



TERRES CULTIVÉES

GRANDES CULTURES ET PRAIRIES TEMPORAIRES

par Anita VAN QUYNH, Pierre BARRÉ
& l'équipe d'animation de **FairCarboN**



PROGRAMME
DE RECHERCHE

CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte

- 1. PRÉSENTATION DE L'ÉCOSYSTÈME : DÉFINITIONS ET CHIFFRES-CLÉS**
- 2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE**
- 3. DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE**
- 4. LEVIERS D'ACTION POUR STOCKER DU CARBONE**
- 5. CONCLUSIONS**



1 Gt = 1 milliard de tonnes
= 10⁹ tonnes

1 Gt C = 1 Pg C

1 Mt = 10⁶ tonnes

1 Gt C = 3,666 Gt CO₂

GIEC	=	IPCC
Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat		Intergovernmental Panel on Climate Change

GES (Gaz à Effet de Serre) :
 constituants gazeux de l'atmosphère, à la fois naturels et anthropiques, qui absorbent des radiations à des longueurs d'onde spécifiques dans le spectre infrarouge émis par la surface de la Terre, l'atmosphère elle-même, et par les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. Les principaux GES dans l'atmosphère de la Terre sont : H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 .

NPP : Net Primary Production (Production Primaire Nette) : caractéristique fondamentale d'un écosystème, exprimant **la conversion de dioxyde de carbone en biomasse via la photosynthèse, une fois la respiration des plantes déduite** (Production primaire brute (GPP) – Respiration des végétaux).

Carbone Organique du Sol (COS) :
 carbone inclus dans la matière organique du sol (on considère que la matière organique des sols se compose à 50-60 % de C). Crucial pour la santé, et la fertilité du sol et autres services écosystémiques, notamment la production de nourriture (FAO).

Matière organique du sol : tout matériau produit initialement par des organismes vivants (plantes ou animaux), qui retourne dans le sol et suit le processus de décomposition. **À un temps t, il s'agit d'une gamme de matières allant des tissus originaux et intacts issus de plantes et d'animaux, au mélange de matières substantiellement décomposées** (FAO).

Respiration hétérotrophe du sol :
 résulte de la minéralisation de la matière organique essentiellement par la microfaune au cours de laquelle les composés organiques sont oxydés en dioxyde de carbone. Paramètre utilisé pour quantifier l'activité microbienne dans les sols.

Litière : toute **biomasse non vivante** avec un diamètre inférieur au diamètre minimal pour le bois mort (e.g. 10 cm) présente en surface ou au sein du profil de sol dans des états de décomposition variés (FAO).

Rotation des cultures : organisation de la succession culturale des espèces sur une parcelle (dicoagroecologie).

Temps de résidence (TR) : durée pendant laquelle un composé ou une substance, une fois introduit dans l'environnement, reste avant d'être physiquement éliminé ou bien biologiquement ou chimiquement transformé (FAO).



TERRES CULTIVÉES

1. PRÉSENTATION DE L'ÉCOSYSTÈME : DÉFINITIONS ET CHIFFRES-CLÉS



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte



Terres cultivées = Terres arables + Cultures permanentes

Terres arables

Terres affectées aux **cultures temporaires, prairies temporaires à faucher ou pâturer, jardins maraîchers ou potagers et terres en jachère temporaire** (moins de cinq ans). Les terres abandonnées résultant de cultures itinérantes ne sont pas incluses dans cette catégorie. Les données pour les terres arables ne visent pas à indiquer la quantité de terres qui sont potentiellement cultivables.

Cultures permanentes

Terres affectées aux **cultures qui occupent les terres pour de longues périodes et ne nécessitent pas d'être replantées après chaque récolte**, telles que le cacao, le café et le caoutchouc ; cette catégorie inclut les terres sous arbustes de haies, arbres fruitiers, arbres à noix et vignes, mais **exclut les terres plantées d'arbres cultivés pour le bois de chauffage et le bois d'œuvre**.



Paysage de polycultures

© INRAE / BOUCHERY Yves



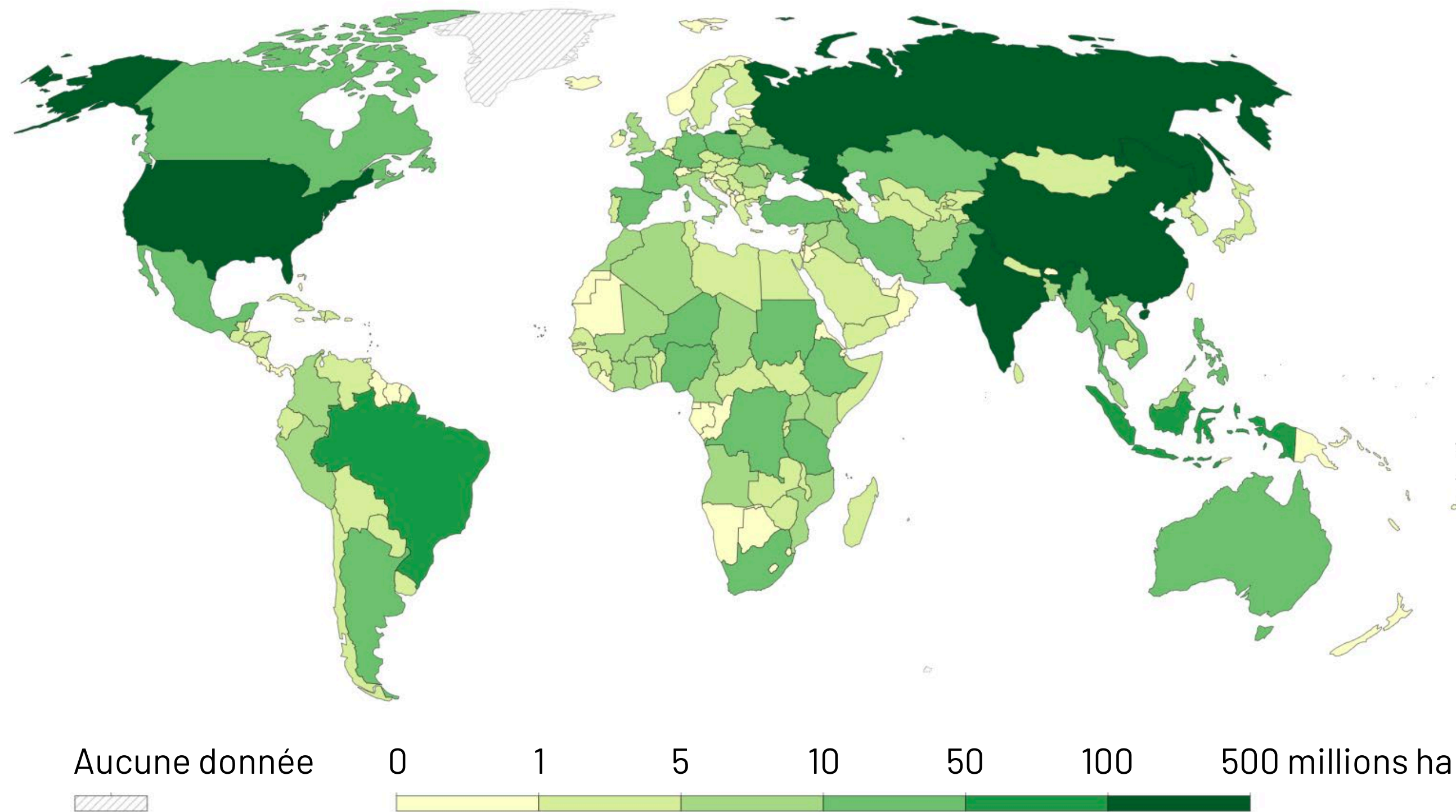
Champ de miscanthus

© INRAE / CHARTIER Michel



Champ de colza

© INRAE / SAVIN Alexandre



Surfaces de terres cultivées par pays (FAO, 2020)

! Cette carte ne renseigne pas le *pourcentage* de terres cultivées par territoire : un pays plus grand aura donc tendance à compter davantage de terres cultivées qu'un pays plus petit mais plus densément cultivé.

Surface mondiale (occupation des sols)

Agriculture : **4 818** millions d'ha

Terres cultivées : **1 580** millions d'ha

Prairies temporaires : **144** millions d'ha

Production mondiale grandes cultures (matière sèche)

1^{er} Canne à sucre : **1 900** Mt.an⁻¹

2^e Maïs (corn) : **1 200** Mt.an⁻¹

3^e Riz : **787** Mt.an⁻¹

4^e Blé : **771** Mt.an⁻¹

5^e Fruits du palmier à huile : **416** Mt.an⁻¹

(FAOSTAT, 2021)



TERRES CULTIVÉES

2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE

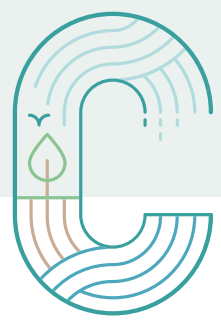


PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte



	Dans le monde	En France
Surface des terres cultivées	1,60.10⁹ ha	18,4.10⁶ ha
Stock de C par unité de surface	81 t C.ha⁻¹ (0 - 1 m)	51,6 ± 16,2 t C.ha⁻¹ (0 - 30 cm)
Stock total de C	131 Gt C (0 - 1 m)	950 Mt C (0 - 30 cm)

Source des données

IPCC SRES Land-Use 1998

RMQS - GIS Sol 2020

Il existe une **forte variabilité** autour des valeurs moyennes indiquées.

Rapportés à une même profondeur les stocks de COS dans les sols cultivés français sont dans la moyenne globale.

(JOBAGY & JACKSON, 2000)

En France métropolitaine, les sols cultivés couvrent environ **45 % de la superficie** et représentent environ **30 % des stocks de carbone** des sols.



Différentes formes de carbone organique dans les sols



Molécules organiques d'origine végétale ou microbienne associées aux minéraux donnant la couleur sombre.

environ 60 - 95 %



© DURAND Hermine



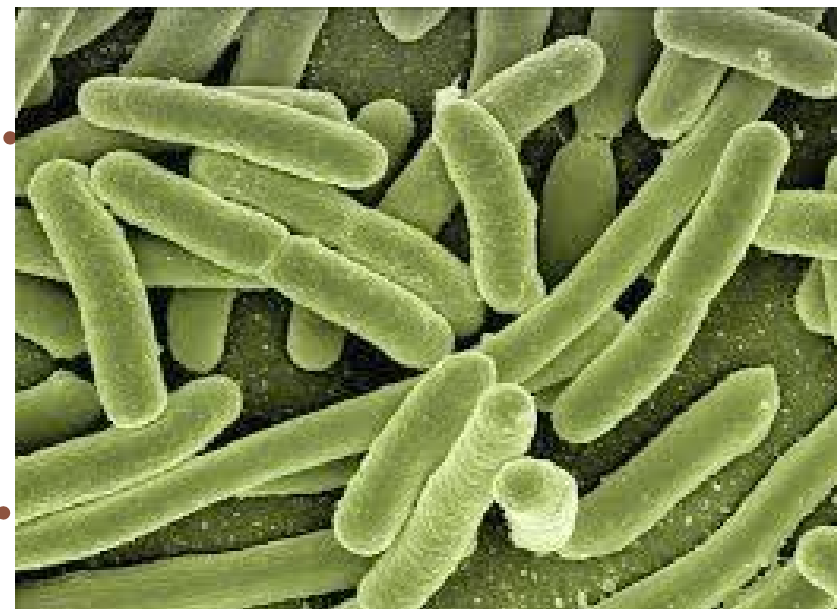
© DURAND Hermine

Débris végétaux en décomposition (flottant dans l'eau du fait de leur densité).

environ 5 - 30 %

Matière organique vivante.

environ 1 - 5 %



Atlas européen de la biodiversité des sols (2013)



© CHASSÉ Matthieu

Matière organique pyrogénique.

environ 5 - 30 %

+

du carbone organique dissous.

< 1 %

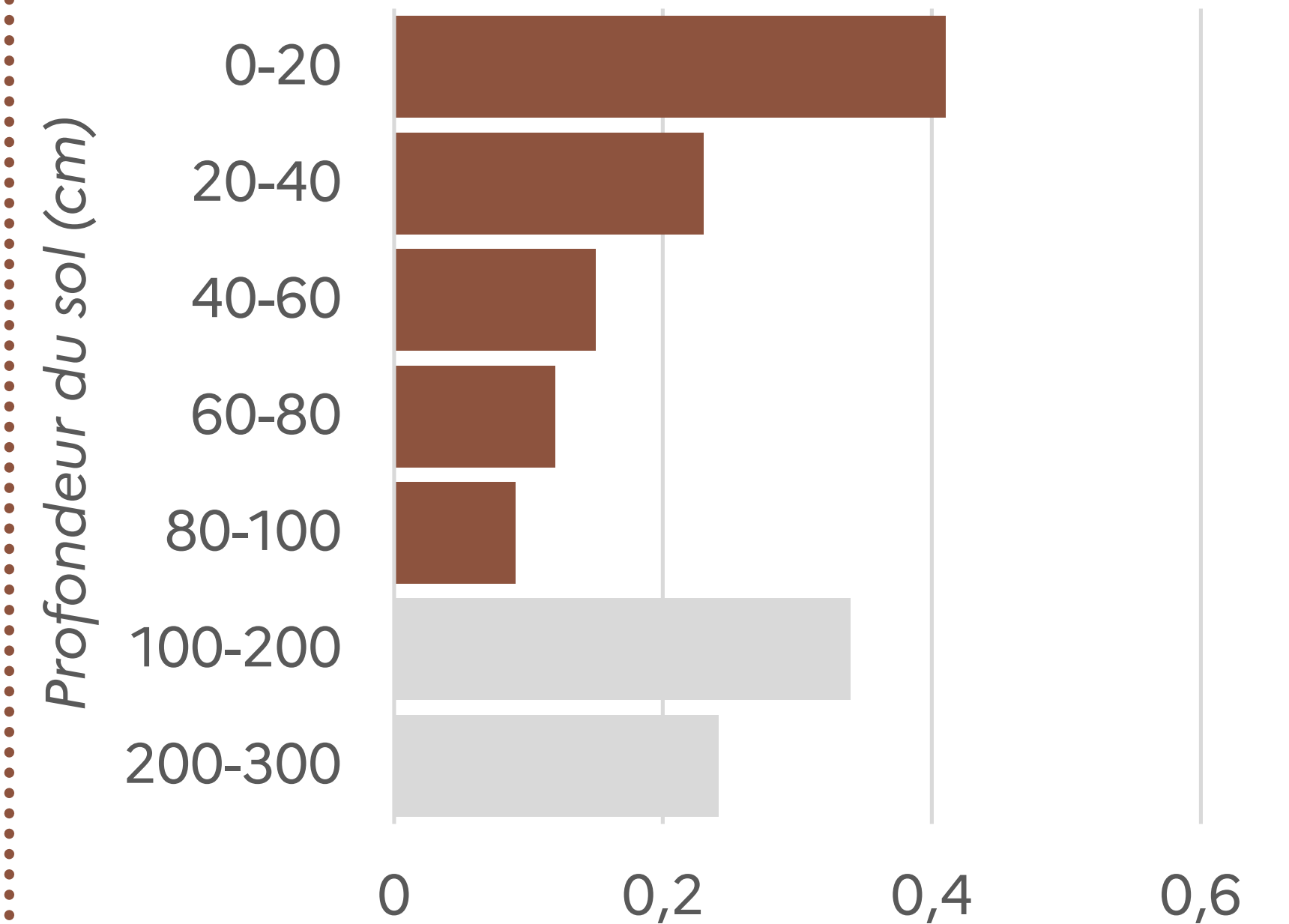


© INRAE / JOLIVET Claudy

Davantage de carbone en surface mais il y en a en profondeur !

Environ 2/3 du carbone organique dans le premier mètre et 25-30 % dans la couche 0-20 cm.

Profil de répartition du carbone organique dans les sols cultivés



En marron, stock relatif de carbone dans la couche 0-1 m ; en grisé stock relatif rapporté au stock mesuré entre 0 et 1 m.

(JOBAGY & JACKSON, 2000)



TERRES CULTIVÉES

3. DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE



PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte



Schéma général de la dynamique du carbone dans les écosystèmes cultivés



ENTRÉES DE C

- **Litières aériennes et racinaires**
- **Amendements organiques**

Influencées par :

- *Production Primaire Nette (NPP), fortement dépendante du climat*
- *Rotations (choix des cultures, prairies temporaires etc.)*
- *Pratiques (ex. restitution des pailles, couverts intermédiaires, apports d'amendements...)*

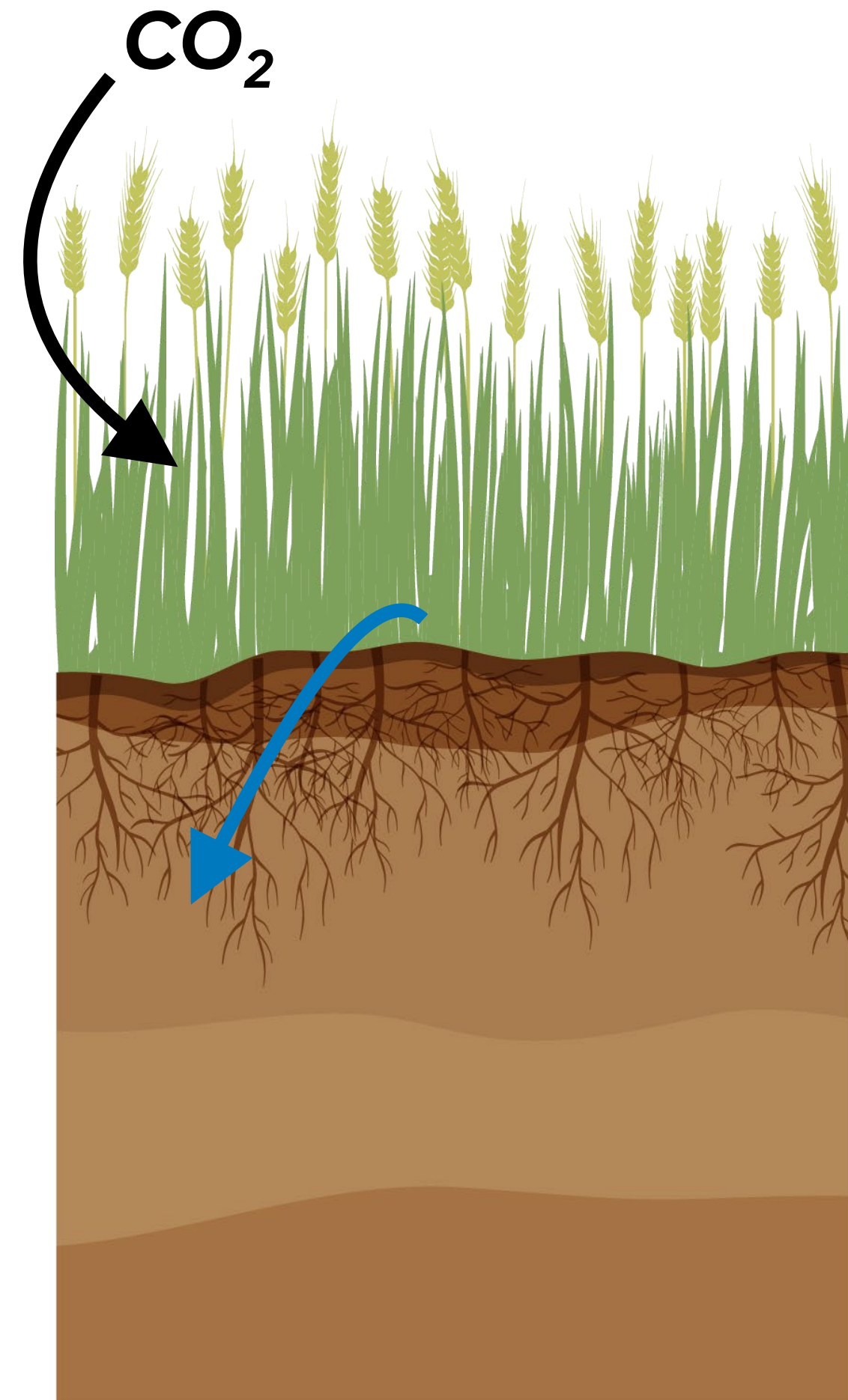




Schéma général de la dynamique du carbone dans les écosystèmes cultivés



ENTRÉES DE C

- **Litières** aériennes et racinaires
- **Amendements organiques**

Influencées par :

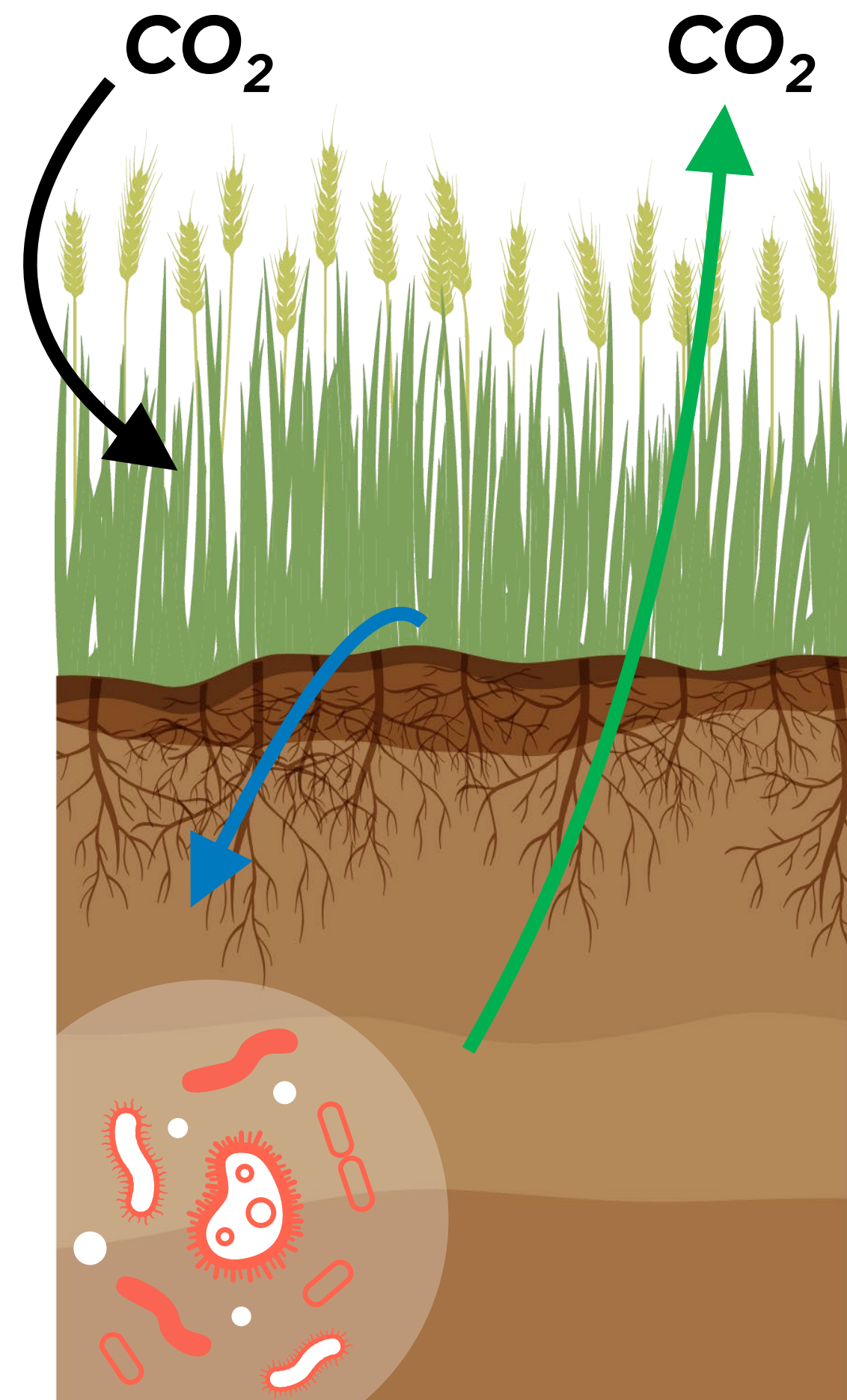
- *Production Primaire Nette (NPP), fortement dépendante du climat*
- *Rotations (choix des cultures, prairies temporaires etc.)*
- *Pratiques (ex. restitution des pailles, couverts intermédiaires, apports d'amendements...)*

- **Biotransformations**

(synthèse microbienne, dépolymérisation, fragmentation)

- **Transferts**

(bioturbation, diffusion, etc.)



SORTIES DE C

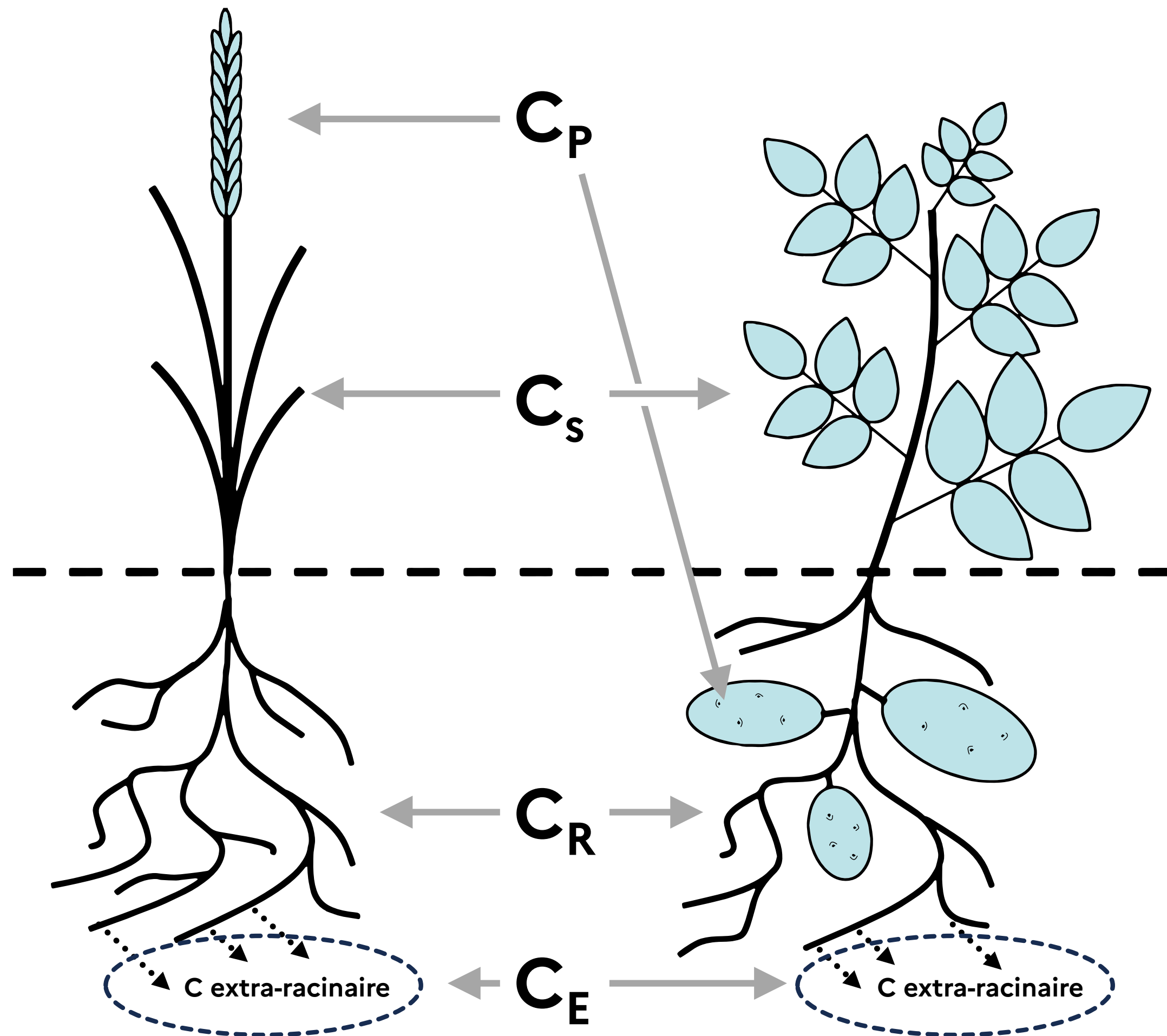
- **Respiration**, principalement par les micro-organismes (dépendante des conditions pédoclimatiques)
- **Érosion et Lessivage**

Les matières organiques des sols sont clivées par les enzymes microbiennes en petites molécules solubles absorbable par les micro-organismes. Le carbone ainsi ingéré est **une source de matière (synthèse microbienne) et d'énergie (respiration hétérotrophe)**.

Les sorties de C des sols se font principalement sous forme de CO_2 issu de la respiration hétérotrophe des micro-organismes.



d'après BOLINDER *et al.*, 2007



- C_P : Carbone dans la partie récoltée de la plante
- C_S : Carbone dans les résidus (non récoltés) de la biomasse aérienne
- C_R : Carbone dans les tissus racinaires non récoltés
- C_E : Carbone dans la matière extra-racinaire (rhizodéposition)

➔ Le C racinaire et extra-racinaire (C_R et C_E) possède un temps de résidence plus élevé que le C aérien (C_S et C_P).

(RASSE *et al.*, 2006)

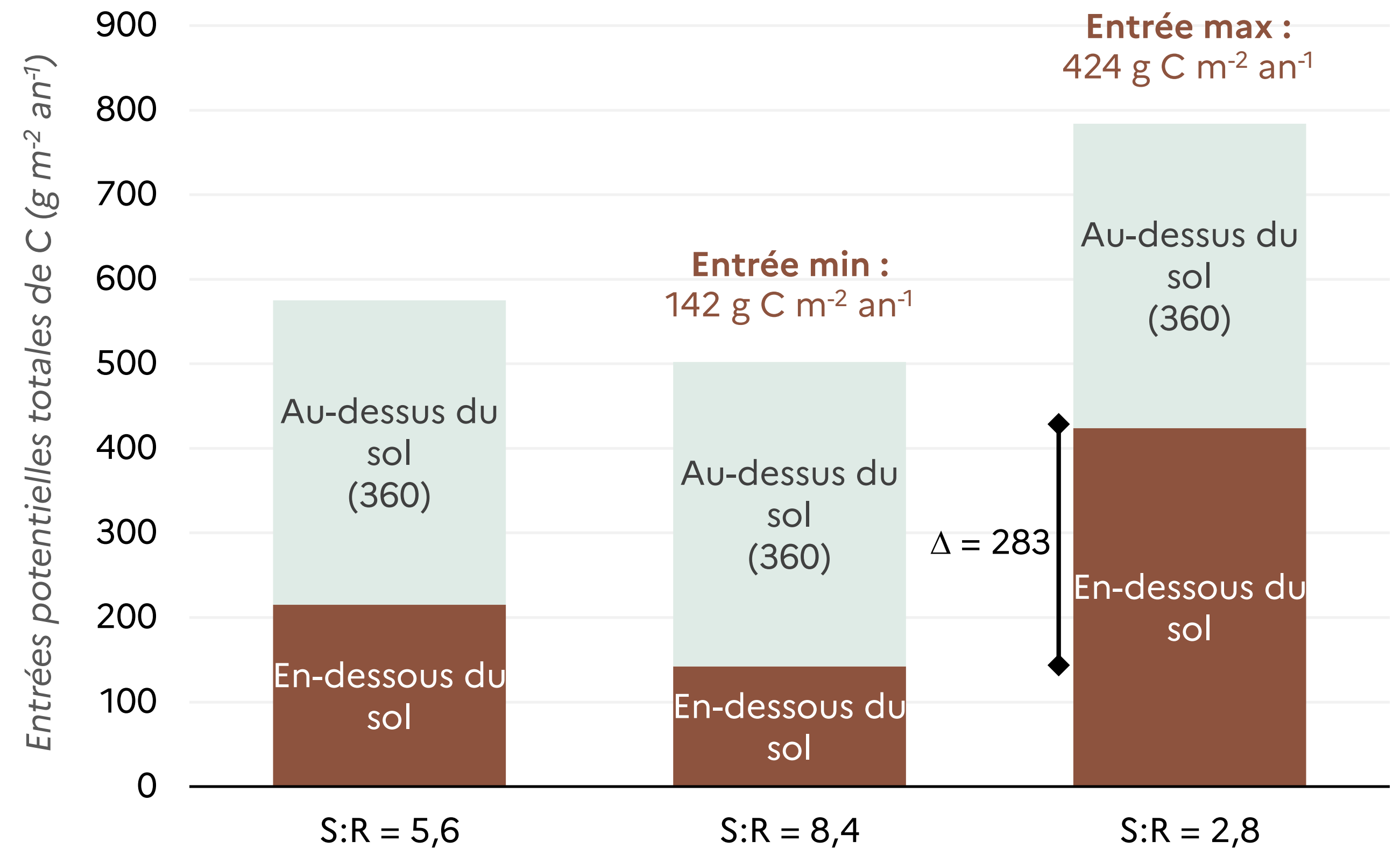
Illustration des différents réservoirs de C pour deux plantes conceptualisées.



d'après BOLINDER *et al.*, 2007

- ▶ L'estimation de C_R repose sur le shoot:root ratio, noté S:R (rapport entre partie aérienne et partie racinaire)
- ▶ Valeurs moyennes du shoot:root ratio dans les terres cultivées :
 - S:R $\sim 5 \pm 3$ pour les cultures annuelles (maïs, soja)
 - S:R $\sim 1 - 2$ pour les cultures fourragères (graminées, légumineuses)

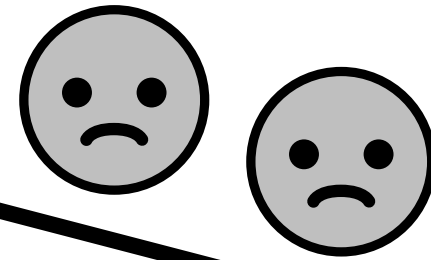
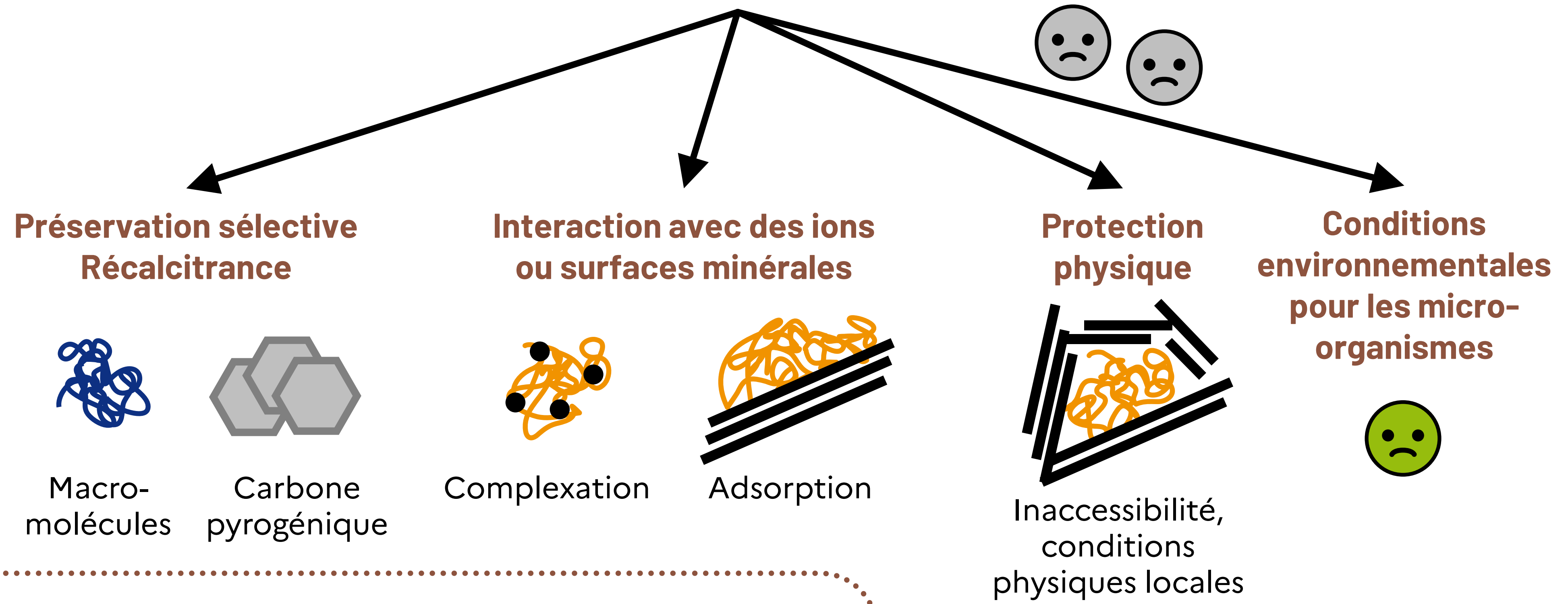
→ L'estimation des entrées de carbone dans le sol dépend du shoot:root ratio.



Incertitude liée aux entrées annuelles de C souterraines (C_R et C_E) pour une culture de maïs-grain à rendement moyen (9 Mg grain ha⁻¹), pour différentes valeurs de shoot:root ratio.



Mécanismes de stabilisation des matières organiques dans les sols

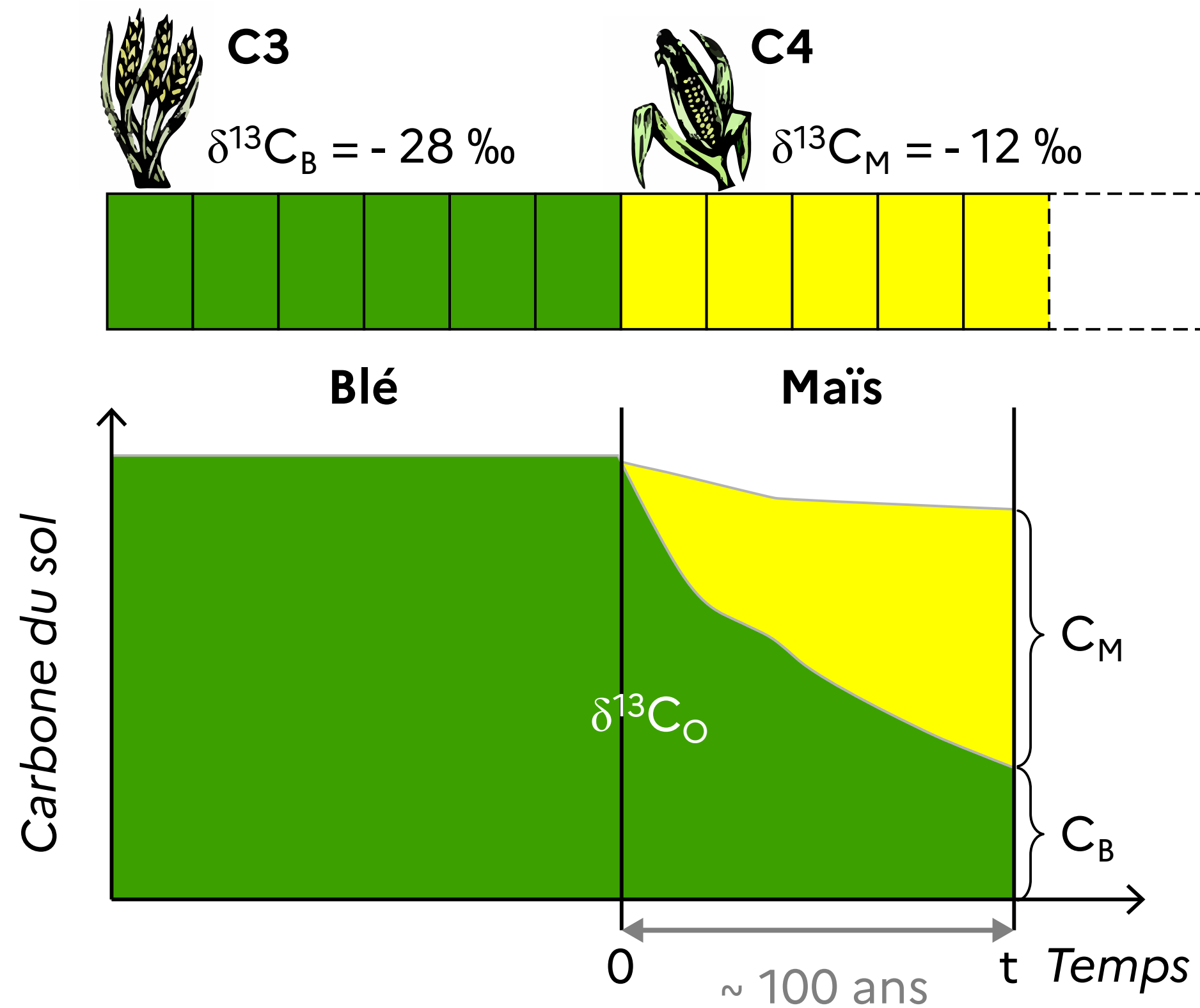


→ La vitesse à laquelle la MO peut être dégradée dépend de sa composition chimique, de son interaction avec la phase minérale, de son accessibilité pour les micro-organismes et des conditions environnementales.

d'après CHENU *et al.*, 2009, CMS series



Mesure de la stabilité biogéochimique du carbone organique dans les sols - méthode isotopique -



La MO des plantes de type photosynthétique C3 (ex. Blé) et C4 (ex. Maïs) n'a pas la même signature isotopique.

Cultiver des plantes en C4 sur des sols n'ayant accueilli précédemment que des plantes en C3 permet de suivre l'évolution temporelle de la quantité de carbone dérivée des plantes en C3 et ainsi d'observer sa stabilité biogéochimique.

➔ Les travaux utilisant l'outil isotopique montrent que le COS des sols cultivés a **un temps moyen de résidence de plusieurs dizaines d'années** et que **40-60 % du COS persiste plus de 100 ans.**

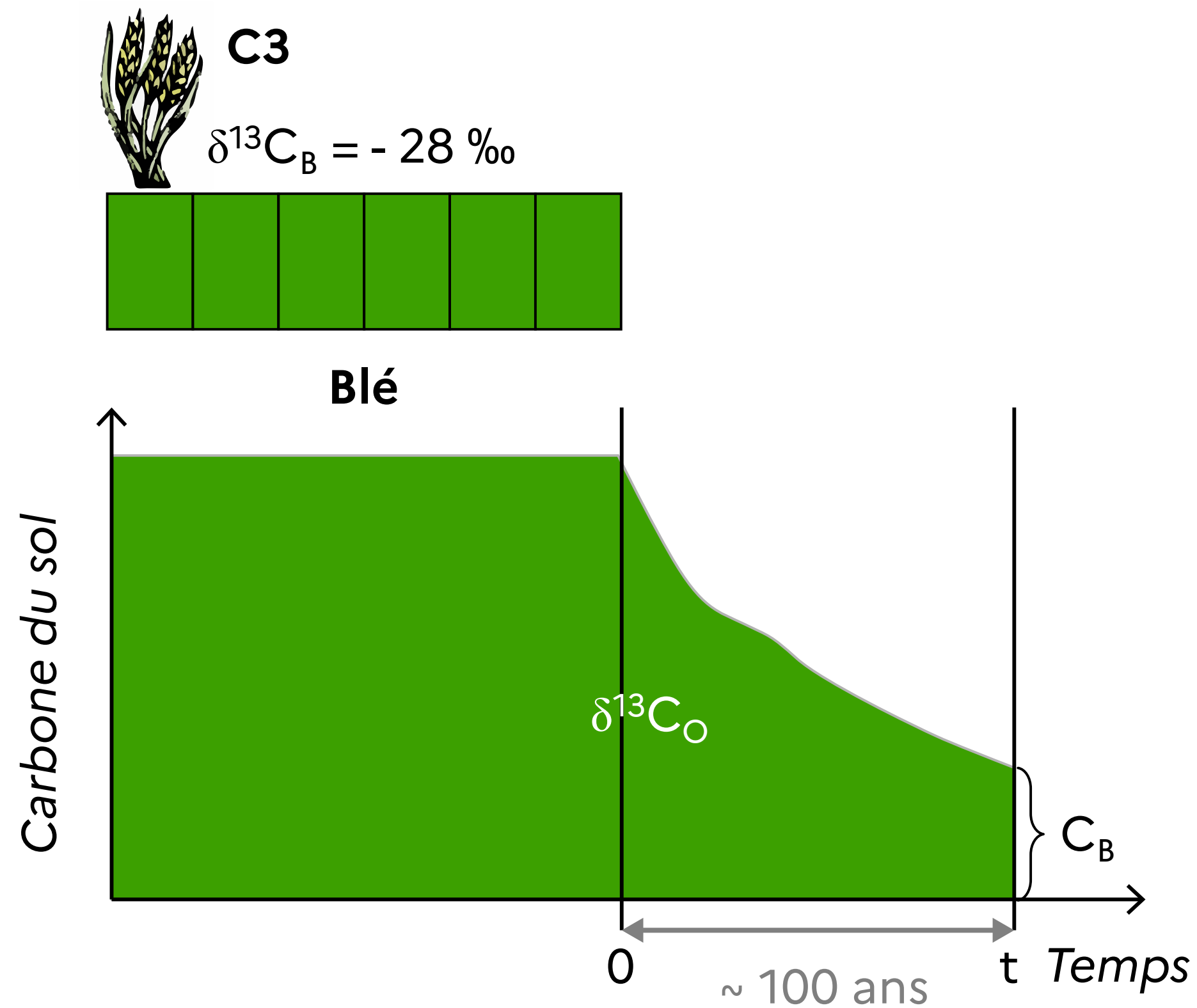
Chronoséquence C3/C4

adapté de BALESSENT, 1991.

(par ex. BALESSENT *et al.*, 1988)



Mesure de la stabilité biogéochimique du carbone organique dans les sols - jachère nue -



Jachère nue de longue durée

adapté de BALESSENT, 1991.

La jachère nue consiste à maintenir le sol sans végétation, **les entrées de carbone étant de ce fait négligeables.**

Les micro-organismes continuent à dégrader les matières organiques, expliquant la décroissance du carbone organique.

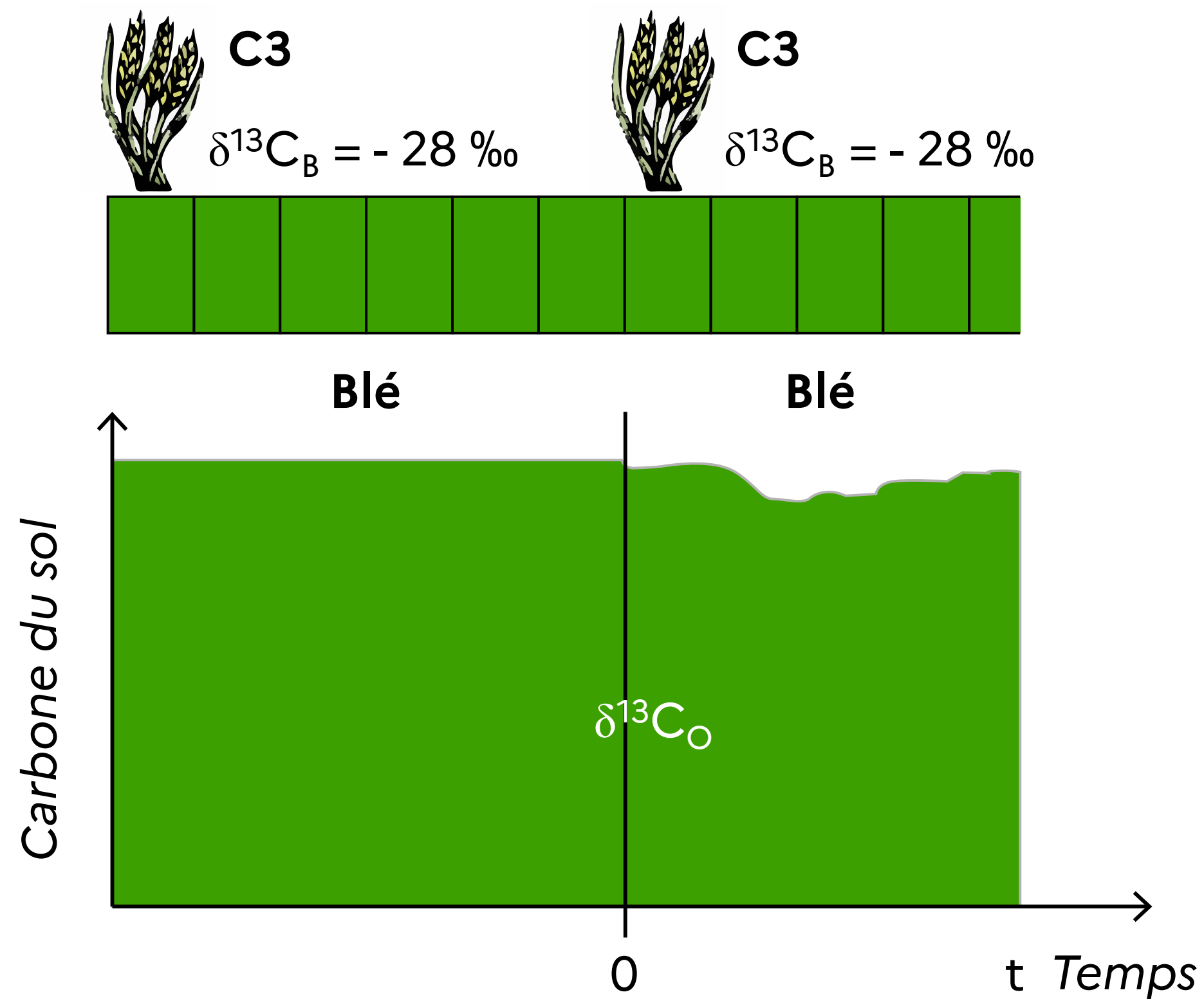
Le suivi des stocks/teneurs en C dans les sols de jachère nue donne une mesure de la stabilité biogéochimique.

→ Les observations dans différents sites de jachère nue confirment les résultats obtenus par l'approche isotopique.

(BARRÉ *et al.*, 2010)



Mesure de la stabilité biogéochimique du carbone organique dans les sols - apports de la modélisation -



Simulations d'évolution de stocks de COS dans des essais agronomiques de longue durée (entrées de C connues)

adapté de BALESSENT, 1991.

De nombreux modèles permettent de simuler les évolutions de stock de carbone dans les sols.

La simulation de l'évolution des stocks entre le temps t et $t+1$ se fait en ajoutant les entrées de carbone sur cet intervalle de temps et en retranchant les sorties (respiration microbienne).

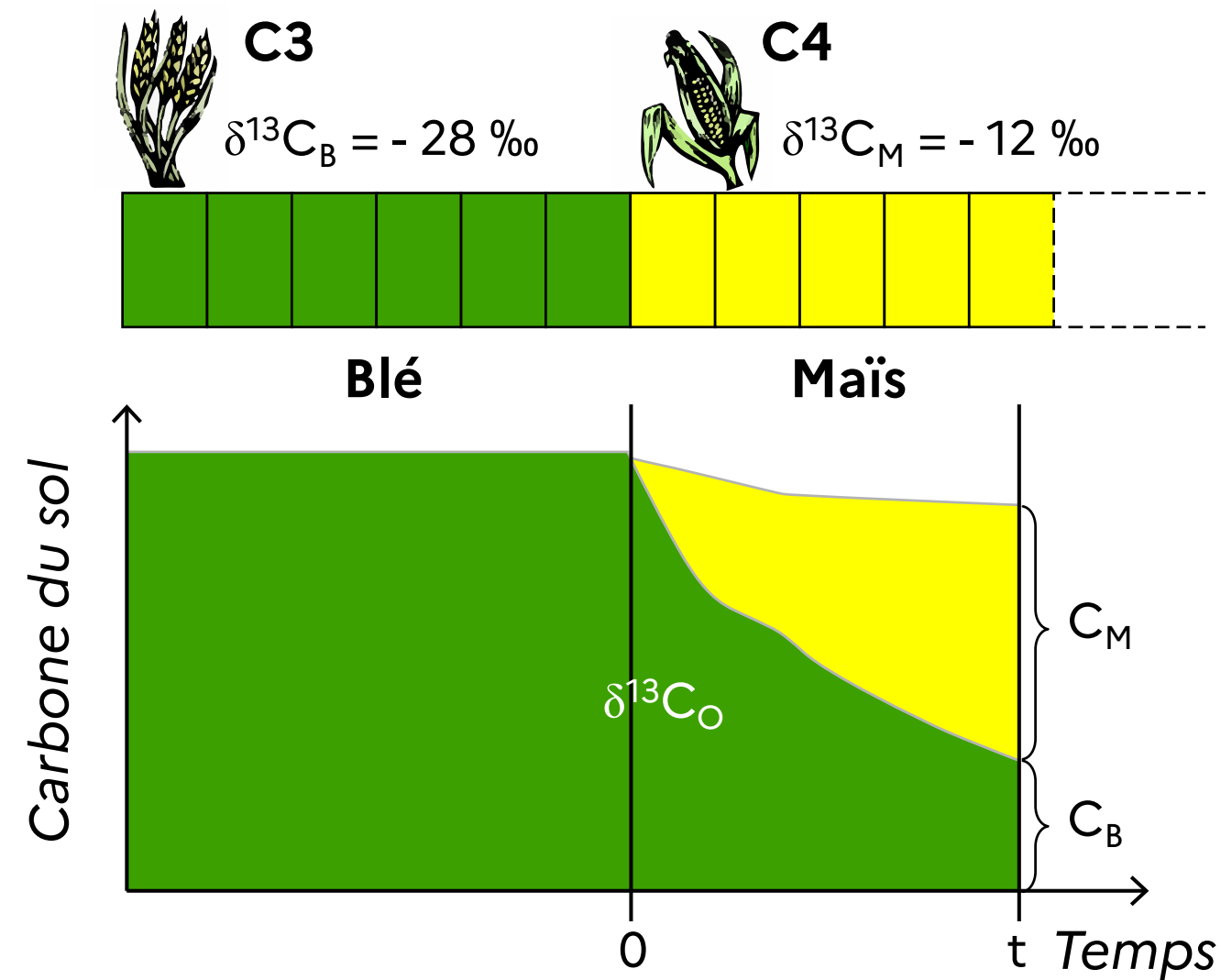
En connaissant les évolutions de stocks et les entrées de carbone (comme cela est le cas dans les expériences agronomiques de longue durée), il est possible de déterminer par différence la stabilité biogéochimique.

→ Un tel exercice permet de montrer que les différents modèles ont besoin d'un compartiment **stable** (temps de résidence de plusieurs siècles) **ou inerte significatif** représentant 20-75 % du COS.

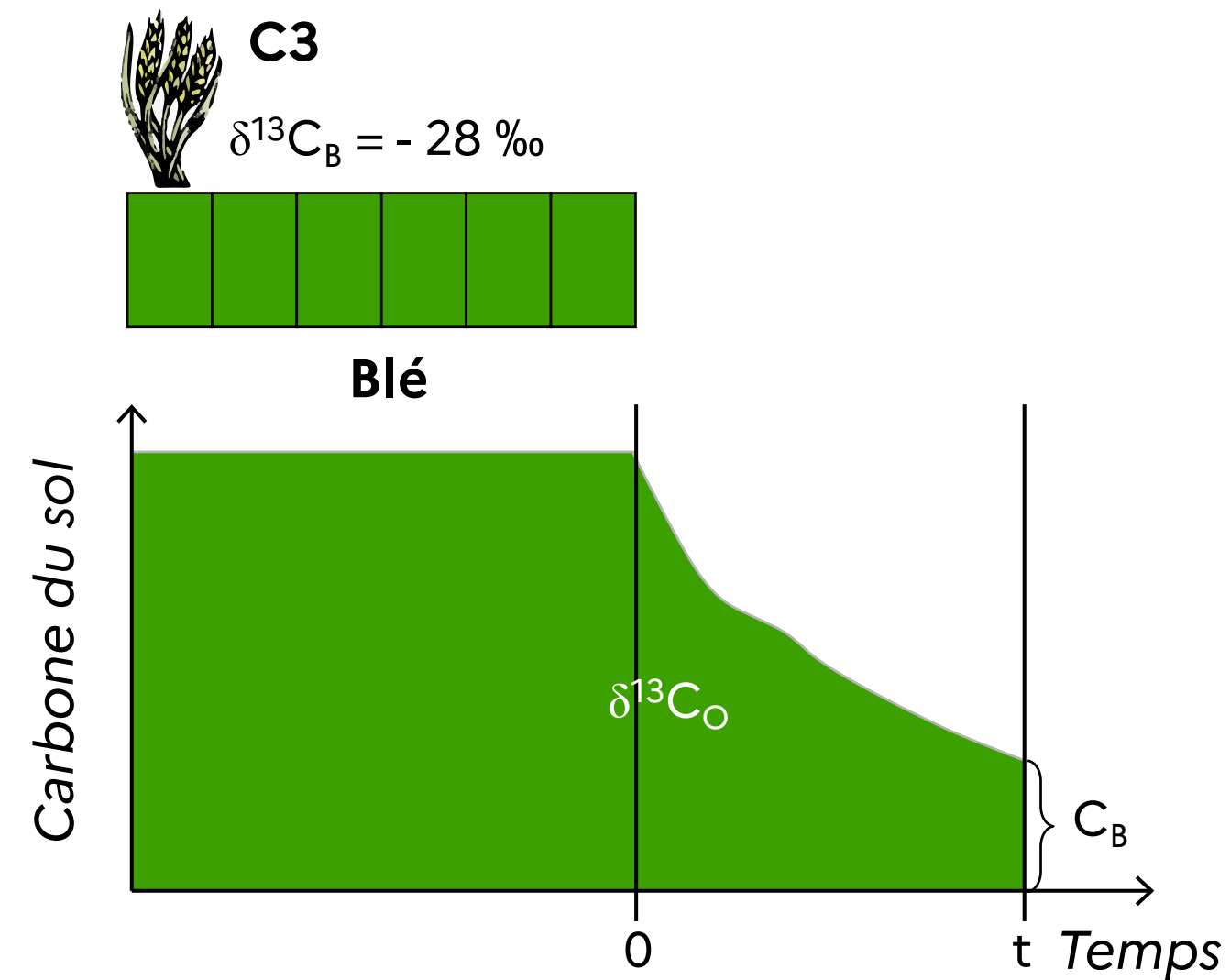
(par ex. CLIVOT *et al.*, 2019)



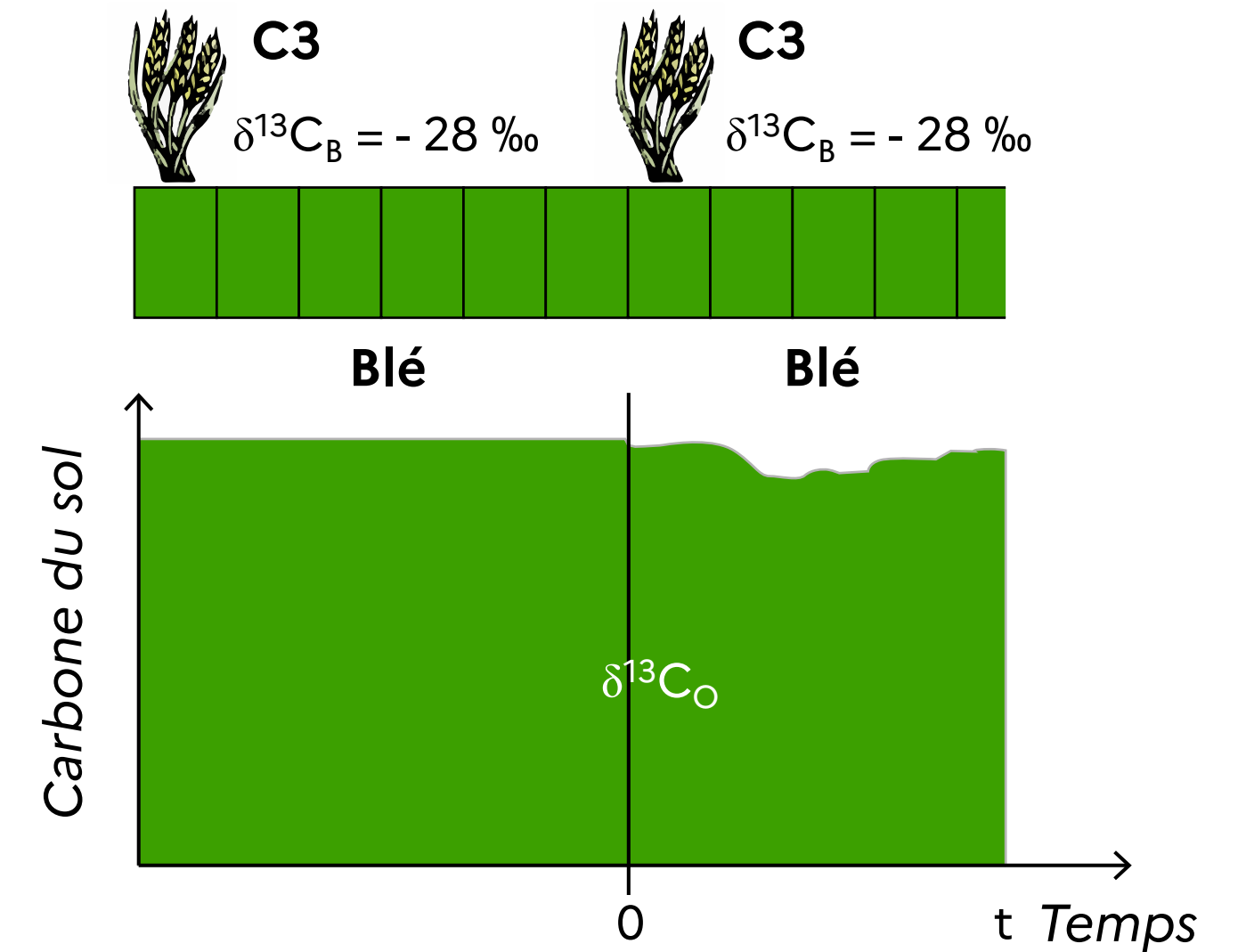
Synthèse de l'évaluation multi-approches de la stabilité biogéochimique du COS



Chronoséquence C3/C4



Jachère nue de longue durée



Simulations d'évolution de stocks de COS dans des essais agronomiques de longue durée

➔ Dans la couche supérieure 0-30 cm :

1-5 % de carbone organique avec un temps moyen de résidence court (années) ;

25-70 % de carbone organique avec un temps moyen de résidence de l'ordre de quelques décennies ;

30 à 75 % avec un temps moyen de résidence supérieur au siècle.

➔ Augmentation du temps de résidence avec la profondeur



TERRES CULTIVÉES

4. LEVIERS D'ACTION POUR STOCKER DU CARBONE



PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

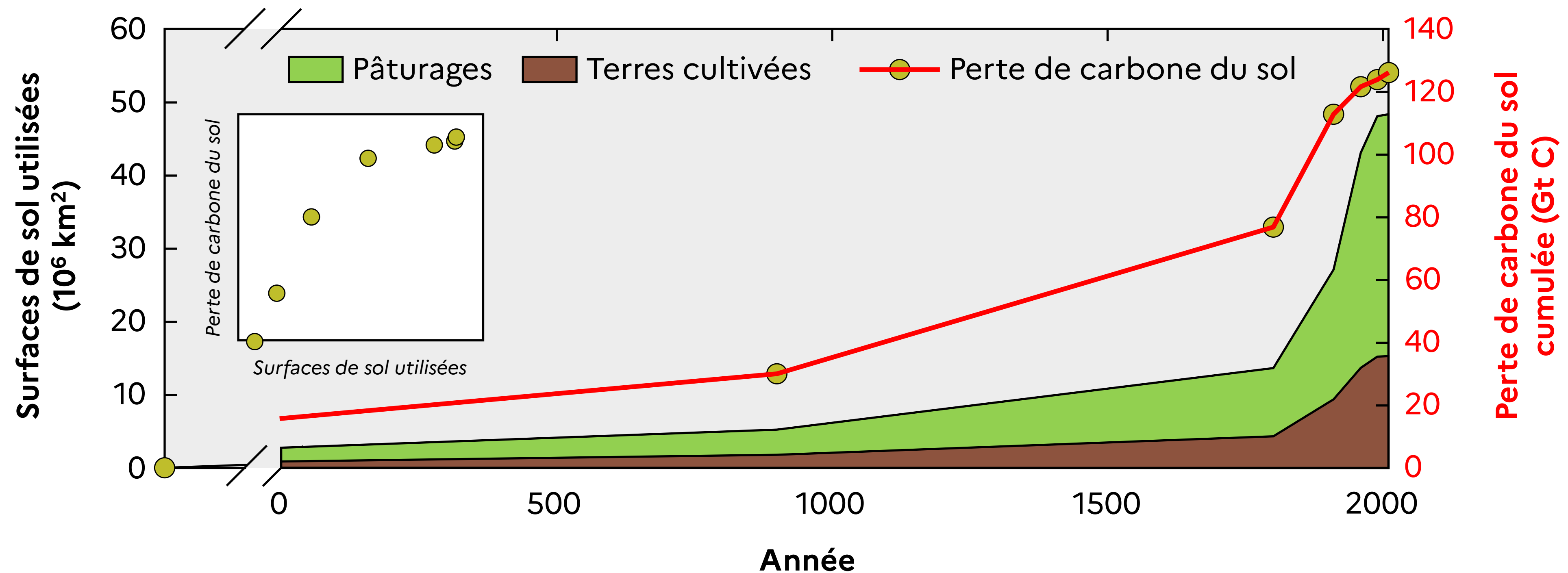
www.pepr-faircarbon.fr

Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte



d'après SANDERMAN et al., 2017



Les modèles montrent que la mise en culture a probablement provoqué une perte totale de **133 Gt C** à l'échelle globale pour les deux premiers mètres du sol depuis les débuts de l'agriculture.

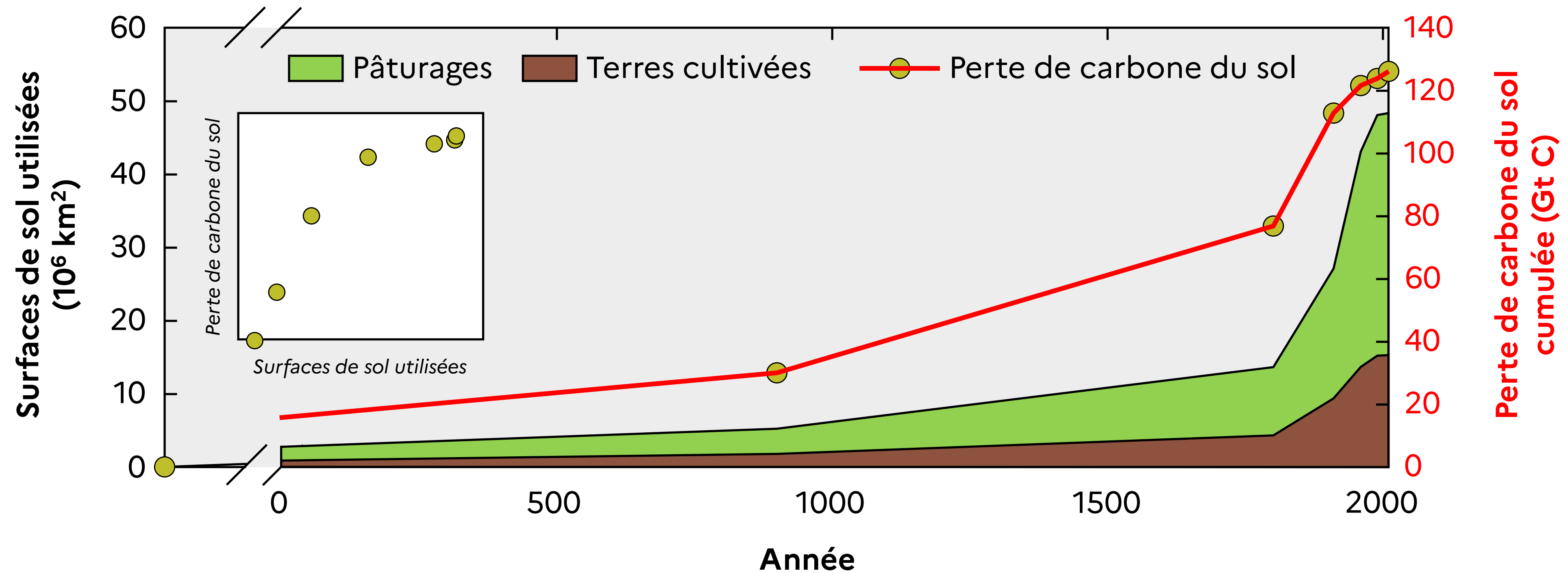
Aujourd'hui, à l'échelle mondiale, l'utilisation agricole des terres, et le **changement d'usage des sols** lié aux activités agricoles, libèrent **environ 1 Gt C.an⁻¹** (FAOSTAT 2020).



La mise en culture des sols entraîne une perte de carbone



d'après SANDERMAN et al., 2017



➔ **L'enjeu est donc de restituer une partie de ce carbone perdu dans les sols cultivés et d'éviter de nouvelles pertes !**



Augmenter les entrées ou réduire les pertes de carbone pour maintenir ou augmenter les stocks de carbone dans les sols cultivés



1 En augmentant la **couverture des sols** en introduisant des **cultures intermédiaires**.



© INRAE / FOUCHARD Marc

2 En réduisant le **travail du sol** (attention, cette pratique peut conduire à une utilisation accrue d'herbicides, ce qui est problématique pour la biodiversité, la qualité de l'eau et la santé humaine).



© INRAE / FARCY Pascal

3 En augmentant la part des **prairies temporaires** dans les successions culturales.



© INRAE / CHEVET Karine



Augmenter les entrées ou réduire les pertes de carbone pour maintenir ou augmenter les stocks de carbone dans les sols cultivés



4 En apportant de la **matière organique** sur les sols sous forme d'amendements.



© INRAE / MAITRE Christophe

5 En développant **les haies et l'agroforesterie** à l'intérieur même des parcelles cultivées.



© INRAE / NICOLAS Bertrand

6 En pratiquant **l'enherbement** des inter-rangs dans les vignobles et les vergers.



© INRAE / BOUISSON Yvan

➔ **1,2 Gt de carbone par an pourraient être stockées à l'échelle globale dans les sols agricoles (cultures et prairies) (GIEC 2014), ce qui compenserait plus de 10 % des émissions anthropiques annuelles.**



Quelle quantité de carbone serait-il possible de stocker dans les sols cultivés dans les prochaines décennies en France Métropolitaine ?



Stockage additionnel par pratique <small>(INRAE expertise 4 pour 1000, 2019)</small>	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm (kg C/ha/an)	Assiette (M ha)	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm (Mt C/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	+61	4,21	+0,257	
Insertion et allongement de prairies temporaires	+114	6,63	+0,756	
Agroforesterie intraparcellaire	+207	5,33	+1,102	
Haies	+17	8,83	+0,150	
Total grandes cultures			+4,960 (86 %)	+5,2
En vignobles				
Enherbement	+182	0,56	+0,103	
Total vignobles			+0,100 (2 %)	+3,7

➔ À l'échelle du territoire métropolitain, l'augmentation des stocks de carbone dans les sols cultivés pourraient permettre de compenser **environ 5 % des émissions.**

(Étude 4 pour 1000 INRAE, 2020)



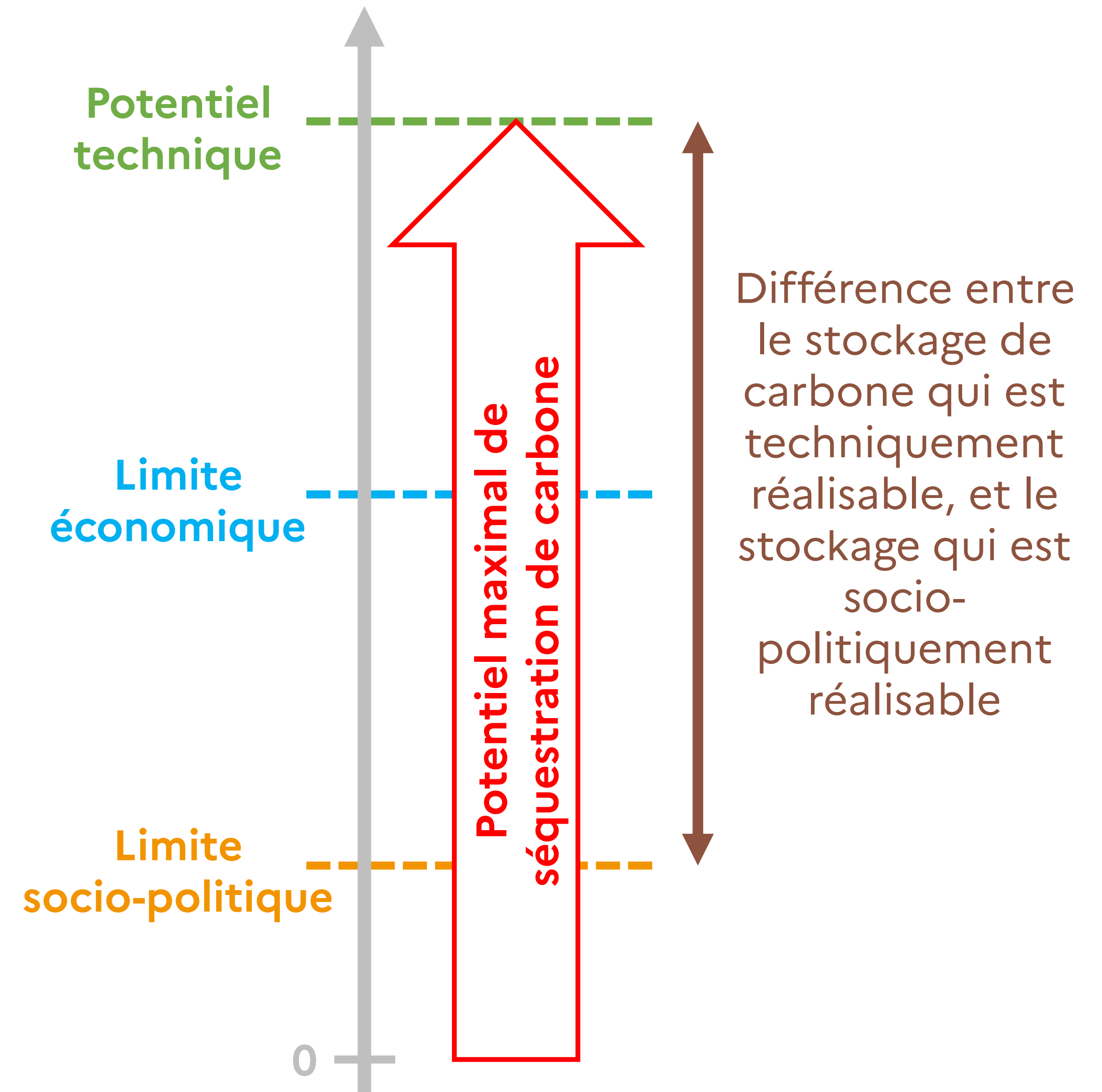
Le stockage de carbone dans les sols agricoles n'est pas une simple question d'ordre biophysique !



Potentiel technique de stockage de carbone : niveau de stockage additionnel atteignable (tenant compte des limites biophysiques) en mettant en œuvre toutes les actions techniquement réalisables sur les terres cultivées d'un territoire.

Limites économiques : la mise en place de pratiques stockantes entraîne généralement un coût additionnel. S'il est prohibitif, ou qu'aucun accompagnement à la mise en place de pratiques stockantes n'est prévu, le potentiel économique de stockage peut être très éloigné du potentiel technique.

Limites sociales : même avec un accompagnement économique adéquate, la mise en place de pratiques stockantes peuvent se heurter à des réticences de la part des agriculteurs.



(Inspiré de AMUNDSON & BIARDEAU PNAS 2018)



Les bénéfices climatiques d'une augmentation des stocks de C dans les sols cultivés : une évaluation intégrée et systémique



Outre les flux de CO₂, les flux de N₂O (et parfois de CH₄) influent fortement sur le bilan GES des terres cultivées. Pour évaluer le bénéfice climatique, il convient de réaliser le bilan GES complet de la parcelle. Ce bilan est réalisé en « équivalent CO₂ ». La concentration en équivalent dioxyde de carbone est la concentration de CO₂ qui entraînerait le même forçage radiatif qu'un mélange donné de CO₂ et d'autres facteurs de forçage.

(définition du GIEC, 2018)

Définitions (d'après DON et al., 2023)

Séquestration de Carbone Organique du Sol (COS) : Flux net de carbone depuis l'atmosphère vers le sol. Ce processus se fait via les plantes ou d'autres organismes. On parle plus communément de *stockage* de carbone.

Émissions négatives : Réduction nette d'équivalents CO₂ de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (absorption de GES).

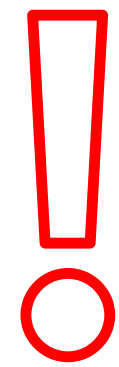
Atténuation du changement climatique : Intervention anthropique qui réduit les sources ou améliore les puits des gaz à effet de serre.

→ **L'agriculture représente 10 à 12 % des émissions de GES anthropogéniques (5,1 à 6,1 GtCO₂ eq/an), majoritairement en raison des émissions de CH₄ et de N₂O.**

(GIEC, 2007)

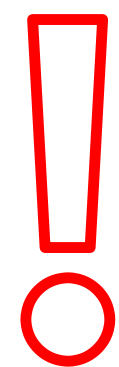
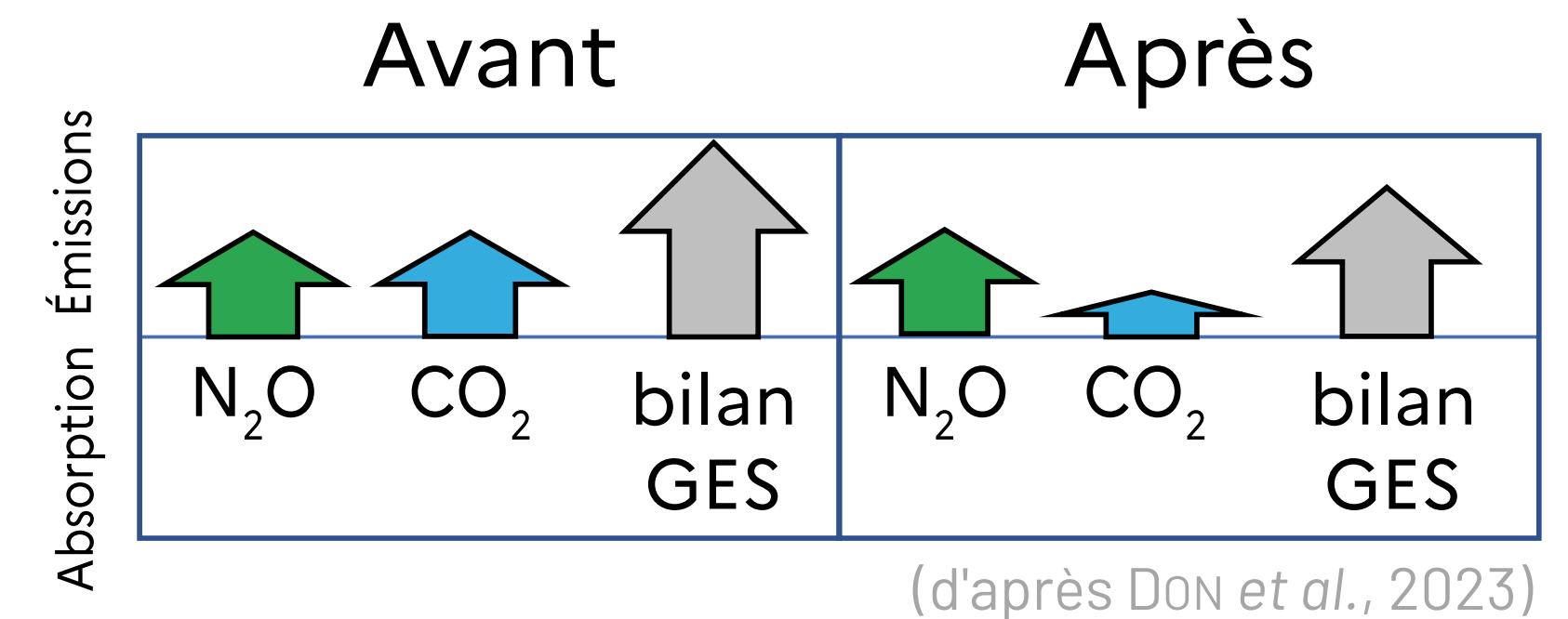


Les bénéfices climatiques d'une augmentation des stocks de C dans les sols cultivés : une évaluation intégrée et systémique



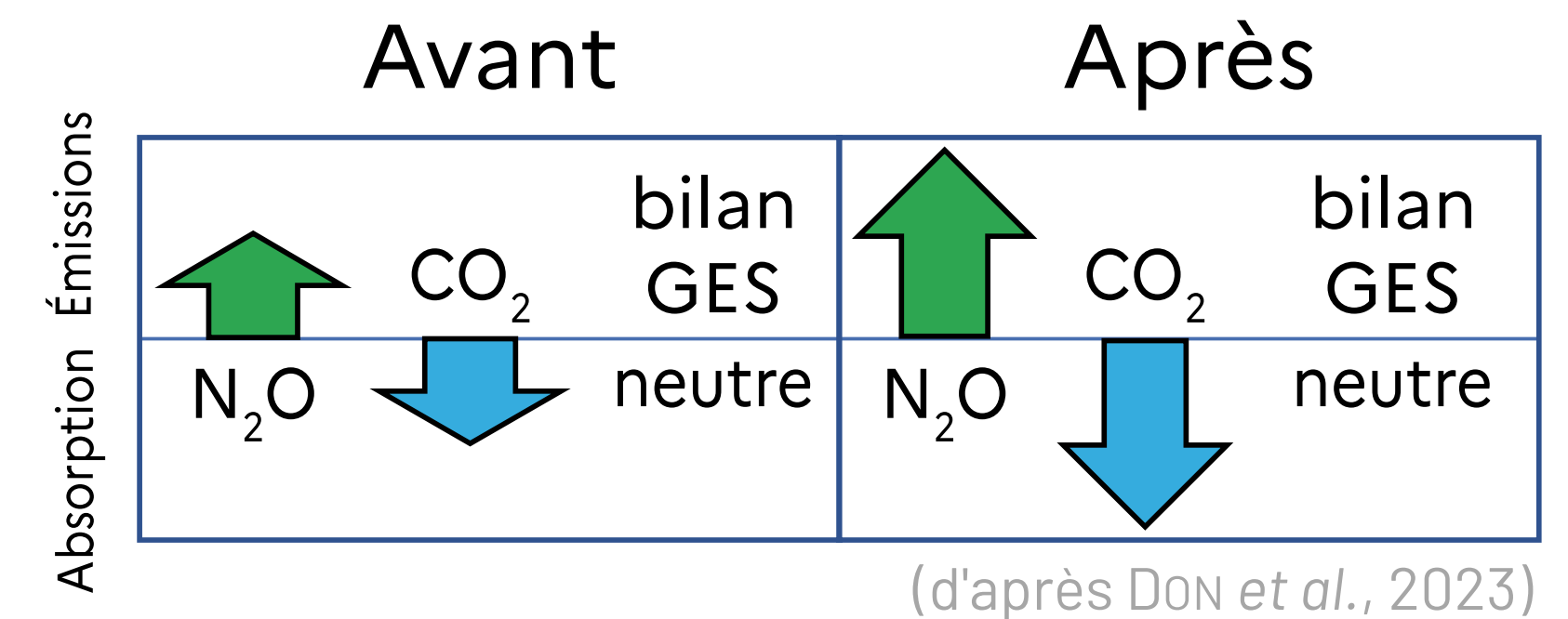
Réduction des émissions de GES \neq Émissions négatives

Dans l'exemple ci-contre, la baisse des émissions de CO_2 permet de diminuer les émissions de GES (et donc d'atténuer le changement climatique), mais cette baisse est insuffisante pour que les émissions de GES deviennent négatives (i.e. passer d'une situation d'émission à une situation d'absorption).



Augmenter le stock de carbone \neq Atténuer le changement climatique

Cette situation peut arriver, par exemple, si l'augmentation du stock de COS a nécessité une forte augmentation de l'apport d'engrais azotés ayant entraîné des émissions accrues de N_2O : le bilan GES est inchangé, malgré l'effort de séquestration de carbone dans les sols.





Exemples théoriques d'impacts (propres aux sites) des changements de pratiques, sur les réservoirs de carbone du sol et de l'atmosphère, et sur les flux de N₂O

Changement de la gestion des cultures...

... vers davantage de cultures de couverture

... vers davantage de cultures de couverture, sur les sites présentant une perte de COS

... vers davantage de fertilisation

... vers des génotypes avec une biomasse racinaire accrue

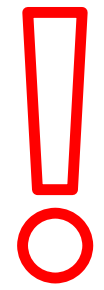
... vers une fertilisation réduite, sur les sites présentant une perte de COS

	Avant	Après	Atténuation de la perte de COS	Atténuation du changement climatique	Séquestration de C	Émissions négatives	Réduction des émissions de GES
Absorption	↑ N ₂ O	↑ N ₂ O	-	OUI	OUI	OUI	OUI
Émissions	↓ CO ₂	↓ CO ₂	-	OUI	OUI	OUI	OUI
bilan GES	↑	↓	-	OUI	OUI	OUI	OUI
Absorption	↑ N ₂ O	↑ N ₂ O	OUI	OUI	NON	NON	OUI
Émissions	↑ CO ₂	↑ CO ₂	OUI	OUI	NON	NON	OUI
bilan GES	↑	↑	OUI	OUI	NON	NON	OUI
Absorption	↑ N ₂ O	↑ N ₂ O	-	NON	OUI	NON	NON
Émissions	↓ CO ₂	↓ CO ₂	-	NON	OUI	NON	NON
bilan GES	neutre	neutre	-	NON	OUI	NON	NON
Absorption	↑ N ₂ O	↑ N ₂ O	OUI	OUI	OUI	NON	OUI
Émissions	↑ CO ₂	↓ CO ₂	OUI	OUI	OUI	NON	OUI
bilan GES	↑	↑	OUI	OUI	OUI	NON	OUI
Absorption	↑ N ₂ O	↑ N ₂ O	NON	OUI	NON	NON	OUI
Émissions	↑ CO ₂	↑ CO ₂	NON	OUI	NON	NON	OUI
bilan GES	↑	↑	NON	OUI	NON	NON	OUI

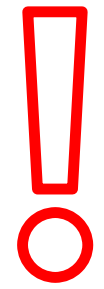
(d'après Don et al., 2023)



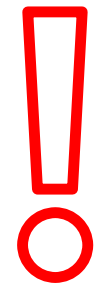
Les bénéfices climatiques d'une augmentation des stocks de C dans les sols cultivés : une évaluation intégrée et systémique



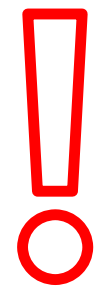
Réduction des émissions de GES \neq Émissions négatives



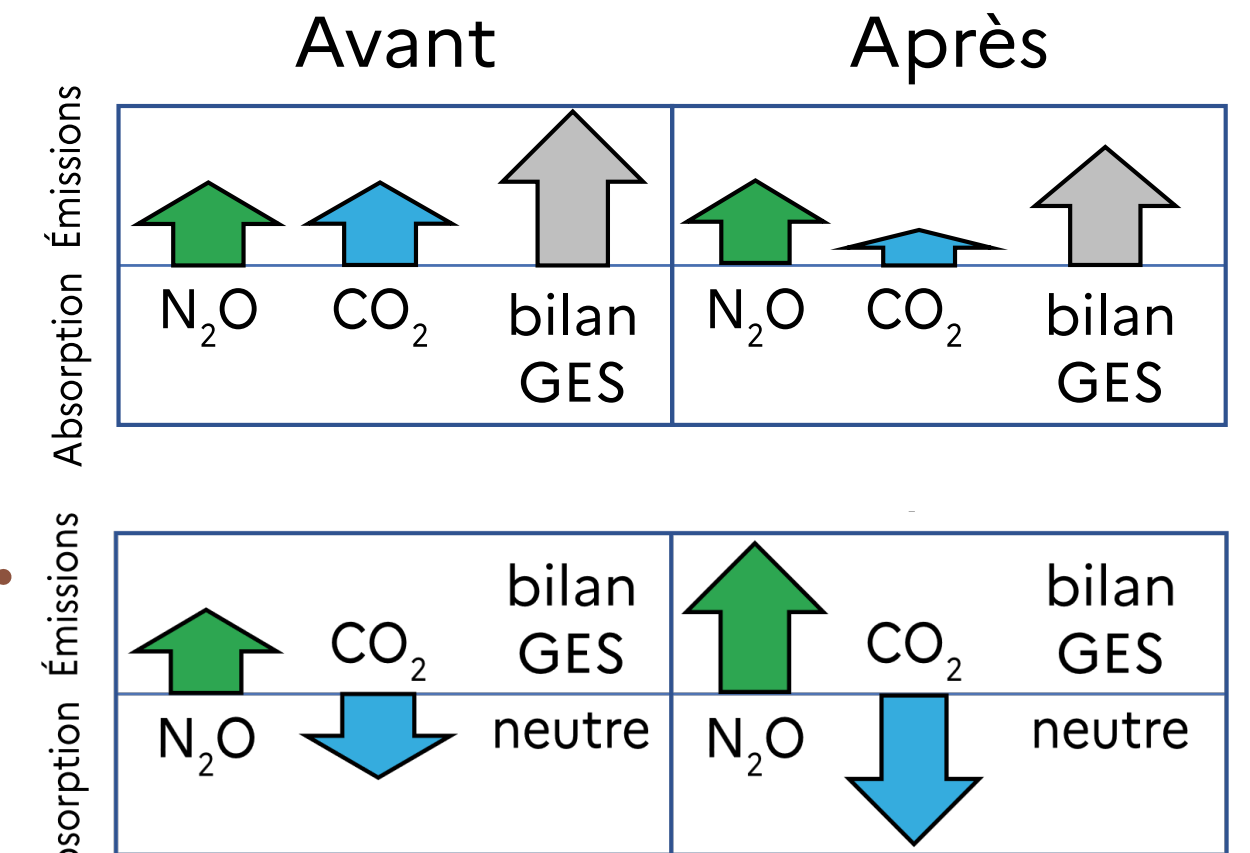
Augmenter le stock de carbone \neq Atténuer le changement climatique



Les émissions de GES associées à la production et à l'épandage d'engrais ne sont pas prises en compte dans les graphes ci-avant.



Les graphes ci-avant ne prennent pas en compte les conséquences sur l'occupation du sol à l'échelle systémique, d'une modification de la production sur une parcelle donnée (e.g. une diminution de la production alimentaire à un endroit donné pourrait être compensée à un autre endroit par la conversion d'écosystèmes naturels en terres cultivées...).



(d'après DON et al., 2023)



Certaines pratiques apportent des co-bénéfices associés à la protection ou l'augmentation des stocks de carbone organique dans l'écosystème



→ Les cultures intermédiaires :

- Améliorent la qualité de l'eau (piège à nitrates) ;
- Limitent l'érosion ;
- Contribuent à l'atténuation du changement climatique via des effets biophysiques (effets d'albédo).



© INRAE / FOUCHARD Marc

→ L'agroforesterie intra-parcellaire et les haies ont un effet positif sur :

- la biodiversité ;
- l'esthétique des paysages ;
- la réduction du risque érosif lié au ruissellement.



© INRAE / NICOLAS Bertrand

© INRAE / NICOLAS Bertrand



TERRES CULTIVÉES

5. CONCLUSIONS




PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr


Septembre 2024

© INRAE / CAUVIN Brigitte

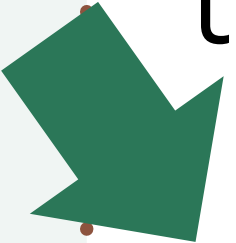


Les terres cultivées représentent **un tiers** des surfaces agricoles et stockent plus de 130 Gt C.


Dans l'écosystème des terres cultivées, plus de **95 % du carbone est stocké dans le sol**, seuls 5 % sont stockés dans la biomasse.




On peut mesurer le **temps de résidence** du carbone dans les terres cultivées via différentes approches, notamment les **chronoséquences C3/C4**.



La teneur en carbone dans les terres cultivées **diminue avec la profondeur**.



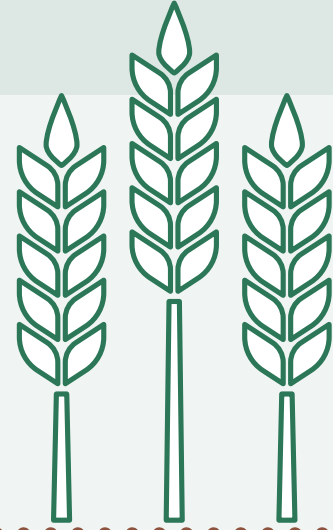
Les entrées de carbone sont la **litière** et les amendements organiques, les sorties de carbone sont la **respiration des micro-organismes** et dans une moindre mesure l'érosion et le lessivage.



Le COS peut être divisé en **compartiments cinétiques** ayant des temps de résidence (TR) contrastés :

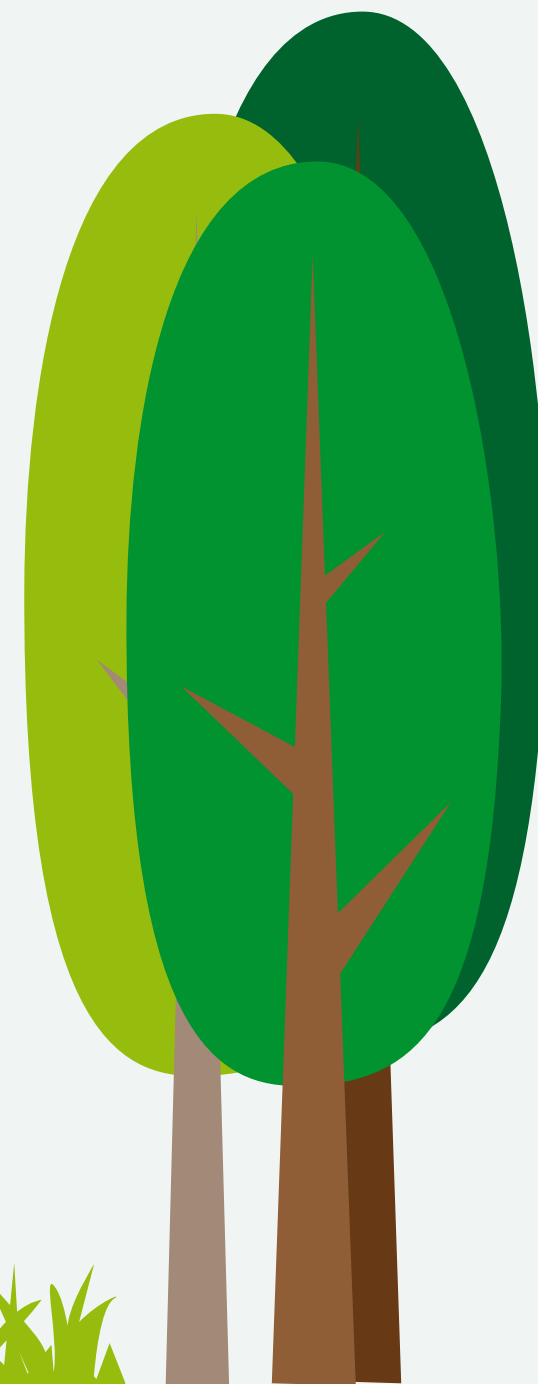
1-5 % avec TR ~ années ;
25-70 % avec TR ~ plusieurs décennies ;
30-75 % avec TR ~ quelques siècles.

TR

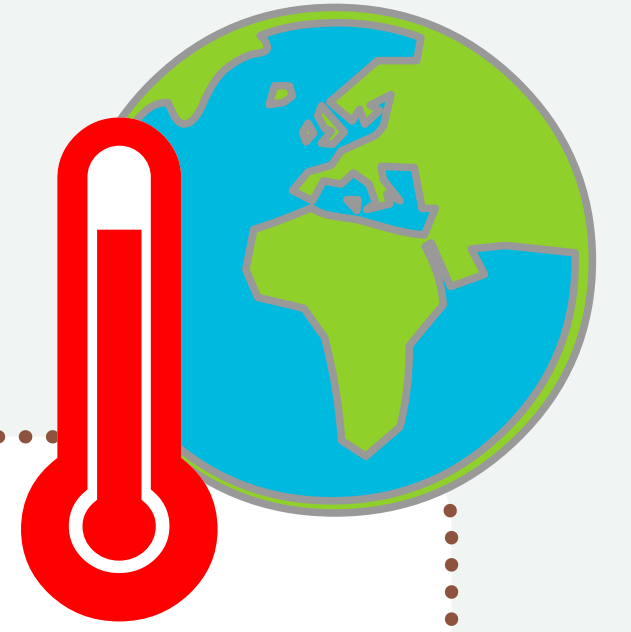


Le changement d'usage des terres est une source significative d'émission de carbone.



Des techniques existent pour **préserver ou augmenter les stocks de carbone existants** : cultures intermédiaires, prairies temporaires, semis direct, haies, agroforesterie, enherbement...



Augmenter le stock de carbone dans les sols cultivés ne permet pas toujours d'atténuer le changement climatique, car d'autres GES entrent en compte dans le bilan total.



Définition des terres cultivées de la FAO

-  <https://www.fao.org/4/i0132e/i0132e08.pdf>
-  <https://www.fao.org/economic/the-statistics-division-ess/other-statistics/socio-economic-agricultural-and-environmental-indicators/compendium-of-agricultural-environmental-indicators-1989-91-to-2000/annex-2-definitions/en/>

Les terres cultivées dans le monde

-  <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
-  <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>
-  <https://ourworldindata.org/grapher/cropland-area?time=latest>

Stock de carbone organique du sol des terres cultivées

-  <https://ourworldindata.org/grapher/cropland-area>
-  https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=3
-  https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf

Différentes formes de carbone organique dans les sols

-  <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

Distribution verticale du carbone organique dans les sols cultivés





-  JOBBÁGY E.G. & JACKSON R.B. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications* 10: 423-436. <https://doi.org/10.2307/2641104>


Schéma général de la dynamique du carbone dans les écosystèmes cultivés

-  <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>
-  <https://earthhow.com/photosynthesis-process/>
-  <https://www.fao.org/3/ca9894en/CA9894EN.pdf>


Estimation des entrées de carbone dans les terres cultivées

-  BOLINDER M.A., JANZEN H.H., GREGORICH E.G., ANGERS D.A., VANDENBYGAART A.J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118(1-4): 29-42. ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013>




Mécanismes de stabilisation des matières organiques dans les sols

-  CHENU C., VIRTO I., PLANTE A. & ELSASS F. (2009). Clay-Size Organo-Mineral Complexes in Temperate Soils: Relative Contributions of Sorptive and Physical Protection. *CMS Workshop Lectures* 16: 120-135. <https://doi.org/10.1346/CMS-WLS-16>


Mesure de la stabilité biogéochimique de la stabilité du carbone organique dans les sols

-  BALESSENT J., WAGNER G.H. & MARIOTTI A. (1988). Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by C-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 118-124. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010021x>

Synthèse de l'évaluation multi-approches de la stabilité biogéochimique du COS

-  BALESSENT J., MARIOTTI A. & GUILLET B. (1987). Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 19(1): 25-30. ISSN 0038-0717. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90120-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90120-9)
-  CLIVOT H., MOUNY J.C., DUPARQUE A., DINH J.L., DENROY 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. *Environmental Modelling & Software* 118: 99-113. ISSN 1364-8152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
-  BARRÉ P., EGLIN T., CHRISTENSEN B.T., CIAIS P., HOUOT S., KÄTTERER T., VAN OORT F., PEYLIN P., POULTON P.R., ROMANENKOV V. & CHENU C. (2010). Quantifying and isolating stable soil organic carbon using long-term bare fallow experiments, *Biogeosciences* 7: 3839-3850. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3839-2010>

La mise en culture des sols entraîne une perte de carbone

-  SANDERMAN J. & HENGL T. & FISKE G.J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36): 9575-9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>

Augmenter les entrées ou réduire les pertes de carbone pour maintenir ou augmenter les stocks de carbone dans les sols cultivés

-  https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf
-  https://4p1000.org/wp-content/uploads/2021/01/4p1000_8p_FR_Join.pdf
-  <https://agriculture.gouv.fr/animation-sequestration-du-carbone-comprendre-le-4-pour-1000-en-3-minutes>
-  <https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/sol/menaces.pdf>

Quelle quantité de carbone serait-il possible de stocker dans les sols cultivés dans les prochaines décennies en France Métropolitaine ?

-  https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf


Le stockage de carbone dans les sols agricoles n'est pas une simple question d'ordre biophysique !

-  <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1815901115>
-  https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf

Les bénéfices climatiques d'une augmentation des stocks de C dans les sols cultivés : une évaluation intégrée et systémique

-  DON A., SEIDEL F., LEIFELD J., KÄTTERER T., MANUEL M., PELLERIN S., EMDE D., SEITZ D. & CHENU C. (2023). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation - Definitions and pitfalls. *Global Change Biology* 30(1): e16983. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>
-  https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_FR.pdf

Exemples théoriques d'impacts (propres aux sites) des changements de pratiques, sur les réservoirs de carbone du sol et de l'atmosphère, et sur les flux de N₂O

-  DON A., SEIDEL F., LEIFELD J., KÄTTERER T., MANUEL M., PELLERIN S., EMDE D., SEITZ D. & CHENU C. (2023). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation - Definitions and pitfalls. *Global Change Biology* 30(1): e16983. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>

Certaines pratiques apportent des co-bénéfices associés à la protection ou l'augmentation des stocks de carbone organique dans l'écosystème

-  https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf