



# LA VALORISATION AGRICOLE DES PRODUITS ORGANIQUES :

UNE PRATIQUE TRADITIONNELLE  
QUI RÉPOND À DE NOUVEAUX ENJEUX

# Flux de C et de nutriments liés au retour au sol des PRO

Florent Levavasseur

INRAE – UMR ECOSYS

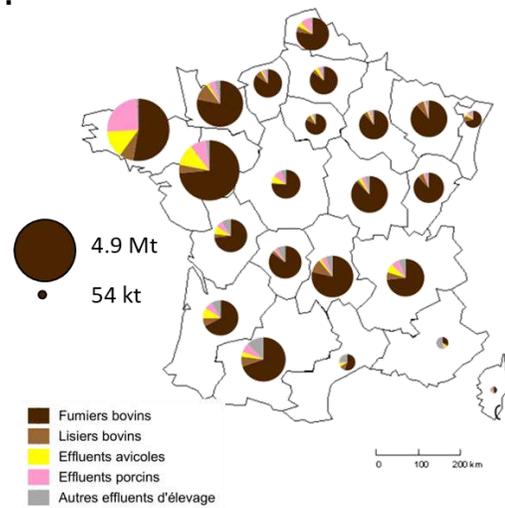


# Introduction

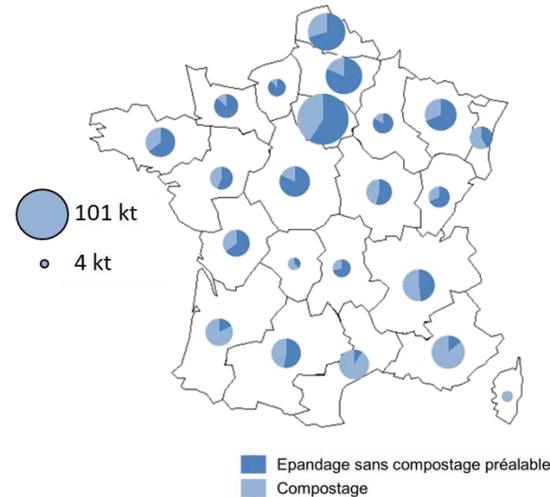
- Nombreux résultats expérimentaux à la parcelle démontrant les effets des PRO sur :
  - ↗ matière organique des sols et amélioration propriétés physiques et biologiques
  - ↗ fourniture de nutriments, permettant une ↗ des rendements et/ou une substitution d'engrais minéraux
- Pratiques réelles des agriculteurs peuvent différer des pratiques mises en œuvre en conditions expérimentales
- Forte diversité des PRO et des systèmes de culture entre territoires et au sein d'un même territoire

→ Que représentent les PRO en termes de flux de C et de nutriments, de l'échelle de la parcelle à l'échelle du territoire ? Par rapport aux besoins ?

→ Une modification des systèmes (agricoles, alimentaires...) peut-elle modifier substantiellement cette contribution ?



*Effluents d'élevages récupérables  
en France en 2000-2001*

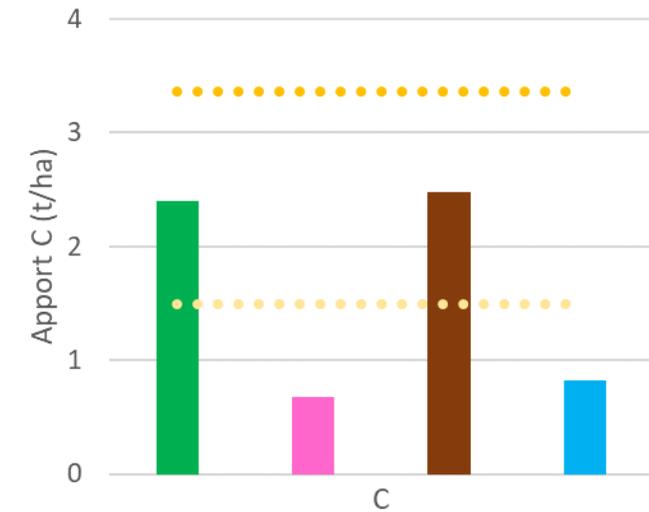
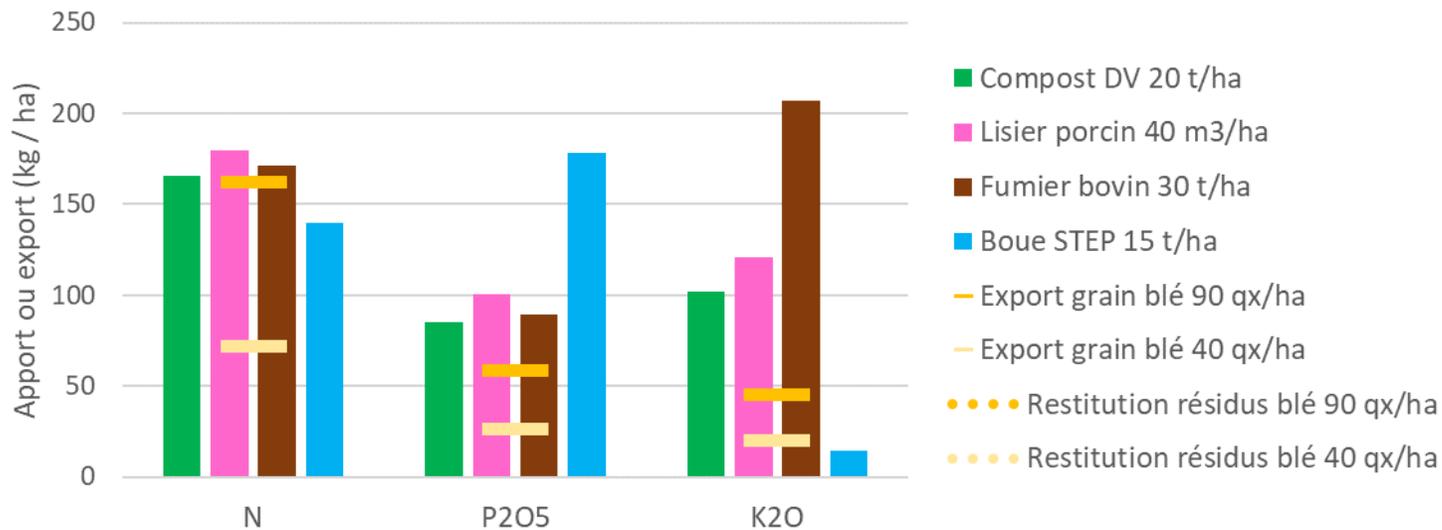


*Boues d'épuration urbaines  
épanchées en 2011*



# Quelques exemples de flux C, N, P, et K avec un apport de PRO

- Pour des doses classiques d'apport de PRO, les flux d'apport de NPK peuvent correspondre aux exports des cultures, voire les dépasser
- Mais efficacité d'utilisation des nutriments < 1 (surtout pour N)
- Flux d'apport de C peuvent être < à similaires aux restitutions aériennes des cultures
- Et l'efficacité du stockage du C des PRO > stockage du C des résidus

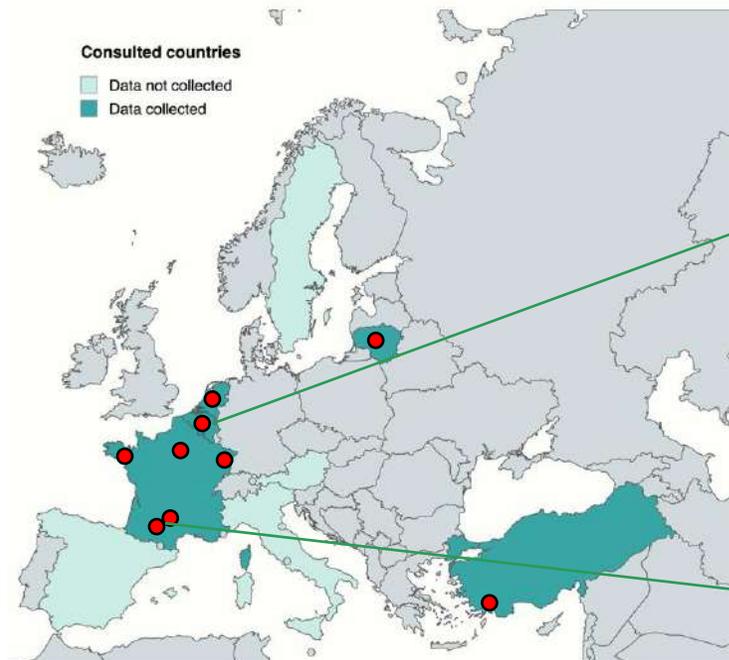


Apport de C, N, P et K par les PRO pour des doses classiques et des teneurs moyennes (Houot et al., 2014) en comparaison aux exports (NPK) et aux restitutions (C) d'un blé (Comifer, 2009, 2013, Clivot et al., 2023)

- Pas d'apport de PRO tous les ans : quel apport en moyenne à l'échelle du système de culture ?

# Flux d'éléments par les PRO dans des systèmes de culture type

- Projet EOM4SOIL : définition à dire d'expert de systèmes de culture typiques en Europe, avec type, dose et fréquence d'apport de PRO tels que pratiqués par les agriculteurs
- 9 « régions considérées », représentant des contextes pédoclimatiques et systèmes de production agricole variés, avec une diversité des sources de PRO disponible (élevage, agro-industrie, péri-urbain...)
- 27 systèmes de culture avec PRO considérés (comparés à une référence minérale)



## Système polyculture-élevage en Wallonie

Rotation betterave-blé-colza-maïs ensilage-blé

Luvisol

Fumier bovin (20 t/ha avant maïs et betterave) +  
écumes de sucrerie (10 t/ha avant maïs)



## Système céréalier dans le Laurageais

Rotation tournesol-blé

Calcosol

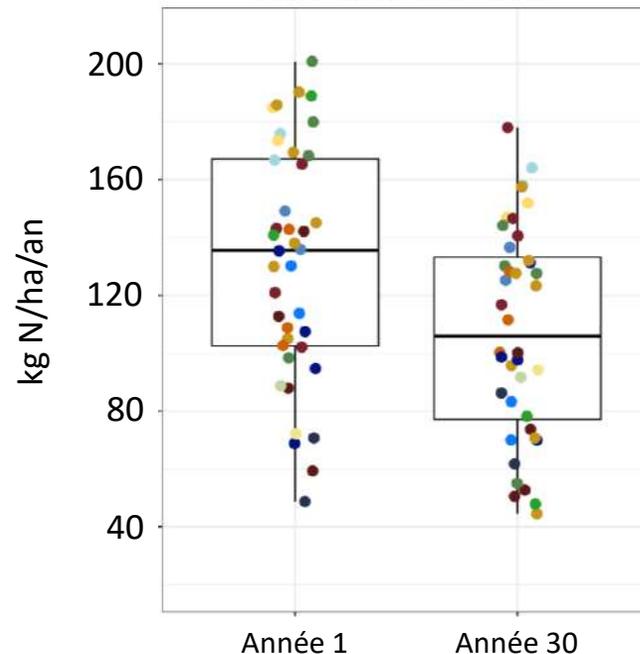
Compost de déchets verts (9 t/ha avant tournesol)

# Flux d'éléments par les PRO dans des systèmes de culture type

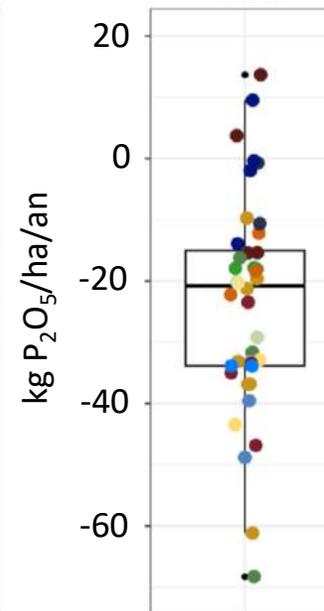
- Projet EOM4SOIL (suite)
- En considérant l'efficacité du N, et les fréquences d'apport à l'échelle du système de culture, l'apport de N des PRO n'est pas suffisant pour subvenir aux besoins des cultures dans des pratiques conventionnelles typiques
- Augmentation des fournitures à long terme (30 ans) après des apports répétés
- Pour le P et le K, au vu des fréquences d'apport, la plupart des systèmes conventionnels avec PRO restent déficitaires, mais certains sont excédentaires

*Exemple de besoin en N minéral et de balance PK pour des systèmes de culture typiques avec PRO en France et Wallonie (Rinasoa et al., 2024)*

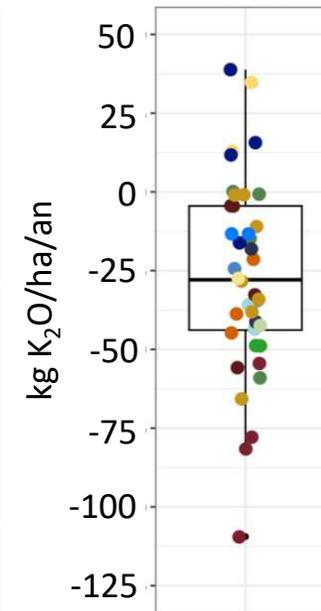
**Besoin complémentaire en N minéral**



**Balance P**



**Balance K**



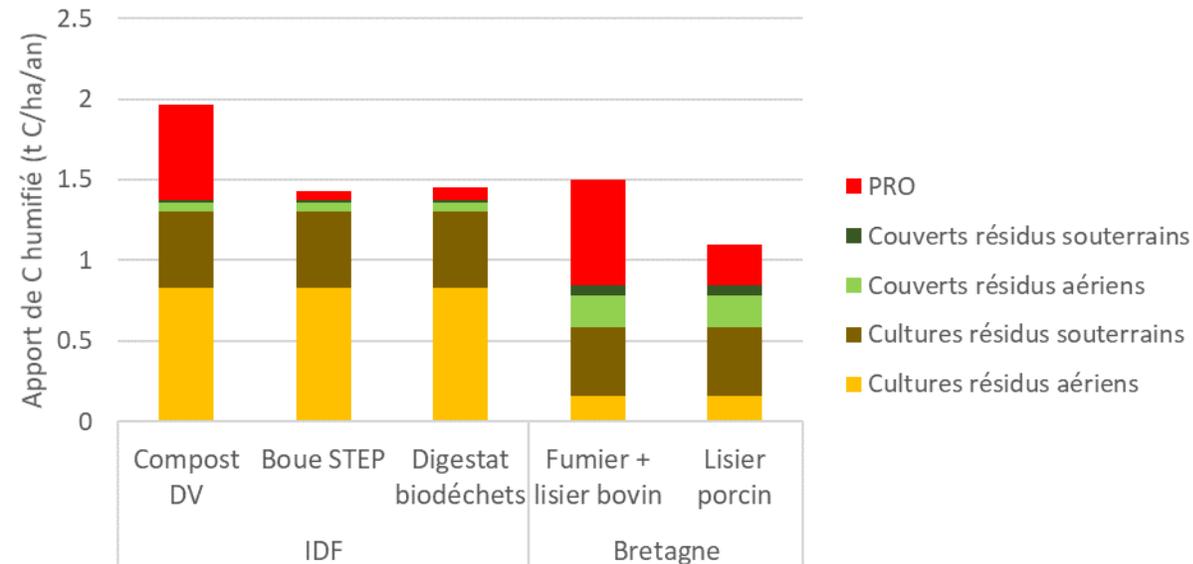
Système de culture typique avec PRO :

- Boue chaulée
- Compost de boue
- Compost DV
- Fumier et compost fumier bovin
- Fumier de cheval
- Fumier bovin
- Fumier bovin et écumes
- Fumier et lisier bovin
- Lisier bovin
- Lisier porcin
- Digestat de lisier porcin
- Digestat de fumier et lisier bovin
- Digestat de biodéchets
- Digestat de CIVE

# Flux de C des PRO dans des systèmes de culture type

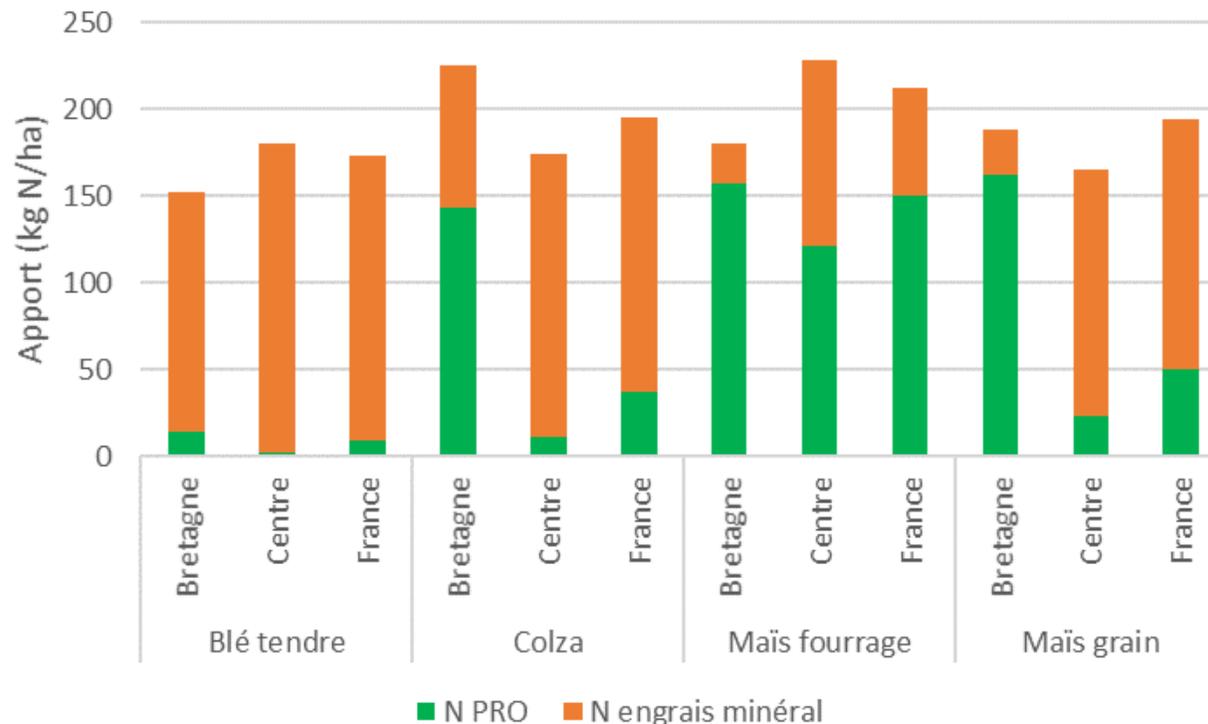
- Projet EOM4SOIL (suite)
- En considérant les fréquences d'apport de PRO et le coefficient d'humification des PRO et des résidus :
  - Apport de C humifié des PRO < apport de C humifié des cultures
  - Des apports très faibles par les PRO dans certains systèmes (ex : boue et digestat en IDF)
  - Mais contribution relative importante aux entrées de C dans certains cas :
    - Apport de compost de déchets verts (IDF)
    - Apport de fumier et forts exports de biomasse des cultures (Bretagne)

*Exemple de flux d'apport de C humifié pour des systèmes de culture typiques avec PRO en Ile-de-France et Bretagne (Rinasoa et al., 2024)*



# Contribution des PRO à la fertilisation N en France, par culture

- A l'échelle des territoires, tous les agriculteurs n'utilisent pas des PRO : quelle contribution des PRO à la fertilisation à cette échelle, par culture ?
- Forte variabilité de la contribution des PRO aux fournitures de N selon les cultures et les régions :
  - Directement liée à la disponibilité des PRO (élevage principalement)
  - Pratiques aussi liées à la +/- bonne valorisation de l'azote des PRO entre cultures (maïs et colza valorisent mieux les apports d'avant semis)

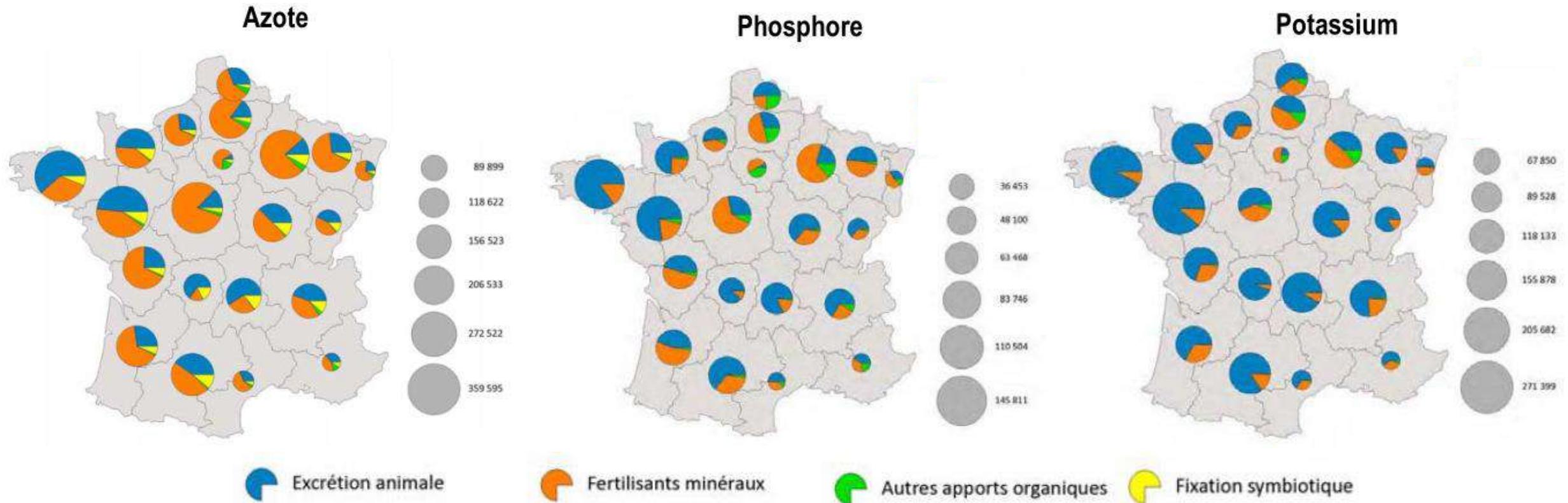


*D'après les données d'enquêtes pratiques culturales 2017 (Agreste)*

# Contribution des PRO à la fertilisation en France

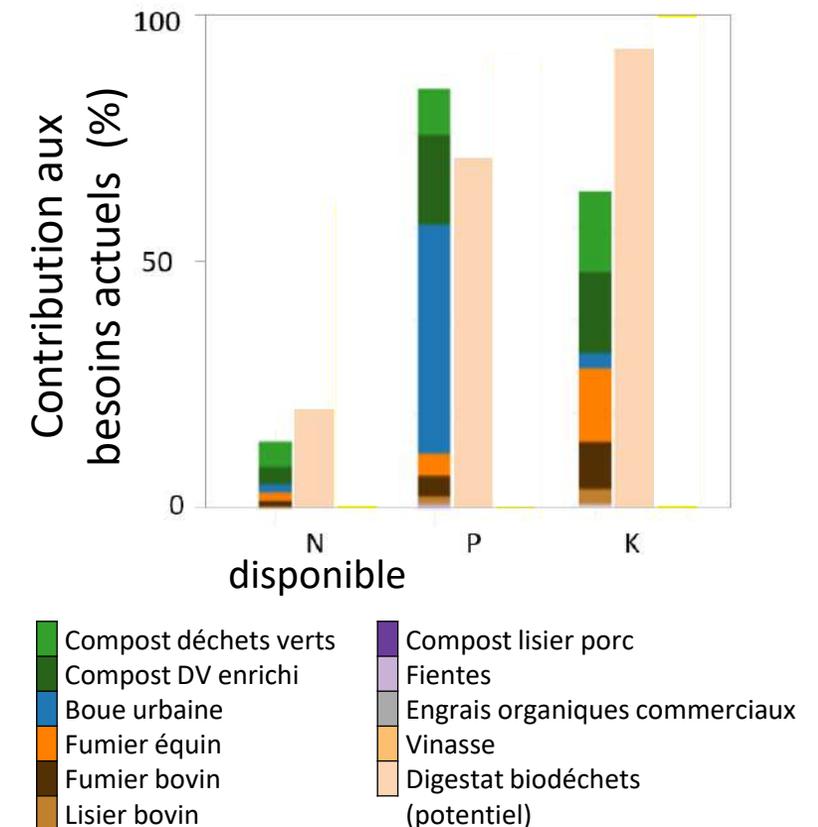
- 39% N, 70% P et 82% K proviennent d'apports organiques, principalement des effluents d'élevage (restitution à la pâture incluse) (Houot et al., 2014)
- Seulement 2% N, 5% P et 3% du K proviennent des PRO hors élevage (Houot et al., 2014)

⚠ Données incertaines et anciennes (mais ordre de grandeur valide a priori)



# Contribution des PRO à la fertilisation à l'échelle territoriale

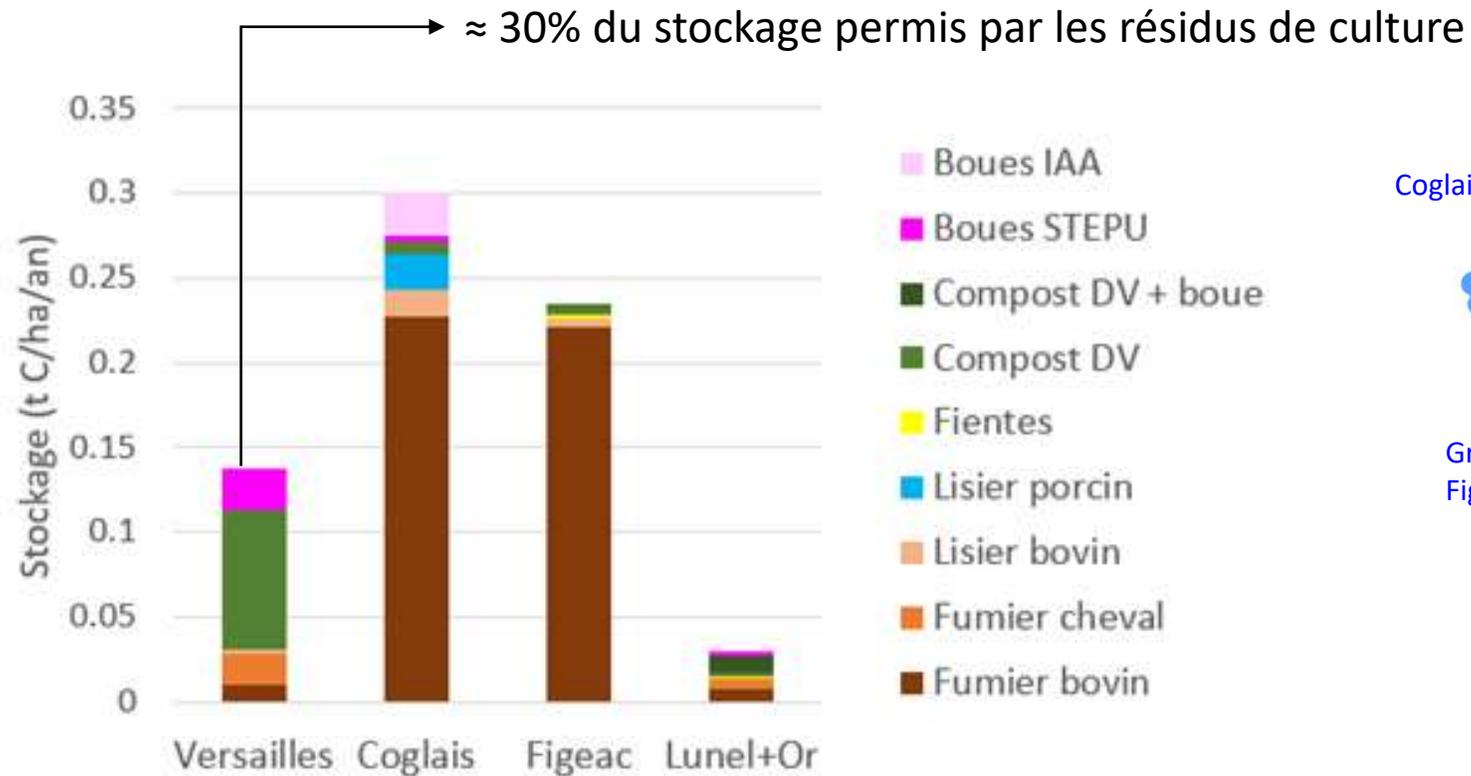
- Localement, des potentiels importants existent même en dehors des zones d'élevage
- Exemple de la plaine de Versailles (*Moinard et al., 2021*)
- 11 000 ha à proximité de Paris, avec principalement des cultures céréalières conventionnelles (forts besoins en NPK)
- Présence de stations d'épuration et de compostières de déchets verts (imports de déchets des zones urbaines voisines)
- Contribution potentielle mineure aux besoins en N du territoire (faible disponibilité du N des PRO), mais importante en P et K
- Contribution réelle plus faible (export des boues d'épuration du territoire)
- Contribution potentielle bien plus élevée sous hypothèse de conversion en AB ( $\approx 60-70\%$  besoin N)
- Potentiel additionnel important de la méthanisation des déchets alimentaires pour la fourniture de N (incinérés pour le moment)
- Cependant, potentiel de la méthanisation de biodéchets limité à l'échelle nationale (*icare&consult, 2020*)



# Contribution des PRO au stockage de C à l'échelle territoriale

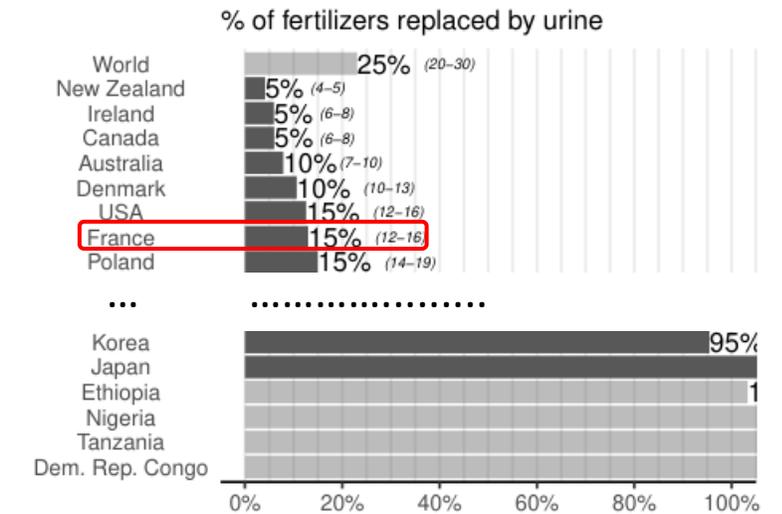
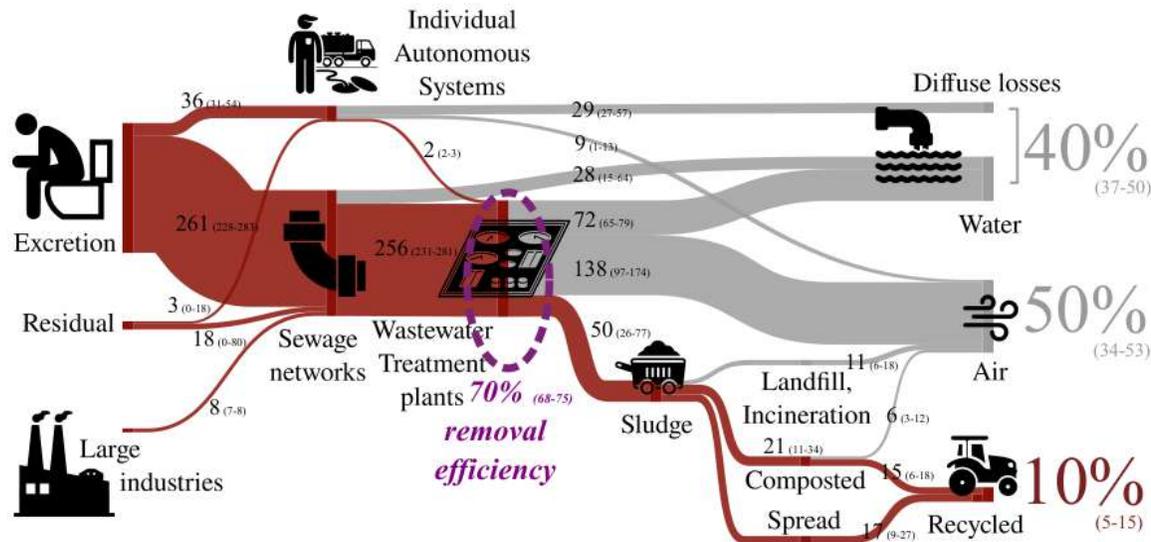
- A l'échelle des territoires, tous les agriculteurs n'utilisent pas des PRO : quelle contribution des PRO au stock de C des sols à cette échelle ? En considérant les ressources en PRO, la surface et les sols du territoire ?
- Contribution très variable entre territoire, en lien avec les activités du territoire (élevage, zones péri-urbaines avec recyclage de déchets urbains...)
- Contribution < résidus de culture, mais reste relativement importante

Stockage de C par les PRO dans 4 territoires contrastés (Berger et al., 2022)



# Quel potentiel additionnel de flux CNPK par les PRO ?

- Plusieurs travaux montrent que les flux de PRO sont insuffisants pour subvenir aux besoins actuels de l'agriculture, même si leur contribution est significative (*Davis et al., 2024; icare&consult, 2020*)
- Principal gisement additionnel mobilisable : les excréments humains (surtout pour NPK, moins pour C a priori) :
  - Seuls 10% du N et 50% du P des excréments sont recyclés à l'heure actuelle via les boues d'épuration en France (*Starck, 2024*)
  - Le recyclage de l'ensemble du N des excréments pourrait substituer 15% des engrais N de l'agriculture française (*Starck, 2024*) → important mais insuffisant également !

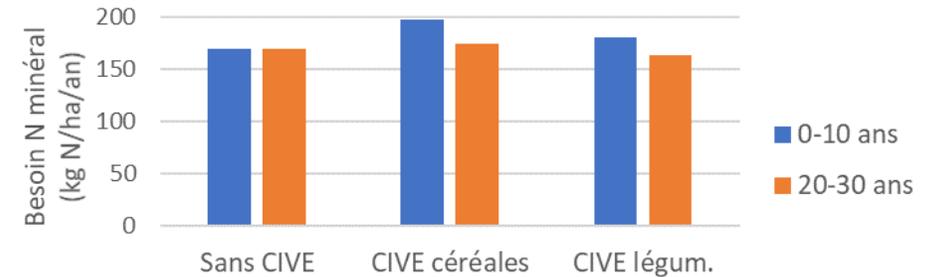


*Potentiel théorique de remplacement des engrais minéraux N par les urines par pays (Starck, 2024)*

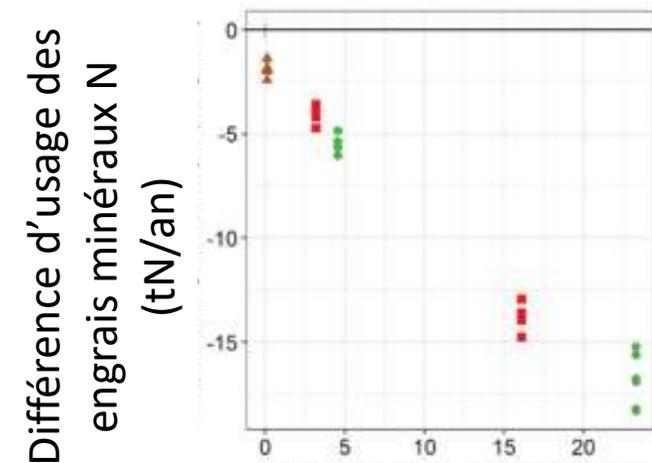
*Flux d'azote dans le système d'assainissement français (kt N / an) (Starck, 2024)*

# Modification des systèmes : cas de la méthanisation

- Flux actuels et potentiels de PRO insuffisant pour subvenir aux besoins actuels de l'agriculture en nutriments
- Quel rôle potentiel de la méthanisation ?
- Méthanisation d'effluents d'élevage seuls : les flux sont peu modifiés et le potentiel d'économies d'engrais reste faible (*Moinard, 2021*)
- Méthanisation de CIVE amène plutôt une augmentation de la consommation d'engrais N, à moins de mobiliser des légumineuses (peu le cas à l'heure actuelle) (*Launay, 2023, Boros et al., 2024*)
- Méthanisation en général : l'apport de déchets extérieurs (ressource limitée) est le principal déterminant des économies d'engrais (*Moinard, 2021, Boros et al., 2024*)



Besoin moyen en N minéral de systèmes de culture sans CIVE ou avec CIVE + digestat (*d'après Launay, 2023*)

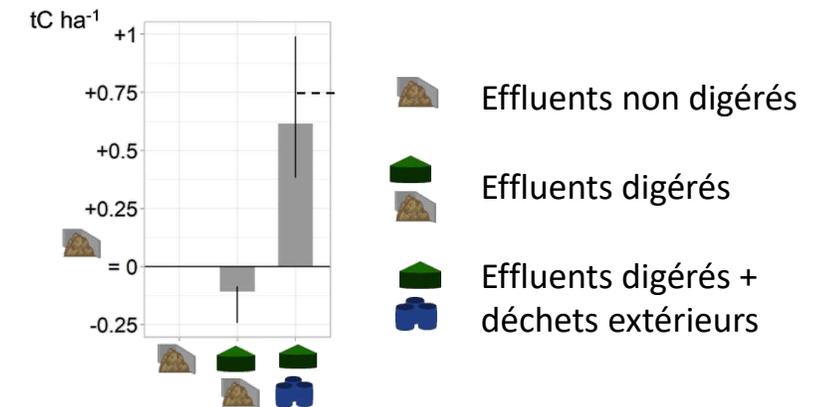


Import de N avec déchets extérieurs (tN/an)

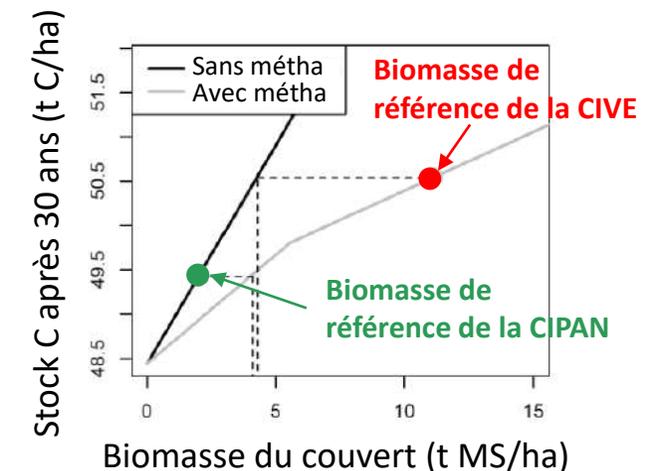
Economie d'engrais en fonction de l'import de déchets extérieurs dans sur une ferme de polyculture élevage (*adapté de Moinard, 2021*)

# Modification des systèmes : cas de la méthanisation

- La plupart des PRO déjà recyclée : peu de stockage additionnel de C dans les sols possible avec les PRO
- Quel rôle potentiel de la méthanisation ?
- Méthanisation d'effluents d'élevage seuls : légère  $\searrow$  stockage de C dans les sols (*Moinard, 2021, Launay, 2023*)
- Méthanisation de CIVE seules (*Levavasseur et al., 2023*) :
  - Légère  $\searrow$  stockage de C dans les sols en comparaison à une situation avec couvert non méthanisé et de biomasse égale
  - En pratique :  $\nearrow$  biomasse du couvert amène une  $\nearrow$  stockage de C dans les sols
- Méthanisation en général : l'apport de déchets extérieurs (ressource limitée) permet d'augmenter les flux de C retourné au sol (*Moinard, 2021*)
- D'autres traitements de la biomasse avec un plus fort potentiel d'un point de vue stockage de C (ex : pyrolyse  $\rightarrow$  biochar) (*Andrade Diaz et al., 2023*)



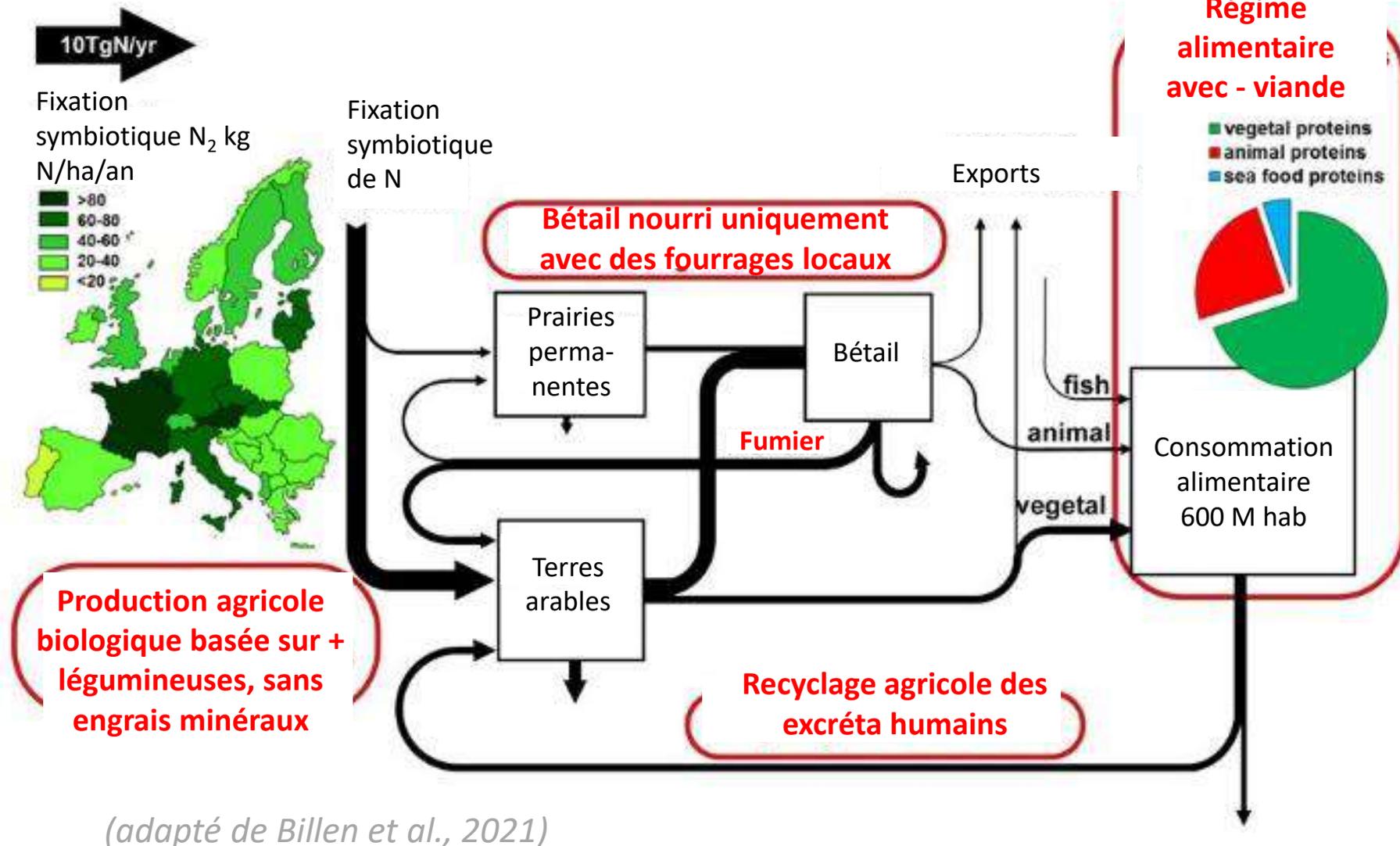
Stockage de C relatif à 20 ans (*Moinard, 2021*)



Stock de C à 30 ans selon la production du couvert (*Levavasseur et al., 2023*)

# Modification du système agricole et alimentaire

- Billen et al. (2021) indiquent la possibilité de nourrir la population européenne, sans recours aux engrais N grâce :
  - Changement système alimentaire (- viande, + de légumineuses)
  - Reconnexion polyculture-élevage (rôle du fumier)
  - Recyclage des urines humaines



# Conclusion

- A l'échelle d'un apport de PRO :
  - Grande variabilité des flux de C, N, P, K selon les doses et caractéristiques de PRO
  - Peut subvenir aux besoins N, P et/ou K de la culture l'année de l'apport et représenter des flux de C > résidus de culture de l'année
- A l'échelle du système de culture (parcelle, rarement des PRO tous les ans) :
  - Contribution aux besoins variable selon les systèmes de culture et les pratiques d'apport, mais potentiel souvent insuffisant en termes de fourniture de N dans des systèmes conventionnels, potentiel excédent en PK dans certains cas
  - Contribution au stockage de C souvent < résidus de culture, mais significative dans certains cas (fumier, compost...)
- A l'échelle territoriale (souvent pas des PRO pour tout le monde !) :
  - Contribution des PRO insuffisante pour subvenir aux besoins de l'agriculture actuelle en termes de fourniture de nutriments (surtout N)
  - Potentiel additionnel limité, excréta humains principalement (mais insuffisant aussi)
- Besoin de changements systémiques du système alimentaire et agricole pour modifier fortement le potentiel des PRO à la fertilisation (↘ besoin et ↗ recyclage)

# Bibliographie

- Andrade Díaz, C., Clivot, H., Albers, A., Zamora-Ledezma, E., Hamelin, L., 2023. The crop residue conundrum: Maintaining long-term soil organic carbon stocks while reinforcing the bioeconomy, compatible endeavors? *Appl. Energy* 329, 120192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120192>
- Berger, S., Sicard, L., Levavasseur, F., Houot, S., 2022. Contribution des Produits Résiduaux Organiques à la séquestration du carbone dans les sols. *RECORD*.
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Le Noë, J., Sanz-Cobena, A., 2021. Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth* 4, 839–850. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Boros, L., Carozzi, M., Carton, S., Houot, S., Martin, P., Levavasseur, F., 2024. Changes in cropping systems associated with biogas plants in French cereal-growing areas. Presented at the 15th IFSA Conference IFSA 2024, Trapani, Italy.
- 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. *Environ. Model. Softw.* 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Davis, S.C., Maynard, F.G., Jenkins, D., Herman, T., Reza, M.T., 2024. Potential for improving nutrient use efficiencies of human food systems with a circular economy of organic wastes and fertilizer. *Environ. Res. Lett.* 19, 093002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6617>
- 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.
- icare&consult, 2020. Etude prospective fixant des objectifs stratégiques d'augmentation de la part de fertilisants issus de ressources renouvelables. Rapport final.
- Launay, C., 2023. Insertion de cultures intermédiaires énergétiques dans les systèmes de cultures en France : évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau–azote–carbone (phdthesis). Université Paris-Saclay.
- Levavasseur, F., Kouakou, P.K., Constantin, J., Cresson, R., Ferchaud, F., Girault, R., Jean-Baptiste, V., Lagrange, H., Marsac, S., Pellerin, S., Houot, S., 2023. Energy cover crops for biogas production increase soil organic carbon stocks: a modeling approach. *GCB Bioenergy* 15, 224–238. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13018>
- Moinard, V., 2021. Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme (phdthesis). Université Paris-Saclay.
- Moinard, V., Levavasseur, F., Houot, S., 2021. Current and potential recycling of exogenous organic matter as fertilizers and amendments in a French peri-urban territory. *Resour. Conserv. Recycl.* 169, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105523>
- Rinasoa, S., Houot, S., Moreira, M., Schaub, A., Lagrange, H., Barcauskaite, K., Erdal, U., de Haan, J., Huyghebaert, B., Levavasseur, F., 2024. Multicriteria evaluation system for EOMs use (EOM4SOIL Deliverable D6.1). Zenodo.
- Starck, T., 2024. Towards a circular management of nitrogen and phosphorus in human excreta: current state, global agricultural potential, and spatial constraint in France (phdthesis). Ecole nationale des ponts et chaussées.



**Merci !**

**LA VALORISATION AGRICOLE  
DES PRODUITS ORGANIQUES :**

**UNE PRATIQUE TRADITIONNELLE  
QUI RÉPOND À DE NOUVEAUX ENJEUX**