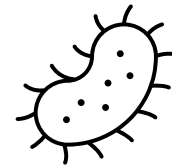
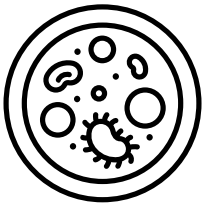


Evaluer la fertilité biologique du sol pour s'adapter



Combien d'organismes vivants dans ce sol ?



1 à 10 000 000 000



Le compartiment biologique en chiffres...

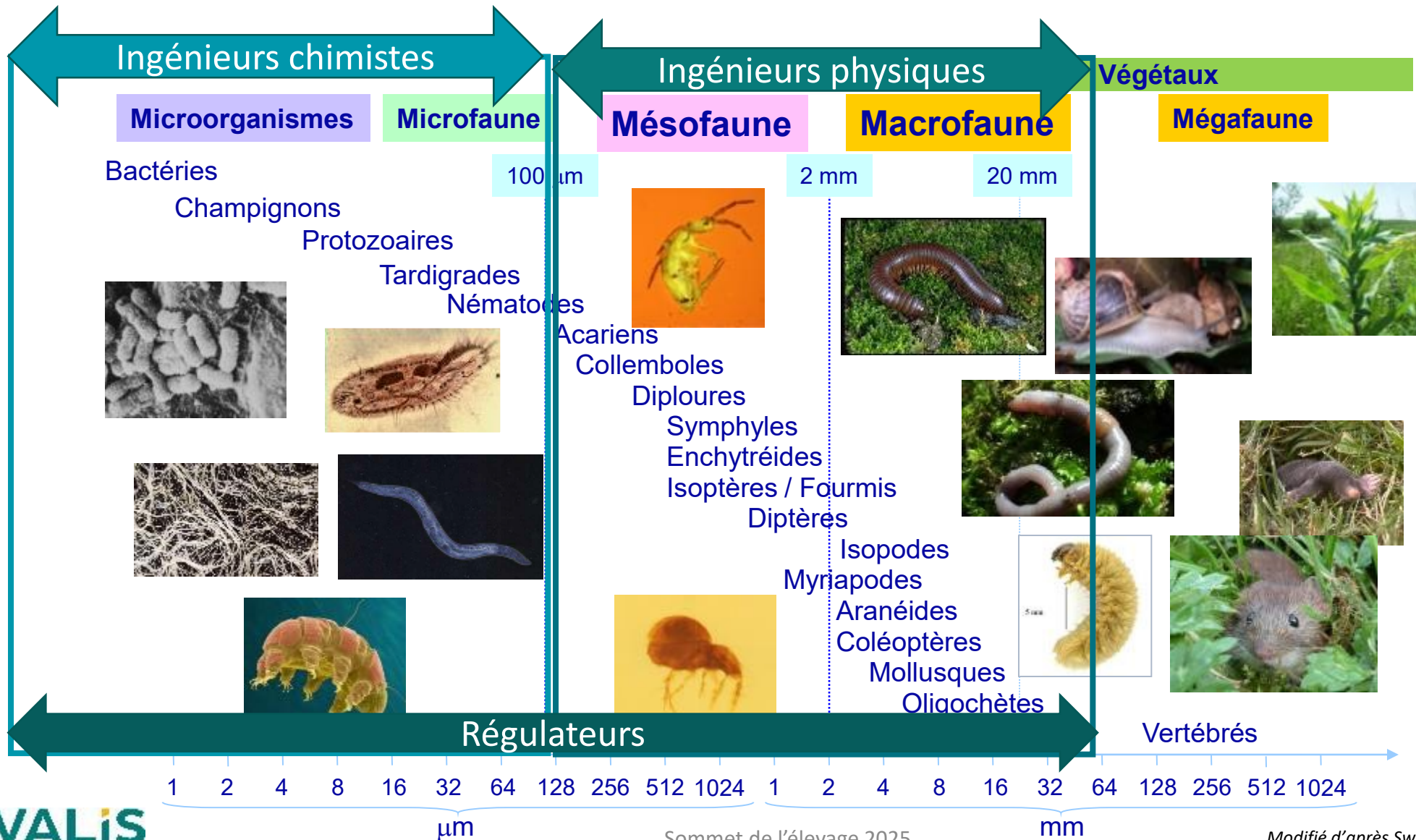
« Plus de microorganismes dans 1 m² de sol que d'étoiles dans le ciel » H. Reeves

« Le sol est un habitat pour ¼ des espèces qui vivent sur Terre »
Decaëns et al 2010



Le compartiment vivant du sol

De l'infiniment petit au visible...



Etroitement lié aux matières organiques (MO)

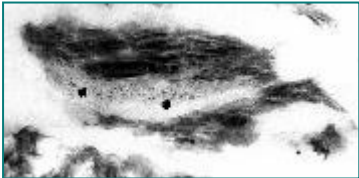
(2 % MO - 25 cm d'épaisseur de densité apparente 1.4)
42 t C/ha = 72 t de matières organiques



Matières organiques = les composés organiques du sol
Tout ce qui est ou a été vivant



Total	42 t/ha de C
Résidus organiques frais "libres"	0 à 4
Résidus organiques évolués (mat. orga. particulières)	2 à 4
Macro et méso faune	0,5 à 1
Biomasse microbienne	1 à 2
MO stables Ou Humus	36



Des acteurs de fonctions majeures au sein des sols

Recyclage des nutriments



Capture
Dynamique
Biodisponibilité N et P

Ingénieurs chimistes

Transformation du carbone



Décomposition
Dynamique de la MO

Ingénieurs chimistes

Matières organiques

Organismes
du sol

Maintien de la structure du sol



*Ingénieurs
physiques*

Rétention en eau
Infiltration de l'eau
Fourniture d'habitats
Erosion

Régulation des populations

Contrôle des bioagresseurs



Régulateurs



Le compartiment biologique consomme et assimile les MO



Le moteur : la matière organique « vivante » du sol

Le carburant : la matière organique « morte » du sol



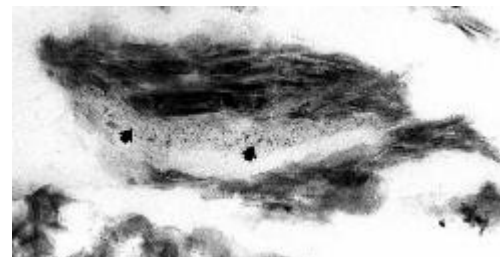
Déchets organiques, + ou - décomposés

- ✓ protection des sols en surface
- ✓ alimentation des organismes du sol et stimulation des fonctions minéralisatrices et agrégantes

Vitesse de rotation du moteur
(activité biologique)

+ ou - rapide

- ✓ contribution à la CEC
- ✓ contribution à la réserve en eau
- ✓ stockage de carbone
- ✓ Lutte contre érosion et battance



MO stables
« humus »

Macro et méso-faune



Biomasse microbienne



- ✓ alimentation minérale (azote, soufre,...)
- ✓ dégradation des polluants
- ✓ Agrégation, infiltration de l'eau et structure du sol

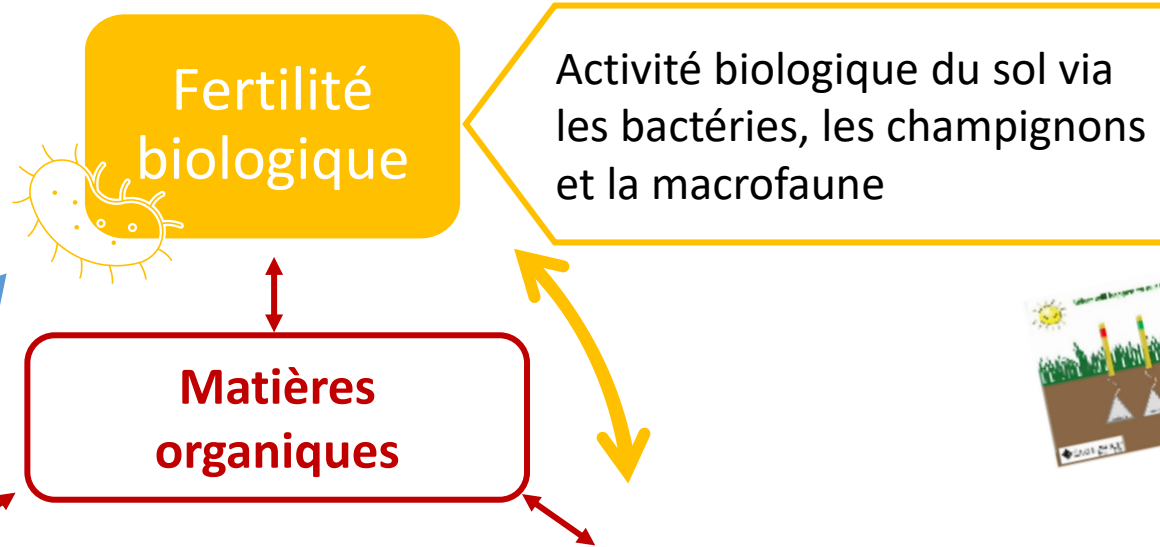


Evaluer le fonctionnement biologique : les avancées

Comment faire un diagnostic éclairé et éclairant ?

Les composantes de la fertilité sont liées !

- *Microorganismes (biomasse, activité, diversité)*
- *Faune du sol (biomasse, activité, diversité)*



La manière dont les différents constituants du sol sont agencés ensemble

Fertilité physique

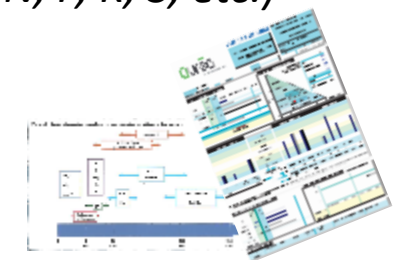
- *Etat structural*
- *Profondeur d'enracinement*
- *Réserve hydrique*
- *Conservation de la couche arable (érosion)*



Fertilité chimique

L'abondance en proportions suffisantes des nutriments indispensables au développement de la culture en place

- *Disponibilité en éléments minéraux (N, P, K, S, etc.)*
- *Statut acido-basique*
- *Capacité d'échange cationique*

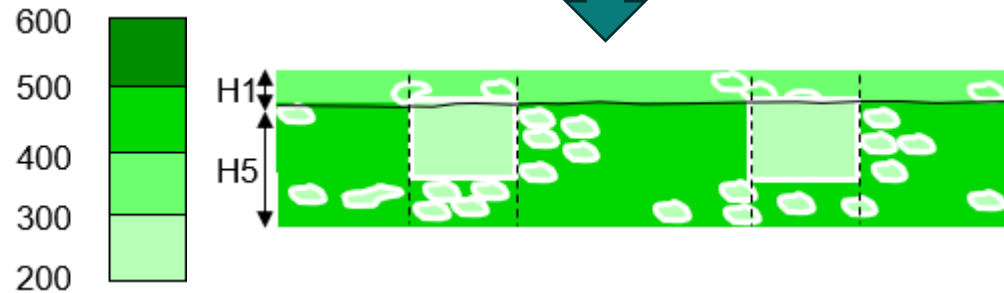


Les composantes de la fertilité sont liées : exemples

Après semis d'automne en conditions humides : le tassement impact l'activité biologique



Potentiel de
minéralisation du C
(mgC.kg⁻¹)



Source : Vian, 2009; Vian et al., 2009 - Soil Use and Management

Teneur en MO et pH impactent la structure du sol

Témoin
CECe = 8,7 cmolc kg⁻¹
MO = 0,86 % pH eau = 5,6

100 t fumier ha⁻¹an⁻¹
CECe = 18 cmolc kg⁻¹
MO = 5,3 % pH eau = 7,8



Photos C. Chenu

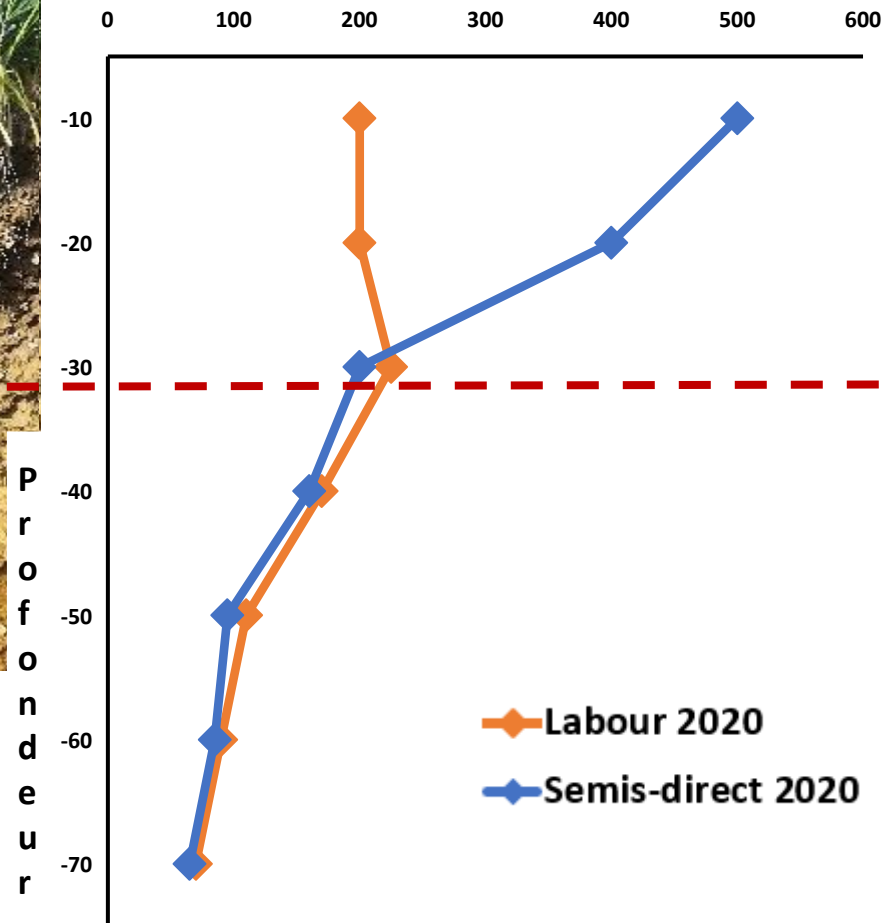
Dispositif des 42 parcelles à l'INRA de Versailles en mai 99



Le fonctionnement biologique est lié à la matière organique



Biomasse microbienne en mg/kg de terre fine en fonction de la profondeur.



Essai Syst' M Arvalis Pusignan (69)



- **L'abondance** de biomasse microbienne est corrélée à la teneur en carbone de l'horizon
- Quelles que soient les pratiques, en dessous de 30-40cm de profondeur les quantités sont faibles.

Evaluer le fonctionnement biologique : les avancées

La teneur en Matière organique et en azote totale d'une analyse de terre classique sont déjà des informations importantes du fonctionnement du sol

LABORATOIRES ASSOCIES DE RECHERCHES AGRICOLES
271, AVENUE DE GRANDE-BRETAGNE
31 - TOULOUSE - 31
TELEPHONE : 42-33-37
C. C. P. : LARA 2-92-18

Inscription :
Participation aux frais :

1979

ANALYSE DE TERRE
RÉSULTATS ET CONSEILS

Demandeur :
Réf. : 1259-2110 - 62°/66

Echantillon : Franquette Haute n°3
TOULOUSE, le

DÉTERMINATION	RÉSULTATS	OBSERVATIONS
Refus à 2 mm	125	
ANALYSE PHYSIQUE		
Sable grossier (0,2 à 2 mm) p. 1000	273	
Sable fin (0,050 à 0,2) p. 1000	276	
Sable très fin (0,020 à 0,050) p. 1000	145	
Limons (0,002 à 0,020 mm) p. 1000	226	Sables limoneux
Argile (moins de 0,002 mm) p. 1000	80	
Calcaire total p. 1000		
Calcaire actif (Méthode Trounau)		
Matière organique p. 1000	35	Normal
pH : eau	6,1	
KCl N	5,2	Faible
Réductibilité	5 080	
ANALYSE CHIMIQUE (en ppm ou mg par kg)		
PHOSPHATES		
Méthode Jorot-Hébert	111	
Méthode Dyer	224	Elevé
SOUFRE		
BASES ECHANGEABLES		
Chaux	1 870	Faible
Magnésium	177	Elevé
Potasse	247	Elevé
Soude	21	Normal
FER	138	Normal
MANGANESES :		
— Réductible	12,8	Normal
— Echangeable	1,6	Normal
CUIVRE Ox.	1,2	Normal
CUIVRE échangeable		
ZINC	1,83	Normal
MOLYBDENE		
BORE		

(Voir Conseils au verso.)



Evaluer le fonctionnement biologique : les avancées



Activité

- Potentiel de minéralisation C et N
- Activités enzymatiques



Diversité

- Bactéries
- Champignons
- Faune du sol



Abondance

- Biomasse microbienne
- Bactéries
- Champignons
- Bactéries/champignons
- Faune du sol (dénombrement effectifs)



Evaluer le fonctionnement biologique : les avancées

	Type d'indicateur	Méthode	Niveau de maturité
Statut organique	Qualité de la matière organique	•Fractionnement granulométrique de la matière organique	Méthode normalisée, référentiels laboratoires
		•Carbone microbien par fumigation-extraction	Méthode normalisée, référentiels laboratoires
		•Carbone oxydable au KMnO4	Référencement en cours
		•Azote Biologiquement Minéralisable	Référencement en cours
		•Azote Potentiellement Minéralisable	Référencement en cours
		Minéralisation C et N par incubation aérobie	Méthode normalisée, référentiels laboratoires
Abondance	Abondance microbienne	• ADN microbien total	Plusieurs méthodes existantes, dont INRAE Dijon, avec référentiel RMQS
		• Abondance relative des champignons (ADNr 18S) et des bactéries (ADNr 16S) (ratio F/B)	Plusieurs méthodes existantes, dont INRAE Dijon, avec référentiel RMQS
	Abondance et diversité des vers de terre, carabidés et collemboles	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée (prélèvement) Référentiels des chercheurs
		Diversité moléculaire de la faune du sol	Pas encore abouti
	Abondance et diversité des nématodes	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée Référentiel ELISOL
Activité	Activité microbienne	Activités enzymatiques (N, C, P, S)	Méthode normalisée Plusieurs laboratoires dont INRAE UMR Ecosys avec référentiel INRAE/RMQS
Diversité	Diversité des bactéries et champignons	Diversité taxonomique par séquençage ADN haut débit	Méthode INRAE Dijon avec référentiel RMQS



Evaluer le fonctionnement biologique : exemple d'indicateurs

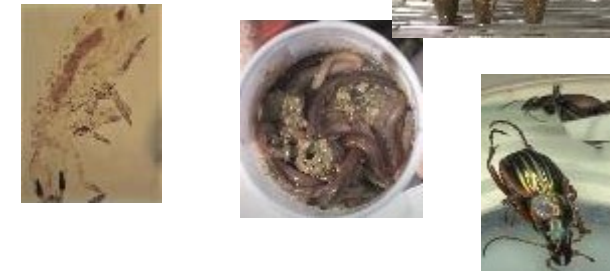
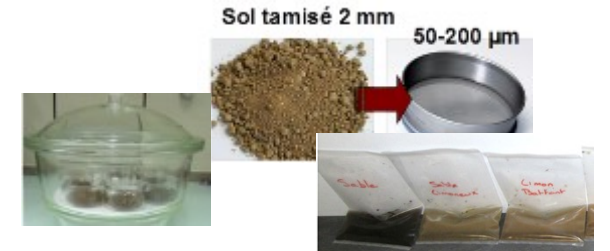
Liste d'indicateurs du fonctionnement du sol utilisable dans le conseil (Tscheiller&Riah-Anglet et al., 2025)

Type d'indicateurs	Indicateurs	Labo/ Terrain	Coût	Technique et appareillage	Analyse sur sol : sec/frais	Norme disponible	Degré de maturité
			(1: faible à 3: élevé)	(1: laboratoire d'analyse de terre ou 2 : laboratoire spécialisé)		(1: Norme, 2: méthode publiée mais pas de norme, 3: Différentes méthodes)	
Organiques	C org (%)	Labo	1	1	sec	1	TRL 9
	N total (%) et C/N	Labo	1	1	sec	1	TRL 9
	Fractionnement granulométrique MO	Labo	2	2	sec	1	TRL 8
	POXC	Labo/Terrain	1	2	sec	2	TRL 6-7
Abondance	C microbien (fumigation-extraction)	Labo	2	2	frais	2	TRL 8
	ADN total	Labo	3	2	frais	2	TRL 7
	Biomasse bactérienne ADNr 16S	Labo	3	2	frais	3	TRL 6
	Biomasse fongique ADNr 18S	Labo	3	2	frais	3	TRL 6
	Taux de mycorhization des racines	Labo	2	2	frais	2	TRL 7-8
Activité	Minéralisation de l'azote	Labo	3	2	frais	2	TRL 8
	Minéralisation du carbone	Labo	3	2	frais	2	TRL 8
	Fluorescein di-acétate	Labo	2	2	frais	2	TRL 7-8
	β-D-glucosidase (GLU)	Labo	2	2	frais	1	TRL 7-8
	Concentration totale de Glomaline	Labo	1	2	frais	2	TRL 6-7
	Respiration <i>in situ</i>	Terrain*	2			2	TRL 6
	Azote Potentiellement Minéralisable	Labo	2	2	frais	2	TRL 8
	Azote Biologiquement Minéralisable	Labo	2	2	frais	2	TRL 7-8
	Bait lamina	Terrain*	1			2	
Diversité	Nématofaune	Labo		2	frais	1	TRL 8 - 9
	Vers de terre	Terrain*	2			2	TRL 7-8
	Diversité bactérienne	Labo	3	2	frais	2	TRL 6
	Diversité fongique	Labo	3	2	frais	2	TRL 6

* Méthode d'interprétation uniquement en comparaison



Sommet de l'élevage 2025



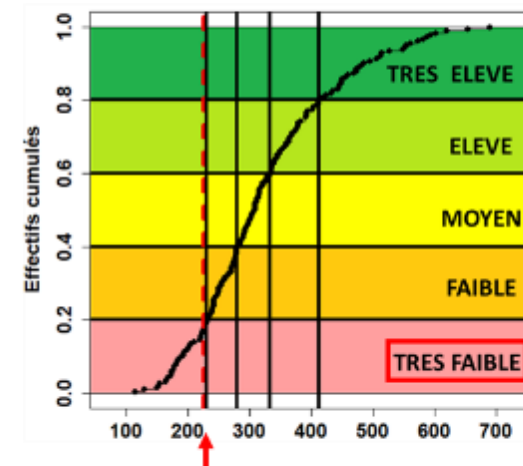
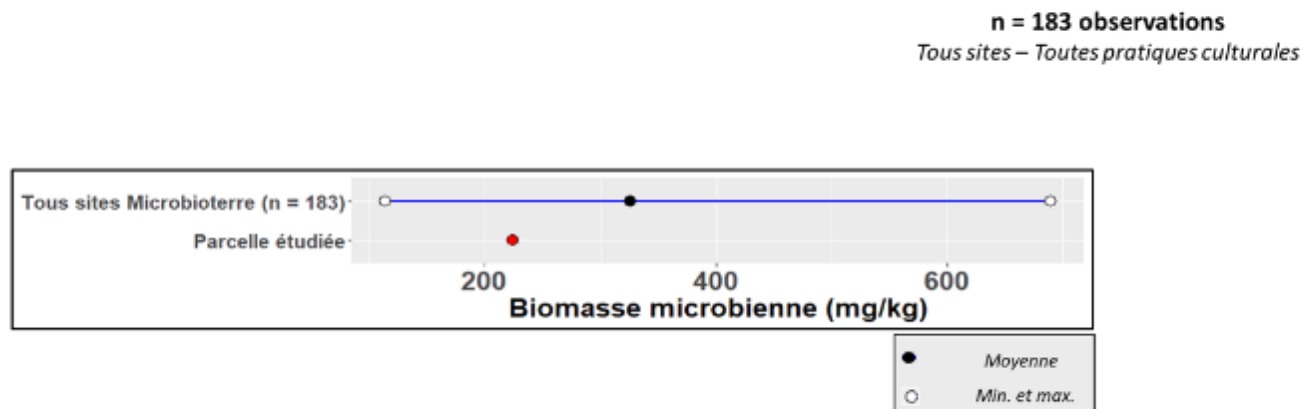
Comment interpréter ces indicateurs ?

Exemple : biomasse microbienne

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)

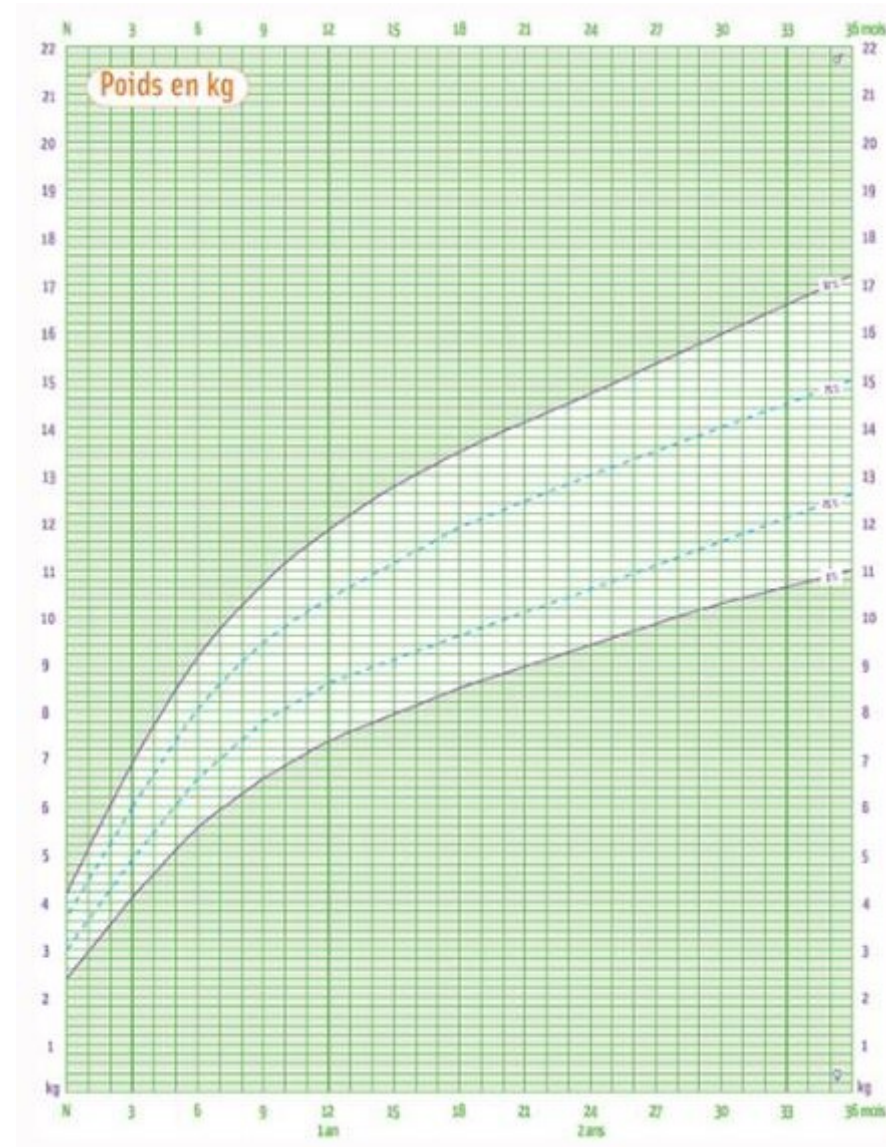
→ Valeur de biomasse microbienne comprise dans référentiel Microbioterre

→ Valeur très faible de l'indicateur

Microbioterre

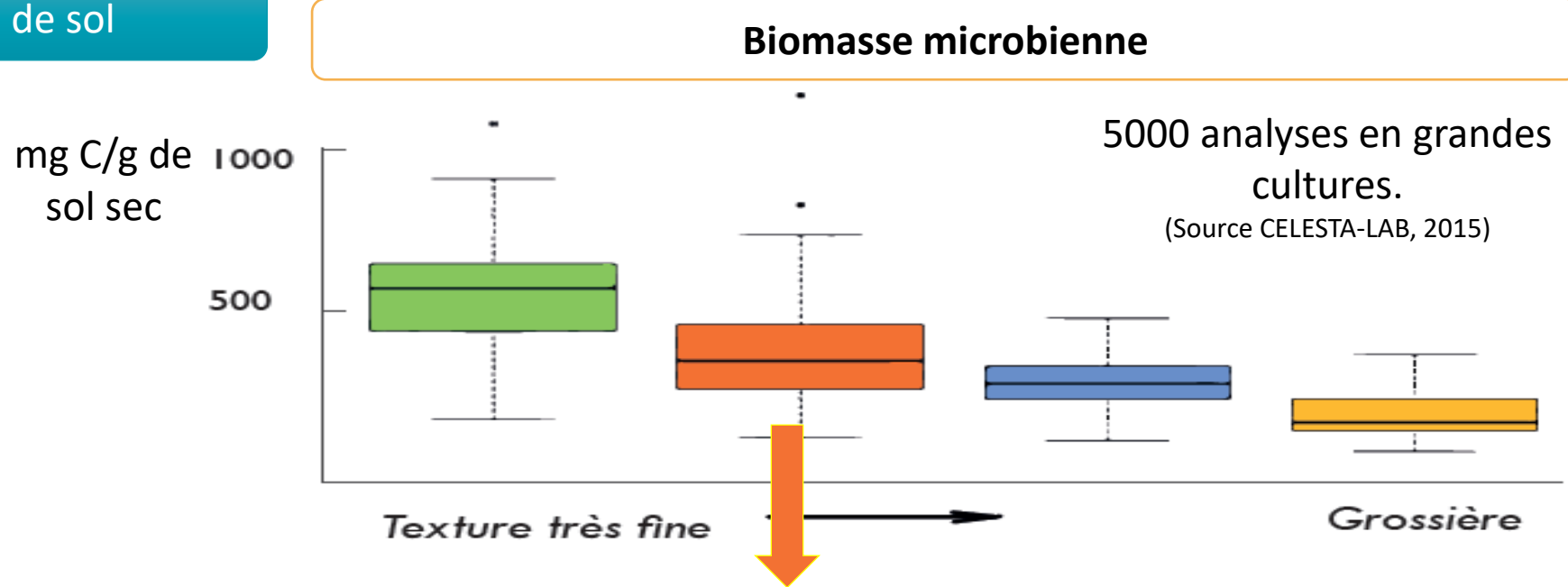
Référentiel de positionnement : insuffisant pour diagnostic

Référentiel d'interprétation : le plus n'est pas toujours le mieux !

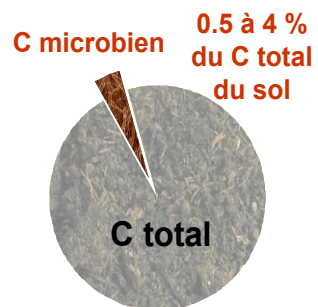


Les indicateurs de fonctionnement biologique dépendent du type de sol et des pratiques

1° Au type de sol

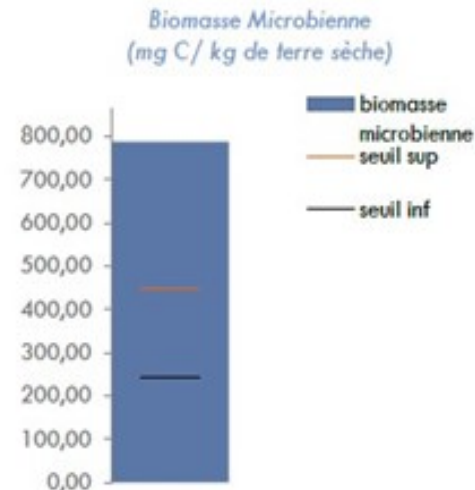


2° Aux pratiques culturales



> 10ans d'ACS

**Biomasse microbienne :
4 % du C**



Argilo-calcaire – 3.4 % MO

Sommet de l'élevage 2025

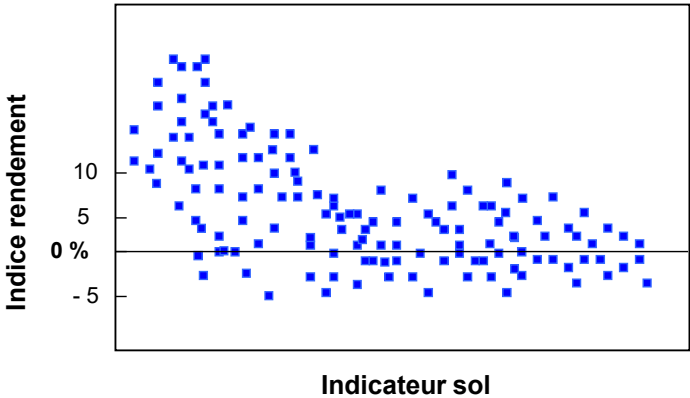
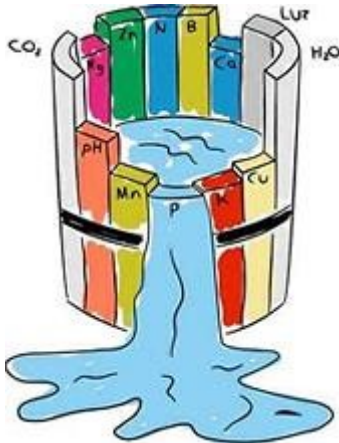
“ Il n’y a pas de fertilité en soi mais en référence, pour un milieu, aux systèmes de culture pratiqués ”

Michel Sebillotte



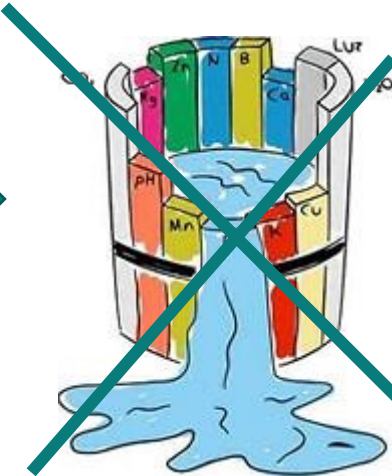
Indicateurs du fonctionnement biologique : la recherche nécessaire du lien avec des fonctions du sol

Indicateur : P Olsen



Teneur
impasse /
Teneur seuil...

Indicateur : Biomasse
microbienne



Transformation du carbone					Structure du sol			
Transformation MO		Perte MO	Augmentation MO		Erosion Battance		Porosité	
Fragmentation	Biodegradation	Minéralisation (CO2)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Agrégation (Macro)	Agrégation (Micro)	Aération/Circulation eau - air	Stockage eau
		+			+			



Recherche de
valeur
souhaitable
ou « critique »

Pas de lien direct avec productivité !



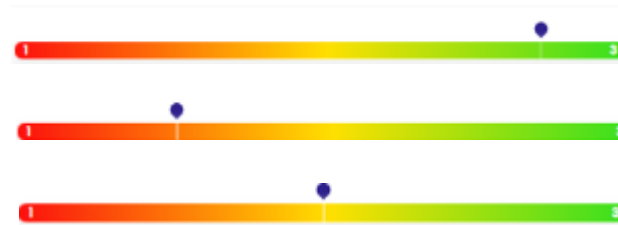
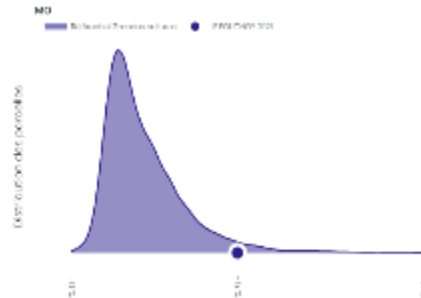
Perspectives : des travaux en cours pour interpréter les paramètres biologiques

Améliorer l'évaluation des fonctions du sol via des indicateurs organo-biologiques pour réaliser du conseil opérationnel

Développement
et sélection
d'indicateurs

Référentiel
descriptif

Diagnostic
agronomique et
conseil



Avec la contribution du Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt

Organismes associés



Labellisé par BOUCLAGE



Conclusion : comment faire un diagnostic ?

- De nombreux indicateurs, certains plus matures que d'autres : se renseigner auprès d'un laboratoire
- Les services rendus par la fertilité biologique des sols sont identifiés mais encore difficiles à quantifier.
- Besoin d'indicateurs pour évaluer 3 composantes du fonctionnement biologique des sols :
 - Abondance
 - Activité
 - Diversité
- ...les composantes de la fertilité sont liées !!!

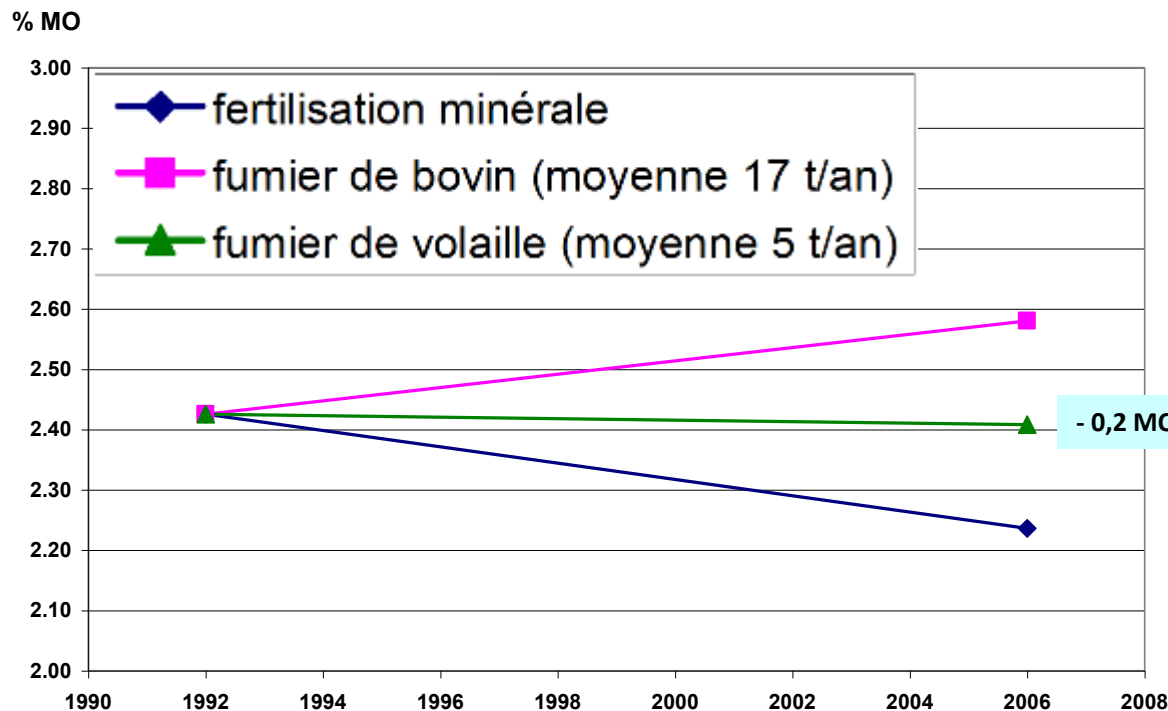


Fonctionnement biologique et pratiques en polyculture-élevage

Atouts et contraintes

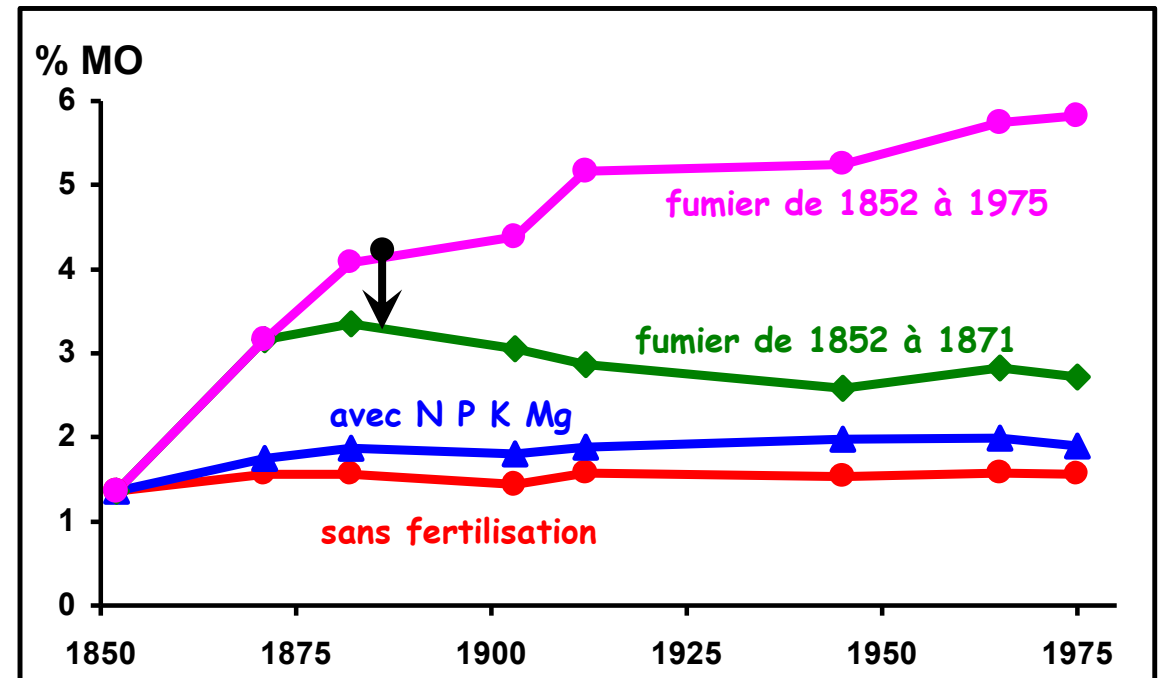
1^{er} atout : gestion des PRO

L'apport d'amendement organique améliore la teneur en MO



Essai de La Jaillière (44)

Sol brun, limon sur altérite de schiste



Effet à (très!) long terme

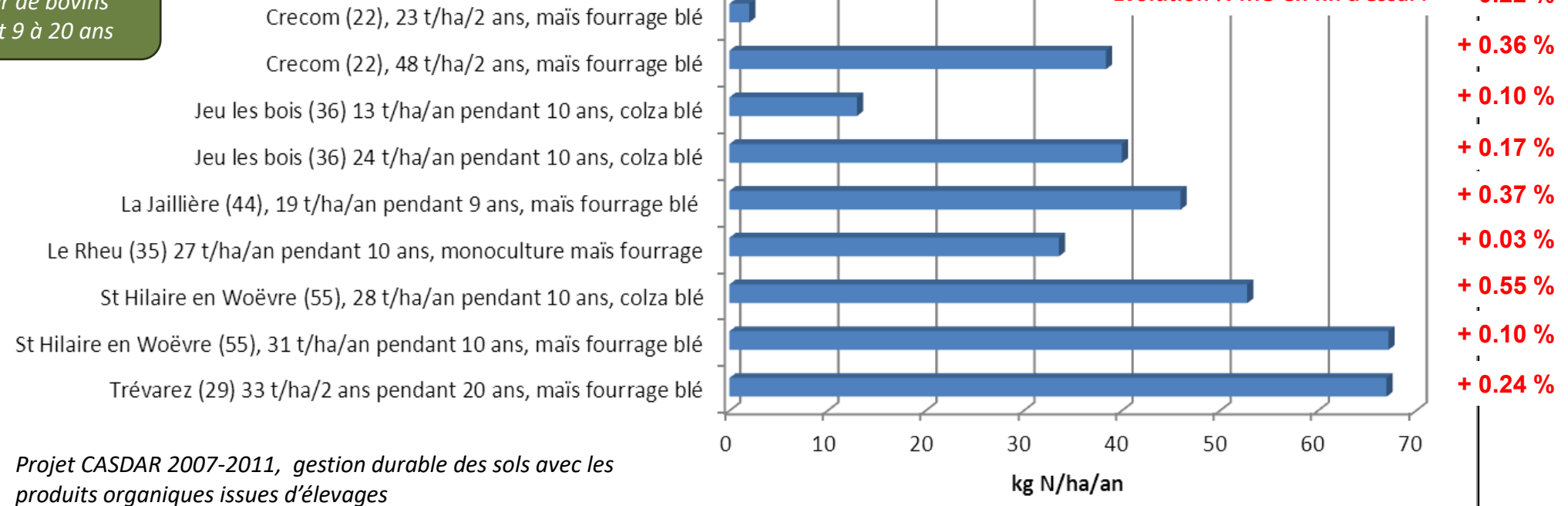
Essai de Rothamsted (UK)



Les PRO fournisseurs de carbone et d'azote

Supplément de minéralisation annuelle liée à des apports répétés de fumier de bovins par rapport à une fertilisation minérale azotée seule

Essais avec apports de fumier de bovins durant 9 à 20 ans

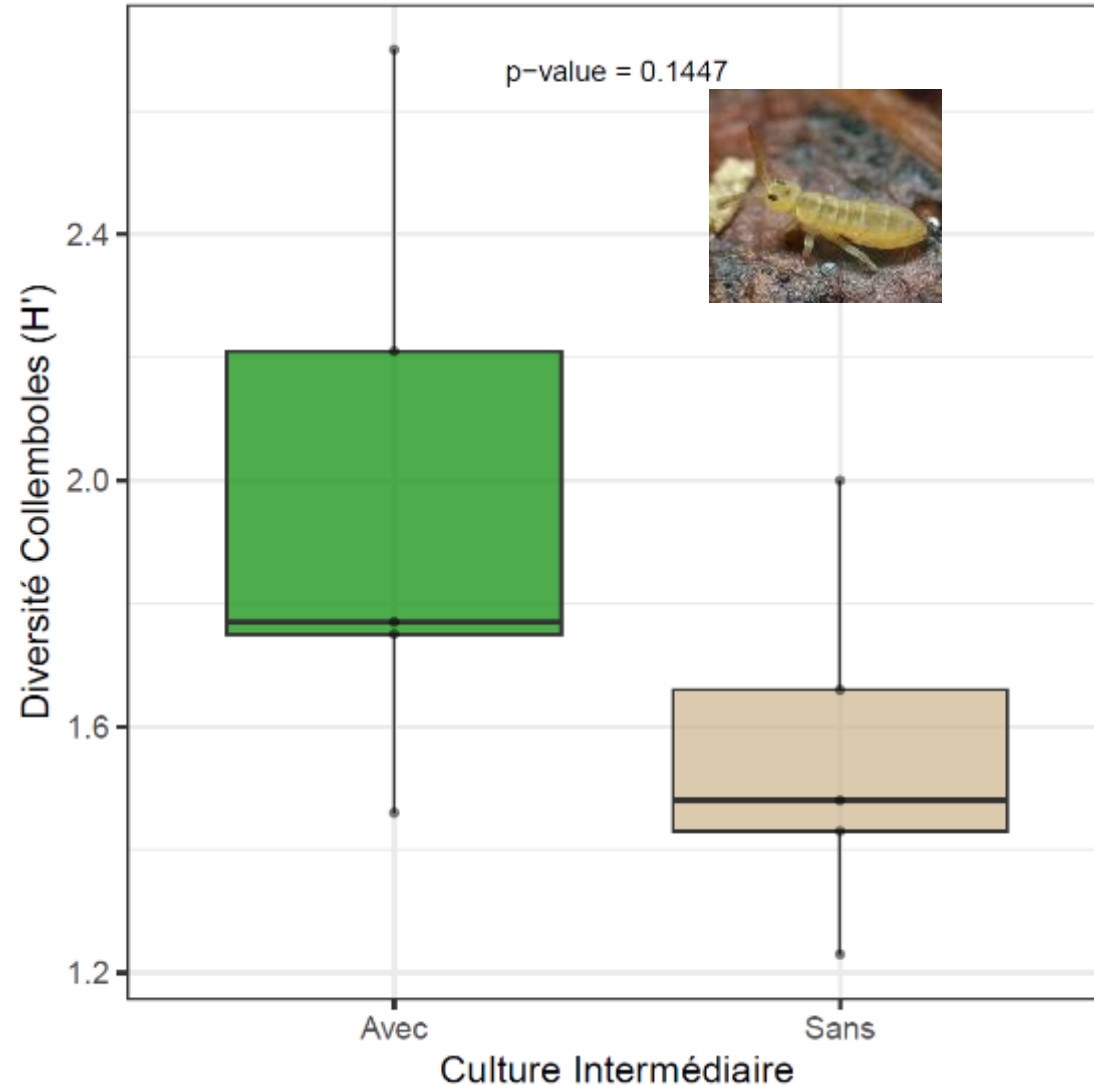


L'apport répété de PRO a pour conséquence :

- Augmentation du % de MO entre +0.03 et +0.55% selon état initial
- **Augmentation des fournitures en azote de +5 à +65 kg d'azote par hectare et par an**

2^{ème} atout : les successions culturelles

Impact des couverts sur la diversité des collemboles



- | |
|-------------------------|
| 1– La Jaillière |
| 2– Oulmes |
| 3– Poix |
| 4– Pusignan |
| 5– St-Hilaire-en-Woëvre |
| 6– Syppre Béarn |
| 7– Syppre Lauragais |
| 8– Boigneville |

Analyse de 64 modalités de 8 essais longue durée

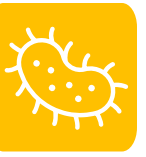


➤ Pas d'impact significatif mais tendance à l'augmentation de la diversité des collemboles en cas de pratique des couverts

Carton-Moreau et al, 2023

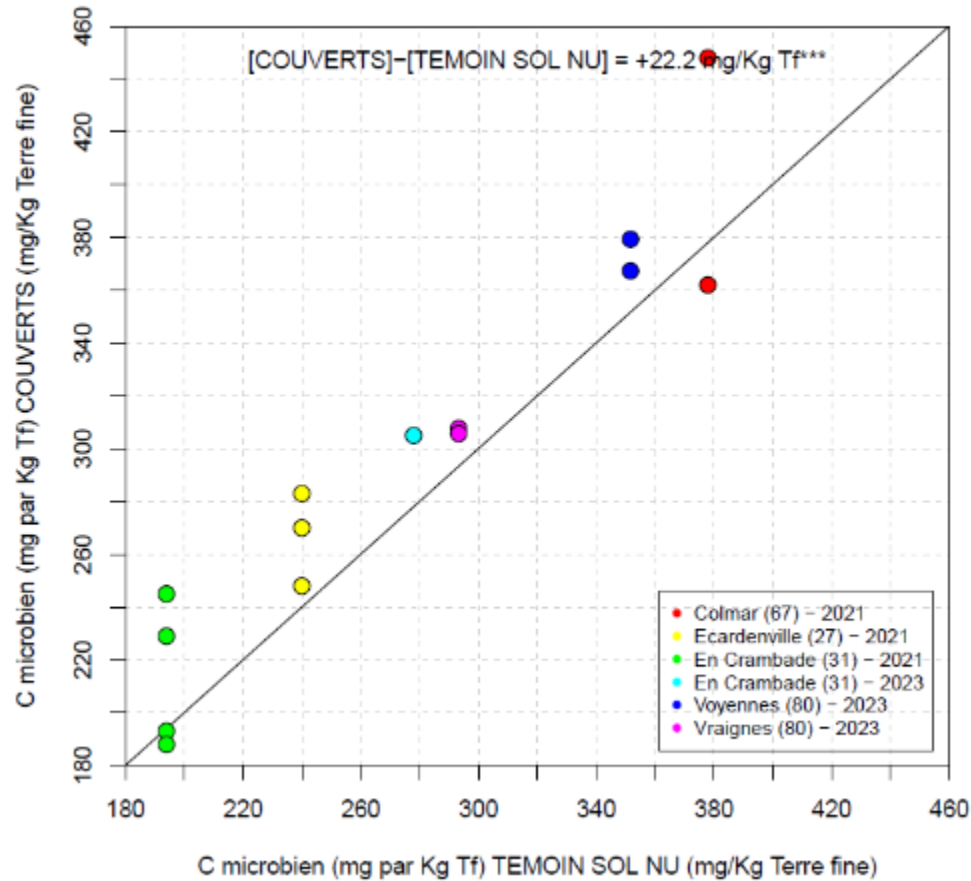


L'abondance microbienne est favorisée par la mise en place de couverts multiservices



6 essais, 2021-2023

DIFFERENCE DE C microbien (mg par Kg Tf) ENTRE TEMOIN SOL NU
ET COUVERTS SUR 0-20cm DE SOL



Test de comparaisons de moyennes appariés

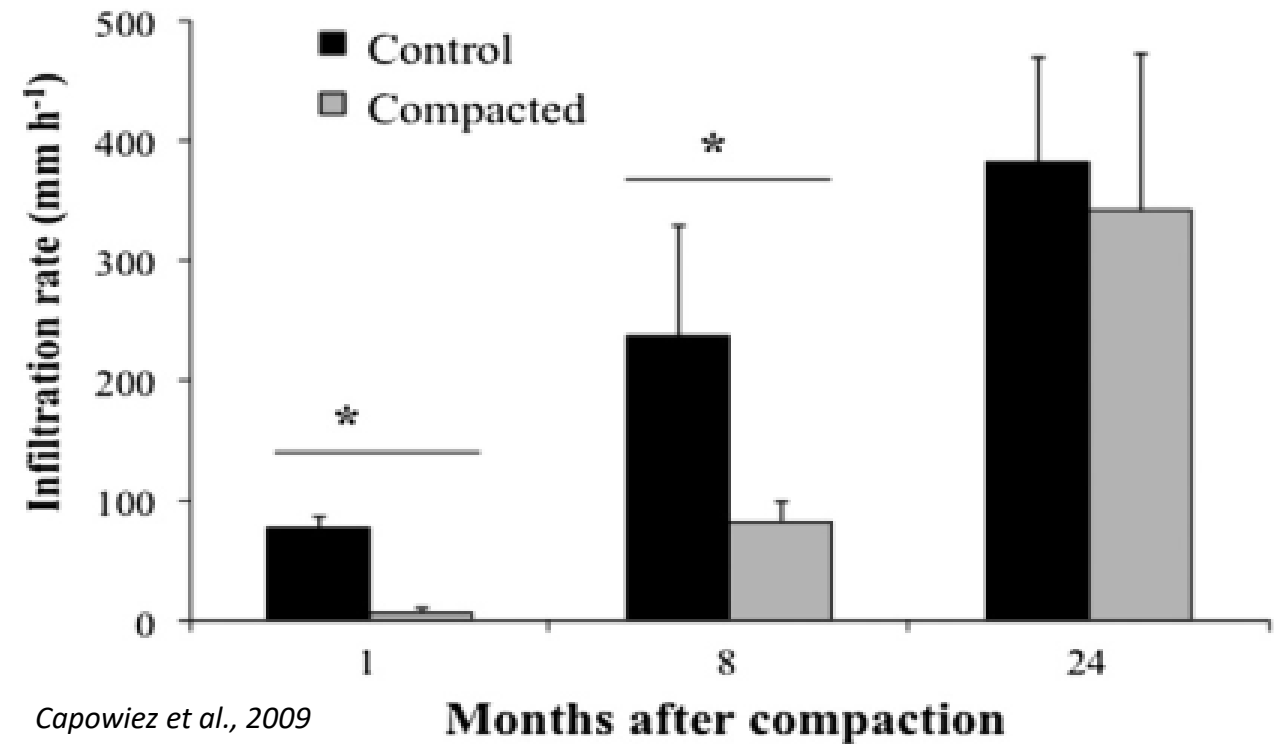
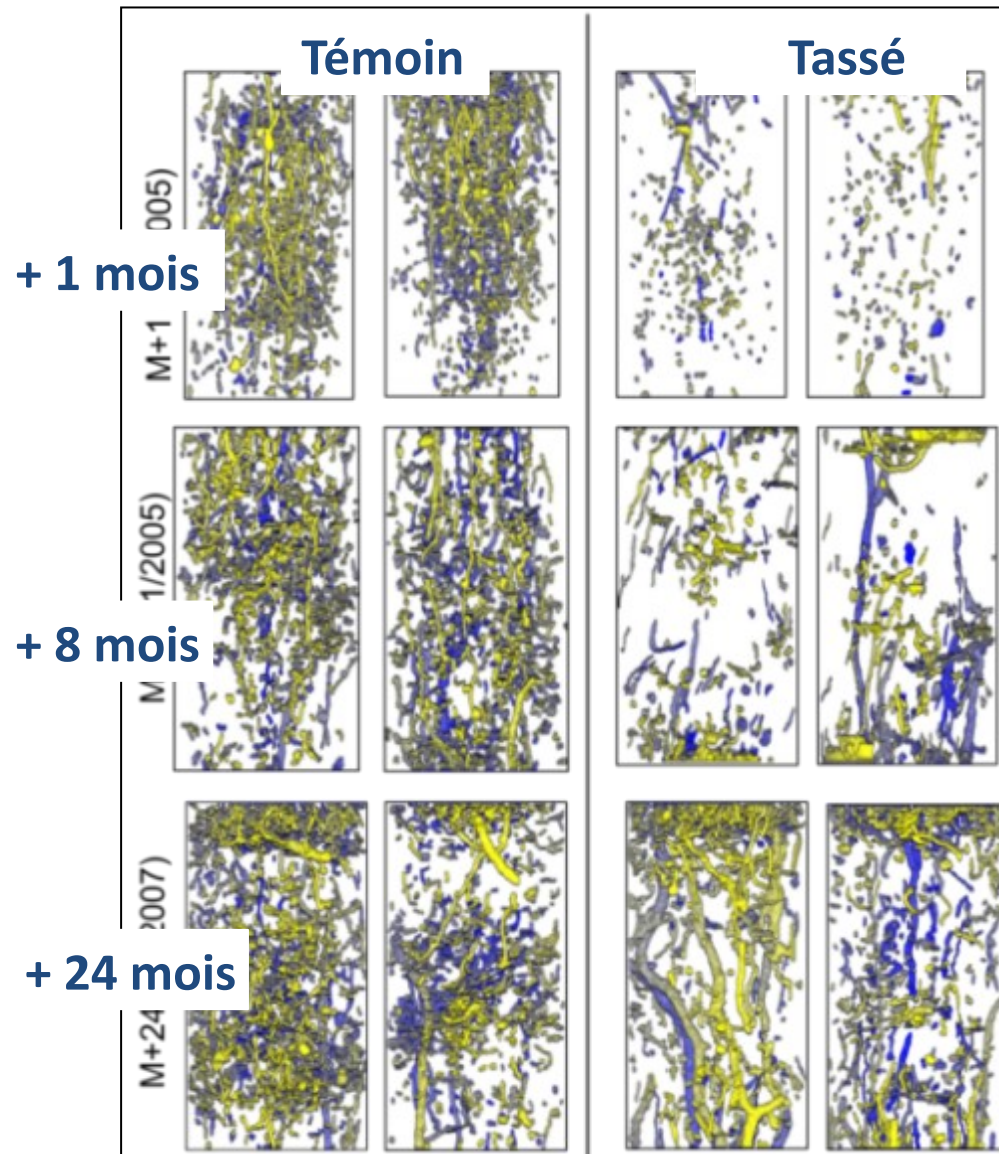


Avoine Pois Vesce (mélange fourrager avant maïs ensilage), Saint-Paul-en-Gatine (79)

Effet significatif : la mise en place de couverts **augmente légèrement mais significativement les teneurs en carbone microbien**, indicateur ayant un lien avec la minéralisation et la macro-agrégation



Sur des cultures pluriannuelles, les lombriciens et l'enracinement contribuent à régénérer un sol compacté

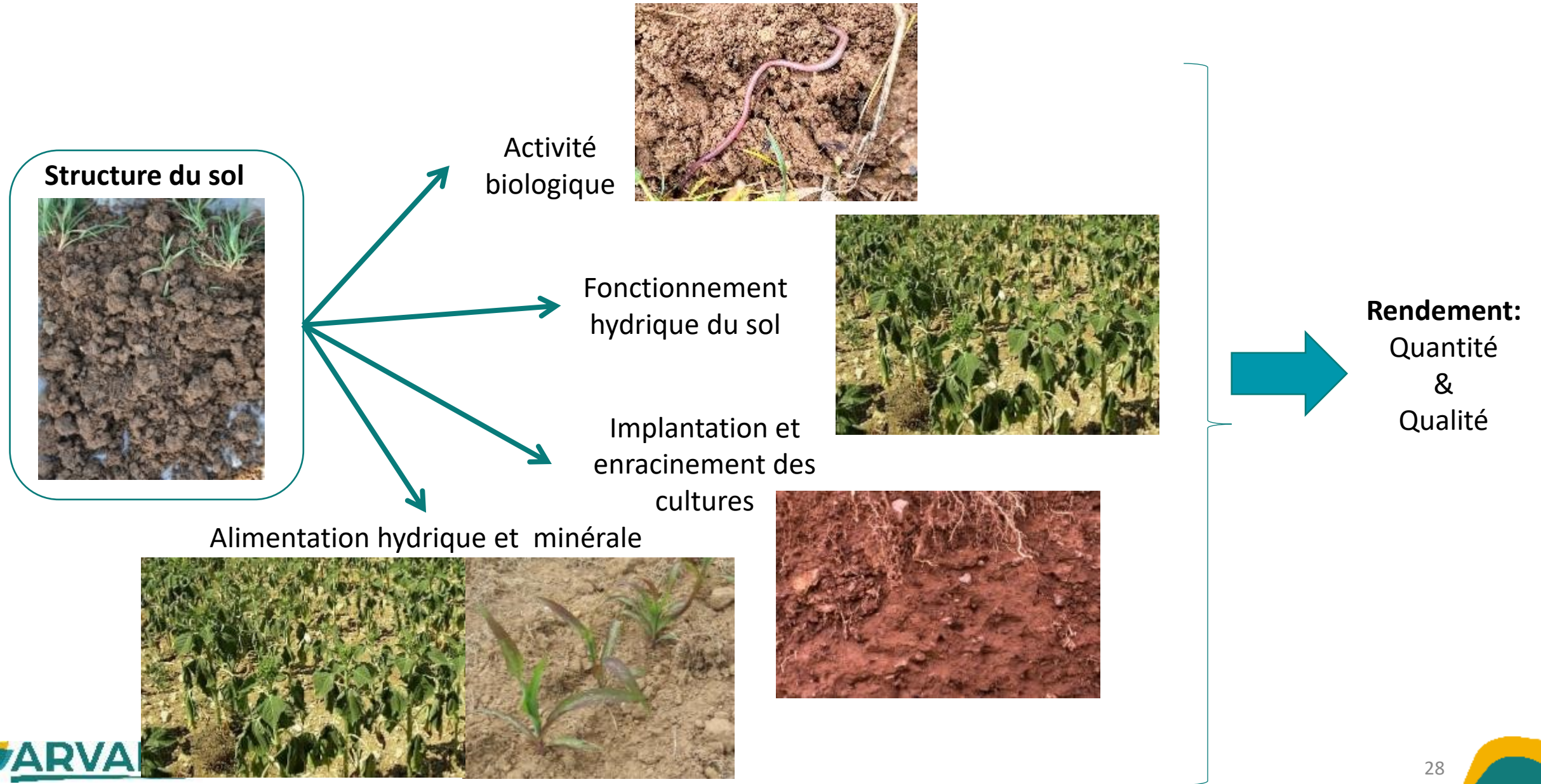


Capowiez et al., 2009

Effet majeur du tassement : destruction du réseau de galeries
La reconstitution du réseau dépend des **espèces** (anéciques, endogés)
Rétablissement **progressif** des fonctions d'infiltration

Capowiez et al., 2012

Contraintes : exposition au risque de tassement



Conséquences des tassements sur la production

Culture	Pertes de rendement indicatives
Blé	Limitées, sauf excès d'eau ou sécheresse
Maïs	Eviter en priorité une rupture de densité entre deux horizons
- Ensilage	30 à 35%
- Grain&Semence	15 à 25%
Luzerne	10 % à 30% sous les roues; 1 à 3% à l'échelle de la parcelle (selon la taille du matériel)
Pomme de Terre	30 % sous les passages de roues 5 à 15% à l'échelle de la parcelle



Plus le cycle de la culture est court, plus l'impact du tassement est important

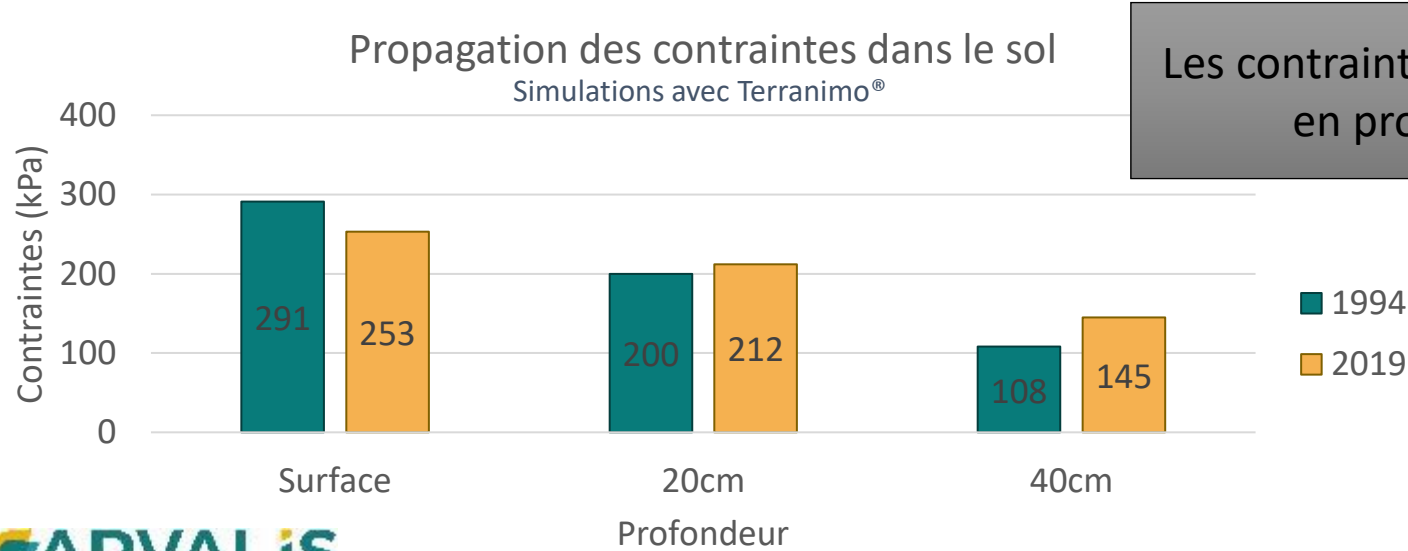
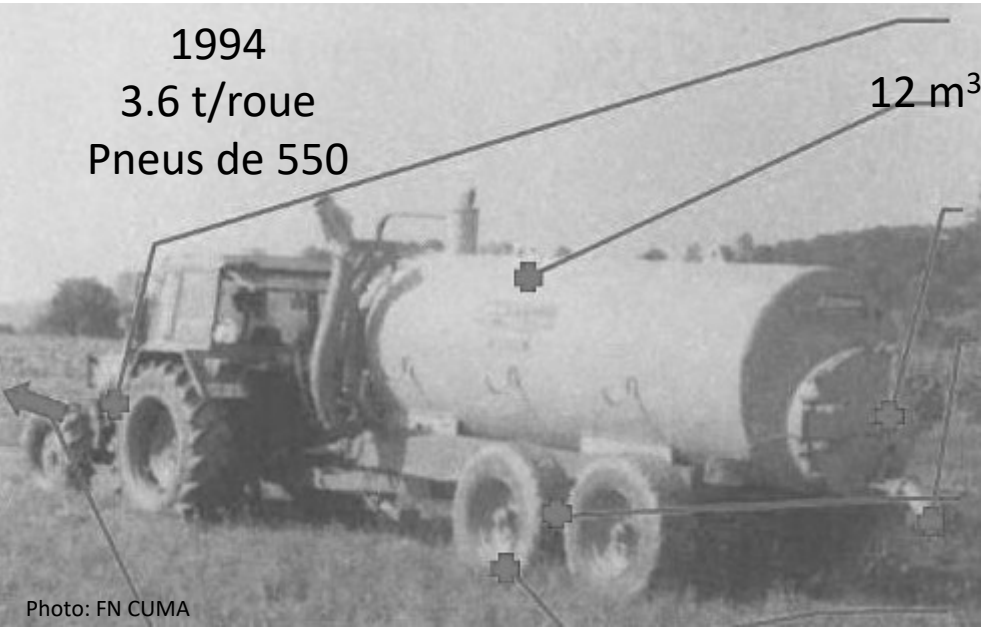
Blé, maïs grain, maïs ensilage : Essais Arvalis à Boigneville (91), La Jaillière (44) et Montesquieu Lauragais (31).

Maïs semence : essais Arvalis-FNPSMS à Etoile sur Rhône.

Pomme de Terre: essai Sol-D'Phy. Luzerne: Beaudoin et Thiébaud, 2007; INRAE – Fourrages.



Conséquences de l'évolution des agroéquipements

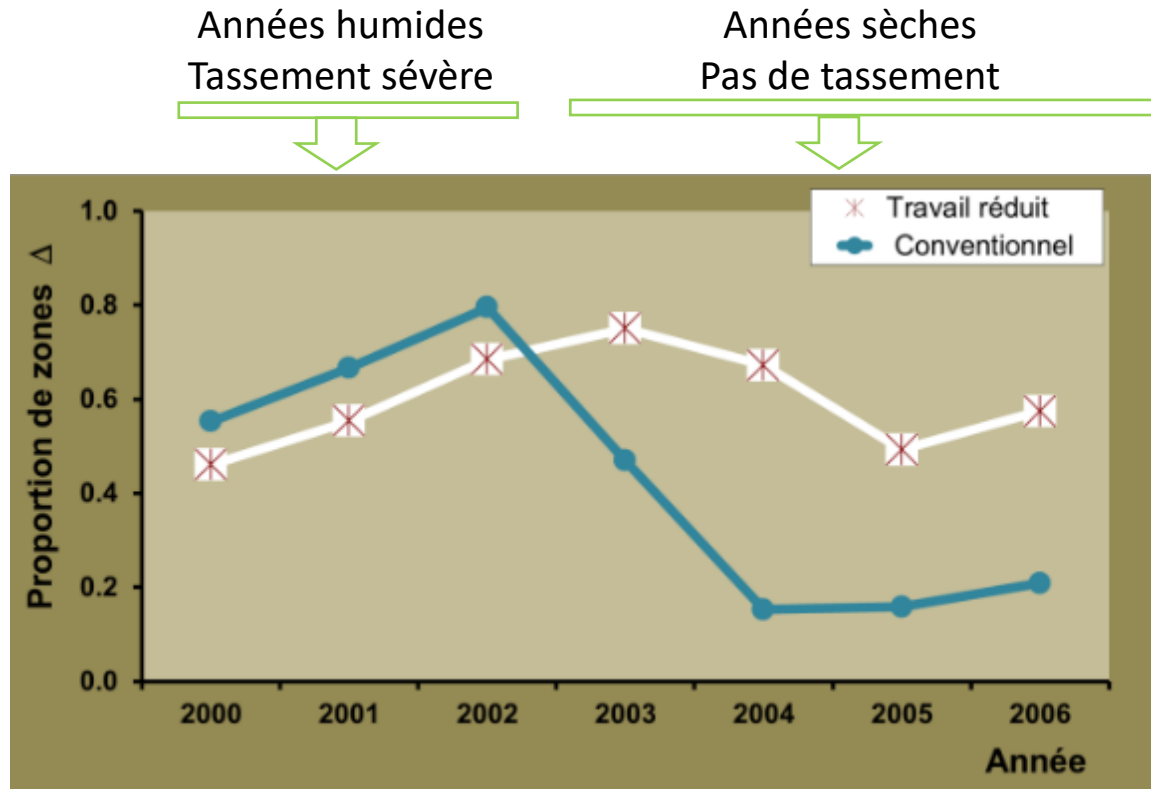


Les contraintes augmentent en profondeur

Le télégonflage et les pneus basses pressions ne compensent qu'en partie l'évolution du poids du matériel

L'activité biologique ne suffit pas toujours à restructurer le sol

INRAE



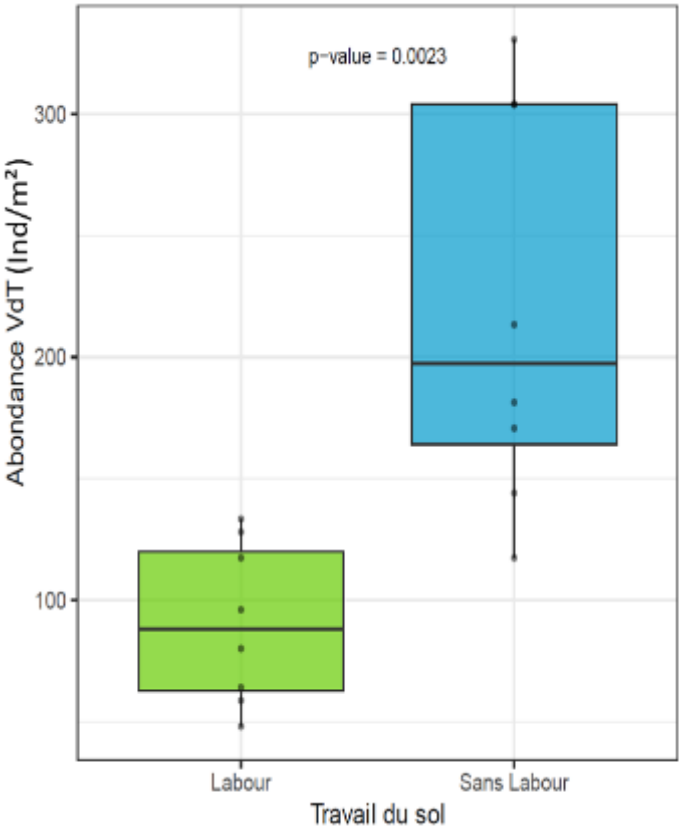
Essai « Systèmes de culture et structure du sol »
INRA Mons
Boizard et al., 2013

Dans ce sol de limon :

- En travail conventionnel : la disparition des zones tassées est effective en deux ans
- En travail réduit : Les zones tassées sont beaucoup plus durables et la porosité structurale reste proche de 0 durant plusieurs années

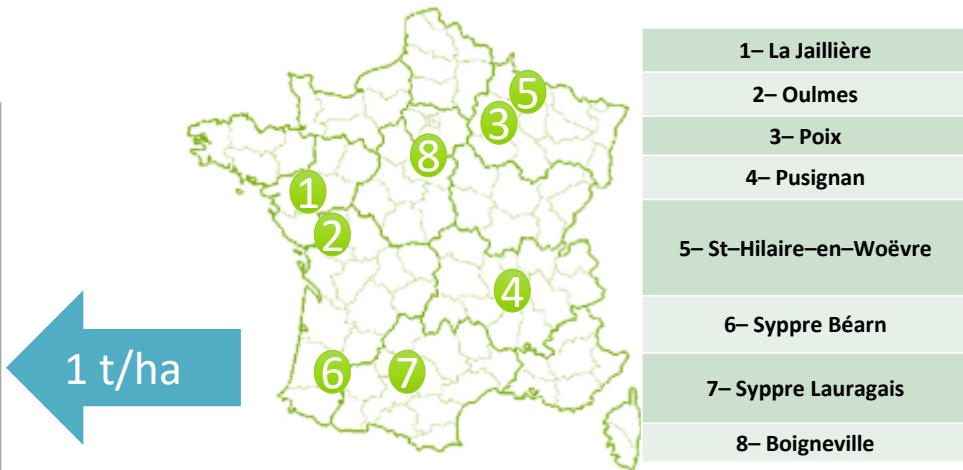
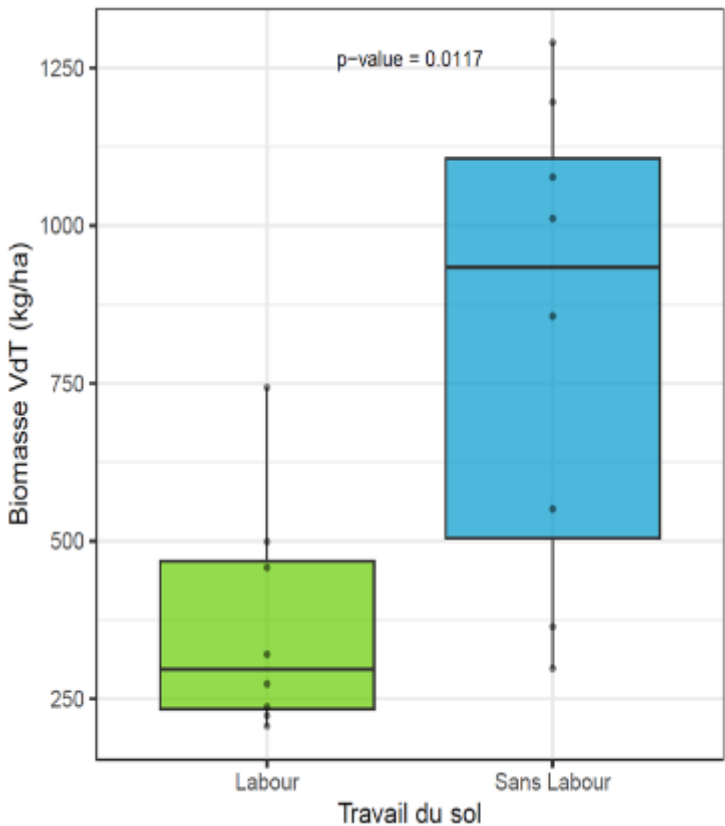
La réduction du travail du sol favorise les vers de terre

Nombre des VdT en fonction du travail du sol



Sur 8 couples Labour / Semis direct ou strip-til
Essais ARVALIS, prélèvements au printemps 2022

Biomasse des VdT en fonction du travail du sol



Analyse de 64 modalités de 8 essais longue durée



De fortes différences entre sites
Des vers de terre présents en labour

Travail du sol et fonctionnement biologique : un nécessaire compromis

- Tassement pas toujours évitable
- L'activité biologique est impacté par le tassement, et n'est pas toujours suffisante pour rétablir les fonctions d'un sol compacté
- Mais...Activité biologique (notamment lombricien) est favorisé par la simplification du travail du sol

Ne pas raisonner travail du sol vs non travail du sol, mais structure du sol en fonction de vos attentes



Conclusion : évaluer la fertilité biologique du sol pour s'adapter

- Analyses maintenant accessibles pour les producteurs (menu \simeq 150-400 €)
- Evaluation complexe vu la grande diversité des organismes vivants du sol et les interdépendances : prendre en compte l'abondance, l'activité et la diversité
- Travaux en cours pour quantifier le lien avec les fonctions du sol, et donc améliorer le conseil accompagnant l'analyse (projet LienDuSol)
- Un diagnostic éclairé prendra en compte la composante physique et chimique de la fertilité



Pour en savoir plus...

- Guide d'interprétation Microbioterre
- *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI 10.17180/qnpx-x742 .*
- Indicateurs de fonctionnement biologique des sols agricoles - Fiches pratiques (sortie le 10/10/2025)

