

Piégeage et stockage du carbone par les écosystèmes terrestres et solutions fondées sur la nature

Nicolas Viovy
LSCE

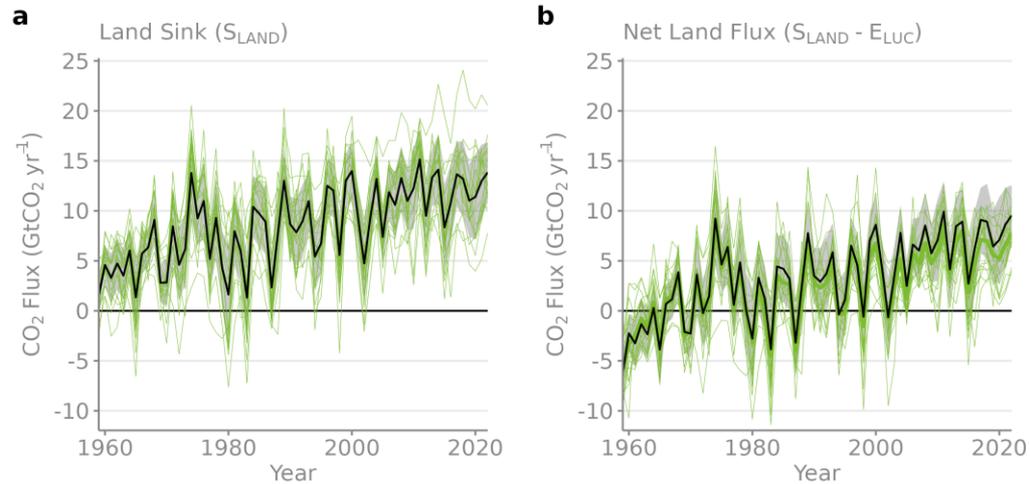


Evolution du puits de carbone terrestre global

Terrestrial sink

The land carbon sink, estimated by Dynamic Global Vegetation Models, was 12.3 ± 3.1 GtCO₂/yr during 2013–2022 and 13.9 ± 3.0 GtCO₂/yr in 2022.

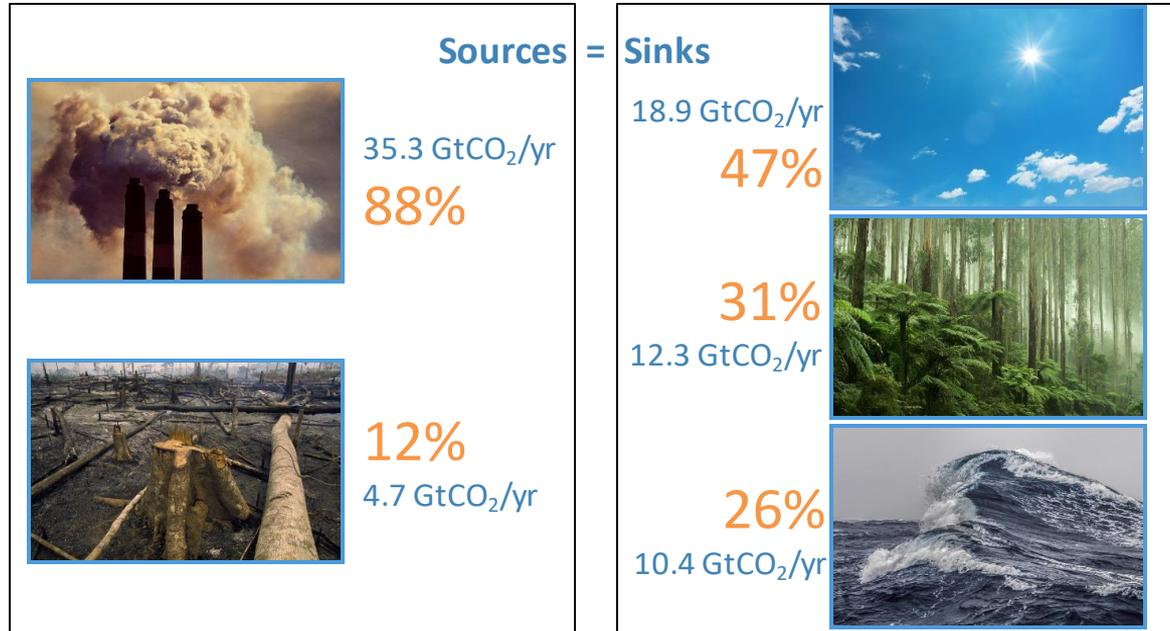
The total CO₂ fluxes on land (including land-use change) are also constrained by atmospheric inversions.



Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

Répartition des sources et puits de carbone

Fate of anthropogenic CO₂ emissions (2013–2022)



Budget Imbalance: 4%
 (the difference between estimated sources & sinks) -1.6 GtCO₂/yr

Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

En résumé

- ⇒ Les surfaces continentales absorbent 1/4 des émissions globales

Causes :

- Réchauffement (haute latitude)
- Fertilisation du CO₂
- Fertilisation des nutriments
- Reforestation des moyennes latitudes

⇒ comment accroître le puits pour compenser plus d'émissions ?

Besoin d'émissions négatives

Le contexte: Accord de Paris

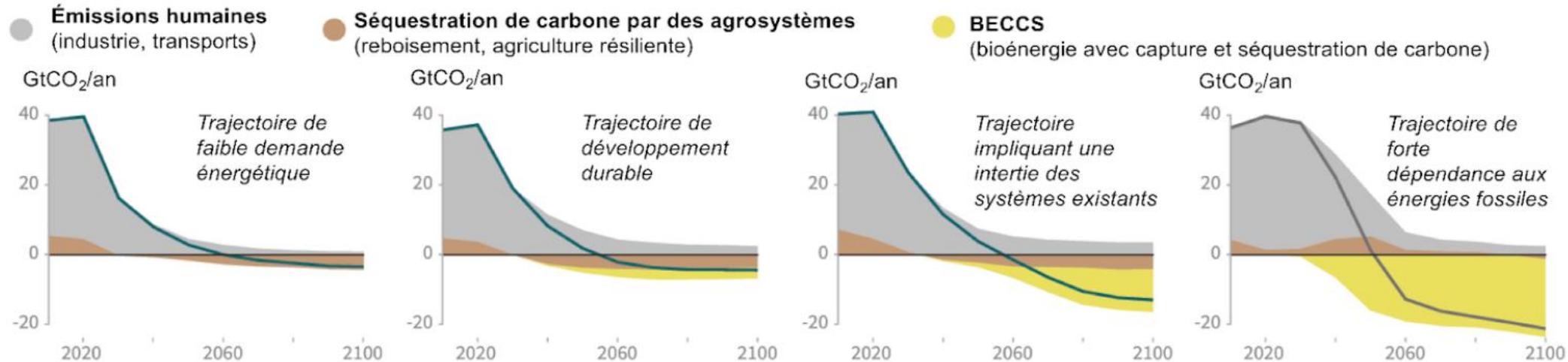
L'Art. 4 pose les principes de l'atténuation planétaire et fait un lien avec l'Art 3 qui concerne les Contributions Nationales

=> Évaluées objectivement et scientifiquement dans le SR15 du GIEC.

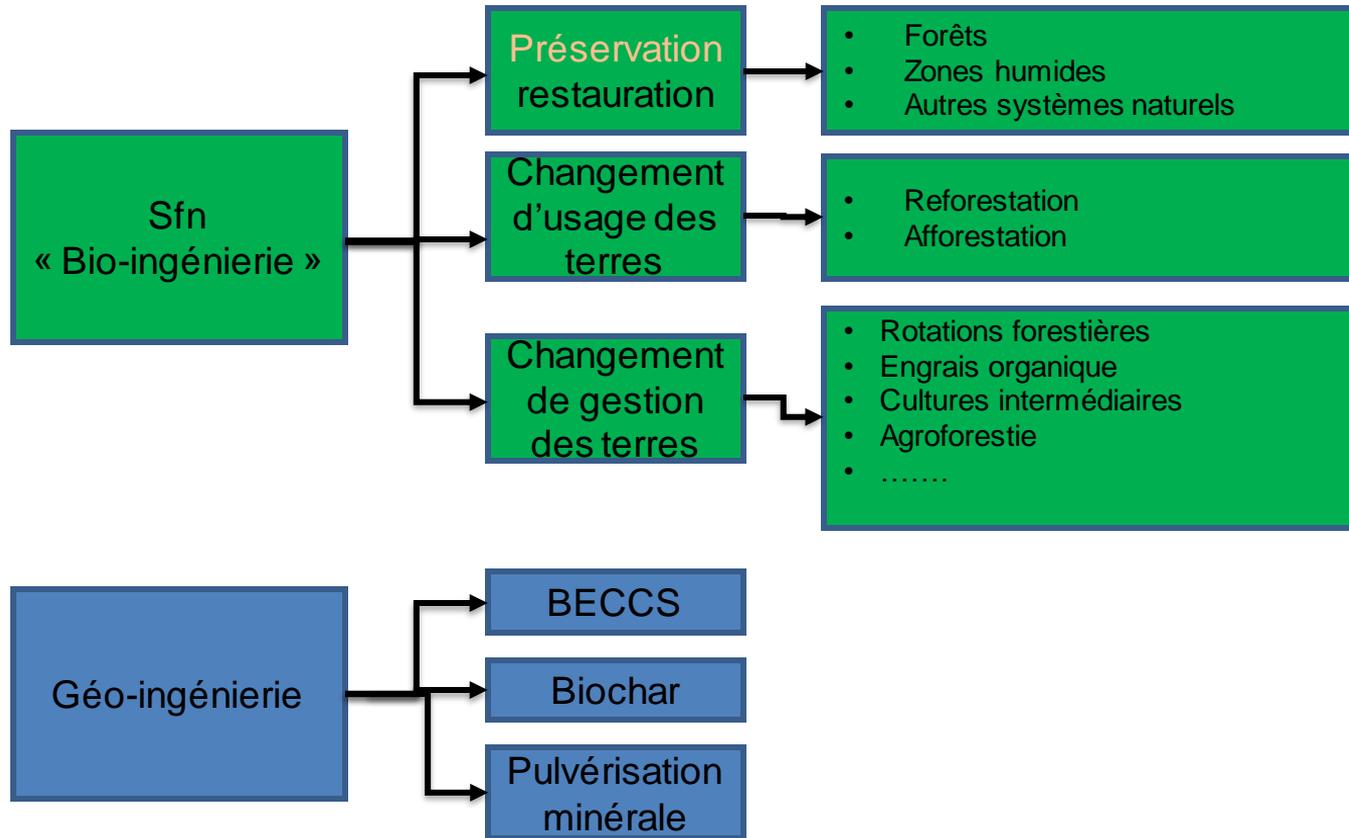
* émissions de CO₂ devraient diminuer de 45% en 2030 (par rapport à 2010)

* atteindre le "net zéro" vers 2050

* Réduire les autres émissions (non CO₂)



Les principales catégories de CDR terrestre



Suivant les solutions on joue sur la biomasse ou le carbone du sol

Solutions fondées sur la nature: Définition de IUCN



*les actions visant à **protéger**, **gérer** de manière durable et **restaurer** des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de **manière efficace et adaptative**, tout en assurant le **bien-être humain** et en produisant des **bénéfices pour la biodiversité***

Les Solutions fondées sur la Nature se déclinent en trois types d'actions, qui peuvent être combinées dans les territoires :

- **La préservation** d'écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique
- **L'amélioration de la gestion** d'écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines
- **La restauration** d'écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes.

⇒ **La mitigation du carbone ne représente qu'un des aspects des SfN**

Solutions fondées sur la nature: Définition de IUCN



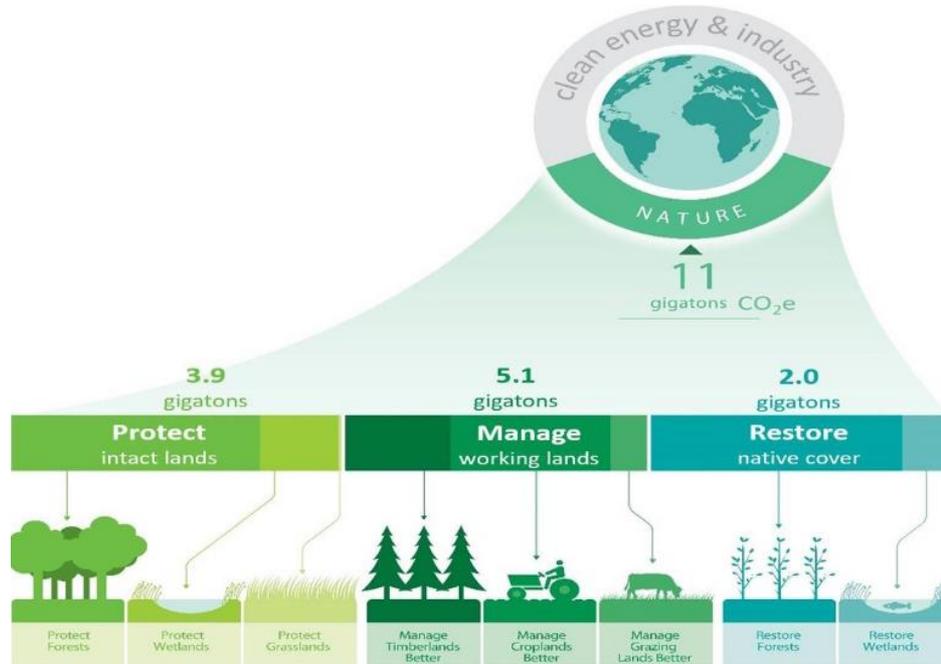
*les actions visant à **protéger**, **gérer** de manière durable et **restaurer** des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de **manière efficace et adaptative**, tout en assurant le **bien-être humain** et en produisant des **bénéfices pour la biodiversité***

Les Solutions fondées sur la Nature se déclinent en trois types d'actions, qui peuvent être combinées dans les territoires :

- **La préservation** d'écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique
- **L'amélioration de la gestion** d'écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines
- **La restauration** d'écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes.

⇒ **La mitigation du carbone ne représente qu'un des aspects des SfN**

Estimations du potentiel de stockage/préservation des stocks de C lié au SfN



Émissions actuelles $34+6=40\text{GtCO}_2$

Émissions « négatives » :

5.1 (gestion)+ 2 (restauration)= 7.1

GtCO_2

Emissions « évitées » = 3.9GtCO_2

Source: Griscom et al., PNAS (2017) and Griscom et al., 2020 Philosophical Transactions of the Royal Society B. Graphics from Nature Conservancy magazine and 5W Infographics



Un état des lieux des capacités globales

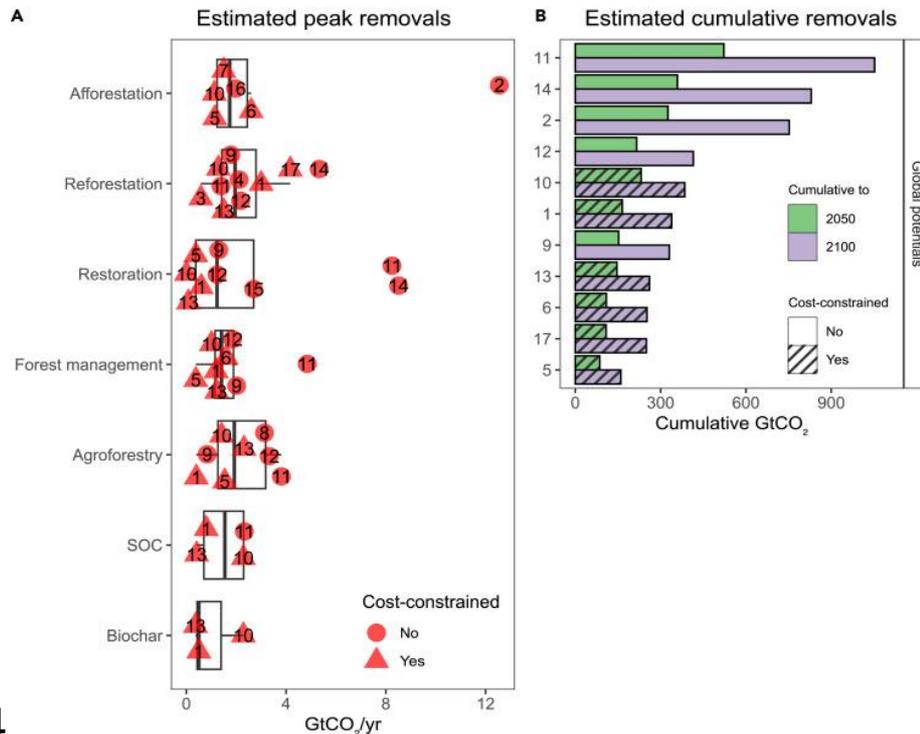


Figure 3: Global mitigation potential is spread across ecosystems, with all studies concluding that actions in forest have the greatest total potential

(Sources: Griscom *et al.* 2017; Girardin *et al.* 2021; McKinsey & Company 2021; Roe *et al.* 2019)



- **Actuel (2012-2023)** : -1.8 GtCO₂/y (-2.9,-0.7) (source GCP (Friedlingstein et al. 2023) (- 0.2 GtCO₂/y bois durable, -0.002 GtCO₂/y BECCS)
- **Meta-analyse des capacités de capture futur** (Dooley et al. 2024)



Le cas français

Rapport 4p1000 INRAE <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>

Rapport carbone EFESE:

<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9matique%20La%20sequestration%20de%20carbone%20par%20les%20ecosysteme.pdf>

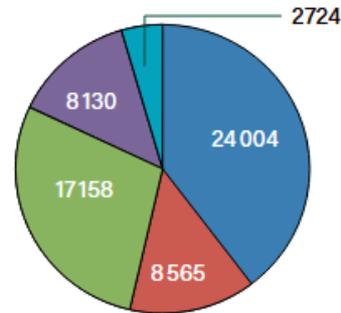
Position paper ANCRE: https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2022/11/ANCRE-Position-paper_Les-puits-de-carbone.pdf



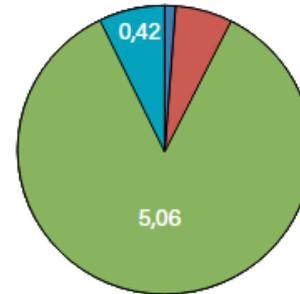
Stock et de puit de carbone des agrosystèmes

BILAN CARBONE DES FORÊTS FRANÇAISES

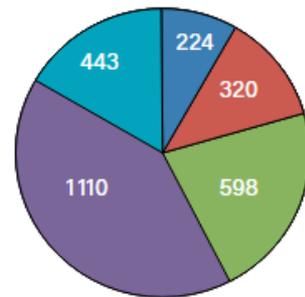
Les forêts représentent à la fois le plus important stock et le plus important puits de carbone en France.



Surface (en milliers d'hectares) des écosystèmes naturels terrestres



Puits de carbone (en tonnes de CO₂ par hectare) : à 87% forestiers

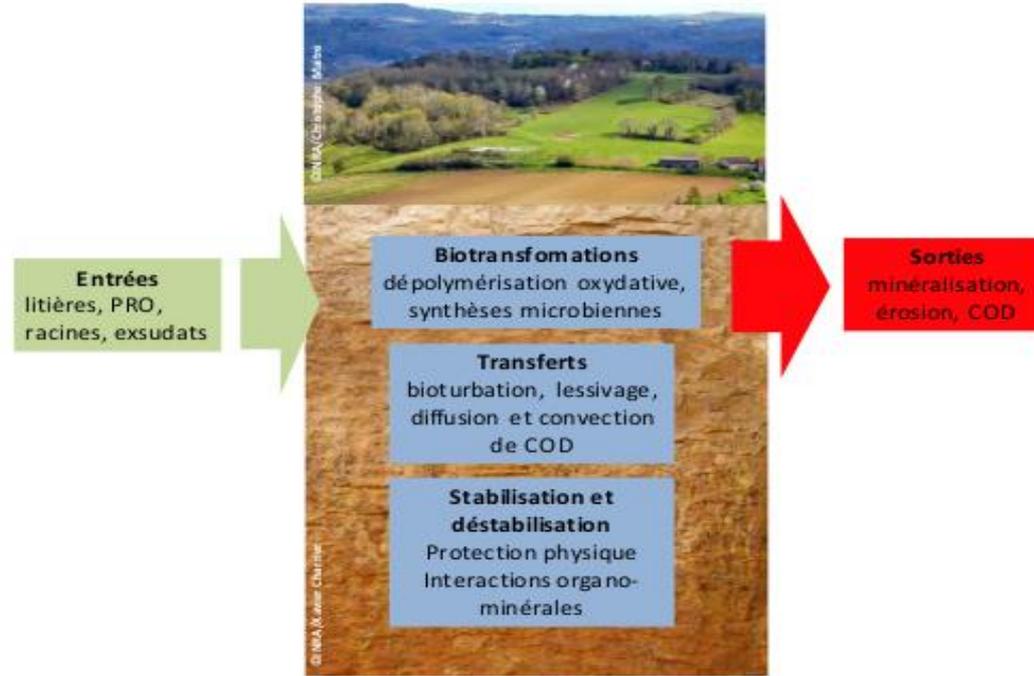


Stocks de carbone (en tonnes de CO₂ par hectare) : 63% dans la forêt

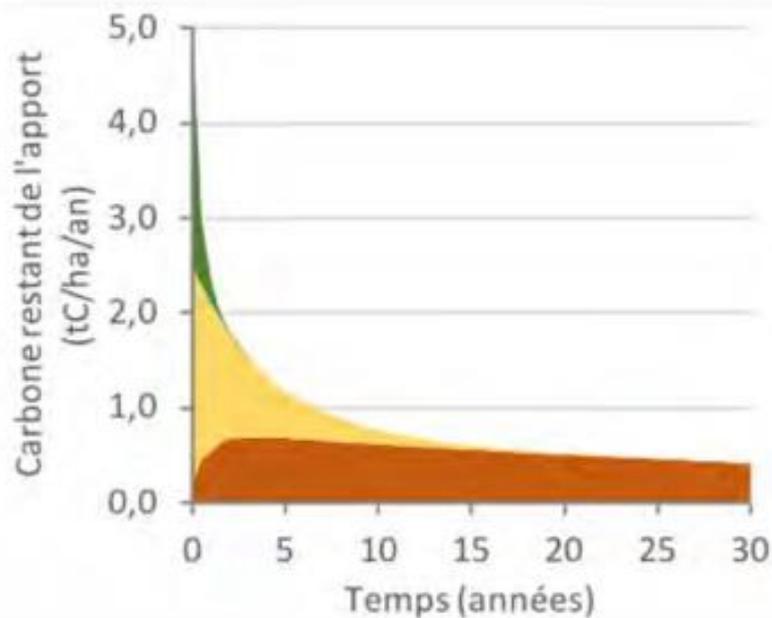
- Culture
- Prairie
- Forêt métropole
- Forêt outremer
- Autre

La forêt représente le plus grand stock et puits mais peu d'espace pour la reforestation
C'est plus sur les stocks du sol que l'on peut jouer.

Potentiel des sols: l'initiative 4/1000



La cinétique du carbone dans le sol



pool cinétique	Part du flux entrant	Temps moyen de résidence	Taille du pool
	tC/ha/an	an	tC/ha
"rapide"	2,50	0,2	0,5
"intermédiaire"	1,75	4	7,0
"lent"	0,75	50	37,5
total	5,00	9	45,0
carbone ancien		5000	10

La décomposition dépend de

- 1/ la température
- 2/ l'humidité des sols

Les stocks actuels de carbone

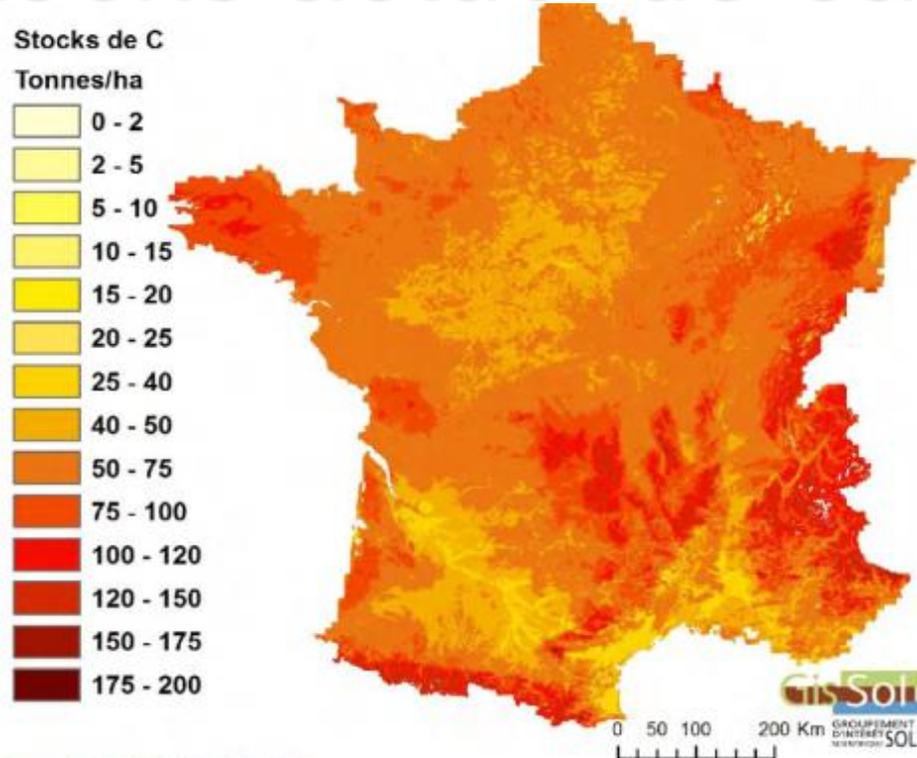


Tableau 3.5-1. Statistiques sur les stocks de C par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm

	min	moyenne	médiane	max	écart type
Stock de C organique sous prairie permanente (t ha ⁻¹)	18,1	84,6	78,3	309	35,0
Stock de C organique sous grande culture (t ha ⁻¹)	9,92	51,6	47,9	137	16,2
Stock de C organique sous forêts (t ha ⁻¹)	6,7	81,0	73,4	230	35,4

Evolution liée de changement d'usage

Tableau 3.5-3. Variations de stocks de COS lors de changements d'occupation des sols en climat tempéré.
Méta-analyse de Poeplau *et al.* (2011)

Transition	Durée de la transition (années)	Profondeur de prélèvement moyenne (cm)	Stockage de COS mesuré (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)	Nombre d'observations
Culture → Prairie	20	23,5	0,92 ± 0,25	89
Culture → Prairie	100	23,5	0,59 ± 0,11	89
Prairie → Culture	20	27,1	-2,08 ± 0,26	176
Prairie → Culture	100	27,1	-0,42 ± 0,05	176
Forêt → Culture	20	28,5	-2,31 ± 1,50	29
Forêt → Culture	100	28,5	-0,47 ± 0,29	29
Culture → Forêt	20	28	0,77 ± 0,36	70
Culture → Forêt	100	28	0,80 ± 0,37	70
Prairie → Forêt	20	38,9	-0,17 ± 0,25	100
Prairie → Forêt	100	38,9	0,24 ± 0,10	100

Evolution liée de changement de pratiques

	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm kgC/ha/an	Assiette Mha	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm MtC/an	Stockage additionnel, rapporté au stock du mode d'occupation du sol correspondant %/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			+4,873² (85,6%)	+5,1
En prairie permanente				
Intensification modérée	+176	3,94	+0,694	
Remplacement fauche-pâturage	+265	0,09	+0,023	
Total prairies permanentes			+0,717 (12,6%)	+0,9
En vignoble				
Enherbement	+182	0,56	+0,103	
Total vignoble			+0,103 (1,8%)	+3,7
En forêt				
Pas de pratique plus stockante que les pratiques actuelles identifiées	-	-	-	-
Total forêt			-	-
Total France (hors surfaces artificialisées et divers)			5,693 (100%)	+1,8



Tableau 4.4-14. Calcul du bilan de GES des pratiques stockantes (sur l'ensemble du profil de sol)

Pratiques stockantes	Stockage additionnel de C par ha d'assiette (sur tout le profil) (kgC/ha/an)	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par stockage additionnel de C (sur tout le profil) (kgCO ₂ /ha/an)	Principaux autres postes d'émissions modifiés	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par les modifications des autres postes d'émissions (kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ soustrait de l'atmosphère tenant compte du bilan de GES complet (kgCO ₂ e/ha/an)	Assiette (Mha)	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par séquestration de C France entière (MtCO ₂ e/an)	CO ₂ e soustraits de l'atmosphère à l'échelle France entière en tenant compte du bilan de GES (MtCO ₂ e/an)
Extension des cultures intermédiaires	-215	-788	↗ CO ₂ carburants ↘ N ₂ O indirect	52	-736	16,03	-12,63	-11,79
Nouvelles ressources organiques*	-98	-359	↗ N ₂ O indirect (volatilisation, lixiviation) ↘ CO ₂ fabrication engrais N	35	-324	1,46	-0,53	-0,47
Insertion et allongement de prairies temporaires	-192	-703	↘ N ₂ O indirect (volatilisation, lixiviation) ↘ CO ₂ fabrication engrais N	-201	-903	6,63	-4,66	-5,99
Agroforesterie intraparcellaire	-391	-1 432	↗ Stockage C biomasse	-3 874	-5 306	5,33	-7,63	-28,28
Haies	-31	-115	↗ Stockage C biomasse	-1 121	-1 236	8,83	-1,02	-10,91
Intensification modérée des prairies permanentes	-213	-781	↗ N ₂ O direct et indirect ↗ CO ₂ fabrication engrais	791	10	3,94	-3,08	0,04
Remplacement fauche pâture	-362	-1 328	↗ N ₂ O	343	-986	0,09	-0,12	-0,09
Enherbement permanent des vignobles	-464	-1 701		167	-1 534	0,15	-0,26	-0,23
Enherbement hivernal des vignobles	-300	-1 100		13	-1 087	0,41	-0,45	-0,45

* Le bilan GES calculé pour la mobilisation de NRO tient compte du fait que les déchets verts mobilisés retournaient déjà au sol dans la ligne de base et que leur décomposition s'accompagnait d'un stockage de C et d'émissions de N₂O hors parcelle agricole, d'où des différences avec les valeurs apparaissant dans le Tableau 4.4-5.



Considérations économiques

Tableau 4.5-14. Récapitulatif des coûts technique (en €/ha/an) et total (en €/an), par pratique, en moyenne au niveau national.

Pratiques stockantes	AMT (Mha)	Coût technique unitaire		Coût total (M€/an)	
		Moyenne nationale (€/ha/an)	Extrêmes régionaux (€/ha/an)		
Extension des cultures intermédiaires	16,03	39	11,9 ; 146,9	619	
Semis direct	11,29	13	-23,9 ; 39,6	142	
Nouvelles ressources organiques	1,46	22,6	-92,0 ; 268,9	33	
Insertion et allongement des prairies temporaires	6,63	91	-40,6 ; 313,7	602	
Agroforesterie intra-parcellaire	5,33	118	63,3 ; 178,8	628	
Haies	8,83	73	54,1 ; 86,5	645	
Intensification modérée des prairies permanentes	3,94	28	12,1 ; 38,2	109	
Remplacement fauche pâture en prairies permanentes	0,09	73	-84,7 ; 145,8	6	
Enherbement des inter-rangs des vignobles	permanent	0,15	-26	-27,4 ; -22,2	-4
	hivernal	0,41	-15	-15,2 ; -15,2	-6

Limites et risques

- 1/ La difficulté de l'évaluation du puits additionnel
- 2/ Le problème de pérennité du stockage
- 3/ Le conflit avec les autres services écosystémiques (e.g biodiversité)
- 4/ Le conflit d'usage des terres (sécurité alimentaire, biodiversité)
- 5/ Le problème de l'interaction avec le changement climatique :
 - **sol:** risque de perte de carbone des sols par augmentation de la température
 - **Foresterie:** vulnérabilité des forêts: Risque de dépérissement des zones reboisée. Choix des essences peu abordé (risque de choix d'essences à croissance rapide mais peu résiliente).

⇒ une approche systémique nécessaire mais rarement prise en compte !!



Conclusions

- Un potentiel théorique de 10GtCO₂ soit 20% des émissions actuelles. Mais largement incertain (e.g effet climatique) et effet de saturation..
- La préservation des stocks doit rester une priorité
- l'afforestation/reforestation offre le plus fort potentiel global , mais pose un problème de conflit d'usage et reste limité par exemple en Europe
- La modification des pratiques culturales offre un potentiel intéressant avec les cultures intermédiaires et l'agroforesterie. Mais pose un problème de coût économique et éventuellement d'équité (i.e sols les plus dégradé=plus de potentiel= plus de crédit carbone).
- Impacts sur les autres services écosystémiques (dont la sécurité alimentaire et biodiversité)

Nécessité de prise en compte d'approches systémiques et de suivi sur le long terme

