

Stocker du carbone dans les sols agricoles
➤ français : Quel potentiel et à quel coût ?

Sylvain PELLERIN, INRAE

➤ Un contexte d'urgence climatique

Rapport spécial du GIEC de 2018 → contenir la hausse de la température moyenne en deçà de +1.5°C suppose d'atteindre la **neutralité carbone** à l'échelle planétaire au plus tard en 2050



Deux leviers complémentaires

- **Réduire les émissions** de CO₂ liées à l'usage des énergies fossiles et à la déforestation, ainsi que les émissions des autres gaz à effet de serre (N₂O, CH₄)
- **Préserver et accroître le puits de CO₂** que constitue la biosphère (stockage dans la biomasse et les sols)

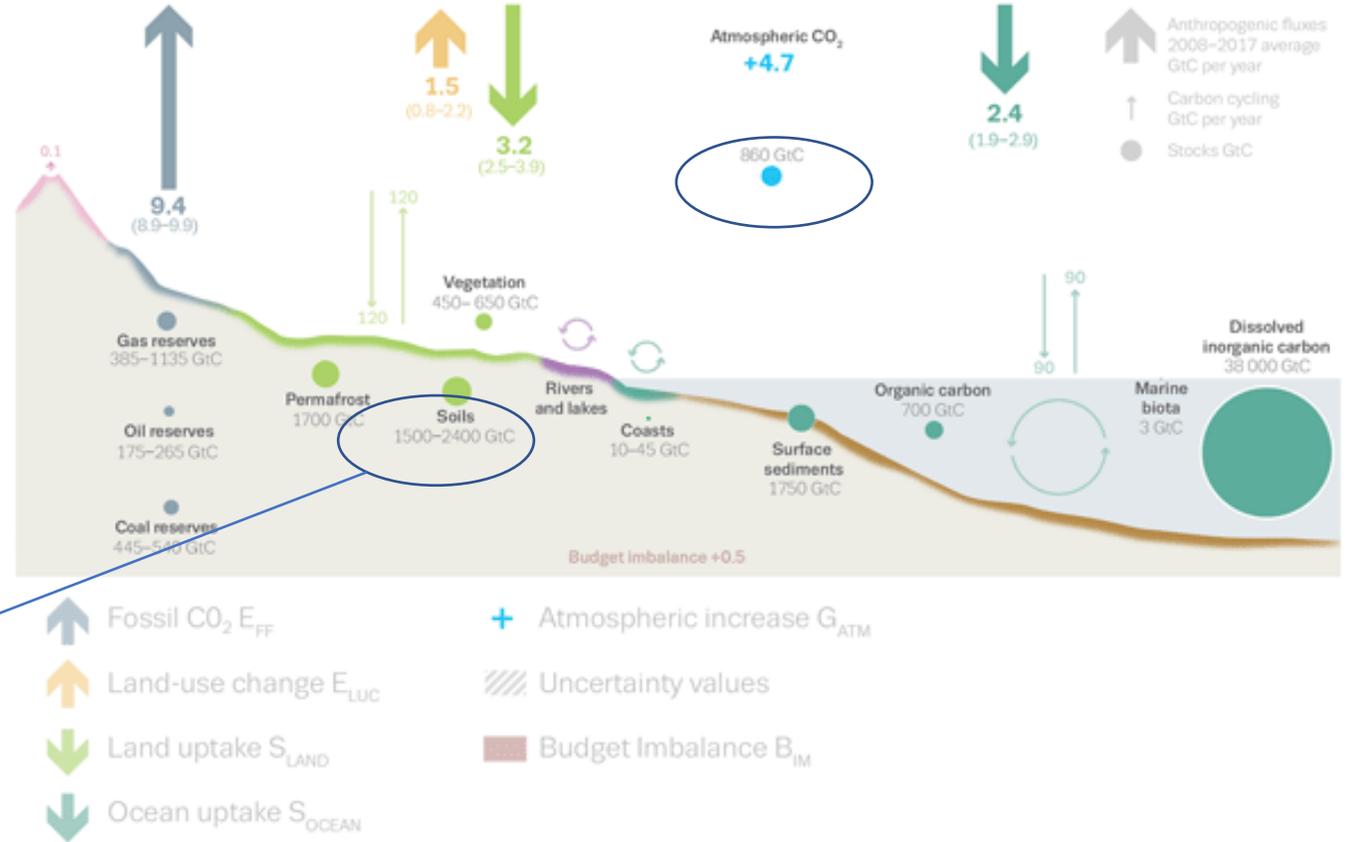


➤ L'initiative 4‰



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

The global carbon cycle



Les sols contiennent 2 à 3 fois plus de carbone que l'atmosphère

Accroître le stock de l'horizon de surface de 4 ‰ par an, associé à un arrêt de la déforestation, compenserait les émissions nettes de CO2 d'origine anthropique

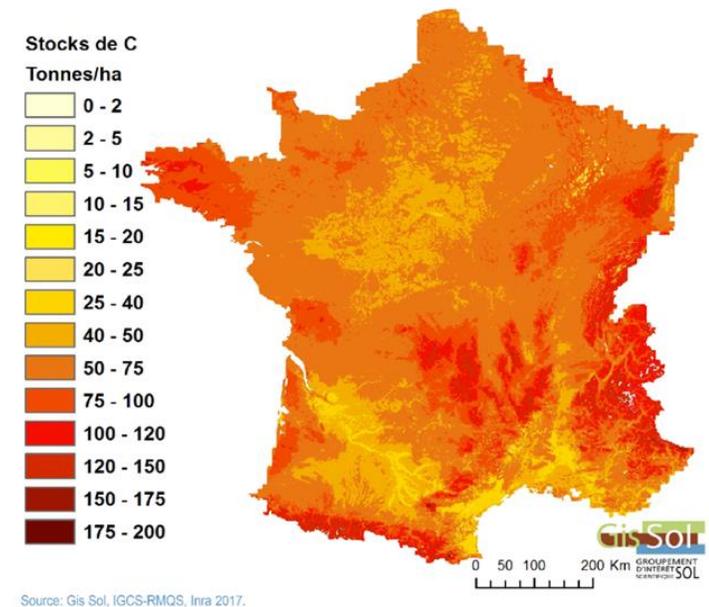
$$830 \times 4/1000 = 3,3 \text{ Gt C}$$

$$+4,7 - 1,5 = 3,2 \text{ Gt C}$$



➤ Quid du 4‰ à l'échelle française?

- En France le stock de C des sols sur l'horizon 0-30cm est de 3580 Mt (6080 sur l'horizon 0-100cm) (Mulder et al., 2016)
- Une augmentation de 4‰ par an du stock sur 0-30cm ($3580 \times 0,004 \times 3,75 = 53,7$ Mt CO₂e) compenserait 11,7 % des émissions nationales de GES (458Mt CO₂e) (19,9% en faisant le calcul sur 0-100cm)

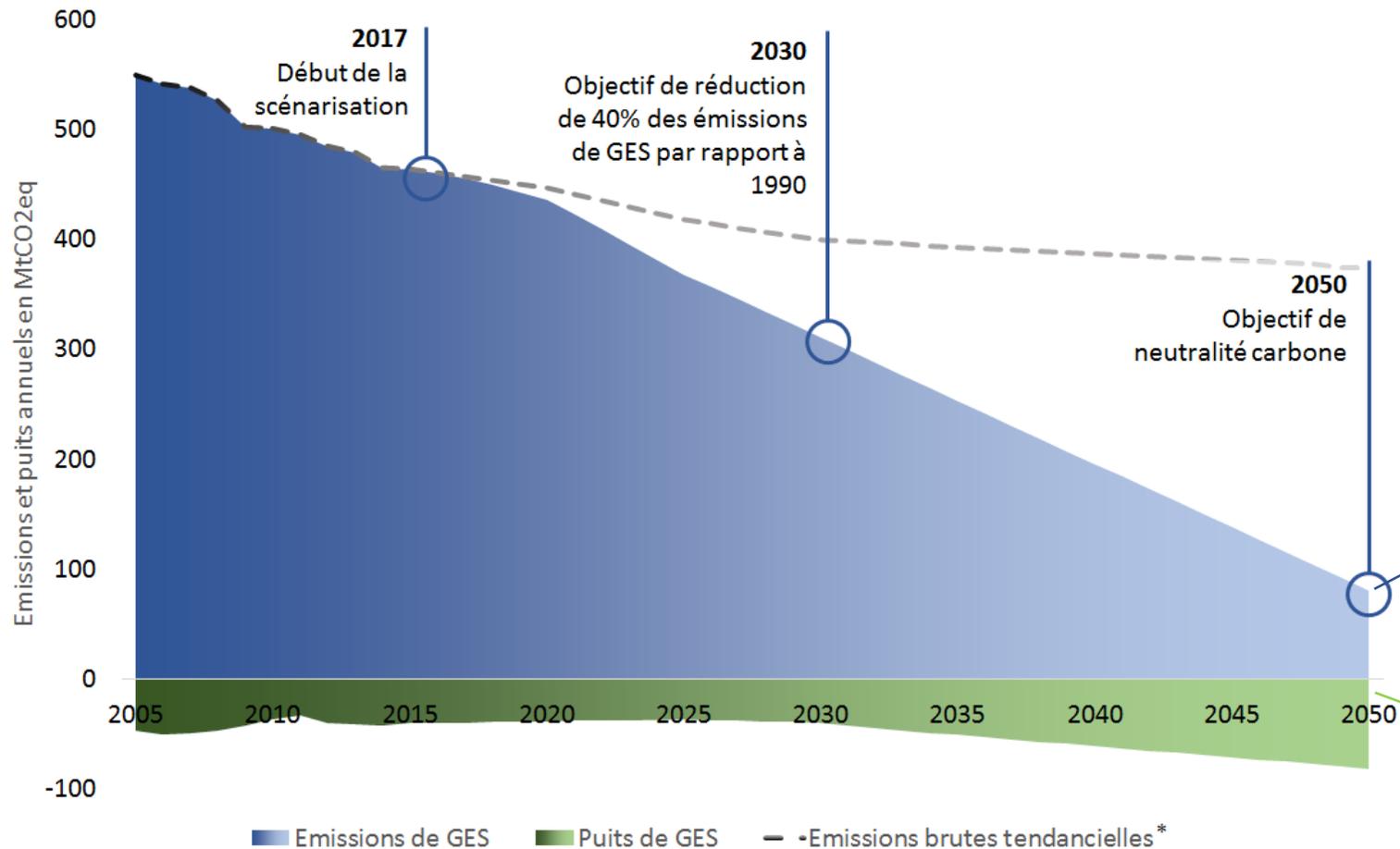


→ Pour un pays industriel comme la France, le stockage additionnel de carbone dans les sols ne peut être qu'un complément à la réduction des émissions pour atteindre la neutralité carbone

→ Mais, compte tenu de la difficulté qu'il y aura à atteindre l'objectif, aucun levier ne doit être négligé



➤ Stratégie Nationale Bas Carbone



Objectif: neutralité C en 2050

- Division par 6 des émissions (division par 2 en agriculture)
- Doublement des puits (afforestation, stockage C dans les sols...)

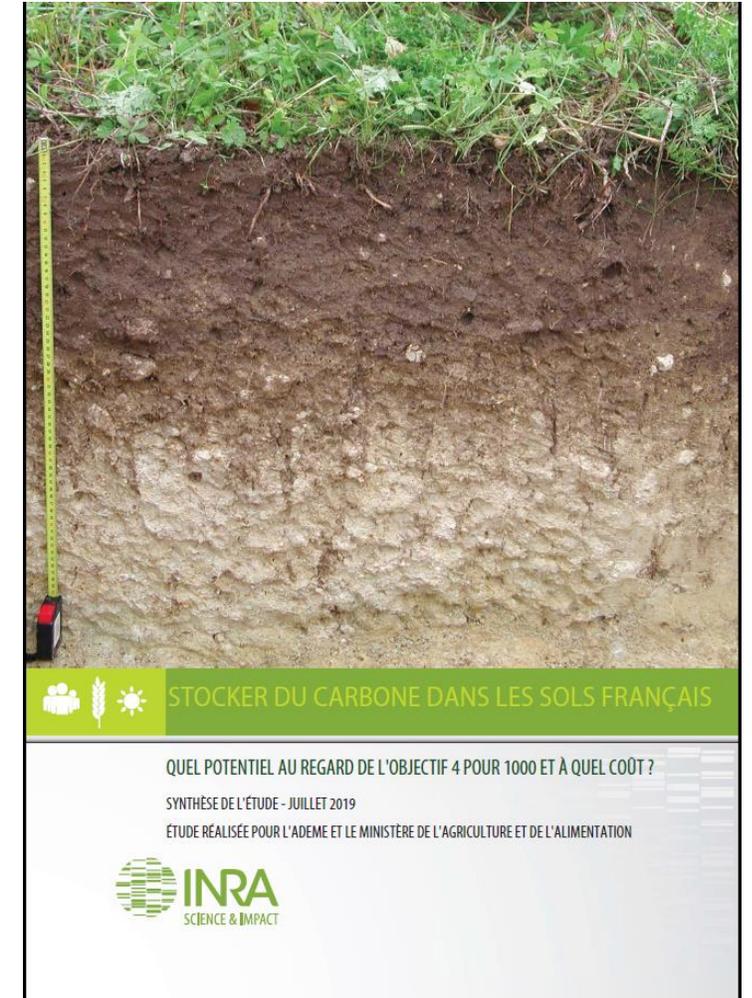
Emissions

Puits de carbone



➤ Objectifs de l'étude INRA « 4 pour mille France »

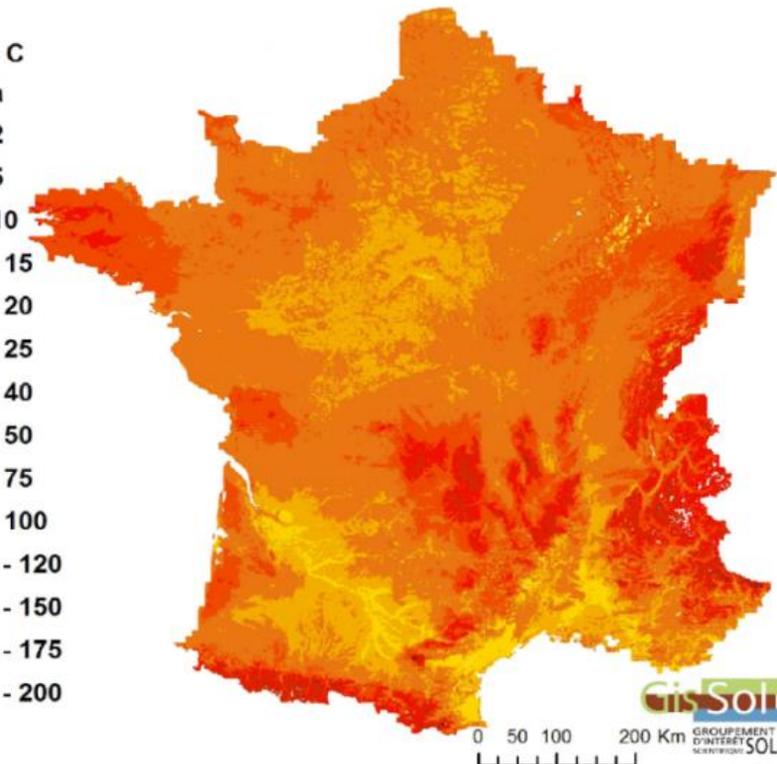
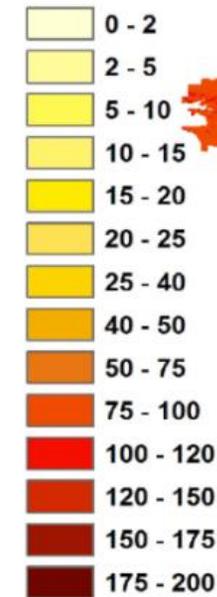
- Identifier des pratiques agricoles permettant d'accroître la teneur en carbone organique des sols français
- Quantifier les potentiels de stockage et les coûts associés, aux échelles régionales et nationales; les cartographier
- Evaluer les effets sur d'autres variables d'intérêt (production, autres gaz à effet de serre, lessivage nitrates,...)
- Proposer une stratégie d'allocation coût-efficace de l'effort de stockage



➤ Les stocks actuels en France

- Des stocks plus élevés en altitude, plus faibles en zones de plaine
- Des stocks plus élevés sous forêt, prairie permanente, plus faibles sous grande culture

Stocks de C
Tonnes/ha



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

	min	moyenne	médiane	max	écart type
Stock de C organique sous prairie permanente (t/ha)	18,1	84,6	78,3	309	35.0
Stock de C organique sous grande culture (t/ha)	9,92	51,6	47,9	137	16.2
Stock de C organique sous forêts (t/ha)	6.87	81.0	73.4	230	35.4



➤ Démarche

1. Sélection de pratiques stockantes « candidates » (bibliographie)

2. Estimation de l'assiette maximale technique (AMT)

surface sur laquelle la mise en œuvre de la pratique « stockante » est possible, en tenant compte des obstacles techniques (ex espèces présentes dans la succession, type de sol, taille des parcelles, présence d'un troupeau...)

3. Chiffrage du potentiel de stockage additionnel

- par simulation, à une résolution spatiale fine (km²), pour prendre en compte la diversité des contextes agro-pédo-climatiques; utilisation des modèles STICS et PaSim pour simuler l'évolution du stock de C pour

(i) la ligne de base (pratiques actuelles)

(ii) les scénarios « stockants »

- par calcul pour les pratiques pour lesquelles on ne disposait pas de modèle (ex Agroforesterie)

4. Calcul du coût additionnel pour l'agriculteur

5. Proposition d'une allocation cout-efficace de l'effort de stockage

quelle(s) pratiques mettre en œuvre? et où les mettre en œuvre? pour atteindre une cible de stockage donnée, en minimisant le coût



➤ Pratiques « stockantes » étudiées

En grandes cultures :

- ❖ **Extension des cultures intermédiaires** : couvrir toutes les intercultures d'une durée supérieure à 2 mois
- ❖ **Semis direct** : suppression de tout travail du sol sauf contrainte technique et sauf pour la destruction des prairies et des cultures intermédiaires
- ❖ **Mobilisation de nouvelles ressources organiques** : compostage ou méthanisation de biodéchets et déchets verts non mobilisés actuellement.
Compostage de boues de station d'épuration déjà épandues actuellement
- ❖ **Insertion et allongement des prairies temporaires** : insertion de prairies à la place du maïs fourrage et allongement de la durée des prairies déjà en place de 1 à 2 ans
- ❖ **Agroforesterie intra-parcellaire** : plantation de rangées d'arbres tous les 24 m sur les parcelles à sol profond
- ❖ **Haies** : plantation sur le périmètre des parcelles >8ha

En prairie permanente :

- ❖ **Intensification modérée des prairies** : apport supplémentaire de 50 kg N/ha sur les prairies productives peu ou pas fertilisées, à l'exclusion des landes, parcours et estives
- ❖ **Substitution de la fauche par des pâturages** : substitution de la ou des deux dernières fauches par deux pâturages

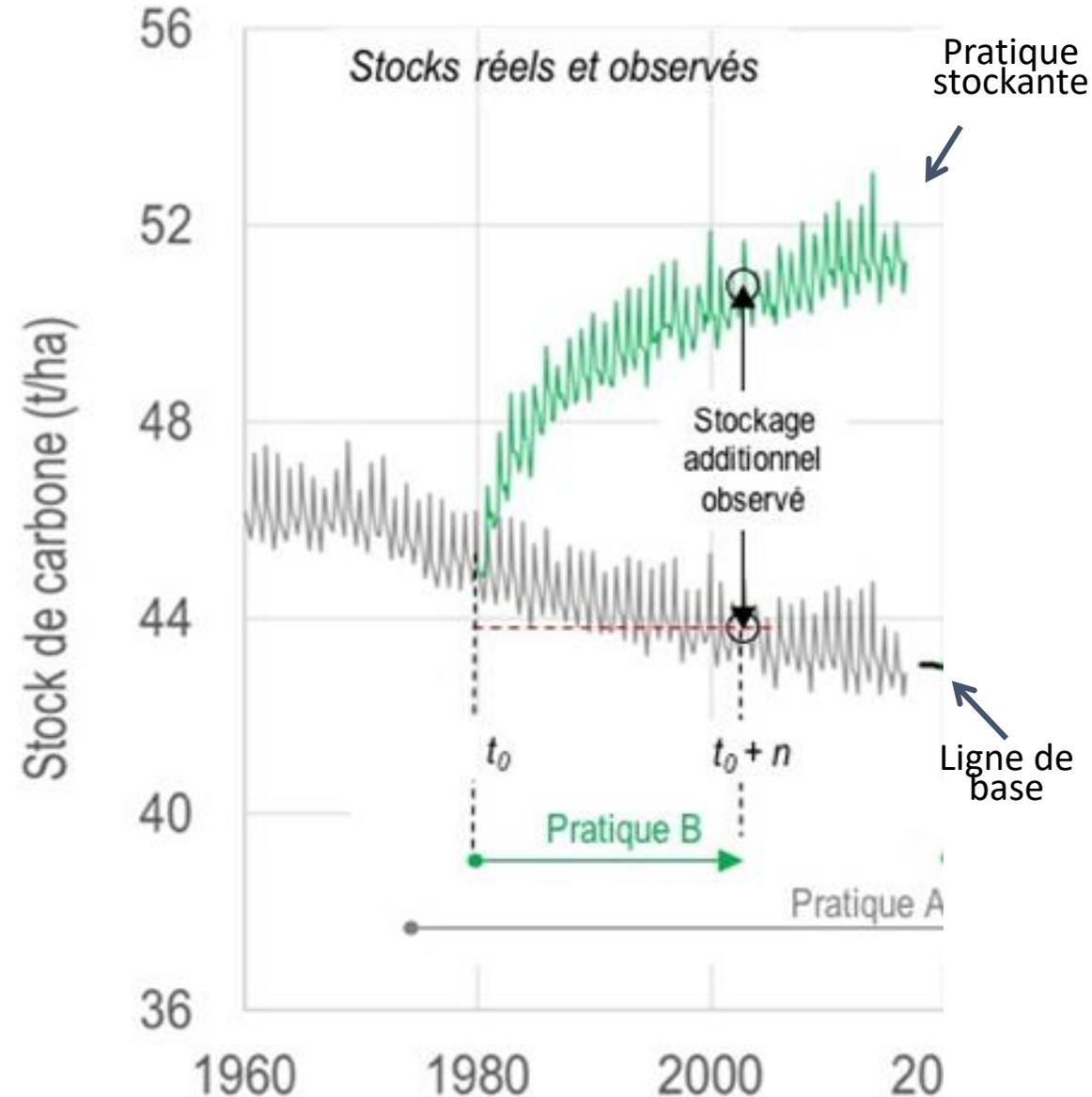
En vigne :

- ❖ **Enherbement des vignes** : une modalité avec un enherbement permanent et une modalité avec un enherbement hivernal de tous les inter-rangs



➤ Calcul du stockage additionnel

- Evolution du stock simulé sur 30 ans
 - sous hypothèse de maintien des pratiques actuelles = **ligne de base**
 - sous hypothèse d'adoption de la **pratique stockante**
- Stockage additionnel (tC/ha/an) =
$$\frac{(\text{Stock } C \text{ final pratique stockante} - \text{Stock } C \text{ final ligne de base})}{30}$$
- Simulations
 - sur 30 ans, sous climat actuel (passé récent)
 - pour l'horizon 0-30 cm
 - extrapolées à l'ensemble du profil
- Calcul d'un bilan GES complet par pratique



➤ Modèles utilisés

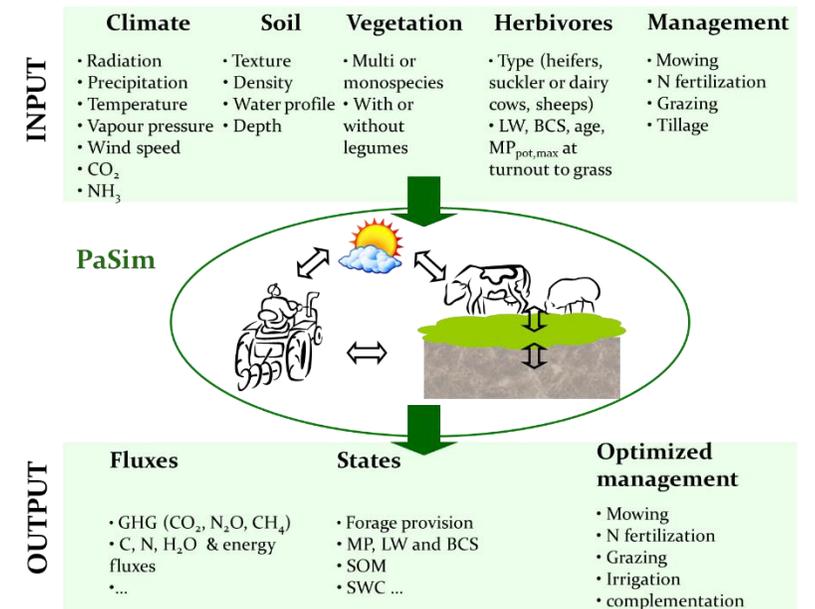
❖ STICS pour les grandes cultures et prairies temporaires

❖ PaSim pour les surfaces toujours en herbe

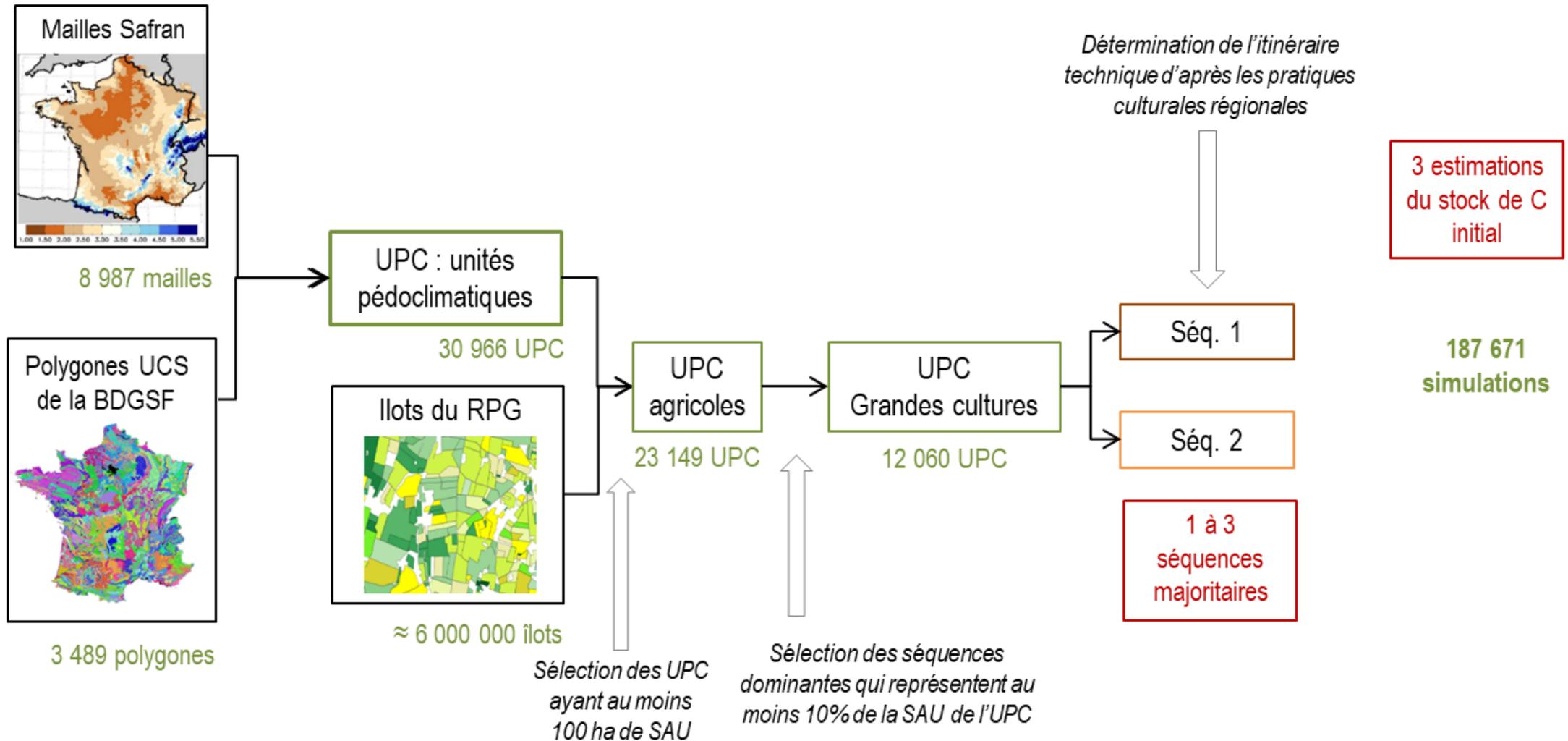
- Couplage du cycle du carbone et de l'azote
- Représentation du pédo-climat et des pratiques agricoles (fertilisation, pâturage, irrigation...)
- En variables de sortie : stock de carbone du sol, rendement des cultures, lixiviation de nitrate, émissions de N₂O...
- Robustes pour une utilisation à l'échelle nationale



PaSim



➤ Plan de simulation STICS (grandes cultures)

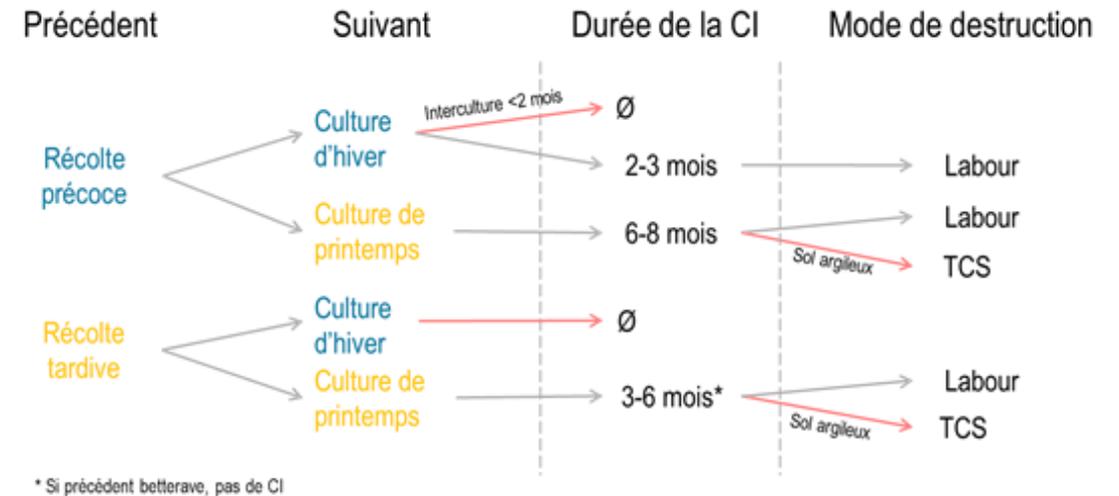


➤ Exemple de la pratique stockante « Extension des cultures intermédiaires »

❖ Extension des cultures intermédiaires en **surface** (Zones Vulnérables Nitrate (ZVN) et hors ZVN, interculture longue et courte), et en **durée** (dates de semis et de destruction optimisées selon le précédent et le suivant).

❖ Choix des espèces :

- Moutarde blanche ou ray-grass d'Italie en interculture d'hiver selon la dominance dans la région (cf. Enquêtes Pratiques Culturelles 2006 et 2011)
- Féverole après maïs grain
- Vesce en interculture d'été

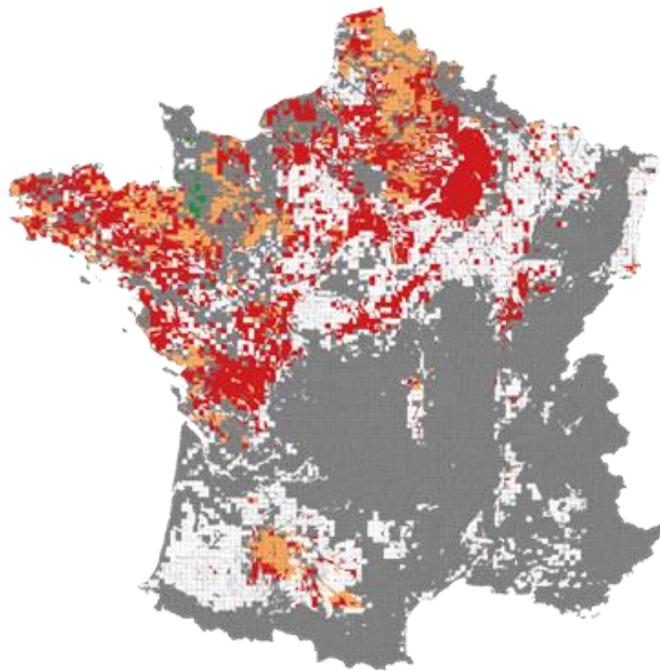


❖ Irrigation possible au semis dans les Unités PédoClimatiques irrigables.

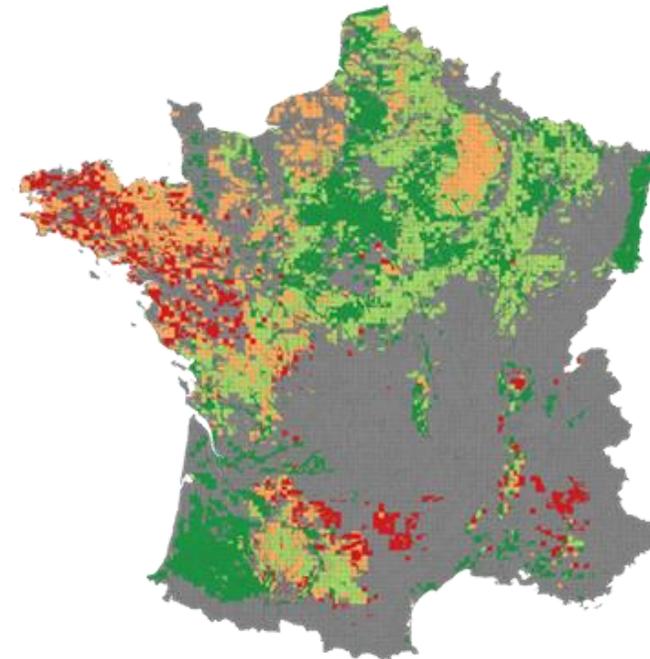


➤ Exemple du scénario expansion des cultures intermédiaires

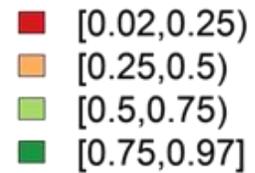
Fréquence des intercultures...



a) ... couvertes dans la ligne de base



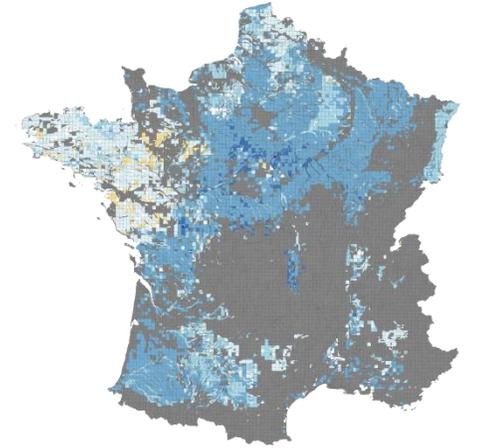
b) couvertes dans le scénario CI



Ajout principalement de cultures intermédiaires en été et de féverole après maïs grain en Alsace et Aquitaine.

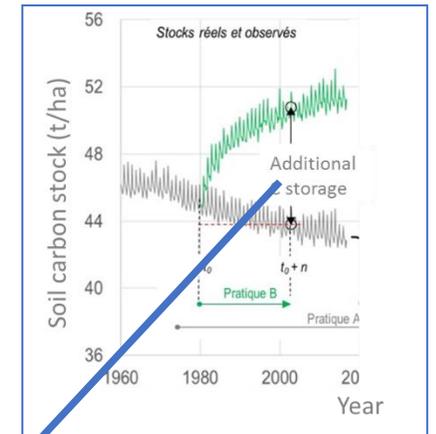
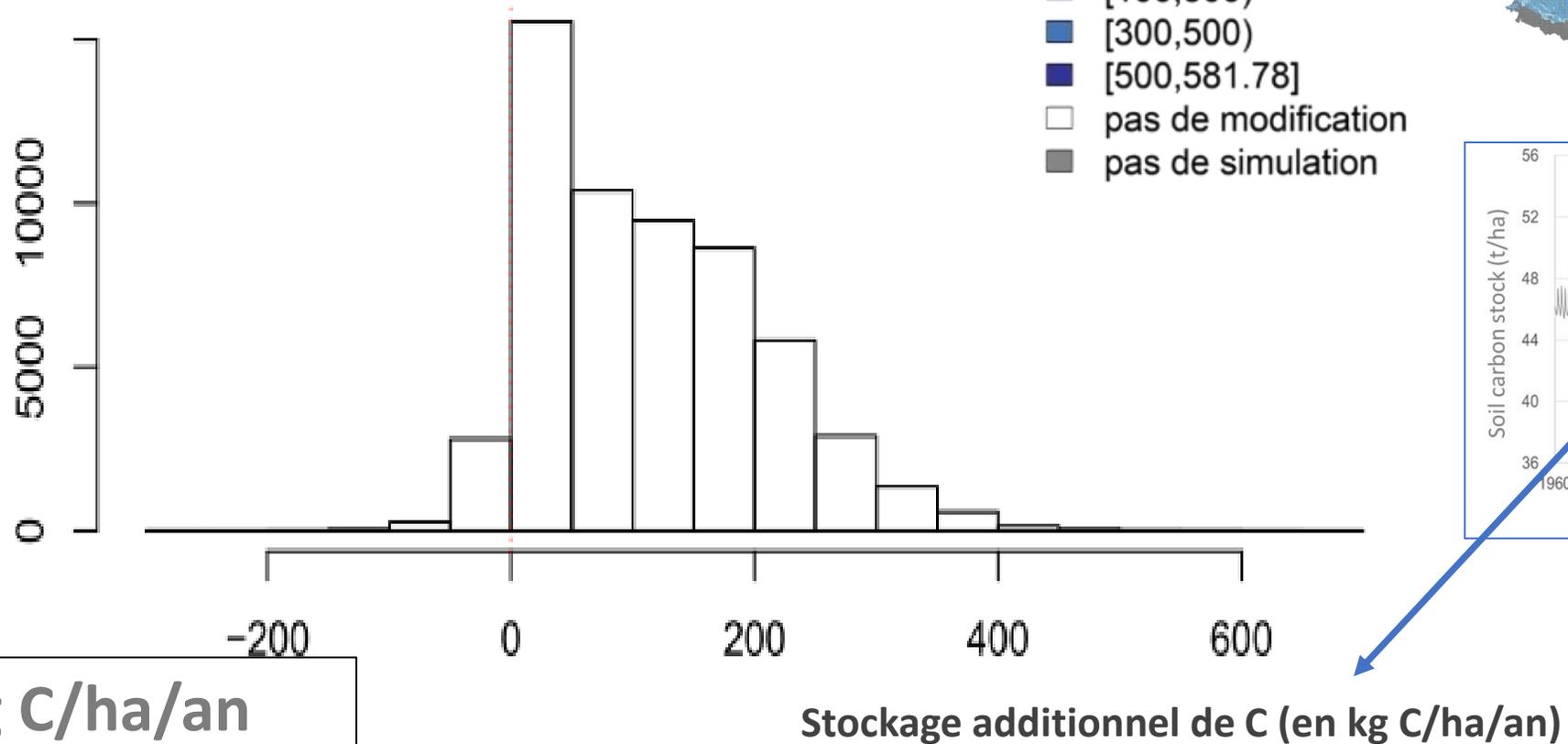


➤ Stockage additionnel permis par l'expansion des cultures intermédiaires



en kg C/ha/an

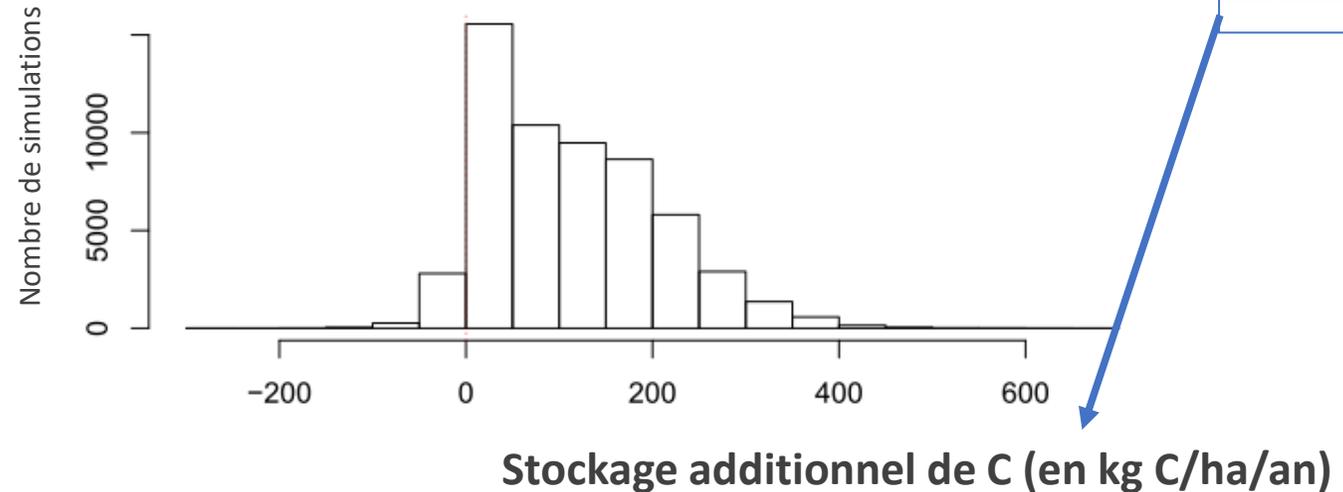
- [-73.43,-50)
- [-50,0)
- [0,50)
- [50,100)
- [100,300)
- [300,500)
- [500,581.78]
- pas de modification
- pas de simulation



➤ Stockage additionnel permis par l'expansion des cultures intermédiaires

Stockage additionnel par rapport à la ligne de base

Surface concernée : 16,64 Mha (96,1% de la surface en grandes cultures et prairie temporaire)



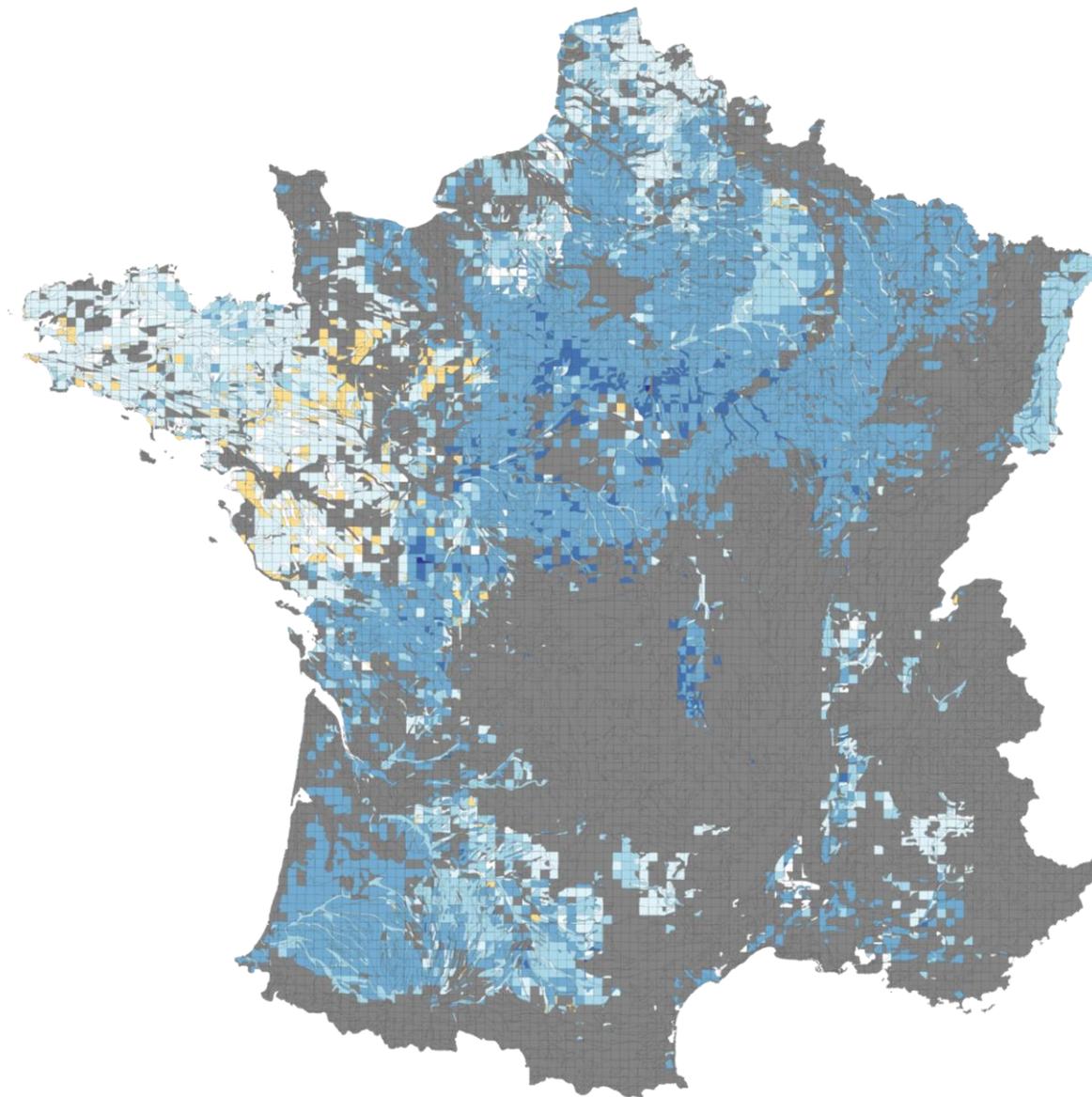
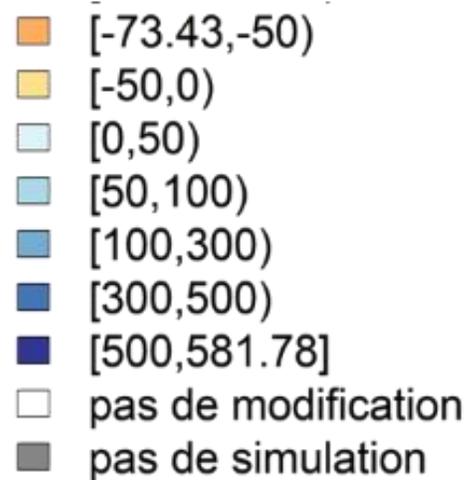
Moyenne : +126 ±93 kg C/ha/an

Référence de la littérature : +313 kgC/ha/an dans des situations où des cultures intermédiaires sont insérées dans des intercultures d'hiver nues à l'état initial.



➤ Stockage additionnel permis par l'expansion des cultures intermédiaires

Carte du stockage additionnel de carbone (en kgC/ha/an)



➤ Bilan gaz à effet de serre complet de l'expansion des cultures intermédiaires

C séquestré sur 0-30 cm	Emissions N ₂ O directes	Volatilisation NH ₃	Lixiviation NO ₃ ⁻	Emissions N ₂ O directes et indirectes	Consommation de carburant par les opérations agricoles	Emissions induites par la fabrication de fuel	Bilan
(kgCO ₂ eq/ha/an)	(kgN-N ₂ O/ha/an)	(kgN-NH ₃ /ha/an)	(kgN-NO ₃ ⁻ /ha/an)	(kgCO ₂ eq/ha/an)	(kgCO ₂ eq/ha/an)	(kgCO ₂ eq/ha/an)	(kgCO ₂ eq/ha/an)
-463	0,10	0,10	-3,70	34	15	4	-411



➤ Potentiel de stockage additionnel associé aux pratiques stockantes

	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm	Assiette	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm	Stockage additionnel, rapporté au stock du mode d'occupation du sol correspondant
	Kg C/ha/an	Mha	Mt C/an	‰ /an
En grandes cultures et prairies temporaires				
Extension des cultures intermédiaires	+126	16,03	+2,019	
Semis direct	+60	11,29	+0,677	
Nouvelles ressources organiques	+57	1,46	+0,084	
Insertion et allongement de prairies temporaires	+127	6,63	+0,840	
Agroforesterie intraparcellaire	+207	5,33	+1,103	
Haies	+17	8,83	+0,150	
Total grandes cultures			+4,873	+5,1



➤ Potentiel de stockage additionnel associé aux pratiques stockantes

	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm	Assiette	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm	Stockage additionnel, rapporté au stock du mode d'occupation du sol correspondant
	Kg C/ha/an	Mha	Mt C/an	‰ /an
En prairie permanente				
Intensification modérée	+176	3,94	+0,694	
Remplacement fauche-pâturage	+265	0,09	+0,023	
Total prairies permanentes			+0,717	+0,9
En vignoble				
Enherbement	+182	0,56	+0,103	
Total vignoble			+0,103	+3,7
Ensemble des surfaces agricoles			5,693	+3,2



➤ Bilan gaz à effet de serre complet des pratiques stockantes

Pratiques stockantes	Stockage additionnel de C par ha d'assiette sur l'ensemble de la profondeur de sol	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par stockage additionnel de C	Principaux autres postes d'émissions modifiés	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par les modifications des autres postes d'émissions	CO ₂ soustrait de l'atmosphère tenant compte du bilan de GES complet
	(kgC/ha/an)	(kgCO ₂ /ha/an)		(kgCO ₂ e/ha/an)	(kgCO ₂ e/ha/an)
Extension des cultures intermédiaires	215	-788	↗ CO ₂ carburants ↘ N ₂ O indirect	52	-736
Insertion et allongement de prairies temporaires	192	-703	↘ N ₂ O indirect (volatilisation, lixiviation) ↘ CO ₂ fabrication engrais N	-201	-903
Agroforesterie intraparcellaire	391	-1 432	↗ Stockage C biomasse	-3 874	-5 306
Intensification modérée des prairies permanentes	213	-781	↗ N ₂ O direct et indirect ↗ CO ₂ fabrication engrais	791	+10

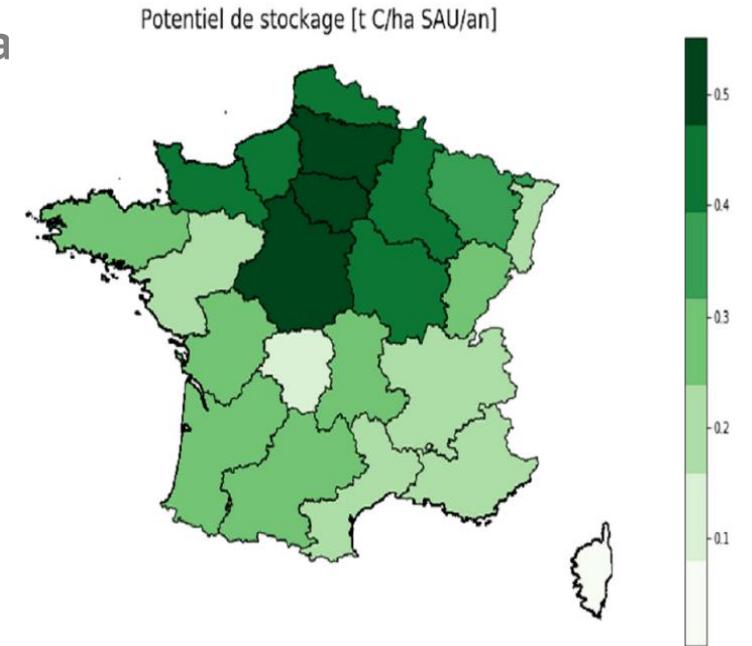
➤ Le calcul du bilan GES complet

- renforce l'intérêt de l'agroforesterie, des haies, des prairies temporaires
- annule l'intérêt de l'intensification modérée des prairies permanentes



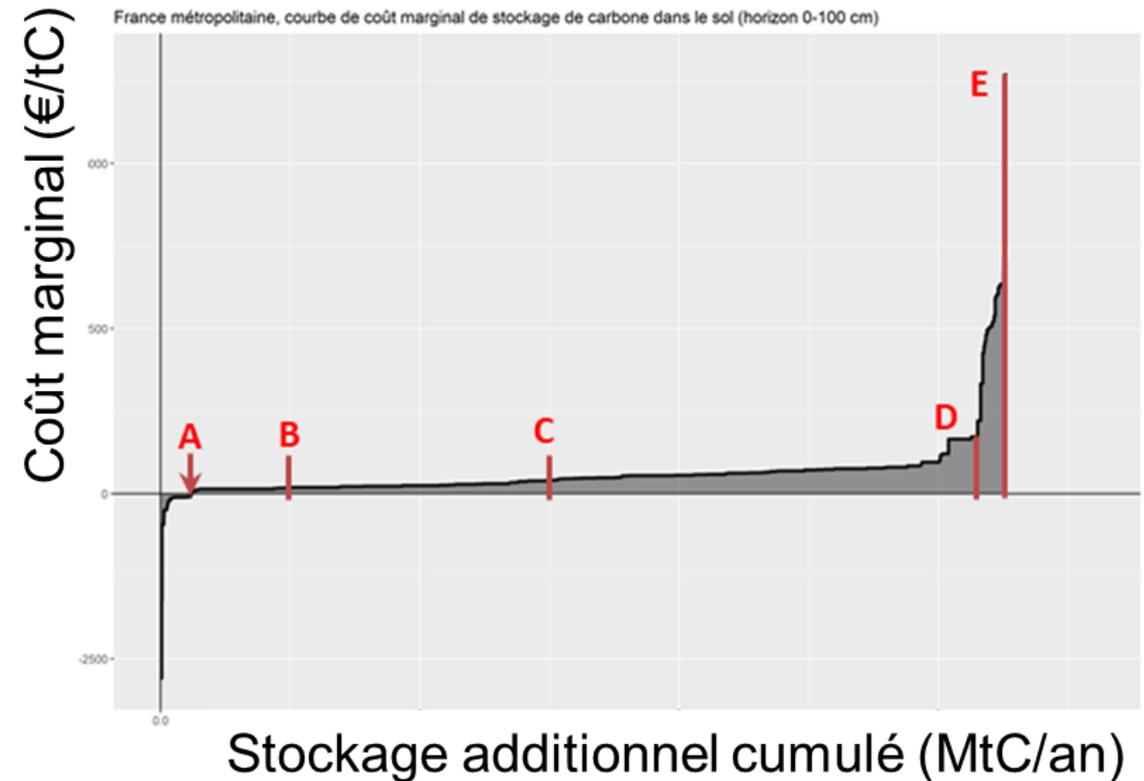
➤ Résultats clés

- Le potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles français est de +5,69 Mt C par an dans l'horizon 0-30cm (+8,28 Mt de C par an sur toute la profondeur de sol)
- L'essentiel des possibilités de stockage additionnel se trouve dans les systèmes de grandes cultures (+5,1 % par an; 86 % du potentiel total)
- Les pratiques avec les plus forts potentiels de stockage sont:
 - *L'extension des cultures intermédiaires (35,5%)*
 - *L'agroforesterie intraparcellaire (19,4%)*
 - *L'insertion et l'allongement de prairies temporaires (14,8%)*
- En prairie permanente l'enjeu est plutôt de préserver les stocks, qui sont plus élevés qu'en grande culture (84,6t de C/ha sous prairie; 51,6t de C/ha sous grande culture)

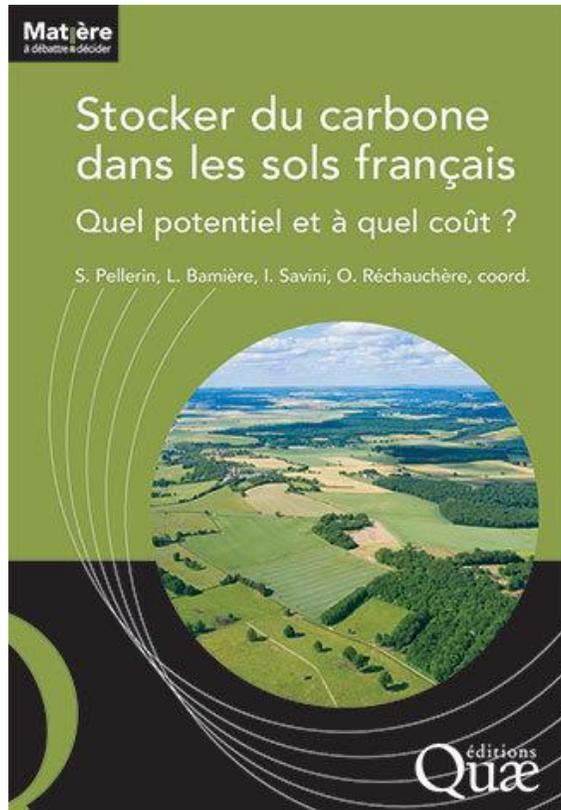


➤ Résultats clés

- Calculé sur l'ensemble de la profondeur de sol, le stockage additionnel permis par l'adoption de pratiques agricoles plus stockantes (30,4 MtCO₂e/an) compenserait annuellement 6,8% des émissions françaises de gaz à effets de serre (458 MtCO₂e/an)
- 46% du potentiel de stockage est à un coût inférieur à la valeur tutélaire actuelle du carbone (55€ /tCO₂e)



➤ Pour aller plus loin



Received: 24 December 2019 | Revised: 7 December 2020 | Accepted: 5 January 2021
DOI: 10.1111/gcb.15547

PRIMARY RESEARCH ARTICLE

Global Change Biology WILEY

Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon: A case study for France

Manuel P. Martín¹ | Bassem Dimassi^{1†} | Mercedes Román Dobarco¹ |
Bertrand Guenet^{2,3} | Dominique Arrouays¹ | Denis A. Angers⁴ | Fabrice Blache⁵ |
Frédéric Huard⁶ | Jean-François Soussana⁷ | Sylvain Pellerin⁸

¹INRAE, InfoSol, Orléans, France
²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSIL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France
³Laboratoire de Géologie de l'ENS, PSL Research University, CNRS, UMR 8538, Paris, France
⁴Agriculture and Agri-Food Canada, Québec City, QC, Canada
⁵Lyode Pothier, Orléans, France
⁶INRAE, AgroClim, Avignon, France
⁷INRAE, UMR ISPA, Bordeaux Sciences Agro, Villenave d'Ornon, France

Correspondence
Manuel P. Martín, INRAE, InfoSol, F-45075 Orléans, France.
Email: manuel.martin@inrae.fr

Present address
Mercedes Román Dobarco, Sydney Institute of Agriculture & School of Life and Environmental Sciences, The University of Sydney, Eveleigh, NSW 2015, Australia

Funding information
Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Agence Nationale de la Recherche, Grant/Award Number: CLAND-ANR-16-CONV-003; Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, LE STUDIUM, European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme, Grant/Award Number: 774378

Abstract

Increasing soil organic carbon (SOC) stocks is a promising way to mitigate the increase in atmospheric CO₂ concentration. Based on a simple ratio between CO₂ anthropogenic emissions and SOC stocks worldwide, it has been suggested that a 0.4% (4 per 1000) yearly increase in SOC stocks could compensate for current anthropogenic CO₂ emissions. Here, we used a reverse RothC modelling approach to estimate the amount of C inputs to soils required to sustain current SOC stocks and to increase them by 4‰ per year over a period of 30 years. We assessed the feasibility of this aspirational target first by comparing the required C input with net primary productivity (NPP) flowing to the soil, and second by considering the SOC saturation concept. Calculations were performed for mainland France, at a 1 km grid cell resolution. Results showed that a 30%–40% increase in C inputs to soil would be needed to obtain a 4‰ increase per year over a 30-year period. 88.4% of cropland areas were considered unsaturated in terms of mineral-associated SOC, but characterized by a below target C balance, that is, less NPP available than required to reach the 4‰ aspirational target. Conversely, 90.4% of unimproved grasslands were characterized by an above target C balance, that is, enough NPP to reach the 4‰ objective, but 59.1% were also saturated. The situation of improved grasslands and forests was more evenly distributed among the four categories (saturated vs. unsaturated and above vs. below target C balance). Future data from soil monitoring networks should be able to validate these results. Overall, our results suggest that, for mainland France, priorities should be (1) to increase NPP returns in cropland soils that are unsaturated and have a below target carbon balance and (2) to preserve SOC stocks in other land uses.

KEYWORDS

4 per 1000, climate change mitigation, net primary productivity, RothC, SOC saturation, soil organic carbon

†Deceased 16 January 2018.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.
© 2021 The Authors. Global Change Biology published by John Wiley & Sons Ltd.

Global Change Biol. 2021,00:1–20.

wileyonlinelibrary.com/journal/gcb | 1

Received: 21 July 2020 | Accepted: 4 January 2021
DOI: 10.1111/gcb.15112

PRIMARY RESEARCH ARTICLE

Global Change Biology WILEY

Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling

Camille Launay^{1,2} | Julie Constantin¹ | Florent Chlebowski³ | Sabine Houot⁴ |
Anne-Isabelle Graux⁵ | Katja Klumpp⁶ | Raphaël Martin⁶ | Bruno Mary³ |
Sylvain Pellerin⁷ | Olivier Therond⁸

¹Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, Castanet-Tolosan, France
²INRAE, DESE, Paris, France
³INRAE, UMR 1213, Université de Lille, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France
⁴INRAE, UMR 1213, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France
⁵INRAE, UMR 1213, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France
⁶INRAE, UMR 1213, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France
⁷INRAE, UMR 1213, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France
⁸INRAE, UMR 1213, Université de Picardie Jules Verne, Arras, France

Correspondence
Julie Constantin, INRAE, UMR AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France.
Email: julie.constantin@inrae.fr

Funding information
Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, INRAE

Abstract

Many studies have assessed the potential of agricultural practices to sequester carbon (C). A comprehensive evaluation of impacts of agricultural practices requires not only considering C storage but also direct and indirect emissions of greenhouse gases (GHG) and their side effects (e.g., on the water cycle or agricultural production). We used a high-resolution modeling approach with the Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard soil-crop model to quantify soil organic C (SOC) storage potential, GHG balance, biomass production and nitrogen- and water-related impacts for all arable land in France for current cropping systems (baseline scenario) and three mitigation scenarios: (i) spatial and temporal expansion of cover crops, (ii) spatial insertion and temporal extension of temporary grasslands (two sub-scenarios) and (iii) improved recycling of organic resources as fertilizer. In the baseline scenario, SOC decreased slightly over 30 years in crop-only rotations but increased significantly in crop/temporary grassland rotations. Results highlighted a strong trade-off between the storage rate per unit area (kg C ha⁻¹ year⁻¹) of mitigation scenarios and the areas to which they could be applied. As a result, while the most promising scenario at the field scale was the insertion of temporary grassland (4466 kg C ha⁻¹ year⁻¹ stored to a depth of 0.3 m compared to the baseline, on 0.68 Mha), at the national scale, it was by far the expansion of cover crops (4131 kg C ha⁻¹ year⁻¹ on 17.62 Mha). Side effects on crop production, water irrigation and nitrogen emissions varied greatly depending on the scenario and production situation. At the national scale, combining the three mitigation scenarios could mitigate GHG emissions of current cropping systems by 54% (–11.2 from the current 20.5 Mt CO₂e year⁻¹), but the remaining emissions would still be far from the objective of C-neutral agriculture.

KEYWORDS

cover crops, cropping system, large scale, organic fertilization, LTIIC model, temporary grasslands

Global Change Biol. 2021,27:1845–1861.

wileyonlinelibrary.com/journal/gcb

© 2021 John Wiley & Sons Ltd | 1845

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



#3RDF2022

Stocker du carbone dans les sols agricoles français : quel potentiel et à quel coût?
20 janvier 2022 / Sylvain Pellerin

p. 24

Merci pour votre attention!

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

