

Les Océans et le Cycle du Carbone

Laurent Bopp, Chercheur CNRS à l'IPSL / LSCE

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement



Institut
**Pierre
Simon
Laplace**

Quelle est l'influence de l'océan sur le CO₂ atmosphérique ?

1. Des réservoirs de carbone de tailles très différentes....

Atmosphère : **750 PgC**
(CO₂) = **380 ppm**



Océan : ~ **39 000 PgC**
(HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂,
matière organique, ...)

Quelle est l'influence de l'océan sur le CO₂ atmosphérique ?

1. Des réservoirs de carbone de tailles très différentes....

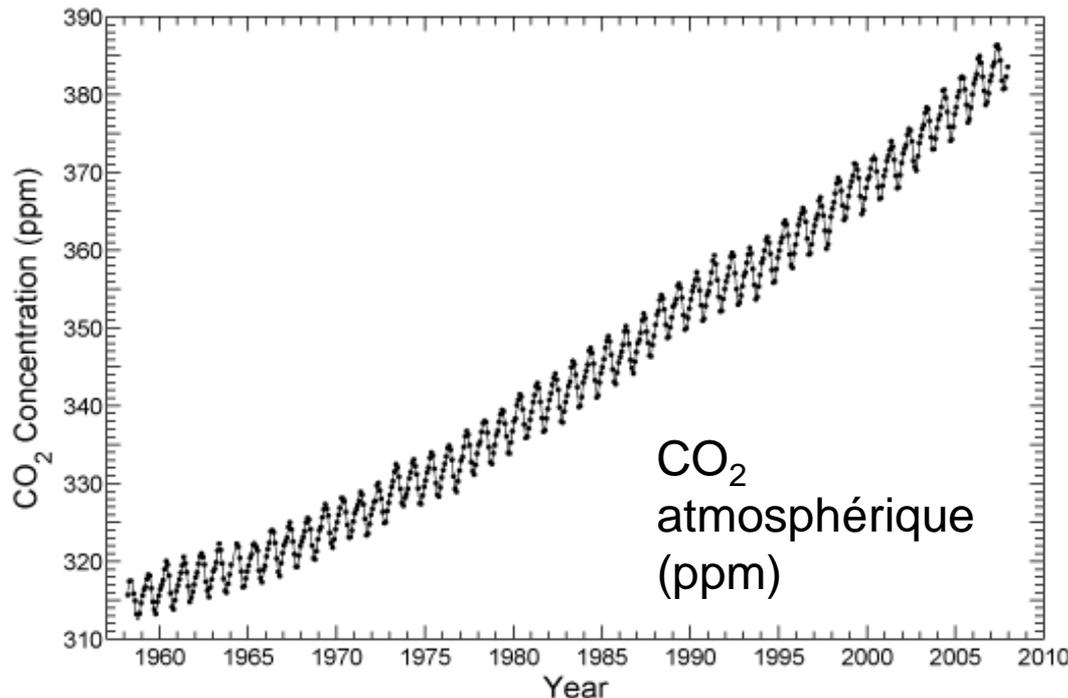
Atmosphère : **750 PgC**
(CO₂) = **380 ppm**



Océan : ~ **39 000 PgC**
(HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂,
matière organique, ...)

2. ...qui échangent sur des échelles de temps variables...

Mauna Loa Record



...derniers 50 ans....

Quelle est l'influence de l'océan sur le CO₂ atmosphérique ?

1. Des réservoirs de carbone de tailles très différentes....

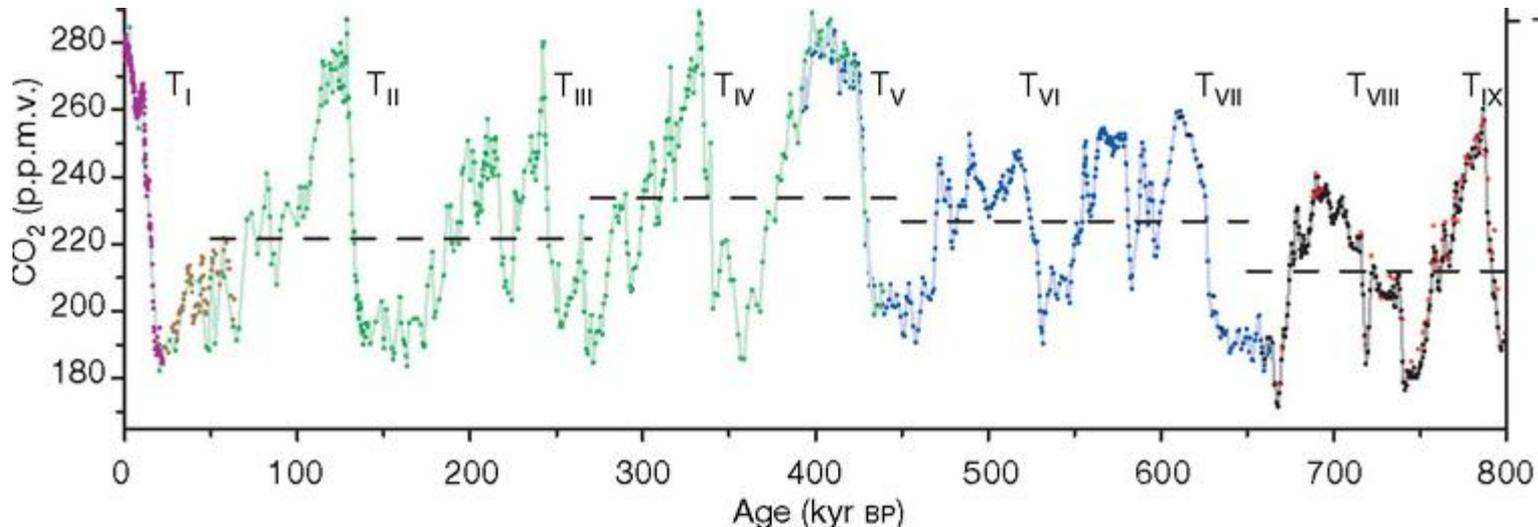
Atmosphère : **750 PgC**
(CO₂) = **380 ppm**

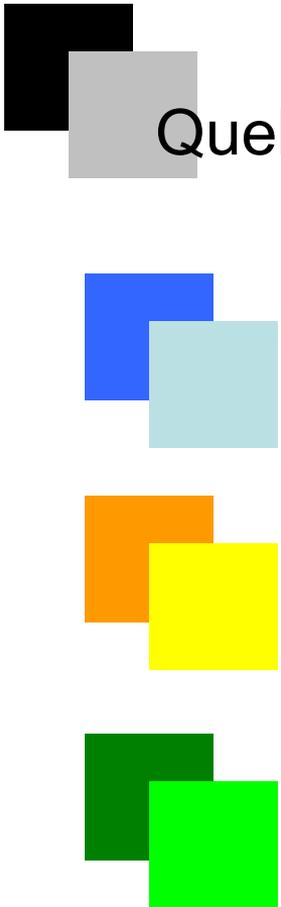


Océan : ~ **39 000 PgC**
(HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂,
matière organique, ...)

2. ...qui échangent sur des échelles de temps variables...

... au cours du dernier million d'années...





Quelle est l'influence de l'océan sur le CO₂ atmosphérique ?

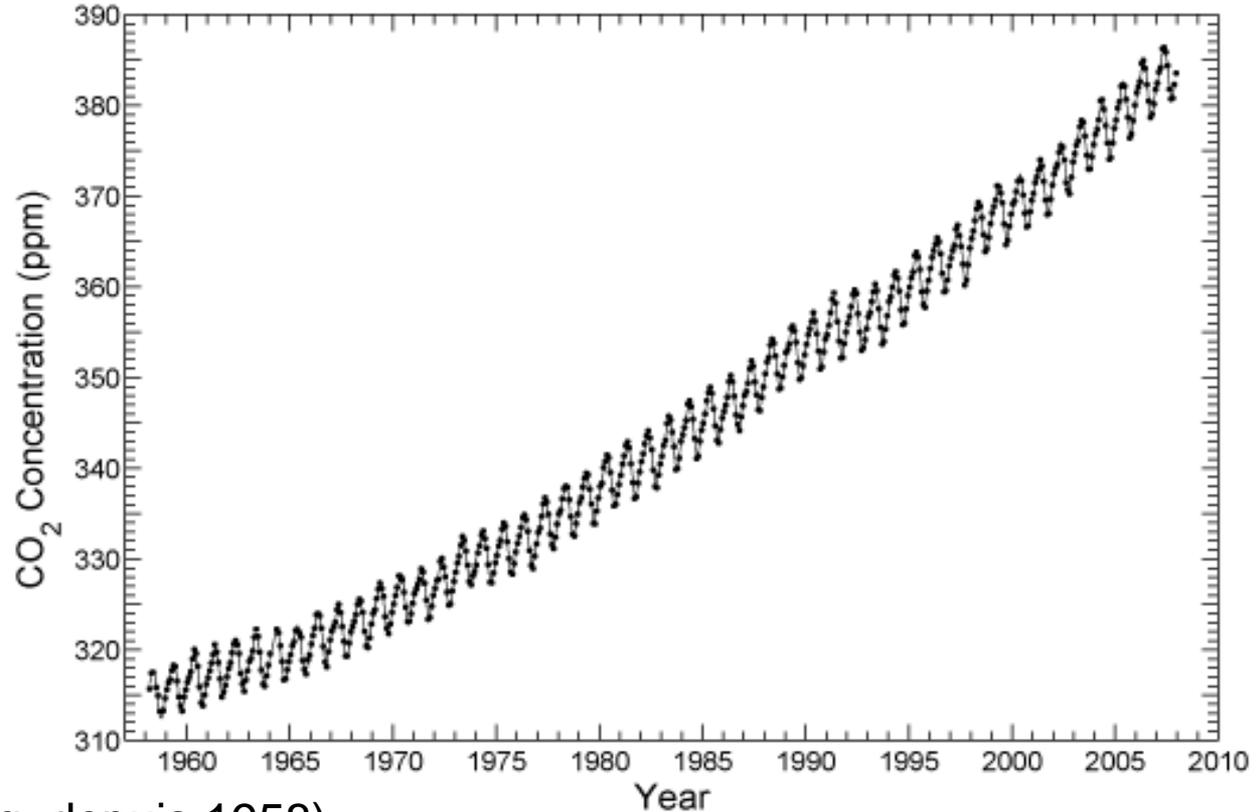
Bilan de carbone et mise en évidence
du puits océanique de carbone

Mécanismes d'absorption du carbone anthropique
et **Couplage Climat-Carbone**

La **géo-ingénierie** : “manipulations”
du cycle du carbone océanique

Bilan Carbone / Rôle de l'océan

Mauna Loa Record

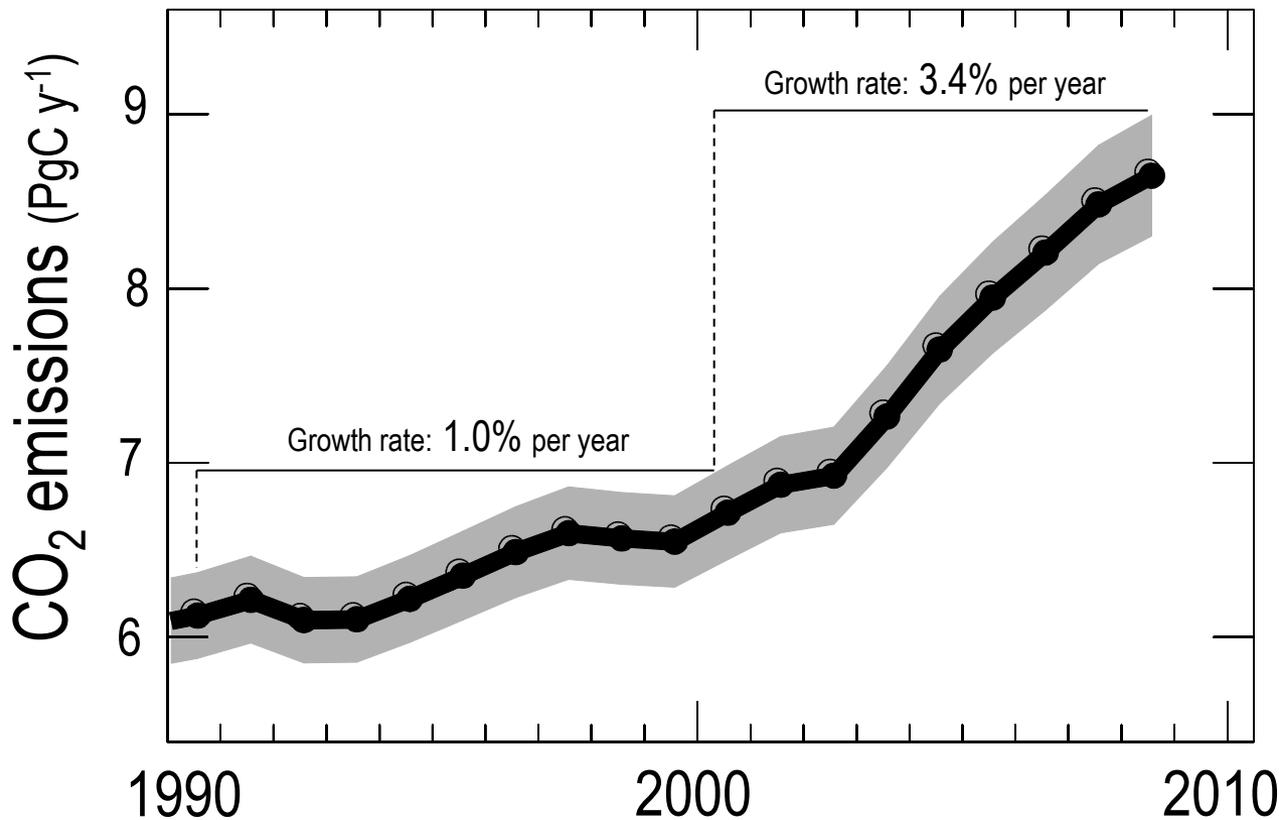


- CO₂ atmosphérique à Mauna Loa (C. Keeling, depuis 1958)
- Mi-2010: CO₂ “moyen” = 391 ppm
- Plus élevé depuis > 25 Millions d’années

Bilan Carbone / Rôle de l'océan

➤ Les émissions :

[1 Pg = 1 Petagram = 1 Billion metric tonnes = 1 Gigatonne = $1 \times 10^{15} \text{g}$]



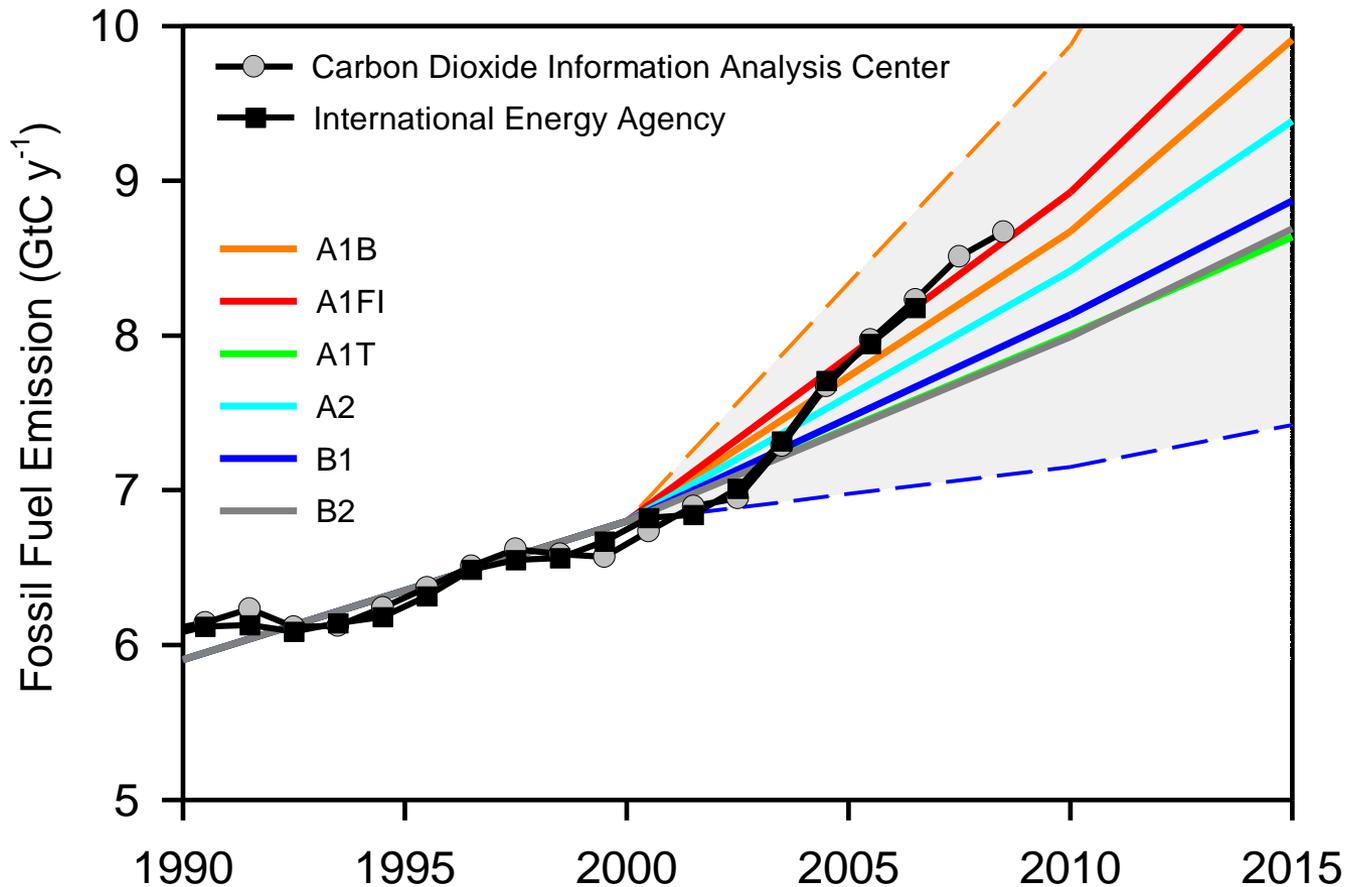
2008:
Emissions: 8.7 PgC
Growth rate: 2.0%
1990 levels: +41%

2000-2008
Growth rate: 3.4%

(source: Global Carbon Project 2009, Le Quéré et al. 2009)

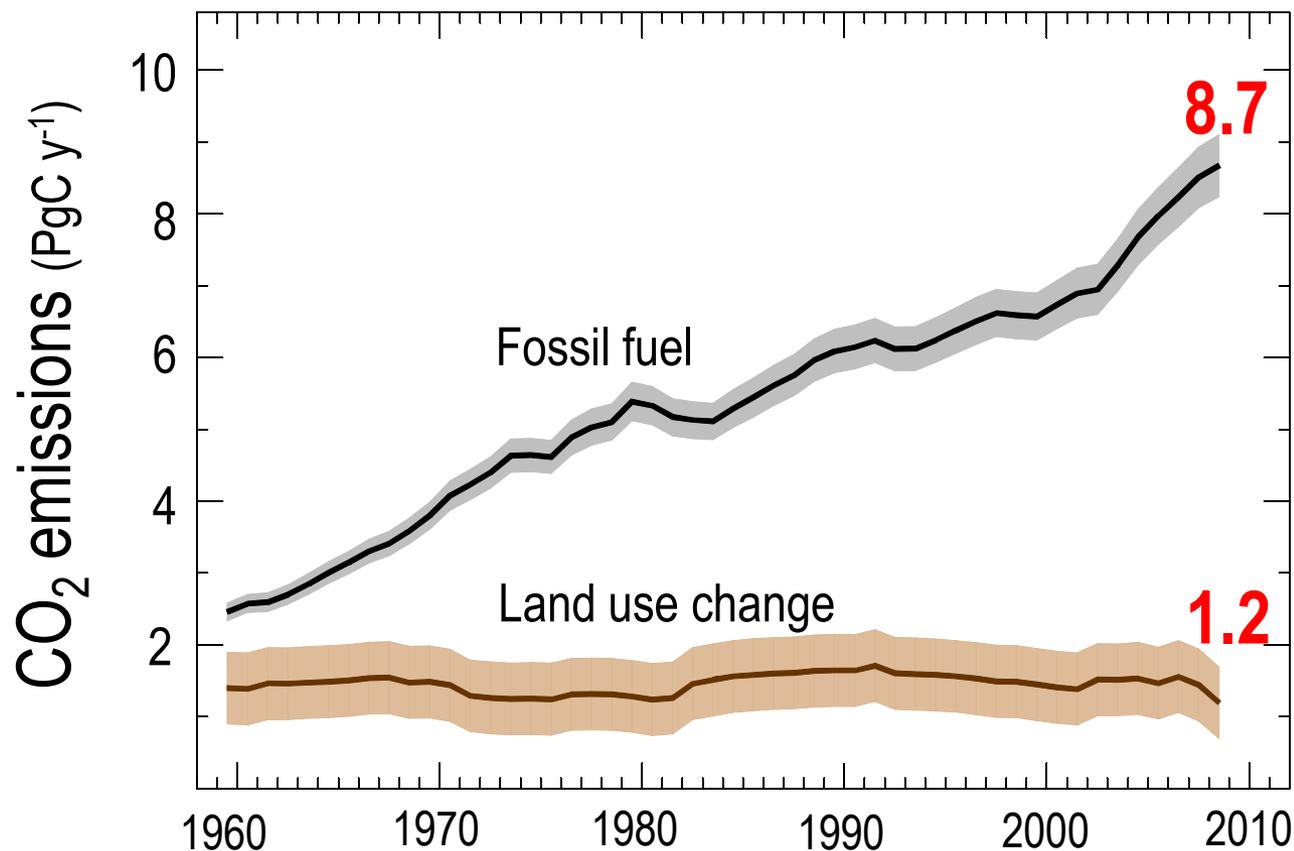
Bilan Carbone / Rôle de l'océan

➤ Les émissions : comparaison aux scénarios IPCC



Bilan Carbone / Rôle de l'océan

➤ Les émissions : Liées à la déforestation



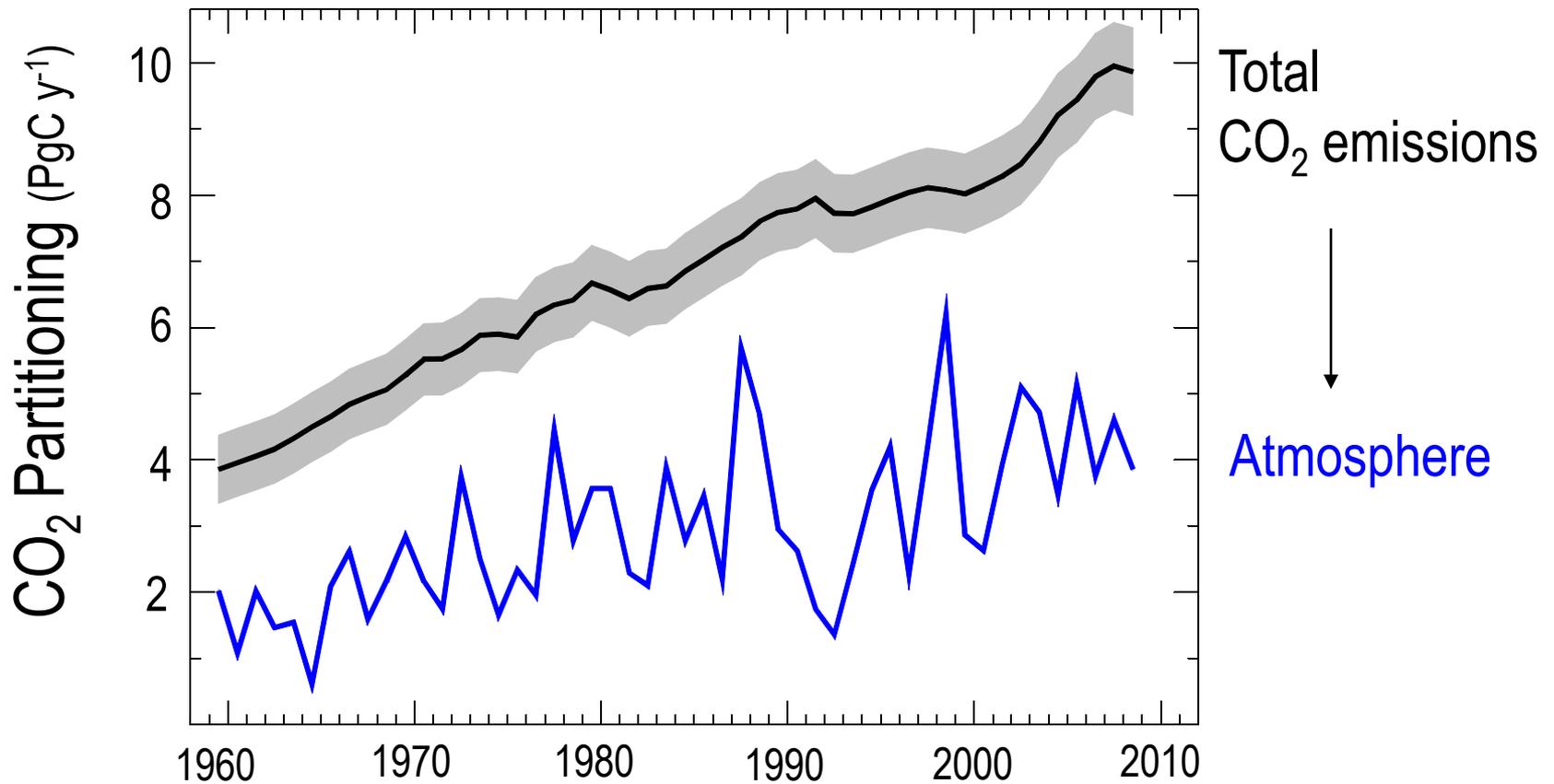
9.9 PgC



12% of total anthropogenic emissions

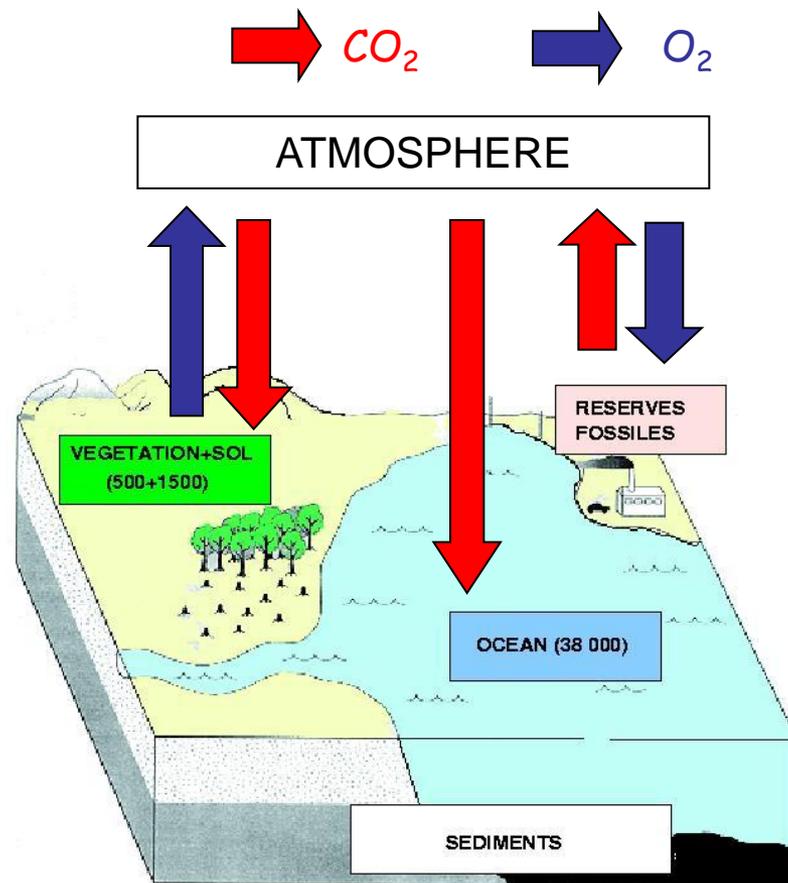
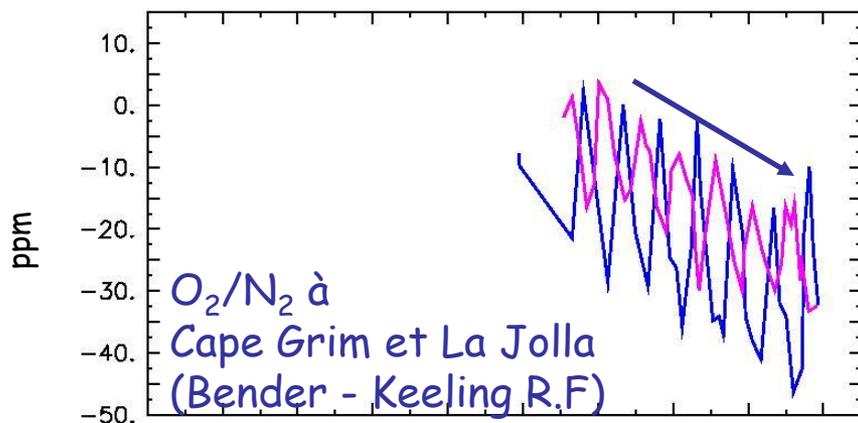
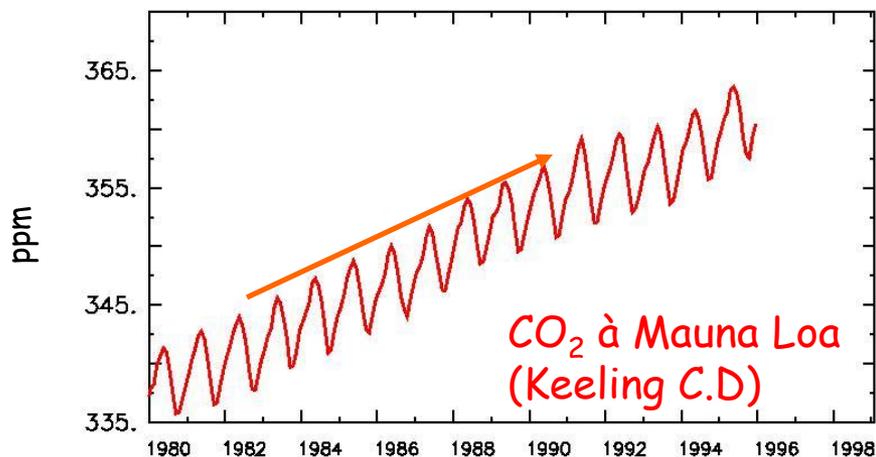
Bilan Carbone / Rôle de l'océan

- Emissions et croissance du CO₂ ? = Des puits de carbone



Bilan Carbone / Rôle de l'océan

➤ O₂ atmosphérique pour contraindre le cycle du carbone



(Keeling et Shertz, 1992)

Bilan Carbone / Rôle de l'océan

- Des mesures de la différence de pression partielle de CO₂

$$F_{\text{CO}_2} = k^*(\Delta p\text{CO}_2)$$

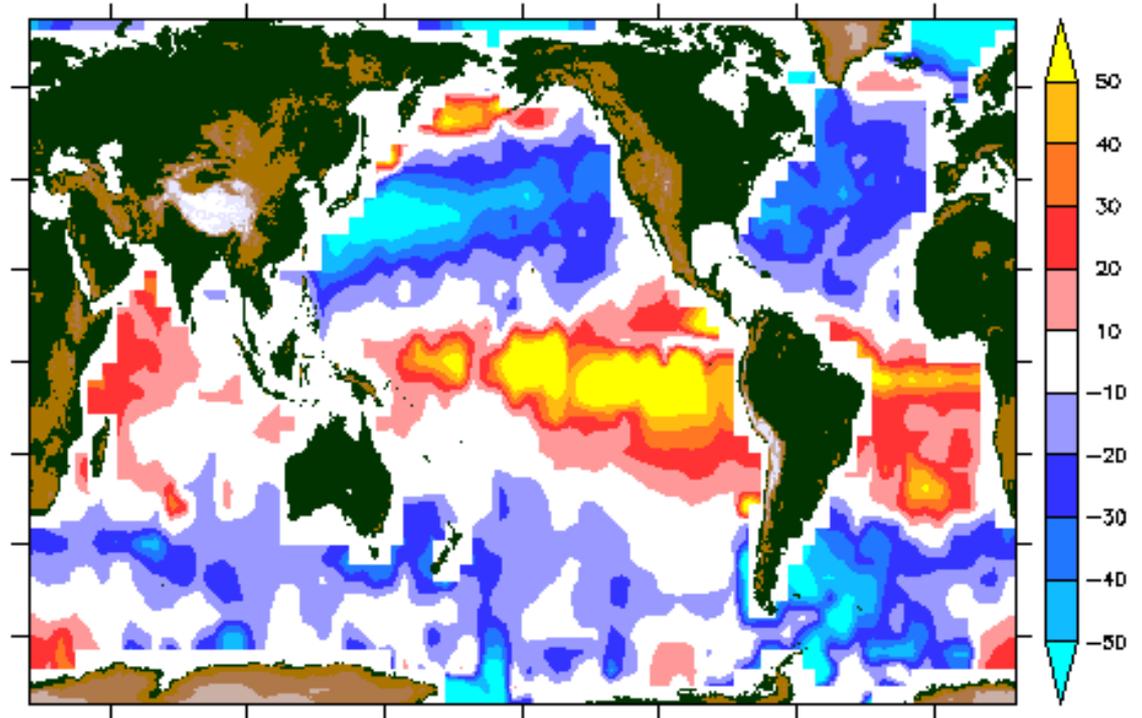


Carbon Sink



Carbon Source

Données Océaniques



(Takahashi et al. 2009)

Janvier

Bilan Carbone / Rôle de l'océan : pour 2000-2009

1.4 PgC y⁻¹



7.7 PgC y⁻¹ +



4.1 PgC y⁻¹
45%



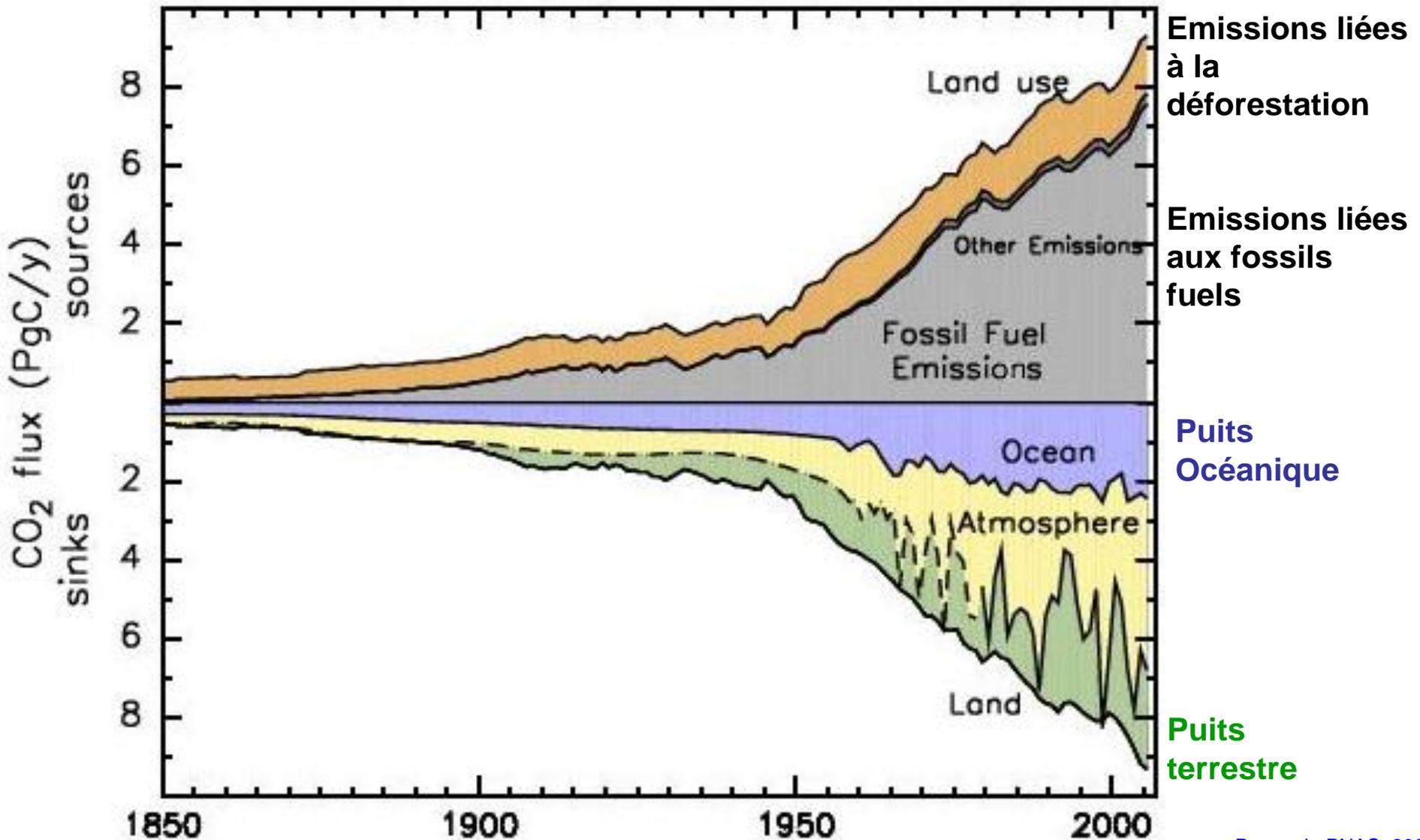
3.0 PgC y⁻¹
29%

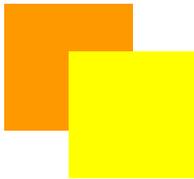


2.3 PgC y⁻¹
26%



Bilan Carbone / Rôle de l'océan

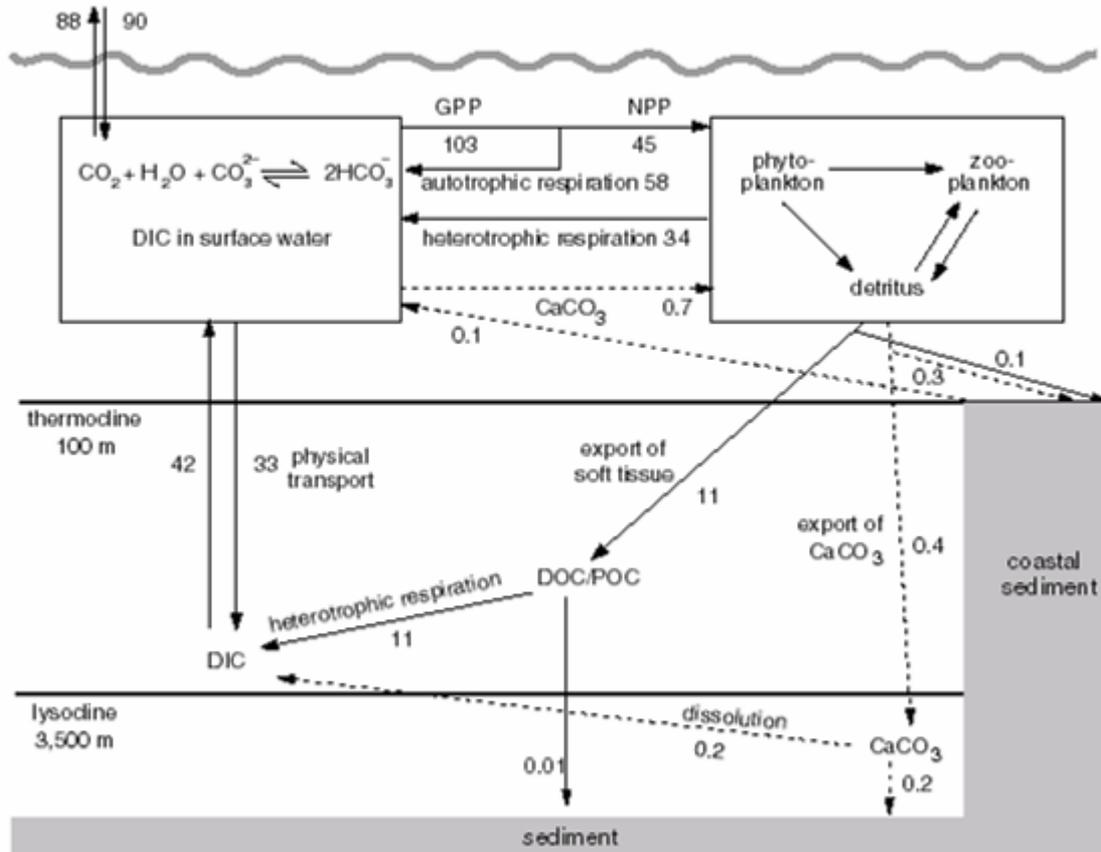




Cycle du Carbone océanique :

Cycle du Carbone océanique : processus et réservoirs...

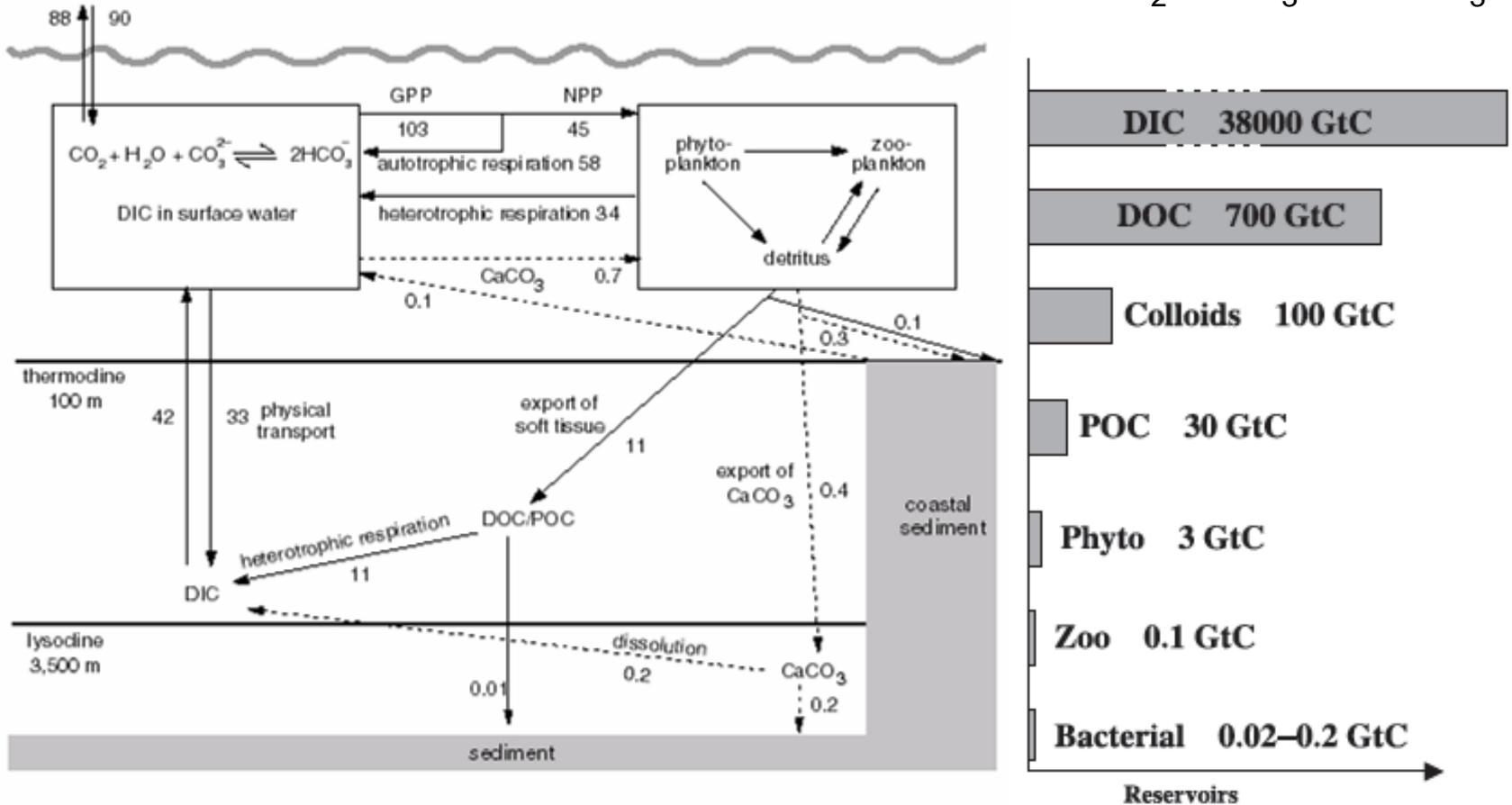
Carbon cycling in the ocean



Marine Carbon Cycle : Physics / Chemistry / Biology

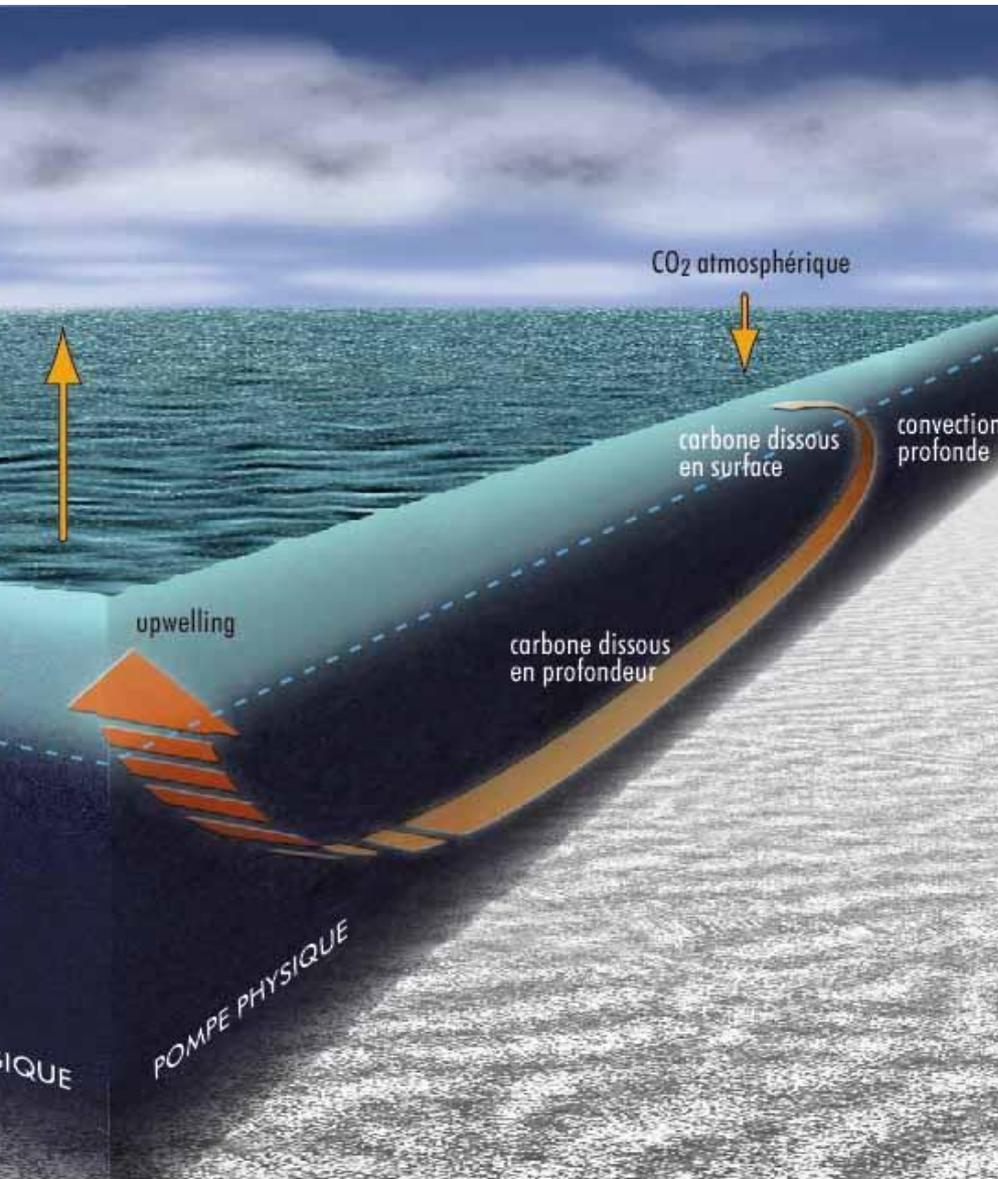
Cycle du Carbone océanique : processus et réservoirs...

Carbon cycling in the ocean



Marine Carbon Cycle : Physics / Chemistry / Biology

Cycle du Carbone océanique : processus et réservoirs...



Pompe de solubilité

- Dissolution aux hautes latitudes
- Transfert par la circulation océanique
- Dégazage dans les eaux chaudes ou les zones d'upwelling

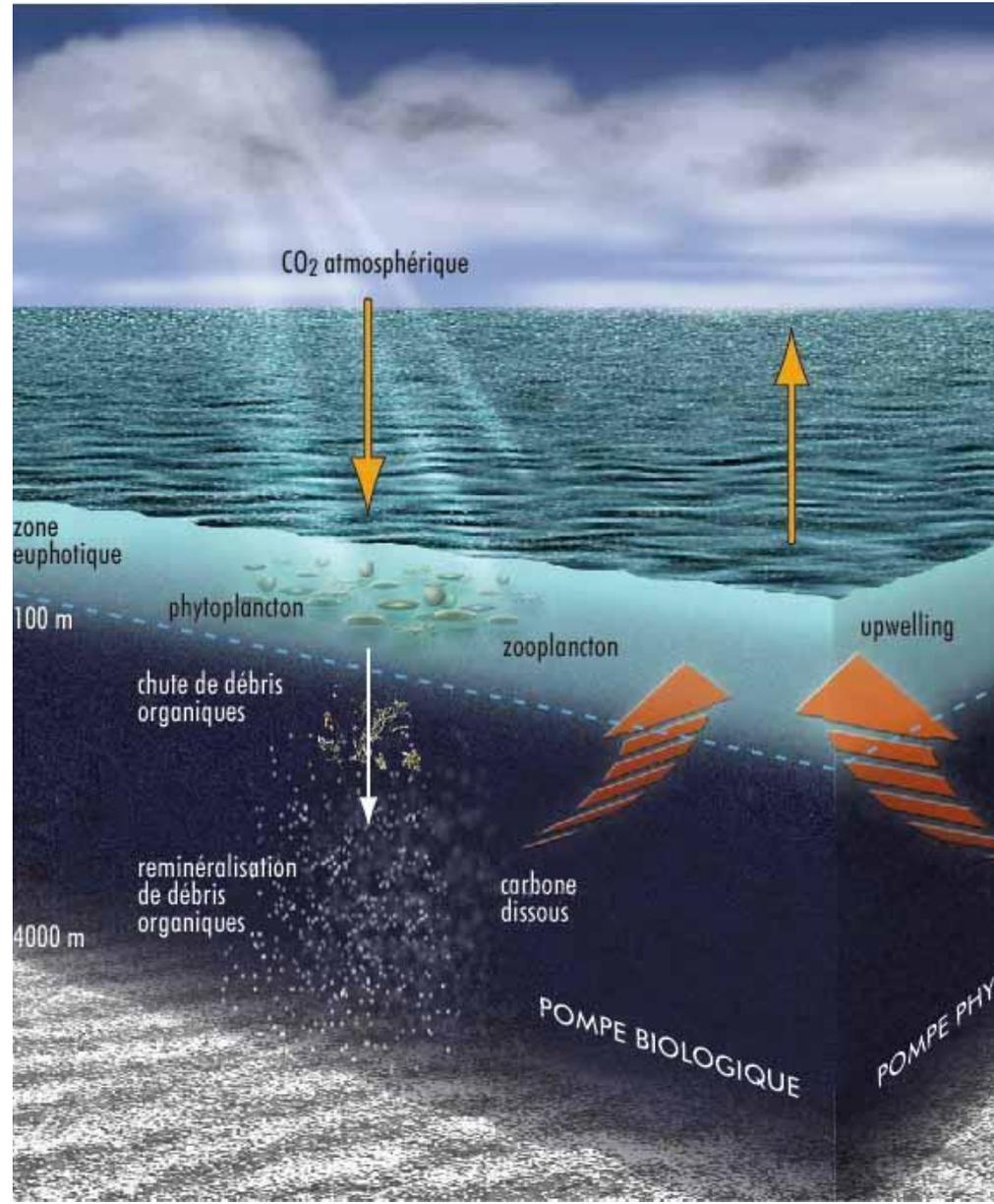
Constantes de temps

- Echange de gaz : ~1 mois
- Transport dans l'océan : ~1000 yr

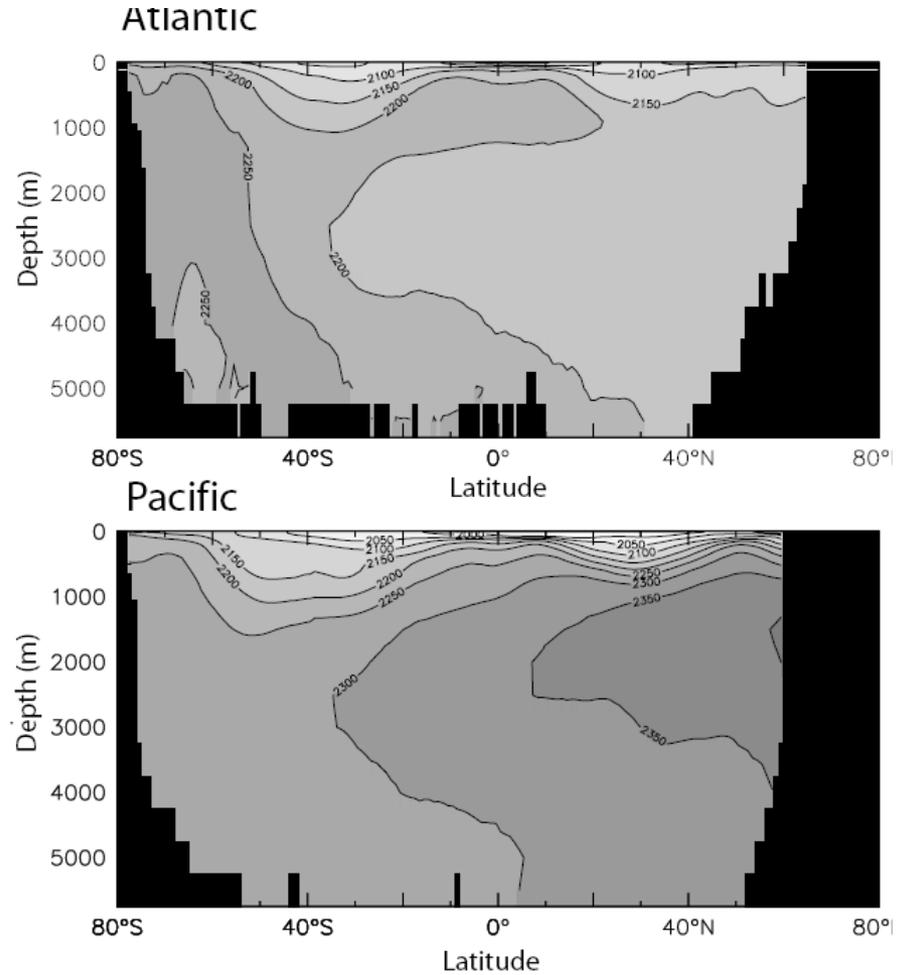
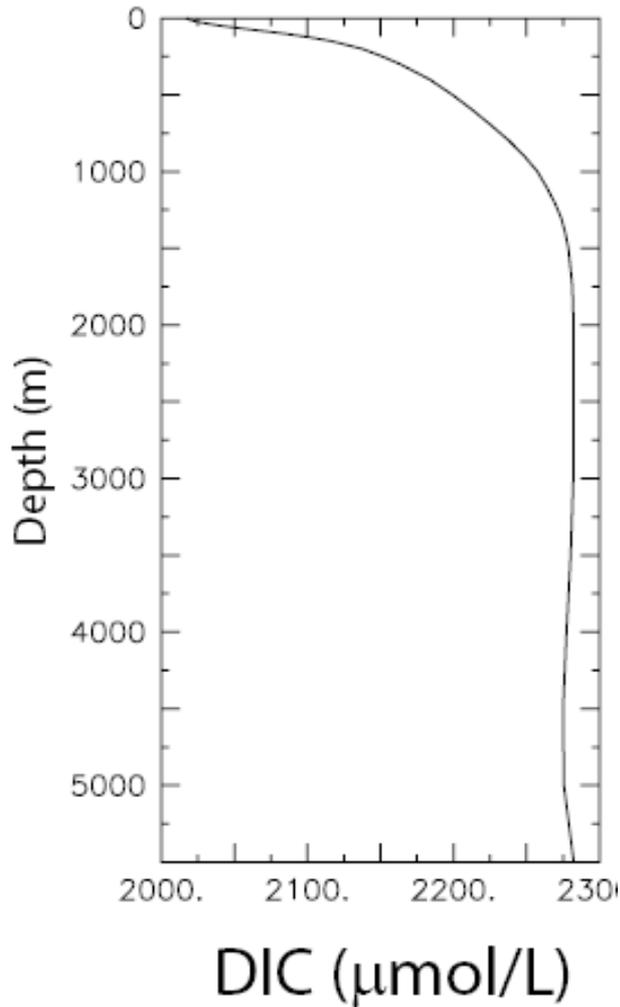
Cycle du Carbone océanique : processus et réservoirs...

Pompe Biologique

- Fixation du carbone dans le zone euphotique (production primaire)
- La majeure partie est recyclée
- Une partie est exportée en profondeur (production exportée)



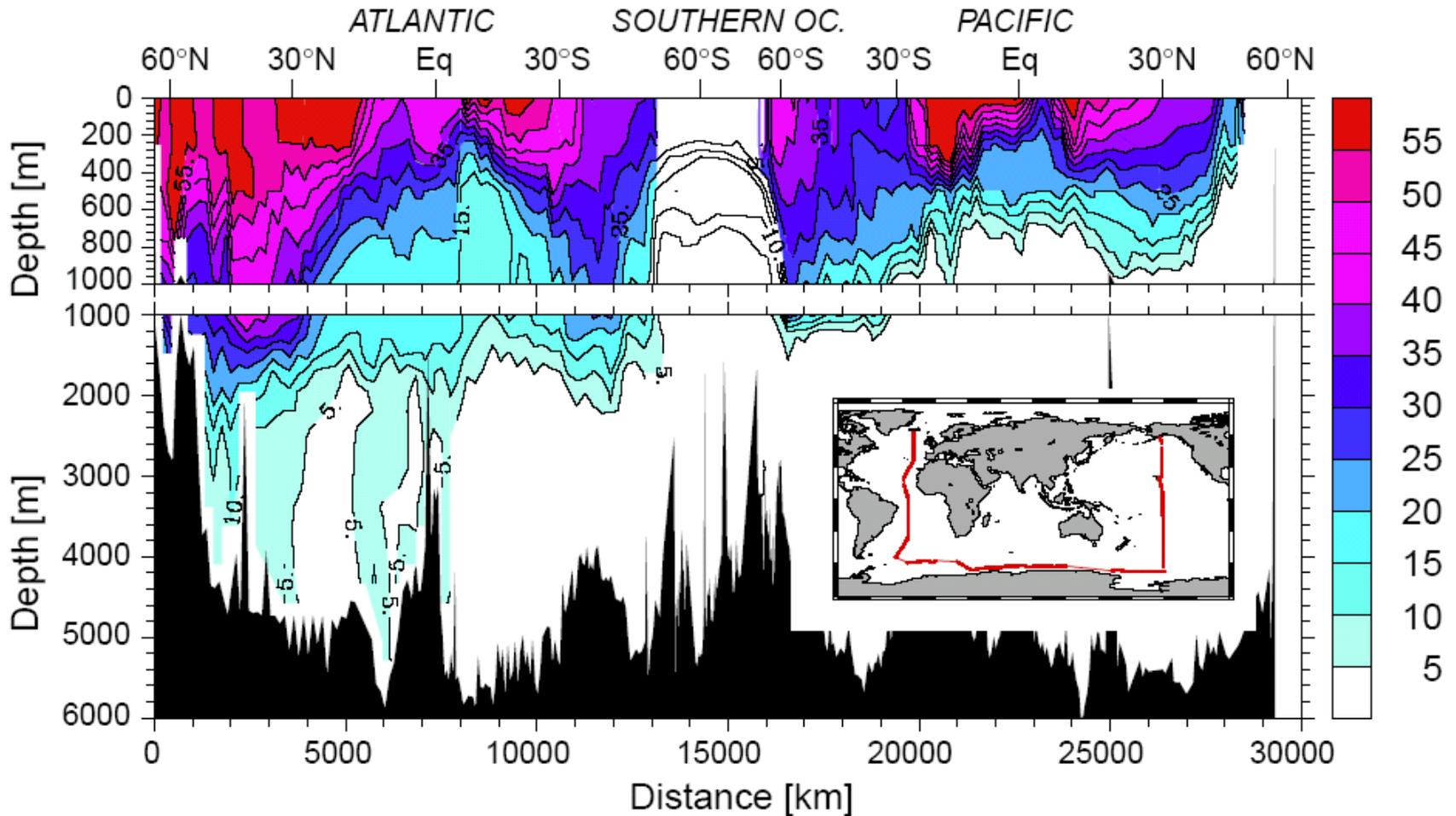
Cycle du Carbone océanique : processus et réservoirs...



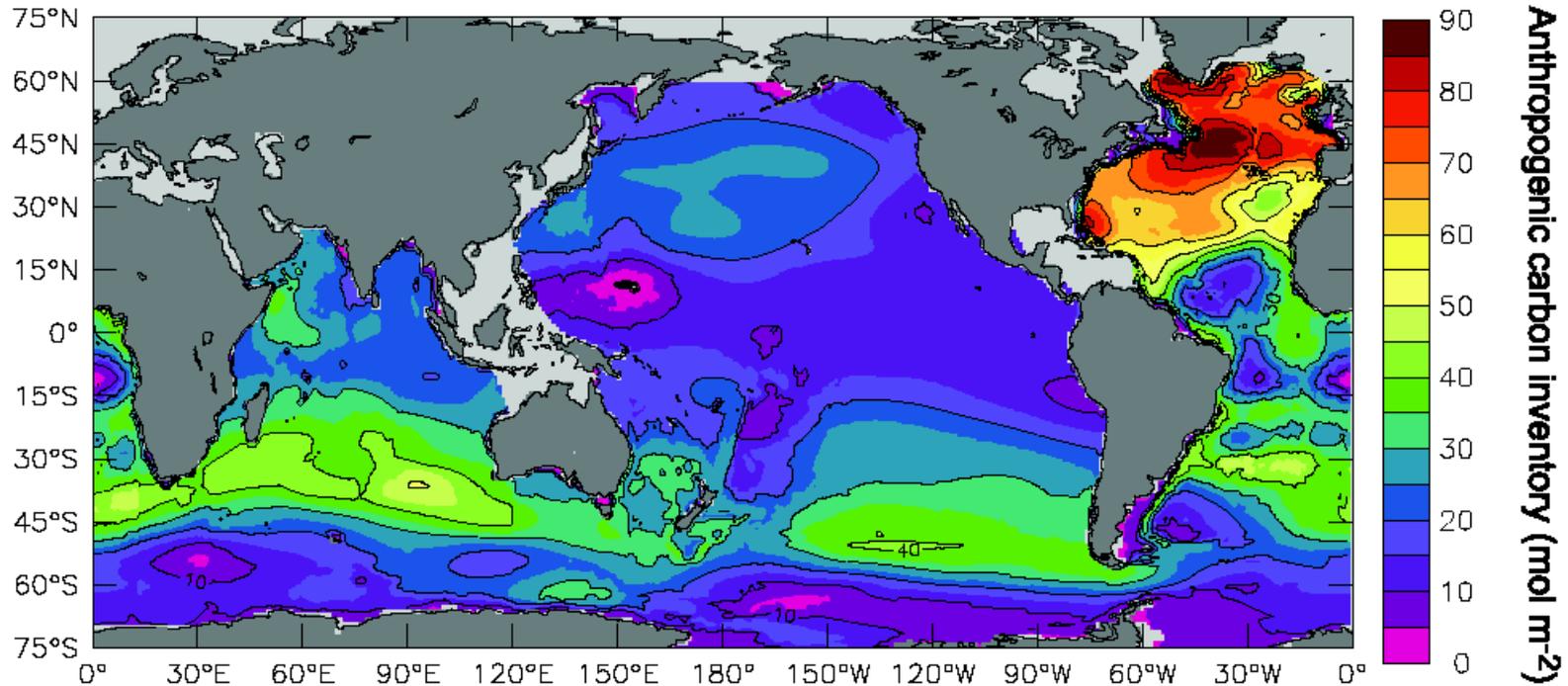
Pompe de Solubilité : ~ 10%
Pompes Biologiques : ~ 90%

Cycle du Carbone océanique : Absorption du CO₂ anthropique

Carbone Anthropique : ~ 120 PgC

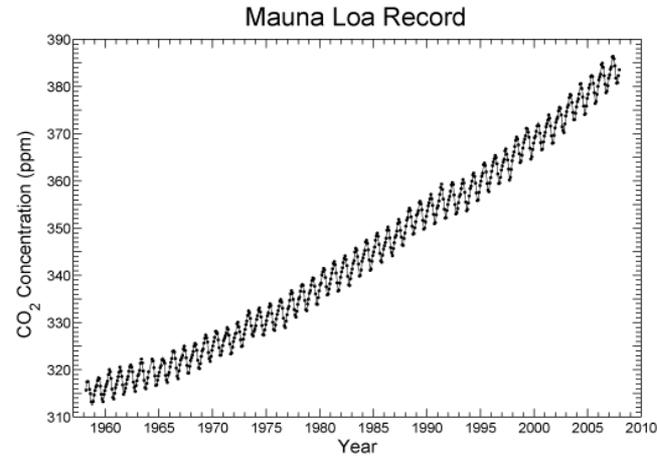


Cycle du Carbone océanique : Absorption du CO₂ anthropique

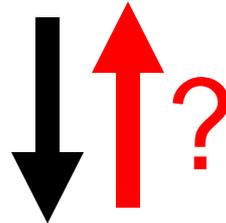


« Malgré l'importance des processus biologiques pour le cycle naturel du carbone, il semble que l'absorption de carbone anthropique par l'océan soit principalement contrôlé par des processus physico-chimique. Cette absorption s'ajoute donc à un cycle naturel à l'équilibre, piloté par la biologie.» (IPCC, 2001)

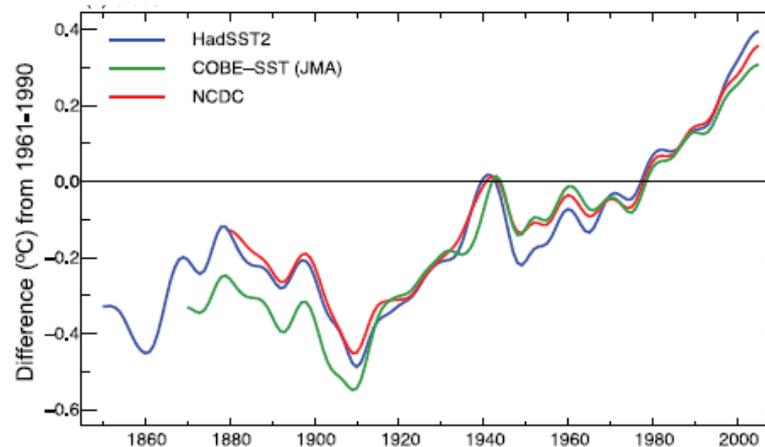
CO₂ et Climat : Une réaction positive ?



CO₂
atmosphérique
(ppm)



Climat



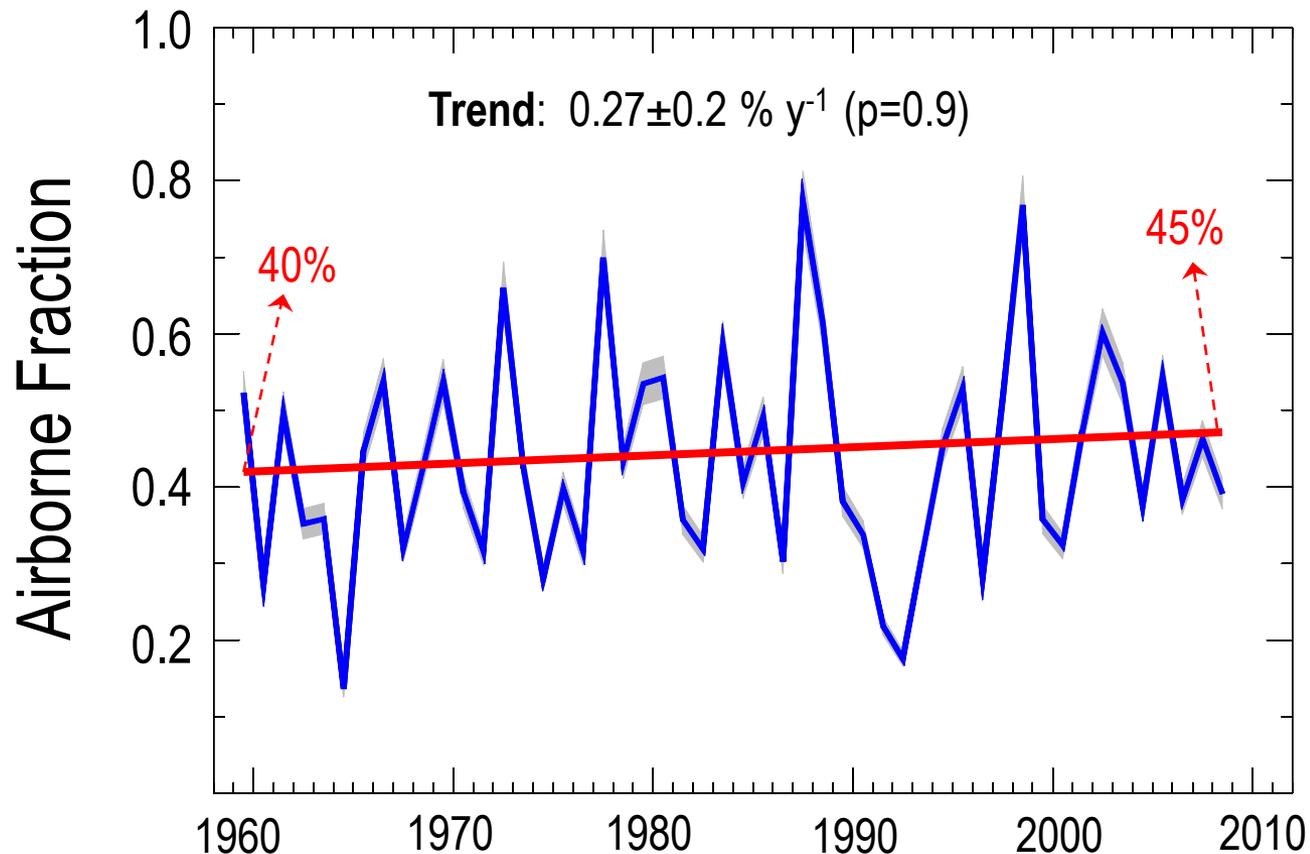
Température
de
surface de
l'océan

(°C)

CO₂ et Climat : Une rétroaction positive ?

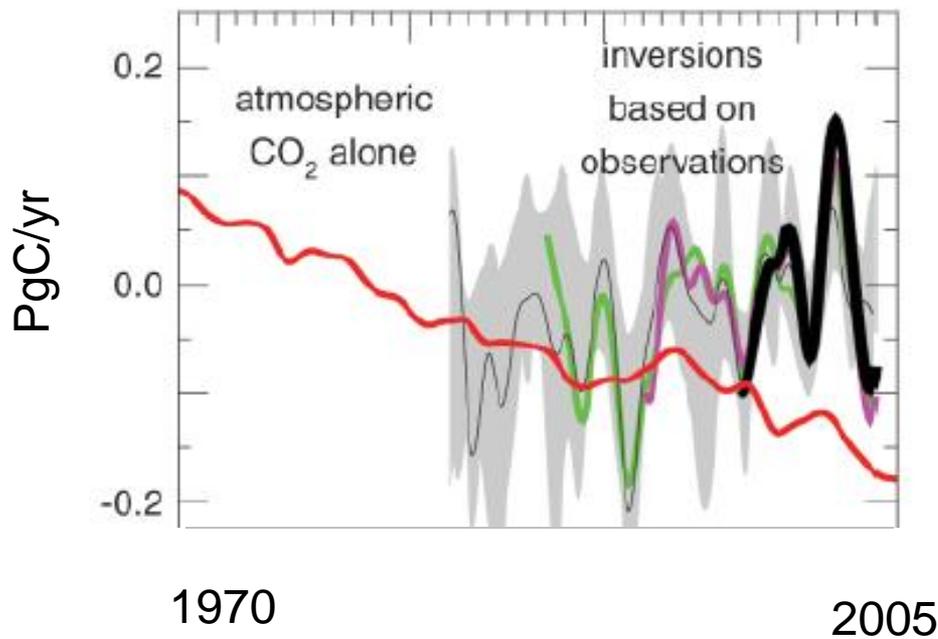
Des indications à partir d'observations ?

Airborne Fraction: Proportion des émissions qui s'accumule dans l'atmosphère



CO₂ et Climat : Une rétroaction positive ?

Des indications à partir d'observations ?

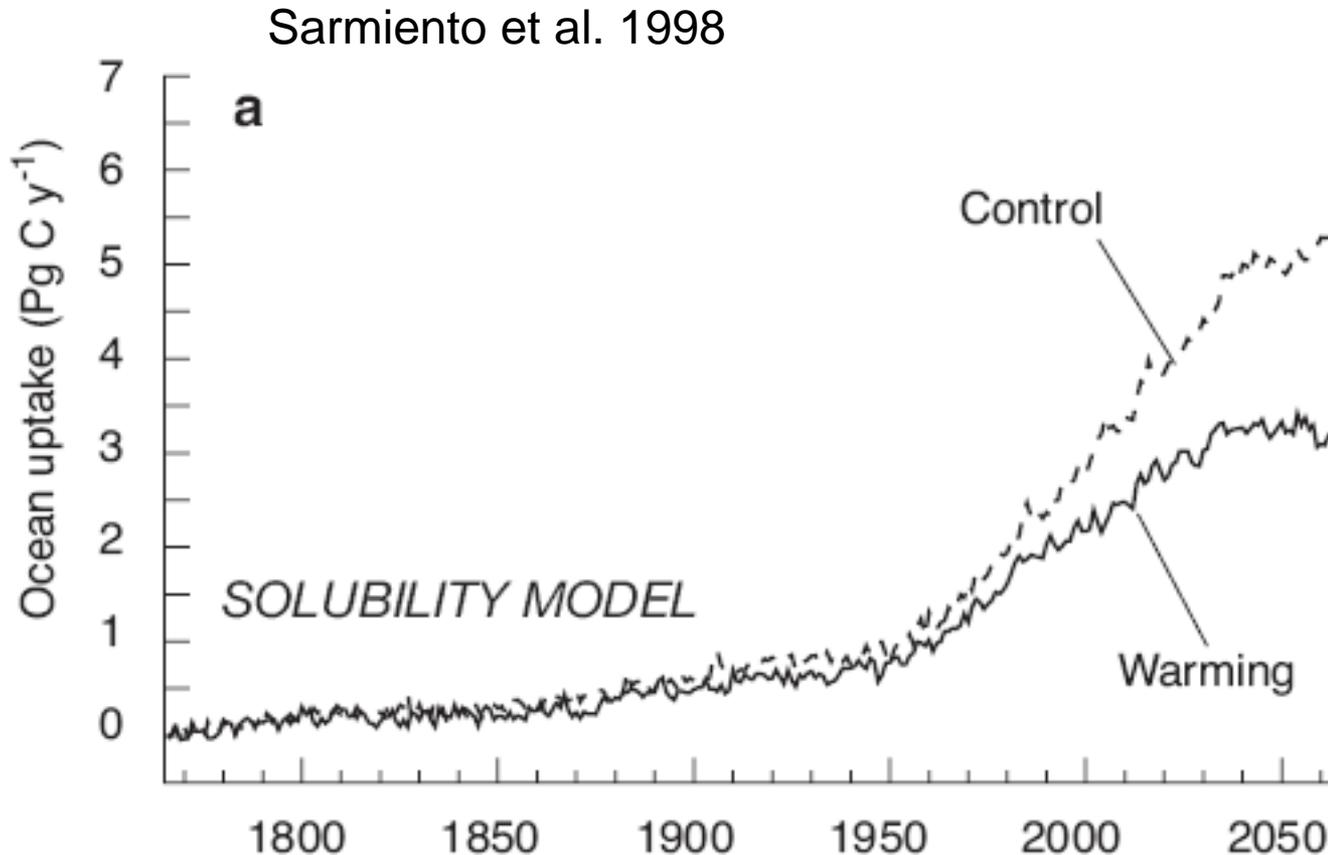


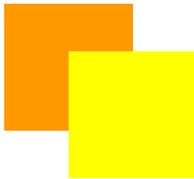
Flux de carbone dans l'océan Sud

Le puits augmente

CO₂ et Climat : Une rétroaction positive ?

Premières études en modélisation à la fin des années 90...





CO₂ et Climat : Une rétroaction positive ?

Quels mécanismes ?

Océan :

Chimie du carbone dans l'eau de mer

Réchauffement des eaux de surface (diminution de la solubilité)

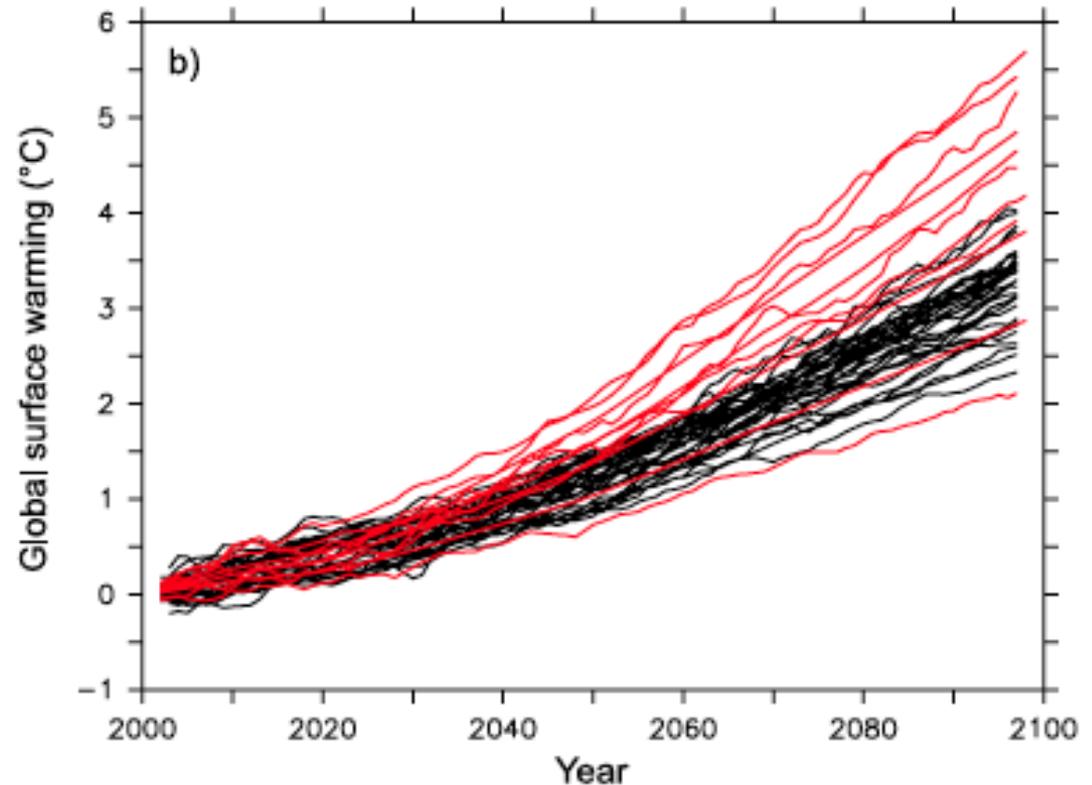
Stratification des eaux de surface

....

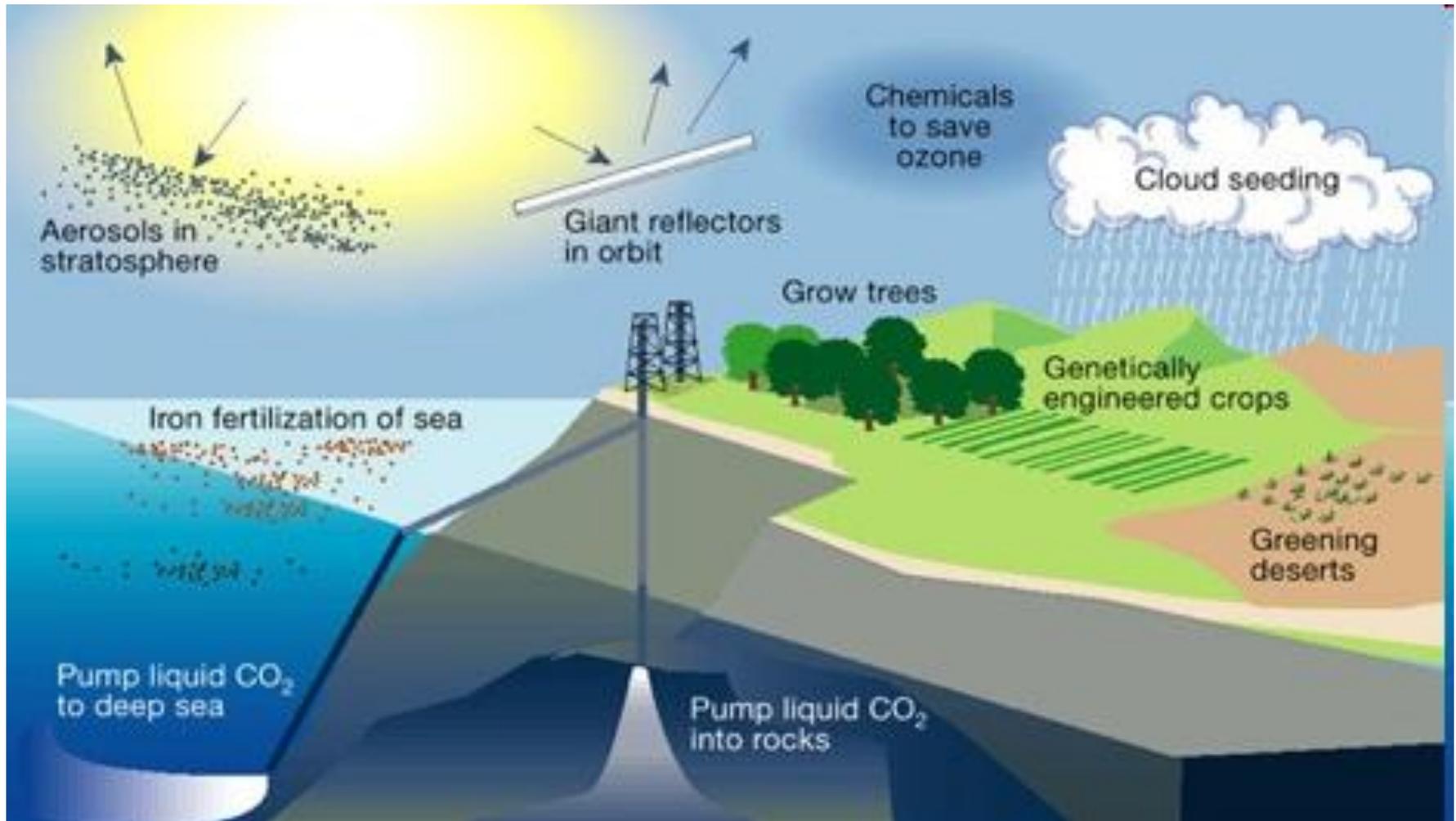
CO₂ et Climat : Une réaction positive ?

Quelle conséquence ?

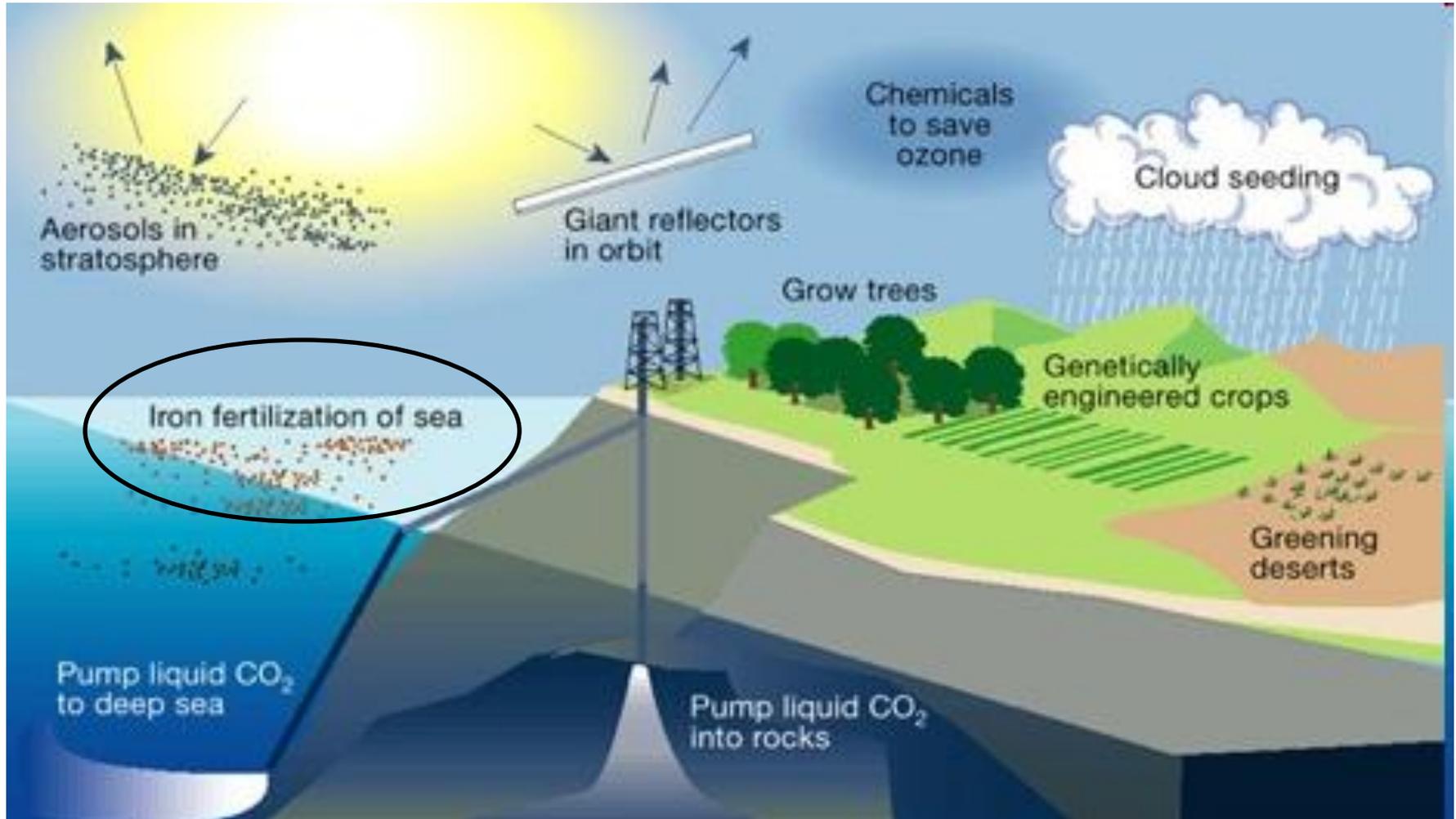
Des conséquences importantes pour notre climat futur....



Géo-ingénierie et carbone océanique



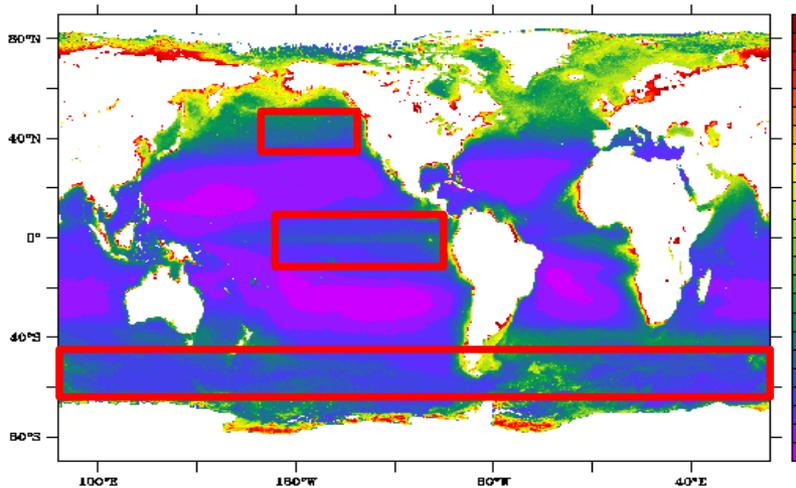
Géo-ingénierie et carbone océanique



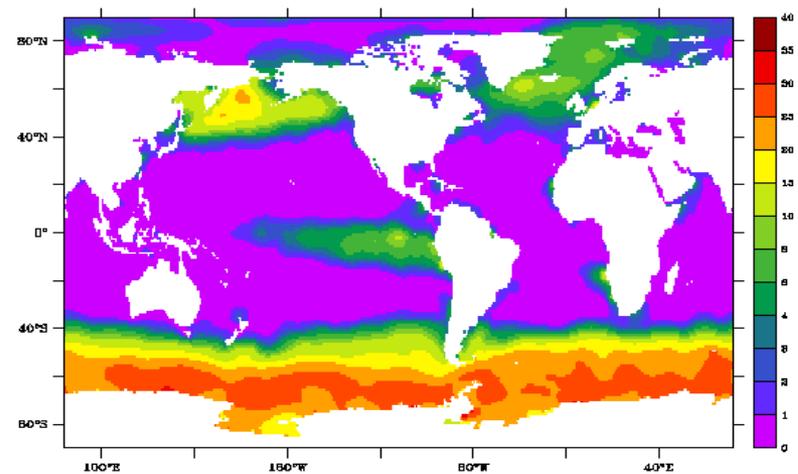
Géo-ingénierie et carbone océanique

Zones HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)

Chla, SEAWiFS

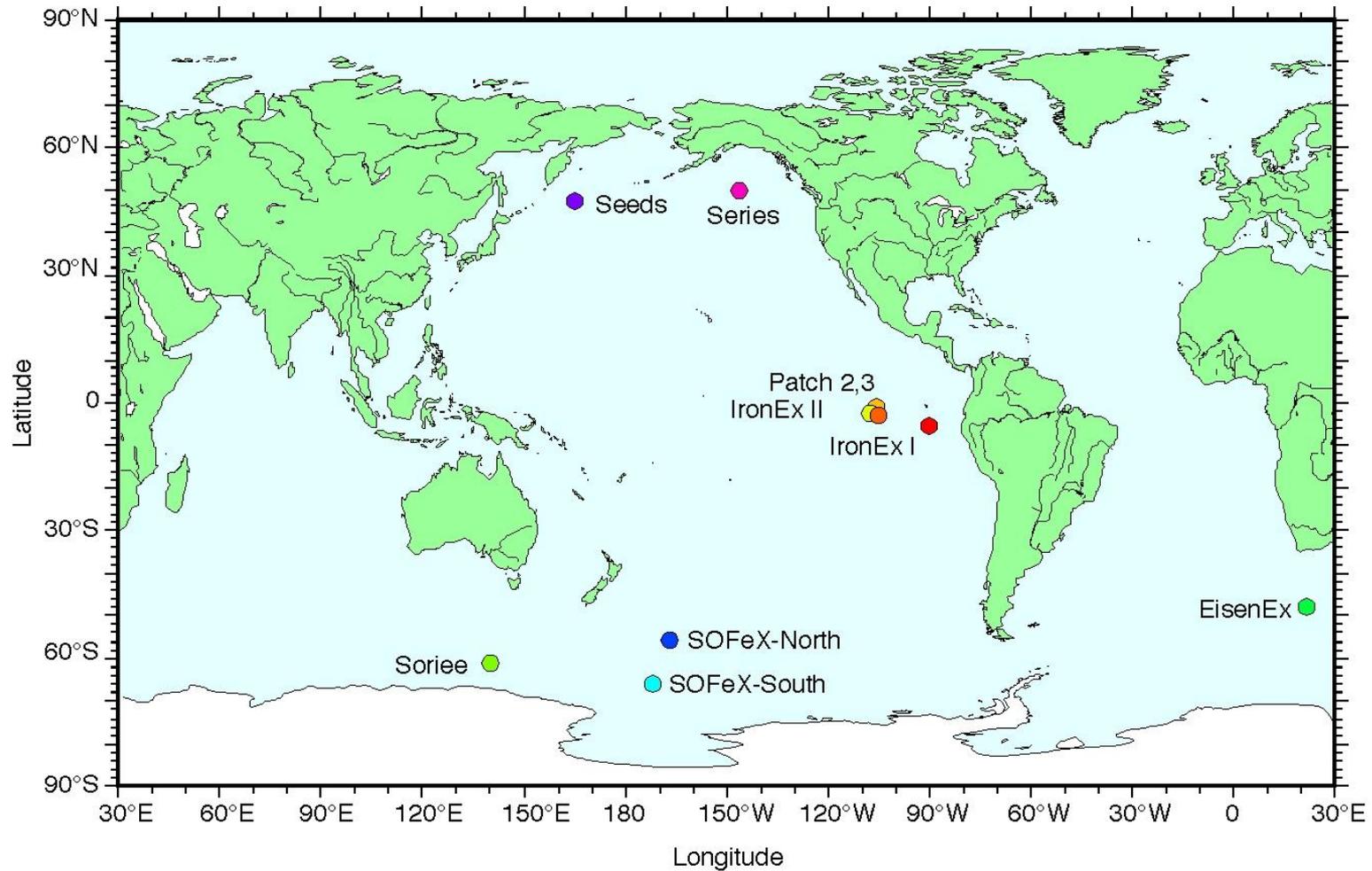


Nitrates, WOA2001



- Ces zones sont limités par les concentration de Fer dissous (élément micronutritif)

Géo-ingénierie et carbone océanique

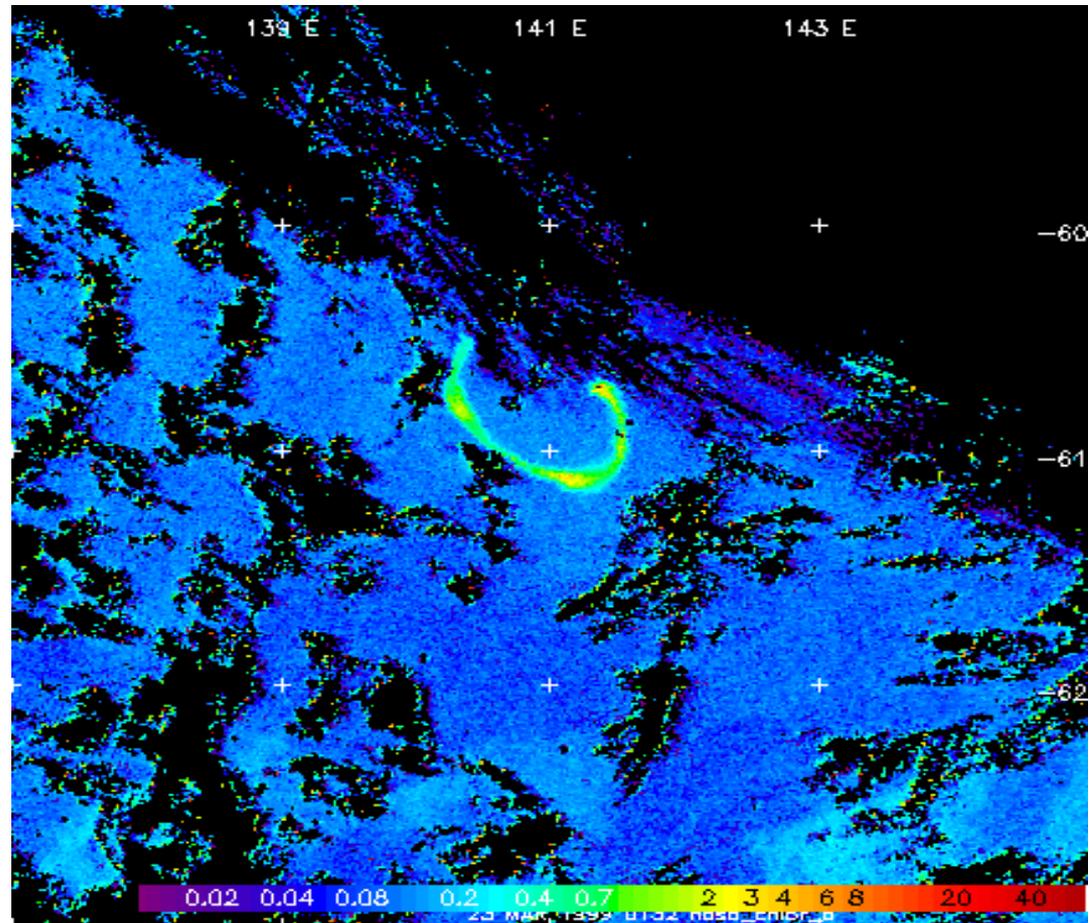


IronEx I ● IronEx II ● Control Expt. Patch 2 ● Control Expt. Patch 3 ● Sorisee ●

EisenEx ● SOFeX-South ● SOFeX-North ● Seeds ● Series ●

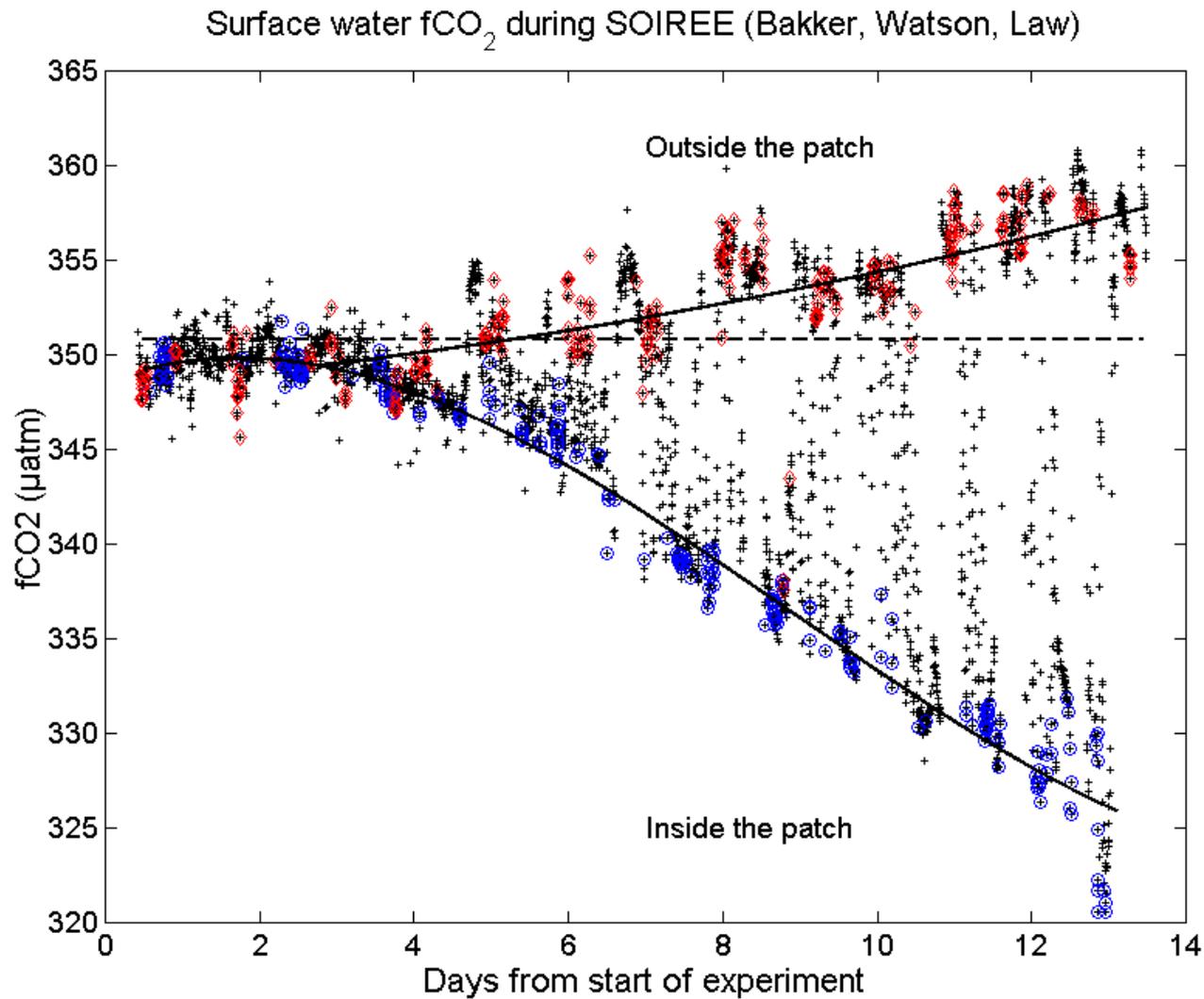
Géo-ingénierie et carbone océanique

SOIREE après 42 jours
SeaWiFS
Abraham et al., 2000



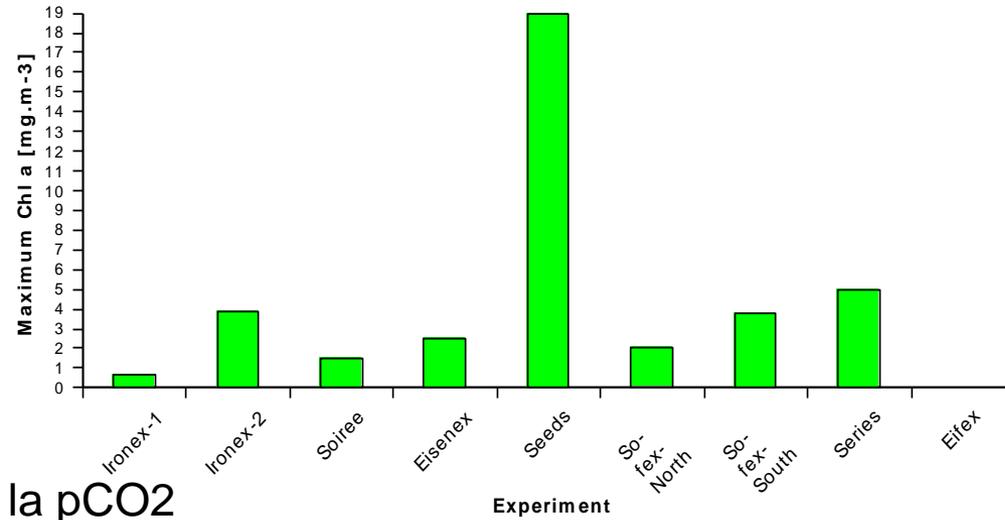
Géo-ingénierie et carbone océanique

Experience SOIREE

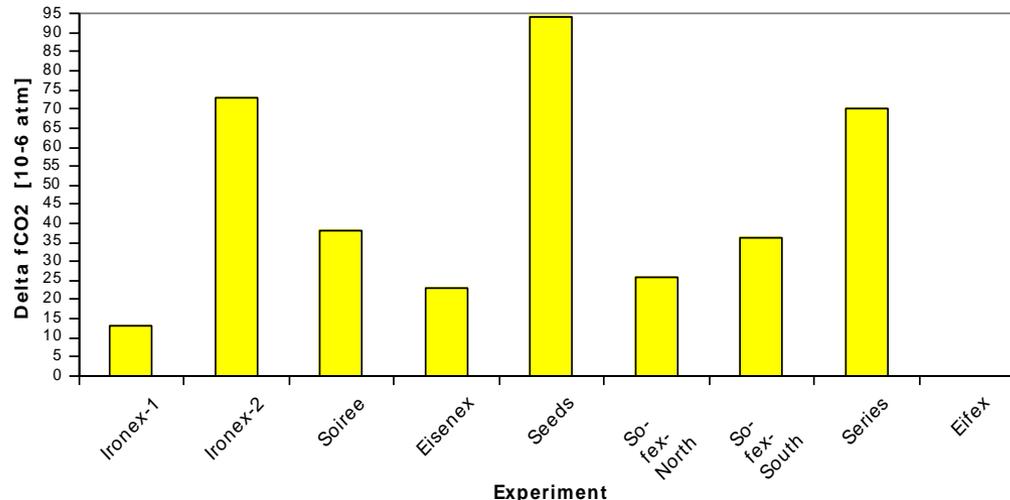


Géo-ingénierie et carbone océanique

>> Une augmentation de la chlorophylle et de la biomasse...



>> et une diminution de la pCO₂

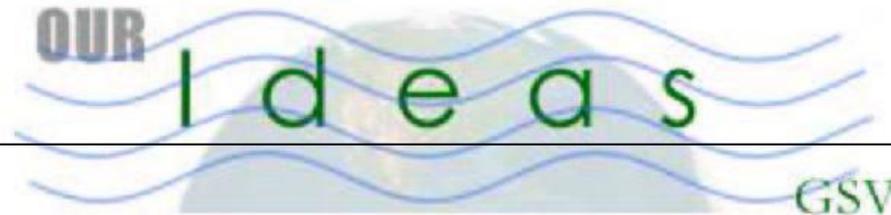


Géo-ingénierie et carbone océanique

Planktos
Ocean Farming Inc.
GreenSea Venture Inc ...

GreenSea Venture INC.

<http://www.greenseaventure.com/>



- [Iron Fertilization Science](#)
- [Development of Iron Fertilization Science](#)
- [GreenSea Development Agenda](#)
- [Questions and Concerns](#)
- [The Case For Iron Fertilization As a Control Technology](#)

GreenSea Mission

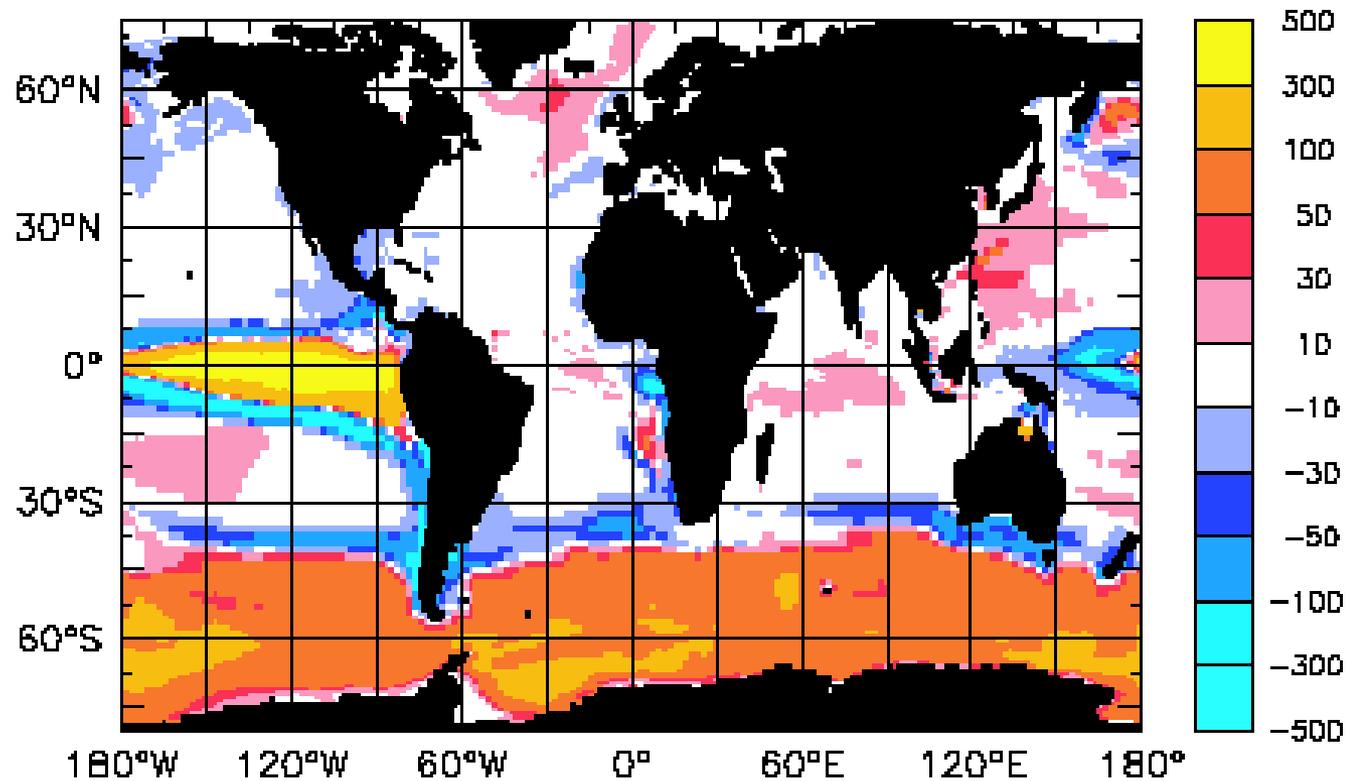
GreenSea's mission is to develop iron fertilization of marine phytoplankton as a means of managing atmospheric carbon dioxide. GreenSea believes that iron fertilization of marine phytoplankton is a needed and promising means of managing atmospheric carbon, provided that:

- The effects on ecosystems are benign or beneficial;
- Carbon flux at the ocean surface can be reliably measured;
- Long-term carbon flux and storage can be reasonably approximated; and
- A comprehensive, rigorous, and transparent system for monitoring

Géo-ingénierie et carbone océanique

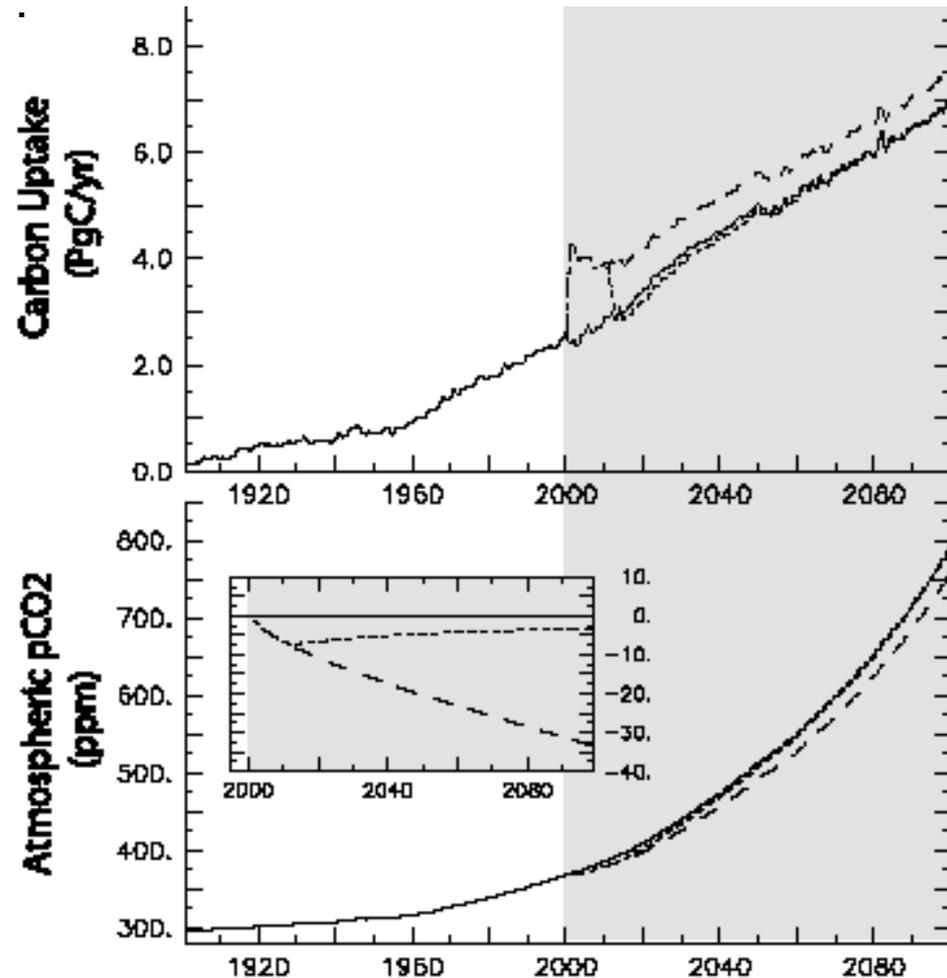
- Modélisation de la Fertilisation par le Fer :

b Changes in PP (annual mean) after 100 yr of Fe fert.



Géo-ingénierie et carbone océanique

- Modélisation de la Fertilisation par le Fer :
- Production Primaire (PP) augmente jusqu'à +50%, puis diminue
- L'effet maximum sur la CO₂ atm. est de **33 ppm après 100 ans**,
-7 ppm après 10 ans.
- 33% de l'export de carbone vient de l'atmosphère
- Seule la fertilisation de l'océan Austral est (très modérément) efficace
- Si la fertilisation s'arrête, la production diminue rapidement et l'effet sur le CO₂ fortement amoindri



Ocean pipes could help the Earth to cure itself

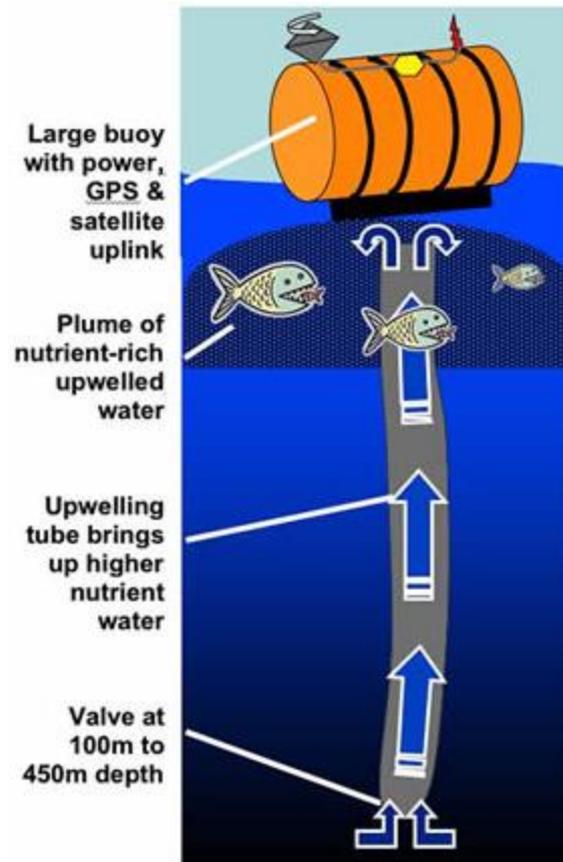
SIR — We propose a way to stimulate the Earth's capacity to cure itself, as an emergency treatment for the pathology of global warming.

James E. Lovelock*, Chris G. Rapley†

*Green College, University of Oxford,
Woodstock Road, Oxford OX2 6HG, UK

†Science Museum, Exhibition Road,
South Kensington, London SW7 2DD, UK

Nature, 2007



Ocean pipes could help the Earth to cure itself

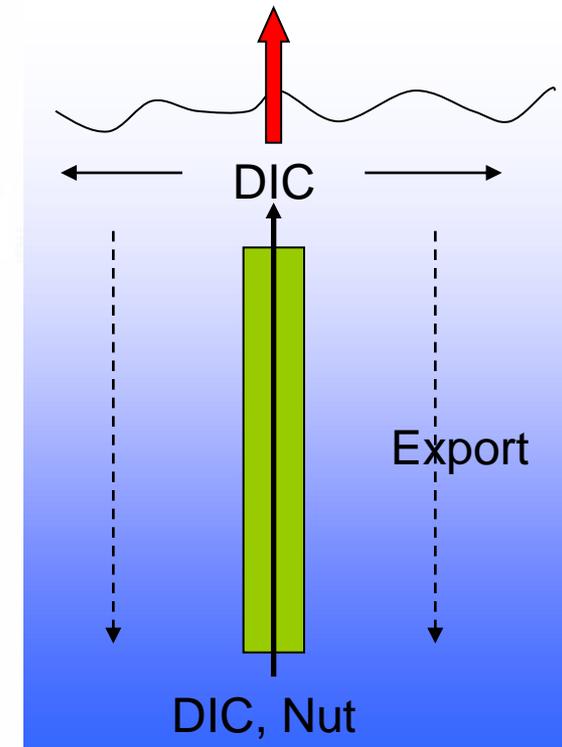
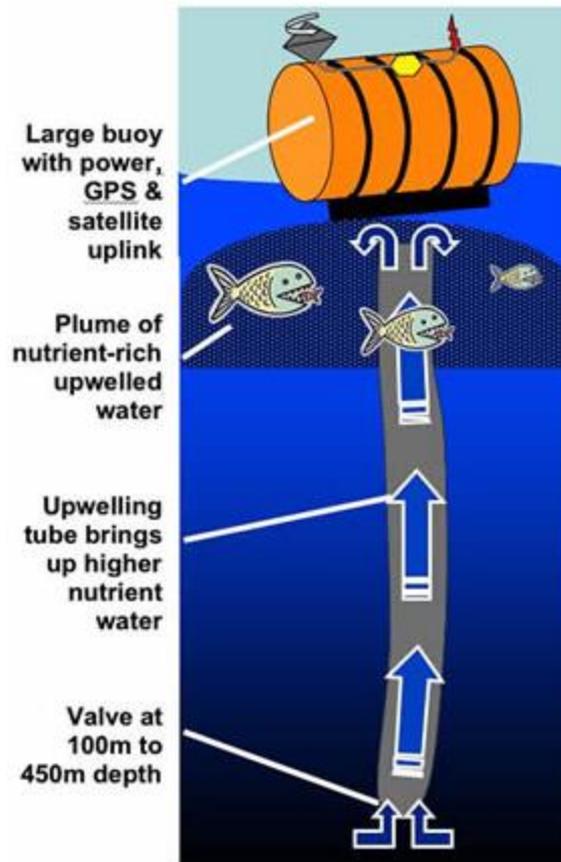
SIR — We propose a way to stimulate the Earth's capacity to cure itself, as an emergency treatment for the pathology of global warming.

James E. Lovelock*, Chris G. Rapley†

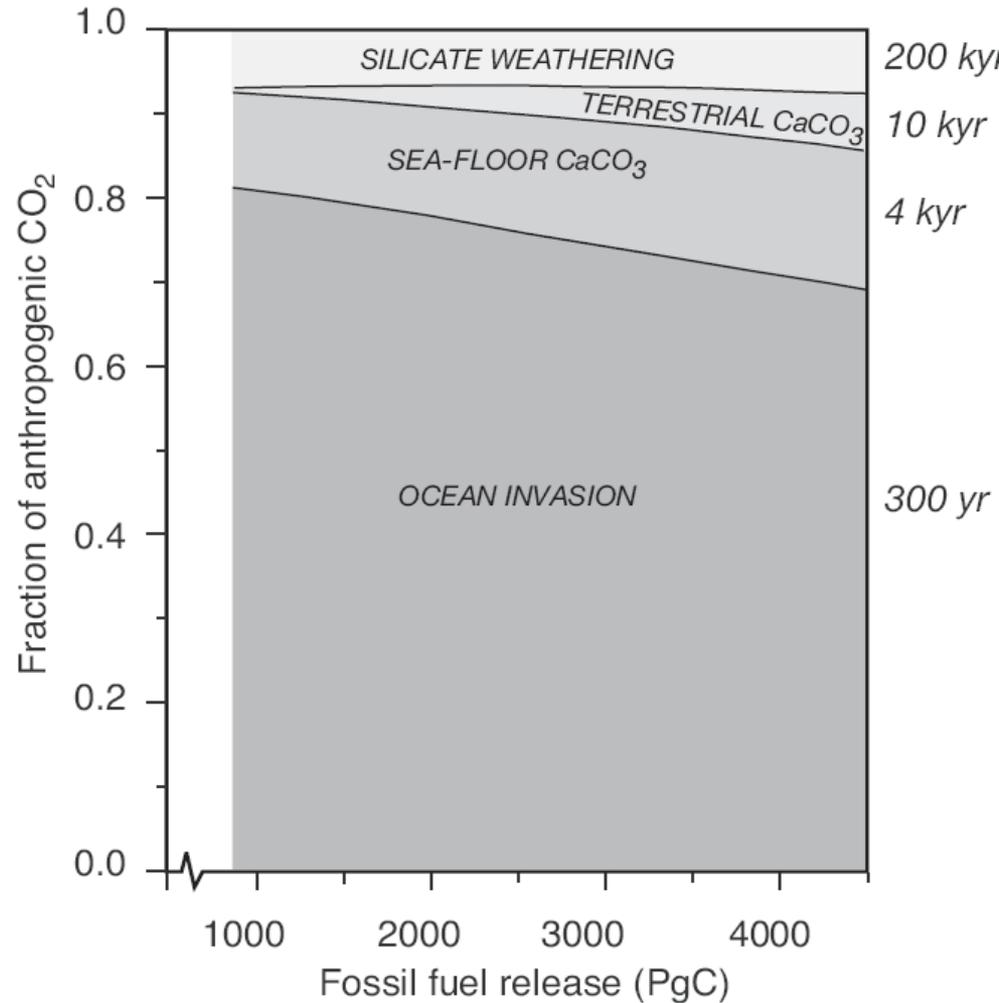
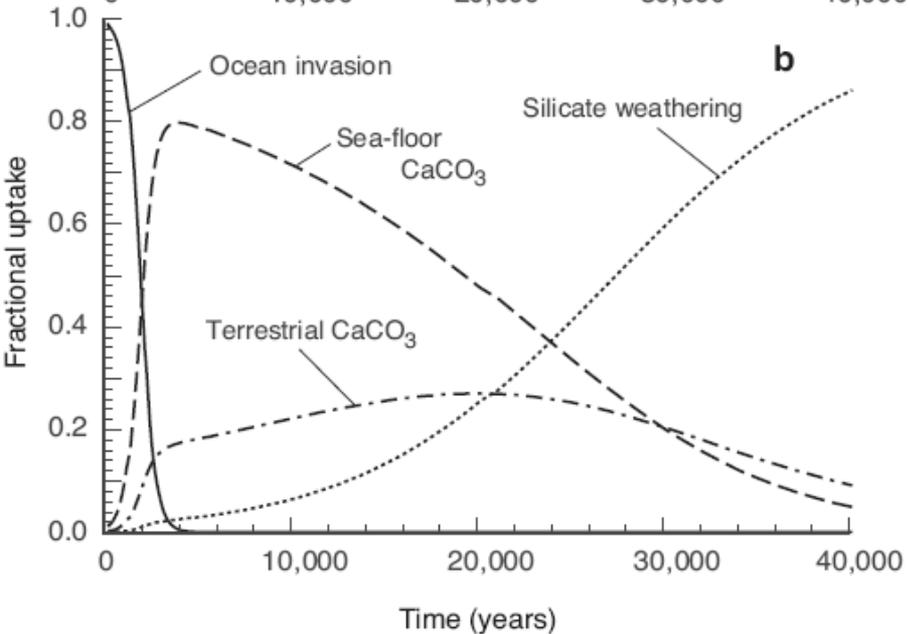
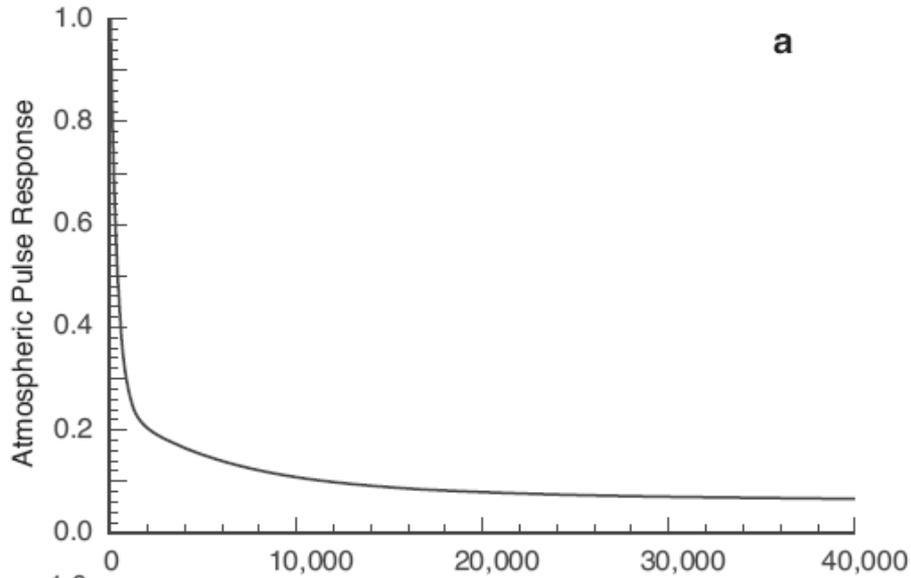
*Green College, University of Oxford,
Woodstock Road, Oxford OX2 6HG, UK

†Science Museum, Exhibition Road,
South Kensington, London SW7 2DD, UK

Nature, 2007



Les mécanismes d'absorption du CO₂ atmosphérique



CO₂

Variations passées du CO₂ atmosphérique

