

Colloque « Retour au sol des produits résiduaux organiques »
organisé par l'observatoire de
recherche SOERE PRO

Campus Agro Paris-Saclay
22 juin 2023



Colloque « Retour au sol des produits résiduaux organiques » organisé par
l'observatoire de recherche SOERE PRO

Campus Agro Paris-Saclay, 22 juin 2023

Dynamiques C, N, P après des apports répétés de produits résiduaux organiques. De la mesure à la parcelle à l'évaluation multicritère territoriale

Florent Levavasseur, Sabine Houot

INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, UMR ECOSYS, Palaiseau

Introduction

- Apport de PRO en agriculture : retour au sol de nutriments et de matière organique
 - Quelle efficacité fertilisante ? Quelle substitution d'engrais possible ?
 - Quel efficacité pour entretenir / augmenter les stocks de C du sol ?
 - Quelle variabilité des effets entre PRO ? Entre sites ?
 - Quelle dynamique temporelle ?
 - Quels déterminants des effets ?
 - ...
- Intérêt des essais au champ de longue durée pour répondre à ces questions
- Impossible de tester toutes les conditions de sol, climat et système de culture au champ
- Possibilité d'utiliser les données d'essai pour calibrer des modèles et extrapoler dans de nouvelles conditions, à plus large échelle ?





Plan

Introduction

Bilan de 20 ans ou plus d'apports de PRO sur les flux de C, N et P sur QualiAgro et PROspective

Comment mobiliser ces données pour l'évaluation territoriale de scénarios de gestion des PRO ?

Conclusion

QualiAgro et PROspective dans le SOERE-PRO



- Le SOERE-PRO : réseau de sites expérimentaux au champ de longue durée étudiant le recyclage agricole des PRO
- QualiAgro et PROspective :
 - Les deux sites actifs les plus anciens du SOERE-PRO
 - Des PRO en commun
 - Des contextes pédoclimatiques et des systèmes de culture différents

QualiAgro et PROspective (avant changement)

	PROspective (Colmar, 68)	QualiAgro (Feucherolles, 78)
Type de sol	Calcosol profond	Luvisol profond
Teneur C initiale	14.3 g / kg	10.5 g / kg
Climat	Semicontinental	Océanique dégradé
Rotation	Mais g – blé – betterave s – orge p	Mais grain - blé
Type de système	Conventionnel, résidus restitués	Conventionnel, pailles enlevées
PRO	<p>Boue (BOUE / SLU)</p> <p>Compost DV + boue (DVB / GWS)</p> <p>Compost DV + biodéchets (BIO)</p> <p>Fumier bovin (FUM / FYM)</p> <p>Compost de fumier (FUMC / FYMC)</p>	<p>Compost DV + boue (DVB / GWS)</p> <p>Compost DV + biodéchets (BIO)</p> <p>Compost d'ordures ménagères (OMR / MSW)</p> <p>Fumier bovin (FUM / FYM)</p>
Dose d'apport de PRO	170 kg N/ha, 1 an sur 2	4 t C/ha, 1 an sur 2
Période	Sortie d'hiver avant culture de printemps	Fin d'été après blé
Sous-essai (avant changement)	Complémentation minérale optimale et ajustée par traitement (N+)	Complémentation minérale optimale (N+), sans substitution sur blé
	Sans complémentation minérale (N-)	Complémentation minérale minimale (N-)
	Jachère nue	

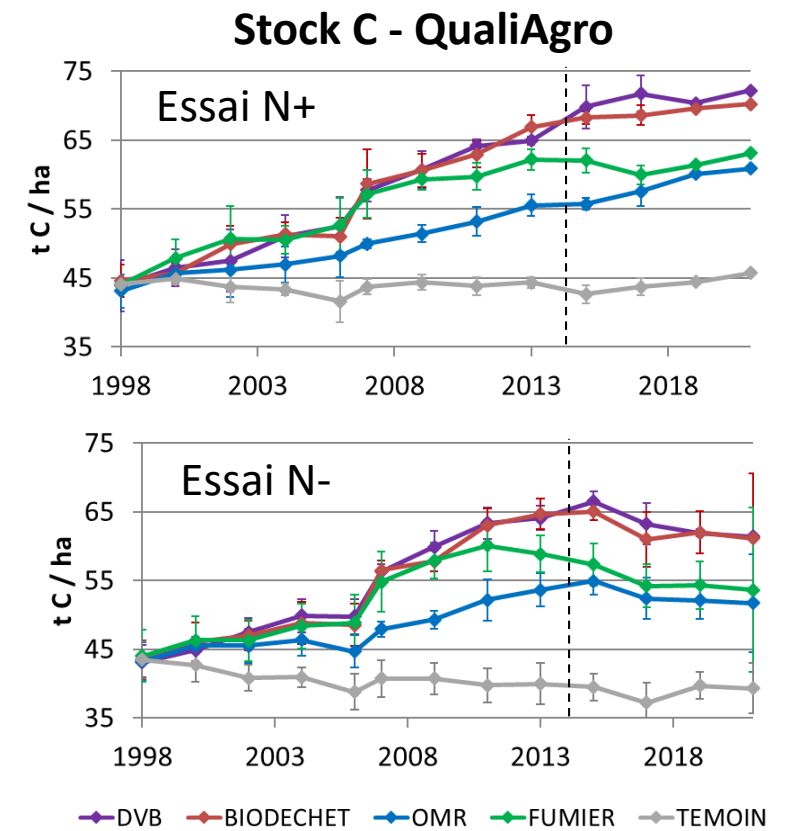
QualiAgro et PROspective (après changement)

- Changement de design expérimental des deux essais en 2014
- QualiAgro : dose de PRO + raisonnable (N+), comparaison apport de PRO et légumineuse dans des systèmes de culture en « simili » agriculture biologique
- Colmar N- : obtenir les mêmes rendements qu'en N+ en augmentant les doses de PRO et en ajoutant du digestat si besoin

Sous-essai	PROspective		QualiAgro	
	N-	N+	LEG (ancien N-)	PRO (ancien N+)
Rotation	Inchangée + insertion de CIPAN		Maïs grain – céréales + légumineuses	Maïs grain - céréales
PRO	Idem + ajout de digestat de biodéchets dans essai N-		Arrêt, mais ajout d'engrais organique commercial	Idem + ajout d'engrais organique commercial
Dose d'apport de PRO	Fonction des besoins de la culture de printemps	170 kg N/ha, 1 an sur 2	0 (arrêt)	2 t C/ha, 1 an sur 2
Période	Eté avant culture de printemps		Fin d'été après blé (inchangée)	

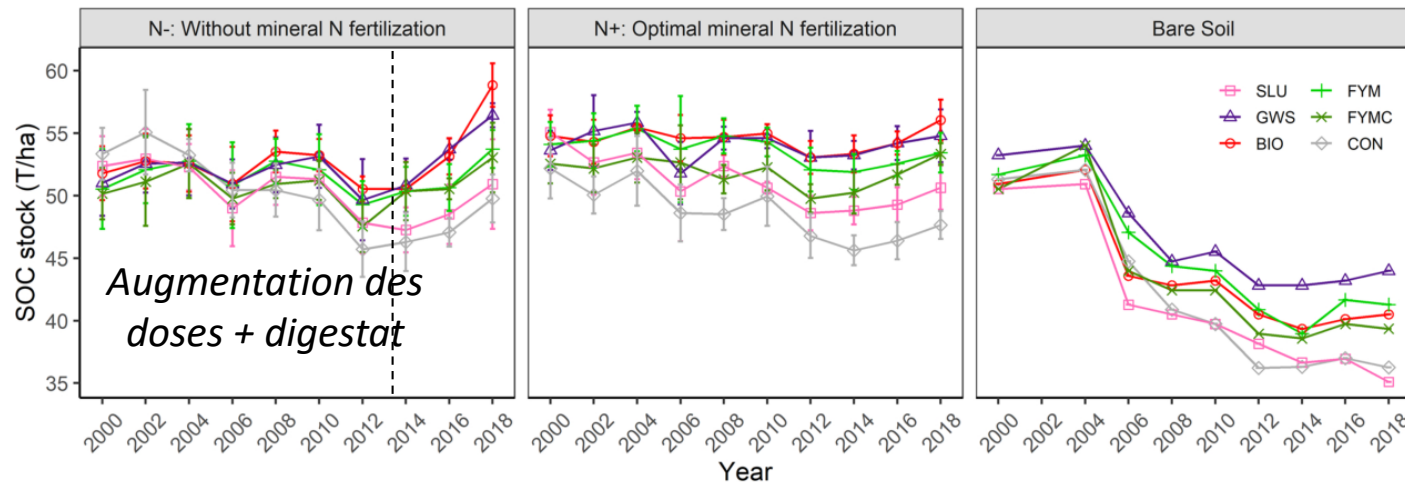
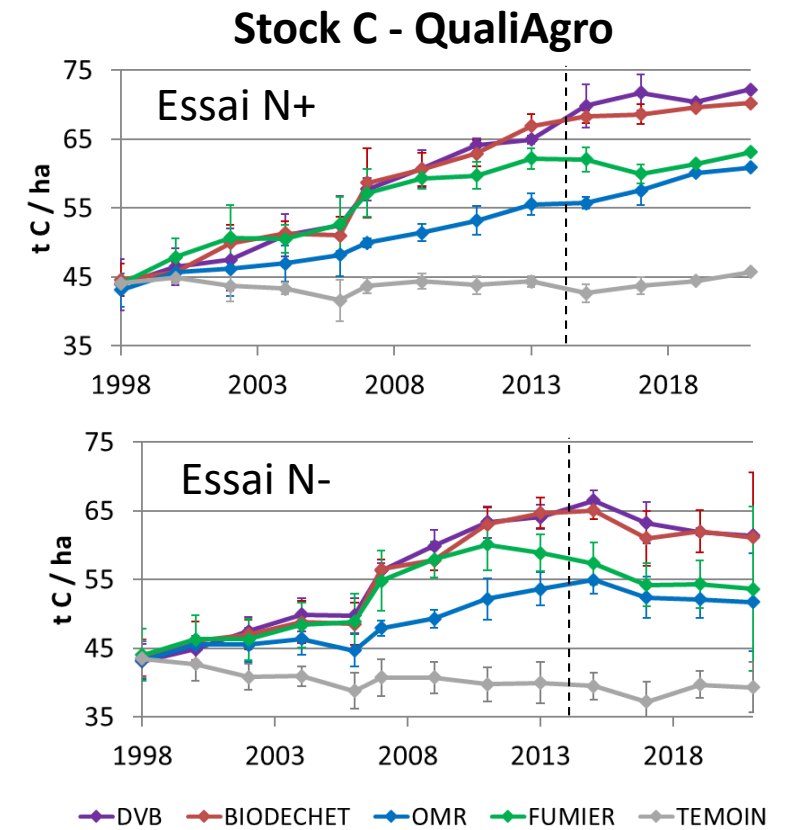
Apport de PRO et stockage de C

- QualiAgro :
 - forte \nearrow des stocks de C avec PRO
 - \searrow progressive après arrêt des PRO (N- / LEG)
 - Des différences entre traitements malgré les mêmes doses de C à expliquer



Apport de PRO et stockage de C

- QualiAgro :
 - forte \nearrow des stocks de C avec PRO
 - \searrow progressive après arrêt des PRO (N- / LEG)
 - Des différences entre traitements malgré les mêmes doses de C à expliquer
- PROspective :
 - légère \nearrow ou maintien des stocks sur la partie cultivée
 - PRO insuffisants en jachère nue pour maintenir les stocks
 - Des différences entre traitements à expliquer (dose C différente...)



Stock C - PROspective
(Chen et al., 2022)

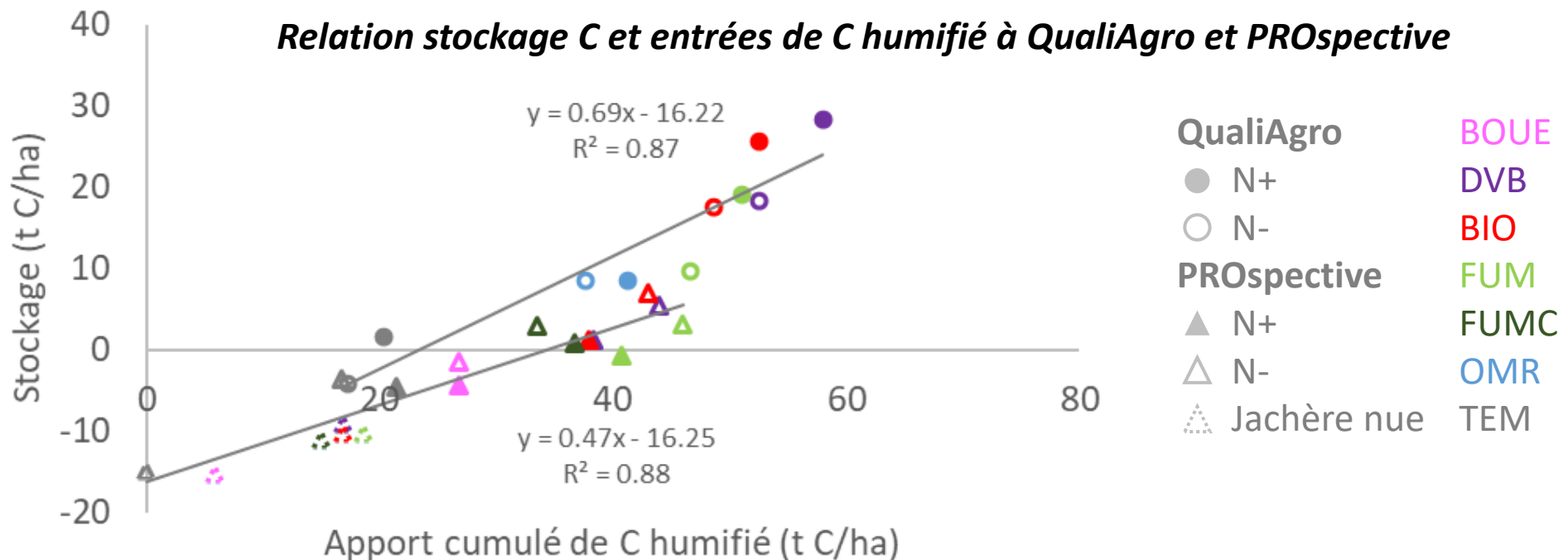
Déterminants du stockage de C

- Stockage C (t) = Stock C (t) – Stock C (t₀)
- Entrées de C humifié = \sum quantité C_i . coefficient humification_i (ISMO pour les PRO)



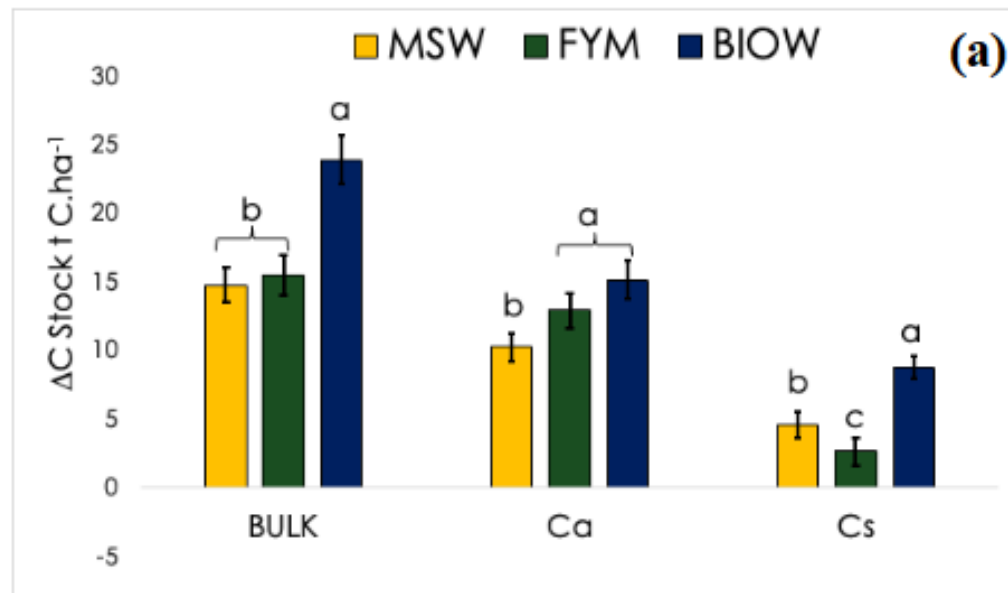
Déterminants du stockage de C

- Stockage C (t) = Stock C (t) – Stock C (t₀)
- Entrées de C humifié = \sum quantité C_i . coefficient humification_i (ISMO pour les PRO)
- Entrées expliquent bien les différences de stockage après 20 ans au sein de chaque site :
 - **PROspective** : plus d'apport de C et + stable avec composts et fumier par rapport à la boue
 - **QualiAgro** : même apport de C, stabilité explique les différences (+ stockage avec DVB...)
- Efficience de stockage + faible à PROspective malgré des vitesses de minéralisation de la MO du sol théoriquement similaire (Clivot *et al.*, 2019)



Stabilité de la matière organique stockée

- Estimation de la stabilité du C stocké par pyrolyse Rock-Eval (*Cécillon et al., 2021*)
- **QualiAgro** : léger stockage de C stable dans les traitements PRO, mais principalement du stockage de C actif (*Kpemoua, 2023*)
- **PROspective** : peu d'évolution, mais des tendances qui vont dans le même sens que QualiAgro



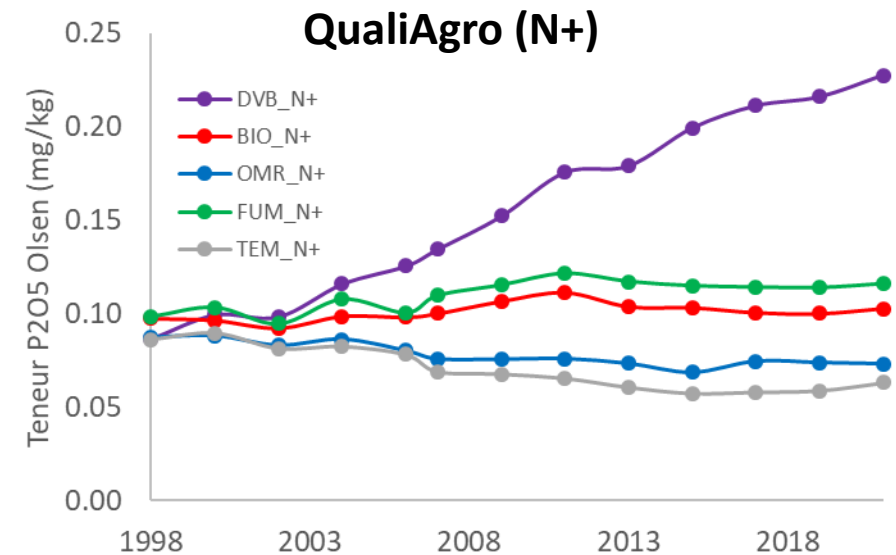
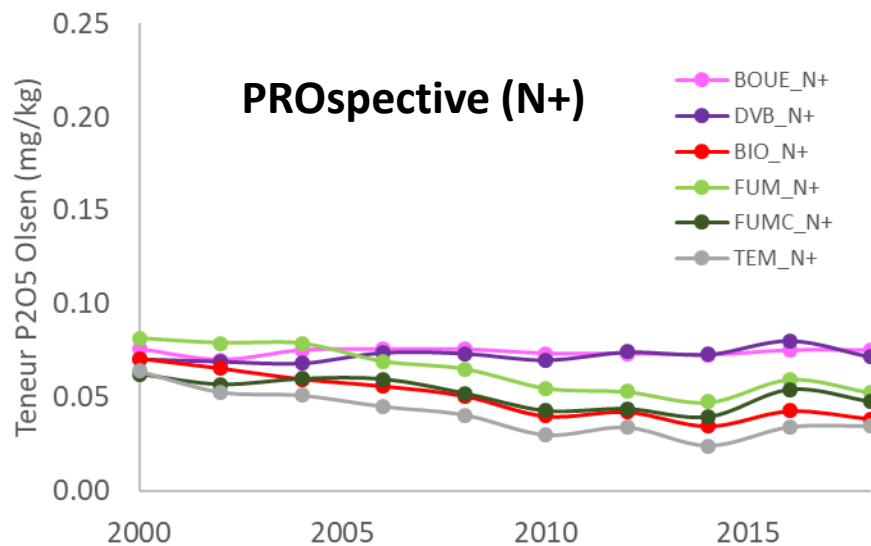
Stockage additionnel de C total, C actif et C stable dans les traitements PRO de QualiAgro en comparaison au traitement témoin Kpemoua (2023)

$$\Delta C \text{ stock PRO } (t) = C \text{ stock PRO } (t) - C \text{ stock témoin } (t)$$

Dynamique du phosphore

- Teneur en P_2O_5 Olsen du sol QualiAgro > PROspective
 - **QualiAgro** : augmentation (sauf OMR) des teneurs
 - **PROspective** : Moindre décroissance ou maintien (boue, DVB) des teneurs
- Différences entre traitements et entre sites ?

Teneur du sol en P_2O_5 Olsen

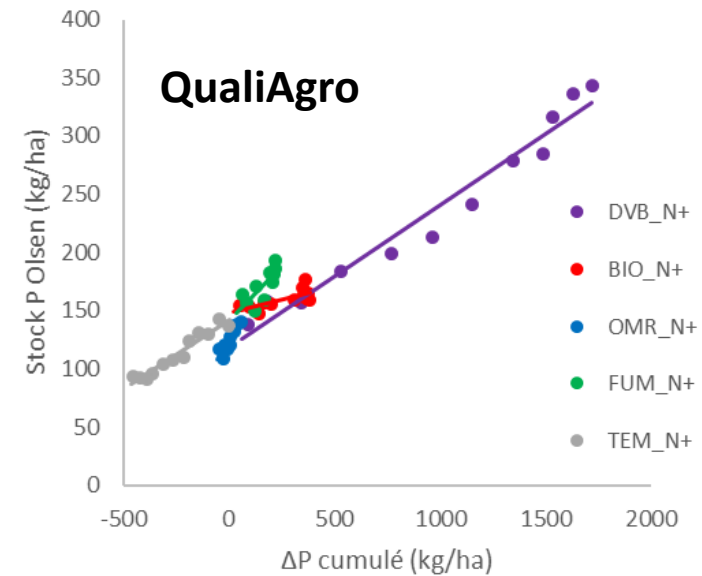
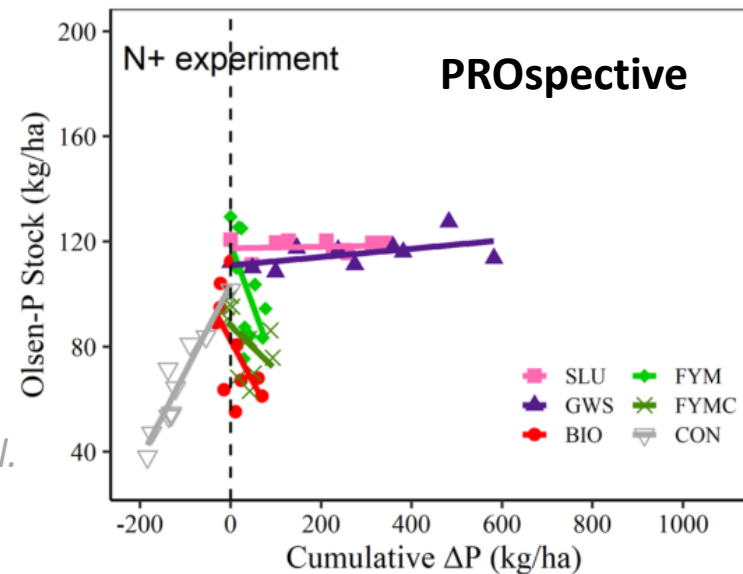


Dynamique du phosphore

- ΔP = apport ferti (PRO + minéral) – export plante
- P en excès dans presque tous les traitements PRO, mais effet variable sur les stocks de P Olsen :
 - **QualiAgro** : effet \approx identique et positif selon les traitements
 - **PROspective** : effet très variable selon les traitements : d'une légère \nearrow à une forte \searrow
- Mécanismes sous-jacents encore mal compris
- Des résultats comparables pour le potassium (avec un effet type de PRO \neq)

Relation ΔP et stock P Olsen

Chen et al. (2022)



Pente de régression stock P Olsen / ΔP

Traitement	BOUE_N+	DVB_N+	BIO_N+	OMR_N+	FUM_N+	FUMC_N+	TEM_N+
Colmar	0	0.02	-0.32	-	-0.47	-0.16	0.33
QualiAgro	-	0.12	0.04	0.29	0.19	-	0.12

Efficacité fertilisante N des PRO et économies d'engrais

- Différentes façons de l'étudier :
 - Pour un même rendement obtenu, quelles économies d'engrais avec PRO ?
 - $CAU_{PRO} = \frac{(N_{\text{absorbé avec PRO}} - N_{\text{absorbé ON}})}{N_{\text{apporté par le PRO}}}$
 - $KEQ_{PRO} = CAU_{PRO} / CAU_{\text{engrais minéral}}$



Efficacité fertilisante N des PRO et économies d'engrais

- Différentes façons de l'étudier :
 - Pour un même rendement obtenu, quelles économies d'engrais avec PRO ?
 - $CAU_{PRO} = \frac{(N_{\text{absorbé avec PRO}} - N_{\text{absorbé ON}})}{N_{\text{apporté par le PRO}}}$
 - $KEQ_{PRO} = CAU_{PRO} / CAU_{\text{engrais minéral}}$
- PROspective** (essai N+, même rendement) :
+ économies N et P avec boue, K avec fumier...
- PROspective** (essai N-) : KEQ N digestat > BOUE > composts et fumier

OW	Essai N+			Essai N-
	Mineral fertilizer saved (kg yr ⁻¹ ha ⁻¹)			NFRV (%) *
	N	P	K	
SLU	57.3	23.1	5.7	58
GWS	17.6	23.1	16.2	30
BIO	22.4	16.1	26.7	21
FYM	27.4	18.4	30.5	35
FYMC	18.8	17.7	30.5	32
Digestate	–	–	–	69

*Economies d'engrais à PROspective
Chen et al. (2022)*

* NFRV = KEQ N (coefficient d'équivalence engrais N)

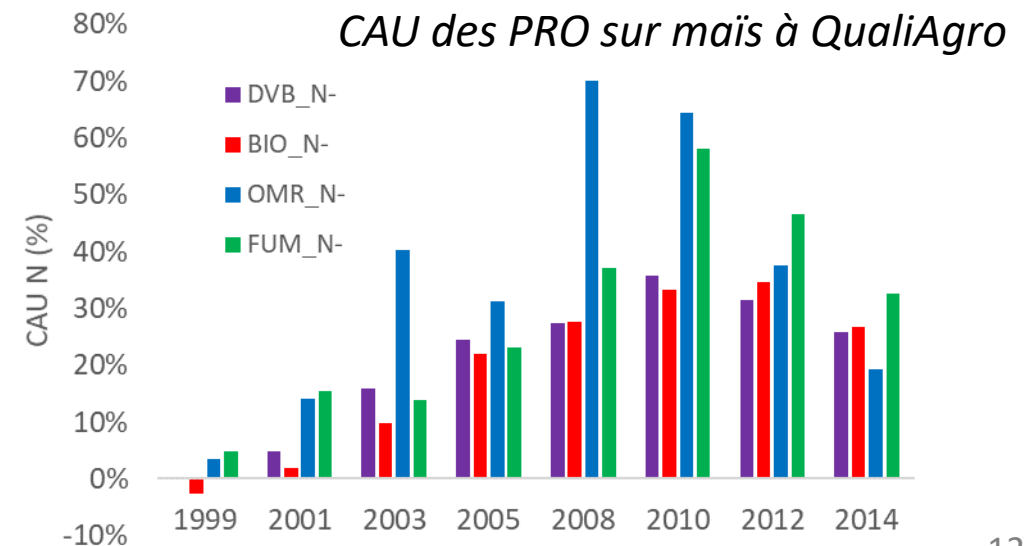
Efficacité fertilisante N des PRO et économies d'engrais

- Différentes façons de l'étudier :
 - Pour un même rendement obtenu, quelles économies d'engrais avec PRO ?
 - $CAU_{PRO} = \frac{(N_{\text{absorbé avec PRO}} - N_{\text{absorbé ON}})}{N_{\text{apporté par le PRO}}}$
 - $KEQ_{PRO} = CAU_{PRO} / CAU_{\text{engrais minéral}}$
- PROspective** (essai N+, même rendement) : + économies N et P avec boue, K avec fumier...
- PROspective** (essai N-) : KEQ N digestat > BOUE > composts et fumier
- QualiAgro** (essai N-) : initialement faible CAU des PRO mais augmentation progressive avec des apports répétés

OW	Essai N+			Essai N-
	Mineral fertilizer saved (kg yr ⁻¹ ha ⁻¹)			NFRV (%) *
	N	P	K	
SLU	57.3	23.1	5.7	58
GWS	17.6	23.1	16.2	30
BIO	22.4	16.1	26.7	21
FYM	27.4	18.4	30.5	35
FYMC	18.8	17.7	30.5	32
Digestate	-	-	-	69

*Economies d'engrais à PROspective
Chen et al. (2022)*

* NFRV = KEQ N (coefficient d'équivalence engrais N)

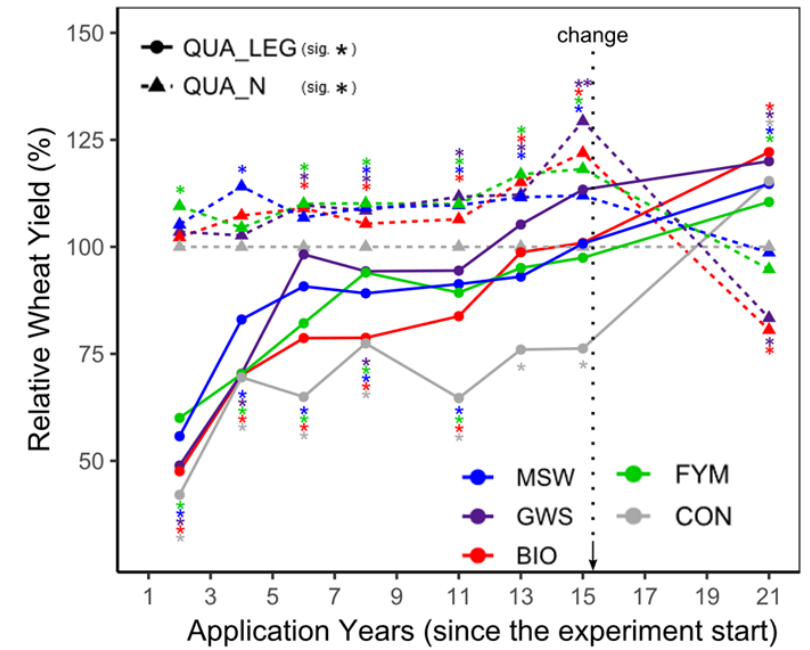


Effet sur les rendements

$$RY (\%) = \text{Yield}_{OW} / \text{Yield}_{\text{mineral_N_control}} \times 100$$



Wheat yield in QualiAgro (Chen, 2023)

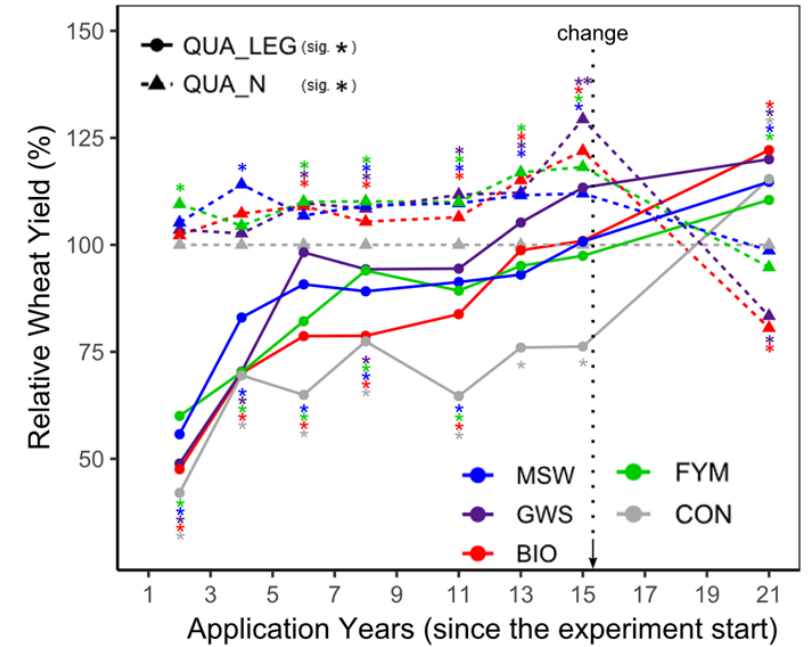


Effet sur les rendements

$$RY (\%) = \text{Yield}_{OW} / \text{Yield}_{\text{mineral_N_control}} \times 100$$

- Substitution totale des engrais :
 - **PROspective** : \searrow de rendement (surtout blé)
 - **QualiAgro** (maïs uniquement) : identiques à long terme avec apports massifs de PRO
- Substitution partielle des engrais sur **PROspective** et **QualiAgro** (maïs, blé) : possibilité de \approx maintenir voire d'augmenter les rendements, surtout à long terme suite aux augmentations de MO du sol si apports massifs de PRO

Wheat yield in QualiAgro (Chen, 2023)

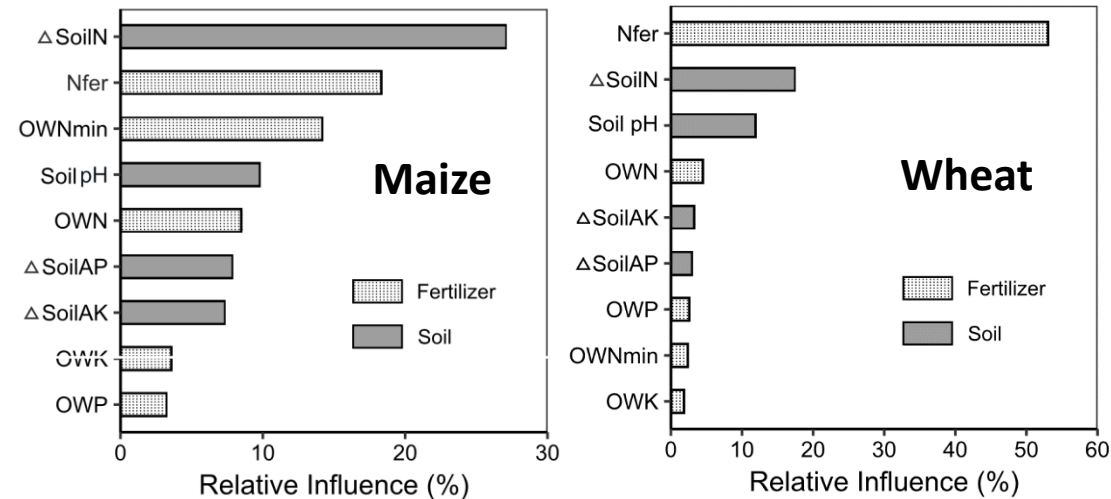
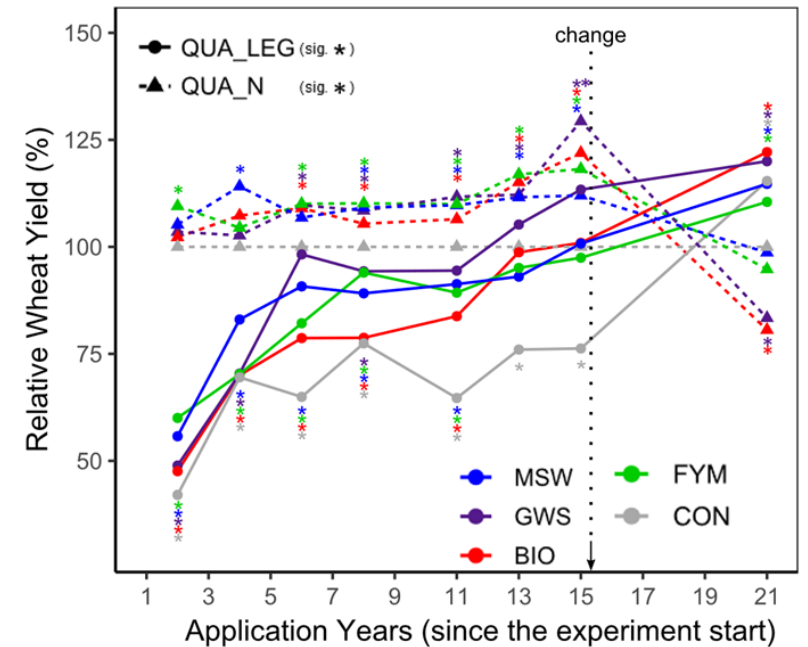


Effet sur les rendements

$$RY (\%) = \text{Yield}_{OW} / \text{Yield}_{\text{mineral_N_control}} \times 100$$

- Substitution totale des engrais :
 - **PROspective** : \searrow de rendement (surtout blé)
 - **QualiAgro** (maïs uniquement) : identiques à long terme avec apports massifs de PRO
- Substitution partielle des engrais sur **PROspective** et **QualiAgro** (maïs, blé) : possibilité de \approx maintenir voire d'augmenter les rendements, surtout à long terme suite aux augmentations de MO du sol si apports massifs de PRO
- Analyse statistique (GBM) des déterminants du rendement sur QualiAgro et PROspective :
 - Fertilisation minérale N = principal déterminant du rendement du blé
 - Stock de N total du sol = principal déterminant du rendement du maïs

Wheat yield in QualiAgro (Chen, 2023)



Relative influences of explanatory variables for relative yield in QualiAgro and PROspective Chen (2023)

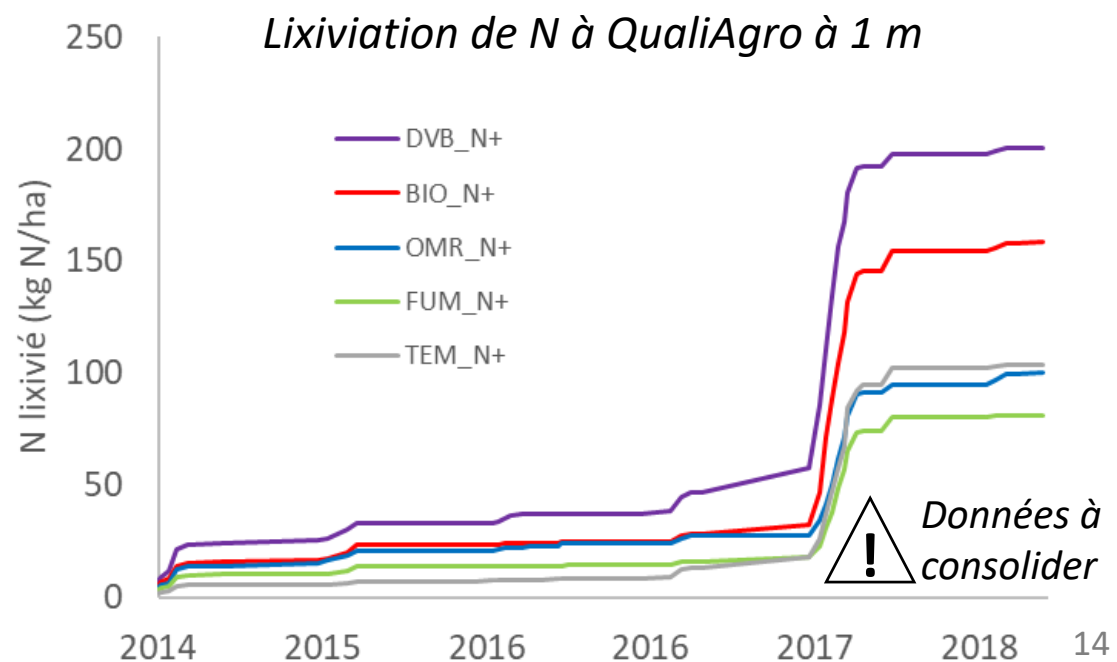
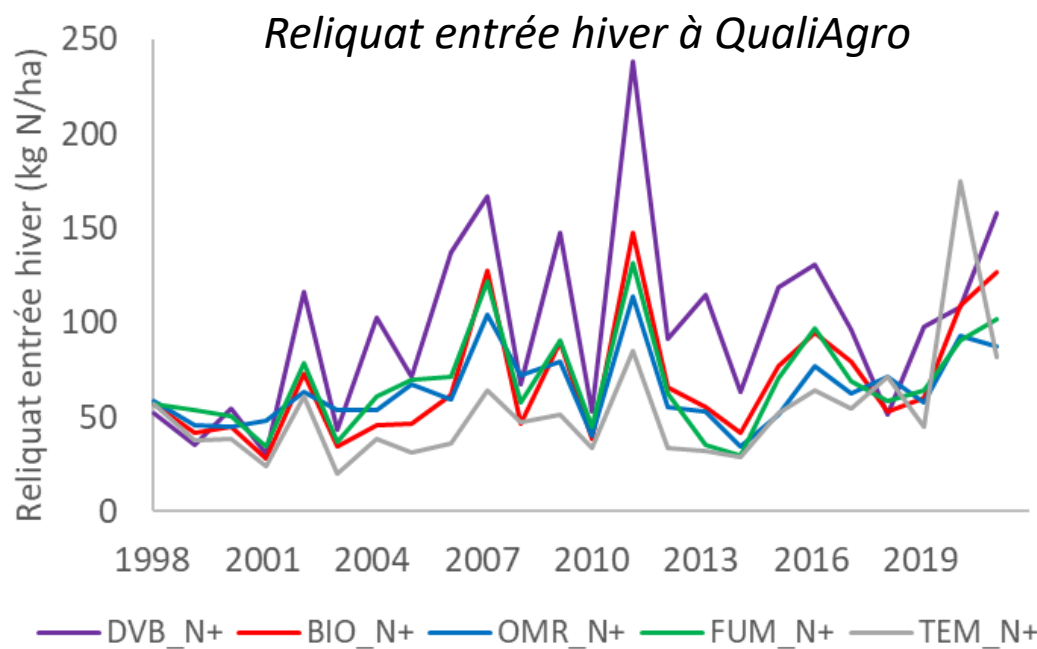
Pertes de N par lixiviation

- **PROspective** : pas d'augmentation significative des reliquats entrée hiver dans les traitements PRO (*Chen et al., 2022*) → apport de PRO modéré, en sortie d'hiver ou été avec CIPAN, sans augmentation forte de la MO du sol



Pertes de N par lixiviation

- **PROspective** : pas d'augmentation significative des reliquats entrée hiver dans les traitements PRO (*Chen et al., 2022*) → apport de PRO modéré, en sortie d'hiver ou été avec CIPAN, sans augmentation forte de la MO du sol
- **QualiAgro** :
 - Forte augmentation des reliquats entrée hiver dans les traitements PRO (année d'épandage et suivante)
 - augmentation significative de la quantité de N lixiviée à 1 m dans certains traitements PRO
 - ≈ 3/4 flux concentré en 1 « hiver » sur 6 (+ forte lame drainante)
 - augmentation de la lixiviation cumulée en partie expliquée par l'augmentation de la teneur en N_{org} du sol, période d'apport (fin d'été, avant maïs sans CIPAN ou sur céréales d'hiver), teneur N_{min} du PRO





Plan

Introduction

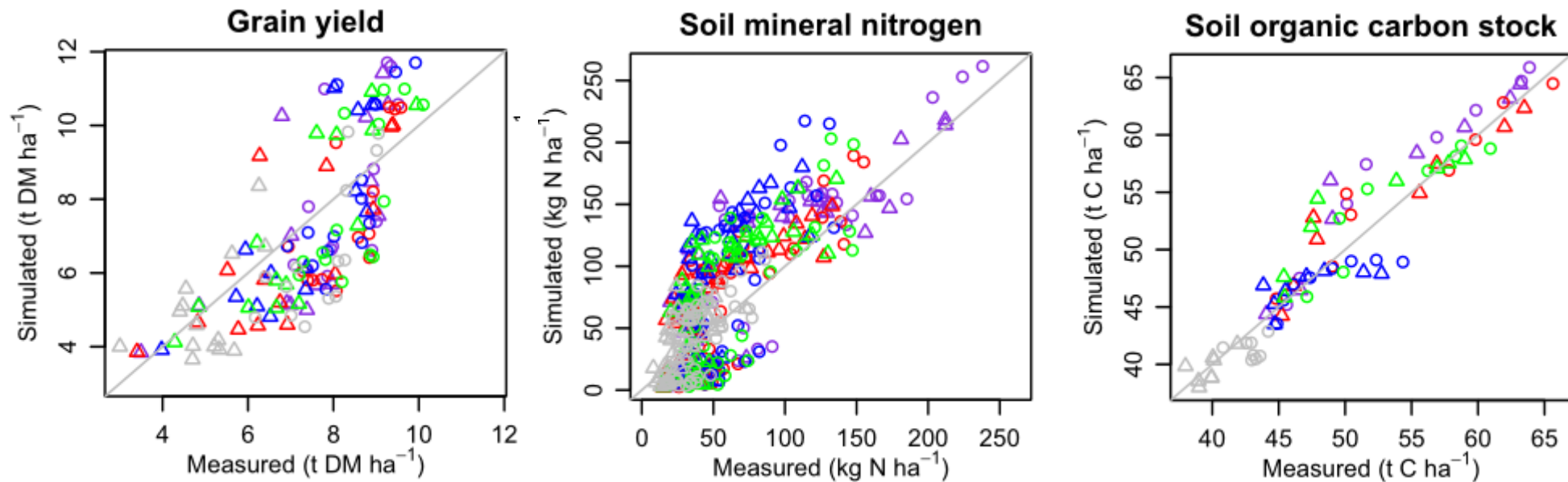
Bilan de 20 ans ou plus d'apports de PRO sur les flux de C, N et P sur QualiAgro et PROspective

Comment mobiliser ces données pour l'évaluation territoriale de scénarios de gestion des PRO ?

Conclusion

Calibration de modèles prédictifs des effets des PRO

- Modélisation de l'essai **QualiAgro** (1998-2013) avec STICS (*Levavasseur et al., 2021*) : performances satisfaisantes pour simuler la biomasse et le rendement, les reliquats azotés, les stocks de carbone et l'humidité du sol
- Résultats similaires avec le modèle CERES-EGC (*Noirot-Cosson et al., 2016*)



Valeurs observées et simulées avec STICS de rendement, reliquat azoté et stock de carbone du sol sur l'essai QualiAgro
Levavasseur et al. (2021)

- GWS_N+ : green waste and sludge compost + optimal mineral nitrogen fertilization
- △ GWS_N- : green waste and sludge compost + minimal mineral nitrogen fertilization
- BIO_N+ : biowaste compost + optimal mineral nitrogen fertilization
- △ BIO_N- : bio-waste compost + minimal mineral nitrogen fertilization
- MSW_N+ : municipal solid waste compost + optimal mineral nitrogen fertilization
- △ MSW_N- : municipal solid waste compost + minimal mineral nitrogen fertilization
- FYM_N+ : farmyard manure + optimal mineral nitrogen fertilization
- △ FYM_N- : farmyard manure + minimal mineral nitrogen fertilization
- CT_N+ control treatment without organic amendment + optimal mineral nitrogen fertilization
- △ CT_N- control treatment without organic amendment + minimal mineral nitrogen fertilization

Mobilisation des modèles dans des outils multicritère

- Outil PROLEG : combinaison d'un modèle de C (AMG), de STICS, de fonctions de pédotransfert avec des bases de données (caractéristiques des PRO...) pour une évaluation prédictive multicritère de l'effet des PRO
- Des effets encore mal ou non prédits (P, K, tassement...)

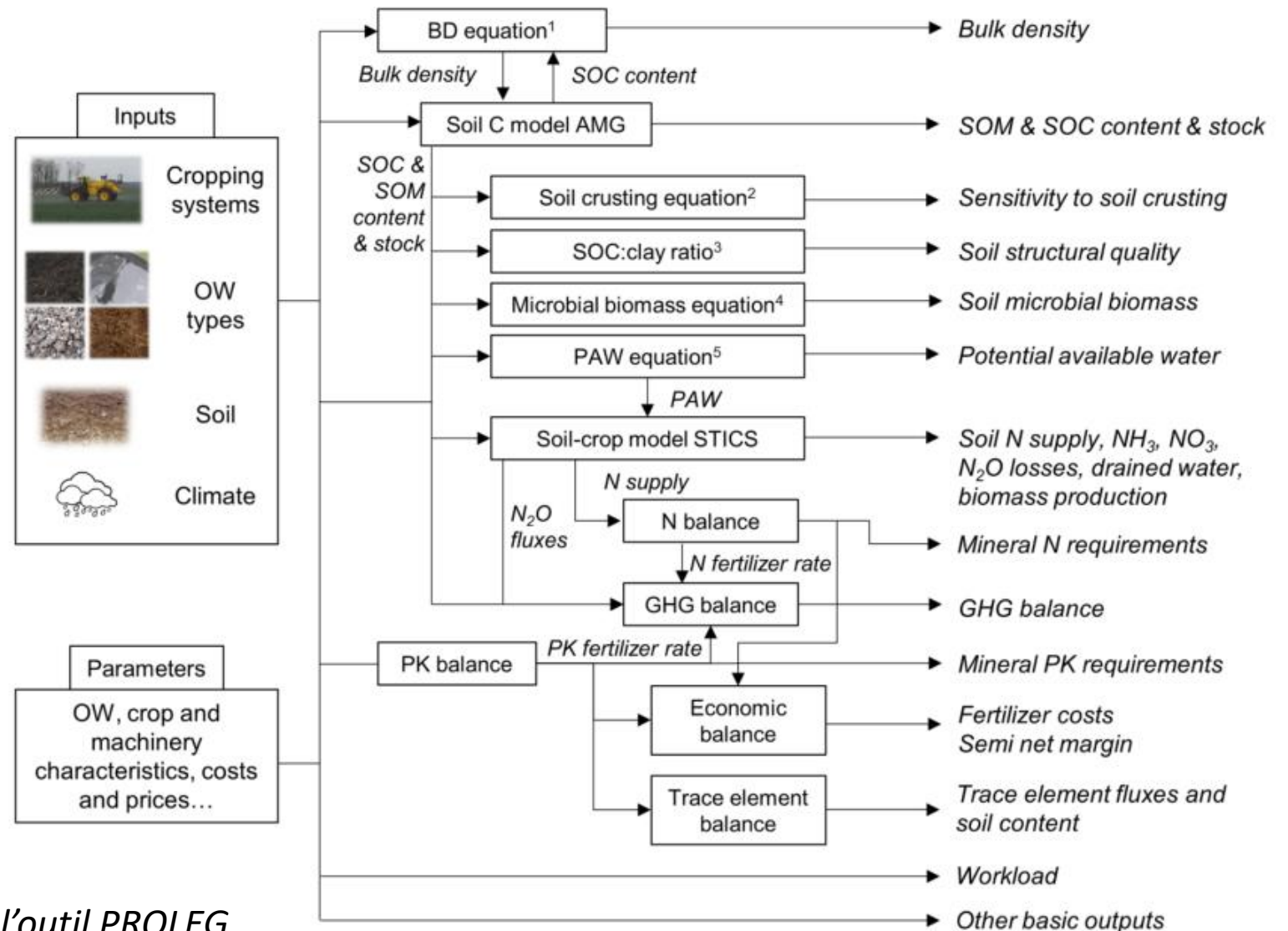
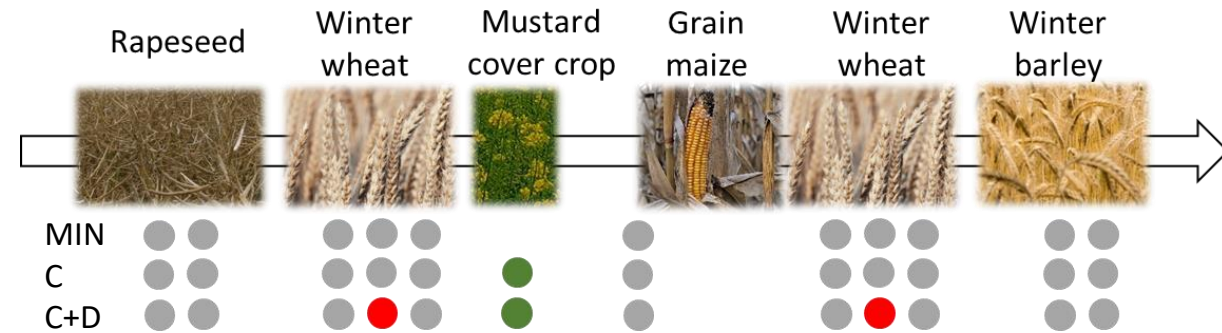


Diagramme de l'outil PROLEG
Levavasseur et al. (2023)

Mobilisation des modèles dans des outils multicritère

Exemple d'application pour la simulation de scénarios d'apports de PRO en Ile-de-France :

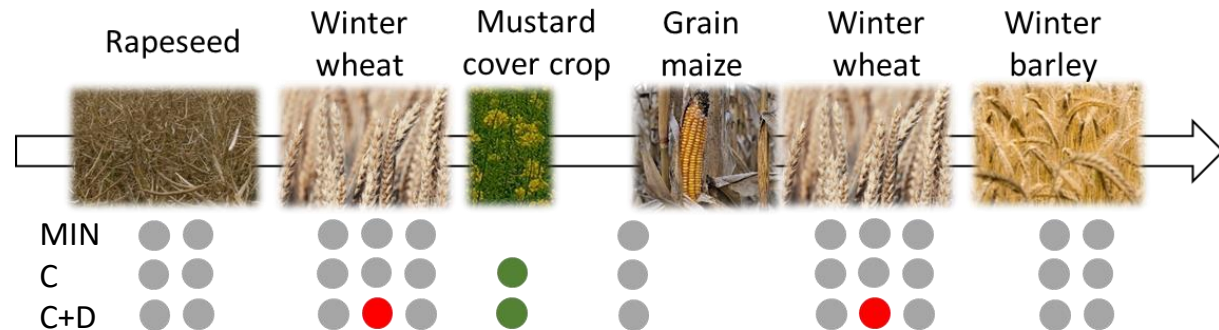
- MIN : engrais minéral ●
- C : compost de déchets verts ● + engrais minéral ●
- C+D : compost de déchets verts ● + digestat de biodéchets ● + engrais minéral ●



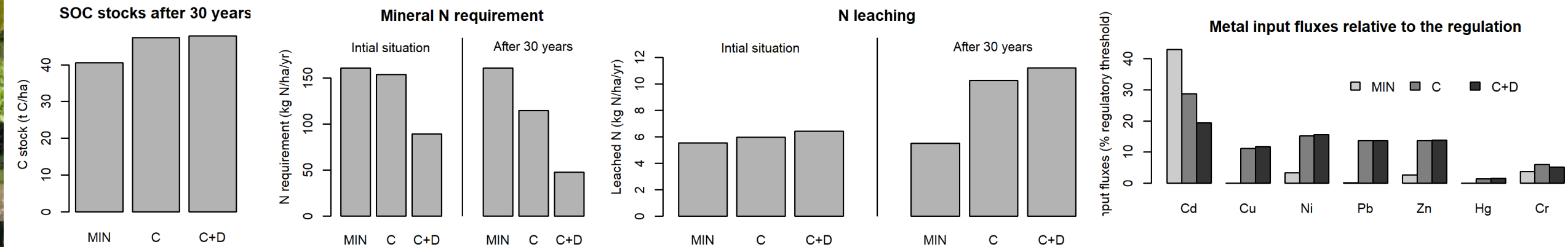
Mobilisation des modèles dans des outils multicritère

Exemple d'application pour la simulation de scénarios d'apports de PRO en Ile-de-France :

- MIN : engrais minéral ●
- C : compost de déchets verts ● + engrais minéral ●
- C+D : compost de déchets verts ● + digestat de biodéchets ● + engrais minéral ●



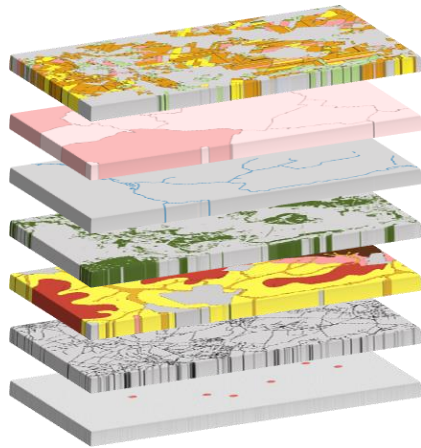
Exemple de résultats de de simulation avec PROLEG
Levasseur et al. (2023)



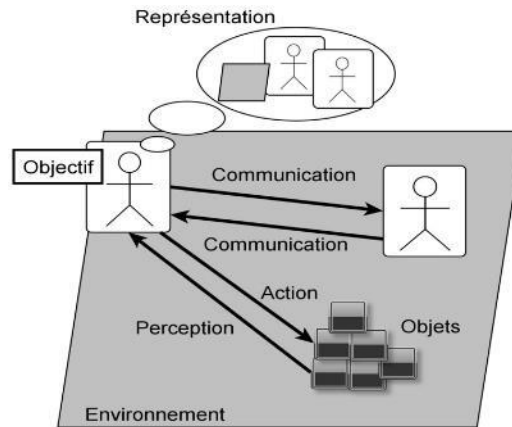
Passage au territoire pour la simulation intégrée de scénarios de gestion des PRO

- MAELIA-PRO (*Misslin et al., 2022*)
- Modèle biophysique adapté de AMG et STICS

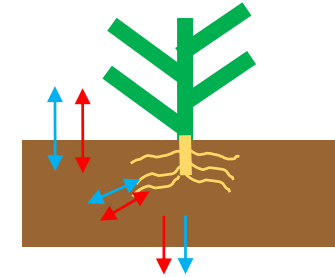
SIG à haute résolution



+ Système multi-agent



+ Modèle biophysique

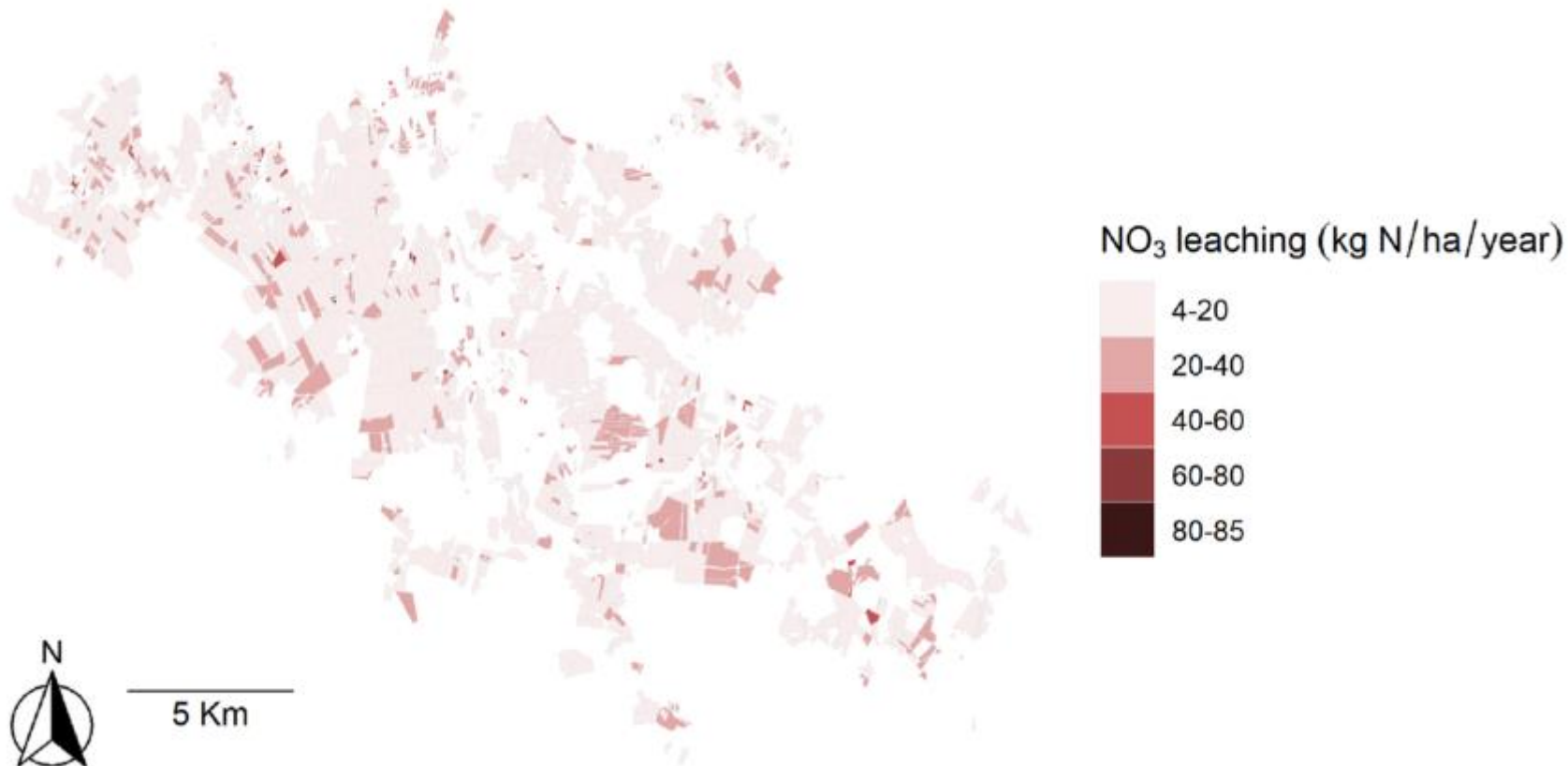


+ Modèle de traitement et de logistique



Passage au territoire pour la simulation intégrée de scénarios de gestion des PRO

- Exemple d'application de MAELIA-PRO (*Misslin et al., 2022*) : simulation des pertes de nitrates par lixiviation dans un scénario d'usage maximal des PRO sur la plaine de Versailles





Plan

Introduction

Bilan de 20 ans ou plus d'apports de PRO sur les flux de C, N et P sur QualiAgro et PROspective

Comment mobiliser ces données pour l'évaluation territoriale de scénarios de gestion des PRO ?

Conclusion

Conclusion

- Intérêt des essais de longue durée du SOERE-PRO pour :
 - Quantifier les effets du recyclage des PRO en termes de fourniture de nutriments et d'entretien de la MO du sol
 - Analyser l'effet de la nature des PRO et des modalités d'apport dans la variabilité des effets mesurés
- Certains effets relativement bien expliqués et prédictibles (C, N), d'autres plus délicats (P, K en sol calcaire...)
- D'autres effets à considérer pour une évaluation multicritère la + complète possible (contaminants, émissions GES, NH₃...)
- Possibilité d'utiliser les outils / modèles calibrés avec les données des essais pour extrapoler dans de nouvelles conditions, de la parcelle au territoire

Merci de votre attention

- 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. *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3879–3898. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3879-2021>
- Chen, H., Levavasseur, F., Montenach, D., Lollier, M., Morel, C., & Houot, S. (2022). An 18-year field experiment to assess how various types of organic waste used at European regulatory rates sustain crop yields and C, N, P, and K dynamics in a French calcareous soil. *Soil and Tillage Research*, 221, 105415. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105415>
- Chen, H., 2023. Long-term effects of repeated inputs of organic wastes in agriculture on crop production and soil fertility: insights from two French long term field experiments. [These de doctorat, université Paris-Saclay].
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Kpemoua, T. P. I. (2023). Persistance et vulnérabilité du carbone nouvellement stocké dans les sols agricoles [These de doctorat, université Paris-Saclay]. <https://www.theses.fr/2023UPASB025>
- Levavasseur, F., & Houot, S. (2023). Predicting the short- and long-term effects of recycling organic wastes in cropping systems with the PROLEG tool. *Soil Use and Management*, 39(1), 535–556. <https://doi.org/10.1111/sum.12856>
- Levavasseur, F., Mary, B., & Houot, S. (2021). C and N dynamics with repeated organic amendments can be simulated with the STICS model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10106-5>
- Misslin, R., Clivot, H., Levavasseur, F., Villerd, J., Soulié, J.-C., Houot, S., & Therond, O. (2022). Integrated assessment and modeling of regional recycling of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 134725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134725>
- Noirot-Cosson, P. E., Vaudour, E., Gilliot, J. M., Gabrielle, B., & Houot, S. (2016). Modelling the long-term effect of urban waste compost applications on carbon and nitrogen dynamics in temperate cropland. *Soil Biology and Biochemistry*, 94, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.014>