

Le Cycle du carbone présent et futur : Entre certitudes et incertitudes

Jean-Louis Dufresne



Laboratoire de météorologie dynamique

avec le concours de :



Laurent Bopp, Laboratoire de sciences du climat et de l'environnement

Philippe Bousquet, Laboratoire de sciences du climat et de

l'environnement

Pierre Monterey, Laboratoire de sciences du climat et de

l'environnement



PLAN

Partie 1 : Le présent

1-1. Cycle du carbone actuel : Flux et réservoirs

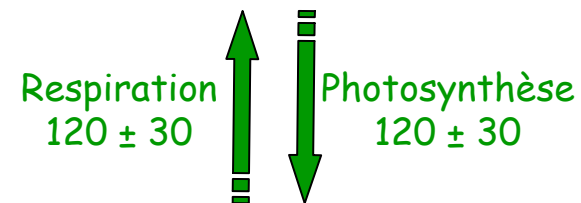
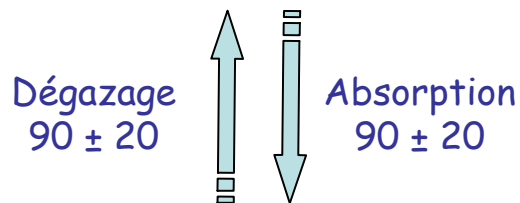
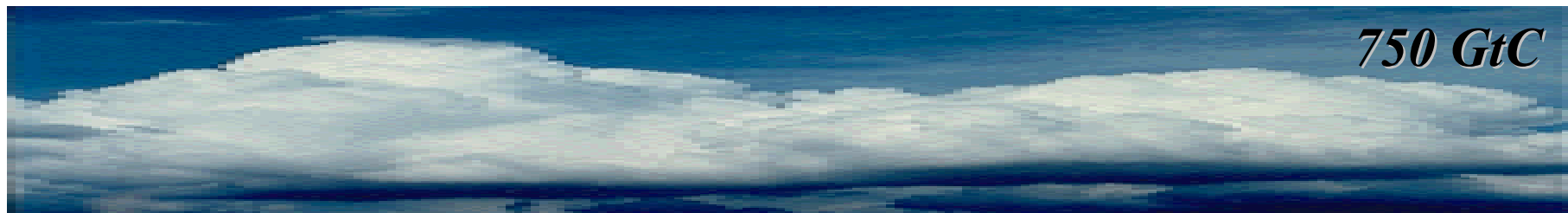
1-2. Méthodes d'évaluation des sources et puits de CO_2

Partie 2 : Le futur

2-1. Le Cycle du Carbone contrôle le Climat

2-2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

Le bilan global actuel «naturel» du CO₂ en GtC an⁻¹ (1 GtC = 10¹⁵gC)



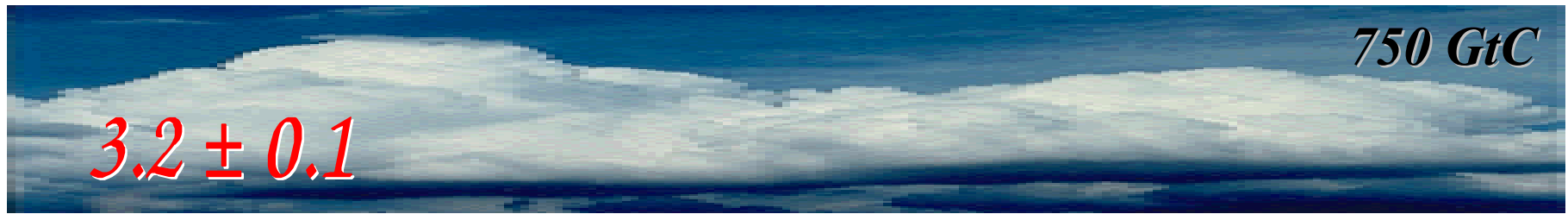
Flux annuels années 1990
Stocks moyens réservoirs
Source : IPCC-TAR

Le bilan global actuel perturbé du CO₂ en GtC an⁻¹ (1 GtC = 10¹⁵gC)

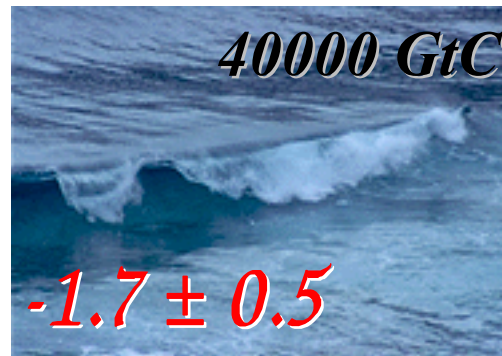


Flux annuels années 1990
Stocks moyens réservoirs
Source : IPCC-TAR

Le bilan global actuel perturbé du CO₂ en GtC an⁻¹ (1 GtC = 10¹⁵gC)



Source \uparrow fossile Puits \downarrow océanique Puits \downarrow biosphérique



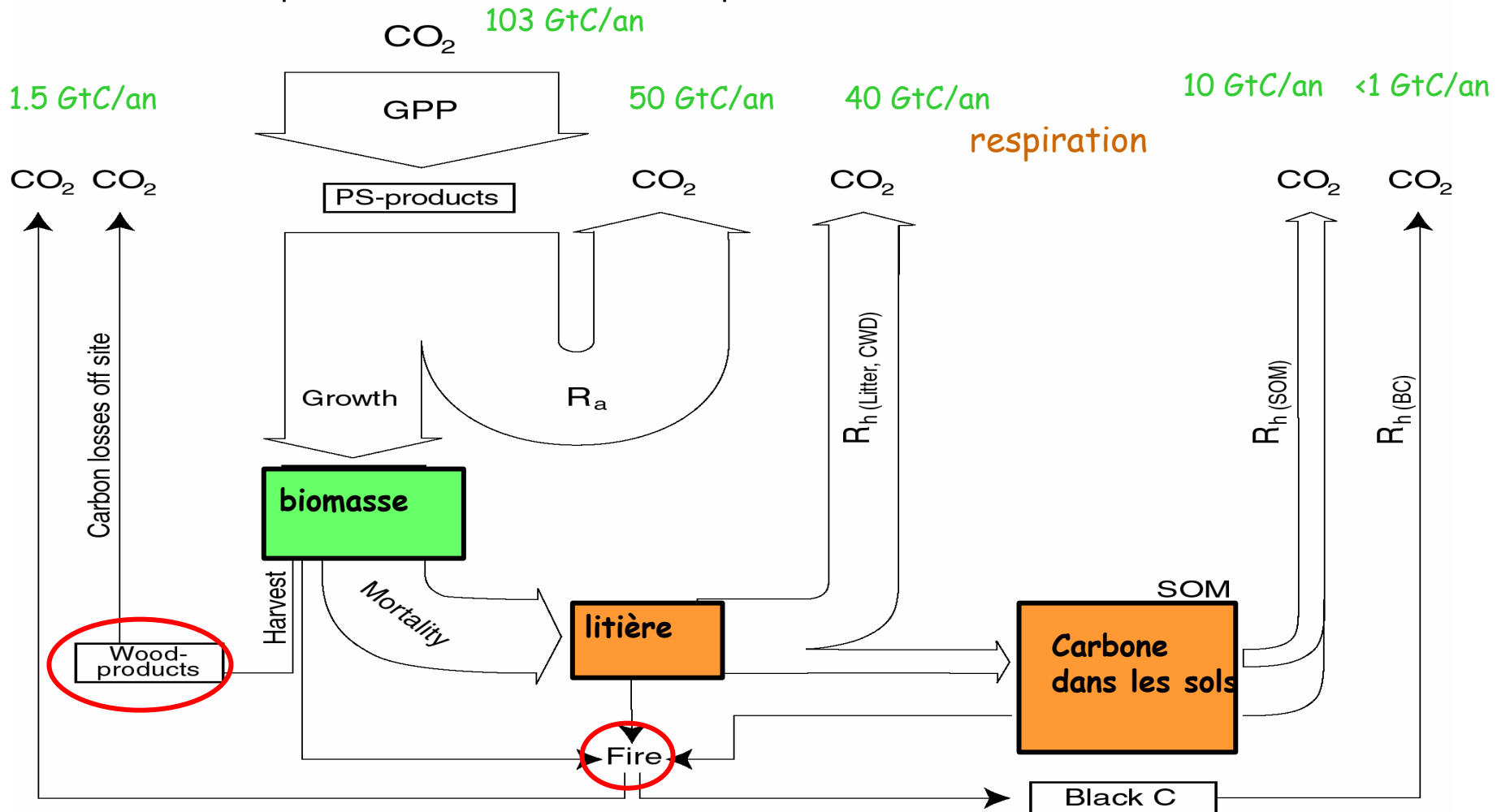
Flux annuels années 1990
Stocks moyens réservoirs
Source : IPCC-TAR

Le cycle du carbone continental

Bilan net long terme

Bilan net court terme

Production de biomasse



Les stocks de carbone dans la biosphère continentale

Biotope	Surf. 10 ⁶ km ²	Stocks de carbone GtC		
		Biomasse	Sol	Total
Forêts Tropicales	17.6	212	216	428
Forêts Tempérées	10.4	59	100	159
Forêts Boréales	13.7	88	471	559
Savannes	22.5	66	264	330
Prairies	12.5	9	295	304
Déserts	45.5	8	191	199
Toundra	9.5	6	121	127
Zones humides	3.5	15	225	240
Agrosystèmes	16.0	3	128	131
Total	151.2	466	2011	2477

WBGU 1998

Déserts Zones humides Prairies & cultures Savannes



Forêts boréales



Forêts tempérées

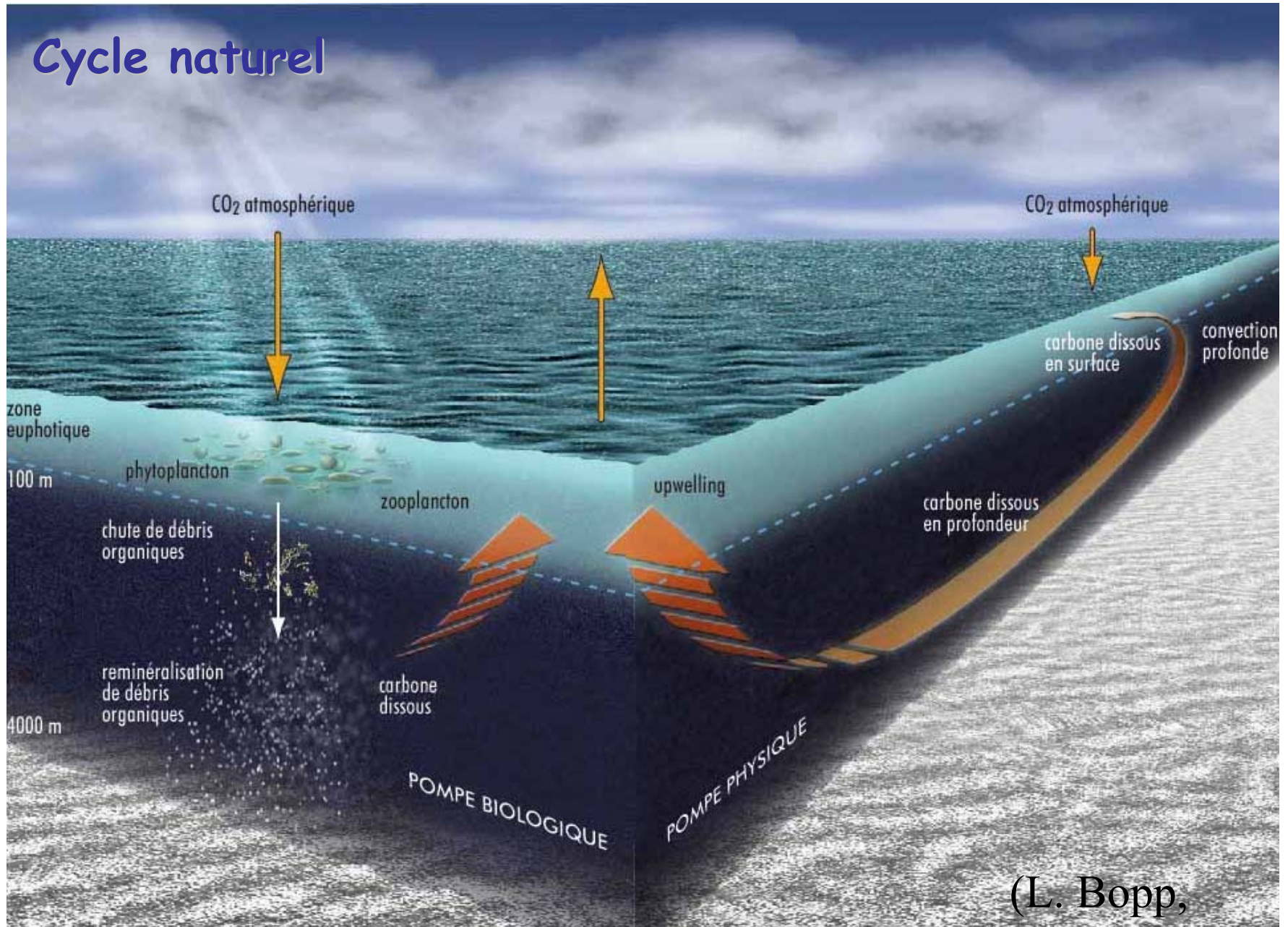


Forêts tropicales



Le Cycle du Carbone Océanique - 1

Cycle naturel



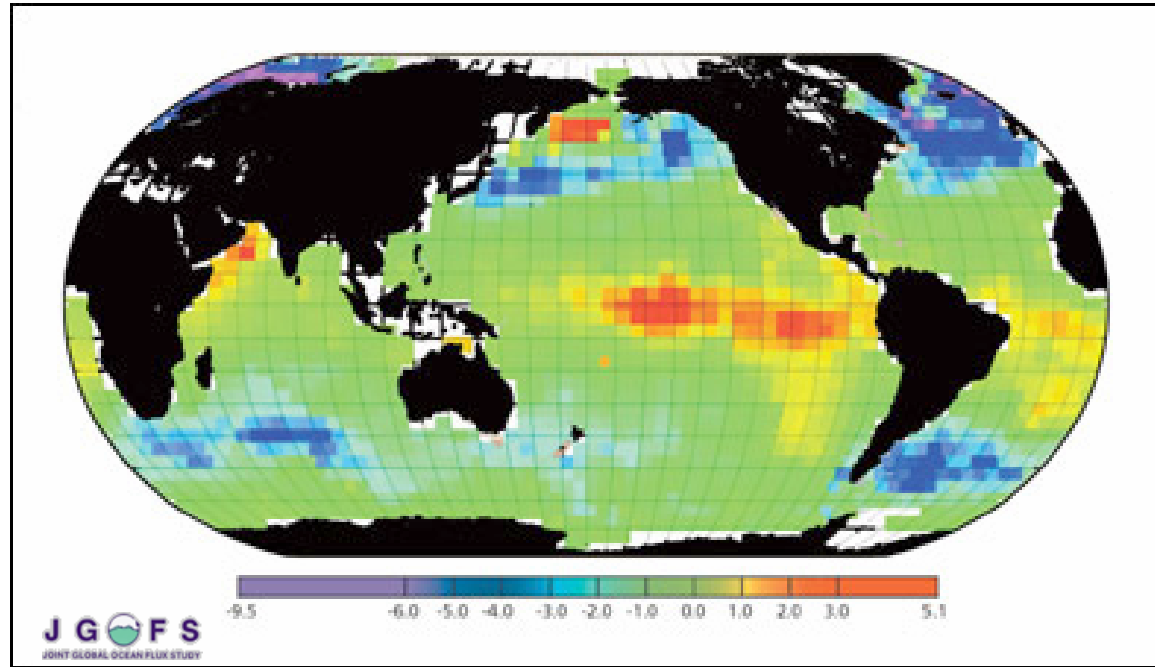
(L. Bopp,

2002)

Le Cycle du Carbone Océanique - 6

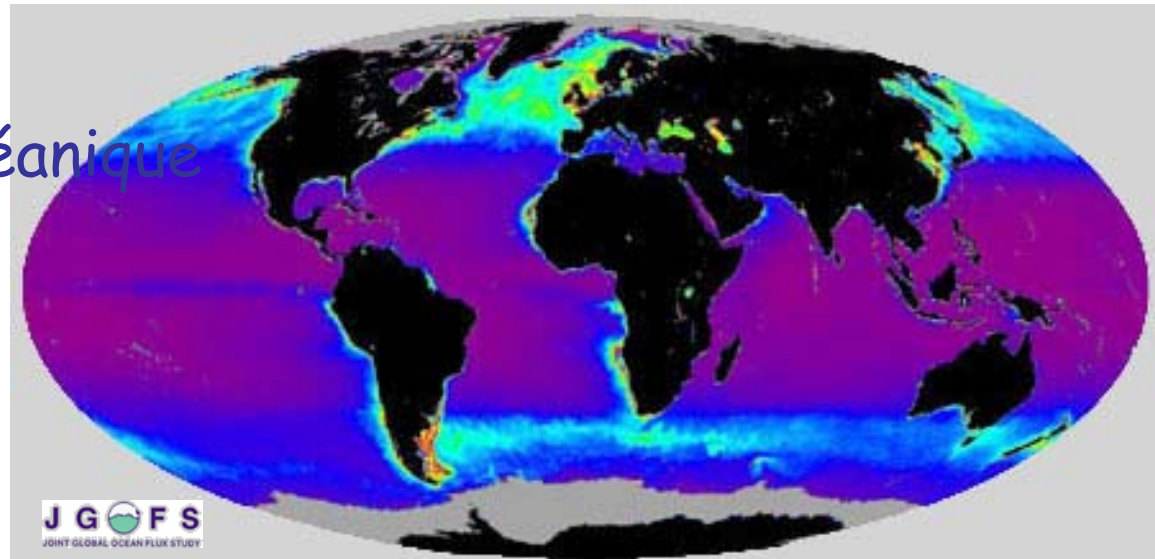
Flux air-mer de CO_2 (mol-C m⁻² a⁻¹)

Produit à partir de données
de ΔpCO_2 et d'un modèle



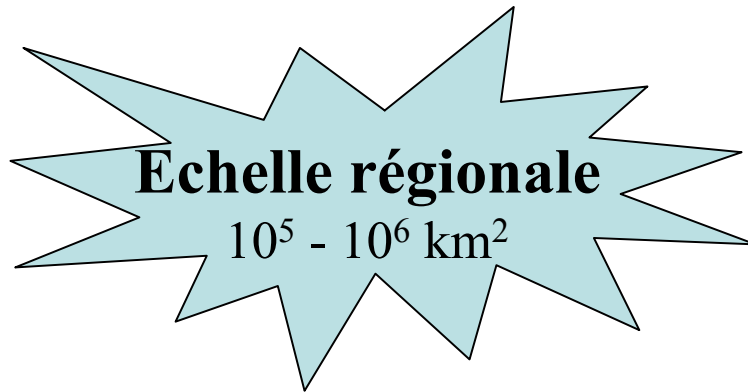
Production primaire océanique (mol-C m⁻² a⁻¹)

Produit à partir de données
Satellites (SeaWiFS) et de modèles



Comment estimer les flux de CO₂ ?

Modélisation inverse du transport atmosphérique



Inventaires forestiers
- local (1ha)

Tours de flux
(1-10 km²)

Mesures océaniques
Extrapolation des mesures de $\Delta p\text{CO}_2$

Modèles directs
- biosphériques
- Océaniques
(1-5000 km²)

Problème mal posé
Amplification de l'erreur

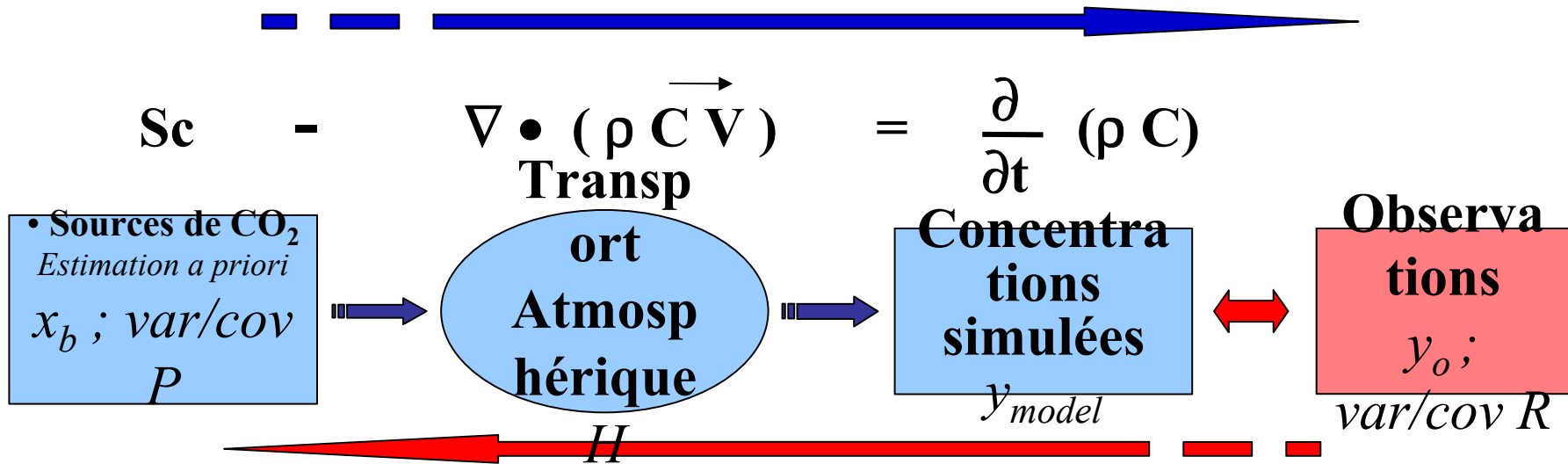
Approche descendante
(top-down)

Approche montante
(*Bottom-up*)

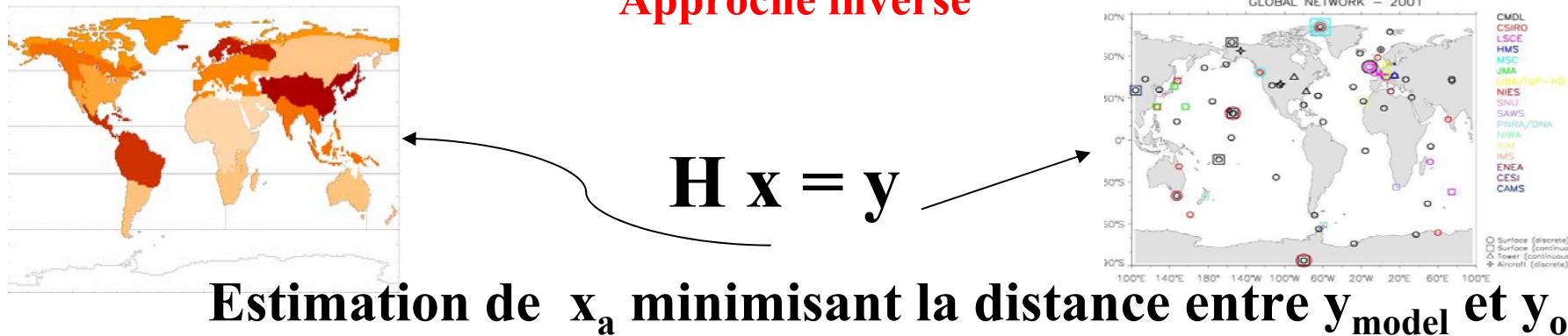
Extrapolation
Forte hétérogénéité

Inversion du transport atmosphérique - 1

Approche directe



Approche inverse



Estimation :
$$x_a = x_b + (H^T R^{-1} H + P^{-1})^{-1} H^T R^{-1} (y_o - H x_b)$$

Incertitudes :
$$P_a = (H^T R^{-1} H + P^{-1})^{-1}$$

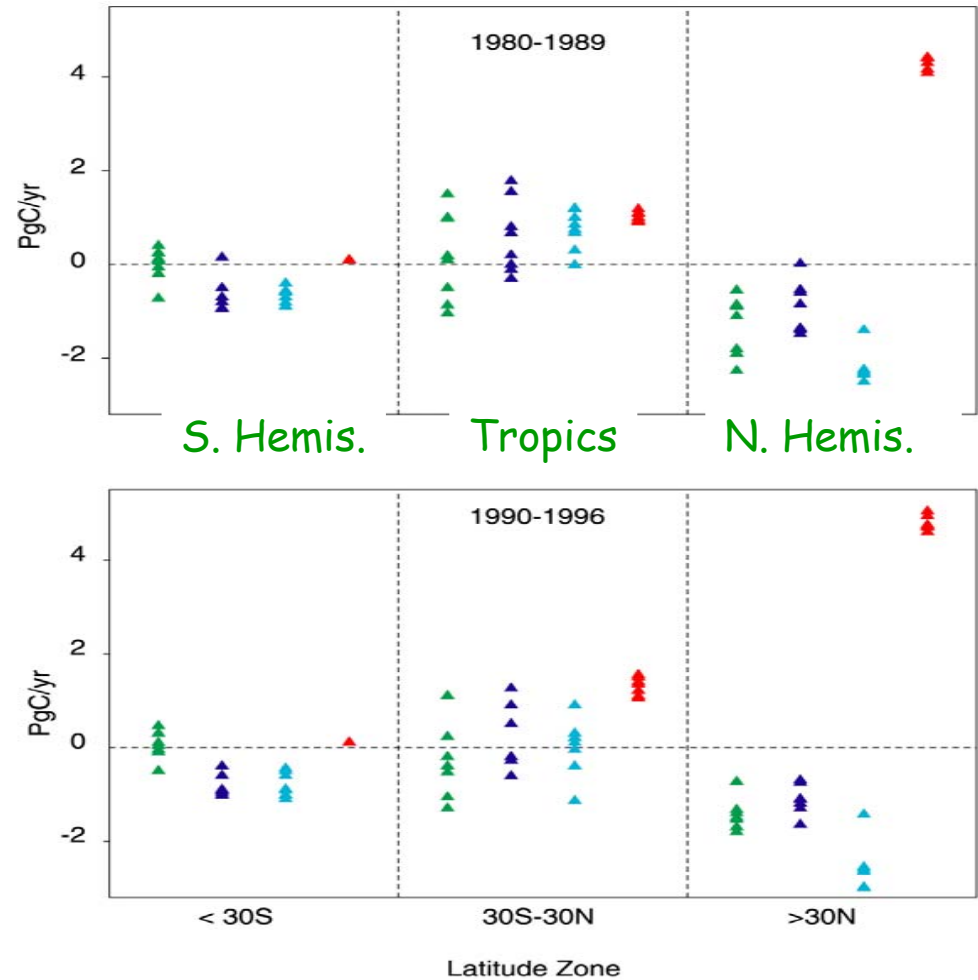
Inversion du transport atmosphérique - 3

Totaux par grandes bandes de latitude

Un puits continental et océanique dans L'hémisphère Nord

Un puits océanique dans l'hémisphère sud

Grosses incertitudes aux tropiques



- ▲ land-atmosphere flux
- ▲ ocean-atmosphere flux
- ▲ sum of ocean-atmosphere and land-atmosphere fluxes
- ▲ fossil-fuel emissions

IPCC, 2001

« Conclusions - 1 »

- Chaque année entre 2 à 3 GtC rentrent dans la biosphère continentale et entre 1.5 à 2.5 GtC sont absorbés par les océans
- Puits important dans les moyennes lat. de l'H. N. (bio et océans)
- Puits tropical compensant la source de déforestation (mais incertitudes)
- Mécanismes ?
 - Peut être principalement fertilisation dans les tropiques, et combinaison de fertilisation, azote, gestion,... dans les zones tempérées.
- Les incertitudes restent grandes à l'échelle régionale par manque de données et à cause des faiblesses des modèles.
- Accord en ordre de grandeur entre les approches montantes et descendantes sur l'Europe

PLAN

Partie 1 : Le présent

1-1. Cycle du carbone actuel : Flux et réservoirs

1-2. Méthodes d'évaluation des sources et puits de CO_2

Partie 2 : Le futur

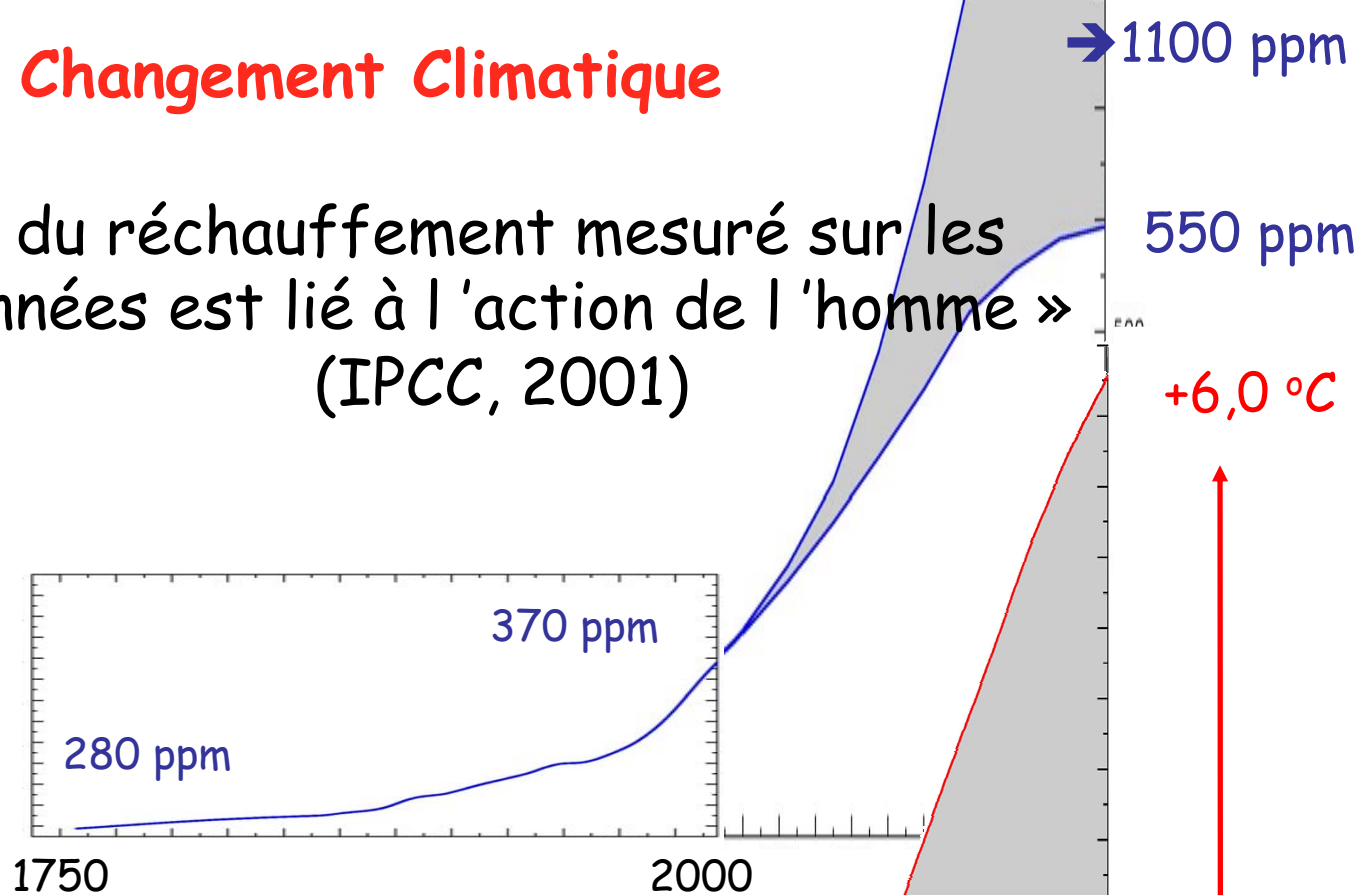
2-1. Le Cycle du Carbone contrôle le Climat

2-2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

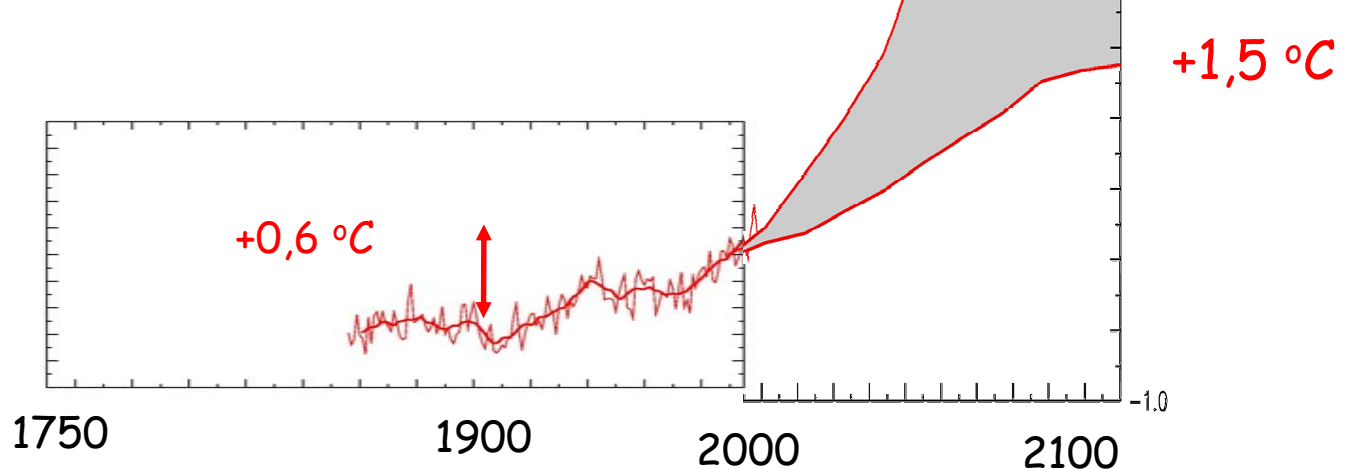
Contexte : Le Changement Climatique

« ... L'essentiel du réchauffement mesuré sur les 50 dernières années est lié à l'action de l'homme »
(IPCC, 2001)

pCO₂
atmosphérique
(ppm)

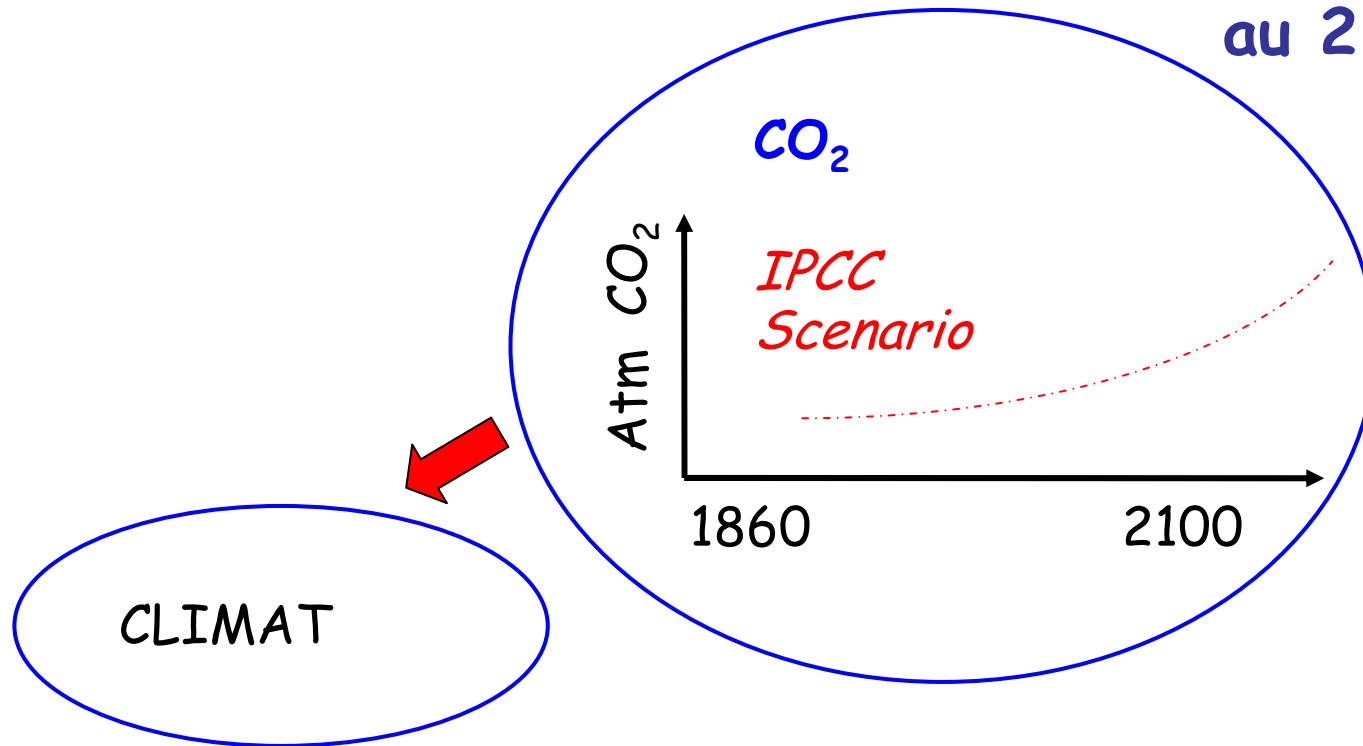


Température
de surface
(°C)



1. Le Cycle du Carbone contrôle le Climat

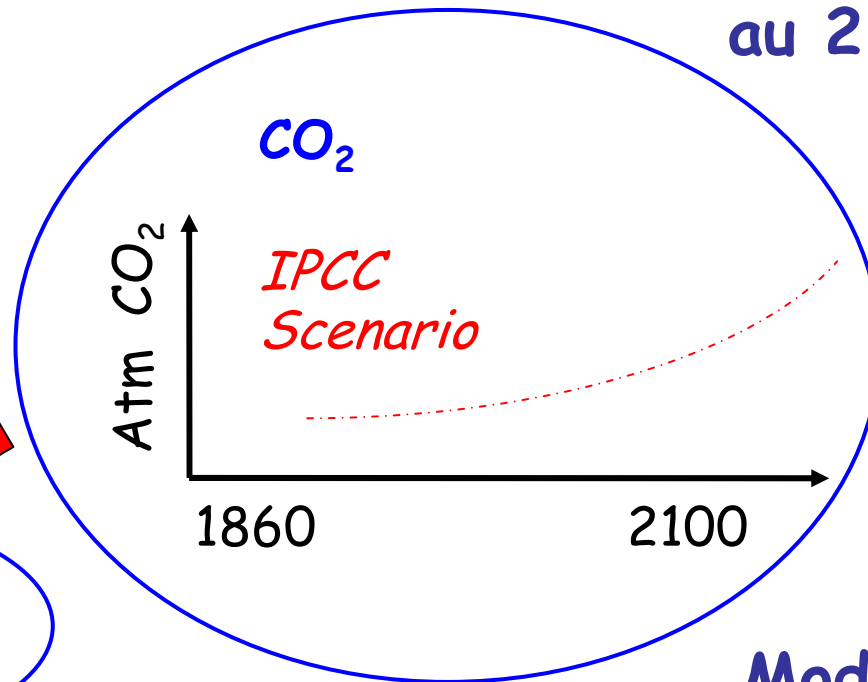
L'évolution du CO₂
au 21ème siècle



Modèles de
circulation générale

1. Le Cycle du Carbone contrôle le Climat

L'évolution du CO₂ au 21ème siècle

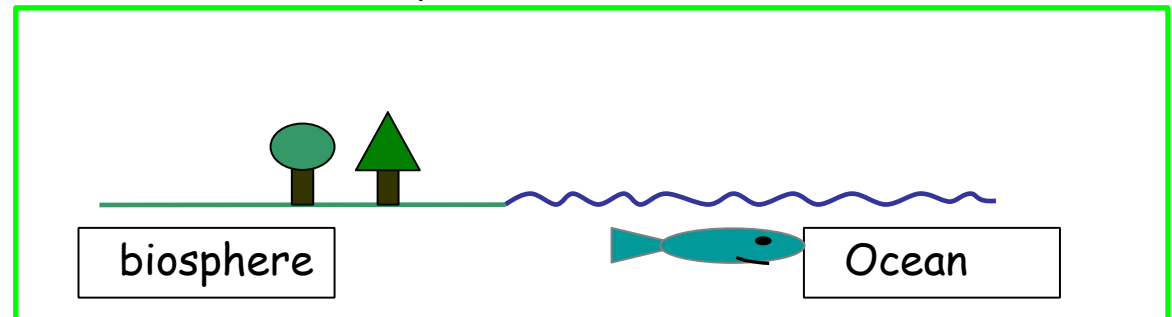


CLIMAT

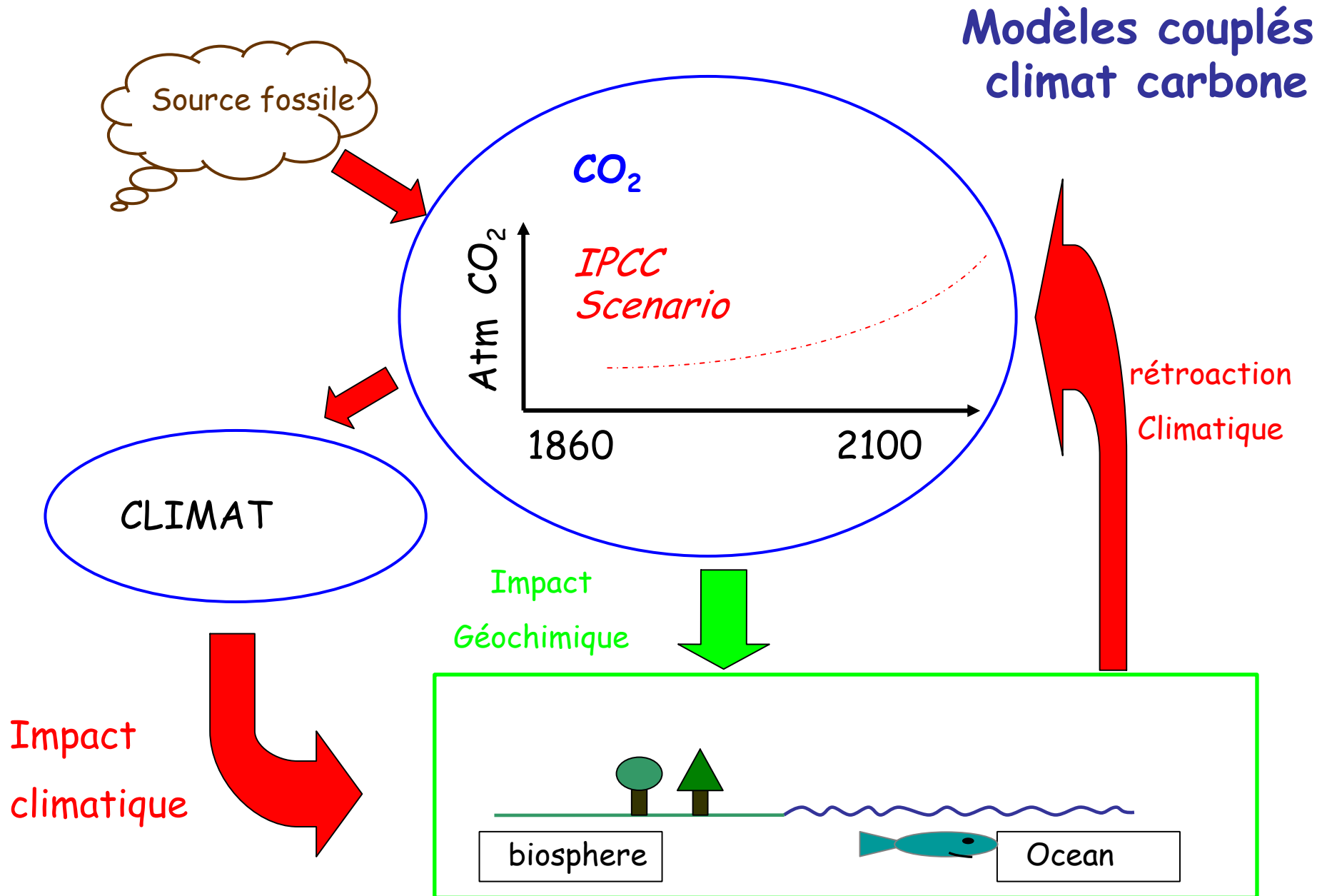
Modèles du cycle du carbone

Impact
Géochimique

Impact
climatique



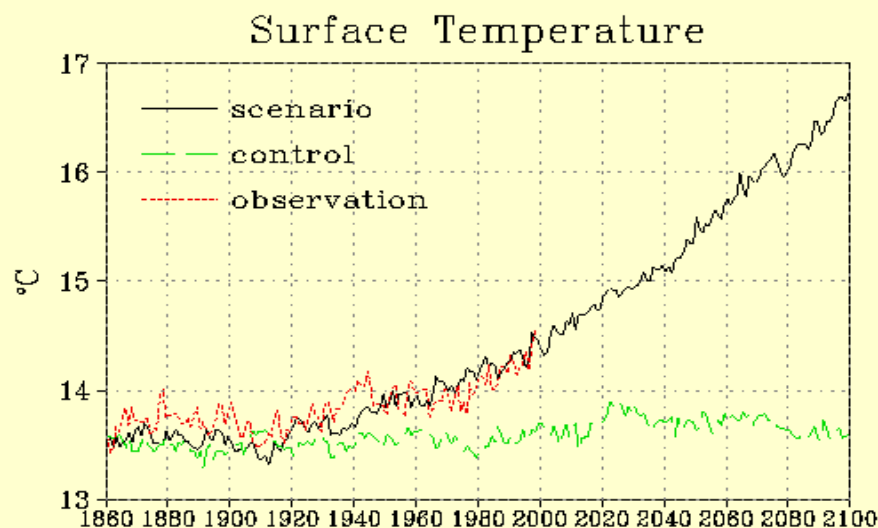
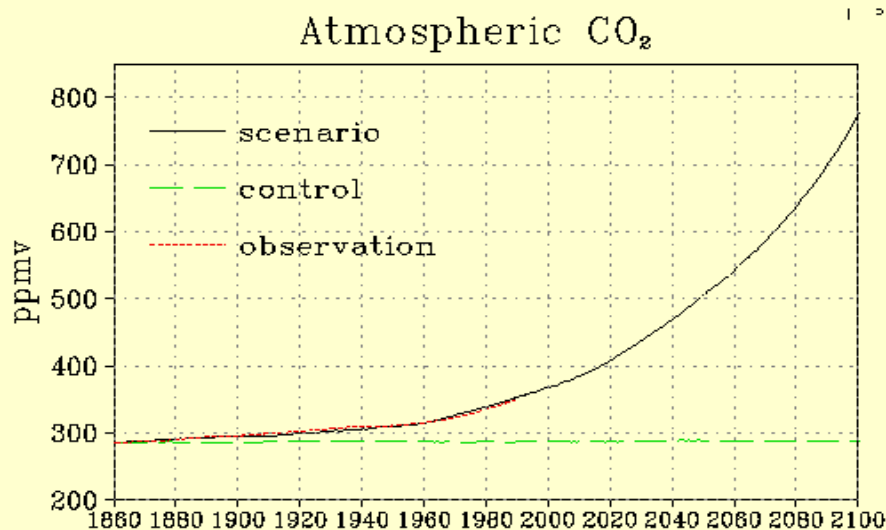
2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone



2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

Modélisation couplée climat-carbone

Scenario A2

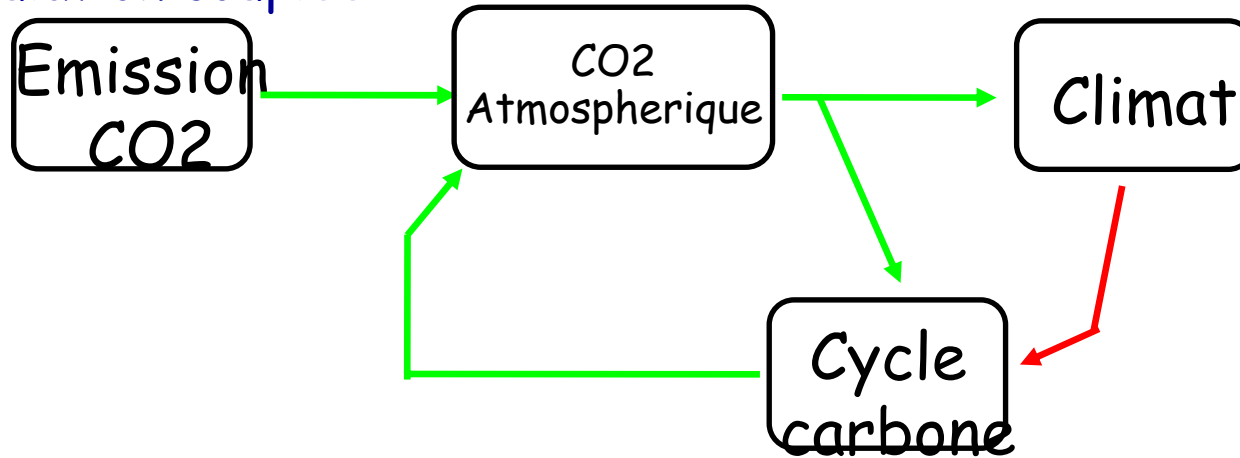


(Dufresne et al, 2002)

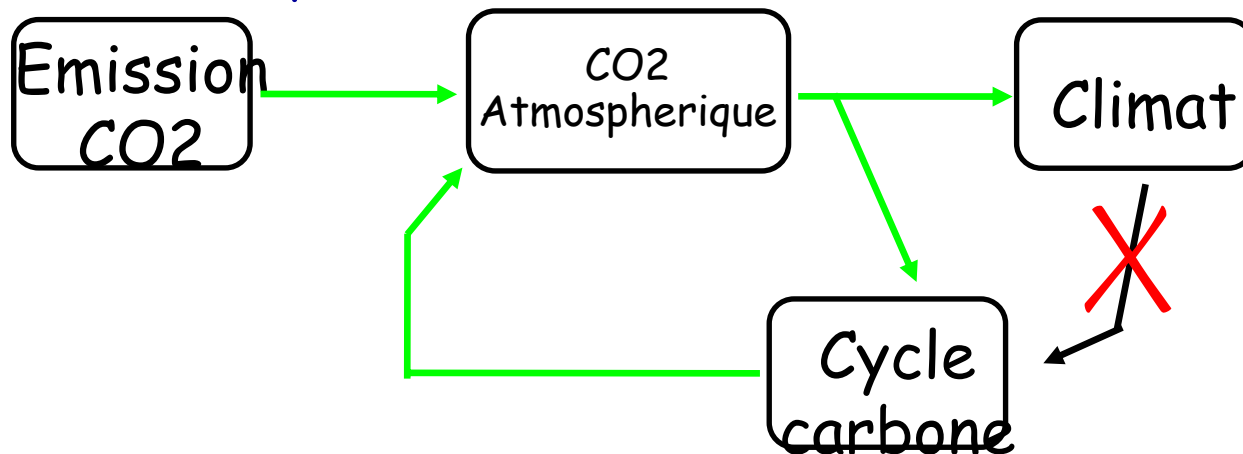
2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

Analyse rétroactions

A) Simulation couplée

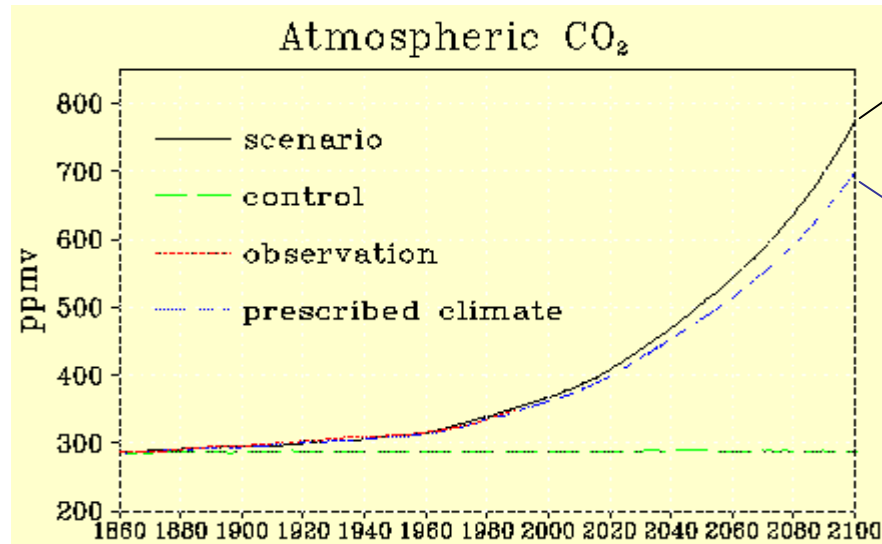


B) Simulation découplée



2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

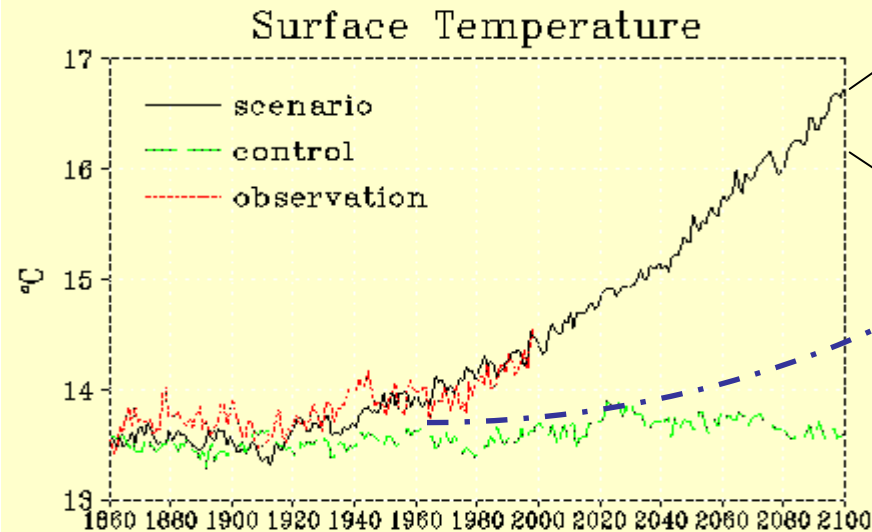
Rétroaction climat-carbone



couplée

rétroaction Positive

découplée



couplée

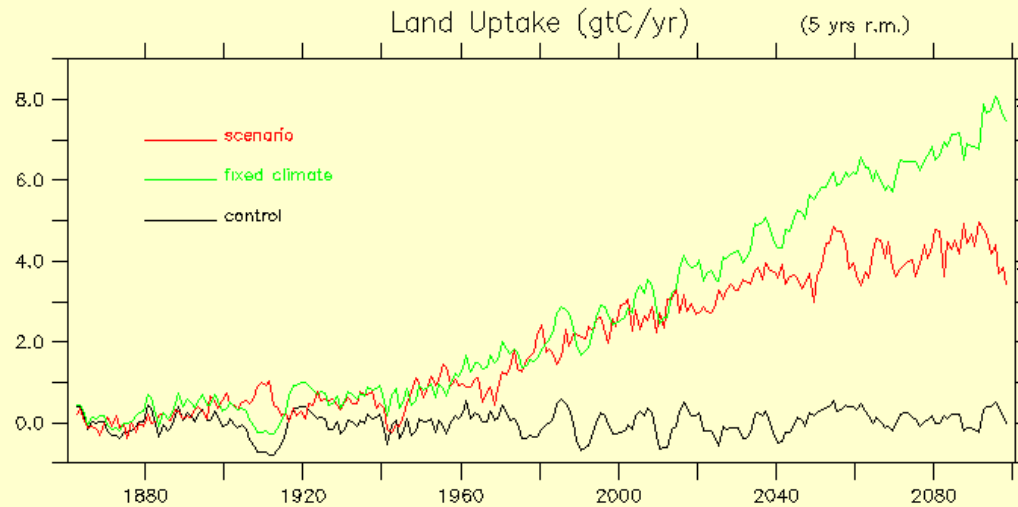
rétroaction Positive

découplée

2. Le Climat contrôle le Cycle du Carbone

Impact climat sur cycle C

Biosphère

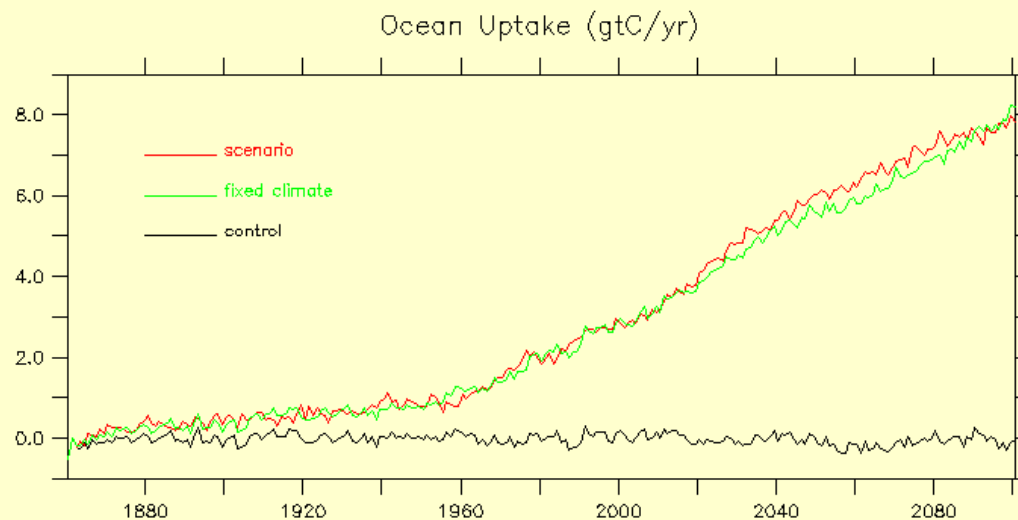


découplé

*Impact
Negatif*

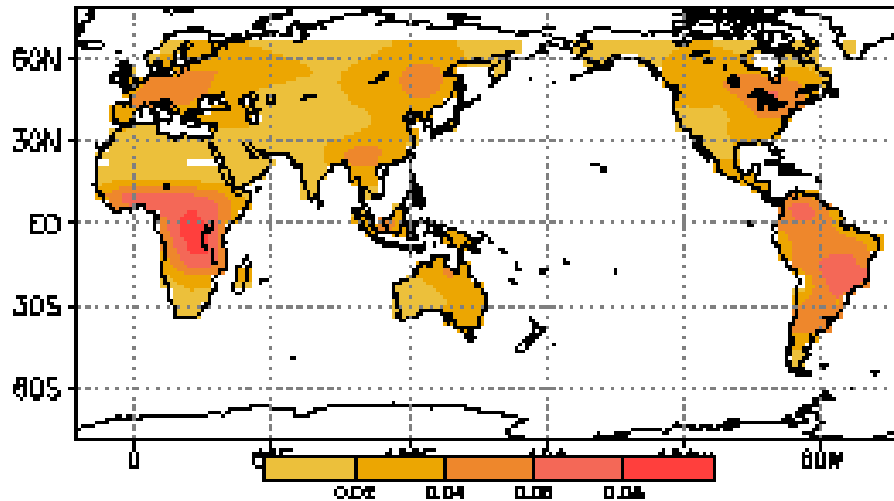
couplée

Océan



Variation du bilan net de carbone vers 2100

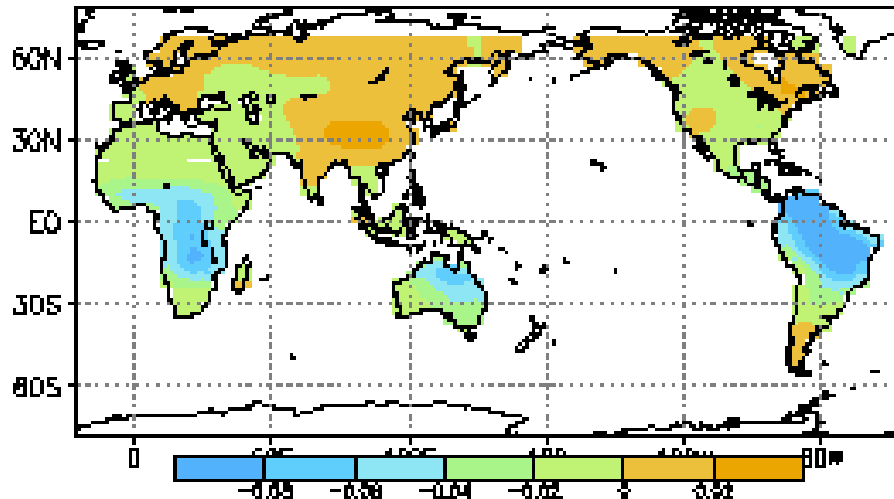
without climate feedback



Simulation découplée.

Impact de l'accroissement de CO₂ sur le puit de carbone

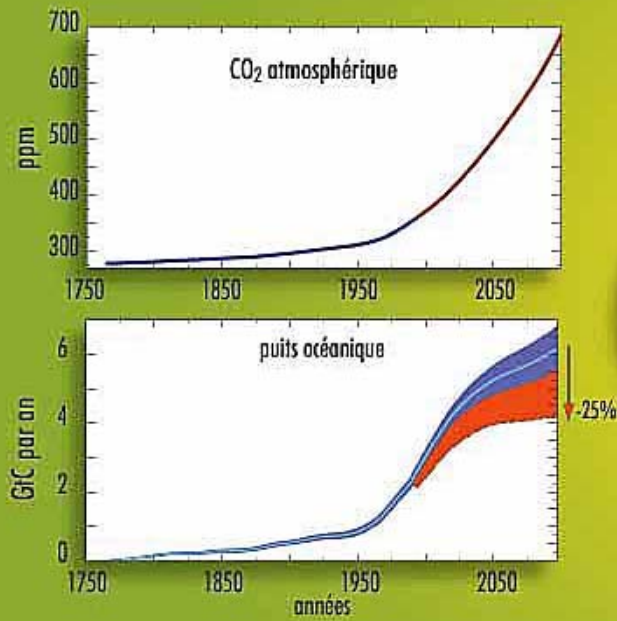
Climate impact



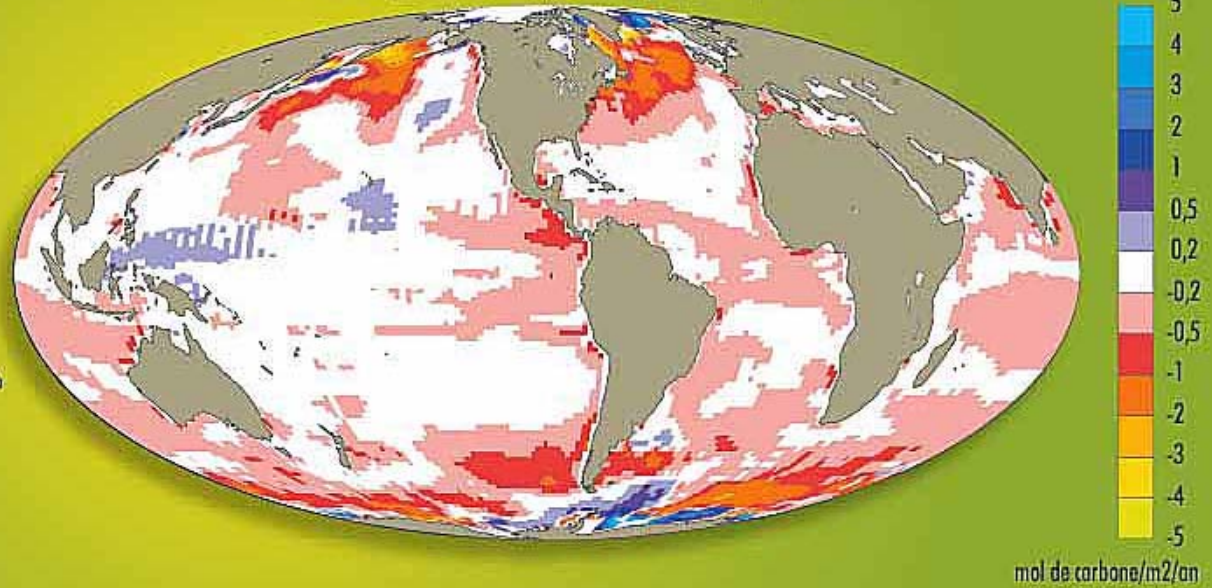
Différence entre simulation couplée et découplée.

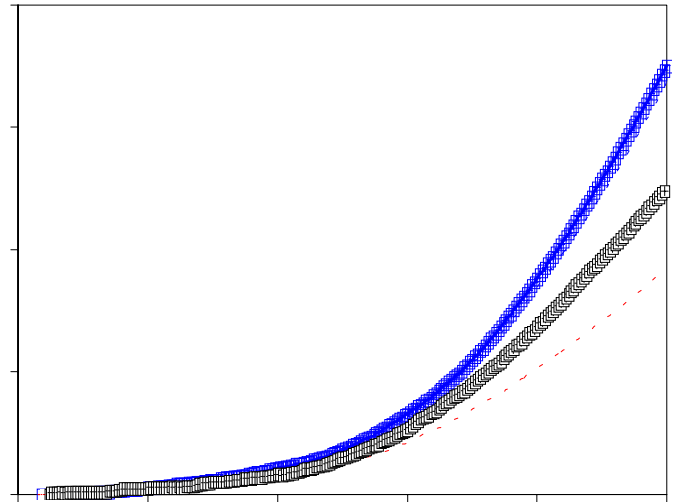
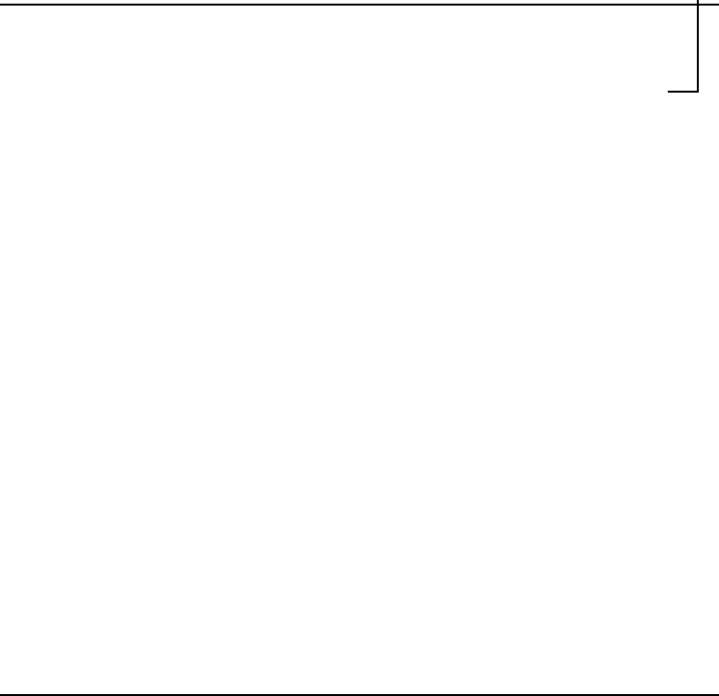
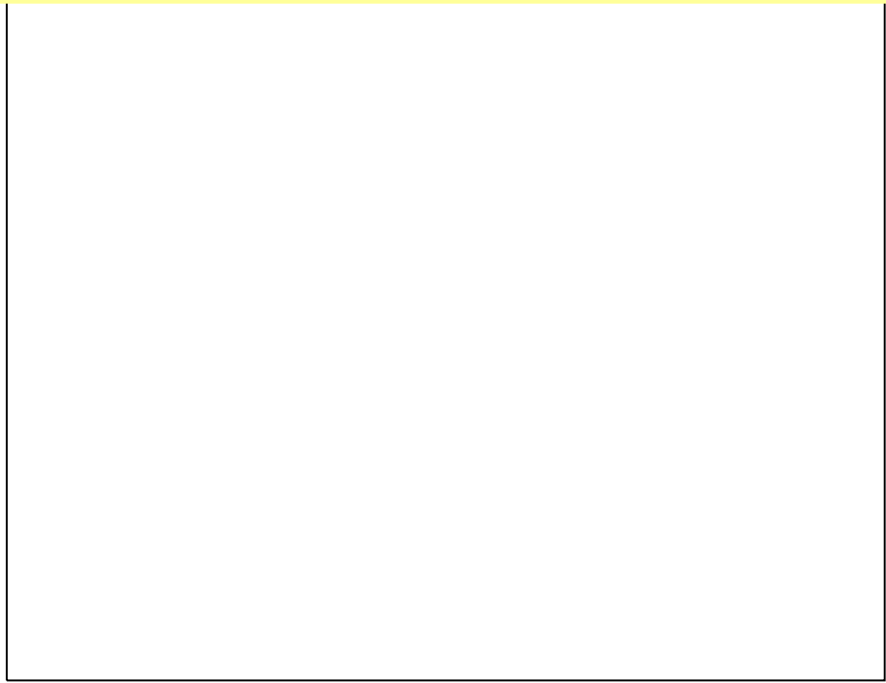
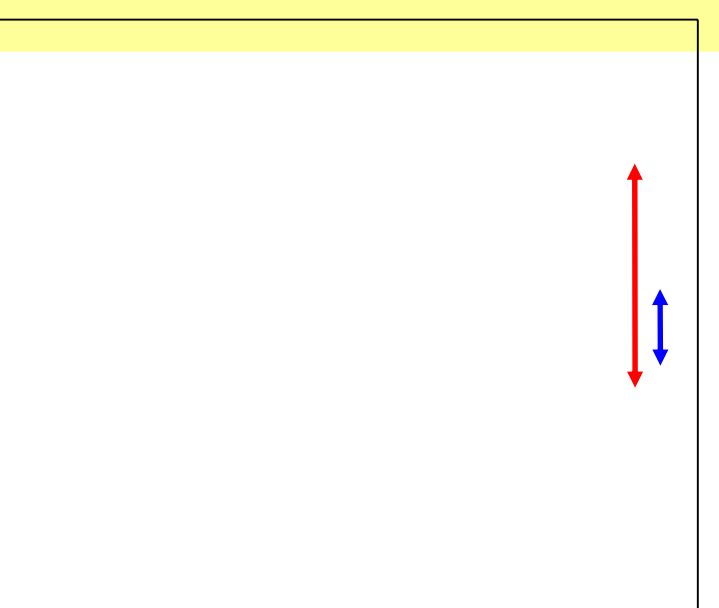
Impact du changement climatique le puit de carbone

Evolution du puits océanique de carbone

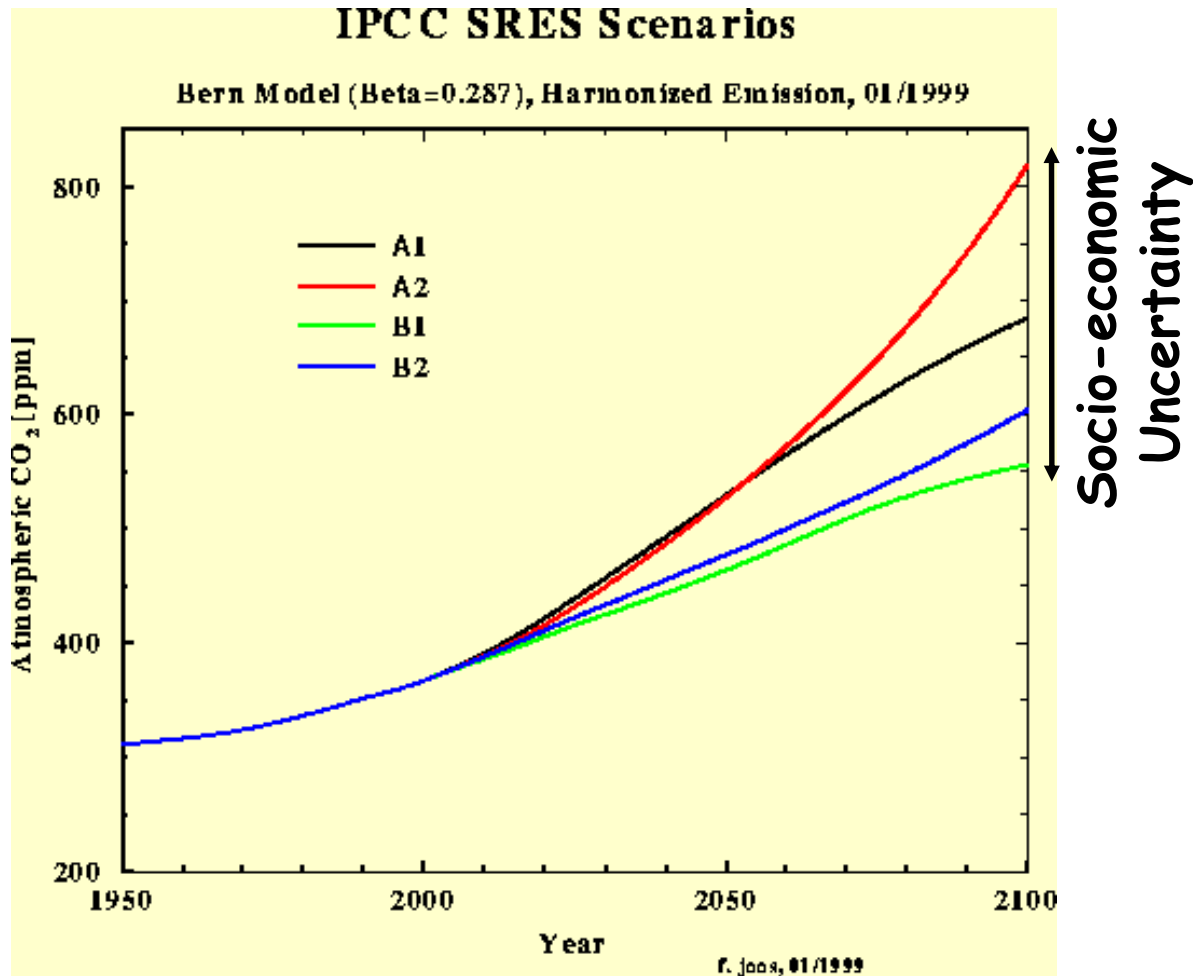


effet du changement climatique sur le puits océanique en 2100

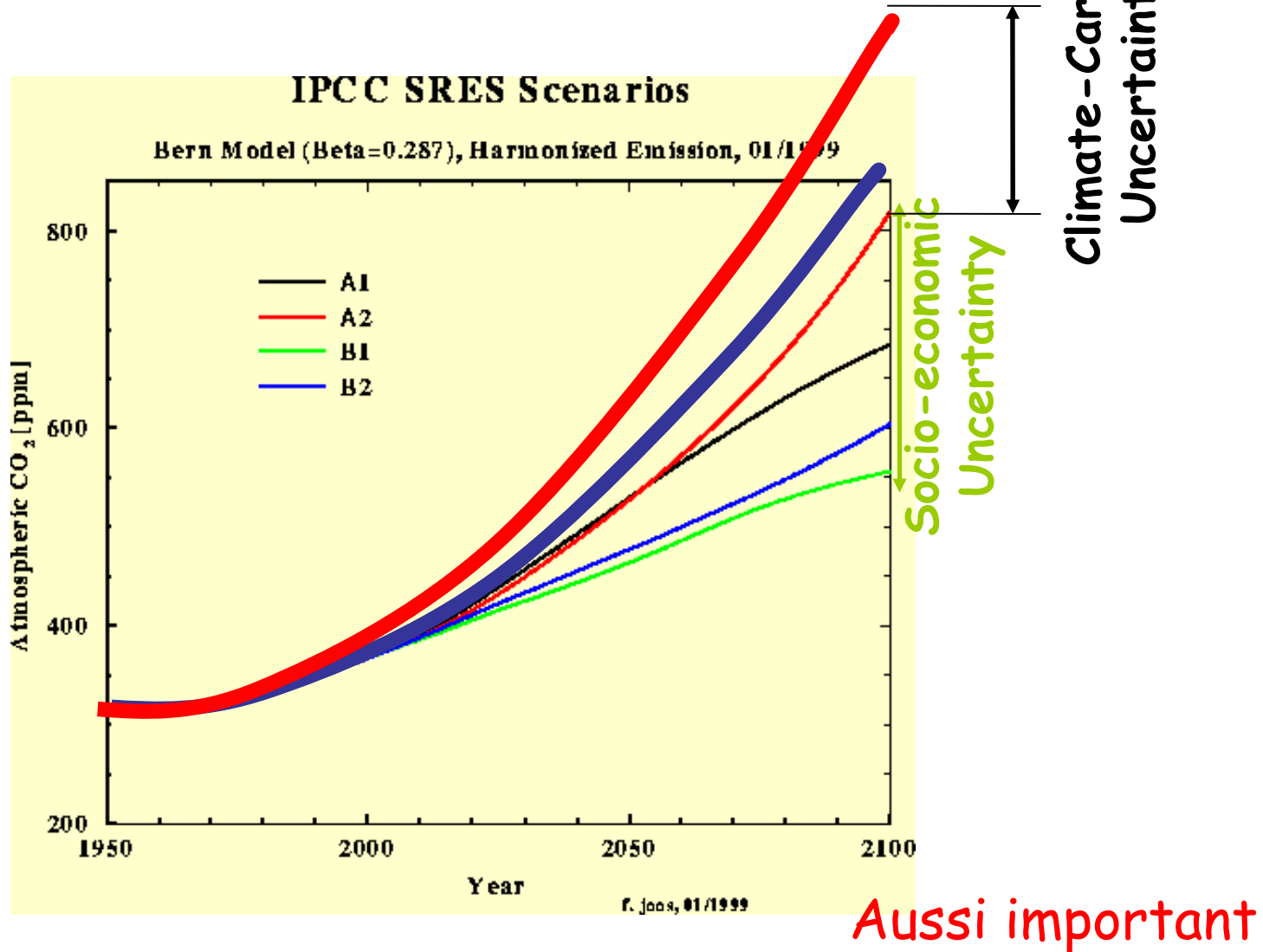




Incertitude scenario d'émission



Incertitude climat-carbone



« Conclusions - 2 »

Couplage climat-carbone : rétroaction positive

- dû à l'impact climatique négatif sur la biosphère
- impact climatique négatif sur le puits océanique est contré par l'augmentation du puits par effet géochimique

Pour une stabilisation atmosphérique donnée, les émissions de CO₂ compatibles sont réduites, le *GAP* énergétique augmente.

Plus la stabilisation sera élevée, plus le changement climatique sera important, plus grande sera l'impact sur le cycle du carbone, plus grande sera la réduction des émissions compatibles.