

Colloque de séminaires organisé par

**CHAIRE ÉVOLUTION DU CLIMAT ET
DE L'OCÉAN**



**COLLÈGE
DE FRANCE**
—1530—

**Carbones atmosphériques naturels
et anthropiques**

Rétroactions entre le Climat et le Cycle du Carbone

Laurent Bopp

Directeur de Recherche CNRS au LSCE / IPSL

et Pierre Friedlingstein

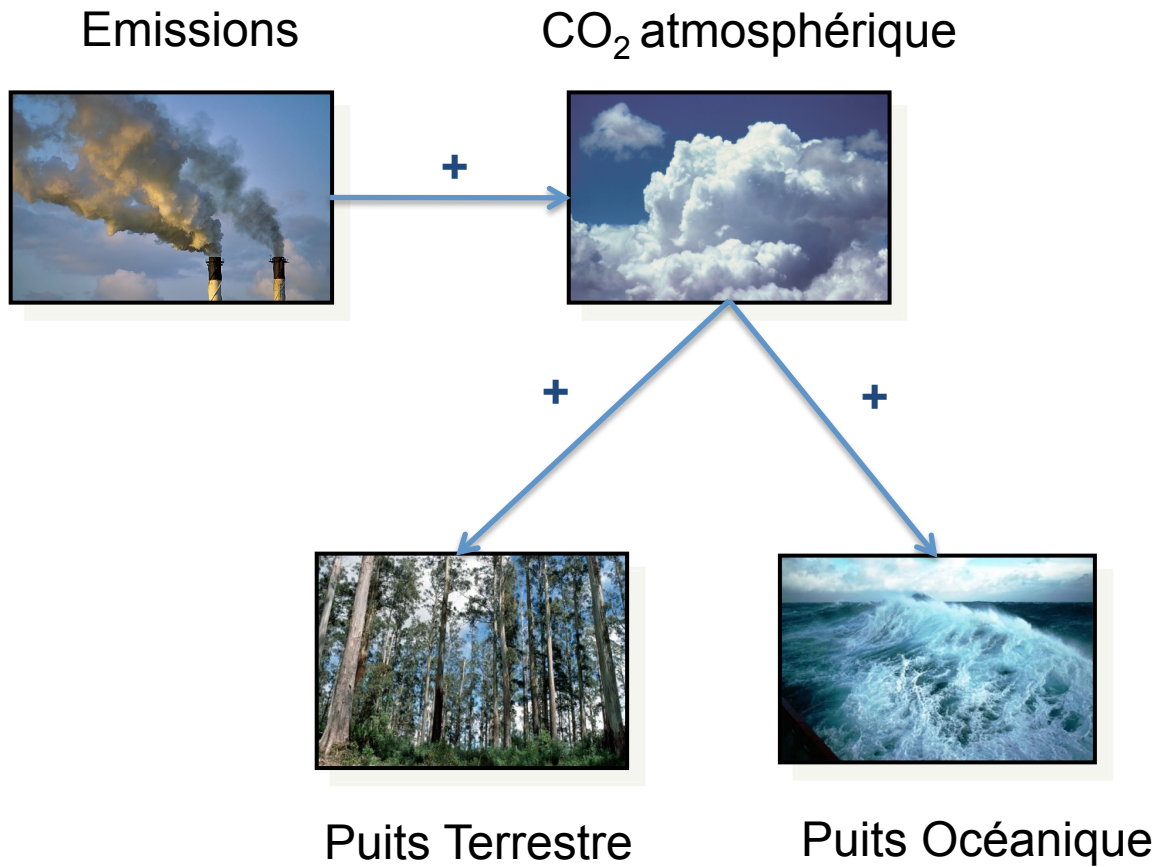
Professeur à Exeter University



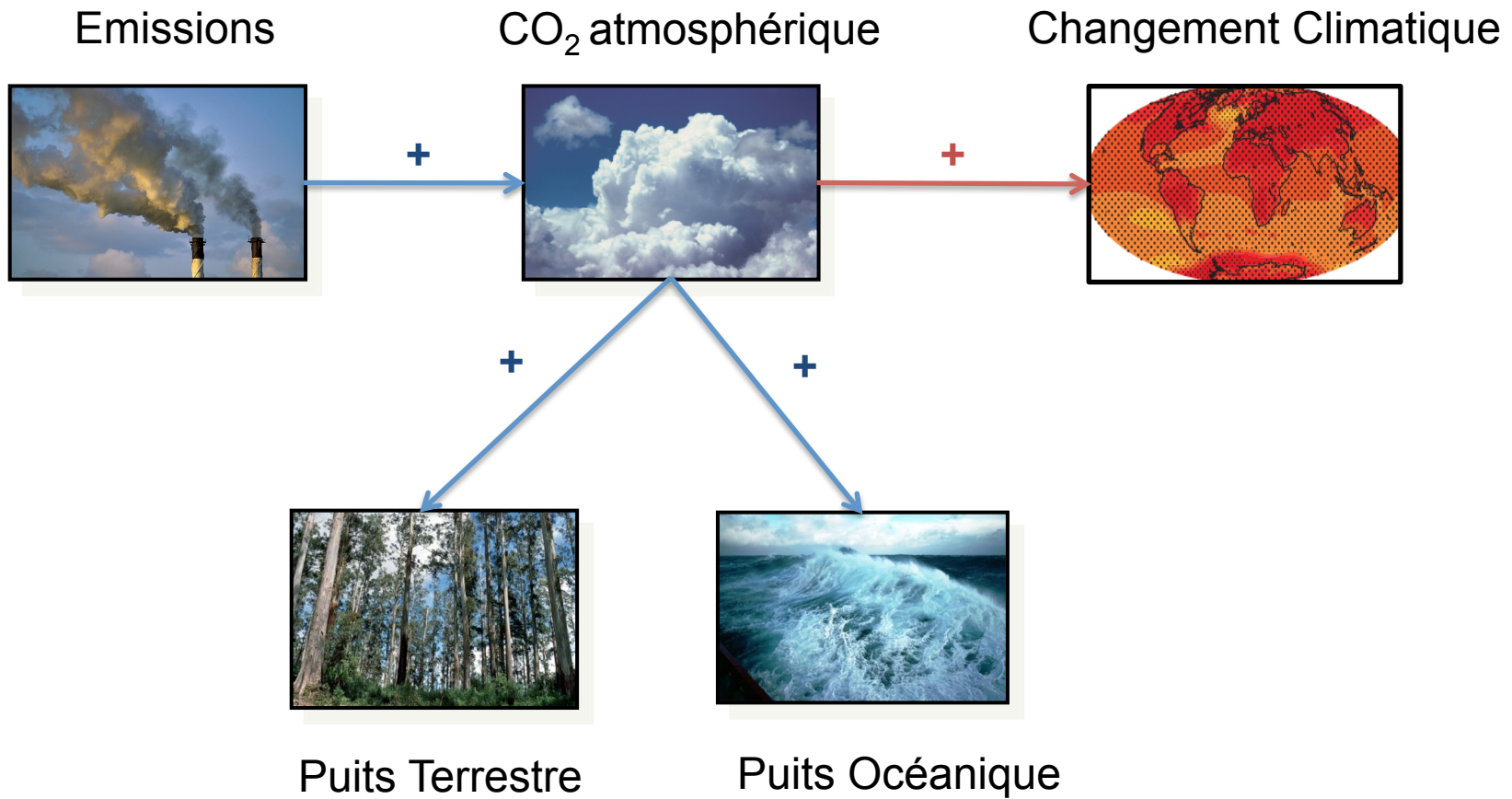
LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT & DE L'ENVIRONNEMENT



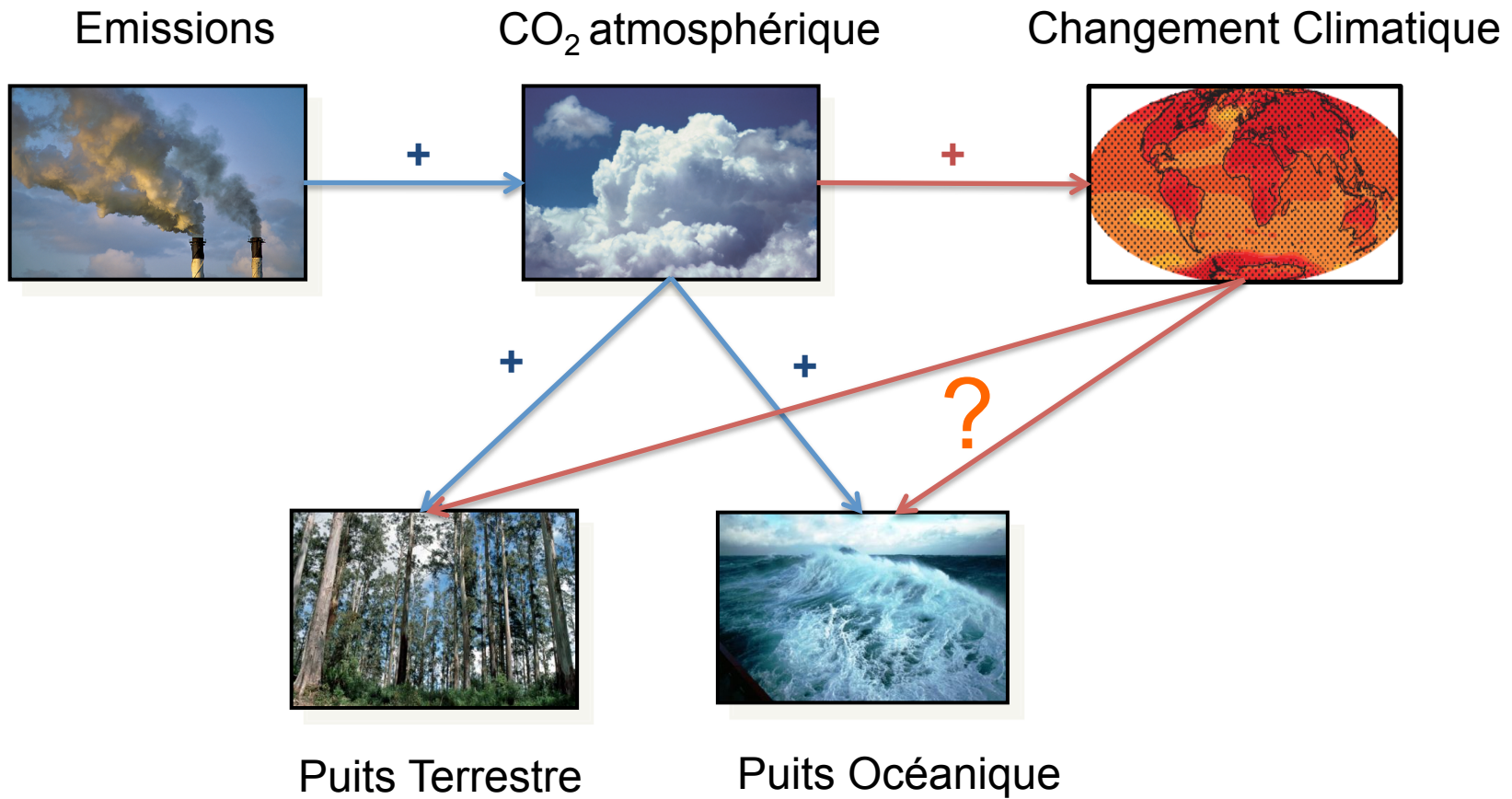
Introduction – Cycle du carbone



Introduction – Cycle du carbone et Changement Climatique



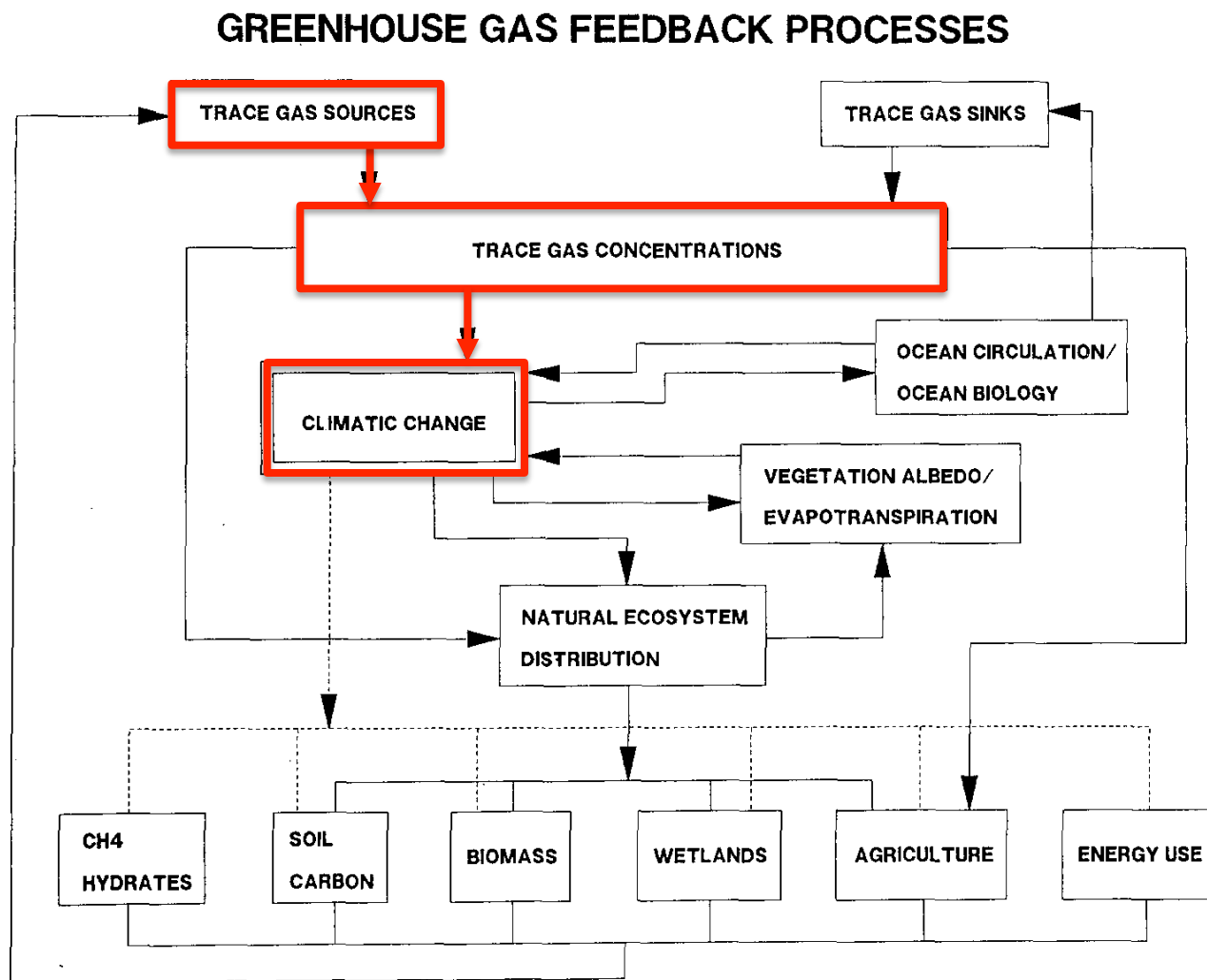
Introduction – Une rétroaction climat-carbone ?



En modifiant l'efficacité des puits de carbone, le changement climatique affecte la concentration de CO₂

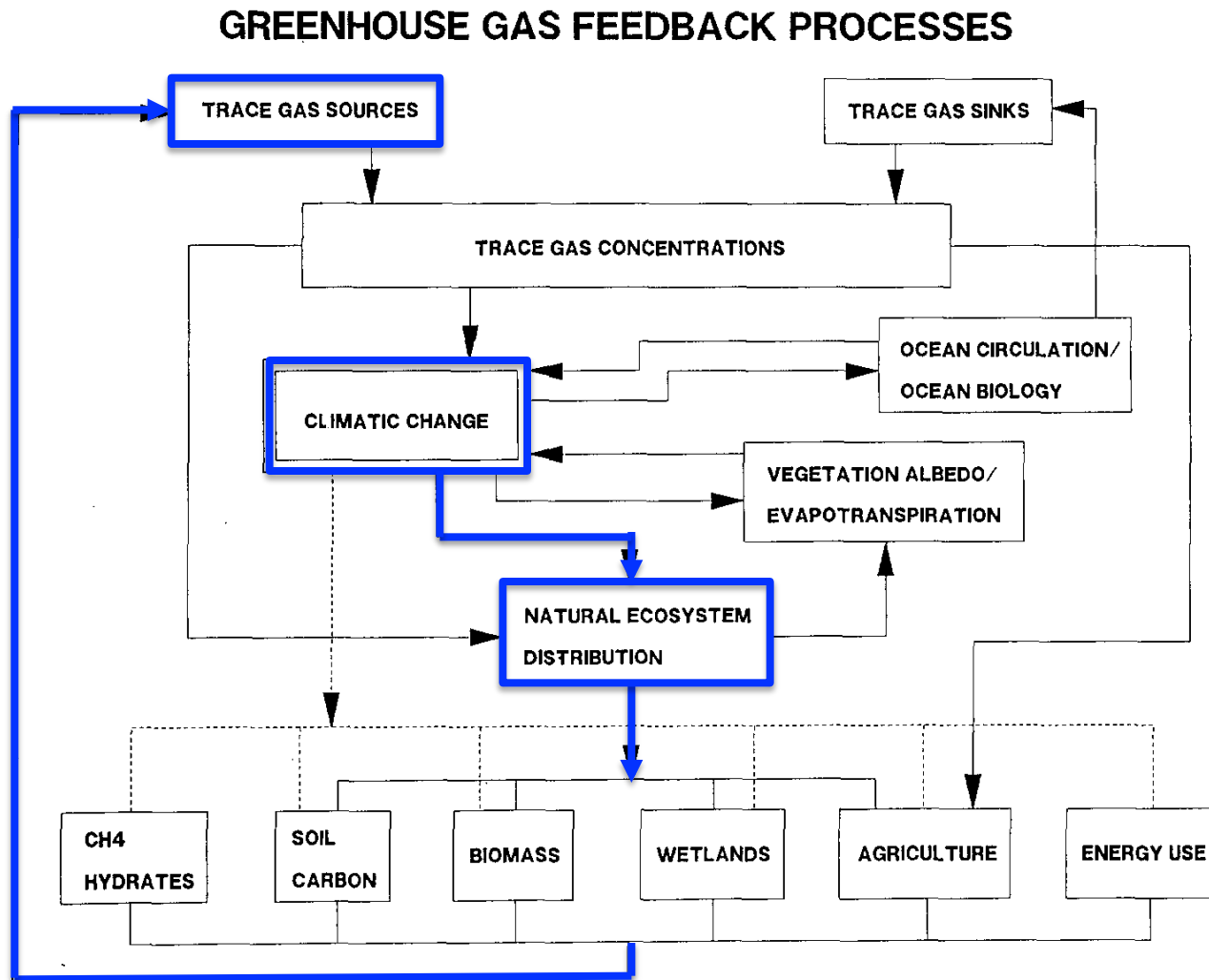
Rétroaction positive ou négative ?

Introduction – Un sujet discuté depuis plus de 25 ans ...



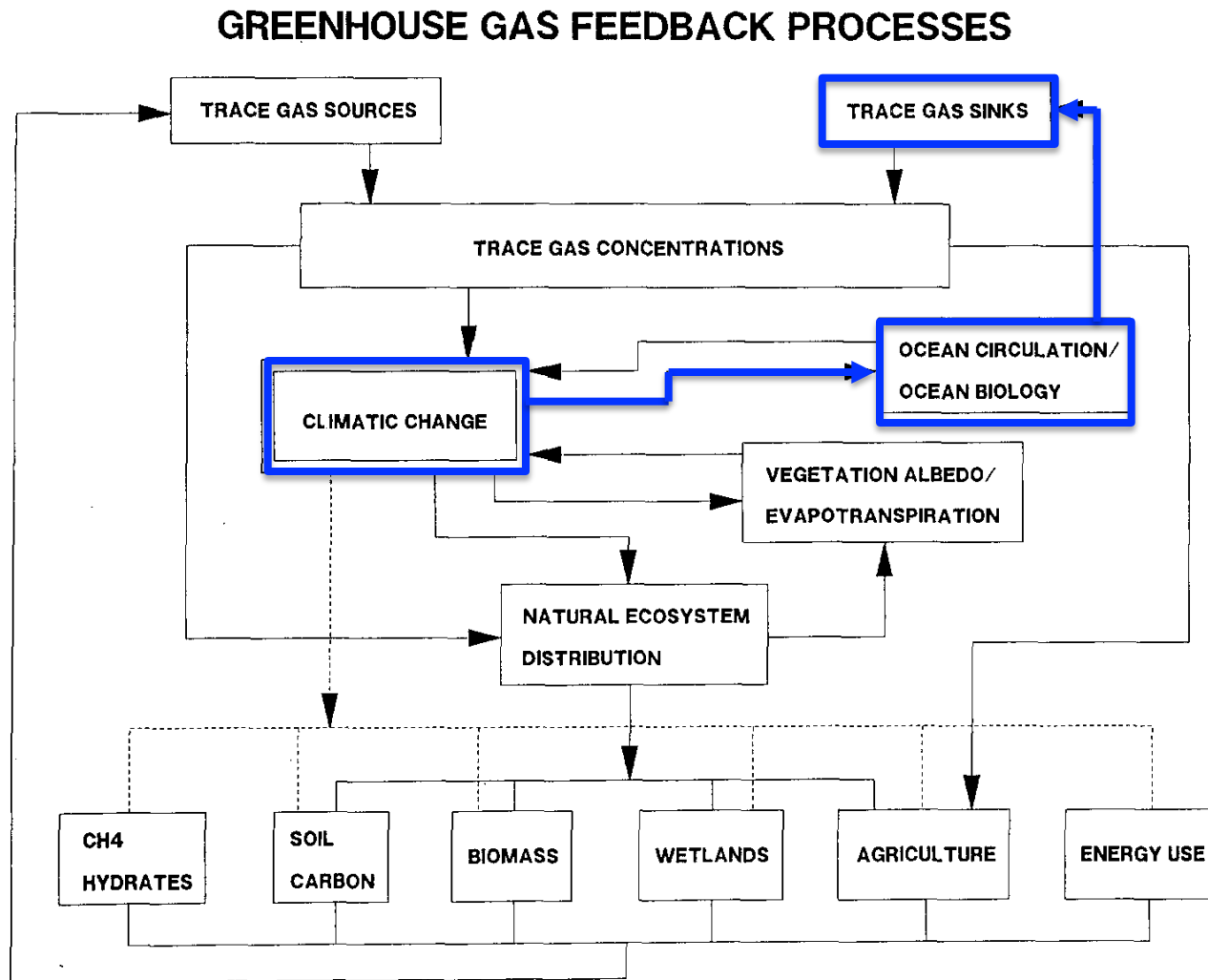
Lashof, Climatic Change, 1989

Introduction – Un sujet discuté depuis plus de 25 ans ...



Lashof, Climatic Change, 1989

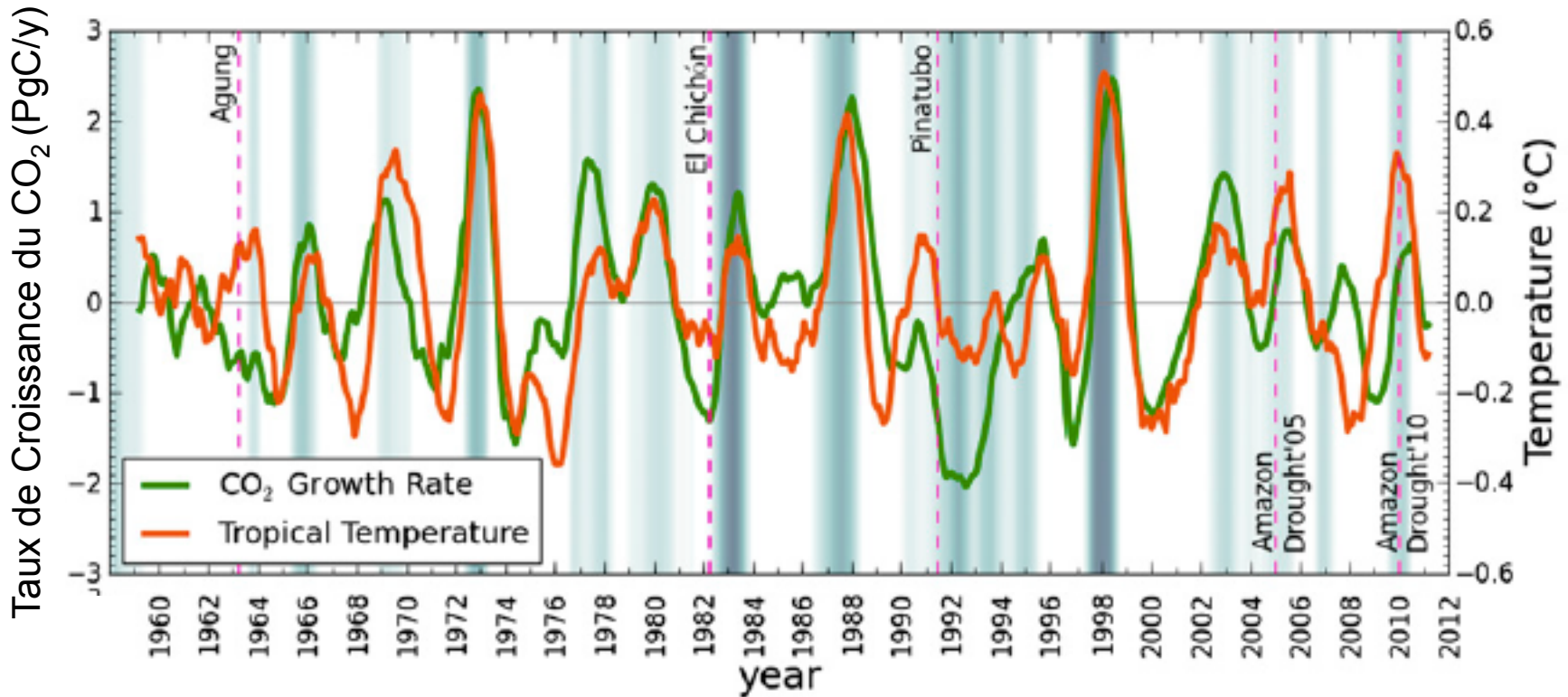
Introduction – Un sujet discuté depuis plus de 25 ans ...



Lashof, Climatic Change, 1989

Introduction – Des indices sur plusieurs échelles de temps

Variabilité Interannuelle : CO₂ atmosphérique et El Niño

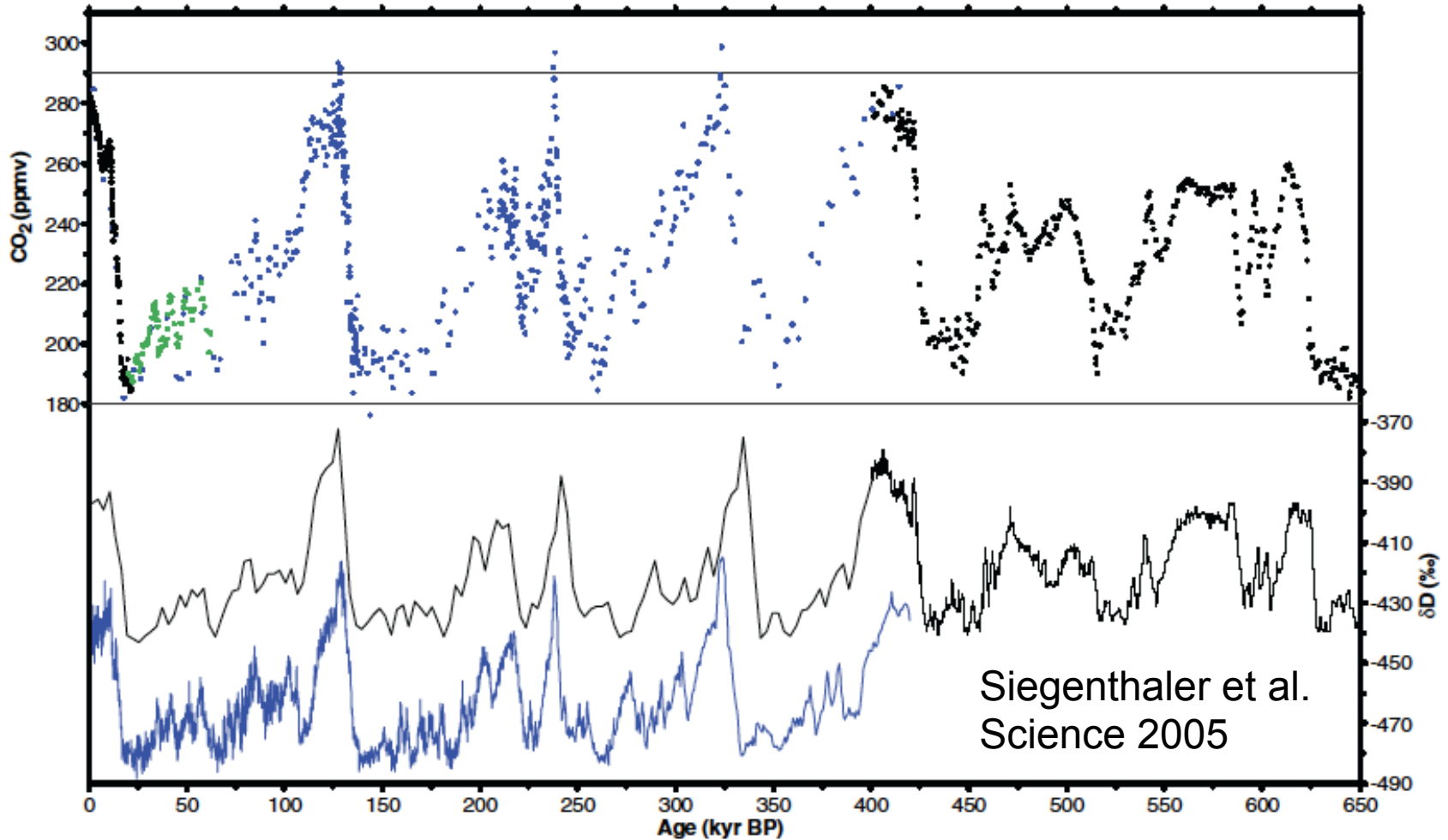


Wang et al. PNAS 2013

→ ENSO, Variabilité des échanges avec la biosphère terrestre, CO₂ atmosphérique

Introduction – Des indices sur plusieurs échelles de temps

Variabilité Glaciaire – Interglaciaire : CO₂ et Climat



→ Cycles G-IG, Variabilité des échanges avec l'océan, CO₂ atmosphérique

Introduction - La rétroaction climat-carbone au 21^{ème} siècle

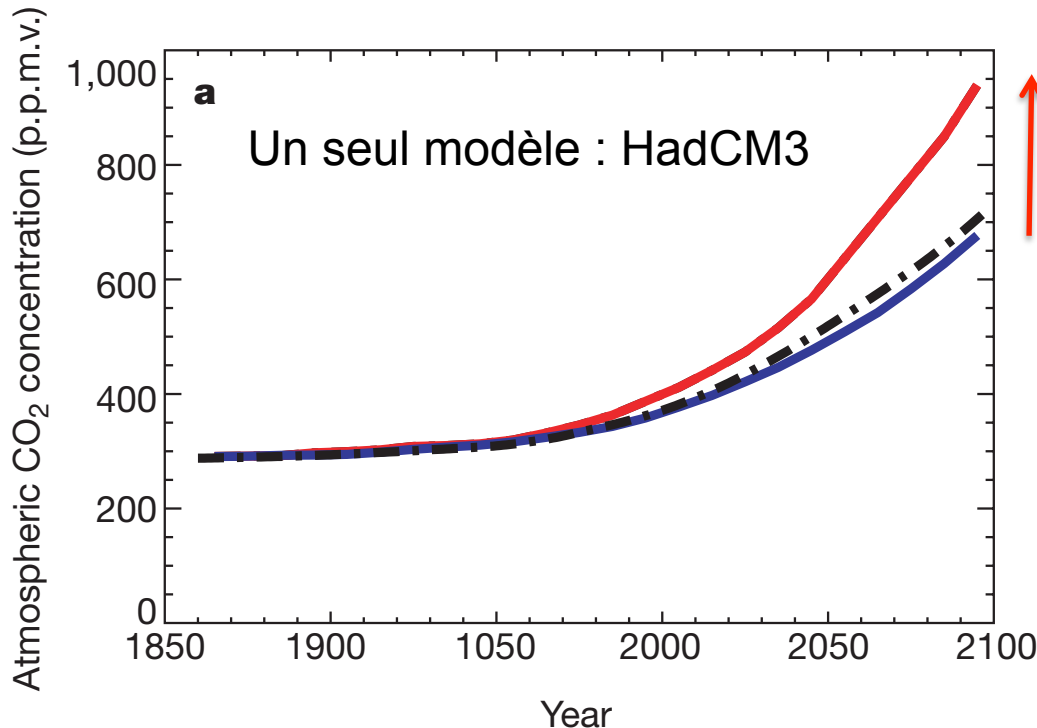
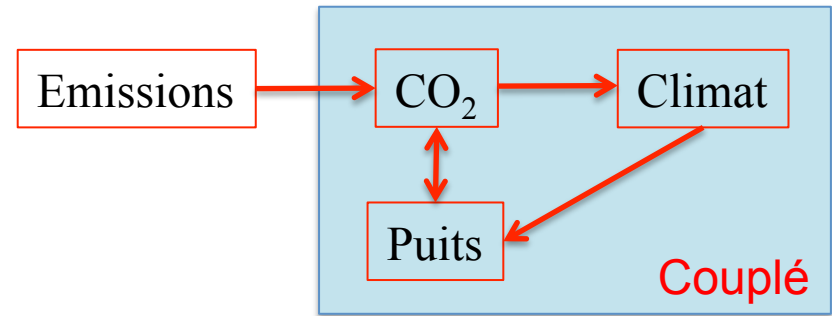
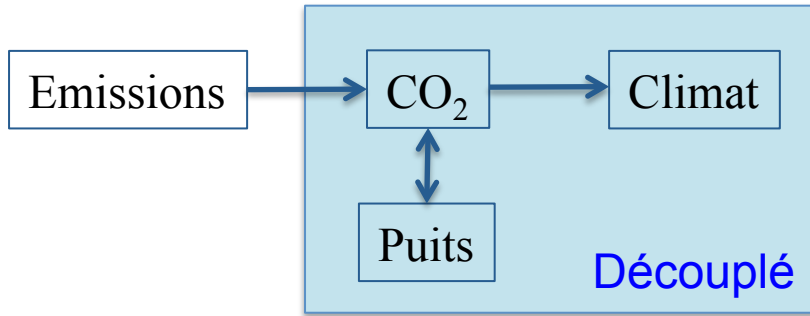
- Quelle est l'amplitude de cette rétroaction ?
- Comment décomposer cette rétroaction ?
- Comment contraindre cette rétroaction ?



Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

Les premières simulations couplées climat-carbone : Cox et al. Nature 2000

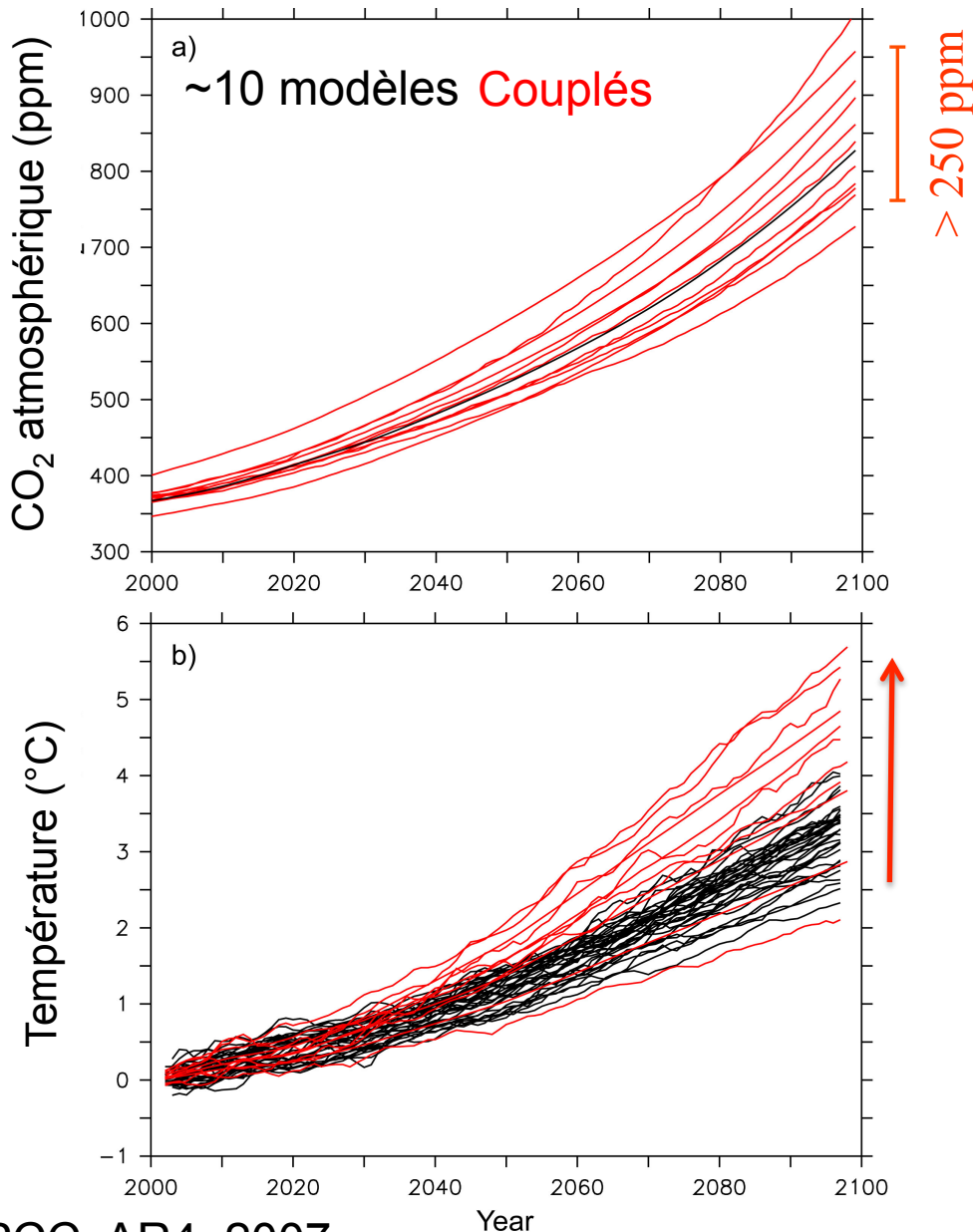


Rétroaction Positive !

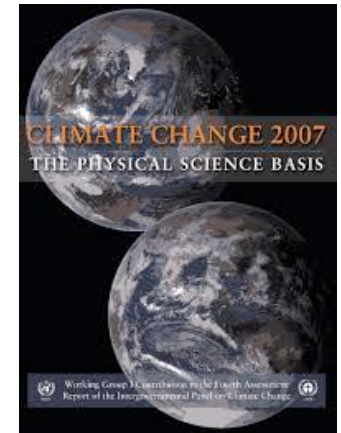
Le changement climatique conduit à une contraction de la forêt amazonienne et à une perte massive du carbone du sol.

La rétroaction conduit à un CO₂ additionnel de **200 ppm** en 2100 !

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?



IPCC AR4



Rétroaction Positive

“Warming tends to reduce land and ocean uptake of atmospheric carbon dioxide, increasing the fraction of anthropogenic emissions that remains in the atmosphere.”

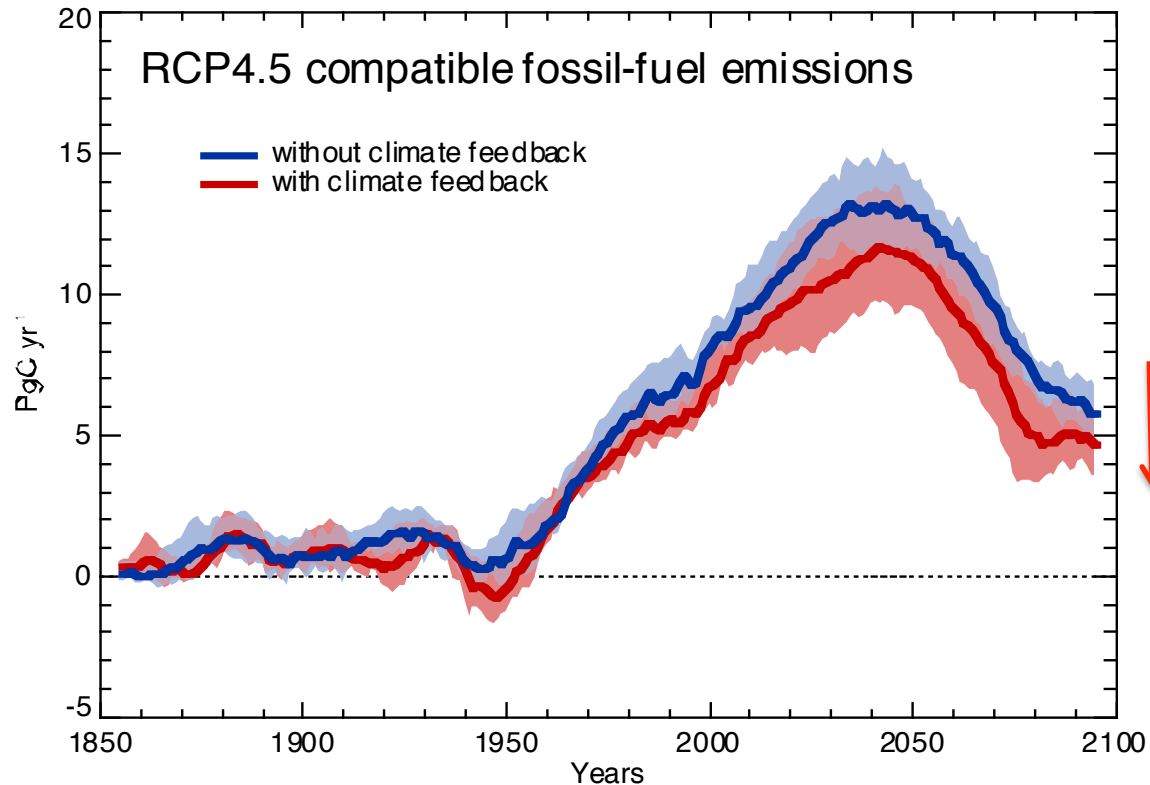
IPCC AR4

Mais très grande incertitude :

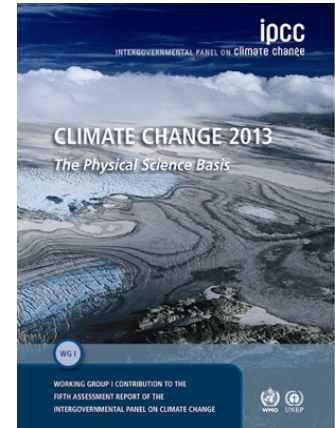
+20 à +220 ppm

+0.2 à +1.5°C

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?



IPCC AR5



Rétroaction Positive et impact sur les émissions compatibles

“Based on Earth System Models, there is *high confidence* that the feedback between climate and the carbon cycle is positive in the 21st century; ...” IPCC AR5 2013

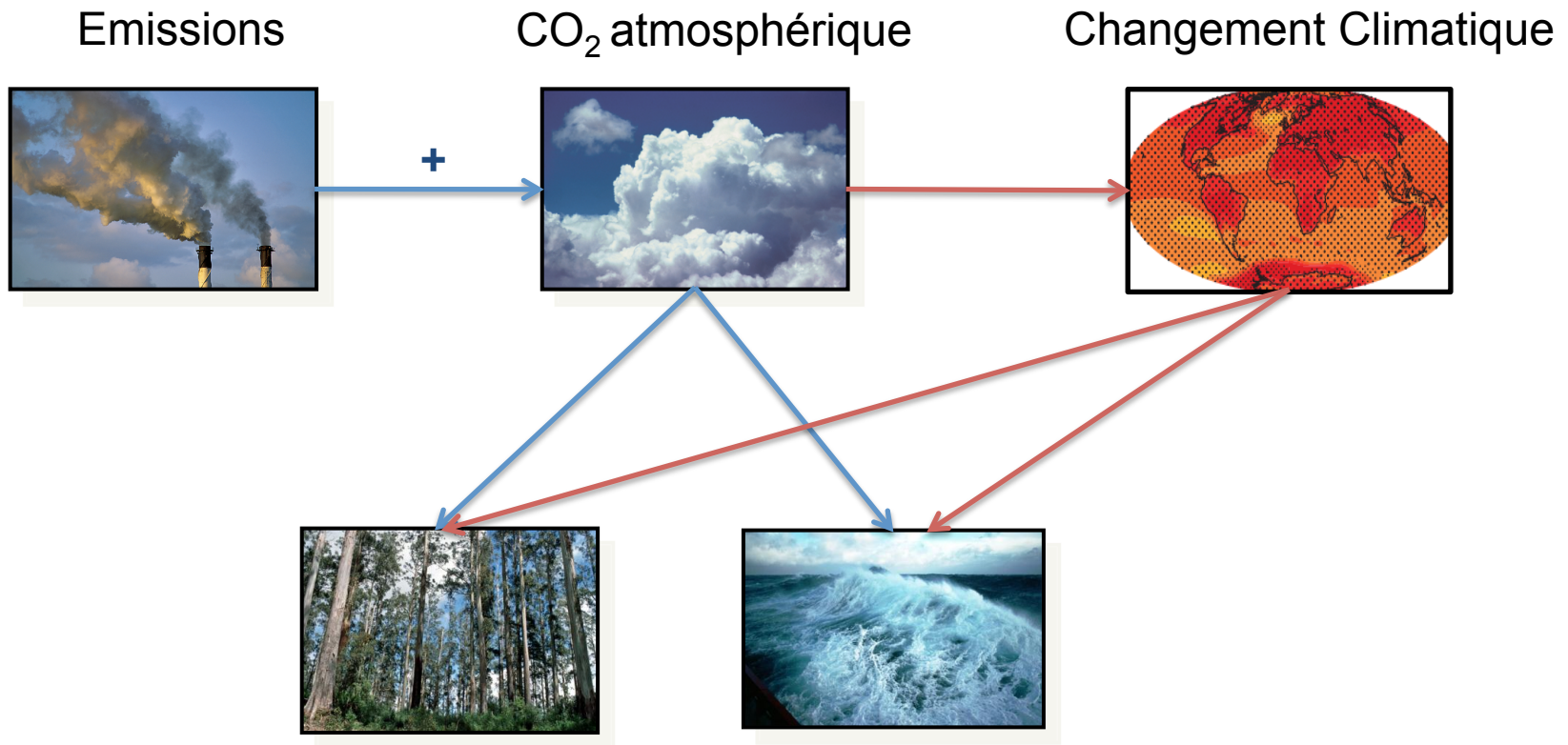
Impact sur les émissions compatibles : -6 à -29% entre 2006 et 2100 (-157 PgC)

Toujours une grande incertitude sur l'amplitude de la rétroaction

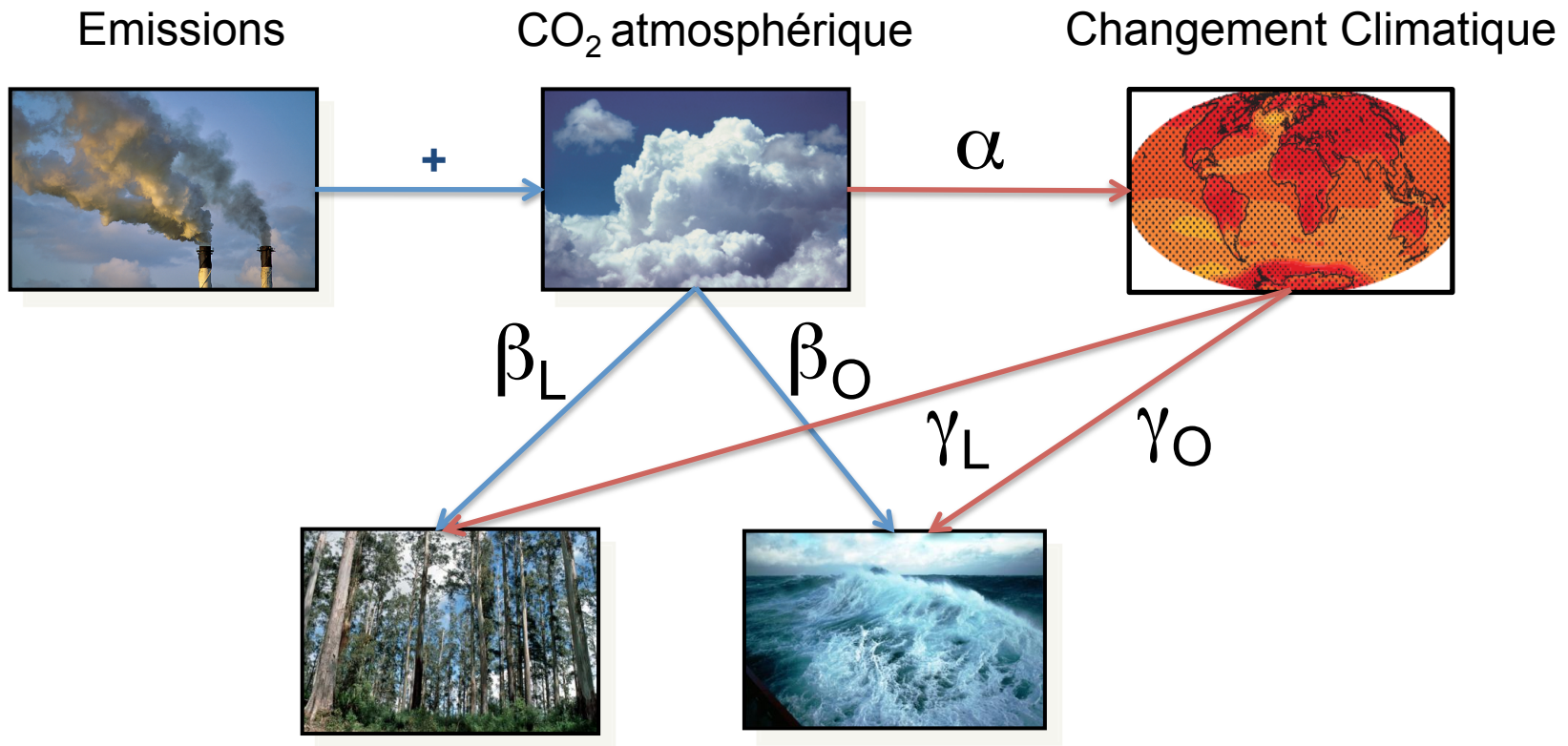


Comment décomposer la rétroaction climat-carbone ?

Comment décomposer la rétroaction climat-carbone ?



Comment décomposer la rétroaction climat-carbone ?

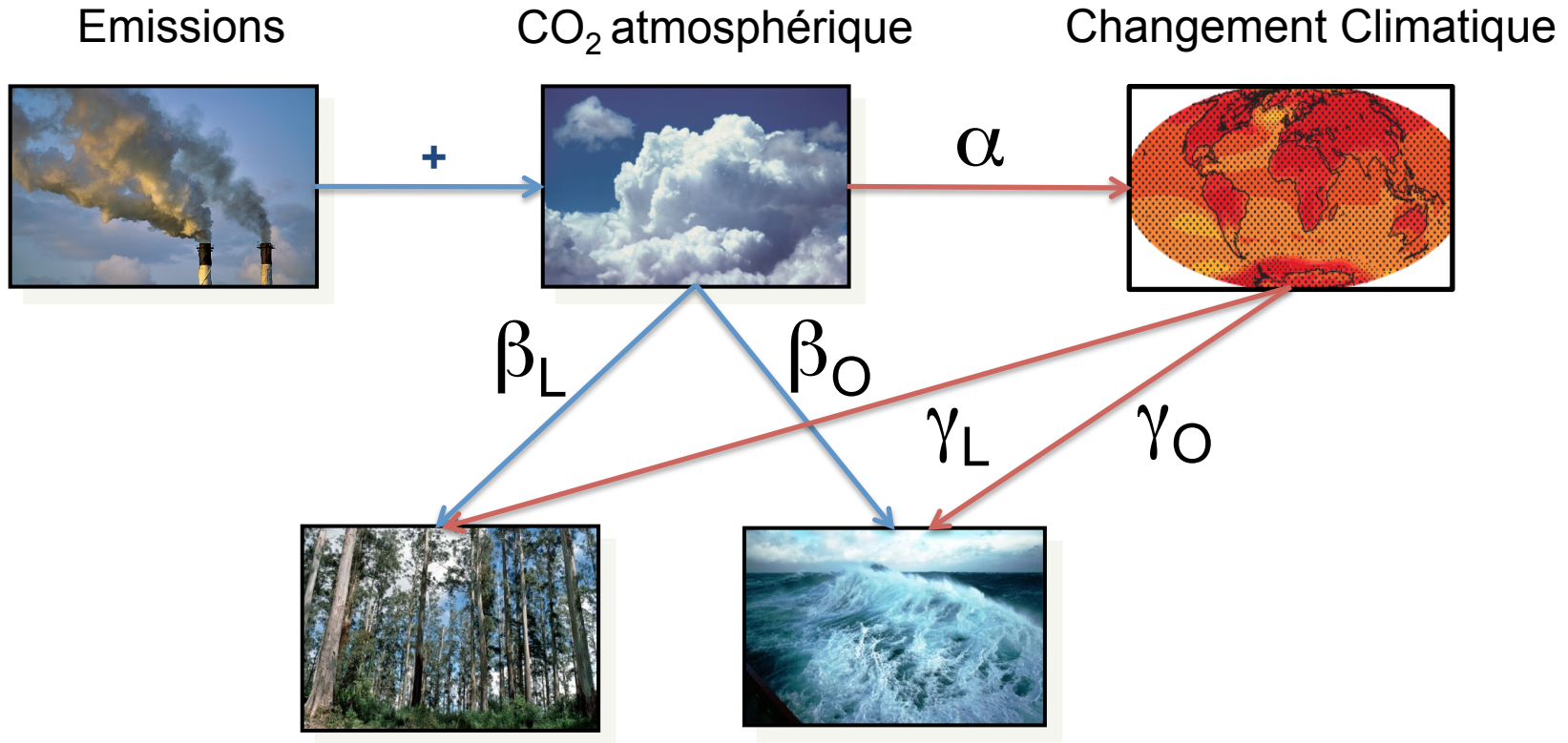


α : sensibilité climatique ($^{\circ}\text{C} / \text{ppm}$)

β : sensibilité des puits au CO₂ atmosphérique (PgC / ppm)

γ : sensibilité des puits au climat (PgC / $^{\circ}\text{C}$)

Comment décomposer la rétroaction climat-carbone ?



$$\Delta T_{\text{cou}} = 1/(1-g) \Delta T_{\text{unc}} \text{ avec } g = \frac{-(\gamma_L + \gamma_O)\alpha}{(m + \beta_L + \beta_O)}$$

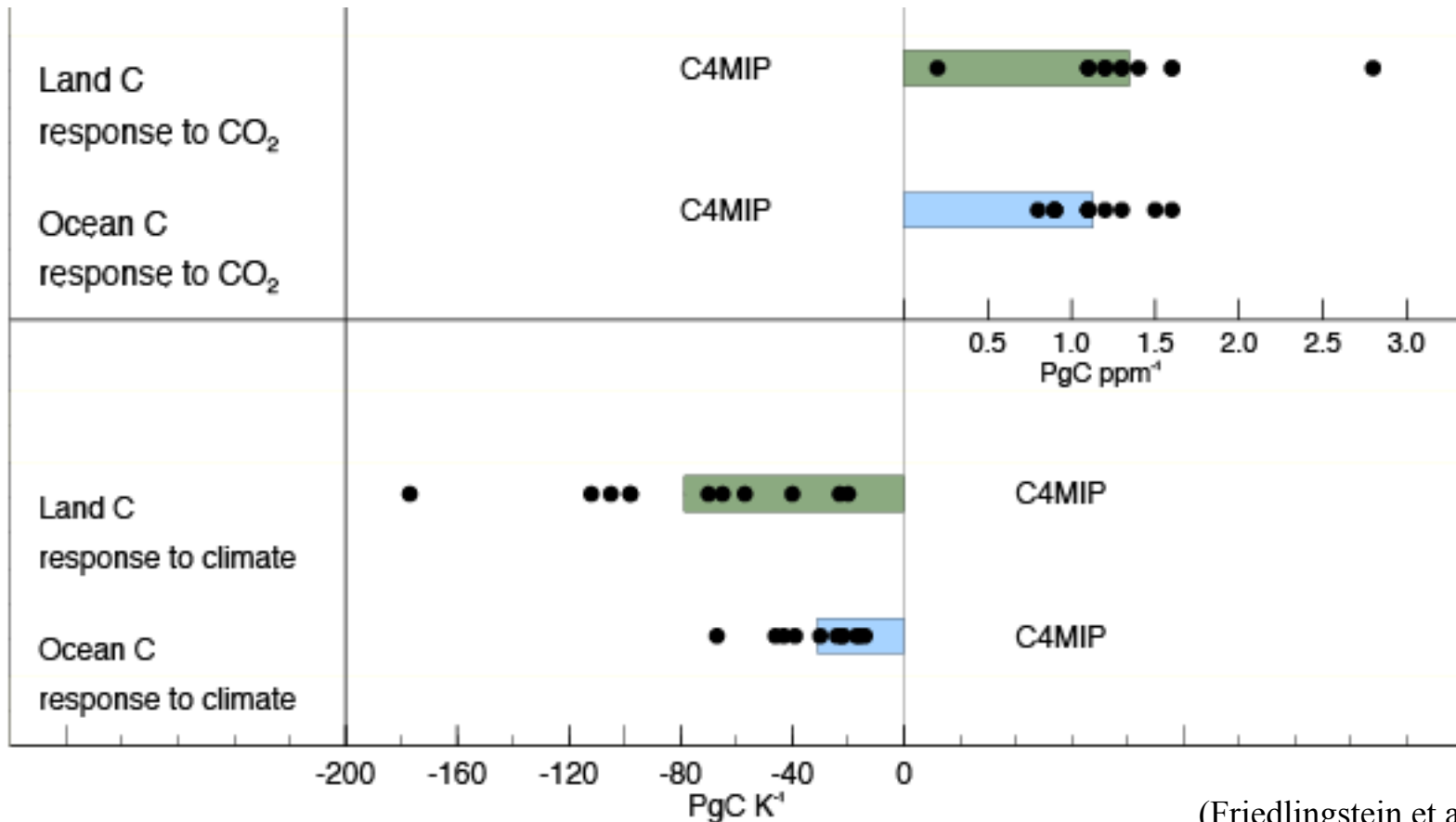
g : gain de la rétroaction – estimé à 2xCO₂

Analyse des différents termes : Friedlingstein et al. 2006

- Sensibilité similaire au CO₂ pour l'océan et la biosphère terrestre
Sensibilité au climat négative, mais plus forte pour la biosphère terrestre
- Incertitude la + importante : pour la réponse de la biosphère terrestre

β

γ

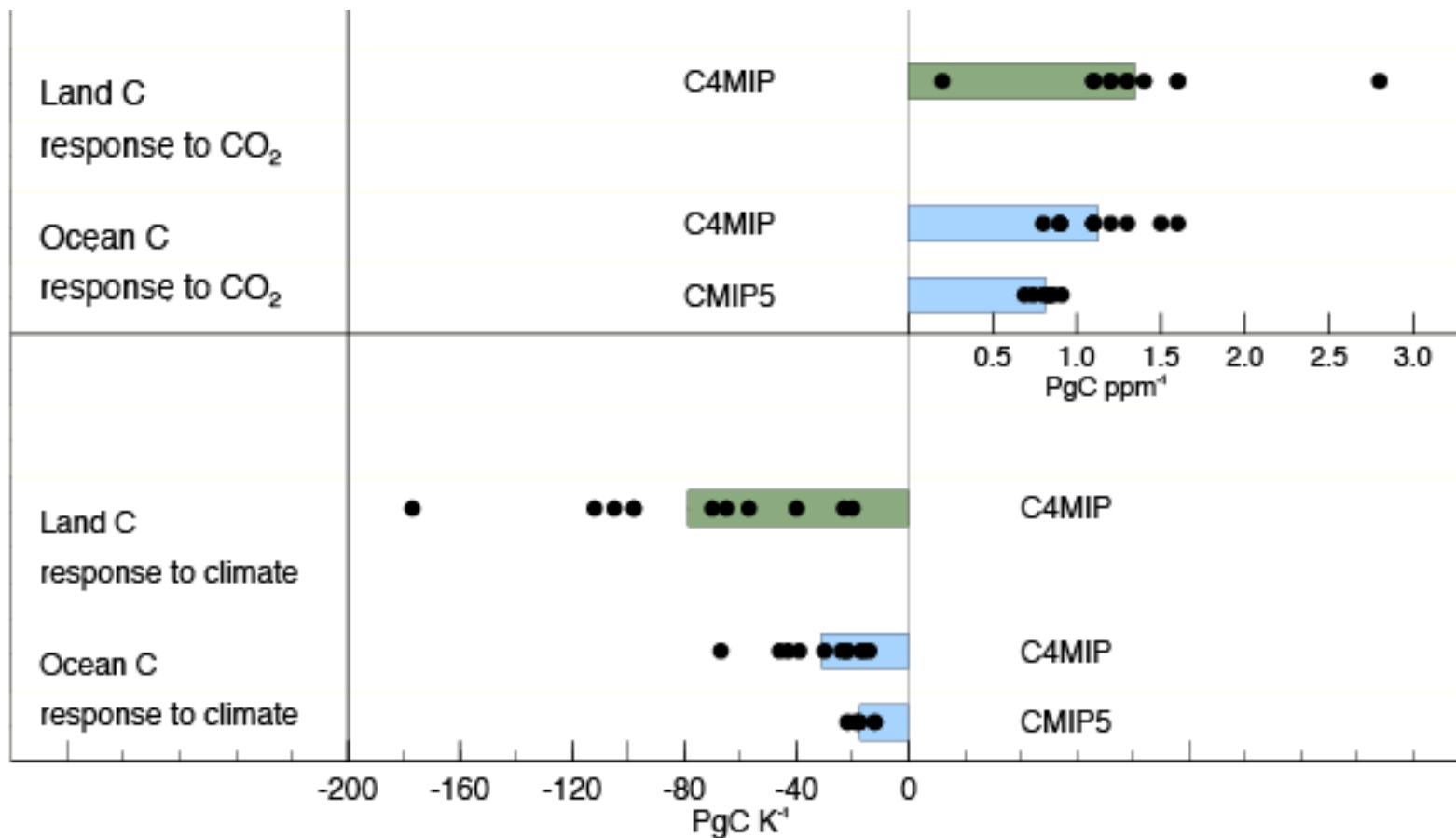


Analyse des différents termes : dans IPCC 2013

■ Réduction de l'incertitude pour les sensibilités océaniques

β

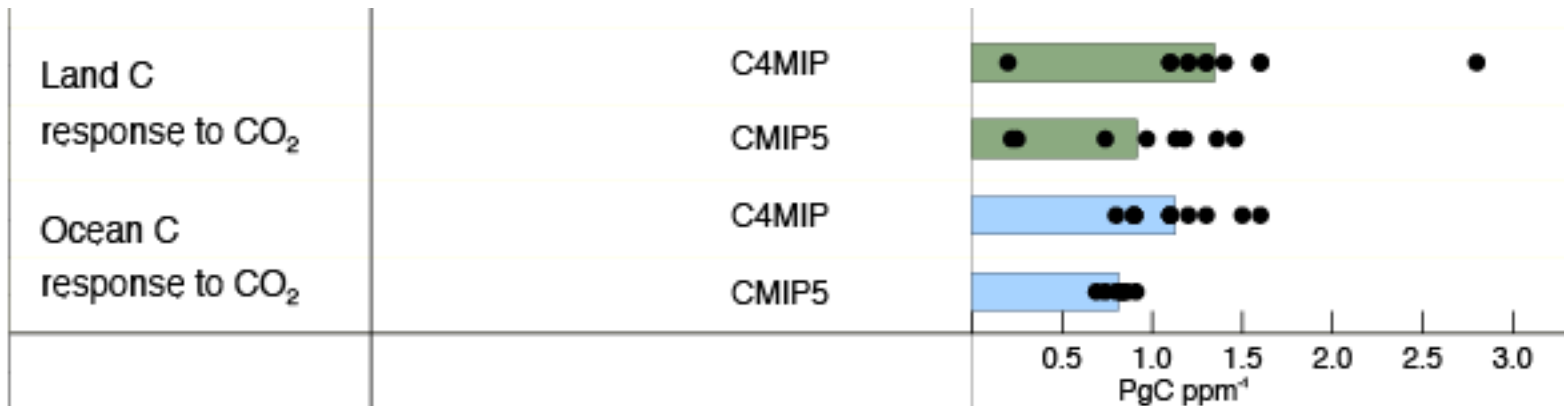
γ



Analyse des différents termes : dans IPCC 2013

- Réduction de l'incertitude pour les sensibilités océaniques
- Réduction de l'incertitude pour les sensibilités continentales, mais toujours une large gamme de valeurs

β



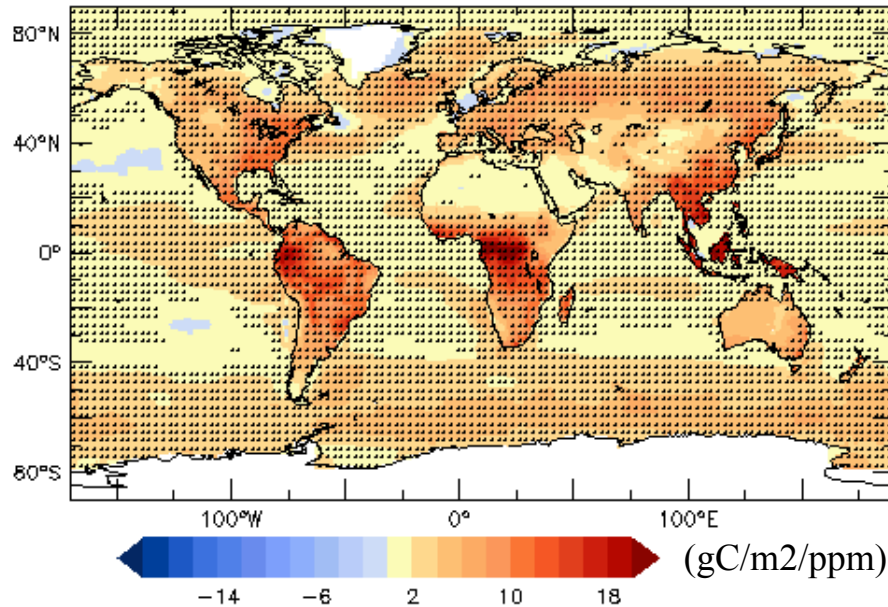
γ

-200 -160 -120 -80 -40 0
PgC K⁻¹

0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0
PgC ppm⁻¹

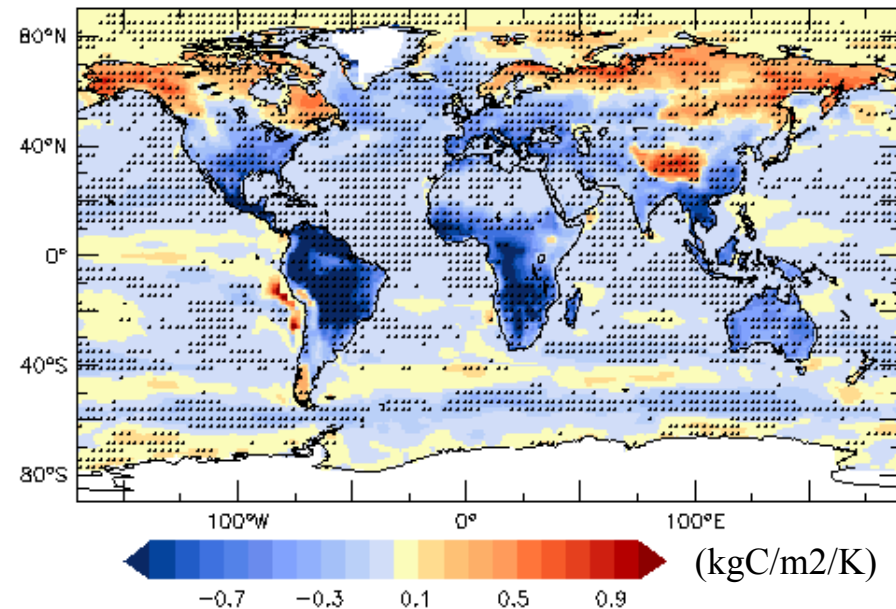
Analyse des différents termes : Régionalisation

Distribution modélisée des valeurs de β et γ pour l'océan et la biosphère



Sensibilité au climat (γ)

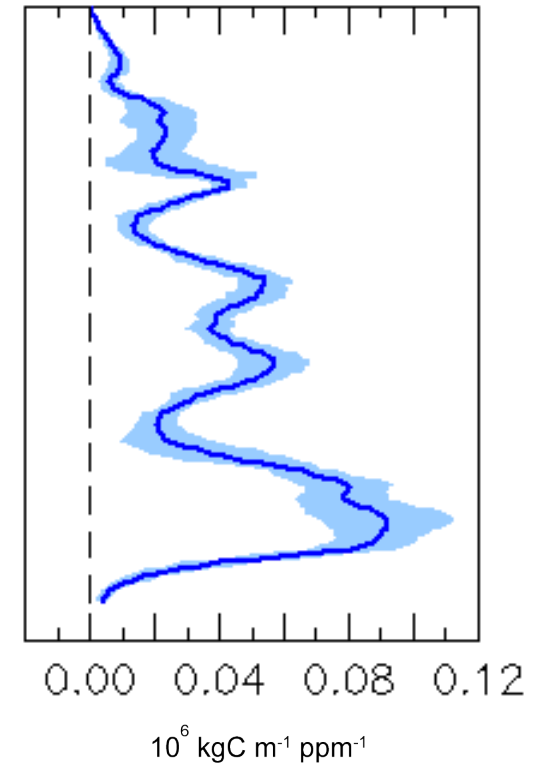
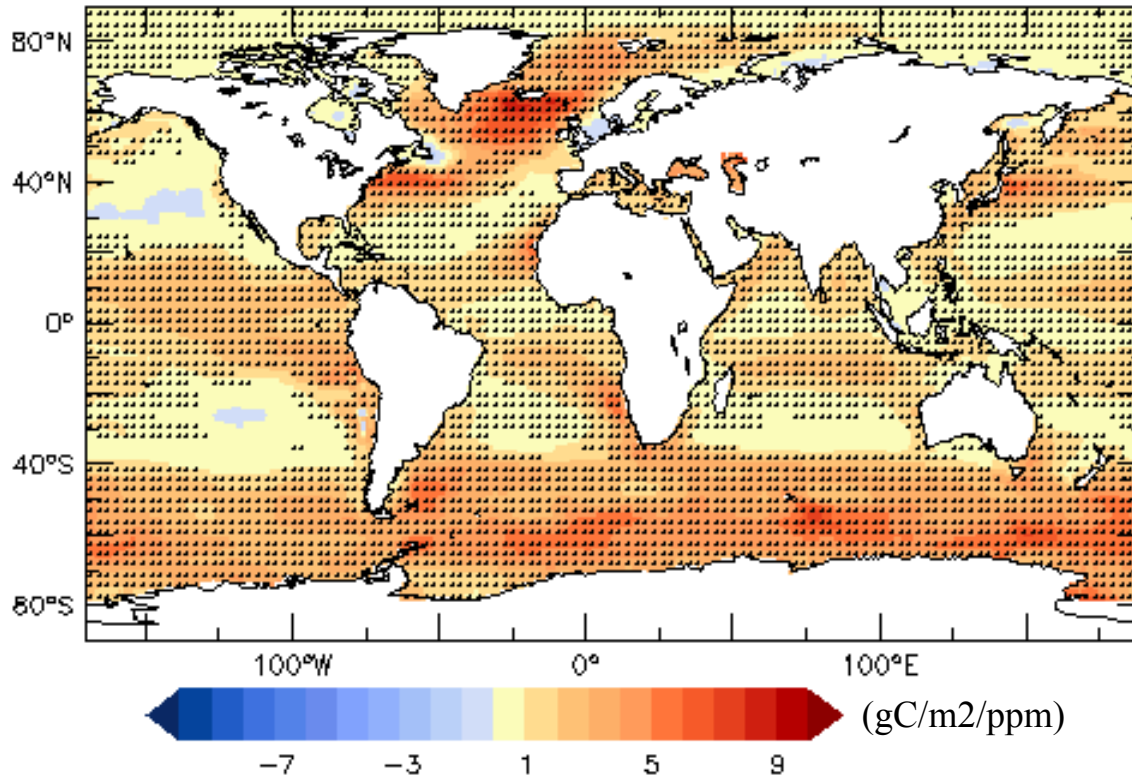
Sensibilité au CO₂ (β)



Analyse des différents termes : Océan et CO₂

- Fortes valeurs dans l'Atl. Nord / l'Océan Austral – bon accord entre les modèles
- Similaire aux estimations de l'absorption de carbone anthropique pour aujourd'hui
(Mikaloff-Fletcher et al. Gruber et al.)

Sensibilité au CO₂ (β)



(Pointillés : robustesse inter-modèle)

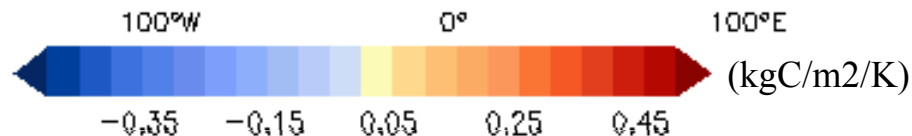
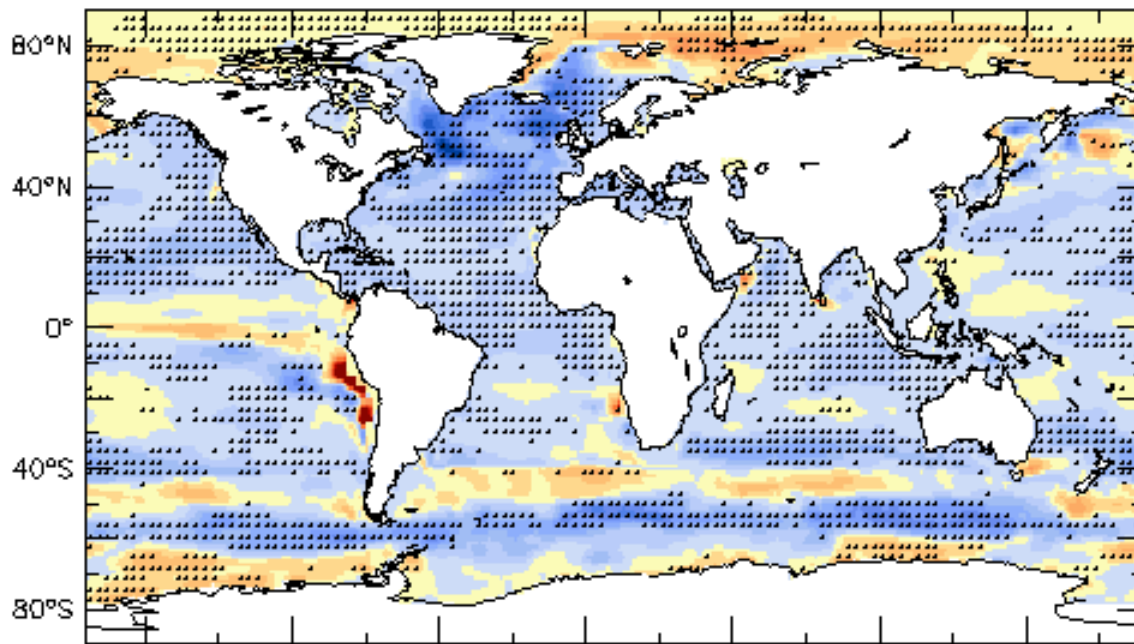
Analyse des différents termes : Océan et Climat

Valeurs positives ou négatives ! – Peu d'accord entre les modèles

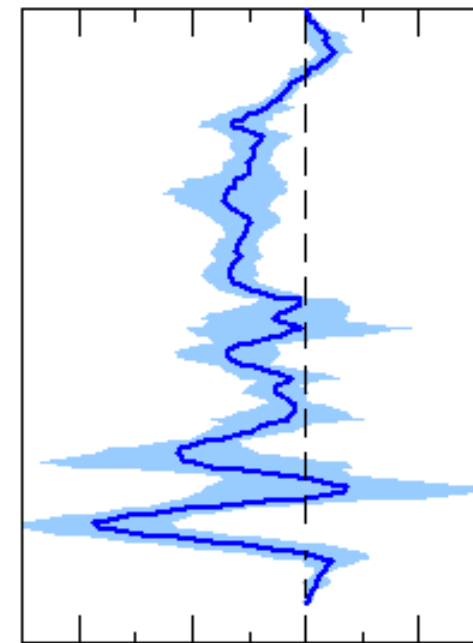
Négatif : Diminution de la solubilité, Stratification, ...

Positif : Fonte de la glace de mer, mélange plus important

Sensibilité au climat (γ)



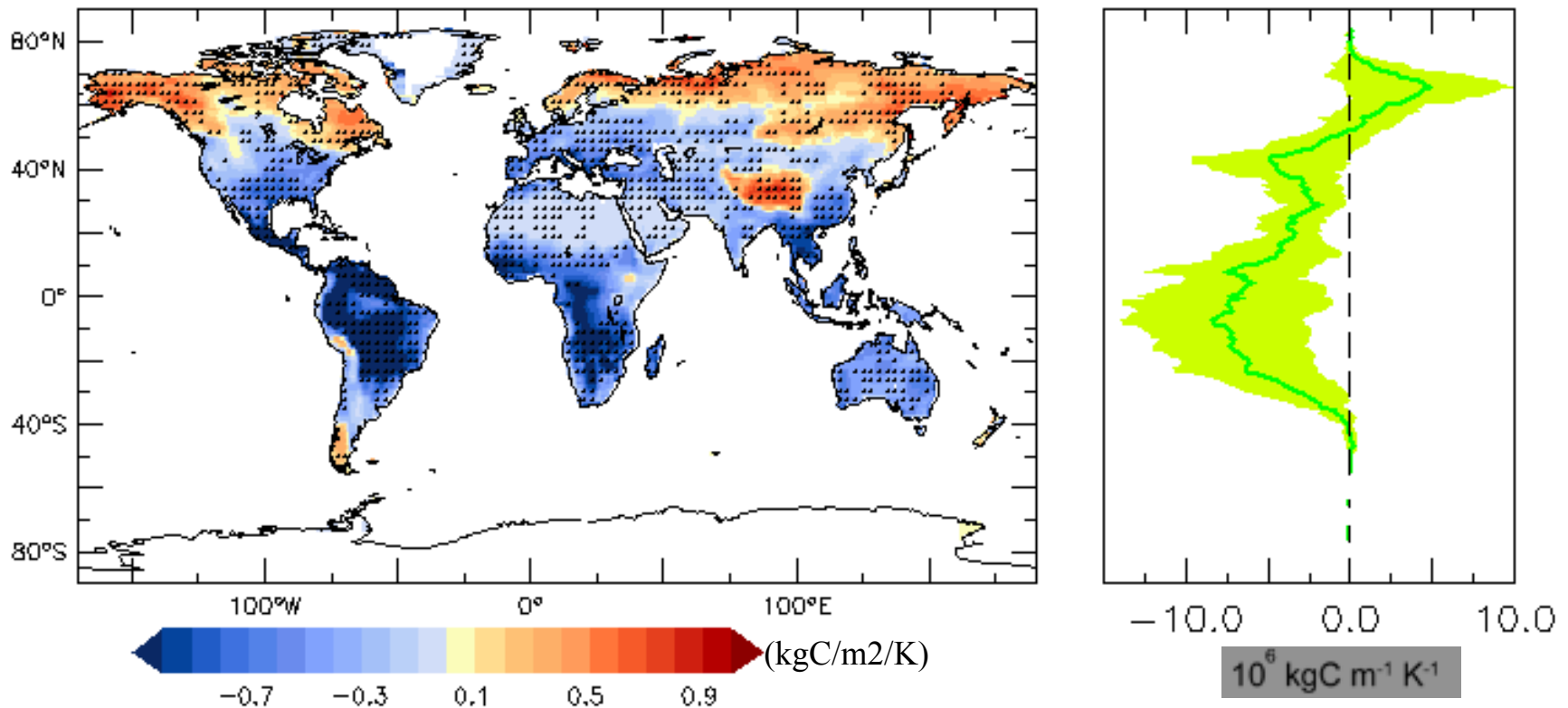
(Pointillés : robustesse inter-modèle)



$10^6 \text{ kgC m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Analyse des différents termes : Biosphère Terrestre et Climat

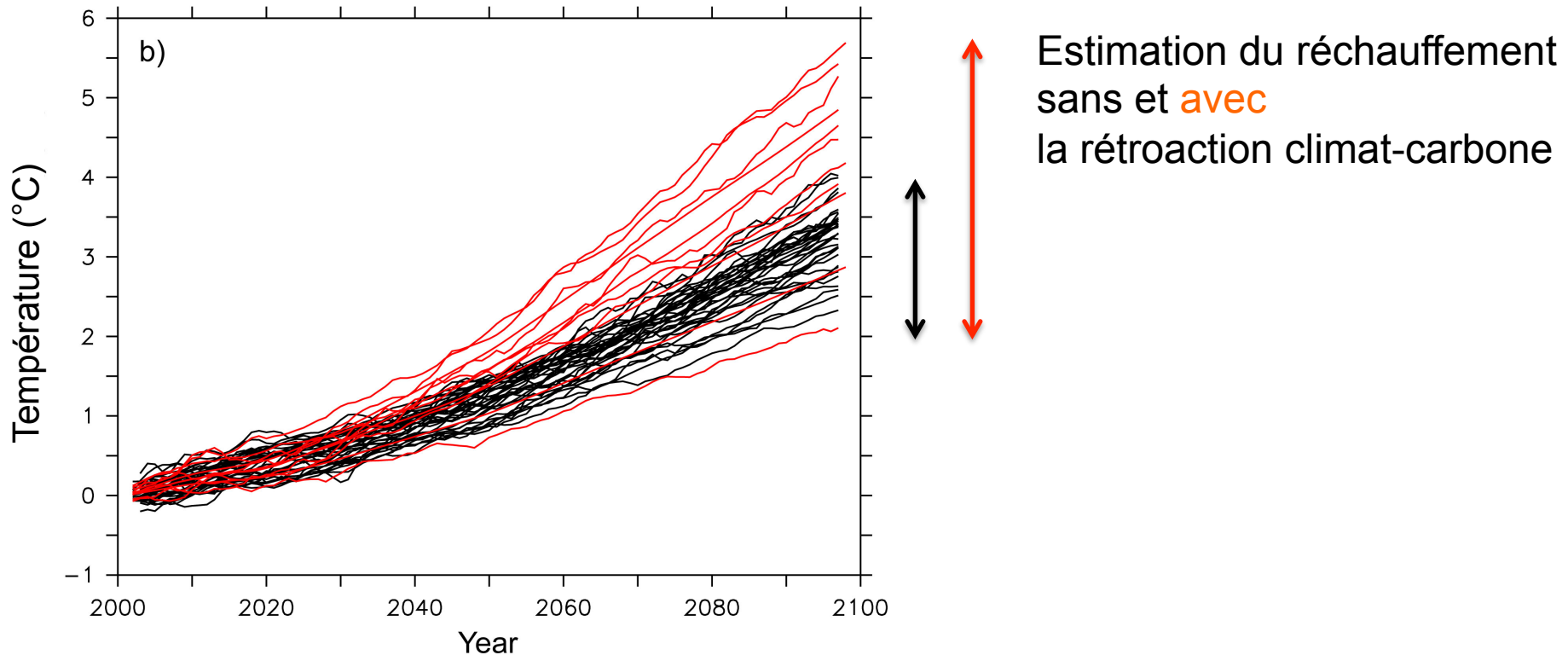
- Valeurs positives aux hautes latitudes / Négative aux basses latitudes
- Distribution robuste entre les modèles, mais pas pour l'amplitude
- Processus : T / respiration C sol, précipitation / photosynthèse, durée saison,



(Stippling denotes robustness – when 80% of models show same sign)

Comment contraindre cette rétroaction ?

(en utilisant des observations...)



L'amplitude de la rétroaction est estimée (avec les modèles) entre 2-3 et 15 ppm/°C

Comment contraindre cette rétroaction ?

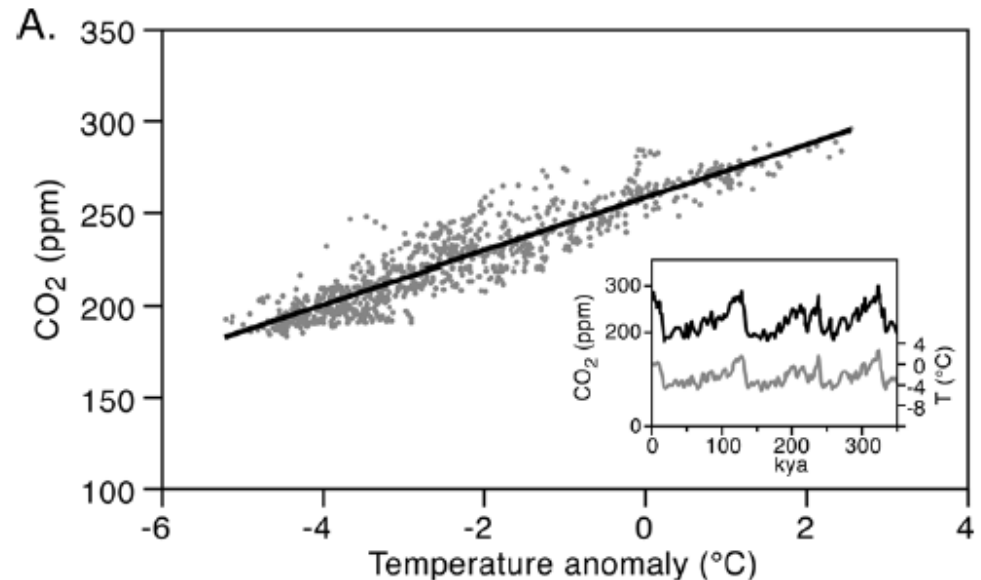
(en utilisant des observations...)

■ En utilisant les cycles glaciaires / interglaciaires

> entre 8.7 et 12.5 ppm / °C

Mais les processus impliqués
sont très différents –

Ce n'est pas un bon analogue
pour les 100 prochaines années

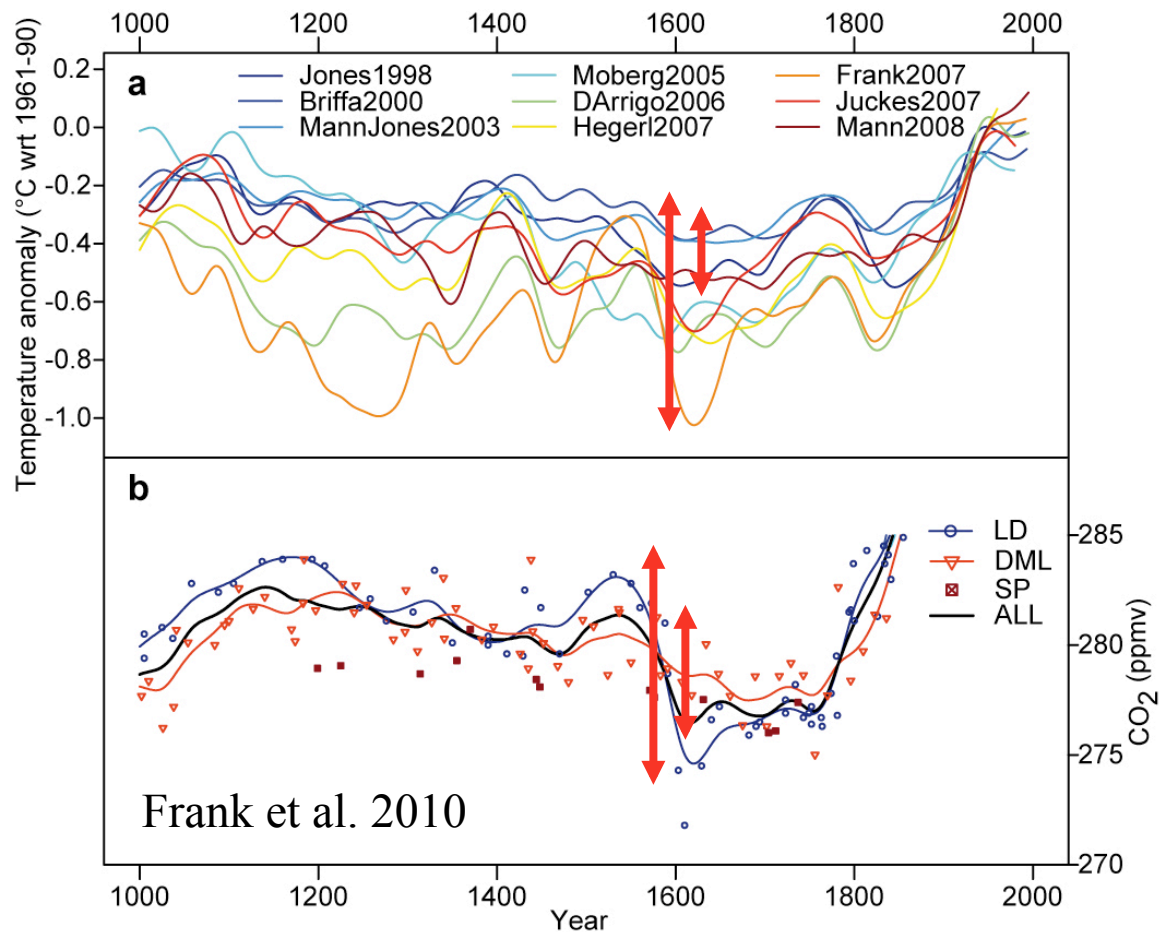


(Sheffer et al. 2006,
Torn and Harte 2006, ...)

Comment contraindre cette rétroaction ?

(en utilisant des observations...)

En utilisant le dernier millénaire



Variations de CO₂ et de température reconstruites pour le dernier millénaire

Comment contraindre cette rétroaction ?

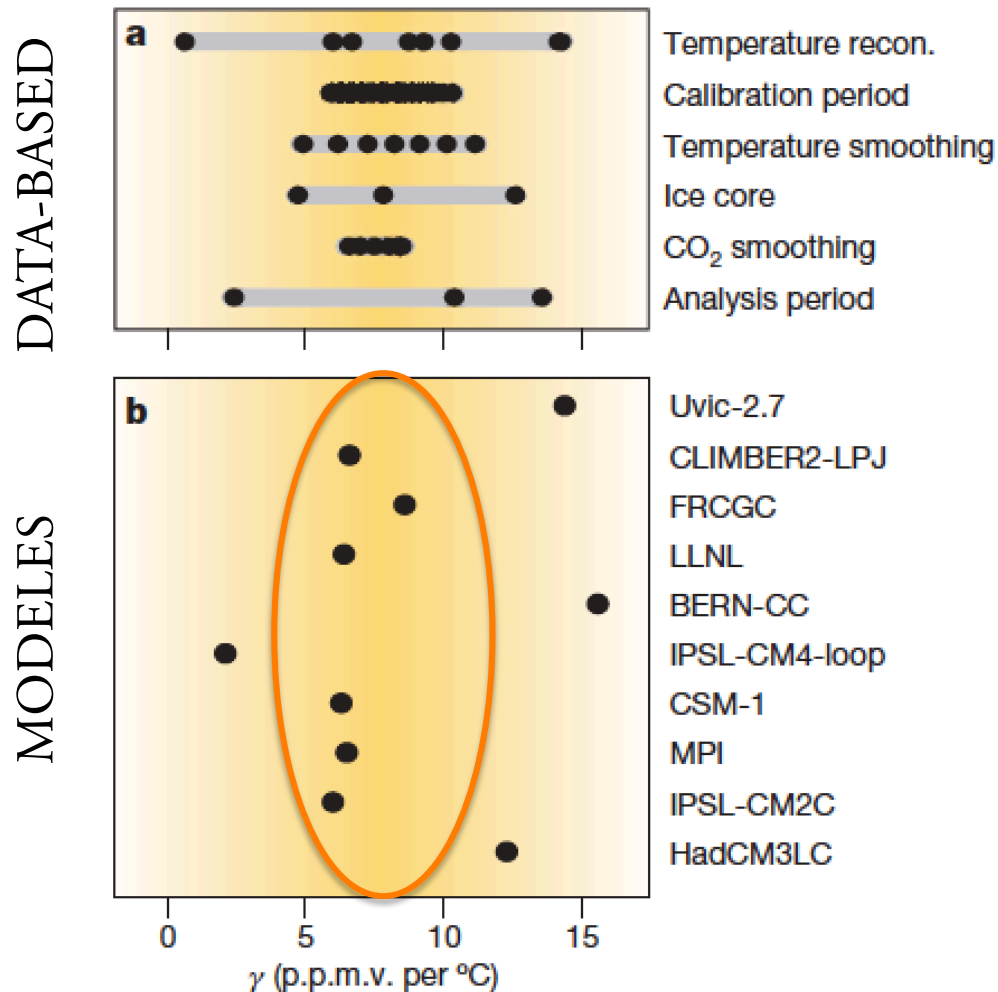
(en utilisant des observations...)

■ En utilisant le dernier millénaire

> 7.7 ppm/°C (1.7-21.4)

Confirme la rétroaction positive

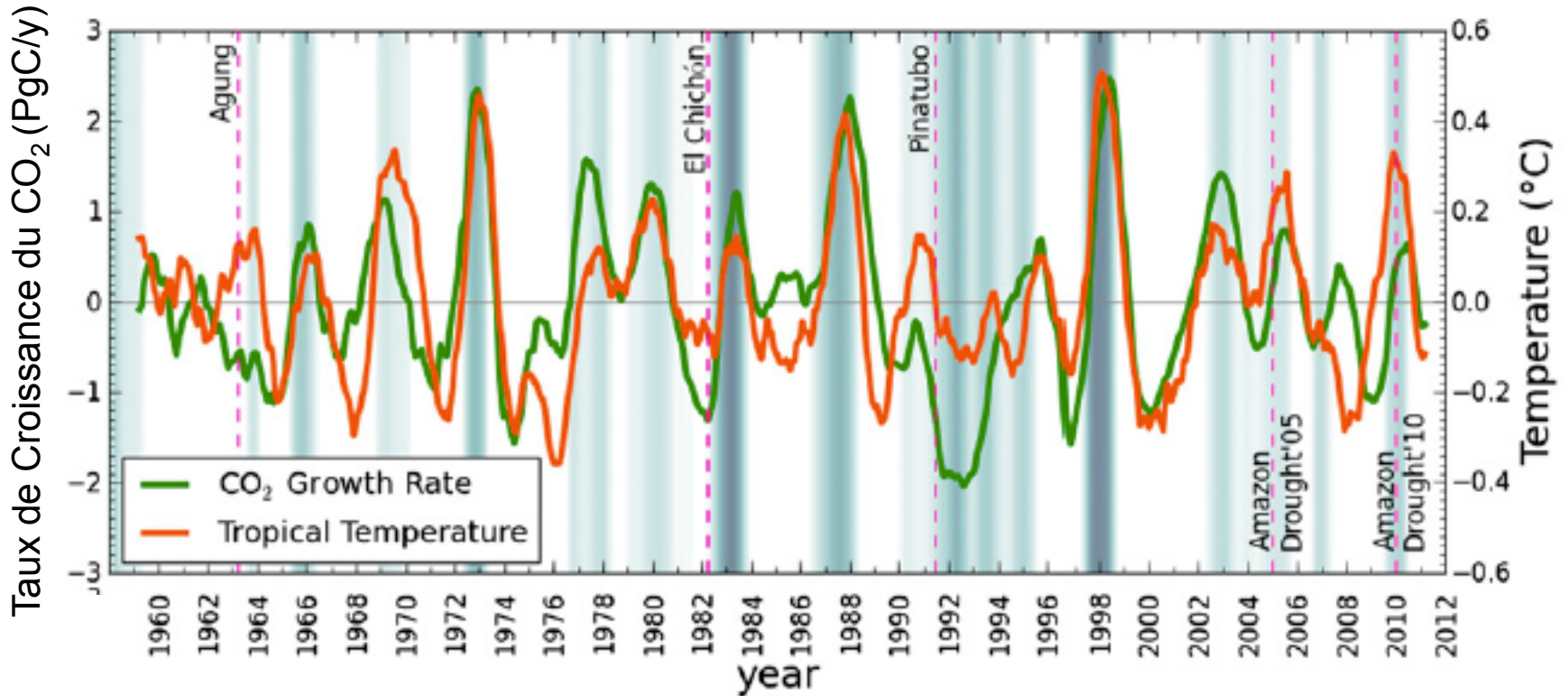
Incompatible avec les valeurs très élevées de la rétroaction



Comment contraindre cette rétroaction ?

(en utilisant des observations...)

En utilisant la variabilité interannuelle



Comment contraindre cette rétroaction ?

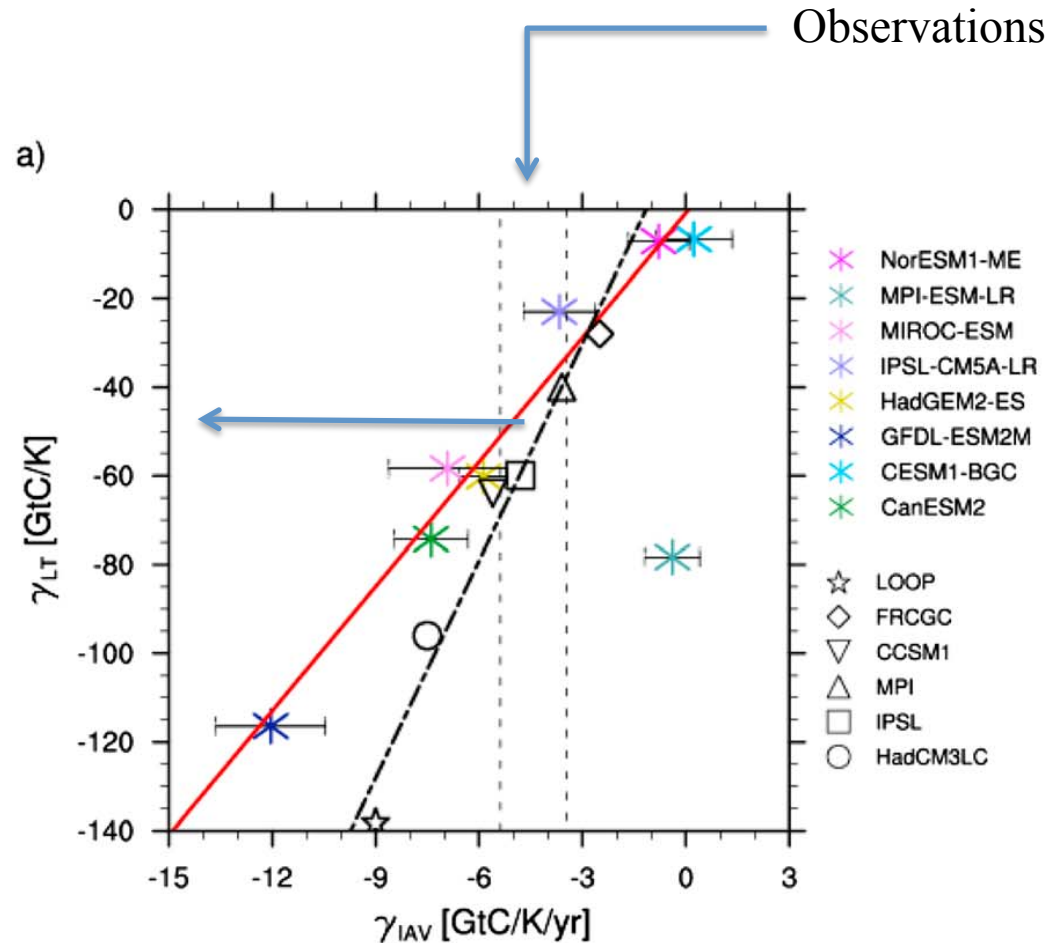
(en utilisant des observations...)

En utilisant la variabilité interannuelle

→ Les observations permettent d'estimer la sensibilité de la biosphère tropicale au climat sur des échelles interannuelles

→ L'analyse des modèles climat-carbone montre une relation entre cette valeur (γ_{IAV}) et la même valeur pour le 21^{ème} siècle (γ_{LT})

→ Cette méthode permet aussi de confirmer une rétroaction positive, plutôt dans le bas de la gamme des valeurs estimées aujourd'hui



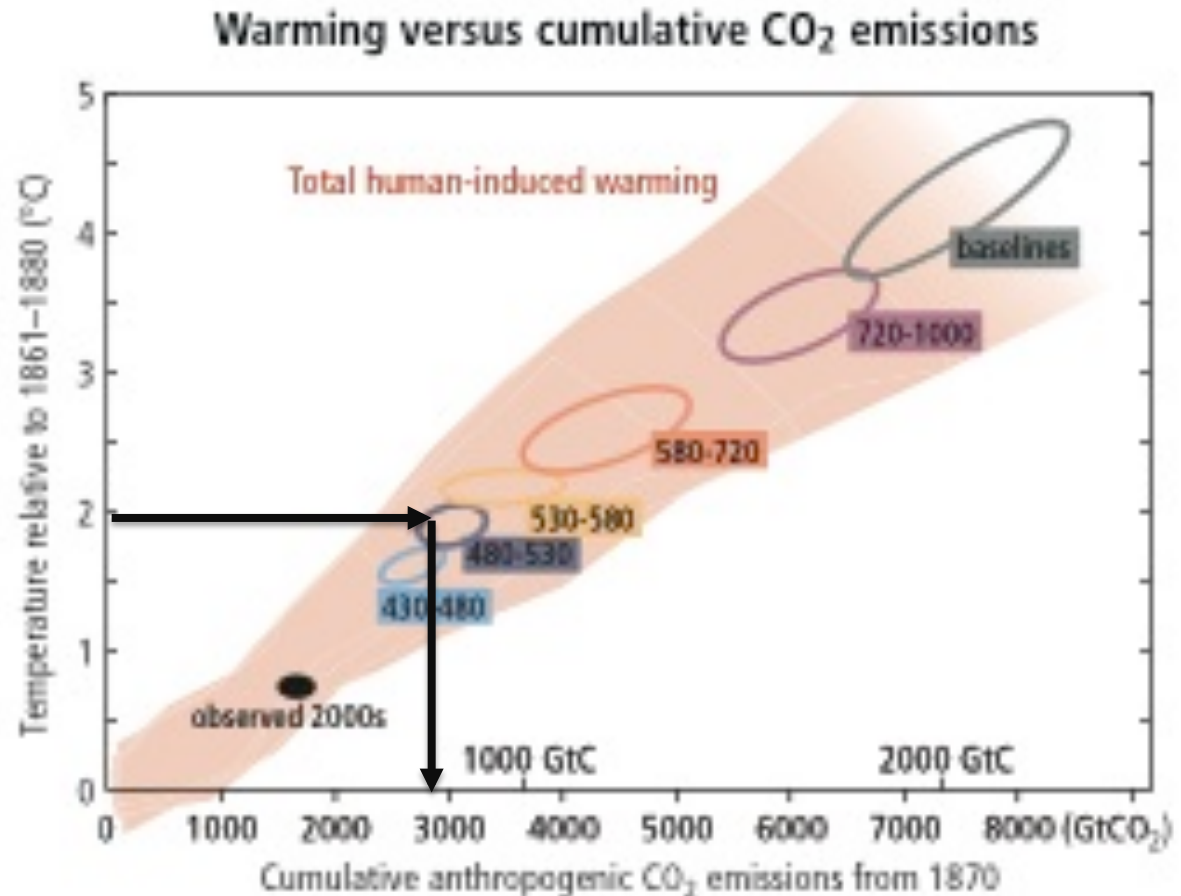
Conclusions et Implications

- Une rétroaction climat-carbone **positive**, mais **modérée**
- Plusieurs processus ne sont pas inclus dans ces estimations (permafrost, limitations par certains nutriments, physique haute résolution, ...)

Conclusions et Implications

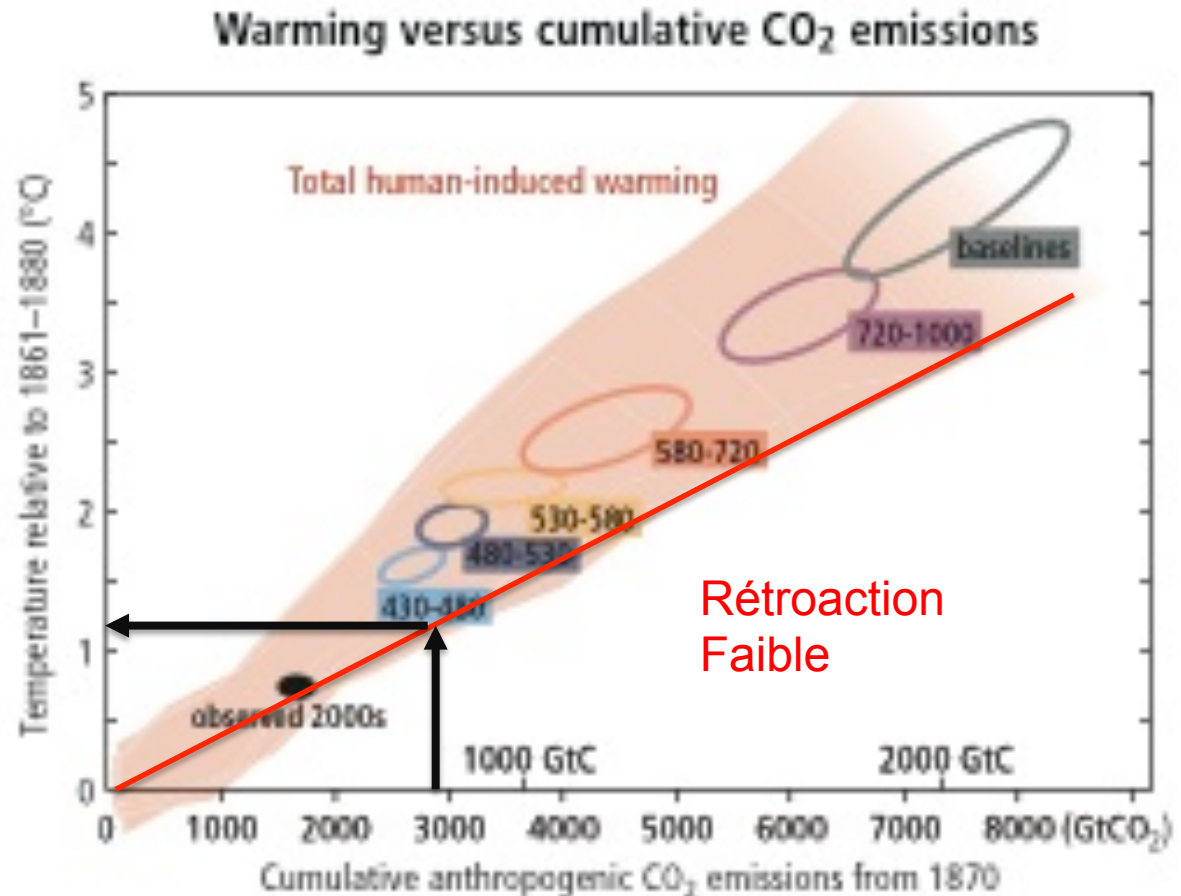
- Une rétroaction climat-carbone **positive**, mais **modérée**
- Plusieurs processus ne sont pas inclus dans ces estimations (permafrost, limitations par certains nutriments, physique haute résolution, ...)
- Une implication politique pour les niveaux d'atténuation....

< 2°C
pour une émission
cumulée de 2900 PgCO₂



Conclusions et Implications

- Une rétroaction climat-carbone **positive**, mais **modérée**
- Plusieurs processus ne sont pas inclus dans ces estimations (permafrost, limitations par certains nutriments, physique haute résolution, ...)
- Une implication politique pour les niveaux d'atténuation....



Conclusions et Implications

- Une rétroaction climat-carbone **positive**, mais **modérée**
- Plusieurs processus ne sont pas inclus dans ces estimations (permafrost, limitations par certains nutriments, physique haute résolution, ...)
- Une implication politique pour les niveaux d'atténuation....

... ou $> 2^{\circ}\text{C}$
pour le même niveau
d'émissions

