

XIII Séminaire STICS
13-16 Novembre 2023, Latresne

Prédiction des effets à court et long termes du recyclage des Produits Résiduaire Organiques en agriculture avec l'outil PROLEG *

Florent Levavasseur, Sabine Houot
INRAE, UMR ECOSYS, Palaiseau, France



* Adapté d'un article publié dans *Soil Use and Management*: <https://doi.org/10.1111/sum.12856>

Introduction

- Diversité des Produits Résiduaux Organiques (PRO) : effluents d'élevage (lisier, fumier), déchets verts, boue STEP, etc., épandus bruts ou après traitement (compostage, méthanisation)
- Multiples effets positifs du retour au sol des PRO (stockage de C, fourniture de nutriments) mais des impacts à limiter (contamination, émissions gazeuses...)
- Des effets à court et long termes
- Effets des PRO dépendent des caractéristiques des PRO, des systèmes de culture, du contexte pédoclimatique, etc.
- Intérêt d'une évaluation multicritère prédictive des effets à court et long terme des PRO pour optimiser le recyclage des PRO en agriculture



Développement d'un nouvel outil

- Enquêtes sur les effets considérés : tous les effets sont importants à considérer !
- Des outils existants pour estimer ces effets, mais avec des limites :
 - Non adaptés à la diversité des PRO
 - Non prise en compte des effets long terme
 - Diversité des effets limités

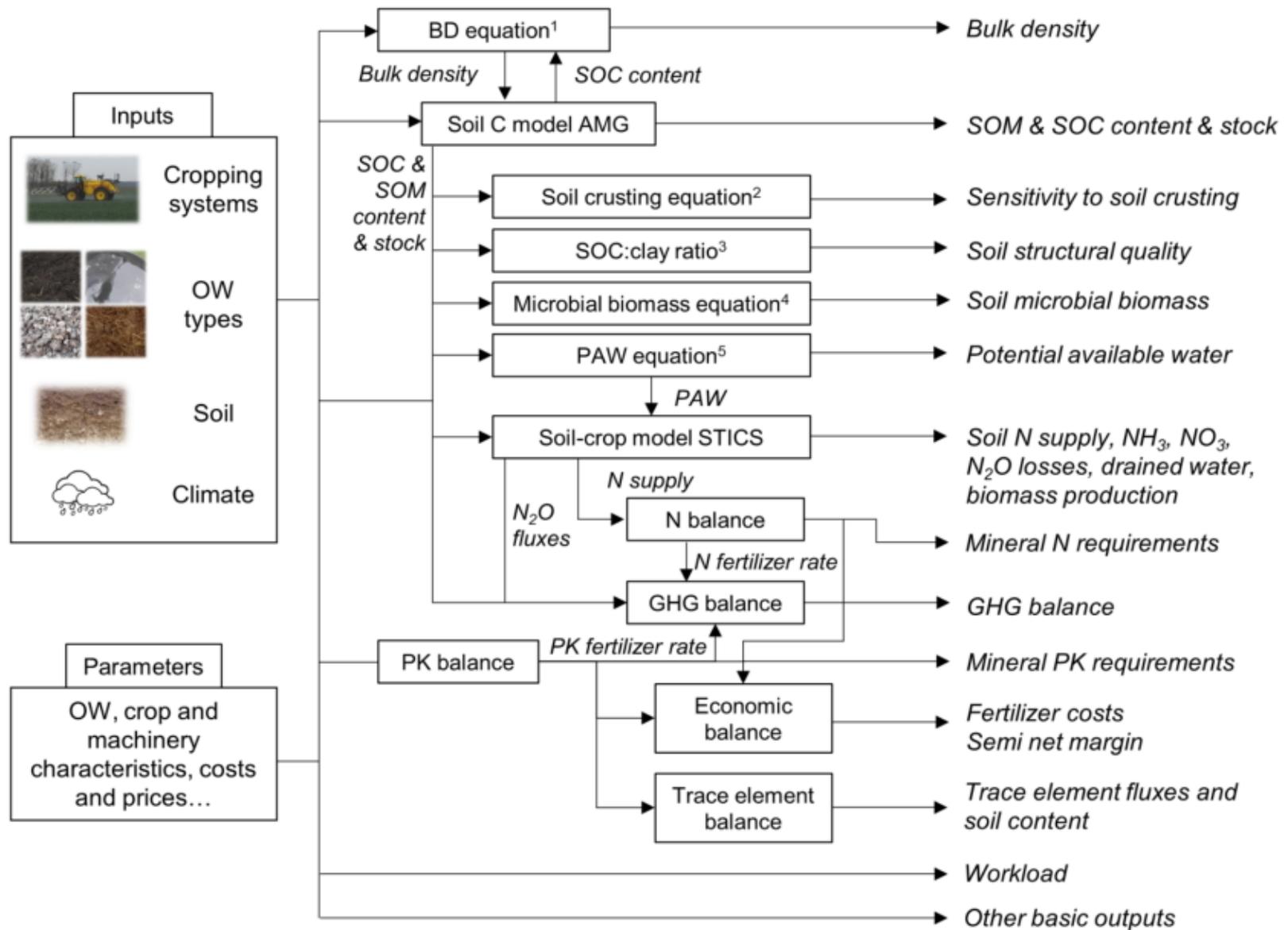
Développement d'un nouvel outil

- Enquêtes sur les effets considérés : tous les effets sont importants à considérer !
- Des outils existants pour estimer ces effets, mais avec des limites :
 - Non adaptés à la diversité des PRO
 - Non prise en compte des effets long terme
 - Diversité des effets limités

→ Besoin d'un nouvel outil, mais ne pas repartir de zéro :
combinaison de modèles et formalismes existants entre eux au sein
d'un script R, dont AMG (*Clivot et al., 2019*) et STICS (*Brisson et al., 2008*)

- Faciliter la prise en main et la simulation de multiples scénarios :
 - Définition des scénarios dans des fichiers Excel
 - Lancement de l'outil avec 2 lignes de code R
 - Sorties sous formes graphiques et de tableaux de résultats

Structure générale de l'outil PROLEG



¹Cousin et al. (2018), ²Remy and Marin-Lafleche (1974), ³Johannes et al. (2017), ⁴Horrigue et al. (2016), ⁵Rawls et al. (2003)

Usage de STICS dans PROLEG

- Simulation de la rotation définie dans le scénario, aux échéances temporelles définies par l'utilisateur : 0, 20 ans...
 - 1) Génération des fichiers d'entrée STICS par le script R à partir des fichiers de scénario
 - 2) Initialisation du sol dans STICS :
 - MO selon les sorties d'AMG
 - RU selon des équations de pédotransfert (et C selon AMG)
 - 3) 1^{er} run sans fertilisant azoté pour définir les fournitures de N du système
 - 4) Calcul des besoins en fertilisant N selon les fournitures de N simulées et les besoins en N d'après les objectifs de rendement (donnée d'entrée)
 - 5) 2nd run avec apports de fertilisants azotés
 - 6) Extraction des sorties de STICS : fourniture de N, pertes de N, lame d'eau drainée, rendement (pour vérification de l'atteinte de objectifs)

Usage de STICS dans PROLEG

- Simulation de la rotation définie dans le scénario, aux échéances temporelles définies par l'utilisateur : 0, 20 ans...
 - 1) Génération des fichiers d'entrée STICS par le script R à partir des fichiers de scénario
 - 2) Initialisation du sol dans STICS :
 - MO selon les sorties d'AMG
 - RU selon des équations de pédotransfert (et C selon AMG)
 - 3) 1^{er} run sans fertilisant azoté pour définir les fournitures de N du système
 - 4) Calcul des besoins en fertilisant N selon les fournitures de N simulées et les besoins en N d'après les objectifs de rendement (donnée d'entrée)
 - 5) 2nd run avec apports de fertilisants azotés
 - 6) Extraction des sorties de STICS : fourniture de N, pertes de N, lame d'eau drainée, rendement (pour vérification de l'atteinte de objectifs)
- Simulation d'une rotation avec la même année climatique répétée sur la durée de la rotation, mais plusieurs années (simulations) possibles
- « Bypass » de STICS pour la volatilisation NH_3 : remplacement par Alfam (*Hafner et al., 2019*)

Base de données de paramètres associée

- Fichiers csv
- Base de données PRO (environ 40 PRO) :
 - Caractéristiques physico-chimiques (*Houot et al., 2014*)
 - Paramètres de minéralisation (*Levavasseur et al., 2021*)
- Base de données GES (*Arvalis, 2020*) : machinisme, engrais, émissions amont PRO (traitement, stockage)
- Coût (*APCA, 2018*) et temps de travail (*Hirschy et al., 2015*) liés aux opérations culturales et intrants
- Besoin N des cultures, exportations P et K des cultures (*COMIFER*)
- Stratégie phyto moyenne (*Agreste*)
- Climat : séries climatiques de quelques stations (données internes)
- Paramètres STICS et AMG
- ...

Interface de saisie des scénarios

Onglet ITK

Renseignements généraux							
rang	Culture	Type	Période de simulation		AB	Unité	Rendement
			Début	Fin			
1	colza	principale	02/07/2020	15/07/2021	non	qx/ha (9% h)	40
2	ble tendre hiver	principale	16/07/2021	15/07/2022	non	qx/ha (15% h)	85
3	couvert_cruciferes	couvert	16/07/2022	16/11/2022	non	t MS/ha	2
4	mais grain	principale	17/11/2022	25/10/2023	non	qx/ha (15% h)	90
5	ble tendre hiver	principale	26/10/2023	15/07/2024	non	qx/ha (15% h)	80
6	orge hiver	principale	16/07/2024	01/07/2025	non	qx/ha (15% h)	75

Travail du sol					
Travail 1			Travail 2		
Date	Type	Profondeur	Date	Type	Profondeur
05/08/2020	dechaumage	10	24/08/2020	vibroculteur	5
10/08/2021	dechaumage	10	08/10/2021	vibroculteur	5
24/08/2022	dechaumage	10	15/11/2022	labour	25
01/04/2023	dechaumage	10	15/04/2023	vibroculteur	5
26/10/2023	labour	25	27/10/2023	vibroculteur	10
20/08/2024	dechaumage	10	01/10/2024	vibroculteur	5

Semis	
Date	Outil
25/08/2020	semis cereales
10/10/2021	semis cereales
25/08/2022	semis cereales
16/04/2023	semis monograine
28/10/2023	semis cereales
02/10/2024	semis cereales

Fertilisation & amendement organique					
Action 1					
Date	Type	Outil	Enfouissement	Délai (h)	Dose (t/ha)
25/09/2022	compost dechets verts	epandeur fumier			30

Stratégie phyto	Récolte (hors prairies et couverts)		
	Date	Outil	Restitution
moyenne IDF	15/07/2021	moissonneuse batteuse	pailles
moyenne IDF	15/07/2022	moissonneuse batteuse	pailles
absence			
moyenne IDF	25/10/2023	moissonneuse batteuse	pailles
moyenne IDF	15/07/2024	moissonneuse batteuse	pailles
moyenne IDF	01/07/2025	moissonneuse batteuse	pailles

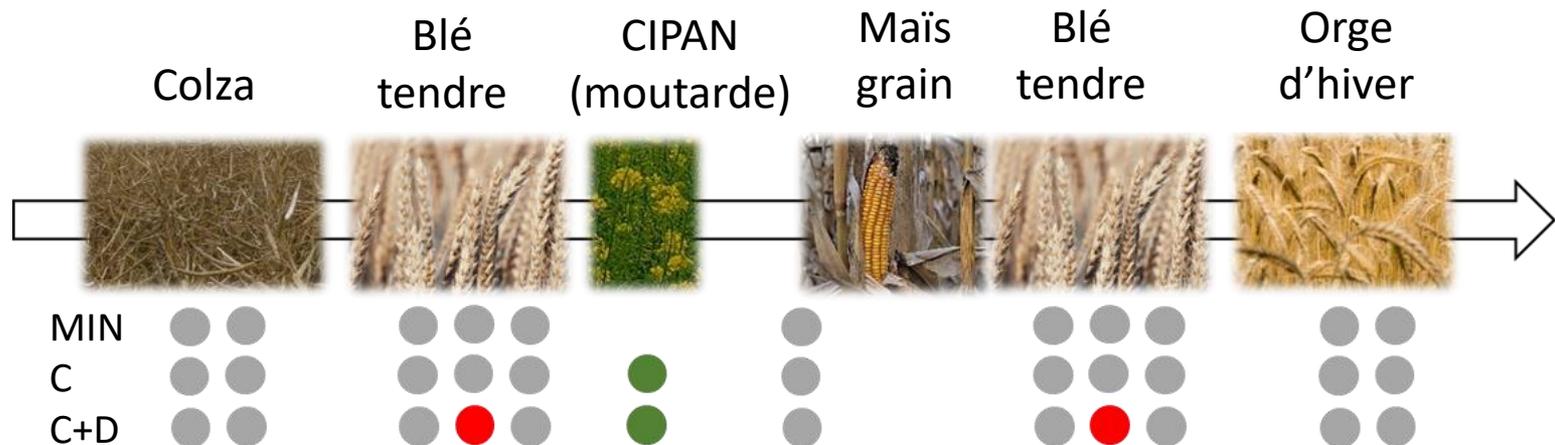
Onglet sol

Horizon	Epaisseur (cm)	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables	% Calcaire	pH	% Matière organique	Fraction inerte de la matière organique	C/N	% éléments grossiers (vol)	Type EG	Densité apparente	Potentiel de dénitrification (kg N/ha/jour)	Couleur	Cd (mg/kg MS)
Horiz1	25	17	30	50	3	0	7	2,02		10	0			0,5	jaune	
Horiz2	35	17			3						0					
Horiz3	40	25			3						0					
Horiz4																
Horiz5																

Données optionnelles

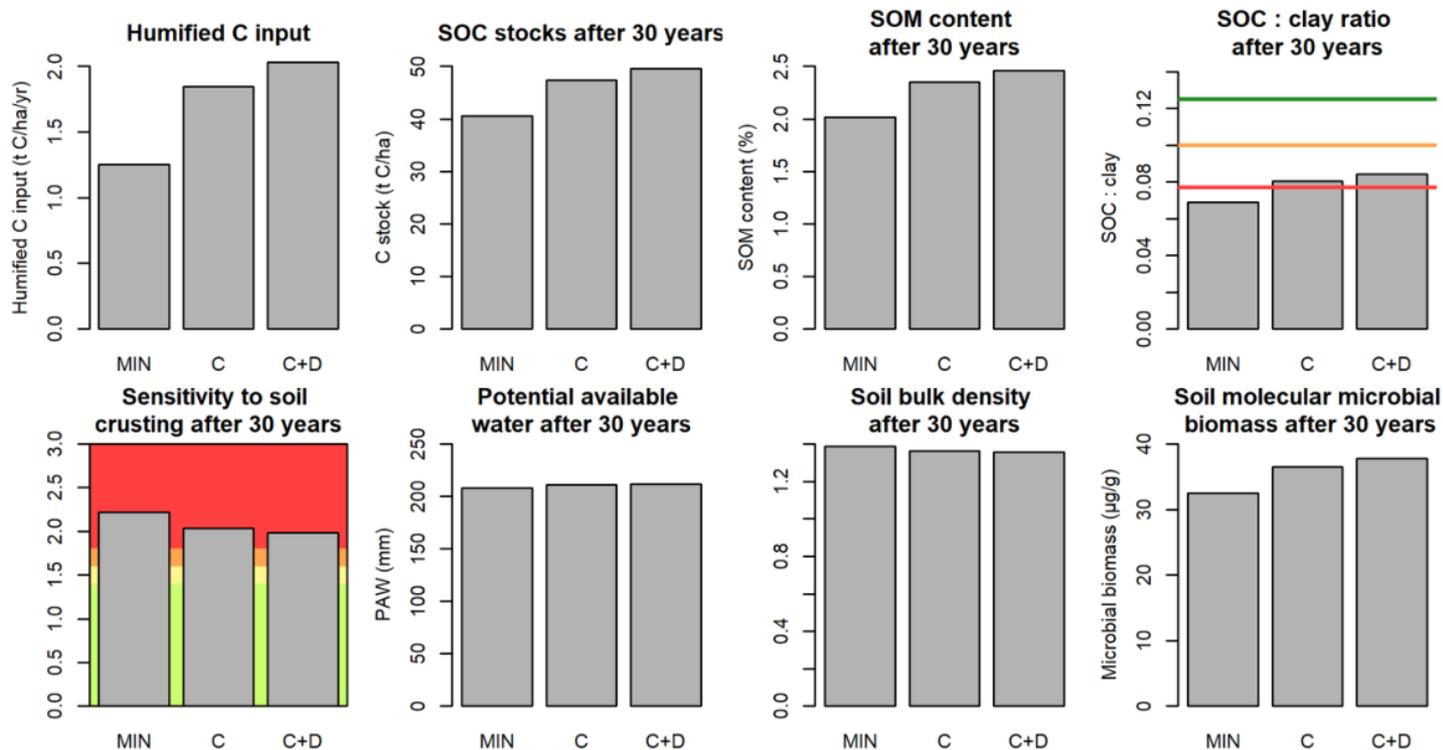
Présentation du cas d'étude

- Rotation classique du bassin parisien, sur un sol limoneux décarbonaté moyennement profond (1 m)
- Trois scénarios évalués :
 - MIN : engrais minéraux seulement
 - C : compost de déchets verts ● + engrais minéral ●
 - C+D : compost de déchets verts ● + digestat de biodéchets ● + engrais minéral ●
- Evaluation à 0 et 30 ans



Résultats - carbone

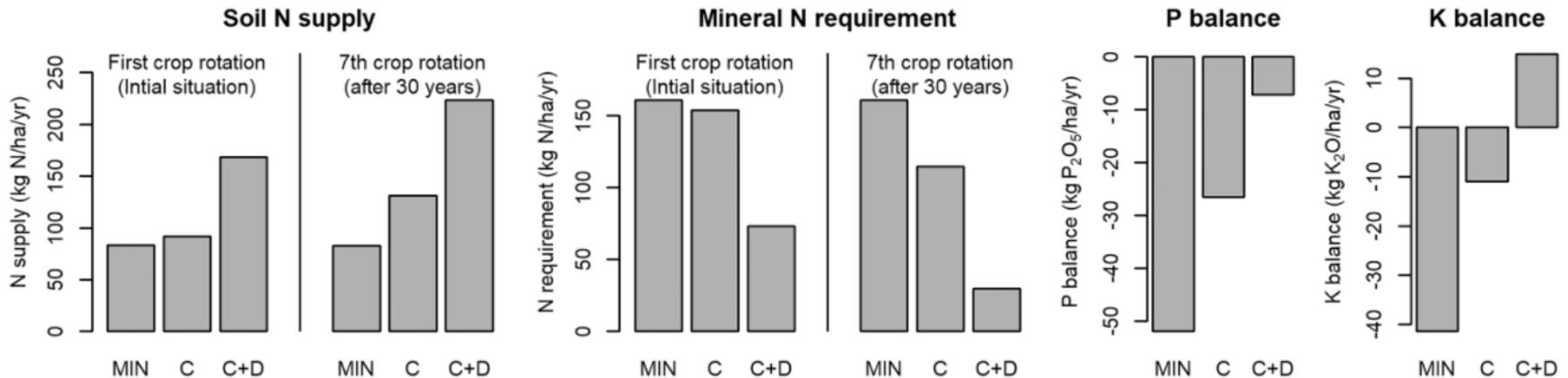
- ↗ des entrées de C humifié avec le compost : ↗ des stocks à 30 ans
- Légère amélioration de la structure du sol, peu d'effet sur la RU, légère ↘ densité, ↗ de la biomasse microbienne...
- Peu d'effet du digestat en plus du compost



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

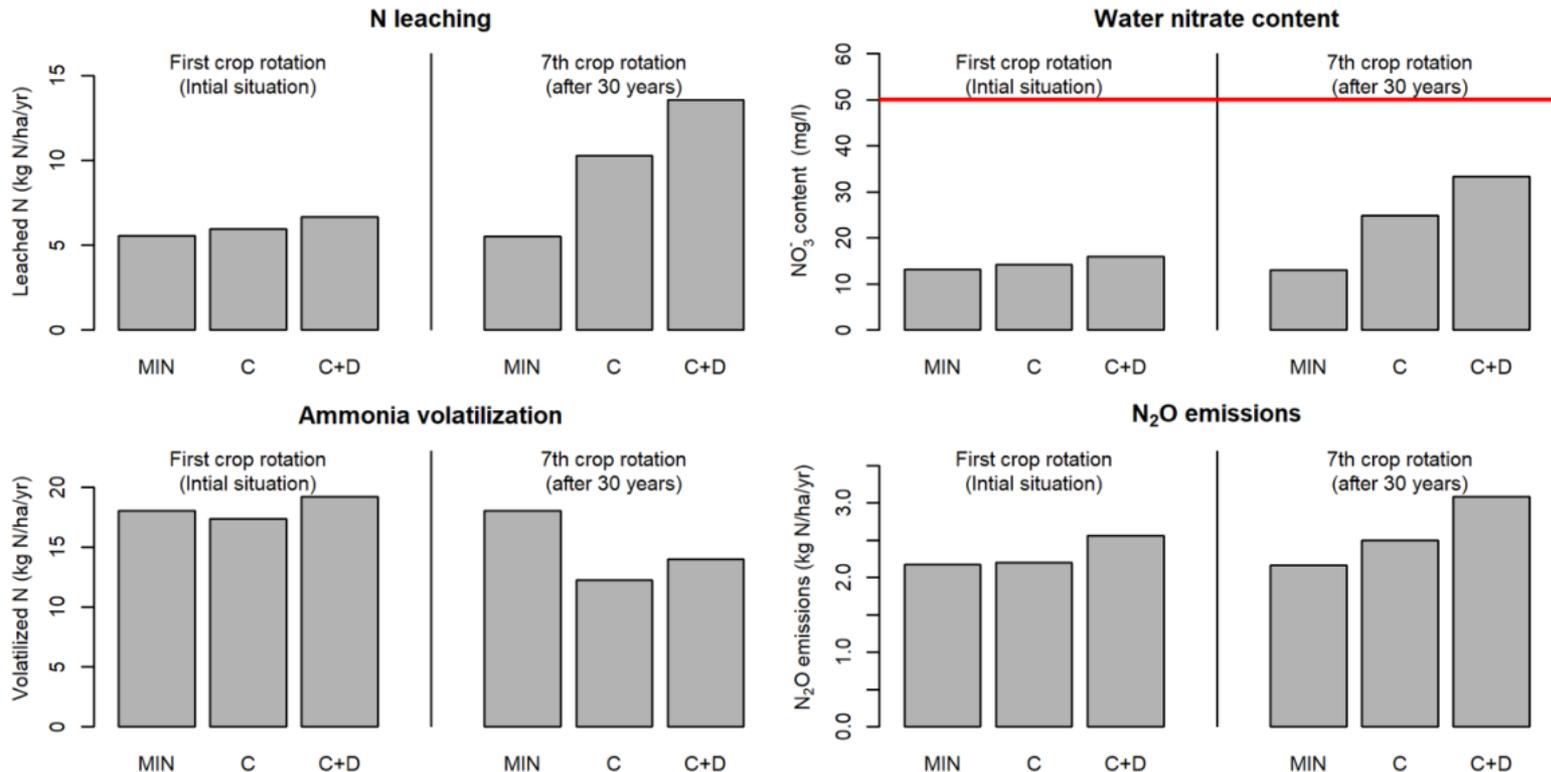
Résultats - fertilisation

- Compost : ↗ fourniture de N du sol et économies d'engrais N à long terme seulement
- Digestat : ↗ fourniture de N du sol et économies d'engrais N dès le début
- P et K : proche de l'autonomie, voire risque d'excès avec compost + digestat



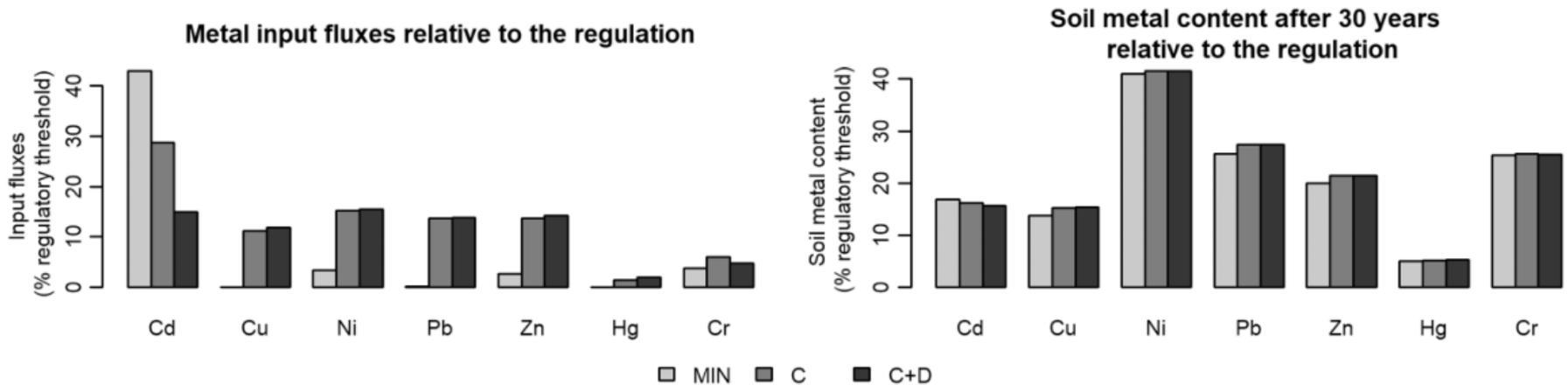
Résultats – pertes de N

- ↗ du risque de perte par lixiviation et émissions de N_2O avec compost (avec ou sans digestat) à long terme suite à ↗ MO du sol
- Volatilisation :
 - ↗ à court terme avec digestat
 - ↘ à long terme suite aux économies d'engrais N



Résultats – contamination du sol en ETM

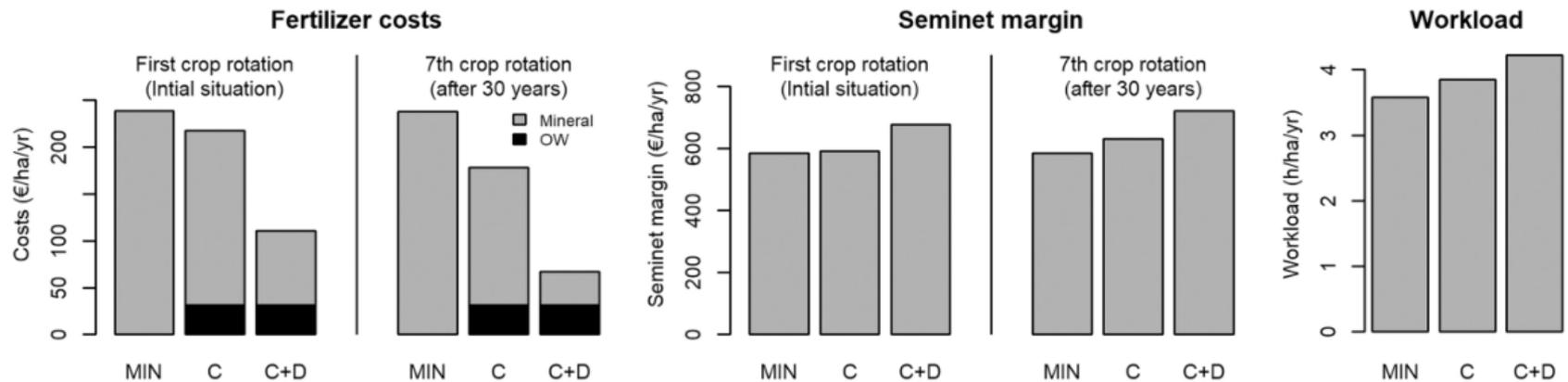
- ↗ entrées d'ETM dans les sols avec les PRO, sauf en Cd (substitution d'engrais phosphaté contaminés)
- Teneur simulée en ETM des sols après 30 ans similaire entre les scénarios et très < seuil réglementaire



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

Résultats économiques

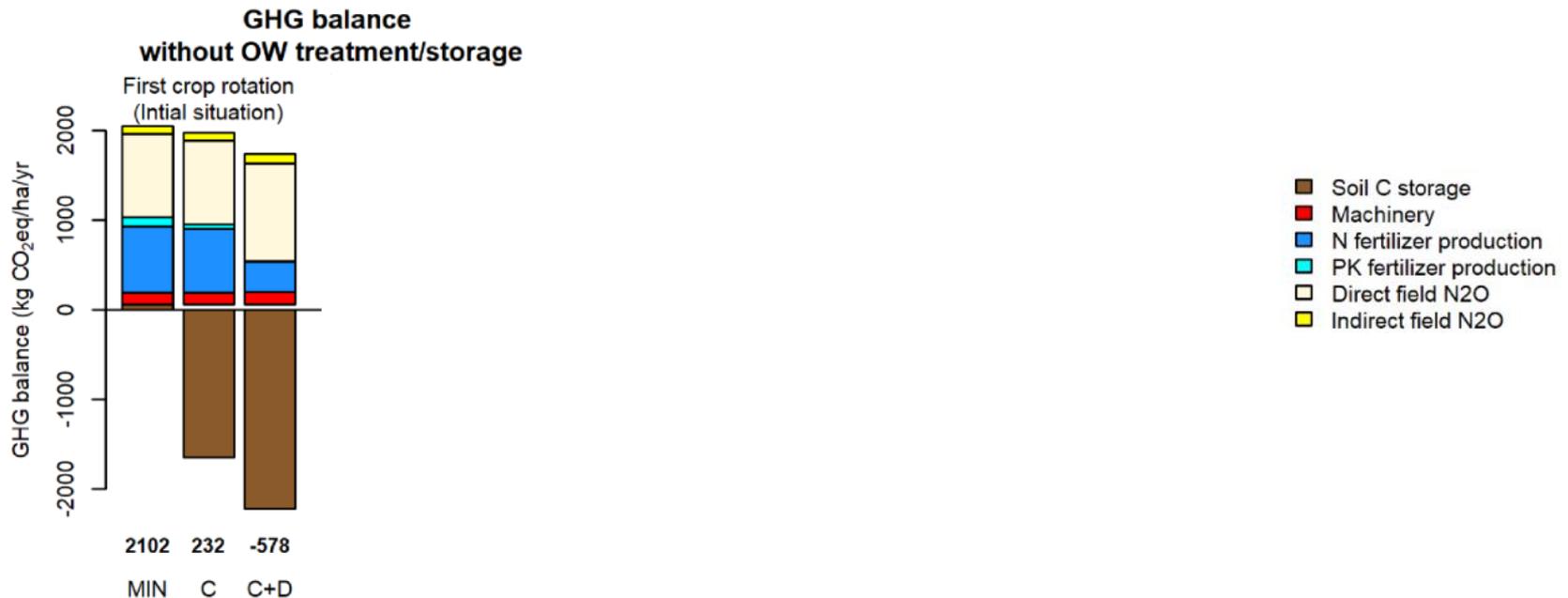
- Avec PRO :
 - Forte diminution des charges en fertilisants
 - Augmentation de la marge semi-nette
 - Augmentation du temps de travail



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

Résultats – bilan GES

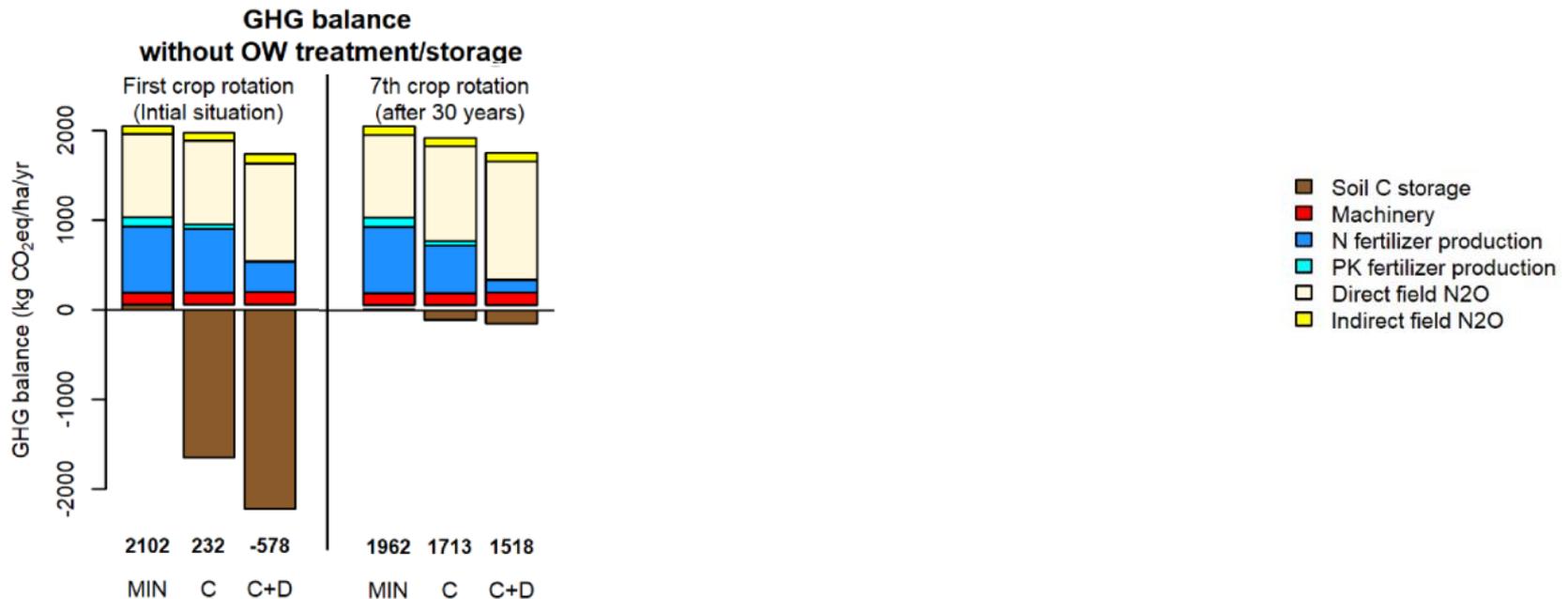
- 1^{ère} rotation : forte amélioration du bilan GES avec compost grâce au stockage de C, amélioration supplémentaire avec digestat (- engrais N)



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

Résultats – bilan GES

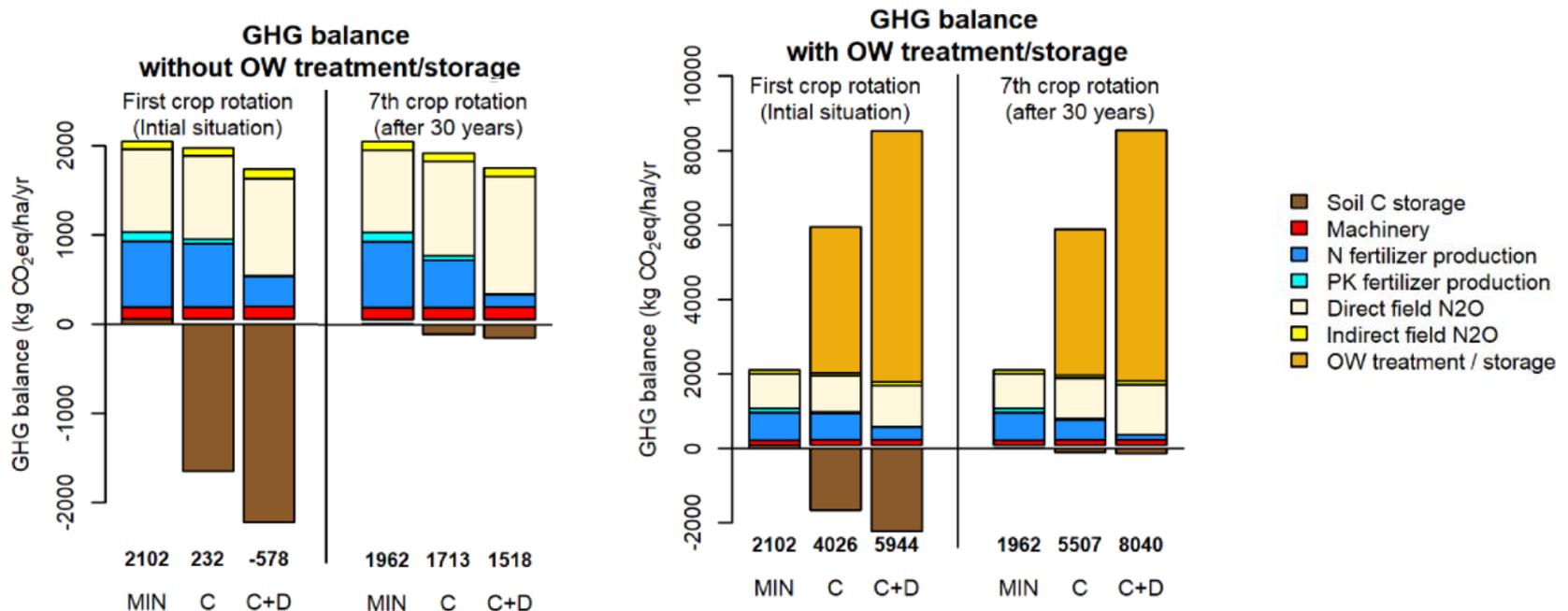
- 1^{ère} rotation : forte amélioration du bilan GES avec compost grâce au stockage de C, amélioration supplémentaire avec digestat (- engrais N)
- 7^{ème} rotation (30 ans) : pas de stockage C additionnel, mais économies d'engrais N améliorent le bilan GES, malgré \nearrow du N₂O



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

Résultats – bilan GES

- 1^{ère} rotation : forte amélioration du bilan GES avec compost grâce au stockage de C, amélioration supplémentaire avec digestat (- engrais N)
- 7^{ème} rotation (30 ans) : pas de stockage C additionnel, mais économies d'engrais N améliorent le bilan GES, malgré ↗ du N₂O
- Avec les émissions amont : meilleur bilan GES avec fertilisation minérale uniquement, mais incertitudes des émissions amont, choix méthodo....



MIN : engrais minéraux, C : compost de déchets verts + MIN, C+D : digestat de biodéchets + C

Conclusion et perspectives

- Intérêt de l'outil pour évaluer conjointement de multiples effets des PRO à court et long terme
- Besoin d'une évaluation des performances de simulation ?
- Incertitudes des bilans GES (simulation du N₂O au champ, émissions amont)
- Envisageable d'intégrer des effets d'intérêt supplémentaires (tassement du sol...)
- D'autres effets importants plus délicats (évolution du pH du sol...)

Conclusion et perspectives

- Intérêt de l'outil pour évaluer conjointement de multiples effets des PRO à court et long terme
- Besoin d'une évaluation des performances de simulation ?
- Incertitudes des bilans GES (simulation du N₂O au champ, émissions amont)
- Envisageable d'intégrer des effets d'intérêt supplémentaires (tassement du sol...)
- D'autres effets importants plus délicats (évolution du pH du sol...)

- Outil principalement utilisé dans des projets de recherche
- Mobilisé en appui aux politiques publiques (étude pour la DRIAAF sur la méthanisation)
- Transfert à INRAE Transfert en cours
- Avenir de l'outil : documentation, maintien, support... ?

Merci pour votre attention

- APCA, 2018. Coûts des Opérations Culturelles 2018 des Matériels Agricoles. Un référentiel pour le calcul des coûts de production et le barème d'entraide.
- Arvalis, 2020. GES'TIM+ : la référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air.
- Brisson N, Launay M, Mary B, Beaudoin N (2008) Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, Editions Quae (ed)
- 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>
- COMIFER, 2019. La fertilisation P – K – Mg. Les bases du raisonnement.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies.
- Cousin, I., Ly, A., Duparc, P.B., Champolivier, L., Bernicot, M.-H., 2018. Evaluating pedotransfer functions for the estimation of soil bulk density on cultivated fields. Presented at the 21. International Soil Tillage Research Organization (ISTRO). 2018 ISTRO Conference. 237–256. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Hafner, S.D., Pacholski, A., Bittman, S., Carozzi, M., Chantigny, M., Géniermont, S., Häni, C., Hansen, M.N., Huijsmans, J., Kupper, T., Misselbrook, T., Neftel, A., Nyord, T., Sommer, S.G., 2019. A flexible semi-empirical model for estimating ammonia volatilization from field-applied slurry. Atmospheric Environment 199, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.034>
- Hirschy, M., Ravier, C., Lorin, M., 2015. CRITER 5.4 - Un outil de caractérisation des performances de systèmes de culture.
- Horrigue, W., Dequiedt, S., Chemidlin Prévost-Bouré, N., Jolivet, C., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Bispo, A., Maron, P.-A., Ranjard, L., 2016. Predictive model of soil molecular microbial biomass. Ecological Indicators 64, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.004>
- Houot, S., Pons, M.N., Pradel, M., 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'expertise scientifique collective.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? Geoderma 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Levavasseur, F., Lashermes, G., Mary, B., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Houot, S., 2021. Quantifying and simulating carbon and nitrogen mineralization from diverse exogenous organic matters. Soil Use and Management 38, 411–425. <https://doi.org/10.1111/sum.12745>
- 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>
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M., Bloodworth, H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. Geoderma, Quantifying agricultural management effects on soil properties and processes 116, 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Remy, J.C., Marin-Lafleche, A., 1974. Soil analysis: Realization of an automatic interpretation programme. Annales agronomiques 25, 607–632.