



Séquestration du Carbone dans les sols

Contribution des Produits Résiduaux Organiques

Contexte et témoignage d'un membre de RECORD

Isabelle DEPORTES, ADEME

Présentation de l'étude RECORD

Florent LEVAVASSEUR, INRAE

Journée de restitution
| 23 novembre 2023 | Saint Denis

Séquestration du Carbone dans les sols – Contribution des PRO

Contexte

INRAé & stockage de carbone additionnel dans les sols agricoles => ambition 4 pour 1000

Intérêt des PRO autres que les effluents d'élevages ?

Intérêt pour l'ADEME

Faire un outil d'appropriation par les acteurs des possibilités (ou non) de stockage du carbone via les PRO

Résultats et valorisations

Des leviers identifiés plus ou moins forts : séquestration C ou des économies d'engrais

Résultats de l'étude valorisés dans une étude ADEME en cours (stockage C)

Aller vers l'usage de nouvelles ressources (effluents humains)

Journée de Restitution RECORD

Jeudi 23 novembre 2023, Paris-Saint Denis

Séquestration du Carbone dans les sols – Contribution des Produits Résiduaux Organiques

Florent Levavasseur¹, Louis Sicard², Sylvaine Berger², Sabine Houot¹

¹ INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, UMR ECOSYS, Palaiseau

² Solagro, Toulouse

Introduction

- Rôle central du carbone (C) dans les sols agricoles
- Production de déchets organiques, par diverses activités :
 - Agriculture : effluents d'élevage (lisier, fumier...)
 - Ville : déchets verts, déchets alimentaires, boues de station d'épuration...
 - Industrie : boues d'agro-industrie, boue papetière, déchets d'abattoir...
- 150 Mt/an de déchets recyclés bruts ou après traitement (compostage, méthanisation...) en agriculture pour leur intérêt fertilisant et amendant → Produits Résiduaire Organiques (PRO)
- **Tous ces PRO contiennent +/- de C → potentiel de stockage de C dans les sols**



Claudy Jolivet (INRA)



Stockage de fumier au champ

Contenu de l'étude

- **Objectif de l'étude** : Apporter des connaissances et des recommandations aux acteurs sur l'utilisation des PRO et de l'impact sur le stockage du C dans les sols
- Trois phases consécutives :
 - Analyse bibliographique et entretiens d'acteurs
 - Analyse quantitative sur 4 territoires : inventaire des PRO et modélisation
 - Elaboration de recommandations
- Déroulé : 2021-2022

Contribution des Produits Résiduels Organiques à la séquestration du carbone dans les sols



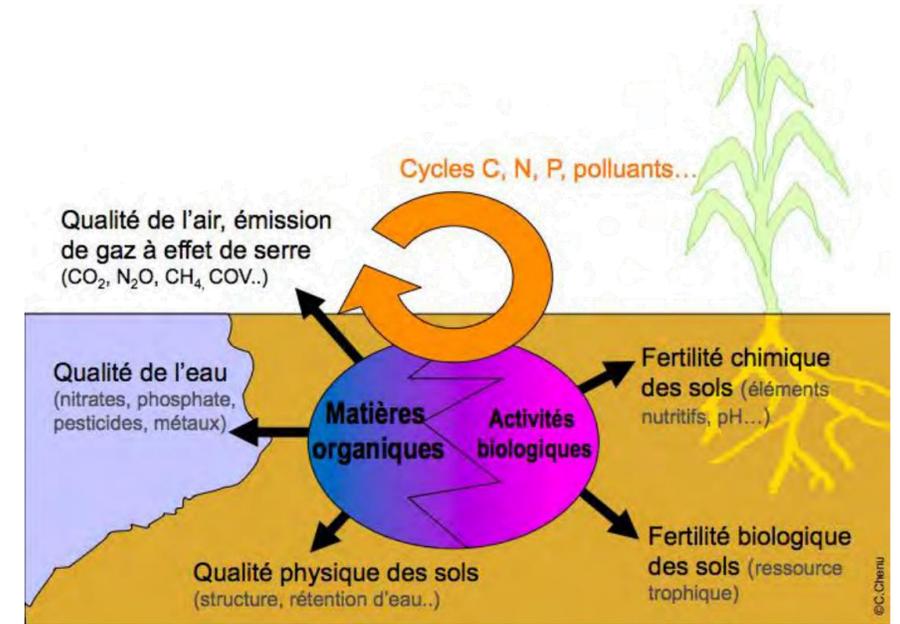
C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

RECORD 20-0518/1A novembre 2022



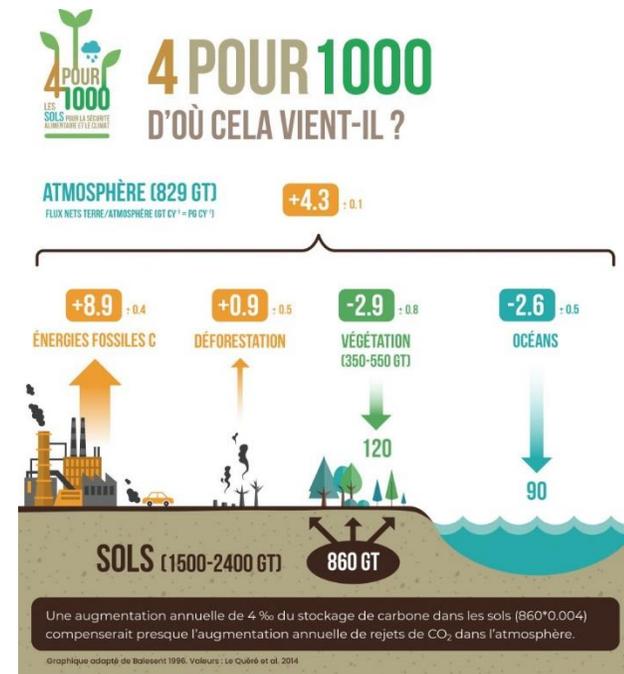
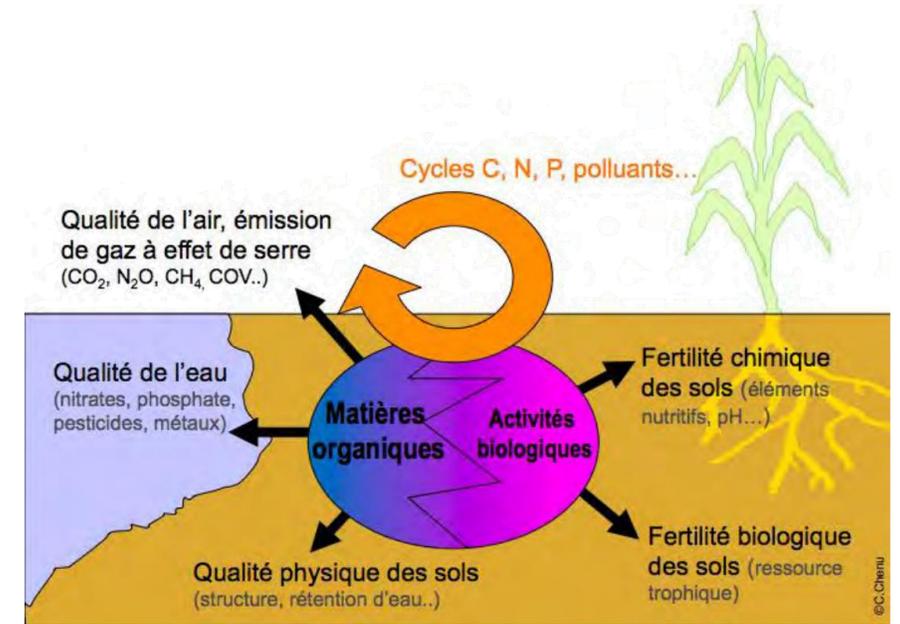
Rôle du C dans les sols

- Matière organique des sols = C, N, P...
- ≈ 1 kg C dans 1,72 kg matière organique
- Rôles multiples de la matière organique des sols :
 - Fertilité chimique
 - Qualité physique
 - Fertilité biologique
- En interaction avec la qualité de l'eau et de l'air



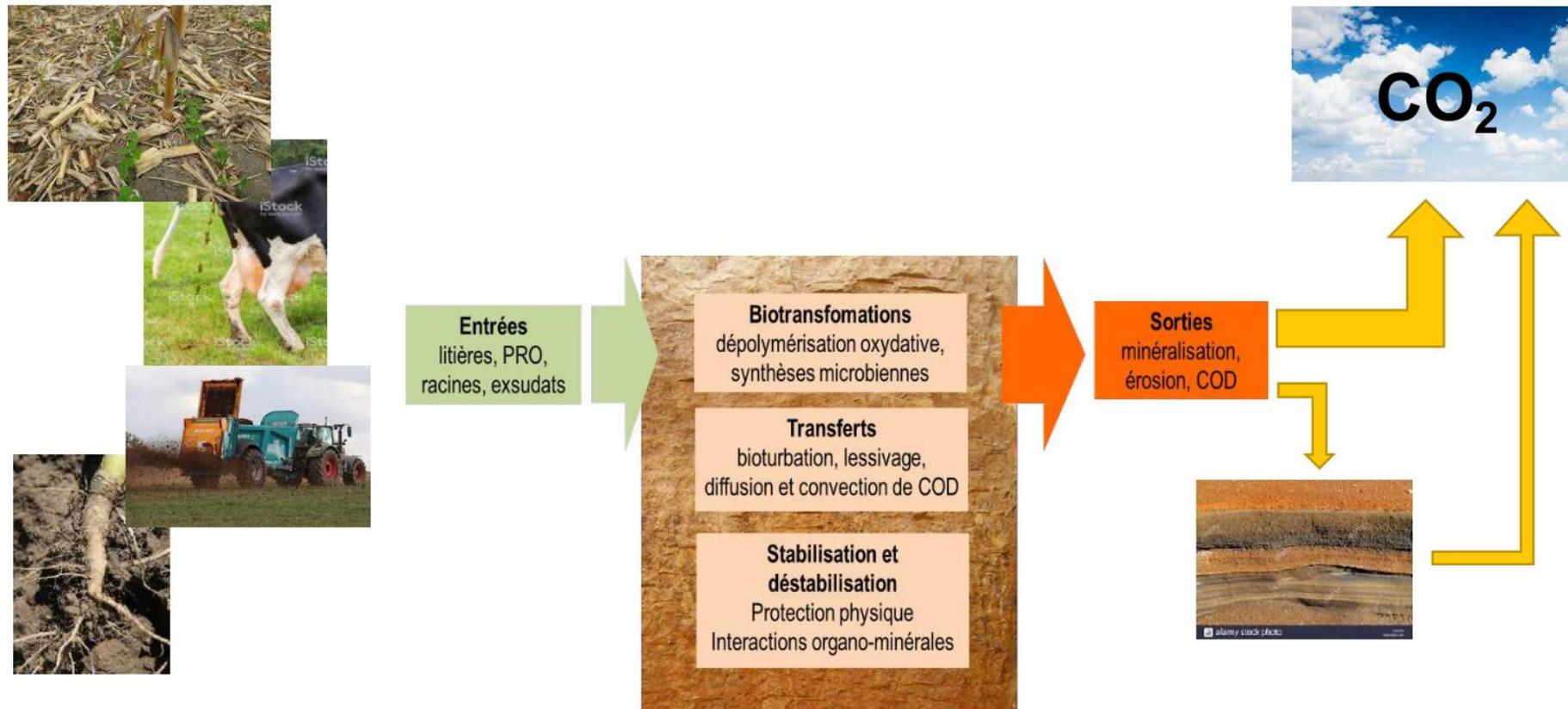
Rôle du C dans les sols

- Matière organique des sols = C, N, P...
- ≈ 1 kg C dans 1,72 kg matière organique
- Rôles multiples de la matière organique des sols :
 - Fertilité chimique
 - Qualité physique
 - Fertilité biologique
- En interaction avec la qualité de l'eau et de l'air
- Potentiel atténuation du changement climatique :
 - le C stocké dans le sol n'est pas dans l'air !
 - 2 400 Gt de C stocké dans les sols à l'échelle planétaire = 3 fois la quantité présente dans l'atmosphère
 - Initiative 4 pour 1000 : ↗ stocks de C du sol de 4% par an pourrait « compenser » les émissions anthropiques de gaz à effet de serre



Stockage de C dans les sols

- Solde entre les :
 - entrées de C (résidus de culture, racines, PRO)
 - sorties de C, majoritairement par minéralisation en CO_2 par les microorganismes du sol, variable selon les contextes pédoclimatiques principalement

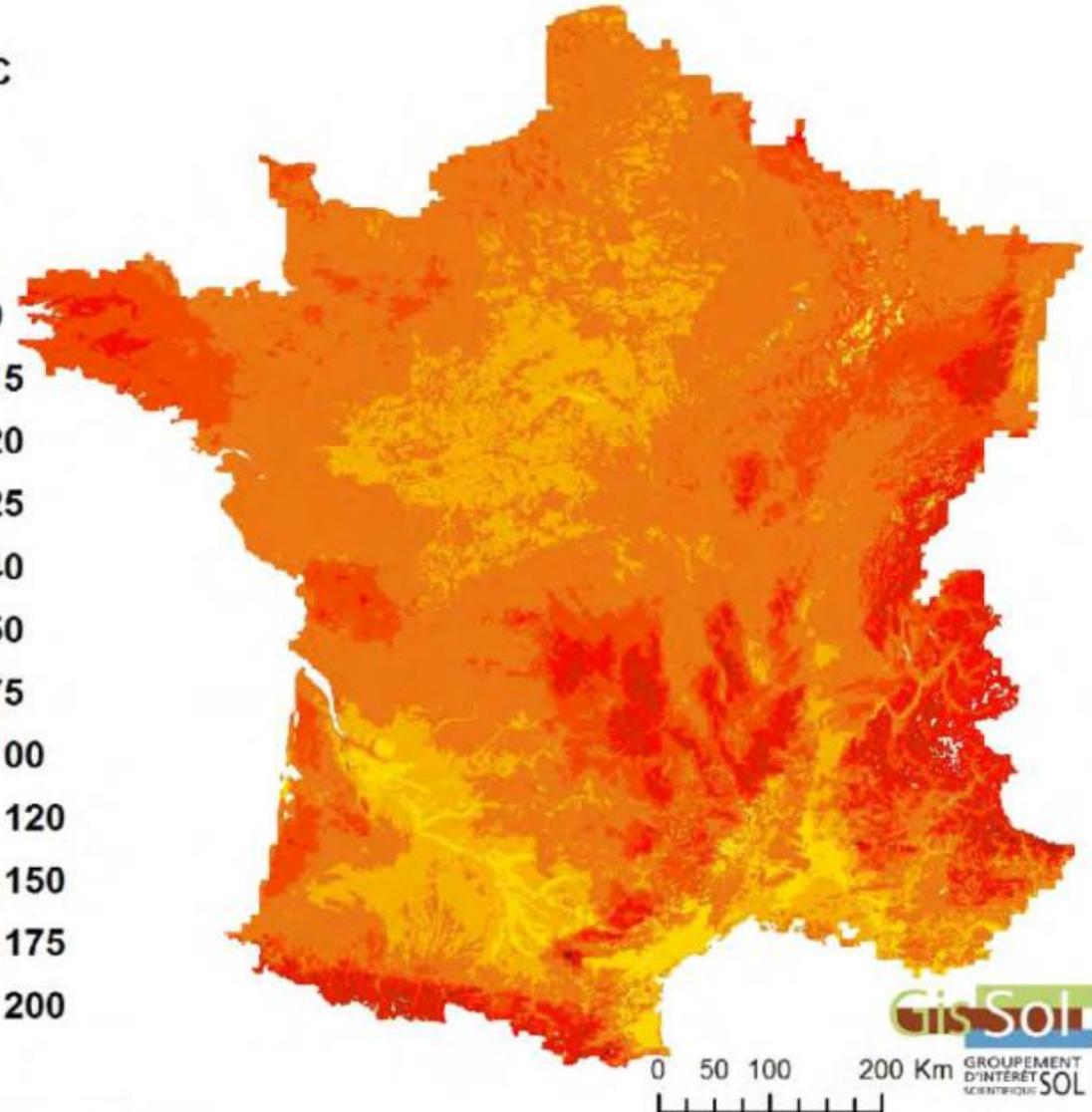
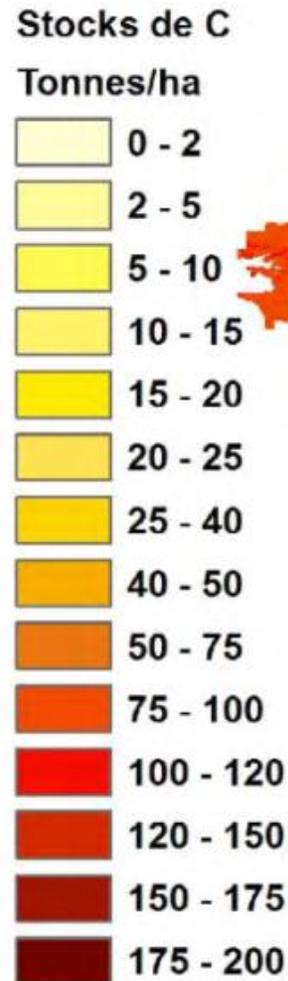


Pellerin et al. (2020)

Les stocks de C des sols français

- Des stocks fortement conditionnés par le mode d'occupation du sol, en interaction avec le pédoclimat (dont altitude) :
 - Plus élevés en altitude, plus faibles en zones de plaine
 - Plus élevés sous forêt, prairie permanente, plus faibles sous grande culture

Occupation du sol	Stock moyen 0-30 cm (t C/ha)
Grande culture	52
Prairie permanente	85
Forêt	81

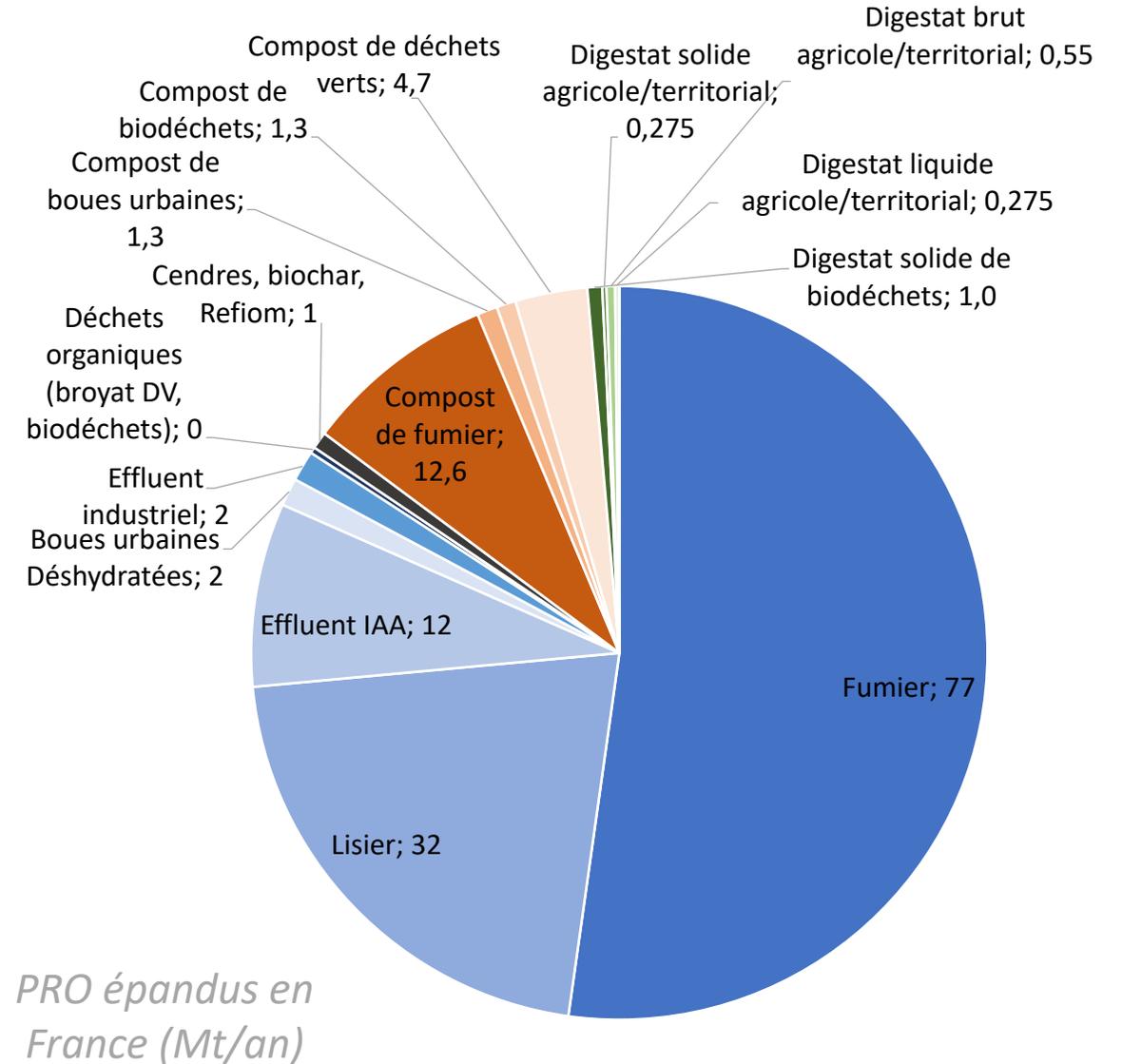


Source: Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.

Les gisements de PRO en France et les tendances

Houot et al. (2014), Icare&consult (2020)

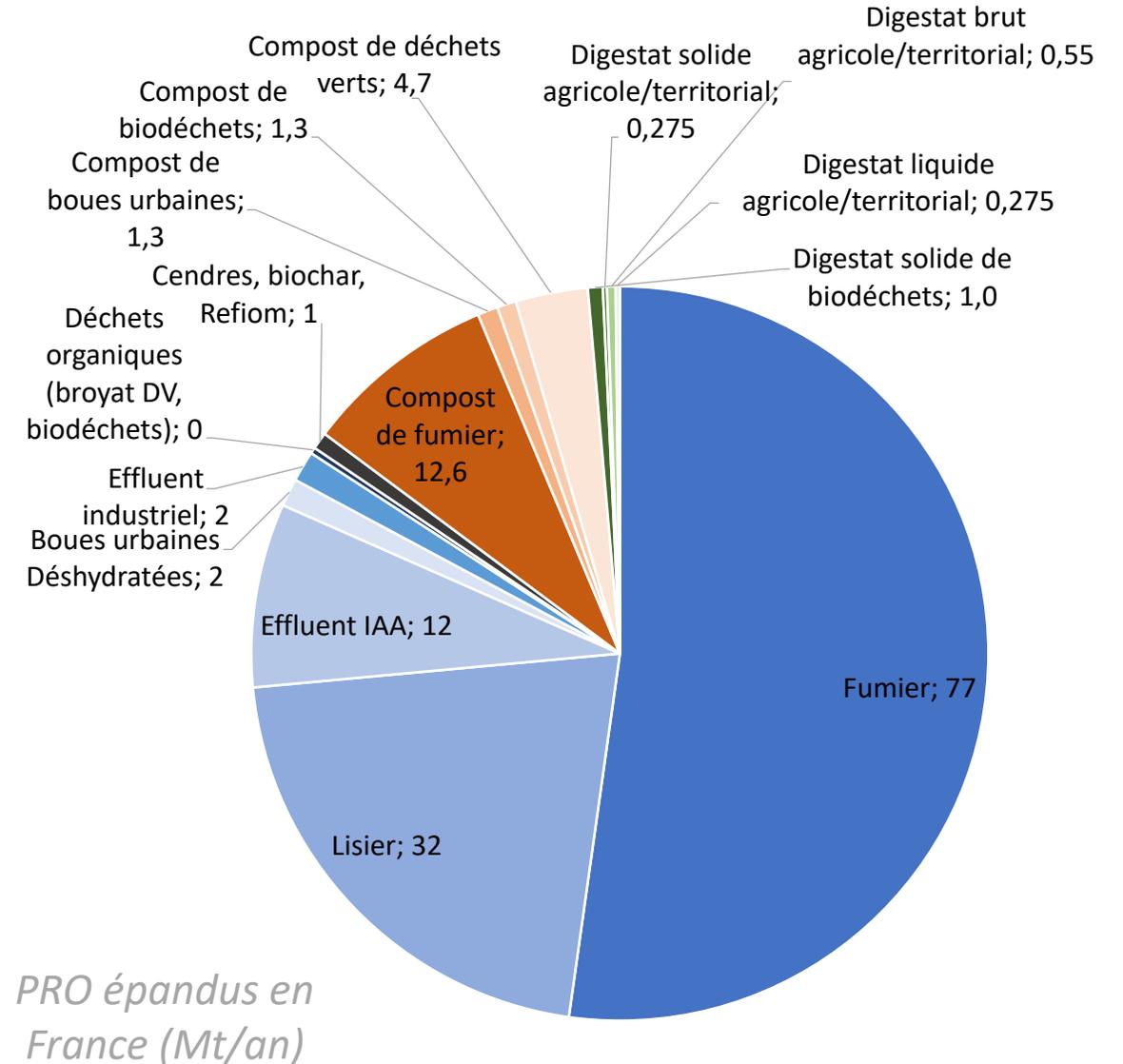
- Environ 150 Mt/an de PRO (= quantités qui sont retournées au sol)
- Essentiellement d'origine agricole (120 Mt brut/an lisier, fumier)
- Plus de 80% épandu en brut, le reste essentiellement compost



Les gisements de PRO en France et les tendances

Houot et al. (2014), Icare&consult (2020)

- Environ 150 Mt/an de PRO (= quantités qui sont retournées au sol)
- Essentiellement d'origine agricole (120 Mt brut/an lisier, fumier)
- Plus de 80% épandu en brut, le reste essentiellement compost
- Tendances :
 - Diminution du cheptel et donc des PRO d'élevage
 - Augmentation de la valorisation des biodéchets avec la généralisation du tri à la source au 1^{er} janvier 2024 (loi AGEC)
 - Développement de la méthanisation des PRO



PRO et stockage de C

- Contribution d'un PRO au stockage de C du sol dépend de plusieurs facteurs:
 - Dose et fréquence d'apport : tous les PRO ne sont pas apportés à la même dose et à la même fréquence (disponibilité, apports d'éléments fertilisants...)
 - Teneur en C du PRO
 - Facteur de conversion en C du sol \approx résistance à la décomposition de la MO par les micro-organismes du sol
 - Conditions pédoclimatiques

PRO et stockage de C

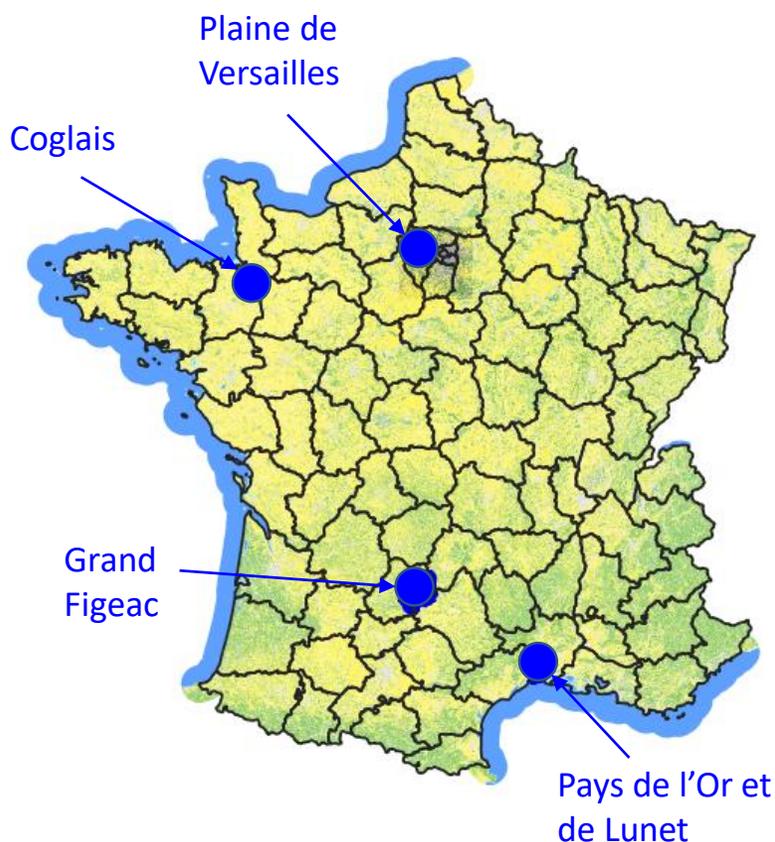
- Contribution d'un PRO au stockage de C du sol dépend de plusieurs facteurs:
 - Dose et fréquence d'apport : tous les PRO ne sont pas apportés à la même dose et à la même fréquence (disponibilité, apports d'éléments fertilisants...)
 - Teneur en C du PRO
 - Facteur de conversion en C du sol \approx résistance à la décomposition de la MO par les micro-organismes du sol
 - Conditions pédoclimatiques

Exemple de stockage de C additionnel pour différentes pratiques d'apport de PRO (Pellerin et al., 2020)

	PRO	Fumier bovin	Lisier porcin	Boue de station d'épuration
×	Dose (t MB/ha)	40	40	10
×	Fréquence d'apport (an)	3	2	3
=	Teneur en C (% MB)	10	3	3
×	Dose de C apporté en 20 ans	27	11	2
=	Facteur de conversion (t C sol/t C PRO apporté)	0.36	0.18	0.3
	Stockage de C en 20 ans	9.7	1.9	0.7

Analyse quantitative du stockage de C par les PRO sur 4 territoires d'étude

- 4 territoires contrastés en termes d'activités agricoles ou génératrices de PRO, de climat et de sol
- Des scénarios alternatifs de gestion des PRO considérés



Territoire	Agriculture	Autres caractéristiques	Scénario alternatif
Plaine de Versailles	Grandes cultures	Périurbain et fort import de déchets	Méthanisation de biodéchets
Coglais	Elevage bovin et porcin	Rural + IAA	Méthanisation d'effluents, de biodéchets
Grand Figeac	Elevage bovin	Rural	Méthanisation d'effluents, de biodéchets
Pays de l'Or et Lunel	Viticulture + grandes cultures	Périurbain	Import de composts de boue, méthanisation de biodéchets

Activités génératrices de PRO sur la plaine de Versailles

- 3 plateformes de compostage de déchets verts
- 14 stations d'épuration
- Peu d'activités non agricoles ou urbaines génératrices de PRO (IAA), hormis les centres équestres
- 1 grosse ferme d'élevage (Grignon) : fumier et lisier
- Fientes de volailles (locales et import)
- Lisier porcin séché (import Bretagne)
- Biodéchets des ménages et assimilés : incinérés pour le moment



www.sede.veolia.com



Compostage de déchets verts



SMRA 68



SMRA 68

Station d'épuration

Boue STEP



C. LOSFELD

Centre équestre



Fumier de cheval



Grands troupeaux magazine

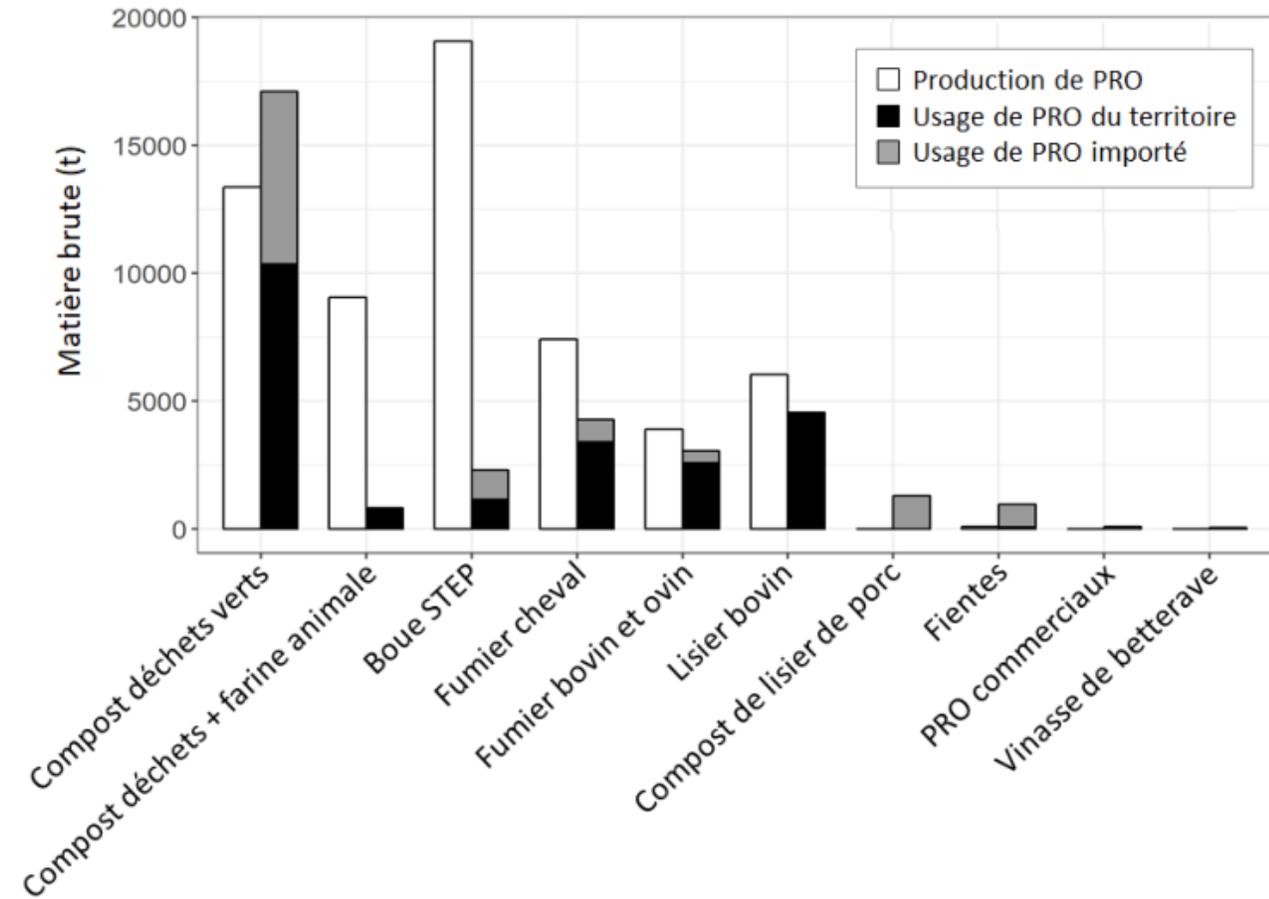
Ferme de Grignon



Fosse à lisier

Gisement de PRO sur la plaine de Versailles et leur utilisation

- Gisements principaux : compost de déchets verts, boues de STEP, fumier de cheval, fumier / lisier bovin
 - Valorisation actuelle des PRO :
 - boues d'épuration majoritairement exportées
 - compost et fumier de cheval principalement valorisés dans la plaine
 - Biodéchets des ménages et assimilés : 68 kt / an incinérés pour le moment dans l'incinérateur du territoire (fortes importations des alentours)
- Potentiel digestat / compost de biodéchets

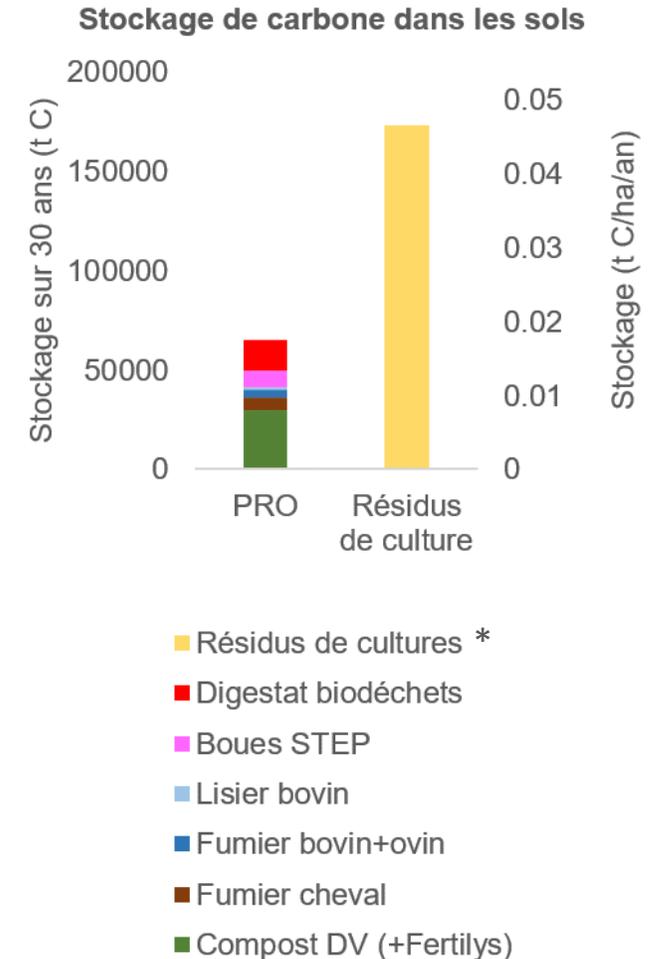


Production et usage annuels de PRO sur la plaine de Versailles en 2018

adapté de Moinard et al. (2021)

Stockage de C sur la plaine de Versailles

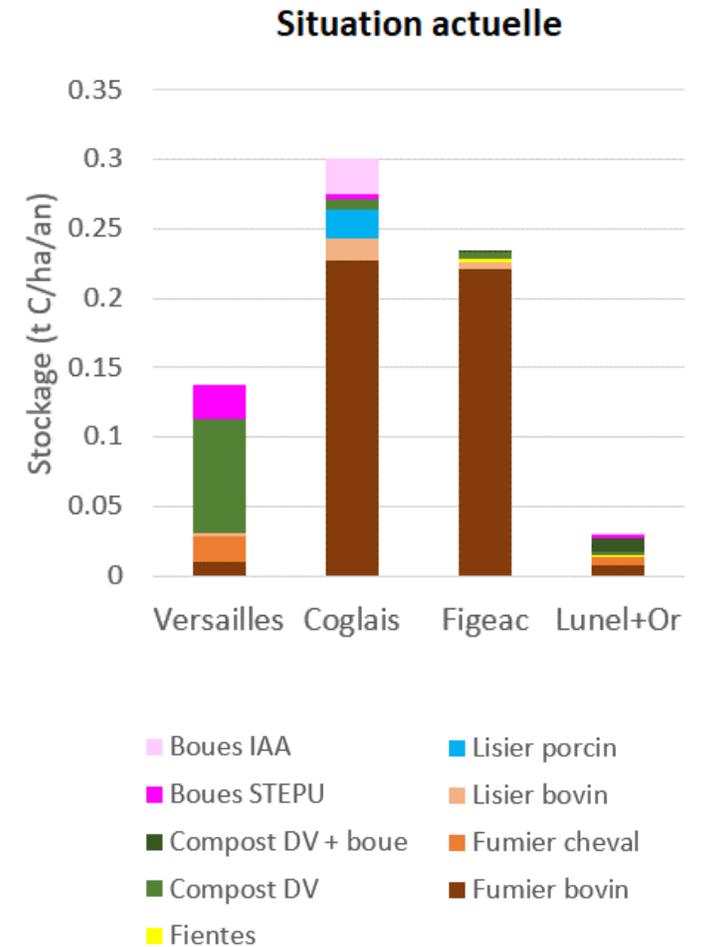
- Stockage de C par les PRO (si tous épandus) :
 - 0.14 t C ha⁻¹ an⁻¹ sur 30 ans
 - Significatif mais faible par rapport au stockage lié aux résidus de culture : 0.48 t C ha⁻¹ an⁻¹
 - PRO = stockage annuel de 3‰, mais déjà effectif, pas additionnel
- Valorisation de l'ensemble des biodéchets en digestat :
 - + 0.04 t C ha⁻¹ an⁻¹ soit 0.8‰ additionnel
 - Mais irréaliste (collecte, surface nécessaire, odeurs...)
- Même avec un fort import de PRO des zones urbaines voisines, stockage lié au PRO reste limité
- Autres gisements envisageables : compostage des biodéchets, biochar, digestat de CIVE...



* assolement et rendement moyens du territoire, tous restitués

Stockage de C actuel sur les territoires

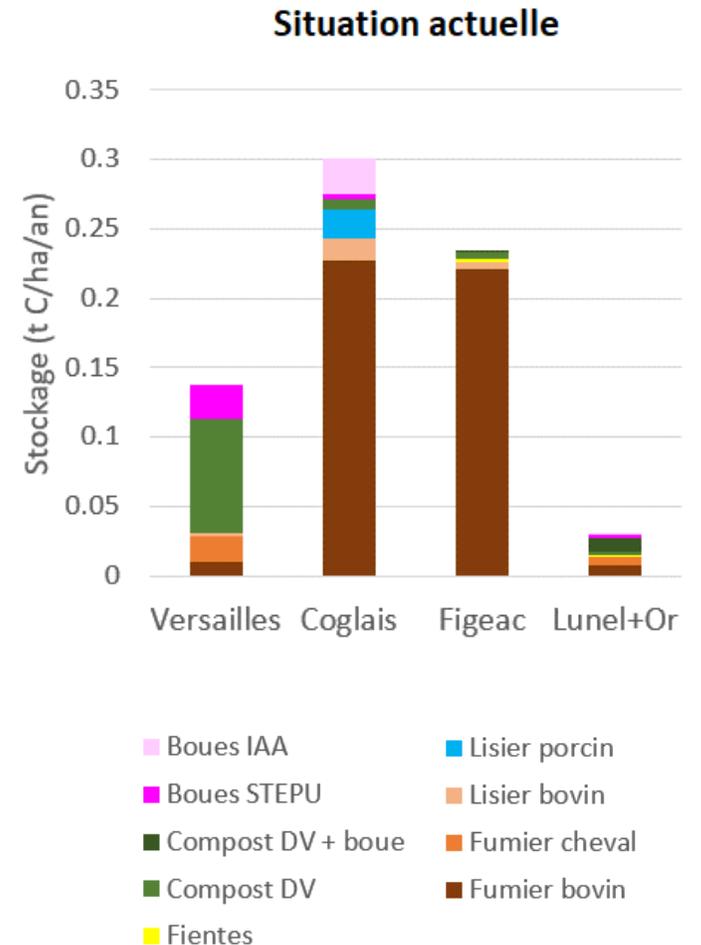
- Différences d'origine et de quantité des PRO selon la proximité de la ville et l'importance de l'élevage
- Différences de stockage potentiel entre territoires



*Stockage de carbone potentiel
en 30 ans*

Stockage de C actuel sur les territoires

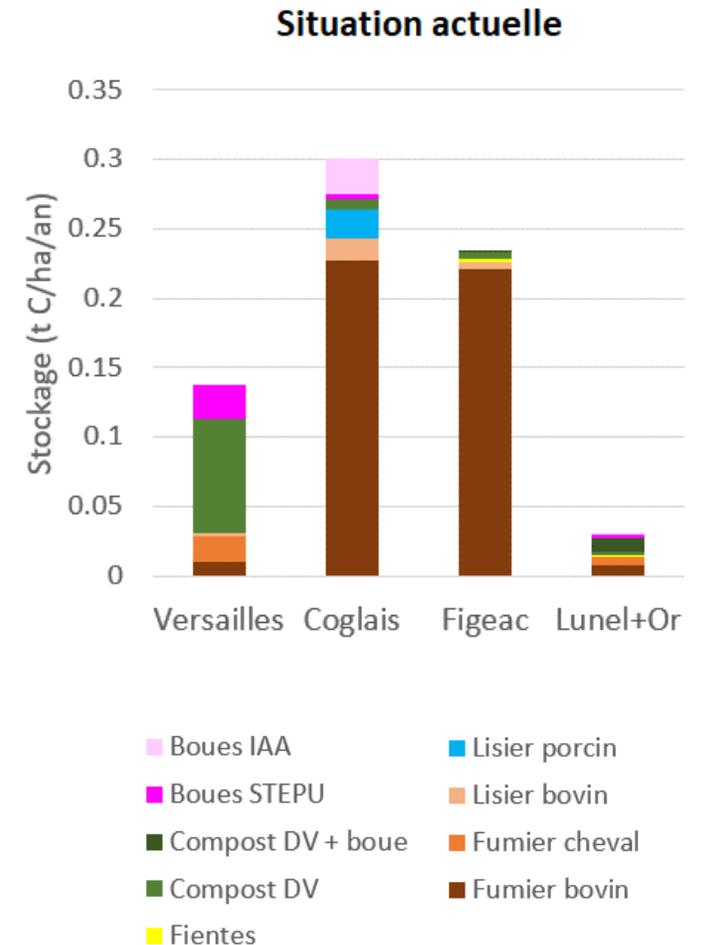
- Différences d'origine et de quantité des PRO selon la proximité de la ville et l'importance de l'élevage
- Différences de stockage potentiel entre territoires
- Stockage actuel proche ou $> 4 \text{ ‰}$ ($\approx 0.2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sur tous les territoires sauf Pays de Lunel, mais PRO déjà valorisés, ne représentent pas un stockage additionnel
- Stockage réel plus faible du fait d'un export d'une partie des PRO des territoires (plaine de Versailles notamment)



**Stockage de carbone potentiel
en 30 ans**

Stockage de C actuel sur les territoires

- Différences d'origine et de quantité des PRO selon la proximité de la ville et l'importance de l'élevage
- Différences de stockage potentiel entre territoires
- Stockage actuel proche ou $> 4 \text{ ‰}$ ($\approx 0.2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sur tous les territoires sauf Pays de Lunel, mais PRO déjà valorisés, ne représentent pas un stockage additionnel
- Stockage réel plus faible du fait d'un export d'une partie des PRO des territoires (plaine de Versailles notamment)
- Peu d'effet de la méthanisation des effluents d'élevage : 0.23 t C/ha à $0.22 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans le Coglais avec un méthaniseur de 32 kt MB/an



Stockage de carbone potentiel en 30 ans

Effets collatéraux du recyclage des PRO : exemple de la plaine de Versailles

Modélisation des effets de pratiques d'apport de PRO de la plaine de Versailles à dose agronomique avec l'outil PROLEG (Levavasseur & Houot, 2023)

Paramètre		Effet
Stockage de C		↗ maximal avec compost de déchets verts et fumiers
Fertilité du sol (réserve utile, stabilité structurale...)		Peu modifiée, hormis légèrement avec composts et fumiers
Consommation d'engrais N		↘ à court terme avec digestat et lisier ↘ à long terme avec composts et fumiers
Consommation d'engrais P & K		↘ (P avec les boues, K avec le fumier...)
Qualité de l'eau (nitrates)		Détérioration possible à long terme suite à ↗ MO du sol
Qualité de l'air (ammoniac)		Amélioration possible à long terme suite aux économies d'engrais N
Emissions de gaz à effet de serre (N ₂ O)		↗ pollution possible à long terme suite à ↗ MO du sol, mais très incertain
Contamination des sols par les métaux		Légère ↗ (sauf Cd), mais très < seuil (réglementaire, tox)
Résultats économiques		↗ de la marge, mais ↗ possible du temps de travail
Bilan gaz à effet de serre	Sans les émissions du traitement	Amélioration (stockage C et/ou - engrais N)
	Avec les émissions du traitement	Détérioration (sauf fumier)

Messages clés

- 1) Stock de C n' \nearrow pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.

Messages clés

- 1) Stock de C n' \nearrow pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO \nearrow stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.
- 5) Les PRO apportent des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.
- 5) Les PRO apportent des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.
- 6) Les apports de métaux par les PRO restent limités après 30 ans d'apport.

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.
- 5) Les PRO apportent des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.
- 6) Les apports de métaux par les PRO restent limités après 30 ans d'apport.
- 7) Les pratiques culturales impactent fortement les effets des PRO sur le bilan azote.

Messages clés

- 1) Stock de C n'↗ pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO ↗ stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus → pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.
- 5) Les PRO apportent des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.
- 6) Les apports de métaux par les PRO restent limités après 30 ans d'apport.
- 7) Les pratiques culturales impactent fortement les effets des PRO sur le bilan azote.
- 8) Les paramètres physico-chimiques des sols ne sont pas impactés négativement par l'apport de PRO.

Messages clés

- 1) Stock de C n' \nearrow pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, nouvel équilibre.
- 2) Apport de PRO \nearrow stock de C (selon caractéristiques du PRO, pratiques d'apport, sol, climat).
- 3) Les déjections animales permettent un stockage important de C. La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du C.

Le stockage est déjà effectif pour la plupart des PRO épandus \rightarrow pas de stockage additionnel, mais importance de maintenir les stocks existants de C.

- 4) Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de C additionnels dans les zones péri-urbaines.
- 5) Les PRO apportent des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.
- 6) Les apports de métaux par les PRO restent limités après 30 ans d'apport.
- 7) Les pratiques culturales impactent fortement les effets des PRO sur le bilan azote.
- 8) Les paramètres physico-chimiques des sols ne sont pas impactés négativement par l'apport de PRO.
- 9) Le stockage du carbone dans le sol par les PRO (= émissions négatives GES), ne permet pas de compenser totalement les émissions de GES liées aux étapes de traitement amont et aux émissions aux champs.

Merci de votre attention



Les programmes
RECORD font l'objet
d'un soutien de l'ADEME



Journée de restitution RECORD

Présentation des derniers résultats issus de ses
programmes d'études et de recherche

Les membres de RECORD



23 novembre 2023,
SNCF, Saint Denis

