	<i>Recyclage des nutriments</i>					<i>Transformation du carbone</i>					<i>Structure du sol</i>																																								
	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																																				
	+	+						+				+																																							
Gamme de variation	<ul style="list-style-type: none"> Références Microbioterre : les valeurs s'étendent de 0 à 54,5 nmol/min/g sol, avec une moyenne de 18,6 nmol/min/g sol. La texture du sol a un impact sur les valeurs observées : plus la teneur en argile (texture fine) est élevée et plus l'indicateur est élevé. Valeurs de références selon la texture : <table border="1" style="margin-left: 40px; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Min</th> <th>Faible</th> <th>Moy</th> <th>Elevée</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Toutes textures (n = 183)</td> <td>0</td> <td>12.6</td> <td>18.6</td> <td>23.4</td> <td>54.5</td> </tr> <tr> <td>Très fine (n = 21)</td> <td>15.1</td> <td>21.9</td> <td>31.0</td> <td>37.4</td> <td>54.5</td> </tr> <tr> <td>Fine (n = 15)</td> <td>13.8</td> <td>18.5</td> <td>24.2</td> <td>29.0</td> <td>40.3</td> </tr> <tr> <td>Moyenne fine (n = 57)</td> <td>0</td> <td>12.3</td> <td>15.2</td> <td>19.2</td> <td>32.1</td> </tr> <tr> <td>Moyenne grossière (n = 90)</td> <td>3.1</td> <td>13.7</td> <td>17.0</td> <td>20.4</td> <td>33.4</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-right: 20px;">En nmol/min/g () : nombre de données du référentiel</p> 																Min	Faible	Moy	Elevée	Max	Toutes textures (n = 183)	0	12.6	18.6	23.4	54.5	Très fine (n = 21)	15.1	21.9	31.0	37.4	54.5	Fine (n = 15)	13.8	18.5	24.2	29.0	40.3	Moyenne fine (n = 57)	0	12.3	15.2	19.2	32.1	Moyenne grossière (n = 90)	3.1	13.7	17.0	20.4	33.4
		Min	Faible	Moy	Elevée	Max																																													
	Toutes textures (n = 183)	0	12.6	18.6	23.4	54.5																																													
	Très fine (n = 21)	15.1	21.9	31.0	37.4	54.5																																													
Fine (n = 15)	13.8	18.5	24.2	29.0	40.3																																														
Moyenne fine (n = 57)	0	12.3	15.2	19.2	32.1																																														
Moyenne grossière (n = 90)	3.1	13.7	17.0	20.4	33.4																																														
<ul style="list-style-type: none"> Autres référentiels français : de 0 à 195.8 nmol/min/g sol 																																																			
Pratiques culturales	PRO		Couverts intermédiaires			Travail du sol			Rotations			Systèmes																																							
Interprétation	Une valeur élevée aura pour conséquences potentielles un flux de carbone élevé pour les microorganismes, une minéralisation élevée de la MO et une bonne stabilité structurale.																																																		

Remarque sur les enzymes

Les trois enzymes protéolytiques protéase, LAP et ARYL N interviennent dans le même cycle, celui de l'azote. Les deux enzymes LAP et protéase interviennent dans les mêmes étapes de dégradation des protéines et peptides ; leur produit de dégradation est soumis à l'action de l'ARYL N. Il est important de noter que la mesure d'une seule enzyme dans chacun des cycles (une pour l'azote et une pour le carbone) peut suffire pour le diagnostic et permettra de faire baisser le coût en faisant analyser moins d'indicateurs.

4. Mode opératoire de prélèvement, de conditionnement et d'envoi d'échantillons de terre en vue d'une analyse d'indicateurs microbiologiques

Le mode opératoire de prélèvement de terre pour une analyse biologique est très proche de celui pour une analyse chimique. La différence réside surtout dans la période de prélèvement, le conditionnement et l'envoi car les paramètres biologiques sont sensibles aux conditions de température et d'humidité. Ce prélèvement peut donc être couplé à l'analyse physico-chimique de terre avec quelques précautions. Pour cela, s'assurer notamment que la quantité de terre prélevée soit suffisante pour le laboratoire.

4.1. Renseignements nécessaires

Avant analyse, il est nécessaire d'échanger avec l'agriculteur sur ses objectifs et les éventuelles analyses déjà réalisées. La Partie 6 présente ces éléments.

4.2. Préparation des consommables

Contactez votre laboratoire pour avoir la marche à suivre (réalisation de devis, envoi de consommables et procédure). Utiliser un sachet plastique neuf, suffisamment épais et résistant pour contenir plusieurs kilogrammes de terre. Bien identifier l'échantillon sur le sachet (inscription au feutre indélébile et/ou étiquette à coller). Reportez l'identification sur une fiche de renseignement accompagnant le sachet, en précisant les analyses demandées et les pratiques culturales.

Inscrire sur le sachet au feutre indélébile le nom de la parcelle, la date de prélèvement, la profondeur et coller l'étiquette code barre le cas échéant :

- Coller la contre-étiquette sur la fiche de prélèvement le cas échéant
- Indiquer le ou les menus choisis ainsi que les informations indiquées sur le sac et la fiche

4.3. Matériels nécessaires et consommables

- Couteau
- Feutre indélébile ou crayon
- Fiche de renseignements
- Fiche étiquettes code barre
- GPS
- Sacherie spécifique « analyse biologique »
- Seau
- Tarière de type Edelman ou préleveur à percussion

4.4. Période de prélèvement

- Prélever de préférence au printemps (éventuellement à l'automne) sur un sol proche de la capacité au champ (ni trop sec, ni trop humide) et avec une température moyenne journalière de l'air supérieure à 8 °C et inférieure à 25°C. Proscrire le prélèvement sur sol sec ou gelé.
- Veiller à réaliser le prélèvement :
 - Avant tout épandage de produit organique, d'enfouissement de résidus de culture ou destruction de couvert. Si ce n'est pas possible, il faut un délai minimum de 2 à 3 mois entre le prélèvement et le dernier apport de carbone au sol
 - Avant tout apport d'amendement minéral basique, ou 6 mois après le dernier apport
 - Impérativement avant un labour ou autre travail profond et si possible avant un travail superficiel
 - Après la valorisation de tout apport d'engrais minéral (pluie supérieure à 15 – 20 mm) et au moins 4 à 5 semaines après le dernier apport
- Le prélèvement doit avoir lieu en début de semaine afin de limiter le temps d'attente lors du transport (éviter les envois le vendredi).

Selon le ou les menus d'analyse demandés au laboratoire, la quantité de terre à transmettre varie (entre 500 g et 3 kg maximum). A noter que si plusieurs menus sont demandés, il est préférable de n'envoyer qu'un seul échantillon contenant la somme des quantités de terre requise pour chaque menu, plutôt que plusieurs échantillons correspondant chacun à un menu. Cela limitera la variabilité de mesure, la redondance entre analyses et le coût de préparation.

4.5. Choix de la zone de prélèvement

- Si des analyses ont déjà eu lieu, retourner dans la zone historique de prélèvement de la parcelle
- Sinon, identifier une zone homogène et représentative de la parcelle, en évitant les tournières, les zones de stockage de fumier, ... Se placer au centre de la zone et noter les coordonnées à l'aide du GPS
- Evaluer la proportion de cailloux en surface et la renseigner dans la fiche (figure N°)

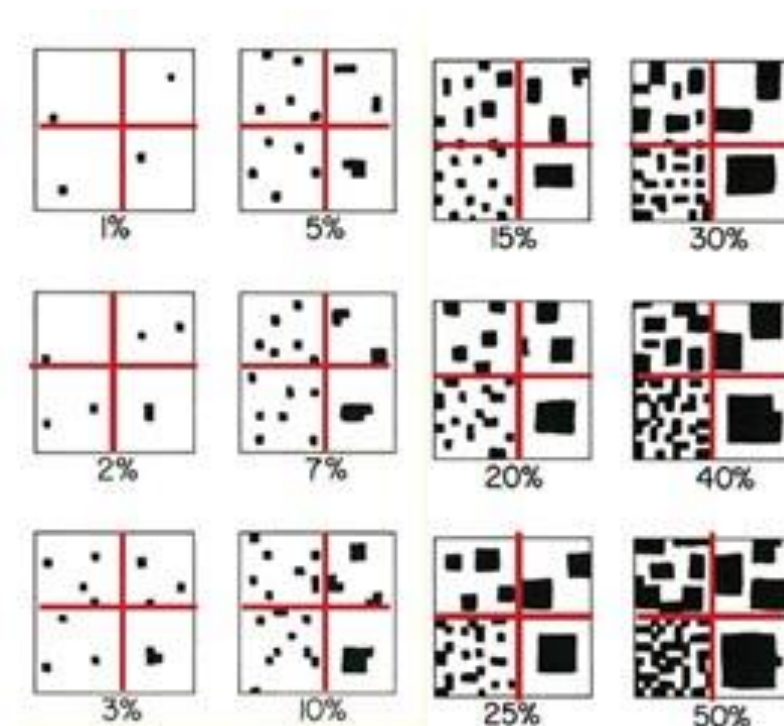


Figure 5 Grille d'estimation visuelle du % en surface d'éléments grossiers (Limaux et al., 1998)

4.6. Evaluation de la structure du sol

Evaluer la structure du sol au moyen d'un test bêche. Deux propositions de méthodes sont disponibles :

- Méthode ISARA (https://orgprints.org/32099/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf)
- Méthode VESS (https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/sol/fichiers_pdf/GEODE_SOLS_VESS_A_Test_b%C3%A0che_Horizon_A_score_chart_FR_2018.pdf)

4.7. Prélèvement et mise en sachet

- Sur une profondeur de 20 cm, à l'aide de la tarière, prélever et déposer dans le seau au minimum 12 à 15 prises élémentaires à la périphérie d'un cercle de 10 à 15 mètres de rayon, pour constituer un échantillon moyen de la zone sélectionnée (Figure 6). Mélanger soigneusement le contenu du seau à l'aide du couteau, après dissociation manuelle des mottes si nécessaire et retrait des éléments très grossiers (cailloux, débris végétaux).
- Remplir le sachet de prélèvement en veillant à ce que la quantité de terre satisfasse les besoins du laboratoire. Enfin fermer le sachet.

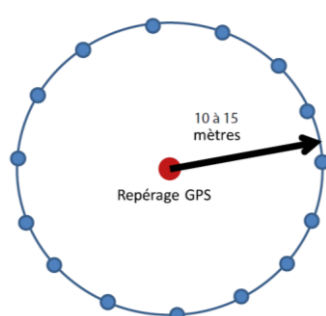


Figure 6 Schéma de prélèvement parcellaire (source ARVALIS)

4.8. Gestion (stockage avant envoi) et envoi des échantillons

- Envoyer l'échantillon au plus tôt après son prélèvement
- Choisir un envoi rapide, afin que le laboratoire reçoive les échantillons le plus vite possible
- S'il n'est pas possible d'envoyer au laboratoire l'échantillon sitôt le prélèvement réalisé ou avant le mercredi, un stockage au réfrigérateur à 5 °C minimum est possible pendant quelques jours
- Proscrire le stockage au congélateur, qui peut tuer une partie des micro-organismes du sol.

5. Laboratoires de routine proposant des analyses biologiques

Il n'existe pas de liste officielle des laboratoires de routine pratiquant des analyses biologiques de terre (GEMAS, 2021). Voici néanmoins ceux qui ont été identifiés (non exhaustif) :

Laboratoire	Coordonnées
AUREA AGROSCIENCES	- Adresse : 270 All. de la Pomme de Pin, 45160 Ardon - Tél. : 01 44 31 40 40
CELESTA-LAB	- Adresse : 154, rue Georges Guynemer, 34130 Muguio - Tél. : 04 67 20 10 90
SADEF	- Adresse : 30 Rue de la Station, 68700 Aspach-le-Bas - Tél. : 03 89 62 72 30
SEMSE	- Adresse : 2, Chemin du Lavoir, 21310 Vieuvigne - Tél. : 03 80 75 37 65

6. Caractérisation des pratiques et objectifs de l'agriculteur

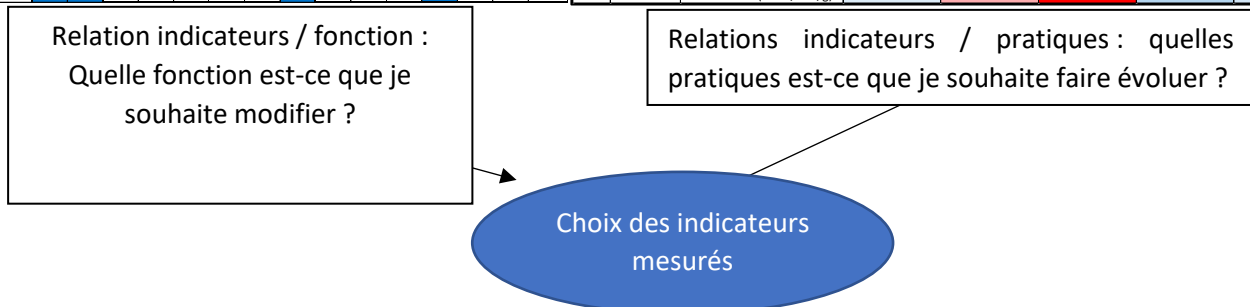
La première étape du diagnostic est la caractérisation des pratiques de l'agriculteur à travers les différents leviers étudiés dans Microbioterre :

- Le système de culture (types de culture, rotation, durée, etc.)
- Intensité et type de travail du sol
- Apports de Produits Résiduaux Organiques (disponibilités, types, ...)
- Implantation et gestion des couverts intermédiaires et plantes compagnes
- Pratiques de fertilisation, notamment azotée, amendements et si possible pratiques phytosanitaires

A partir de cet état des lieux des pratiques, il s'agit d'identifier les problématiques de l'agriculteur sur les fonctions et processus étudiés : réduction engrais, stockage carbone, amélioration de la structure du sol, ... et ses objectifs (maintien, augmentation, diminution) sur les différents leviers disponibles. Ainsi, il pourra faire le choix de certains indicateurs à suivre en priorité et/ou à suivre dans le temps.

Indicateurs	Recyclage des nutriments			Transformation du carbone						Structure du sol			Indicateurs du Menu Microbioterre	PRO	Couverts intermédiaires	Réduction travail du sol	Rotation	Systèmes de culture	
	Fourniture N		Perte N	Transformation MO	Perte MO	Augmentation MO		Erosion substance	Porosité		Stockage eau								
	Ammonification	Nitrification	Fixation symbiotique	Réduction du NO3	Volatilisation	Fragmentation	Biodegradation	Minéralisation (CO2)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Apport (Micro)	Apport (Macro)							Apport (Micro)
C org (%)	+	+						+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
C 0-50 µm (%)																			
C 50-200 µm (%)																			
C 200-2000 µm (%)																			
C KMnO4 (mg/kg)																			
N total (%)	+	+																	
N 0-50 µm (%)																			
N 50-200 µm (%)	+	+																	
C microbien (mg/kg)																			
18S (copies/g)																			
LAP (nmol/min/g)	+	+																	
ARYLN (nmol/min/g)	+	+																	
Protéase (nmol/min/g)	+																		
ABM (mg/kg)	+																		
B-Glu (nmol/min/g)	+	+																	

Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)	16%	6%	2%	2%	4%
		C 0-50 (%)	-4%	-3%	-2%	1%	-1%
Azote	C 50-200 (%)	35%	42%	3%	-5%	10%	
	C 200-2000 (%)	16%	27%	10%	-3%	13%	
	C 50-2000 (%)	27%	37%	22%	-4%	10%	
	C labile oxydé (mg/kg)	32%	2%	6%	13%	7%	
	N total (%)	19%	5%	4%	13%	5%	
Abondance	N 0-50 (%)	-3%	0%	0%	1%	-1%	
	N 50-200 (%)	40%	10%	6%	-8%	10%	
	N 50-2000 (%)	34%	6%	5%	-12%	13%	
	Biomasse microbienne (mg/kg)	38%	7%	7%	23%	20%	
Activités	18S (copies/g)	82%	29%	42%	65%	4%	
	ABM (mg/kg)	36%	12%	-1%	8%	1%	
	Protéase (nmol/min/g)	26%	11%	-9%	7%	15%	
	Leucine amino-peptidase (nmol/min/g)	22%	9%	1%	18%	12%	
	Arylamidase (nmol/min/g)	36%	17%	10%	30%	21%	
	Glucosidase (nmol/min/g)	11%	-6%	-20%	24%	14%	



Les éléments de pratique culturale présentés dans les tableaux suivants sont indispensables à l'interprétation et à la discussion :

- **Système de cultures et durée de la rotation :**

		Année n	n-1	n-2	n-3	n-4	Objectifs, évolution souhaitée
Cultures principales sur la rotation	Type d'organe récolté						
	Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes						
	Humidité de référence organe récolté (%)						
	Devenir des résidus						
	Quantité de résidus (t MS /ha)						

• **Intensité et type de travail du sol :**

		Année n, n-1, n-2 ...		Objectifs, évolution souhaitée
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus profond			
	Profondeur travail le plus profond (cm)			
	Profondeur estimée ou mesurée (cm) ?			
	Type d'outil			
	Nombre de passages de travail du sol entre récolte précédent et semis compris			
Travail du sol après semis	Type			
	Nombre de passages			

• **Apports de Produits Résiduaire Organiques :**

		année n, n-1, n-2 ...		Objectifs, évolution souhaitée
Produits résiduaire organiques (PRO) : produits 1, 2, ...	Type de PRO			
	Quantité apportée (t/ha de matière brute MB)			
	% de matière sèche M.S.			
	C total ‰ de minéralisation biologique MB			
	N total ‰ de MB			
	N-NH ₄ ‰ de MB			
	ISMO (Indicateur de la stabilité des MO)			
	Mois d'épandage de PRO			

• **Implantation et gestion des couverts intermédiaires et plantes compagnes :**

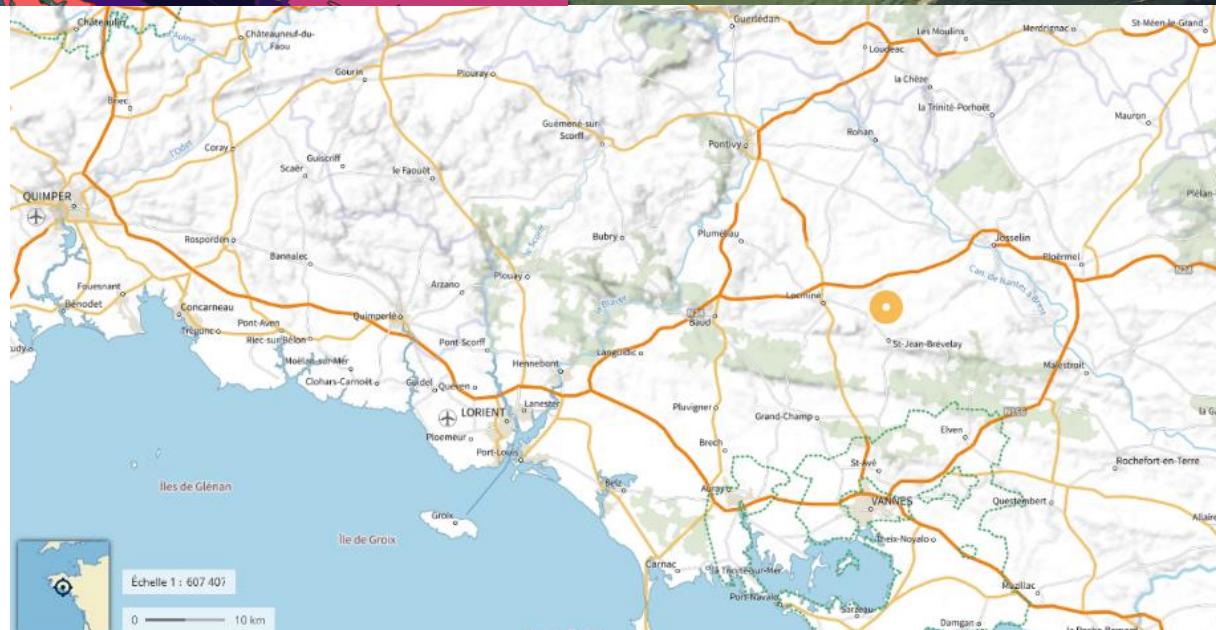
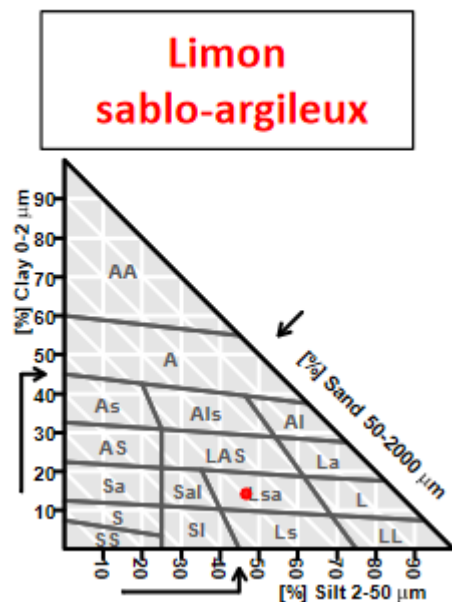
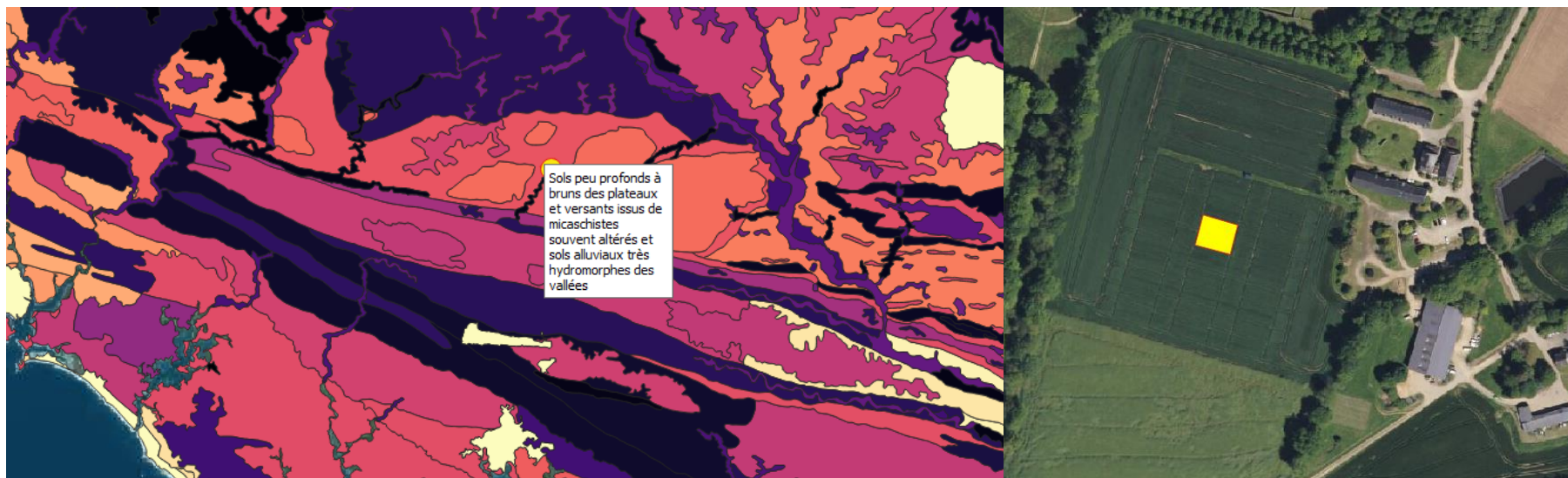
		année n, n-1, n-2 ...		Objectifs, évolution souhaitée
CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses	Composition (espèces présentes ou a minima famille)			
	Biomasse (t MS/ha) à la date de destruction			
	Estimation de la biomasse si non mesurée			
	Teneur en azote (% N)			
	Date de levée			
	Date destruction			
	Mode de destruction			
	Devenir de la biomasse			
	Mode incorporation dans le sol			
Couvert associé à la culture	Couvert ou culture			
	Date implantation			
	Date destruction			

- **Pratiques de fertilisation, notamment azotée, amendements et si possible pratiques phytosanitaires :**

		année n, n-1, n-2 ...		Objectifs, évolution souhaitée
Amendement	Type			
	Quantité (t/ha)			
	Valeur neutralisante (VN/ha)			
Fertilisation minérale / an pour chaque culture de la rotation	N (kg/a)			
	P ₂ O ₅ (kg/ha)			
	K ₂ O (kg/ha)			
IFT (si connu)	IFT total (herbicide, fongicide et insecticide)			

7. Exemple de démarche

7.1. Présentation de la parcelle : essai Travail du sol Kerguehenec – modalité TCS fumier volaille



7.2. Fiche de renseignement ITK et objectifs de l'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
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus profond	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Maintien en non labour.
	Profondeur travail le plus profond (cm)	12	10	10	10	
	Type d'outil	Canadien	Canadien	Canadien	Canadien	
	Nb de passages de travail du sol entre récolte précédent et semis compris	3	2	2	2	
Travail du sol après semis	Type	aucun	aucun	aucun	aucun	
	Nombre de passages					
Culture principale	Type d'organe récolté	Grain	Grain	Grain	Grain	Exportation/valorisation extérieure des pailles ? Amélioration des rendements colza (semis plus précoce)
	Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes	12.3	7.5	2.4	8.9	
	Devenir des résidus	Cannes broyées	Paille broyée	Caille 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 Augmenter la biomasse du couvert entre blé et maïs en semant plus tôt.
	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	
Produits résiduaux organiques (PRO) : produit 1	Type de PRO	fumier volaille	fumier volaille	fumier volaille	fumier volaille	Manque de disponibilité du fumier de volaille à moyen terme. Echange paille/fumier à renégocier.
	Quantité apportée (t/ha de matière brute, MB)	9	9	6	8,5	
	% matière sèche (M.S.)	52,2	50,6	44,4	79,7	
	C total (% MB)	336	392	140	305	
	N total (% MB)	23,9	21,5	21,0	22,8	
	C/N	14,0	18,2	6,6	13,3	
	mois d'épandage de PRO	avril	mars	septembre	Mars	
Amendement	Type	Pas d'amendement				pH entretenu par le 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	

7.3. 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 gamma témoin d'une structure aérée, peu tassée. Elle est favorable à l'oxygénation du sol et aux activités aérobies des microorganismes ainsi qu'à l'exploration par les racines du colza.

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



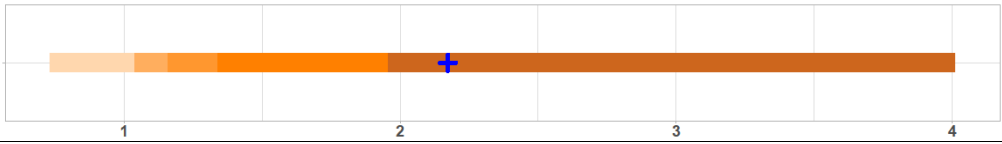
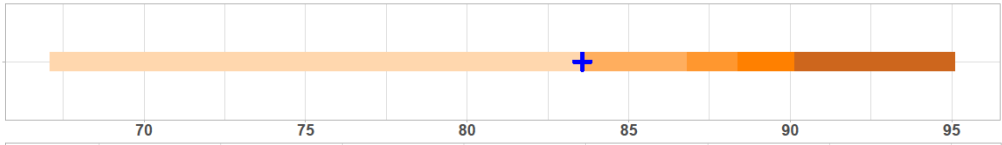
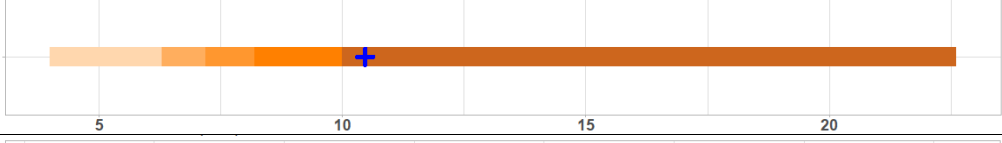
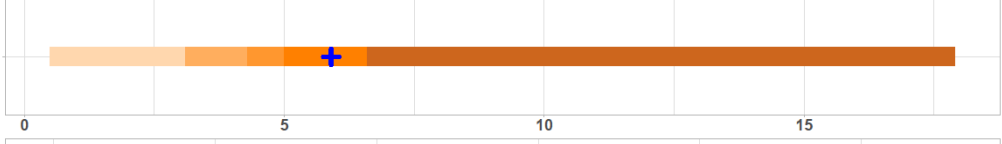
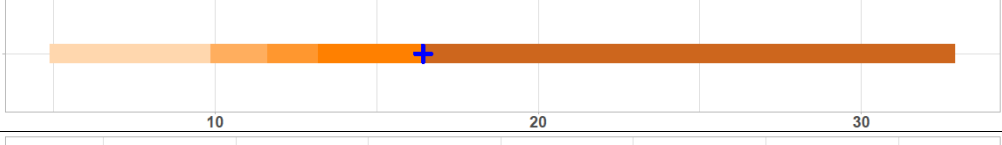
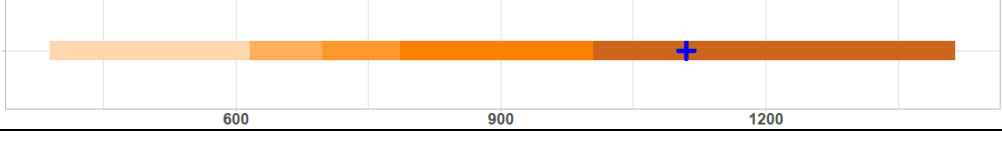
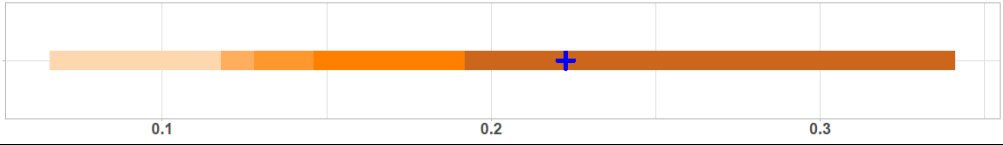
7.4. Simulation de l'évolution du carbone organique dans les sols à 30 ans

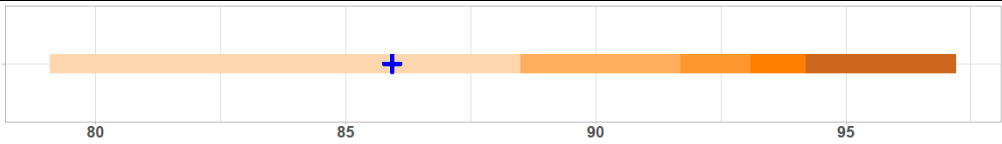
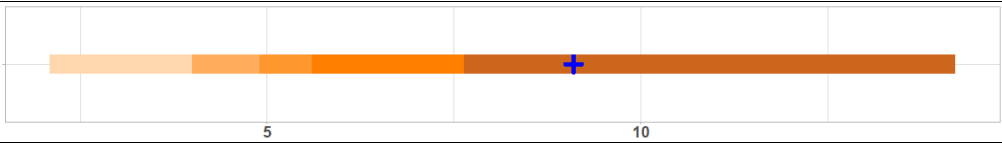
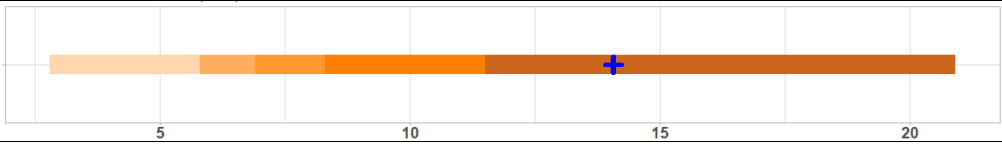
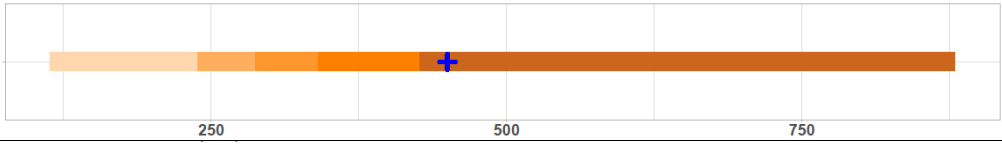
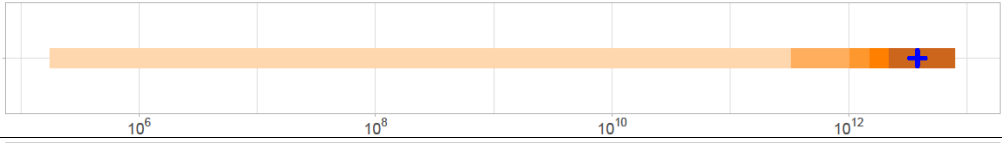
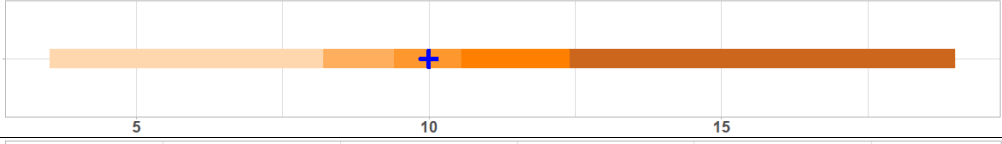
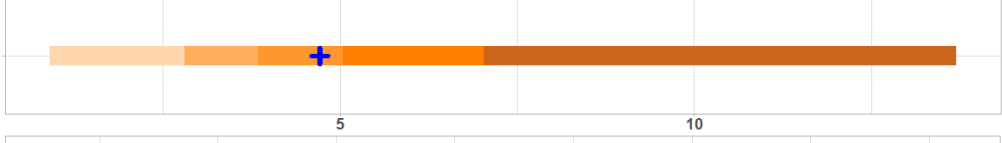
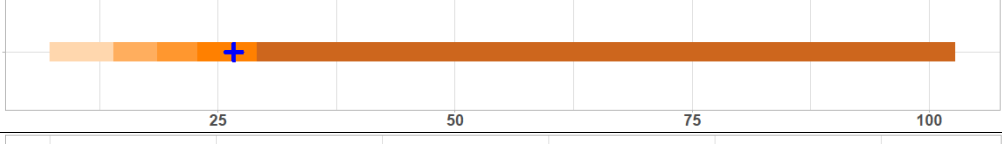
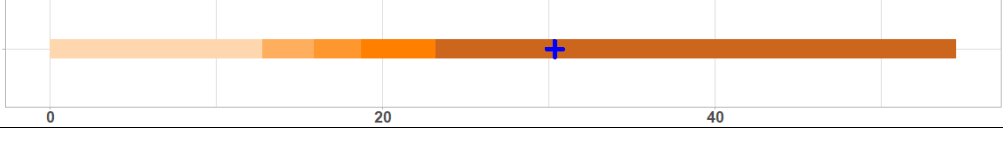
Essais système étudiés	Carbone humifié PRO	Carbone humifié COUVERT	Carbone humifié RESIDUS	Carbone MINERALISE TOTAL	Evolution tx MO 30 ans
TCS fumier volaille	51		4	87	0.8

- 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.

7.5. Indicateurs mesurés : valeurs et niveaux des indicateurs dans le référentiel

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
Azote total (%)		0,22	Très élevé	Somme de l'azote organique et azote minéral Teneur très élevée

N 0-50 µm (%)		85,93	Très faible	Azote présent dans les matières organiques liées du sol Teneur très faible
N 50-200 µm (%)		9,10	Très élevé	Azote présent dans les matières organiques libres du sol Teneur très élevée
N 50-2000 µm (%)		14,07	Très élevé	Azote présent dans les matières organiques libres du sol Teneur très élevée
C microbien (mg/kg)		449,90	Très élevé	Quantité des microorganismes totaux dans le sol Quantité très élevée
18S (copies/g)		3,83E+12	Très élevé	Quantité de champignons dans le sol Quantité très élevée
LAP (nmol/min/g)		10,00	Moyen	Activité impliquée dans la minéralisation de l'azote Activité à un niveau moyen
ARYLN (nmol/min/g)		4,71	Moyen	Activité impliquée dans la minéralisation de l'azote Activité à un niveau moyen
Azote minéralisable (mg/kg)		26,67	Elevé	Quantité d'azote potentiellement minéralisable Quantité élevée
B-Glu (nmol/min/g)		30,33	Très élevé	Activité impliquée dans la minéralisation du carbone Activité à un niveau très élevé

7.6. 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	+	+													
N 50-2000 µm (%)	14.1	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	+	+						+				+			

Interprétation générale :

Le système de culture est productif. Le sol présente une structure et une aération favorables au développement des cultures. L'ensemble des indicateurs mesurés est à un niveau élevé dans le référentiel Microbioterre, sauf pour les fractions stables, liées (fractions 0-50 µm) du carbone et de l'azote. Le système de culture permet un stockage additionnel de carbone.

<i>Composantes de la fertilité biologique</i>	<i>Niveau mesuré</i>
Matières organiques fraîches et labiles : « le carburant »	Elevé
Biomasses microbiennes et fongiques : « le moteur »	Elevé
Activités enzymatiques : « la vitesse »	Elevé

<i>Synthèse des indicateurs</i>	<i>Recyclage des nutriments</i>		<i>Transformation du carbone</i>			<i>Structure du sol</i>		
	<i>Fourniture N</i>	<i>Perte N</i>	<i>Transformation MO</i>	<i>Perte MO</i>	<i>Augmentation MO</i>	<i>Erosion Battance</i>	<i>Porosité</i>	<i>Stockage d'eau</i>
Effets sur les fonctions du sol	++	++	-	++	++	++	++	++

Fonctions de recyclage des nutriments

Diagnostic : un niveau de fourniture d'azote élevé par ammonification et nitrification, un risque élevé de perte d'azote par réduction du NO₃ et par volatilisation si les apports azotés ne sont pas ajustés.

Cette fonction est pilotée par des apports importants et réguliers de fumiers de volaille et la restitution d'une importante quantité de résidus de cultures. Les apports de fumier de volaille peuvent être diminués sans impacter la fonction de fourniture d'azote par le sol à court terme. Surveiller ce point avec la réflexion sur les couverts végétaux.

Fonctions transformation du carbone

Diagnostic : des processus de transformation du carbone potentiellement dégradés, en parallèle de processus de minéralisation de la MO élevés, une augmentation potentielle de la MO.

De même ces fonctions sont activées par les importantes restitutions de résidus de cultures et les apports réguliers de PRO. La diminution potentielle des apports de fumiers doit être réfléchi conjointement à la mise en œuvre de couverts d'interculture plus développés.

Fonction de structure du sol :

Diagnostic : des processus d'agrégation potentiellement élevés limitant la battance. Leur maintien peut être assuré par les restitutions de résidus de culture et le développement des couverts d'interculture.

8. Sources

Bispo A., Grand C. et Galsomies L., Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols", Étude et Gestion des Sols, Volume 16, 3/4, 2009 – p. 145 à 158

Balloy B. et al., 2017. Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols [Disponible en ligne : <https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-letat-organique-et-biologique-des-sols>].

FAO, 2015. International year of Soils ressources. [Disponible en ligne : <https://www.fao.org/soils-2015/resources/promotional-material/fr/>]

Gangneux, C., Akpa Vincelas, M., Sauvage, H., Desaire, S., Houot, S., Laval, K., 2011. Fungal, bacterial and plant dsDNA contributions to soil total DNA extracted from silty soils under different farming practices: Relationships with chloroform-labile carbon. Soil Biology & Biochemistry. doi:10.1016/j.soilbio.2010.11.012.