

Colloque SOERE-PRO

Rennes, 2 octobre 2024

Changements, interactions et déterminants des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol après l'application répétée de PRO à QualiAgro et PROspective

Résultats de la thèse de Chen (2023)

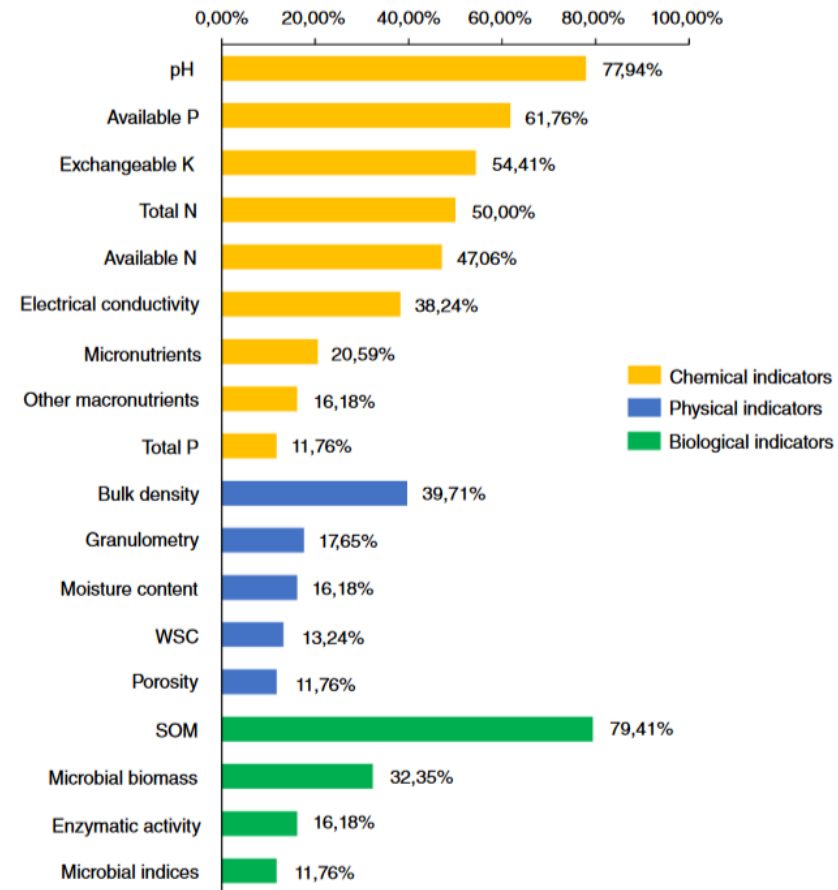
H. Chen, F. Levavasseur, P. Barré, F. Baudin, S. Sadet-Bourgeteau, C. Chauvin, N. Cheviron, C. Mougin, A. Delahaie, S. Menasseri-Aubry, C. Villenave, S. Houot



Introduction

- Nombreuses études existantes documentant les effets des PRO sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols
- Effets globalement positifs

Fréquence d'apparition des propriétés du sol dans la littérature (n=68 articles) (Brichi et al., 2023)

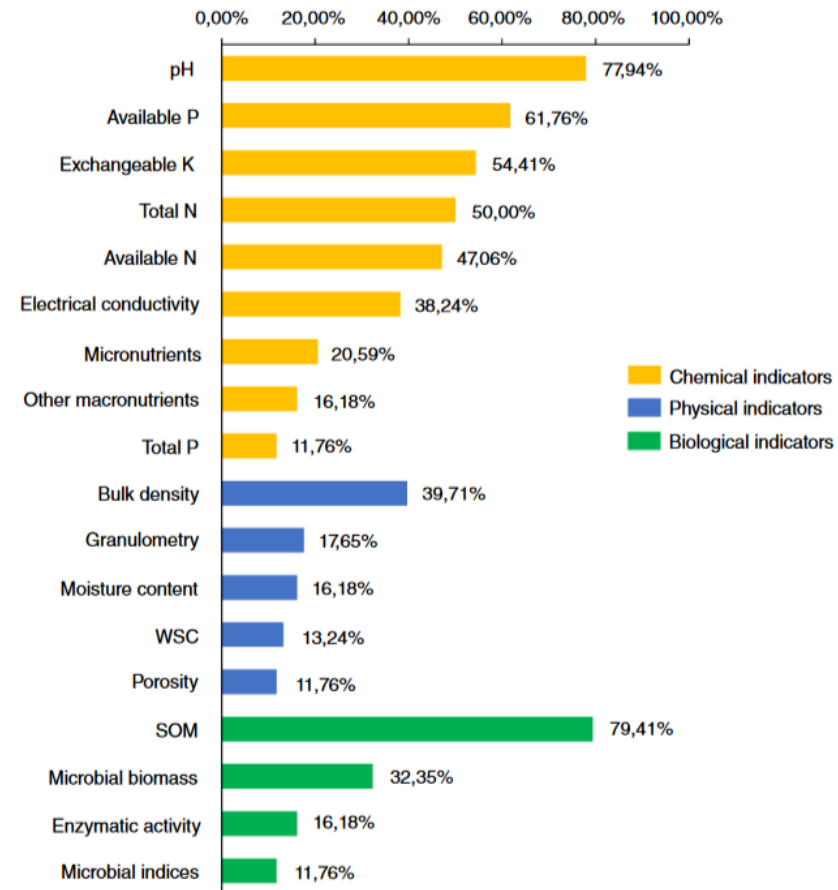


Introduction

- Nombreuses études existantes documentant les effets des PRO sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols
- Effets globalement positifs

Fréquence d'apparition des propriétés du sol dans la littérature (n=68 articles) (Brichi et al., 2023)

- Peu d'études ont comparé les effets de différents PRO à la fois sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques, en les hiérarchisant, à long terme, sur plusieurs sites
- Peu d'études ont étudié les facteurs influençant les changements



Objectif

- Déterminer les changements des propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol après l'application à long terme et répétée de PRO
- Identifier quelles propriétés réagissent principalement aux applications de PRO
- Synthétiser ces changements dans une évaluation globale de la qualité du sol
- Identifier le lien entre les changements de propriétés du sol et les apports de PRO

Sites d'étude et prélèvement - QualiAgro

Site en collaboration



- Feucherolles (78), luvisol, climat océanique altéré
- 4 PRO testés : compost de déchets verts et boue (GWS), compost de déchets verts et biodéchets triés à la source (BIO), compost d'ordures ménagères résiduelles (MSW), fumier bovin (FYM)
- 1998-2013 :
 - Rotation maïs grain-blé, sans couvert
 - Pratiques conventionnelles, labour à 28 cm, résidus exportés (blé)
 - Sous-essai N+: PRO / sans PRO + fertilisation N minérale optimale
 - Sous-essai N-: PRO / sans PRO + fertilisation N minérale minimale
 - Dose de PRO : 4 t C/ha, tous les deux ans, été avant maïs
- 2014-... :
 - Pratiques « AB », labour à 28 cm, résidus enfouis, engrais organique si besoin
 - Sous-essai PRO (N+) : rotation maïs + céréales, PRO/sans PRO, dose : 2 t C/ha
 - Sous-essai LEG (N-) : rotation maïs/légumineuses + céréales, arrêt des PRO
- Prélèvement de sol (0-28 cm) en 2018 dans le cadre du projet Ademe PROTERR
- Après 20 ans d'essai et 11 épandages, ≈ 6 mois après le dernier épandage



Sites d'étude et prélèvement - PROspective

- Colmar (68), calcisol, climat semicontinental
- 5 PRO testés : boue d'épuration (SLU), compost de déchets verts et boue (GWS), compost de déchets verts et biodéchets triés à la source (BIO), fumier bovin (FYM), fumier bovin composté (FYMC)
- Rotation maïs grain-blé-betterave sucrière-orge de printemps, + couvert depuis 2014
- Pratiques conventionnelles, labour à 28 cm, résidus enfouis
- 2000-2013 :
 - Sous-essai N+: PRO / sans PRO + fertilisation N minérale optimale
 - Sous-essai N-: PRO / sans PRO, sans complément
 - Dose de PRO : 170 kg N/ha, tous les deux ans avant maïs / betterave
- 2014-... :
 - Sous-essai N+ : pas de changement
 - Sous-essai N- : augmentation de la dose de PRO + application de digestats de biodéchets dans tous les traitements si besoin pour atteindre une fourniture optimale de N
- Prélèvement de sol (0-28 cm) en 2018 dans le cadre du projet Ademe PROTERR
- Après 18 ans d'essai et 9 épandages, ≈ 11 mois après le dernier épandage



Méthodes - propriétés analysées

Groupe	Propriétés	Responsable <i>(référence)</i>
Physico-chimique	C total (TC), N total (TN), C/N, pH, CEC, K échangeable (EK), Olsen P (AP)	LAS
Physique	Stabilité structurale, diamètre moyen pondéré (MWD) des agrégats après humectation rapide (FW), réhumectation lente (WS), désagrégation mécanique (MB)	UMR SAS <i>(Le Bissonais, 1996)</i>
Stabilité de la MO	C stable / actif, proportion C stable (SC.ratio) (Rock-Eval + CpSOC modèle)	Laboratoire de géologie <i>(Cécillon et al., 2021)</i>
Activités enzymatiques	Phosphatase (PHOS), Arylamidase (ARN), β -glucosidase (GLU), Arylsulfatase (ARS), Urease (URE), indice de diversité (Shannon.Enzy, Simpson.Enzy)	Biochemenv <i>(Cheviron et al., 2021)</i>
Nématodes	Abondances des bactérivores (BFN), fongivores (FFN), phytophages (PFN), omnivores-carnivores (OPN), indice de structure (SI), indice d'enrichissement (EI), Nematode channel ratio (NCR), plant parasit index (PPI), indice de maturité (MI), diversité (shannon.nat)	ELISOL <i>(Yeates et al., 1993)</i>
Micro-organismes	Biomasse microbienne (SMB), richesse bactérienne (Ri.Ba) et fongique (Ri.Fu), diversité bactérienne (Sha.Ba) et fongique (Sha.Fu), régularité bactérienne (Evenness.Ba) et fongique (Evenness.Fun)	UMR Agroécologie <i>(Terrat et al., 2012)</i>
Éléments traces métalliques	Zn, Pb, Ni, Cu, Cd, Cr extractibles à l'EDTA	LAS <i>(Quevauviller, 1998)</i>

Méthodes – traitement de données

- ANOVA pour tester la significativité des changements

Méthodes – traitement de données

- ANOVA pour tester la significativité des changements
- Construction d'un indice de qualité des sols (*Raiesi, 2017*)
 - ACP avec toutes les variables
 - Sélection d'un jeu de variables minimales
 - « Scoring » de chaque variable (normalisation entre 0 et 1)
 - Pondération et construction d'un indice de qualité des sols

Méthodes – traitement de données

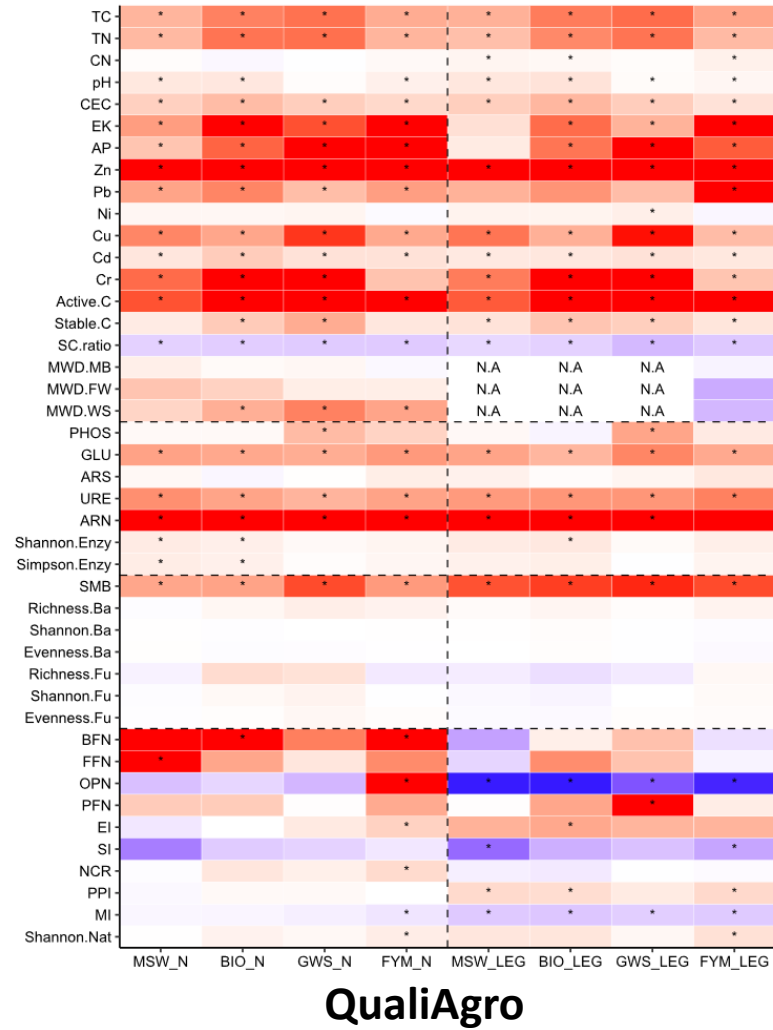
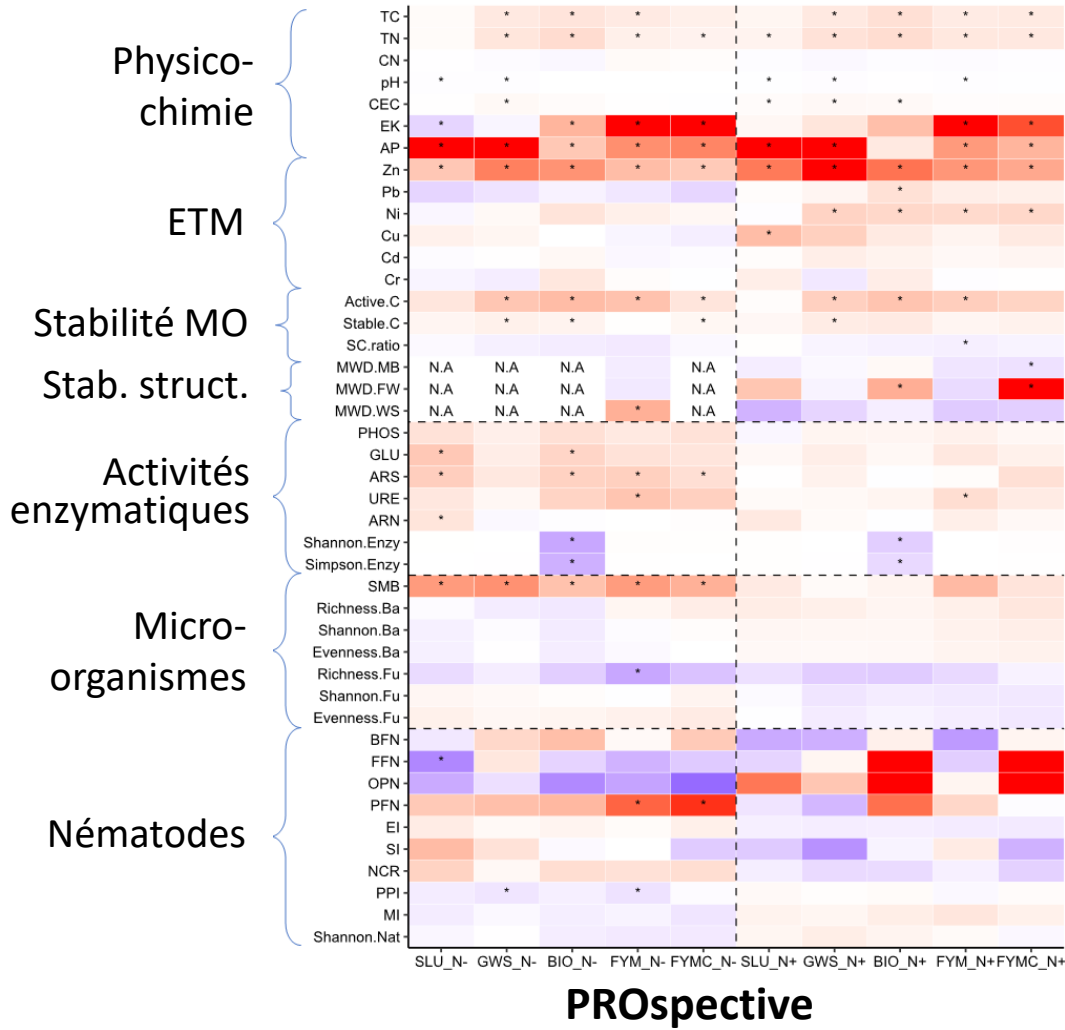
- ANOVA pour tester la significativité des changements
- Construction d'un indice de qualité des sols (*Raiesi, 2017*)
 - ACP avec toutes les variables
 - Sélection d'un jeu de variables minimales
 - « Scoring » de chaque variable (normalisation entre 0 et 1)
 - Pondération et construction d'un indice de qualité des sols
- Recherche des variables explicatives des changements
 - Generalized Boosted Regression Model (GBM) (*Friedman, 2001*)
 - Variable explicative testée : $\Delta C_{balance}$, $\Delta N_{balance}$, $\Delta P_{balance}$, $\Delta K_{balance}$

$$\Delta C(NPK)_{balance} = C(NPK)_{balance\ PRO} - C(NPK)_{balance\ contrôle}$$

$$C_{balance} = C_{PRO} + C_{résidus}$$

$$N(PK)_{balance} = N(PK)_{appliqué} - N(PK)_{exporté}$$

Aperçu global des changements



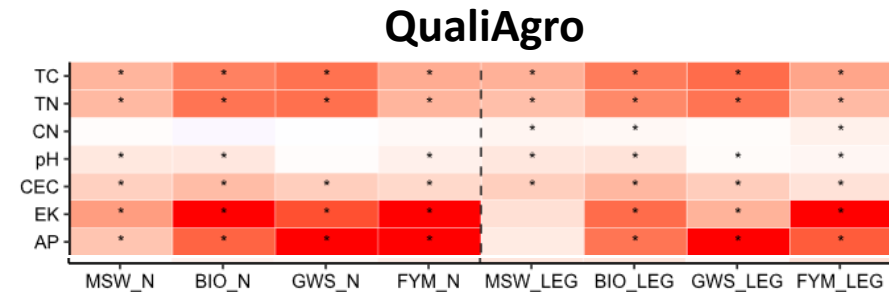
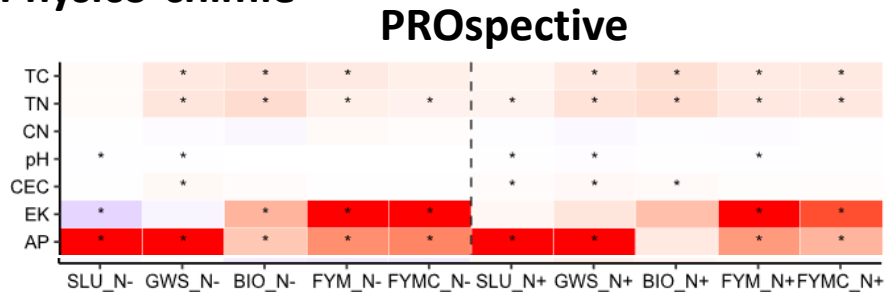
-100 -50 0 50 100

Changement relativement au contrôle (%)

* Changement significatif

Aperçu détaillé des changements (1)

Physico-chimie



- Teneur en C, N, P et K échangeables, pH et CEC augmentent dans presque tous les traitements, + significativement à QualiAgro

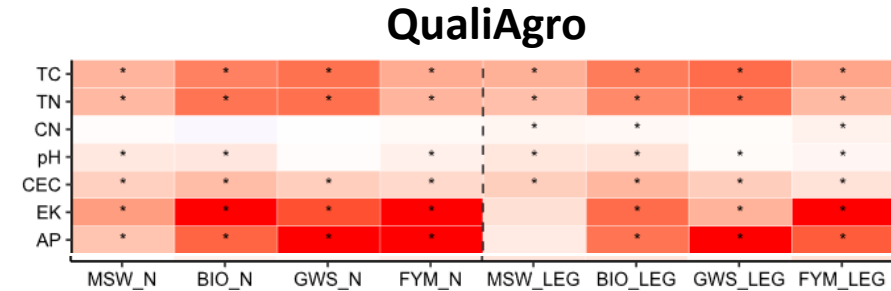
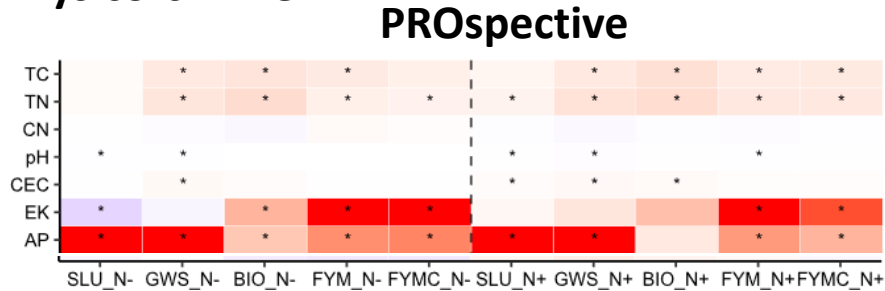
-100 -50 0 50 100

Changement relativement au contrôle (%)

* Changement significatif

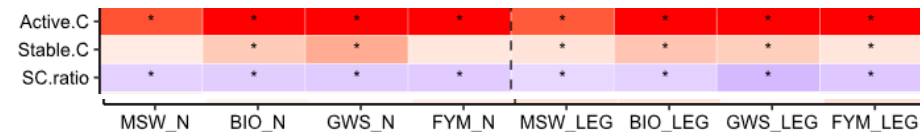
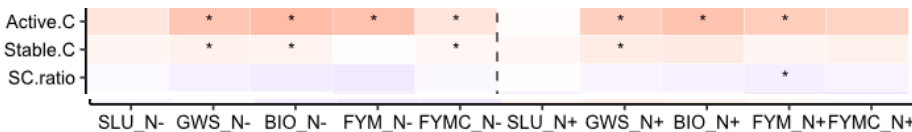
Aperçu détaillé des changements (1)

Physico-chimie



- Teneur en C, N, P et K échangeables, pH et CEC augmentent dans presque tous les traitements, + significativement à QualiAgro

Stabilité de la matière organique



- Principalement la teneur en C actif qui \nearrow , proportion C stable \searrow , + significatif à QualiAgro

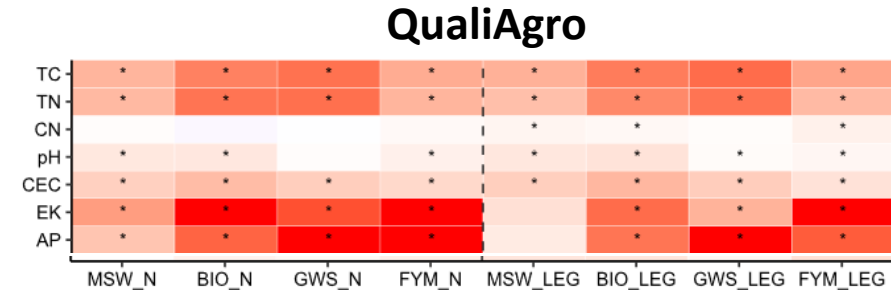
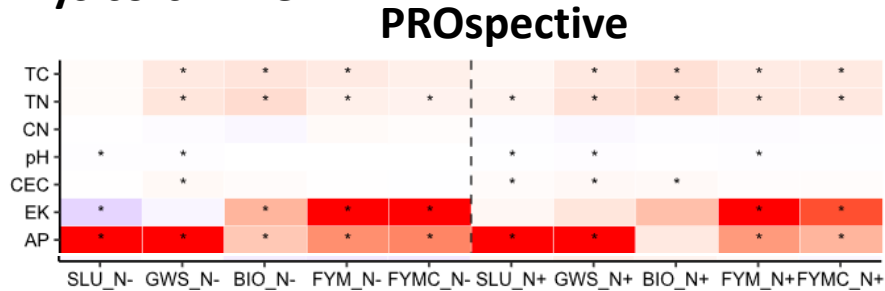
-100 -50 0 50 100

Changement relativement au contrôle (%)

* Changement significatif

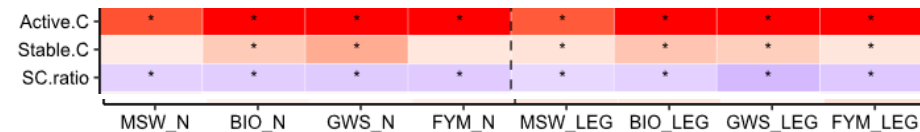
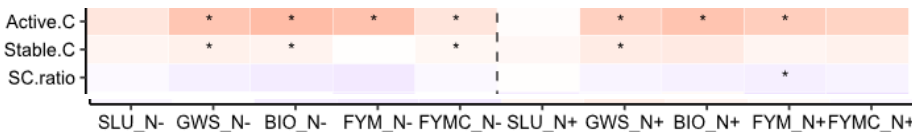
Aperçu détaillé des changements (1)

Physico-chimie



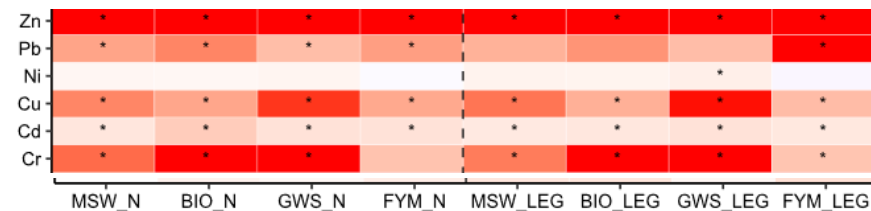
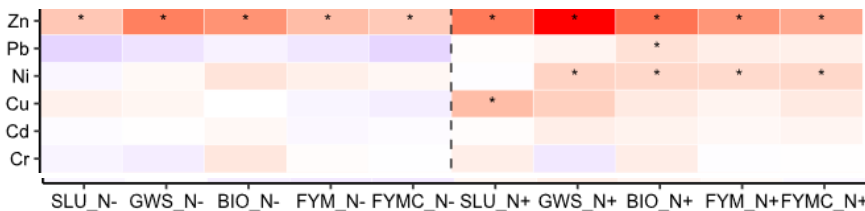
- Teneur en C, N, P et K échangeables, pH et CEC augmentent dans presque tous les traitements, + significativement à QualiAgro

Stabilité de la matière organique



- Principalement la teneur en C actif qui \nearrow , proportion C stable \searrow , + significatif à QualiAgro

ETM extractibles EDTA



- Teneur de la plupart des ETM_{EDTA} \nearrow significativement à QualiAgro, seulement Zn à Colmar

-100 -50 0 50 100

Changement relativement au contrôle (%)

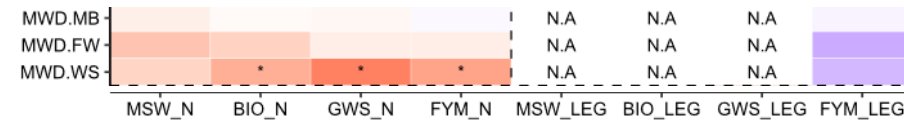
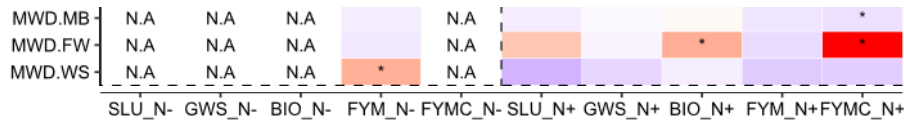
* Changement significatif

Aperçu détaillé des changements (2)

PROspective

QualiAgro

Stabilité structurale



- Augmentation significative de la stabilité des agrégats WS à Qualiagro

-100 -50 0 50 100



Changement relativement au contrôle (%)

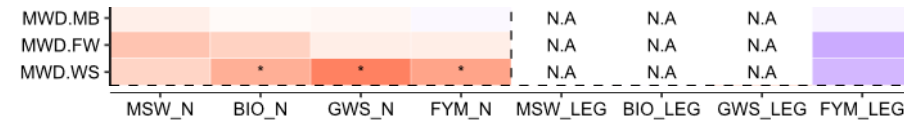
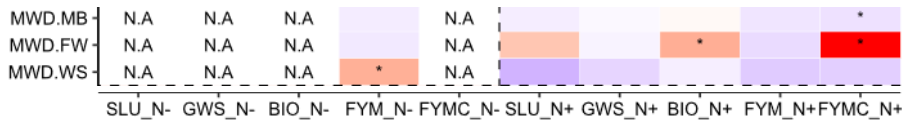
* Changement significatif

Aperçu détaillé des changements (2)

PROspective

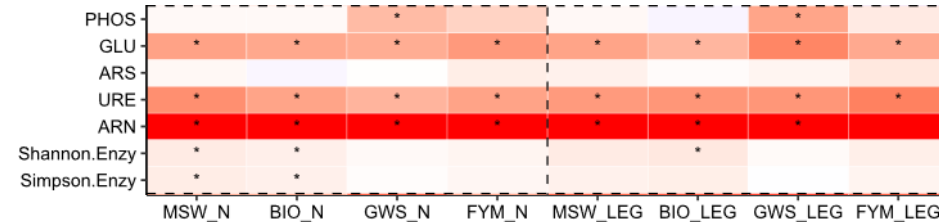
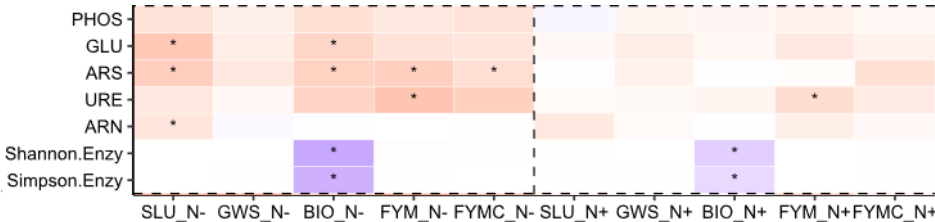
QualiAgro

Stabilité structurale



- Augmentation significative de la stabilité des agrégats WS à Qualiagro

Activités enzymatiques



- Augmentation significative des activités liées aux cycles du C et du N, surtout à QualiAgro
- Peu d'effet sur les activités liées aux cycles du P et du S (sauf S sur essai N- Colmar)
- Peu d'influence sur les indices de diversité

-100 -50 0 50 100

Changeement relativement au contrôle (%)

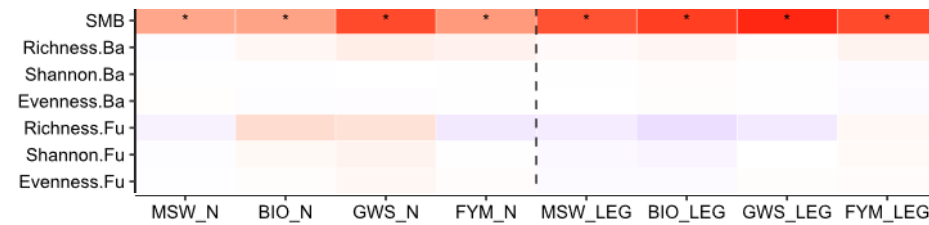
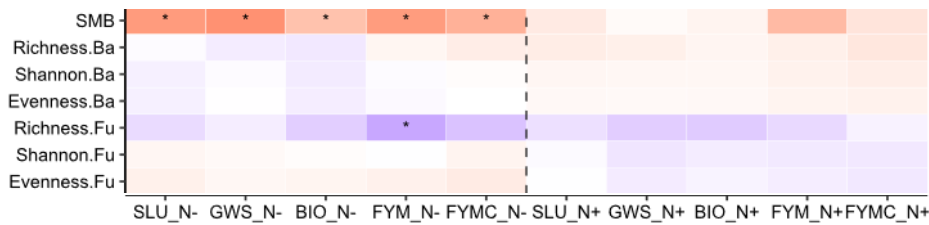
* Changement significatif

Aperçu détaillé des changements (3)

PROspective

QualiAgro

Biomasse microbienne



- Augmentation significative de la biomasse microbienne dans tous les traitements de QualiAgro, dans les traitements N- de PROspective (dose plus élevée de PRO)
- Pas d'effet sur les indices de diversité

-100 -50 0 50 100



Changement relativement au contrôle (%)

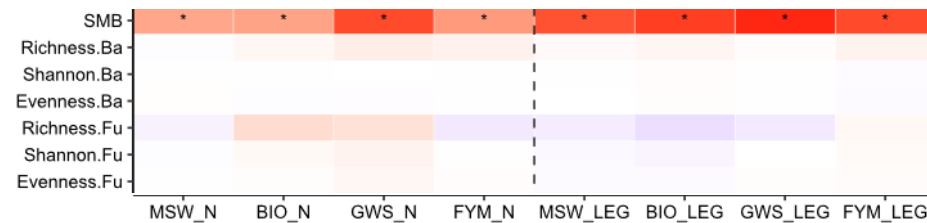
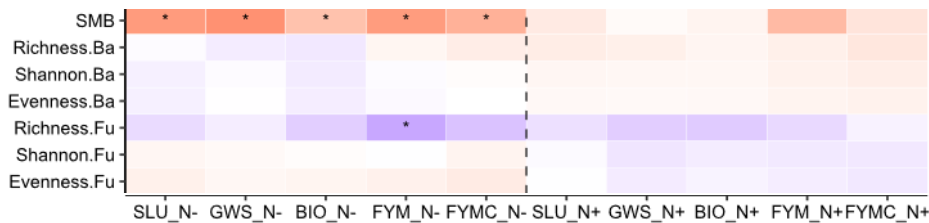
* Changement significatif

Aperçu détaillé des changements (3)

PROspective

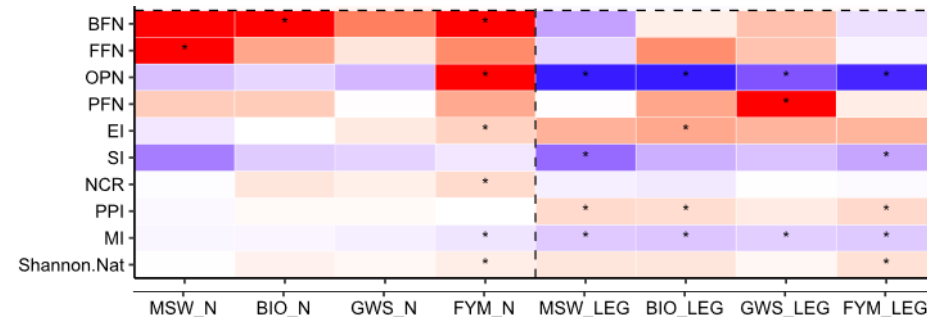
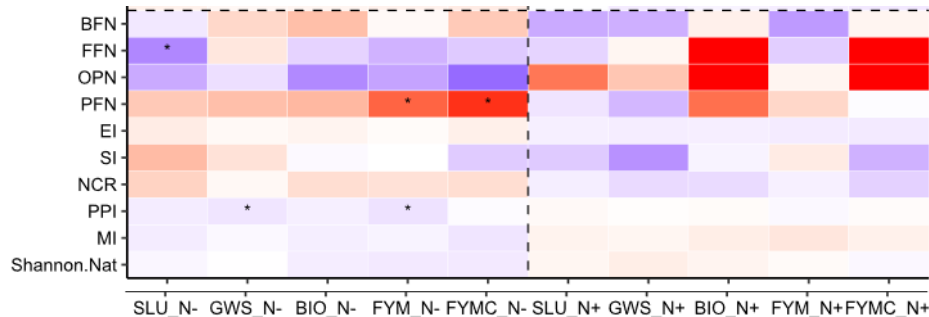
QualiAgro

Biomasse microbienne



- Augmentation significative de la biomasse microbienne dans tous les traitements de QualiAgro, dans les traitements N- de PROspective (dose plus élevée de PRO)
- Pas d'effet sur les indices de diversité

Nématodes



- Résultats variables selon le site, le type de MO, et l'indicateur utilisé
- Tendance à l'augmentation des bactérivores (+/- significatif à QualiAgro)

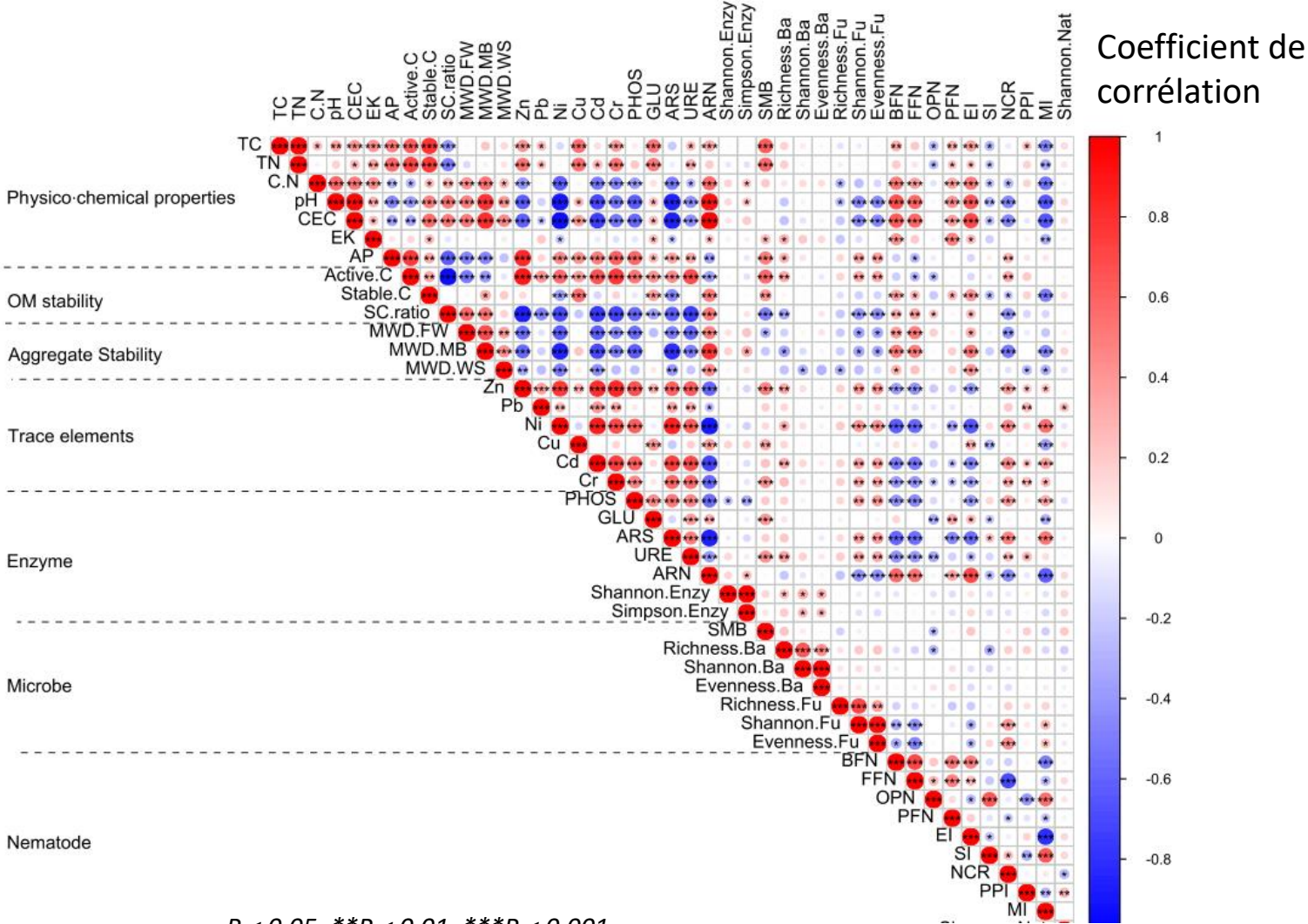
-100 -50 0 50 100

Changement relativement au contrôle (%)

* Changement significatif

Corrélations entre changements

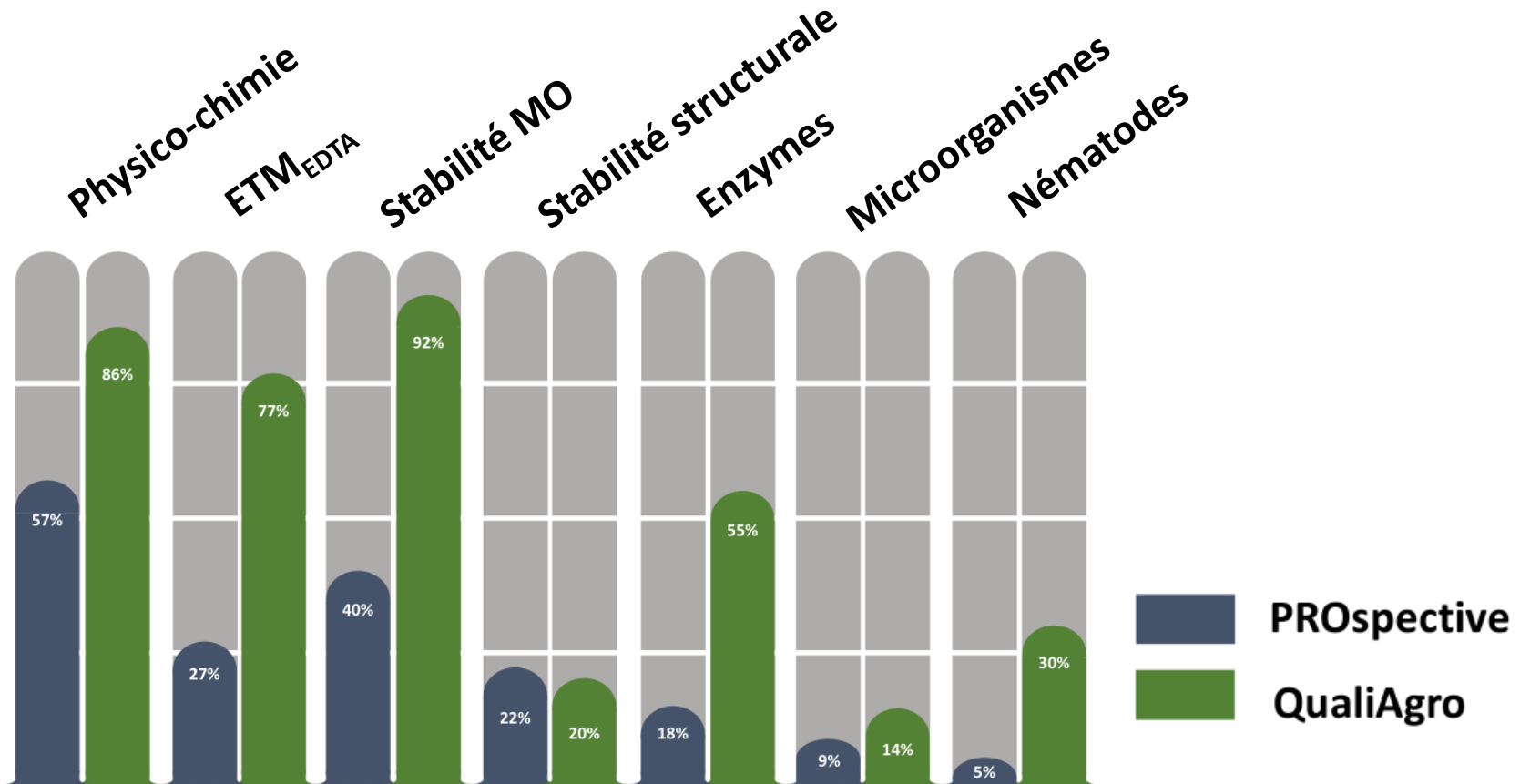
- La plupart des propriétés corrélées entre elles, hormis les indicateurs biologiques de diversité



$P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.001$

Synthèse des changements significatifs

- Plus de changements significatifs à QualiAgro qu'à PROspective
- Plus de changements sur la physico-chimie



Proportion de changements significatifs entre traitements PRO et le contrôle

Indice de qualité du sol

- Propriétés retenues dans l'indicateur de qualité de sols : N_{tot} , $K_{\text{éch}}$, Ni_{EDTA} ,
 $Nematode_{\text{Shannon}}$, $Enzyme_{\text{Shannon}}$



Seulement une valeur statistique, pas de sens physique/biologique

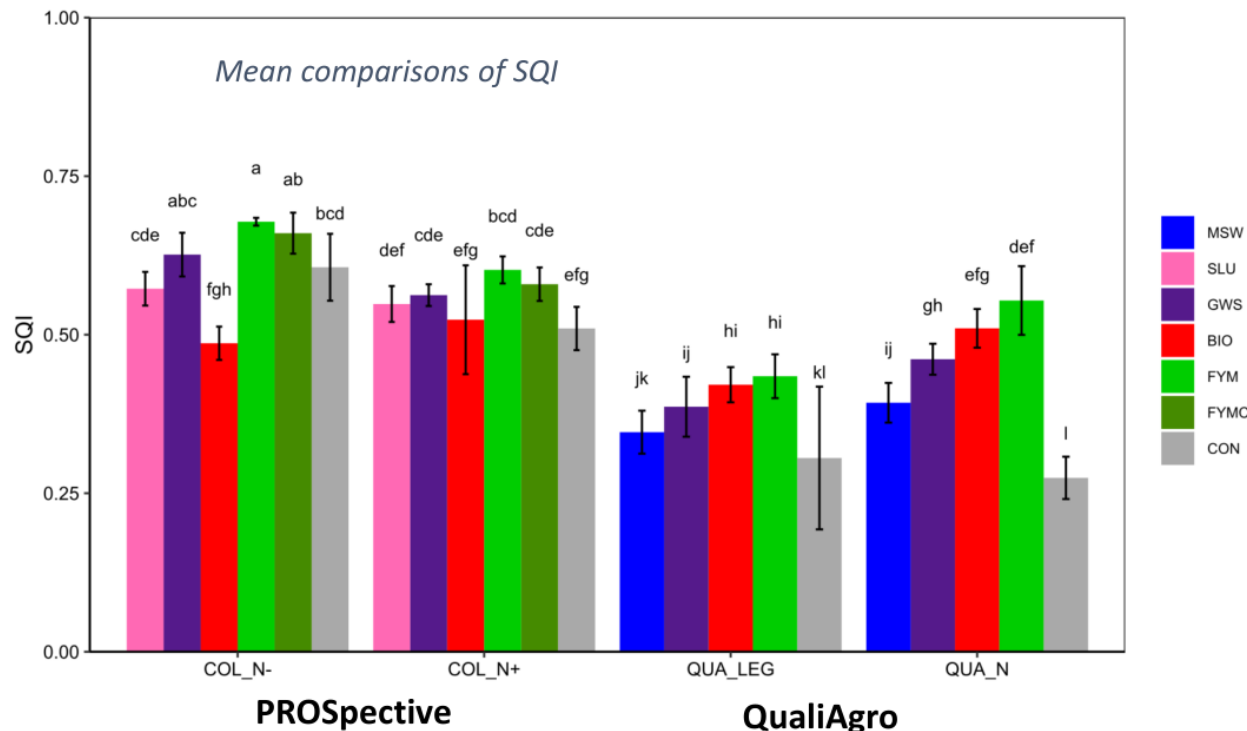
Indice de qualité du sol

- Propriétés retenues dans l'indicateur de qualité de sols : N_{tot} , $K_{\text{éch}}$, Ni_{EDTA} , $Nematode_{\text{Shannon}}$, $Enzyme_{\text{Shannon}}$



Seulement une valeur statistique, pas de sens physique/biologique

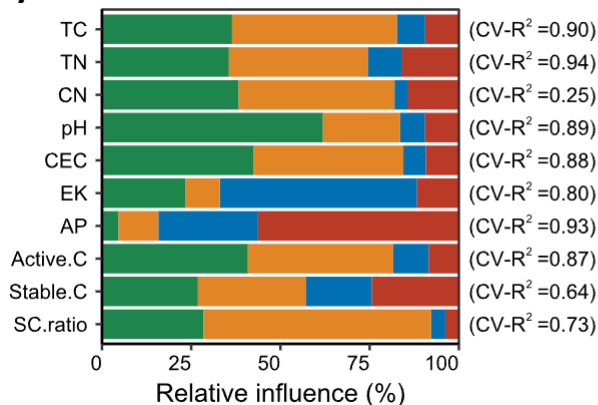
- Indice de qualité des sols globalement plus élevé à PROspective
- Apports de PRO ↗ significativement l'indice à QualiAgro
- Seul le fumier ↗ indice à PROspective, et ↗ le + à QualiAgro



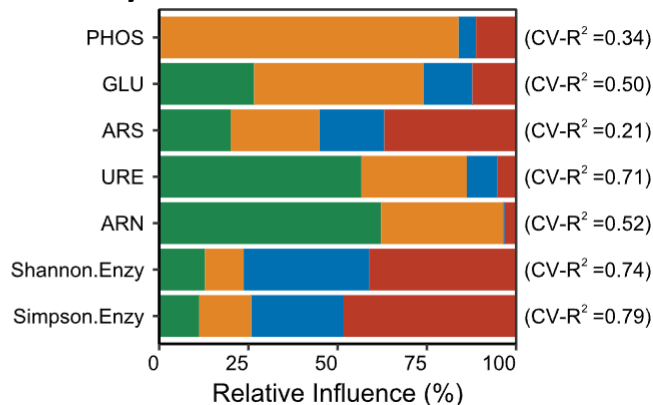
Facteurs de contrôle des changements

- Prédiction bonne à acceptable pour la physico-chimie et les activités enzymatiques
- Changements majoritairement contrôlés par les apports de C et N

Physico-chimie



Enzymes



Variables explicatives

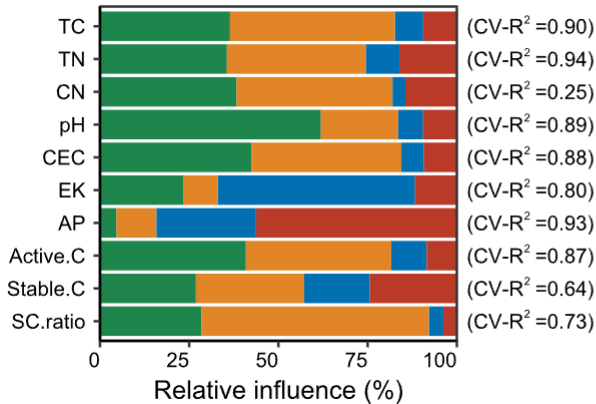


R² et contribution relative de chaque variable à la prédiction des changements de propriétés du sol (modèle GBM)

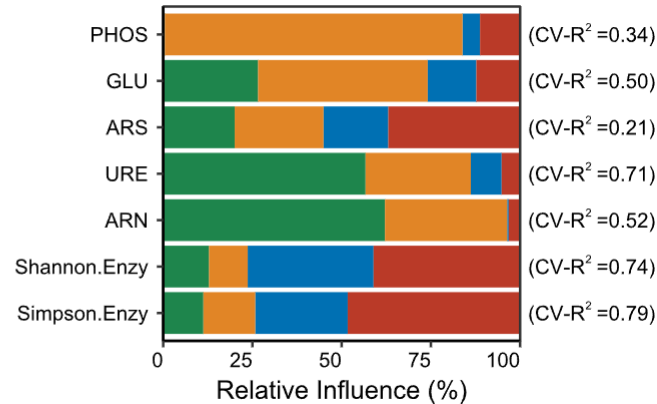
Facteurs de contrôle des changements

- Prédiction bonne à acceptable pour la physico-chimie et les activités enzymatiques
- Changements majoritairement contrôlés par les apports de C et N
- (Très) mauvaise prédiction pour les microorganismes et les nématode

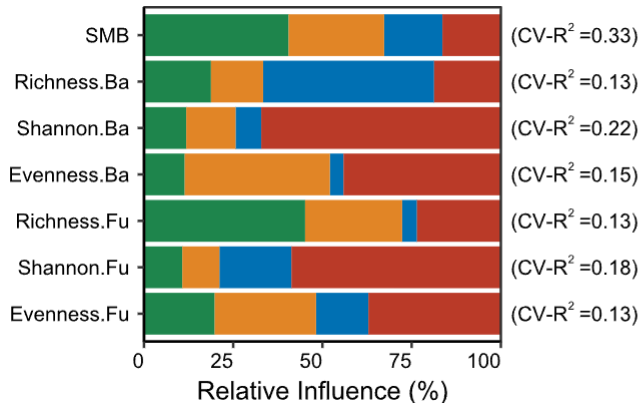
Physico-chimie



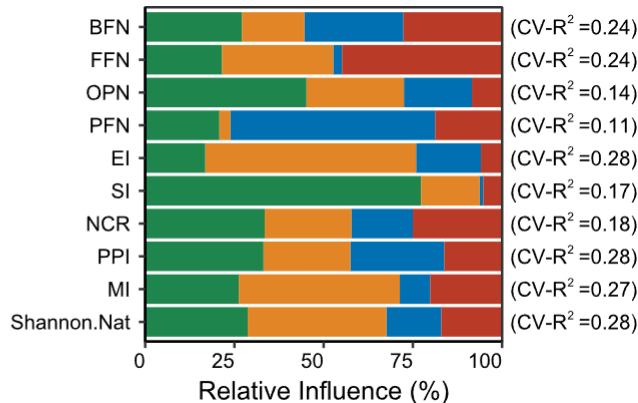
Enzymes



Microorganismes



Nématodes



Variables explicatives



R² et contribution relative de chaque variable à la prédiction des changements de propriétés du sol (modèle GBM)

Conclusion

- Les apports répétés de PRO ont modifié significativement les propriétés chimiques du sol sur QualiAgro et PROspective, et dans une moindre mesure certaines propriétés physiques et biologiques
- Les effets dépendent des doses, du type de PRO, et de l'état initial du sol
- Les apports de C et de N expliquent une bonne partie des changements significatifs
- Les apports de PRO n'ont pas d'effets négatifs sur la biologie du sol, malgré une augmentation de la disponibilité de la plupart des métaux
- Les apports de PRO doivent être combinés avec d'autres pratiques pour améliorer la structure et la biologie du sol

Bibliographie

- Brichi, L., Fernandes, J.V.M., Silva, B.M., Vizú, J. de F., Junior, J.N.G., Cherubin, M.R., 2023. Organic residues and their impact on soil quality, crop production, and sustainable agriculture: A review including bibliographic analysis. *Soil Use Manag.* 39, 686-706. <https://doi.org/10.1111/sum.12892>
- Cécillon, L., Baudin, F., Chenu, C., Christensen, B.T., Franko, U., Houot, S., Kanari, E., Kätterer, T., Merbach, I., van Oort, F., Poeplau, C., Quezada, J.C., Savignac, F., Soucémarianadin, L.N., Barré, P., 2021. Partitioning soil organic carbon into its centennially stable and active fractions with machine-learning models based on Rock-Eval® thermal analysis (PARTYSOCv2.0 and PARTYSOCv2.0EU). *Geoscientific Model Development* 14, 3879- 3898. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-16>
- Chen, H., 2023. Effets à long terme d'apports répétés de produits résiduaux organiques en agriculture sur la production agricole et la fertilité des sols : apports des résultats de deux essais au champ de longue durée en France (These de doctorat). université Paris-Saclay. <https://theses.fr/2023UPASB030>
- Cheviron, N., Amadou, I., Grondin, V., Marraud, C., Mougin, C., Morvan, T., 2021. Soil enzymatic activity data over eight years at the EFELE site, a long-term field experiment on effects of organic waste products and tillage practices. *Data in Brief* 36, 106959. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106959>
- Friedman, J.H., 2001. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics* 29, 1189–1232. <http://www.jstor.org/stable/2699986>
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47, 425–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- Quevauviller, P., 1998. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis I. Standardization. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 17, 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(97\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(97)00119-2)
- Raiesi, F., 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators* 75, 307–320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- Terrat, S., Christen, R., Dequiedt, S., Lelièvre, M., Nowak, V., Regnier, T., Bachar, D., Plassart, P., Wincker, P., Jolivet, C., Bispo, A., Lemanceau, P., Maron, P.-A., Mougel, C., Ranjard, L., 2012. Molecular biomass and MetaTaxogenomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure. *Microbial Biotechnology* 5, 135–141. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00307.x>
- Yeates, G.W., 2003. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biol Fertil Soils* 37, 199–210. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0586-5>