



Les rétroactions Climat/Carbone des surfaces émergées et plus particulièrement des sols

guenet@geologie.ens.fr

Qu'est ce qu'une rétroaction?

 l'action *en retour* d'un effet sur sa propre origine : la séquence de causes et d'effets forme donc une boucle dite *boucle de rétroaction*



Qu'est ce qu'une rétroaction?

• Il existe deux types de boucle rétroaction: positive (le phénomène s'accélère)



Qu'est ce qu'une rétroaction?

• Il existe deux types de boucle rétroaction: négative (le phénomène ralenti)



> 400 ppm de CO₂ dans l'atmosphere

La courbe de Keeling (https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/)



Mais cela ne correspond pas à 100% des émissions

Seulement la moitié des émissions s'accumule dans l'atmosphère





3.1 PgC yr⁻¹

2.6 PgC yr⁻¹

11.5 PgC yr⁻¹



Friedlingstein et al., 2020

Introduction : CO₂ atmosphérique et cycle du carbone





IPCC, 2013 Friedlingstein et al., 2021



IPCC, 2013 Friedlingstein et al., 2021

- Les premiers papiers à mentionner ce terme dans ce contexte datent des années 80 (Lashof, 1989; Hansen et al. 1984)
- Plusieurs rétroactions sont décrites: biogéochimiques (photosynthèse, respiration, CH₄, etc.) et géophysiques (vapeur d'eau, nuage, etc.)
- Tentative de calculer le « gain » par analogie avec l'electronique

Les rétroactions climat/carbone Feedback and Gain



 $g=(\omega-I)/\omega$

Lashof (1989)

Signal d'entré: Changement de température issu de l'effet direct d'une perturbation sur le forçage radiatif

Gain

Signal en sortie: Changement de Température lorsque les rétroactions sont activées

Si ω > I alors g > 0 on parle de rétroactions positives



Si ω < I alors g < 0 on parle de rétroactions négatives



- Mesures dans les carottes de glace à Vostok (Antarctique)
- Mesures de δ^{18} O et de δ D
- Reconstruction du [CO₂] atmosphérique entre 390 et 650 kyr B.P. (Before Present)
- En combinant à d'autres mesures:

reconstruction de la période 0-650 kyr BP



Siegenthaler et al., 2005

• Pourquoi des mesures de δ^{18} O et de δ D











Temps



Temps

- Corrélation entre température et [CO₂] mais qui est responsable de la dynamique de l'autre?
- Il faut s'intéresser au phasages
- Très long débat dans la communauté climatique
- Passage du dernier maximum glaciaire à l'holocène



Shakun et al., 2012







- D'abord un changement de la circulation océanique dans l'Atlantique
- Relargage de CO₂ dans l'atmosphère
- Fin de la période du dernier maximum glaciaire.

RETROACTIONS POSITIVE ENTRE CLIMAT ET CYCLE DU C

Les modèles système Terre (ESM)

- Représentation 3D de l'atmosphère, des océans de la glace de mer et des surfaces émergées.
- Couplage entre le climat et les cycles biogéochimique.
- De nombreux mécanismes dans

chaque cellule

- Circulation océanique
- Chimie atmosphérique
- Biogéochimie



Les modèles système Terre (ESM)

- Mécanismes des surfaces émergées:
 - Photosynthèses/respiration
 - Evapotranspiration/Drainage/Ruisselement
 - Energie
- Sols sont un driver important:
 - Eau
 - Carbone
 - Azote

Les modèles système Terre (ESM)

- Pourquoi développer ces modèles?
 - Pour une meilleur compréhension du climat
 - Pour estimer les effets des drivers (Poussière, radiation solaire, Emissions de GES d'origine anthropique, etc.)
 - Prédire le changement climatique
 - Etudier les rétroactions climat/carbone

- L'importance des puits de C est connues depuis plusieurs décennies
 - Dans le 2ieme et 3ieme rapports du GIEC (1995 et 2001) les retroactions climat/carbone ne sont pas représentées dans les modèles
 - Les puits de C sont uniquement contrôlés par les émissions de C et le climat mais pas de retroactions.

• Une première publication dans Nature en 2000.

Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model

Peter M. Cox*, Richard A. Betts*, Chris D. Jones*, Steven A. Spall* & Ian J. Totterdell†

* Hadley Centre, The Met Office, Bracknell, Berkshire RG12 2SY, UK † Southampton Oceanography Centre, European Way, Southampton SO14 3ZH, UK

- Les auteurs ont utilisés un ESM HadCM3 développé au Hadley Center (UK).
- Mise à l'équilibre avant la simulation en utilisant des conditions pré industriels. Puis simulations entre 1860 et 2100 en utilisant un scénario « business as usual »

- 3 types de simulations:
 - Standard (pas d'interactions en climat et carbone)
 - Offline (cycle du C et végétation dynamique mais pas d'effet direct du CO2 sur le climat)
 - Couplage complet


Comment la communauté scientifique a étudier les rétroactions?



Comment la communauté scientifique a étudier les rétroactions?



Comment la communauté scientifique a étudier les rétroactions?



Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique



Figure 2 Inclusion of CO_2 removal in scenarios, thus allowing larger emissions without breaching the IPCC carbon budget. Source: adapted from Anderson and Peters (2016).

EASAC, 2018

Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique

- Afforestation et reforestation.
- Gestion des terres pour augmenter les stocks de C du sol
- La production de bioenergy avec capture et stockage du C (BECCS).
- Accélaration de l'altération.
- Capture directe et stockage du CO₂ de (DACCS).
- Fertilisation des océans pour augmenter la fixation du CO₂.

Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique

- Afforestation et reforestation.
- Gestion des terres pour augmenter les stocks de C du sol
- La production de bioenergy avec capture et stockage du C (BECCS).
- Accélaration de l'altération.
- Capture directe et stockage du CO₂ de (DACCS).
- Fertilisation des océans pour augmenter la fixation du CO₂.

L'initiative 4‰



Fig. 1. The 4 per 1000 soil carbon sequestration initiative (adapted from Ademe, 2015).

Minasmy et al., 2017

L'initiative 4‰

1.9-

• 3900-4900 Mha de surface sur lesquelles on peut agir

480-790 Gt de C augmentation de 4‰
3.1 GtC yr⁻¹ (20-35% des emissions totales).

 La reduction de nos émissions de GES est INDISPENSABLE!









- Réduction du labour
- Culture intermédiaire
- Agroforesterie
- Biochar

• Le travail du sol (=labour) est la préparation agricole du sol par **agitation mécanique**.



Avantages

- Meilleure aeration
- Reduction des adventices
- Meilleur infiltration

Inconvénient

- Augmentation de l'erosion
- Reduction de la biodiversité

PROTECTION PHYSIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL EN AGRÉGAT DECOMPOSITION DES AGREGATS -> - ACCESSIBILITE AUX MICRO-ORGANISMES ACCRUE - DISPONIBILITÉ D'OXYGENE ACCRUE



(Adaptée de Chenu, 2000 pers. Com.)



(Abdalla et al., 2016)



(Abdalla et al., 2016)



(Abdalla et al., 2016)





⁽Virto et al., 2012)

Table 1 | Some key benefits and limitations or problems observed from a change to no-till cultivation practices.

Benefits	Potential problems/limitations
Soil properties, crop growth and environmental impacts	
Additional organic C in surface layer—beneficial for soil structure, soil biological activity and seedling emergence	Only small additional total organic C stock in whole soil profile—limited benefit for climate change mitigation
More continuous pores allowing increased rainfall infiltration — beneficial for water availability for crops and climate change adaptation	
Increased crop yields in some situations—probably owing to improved soil conditions and/or water availability	Crop yields decreased or unchanged in some situations, or increases only emerge after several years. Possibly associated with uneven seedling emergence or increased soil density causing inhibited root growth in some environments
Increased soil biological activity-especially if combined with crop residue retention	
Decreased risk of soil erosion—particularly if combined with crop residue retention	
	Nitrous oxide emissions may either increase or decrease—with negative or positive impacts on climate change mitigation
Farm operations	
Labour/time saved through elimination of tillage operations	May need extra labour or use of herbicides for weed control
Earlier sowing of crop often facilitated, leading to possibility of improved growth and yield in some environments	In wet climates delayed planting may occur owing to slower soil drying after rainfall events
Fuel saved through elimination of tillage operations—decreased costs and $\mathrm{CO}_{\mathrm{2}}\mathrm{emissions}$	
	Suitable machinery for planting may not be available, a particular issue for resource-poor farmers in less developed countries
Long-term increases in crop yields and farm incomes—especially if combined with crop residue retention and crop diversification	May be little or no increase in farm income in the short-term, a major limitation for small-holder farmers in less developed countries

(Powlson et al., 2014)

Table 1 | Some key benefits and limitations or problems observed from a change to no-till cultivation practices.

Benefits	Potential problems/limitations
Soil properties, crop growth and environmental impacts	
Additional organic C in surface layer—beneficial for soil structure, soil biological activity and seedling emergence	Only small additional total organic C stock in whole soil profile—limited benefit for climate change mitigation
More continuous pores allowing increased rainfall infiltration — beneficial for water availability for crops and climate change adaptation	
Increased crop yields in some situations—probably owing to improved soil conditions and/or water availability	Crop yields decreased or unchanged in some situations, or increases only emerge after several years. Possibly associated with uneven seedling emergence or increased soil density causing inhibited root growth in some environments
Increased soil biological activity-especially if combined with crop residue retention	
Decreased risk of soil erosion—particularly if combined with crop residue retention	
	Nitrous oxide emissions may either increase or decrease—with negative or positive impacts on climate change mitigation
Farm operations	
Labour/time saved through elimination of tillage operations	May need extra labour or use of herbicides for weed control
Earlier sowing of crop often facilitated, leading to possibility of improved growth and yield in some environments	In wet climates delayed planting may occur owing to slower soil drying after rainfall events
Fuel saved through elimination of tillage operations—decreased costs and CO_{2} emissions	
	Suitable machinery for planting may not be available, a particular issue for resource-poor farmers in less developed countries
Long-term increases in crop yields and farm incomes—especially if combined with crop residue retention and crop diversification	May be little or no increase in farm income in the short-term, a major limitation for small-holder farmers in less developed countries

(Powlson et al., 2014)





(© A. Bocar Baldé/CIRAD)



(© A. Bocar Baldé/CIRAD)

Avantages

- Preservation du sol
- Quand on utilise des légumineuses on réduit les besoins en N
- Augmente la biodiversité

Inconvenients

 Pas toujours en efficace en function des conditions locales

- Disponibilité en eau suffisante
- S'insère dans un schema de rotation



Fig. 3. Histogram of annual change of soil carbon due to cover cropping in (Poeplau and Don, 2015)



(Poeplau and Don, 2015)



(Lugato et al., 2018)

Agroforesterie





Agroforesterie

Avantages

- Reduction du lessivage de N
- Augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau
- Autres sources de revenus pour les agriculteurs

Inconvénients

- Réduire le rendement des cultures
- Investissement à long terme
- Coût économique de l'achat de machines adaptées

Agroforesterie



Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique

- Afforestation et reforestation.
- Gestion des terres pour augmenter les stocks de C du sol
- La production de bioenergy avec capture et stockage du C (BECCS).
- Accélaration de l'altération.
- Capture directe et stockage du CO₂ de (DACCS).
- Fertilisation des océans pour augmenter la fixation du CO₂.

Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique



Bastin et al., 2019

Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique

Sous le climat actuelle 4,4.10⁹ha de forêt

peuvent exister

- 1,6.10⁹ha de plus que ce qu'il y a aujourd'hui
- Potentiel d'afforestation à 0,9.10⁹ha
- Stockage de C de l'ordre de 205Gt
- Emission anthropique ~9 Gt C an⁻¹

Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique



Fig. 2. Effects of species conversion in Europe since 1750. Temperature changes are for boundary layer temperature during summer (kelvin). (A) Temperature change due to changes in emissivity ($\Delta T_a, \varepsilon_a$) caused by species conversion, (**B**) changes in albedo ($\Delta \alpha$) due to species conversion, (C) total temperature change (ΔT_a) due to species conversion, and (D) correlation between species-induced and land use-induced temperature change. In (C), black dots denote significant temperature changes at the 0.05 significance level, as determined by a modified paired one-sample t test.



Naudts et al., 2016
Peut on piloter ces rétroactions pour atténuer le changement climatique

- Quand mise en place de politique de gestion de carbone il faut avoir une vision intégrée
- Prendre en compte les effets biophysiques et

les émissions potentiels des autres GHG

MERCI POUR VOTRE ATTENTION