

Journée de Restitution RECORD

Jeudi 23 novembre 2023, Paris-Saint Denis

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

Florent Levavasseur<sup>1</sup>, Louis Sicard<sup>2</sup>, Sylvaine Berger<sup>2</sup>, Sabine Houot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, UMR ECOSYS, Palaiseau

<sup>2</sup> 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 Résiduaire  
Organiques à la séquestration du carbone  
dans les sols**



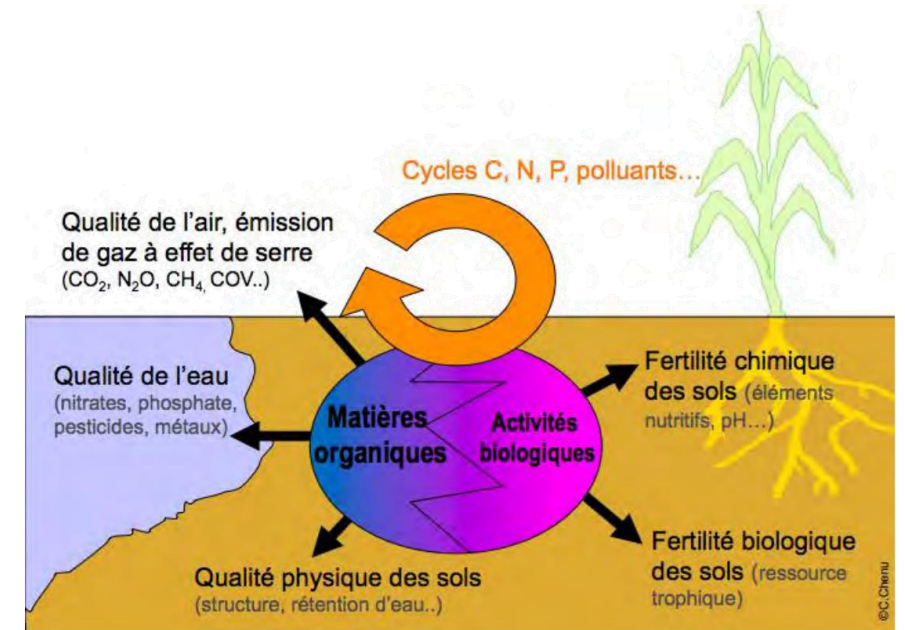
C4H5O2\_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1  
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

RECORD 20-0518/1A novembre 2022



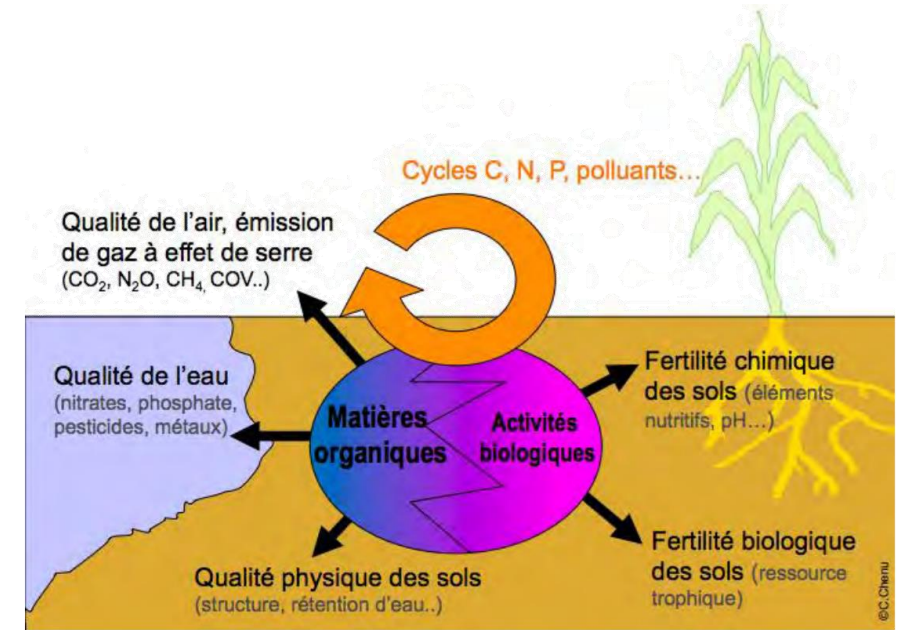
# Rôle du C dans les sols

- Matière organique des sols = C, N, P...
- $\approx 1$  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

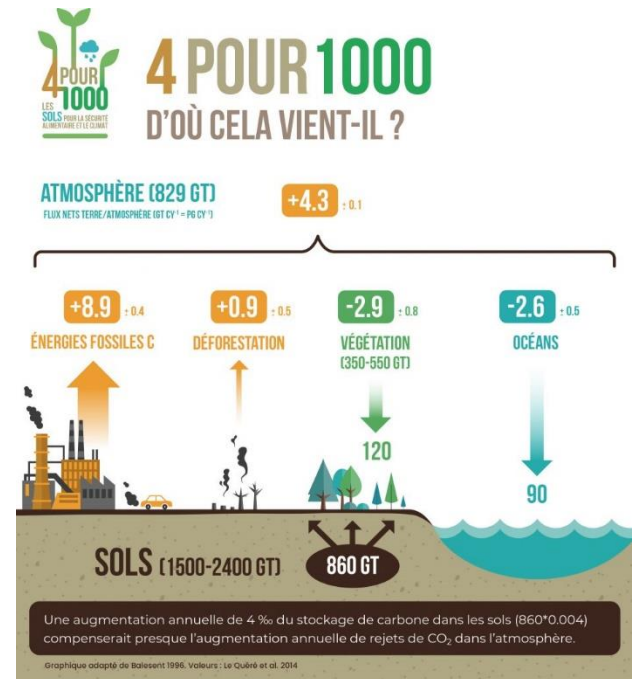


# Rôle du C dans les sols

- 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



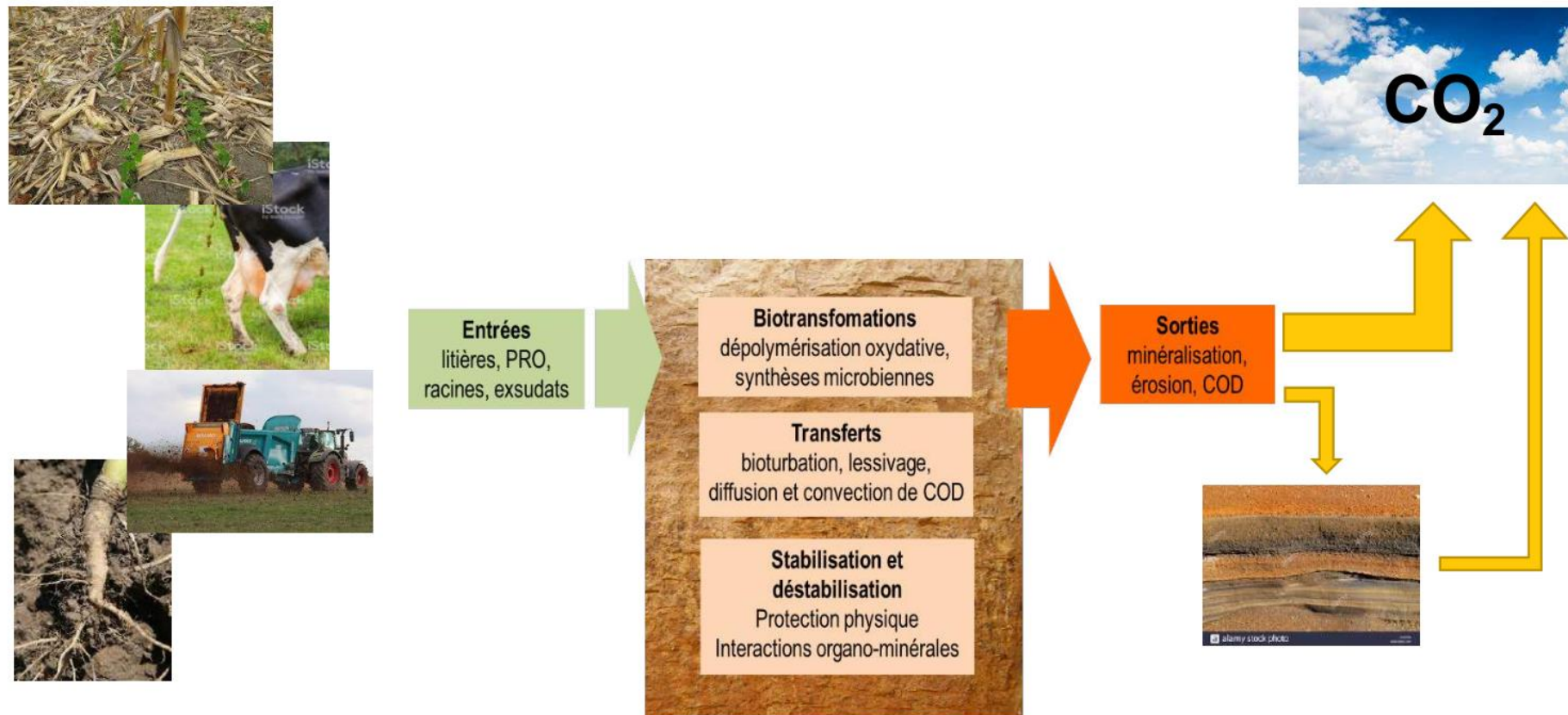
© C. Chenu



<https://4p1000.org/decouvrir/>

# Stockage de C dans les sols

- Solde entre les :
  - entrées de C (résidus de culture, racines, PRO)
  - sorties de C, majoritairement par minéralisation en  $\text{CO}_2$  par les microorganismes du sol, variable selon les contextes pédoclimatiques principalement

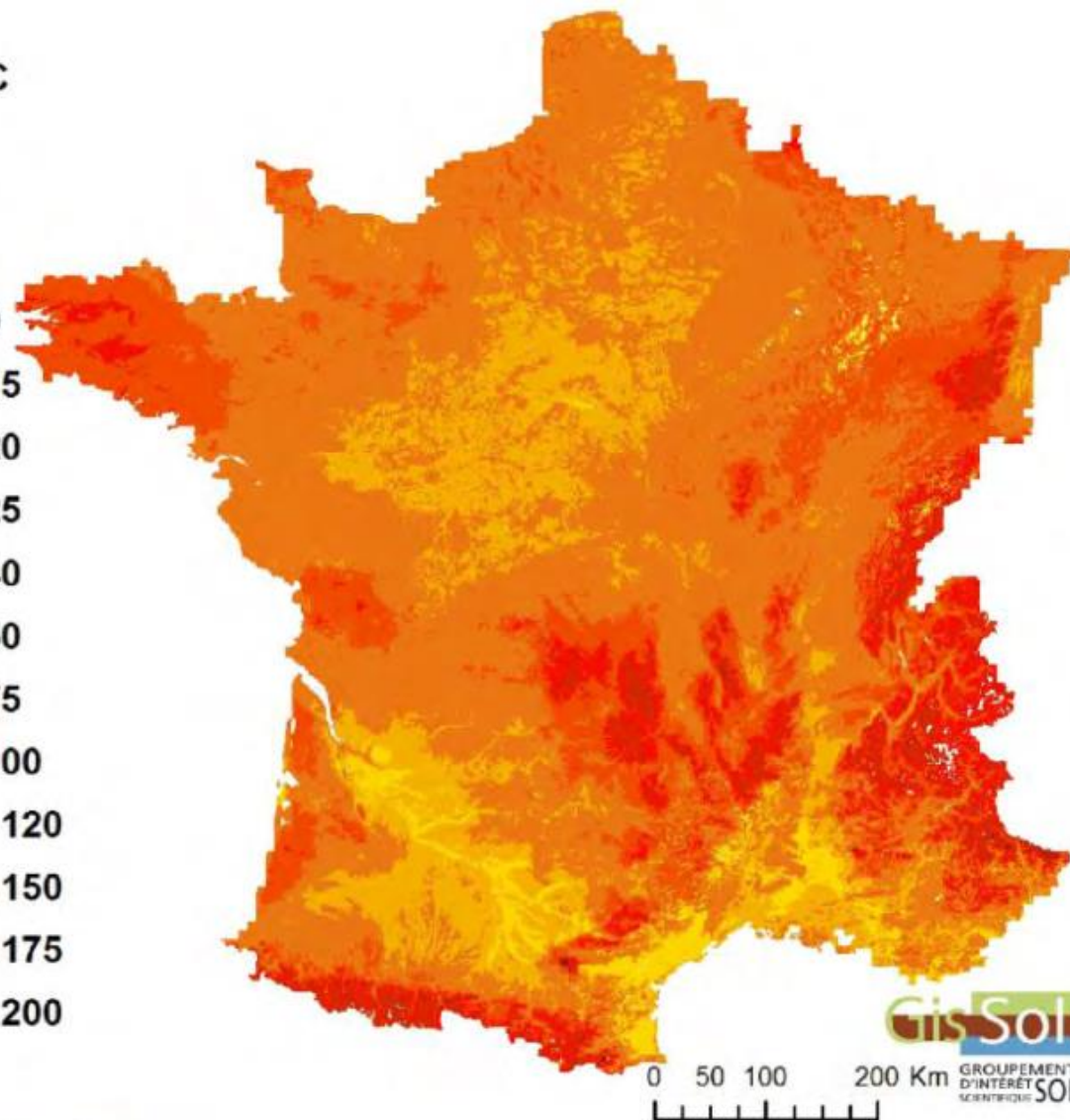
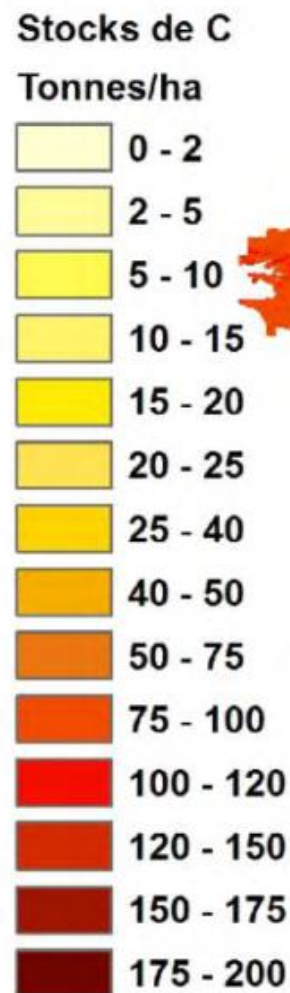


*Pellerin et al. (2020)*

# 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

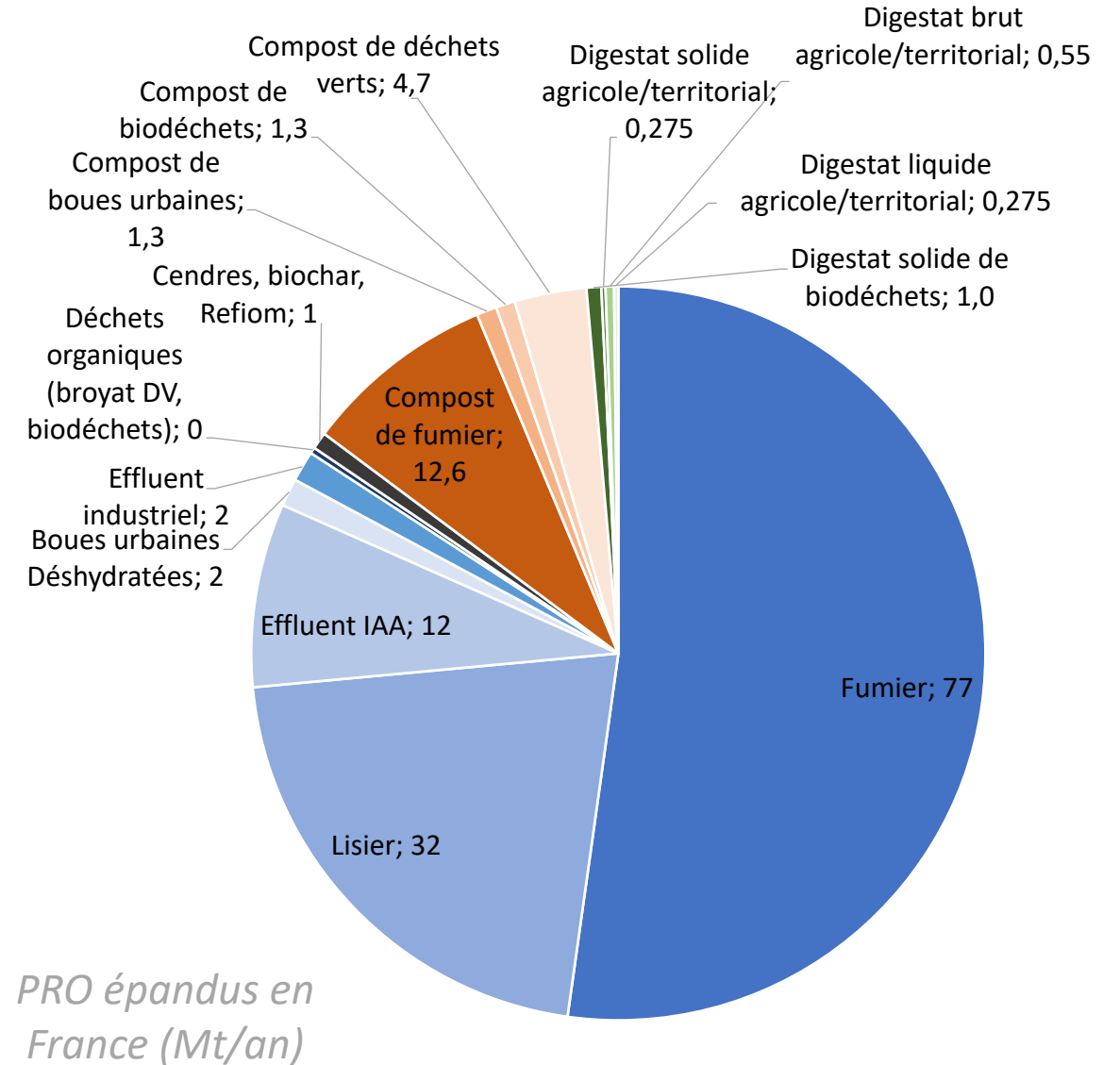


Source: Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.

# 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

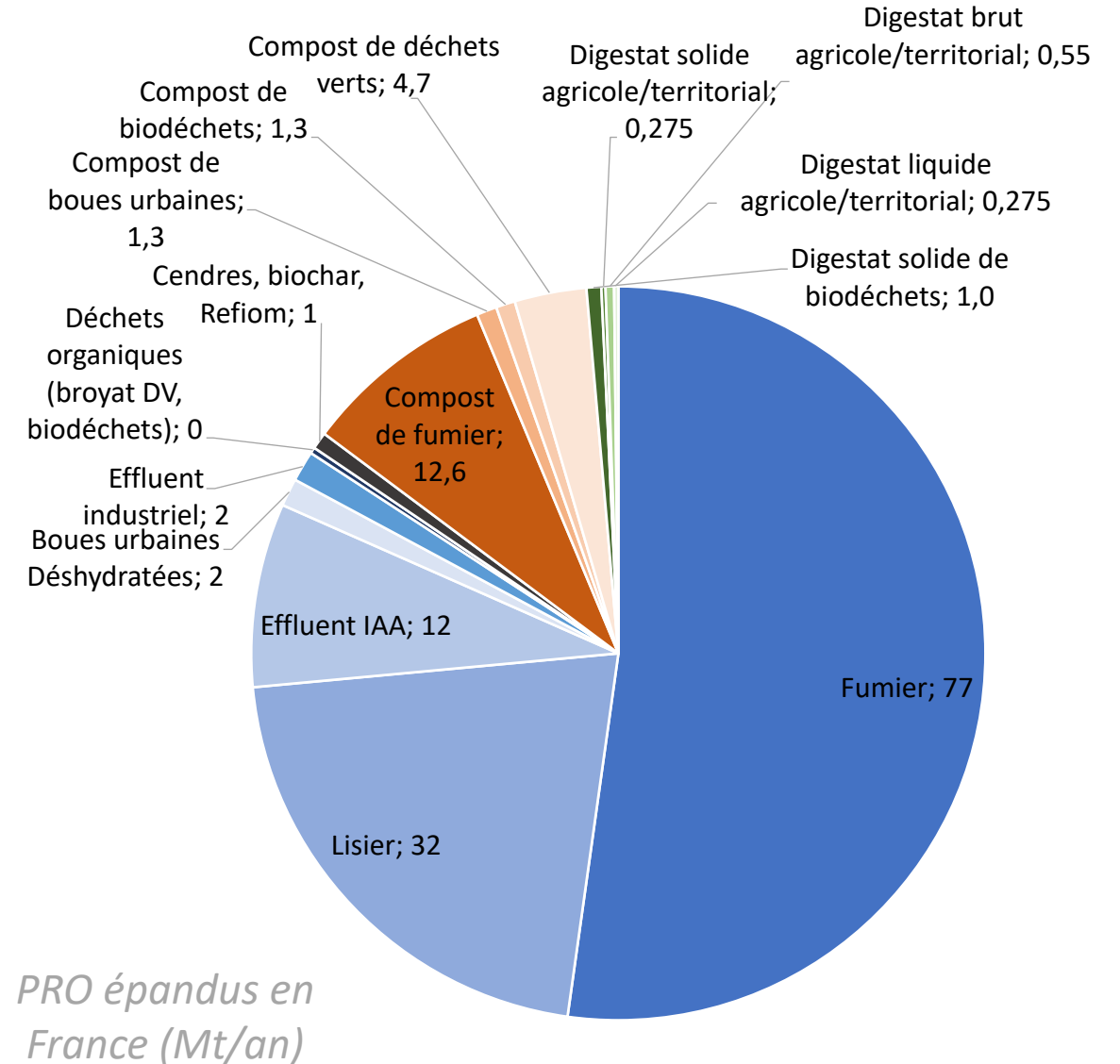




# Les gisements de PRO en France et les tendances

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<sup>er</sup> 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)*

	<b>PRO</b>	<b>Fumier bovin</b>	<b>Lisier porcin</b>	<b>Boue de station d'épuration</b>
x	Dose (t MB/ha)	40	40	10
x	Fréquence d'apport (an)	3	2	3
=	Teneur en C (% MB)	10	3	3
x	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
	<b>Stockage de C en 20 ans</b>	<b>9.7</b>	<b>1.9</b>	<b>0.7</b>

# 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



<b>Territoire</b>	<b>Agriculture</b>	<b>Autres caractéristiques</b>	<b>Scénario alternatif</b>
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

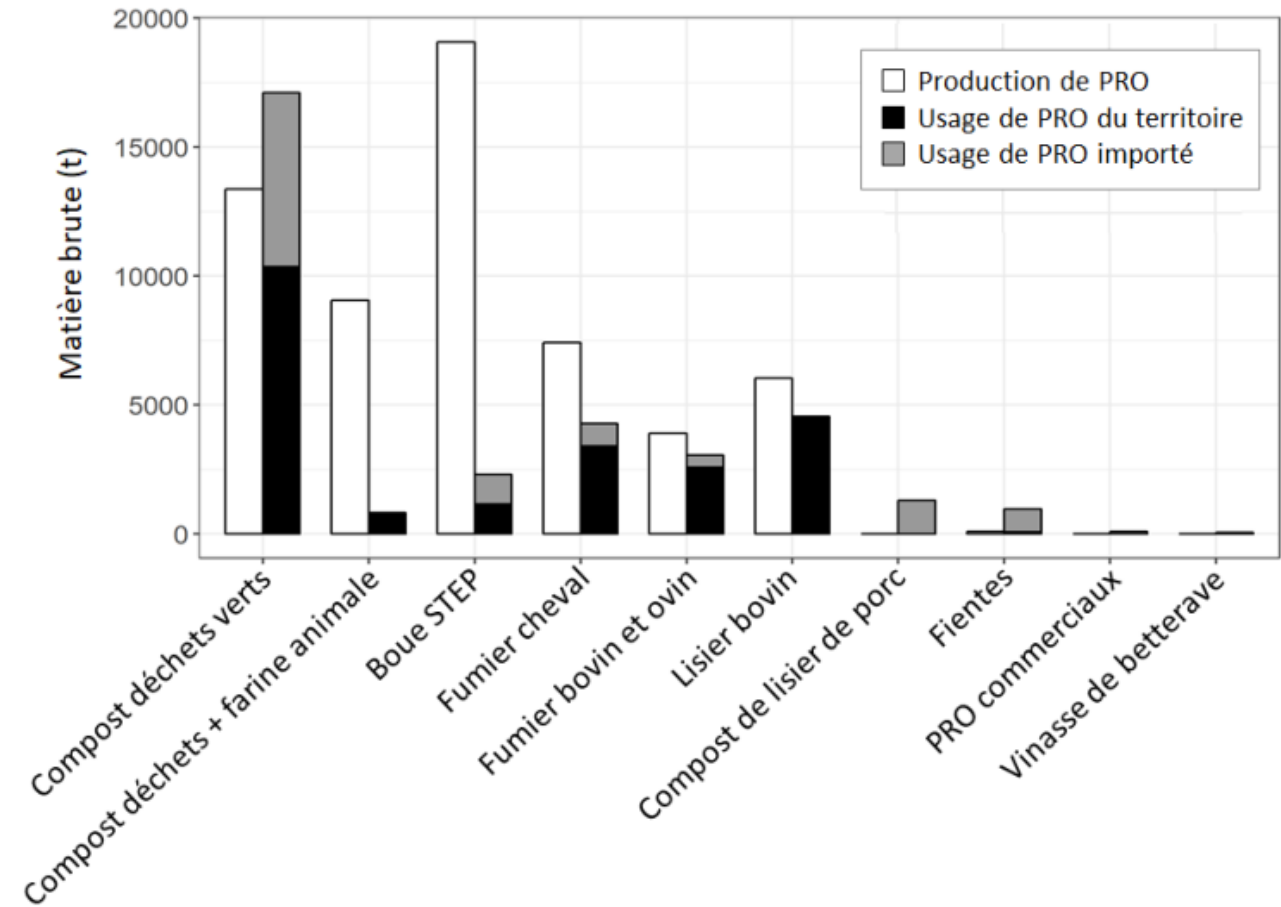
*Ferme de Grignon*



*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

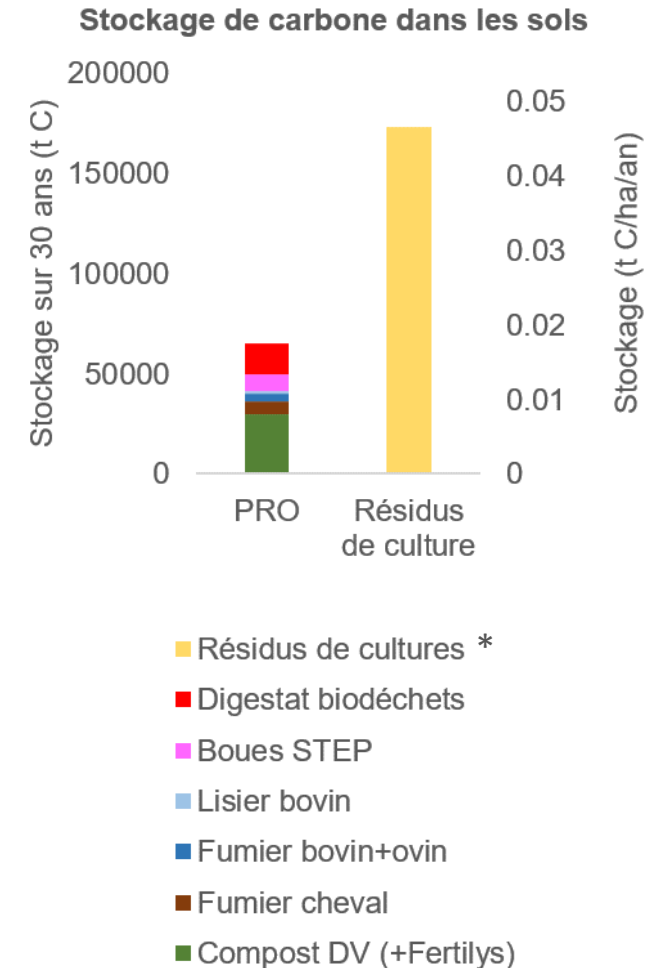


***Production et usage annuels de PRO sur la plaine de Versailles en 2018***

*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<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sur 30 ans
  - Significatif mais faible par rapport au stockage lié aux résidus de culture : 0.48 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>
  - PRO = stockage annuel de 3‰, mais déjà effectif, pas additionnel
- Valorisation de l'ensemble des biodéchets en digestat :
  - + 0.04 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> 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...

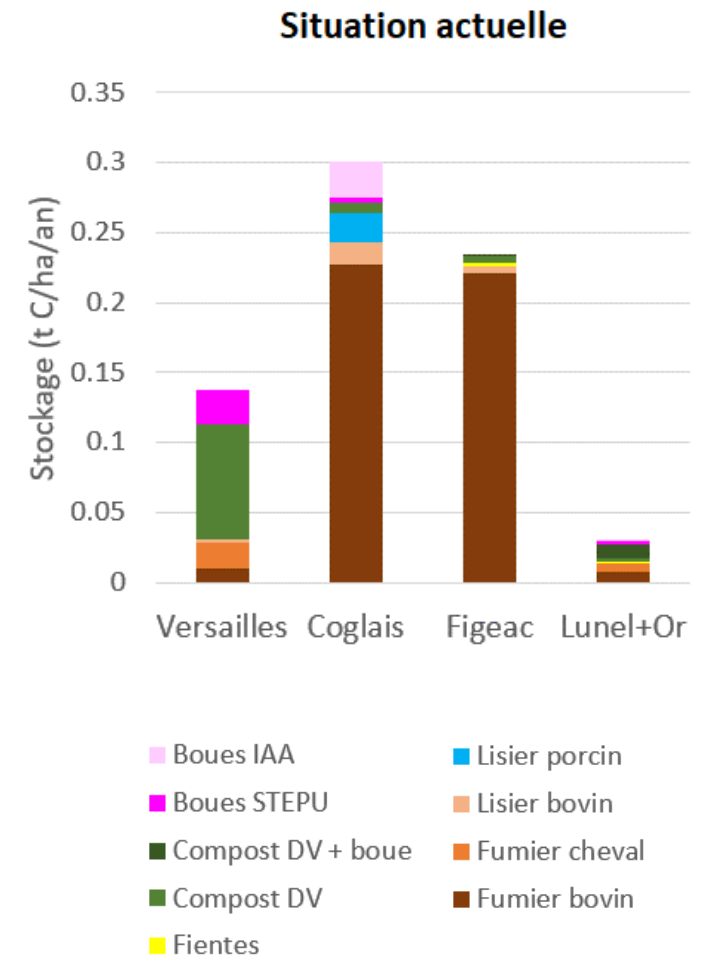


\* *assolement et rendement moyens du territoire, tous restitués*

# 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

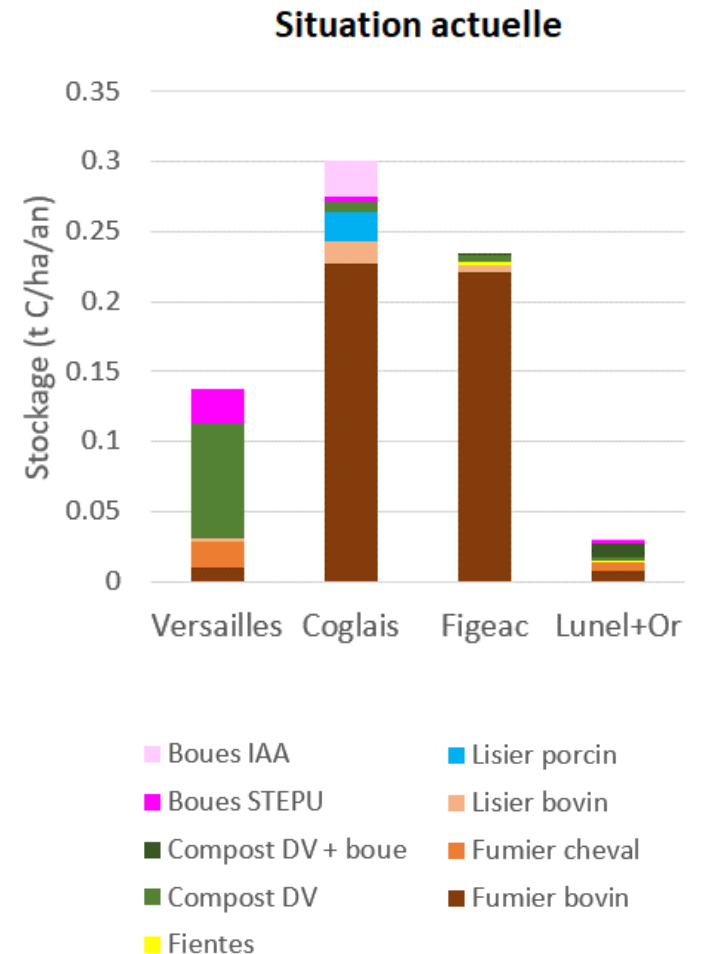


*Stockage de carbone potentiel  
en 30 ans*



# Stockage de C actuel sur les territoires

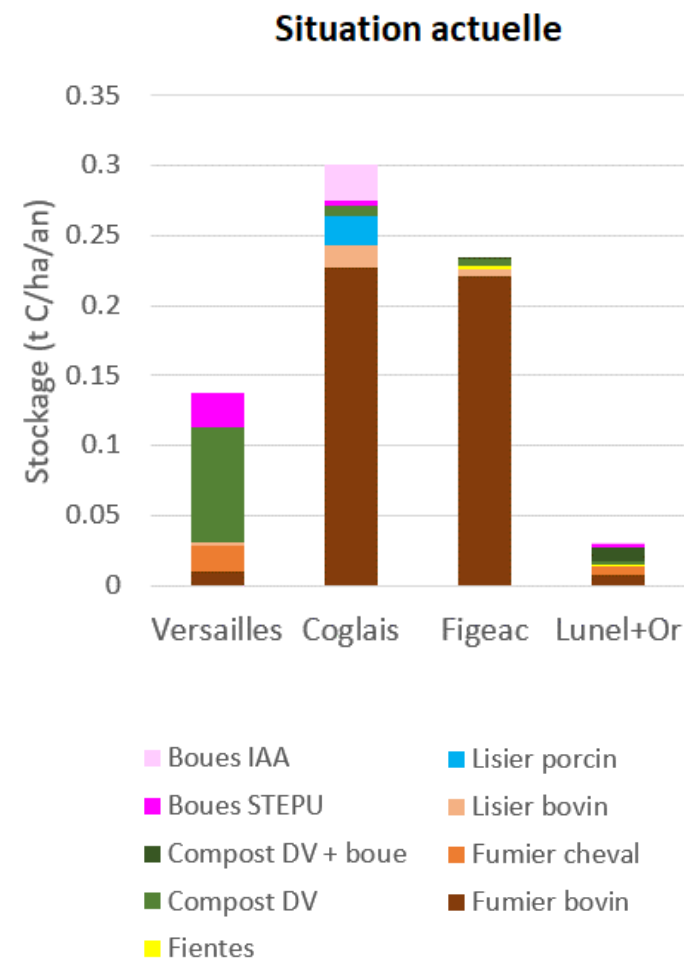
- Différences d'origine et de quantité des PRO selon la proximité de la ville et l'importance de l'élevage
- Différences de stockage potentiel entre territoires
- Stockage actuel proche ou  $> 4 \text{ ‰}$  ( $\approx 0.2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ) sur tous les territoires sauf Pays de Lunel, 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 :  $0.23 \text{ t C/ha}$  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 <sub>2</sub> 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'↗ 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).

# 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'↗ 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.
- 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

