

Séquestration de carbone dans les sols: quels leviers et quelle place pour la sélection?

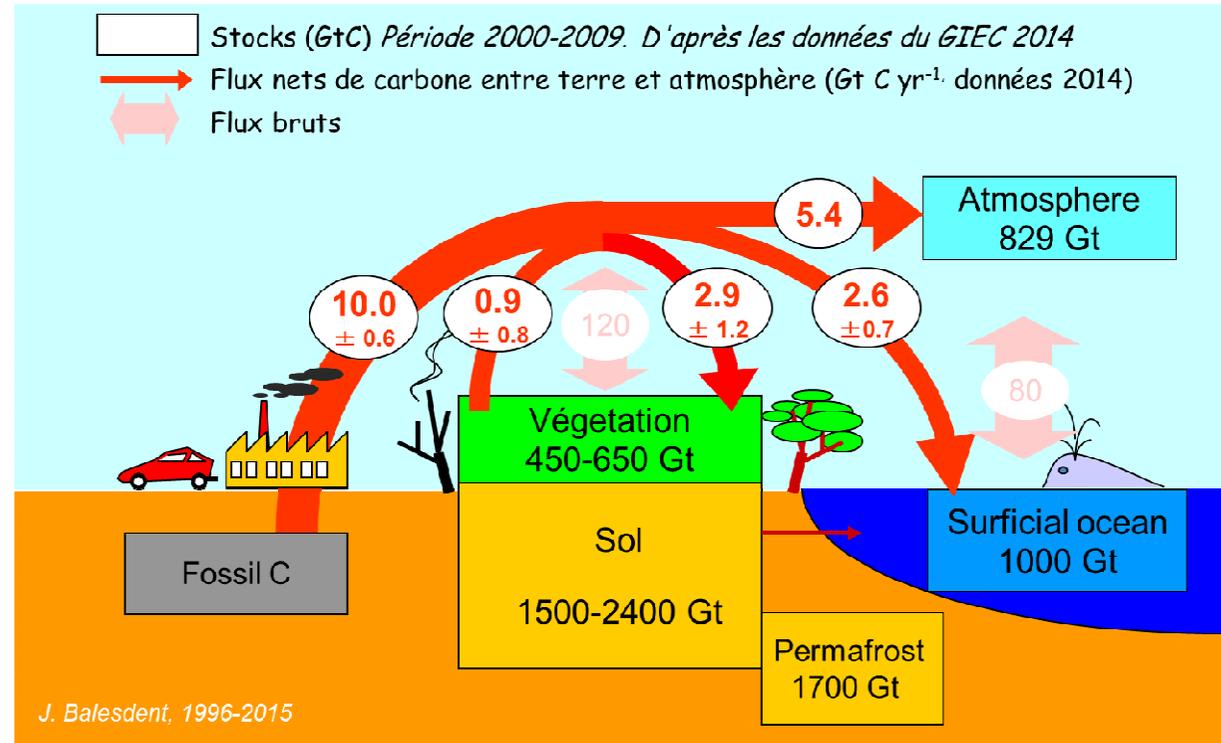
Sylvain PELLERIN

INRA, département EA, UMR Interactions Sol-Plante-Atmosphère

L'initiative 4 pour mille

Au départ un calcul simple, voire simpliste

- A l'échelle planétaire, les sols contiennent entre 1500 et 2400 milliards de tonnes de C
- C'est l'équivalent de 2 à 3 fois le stock de C contenu dans l'atmosphère sous forme de CO₂

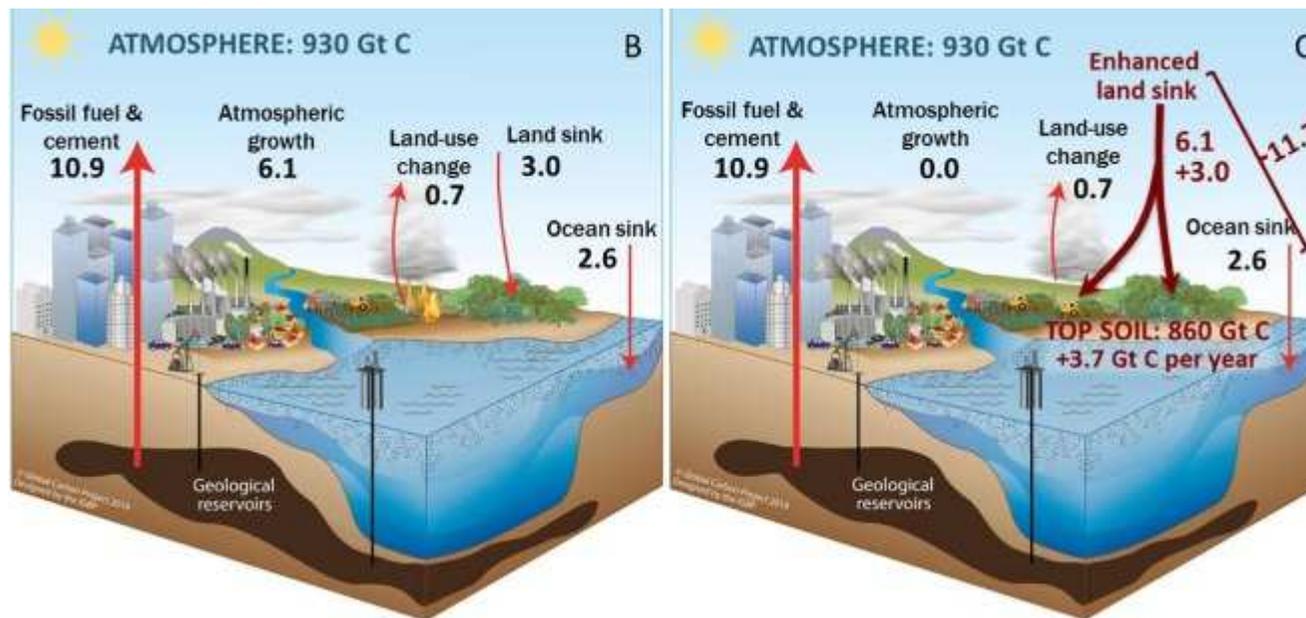


→ Une augmentation annuelle de 4 ‰ du stock de C organique des sols mondiaux ($2400 \times 0,004 = 9,6$ Gt C) compenserait les émissions annuelles de C anthropique liées à l'usage d'énergies fossiles (10,0 Gt C)

Depuis, des calculs plus élaborés ont confirmé la nécessaire contribution du stockage additionnel de C dans les sols pour l'atteinte de la neutralité carbone

Cycle du C en 2030-2040

Sans stockage additionnel de C Avec stockage additionnel de C



Soussana et al., 2019

3 Gt C an⁻¹ (puits de carbone actuel des écosystèmes terrestres)

2,6 Gt C an⁻¹ (puits de carbone actuel des océans)

+3,7 Gt C an⁻¹ (stockage additionnel de C dans les sols = 0,004*860 Gt C (stock C horizon 0-40cm))

+2,4 Gt C an⁻¹ (stockage additionnel de C dans la biomasse: afforestation,...)

→ Total 11,7 Gt C an⁻¹, ce qui compenserait les émissions (11,6=10,9+0,7 Gt C an⁻¹)

Mais les controverses perdurent (cf article Minasny et al., 2017 et réponses)

- Sur l'opportunité de l'initiative (risque d'affaiblir le message sur la nécessité de réduire les émissions)
- Sur la simplicité du calcul
- Sur la faisabilité et les limites de la séquestration du C dans les sols
 - Processus lent, limité dans le temps, réversible
 - Impossible sans un stockage conjoint de N
 - Nécessitant des ressources additionnelles en C « entrant » pas toujours disponibles
 - Avec des freins (techniques, économiques) à l'adoption
 - Susceptible d'être contrecarré par le changement climatique
 - ...

Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges

Take these eight steps to make soils more resilient to drought, produce more food and store emissions, urge **Cornelia Rumpel** and colleagues.

OPINION

WILEY Global Change Biology

Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic

William H. Schlesinger¹ | Ronald Amundson²

OPINION

Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool

Ronald Amundson^{a,1} and Léopold Biardeau^b

Letter | Published: 26 February 2018

Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions

Emanuele Lugato^a, Adrian Leip & Arwyn Jones

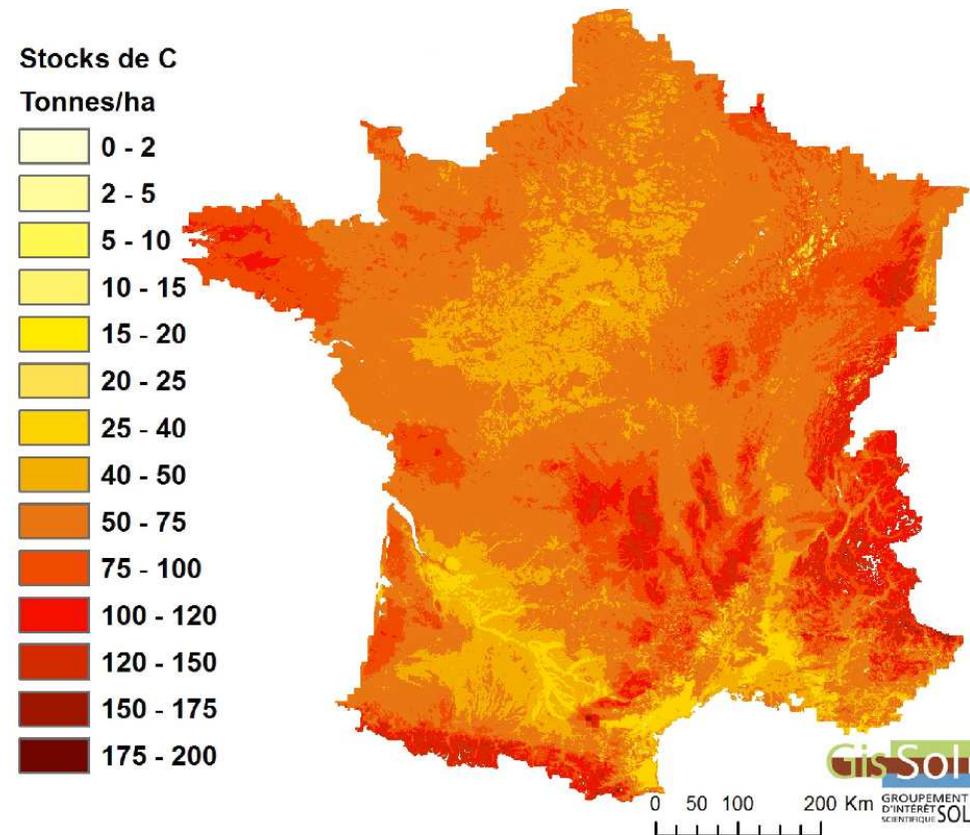
Nature Climate Change 8, 219–223 (2018) | [Download Citation](#)

- Il demeure que, ajouté aux efforts indispensables de réduction globale et générale des émissions de gaz à effet de serre dans l'ensemble de l'économie, le stockage additionnel de C dans les sols est un levier parmi d'autres pouvant aider à atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050
- Outre l'atténuation du changement climatique, l'augmentation de la teneur en C des sols présente plusieurs co-bénéfices qui peuvent être localement importants, notamment pour l'adaptation au changement climatique (amélioration stabilité structurale, augmentation RU,...)
- La controverse sur le 4 pour mille a surtout pointé la nécessité de chiffrer plus précisément le potentiel de stockage et les freins à l'adoption des pratiques stockantes selon les contextes agropédoclimatiques → **Expertise INRA « 4 pour mille France », colloque de restitution à Paris le 13 Juin 2019**

Les stocks de C organique dans les sols français et les tendances d'évolution dans les sols de grande culture

Cartes des stocks de C (Tonnes/ha) organique des sols français sur les 30 premiers centimètres de sol

- Forte variabilité spatiale liée
 - au climat (et à l'altitude)
 - au type de sol
 - au mode d'occupation du sol
- Stocks plus élevés en zone d'altitude (Alpes, Pyrénées, Massif central, Vosges, Jura), sous forêt et prairie (ou régions avec passé prairial)
- Stocks plus faibles dans les régions de grande culture (bassin parisien, aquitain, sillon rhodanien), les régions viticoles (Languedoc-Roussillon)



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

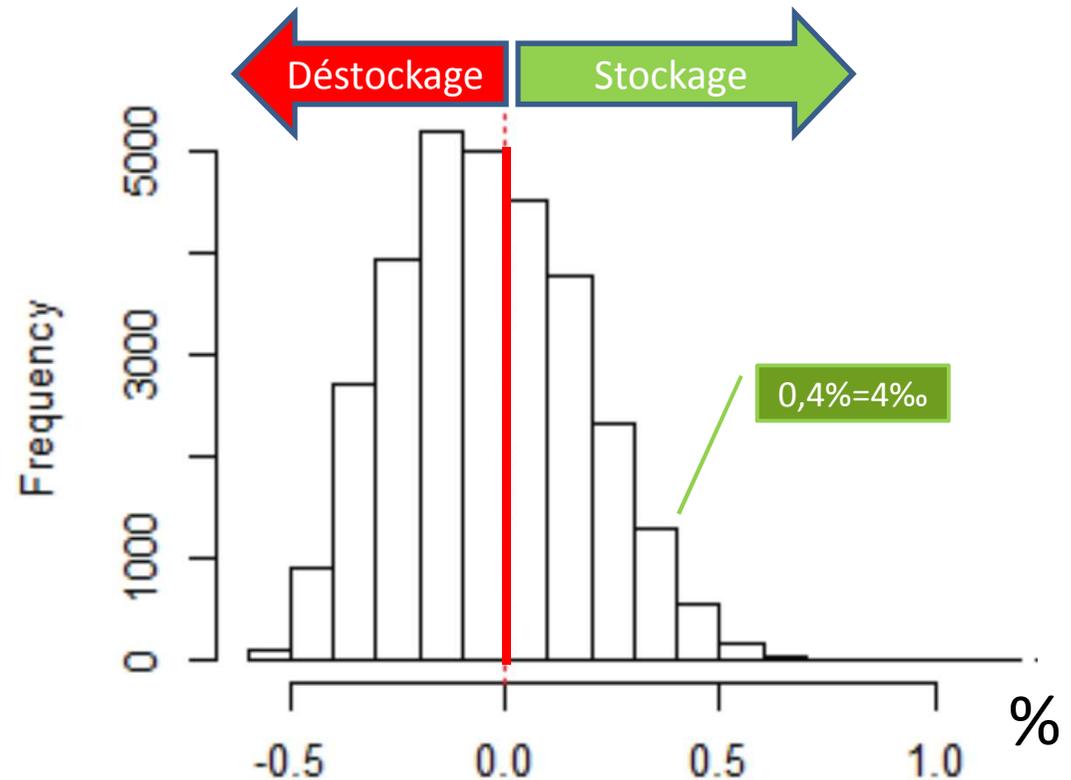
Mulder et al. (2016).

Tendances d'évolution dans les systèmes de grande culture

Résultat des simulations faites dans le cadre de l'expertise EFESE (sans les séquences avec prairies temporaires); résultats à venir dans le cadre de l'étude 4 pour mille france

→ Un taux de stockage annuel compris entre -0,5% et +0,4%

→ En moyenne déstockage de -0,03%



Taux de variation moyen annuel du stock de C dans l'horizon 0-0.3m pour les 30 580 systèmes de grande culture simulés (en %) (EFESE, Pellerin et al., 2017)

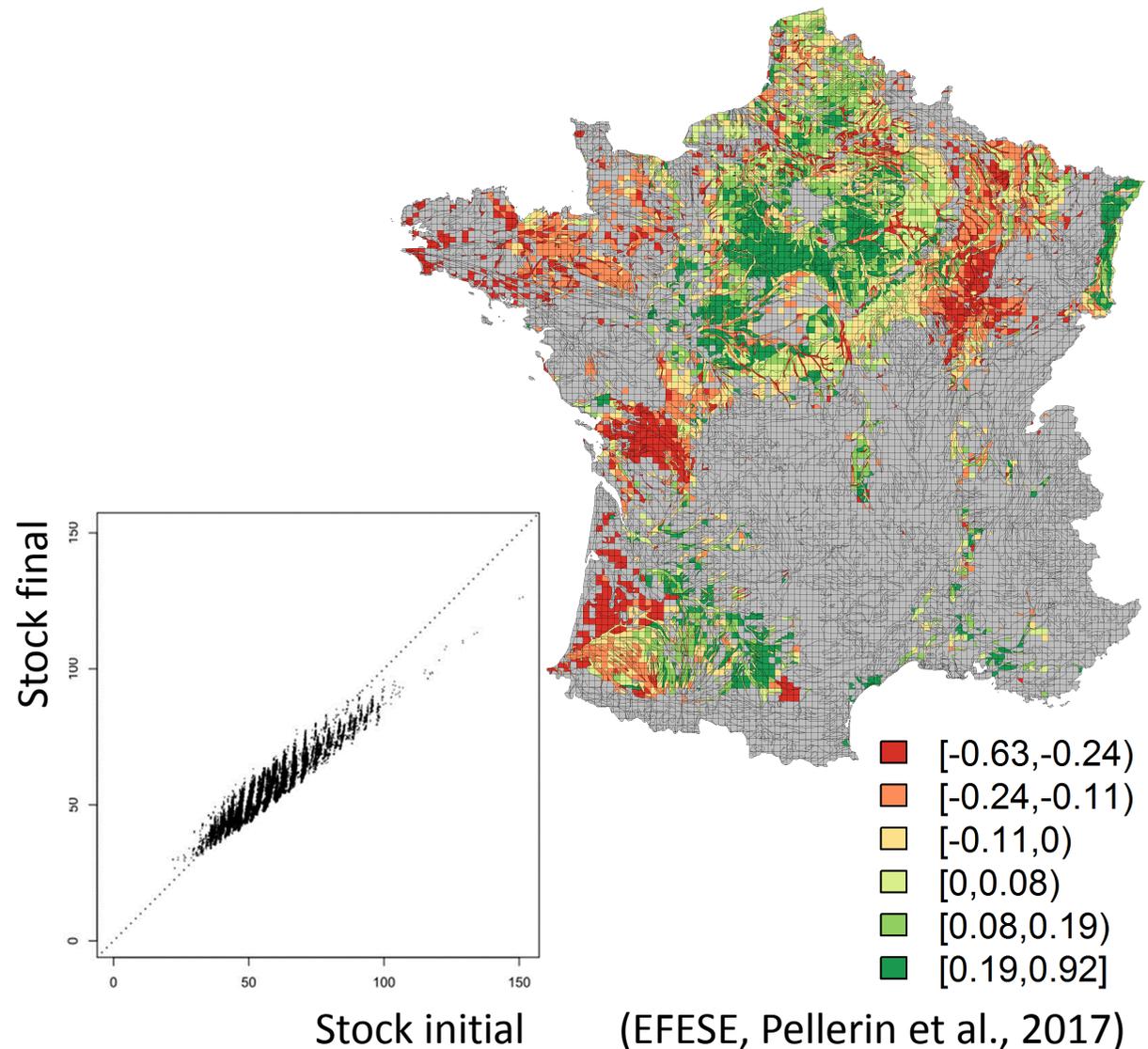
Tendances d'évolution dans les systèmes de grande culture

→ Un léger stockage dans les zones de grandes cultures (Bassin Parisien, Alsace, Sud-Ouest)

- effet favorable de la réglementation zone vulnérable (cult. Interm.)

→ Un déstockage dans l'Ouest (Bretagne, Charente-Maritime, Landes), et à l'Est du bassin parisien

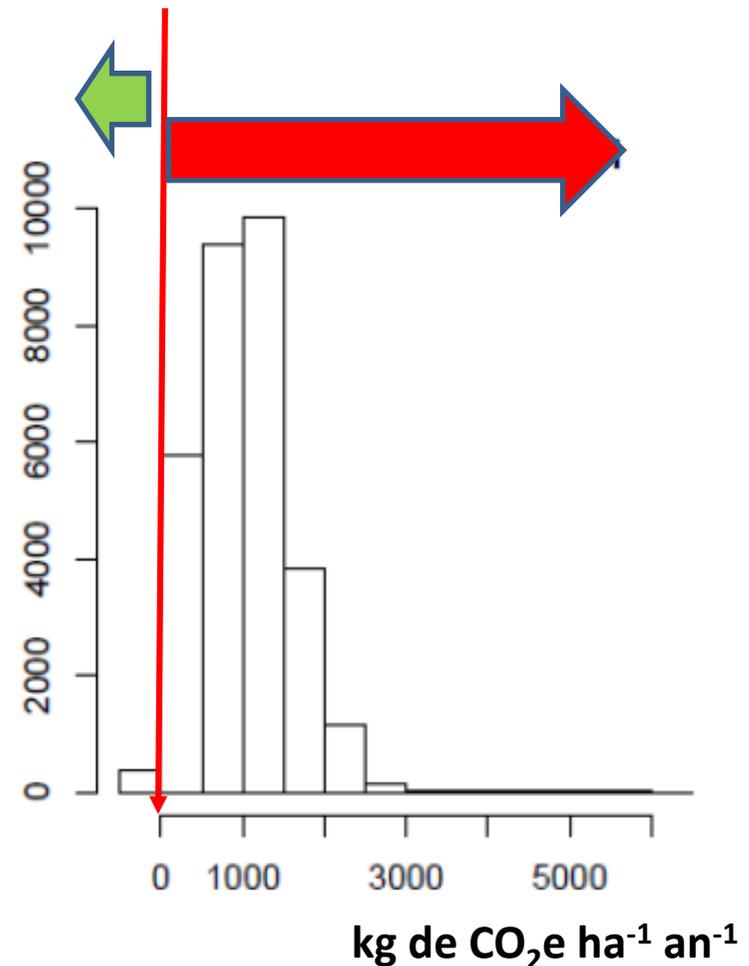
- stocks initiaux hérités élevés que les pratiques actuelles ne permettent pas d'entretenir



Bilans gaz à effet de serre des systèmes de grande culture

Bien que certains systèmes stockent (un peu) de carbone, les systèmes de grandes cultures restent **très majoritairement émetteurs de GES**, du fait des émissions de N_2O

► Un effort pour accroître le stockage de C dans les sols n'a de sens que s'il est accompagné d'un effort concomitant pour réduire l'usage des engrais azotés de synthèse



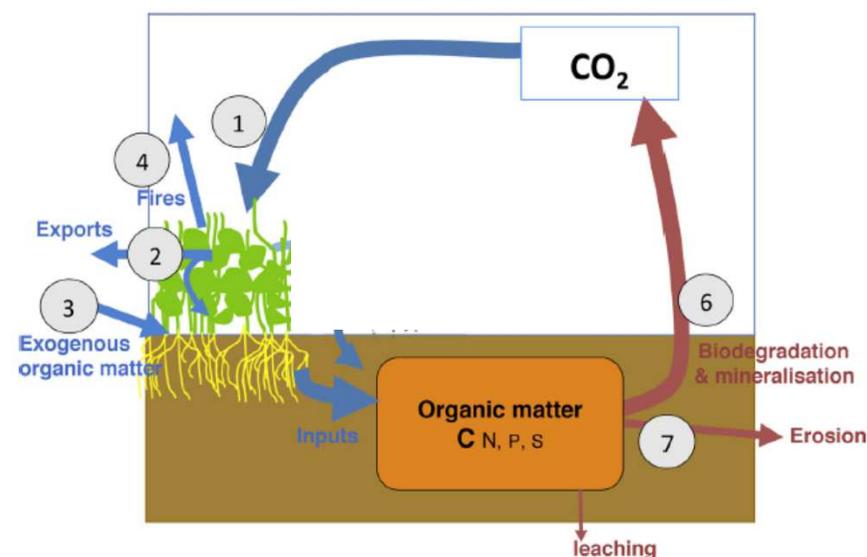
Bilan GES des 30 580 systèmes de grande culture simulés (en %) (EFESE, Pellerin et al., 2017)

**Quels leviers pour accroître le stockage
de C dans les sols de grande culture et
quelles marges de manœuvre?**

Deux leviers pour accroître les stocks de C du sol en systèmes de grande culture

➤ Augmenter les entrées de C

- Augmenter la production primaire (espèces et variétés plus productives, cultures intermédiaires, agroforesterie,...) (1)
- Augmenter la part du C produit restant au sol (résidus de culture) (2)
- Faire des apports de C exogènes (3) (mais attention déplacer du C ne conduit pas à une séquestration additionnelle de C)
- Eviter le brûlage (4)



➤ Réduire les sorties de C

- Réduire la vitesse de minéralisation (non travail du sol) (6)
- Réduire l'érosion (7)

In Chenu et al., 2019

Les résultats récents conduisent:

→ à revoir à **la baisse** le potentiel de stockage additionnel de C par réduction du travail du sol, car celui-ci est non systématique (Angers et Eriksen-Hamel, 2009, Luo 2010, Virto 2011, Dimassi 2014)

Mais, même si le stockage additionnel de C lié à la réduction du labour est moindre que ce qui avait été initialement estimé, cette pratique garde tout son intérêt pour réduire les émissions de CO₂ (via la moindre consommation d'énergie fossile), et vis-à-vis d'autres enjeux (érosion,...)

→ à revoir à **la hausse** le potentiel de stockage additionnel de C par des pratiques augmentant les entrées (ex. cultures intermédiaires) (Juste et al., expertise INRA 2012)

Un stockage de carbone dans le sol accru avec les cultures intermédiaires

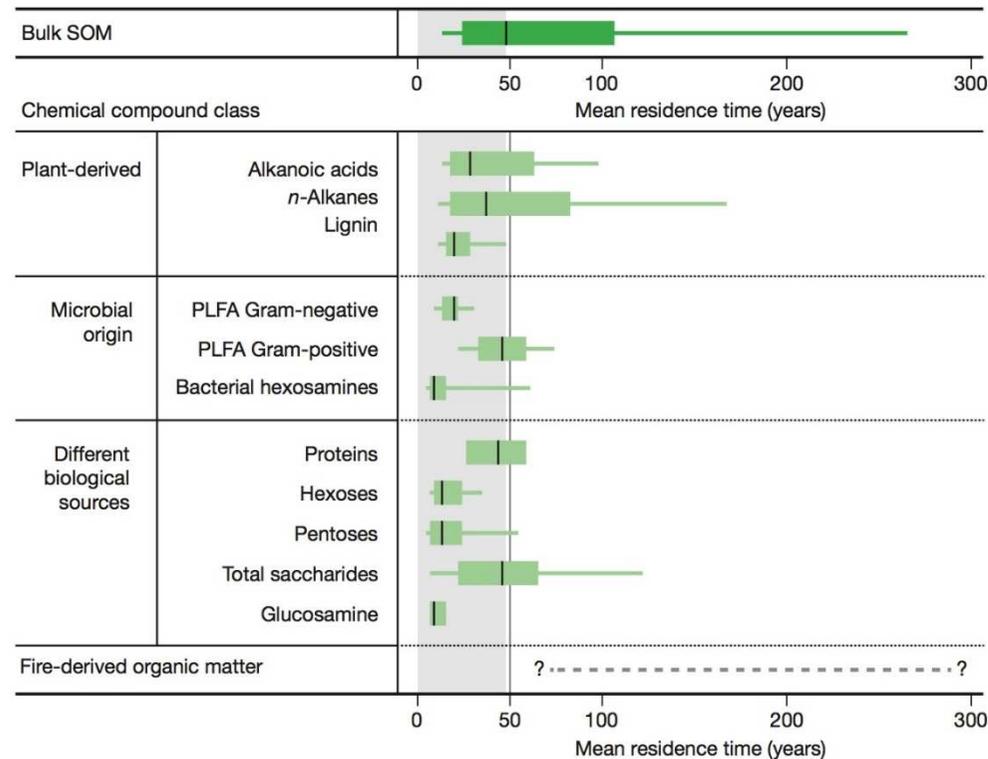
- Un stockage variable mais une tendance positive retrouvée partout.
- Stockage : 292 ± 156 kg C/ha/an en climat tempéré
- Taux de stockage comparable aux résidus de culture
- Le stockage additionnel de carbone dépend beaucoup plus de la biomasse produite (et restituée) que de sa composition biochimique

| Essais | Climat | Durée moyenne (ans) | Séquestration (kg C/ha/an) | | Facteur de conversion (%) | |
|--------|----------|---------------------|----------------------------|------------|---------------------------|------------|
| | | | moyenne | écart-type | moyenne | écart-type |
| 1-7 | Tropical | 12 | 506 | 431 | 17% | 10% |
| 8-23 | Tempéré | 15 | 292 | 156 | 33% | 10% |
| 1-23 | Tous | 14 | 376 | 308 | 25% | 12% |

Juste et al., 2012, expertise INRA

Contrairement à une idée encore répandue la contribution du carbone entrant au stockage à long terme n'augmente pas avec sa récalcitrance chimique initiale

Temps moyen de résidence du carbone en fonction de l'origine et de la nature biochimique du C entrant (Schmidt et al., 2011)



- Le carbone des polysaccharides et des protéines, essentiellement microbien persiste plus longtemps que celui des lignines ou de certains lipides.
- Sachant qu'un apport organique facilement biodégradable forme plus de biomasse microbienne qu'un composé résistant, il formera à terme plus de composés persistants.

A quantité entrante équivalente, le carbone d'origine racinaire contribue plus à la fourniture de carbone stable dans le sol que le carbone aérien

Table 1. Relative contribution factor of roots vs. shoots to total SOC = (root-derived soil C/total root C input)/(shoot derived soil C/total shoot C input). Total SOC includes particulate organic matter from plant debris and finer texture pools of soil C

| Method & crop type | Duration (months) | Relative contribution | Evaluation methods | | References |
|---|-------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | | Total root C input | Tissue-derived soil C | |
| I. Root systems grown <i>in situ</i> | | | | | |
| Maize | 132 | 1.50 | 200% Root biomass | Bare fallow control | Barber (1979) |
| Maize | 48 | 1.75 | 200% Root biomass | Natural abundance ¹³ C | Balesdent and Balabane (1996) |
| Maize | 180 | 1.70 | 200% Root biomass | Natural abundance ¹³ C | Bolinder et al. (1999) |
| Maize | 152 | 3.30 ^a | 200% Root biomass | Natural abundance ¹³ C | Clapp et al. (2000) |
| Hairy vetch (<i>Vicia Villosa</i>) | 5 | 3.70 | Root biomass + ¹³ C SOC | ¹³ C labelling | Puget and Drinkwater (2001) |
| Alfalfa | 24 | 2.70 | 200% Root biomass | Bare fallow control | Rasse (unpublished data) |
| average | 90 | 2.40 | | | |
| II. Incubation: shoot and root material mixed into soils | | | | | |
| Barley (<i>Hordeum vulgare</i>) | 60 | 1.33 | Measured input | ¹³ C labelling | Broadbent and Nakashima (1974) |
| <i>Medicago</i> sp. | 1 | 1.22 | Measured input | ¹⁴ C labelling | Amato et al. (1984) |
| <i>Medicago</i> sp. | 24 | 1.45 | Measured input | ¹⁴ C labelling | Amato et al. (1984) |
| <i>Miscanthus giganteus</i> | 20 | 1.26 | Measured input | No-input control | Beuch et al. (2000) |
| Clover (<i>Trifolium repens</i>) | 3 | 1.30 | Measured input | No-input control | de Neergaard et al. (2002) |
| Ryegrass | 3 | 1.24 | Measured input | No-input control | de Neergaard et al. (2002) |
| Average | 18 | 1.30 | | | |
| III. Incubation: litter-bag experiments | | | | | |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 36 | 1.55 | Measured input | Total C in bag | Scheu and Schauer mann (1994) |
| <i>Festuca vivipara</i> | 2 | 1.5 | Measured input | Total C in bag | Robinson et al. (1997) |
| <i>Festuca vivipara</i> | 13 | 2.1 | Measured input | Total C in bag | Robinson et al. (1997) |
| <i>Poa liguralis</i> | 21 | 0.94 | Measured input | Total C in bag | Moretto et al. (2001) |
| <i>Stipa clarazii</i> | 21 | 0.86 | Measured input | Total C in bag | Moretto et al. (2001) |
| <i>Stipa tenuissima</i> | 21 | 0.77 | Measured input | Total C in bag | Moretto et al. (2001) |
| <i>Lepidium lasiocarpum</i> | 3 | 1.33 | Measured input | Total C in bag | Parker et al. (1984) |
| Average | 17 | 1.29 | | | |

^aaverage value of no-till and chisel-plough systems.

Rasse et al., 2005

Quelle marge de manœuvre pour accroître les stocks de C sous grande culture en France?

- Des sols de grande culture non saturés
- Mais une ressource en C entrant actuellement non suffisante pour accroître le stock de 4 pour mille par an (en moyenne pendant 30 ans)

In Martin et al.,
en préparation

→ des possibilités de stockage additionnel de C, mais à condition de produire les ressources en C entrant nécessaires
→ leviers testés dans le cadre de l'étude 4 pour mille France: généralisation et allongement des cultures intermédiaires, mobilisation de nouvelles ressources organiques (déchets urbains,...), insertion et allongement des prairies temporaires, enherbement des vignes et vergers, agroforesterie et haies, semis direct

Quelles cibles pour l'amélioration des plantes?

- Nécessité de produire de la biomasse (pour accroître le retour au sol de C, tout en préservant les autres usages, alimentaires et non alimentaires) sans dégrader le bilan gaz à effet de serre (et les autres composantes de la durabilité des systèmes de culture)
→ **les cibles « classiques » de la sélection restent à l'ordre du jour (e.g. ↗ l'efficacité de prélèvement et d'utilisation de l'azote)**
- **Besoin de matériel végétal adapté aux évolutions envisagées des pratiques:**
 - Généralisation des cultures intermédiaires (allongement durée, intercultures courtes,...) → *Taux de germination et de levée élevés, y compris en conditions défavorables (sol sec, peu préparé); Croissance rapide (intercultures courtes); Facilité de destruction (sans glyphosate)*
 - Développement des prairies temporaires en remplacement du maïs → *productivité*
 - Semis direct, semis sous couvert → *réussite de l'implantation*
 - Agroforesterie → *tolérance à la compétition interspécifique*
- **Rechercher certaines caractéristiques spécifiques intéressantes vis-à-vis du stockage de C** (e.g. production biomasse racinaire et rhizodépôts, production de C profond)

Merci pour votre attention