

Séminaire de restitution du projet Microbioterre

9h00-9h15 - Mot d'accueil de la Direction d'UniLaSalle-Campus de Rouen/ Présentation du déroulé de la journée

9h15-12h05- Présentation du projet Casdar Microbioterre

- 9h15 : Génèse du projet – *Arvalis*
- 9h30 : Sites échantillonnés – *Terres Inovia*
- 9h45 : Indicateurs physico-chimiques et biologiques suivis – *UniLaSalle*
- 10h10 : Stratégie d'échantillonnage – *Aurea*

10h20 : Temps d'échanges

10h40-10h55 : Pause

- 10h55 : Résultats : Choix du menu Microbioterre – *UniLaSalle/INRAE*
 - Résultats « Liens indicateurs/ fonctions »
 - Résultats « Liens indicateurs pratiques »

11h40 : Temps d'échanges

12h00 - 13h30 : Pause déjeuner

13h30- 16h30 - L'outil Microbioterre

- 13h30 : Recommandations pour le prélèvement des échantillons – *Aurea*
- 13h40 : Construction & évaluation du référentiel d'interprétation Microbioterre – *UniLaSalle*

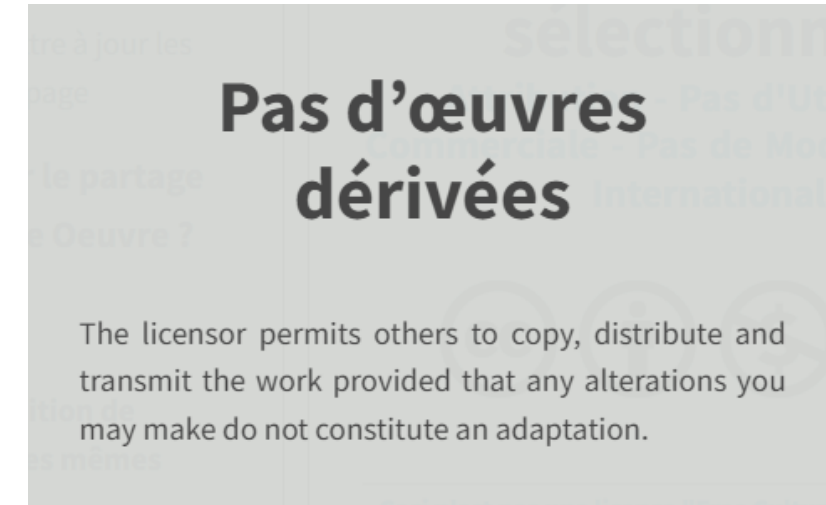
14h20 : Temps d'échanges

- 14h30 : Présentation de cas d'étude – *CA de Bretagne/ CA d'Alsace*
- 15h30 : Communication & Diffusion – *Arvalis*

15h40: Temps d'échanges

16h20-16h30 : Conclusion et Perspectives

16h30 : Clôture du séminaire



Des indicateurs microbiologiques dans l'analyse de terre de routine

« Présentation du projet Casdar Microbioterre »

Barbot Christophe¹, Bennegadi-Laurent Nadia², Bouthier Alain³, Cusset Elodie², Deschamps Thibaud⁴, Gendre Sophie³, Houot Sabine⁵, Leclerc Blaise⁶, Perrin Anne-Sophie⁷, Recous Sylvie⁸, Riah-Anglet Wassila², Roussel Pierre-Yves⁹, Trinsoutrot-Gattin Isabelle², Valé Matthieu¹⁰

¹Chambre d'agriculture d'Alsace, ²UNILASALLE, unité de recherche AGHYLE, ³ARVALIS, ⁴PUR Projet, ⁵INRAE UMR ECOSYS, ⁶ITAB, ⁷TERRES INOVIA, ⁸INRAE, URCA UMR FARE, ⁹Chambre d'agriculture de Bretagne, ¹⁰AUREA AgroSciences

Pilote



Partenaires financés



Partenaires non financés



Soutien



Génèse du projet

Gendre Sophie *et al.*



Microbioterre – Génèse du projet

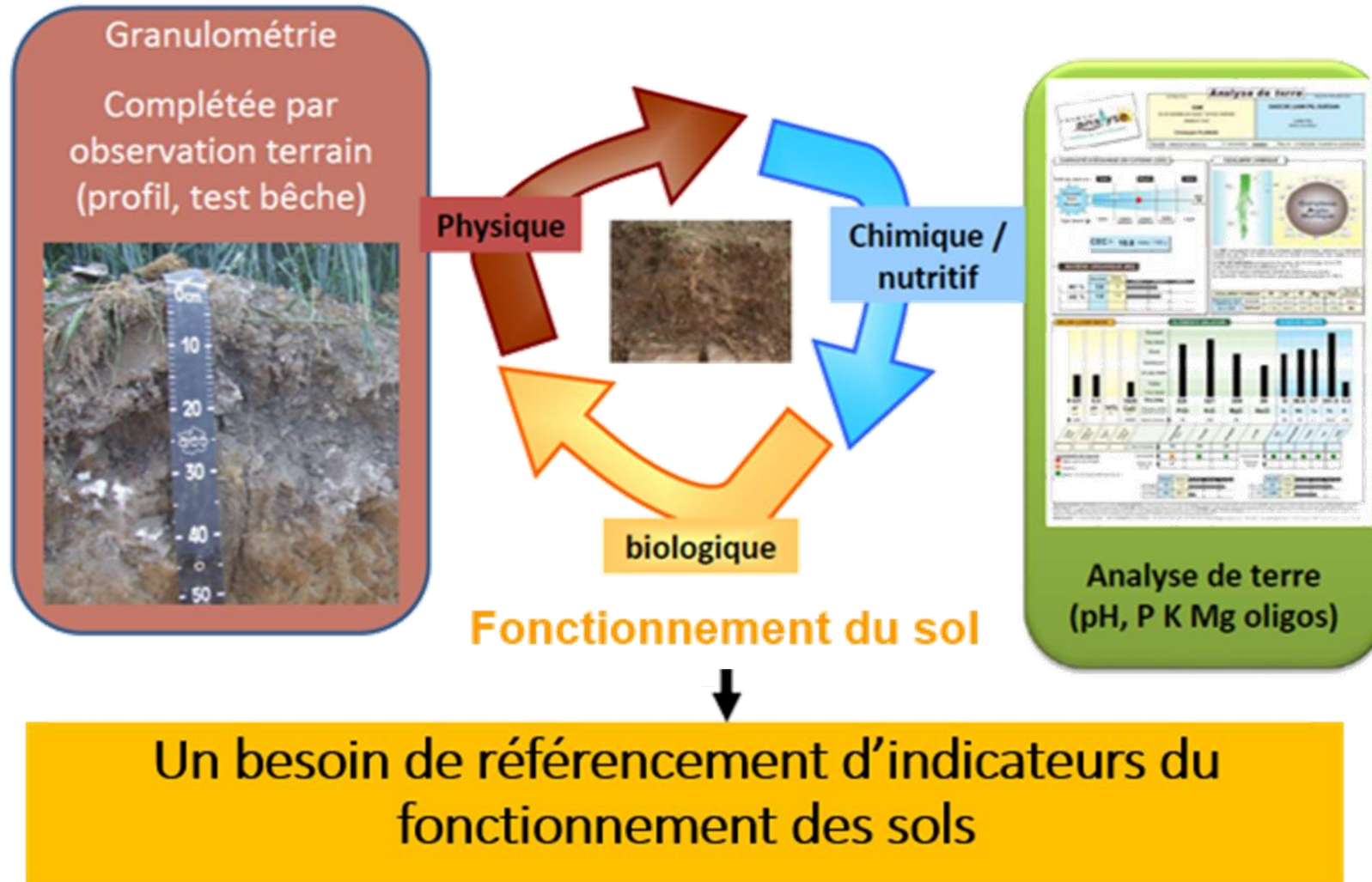
- ❖ Contexte global du projet
- ❖ Objectifs du projet
- ❖ Enjeux & questions du projet
- ❖ Organisation du projet

Contexte du projet Microbioterre

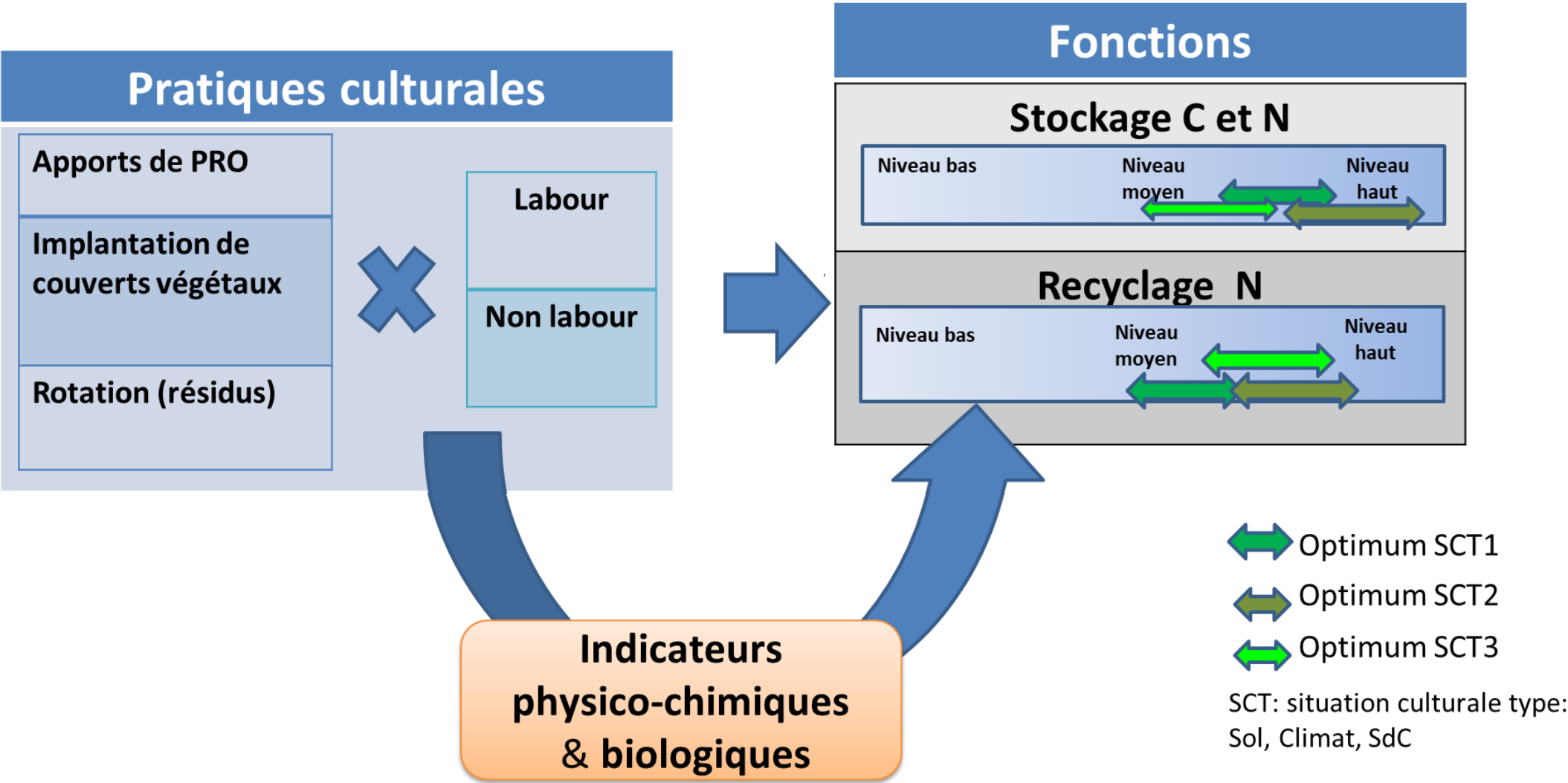
- ❖ Développer des pratiques favorables à un **fonctionnement biologique du sol** qui contribuent à un meilleur recyclage des nutriments, dont l'azote.
- ❖ **Réduction de la dépendance aux engrais minéraux** de synthèse des systèmes
- ❖ Volonté des agriculteurs de faire évoluer leurs systèmes de culture vers des **systèmes plus durables**



Contexte du projet Microbioterre



Contexte du projet Microbioterre



Objectif du projet Microbioterre

Référencer des **indicateurs de microbiologie des sols** en vue de les intégrer dans **l'analyse de terre de routine**, et **améliorer la gestion des restitutions organiques** dans les systèmes de grande culture et polyculture-élevage



Enjeux du projet Microbioterre

- **Quels indicateurs** choisir pour *évaluer la fertilité biologique* des sols en lien avec les fonctions de dégradation des matières organiques et le recyclage de nutriments ?
- Comment **interpréter ces mesures d'indicateurs** ?
 - Besoin d'un *référentiel*
 - Besoin de clarifier les relations Indicateurs microbiologiques / *Fonctions*
- **Quelles pratiques mettre en œuvre** pour évaluer et améliorer les fonctions des sols selon les *objectifs spécifiques de l'agriculteur* ?

Microbioterre: 4 actions structurantes

1/Valoriser les acquis antérieurs au projet : autres projets, bibliographie, expertise pour caler la démarche de diagnostic

2/Etude au champ des « réponses » des bio-indicateurs sur essais de longue durée

Référencer des indicateurs de microbiologie des sols en vue de les intégrer dans l'analyse de terre

3/Proposition d'un schéma interprétatif complet avec bio-indicateurs retenus et test en parcelle agricole

4/Diffusion et transfert des résultats, actions de formation

Microbioterre: Détails des actions & tâches

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

Stratégie méthodologique

Perrin Anne-Sophie, Bennegadi-Laurent Nadia et Valé Matthieu



Microbioterre: Méthodologie

- ❖ Dispositifs expérimentaux étudiés
- ❖ Mesures effectuées
- ❖ Observations de terrain
- ❖ Stratégie d'échantillonnage
- ❖ Construction de la BDD Microbioterre

Dispositifs expérimentaux étudiés



Perrin Anne-Sophie *et al.*



Dispositifs étudiés : critères de sélection

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

Sites expérimentaux échantillonnés

Essais agronomiques
Campagne 2017 - 2018

- 18 sites (20 essais)
- 61 modalités agronomiques
- Profondeur de prélèvement

0 – 20 cm

Pratiques culturales :

Mises en place depuis minimum 5 ans

5 pratiques culturales :

Durée de la rotation

Rotation longue vs. Rotation courte (ref.)

Travail du sol

Travail superficiel ou SD vs. Labour (ref.)

Couverts Intermédiaires

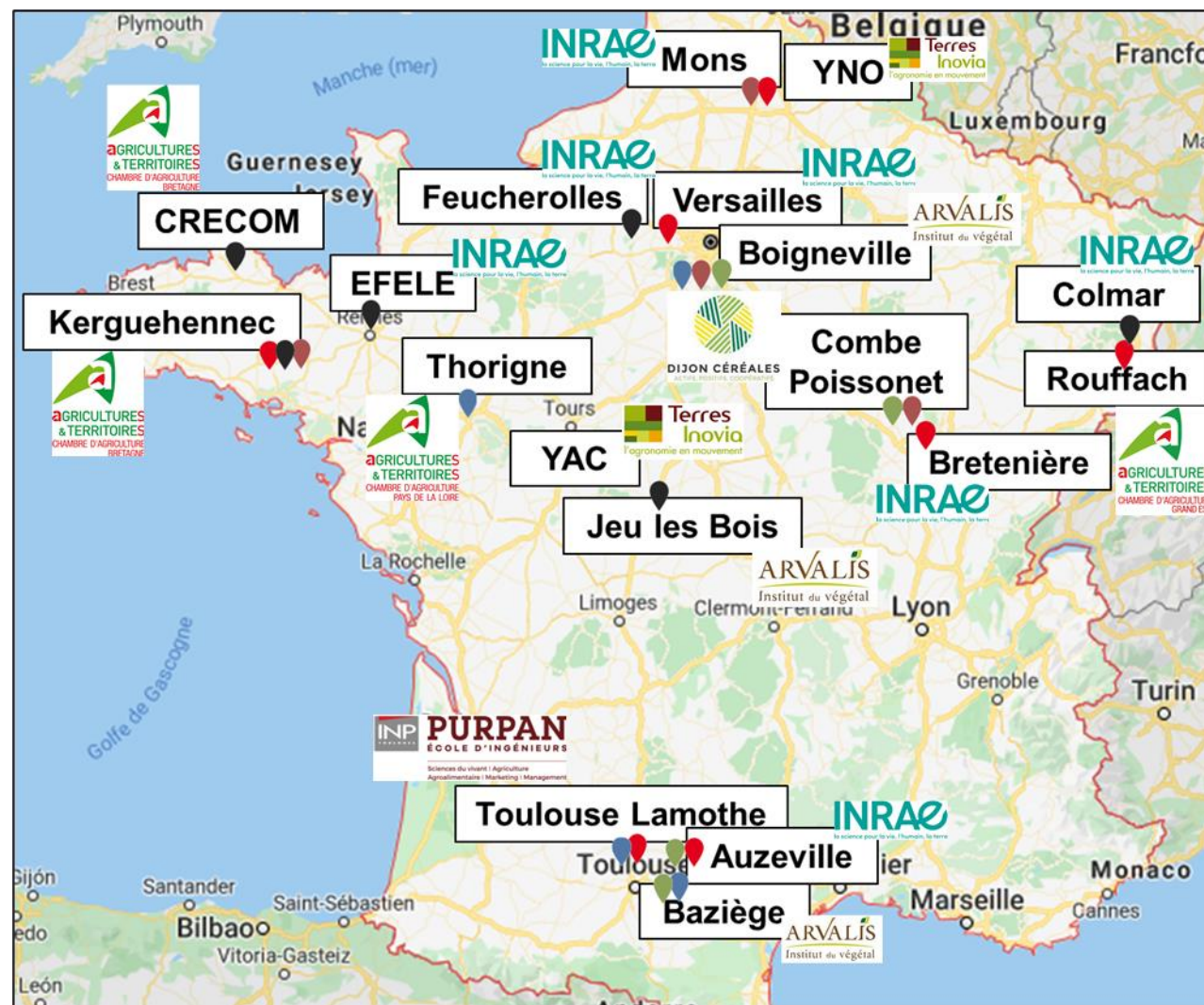
Avec vs. sans couverts (ref.)

Produits résiduels organiques

Avec vs. sans apport PRO (ref.)

Systèmes de culture

Syst. Innovant ou bio. vs. Syst. conventionnel (ref.)



Sites expérimentaux échantillonnés

Durée de la rotation

Rotation longue vs. Rotation courte (ref.)

- **Boigneville** : limon argileux
2 ans (BTh, MG) vs 5 ans (Op, Op, BTh, MG, Op)
- **Thorigne** (Rotaleg BIO) : limon sableux
3 ans (Fh, T, BTh) vs 7 ans (Fh, T, BTh, Luz., Luz, Fh)
- **Toulouse Lamothe** : limon argileux
1 an MG vs 3 ans (MG, BTh, Soja)
- **Baziège** : limon argileux
2 ans (BD, T) vs 8 ans (BD, T, Sorg, BD, Colz, Pois, BD, T)



BTh: blé tendre d'hiver, MG: maïs grain, Op: orge de printemps, Fh: féverole d'hiver, T: tournesol, Luz: luzerne, BD: blé dur, Colz: colza

Sites expérimentaux échantillonnés

Travail du sol

Travail superficiel ou SD vs. Labour (ref.)

- **Boigneville** : limon argileux
Semis direct vs labour
Op, Op, BTh, MG, Op
- **Mons** : limon profond
Travail superficiel vs labour (<8cm)
BTh, Colz, BTh, MG, Op
- **Combe Poissonnet** : argileux
Semis Direct (SD) vs labour
Op, BTh, Pois h, Oh, Colz, Op
- **Kerguehennec** : limon sableux
SD vs superficiel vs labour (<12cm)
Colz, BTh, MG, BTh



BTh: blé tendre d'hiver, MG: maïs grain, Op: orge de printemps, Fh: féverole d'hiver, T: tournesol, Luz: luzerne, BD: blé dur, Colz: colza

Sites expérimentaux échantillonnés

Couverts Intermédiaires

Avec vs. sans couverts (ref.)

- **Boigneville** : limon argileux
couverts incluant des légumineuses ou des crucifères
2 ans (BTh, MG) et 5 ans (Op, Op, BTh, MG, Op)
- **Combe Poissonnet** : argileux
couverts incluant en majorité des légumineuses
Op, BT, Pois h, Oh, Colz, Op
- **Auzeville** : limon argileux
couverts incluant en majorité des légumineuses
BD, Pois chiche, T, BD, Fh, T, BD, Fh
- **Baziège** : limon argileux
2 ans (BD, T) vs 8 ans (BD, T, Sorg, BD, Colz, Pois, BD, T)



BTh: blé tendre d'hiver, MG: maïs grain, Op: orge de printemps, Fh: féverole d'hiver, T: tournesol, Luz: luzerne, BD: blé dur, Colz: colza; Sorg: sorgho

Sites expérimentaux échantillonnés

Produits résiduels organiques

Avec vs. sans apport PRO (ref.)

- **Colmar** : limon argileux
Boues d'épuration & Compost de boues
BTh, MG, Op, Bett, BTh, MG
- **Feucherolles** : limon
Fumier bovin & compost de biodéchets
MG, Op, Seigle, Oh, MG, BTh
- **EFELE** : limon
Fumier bovin et digestat origine agricole (liquide)
Maïs ensilage, BTh
- **CRECOM** : limon sableux
Fumier bovin - Maïs ensilage
- **Kerguehennec** : limon sableux
Fumier volaille - Colza, BTh, MG, BTh
- **Jeu les Bois** : sablo limoneux
Fumier bovin - Maïs fourrage, BTh



Bett : betterave

Sites expérimentaux échantillonnés

Systèmes de culture

Syst. Innovant ou bio. vs. Syst. conventionnel (ref.)

- **Rouffach** : limon argileux
MG (labour) vs BT, Soja, MG avec couvert (travail réduit)
- **Bretenière** : limon argileux
BTh, Colz, Oh, BTh, Colz (labour)
vs BTh, Colz, Triticale+Fh, BTh, soja (SD couvert)
- **Mons** : limon argileux
BTh, Colz, Pois p, BTh, MG, Op
labour ou travail superficiel & avec ou sans restitution paille
- **Versailles** : limon
BTh, Pois h, BTh, Colz, BTh, Pois h (labour)
vs BTh, Pois h, BTh, Colz, BTh, Pois p (avec luzerne en SD)



BTh: blé tendre d'hiver, MG: maïs grain, Oh ou Op: orge d'hiver/printemps, Fh: féverole d'hiver, T: tournesol, Luz: luzerne, BD: blé dur, Colz: colza; Sorg: sorgho

Sites expérimentaux échantillonnés

Systèmes de culture

Syst. Innovant ou bio. vs. Syst. conventionnel (ref.)

- **CRECOM** : limon sableux
Monoculture maïs ensilage vs Maïs ens., Ray gras anglais
- **Kerguehennec** : limon sableux
Conventionnel (BTh, MG)
vs **SdC innovant** (Colza, BTh, MG, BTh)
vs **Bio** : tritic., Fh, trit.+pois fourr, sarrazin, BTH+Fh, MG, BTh
- **Toulouse Lamothe** : limon argileux
Monoculture maïs grain vs **3 ans** (MG, BT, Soja)
- **Auzeville** : limon argileux
BD, T, Soj, BTh, Pois, T, BD, Tritical/Fp
Conventionnel vs **Bas intrants** vs **Couverts**



BTh: blé tendre d'hiver, MG: maïs grain, Oh ou Op: orge d'hiver/printemps, Fh: féverole d'hiver, T: tournesol, Luz: luzerne, BD: blé dur, Colz: colza; Sorg: sorgho

Indicateurs physico-chimiques et microbiologiques mesurés

Bennegadi-Laurent Nadia *et al.*



Laboratoires d'analyses :



Caractérisation physico-chimique du sol & humidité

Caractérisation physico-chimique du sol

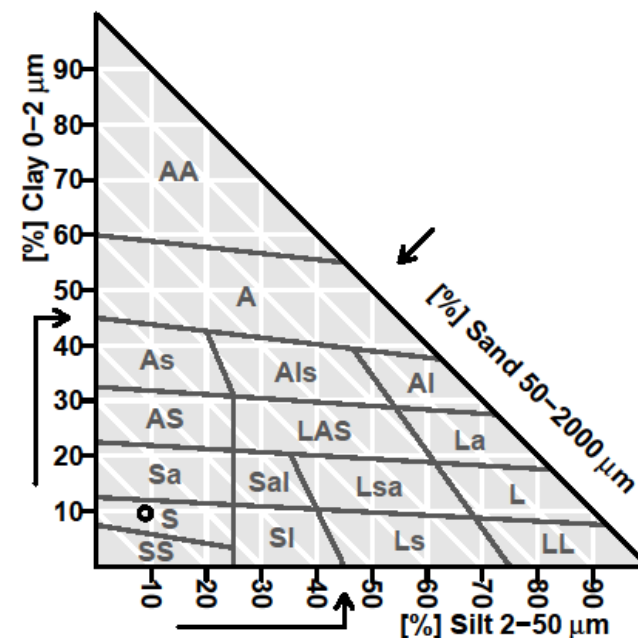
- **Texture** du sol (% sable, limon, argile)
- Teneur en **MO** (% MS)
- Capacité d'Échange Cationique (**CEC**) (meq/100g)
- Taux de **calcaire** (%)
- **pH** eau

Humidité relative au moment du prélèvement

Niveau d'humidité par rapport au niveau optimal d'humidité

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

Classes de texture du sol
Déterminées avec **triangle des textures GEPPA**



Indicateurs physico-chimiques mesurés

Au total 15 indicateurs mesurés :

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

Variable calculée *

Fractions labiles de la MO

Fractions stables de la MO

Indicateurs physico-chimiques mesurés

Variable		Description de la variable	Méthode de mesure ou de calcul	Laboratoire
Azote N (5 indicateurs)	Azote Dumas	N total	Méthode Dumas (NF ISO 13878)	AUREA
	N fraction 50-200 µm	N fraction labile	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
	N fraction 200-2000 µm			
	N fraction 50 2000 µm			
	N fraction 0-50 µm	N fraction stable	Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)	AUREA
C / N	C/N	Rapports Carbone / Azote Total & fractions		AUREA
	C/N fraction 0-50 µm			
	C/N fraction 50-200 µm			
	C/N fraction 200-2000 µm			
	C/N fraction 50-2000 µm			

Variable calculée *

Fractions labiles de la MO

Fractions stables de la MO

Indicateurs microbiologiques mesurés

Au total 15 indicateurs mesurés :

Variable		Description de la variable	Indicateur étudié	Laboratoire
Abondances microbiennes	ADN total	Microorganismes totaux	Biomasse moléculaire totale	UniLaSalle
	Biomasse microbienne (TOC)		C Org. total des micro-organismes (NF ISO 14240-2)	AUREA
	Biomasse bactérienne 16S	Bactéries totales	ADN r spécifiques des bactéries	RITTMO / UniLaSalle
	Biomasse fongique 18S	Champignons totaux	ADN r spécifiques des champignons	RITTMO / UniLaSalle
	Ergostérols total (MAE) & libre (GONG)		Biomasse fongique totale & morte	UniLaSalle

Indicateurs microbiologiques mesurés

	Variable	Description de la variable	Indicateur étudié	Laboratoire
Activités microbiennes	Hydrolyse de la Fluoresceine di-acétate (FDA)	Activité enzymatique globale	Hydrolyse FDA (substrat universel)	SEMSE
	Activité β-glucosidase (Glu)	Activités enzymatiques <i>Cycle C</i>	Hydrolyse de liaisons osidiques (ISO 20130:2018)	UniLaSalle
	C minéralisé moyen	Potentiel de minéralisation C	Potentiel de minéralisation C (NF EN ISO 16072)	CELESTA LAB
	Activité protéase	Activités enzymatiques <i>Cycle N</i>	Dégradation de protéines et petpides LAP (ISO/TS 22939:2019 ArylN (ISO 20130:2018)	Université Lorraine
	Activité leucine aminopeptidase (LAP)			Université Lorraine
	Activité arylamidase (arylN)			RITTMO / UniLaSalle
	Azote Potentiellement Minéralisable	Potentiel de minéralisation N	Double distillation (tampon phosphate borate et KCl) (Giannello et Bremner, 1986)	AUREA
	Azote Biologiquement Minéralisable		Incubation anaérobie 7 jours, 40 °C	AUREA
	N minéralisé moyen		Potentiel de minéralisation N (XP U44-163 et NF ISO 14238)	CELESTA LAB

Carbone oxydable au permanganate de potassium (KMnO_4)*

**Carbone actif KMnO_4 , POxC (Permanganate-Oxidizable Carbon)*

Principe

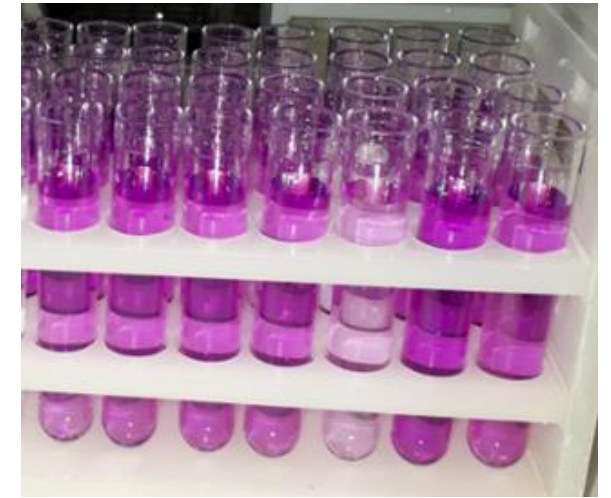
Estimation d'une fraction active (labile) du carbone, par oxydation « douce » et à froid des MO peu condensées
--> source d'énergie pour les micro-organismes (**ressources microbiennes**)

Méthode de mesure

- + **simple, rapide, peu couteuse** (extraction de terre séchée tamisée 2 mm avec KMnO_4 , dosage UV de la décoloration)
- **Pas de norme** (méthode adaptée de Weil et al., 2003 et Culman et al., 2012),
- **Réactif CMR** (cancérogènes, mutagènes pour la reproduction)

Référencement

- Très utilisée aux USA et en Australie (<https://soilhealth.cals.cornell.edu/>)
- Mobilisée par Biofunctool (<https://agritrop.cirad.fr/596146/>)



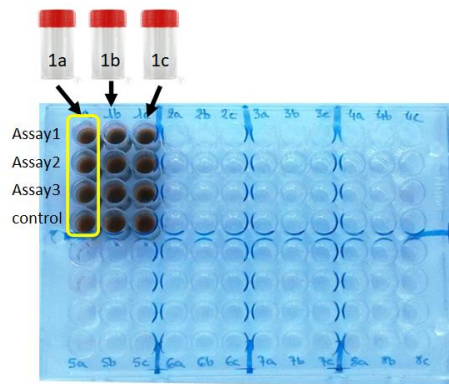
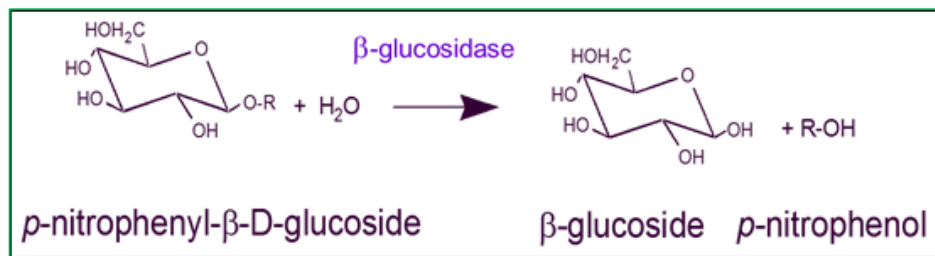
C KMnO_4 :
entre 500 et 2000 mg/kg, soit
entre 4 et 10 % du C org

Focus sur certains indicateurs mesurés

Mesure des activités enzymatiques des sols *in situ* par spectrophotométrie

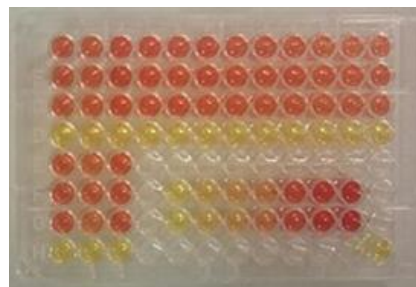
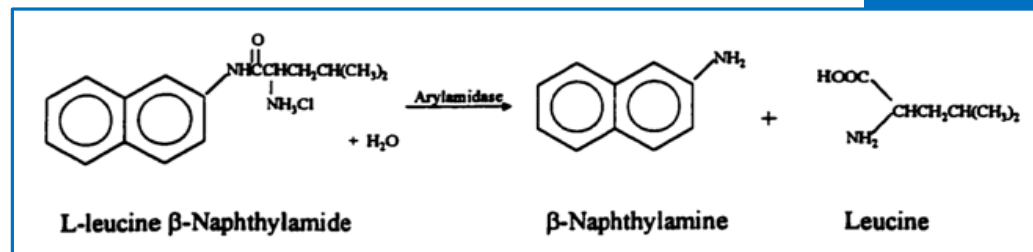
Cycle C

Beta-Glucosidase



Arylamidase

Cycle N



Weight of samples

ECH	ENZ (env 4g)
SOIL 1	4.1239
	3.9173
	4.0822
SOIL 2	4.1578
	4.1680
	4.0635
SOIL 3	4.1858
	4.0694
	4.0854
SOIL 4	4.1095
	4.0893
	4.1554

Moisture of soils

ECH	weigh of cupule	weigh of cupule and humid soil	weigh of cupule and dry soil	RAPPORT
SOIL 1	22.5	34	33.2	0.930
SOIL 2	21.9	37	36.1	0.949
SOIL 3	19.2	33.2	32.1	0.927
SOIL 4	22.8	37.7	36.1	0.993

Map of the plates with absorbances of standards and samples

RANGE PNP	0,017	0,069	0,141	0,359	0,718	1,075	1,42	1,763
	0	0,07	0,145	0,361	0,722	1,081	1,426	1,778

PHOSPHATASE				
	ASSAYS			BLANK
SOIL 1	0.694	0.632	0.692	0.194
	0.66	0.656	0.634	0.194
	0.655	0.646	0.72	0.184
SOIL 2	0.682	0.608	0.608	0.174
	0.592	0.612	0.597	0.185
	0.63	0.591	0.629	0.168
SOIL 3	0.649	0.629	0.589	0.186
	0.555	0.549	0.568	0.2
	0.549	0.538	0.594	0.171
SOIL 4	0.624	0.584	0.561	0.176
	0.539	0.514	0.497	0.19
	0.549	0.435	0.531	0.182

$$A = \frac{(Cs - Cb) \times D \times Vss}{RT \times Wds}$$

A	Activité enzymatique en mU/g de sol sec
Cs	[PNP] formé en nmol/mL
Cb	[PNP] formé dans le blanc en nmol/mL
D	Dilution de l'échantillon en microplaque
Vss	Volume de l'échantillon (en mL)
RT	Temps de réaction (min)
Wds	Masse de sol sec (g)

A	Activité enzymatique en mU/g de sol sec	
Cs	[PNP] formé en nmol/mL	
Cb	[PNP] formé dans le blanc en nmol/mL	
D	Dilution de l'échantillon en microplaque	
Vss	Volume de l'échantillon (en mL)	25
RT	Temps de réaction (min)	60
Wds	Masse de sol sec (g)	4

Référencement

ISO 20130:2018. Soil quality - measurement of enzyme activity patterns in soil samples using colorimetric substrates in micro-well plates

Cheviron et al.-Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17173-3>

Azote minéralisable

Principe

Estimation d'une fraction d'azote minéralisable à l'échelle du cycle de culture

3 Méthodes de mesure testées

	Méthode	Norme	Préparation	Simplicité	Rapidité	Cout	Référencement
N minéralisé 28 J	Incubation aérobie 28 jours 28°C	XP U44-163 et NF ISO 14238	Sol brut tamisé 5 mm	- -	⌚⌚⌚⌚	€€€€	Méthode de référence en France (Bouthier et al, 2015 ; Déplanche, 2021)
APM (Azote <i>Potentiellement</i> Minéralisable)	Double distillation Kjeldahl partielle (KCl et tampon phosphate borate)	Non (Gianello et Bremner, 1986)	Sol séché tamisé 2 mm	-	⌚⌚	€€	Travaux d'In Vivo (Rocca et al, 2013), Réseau Mh / Sol-AID (http://geowww.agrocampus-ouest.fr/web/?page_id=2804)
ABM (Azote <i>Biologiquement</i> Minéralisable)	Incubation anaérobie 7 jours 40°C	Non (Keeney & Bremner,1966 ; Schomberg et al., 2009)	Sol brut tamisé 5 mm	+ +	⌚⌚	€€	Etudes internationales (Clack, 2018 ; Curtin et al, 2017 ; Orcellet et al 2016), réseau Mh



Appareillage de distillation et dosage selon la méthode Kjeldhal pour l'APM



Échantillons en anaérobiose pour incubation de l'ABM

Modélisation AMG : Evolution du stock de carbone

Le modèle AMG*

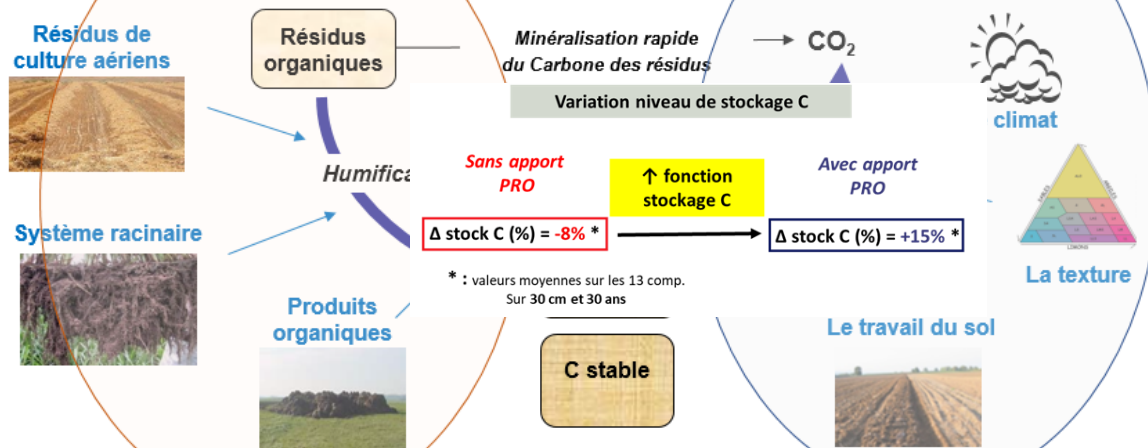
Un modèle simple de calcul de bilan humique à la parcelle

les entrées de Carbone

les sorties de Carbone

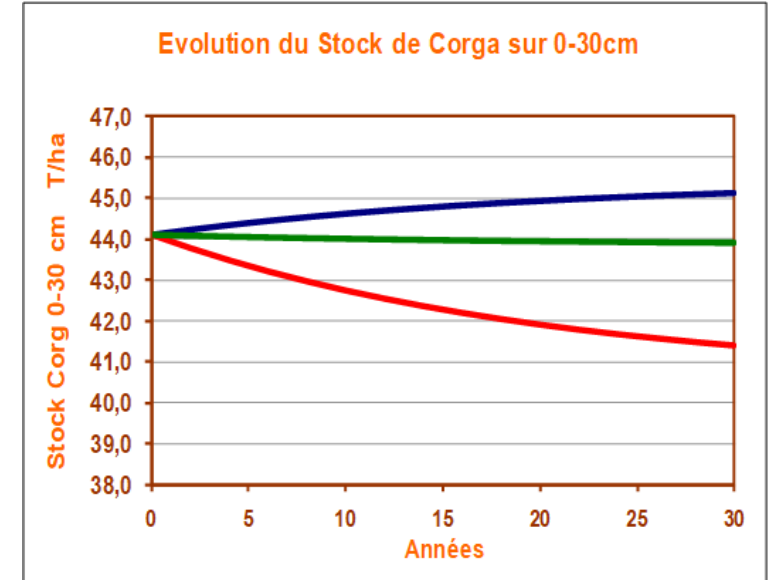
Les principes du calcul

$$dC/dt = k1.m - K.Ca$$

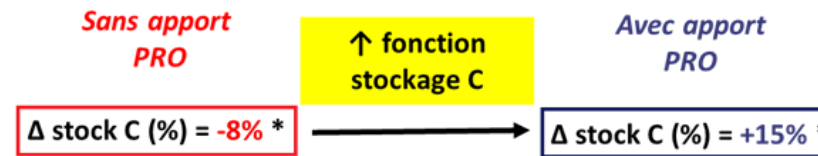


*AMG, du nom de ses auteurs: Andriulo, Mary, Guérif - INRA de LAON

Simulations avec AMG
version 6.2
Couche 0-30cm
Sur 30 ans



Variation niveau de stockage C



Calcul de la variation de stock
de carbone
(exemple effet
PRO)

A. Duparque, AgroTransfert RT

Stratégie d'échantillonnage & observations terrain

Valé Matthieu *et al*



Observations terrain au moment du prélèvement

- La microbiologie du sol est impactée par l'état structural au moment du prélèvement (*Bouthier et al, 2015*)

--> ajout d'observation terrain lors du prélèvement

- Caractéristiques pour définir le type de sol
- Etat de surface
- Etat structural sur la couche prélevée (méthode ISARA)
- Infos sur le comportement hydrique
- Photos

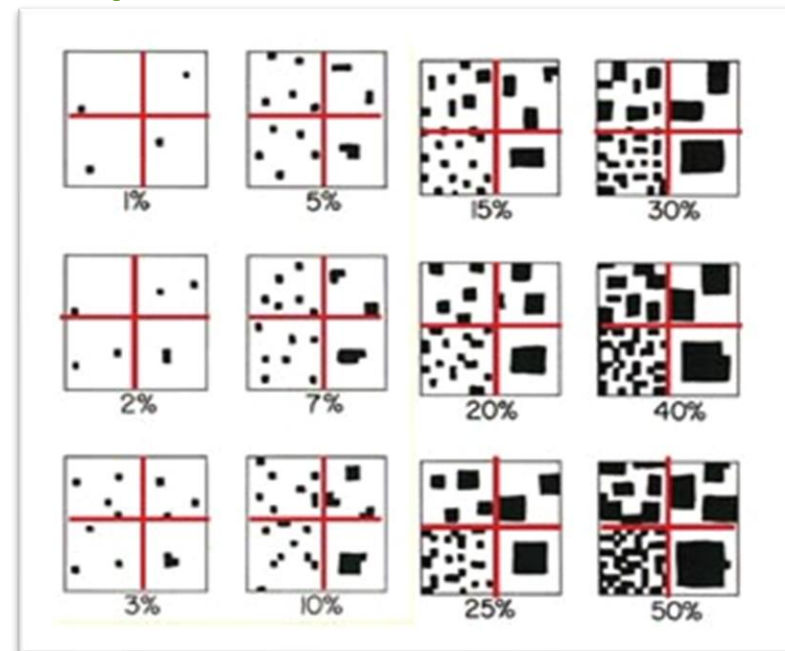


Conditions de réalisation : (sol sec, ressuyé, météo des jours précédents, ...)					
Type de sol de la parcelle élémentaire observée					
Présence de calcaire : oui ☐ non ☐		Profondeur : < 40 cm ☐ 40 à 80 cm ☐ > 80 cm ☐			
Texture : Argileux (>30% A (entourer) ou >25% A et >55% S)	Limons-argileux (<55% S et 18%<A<35%)	Limoneux (<55% S et <18% A)	Limono-sableux (15%<S<55% et <18% A)	Sableux (>55% S et <15% A)	Sablo-limoneux (>55% S et <25% A)
Pierrosité : < 5 % ☐ 5 à 15 % ☐ > 15 % ☐			Hydromorphie : non ☐ oui ☐ Profondeur (cm): _____		
Caractéristiques de la parcelle élémentaire observée					
Sensibilité à la battance: oui ☐ non ☐		Drainée: oui ☐ non ☐		Arrivée d'eau en amont: oui ☐ non ☐	
Rupture de perméabilité: oui ☐ non ☐		Irriguée: oui ☐ non ☐		Concentration de ruissellement: oui ☐ non ☐	
Possibilité de saturation en eau des horizons de surface: oui ☐ non ☐				Proximité cours d'eau / fossé: oui ☐ non ☐ (distance inférieure à xx m)	
Date et nature de la dernière intervention: _____				Présence d'une forte pente: oui ☐ non ☐ (pente supérieure à xx %)	
Etat de surface du sol (en % de la surface couverte)					
% couverture du sol: _____ % dont: Végétaux: _____ % résidus: _____ % Turricules / macropores: _____ %					
Taille des éléments grossiers >2cm (si présents): de _____ cm à _____ cm					
Autres observations: Fissures: _____ % Glaçage: _____ % Mottes visibles: _____ %					

Observations terrain au moment du prélèvement

Estimations visuelles :

- **Profondeur** du sol
- Taux de **cailloux**
- Taux de **couverture totale** du sol :
 - *Végétaux*
 - *Résidus*
 - *Turricules / Macropores*



Estimation visuelle du % d'éléments grossiers

Limaux et al., (1998)

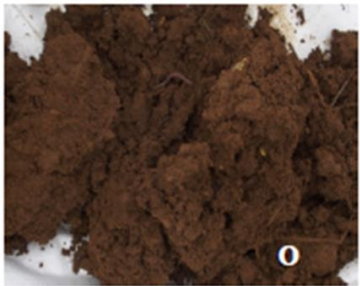


Niveau de compaction du sol : Test bêche

Par horizon de sol
du bloc prélevé



→ Estimation du mode d'**assemblage des mottes** :



O → O/C → C2R → CR → C
Ouvert Favorable Fermé Défavorable

→ Estimation des % de chaque **type de motte** :



Mottes Γ (gamma)
Arrondies
Porosité importante



Mottes Δ (delta)
Lisses
Sans porosité visible



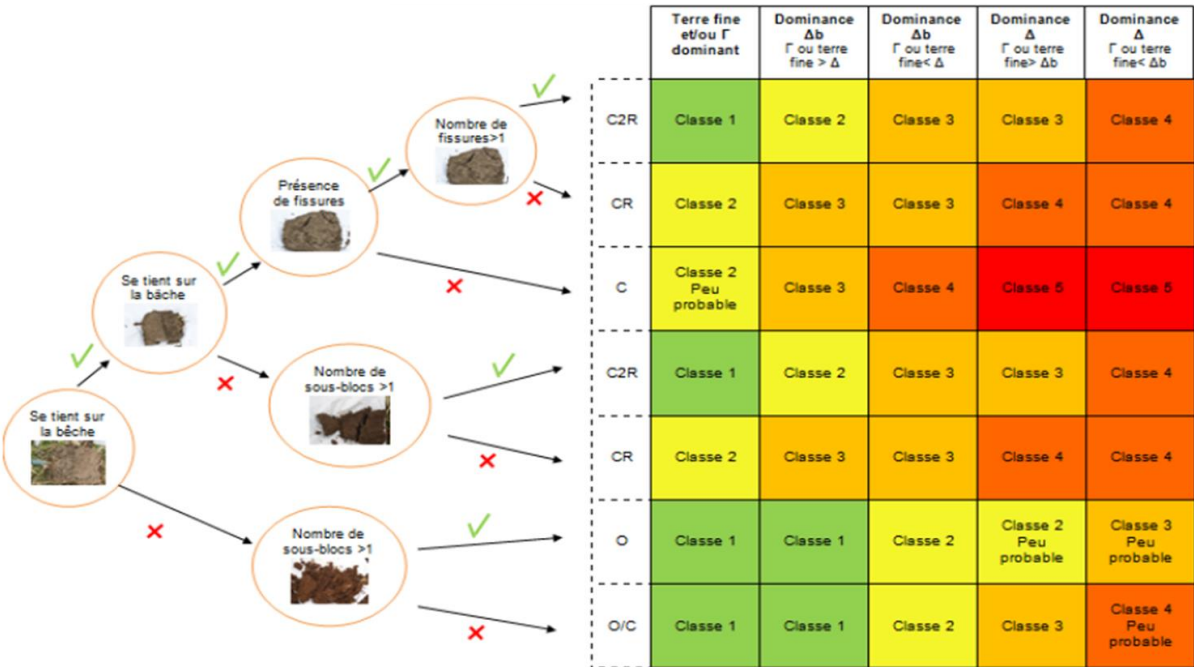
Mottes Δb
Lisses, quelques macropores
d'origine biologique

Source : Peigné et al. 2016, Test Bêche Guide d'utilisation (ISARA Lyon)

<https://agriressources.fr/fertisols/diagnostic/diagnostiquer-la-fertilite-physique/evaluer-la-structure-des-sols/>

Niveau de compaction du sol : Test bêche

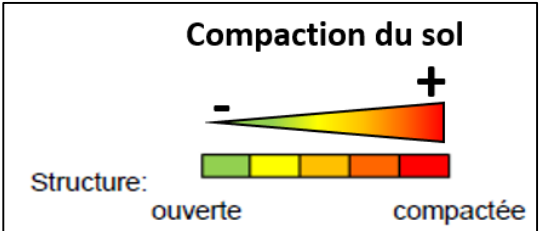
→ Classe de **niveau de compaction** :



Bêche (phase 1)	Observation du bloc de sol			Bêche (phase 2)
Tient sur la bêche : oui ☐ non ☐	Tient sur la bêche : oui ☐ non ☐			
Profondeur du bloc : ____ cm	Nombre de blocs / sous-blocs : ____			
Nombre de blocs / sous-blocs : ____	Rupture franche entre horizons : oui ☐ non ☐ (changement de porosité)			
Présence de racines : oui ☐ non ☐	Racines coudées horizontales : oui ☐ non ☐ Profondeur (cm): ____			
Présence de résidus : oui ☐ non ☐				
Structure des mottes et indicateurs de profondeur				
	H1	H2	H3	
Profondeur :	____ cm à ____ cm	____ cm à ____ cm	____ cm à ____ cm	
% terre fine + mottes Γ :				
% de mottes Δb				
% de mottes Δ				
Fissures :	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	
% cailloux >2 cm :				
Problème d'enracinement :	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de racines	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de racines	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de racines	
Vers de terre :	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	
Traces de rouille :	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	oui ☐ non ☐	
Décomposition satisfaisante des résidus de culture :	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de résidus	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de résidus	oui ☐ non ☐ ☐ Pas de résidus	
Mode d'assemblage et type dominant :				
Classe :				

Source : Peigné et al. 2016, Test Bêche Guide d'utilisation (ISARA Lyon)

<https://agriressources.fr/fertisols/diagnostic/diagnostic-uer-la-fertilite-physique/evaluer-la-structure-des-sols/>



186 tests
réalisés en 2018

Contraintes & précaution pour le prélèvement de terre

Indicateurs physico-chimiques & microbiologiques mesurés :

- **Différents protocoles** de conditionnement, de délai d'envoi labo & de mode de conservation
- Une **harmonisation** nécessaire pour la mise en routine des analyses

Inventaire des informations disponibles sur les indicateurs :

- Méthode d'analyse
- Paramètres impactant le résultat (**Variabilité spatiale** horizontale et verticale, **variabilité temporelle** *in situ* (effet climat, effet ITK), **effet du mode de conservation** avant arrivée au labo, effets du **mode de préparation**, **variabilité temporelle** en stockage)
- Stratégie d'échantillonnage (choix de la **période** de prélèvement, choix de la **profondeur** de prélèvement, **schéma** d'échantillonnage, **nombre de prises** élémentaires, **quantité** de matière nécessaire, informations de l'**ITK** à collecter, **observations terrain**)
- Conditionnement / conservation / mode et délai d'envoi labo / préparation labo / mode et délai de conservation
- Analyses / Données complémentaires nécessaires

Contraintes & précaution pour le prélèvement de terre

Campagne d'échantillonnage 2018 : compromis sur les indicateurs les plus contraignants

Date de prélèvement

- Date de prélèvement la plus éloignée possible des **apports d'engrais azotés et produits organiques**
- **Sol ressuyé** (ni trop sec, ni trop humide)

Profondeur(s) de prélèvement

- **0-20 cm** (retenu pour correspondre à la profondeur moyenne des analyses de terre physico-chimiques)
- **0-20 cm & 0-10 cm** (*Boigneville environnement, Kerguéhennec ETS, Toulouse Lamothe*)

Nombre d'échantillons par bloc

- Toujours **3 échantillons / bloc** de chaque modalité agronomique

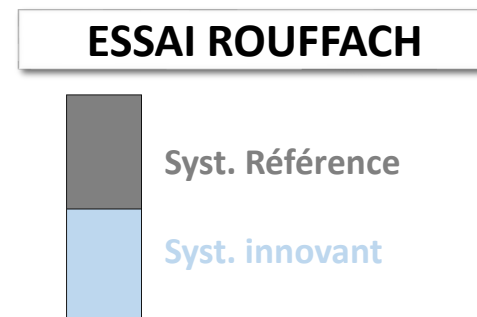
Envoi aux différents laboratoires

- **Acheminement labo en J+1** (pas de prélèvement le jeudi ou vendredi, envoi en direct aux laboratoires)



3 échantillons / modalité
(0 – 20 cm)

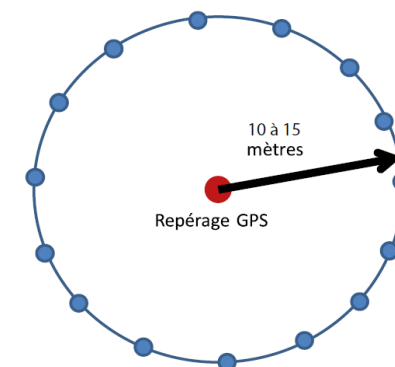
Essais **en bandes** :
BA, BB, BC (3 essais)



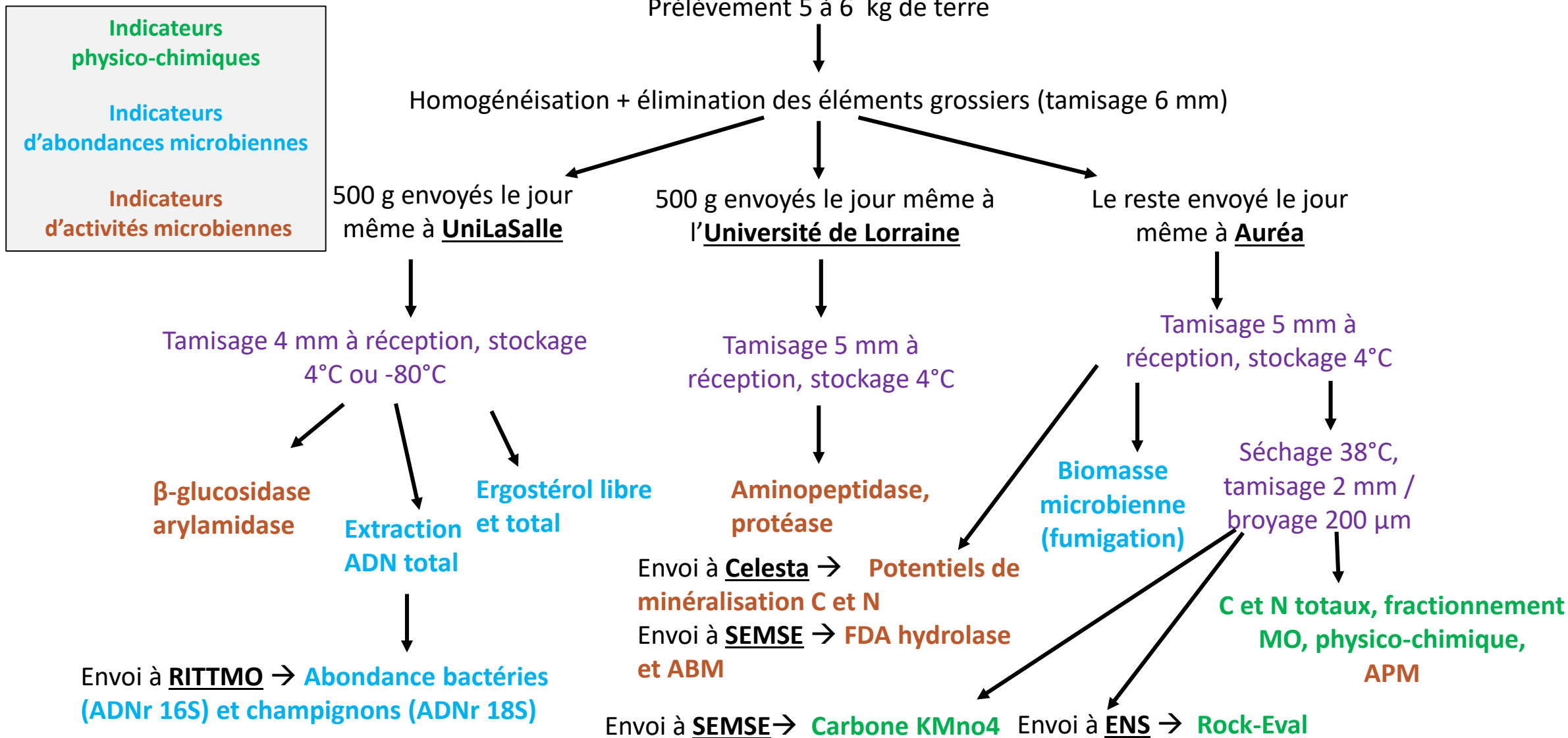
3 prélèvements / bande
→ 3 p. / modalité

1 prélèvement / bloc
→ 2 p. / modalité
→ 1 p. composite R

- **Cercle de 10 à 15 mètres de rayon**
- **12 à 15 prises élémentaires**



Procédure de traitement des échantillons de terre



Campagne d'échantillonnage

Dates de prélèvement des différents sites au printemps 2018

+ sites prélevés
en 2016
(Doignies et Villedieu sur Indre)
et 2017
(Crécom et Jeu Les Bois)



Collecte d'informations agro-pédoclimatiques et des pratiques culturales

Caractéristiques générales des essais & variables pédoclimatiques

Caractéristiques générales des essais	Variables météorologiques	Caractéristiques du sol			Variables de taux de couverture du sol
		Texture du sol	Niveau compaction du sol	Autres caractéristiques du sol	
- Nom de l'essai - Organisme - Thème 1 - Thème 2 - Lieu - Altitude - Âge de l'essai - Type d'essai - Irrigation - Date prélèvement	- Temp. moy. - Pluvio. - ETP - Rayonnement	→ <u>Granulométrie</u> : - Argile (% MS) - Limons fins (% MS) - Limons grossiers (% MS) - Sables fins (% MS) - Sables grossiers (% MS)	→ <u>Par horizon</u> (H1, H2, H3) : - Profondeur sup. - Profondeur inf. - % terre fine + mottes Γ - % de mottes Δb - % de mottes Δ - Classe	- Calcaire total (%) - Sol caillouteux, peu caillouteux, non caillouteux - Sol profond, moyennement profond, peu profond	- Taux <u>couverture totale</u> du sol (%) - Taux <u>couverture végétaux</u> - Taux <u>couverture résidus</u> (%) - Taux <u>couverture turricules / macropores</u> (%)

Collecte d'informations agro-pédoclimatiques et des pratiques culturales

Données agronomiques / pratiques culturales

Pratiques agronomiques par modalité					
Rotations, rendement et devenir des résidus	Travail du sol	Couverts Intermédiaires	Couverts associés à la culture	PRO	Fertilisation minérale
- Culture principale - Précédent - Anté-précédent - Rendement moyen (t/ha ou t MS/ha) - Devenir des résidus	- Travail du sol : - Labour - Travail superficiel - Semis Direct	→ Type de couverts : - Légumineuse pure - Légumineuse(s) + autres - Autres - Pas de couvert → Biomasse (t MS/ha) : - <u>Faible</u> (< 2 t MS/ ha) - <u>Moyenne</u> (entre 2 et 4 t MS/ha) - <u>Elevée</u> (> 4 t MS/ha) → Devenir de la biomasse : - Enfouie - Laissée en surface	- Type - Biomasse (t MS/ha)	- Type de PRO - Quantité PRO (t/ha) - C, N et NH4 apportés (kg/ha) - C/N - ISMO	- Fertilisation minérale N (kg/ha)

Sur les **20 essais** répartis sur 18 sites

- ✓ 4 900 analyses réalisées entre avril **2018** et septembre **2019**
- ✓ 183 observations terrain
- ✓ 61 modalités agronomiques collectées
- ✓ Données pédo-climatiques

Disponibilité de la BDD : accès restreint aux partenaires financés pendant 3 ans, puis disponible sur demande avec licence selon les utilisations envisagées

Analyse des données & sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre

Recous Sylvie, Cusset Elodie et Riah-Anglet Wassila



Microbioterre : De l'indicateur au conseil en agriculture

Choix du menu Microbioterre

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

Revue bibliographique
80 articles

Liens Indicateurs – Pratiques culturales

Articles bibliographiques
147 articles

Essais agronomiques
20 essais

Prélèvement
terre

Construction & évaluation du
référentiel Microbioterre

Essais agronomiques &
littérature
20 essais

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

2 types de données :

- Données acquises dans le projet
- Données bibliographiques

Aptitude des indicateurs à renseigner les niveaux de fonctions

Fonctions & processus étudiés

3 fonctions du sol étudiées :

Déclinées en
16 processus biologiques & physiques
&
qui *conduisent vers*

3 fonctions du sol	Processus	Processus qui conduit vers
Recyclage des nutriments	Ammonification	Fourniture d'azote (ions NH_4 & NO_3^-)
	Nitrification	
	Fixation symbiotique	
	Lixiviation	Perte d'azote (Percolation, N forme gazeuse)
	Réduction du NO_3 (émission N_2O)	
	Volatilisation	
Transformation du carbone	Fragmentation	Transformation de la MO (MO particulières & substrats transformés)
	Biodégradation	
	Minéralisation (CO_2)	Perte de MO
	Stabilisation chimique / humification	Augmentation de MO (Protection par adsorption ou agrégats)
	Stabilisation physique / protection	
Structure du sol	Agrégation (Macro)	Erosion et la battance (Assemblage des particules du sol)
	Agrégation (Micro)	
	Aération / circulation eau - air	Porosité (« Vides » du sol)
	Infiltration en eau	
	Rétention en eau	Stockage d'eau

Aptitude des indicateurs à renseigner les niveaux de fonctions

Etude bibliographique (80 articles)

Et à dire d'experts

Partenaires
Microbioterre

Indicateurs

Quantification du carbone microbien après fumigation et mesure TOC
Quantification de l'ADN total
Quantification de l'ADNr 16S par PCR en temps réel
Quantification de l'ergostérol libre et total
Quantification de l'ADNr 18S par PCR en temps réel
Ratio 18S/16S
Hydrolyse de la FDA
β -glucosidase
Aminopeptidase
Protéase
Arylamidase
Potentiel de minéralisation C
Azote potentiellement minéralisable
Azote biologiquement minéralisable
Potentiel de minéralisation N
Teneur en carbone organique
Teneur en azote total
Fractionnement granulométrique MO
Fraction < 50 μ m
Fraction 50-250 μ m
Fraction 250-2000 μ m
Carbone labile KMnO ₄

Fonctions & Processus

Ammonification
Nitrification
Lixiviation
Réduction du NO ₃ (émission N ₂ O)
Volatilisation
Fixation symbiotique
Fragmentation
Biodégradation
Minéralisation (CO ₂)
Stabilisation chimique / humification
Stabilisation physique / protection
Agrégation (Macro)
Agrégation (Micro)
Aération / circulation eau - air
Infiltration en eau
Rétention en eau

Recyclage des
nutriments

Transformation
du carbone

Structure du sol

Relations positives I/F

- Relation positive faible entre I/F ($r < 0.4$)
- Relation positive moyenne entre I/F ($0.4 < r < 0.8$)
- Relation positive forte entre I/F ($r > 0.8$)

Relations négatives I/F

- Relation négative faible entre I/F ($r < 0.4$)
- Relation négative moyenne entre I/F ($0.4 < r < 0.8$)
- Relation négative forte entre I/F ($r > 0.8$)

Flèches pleines : Absence d'équation reliant I/F

Flèches en discontinu : Equation reliant I/F

Microbioterre : De l'indicateur au conseil en agriculture

Choix du menu Microbioterre

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

Revue bibliographique
80 articles

Liens Indicateurs – Pratiques culturelles

Articles bibliographiques
147 articles

Essais agronomiques
20 essais

Prélèvement
terre

Construction & évaluation du
référentiel Microbioterre

Essais agronomiques
20 essais

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

2 types de données :

Données acquises dans le projet

Données bibliographiques

Réponse des indicateurs aux pratiques culturales

Méta-analyse : Recherche bibliographique & sélection d'articles

ScienceDirect, Springer, Wiley, Google Scholar

Mots-clés : Soil microbial activities, biomass

Produits Résiduels Organiques (PRO)

Manure Compost

Exogen matter

Organic fertilisation

Couverts intermédiaires

Catch crop

Intermediate crop

Cover crop

Tillage

Travail du sol

Plough

N-till

Direct seeding

Rotations

Rotation legumes

Diversified rotation

Crop diversity

Organic systems

Conventional systems

Système de culture

Agroecological systems

Conservation agriculture

Residues retention

Residues incorporation

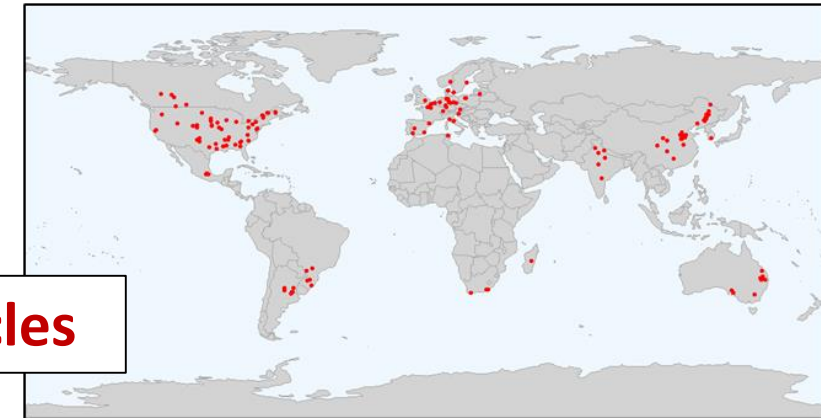
Residues management

Gestion des résidus

Critères de sélection des articles

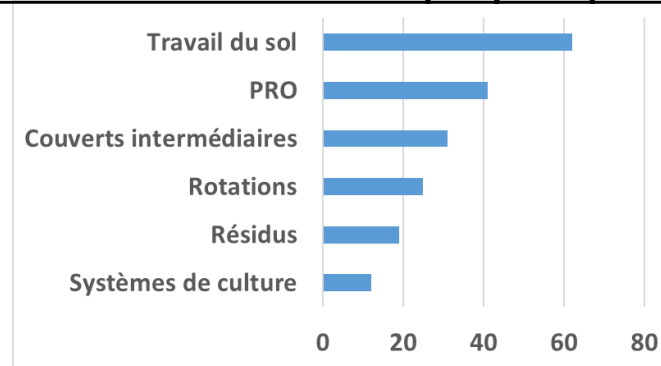
- Publiés entre **2007** et 2021
- Essais **au champ**
- Physico-chimie & μ biologie
- **Données quantitatives** brutes

Localisation des essais étudiés



147 articles

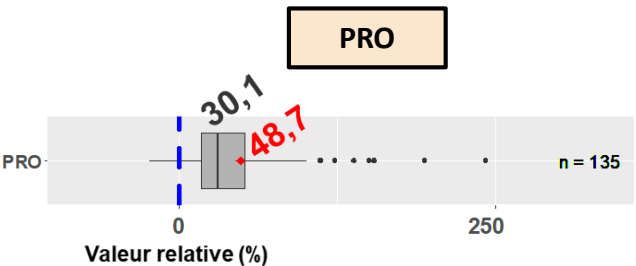
Nombres d'articles étudiés par pratique culturale



52

Réponse des indicateurs aux pratiques culturales

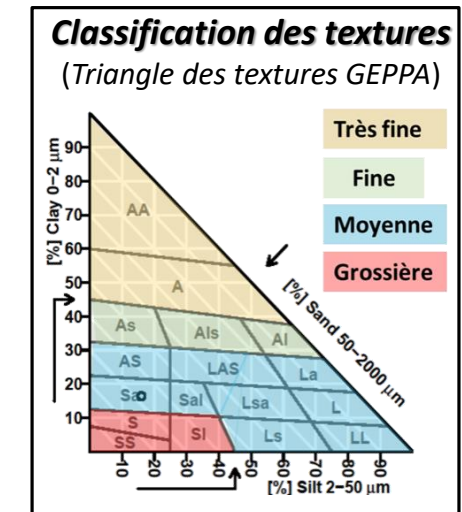
Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien



Effets de l'implantation
de couverts et de l'apport
de PRO
sur le **C microbien**

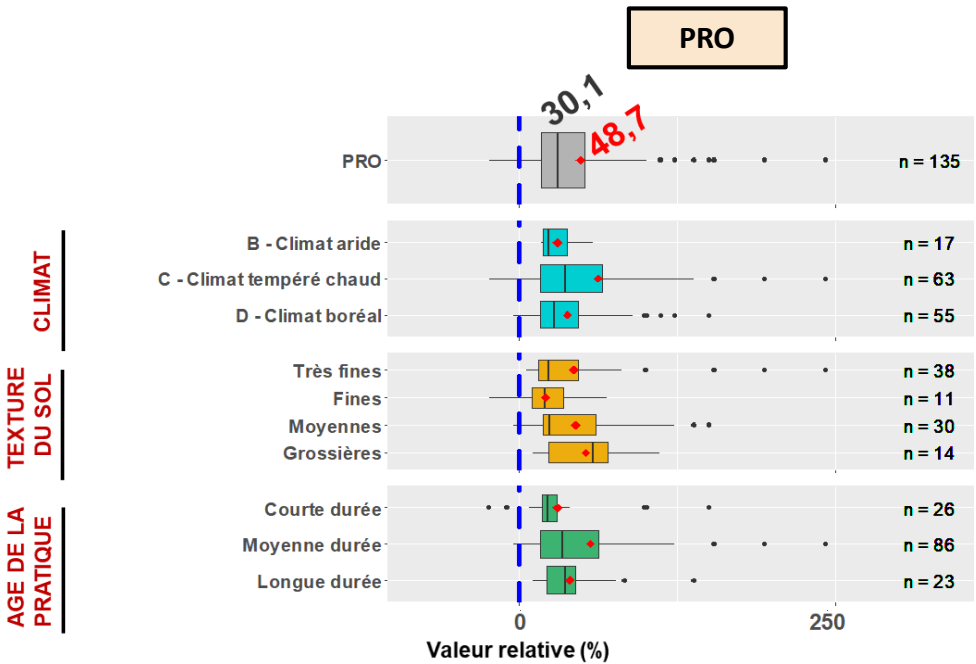
PRO
En moyenne **↑ + 48,7 % C mic.**

Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien



Réponse des indicateurs aux pratiques culturelles

Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien

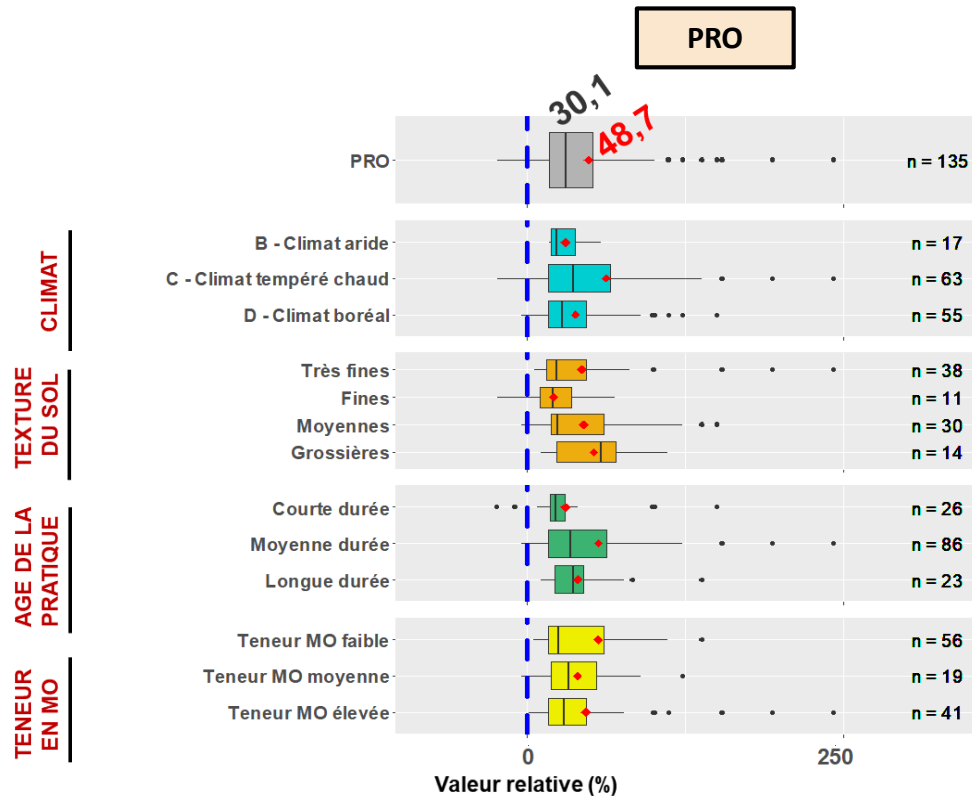


**Classification des âges
des pratiques**
(Dire d'experts)

- < 5 ans
Pratique récente
- Entre 5 et 15 ans
Âge intermédiaire
- > 15 ans
Pratique ancienne

Réponse des indicateurs aux pratiques culturelles

Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien



Classification des teneurs en MO

(Selon distribution des données)

< 1,5%

Teneur MO faible

Entre 1,5 et 2,6%

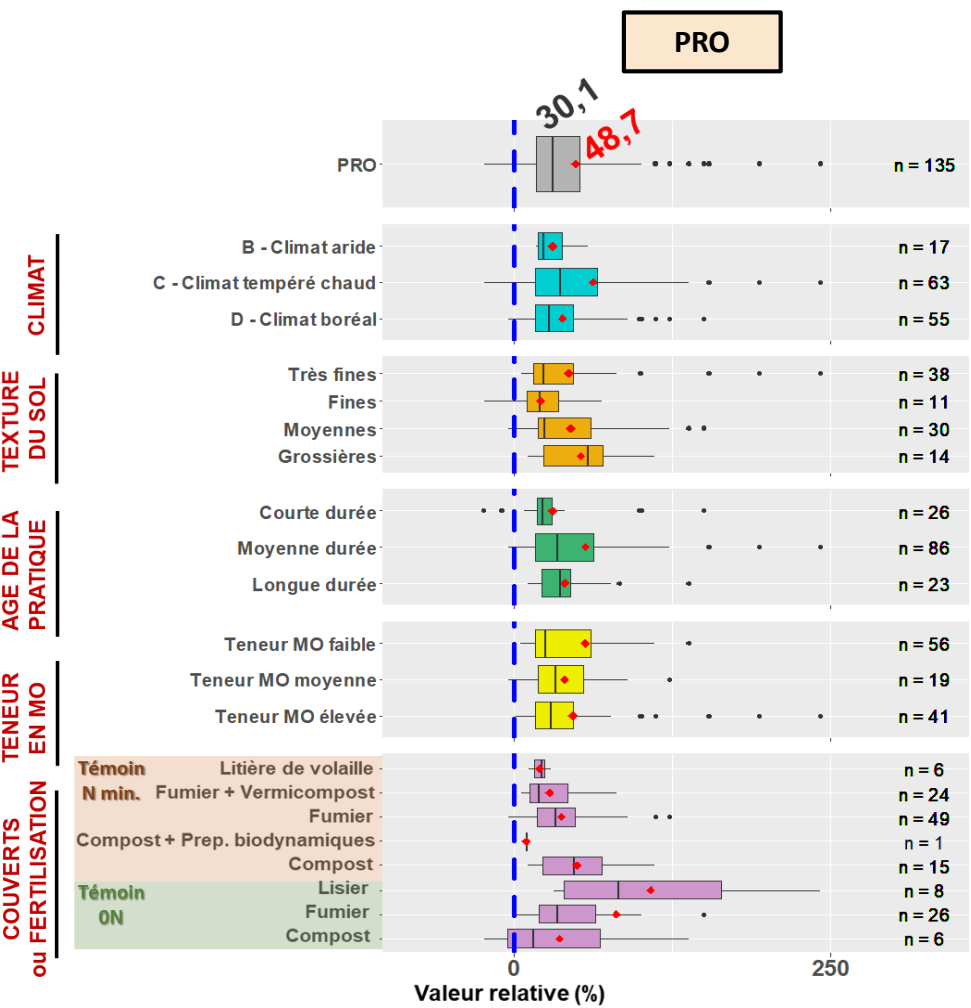
Teneur MO moyenne

> 2,6%

Teneur MO élevée

Réponse des indicateurs aux pratiques culturelles

Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien



Classification des types de PRO

PRO

- Témoins : Avec ou sans fertilisation minérale
- Type de PRO

Réponse des indicateurs aux pratiques culturelles

Méta-analyse – Un exemple de résultat : Effet des pratiques sur l'indicateur C microbien



Effets de l'apport de PRO et implantation de couverts sur le C microbien

Couverts intermédiaires
En moyenne ↑ + 15,9 % C mic.

PRO
En moyenne ↑ + 48,7 % C mic.

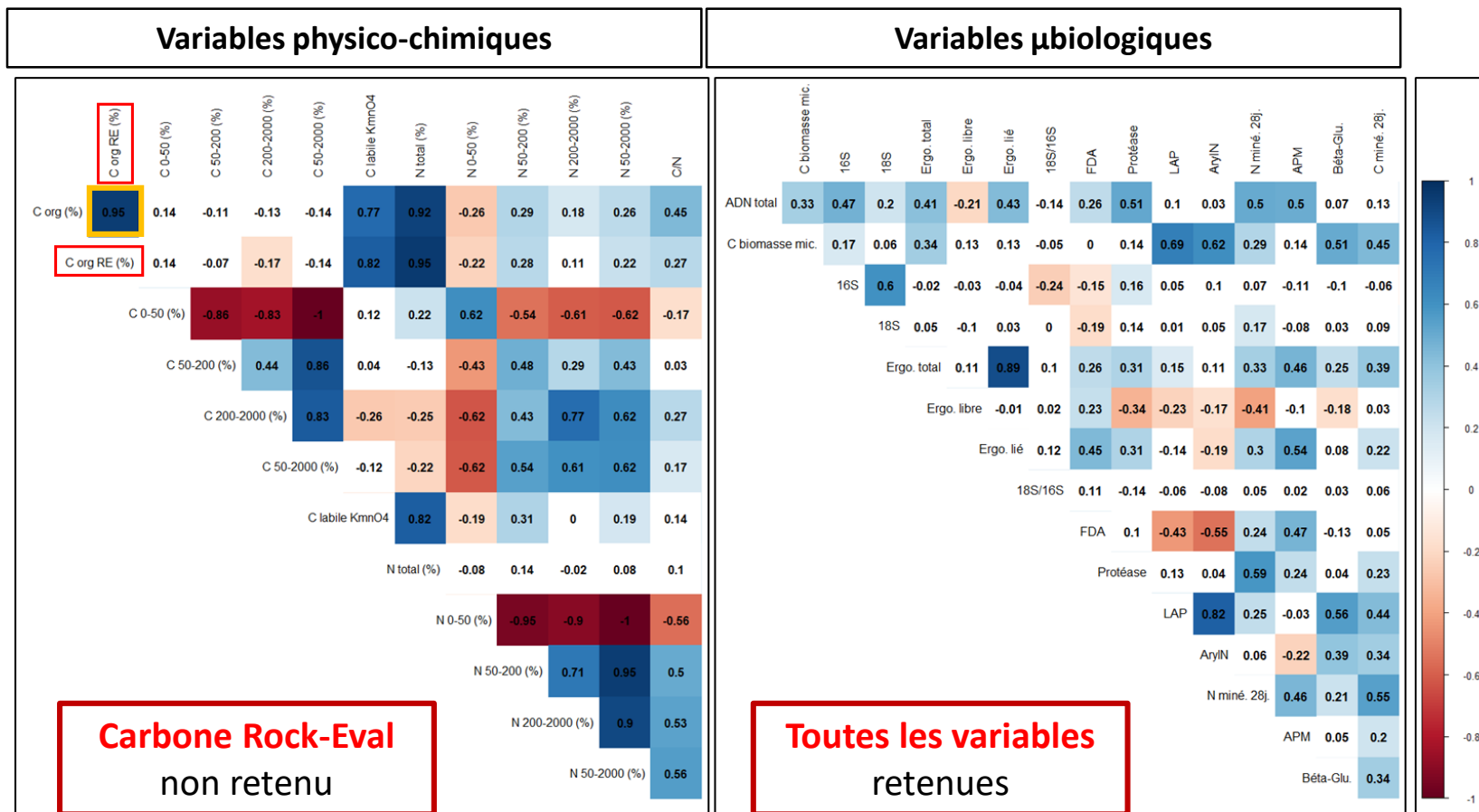
Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Critères de choix des indicateurs du menu analytique MicrobioTerre

- Co-corrélation des indicateurs et **redondance de l'information**
- **Variabilité spatiale** des indicateurs < seuil fixé (dire d'experts : partenaires MicrobioTerre)
- Réponse des indicateurs aux **pratiques culturales étudiées**
- **Coût** acceptable et **faisabilité technique**

Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Co-corrélation des indicateurs et redondance de l'information



- **Critères de redondance** de l'information :

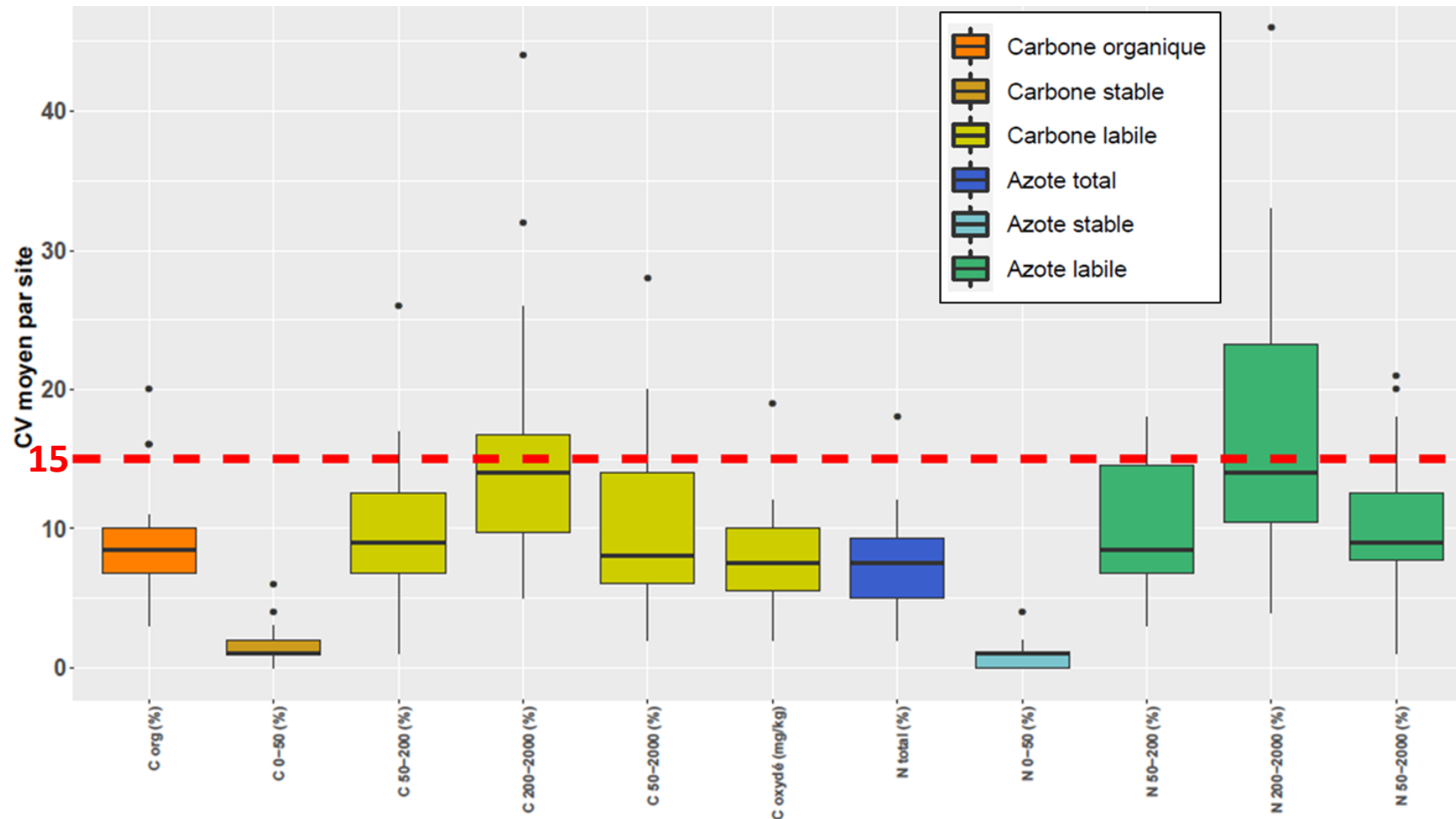
$|R| > 0,9$ & même information
Redondance entre paire d'indicateurs

- **Choix entre indicateurs** co-corrélés :

Sélection d'un indicateur : **Critère de coût & technicité**

Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Variabilité spatiale des variables physico-chimiques



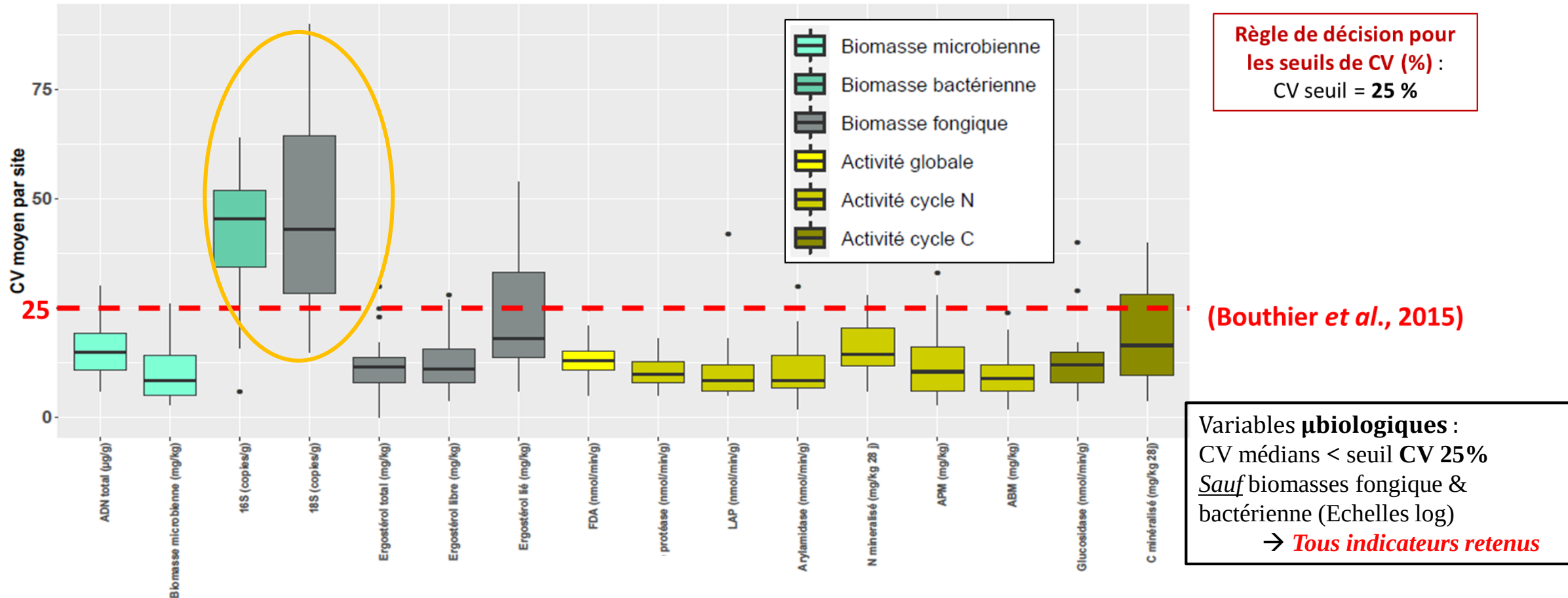
Règle de décision pour les seuils de CV (%) :
CV seuil = 15%

(Bouthier *et al.*, 2015)

Variables **physico-chimiques** :
CV médians < seuil CV 15%
→ **Tous indicateurs retenus**

Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Variabilité spatiale des indicateurs microbiologiques



Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Aptitude des indicateurs à discriminer les modalités agronomiques

Pratique la *plus discriminée* : PRO

Quantité C apportée (moyenne sur 5 ans)

Âge essai

13 comparaisons

Âge des essais		6 ans					18 ans					20 ans		33 ans	SCORING PRO (5%)	
Essai		JEU LES BOIS			EFELE		KER W Sol			COLMAR		FEU		CRECOM		
PRO	Type de PRO	Compost fumier	Fumier	Compost fumier	Digestat lisier	Fumier	SD Fumier	Lab. Fumier	TS Fumier	Boues	Compost boues	Fumier	Compost biodéchets	Fumier		
Variables physico-chimiques	C org (%)	*	*	**								***	***	**	6	
	C org Rock-Eval (g/kg)	*		*		*					*	***	***	**	7	
	C stable 100 ans (g/kg)												**		1	
	C 0-50 (%)							*	**	***	***	***	***	*	7	
	C 50-200 (%)				*	***	*	*	**	**	**	***	***	***	10	
	C 200-2000 (%)				*	*				*	**		**		5	
	C 50-2000 (%)							*	**	***	***	***	***	*	7	
	Carbone actif (g/kg)	**	*	***		*							***	***	*	7
	C oxydé (mg/kg)					*	*	**	*	*	*	*	***	***	***	9
	C labile 20 ans (g/kg)			**					*				***	***	*	5
	N total (%)		*	**						*	*	*	***	***	**	7
	N 0-50 (%)							*		*	*	**	***	***	*	7
Variables microbiologiques	N 50-200 (%)			*		*	*	*	*	*	*	***	***	**	9	
	N 200-2000 (%)				*	*					*	**	***		5	
	N 50-2000 (%)						*		*	*	**	***	***	*	7	
	ADN total (µg/g)								**					*	2	
	Biomasse microbienne (mg/kg)		*					**	**			*	**	**	6	
	16S (copies/g)					**			***						2	
	18S (copies/g)					**			***					*	3	
	Ergostérol total (mg/kg)		*	*					*						3	
	Ergostérol libre (mg/kg)		*												1	
	Ergostérol lié (mg/kg)			*					*						2	
	18S/16S						*								1	
	FDA (nmol/min/g)											*			1	
Protéase (nmol/min/g)					*	**		***				*	**	5		
LAP (nmol/min/g)					*	*	*				***	***	**	5		
Arylamidase (nmol/min/g)		**	*		**	***	***	***				**	**	***	8	
N minéralisé (mg/kg 28 j)			*					**	*					*	4	
APM (mg/kg)								**	***	*	*	**	***	*	1	
ABM (mg/kg)								**	***	*	*	**	***		6	
Glucosidase (nmol/min/g)									**						1	
C minéralisé (mg/kg 28j)													**	**	2	

- **Indicateurs + discriminants** dans **essais + anciens**
- **Effet quantité C** dans **essais récents**

Indicateur non mesuré

Indicateurs discriminants

* : 5%

** : 1%

*** : 0,1%

↑ vs. témoin sans PRO

↓ vs. témoin sans PRO

Non significatif

Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Aptitude des indicateurs à discriminer les modalités agronomiques

Pratique la moins discriminée : Couverts intermédiaires

Âge pratique couverts

+

10 comparaisons

	Âge des essais	7 ans		8 ans		9 ans		48 ans (10 ans couverts)		27 ans		SCORING Couverts (5%)
		COMBE	AUZEVILLE	BAZIEGE	BOIA1	BOI ENV						
Couverts	Type de couverts	Leg.* + autres	Leg.* + autres	Rotation courte Leg.* + autres	Rotation longue Leg.* + autres	Labour Leg.* + autres	SD Leg.* + autres	Labour Leg.* + autres	Labour Autres	SD Leg.* + autres	SD Autres	
	Classe de biomasse couverts	Biomasse moyenne	Biomasse faible	Biomasse faible	Biomasse faible	Biomasse faible	Biomasse faible	Biomasse faible	Biomasse moyenne	Biomasse faible	Biomasse moyenne	
Variables physico-chimiques	C org (%)											0
	C org Rock-Eval (g/kg)											0
	C stable 100 ans (g/kg)											0
	C 0-50 (%)									b ***	b ***	2
	C 50-200 (%)					b *			a *	a *	a *	4
	C 200-2000 (%)									a ***	a **	2
	C 50-2000 (%)									a ***	a ***	2
	Carbone actif (g/kg)											0
	C oxydé (mg/kg)											0
	C labile 20 ans (g/kg)		*									1
	N total (%)											0
	N 0-50 (%)										b *	1
	N 50-200 (%)										a **	1
	N 200-2000 (%)											0
	N 50-2000 (%)										a *	1
Variables biologiques	ADN total (µg/g)											0
	Biomasse microbienne (mg/kg)										a *	1
	16S (copies/g)											0
	18S (copies/g)							a *	a *			2
	Ergostérol total (mg/kg)											0
	Ergostérol libre (mg/kg)					a *						1
	Ergostérol lié (mg/kg)		*									1
	18S/16S											0
	FDA (nmol/min/g)											0
	Protéase (nmol/min/g)								a *			1
	LAP (nmol/min/g)					a *					a *	2
	Arylamidase (nmol/min/g)										a ***	1
	N minéralisé (mg/kg 28j)			**								1
	APM (mg/kg)							b *				1
	ABM (mg/kg)					a *						1
	Glucosidase (nmol/min/g)	*					a *			b ***	b ***	4
	C minéralisé (mg/kg 28j)											0

- **Indicateurs peu discriminants**
quelque soit âge de la pratique
- **Biomasses faibles à moyennes**

Leg.* : Légumineuses

Classes de biomasses (moyennes sur 5 ans) :

Biomasse **faible** : <2 T MS/ha

Biomasse **moyenne** : entre 2 et 4 T MS/ha

Biomasse **élevée** : >4 T MS/ha

Indicateurs discriminants

* : 5%

** : 1%

*** : 0,1%

↑ vs. témoin sans C.I.
↓ vs. témoin sans C.I.
Non significatif

Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Coût et faisabilité technique des indicateurs

Variable	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	Autre référentiel accessible (autre que Microbioterre) : oui/non
Variables physico-chimiques							
C org (%)	1	1 (2 semaines)	1	Sol sec	1	1	oui
C org Rock-Eval (g/kg)	3	3	3	Sol sec	1	2	non
C stable 100 ans (g/kg)	3	3	3	Sol sec	1	2	non
C 0-50 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
C 50-200 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
C 50-2000 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
C 200-2000 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
Carbone actif (g/kg)	3	3	3	Sol sec	1	2	non
C oxydé (mg/kg)	1	1 (2 à 3 semaines)	1	Sol sec	1	2	non (ref. internationales)
C labile 20 ans (g/kg)	3	3	3	Sol sec	1	2	non
N 0-50 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
N 50-200 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
N 200-2000 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
N 50-2000 (%)	2	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol sec	1	1	RMQS (accessible?)
Variables biologiques							
ADN total (µg/g)	1	1	1	Sol brut	3	2	oui
Biomasse microbienne (mg/kg)	3	2	3	Sol brut	2	1	Référentiel Bioindicateurs
16S (nbre copies/g)	2	1	3	Sol brut	3	3	non (dépendant des amorces)
18S (nbre copies/g)	2	1	3	Sol brut	3	3	non (dépendant des amorces)
Ergostérol total (mg/kg)	3	1	2	Sol congelé (-80°C)	3	2	oui
Ergostérol libre (mg/kg)	3	1	2	Sol congelé (-80°C)	3	1	oui
Ergostérol lié (mg/kg)	3	1	2	Sol congelé (-80°C)	3	1	oui
18S/16S	2	1	3	Sol brut	3	3	non (dépendant des amorces)
FDA (nmol/min/g)	1	1	1 à 2	Sol brut	3	2	Oui (Bioindicateurs)
Activité protéase (nmol/min/g)	2	1	2	Sol brut	3	2	non
LAP (nmol/min/g)	2	1	2	Sol brut	3	1	non
Arylamidase (nmol/min/g)	1	1	2	Sol brut	3	1	non
N minéralisé (mg/kg 28 j)	2	3	3	Sol brut	2	1	oui (conversions eq. kg/ha)
APM (mg/kg)	2	2	2	Sol sec	1	2	oui (conversions eq. kg/ha)
ABM (mg/kg)	1	1 (2 à 3 semaines)	2	Sol brut	2 à 3	2	oui (conversions eq. kg/ha)
Glucosidase (nmol/min/g)	1	1	2	Sol brut	3	1	oui
C minéralisé (mg/kg 28j)	2	3	3	Sol brut	2	1	oui (conversions eq. kg/ha)

Variables physico-chimiques :

Variables Rock-Eval en cours de stabilisation : non retenues

Variables microbiologiques :

Mesures + chères, contraintes sol frais

Notion de coût et faisabilité technique :

1 : Coût faible, faisabilité élevée

3 : Coût élevé, faisabilité faible

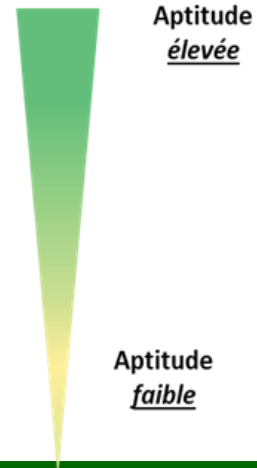
Choix des indicateurs du menu Microbioterre

Aptitude des indicateurs à discriminer les modalités agronomiques

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

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

Aptitude à discriminer les pratiques



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

Relations Indicateurs retenus – Fonctions 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 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
C org (%)	+	+		+				+	+	+	+	+	+	+	+
C 0-50 µm (%)									+						
C 50-200 µm (%)								+		+	+				
C 200-2000 µm (%)								+		+					
C 50-2000 µm (%)															
C KMnO ₄ (mg/kg)				+		-	-	+			+		+	+	+
N total (%)	+	+	-												
N 0-50 µm (%)															
N 50-200 µm (%)	+	+													
N 50-2000 µm (%)															
C microbien (mg/kg)	+			+				+			+				
18S (copies/g)											+				
Protéase (nmol/min/g)	+	-						+			+				
LAP (nmol/min/g)															
ARYLN (nmol/min/g)	+														
ABM (mg/kg)	+				+						+				
B-Glu (nmol/min/g)	+	+						+				+			

Lien Indicateur / Fonction		
	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 <u>non identifié</u>		

- Globalement, chaque **indicateur** retenu nous renseigne sur **au moins une fonction du sol**

- Résultats valorisés dans le **diagnostic Microbioterre**



Séminaire de restitution du projet Microbioterre

9h00-9h15 - Mot d'accueil de la Direction d'UniLaSalle-Campus de Rouen/ Présentation du déroulé de la journée

9h15-12h05- Présentation du projet Casdar Microbioterre

Animatrices : Sylvie Recous & Wassila Riah-Anglet

- 9h15 : Génèse du projet – *Arvalis*
- 9h30 : Sites échantillonnés – *Terres Inovia*
- 9h45 : Indicateurs physico-chimiques et biologiques suivis – *UniLaSalle*
- 10h10 : Stratégie d'échantillonnage – *Aurea*

10h20 : Temps d'échanges

10h40-10h55 : Pause

Animateurs : Matthieu Valé & Pierre-Yves Roussel

- 10h55 : Résultats : Choix du menu Microbioterre – *UniLaSalle/INRAE*
- Résultats « Liens indicateurs/ fonctions » - Résultats « Liens indicateurs pratiques »

11h40 : Temps d'échanges

12h00 - 13h30 : Pause déjeuner

13h30- 16h30 - L'outil Microbioterre

- 13h30 : Recommandations pour le prélèvement des échantillons – *Aurea*
- 13h40 : Construction & évaluation du référentiel d'interprétation Microbioterre – *UniLaSalle*

14h20 : Temps d'échanges

- 14h30 : Présentation de cas d'étude – CA de Bretagne/ CA d'Alsace
- 15h30 : Communication & Diffusion – *Arvalis*

15h40: Temps d'échanges

16h20-16h30 : Conclusion et Perspectives

16h30 : Clôture du séminaire

Des indicateurs microbiologiques dans l'analyse de terre de routine

« L'outil Microbioterre »

Valé Matthieu, Riah-Anglet Wassila, Cusset Elodie et Bennegadi-Laurent Nadia



Microbioterre : De l'indicateur au conseil en agriculture

Choix du menu Microbioterre

Prélèvement terre

Construction & évaluation du référentiel Microbioterre

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

Revue bibliographique
80 articles

Essais agronomiques &
littérature
20 essais

Essais agronomiques
20 essais

Liens Indicateurs – Pratiques culturales

Articles bibliographiques
147 articles

Essais agronomiques
20 essais

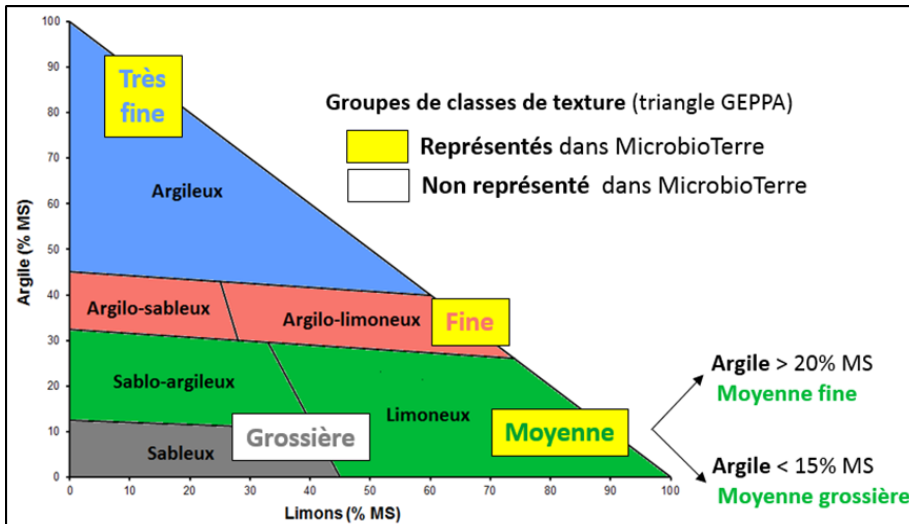
Parcelles agriculteurs
26 parcelles

2 types de données :

- Données acquises dans le projet
- Données bibliographiques

Prélèvement - Variables pédoclimatiques à prendre en compte

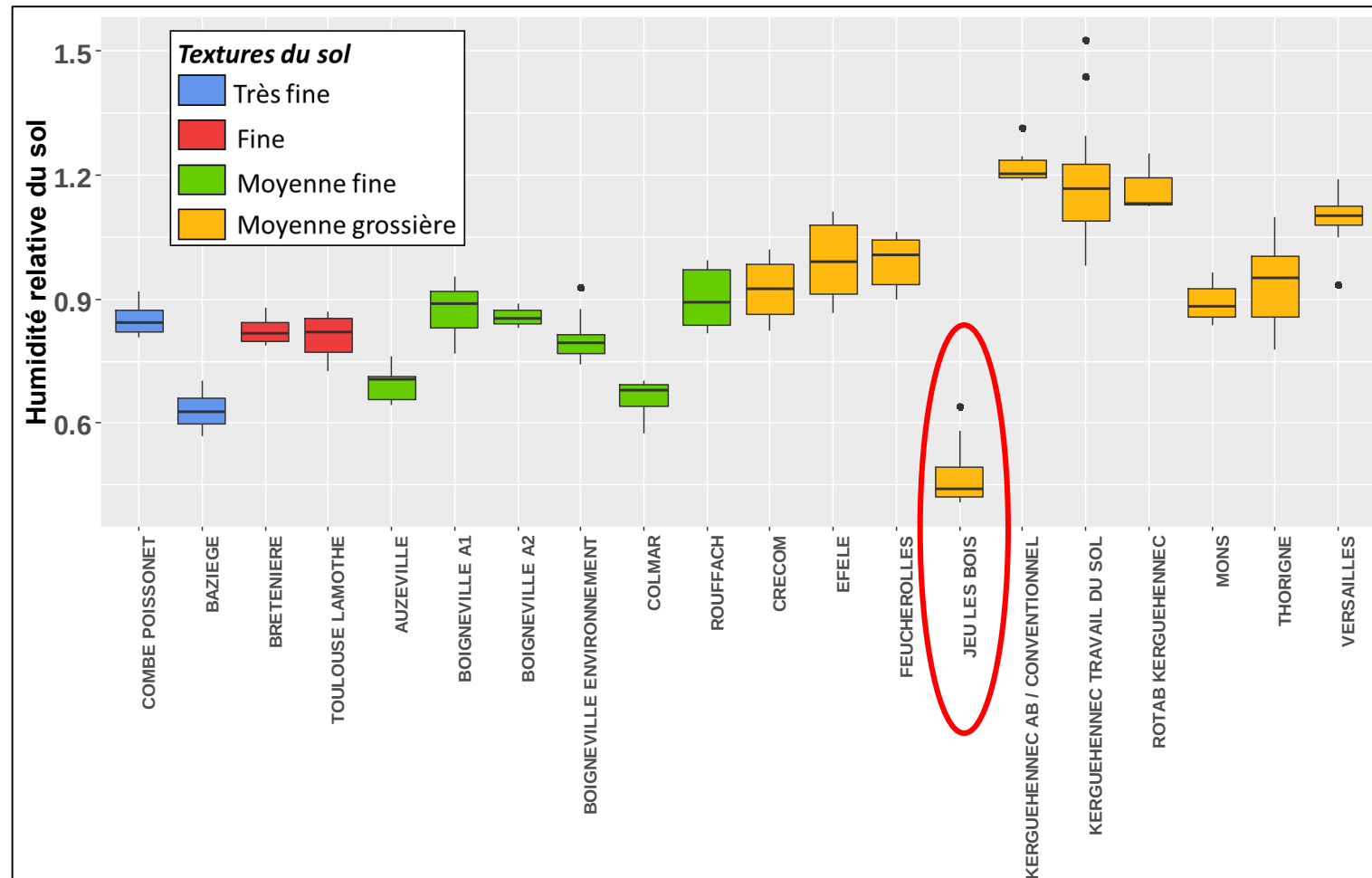
- Humidité relative du sol au moment du prélèvement



Essai de JEU LES BOIS

Sol très sec : humidité relative < 0,65

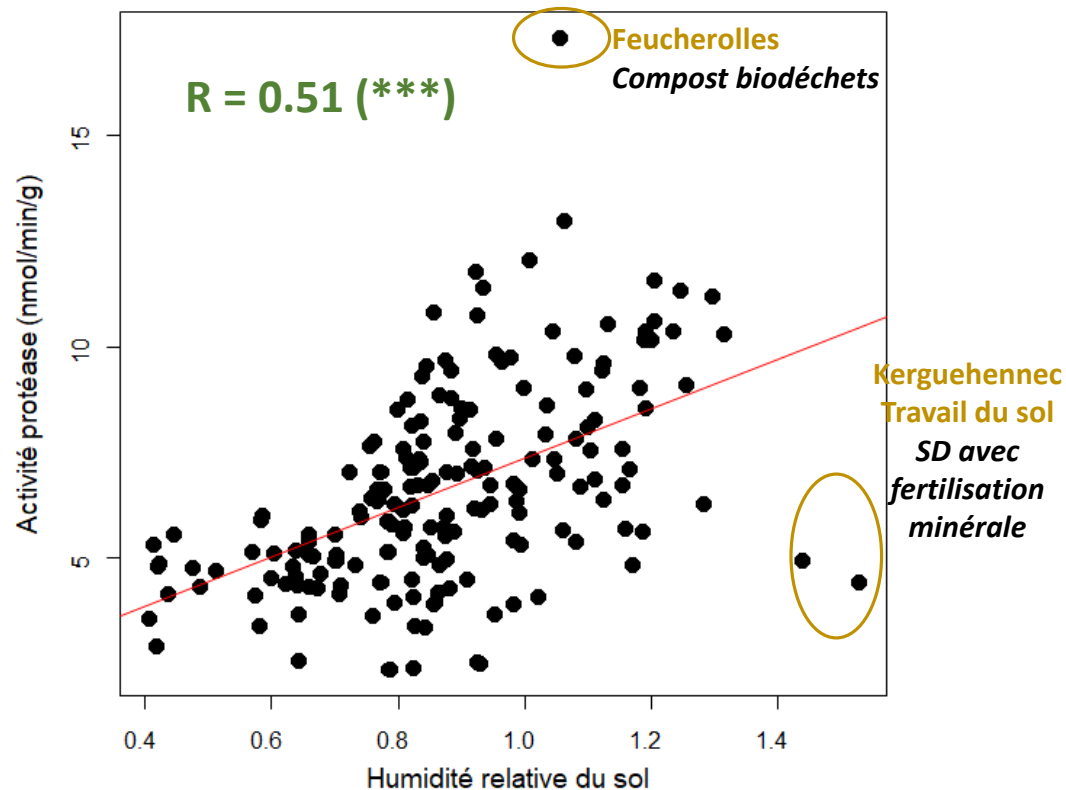
→ Impact sur les indicateurs mesurés ?



Prélèvement - Variables pédoclimatiques à prendre en compte

- Corrélation entre humidité relative du sol au moment du prélèvement & variables microbiologiques mesurées

Exemple de l'activité protéase



- Relation positive entre **humidité du sol** au moment du prélèvement & **activité protéase mesurée**

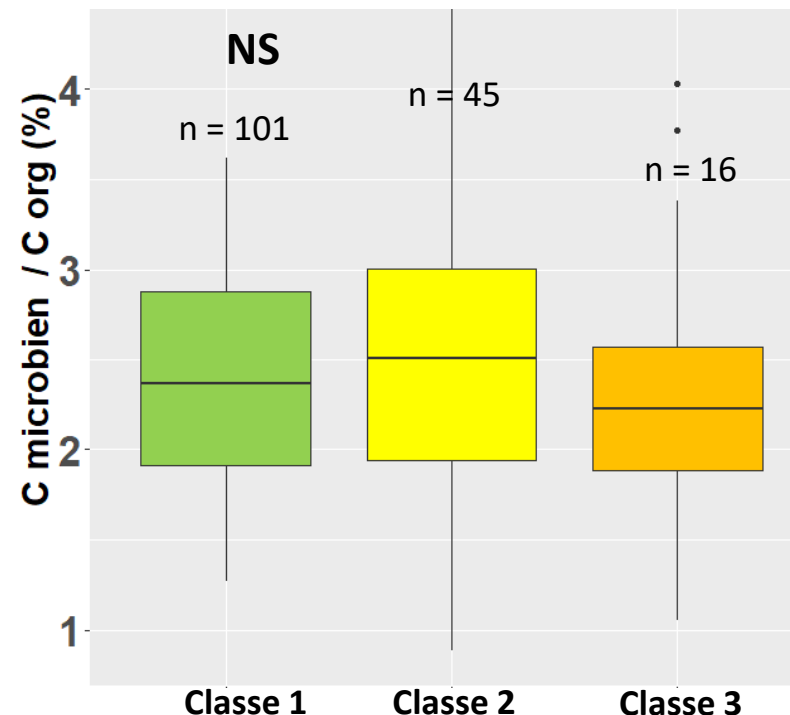
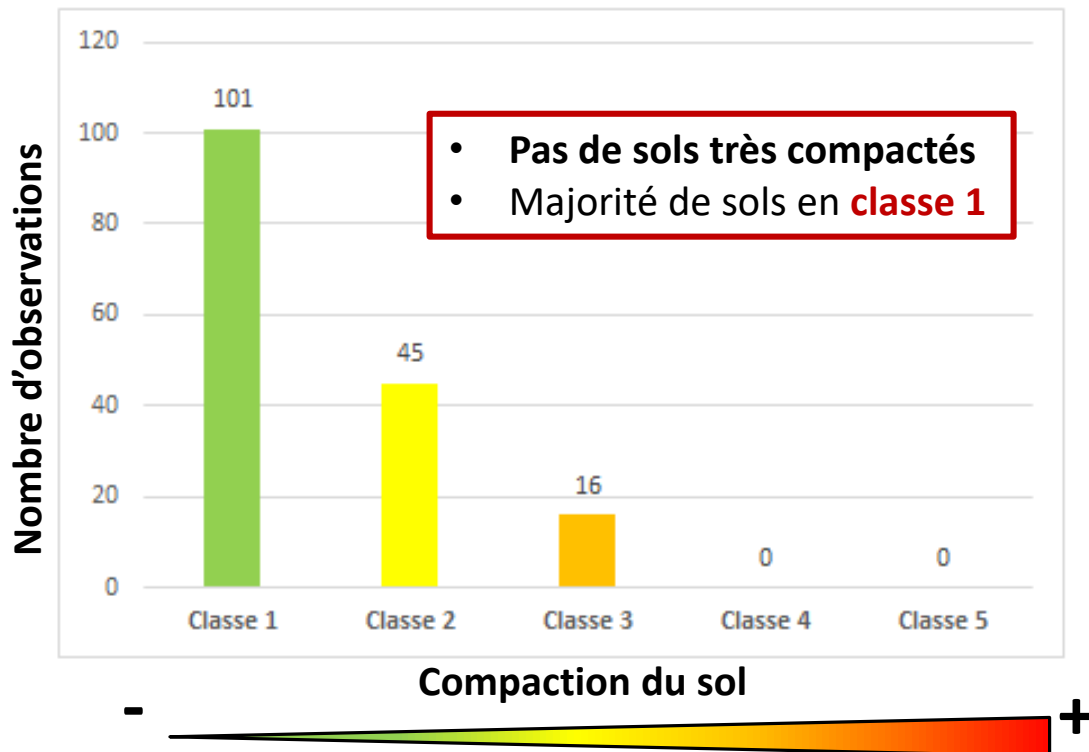
--> **Faible humidité du sol : Impact négatif** sur les indicateurs microbiologiques

Guide Microbioterre

Période de prélèvement : Proscrire le prélèvement sur sol sec

Prélèvement - Variables pédoclimatiques à prendre en compte

- Niveau de compaction du sol sur 0-20 cm



Etudes antérieures :

Indicateur C microbien sensible au niveau de compaction du sol (Salducci, 2007)

Microbioterre :

Pas d'effet sur C microbien car faible variabilité du niveau de compaction

Guide Microbioterre - Evaluation de la structure du sol

Evaluer la structure du sol au moyen d'un test bêche. Utiliser par exemple la **méthode ISARA ou VESS**



Prélèvement - Recommandations issues de la littérature

Température

- ✓ De préférence une température moyenne journalière de l'air supérieure à 8 °C
- ✓ Proscrire le prélèvement sur sol sec ou gelé.

Opérations culturales

- ✓ **Avant tout apport de carbone au sol** (épandage de produit organique, d'enfouissement de résidus de culture ou destruction de couvert), ou **au minimum 2 mois après** ces opérations culturales,
- ✓ Avant tout apport d'amendement minéral basique, ou au minimum 3 mois après
- ✓ 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), ou au minimum 4 semaines après l'apport

--> **Éléments regroupés dans le mode opératoire de prélèvement**

Microbioterre : De l'indicateur au conseil en agriculture

Choix du menu Microbioterre

Prélèvement
terre

**Construction & évaluation du
référentiel Microbioterre**

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

Revue bibliographique
80 articles

Fonction stockage C : Simulations
modèle AMG
18 essais

Essais agronomiques &
littérature
20 essais

Essais agronomiques
20 essais

Liens Indicateurs – Pratiques culturales

Articles bibliographiques
147 articles

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

2 types de données :

- Données acquises dans le projet
- Données bibliographiques

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels **facteurs d'entrée** pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Déploiement test du menu

Construction des référentiels

- Référentiel global
- Sous-référentiels *si possible*

Référentiel complété



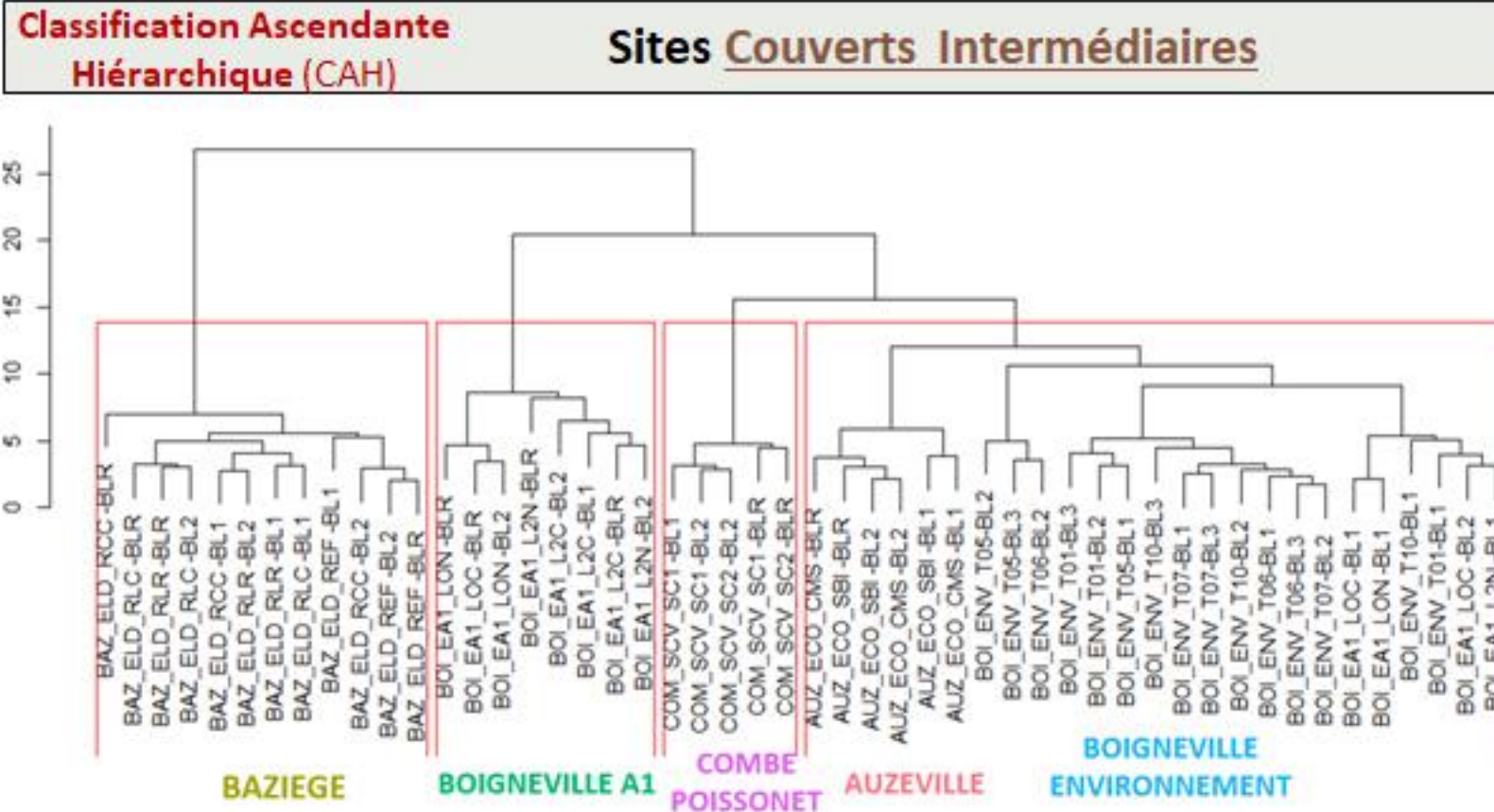
Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

Quels facteurs d'entrée dans les sous-référentiels ?

Quels facteurs prédominants dans l'explication de la variabilité des indicateurs ?

Variables physico-chimiques



Observations regroupées **par sites**

Effet pédoclimat (site) >> effet pratiques culturales

Facteurs pédoclimatiques prédominants
vs. pratiques

✓ **Pris en compte** dans un *sous-référentiel*

(Figuerola *et al.*, 2012)

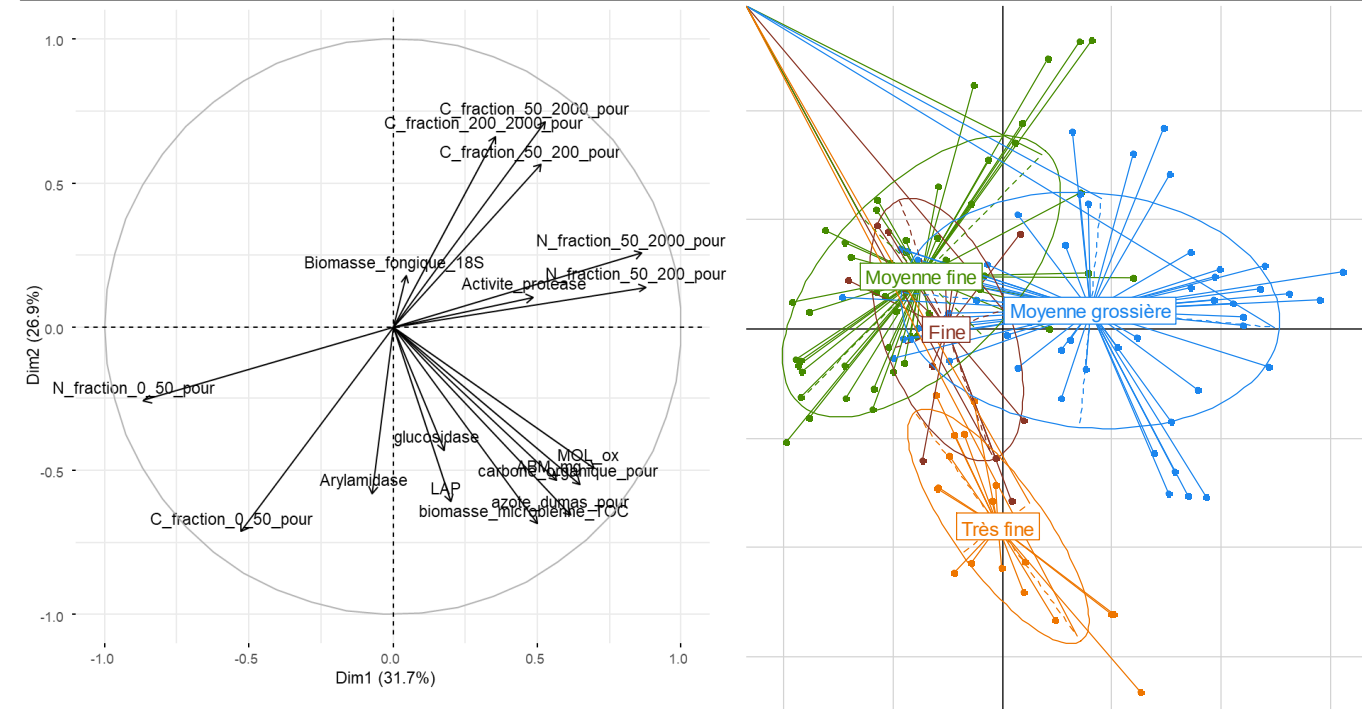
Quels facteurs d'entrée dans les sous-référentiels ?

Quels facteurs prédominants dans l'explication de la variabilité des indicateurs ?

Variables physico-chimiques & microbiologiques

Analyse en composantes
principales (ACP)

Tous sites - Texture du sol



Zone climatique

Types de climats France métropolitaine

- Classification proposée par Joly *et al.* (2008) : **8 types de climats**
- Référentiel Microbioterre **par type de climat** : **Pas assez d'observations**

- Effet texture marqué** sur indicateurs physico-chimiques & microbiologiques
✓ Données d'entrée de sous-référentiels
- Effet climat** : Pas assez d'observations
✗ Non pris en compte dans les sous-référentiels

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels **facteurs d'entrée** pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Construction des référentiels

- Référentiel global ✓
- Sous-référentiels
Par classe de texture

Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

Déploiement test du menu

Référentiel complété



Construction du référentiel global

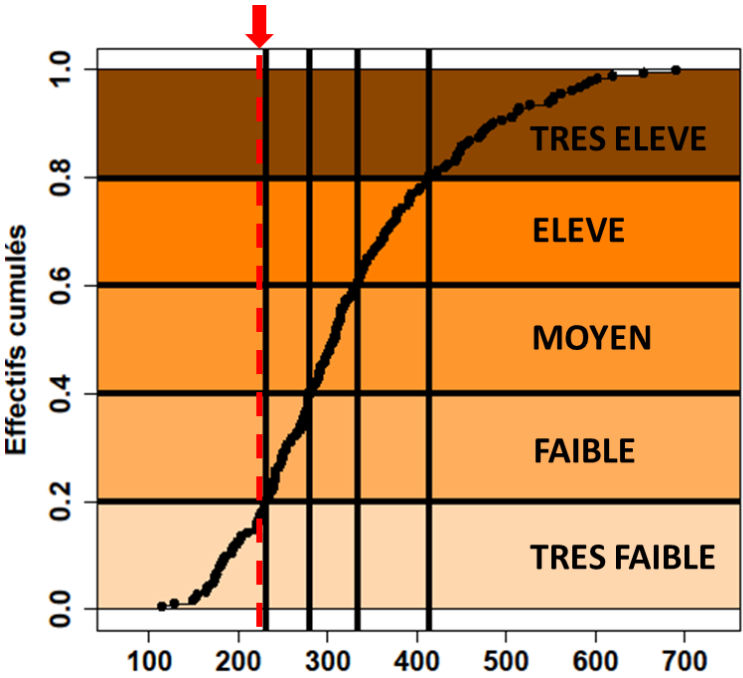
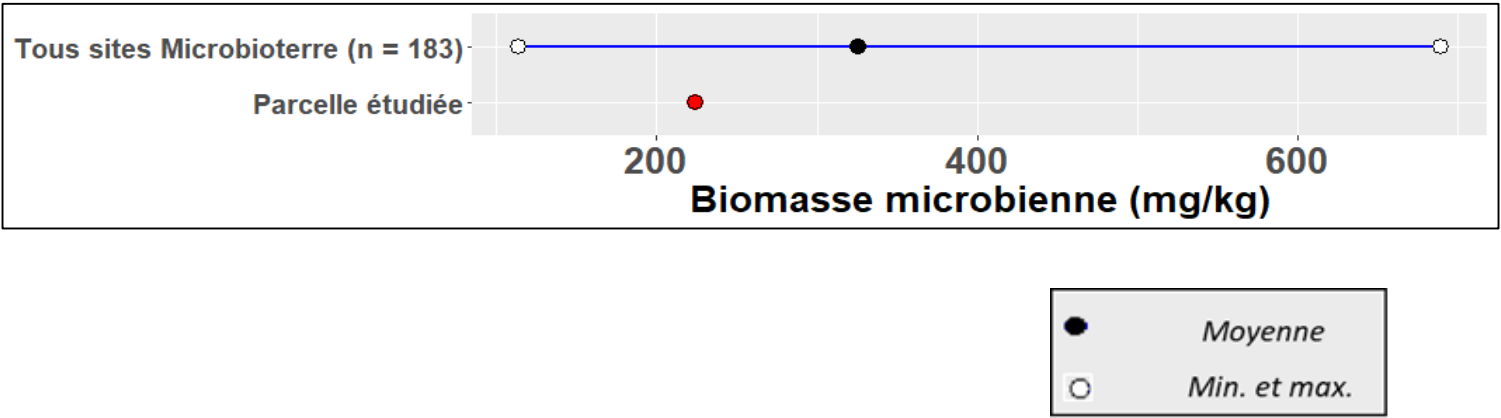
n = 183 observations

Tous sites – Toutes pratiques culturales

1^{er} niveau d'interprétation : Valeur comprise dans le référentiel MicrobioTerre ?

2^{ème} niveau d'interprétation : Niveau de l'indicateur ?

Exemple d'un indicateur μ biologique : **Biomasse microbienne**



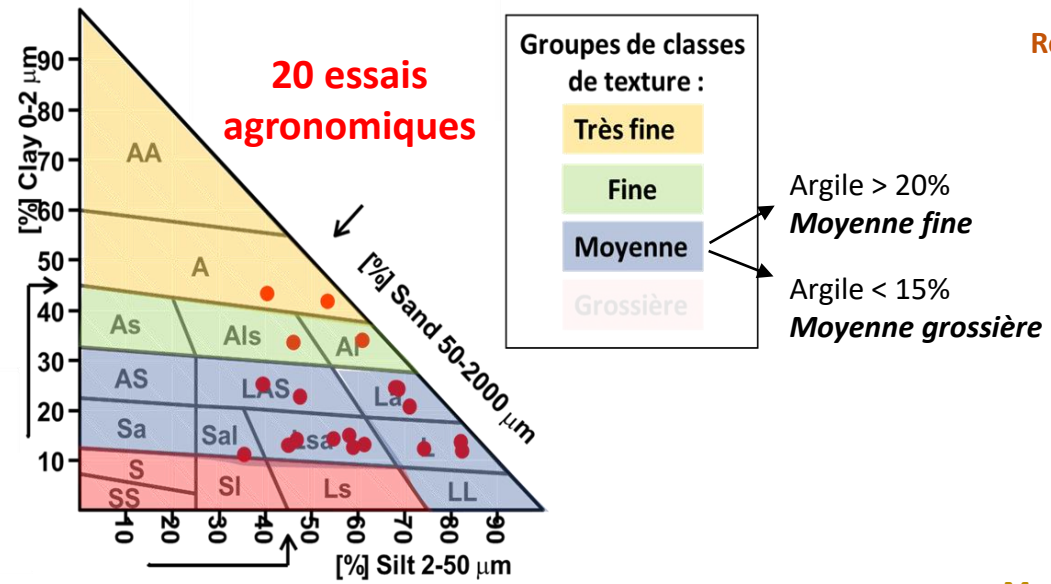
à partir des travaux de l'Université Cornell (2017)

→ **Valeur de biomasse microbienne comprise** dans référentiel Microbioterre

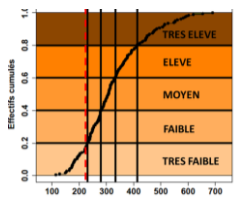
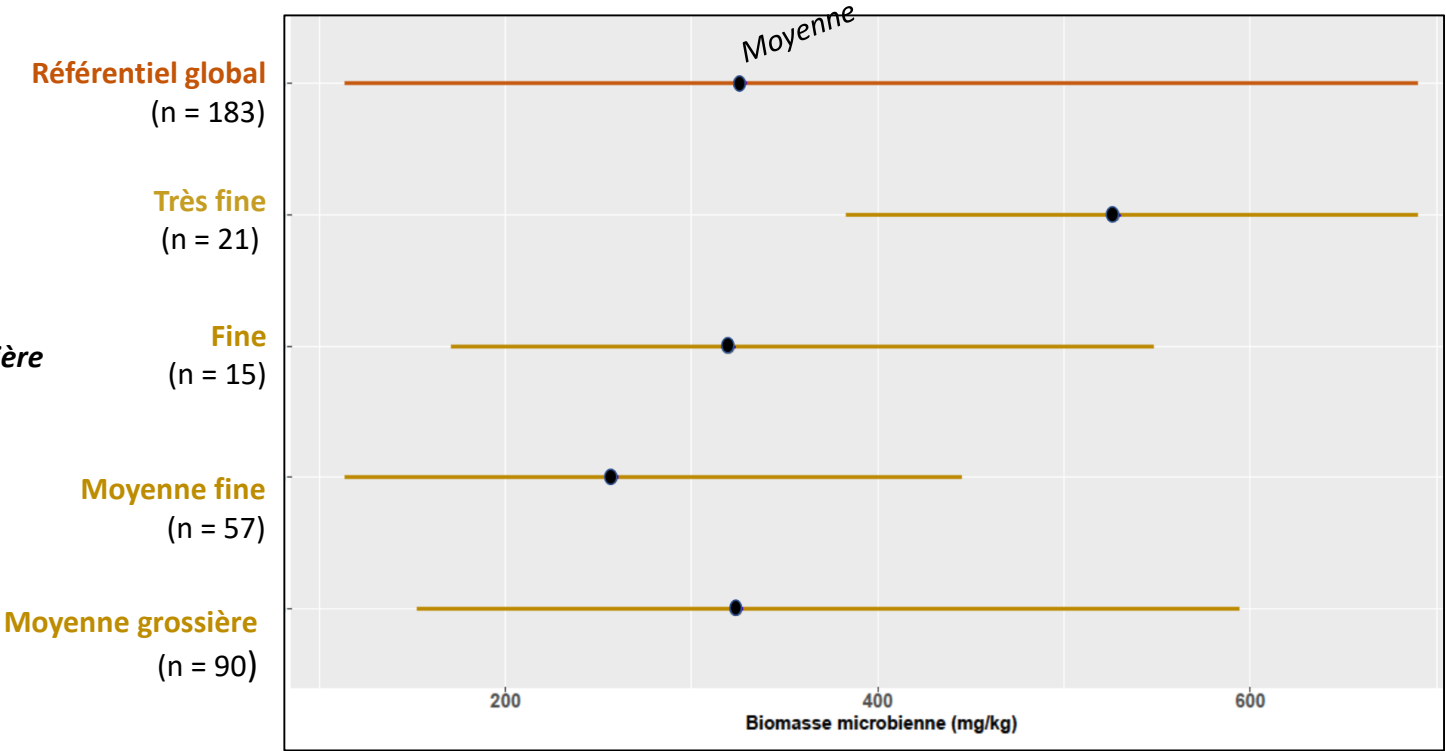
→ **Valeur très faible** de l'indicateur

Construction des sous-référentiels par classe de texture

Triangle des textures GEPPA



Exemple d'un indicateur μ biologique : **Biomasse microbienne**



Effectifs trop restreints pour constituer les classes

Pour *certaines* groupes de classes de texture (**Textures très fine & fine**) :
Nombres d'observations très faibles
→ **Construction des sous-référentiels** par texture *mais* pas encore assez fournis

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels **facteurs d'entrée** pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Construction des référentiels

- Référentiel global ✓
- Sous-référentiels *si possible*
Par classe de texture



Déploiement test du menu

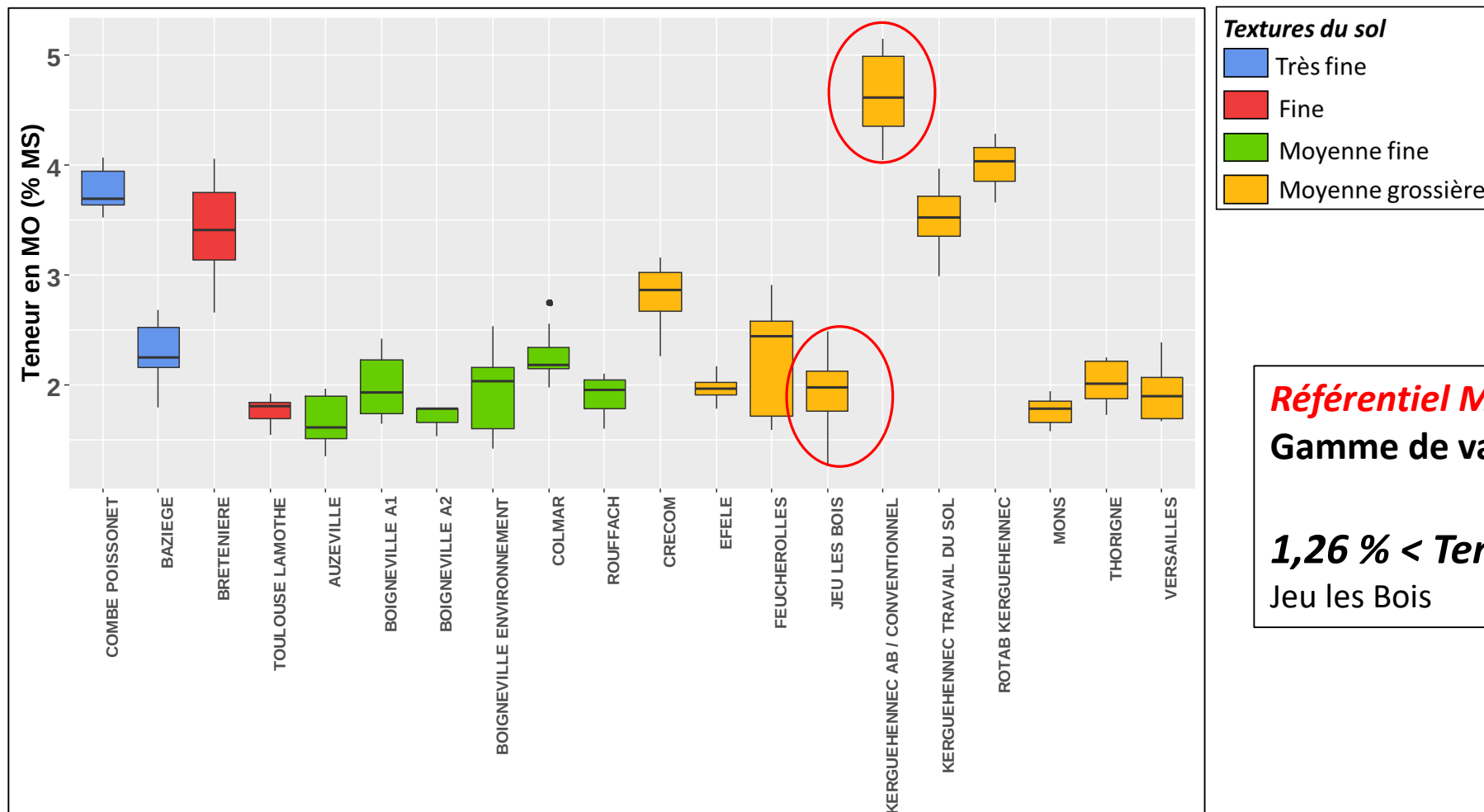
Référentiel complété

Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

Domaines de validité du référentiel Microbioterre

○ Teneurs en MO des sols analysés



Référentiel Microbioterre :

Gamme de variation de la teneur en MO

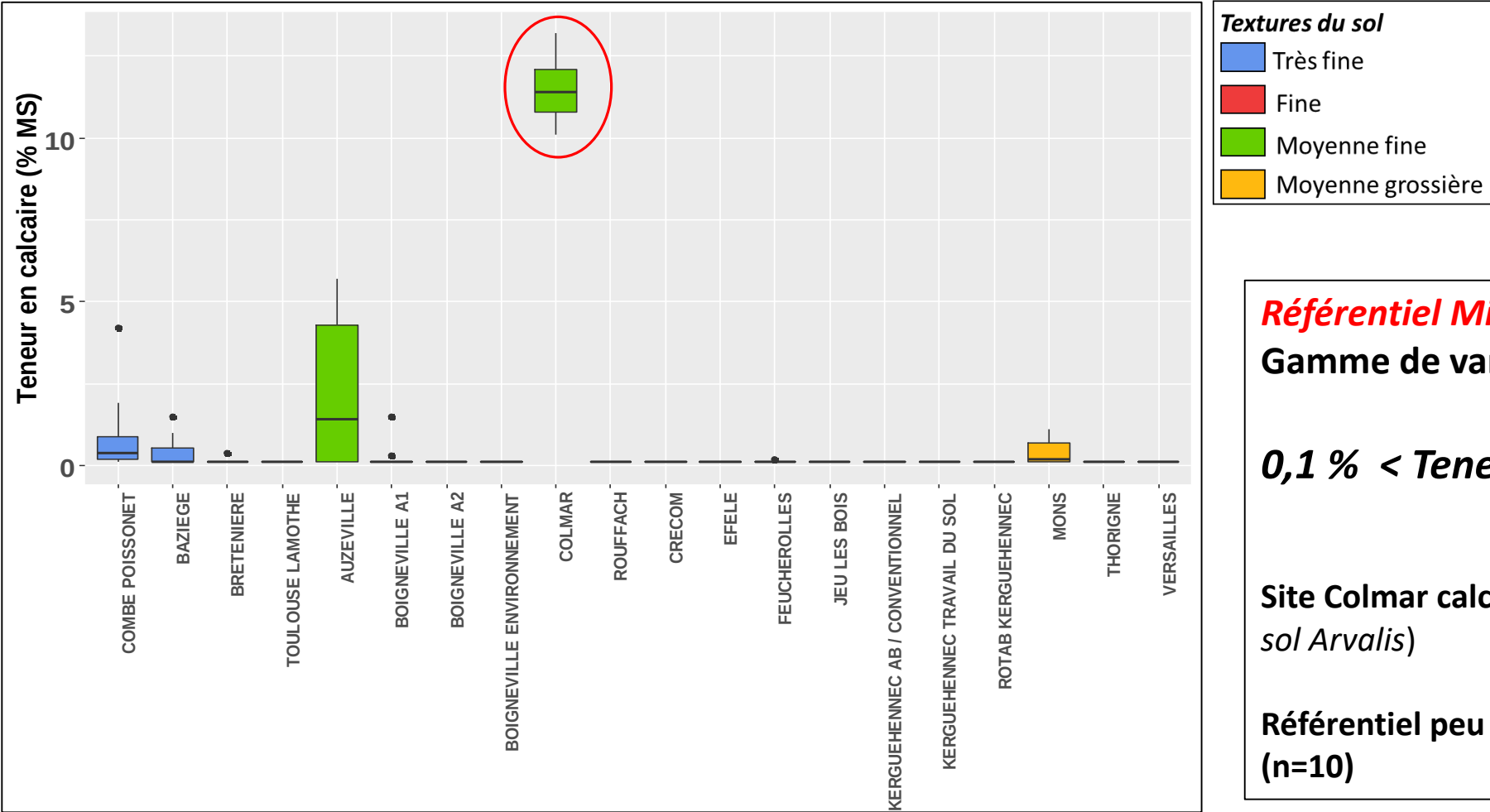
1,26 % < Teneur MO (% MS) < 5,15 %

Jeu les Bois

Kerguehenneec

Domaines de validité du référentiel Microbioterre

Taux de calcaire des sols analysés



Référentiel Microbioterre :
Gamme de variation de la teneur en calcaire

0,1 % < Teneur calcaire (% MS) < 13,2 %
Colmar

Site Colmar calcaire : taux calcaire > 5% (*Seuil base sol Arvalis*)

Référentiel peu robuste pour les sols calcaires
(n=10)

Domaines de validité du référentiel Microbioterre

○ pH eau des sols analysés



Référentiel Microbioterre :
Gamme de variation du pH eau

$6 < pH\ eau < 8,4$
Crecom Mons

**Référentiel peu robuste pour des sols
avec un $pH < 6$ (n=1)**

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels **facteurs d'entrée** pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Construction des référentiels

- Référentiel global
- Sous-référentiels *si possible*

Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

Déploiement test du menu

Référentiel complété



Pratiques culturelles impactant chaque indicateur

Leviers agronomiques possibles

Valeurs relatives moyennes Modalité pratique vs. Modalité référence

Indicateurs du menu Microbioterre			PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes
Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)	+16.2%	+6.1%	+1.5%	+1.6%	+4.4%
		C 0-50 (%)	-3.5%	-2.7%	-1.8%	+0.6%	-1%
		C 50-200 (%)	+35.4%	+41.9%	+29.5%	-4.9%	+9.9%
		C 200-2000 (%)	+15.7%	+27.1%	+9.9%	-3%	+13.3%
		C 50-2000 (%)	+27.4%	+37.3%	+22.3%	-4%	+9.6%
		C oxydé (mg/kg)	+32.1%	+1.9%	6%	+12.6%	+6.7%
	Azote	N total (%)	+18.5%	+5.3%	+3.7%	+13.2%	+4.6%
		N 0-50 (%)	-2.6%	-0.3%	-0.4%	+0.9%	-1%
		N 50-200 (%)	+40.4%	+9.8%	+5.9%	-8.4%	+9.5%
		N 50-2000 (%)	+34.2%	+6.4%	+5.3%	-12.3%	+12.8%
Indicateurs microbiologiques	Abondances	Biomasse microbienne (mg/kg)	+38.1%	+6.5%	+6.8%	+22.9%	20%
		18S (copies/g)	+82.4%	+28.8%	+41.7%	+65.1%	4%
	Activités	Activité protéase (nmol/min/g)	+25.9%	+11.4%	-9%	+7.3%	+15.4%
		LAP (nmol/min/g)	+22.3%	+9.4%	+1.3%	+18%	+11.8%
		Arylamidase (nmol/min/g)	+36.1%	+16.6%	+10.3%	+29.7%	+20.5%
		ABM (mg/kg)	36%	+11.6%	-1.4%	+8.2%	+0.6%
		Glucosidase (nmol/min/g)	+10.5%	-6.3%	-20%	+24.2%	+13.8%

Exemple 1 : Indicateur **Corg**

→ Pratique de la **+ à la- impactante** :

PRO > Couverts > Systèmes > Rotations > **Travail sol**



Pratique culturelle impactant fortement l'indicateur

Pratique culturelle impactant faiblement l'indicateur

Par indicateur du menu

→ Pratiques de la + à la – impactante

Proposition de leviers agronomiques en fonction du contexte agronomique

Pratiques culturales impactant chaque indicateur

Leviers agronomiques possibles

Valeurs relatives moyennes
Modalité pratique vs. Modalité référence

Indicateurs du menu Microbioterre			PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes
Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)	+16.2%	+6.1%	+1.5%	+1.6%	+4.4%
		C 0-50 (%)	-3.5%	-2.7%	-1.8%	+0.6%	-1%
		C 50-200 (%)	+35.4%	+41.9%	+29.5%	-4.9%	+9.9%
		C 200-2000 (%)	+15.7%	+27.1%	+9.9%	-3%	+13.3%
		C 50-2000 (%)	+27.4%	+37.3%	+22.3%	-4%	+9.6%
		C oxydé (mg/kg)	+32.1%	+1.9%	6%	+12.6%	+6.7%
	Azote	N total (%)	+18.5%	+5.3%	+3.7%	+13.2%	+4.6%
		N 0-50 (%)	-2.6%	-0.3%	-0.4%	+0.9%	-1%
		N 50-200 (%)	+40.4%	+9.8%	+5.9%	-8.4%	+9.5%
		N 50-2000 (%)	+34.2%	+6.4%	+5.3%	-12.3%	+12.8%
Indicateurs microbiologiques	Abondances	Biomasse microbienne (mg/kg)	+38.1%	+6.5%	+6.8%	+22.9%	20%
		18S (copies/g)	+82.4%	+28.8%	+41.7%	+65.1%	4%
	Activités	Activité protéase (nmol/min/g)	+25.9%	+11.4%	-9%	+7.3%	+15.4%
		LAP (nmol/min/g)	+22.3%	+9.4%	+1.3%	+18%	+11.8%
		Arylamidase (nmol/min/g)	+36.1%	+16.6%	+10.3%	+29.7%	+20.5%
		ABM (mg/kg)	36%	+11.6%	-1.4%	+8.2%	+0.6%
		Glucosidase (nmol/min/g)	+10.5%	-6.3%	-20%	+24.2%	+13.8%

Exemple 2 : Indicateur **biomasse microbienne**

→ Pratique de la **+ à la-** impactante :

PRO > Rotations > Systèmes > Travail sol > **Couverts**



Pratique culturelle impactant fortement l'indicateur

Pratique culturelle impactant faiblement l'indicateur

Par indicateur du menu

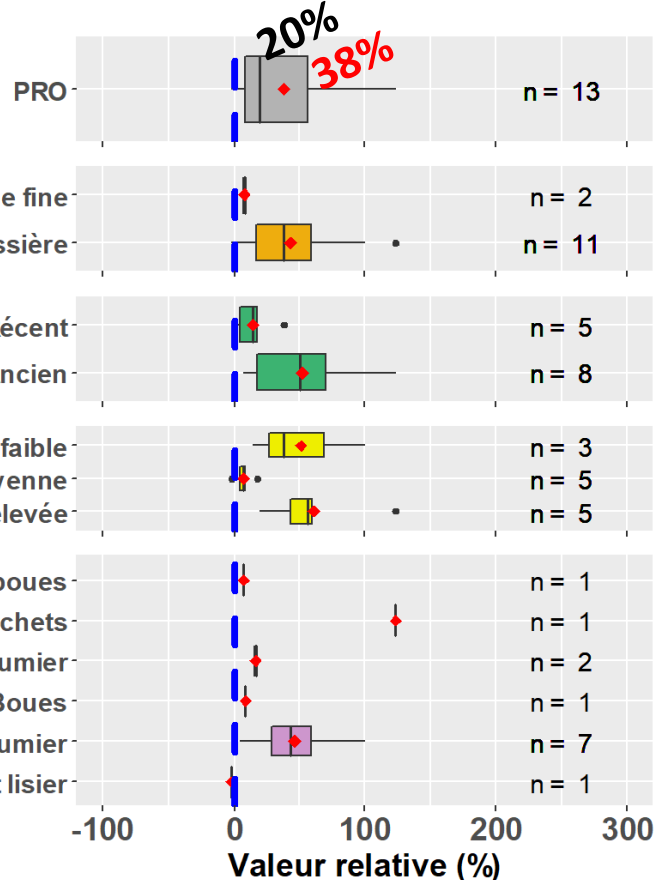
→ Pratiques de la + à la – impactante

Proposition de leviers agronomiques en fonction du contexte agronomique

Pratiques culturales impactant chaque indicateur

Valeurs relatives

PRO



Exemple:

Biomasse microbienne
par fumigation (mg/kg)

Classification types de
pratiques

PRO

6 types de PRO

Travail superficiel

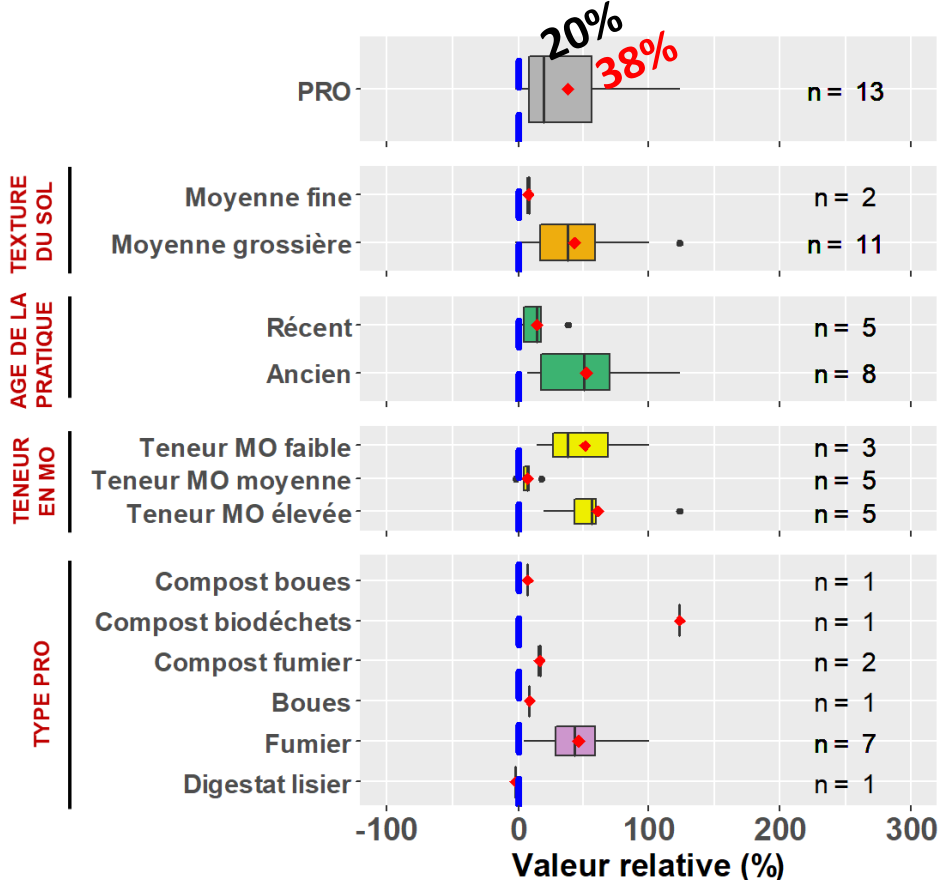
TS : Travail superficiel

SD : Semis Direct

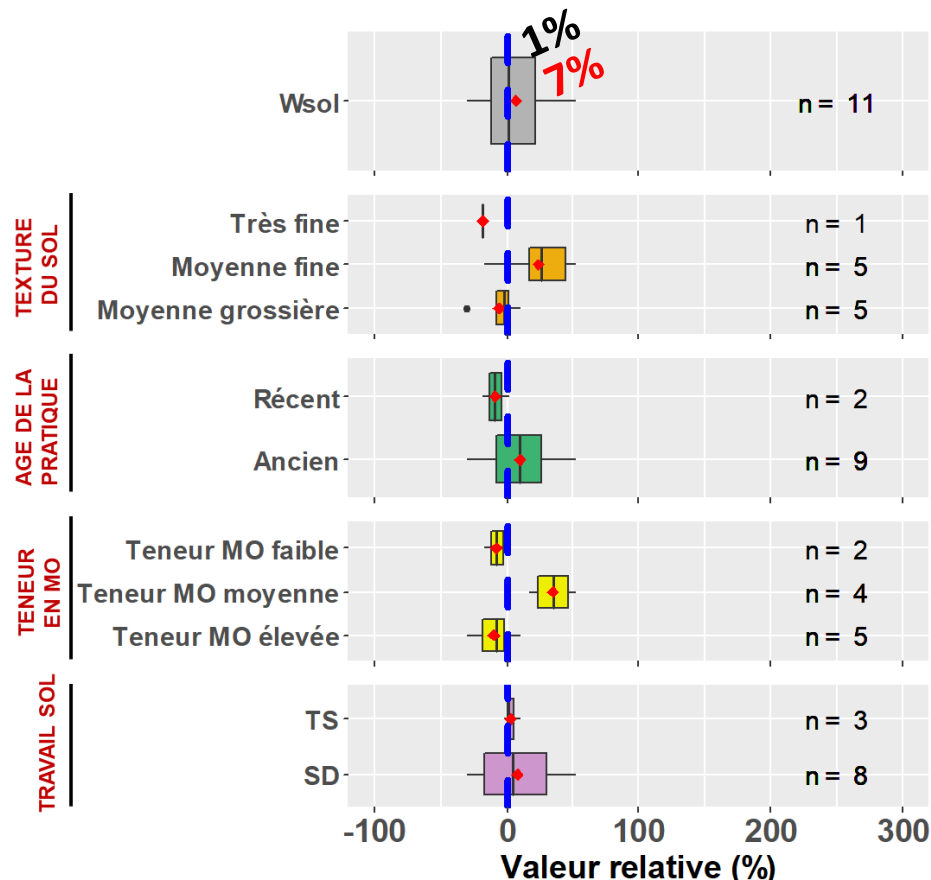
Pratiques culturales impactant chaque indicateur

Valeurs relatives

PRO



Travail du sol



Exemple:
Biomasse microbienne
par fumigation (mg/kg)

Effets de l'apport de PRO
et du type de travail du
sol sur le **C microbien**

PRO
En moyenne $\uparrow + 38\%$ C mic.

Travail du sol
En moyenne $\uparrow + 7\%$ C mic.

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels facteurs d'entrée pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Déploiement test du menu

Construction des référentiels

- Référentiel global ✓
- Sous-référentiels *si possible*
Par classe de texture

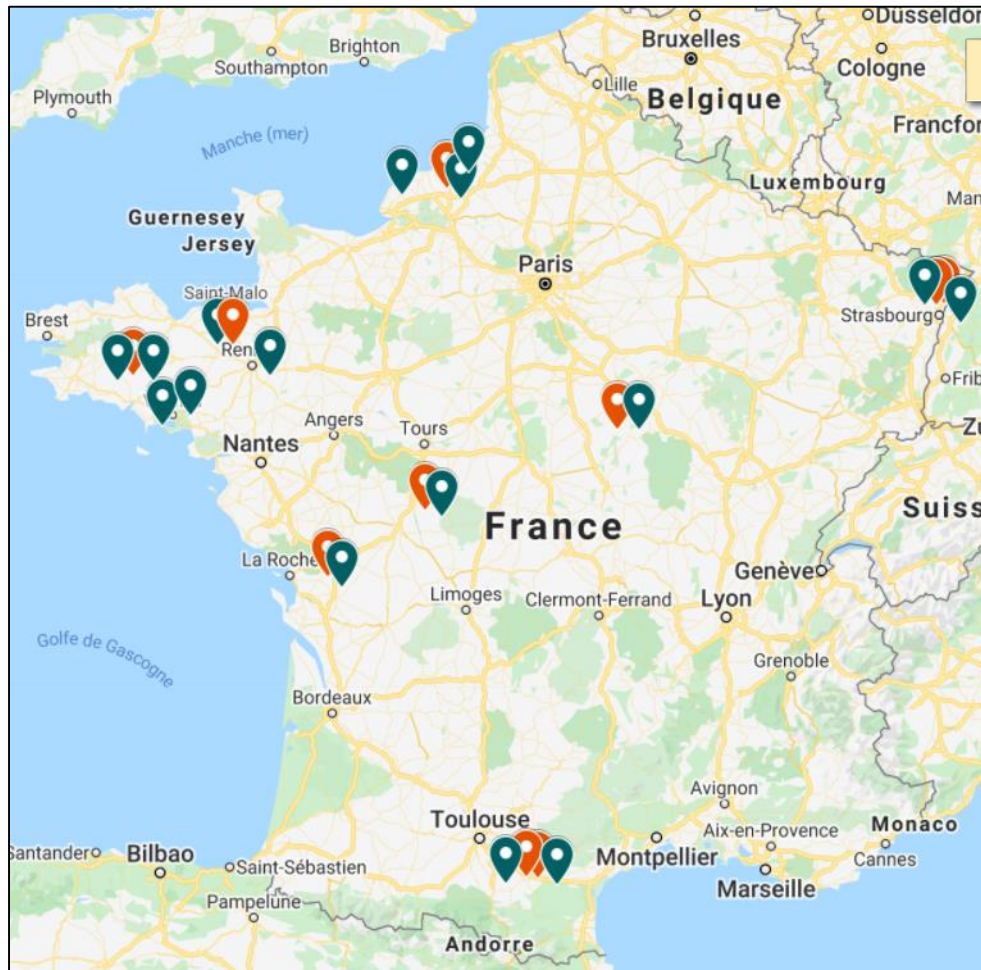


Référentiel complété

Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

Parcelles agriculteurs échantillonnées



26 parcelles

- Profondeur de prélèvement **0 – 20 cm**
- Dates de prélèvement : Entre fin mars et mai



Pratiques conventionnelles

- Labour



Pratiques innovantes ou bio.

- Travail superficiel du sol
- Semis direct
- Avec couvert permanent
- Apport déchets verts

Déploiement test du menu MicrobioTerre

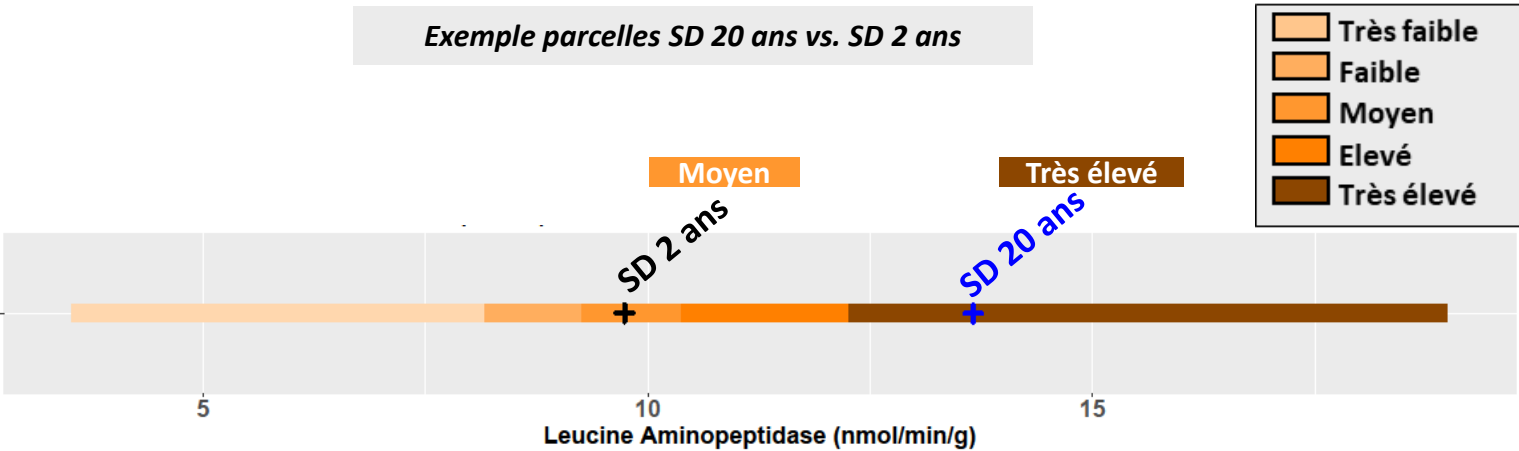
Parcelles agriculteurs

Mesure des **indicateurs du menu** sur chaque parcelle :

Chaque valeur remplacée dans référentiel global
2017-2018 (n=183 obs.)

Indicateurs physico-chimiques	Carbone	C org (%)
		C 0-50 (%)
		C 50-200 (%)
		C 200-2000 (%)
		C 50-2000 (%)
		C oxydé (mg/kg)
	Azote	N total (%)
		N 0-50 (%)
		N 50-200 (%)
		N 50-2000 (%)
Indicateurs microbiologiques	Abondances	Biomasse microbienne (mg/kg)
		18S (copies/g)
	Activités	Protéase (nmol/min/g)
		LAP (nmol/min/g)
		Arylamidase (nmol/min/g)
		ABM (mg/kg)
		Glucosidase (nmol/min/g)

Indicateur non mesuré



Dans cet exemple :

L'indicateur discrimine les pratiques culturelles entre les 2 parcelles agriculteurs

→ Aptitude discriminante potentielle des indicateurs :
Essais agronomiques & parcelles agriculteurs

Construction des référentiels d'interprétation

Essais agronomiques
20 essais

Parcelles agriculteurs
26 parcelles

Quels facteurs d'entrée pour le référentiel ?

- Facteurs pédoclimatiques
- Pratiques culturales

Construction des référentiels

- Référentiel global ✓
- Sous-référentiels *si possible*
Par classe de texture



Déploiement test du menu

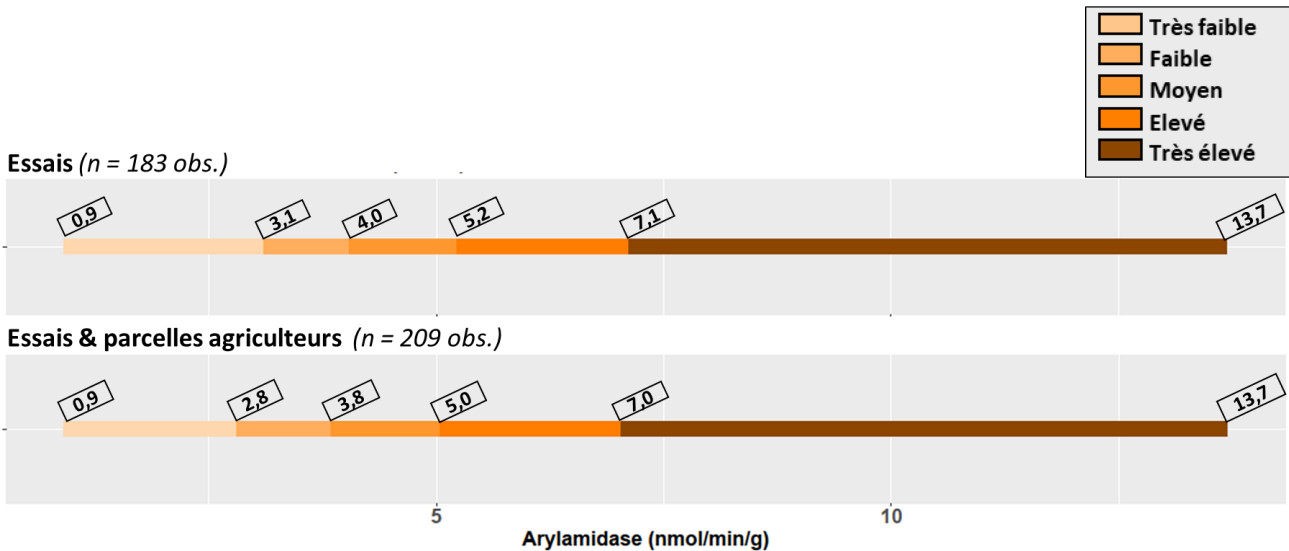
Référentiel complété

Domaines de validité du référentiel

Leviers agronomiques possibles

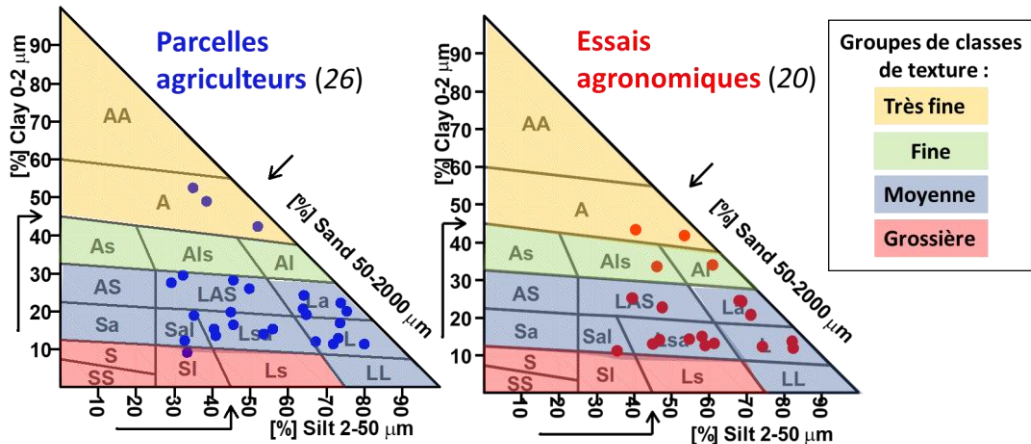
Déploiement test du menu MicrobioTerre

Exemple d'un indicateur μ biologique : **Activité arylamidase**



Valeurs indicateurs des parcelles agriculteurs comprises dans le référentiel Essais

Classes de textures du référentiel



Texture moyenne la plus représentée dans le référentiel

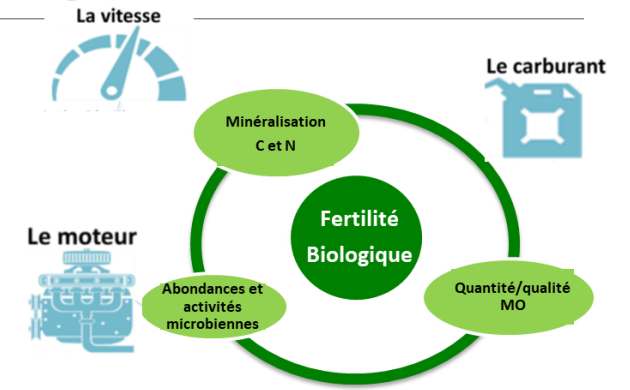
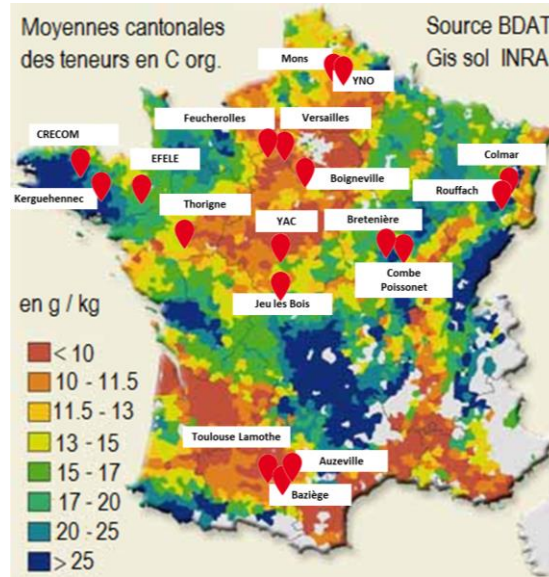
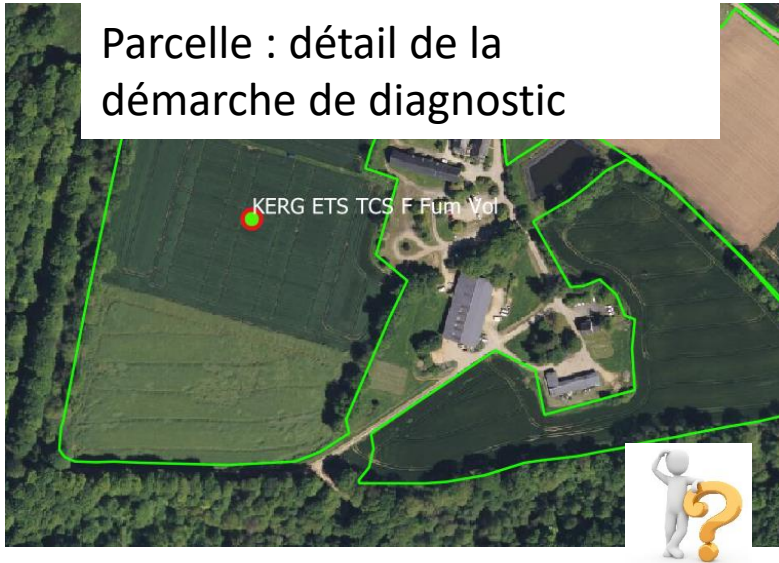
Présentation d'un cas d'étude déroulement du diagnostic

Roussel Pierre-Yves & Barbot Christophe

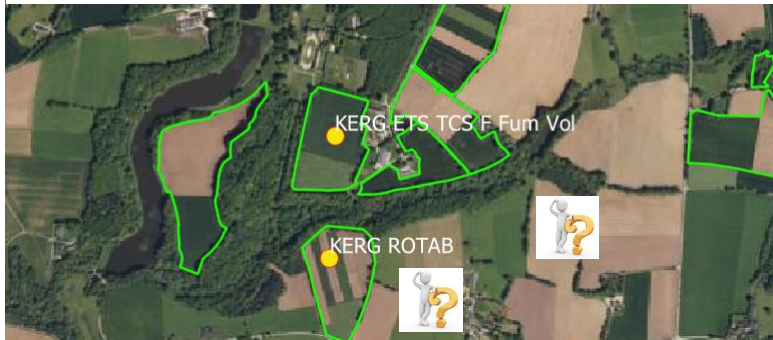


Cas d'étude: sites Bretagne

Parcelle : détail de la démarche de diagnostic



Comparaison systèmes de culture sur un même contexte pédoclimatique



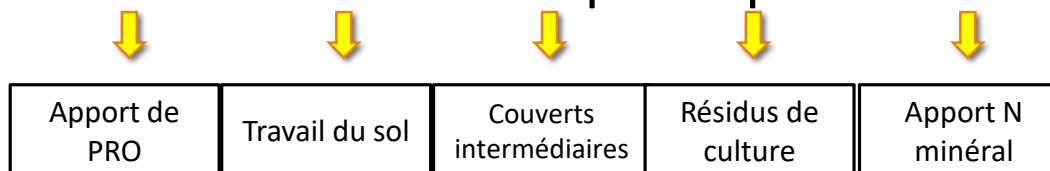
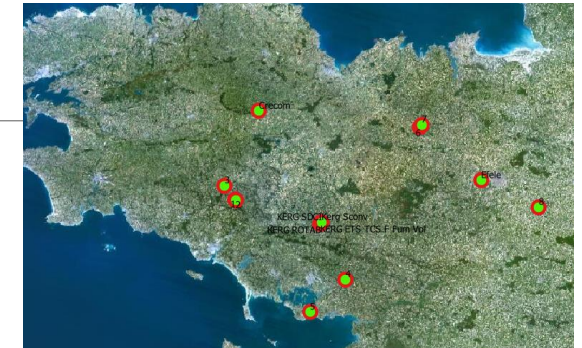
Interprétation à l'échelle des sites bretons prélevés



Cas d'étude: sites Bretagne

DEROULE DE LA DEMARCHE à la l'échelle d'une parcelle

1. Contexte
2. Pratiques culturales sur la rotation
3. Objectifs de l'exploitant: *évolution de pratiques, état de santé du sol, optimum, état souhaitable*
4. Observation, test bêche, prélèvement
5. Simulation d'évolution Carbone et azote (modèle AMG)
6. Interprétation des indicateurs au regard des pratiques dans le cadre du référentiel national et régional quand il existe
7. Proposition d'indicateurs spécifiques à suivre dans le temps

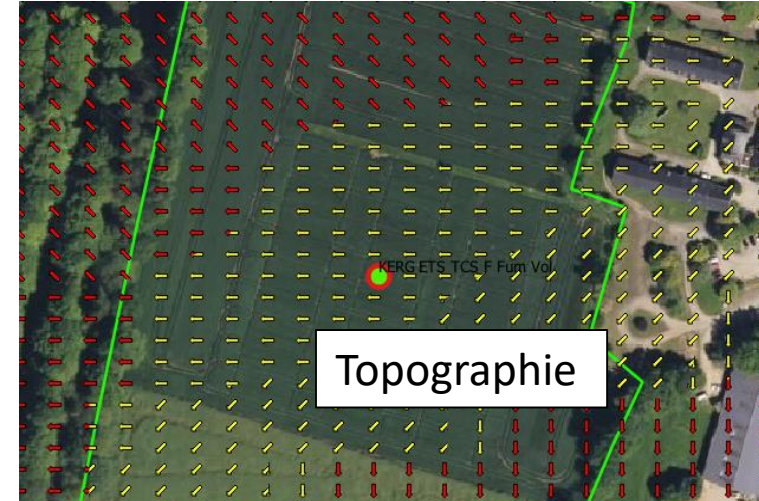
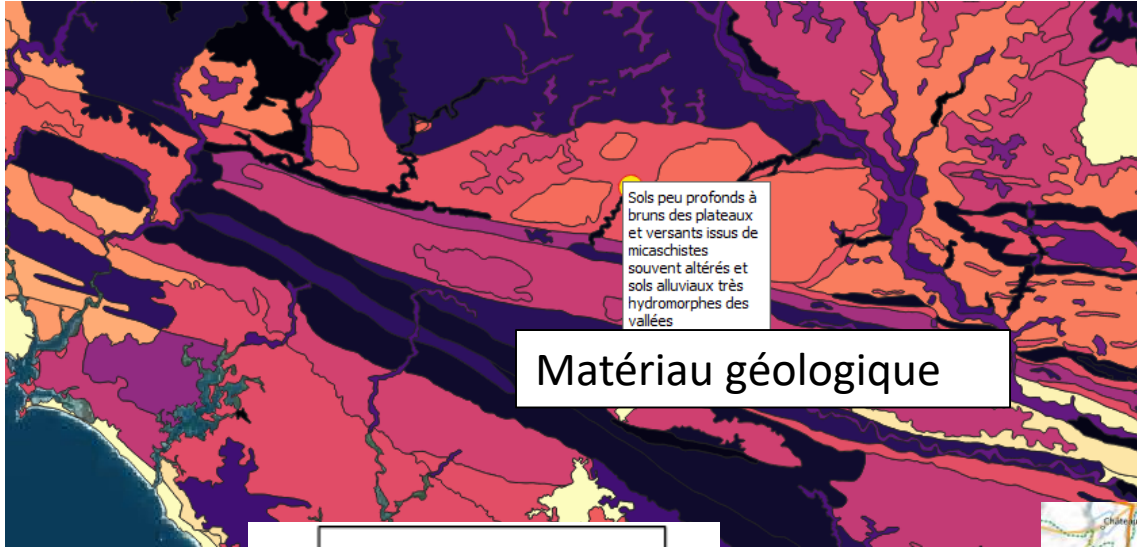


	Année récolte	n-3	n-2	n-1	n	Objectifs exploitant
	Culture	Mais grain	Ble tendre hiver	Colza hiver	Ble tendre hiver	Maintien de la rotation, rendements moyens sur colza (semis plus précoce à prévoir)
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus profond	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Maintien en non labour. Limitation du nb de passages de travail du sol.
	Profondeur travail le plus profond (cm)	12	10	10	10	
Travail du sol après semis	Type d'outil	Canadien	Canadien	Canadien	Canadien	Introduction du désherbage mécanique sur maïs ?
	Nb de passages de travail du sol entre récolte précédente et semis compris	3	2	2	2	
Culture principale	Type	aucun	aucun	aucun	aucun	Exportation/valorisation extérieure des pailles ?
	Nombre de passages	Grain	Grain	Grain	Grain	
CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses	Type d'engrais récolté	Grain	Grain	Grain	Grain	Tester l'introduction de couverts courts
	Rendement récolte (t/ha) ou tonnes aux normes	12.3	7.5	2.4	8.9	
	Devenir des résidus	Canaris broyés	Paille broyée	Paille broyée	Paille broyée	Augmenter la biomasse du couvert entre ble et maïs en semant plus tôt.
	Composition	Moyenne (2Tms/ha)	Non concerné	Peu de résidus	Peu de résidus	
	Estimation de la biomasse	Moyenne (2Tms/ha)	Non concerné	Peu de résidus	Peu de résidus	Manque de disponibilité du fumier de volaille à moyen terme.
	Date de levée	1/9		5/8	5/8	
	Date de destruction	1/2		4/9	10/10	Echange paille/fumier à renégocier.
	Mode de destruction	Chimique		Chimique	Chimique	
Couvert associé à la culture	Devenir de la biomasse	Restituée		Restituée	Restituée	pH entretenu par les apports de fumier de volaille
	Mode d'incorporation dans le sol	Canadien		Canadien	Canadien	
Produits résiduels organiques (PRO) : produit 1	Couvert ou culture	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	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
	Type de PRO	Fumier volaille	Fumier volaille	Fumier volaille	Fumier volaille	
Amendement	Quantité apportée (t/ha de matière brute MB)	9.0	9.0	6.0	8.5	
	% matière sèche (MS)	52.2	50.6	44.4	39.7	
Fertilisation minérale	C total (% MB)	336	392	140	305	
	N total (% MB)	23.9	21.5	21.0	22.8	
	Cin	14.0	18.2	6.6	13.3	
	mois d'épandage de PRO	avril	mars	septembre	mars	
	Type	Pas d'amendement				
	N (kg/ha)	0	60	90	70	
	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	0	0	0	
	K ₂ O (kg/ha)	0	0	0	0	

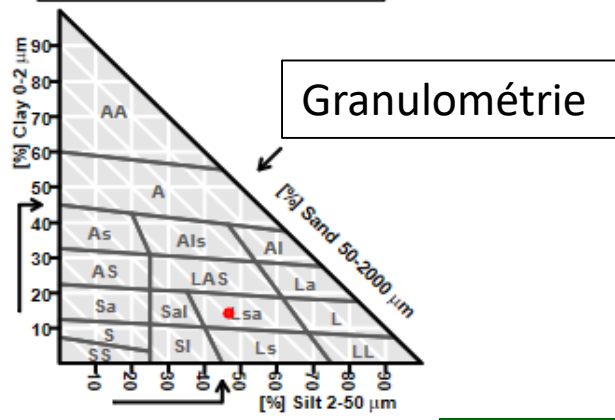
Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

1. Connaitre le contexte de la parcelle



Limon
sablo-argileux





Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

	Année récolte	n-3	n-2	n-1	n	Objectifs exploitant
	Culture	Maïs grain	Blé tendre hiver	Colza hiver	Blé tendre hiver	Maintien de la rotation, rendements moyens sur colza (semis plus précoce à prévoir)
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus profond	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Maintien en non-labour. Limitation du nb de passages de travail du sol.
	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	Introduction du désherbage mécanique sur maïs ?
	Nombre de passages					
Culture principale	Type d'organe récolté	Grain	Grain	Grain	Grain	Exportation/valorisation extérieure des pailles ?
	Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes	12.3	7.5	2.4	8.9	
	Devenir des résidus	Cannes broyées	Paille broyée	Paille broyée	Paille broyée	
CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses	Composition	Phacélie	Non concerné	Repousses de céréales	Repousses de colza	- Tester l'introduction de couverts courts - 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 résiduels 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)	9,0	9,0	6,0	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 les apports de fumier de volaille
Fertilisation minérale	N (kg/ha)	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	

2 et 3

- Historique des pratiques culturales (échelle rotation)
- Questionnement, objectifs sur les différents leviers/pratiques
- Niveaux actuels, niveaux souhaitables
- Sélection des indicateurs pertinents à analyser.

4. Test bêche, prélèvement et envoi des échantillons



- Test bêche : connaître l'état structural du sol et niveau tassement
- Prélèvement de terre pour envoi au laboratoire



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

- 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 de colza



Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

5. simulation de l'évolution du carbone sur 30 ans (modèle AMG)

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

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

Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

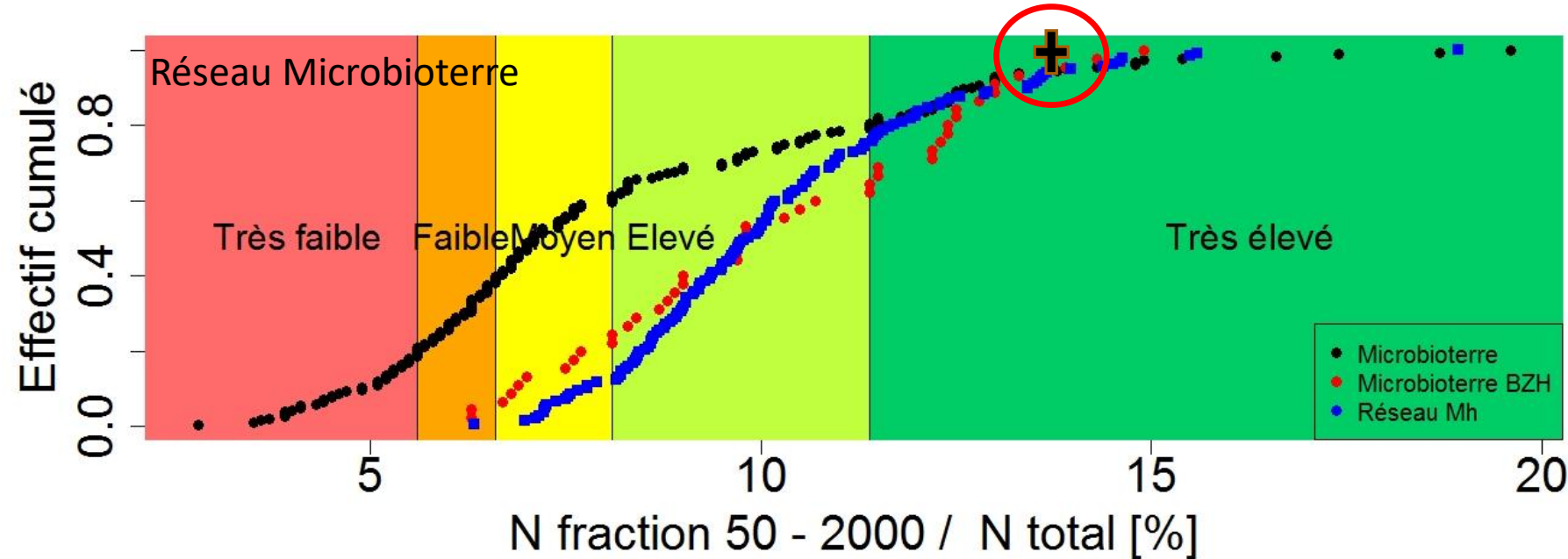
6. Résultats et lien avec les fonctions

Indicateurs	Valeurs indicateurs	Niveaux indicateurs	Recyclage des nutriments					Transformation du carbone					Structure du sol				
	TCS & Fumier de volaille	Référentiel global (n = 209 obs.)	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 50-2000 µm (%)	16.4	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															
ABM (mg/kg)	26.7	Elevé	+				+						+				
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	+														
B-Glu (nmol/min/g)	30.3	Très élevé	+	+						+				+			

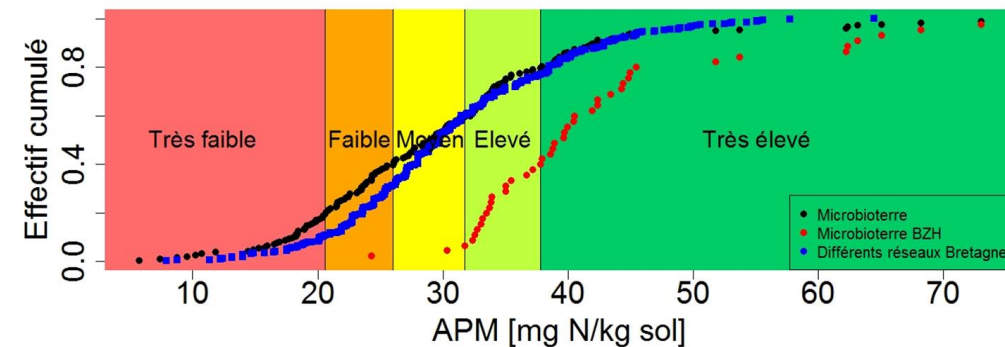
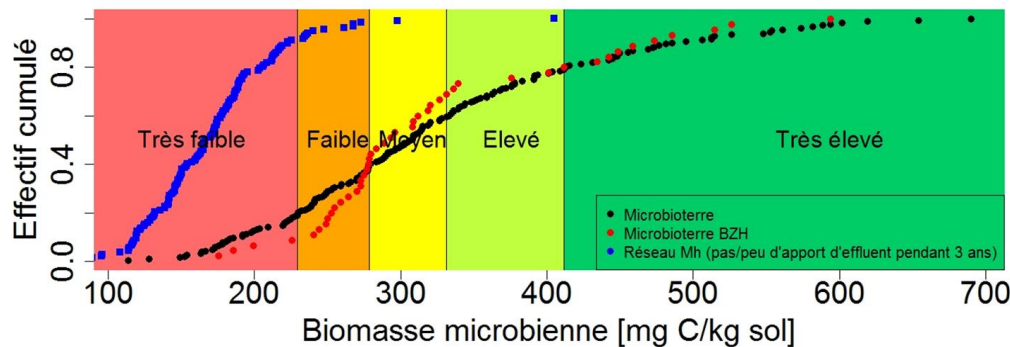
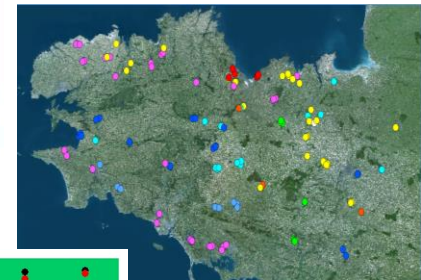
L'ensemble des indicateurs est à un niveau élevé

Lien Indicateur / Fonction		
	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		

6. Résultats et référentiel



Le Réseau Mh (CRAB/INRAE):
un référentiel de 137
parcelles en Bretagne



Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Résultats et lien avec les fonctions

• Diagnostic de base

Indicateurs	Valeur absolue	Niveaux indicateurs		Recyclage des nutriments		Transformation du carbone			Structure du sol		
		Référentiel global (n = 209 obs.)	Référentiel breton (n=53 obs.)	Fourniture N	Perte N	Transformation MO	Perte MO	Augmentation MO	Erosion Battance	Porosité	Stockage d'eau
C microbien par fumigation (mg/kg)	450	Très élevé	Très élevé	++	++		++		++		
C oxydé KMnO4 (mg/kg)	1110	Très élevé	Elevé	++	++	--	++		++	++	++
ABM (mg/kg)	26.67	Elevé	Elevé	+	+				+		

++	Très élevé
+	Elevé
+/-	Moyen
-	Faible
--	Très faible
	ND

6. Résultats et lien avec les fonctions

Indicateurs	Valeurs indicateurs	Niveaux indicateurs	Recyclage des nutriments					Transformation du carbone					Structure du sol				
	TCS & Fumier de volaille	Référentiel global (n = 209 obs.)	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
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 50-2000 µm (%)	16.4	Elevé															
C KMnO ₄ (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															
ABM (mg/kg)	26.7	Elevé	+				+						+				

Lien Indicateur / Fonction		
	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		

Fractionnement:

- fraction libre, labile est en proportion élevée: réservoir de nutriments facilement accessibles
- Stabilité structurale et circulation de l'eau et de l'air potentiellement élevées

Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Résultats et lien avec les fonctions

Indicateurs	Valeurs indicateurs	Niveaux indicateurs	Recyclage des nutriments					Transformation du carbone					Structure du sol				
	TCS & Fumier de volaille	Référentiel global (n = 209 obs.)	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 50-2000 µm (%)	16.4	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															
ABM (mg/kg)	26.7	Elevé	+				+						+				
C microbien (mg/kg)	449.9	Très élevé	+			+				+			+				
18S (copies/g)	3.8E+12	Très élevé											+				

Lien Indicateur / Fonction		
	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		



L'abondance microbienne est très élevée

- fourniture en azote, une minéralisation de la MO élevées,
- stabilité structurale potentiellement élevées.
- Pertes potentielles en azote élevées (émission de N2O) si les apports d'azote ne sont pas bien ajustés

6. Résultats et lien avec les fonctions

Lien Indicateur / Fonction		
	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		

Indicateurs	Valeurs indicateurs	Niveaux indicateurs	Recyclage des nutriments					Transformation du carbone					Structure du sol				
	TCS & Fumier de volaille	Référentiel global (n = 209 obs.)	Fourniture N			Perte N		Transformation MO		Perte MO	Augmentation MO		Erosion Battance		Porosité		Stockage eau
			Ammonification	Nitrification	Fixation symbiotique	Réduction du NO3	Volatilisation	Fragmentation	Bio dégradation	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 50-2000 µm (%)	16.4	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															
ABM (mg/kg)	26.7	Elevé	+				+						+				
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	+														
B-Glu (nmol/min/g)	30.3	Très élevé	+	+						+				+			

Les activités

enzymatiques sont à des niveaux moyens à élevés.

Les activités cycles N - LAP & ARYLN: moyen et protéase : très élevée ce qui traduit une fourniture potentielle d'azote élevée

Activité cycle C- B-Glu très élevé: fourniture de carbone élevée



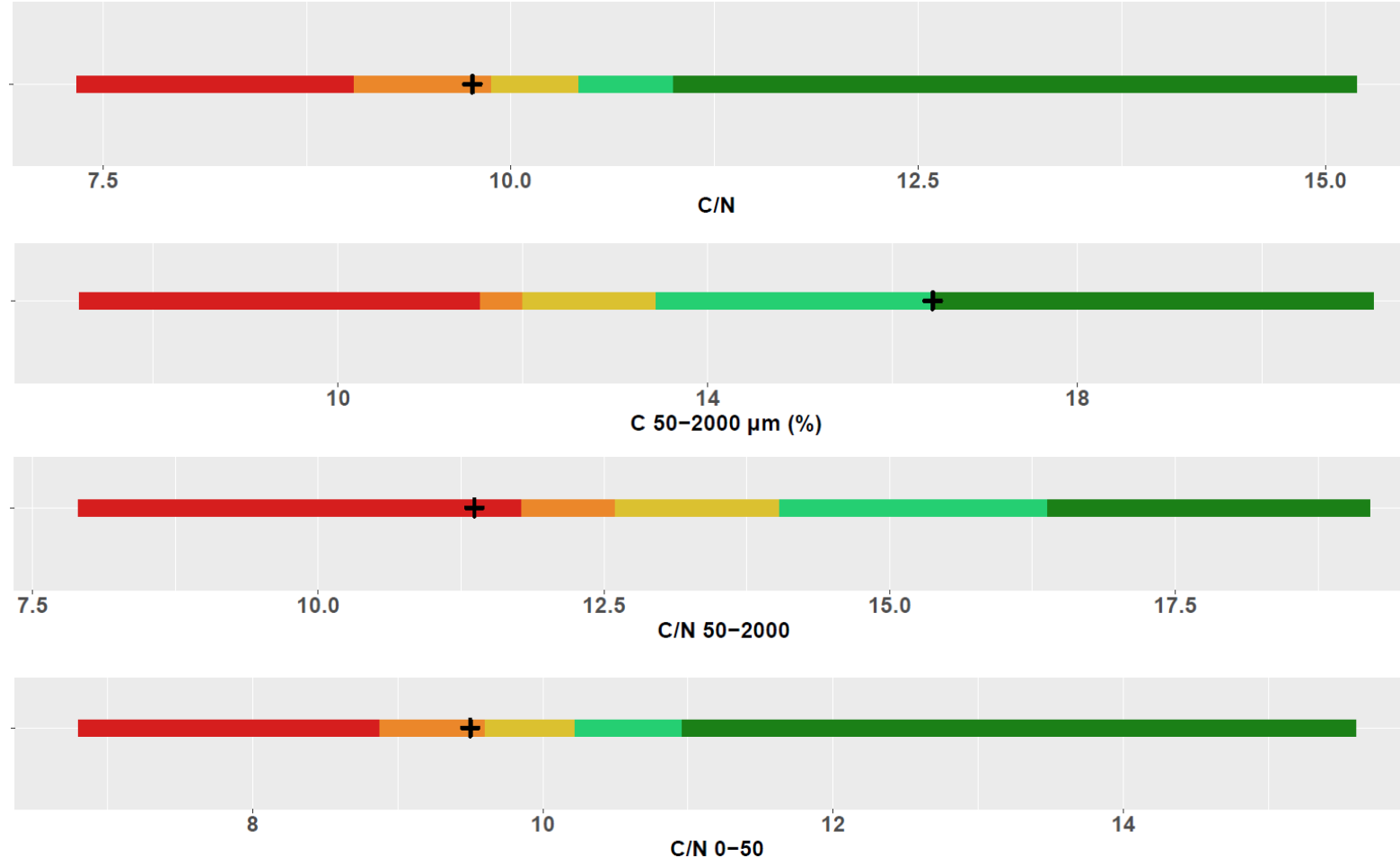
Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Analyse des ratios

Site KERGUEHENNEC Wsol – Modalité TCS et Fumier de volaille
Référentiel : Microbioterre Bretagne (n=53)

Référentiel sites bretons (n=53)



Référentiel sites bretons (n=53)

- C/N global faible
- Proportion élevée de MO fraîche à C/N bas
- Fraction stable à C/N faible

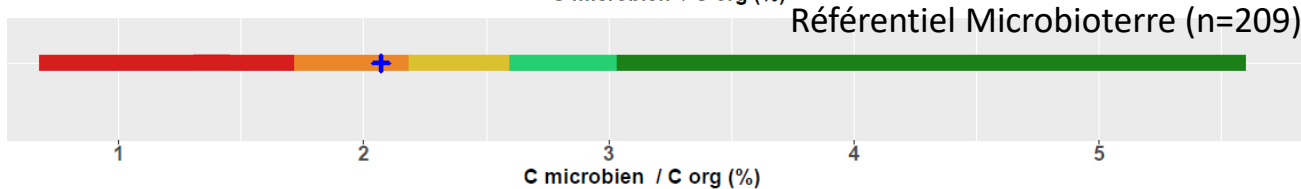
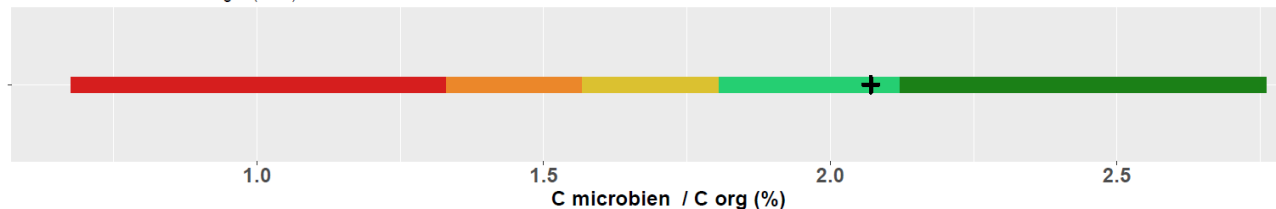
Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Analyse des ratios

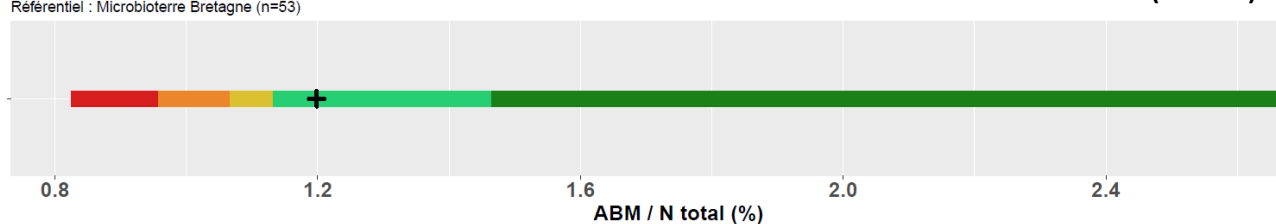
Site KERGUEHENNEC Wsol – Modalité TCS et Fumier de volaille
Référentiel : Microbioterre Bretagne (n=53)

Référentiel sites bretons (n=53)

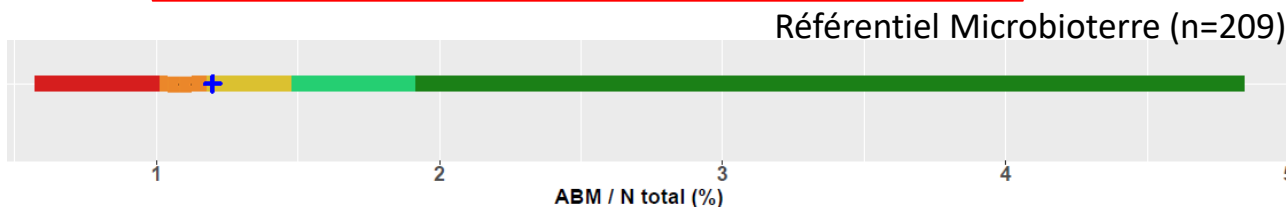


Site KERGUEHENNEC Wsol – Modalité TCS et Fumier de volaille
Référentiel : Microbioterre Bretagne (n=53)

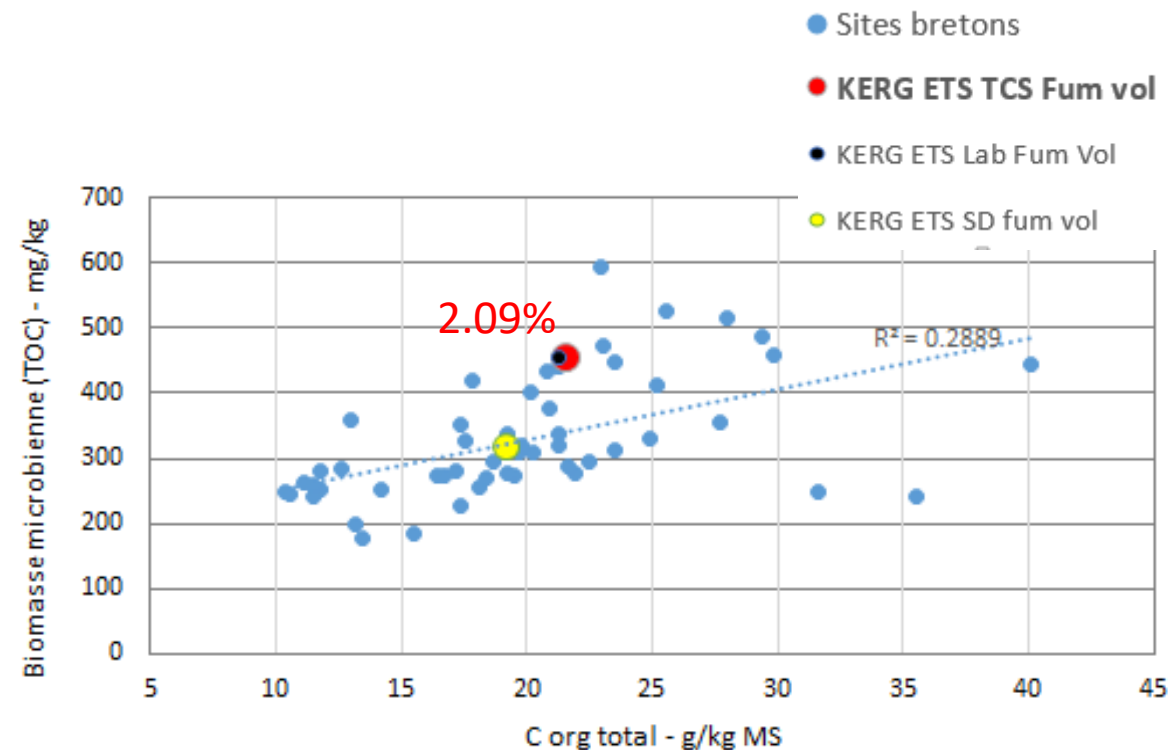
Référentiel sites bretons (n=53)



- Fourniture d'azote élevée



- Biomasse microbienne élevée



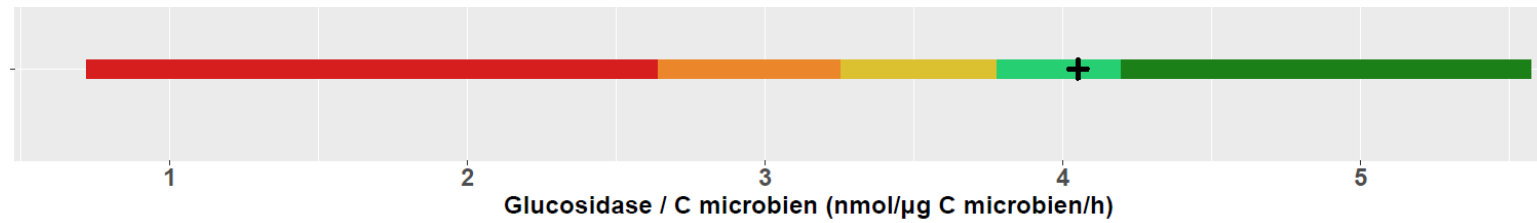
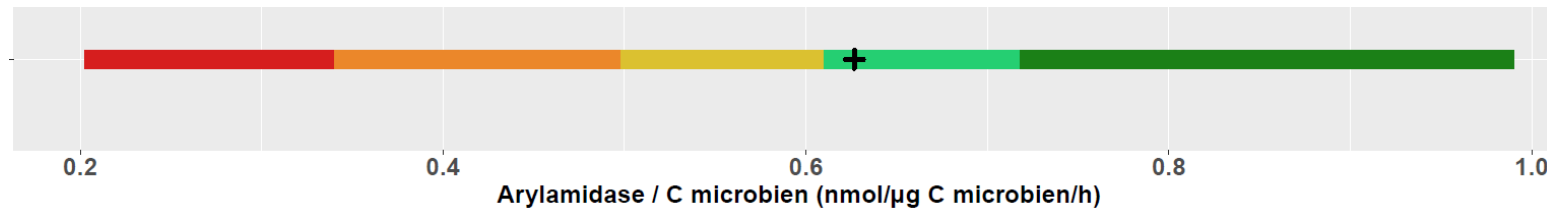
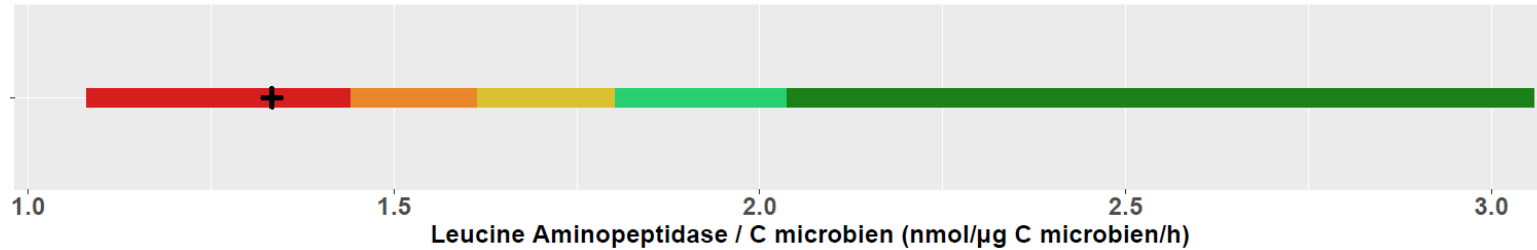
Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Analyse des ratios

Site KERGUEHENNEC Wsol – Modalité TCS et Fumier de volaille
Référentiel : Microbioterre Bretagne (n=53)

Référentiel sites bretons (n=53)



- Biomasse microbienne efficace dans la production des deux enzymes B-Glu & ARYLN comparativement à la production de l'enzyme LAP

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

6. Analyse des ratios

Indicateur	Référentiel sites bretons	VALEUR	Référentiel sites bretons	Référentiel global Microbioterre	Optimum à viser	commentaires
C/N		9.77	Faible	Elevé	10	Valeur correcte pour la région. Il y a un bon équilibre entre minéralisation des MO et humification
C/N 0-50		9.50	Faible	Elevé	8-10	Humus évolués fonctionnels qui minéralisent bien
C/N 50-2000		11.37	Très faible	Très faible	10-15	Energie biologique disponible avec consommation potentiellement rapide (à entretenir), minéralisation de N normale
C oxydé KMnO4 / C org (%)		5.11	Elevé	Faible	?	Proportion de carbone labile élevée pour la région, mais faible en référence nationale due au fort taux de MO
C microbien / C org (%)		2.07	Elevé	Faible	>2-3%	La taille du compartiment microbien est à un niveau élevé pour la région, faible en référence nationale. Eviter les pratiques délétères (tassement, contaminants, ...)

Cas d'étude: sites Bretagne

Exemple de démarche – Parcelle Kerguehennec

7. Synthèse

- L'ensemble des fonctions de recyclage des nutriments, transformation du carbone et structure du sol sont activées
- Point d'attention : fournitures N élevées → perte potentielle N par lixiviation

Plan d'action selon les objectifs de l'agriculteur

Option: remplacer apports fumier par couverts végétaux ?

- Couvert court entre blé et colza,
- Couvert associé avec colza (trèfle blanc) qui resterait pour le blé (si SD),
- Viser davantage de biomasse en interculture longue ou double couvert.

	Année récolte	n-3	n-2	n-1	n	Objectifs exploitant
	Culture	Mais grain	Blé tendre hiver	Colza hiver	Blé tendre hiver	• Maintien de la rotation, rendements moyens sur colza (semis plus précoce à prévoir)
Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus)	Type de travail du sol le plus profond	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	Déchaumage	• Maintien en non labour. Limitation du nb de passages de travail du sol.
	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	• Introduction du désherbage mécanique sur maïs ?
	Nombre de passages					
Culture principale	Type d'organe récolté	Grain	Grain	Grain	Grain	• Exportation/valorisation extérieure des pailles ?
	Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes	12.3	7.5	2.4	8.9	
	Devenir des résidus	Cannes broyées	Paille broyée	Paille broyée	Paille broyée	
CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses	Composition	Phacélie	Non concerné	Repousses de céréales	Repousses de colza	• Tester l'introduction de couverts courts • 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 de destruction	1/3		4/9	01/10	
	Mode de destruction	Chimique		Chimique	Chimique	
	Devenir de la biomasse	Restituée		Restituée	Restituée	
Couvert associé à la culture	Mode incorporation dans le sol	Canadien		Canadien	Canadien	
	Couvert ou culture	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	
Produits résiduels 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)	9,0	9,0	6,0	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	
	CIN	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 les apports de fumier de volaille
Fertilisation minérale	N (kg/ha)	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	

Cas d'étude: sites Bretagne Comparaison de systèmes

ITK

Essais système étudiés	Rotation	Corg (g/kg)	Fréquence apport PRO	Type PRO	Couvert	Travail du sol		Résidus aériens cultures	Fréquence restitution résidus
						Nb labour	Nb passages travail du sol/an		
TCS Fumier volaille	Maïs grain / Blé / Colza / Blé /Couvert	21.7	1	fumier volaille (6-8T)	0.25	0	2.2	colza et maïs restitués, blé exporté	0.67
ROTAB	Féverole P / Triticale / Couvert / Maïs Grain / Blé-féverole / Couvert / Sarrasin / Triticale-pois / Couvert	23.2	0.17	fientes humides poules pondeuses (6T)	0.5	1	3.6	toutes les pailles restituées	1
EFELE fumier bovin	Maïs ensilage / Blé / Couvert	11.5	0.5	fumier bovin (50T)	0.5	1	3.5	maïs exporté plante entière, blé exporté	0

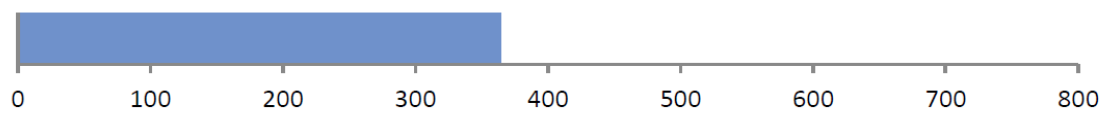
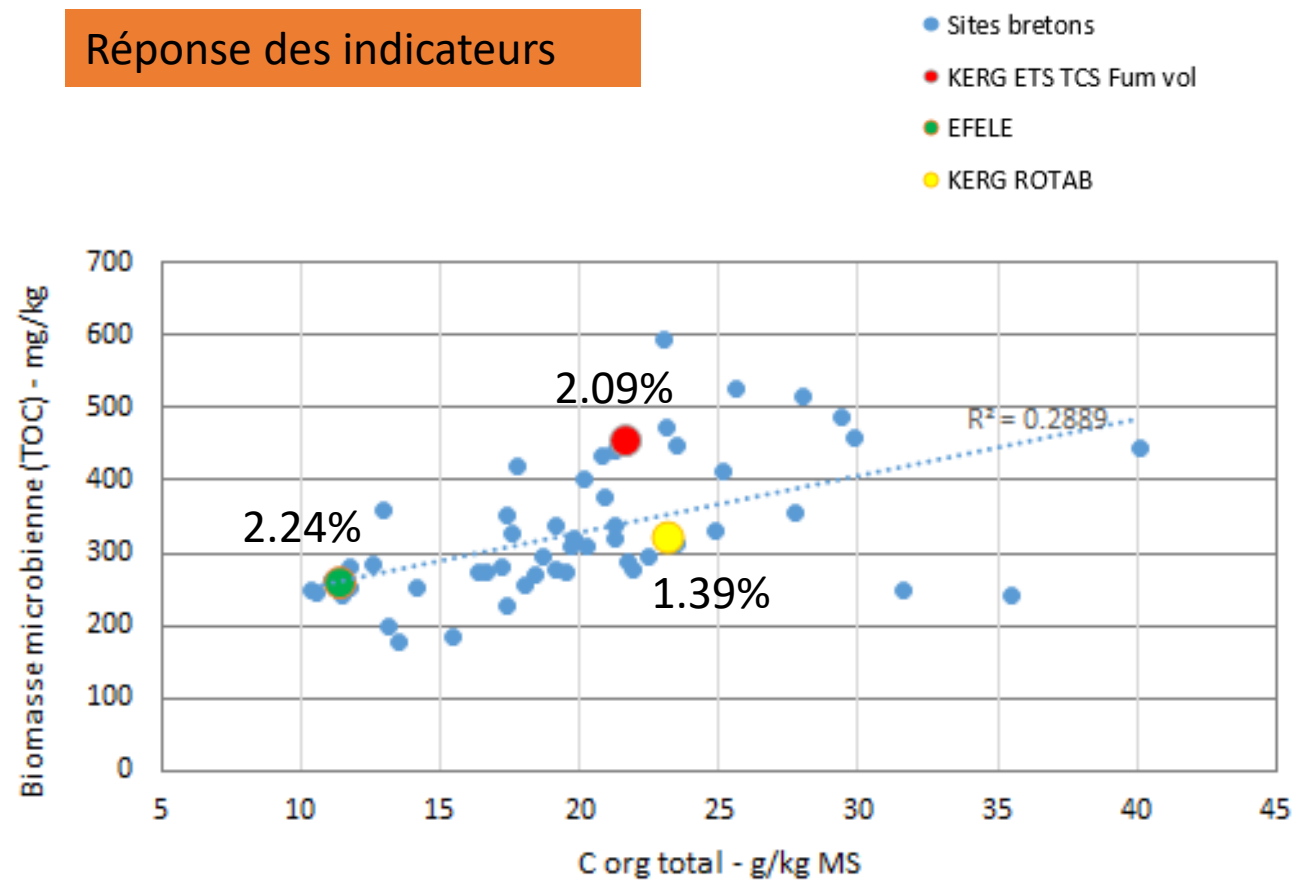
Simulation AMG

Essais système étudiés	Carbone humifié PRO	Carbone humifié COUVERT	Carbone humifié RESIDUS	Carbone MINERALISE TOTAL	Evolution tx MO 30 ans	Classe test bêche	C/N
TCS Fumier volaille	51		4	87	↑ 0.8	1 horizon classe 1	9.78
ROTAB					↓ - 0.7	1 horizon classe 1	10.68
EFELE fumier bovin			47		↑ 1.0	1 horizon classe 1	8.96

Cas d'étude: sites Bretagne Comparaison de systèmes

Référentiel MicrobioTerre 2017-2018		EFELE - Fumier		ROTAB		TCS fumier de volaille	
Indicateur	Valeur	Niveau	Valeur	Niveau	Valeur	Niveau	
MO / Argile (%)	16.60	Elevé	27.65	Très élevé	25.69	Très élevé	
C org (%)	1.20	Moyen	2.32	Très élevé	2.17	Très élevé	
N total (%)	0.13	Moyen	0.22	Très élevé	0.22	Très élevé	
C/N	8.93	Faible	10.67	Très élevé	9.77	Elevé	
C 0-50 µm (%)	87.80	Moyen	83.17	Très faible	83.57	Très faible	
N 0-50 µm (%)	92.60	Moyen	87.60	Très faible	85.93	Très faible	
C/N 0-50	8.47	Faible	10.17	Très élevé	9.50	Elevé	
C/N 50-2000	14.70	Moyen	14.50	Faible	11.37	Très faible	
C oxydé KMnO4 (mg/kg)	700.00	Moyen	1074	Très élevé	1110	Très élevé	
ABM (mg/kg)	NA	NA	23.61	Elevé	26.67	Très élevé	
C microbien par fumigation (mg/kg)	268	Faible	321	Moyen	450	Très élevé	
ADN total (µg/g)	8.61	Moyen	17.91	Très élevé	13.29	Très élevé	
Biomasse fongique 18S (copies/g)	1.41E+12	Moyen	4.66E+11	Très faible	3.83E+12	Très élevé	
Arylamidase (nmol/min/g)	4.03	Faible	4.03	Faible	4.71	Moyen	
Arylamidase / C microbien (nmol/µg C microbien/h)	0.91	Moyen	0.75	Faible	0.63	Faible	
Leucine Aminopeptidase (nmol/min/g)	10.46	Elevé	9.64	Moyen	10.00	Moyen	
Leucine Aminopeptidase / C microbien (nmol/µg C microbien/h)	2.35	Elevé	1.80	Moyen	1.33	Très faible	
Protéase (nmol/min/g)	8.54	Elevé	9.74	Très élevé	10.57	Très élevé	
Béta-Glucosidase (nmol/min/g)	18.12	Moyen	28.36	Très élevé	30.33	Très élevé	

Réponse des indicateurs

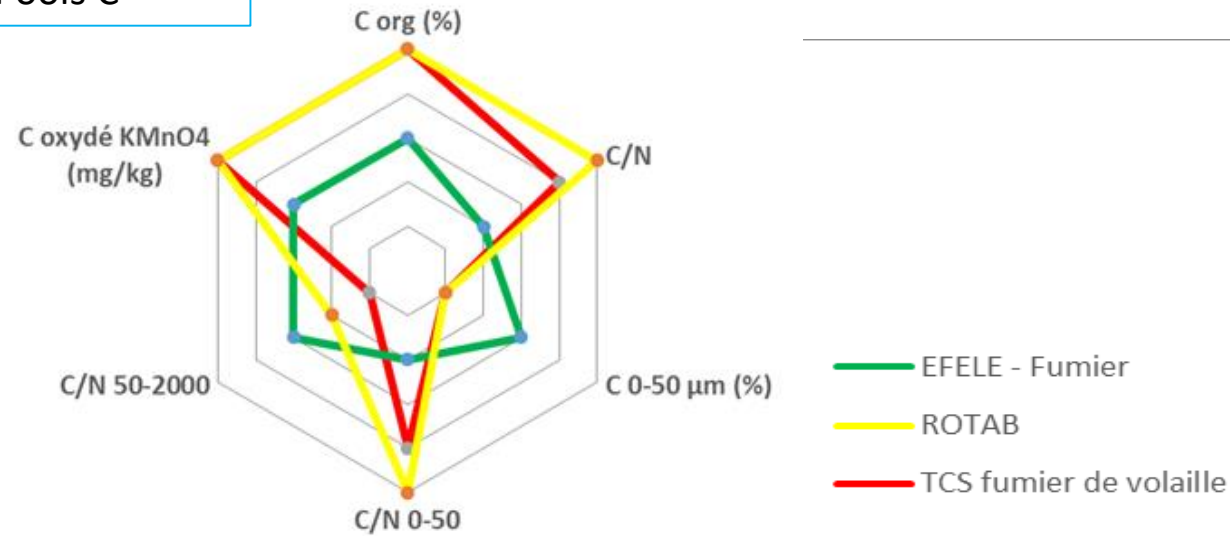


BM: 364 mg/kg fort Analyse 2013 ROTAB (Celesta-lab)

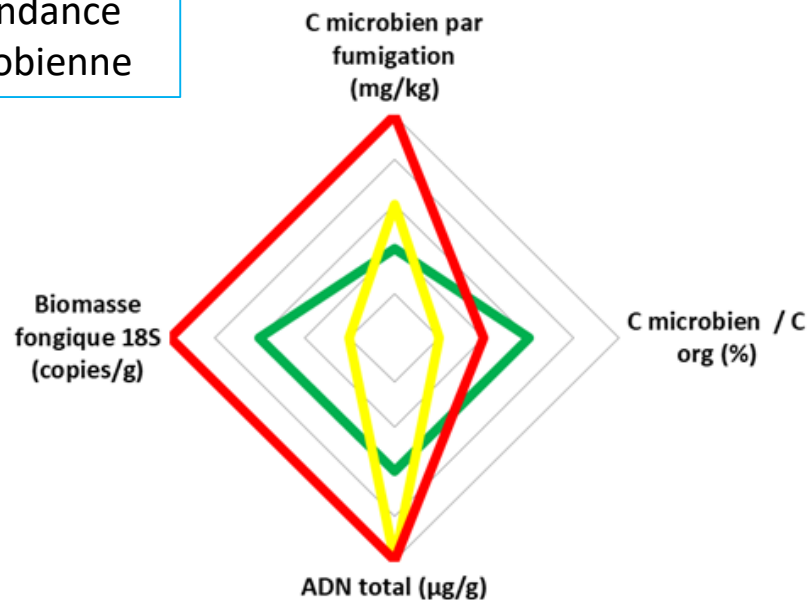
Biomasse Microbienne (mg C/kg de terre sèche)

Cas d'étude: sites Bretagne

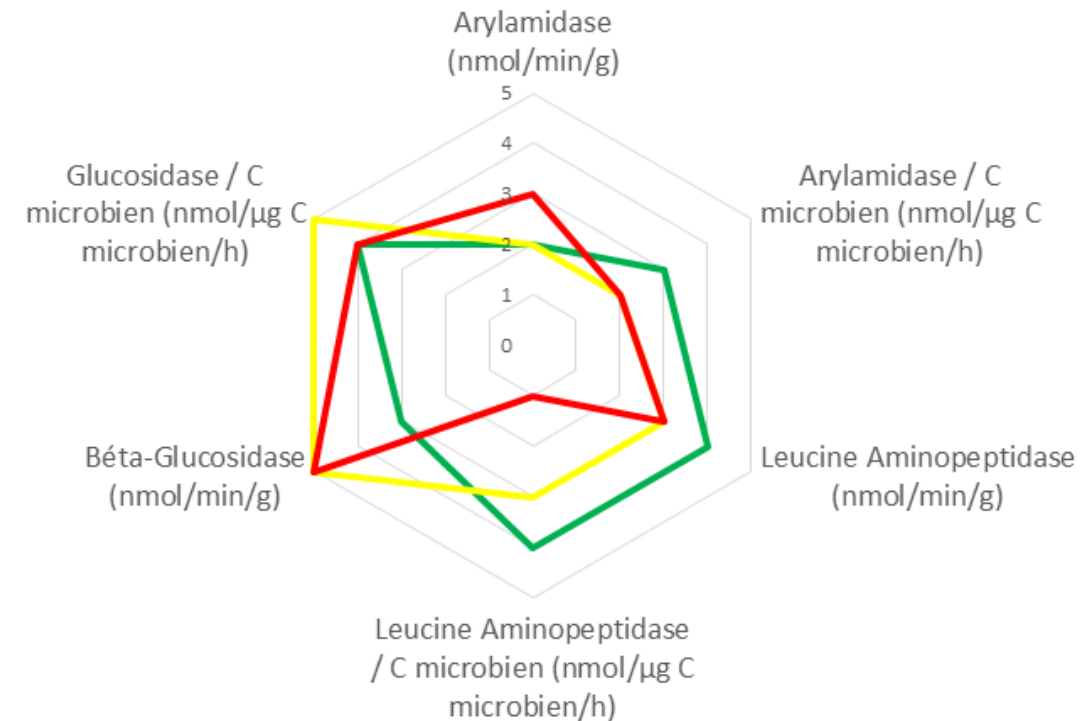
Comparaison de systèmes



Abondance microbienne



Activités enzymatiques





Cas d'étude: 4 parcelles au Nord de Strasbourg (2021)

2 Non-Labours avec couverts végétaux multi-espèces **VS.** 2 Labours

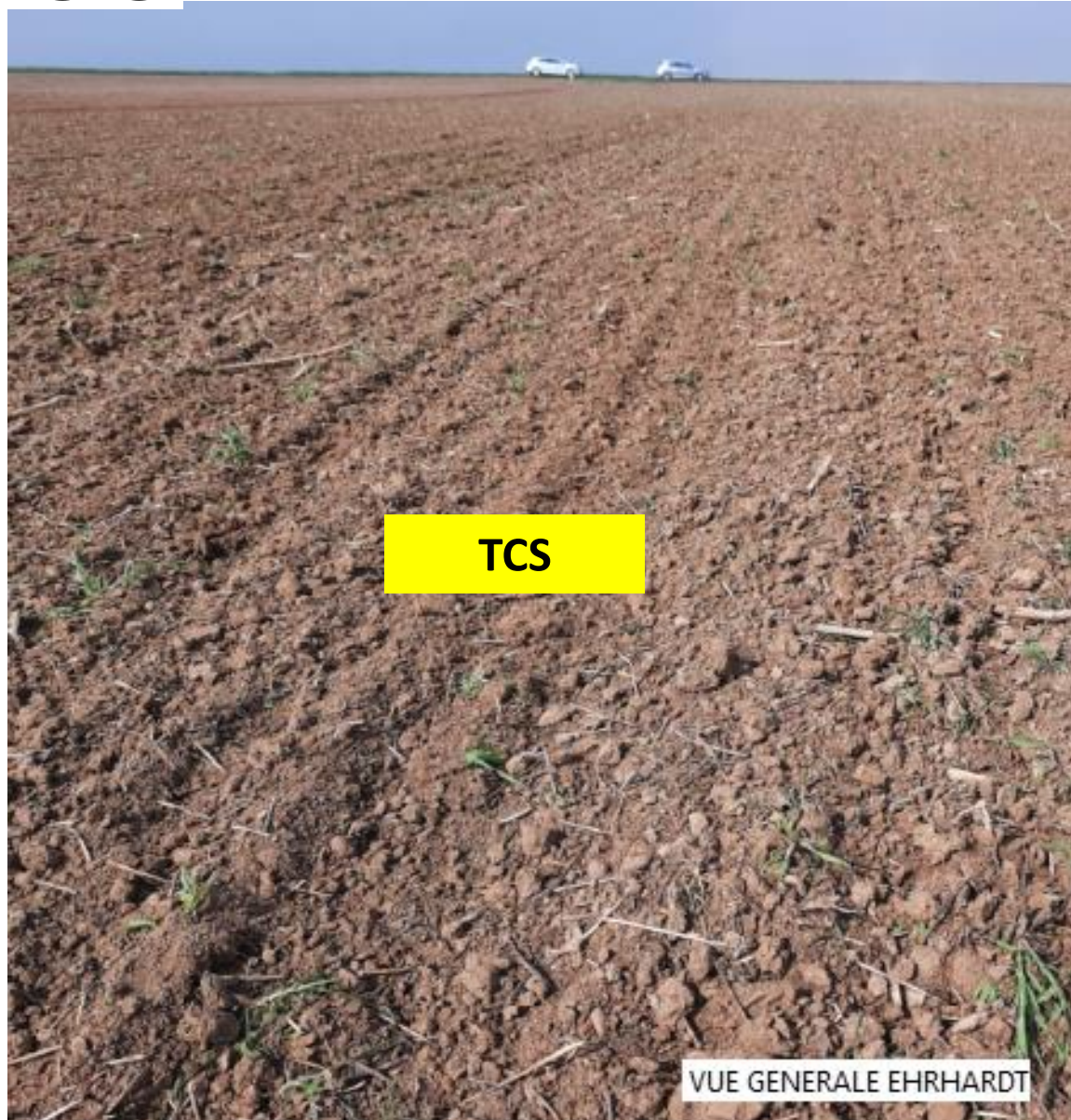
Mundolsheim _ collines de loess

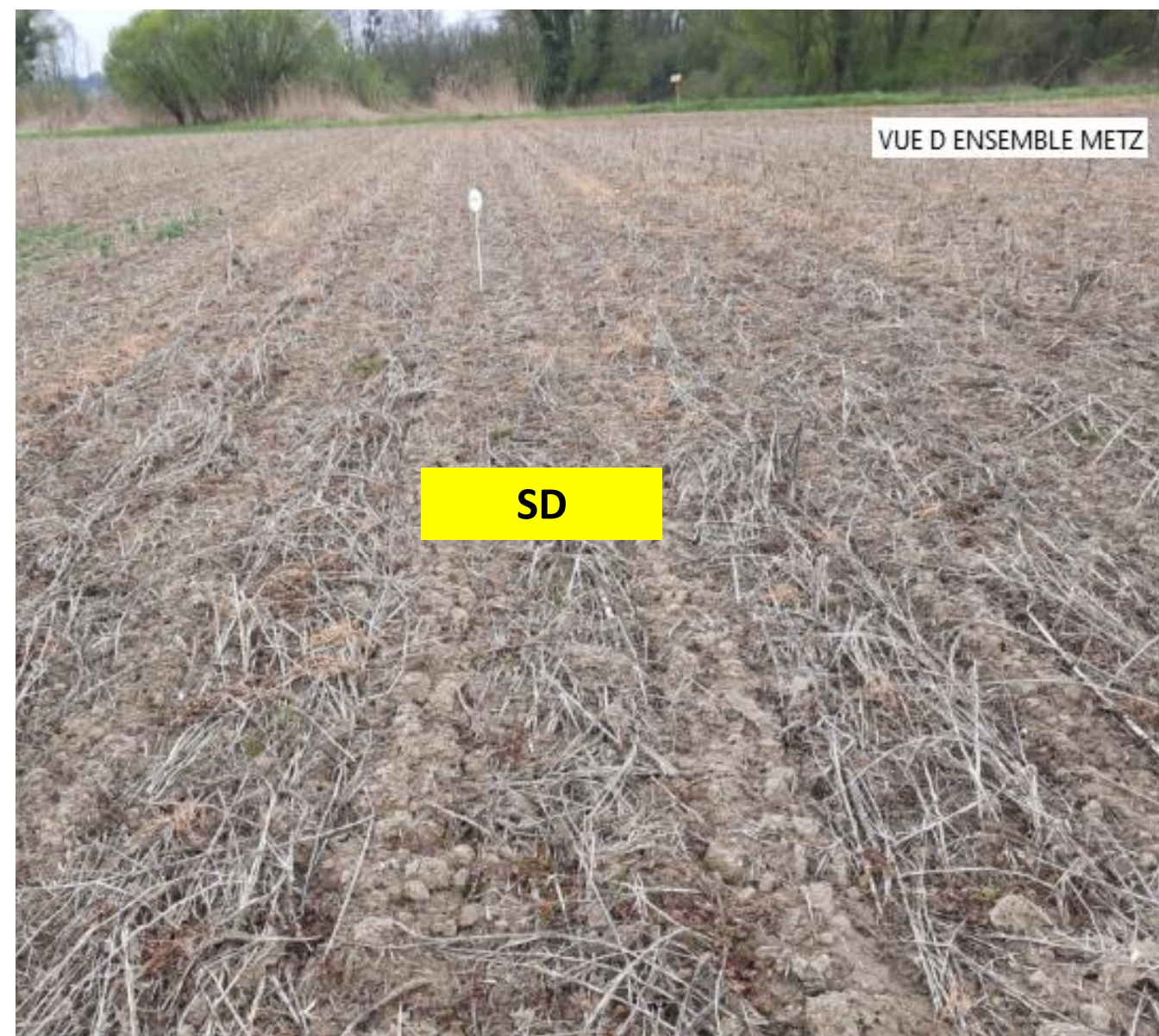
Lieu	Parcelle agriculteur	Type de sol	Système	Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3
Mundolsheim (67)	P. Ehrhardt	Limons loess	TCS depuis 12 ans MG/BTH/BS/Soja	Pas de déj anx, Digestats 2e année Couvert après blé	TCS	Couvert multi-espèces
Mundolsheim (67)	G. Jenner	Limons loess	Labour Maïs-Betteraves-Blé	Pas de déjections animales,	Labour	sans CIMS
La Wantzenau (67)	F. Metz	Limons argilo-sableux du Rhin	SD ACS depuis 5 ans; TCS 10 ans MG/BTH/Moutarde/Soja	Pas de déjections animales Couvert après blé	SD-Strip-till	Couvert multi-espèces
La Wantzenau (67)	F. VIX	Limons argilo-sableux du Rhin	Labour Maïs-Maïs-Maïs-M.	Pas de déjections animales	Labour	sans CIMS



La Wantzenau _ limons d'alluvions du Rhin



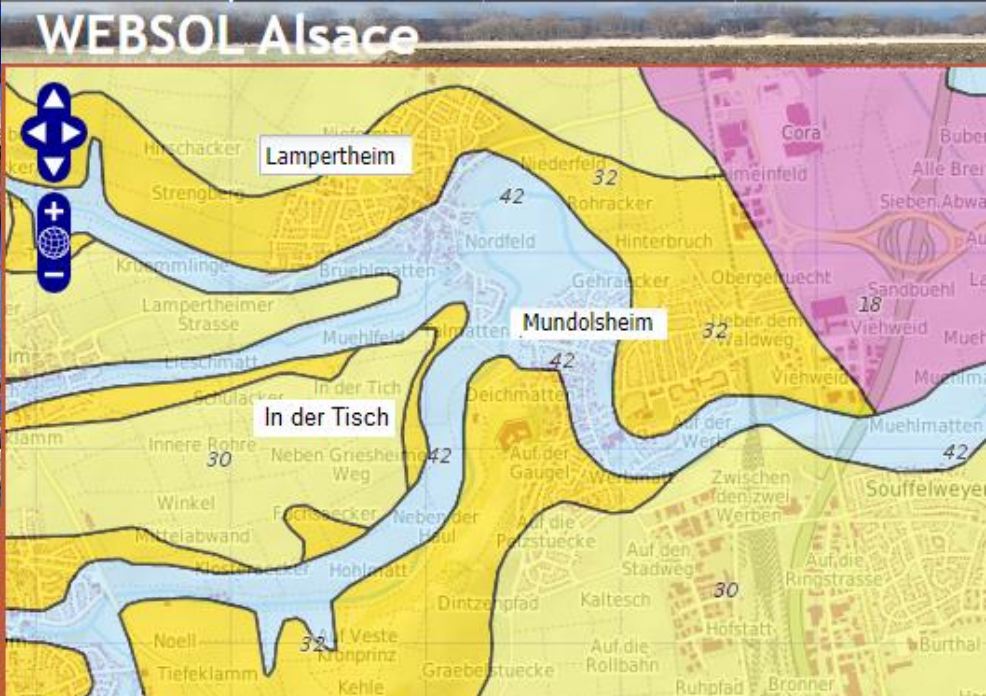
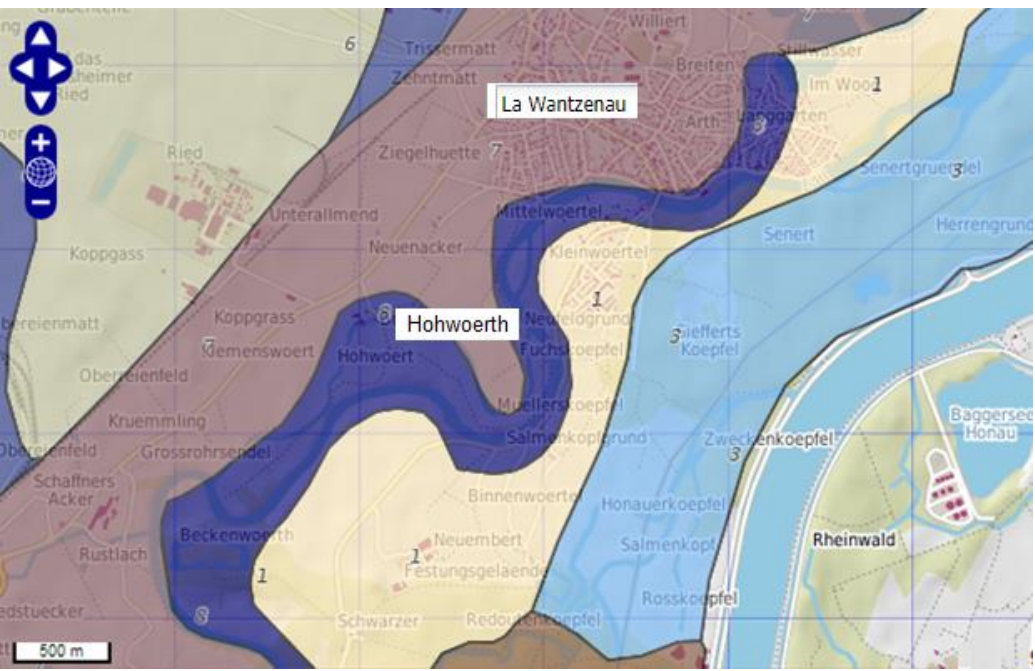






REF. ECHANTILLON	Date prélèvement de sol	Humidité Brute % Terre	Calcaire total %	
HOHWOERT (SD) LA-WANTZENAU	19/04/2021	17,54	21,7	calcaire sols alcalins
HOHWOERT (LABOUR) LA-WANTZENAU	19/04/2021	18,27	15,9	Calcaire sols alcalins
IN DER TISCH (TCS) MUNDOLSHEIM	20/04/2021	15,94	0,8	peu calcaire sols alcalins
IN DER TISCH (LABOUR) MUNDOLSHEIM	20/04/2021	17,18	1,3	peu calcaire sols alcalins

Des limons peu argileux, toutes les 4 parcelles



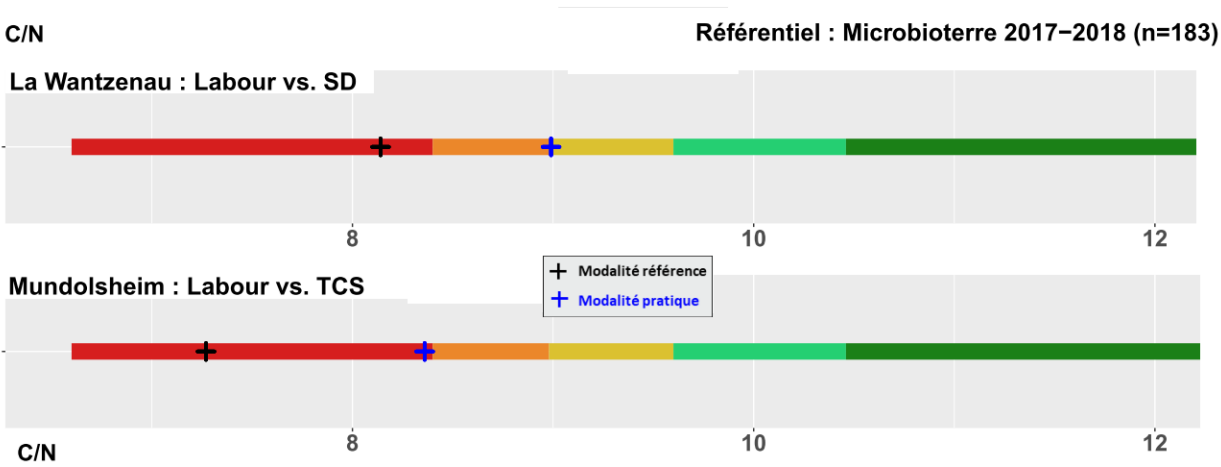
Argile %	Limons Fins % 2-20 µm	Limons grossiers % 20-50 µm	Sables fins % 50-200 µm	Sables grossiers %	pH eau	pH KCl
15,0	14,3	19,7	22,7	4,2	8,46	7,88
21,3	18,7	22,0	16,3	3,4	8,48	7,77
19,4	34,0	39,2	3,4	1,1	8,42	7,58
21,5	30,6	40,9	3,1	0,8	8,28	7,66

(8) Alluvions calcaire hydromorphes, limono-argilo-sableux, du Rhin

(30) Sol brun calcaire, limono-argileux, sur loess

Etude de 4 parcelles au Nord de Strasbourg : analyse C.E.C. Carbone (MO) et Azote (N)

	CEC Metson méq/100g		Matière Organique ,724 xC	Carbone 1 organique %	C/N global du sol	Azote Total (Dumas) %
METZ La Wantzenau	10,53	(SD)	2,44 %	1,42	9,0	0,158
VIX La Wantzenau	13,65	Labour	2,47 %	1,44	8,1	0,177
EHRHARDT Mundolsheim	14,40	(TCS)	2,10 %	1,22	8,4	0,146
JENNER Mundolsheim	13,68	Labour	1,88 %	1,09	7,3 **	0,150



On note une capacité d'échange **CEC Moyenne** autour de 13 /100g sur ces 4 parcelles limoneuses calcaires.

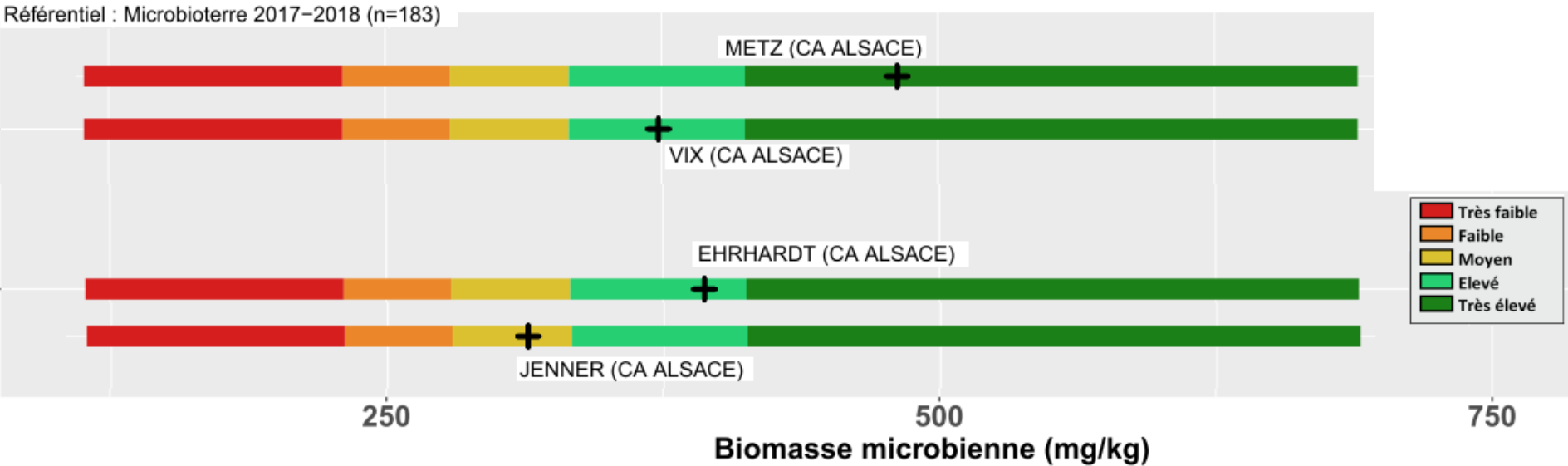
Teneur en Matière Organique : l'améliorer pour monter au-delà de 3% MO (structure stable du sol)

La conduite TCS a une teneur en MO + élevée à Mundolsheim, et influence des anciennes prairies '70 à La-Wantzenau.
 La conduite Labour déstocke plus qu'elle ne fabrique de carbone stable, visible surtout à Mundolsheim (**).

C/N global du sol : les 2 parcelles Sans-Labour avec couverts ont 1 point de C/N en + : elles minéralisent moins rapidement ou elles humifient plus fortement...

Conseil pour la durabilité du système :« on peut s'améliorer et se rapprocher de C/N =10 » (pour équilibrer Min/hum et moins déstocker) avec des entrées organiques en plus (Apports de composts / Rotations avec des Méteils / BRF ?) ...

Le moteur microbien



La quantité microbienne est + forte en TCS et SD que en LABOUR (+25-30%)

Objectif Cmic/Corg = 3% c'est mieux !

	C microbien fumigation mg C/kg	Ratio C microbien / C org.	
METZ (SD) La Wantzenau	481,6	3,4%	1,29
VIX (LAB) La Wantzenau	373,7	2,6%	
EHRHARDT (TCS) Mundolsheim	393,8	3,2%	1,26
JENNER (LAB) Mundolsheim	313,5	2,9%	



Le rapport C/N des 2 fractions Carbone

(1) Carbone Lié

$6 < C/N < 8$

Humus anciens
qui fournissent
peu

$8 < C/N < 10$
($7 < C/N < 9$)

Humus évolués
qui minéralisent bien
(optimum maraîchage)

$10 < C/N < 12$
($12 < C/N < 15$)

Humus non fonctionnels
qui minéralisent +/- moyen
(ou humus médiocres =
blocages !)

Commune	Parcelle	C/N de MO "liée" (fr.0-50 µm) (1)	MO Stable de qualité ?	C/N de MO libre (fr. 50-2000 µm) (2)	MO Labile
La Wantzenau	(SD)	8,7	OK	11,1	OK
La Wantzenau	Labour	7,7*	faible	13,4	OK
Mundolsheim	(TCS)	8,1	à améliorer	11,1	OK
Mundolsheim	Labour	7,4*	faible	5,8	à revoir

*La qualité des MO stables traduit des apports anciens d'humus

(2) Carbone Libre

Énergie biologique faible
Minéralisation de N aisée
(Matières organiques «âgées»)

On gagne en vitesse !

$C/N < 10$ (< 9)

Énergie biologique disponible !
Minéralisation N normale
(# ou minéralisation ralentie))

On maintient le rythme...

$10 < C/N < 15$ ($15 < C/N < 20$)

Énergie indisponible
Immobilisation
Réorganisation certaine de N
(ou % possible de N si valeur forte
de Carbone Microbien)

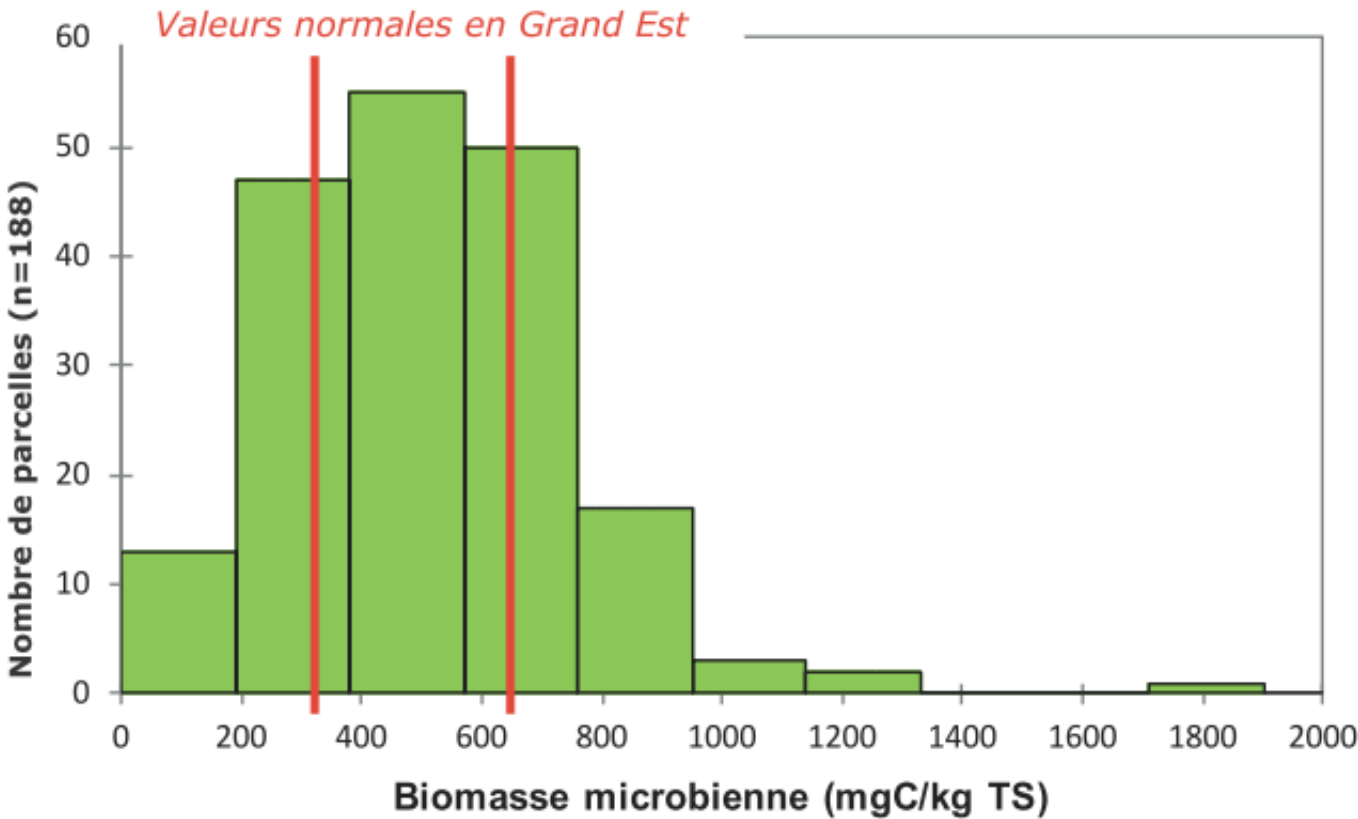
On ralentit de vitesse !

$C/N > 25$ (% $C/N > 20$)



REFERENTIEL BIOLOGIQUE DES CHAMBRES DANS LE GRAND EST

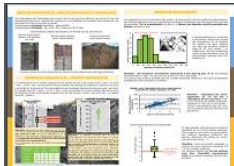
267 PARCELLES analysées avec le Menu Celesta-lab



188 PARCELLES analysées avec Carbone Microbien fumigation.

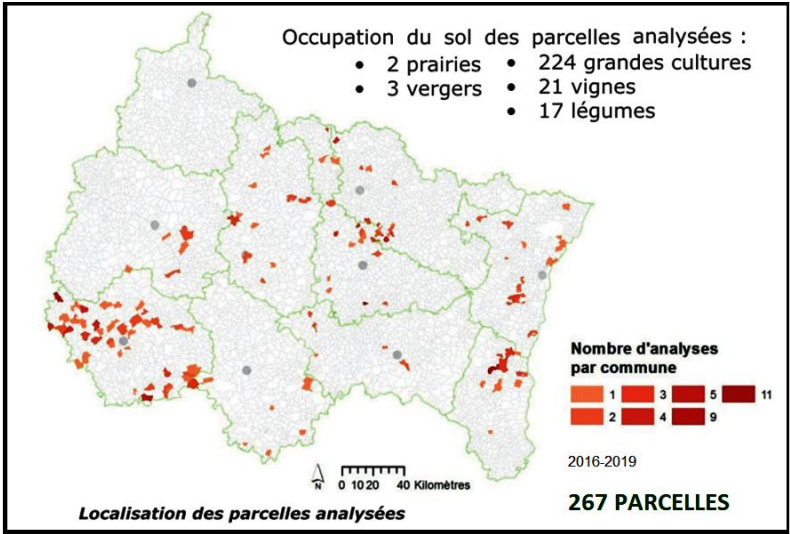
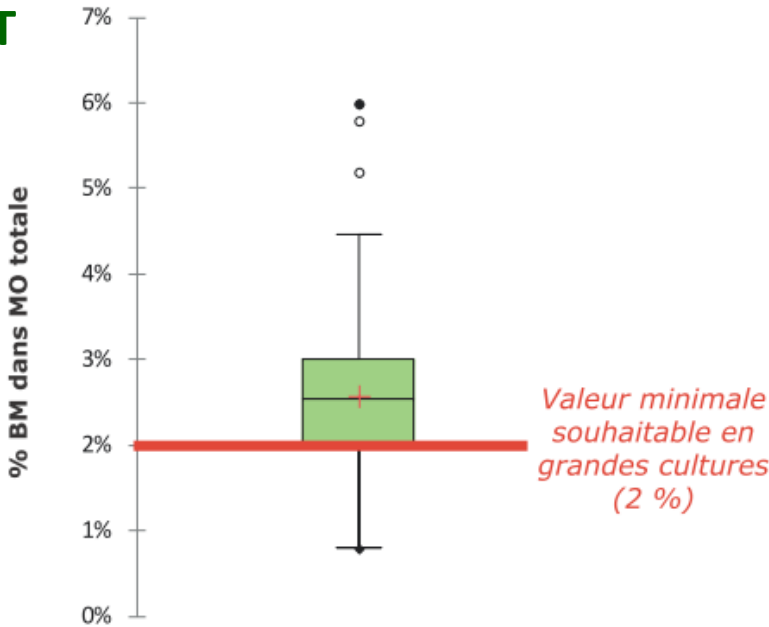
Résultats : des biomasses microbiennes supérieures à 340 mgC/kg pour 75 % des parcelles échantillonnées (n=188) : ces sols sont bien pourvus en micro-organismes.

Fiche Technique

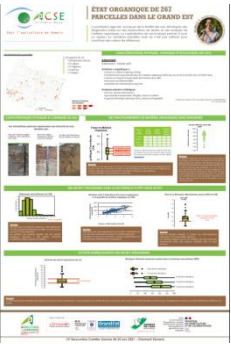


<https://bit.ly/267analyses>

Part de la Biomasse Microbienne dans la MO (n=188)



Poster ACSE



<https://bit.ly/poster-analyses-267>

La proportion des types de matières organiques (les Fractions granulométrique des MO)

	Carbone « lié » humus Fraction 0-50 µm % C org total	Carbone libre fraction 50-2000 µm % C org total
METZ (SD) La Wantzenau	86,8 %	13,2 %
VIX (LAB) La Wantzenau	87,2 %	12,8 %
EHRHARDT (TCS) Mundolsheim	90,6 %	9,4 %
JENNER (LAB) Mundolsheim	95,1 %	4,9 %

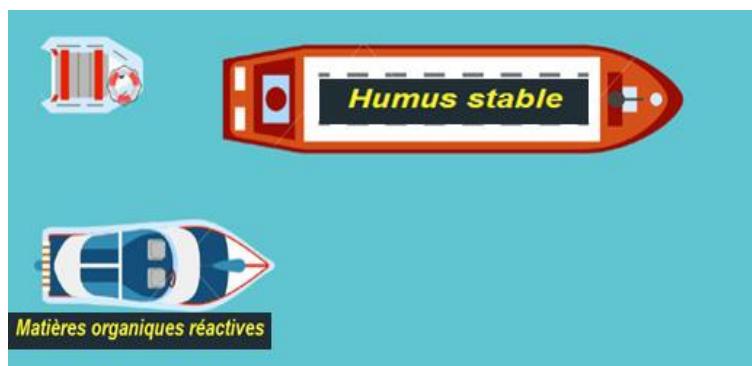
la conduite Sans Labour avec couverts a 0,4 point de Carbone Libre en+ à LA WANTZENAU c'est peu.

la conduite Sans Labour avec couverts a 5 point de Carbone Libre en + à MUNDOLSHEIM.

Pour ces 4 parcelles **le Carbone libre** est trop faible (idéal > 22 % à 25% en sol calcaire et 18-20% pour les autres sols)

Conseil : des apports par couverts végétaux et des composts fermentés jeunes et restitution des pailles de blé qui apporteront du C Labile.

les 4 Parcelles sont en manque de MO riches en énergie pour les microbes, et particulièrement les parcelles de Mundolsheim.



Des Matières carbonnées
Pour un moteur lent ou rapide ?
Début ou fin de saison climatique ?



versus



La vitesse

test ABM :



Parcelles	Azote ABM (mg/kg MS)	Ecart-type ABM	Ratio ABM / N total
METZ (SD)	45,3	1,4	2,9 %
VIX (LAB)	26,1	3,0	1,5 %
EHRHART (TCS)	39,8	0,9	2,7 %
JENNER (LAB)	23,9	0,8	1,6 %

La minéralisation azotée s'essouffle sur les 2 parcelles Labour comparé aux 2 Parcelles Couverts+Non Labour (à 60% des parcelles sans labour)

Conseil : la capitalisation d'azote stable dans les sols est favorisée par les cultures de légumineuses, et le compostage d'effluents organiques.

Etude de 4 parcelles au Nord de Strasbourg.



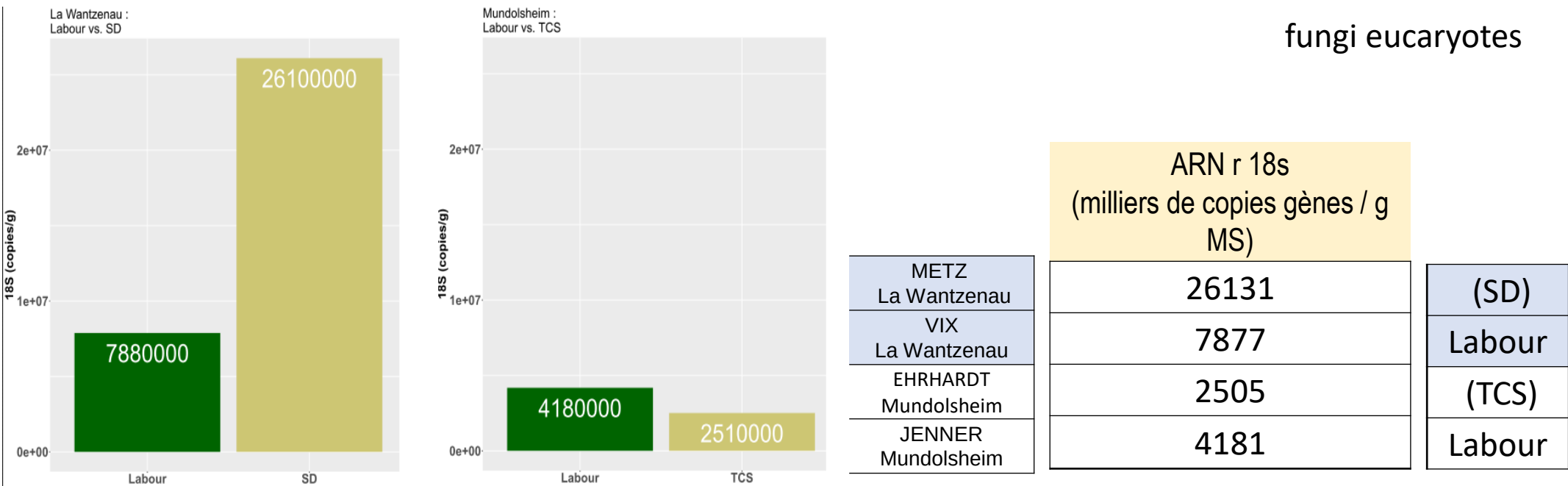
Carbone ACTIF très labile _*POxC

Parcelles	Carbone actif * oxydable au permanganate	C KMnO4 mg/kg 390< 780 >1450 MBT 2018	Ratio POxC / C org
METZ (SD)	834	(SD)	5,9 %
VIX (LAB)	858	Labour	6,0 %
EHRHART (TCS)	783	(TCS)	6,4 %
JENNER (LAB)	727	Labour	6,7 %

Le C très labile est un peu en retrait sur Labour à LA WANTZENAU.

Conseil : La répétition des couverts engrais verts peut apporter du Carbone Actif aux parcelles. A favoriser dan dès que possible dans la rotation culturale.

La chaîne trophique Eucaryotes : dosage de l'acide ARN ribosomique 18S



ARN-r-18S : On note des valeurs très faibles pour (LAB) Mundolsheim & (TCS) Mundolsheim, et légèrement supérieures pour La-Wantzenau (LAB) et (SD)

La pratique depuis plus de 10 ans de non-labour/couverts végétaux multi-espèces et de semis direct dans la variante SD La Wantzenau conduit à une présence plus forte des Eucaryotes « champignons ».

Problème de l'étendue du référentiel ARN 18S à explorer par système de culture et par petite région agricole....

Que retenir avec ce diagnostic de sol ?

Parcelles Labour / SD à La-Wantzenau et Labour/ TCS à Mundolsheim (2021)

Sols basiques très calciques adapter pour les oligo-éléments et **zéro** chaulage !

Des entrées supplémentaires de Carbone Labile sont nécessaires pour la bonne biologie du sol, surtout sur les 2 parcelles Labour, mais les efforts sont à maintenir sur les parcelles en non-labour.

La teneur en MO du sol est à travailler : à peine satisfaisante sur les alluvions du Rhin à Wantzenau et un fort rattrapage est à prévoir dans les limons des collines à Mundolsheim : Composts déchets verts jeunes (et déjections avec litière fermentée), pailles à restituer... Les CIVE et méteils sont une piste.

La quantité d'azote organique stable est à augmenter sur ces parcelles, surtout par la rotation culturale (Soja, CIMS, Luzerne, Pois...) pas évident pour des non-éleveurs.

Ces sols limoneux auto-tassants : Attention au trafic des bennes et des machines, veillez à la portance des sols (ressuyage) et soigner les apports organiques. La stabilité structurale est à améliorer (engrais verts...).

DES LIGNES DE CONDUITE



Communication & Diffusion

Gendre Sophie *et al.*



Les livrables



Agriculteurs

Diagnostic standard :

- Analyse
- Guide interprétation



Laboratoires

Liste des bio-indicateurs + méthodes :

- Mode Op
- Guide Interprétation

Pour tous :

Vidéo de 3 minutes

Supports de présentation des résultats

Articles : Comifer, Innovations Agronomiques



Conseillers

Diagnostic approfondi :

- Guide interprétation
- Formation continue

Scientifiques

Synthèse sur les bio-indicateurs et des fonctions liées C et N :

- Communications scientifiques
- BDD

Gestionnaires des sites expérimentaux

- Journée de discussion sur les résultats
- Résultats d'analyses

Guide Microbioterre & formations

- ❖ Un guide de diagnostic et conseil « **Microbioterre** » sera mis à disposition des conseillers agricoles et des agriculteurs
 - Un diagnostic standard pour que son usage soit adopté par le plus grand nombre d'agriculteurs
 - Un diagnostic approfondi qui constituera un outil de formation et d'animation de groupes basé sur la mesure de plusieurs paramètres microbiologiques.
- ❖ Modules de formation :



Livrables

Livrables	Actions du projet	Accès
Livrets des résumés sous forme d’acte de colloque et compte rendu des retours d’expérience et résultats des projets antérieurs, d’intérêt pour Microbioterre	Action 1	Diffusion restreinte (3 ans) puis libre
Fichier Excel d’inventaires de publications et pdf des publications		
Mode opératoire utilisé dans le cadre du projet	Action 2	Libre
Liste des essais et des modalités retenues par essai		
Fichier des résultats d’analyses physico-chimiques et microbiologiques du projet		
Fichier des données (itinéraires techniques, mesures et analyses sur les sols et les plantes) antérieures au projet sur les essais valorisés dans le projet		
Base de données de l’ensemble des résultats	Action 3	Diffusion restreinte (3 ans) puis sur licences
Rapport des résultats des tests méthodologiques		Diffusion restreinte durant 6 mois puis libre
Mode opératoire du prélèvement et transfert échantillon vers laboratoire		Libre
Guide de diagnostic accompagné de son mode opératoire	Action 4	
Dossier de presse, poster et communications colloques		
Modules de formation initiale Modules de formation continue		

Où trouver les résultats ?

- Vidéo GIS : <https://www.youtube.com/watch?v=85Copm9Bwvc>
- COMIFER 2019 : <https://comifer.asso.fr/fr/evenements/rencontres-precedentes/actes-14emes-rencontres-de-2019/15-rencontres/247-les-presentations-orales-des-14e-rencontres-2019.html#session4>
- COMIFER 2021 : en cours de rédaction
- Innovations Agronomiques : en cours de rédaction
- Vidéo du séminaire et supports seront envoyés à tous les participants

Conclusions & perspectives

Gendre Sophie *et al.*



Outil Microbioterre : Du prélèvement de sol au conseil en agriculture

Prélèvement sol
- Guide : maîtriser prélèvement



Objectif de l'agriculteur : Fonction à optimiser

Ex : Minéralisation C

Fonctions– Indicateurs

En complément d'indicateurs physico-chimiques :

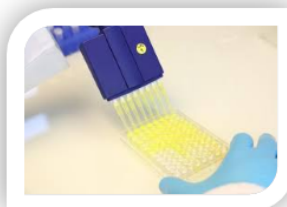
Fonctions et sous-fonctions	
Recyclage des nutriments	Ammonification
	Nitrification
	Lixiviation
	Réduction du NO ₃ (émission N ₂ O)
	Volatilisation
	Fixation symbiotique
Transformation du carbone	Fragmentation
	Biodégradation
	Minéralisation (CO ₂)
	Stabilisation chimique / humification
	Stabilisation physique / protection
Structure du sol	Agrégation (Macro)
	Agrégation (Micro)
	Aération / circulation eau - air
	Infiltration en eau
	Rétention en eau

Indicateurs menus
Biomasse microbienne
18S
Glucosidase
LAP
Activité protéase
Arylamidase
ABM
C org
N total
Fractionnement granulométrique MO
C oxydé

Fonction à optimiser

Indicateur(s) proposé(s)

Analyses indicateurs
Indicateurs menus

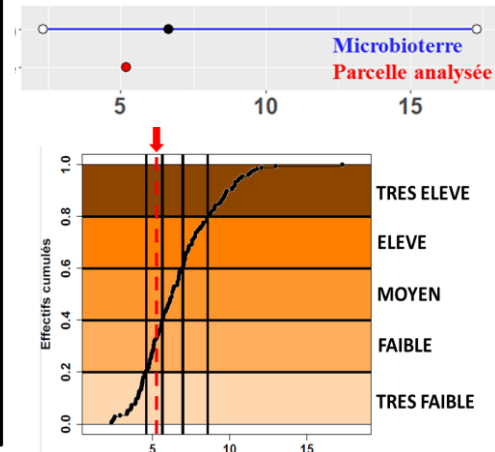


Référentiels
n = 183

Leviers agronomiques

Variable	PRO	Couverts intermédiaires	Travail du sol	Rotations	Systèmes
C org (%)					
C 0-50 (%)					
N 0-50 (%)					
C 50-200 (%)					
N 50-200 (%)					
C 200-2000 (%)					
N total (%)					
C oxydé (mg/kg)					
Biomasse microbienne (mg/kg)					
18S (copies/g)					
LAP (nmol/min/g)					
Arylamidase (nmol/min/g)					
Activité protéase (nmol/min/g)					
ABM (mg/kg)					
Glucosidase (nmol/min/g)					

Protéase (nmol/min/g)



Interprétation & Conseil

Apports du projet Microbioterre

- ❖ **Identification des indicateurs physico-chimiques et microbiologiques à mesurer** pour *évaluer la fertilité biologique* des sols en lien avec les fonctions de dégradation des matières organiques et le recyclage de nutriments
- ❖ **Interprétation de la valeur des indicateurs mesurés**: mise en place d'un *référentiel d'interprétation des indicateurs*
- ❖ **Identification des leviers agronomiques (pratiques) à mettre en œuvre pour améliorer les fonctions** des sols selon les *objectifs spécifiques de l'agriculteur*
 - **Liens indicateurs - fonctions** :
 - Prise en compte objectif(s) agriculteurs
 - **Liens indicateurs – pratiques** dans conditions pédoclimatiques variées :
 - Diagnostic possible dans différents contextes
 - Propositions de leviers agronomiques

Perspectives du projet Microbioterre

Indicateurs physico-chimiques & microbiologiques mesurés

- Prise en compte uniquement d'**indicateurs physico-chimiques et microbiologiques**
- **Cycles N et C** : Cycles P, S... non étudiés
- Pas de **suivi temporel** des indicateurs mesurés
- **Référentiels à consolider** (*Textures diversifiées; Types de pratiques agricoles étudiés sur plusieurs sites; Référentiels régionaux*)

Effet des pratiques culturales

- Poursuivre l'étude de l'impact d'implantation de **couverts intermédiaires** (*fréquence et biomasse du couvert*)

Relations indicateurs – fonctions du sol

- **Relations indicateurs – fonctions** à approfondir (*seules 7 équations identifiées*)
- Notion d'**états souhaitables** à consolider : *Quelle teneur en MO souhaitable par ex. ?*

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

MERCI A TOUS LES CONTRIBUTEURS DU PROJET

Pilote	Partenaires financés	Partenaires non financés	Soutien
 Institut du végétal	 Terre & Sciences l'agronomie en mouvement Institut Technique de l'Agriculture Biologique AgroScience la science pour la vie, l'humain, la terre	 CHAMBRE D'AGRICULTURE BOURGOGNE CHAMBRE D'AGRICULTURE GRAND EST CHAMBRE D'AGRICULTURE ALSACE	 Liberté • Égalité • Fraternité REPUBLIQUE FRANÇAISE MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT avec la contribution financière du compte d'équilibre et de gestion «développement agricole et rural» Réseau Mixte Technologique Recyclage, Fertilisation, Impacts Environnementaux

Gestionnaires des dispositifs expérimentaux

 CHAMBRE D'AGRICULTURE BRETAGNE CHAMBRE D'AGRICULTURE PAYS DE LA LOIRE CHAMBRE D'AGRICULTURE GRAND EST	 Institut du végétal ACTIFS. POSITIFS. COOPÉRATIFS	 la science pour la vie, l'humain, la terre ECOLE D'INGÉNIEURS Sciences du vivant Agriculture Agroalimentaire Marketing Management	 l'agronomie en mouvement
--	--	--	------------------------------

Prestataires

 www.semse.fr agromicrobiote UNIVERSITÉ DE LORRAINE lieux de votre environnement
