

*Fondation Tuck, Think tank IDées
L'ingénierie climatique: une option envisageable ?
Rueil Malmaison, 22 février 2016*

L'ingénierie climatique: de quoi s'agit-il ?

Solutions techniques, solutions écologiques, risques

Luc Abbadie

Professeur d'Ecologie

Université Pierre & Marie Curie, Paris Sorbonne Universités

IEES, Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris

luc.abbadie@upmc.fr

<http://ieesparis.ufr918.upmc.fr>

Un changement de perspective...



L'ingénierie écologique

- Contraintes légales aux USA: Clean Water Act (1972).
 - Section 404: La compensation sur les zones humides est obligation : restauration, amélioration ou création de zones humides.
 - Banques de compensation: un système de crédits qui peuvent être vendus (dans certains états).
- Un livre : Mitsch W.J. & Jorgensen S.E. 1989. “Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology”. Hoboken, John Wiley & Sons.
- Un journal: “Ecological Engineering: The journal of Ecotechnology” (Elsevier), since 1992.
- Des organisations: International Ecological Engineering Society (depuis 1993); American Ecological Engineering Society (depuis 2001).

L'émergence de la géo-ingénierie

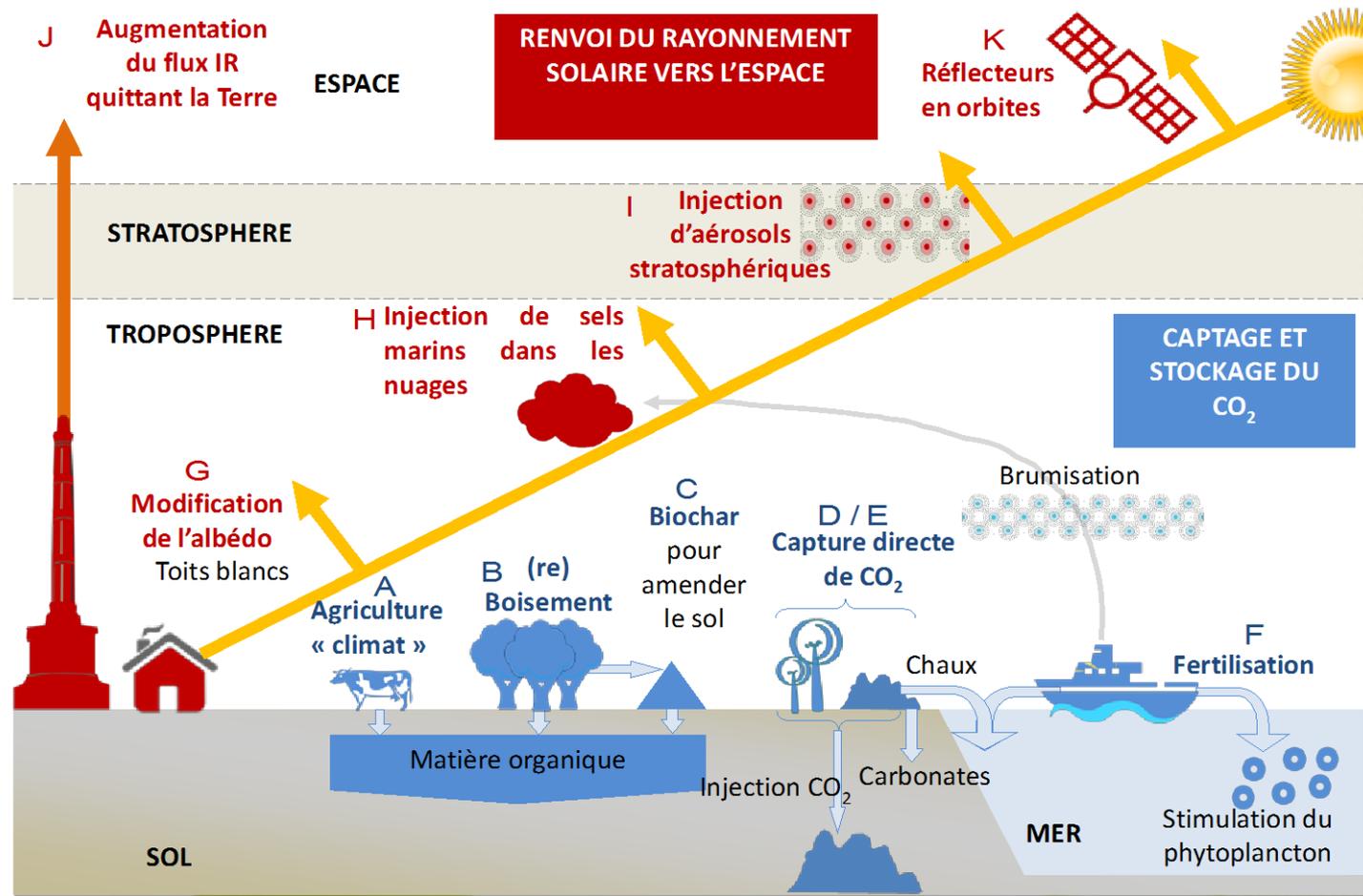
- Préoccupations sur l'avenir du climat dès les années 1950.
- Tentatives de modification du climat dans les années 1950, 1960 et 1970 (contexte de la guerre froide et de la guerre du Vietnam).
- Changement climatique effectif et rapide.
- Difficulté sociale et économique de l'atténuation du changement climatique en amont (cf. COP 21)

Une définition de la géo-ingénierie

« La géo-ingénierie de l'environnement correspond à l'ensemble des techniques et pratiques mises en œuvre ou projetées dans une visée corrective à grande échelle d'effets de la pression anthropique sur l'environnement. Il importe de bien distinguer la géo-ingénierie qui met en jeu des mécanismes ayant un impact global sur le système planétaire terrestre des techniques et pratiques d'atténuation ou ayant simplement un impact local. »

Boucher et al. 2014. Paris, Agence nationale de la recherche

Les approches de la géo-ingénierie



Boucher et al. 2014. Paris, Agence nationale de la recherche



Gestion du rayonnement par aérosols

- Injection de soufre dans la stratosphère (durée de vie de 1 an), si possible sous les tropiques.
- Création d'aérosols d'acide sulfurique qui réfléchissent le rayonnement incident.
- Référence: le Pinatubo en 1991: 20 Mt de dioxyde de soufre, $-0,5^{\circ}\text{C}$ pendant un an.
- Action négative sur la couche d'ozone (tant qu'il y aura des composés halogénés).
- Si l'injection cesse, réchauffement immédiat.
- Pluies acides

Autres approches autour du rayonnement

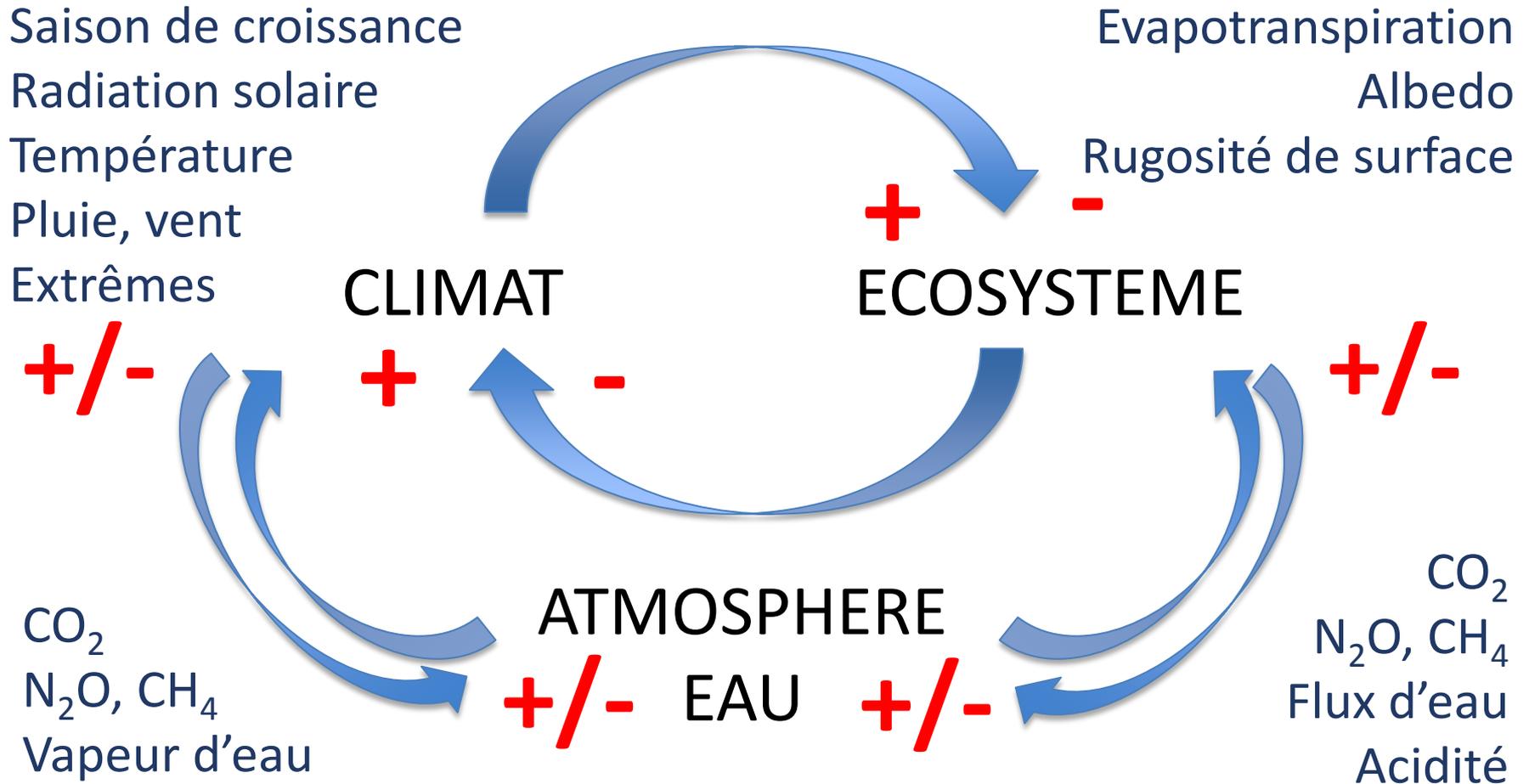
- Réflecteurs orbitaux à 1 500 000 km (stabilité de l'orbite).
- Modification de l'albédo de la planète: envisageable sur terre (déjà élevée en mer et dans les déserts) dans les zones forestières, les zones urbaines. Modifications locales de la circulation atmosphérique possibles.
- Injection d'eau de mer dans la partie basse de l'atmosphère: la brillance des nuages maritimes est augmentée. L'injection doit être permanente.



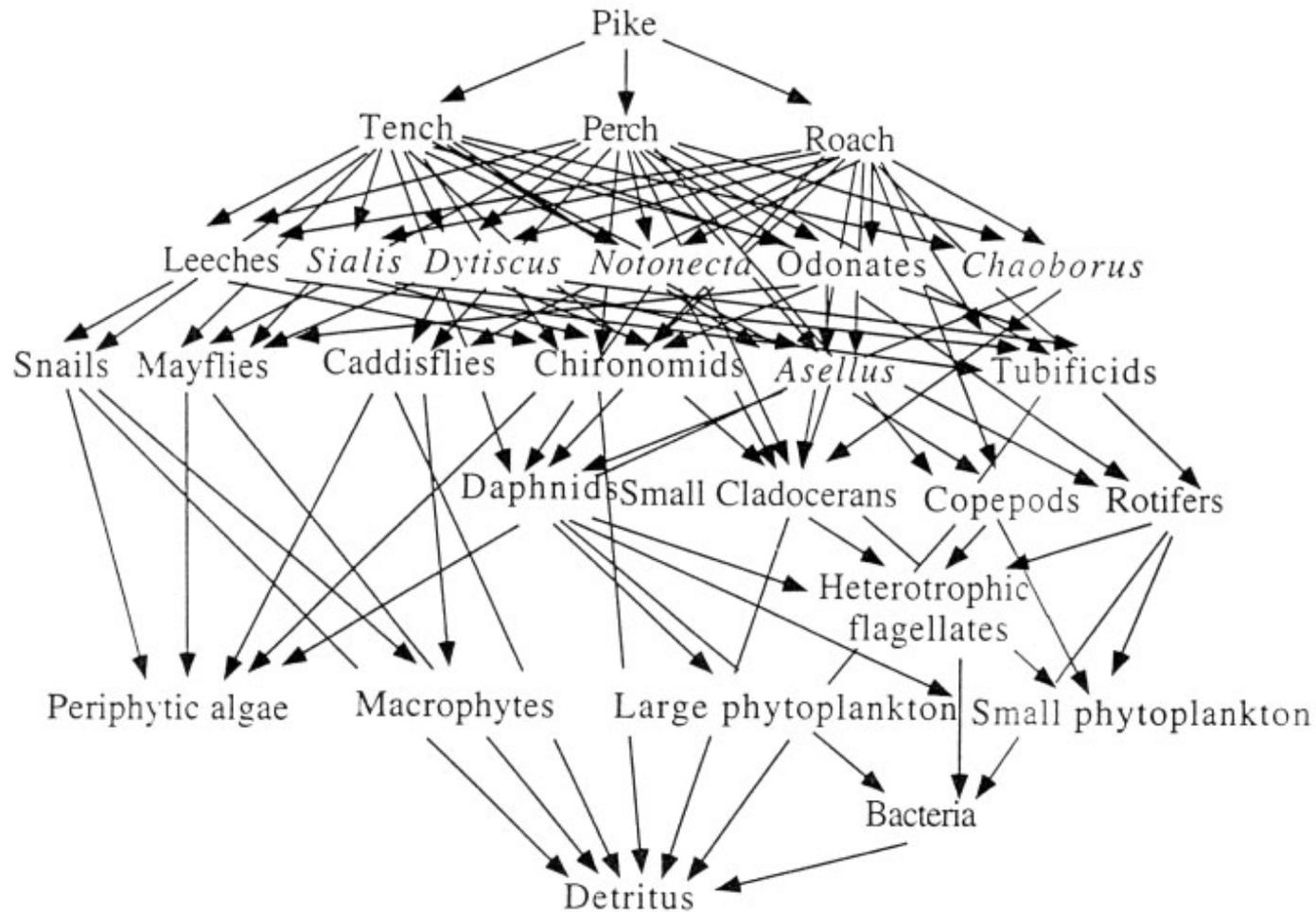
Capture directe du CO₂

- Principe: capture par milieux basiques (formation de carbonates), puis libération de CO₂ avant stockage.
- Stockage dans les couches géologiques profondes.
- Production de bases et d'acides par électrolyse d'eau salée (avec énergie décarbonée).
- Absorption par lagunage de lait de chaux (calcination de roches calcaires par four solaire avec capture à la source du CO₂). Le calcaire formé peut être calciné pour régénérer la chaux.
- Faible empreise au sol.

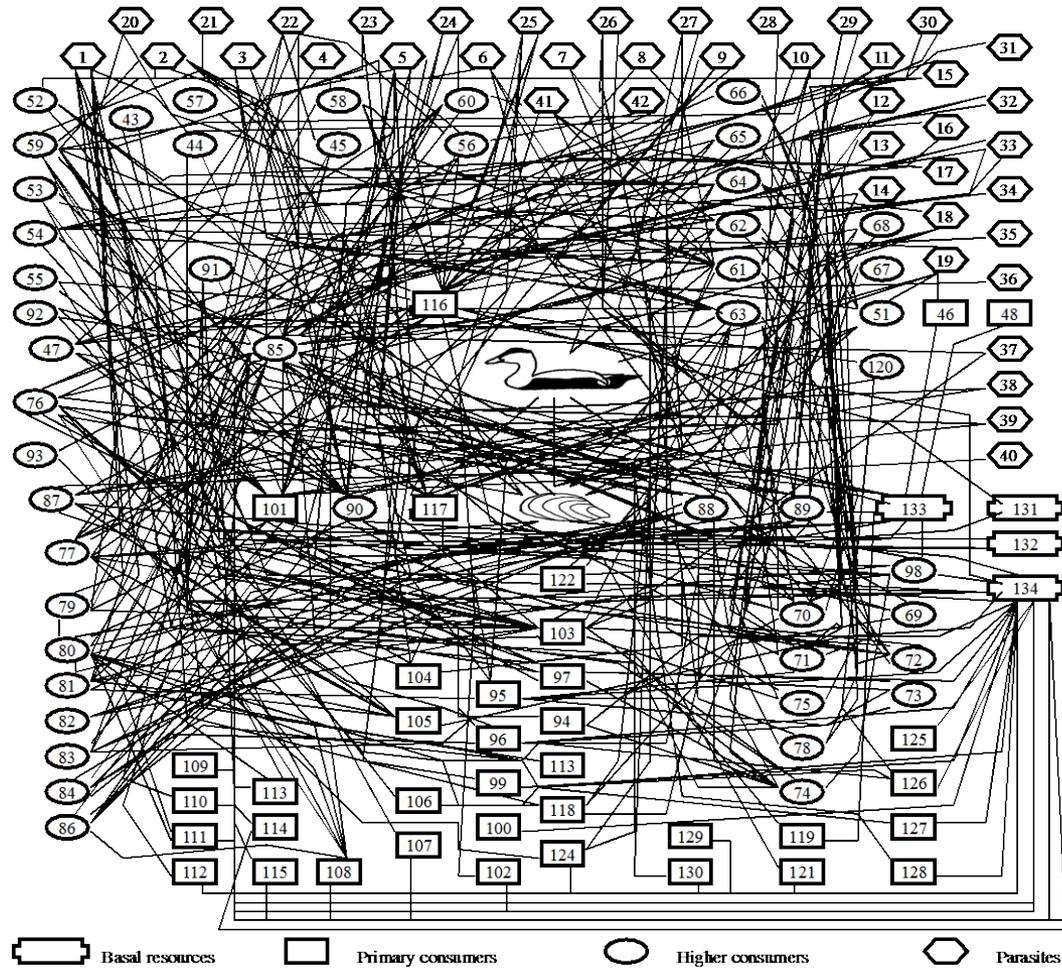
Le système climat-écosystème



Un écosystème, c'est ça...



... ou plutôt ça !!!

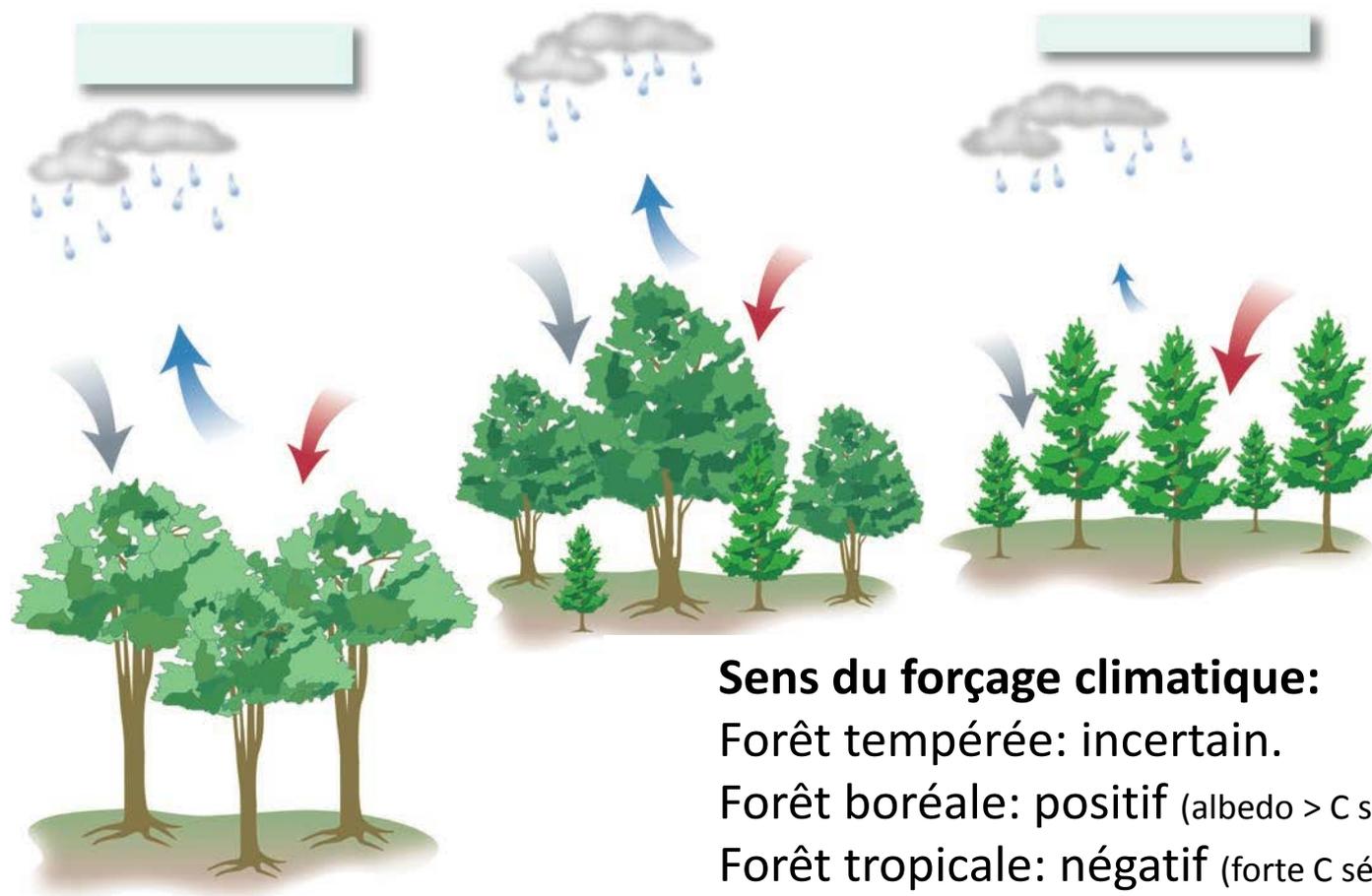




Capture du CO₂ dans la biomasse terrestre

- Si on reforeste tout ce qui a été perdu depuis 1750 (180 GtC): gain de 40-70 ppm de CO₂.
- Il faut prendre en compte l'évapotranspiration et l'albedo.

Climat et forêt



Bonan G.B.
2008. *Science*
320: 1444-1449

Sens du forçage climatique:

Forêt tempérée: incertain.

Forêt boréale: positif (albedo > C séquestration).

Forêt tropicale: négatif (forte C séquestration, refroidissement par évaporation).



Capture du CO₂ dans la biomasse terrestre

- Si on reforeste tout ce qui a été perdu depuis 1750 (180 GtC): gain de 40-70 ppm de CO₂.
- Il faut prendre en compte l'évapotranspiration et l'albedo.
- Récolte régulière, production d'énergie (biocarburants), stockage du CO₂.
- Manque de nutriments fréquent.
- Compétition avec les zones agricoles.
- Effets négatifs du réchauffement ?

Croissance radiale des troncs, Costa Rica

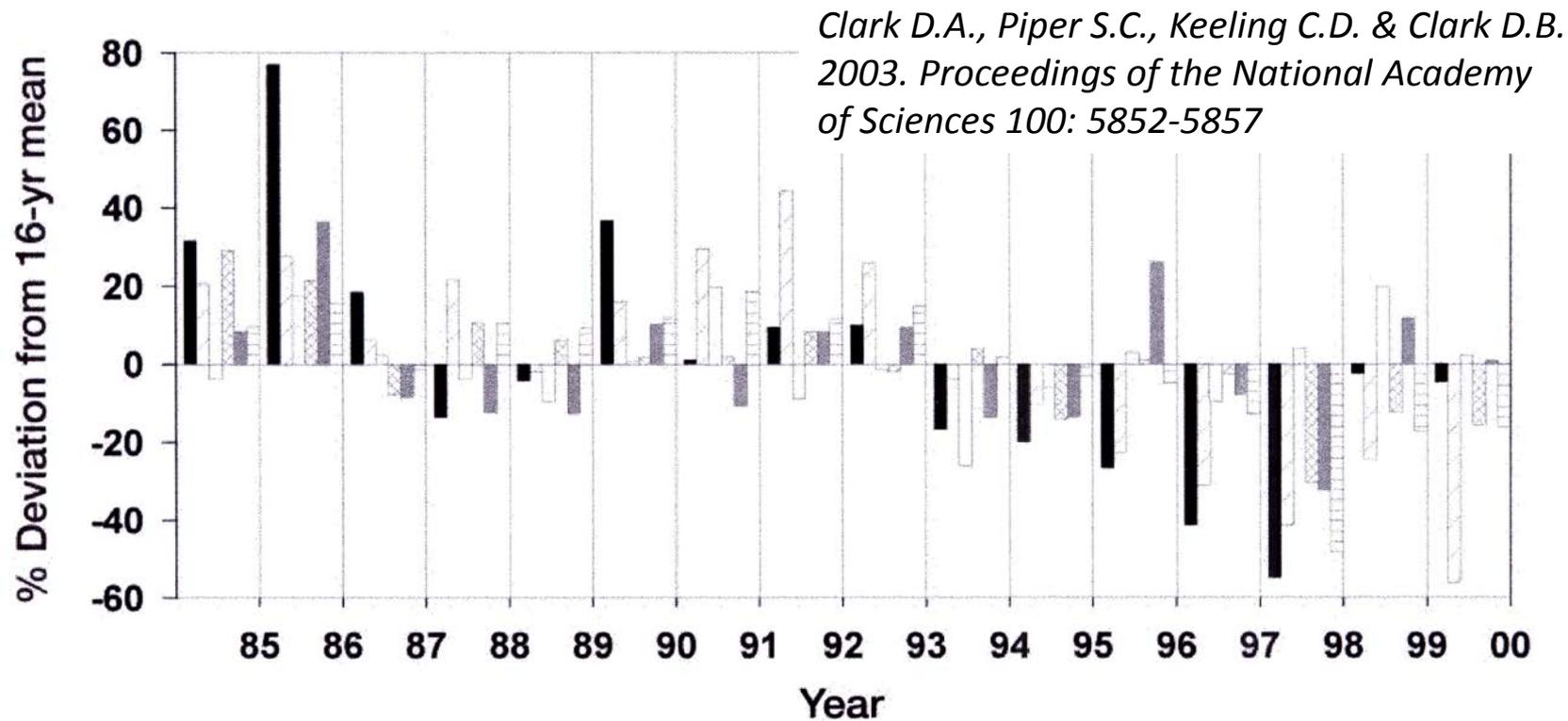
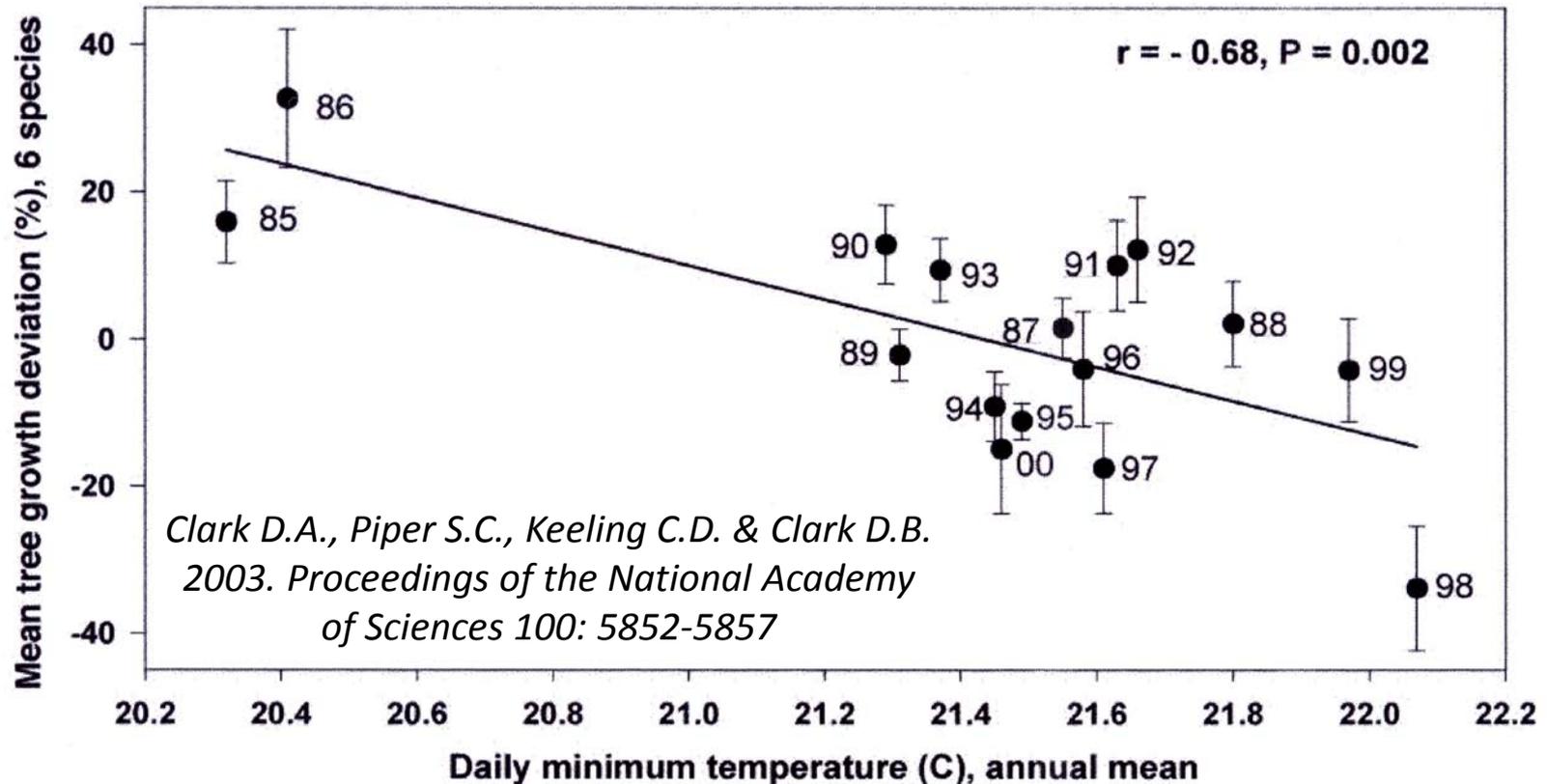
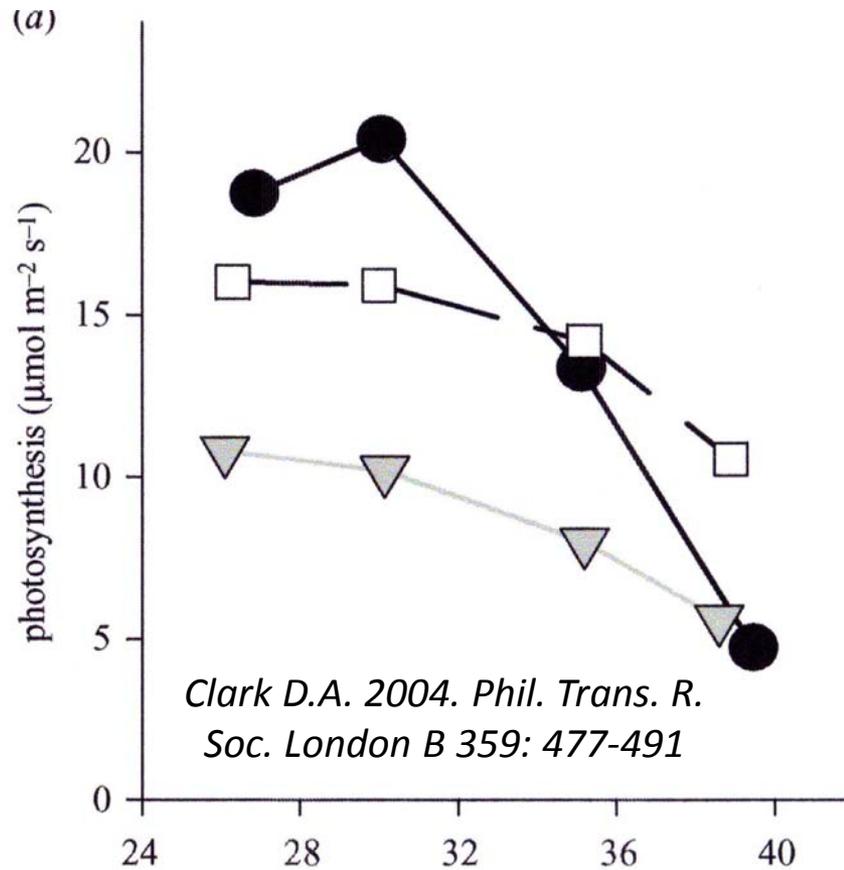


Fig. 1. Interannual variation in tree growth in old-growth lowland rain forest at La Selva, Costa Rica. Bars show the annual mean growth deviations of adult trees of six canopy species (left to right in each year: Mg, La, Dp, Ha, Be, and Hm; see Table 1 for species names and sample sizes); growth deviations are calculated as the percent departure of the species' mean annual diameter increment, from that species' 16-yr mean annual increment. x axis: yr 2 of measurement years.

Croissance radiale des troncs, Costa Rica

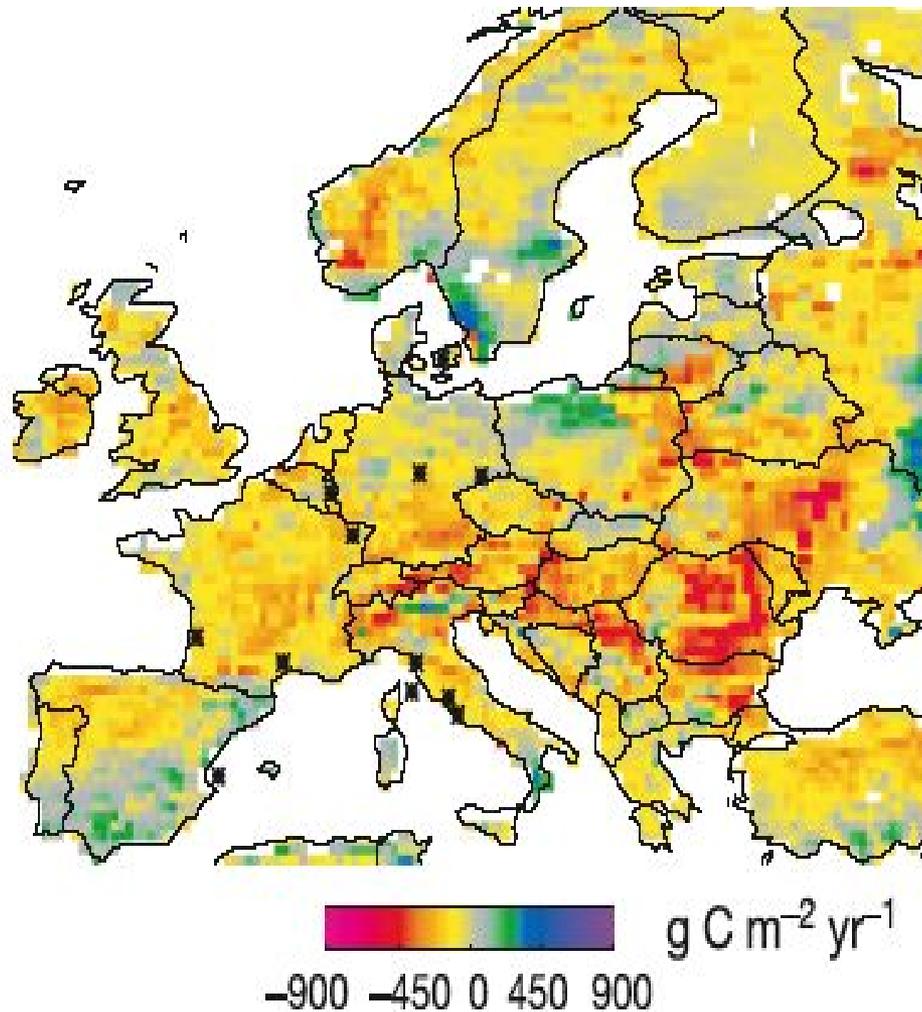


Photosynthèse, Costa Rica



<https://www.flickr.com/photos/withaghost/1430343473>

Effet des extrêmes climatiques



2003: la température moyenne de juillet est de 6°C plus élevée que la normale et le déficit annuel de précipitation de 300 mm environ

La production primaire brute en Europe a diminué de 30 %, ce qui correspond à une réduction de séquestration du carbone de 0.5 Pg C, soit l'annulation de quatre années de fonction puits de carbone des écosystèmes européens.

Ciais P. et al. 2005. Nature 437: 529-523

Augmentation du carbone dans les sols

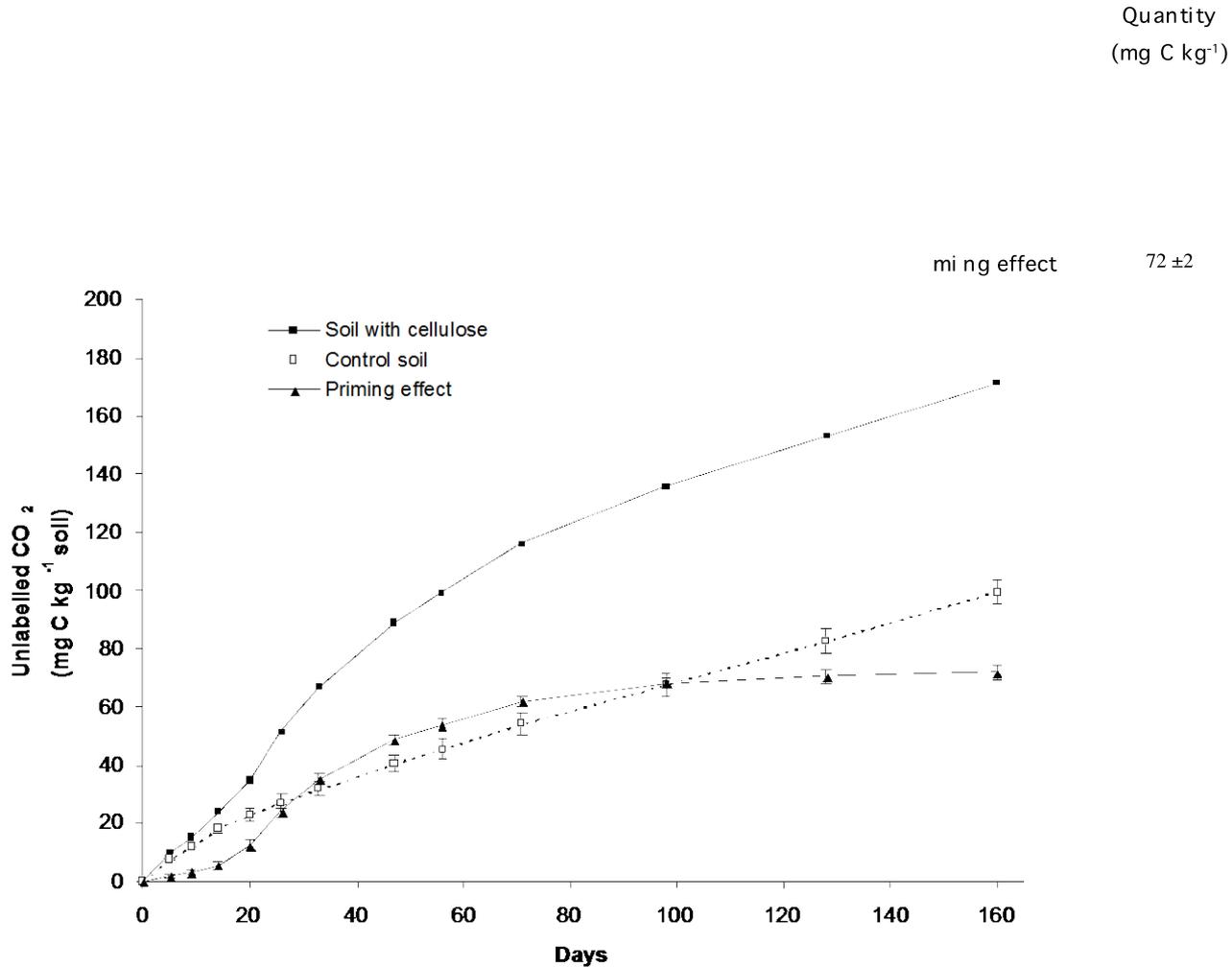
- Ce qui a été perdu par les sols agricoles depuis 1750: 70 GtC.
- Durée potentielle du stockage du carbone organique. Durée accrue en profondeur.

Radiocarbon age of organic C of size fractions from native and cultivated (60 years) soils

Soil	Fraction	Age (years)
Native, Ah horizon	Whole soil	385 ± 110
	Coarse silt	345 ± 115
	Fine silt	440 ± 115
	Coarse clay	530 ± 115
	Fine clay	400 ± 115
Cultivated, Ap horizon	Whole soil	1100 ± 145
	Coarse silt	385 ± 100
	Fine silt	900 ± 120
	Coarse clay	905 ± 120
	Fine clay	965 ± 145

After Anderson D.W. 1995 in: Lal R. et al. (Eds) 1995. Soils and Global Change. Advances in Soil Science, Boca Raton, CRC Press

Priming Effect can allow the degradation of very old and stable soil organic matter

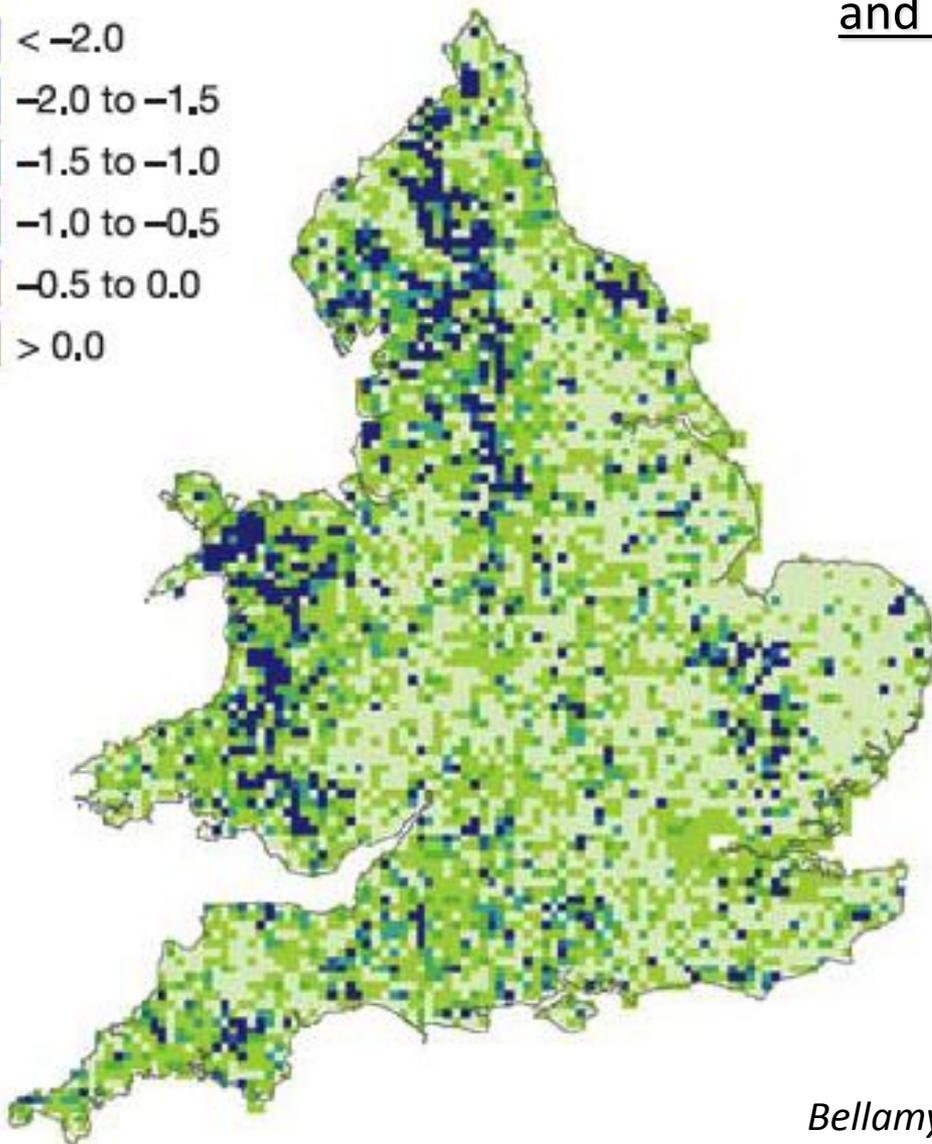
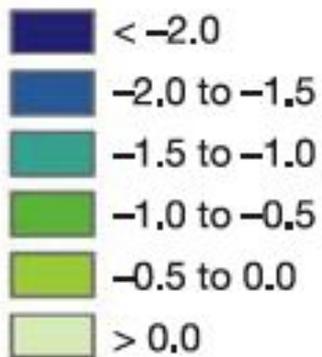


Fontaine et al. 2007.
Nature 450: 277-281

Augmentation du carbone dans les sols

- Ce qui a été perdu par les sols agricoles depuis 1750: 70 GtC.
- Durée potentielle du stockage du carbone organique. Durée accrue en profondeur
- Quelle biodiversité ? Quel niveau de saturation des sols ?
- Effets du réchauffement climatique ?

b Rate of change ($\text{g kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)



Carbon loss from all soils across England and Wales from 1978 to 2003

Mean rate of soil carbon loss (if linear): $0.6 \% \text{ yr}^{-1}$!!!

Augmentation du carbone dans les sols

- Ce qui a été perdu par les sols agricoles depuis 1750: 70 GtC.
- Durée potentielle du stockage du carbone organique. Durée accrue en profondeur
- Quelle biodiversité ? Quel niveau de saturation des sols ?
- Effets du réchauffement climatique ?
- Importance des réseaux trophiques.

Climat et réseau trophique



Graminées
annuelles, peu
de racines
(1 t/ha)



Graminées
pérennes,
beaucoup de
racines (8 t/ha)



Climat et réseau trophique



Institute of Ecology and Environmental Sciences - Paris

Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris

Climat et réseau trophique



Institute of Ecology and Environmental Sciences - Paris

Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris

Climat et réseau trophique



Mitigation et réseau trophique

Intensité du pâturage:

Elevée

Faible



	Graminées annuelles	Graminées pérennes
Production primaire aérienne (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	1 - 4	4 - 10
Production primaire souterraine (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	0.5 - 1.5	5.0 - 12
Teneur en carbone organique(%)	ca. 0.3	ca. 0.5
Azote minéral dominant	Nitrate	Ammonium
Rétention de l'azote dans l'écosystème	Low	High
Lessivage du nitrate	High	Low
Dénitrification	High	Low
Emissions de NO & N ₂ O	High	Low

Agriculture vs. pastoralisme



<http://decouvertesolidarite.free.fr>

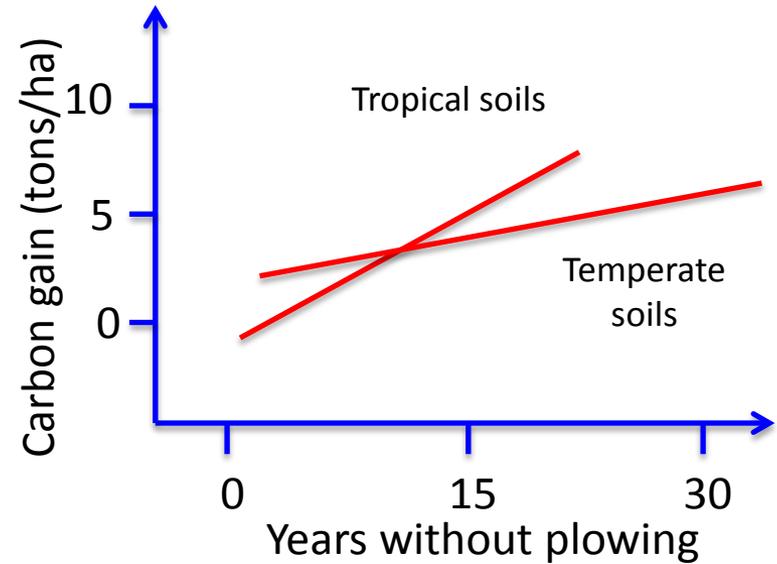


<http://googolfarmer.info>

Augmentation du carbone dans les sols

- Un enjeu majeur: l'agriculture

THE SIMPLE CHANGE OF PRACTICES AS SOURCE OF INNOVATION



After Six J. et al. 2002. *Agronomie* 22: 755-775

“No till” agriculture allows to accumulate carbon (atmospheric CO₂) in temperate and tropical soils and helps to mitigate climate change.

Augmentation du carbone dans les sols

- Un enjeu majeur: l'agriculture
- Biochar: après pyrolyse de biomasse. Potentiel de 1,8 GtC/an. Temps de résidence: moins de 100 ans ?
- Impact sur le fonctionnement du sol (stimulation de l'activité de dégradation de l'humus ?).

Capture du CO₂ par le phytoplancton océanique

- Principe: capture par photosynthèse, puis sédimentation.
- Stockage sur des centaines et des millions d'années.
- Nécessité de fertilisation par le fer.
- Quelle part sédimente réellement ?
- Effets collatéraux: changement de biodiversité (microalgues toxiques), consommation accrue d'oxygène, effet puits d'azote et de phosphore, effets en cascade sur le réseau alimentaire, émission accrue de N₂O

Autres approches autour des gaz

- Photocatalyse du méthane: possibilité sur les concentrations atmosphériques non démontrée.
- Surfaces recouvertes de peinture photocatalysante, ou vitres photocatalysantes.
- Cheminées solaires avec catalyseurs qui transforment le méthane en CO₂.



Conclusion

- Effet retard, effet rebond.
- Solutions techniques:
 - Beaucoup d'incertitudes sur la faisabilité technique.
 - Coûts financiers largement inconnus.
 - Bilan énergétique et environnemental complet à établir.
 - Effets collatéraux possibles.
- Solutions écologiques:
 - Complexité de l'écosystèmes, rétroactions difficiles à prévoir.
 - Impacts potentiellement rapides.
 - Efficacité et durabilité encore incertaines.
 - Effets quantitativement limités, mais possibilité de situations sans regrets.
- Qui paye, tire des bénéfices, subit les conséquences ?

*Merci pour votre
attention!*

Le cycle planétaire du carbone

