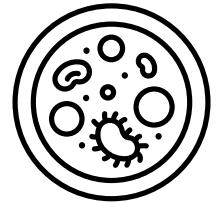
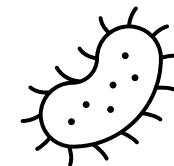


Evaluer la fertilité biologique du sol pour s'adapter



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

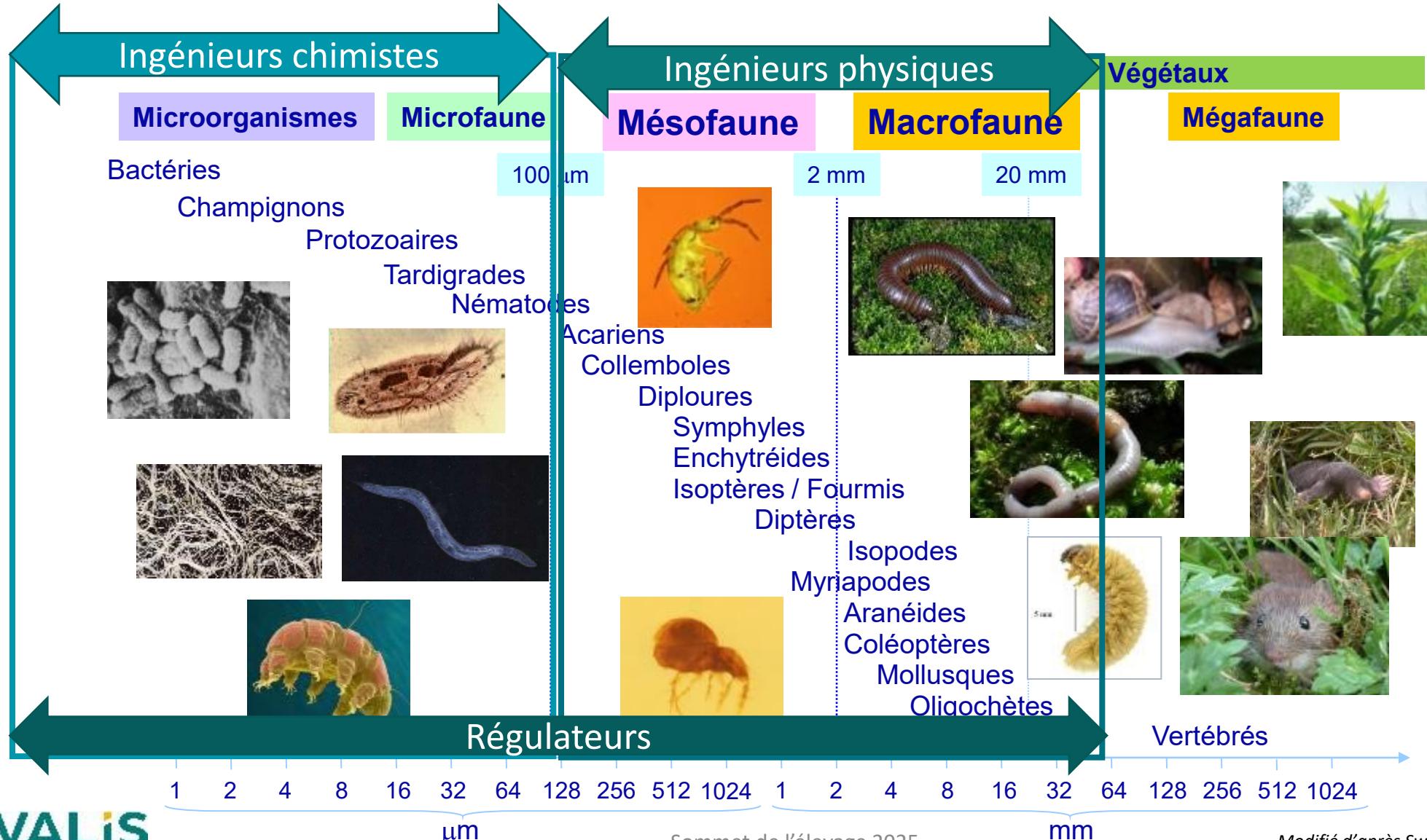
« Le sol est un habitat pour $\frac{1}{4}$ des espèces qui vivent sur Terre »

Decaëns et al 2010



Le compartiment vivant du sol

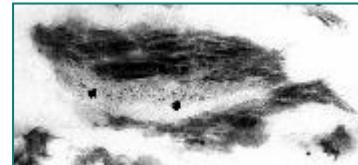
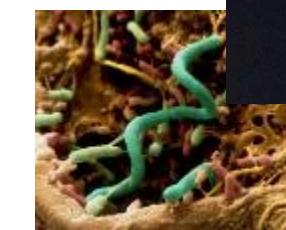
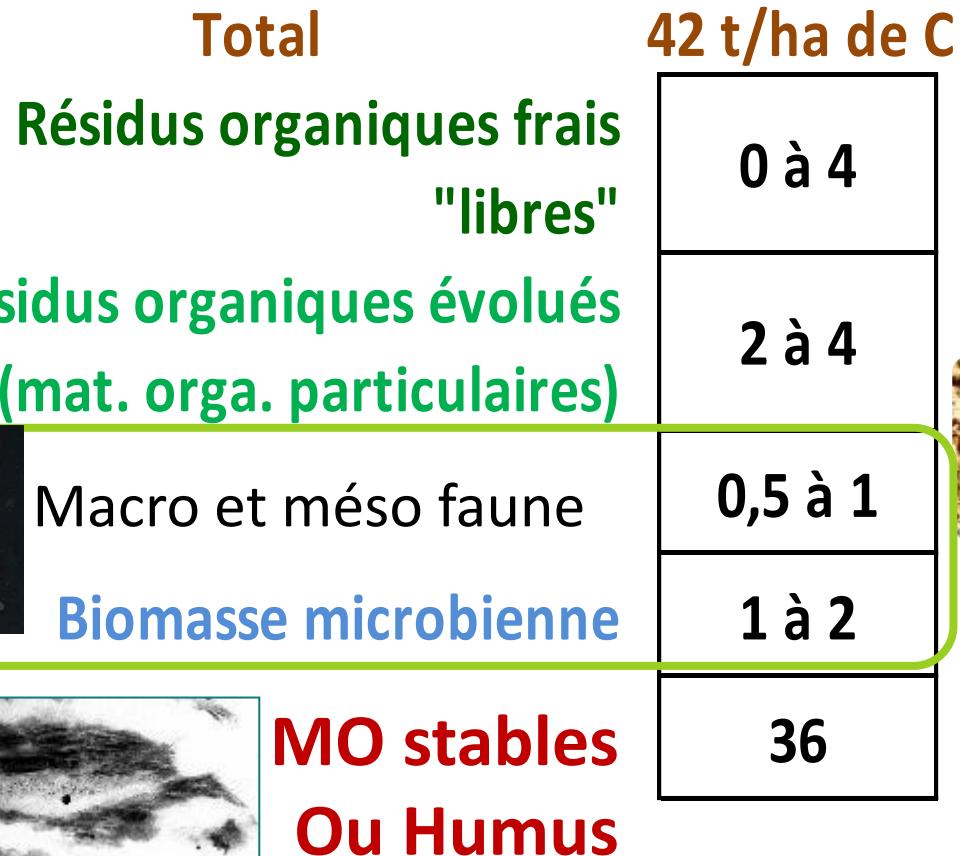
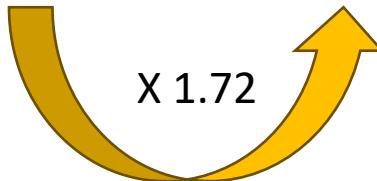
De l'infiniment petit au visible...



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



Photos : C. Chenu, INRA, M-A Félix, CNRS, ARVALIS

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



Ingénieurs physiques

Maintien de la structure du sol

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

Matières organiques

Organismes
du sol

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



Débris organiques, + ou - décomposés

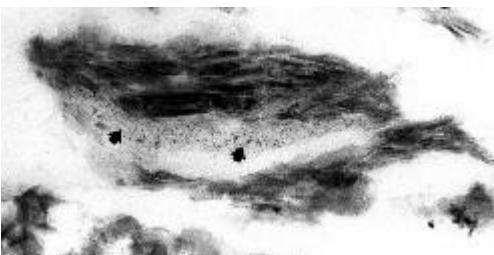
- ✓ protection des sols en surface
- ✓ alimentation des organismes du sol et stimulation des fonctions minéralisatrices et agrégeantes



Vitesse de rotation
du moteur
(activité biologique)



+ ou - rapide



MO stables
« humus »

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

Macro et méso-faune



Biomasse
microbienne



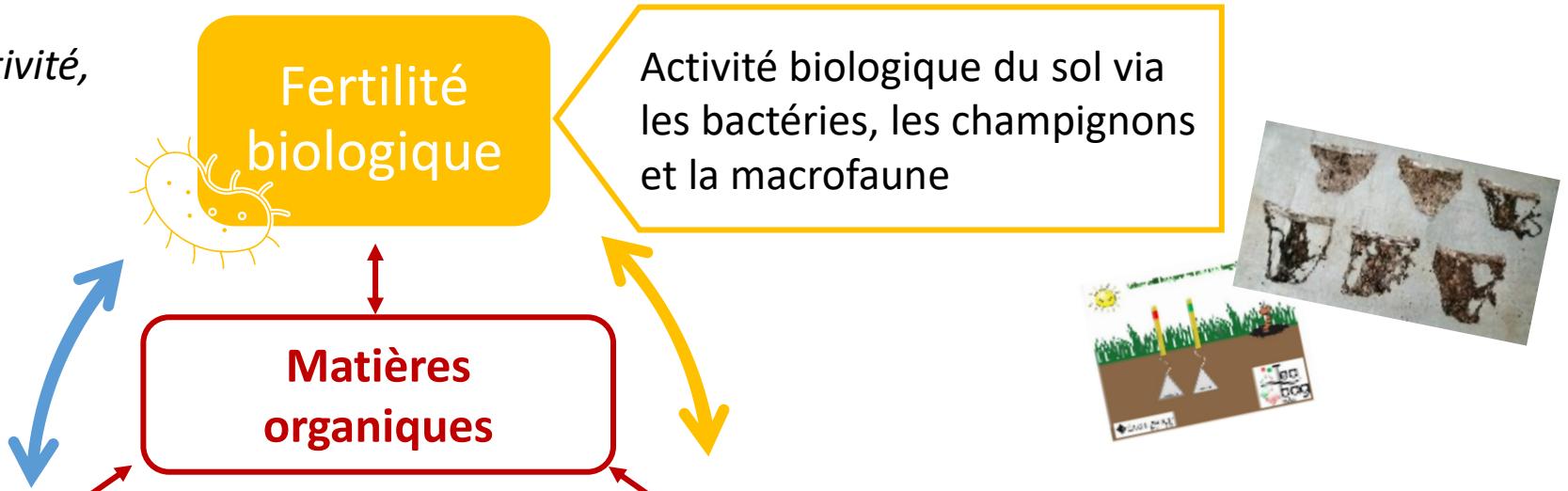
- ✓ alimentation minérale (azote, soufre,...)
- ✓ dégradation des polluants
- ✓ Agrégation, infiltration de l'eau et structure du sol

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



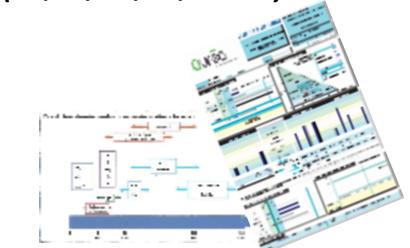
- Etat structural
- Profondeur d'enracinement
- Réserve hydrique
- Conservation de la couche arable (érosion)

Fertilité chimique



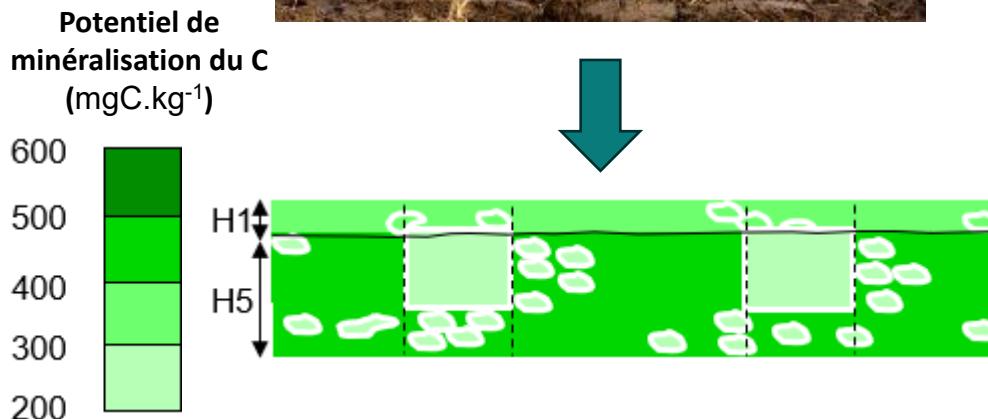
- Disponibilité en éléments minéraux (N, P, K, S, etc.)
- Statut acido-basique
- Capacité d'échange cationique

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



Les composantes de la fertilité sont liées : exemples

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



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

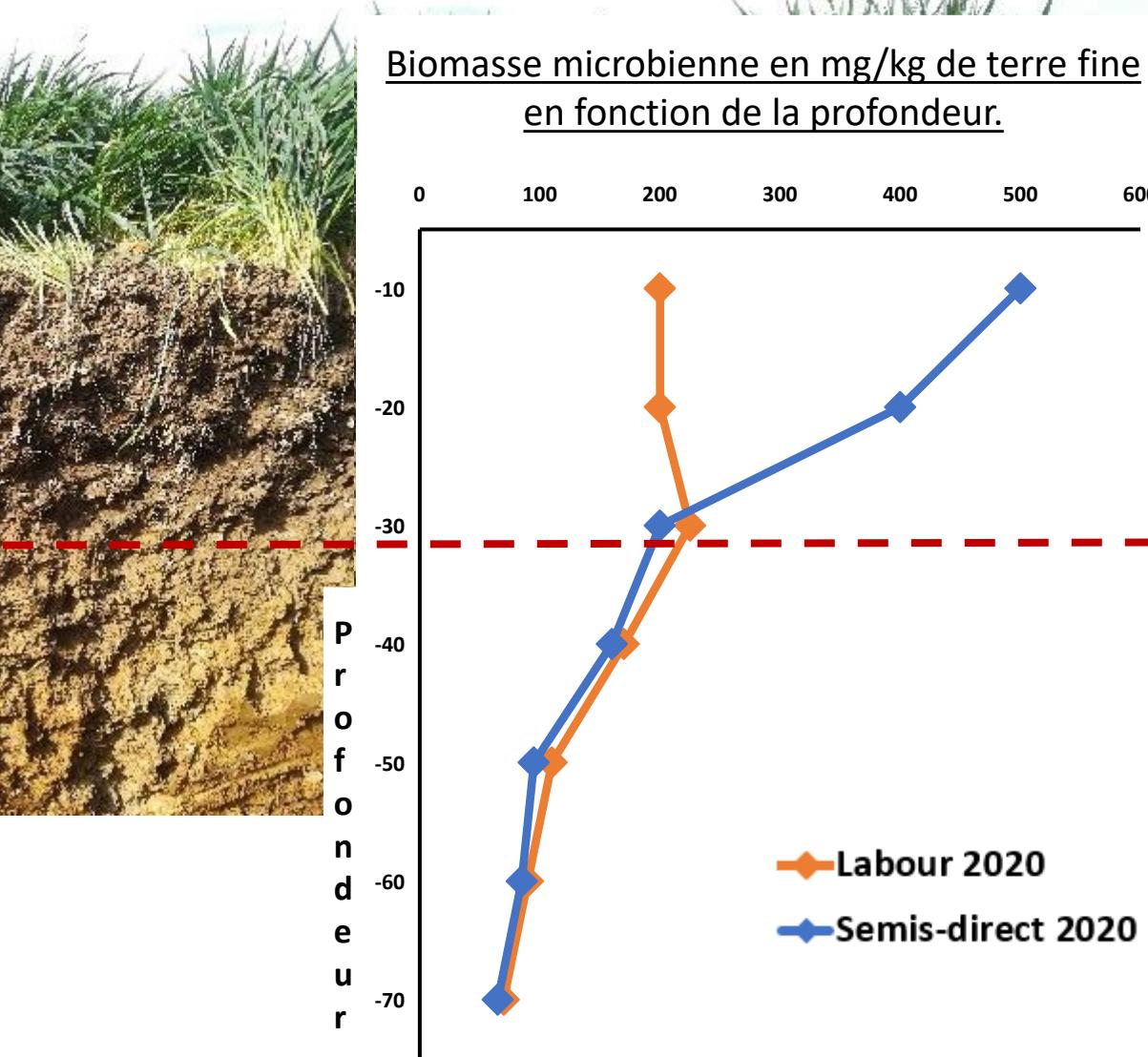
100 t fumier ha⁻¹an⁻¹
CECe = 18 cmolc kg⁻¹
MO = 5,3 % pH eau = 7,8



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



Le fonctionnement biologique est lié à la matière organique



- 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.

Essai Syst'M Arvalis Pusignan (69)

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 ASSOCIÉS DE RECHERCHES
AGRICOLLES
271, AVENUE DE GRANDE-BRETAGNE
31 - TOULOUSE - 31
TELEPHONE : 42 32 37
C. C. P. : LARA 3 912 58

Inscription : _____
Participation aux frais : _____
Date : _____

ANALYSE DE TERRE RÉSULTATS ET CONSEILS

Demandeur : [REDACTED] Réf. : 1269-2110 - 62°/66

Echantillon : François Haute n°8

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	
Limon (0,002 à 0,020 mm) p. 1000	226	
Argile (moins de 0,002 mm) p. 1000	80	Sables limoneux
Caillouté total p. 1000		
Caillouté actif (Méthode Drouot)		
Matière organique p. 1000	35	Normal
pH : eau	6,1	
KCl N	5,2	
Résistivité	5 080	Faible

ANALYSE CHIMIQUE	[en ppm ou mg par kg]	
PHOSPHATES		
Méthode Jeret-Hébert	111	
Méthode Dyr	224	Elevé
SOUFRE	52	
BASSES ÉCHANGEABLES		
Chaux	1 870	Faible
Magnésie	177	Elevé
Potasse	247	Elevé
Soudure	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	•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	•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
	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée (prélèvement) Référentiels des chercheurs
	Diversité moléculaire de la faune du sol	Pas encore abouti
Activité	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée Référentiel ELISOL
	Activité microbienne	Activités enzymatiques (N, C, P, S)
Diversité	Diversité des bactéries et champignons	Diversité taxonomique par séquençage ADN haut débit



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 (1: faible à 3: élevé)	Technique et appareillage (1: laboratoire d'analyse de terre ou 2 : laboratoire spécialisé)	Analyse sur sol : sec/frais	Norme disponible (1: Norme, 2: méthode publiée mais pas de norme, 3: Différentes méthodes)	Degré de maturité
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
Diversité	Bait lamina	Terrain*	1			2	
	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



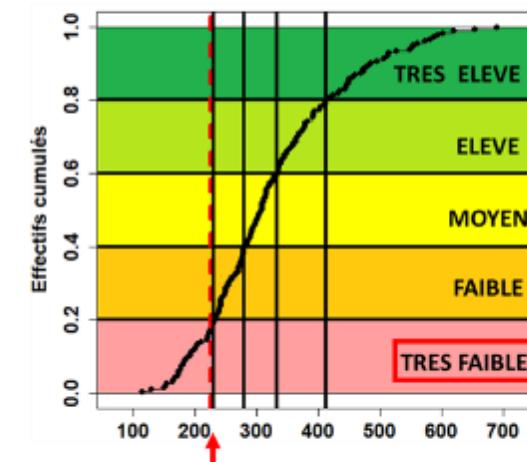
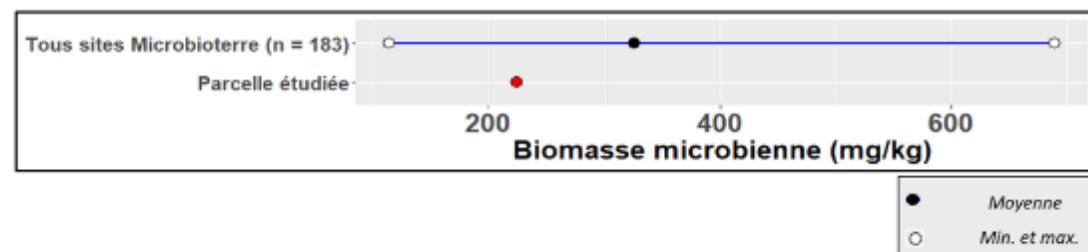
Comment interpréter ces indicateurs ?

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 microbiologique : Biomasse microbienne



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

→ Valeur de biomasse microbienne comprise dans référentiel Microbiterre

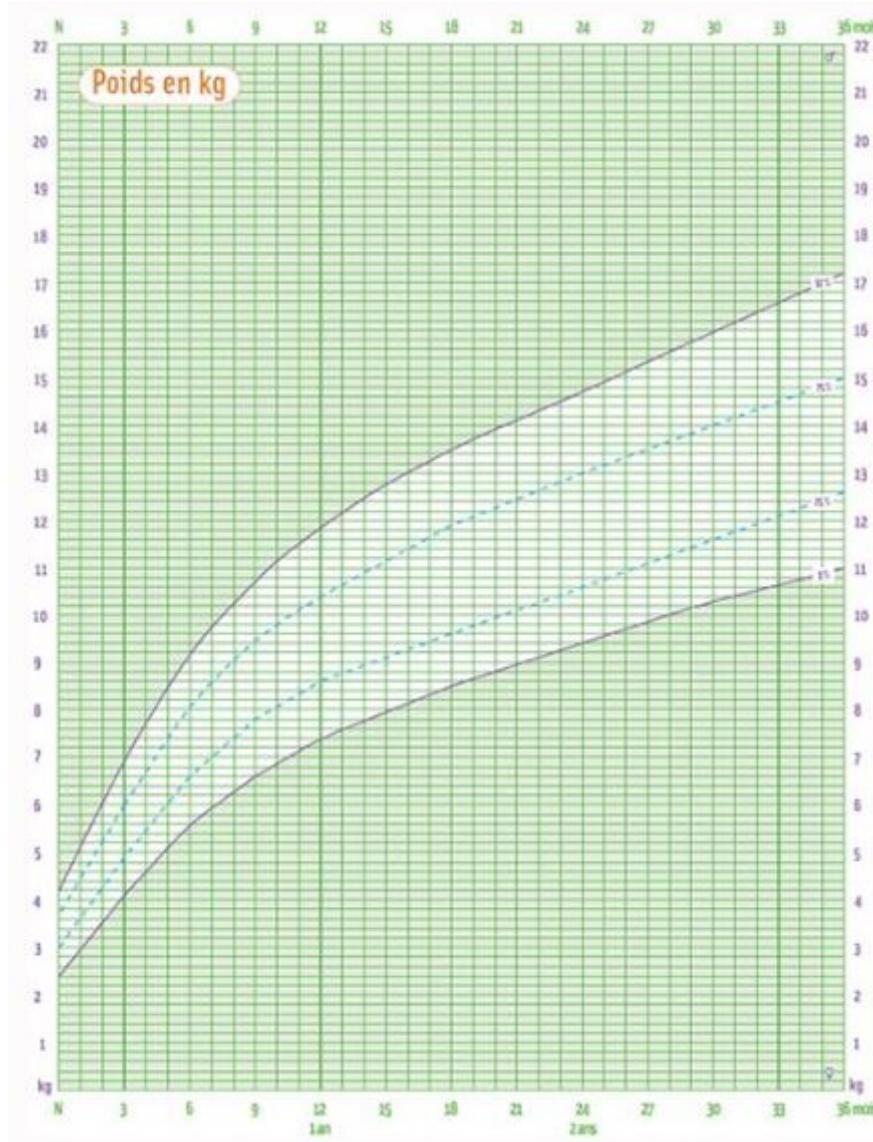
→ Valeur très faible de l'indicateur



Référentiel de positionnement : insuffisant pour diagnostic



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



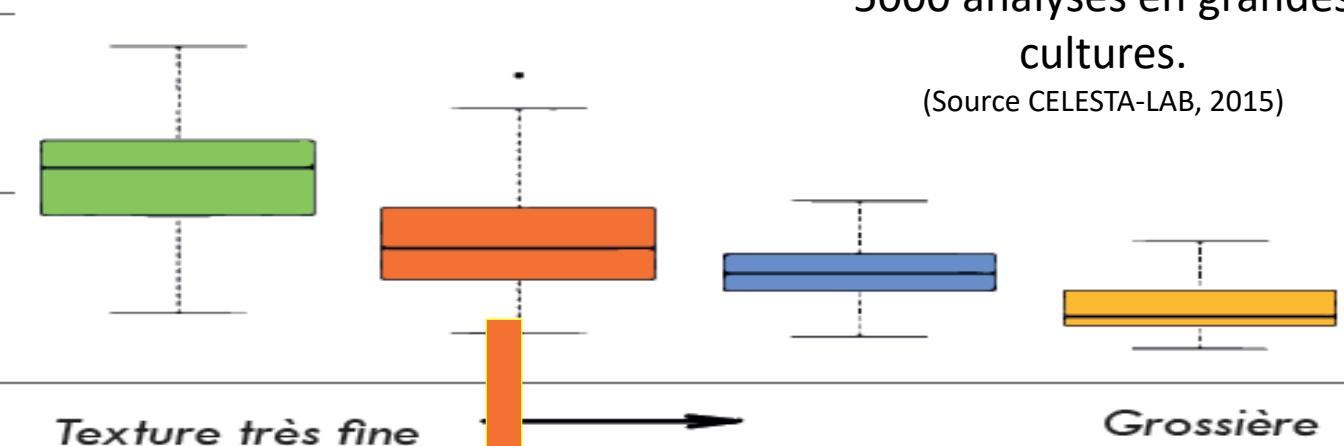
Sommet de l'élevage 2025

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

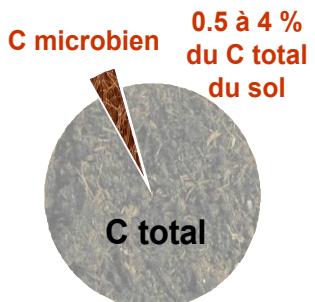
1° Au type de sol

Biomasse microbienne

mg C/g de sol sec

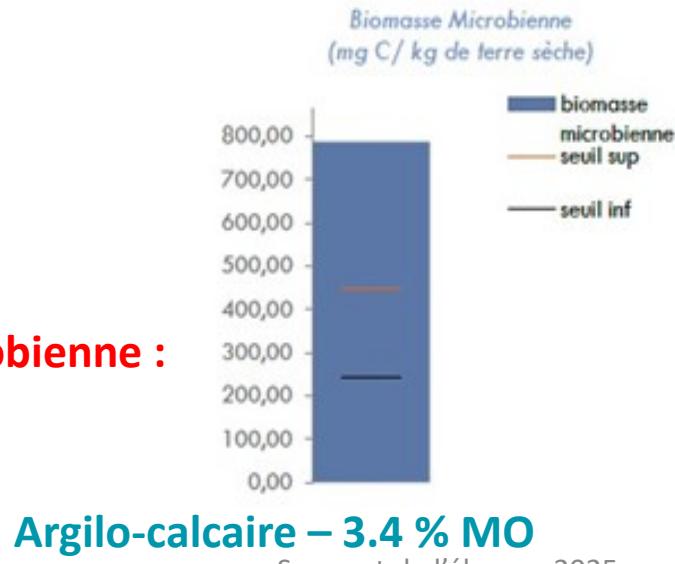


2° Aux pratiques culturales



> 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

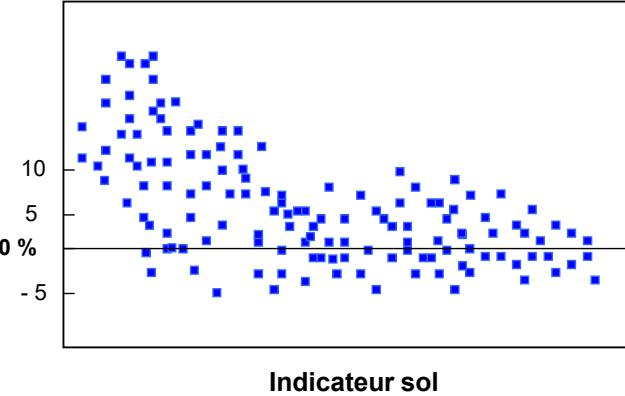
”

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

Indicateur : P Olsen

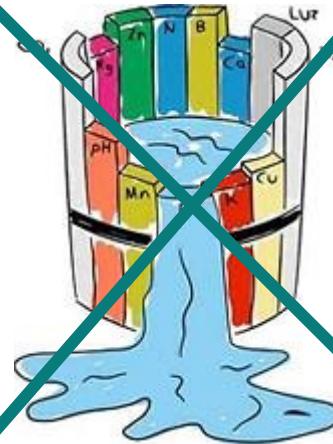


Indice rendement



Teneur
impasse /
Teneur seuil...

Indicateur : Biomasse
microbienne



Pas de lien direct avec productivité !

Transformation du carbone			Structure du sol			
Transformation MO	Perte MO	Augmentation MO	Erosion Battance		Porosité	Stockage eau
Fragmentation	Biodégradation	Minéralisation (CO2)	Stabilisation chimique	Stabilisation physique	Aggrégation (Macro)	Aggrégation (Micro)
		+			+	



Recherche de
valeur
souhaitable
ou « critique »



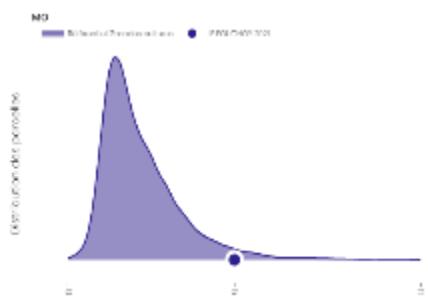
Perspectives : des travaux en cours pour interpréter les paramètres biologiques

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

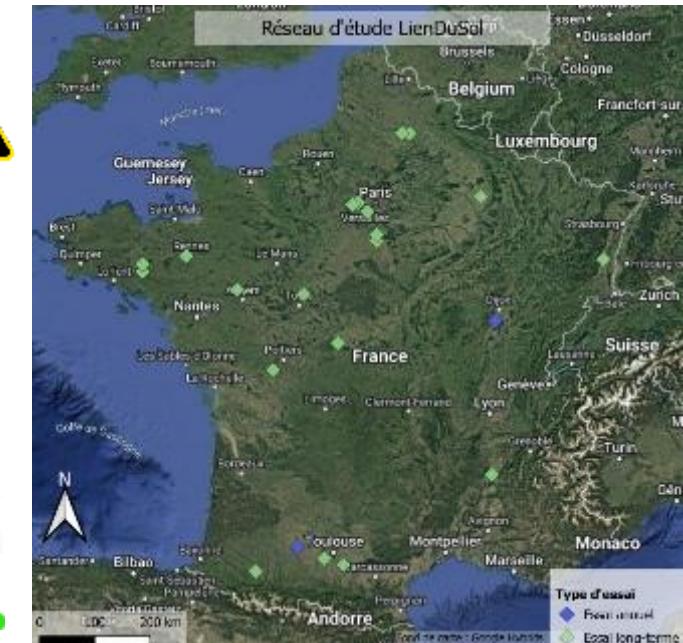
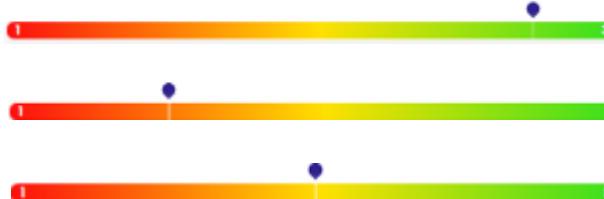
Développement et sélection d'indicateurs



Référentiel descriptif



Diagnostic agronomique et conseil



Avec le soutien du ministère
de l'agriculture, du développement
rural, de l'environnement et du
département de la Charente-Maritime

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE,
DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT

Organismes associés



Labelisé par
BOUCLAGE

Qurea
Agrobiotechnics

Celesta lab
Centre de recherche et de transfert

INRAE
Institut National de la Recherche Agronomique

UniLaSalle
Institut Polytechnique

Terres Inovia
l'agronomie en mouvement

ARVALIS

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 !!!

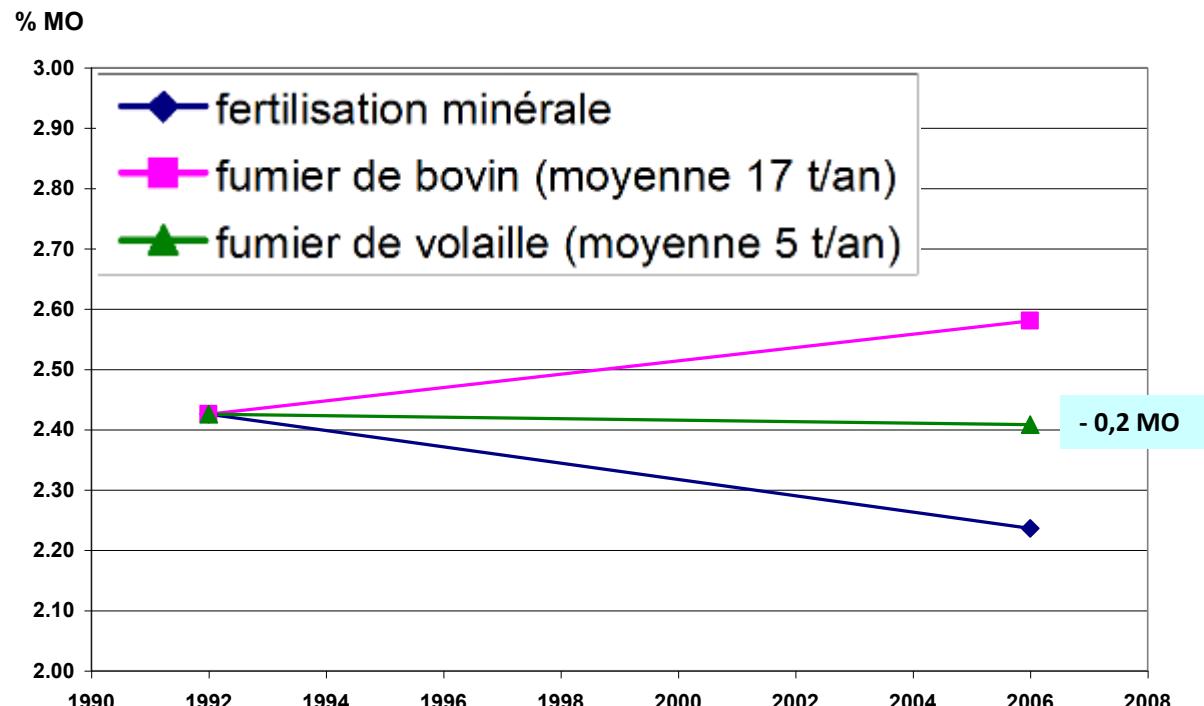


Fonctionnement biologique et pratiques en polyculture-elevage

Atouts et contraintes

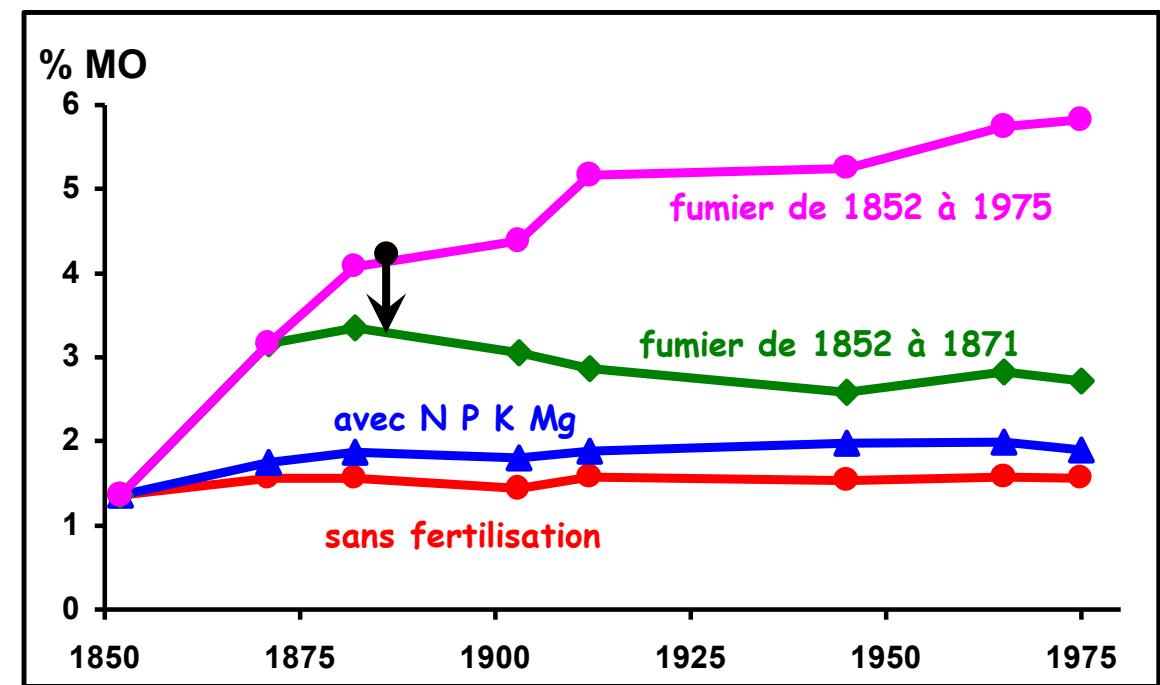
1^{er} atout : gestion des PRO

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



Essai de La Jaillière (44)

Sol brun, limon sur altérite de schiste

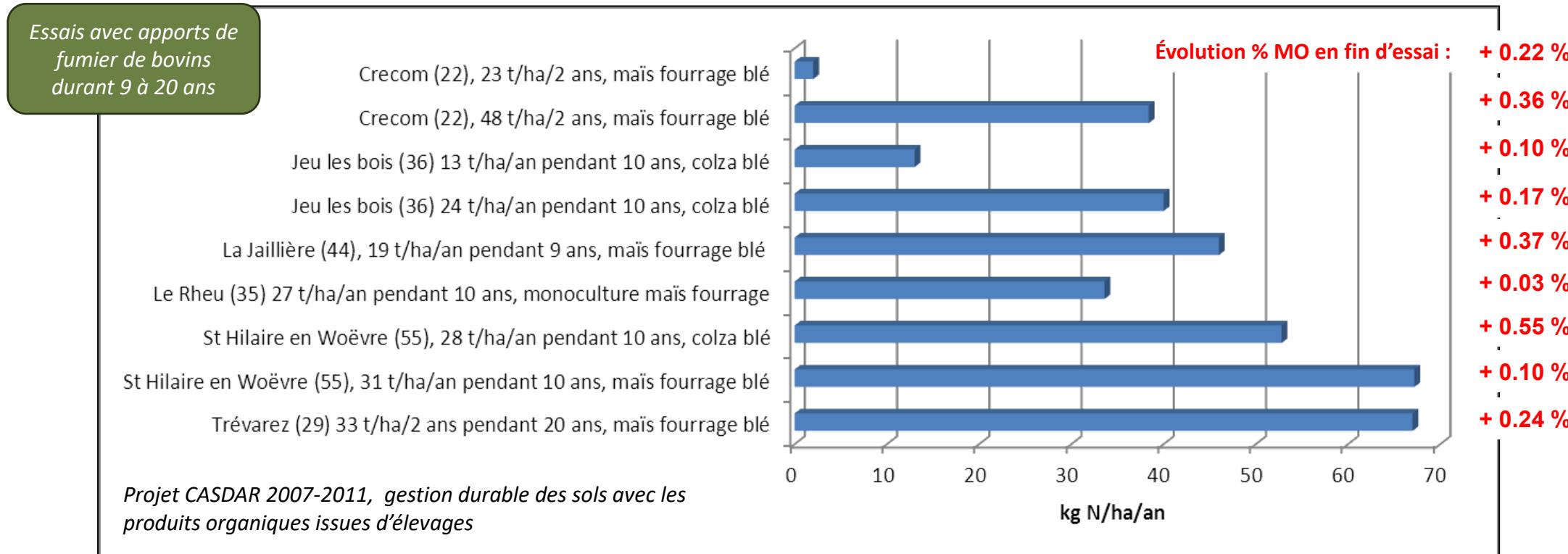


Effet à (très!) long terme

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

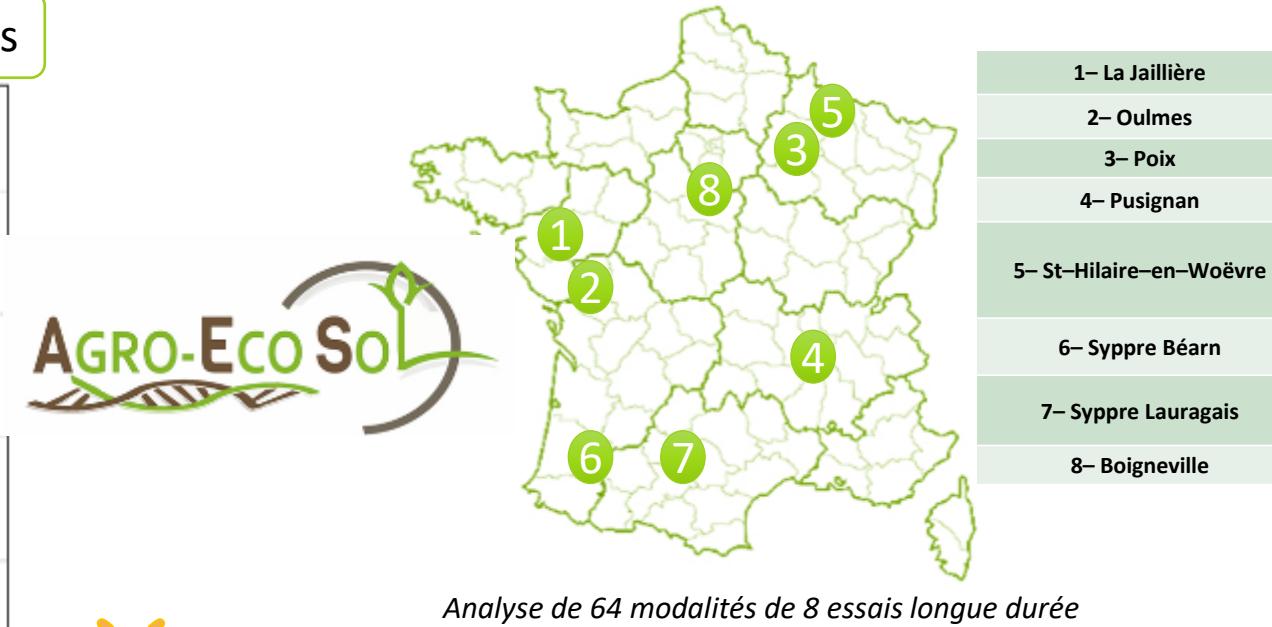
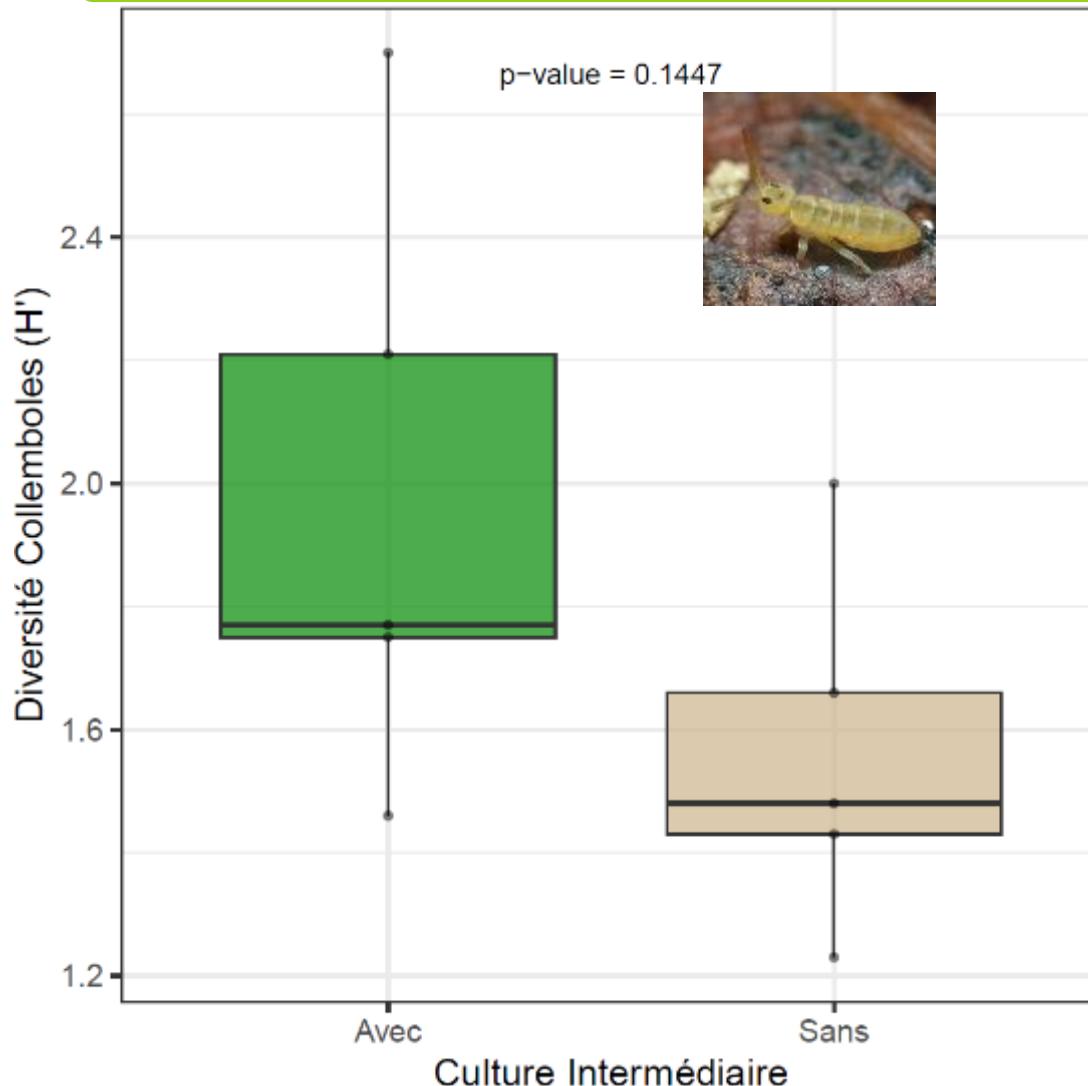


L'apport répété de PRO a pour conséquence :

- 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

2ème atout : les successions culturales

Impact des couverts sur la diversité des collemboles



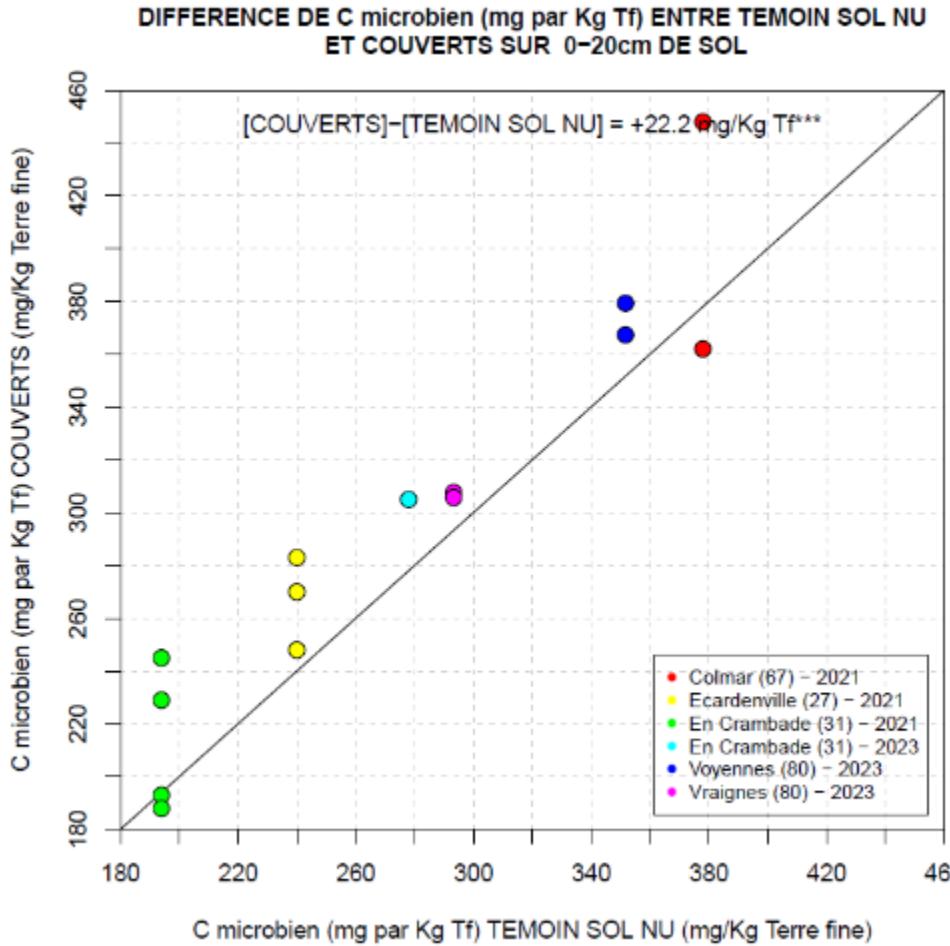
➤ Pas d'impact significatif mais tendance à l'augmentation de la diversité des collemboles en cas de pratique des couverts

Carton-Moreau et al, 2023

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



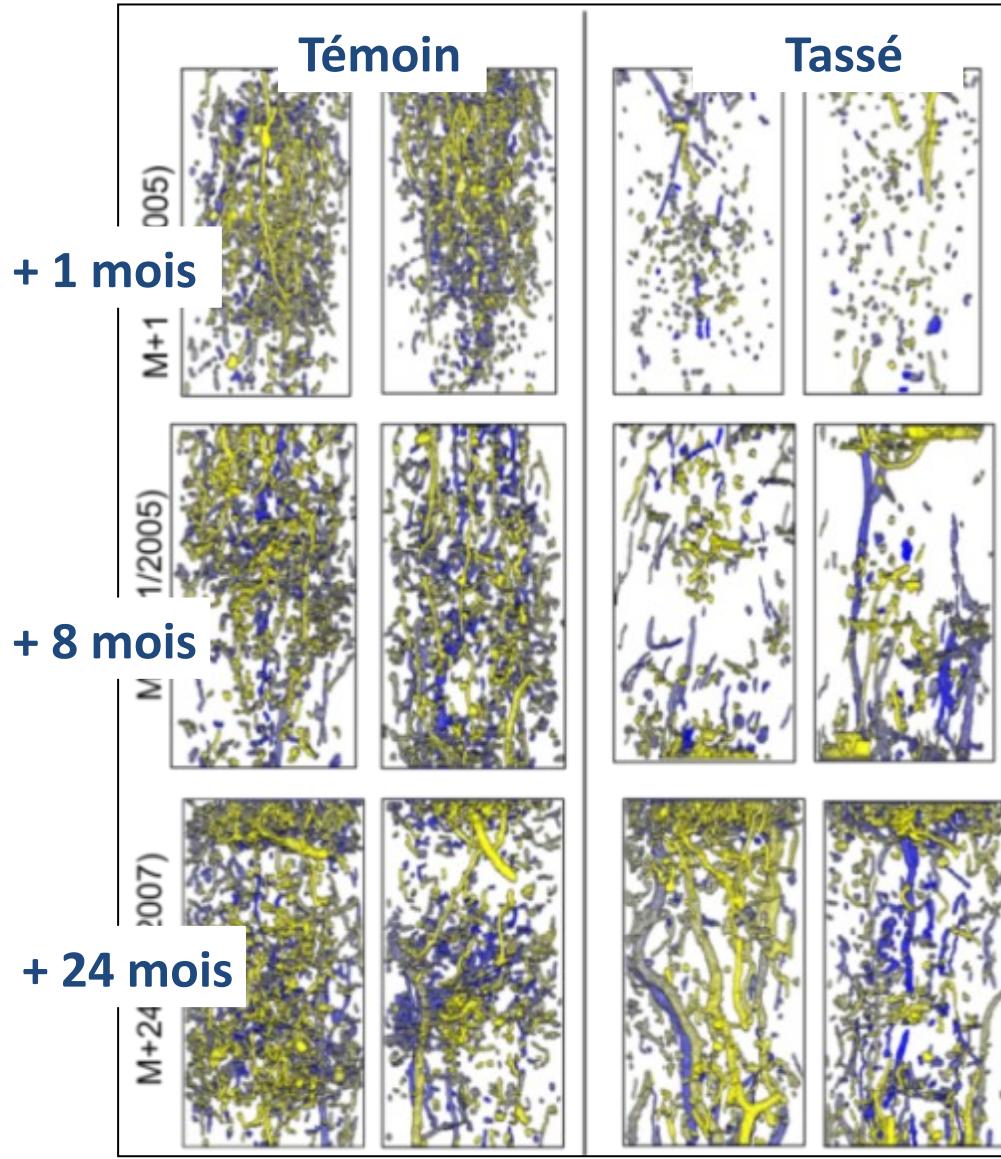
6 essais, 2021-2023



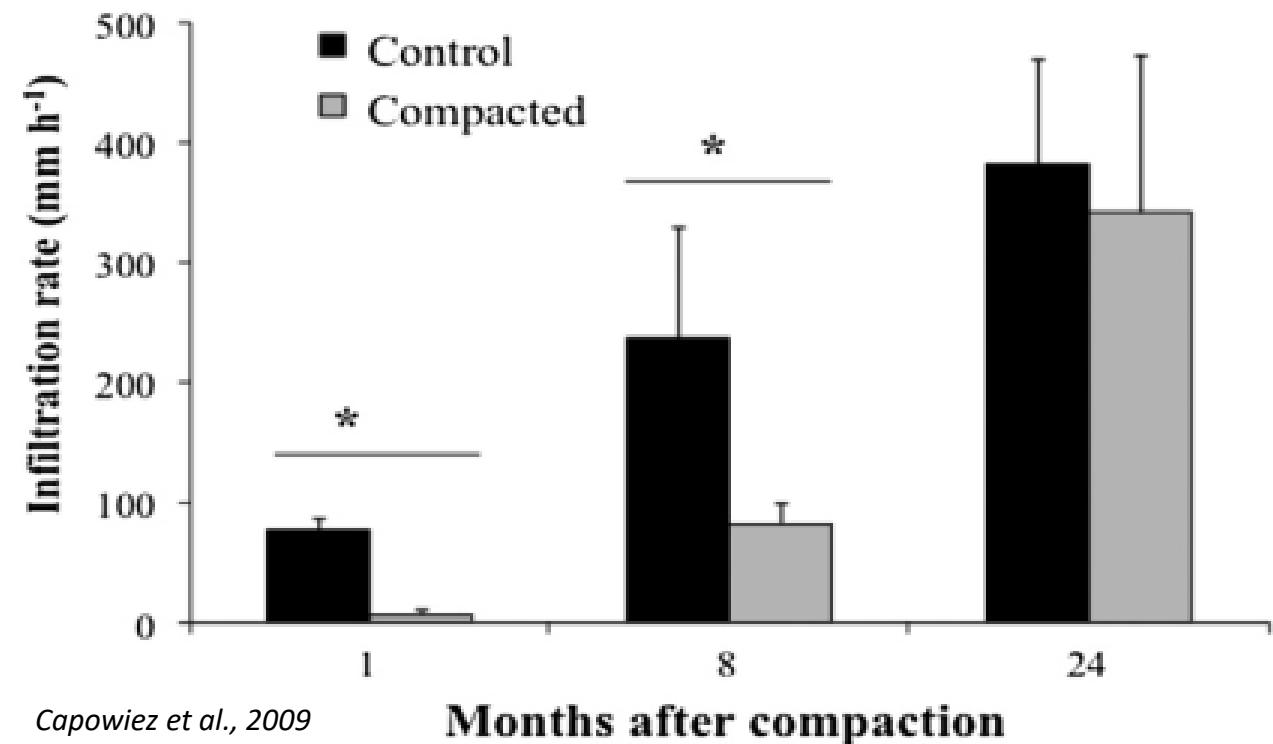
Avoine Pois Vesce (*mélange fourrager avant maïs ensilage*), Saint-Paul-en-Gatine (79)

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., 2012



Capowiez et al., 2009

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

Contraintes : exposition au risque de tassemement



Activité biologique



Fonctionnement hydrique du sol



Implantation et enracinement des cultures



Alimentation hydrique et minérale



Rendement:
Quantité & Qualité

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



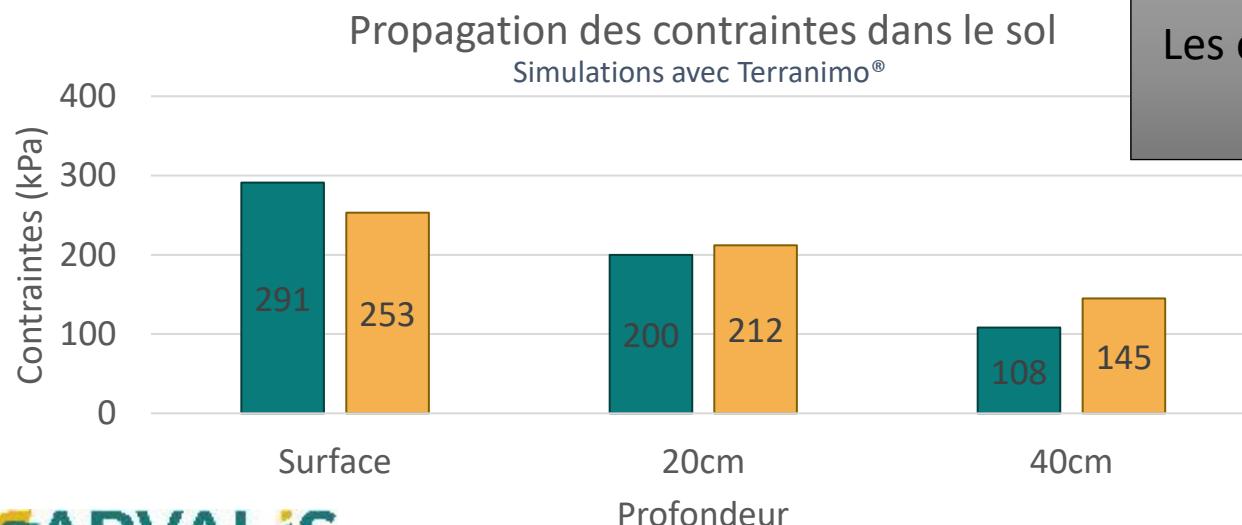
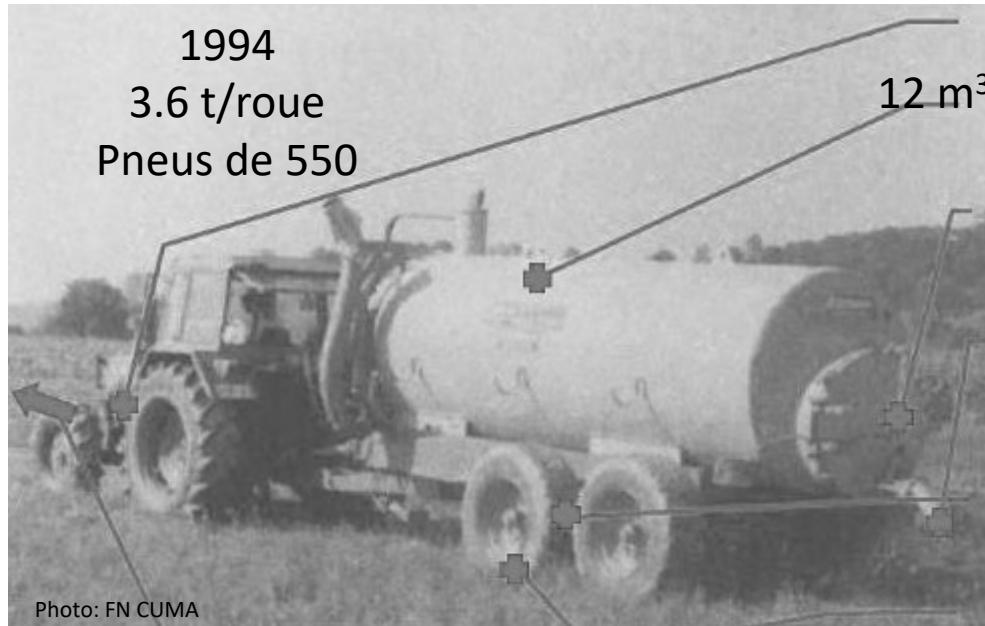
Plus le cycle de la culture est court, plus l'impact du tassemement est important

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

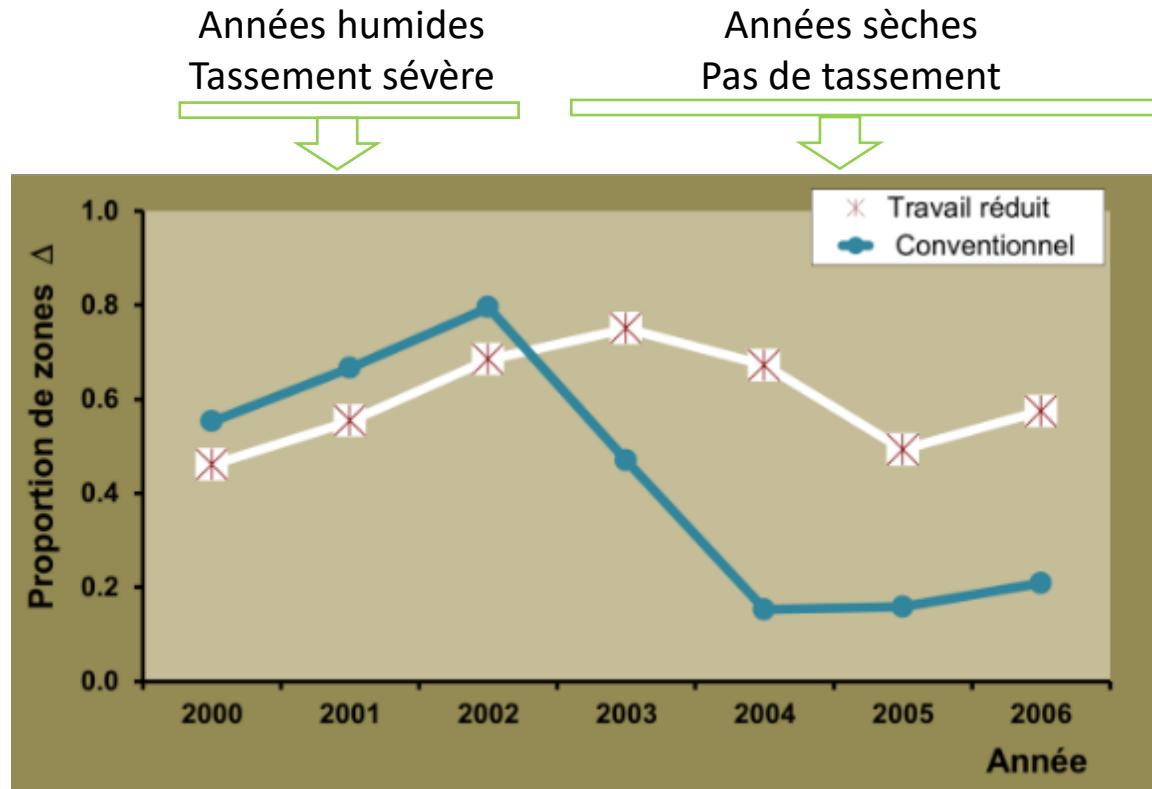


Les contraintes augmentent
en profondeur

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



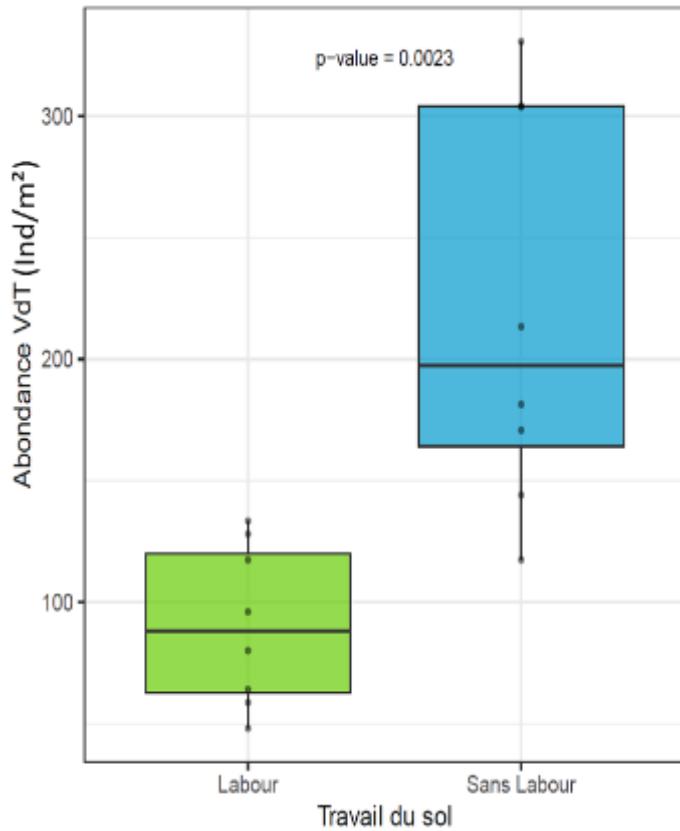
Essai « Systèmes de culture et structure du sol »
INRA Mons
Boizard et al., 2013

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

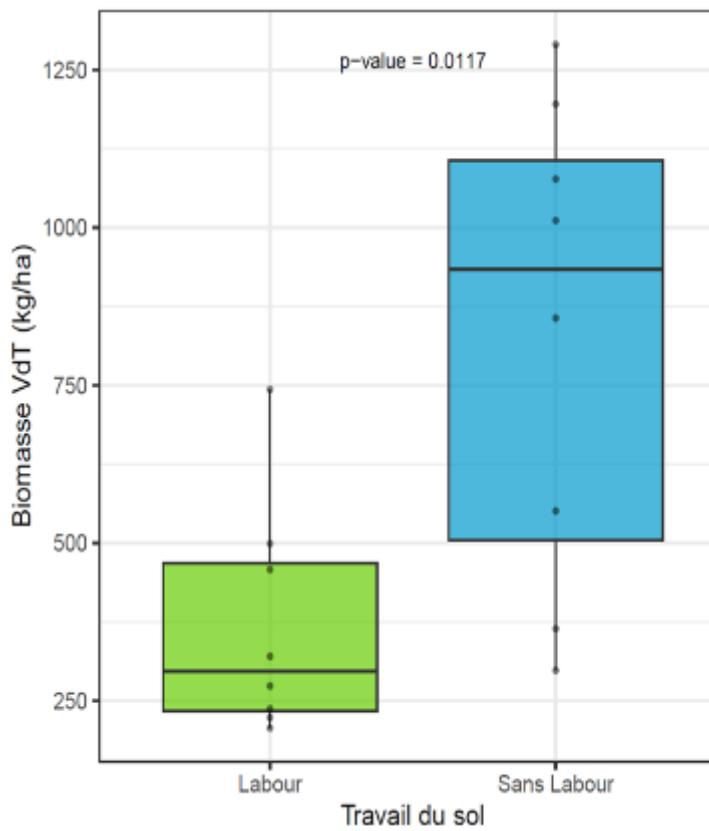
La réduction du travail du sol favorise les vers de terre

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



1 t/ha

0,3 t/ha



Analyse de 64 modalités de 8 essais longue durée



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

Carton-Moreau et al, 2023



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



Vers de terre au repos (juin 2024)

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

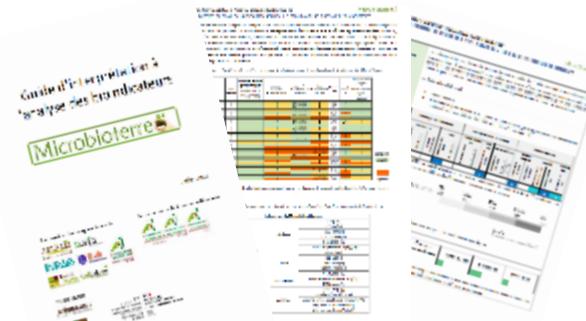
- Analyses maintenant accessibles pour les producteurs (menu \simeq 150-400 €)
- Evaluation complexe vu la grande diversité des organismes vivants du sol et les interdépendances : prendre en compte l'abondance, l'activité et la diversité
- Travaux en cours pour quantifier le lien avec les fonctions du 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



Essai LienDuSol, mars 2025 (21)

Pour en savoir plus...

- Guide d'interprétation Microboterre



- *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)

