

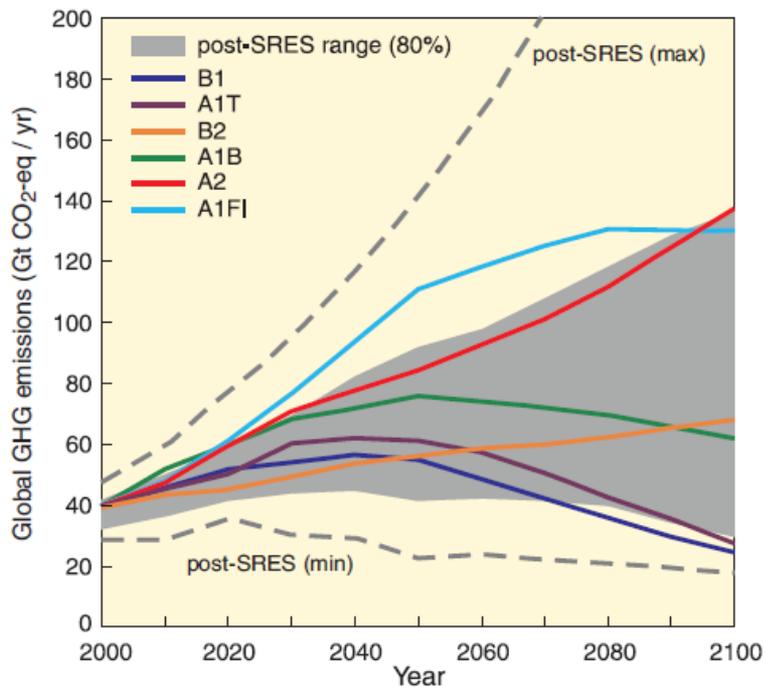
Sols forestiers et changements climatique et atmosphérique

Bruno FERRY, Antonio BISPO, Thomas EGLIN,
Claire CHENU, Etienne DAMBRINE

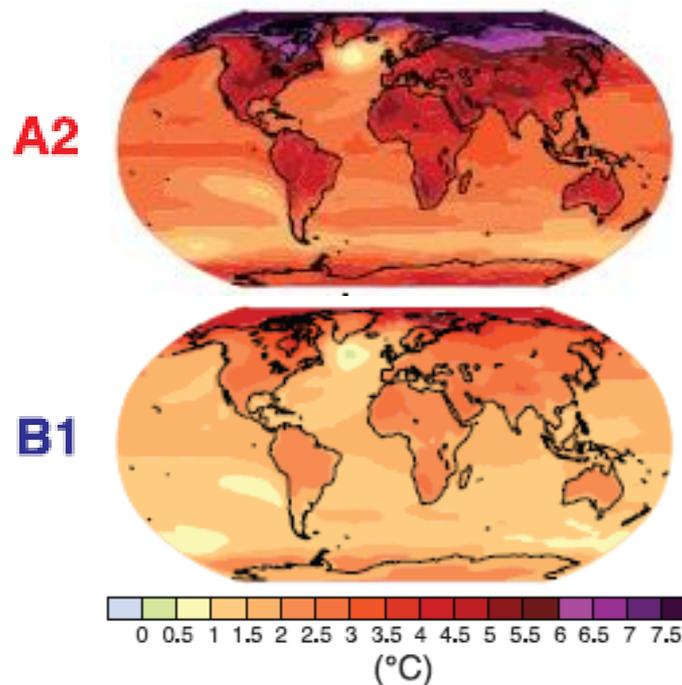


Changement climatique

Emission de GES

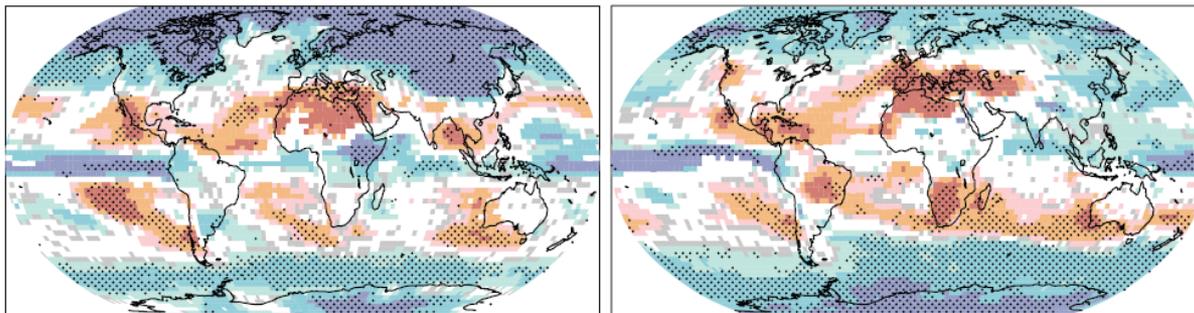


Réchauffement (100 ans)



ΔPrécipitations (100 ans)

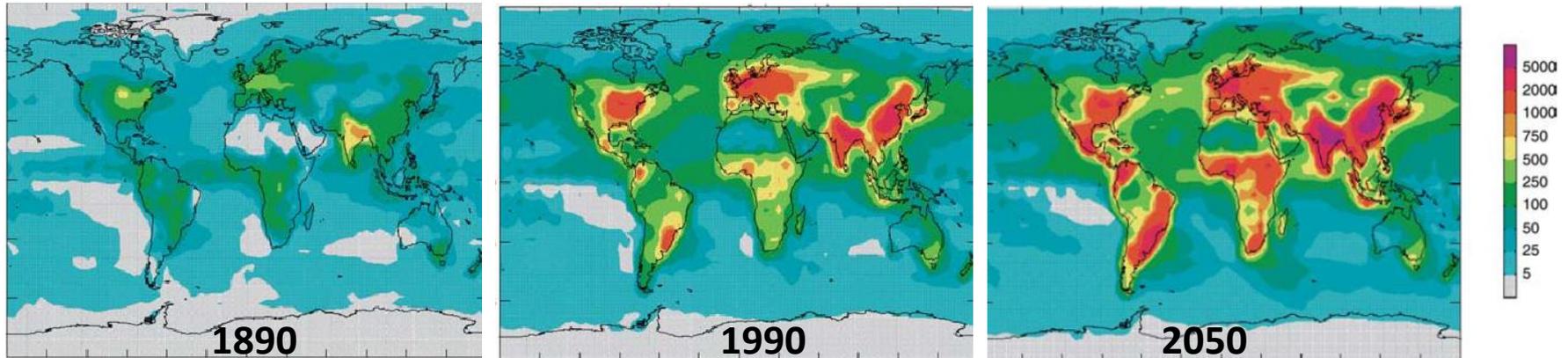
A1B



IPCC (2007)

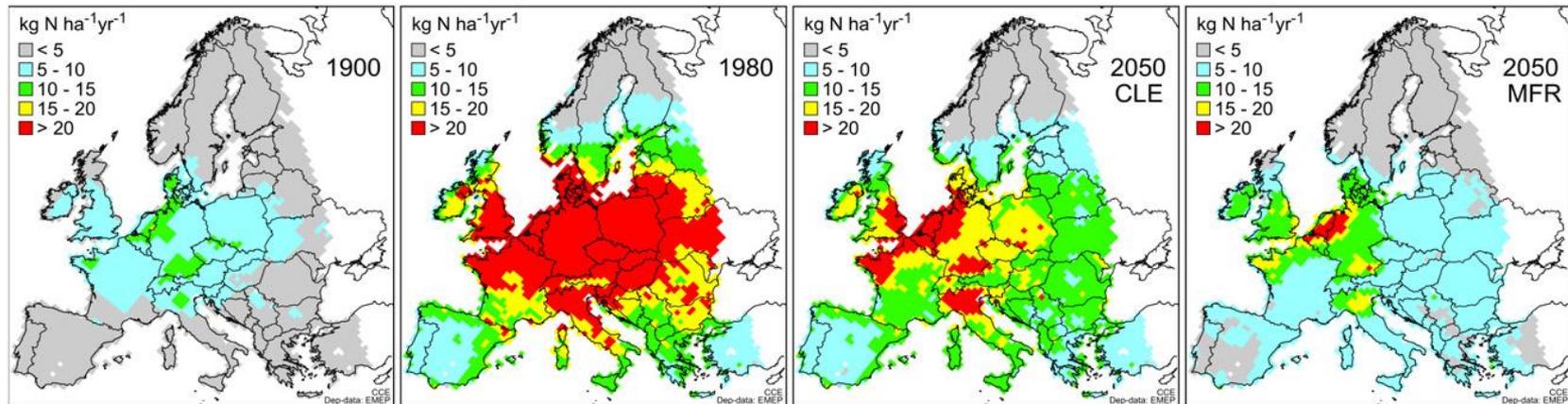
Dépôts azotés

Forte augmentation en Asie, Afrique et Amérique du sud



Galloway *et al.*, *Biogeochemistry* (2004)

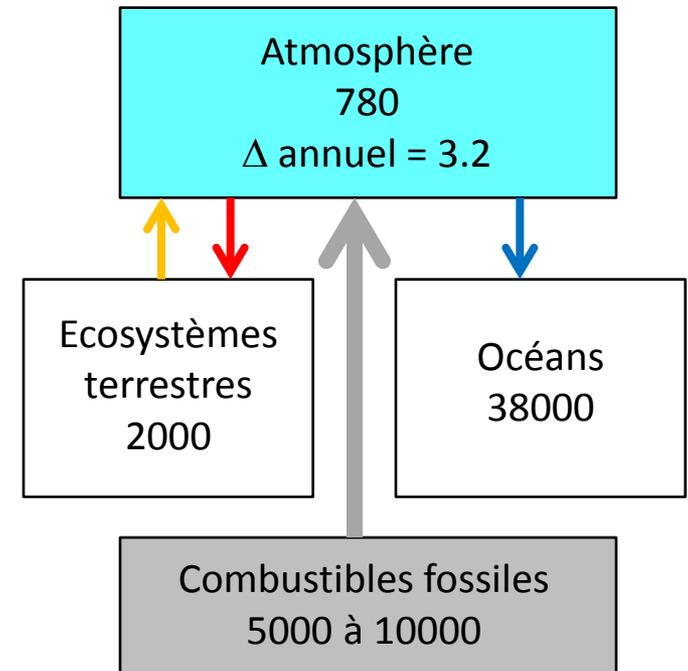
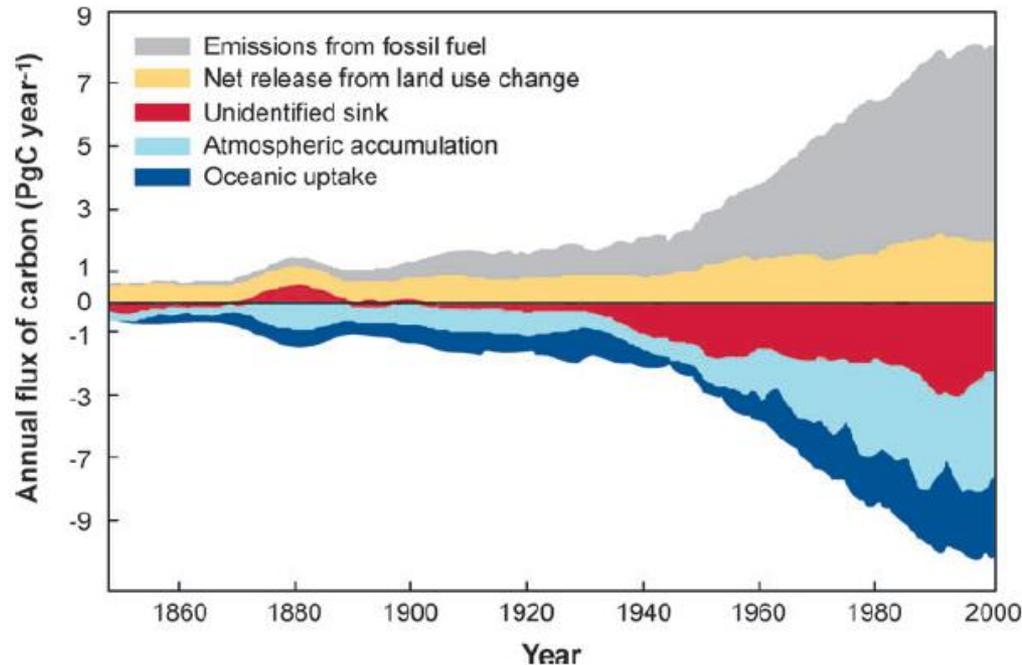
Régression en Europe et Amérique du nord



De Vries et Posch, *Environmental Pollution* (2011)

Un puits de carbone caché

Bilan global du carbone atmosphérique



Houghton *et al.*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (2007)

→ puits non identifié dans les écosystèmes terrestres

Biomasse et/ou MO du sol ?

Comment va-t-il évoluer?



Stockage de carbone dans les sols forestiers : quels effets des changements climatique et atmosphérique, passés et à venir ?

**Quelques résultats récents, ou plus anciens...
et beaucoup de questions**

**Aperçu de quelques dispositifs forestiers mis en place
pour répondre aux questions du changement climatique**

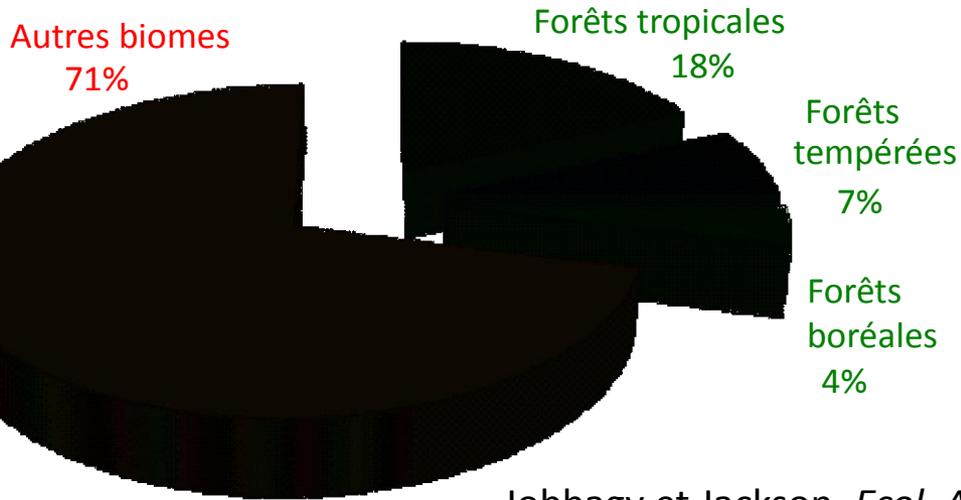
Les apports des modèles couplés climat - cycle du C

~~Changements de régime hydrique~~

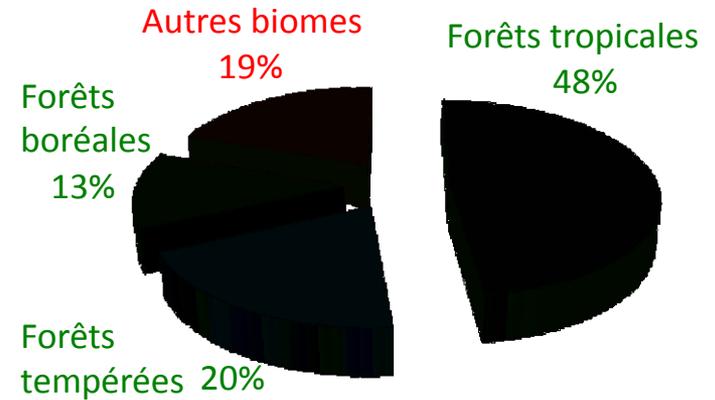
~~Impact de la gestion forestière~~

Stocks de carbone par biomes

Stocks de carbone dans le sol (0-3m)

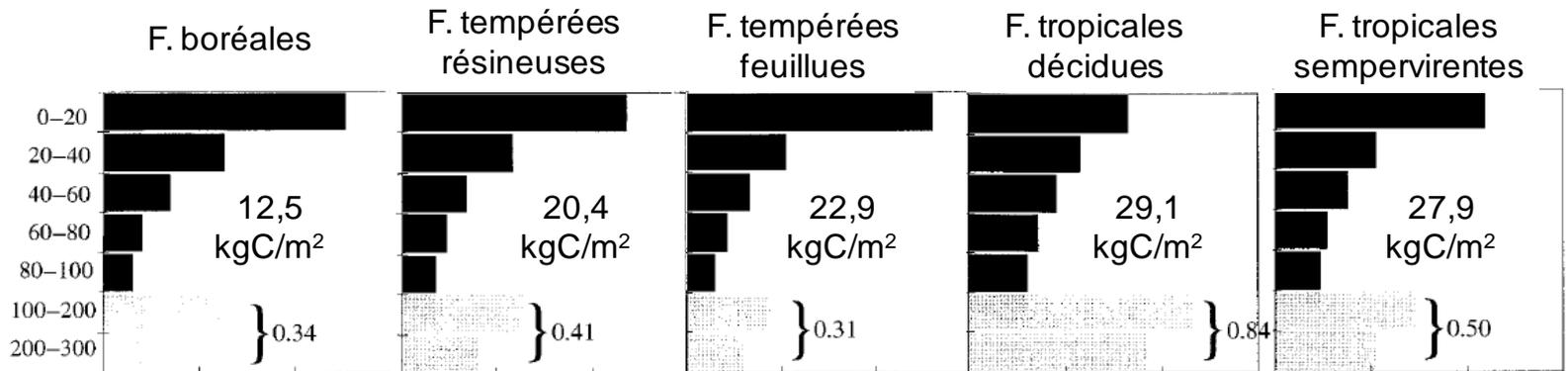


Stocks de carbone dans la végétation



Jobbagy et Jackson, *Ecol. Appl.* (2000) Eglin et al., *Tellus Ser.B*(2010)

Profils du carbone du sol avec la profondeur

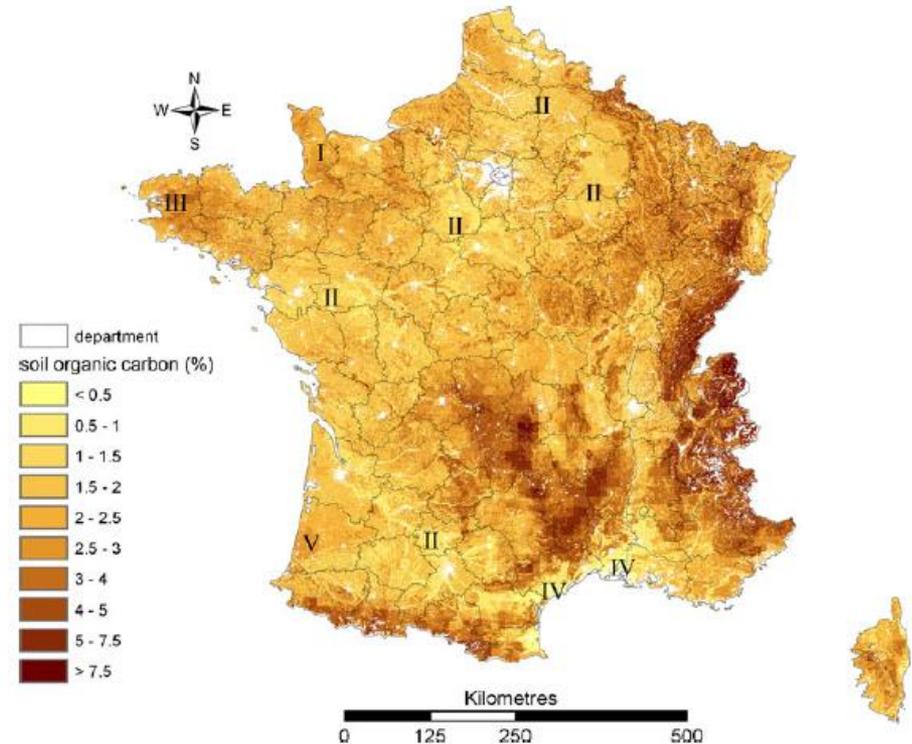


Stock C (0-1m) corrélé à (1) pluviosité, (2) froid, (3) texture fine

Stocks de carbone / climat

3 facteurs environnementaux corrélés positivement au C des horizons supérieurs du sol sous forêt, à l'échelle mondiale comme à l'échelle française :

- 1) texture fine
- 2) **froid**
- 3) **humidité**

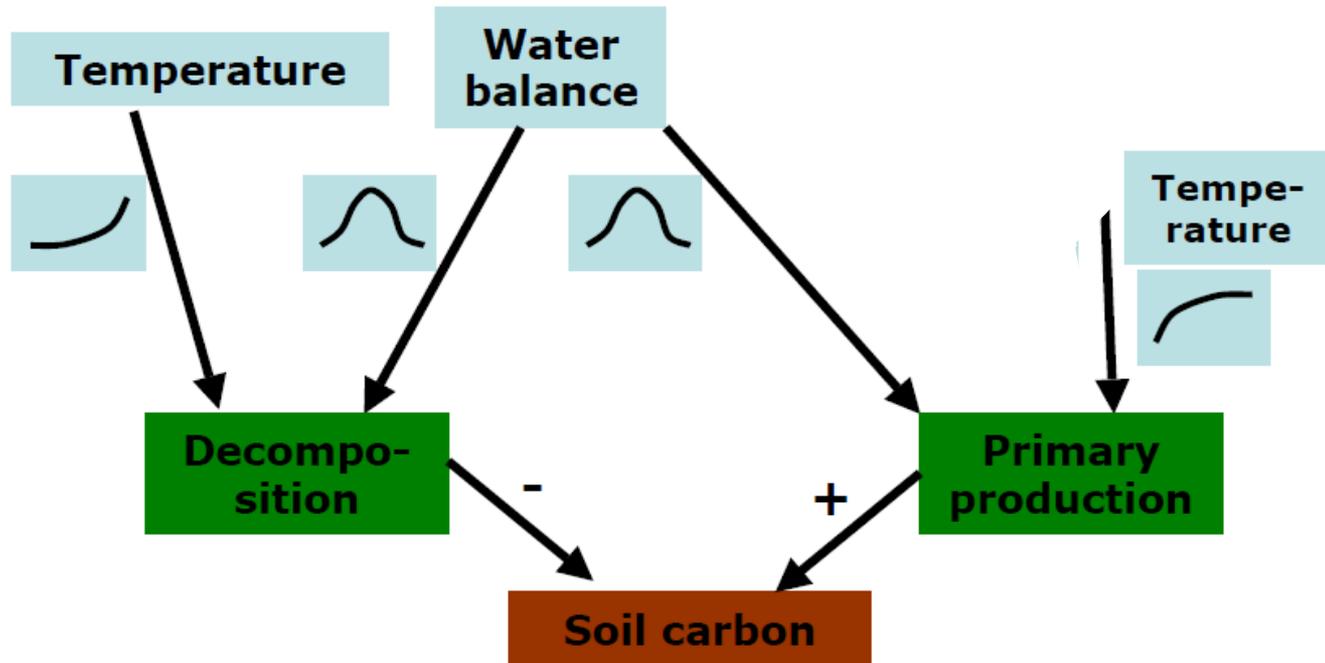


Distribution spatiale en France des teneurs en carbone du sol (0-30cm)

Meersmans *et al.*, *Agron. Sustain.* (2012)

Effets des facteurs du changement climatique

Effets bien connus au 1^{er} ordre de la température et l'humidité sur les flux de carbone entrants et sortants du sol :



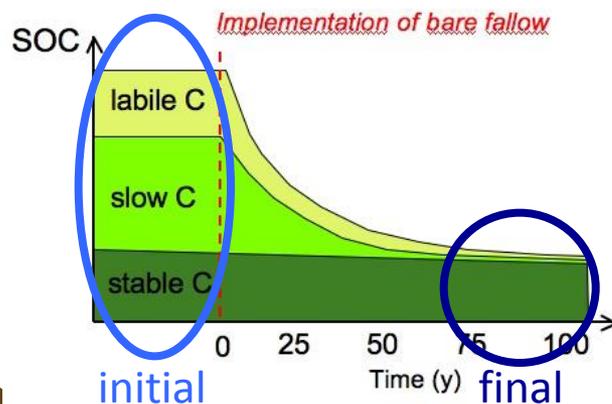
Ciais (2010)

Stabilité des MO / réchauffement

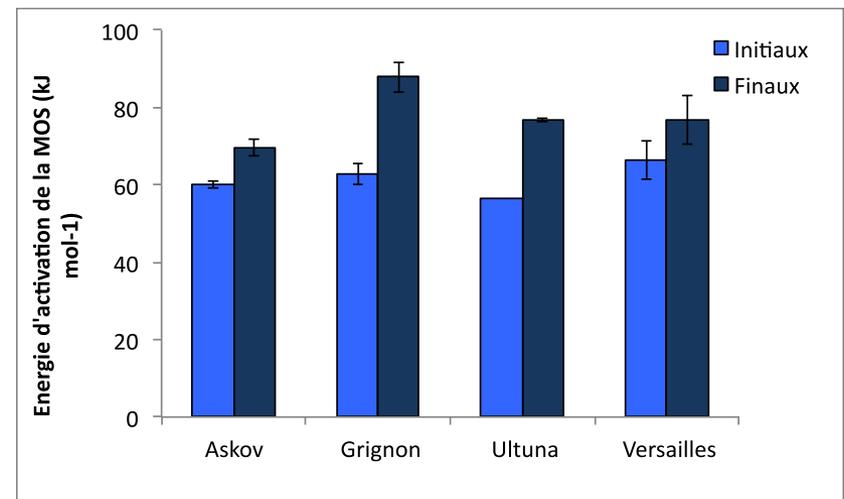
Sensibilité à la température de la décomposition des MO:
les ≠ MO ont t'elles toutes la même sensibilité ?

Une question très débattue (Fang et al., Nature, 2005 ; Conant et al., Ecology, 2008 ;
Haddix et al. 2011 etc.)

Une nouvelle approche pour isoler le carbone stable des sols :
utiliser des jachères nues de longue durée



Romain Lefevre *et al.* en cours



Les MO stables sont plus sensibles à la température que les MO labiles

Décomposition / humidité du sol

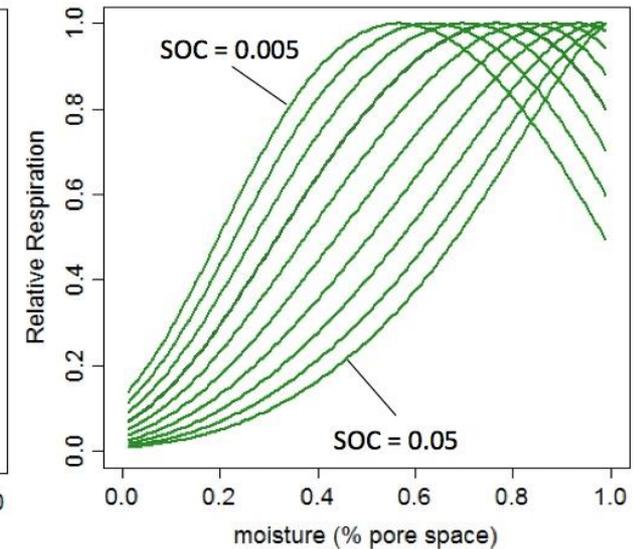
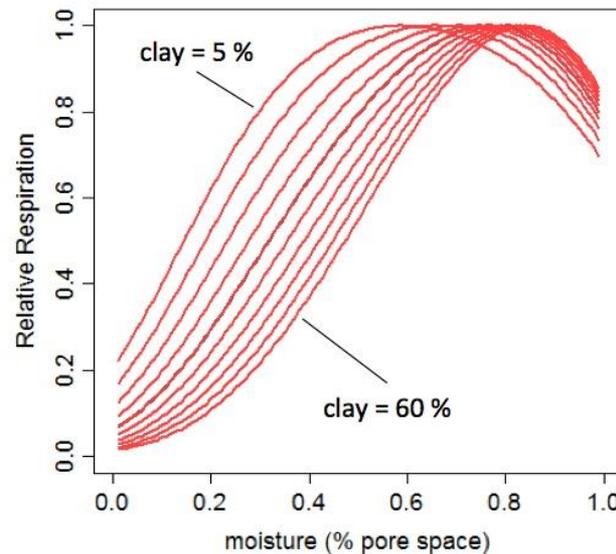
Un effet général connu depuis longtemps...

- Quel impact du type de sol ?

Méta-analyse respiration
du sol = $f(\text{humidité})$

-> nouvelles lois d'action

Moyano *et al.*, *Biogeosciences*
(2012)



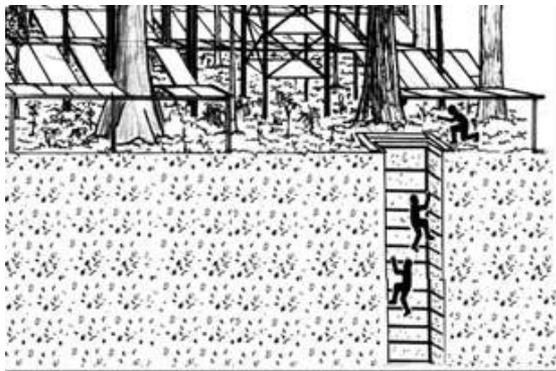
- Quelle interaction de l'humidité avec la température ?
- Quel impact des évènements extrêmes ?

Effets des sècheresses

Dispositif d'interception de 60% des pluies en forêt amazonienne (Tapajos, Brésil)

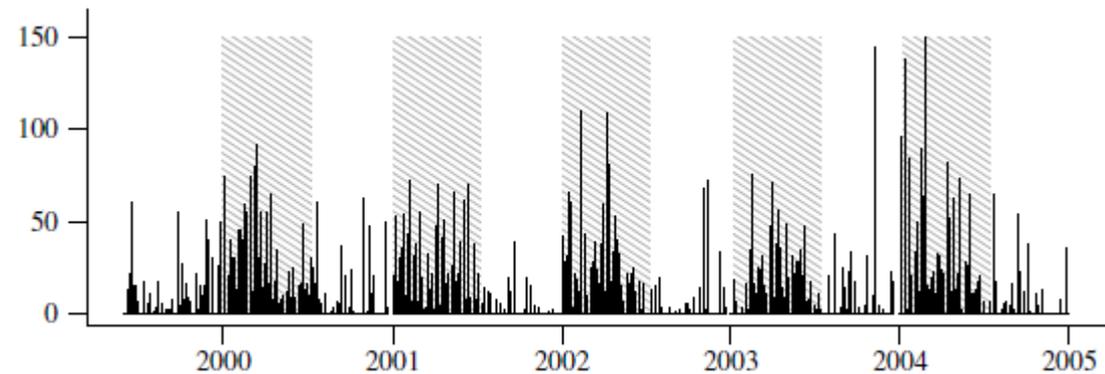


Nepstad *et al.*, *J. Geophys. Res. Atmosph.* (2002)

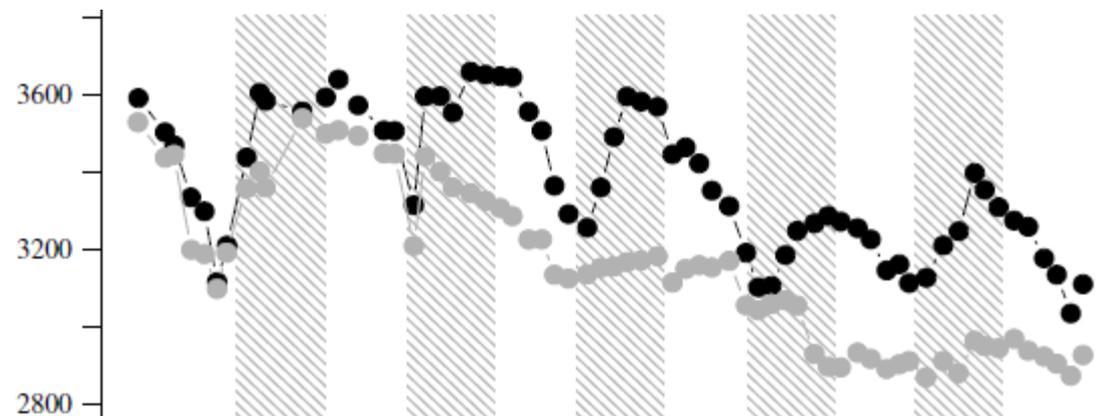


Brando *et al.*, *Philos. Trans. R. Soc. B* (2008)

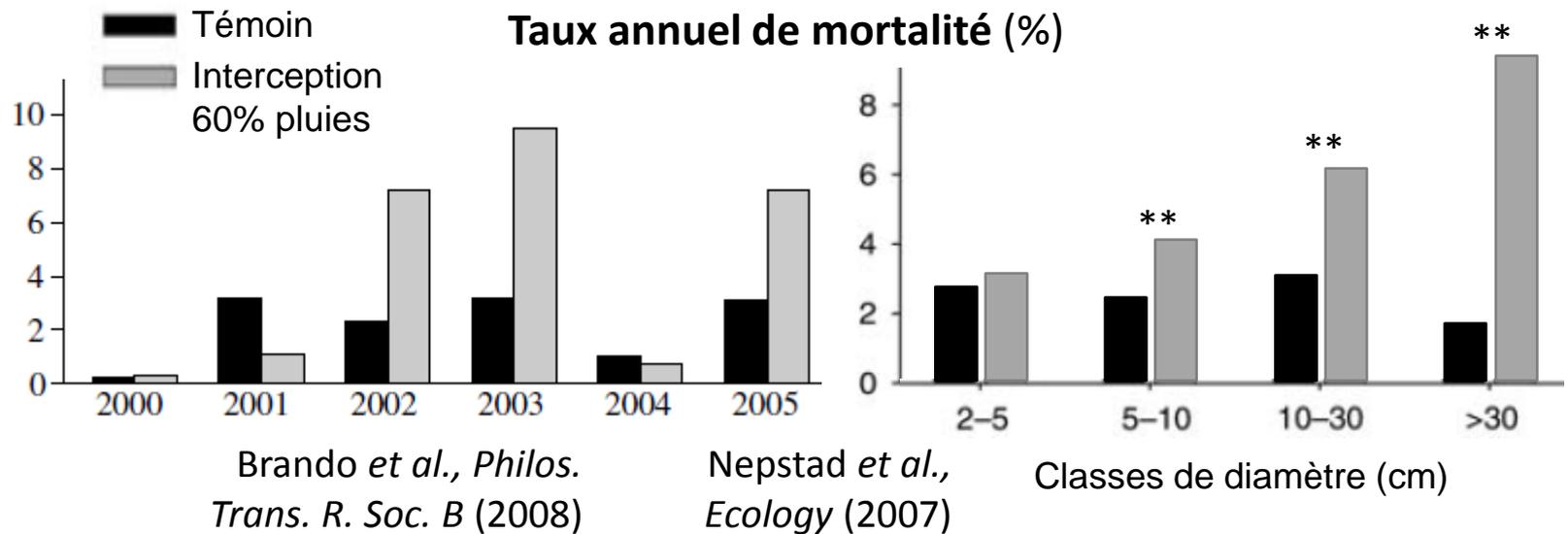
Pluviosité mensuelle (mm)



Réserve en eau entre 2 et 11 m (mm)



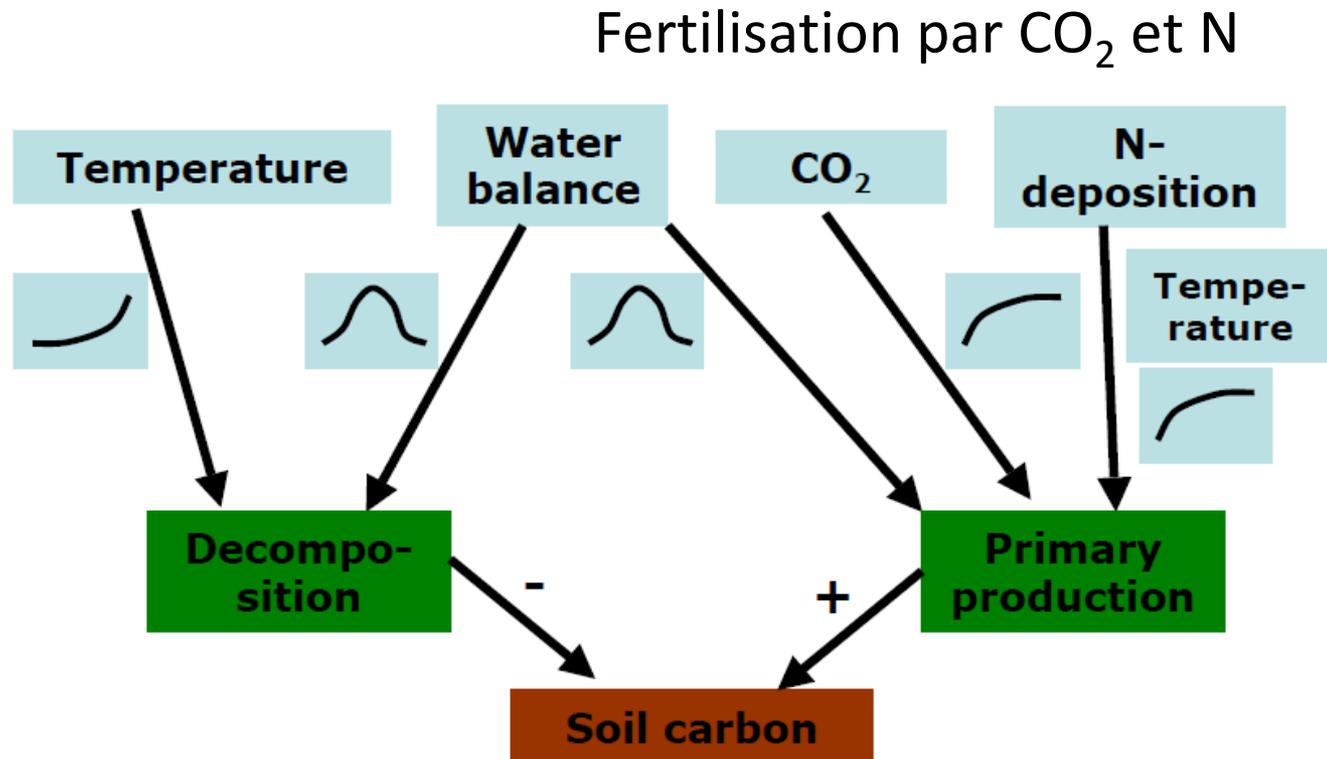
Effets des sècheresses



Forte augmentation de la **mortalité des gros arbre**, similaire à celle observée les années de forte sècheresse naturelle.

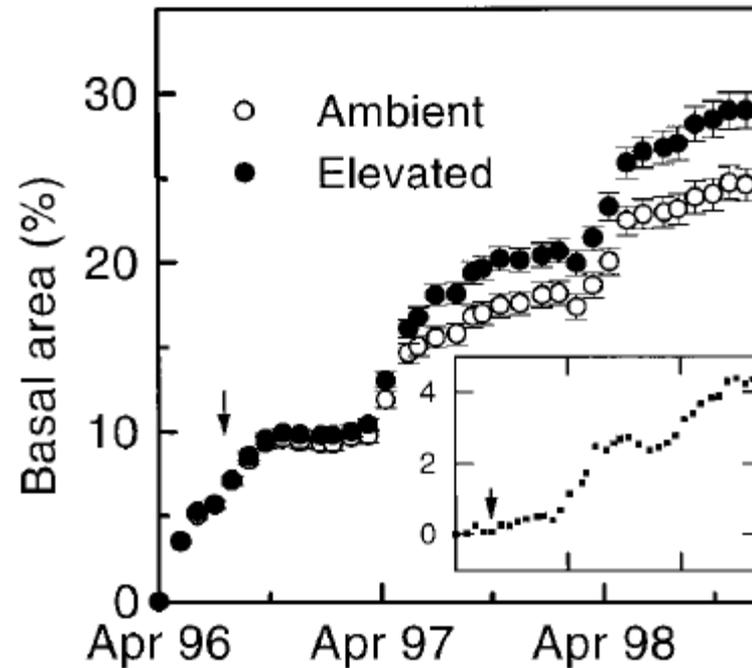
Sècheresse naturelle de 1997 suivie de nombreux incendies en Indonésie → combustion des horizons supérieurs de sols tourbeux et de la végétation ~ 13-40% des émissions annuelles mondiales par combustion d'énergies fossiles.

Effets des facteurs du changement climatique et atmosphérique



Effets de l'enrichissement en CO₂

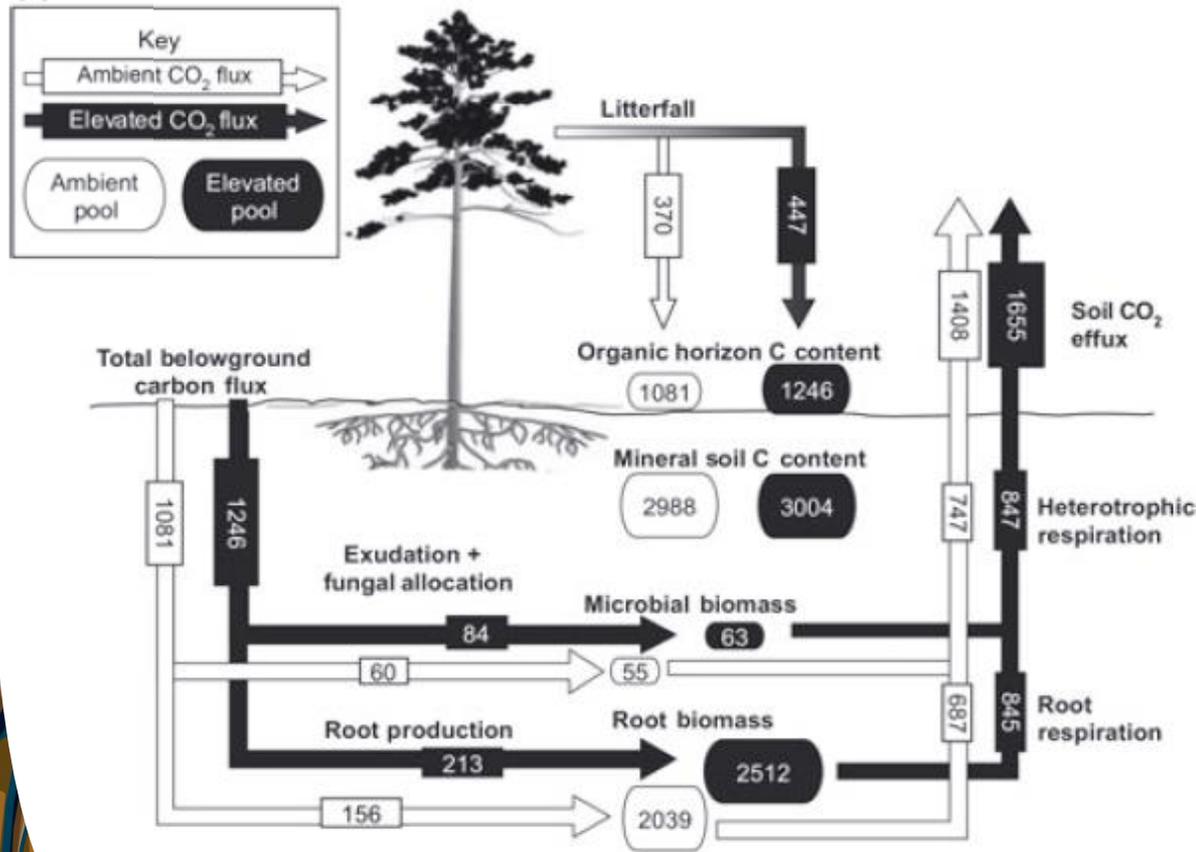
Augmentation in situ de la teneur CO₂ (+ 200 ppm)
pendant 2 ans dans une forêt de pin (dispositif FACE)
→ production primaire nette : + 25%



DeLucia *et al.*, *Science* (1999)

Effets de l'enrichissement en CO₂

Processus et flux modifiés par l'enrichissement en CO₂ :

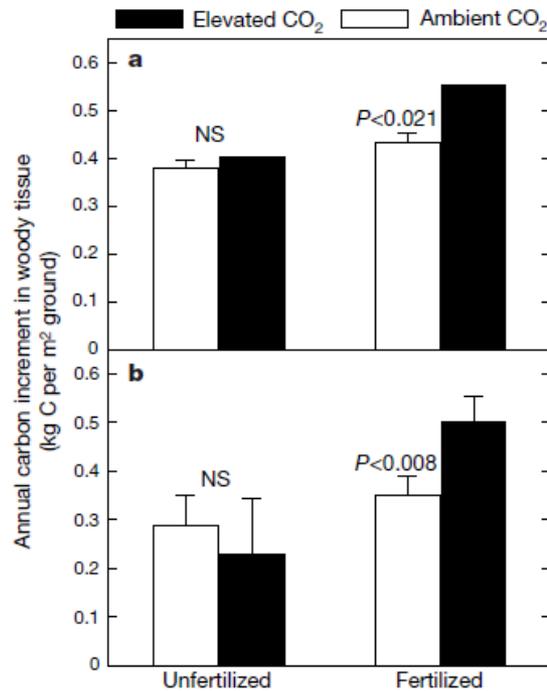


Flux de carbone dans le sol avec ou sans enrichissement en CO₂

- Augmentations de
- Efficacité photosynthèse
- Retombées litière
- Allocation racinaire
- Activité microbienne dans le sol
- Minéralisation de N
- Prélèvement de N par les arbres

→ stockage de carbone dans la biomasse et la litière, peu dans le sol

Interaction CO₂ - N



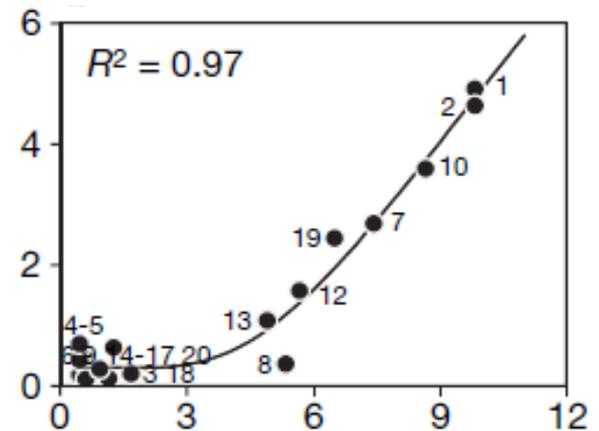
Oren *et al.*, *Nature* (2001)

Effets de l'enrichissement en CO₂ et d'une fertilisation azotée sur la production forestière, dans une station (a) moyennement fertile, (b) pauvre

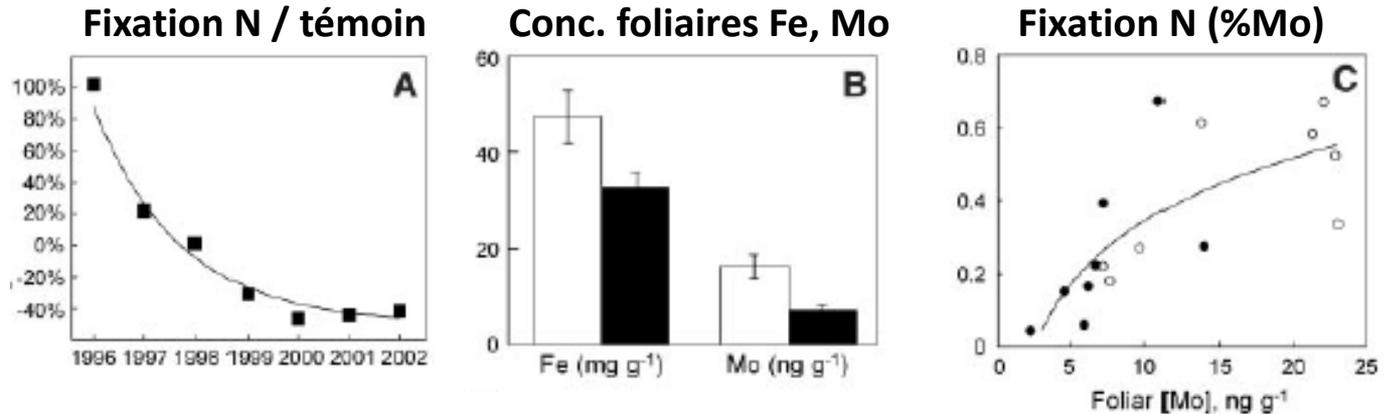
Magnani *et al.*, *Nature* (2007) : dépôts N = principal responsable du puits de carbone dans les forêts tempérées et boréales, parmi les effets du CC → controverse...

L'enrichissement en CO₂ n'a d'effet positif significatif sur l'accroissement ligneux que si le sol est suffisamment fertile (azote, bases échangeables)

Production nette de l'écosystème / dépôts humides de N



Interaction CO₂ - fixation N



Effets d'un enrichissement en CO₂ sur la fixation d'azote par une liane légumineuse

Hungate *et al.*, *Science* (2004)

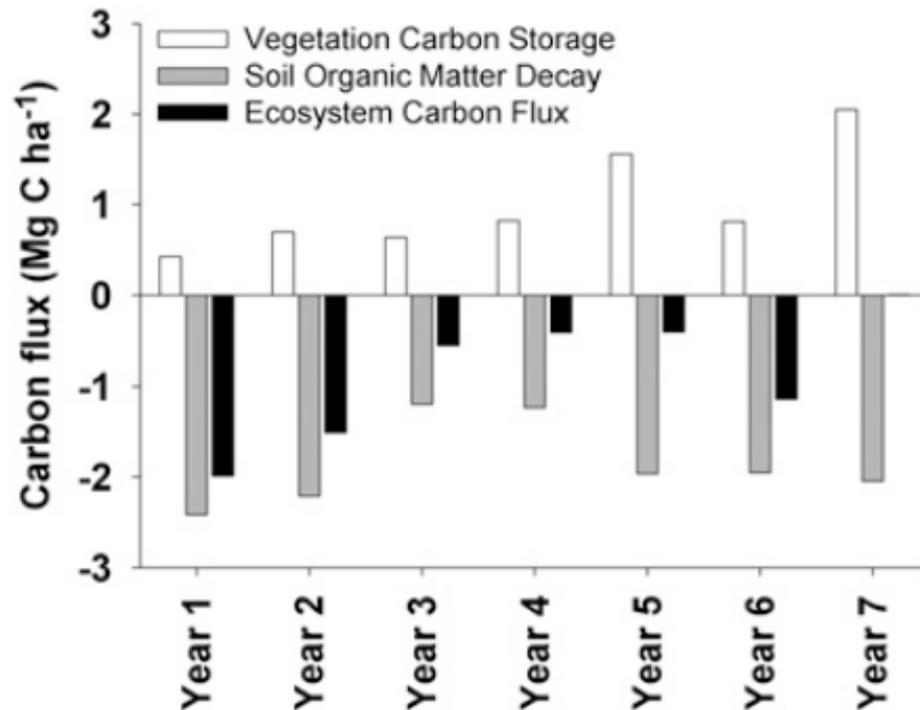
Effet initial très positif de l'enrichissement en CO₂ (fixation N₂ x 2) → diminution puis effet négatif.

Interprétation : limitation par la teneur en molybdène.

Enrichissement en CO₂ → apparition de nouveaux facteurs limitants minéraux

Interaction température x azote

Réchauffement du sol de 5°C par enfouissement de câbles électriques, dans 1 forêt feuillue tempérée (dispositif FACE)



Différence des flux de carbone entre parcelles chauffée et témoin

Traitement / témoin :

Carbone sol : - 13 MgC.ha⁻¹

Carbone vég. : + 7 MgC.ha⁻¹

$\Delta C_{\text{vég}} = - \Delta C_{\text{sol}}$ la 7^e année

Minéralisation N : + 45%

Nitrification : + 200%

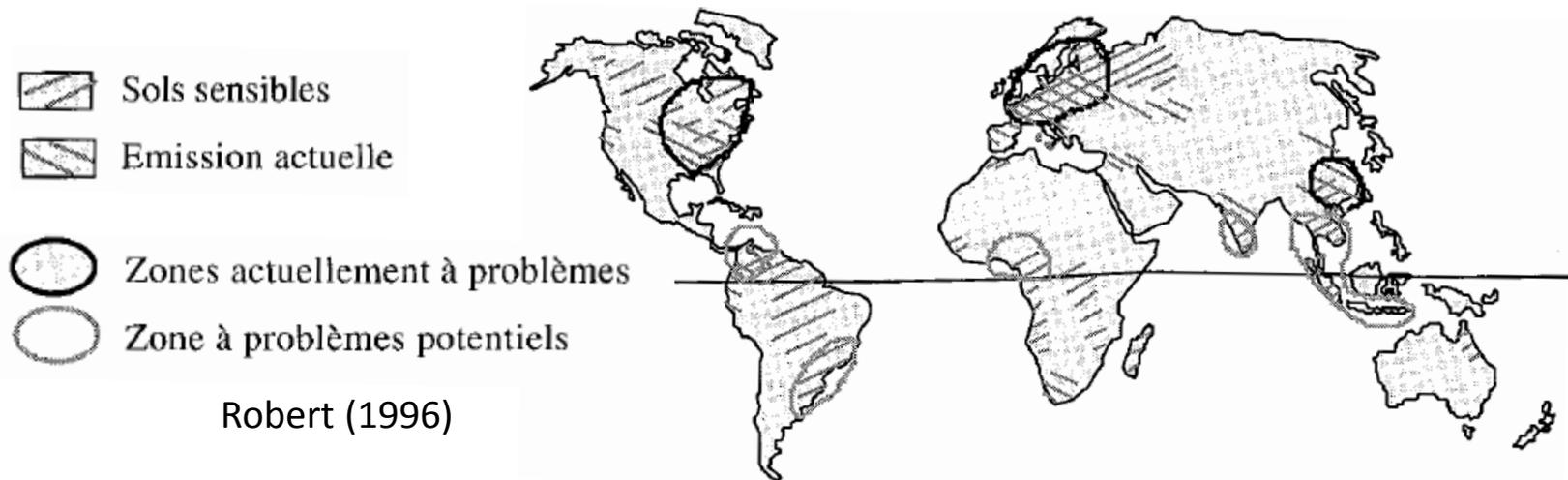
Racines fines (0-10cm) : - 62%

Augmentation de production végétale attribuée surtout à la **meilleure disponibilité en N**

Effets secondaires des dépôts N

Oxydes d'azote → contribution à la formation d'**ozone** troposphérique

Contribution à l'**acidification** des sols, avec SO₄ → presque un problème du passé en Europe et Amérique du nord (sous réserve de gestion durable du bilan minéral), mais un problème d'actualité en Chine et sans doute à venir dans les régions tropicales industrialisées



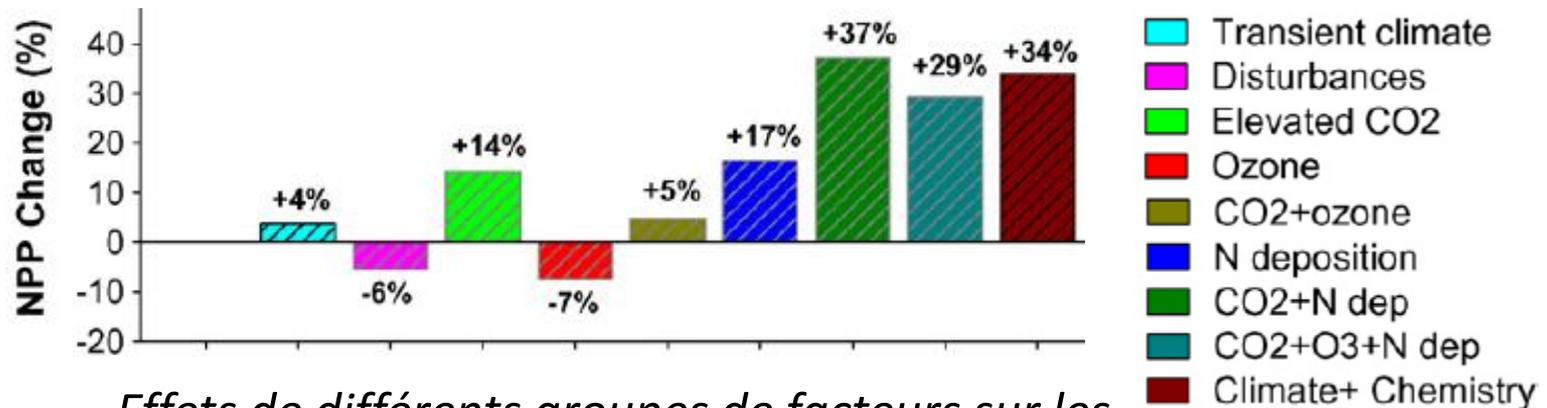
Diagnostic des pollutions atmosphériques entre 1995 et 2004 dans 12 à 14 sites forestiers suisses : niveau critique dépassé dans 12 sites sur 14 pour O₃ et dans 2 à 4 sites sur 12 pour l'acidité

Waldner et al., *Environmental Monitoring and Assessment* (2007)

Modélisation d'effets multiples

Modélisation du cycle du carbone dans les forêts tempérées de l'Est des USA au cours du 20^e siècle, avec prise en compte de :

- type de peuplements (selon espèces dominantes), perturbations (coupes, tempête), climat (radiations, température, pluviosité), composition atmosphérique (CO₂, O₃, dépôts N), sol (réserve utile max)

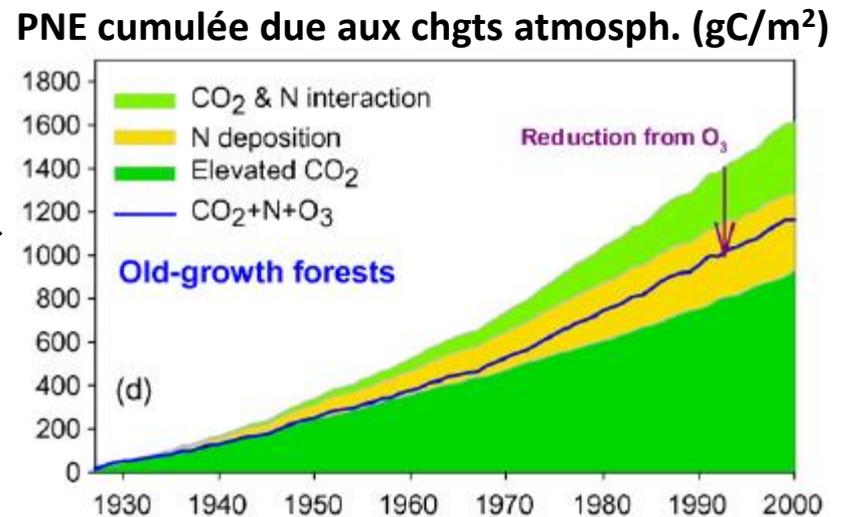
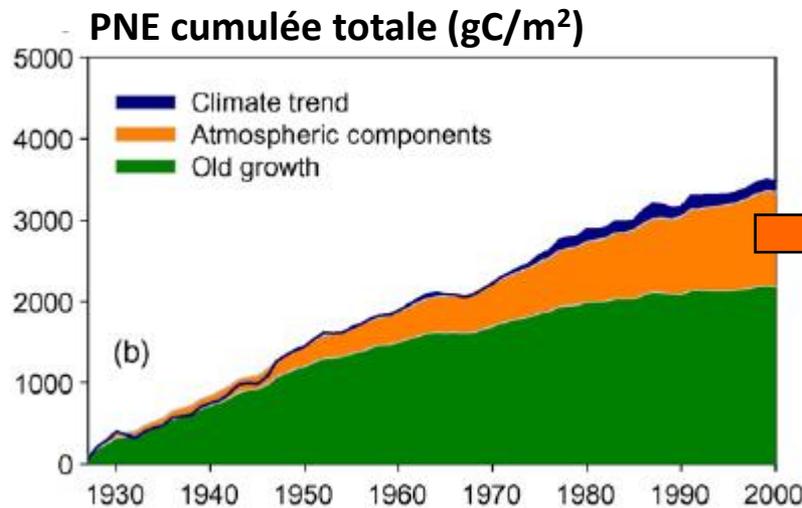


*Effets de différents groupes de facteurs sur les changements de **production primaire nette***

Production primaire nette contrôlée par les dépôts de N puis par le CO₂

Modélisation d'effets multiples

Production nette de l'écosystème contrôlée par l'âge des forêts, puis par l'enrichissement en CO₂



Effets de différents groupes de facteurs sur la production nette de l'écosystème

Interprétation : N favorise la production de MO faciles à décomposer (feuilles) tandis que le CO₂ favorise la production de MO plus durables

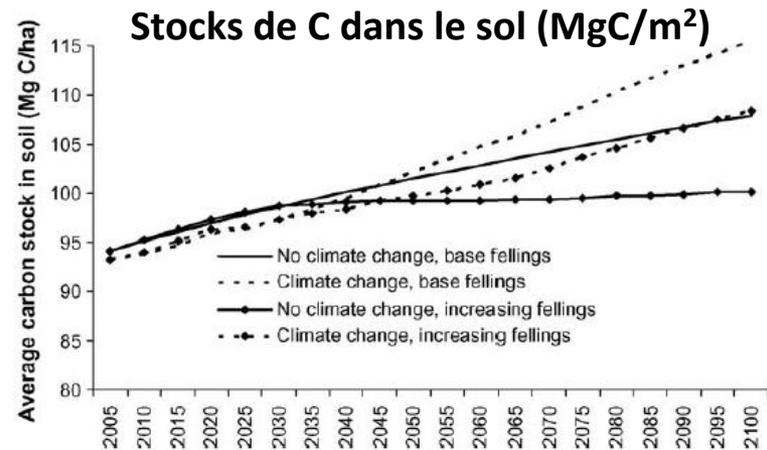
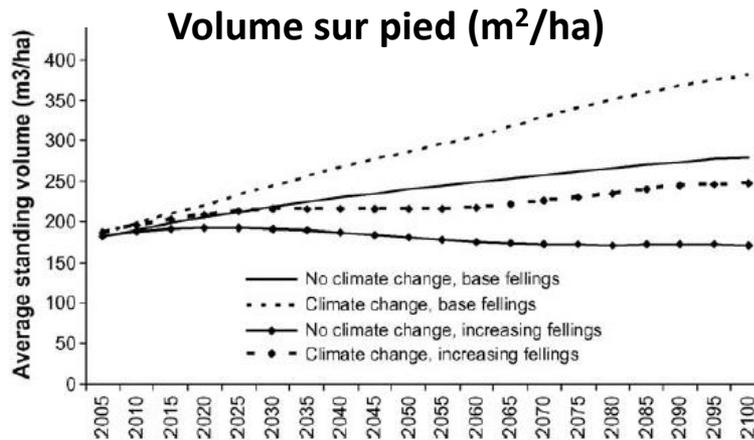
Pan et al., For. Ecol. Manage. (2009)

... mais le modèle n'est pas calé sur des données de C du sol.

Simulations pour le 21^e siècle

Simulation de l'évolution au 21^e siècle du volume de bois sur pied et du carbone du sol de forêts européennes boréales et tempérées, selon le climat (T, P, N, CO₂) et la gestion

Pussinen *et al.*, *For. Ecol. Manage.* (2009)



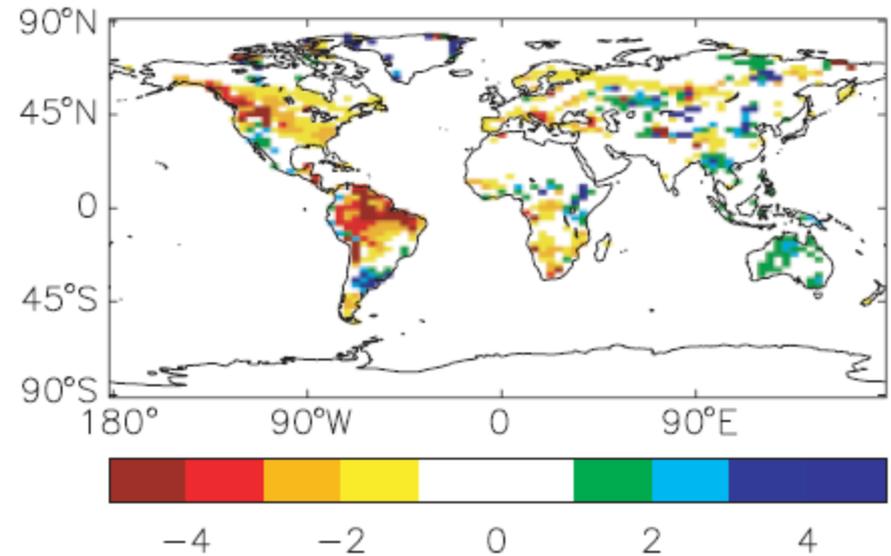
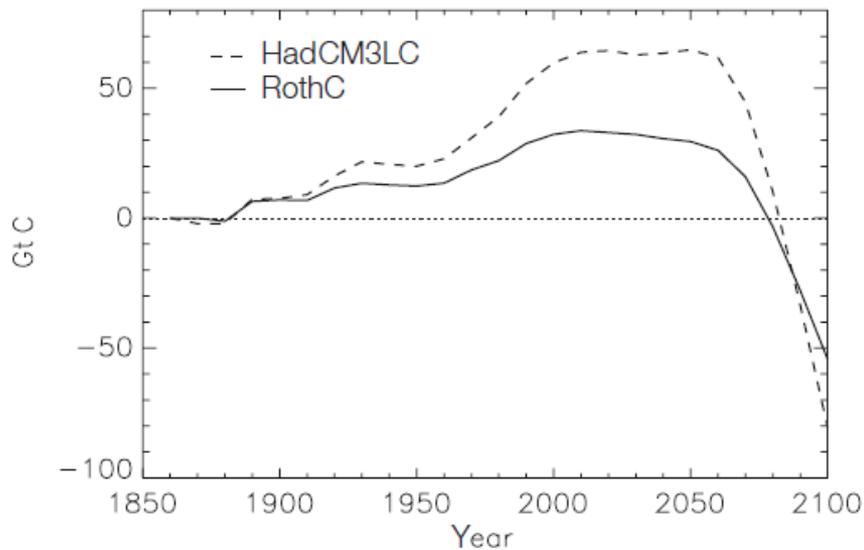
Effets du changement climatique et de la gestion sur le carbone des forêts

Si le prélèvement reste identique à l'actuel, les stocks vont continuer d'augmenter, par vieillissement des forêts - effet renforcé par le changement climatique.

... encore un modèle non calé sur des données de C du sol.

Simulations globales

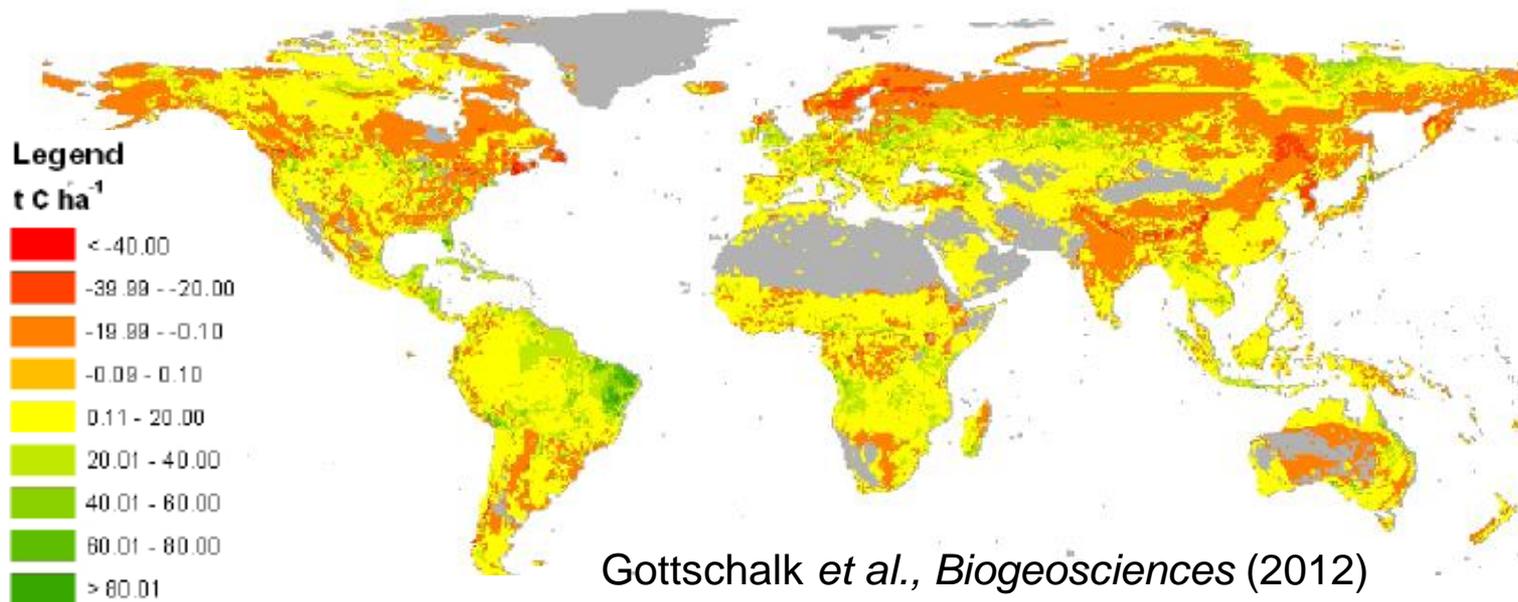
Modèles globaux de cycle terrestre du carbone : représentation très simple de la MO du sol = 1 compartiment



Jones *et al.*, *Glob. Change Biol.* (2005)

Introduction d'un modèle de sol plus réaliste (RothC) → effets amortis du changement climatique, mais tendance similaire
Forte prise en compte du risque accru de mortalité en Amazonie suite à une fréquence accrue des sécheresses
Pas de prise en compte des dépôts azotés

Fortes variations régionales



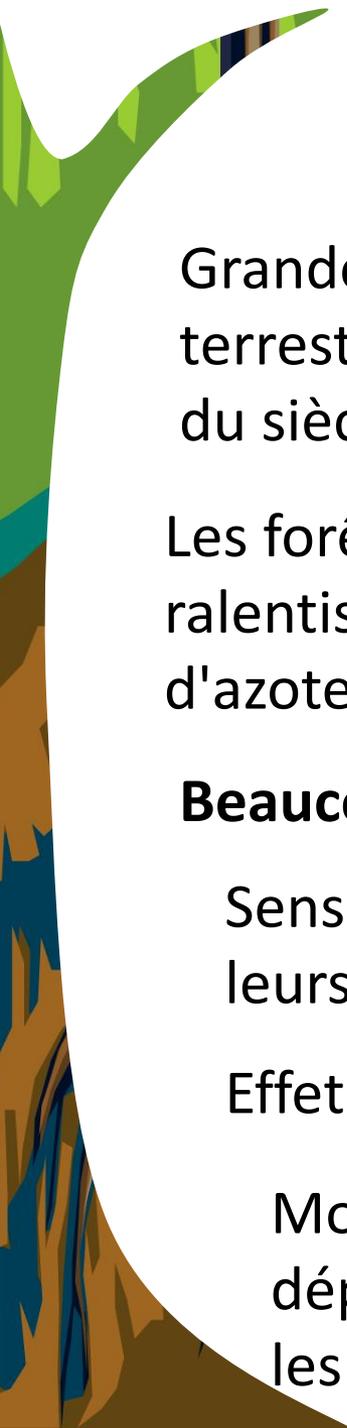
Changement de stocks de C du sol entre 1971 et 2100, scénario A1b, moyenne de 10 modèles terrestres

Article co-publié avec Jones, avec les mêmes outils qu'en 2005.... mais dont les résultats sont très différents :

Fortes pertes en Europe du Nord

Stockage dans les régions tropicales

Globalement, les écosystèmes terrestres restent un puits



Conclusions

Grande majorité des derniers modèles : les écosystèmes terrestres devraient rester des puits de carbone au cours du siècle à venir, mais fortes disparités régionales

Les forêts tempérées vont rester des puits, mais ralentissement, en partie lié à la réduction des émissions d'azote (Templer *et al.*, *Front. Ecol. Environ.*, 2012)

Beaucoup d'incertitudes et de questions :

Sensibilité à la température de la décomposition des MO selon leurs propriétés intrinsèques et leur type de protection

Effet fertilisant du CO₂ à concentrations plus élevées ?

Modèles globaux trop simples / mécanismes dans le sol, dépôts azotés pas pris en compte, difficulté de modéliser les risques de déstockage brutal