

ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE

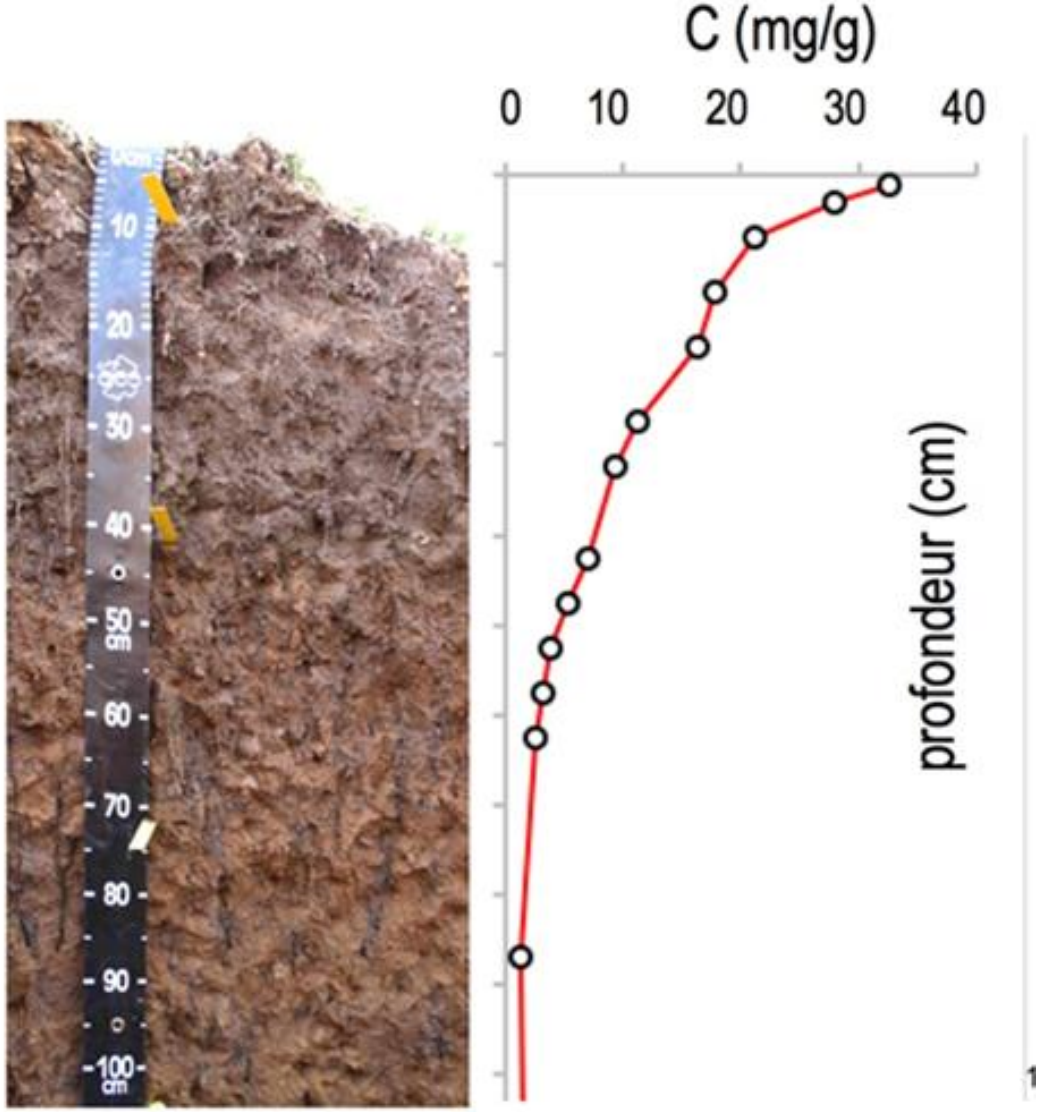
L'atténuation par le sol: quel effet du mode d'occupation du sol et des pratiques sur les stocks de carbone?

Sylvain PELLERIN, INRAE

04 Novembre 2026

Le carbone organique du sol

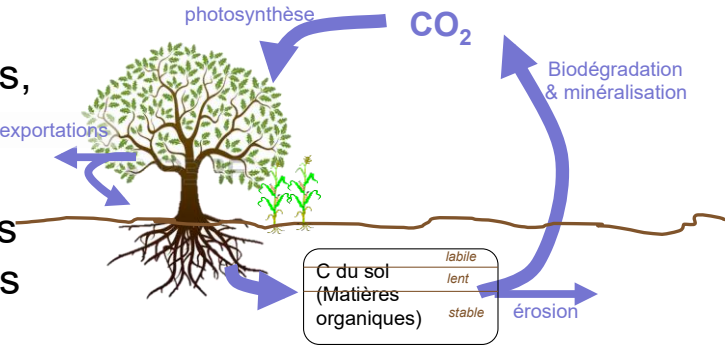
- ✓ Les « Matières organiques du sol » (MOS) représentent entre 1 et 10% de la masse du sol
- ✓ La concentration en MOS est généralement décroissante avec la profondeur
- ✓ Les MOS sont composées à 55% de carbone (C)
- ✓ Carbone Organique du Sol (COS) ≠ Carbone Inorganique (ex $CaCO_3$)

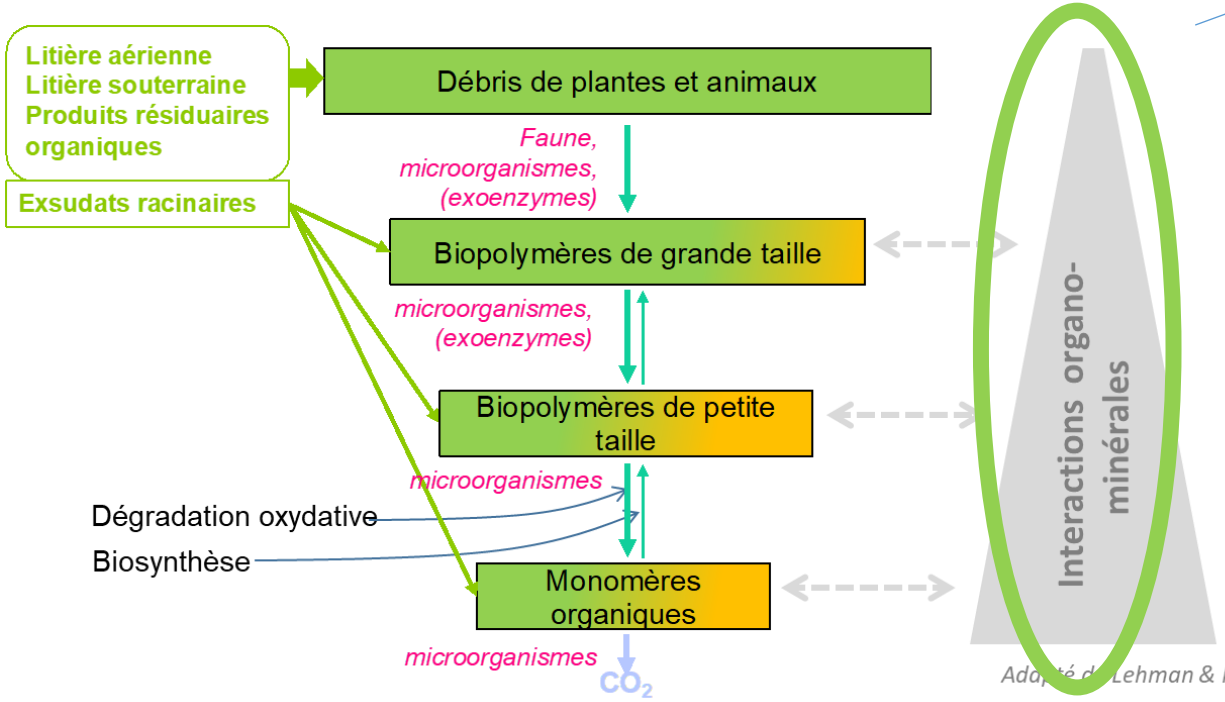


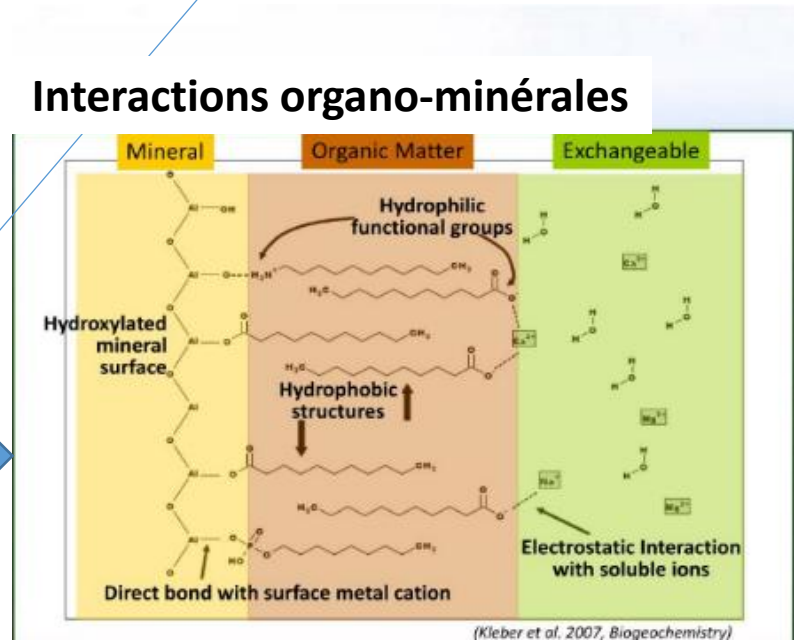
- Le carbone organique du sol provient **de résidus végétaux élaborés par assimilation chlorophyllienne du CO_2 atmosphérique** et incorporés au sol (racines, exsudats racinaires, litières, résidus de culture…)

- Ces résidus végétaux (et animaux) subissent dans le sol une série de **transformations** sous l'effet de la faune et des microorganismes; une fraction des molécules organiques issues des synthèses microbiennes est **« stabilisée »** par des **interactions organo-minérales**

- Cette **stabilisation** fait que le temps de résidence du carbone dans le sol peut atteindre **plusieurs décennies, voire plusieurs siècles (Balesdent, 2018)**





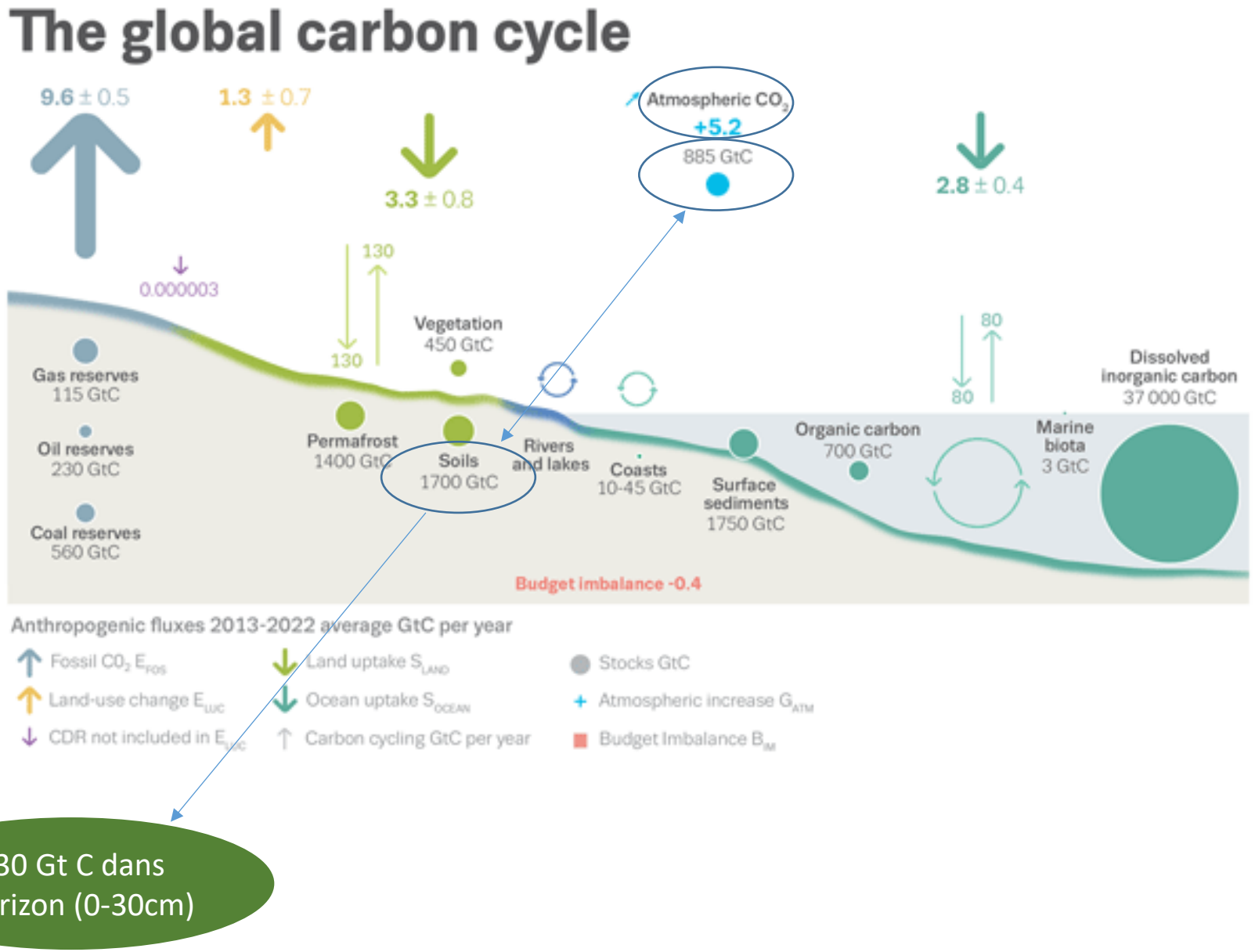


L'idée du 4‰

- A l'échelle planétaire **les sols contiennent ~1700 Gt de carbone organique** (soit deux fois la quantité contenue sous forme de CO_2 dans l'atmosphère)

- La moitié de ce stock est contenue dans l'horizon 0-30cm (**830 GtC**)

- Une augmentation de **4 pour mille par an de ce stock** (830*4/1000=3,2 GtC/an), associé à un arrêt de la déforestation (1,3GtC/an) permettrait de presque stopper l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère (+5,2 GtC/an)



830 Gt C dans l'horizon (0-30cm)

Quelle marge de manœuvre pour augmenter les stocks?

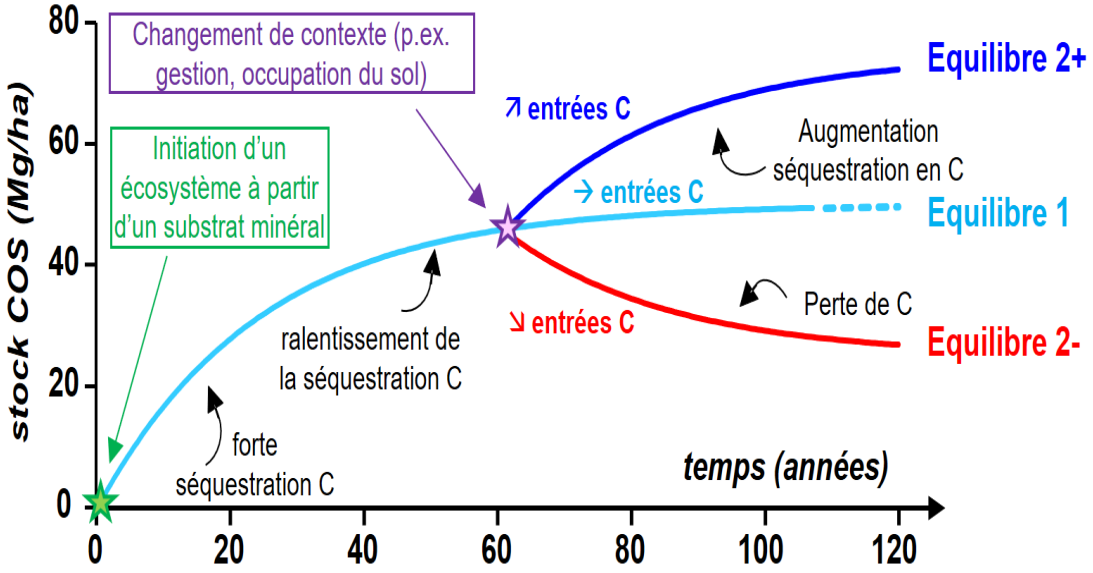
- La constitution d'un stock de carbone dans le sol est un **processus lent** (plusieurs décennies)

- Il y a en permanence des **entrées** (ex apports de litières) et des **sorties** (minéralisation et émission de CO_2 vers l'atmosphère)

- En régime stationnaire (hors changement d'usage et de pratique) le stock tend vers une **valeur d'équilibre** (sorties=entrées)

- **Un changement d'usage** (ex retournement d'une prairie) **ou de pratique** (ex introduction de cultures intermédiaires) va faire tendre le stock vers une **nouvelle valeur d'équilibre**, plus haute ou plus basse

- La capacité d'un sol à stabiliser du carbone est limitée → Notion de **saturation** (différente de la notion d'équilibre), mais **controversée**



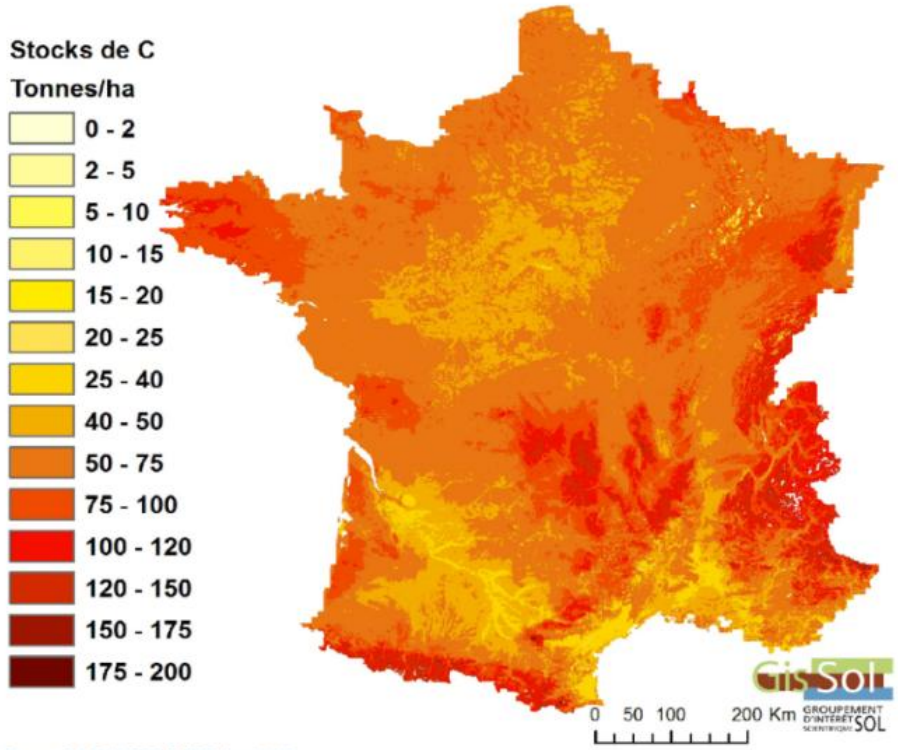
→ Le stockage additionnel de carbone dans les sols est un processus **limité dans le temps, plafonné, réversible, à rendement faible,** nécessitant des **ressources en carbone « entrant »**

Les stocks de carbone organique dans les sols métropolitains

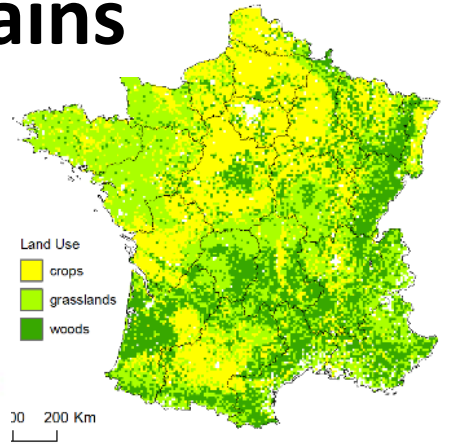
- Un stock total de 6.08 Gt C dans l'horizon 0-100cm (3.58 Gt dans l'horizon 0-30cm)

- Des stocks plus élevés sous forêt et prairie permanentes, plus faibles sous grandes culture

- Des stocks plus élevés en zone de montagne (Alpes, Pyrénées, Vosges, Jura, Massif central); plus faibles en zone de plaine (bassin Parisien, Aquitain)



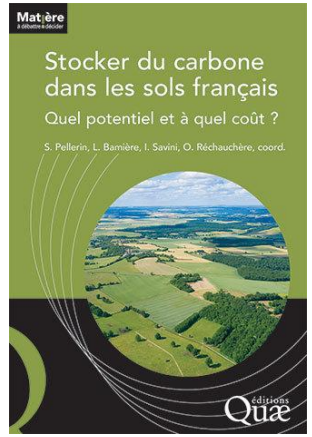
Source: Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.





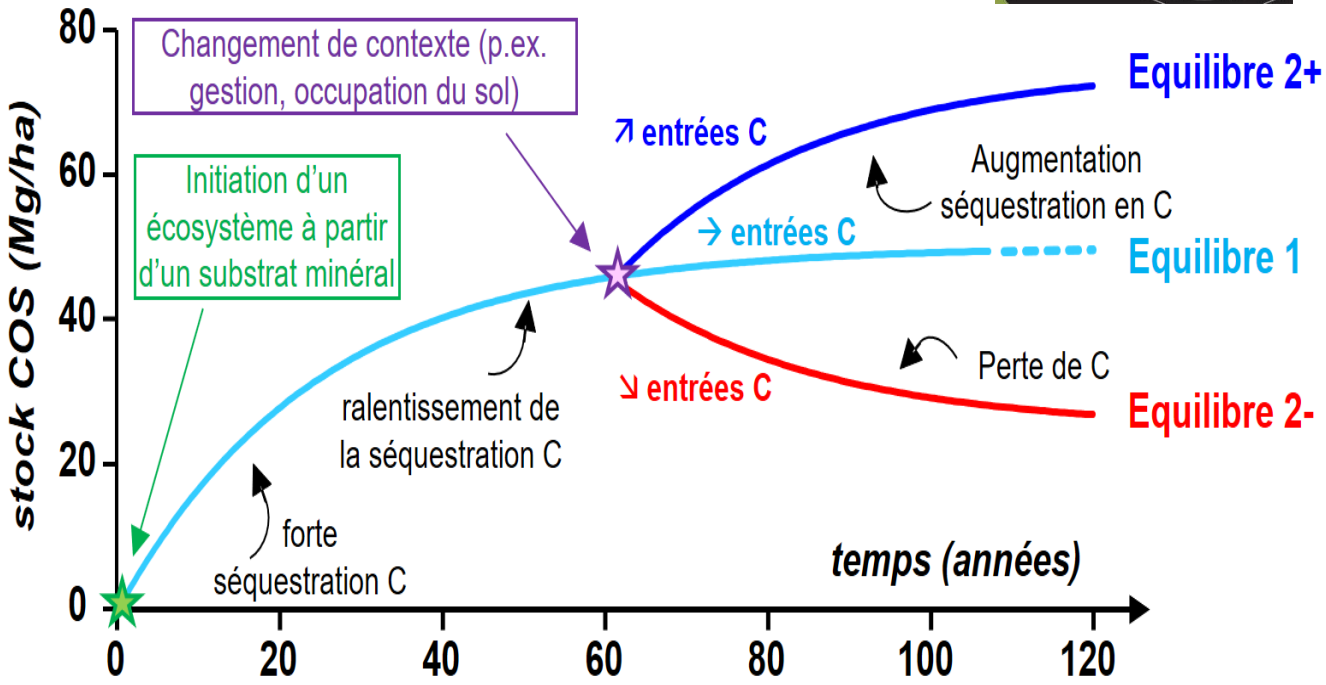
	min	mean	max	Standart deviation
Carbon stocks under permanent grasslands (t/ha)	18,1	**84,6**	309	35.0
Carbon stocks under arable crops (t/ha)	9,92	**51,6**	137	16.2
Carbon stocks under forests (t/ha)	6.87	**81.0**	230	35.4

Ordre de grandeur des évolutions tendancielles (d'après INRA 2021)



Forêts	**+ 240 kg C ha^{-1} an^{-1}**
Prairies permanentes	**+ 110 kg C ha^{-1} an^{-1}**
Grandes cultures	**- 170 kg C ha^{-1} an^{-1}**

INRA, 2020



Valeur utilisée dans l'outil Cap'2ER de l'IDELE pour les prairies permanentes: +570 kgC ha^{-1} an^{-1} (guide méthodologique Cap'2ER 2022), très optimiste!

Quelles pratiques agricoles permettraient d'augmenter les stocks? → Etude "4 pour mille INRA"

Neuf pratiques candidates choisies sur la base d'une synthèse bibliographique

- Extension des cultures intermédiaires
- Semis direct
- Mobilisation de nouvelles ressources organiques, actuellement non épandues
- Insertion et allongement des prairies temporaires, en remplacement du maïs ensilage
- Agroforesterie intra-parcellaire
- Haies
- Intensification modérée des prairies extensives (+50kg N/ha)
- Substitution fauche / pâture
- Enherbement des vignobles









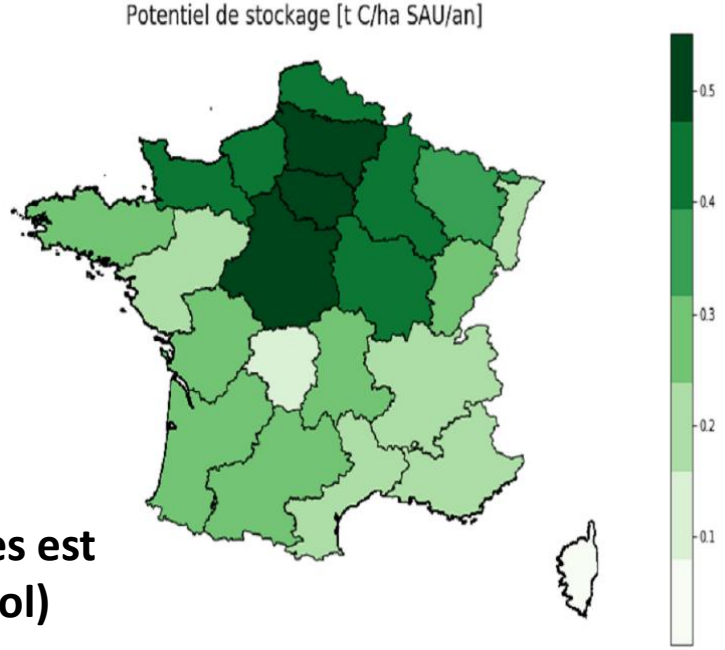


- L'assiette potentielle de chacune de ces pratiques a été estimée à l'echelle France entière en tenant compte de contraintes agronomiques et techniques (ex pas de culture intermédiaire si durée d'interculture < 2 mois…)
- Le stockage additionnel de carbone a été simulé par modélisation mécaniste à resolution spatiale fine (STICS, Pasim)
- Un bilan gaz à effet de serre complet a été calculé

Quelques résultats clés



- **Un potentiel de stockage additionnel de +5,69 Mt C par an sur l'horizon 0-30cm (+8,28 Mt C sur tout le profil de sol)**
- **L'essentiel des possibilités de stockage <u>additionnel</u> se trouve dans les systèmes de grandes cultures (+5,1 ‰ par an; 86 % du potentiel total);**
- **En prairie l'objectif est plutôt de préserver les stocks, déjà élevés**
- **Les pratiques avec les plus forts potentiels de stockage sont:**
  - ***L'extension des cultures intermédiaires (éviter les sols nus) (35,5%)***
  - ***L'agroforesterie intraparcellaire (19,4%)***
  - ***L'insertion et l'allongement de prairies temporaires à la place du maïs ensilage (14,8%)***



- **Le potentiel d'atténuation lié à la mise en place de l'ensemble des pratiques stockantes est de 59 $MtCO_2e$/an (dont 28,2 $MtCO_2e$/an de stockage additionnel de carbone dans le sol)**
- **Cela permettrait de compenser 15% des émissions françaises (396 $MtCO_2e$ in 2020)**

Méthane émis par l'élevage ruminant et stockage de carbone en prairie; comparaison d'ordres de grandeur

Emission de méthane d'une vache laitière (d'après Eugène et al., 2019) : de 90 à 200 kg CH_4 par an, soit entre 2520 et 5600 kg CO_{2e} par an (pour un PRG méthane à 100 ans de 28)

Soit, pour un chargement de l'ordre de 1,4 UGB par ha, une émission de 3530 à 7840 kg CO_{2e} par ha et par an

Stockage tendanciel carbone prairie: 110 kg C ha^{-1} an^{-1}, soit 404 kg CO_2 ha^{-1} an^{-1}

Perte de carbone d'une prairie permanente labourée et remplacée par une grande culture: passage de 80 à 50 tonnes de C par ha dans l'horizon 0-30cm, soit -30t de C par ha en environ 30 ans (durée avant atteinte du nouvel équilibre), soit -1tC/ha/an, soit – 3,67 t CO_2/ha/an=-3670 kgCO_2/ha/an)

→ le stockage tendanciel de carbone en sol de prairie permanente ne compense que très partiellement les émissions de méthane liées à l'élevage herbivore
→ par contre, si l'on considère que la présence d'un élevage herbivore permet le maintien d'une prairie qui serait sinon convertie en grande culture (ce qui se discute), les émissions évitées de CO_2 par non retournement de la prairie sont du même ordre de grandeur que la fourchette basse des émissions de méthane (en CO_2 équivalent)

Quels autres leviers pour améliorer le bilan gaz à effet de serre des élevages?

- Réduire les émissions de méthane entérique et liées à la gestion des effluents via différents leviers (génétique, rations et additifs, conduite du troupeau, gestion des effluents….)→ cf exposés précédents

- Relocaliser la production d'aliments riches en protéines (remplacement du soja importé par des protéines produites en France/dans l'UE)
  - Levier de diversification des successions culturales;
  - intérêt pour la maitrise des bioagresseurs
  - Entrée d'azote par fixation symbiotique, réduction de l'usage des engrais azotés de synthèse et des couts associés, réduction des émissions liées à leur fabrication et à leur usage (CO_2, N_2O)



- Produire de l'énergie renouvelable à partir des effluents d'élevage par digestion anaérobie
  - Réduction des émissions de CH_4 lors du stockage
  - Production d'un biogaz renouvelable, effet de substitution à gaz fossile
  - Stockage carbone par épandage des digestats (mais moindre que si épandage direct des effluents)

Quel usage optimal de la biomasse (effluents d'élevage, cultures intermédiaires…) pour atténuer le changement climatique?

Retour au sol et stockage de carbone?





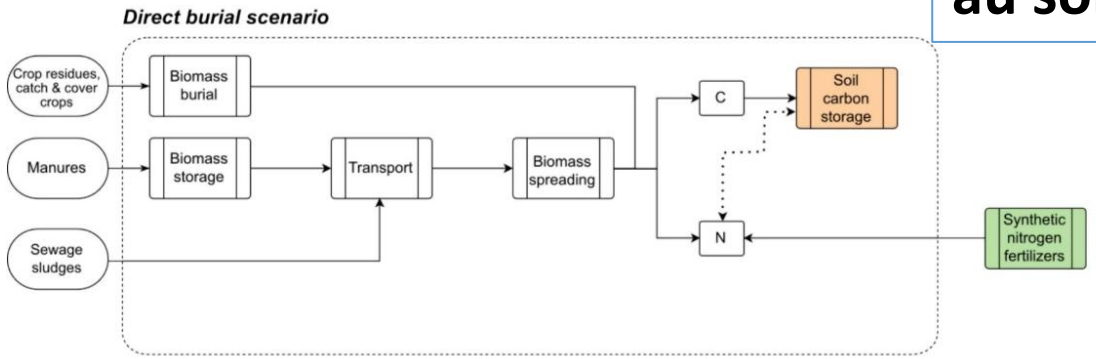
Ou **production d'énergie renouvelable** (par digestion anaérobie) et **substitution à une énergie fossile** (avec également un stockage de carbone par épandage des digestats, mais dans une moindre mesure)



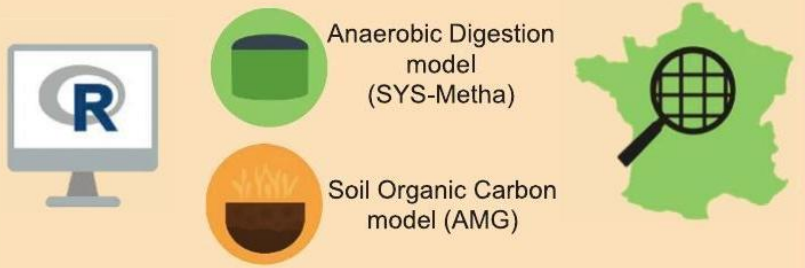
Comparaison des émissions de gaz à effet de serre des deux scénarios, depuis la collecte des biomasses jusqu'à l'utilisation de l'énergie produite et/ou le stockage de carbone dans le sol, à l'échelle France entière

Scenario incorporation au sol



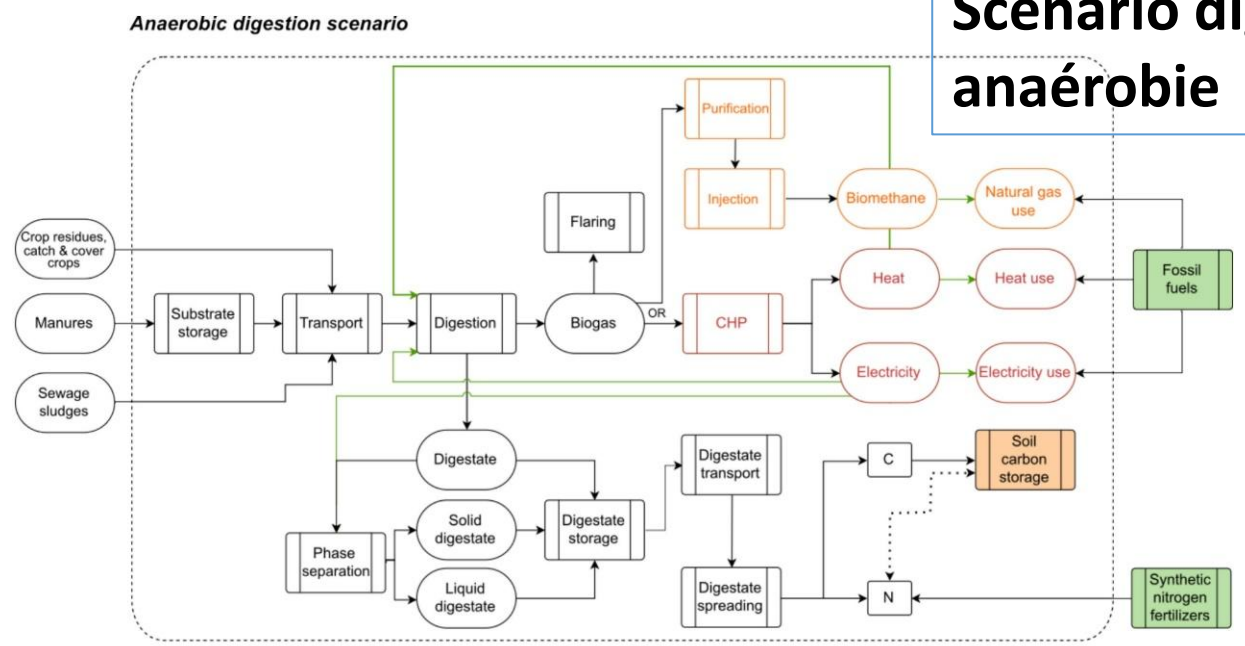


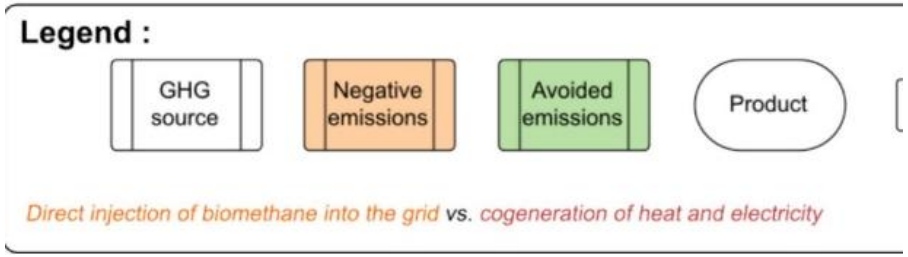
- **Two models are computed** using **emission factors** from national and international references.



Scenario digestion anaérobie



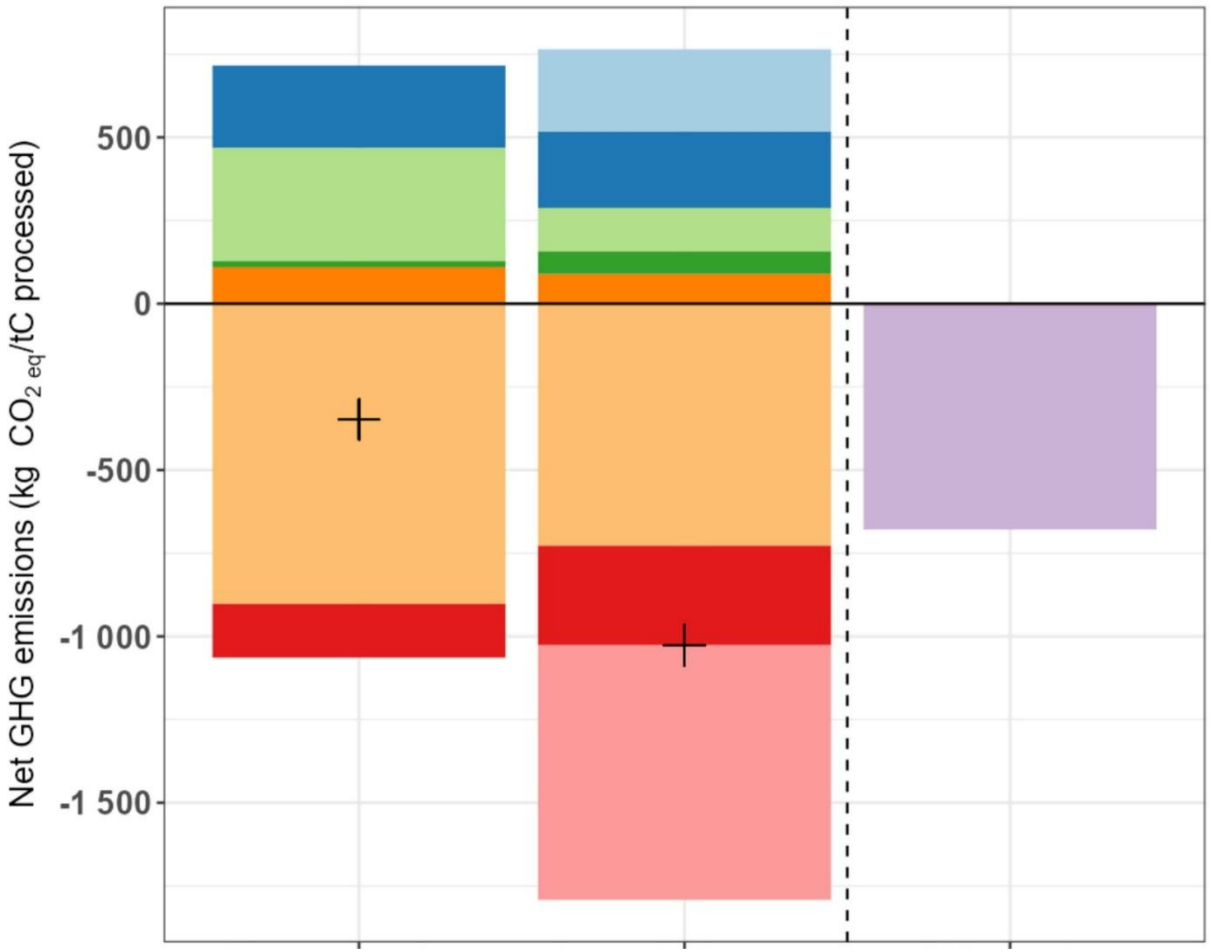




Direct biomass incorporation

Anaerobic digestion

Difference in net GHG emissions



Science of the Total Environment 1002 (2025) 180601

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Large-scale development of biogas production in France: Improved climate benefits over the long term compared to biomass burial

N. Malet[a,b,*], S. Pellerin[a], T. Nesme[a]

Emission source

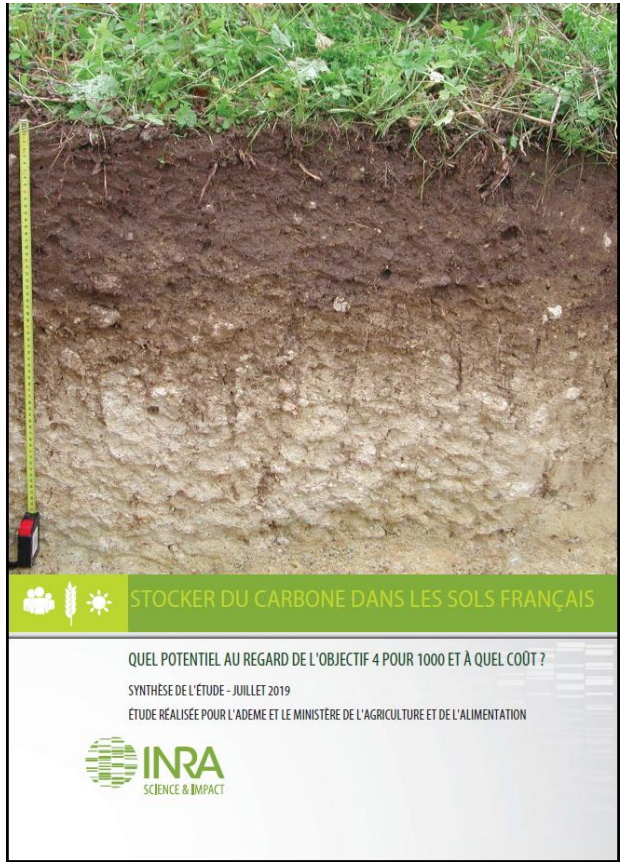
- Anaerobic digestion process
- Biomass spreading
- Biomass storage
- Biomass transport
- Fossil energy substitution
- Synthetic nitrogen fertilizer substitution
- Soil carbon storage
- Soil N Mineralization
- Difference in net GHG emissions

→ La production d'énergie renouvelable par digestion anaérobie de la biomasse est plus performante pour réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre que le stockage de carbone par incorporation dans le sol

Quelques messages clés relatifs au stockage de carbone dans les sols

- Un potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols français de +5.78 Mt C/an dans l'horizon 0-30cm (+8.28 Mt C/an en considérant l'ensemble de la profondeur de sol)
- Ce potentiel de stockage additionnel se trouve surtout en sol de grande culture
- Les trois pratiques avec le plus fort potentiel sont l'extension des cultures intermédiaires, l'agroforesterie et les haies, le remplacement du maïs ensilage par de la prairie temporaire
- En considérant le bilan gaz à effet de serre complet de ces pratiques le potentiel d'atténuation est de 59 $MtCO_2e$/an
- La mise en œuvre de ces pratiques compenserait 15% des émissions nationales (396 $MtCO_2e$ in 2020)
- En prairie permanente l'enjeu est plutôt de préserver les stocks, déjà élevés
- Le stockage additionnel tendanciel en prairie ne compense que très partiellement les émissions de méthane liées à l'élevage herbivore. Par contre les émissions évitées par le non retournement des prairies sont du même ordre de grandeur
- La production d'énergie renouvelable par digestion anaérobie de la biomasse contribue davantage à la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre que le stockage de carbone par incorporation dans le sol. L'arbitrage entre ces différentes options de valorisation de la biomasse doit cependant tenir compte des autres services attendus du carbone du sol





MARTIN M., DIMASSI B., ROMAN DOBARCO M., GUENET B., ARROUAYS D., ANGERS D.A., SOUSSANA J.F., PELLERIN S. 2021. Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon. A case study for France. Global Change Biology. https://doi.org/10.1111/gcb.15547

LAUNAY C., CONSTANTIN J., HOUOT S., MARTIN R., PELLERIN S., THEROND O. 2021. Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. Global Change Biology. https://doi.org/10.1111/gcb.15512

BAMIÈRE L., BELLASSEN V., ANGERS D., CARDINAEL R., CESCHIA E., CHENU C., CONSTANTIN J., DELAME N., DIALLO A., GRAUX A.-I., HOUOT S., KLUMPP K., LAUNAY C., LETORT E., MARTIN R., MÉZIÈRE D., MOSNIER C., RÉCHAUCHÈRE O., SCHIAVO M., THÉROND O., PELLERIN S., 2023. A marginal abatement cost curve for climate change mitigation by additional carbon storage in French agricultural land. Journal of Cleaner Production, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135423

http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Stocker-4-pour-1000-de-carbone-dans-les-sols-francais

Merci pour votre attention!