

Biogeoquímica Marina / Modelos

Cambio Climático y Biogeoquímica Marina

Plan del curso

Introducción -

I. Cuál es la realidad para el cambio climático ?

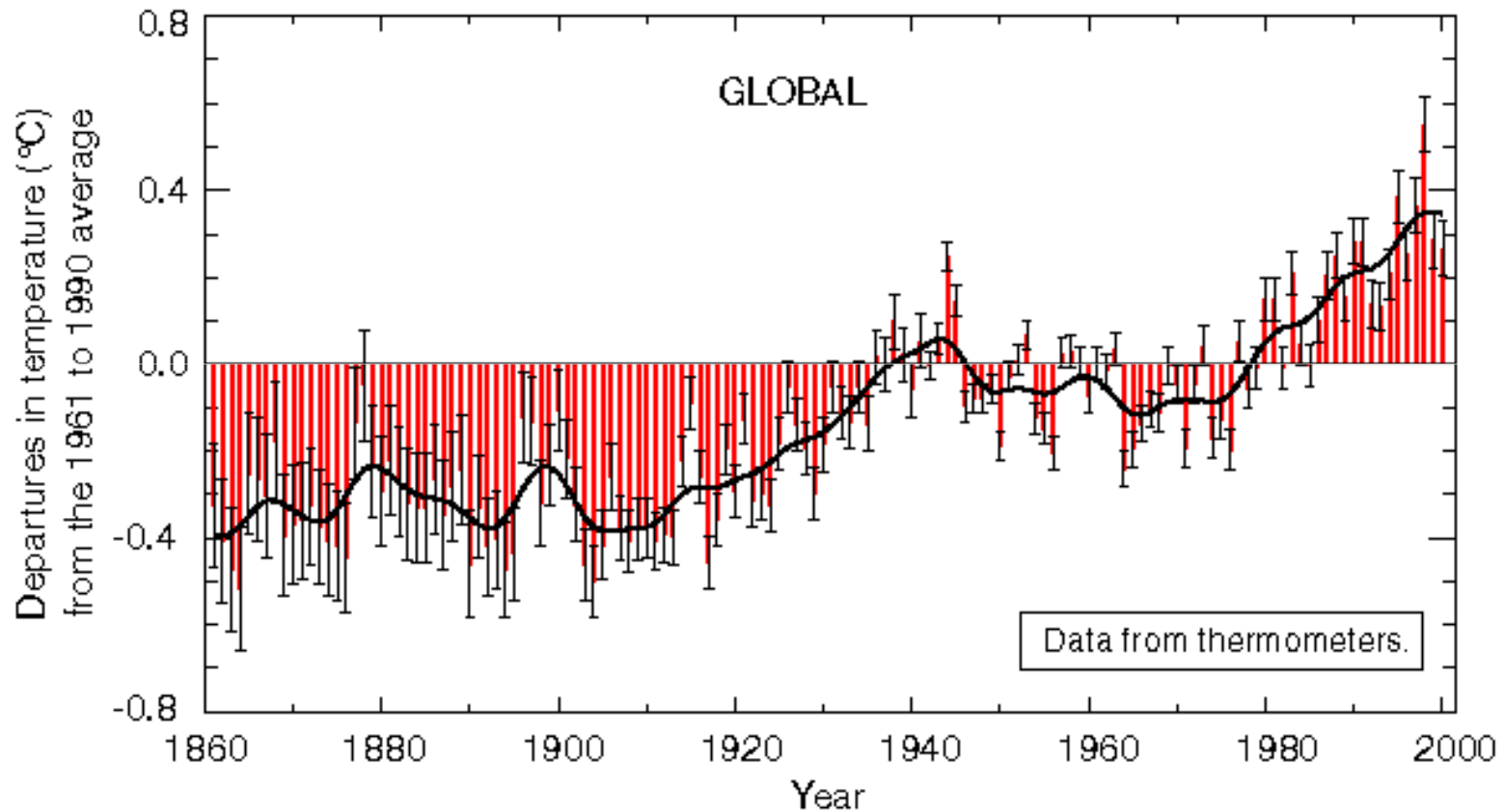
- 1- La observación de los parámetros climáticos
- 2- Evolución de los componentes atmosféricos
- 3- El ciclo del carbono en el corazón del cambio climático

II. Cuál es el rol del ciclo del carbono oceánico ?

- 1- El ciclo natural del carbono en el océano
- 2- La perturbación antrópica
- 3- Escenarios del mañana ?
 - Físico
 - Biológico
 - Carbono
 - Acoplamiento clima-carbono : Retroacción positiva

Calentamiento global

- Desde el fin del siglo XIX, $+0,6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,2$) (temperatura de superficie)

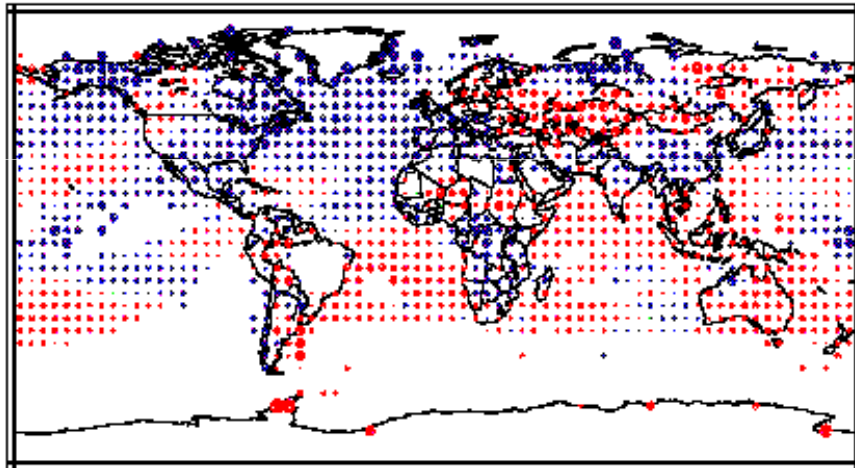


- Confirmado por otros instrumentos (satélites, globos) para los últimos 20 años.

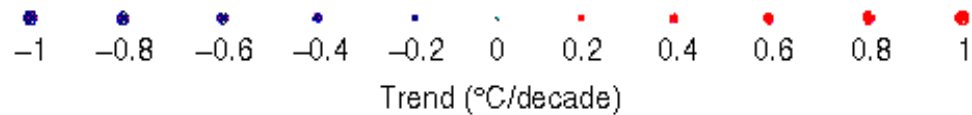
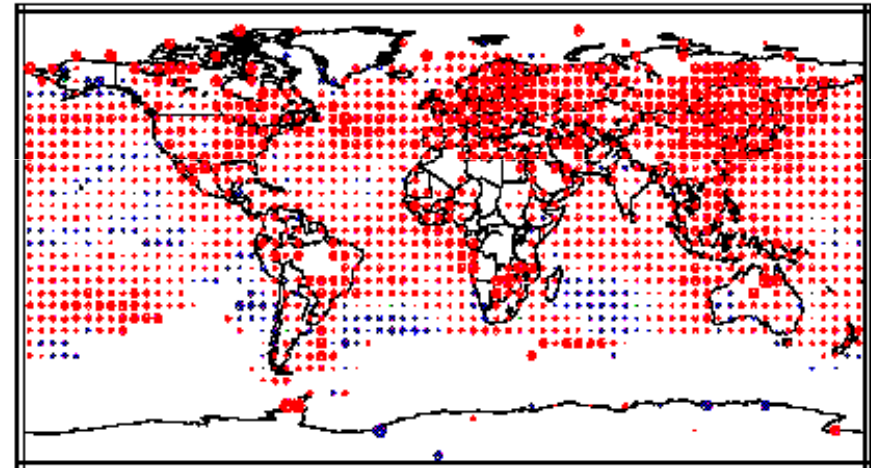
El calentamiento global no es uniforme

- Los continentes (H.N) se calientan más rápido
- Existen zonas/periodos donde la temperatura disminuye
- Influencia de las oscilaciones naturales del sistema climático

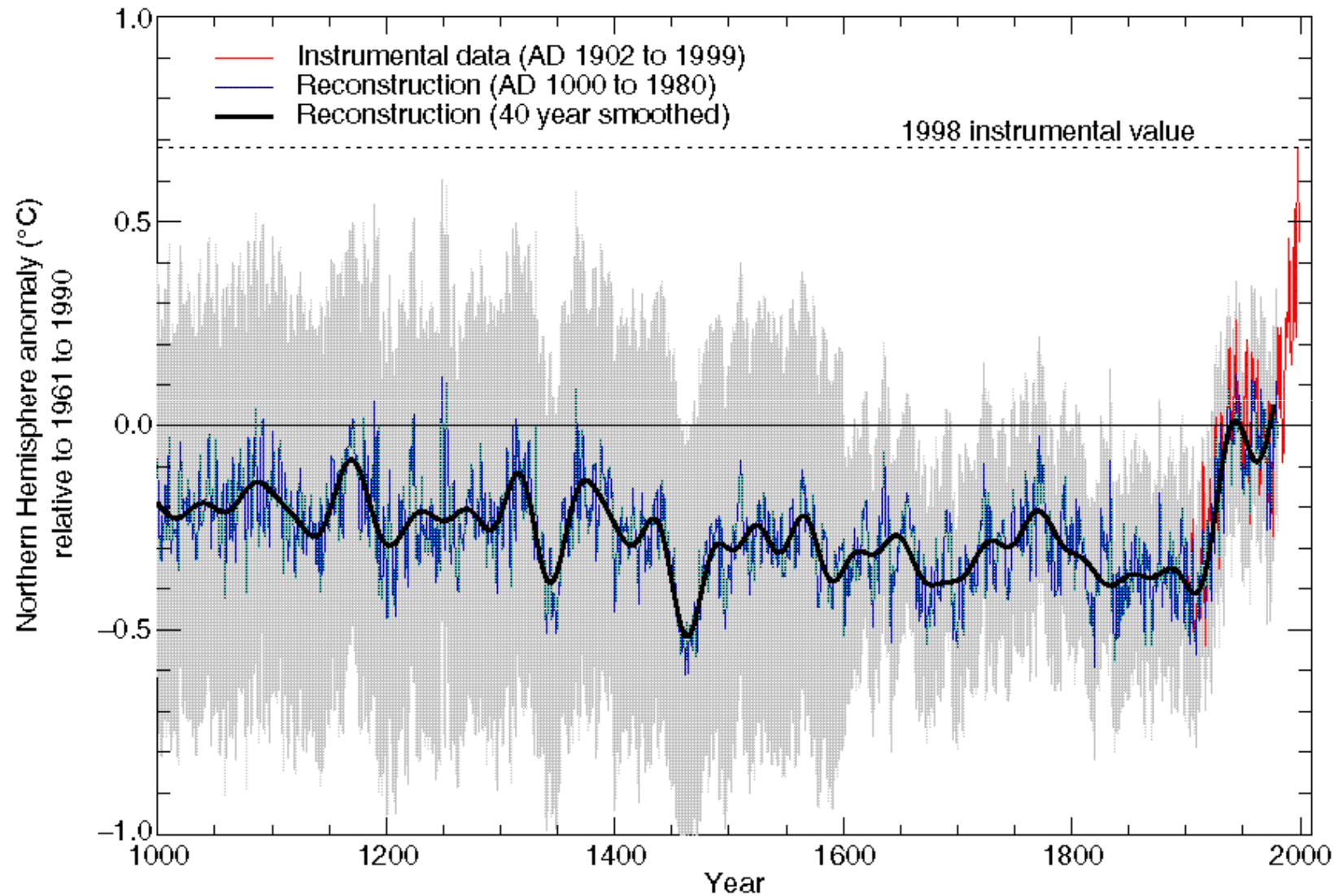
(c) Annual temperature trends, 1946 to 1975



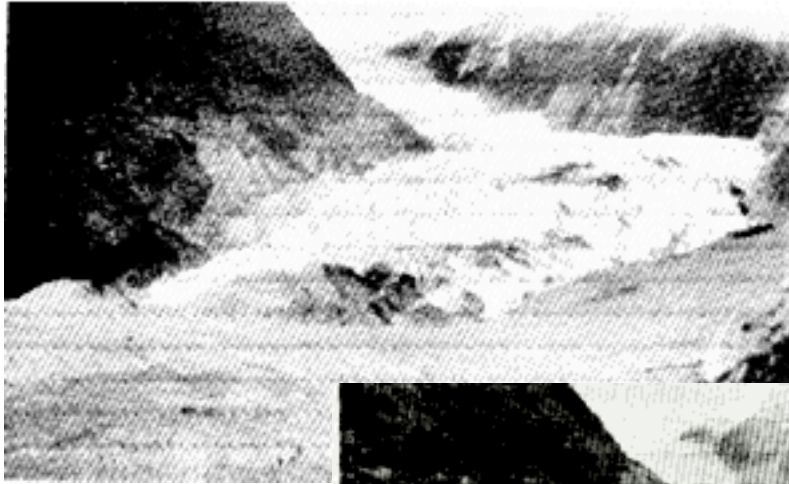
(d) Annual temperature trends, 1976 to 2000



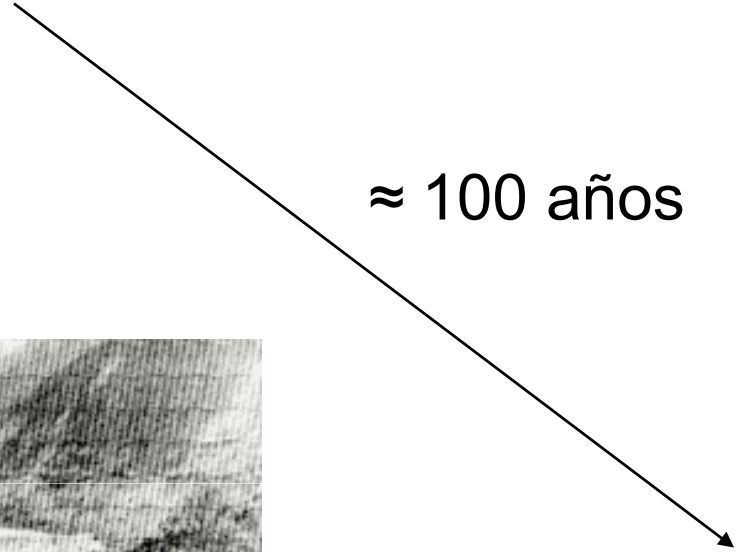
El calentamiento global parece excepcional ...
(a la vista de los últimos 1000 años)



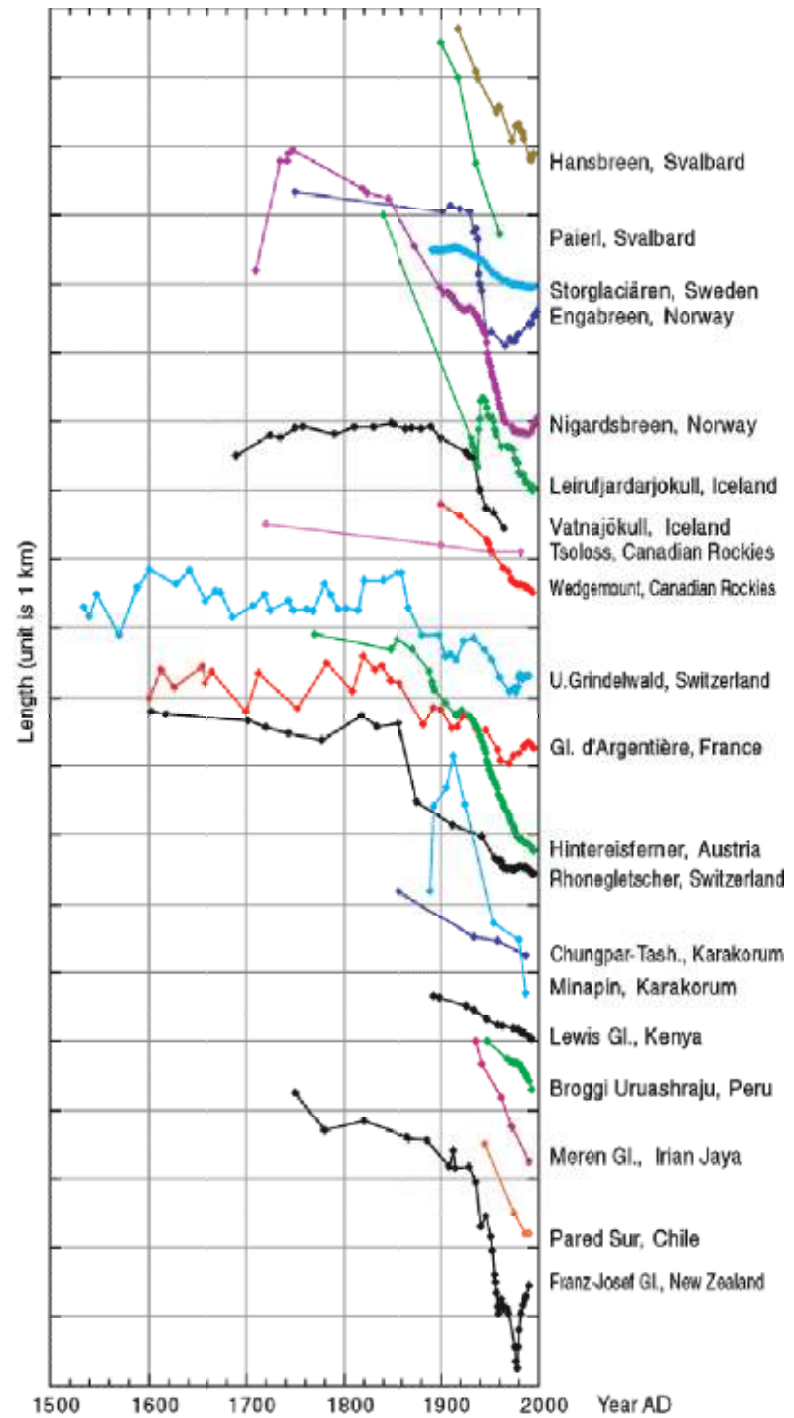
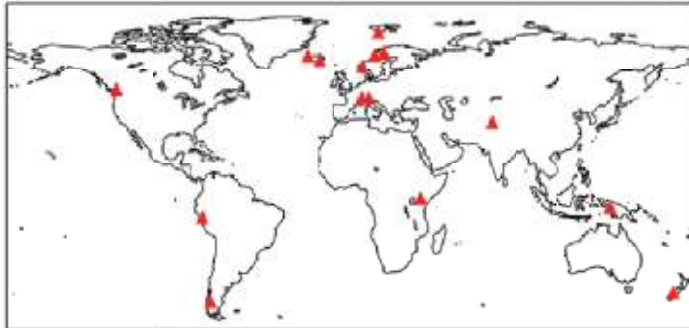
Retroceso de los glaciares Alpinos desde 1850



≈ 100 años

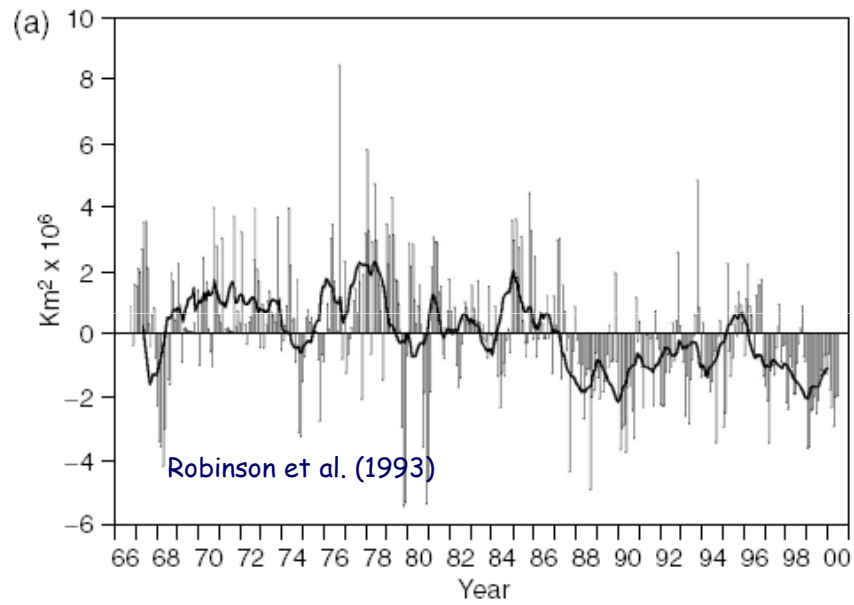


Glaciares de Montaña

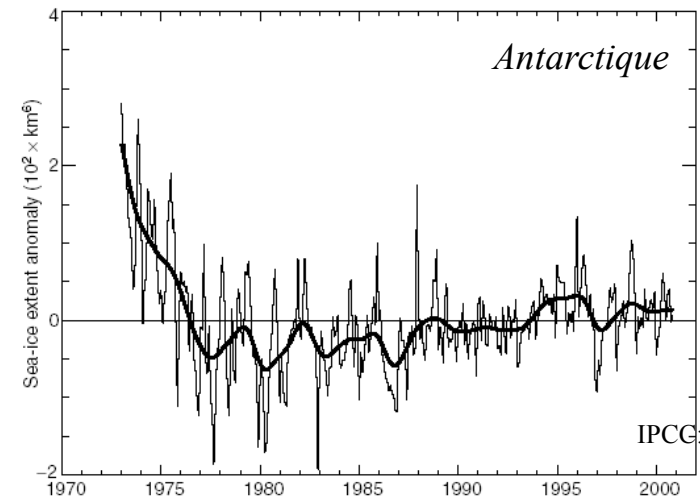
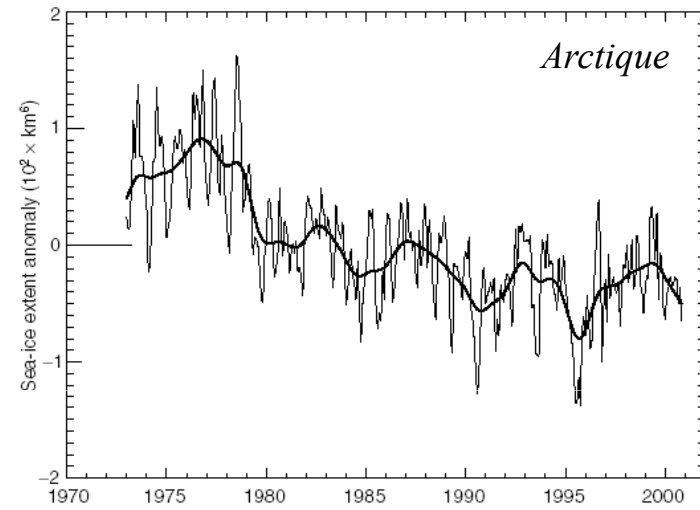


Hielo de mar

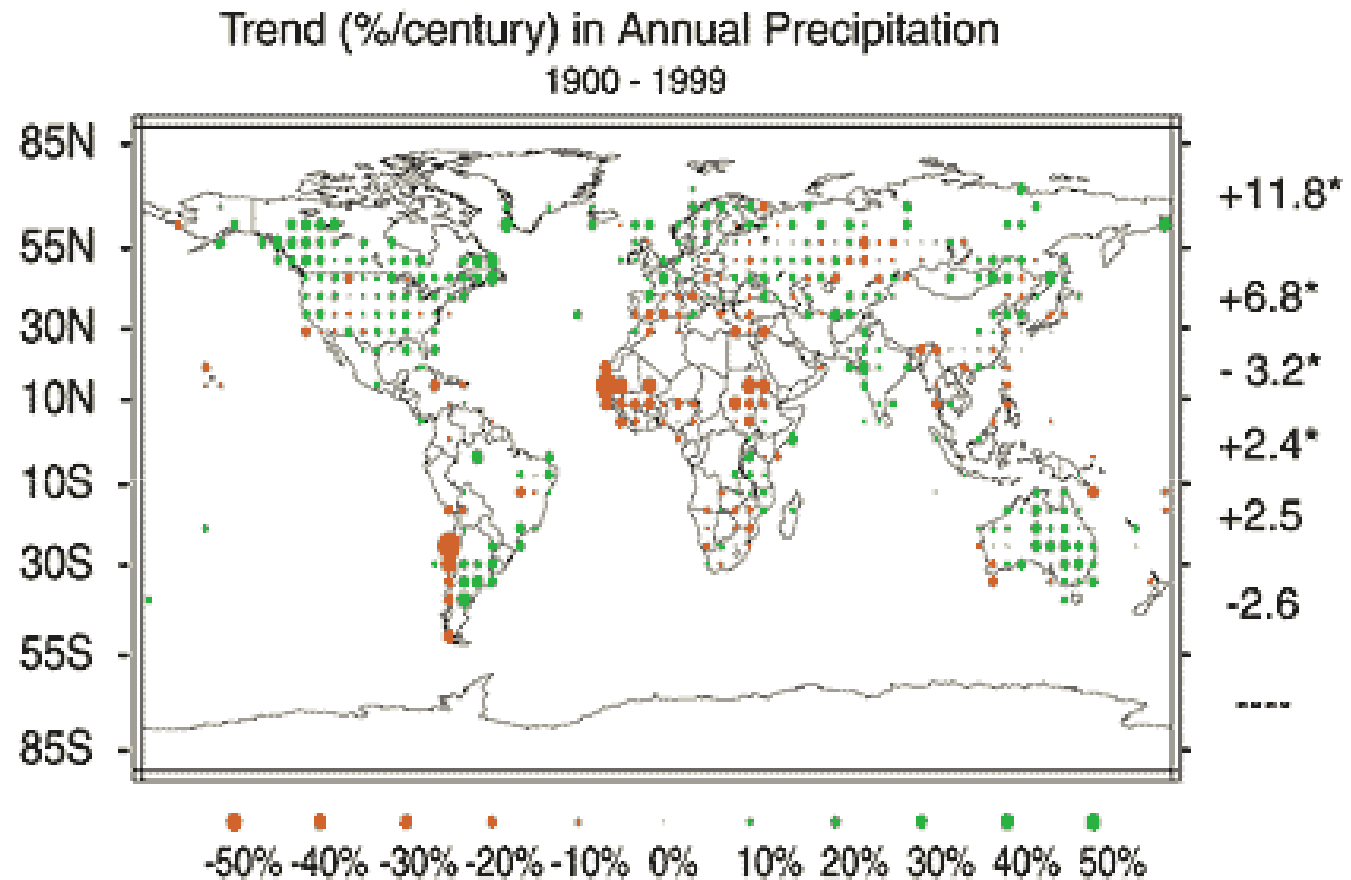
Cobertura de nieve (NOAA/NESDIS)



Mean : $25.2 \cdot 10^6 \text{ km}^2$



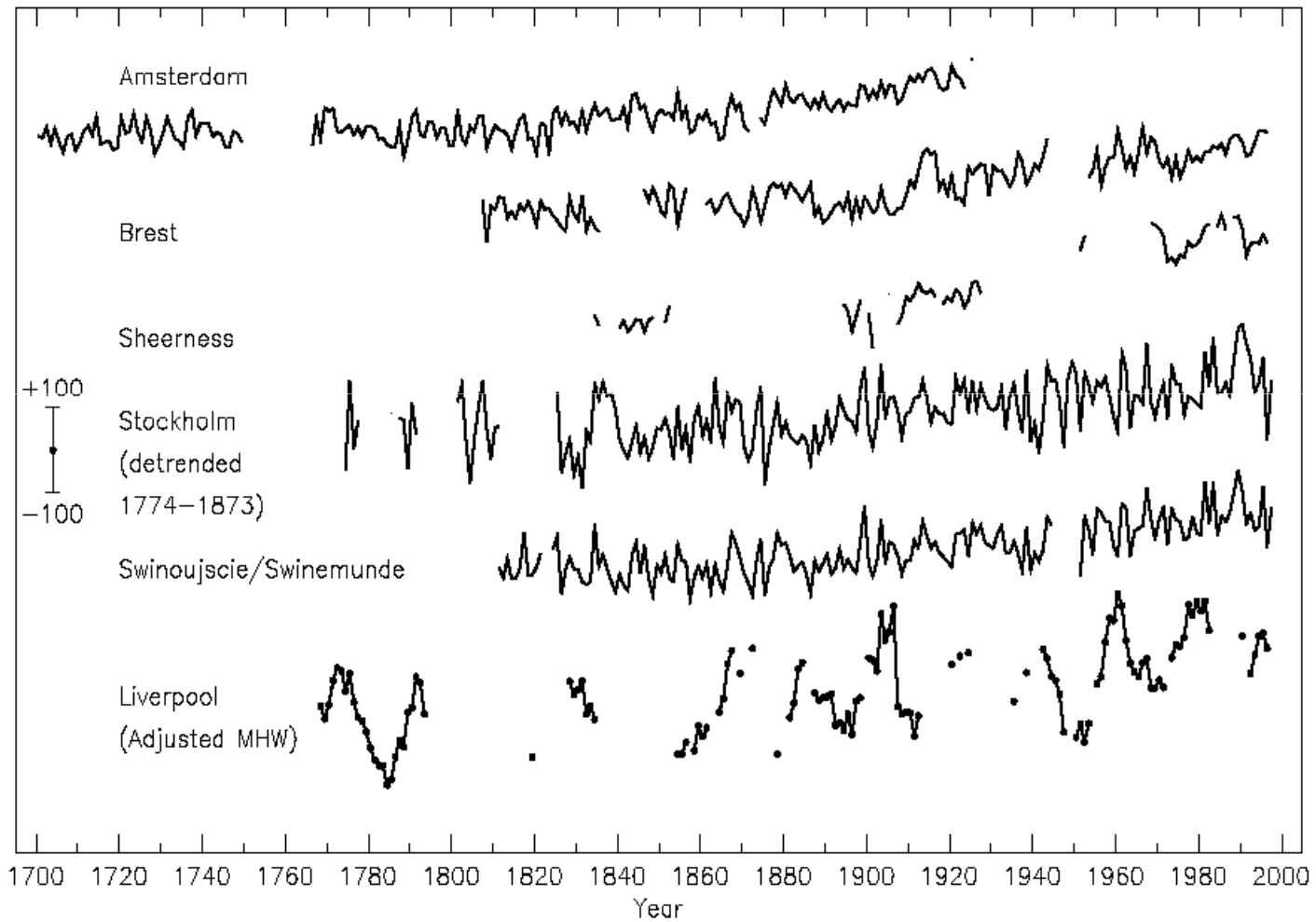
Las precipitaciones son también modificadas ...



- medias/altas latitudes del H.N : las precip. aumentan (+0,5/1%/década)
- sub-trópicos (10N-30N) : las precipitaciones disminuyen (-0.3%/década)

El nivel del mar sube... de 1 à 2 mm/año.

- medidas : mareógrafos



- mecanismos : sobre todo ligados a la expansión térmica hoy en día

El nivel del mar sube ...

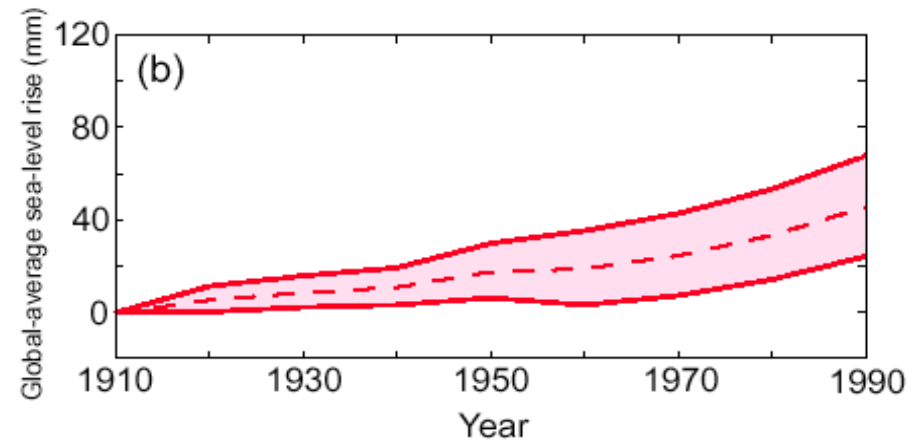
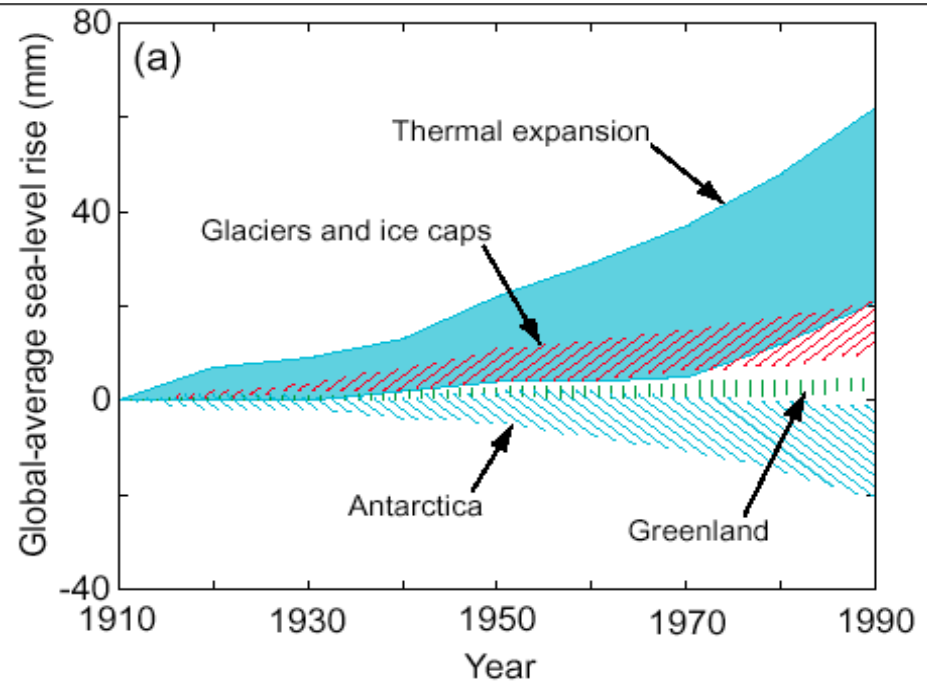


Figure 11.10: Estimated sea-level rise from 1910 to 1990. (a) The thermal expansion, glacier and ice cap, Greenland and Antarctic contributions resulting from climate change in the 20th century calculated from a range of AOGCMs. (b) The mid-range and upper and lower bounds for the computed response of sea level to climate change (the sum of the terms in (a) plus the contribution from permafrost). These curves represent our estimate of the impact of anthropogenic climate change on sea level during the 20th century. (c) The mid-range and upper and lower bounds for the computed sea-level change (the sum of all terms in (a) with the addition of changes in permafrost, the effect of sediment deposition, the long-term adjustment of the ice-sheets to past climate change and the terrestrial storage terms).

El Cambio Climático afecta todos los componentes

Atmósfera :

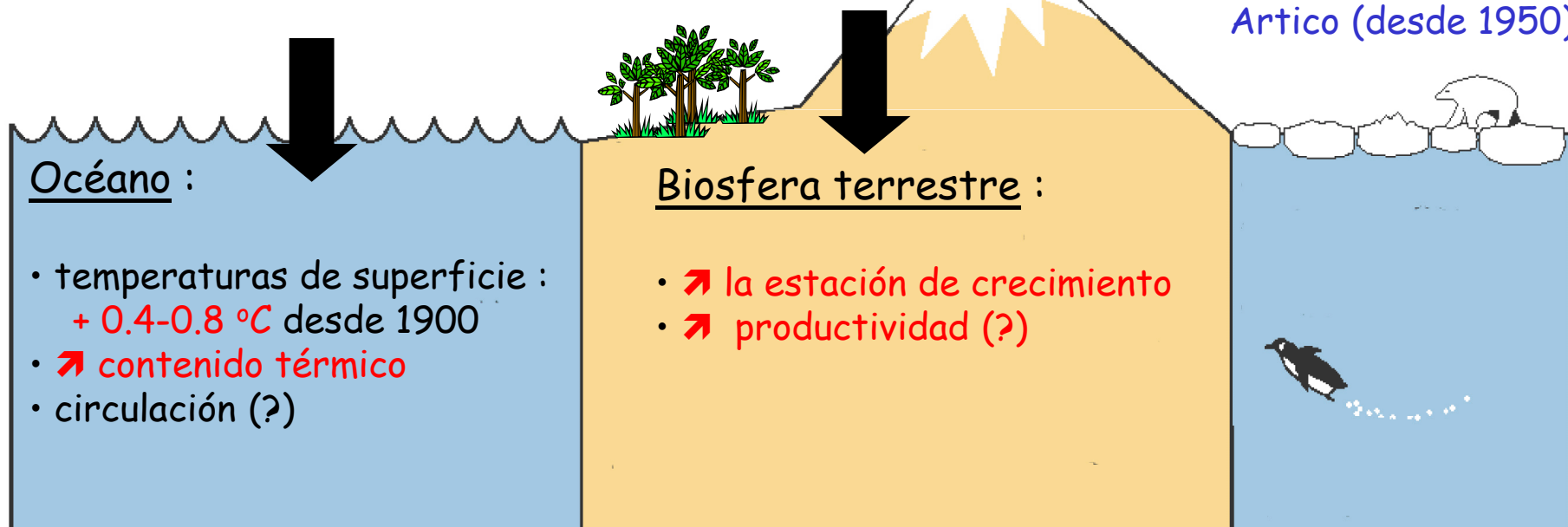
- temperaturas :
 - ↗ en la troposfer
 - ↘ dans la stratosphère
- ↗ cobertura nubosa

Sobre los Continentes :

- + 0.4-0.8 °C desde 1900
- Precipitaciones :
 - ↗ en latitudes medias
 - ↘ en los subtrópicos
- ↘ glaciares y nieve

Hielo de mar :

- ↘ espesor y extensión en el Artico (desde 1950)



Océano :

- temperaturas de superficie :
 - + 0.4-0.8 °C desde 1900
- ↗ contenido térmico
- circulación (?)

Biosfera terrestre :

- ↗ la estación de crecimiento
- ↗ productividad (?)

Evolución de ciertos componentes atmosféricos

- GEI (desde 1750) :

CO_2 : +31 %

CH_4 : +151 %

N_2O : +17 %

Halocarbonos

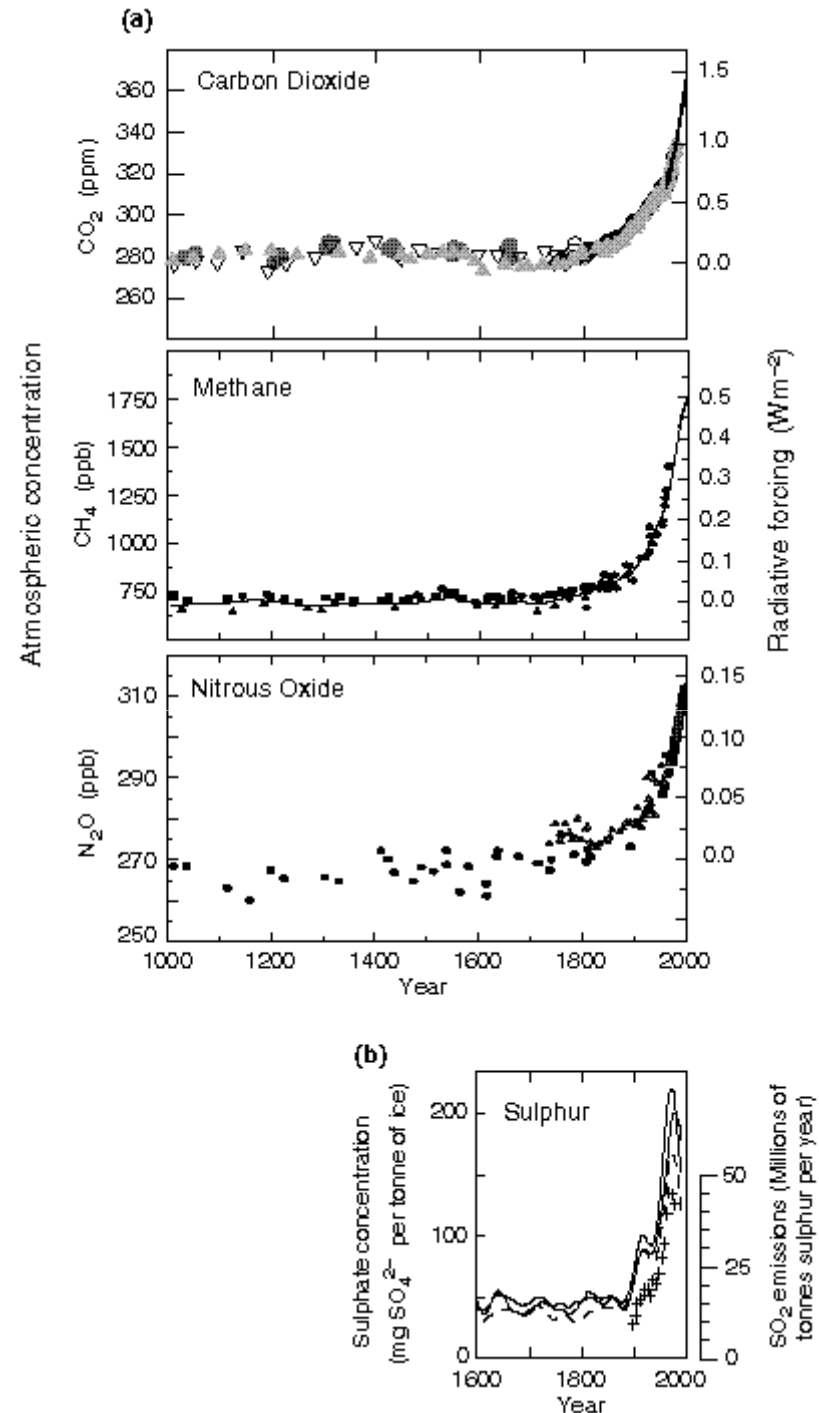
O_3 trop. : +36 %

- aerosoles :

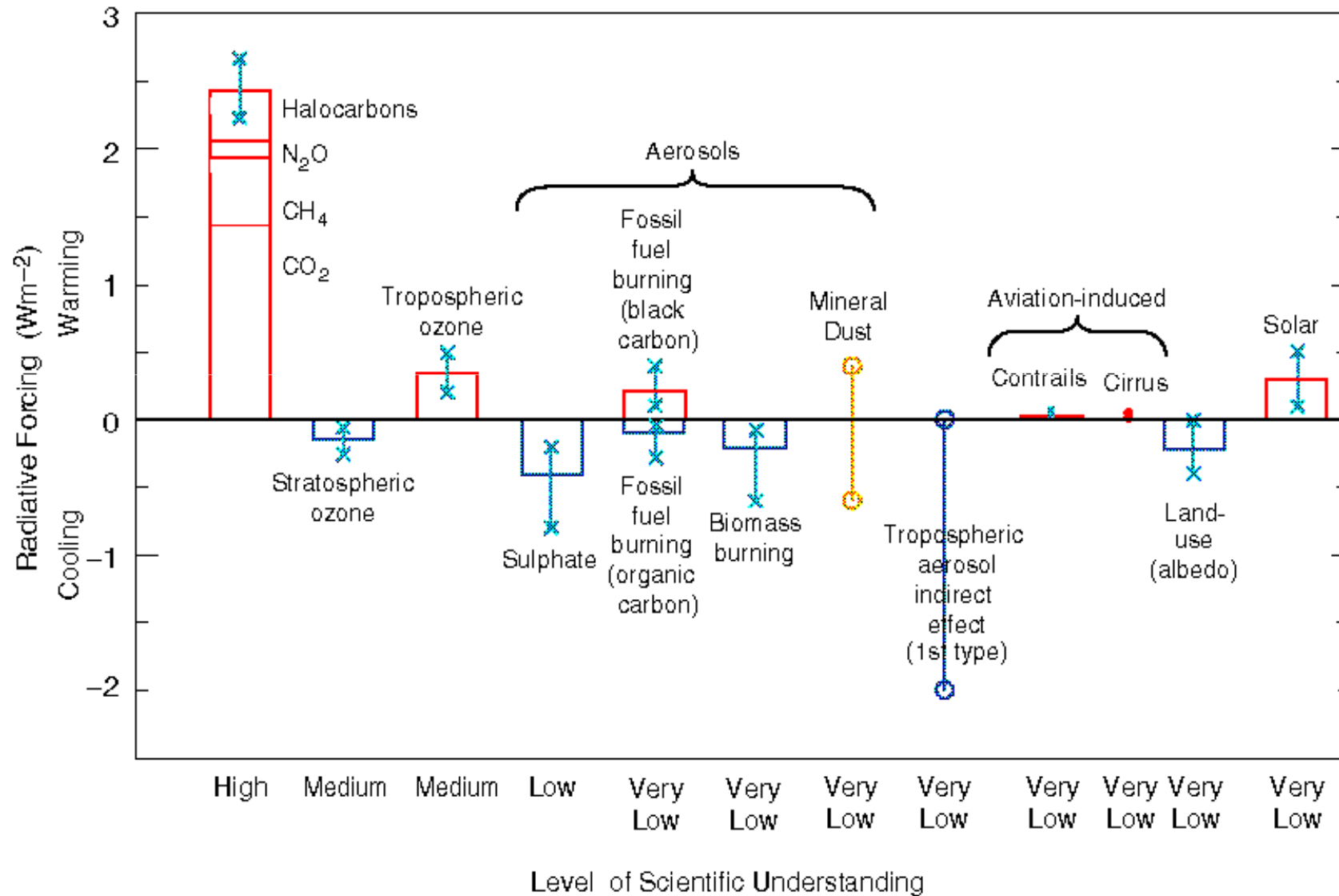
sulfatos

polvos minerales

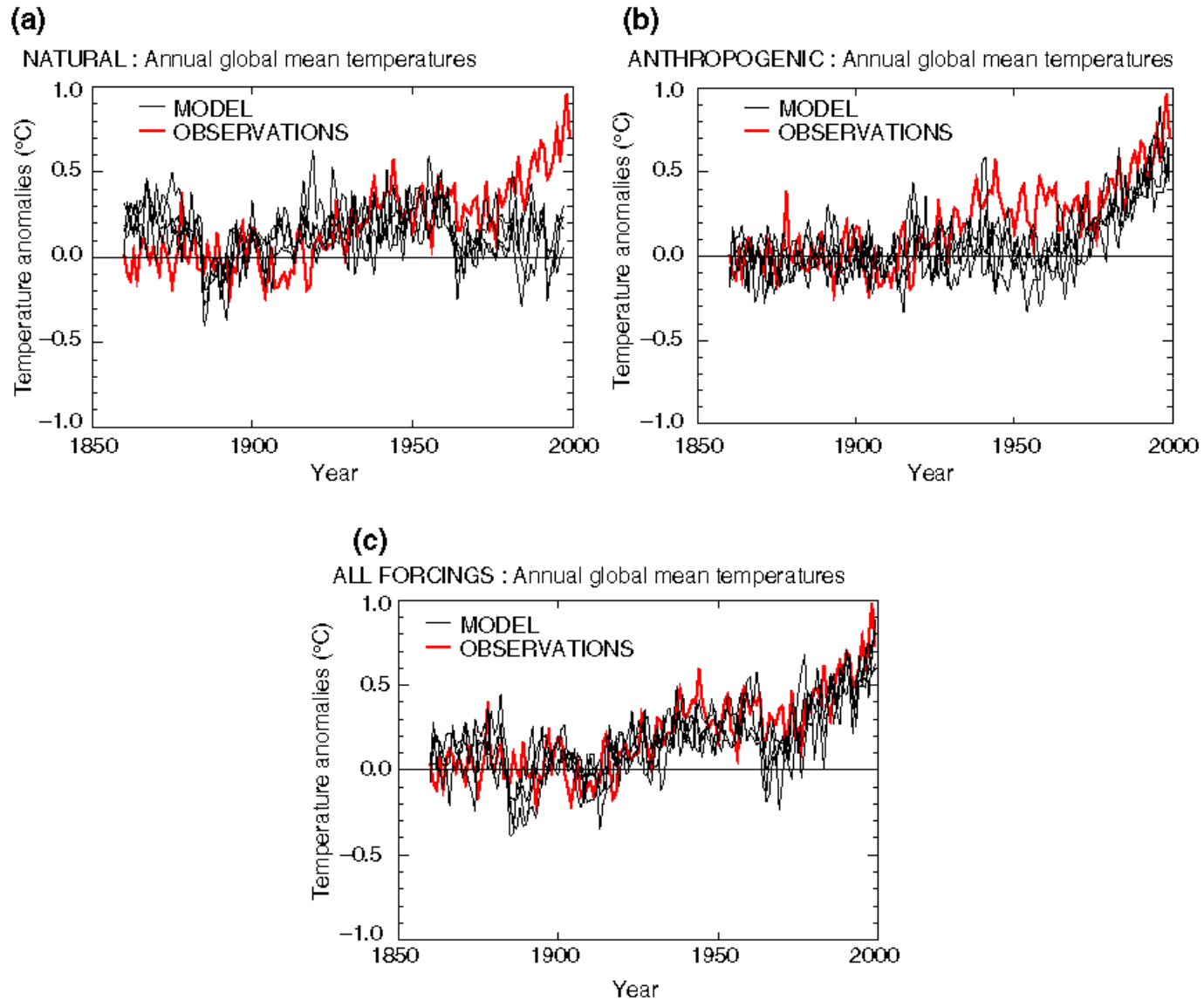
carbón orgánico / carbón 'suie'



Balance : Forzantes radiativos antropico/natural para el año 2000 (/1750)



« Pruebas, nuevas y más fuertes, muestran que la mayor parte del El calentamiento observado en los últimos 50 años se atribuye a la actividad humana »
(IPCC, 2001)



Plan del curso

Introducción -

I. Cuál es la realidad para el cambio climático ?

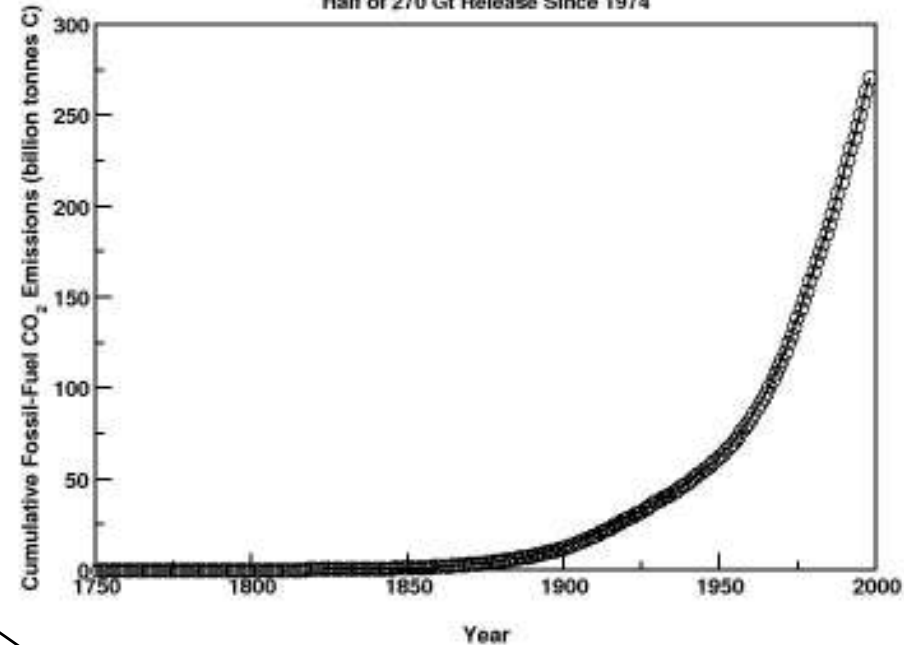
- 1- La observación de los parámetros climáticos
- 2- Evolución de los componentes atmosféricos
- 3- El ciclo del carbono en el corazón del cambio climático

II. Cuál es el rol del ciclo del carbono oceánico ?

- 1- El ciclo natural del carbono en el océano
- 2- La perturbación antrópica
- 3- Escenarios del mañana ?
 - Físico
 - Biológico
 - Carbono
 - Acoplamiento clima-carbono : Retroacción positiva

Emisiones Antrópicas de CO₂

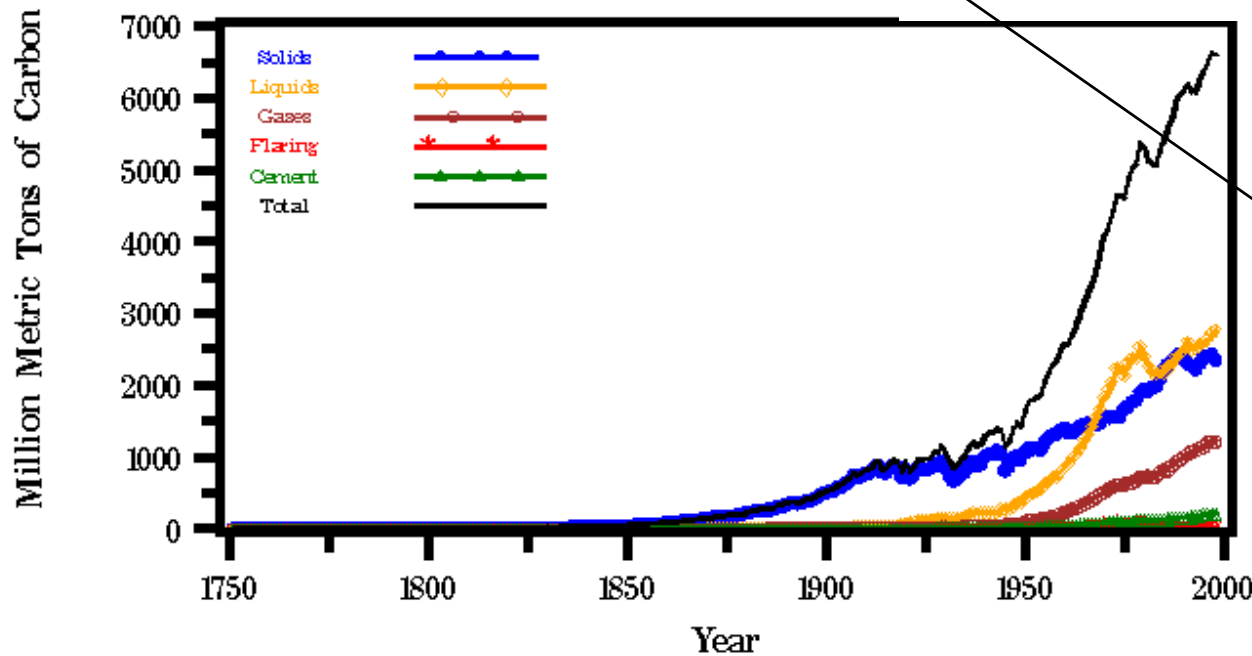
Cumulative Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Consumption and Cement Production
Half of 270 Gt Release Since 1974



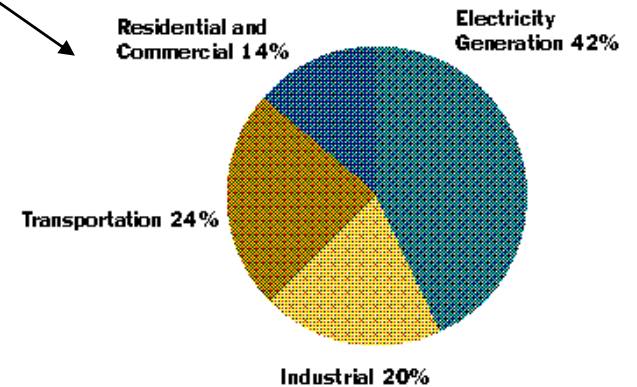
Emisiones globales acumuladas →

Por tipo de producto ↓

Actividades ↘

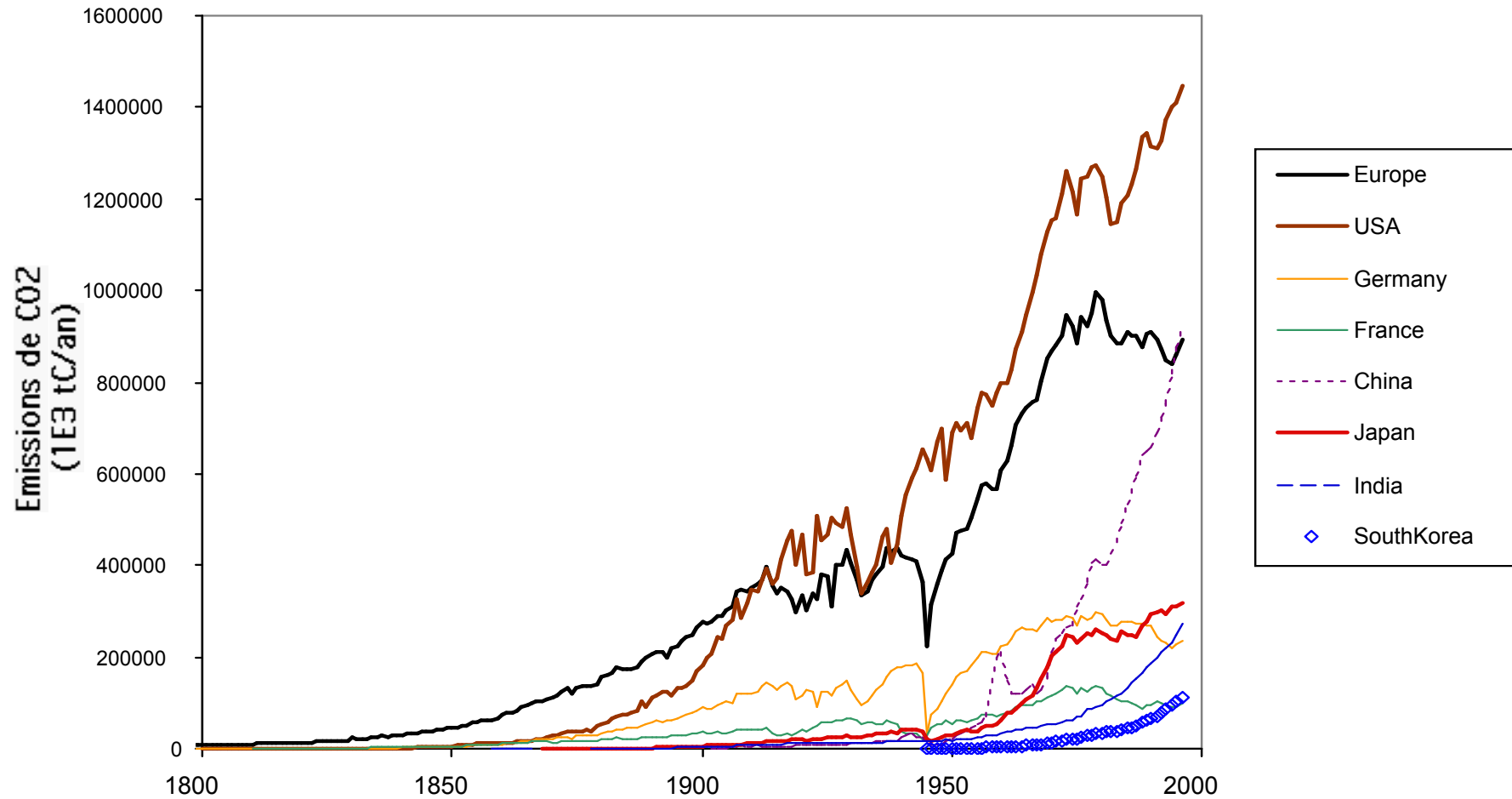


Worldwide Sources of CO₂
Emissions by Sector, 1998



Source: IEA, 2000a.

Emisiones Antrópicas de CO₂



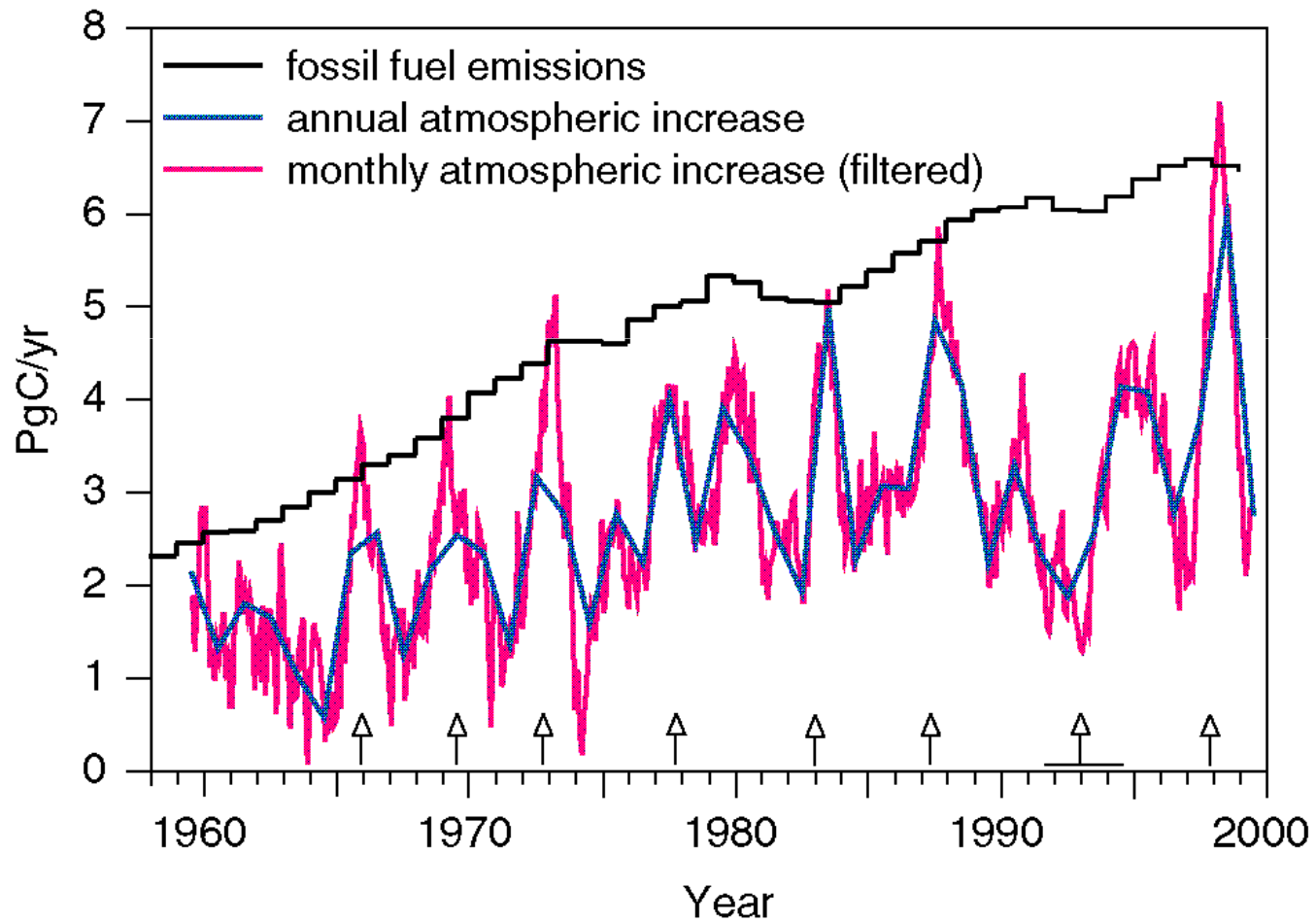
fuentes de 6.3 GtC año⁻¹ en los '90

La deforestación : una fuente de 0.6 à 2.5 GtC año⁻¹

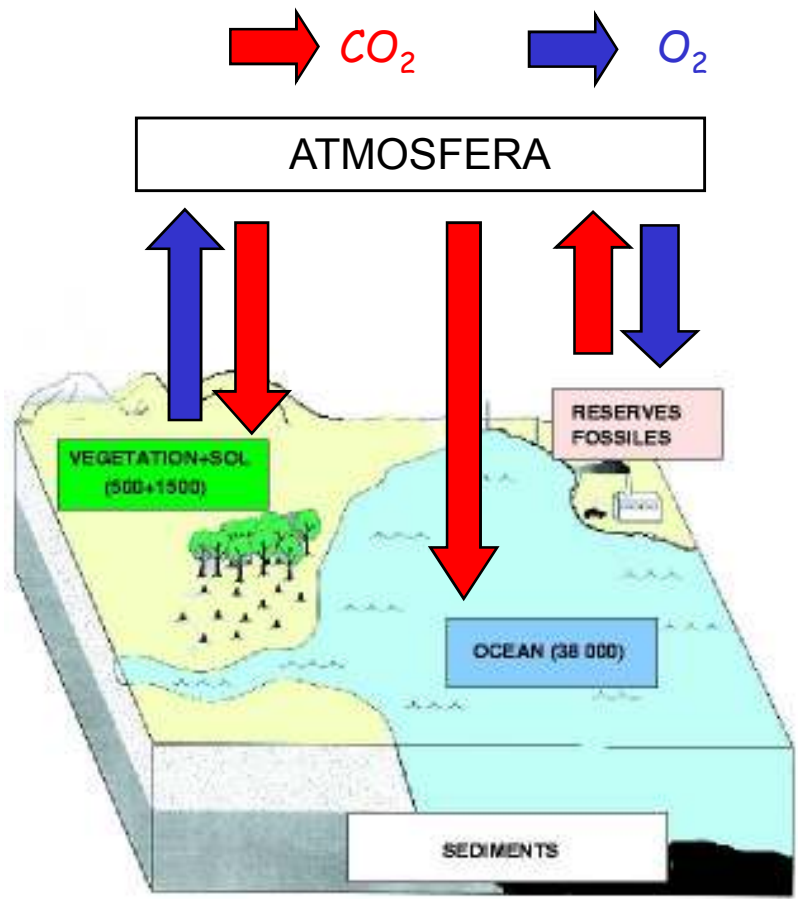
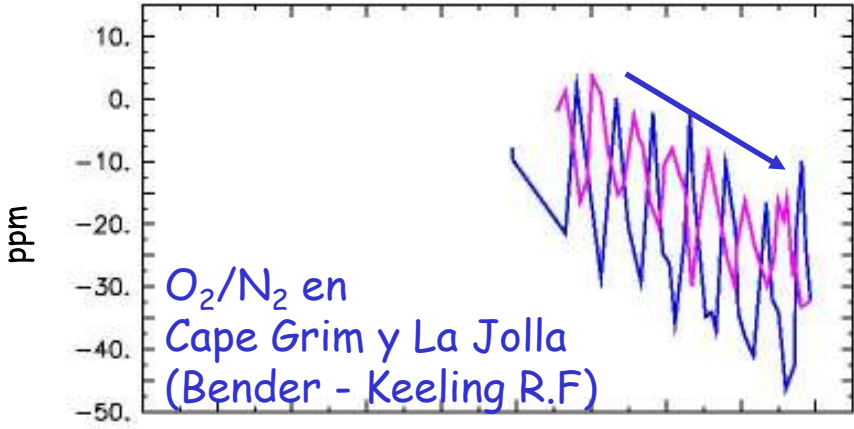
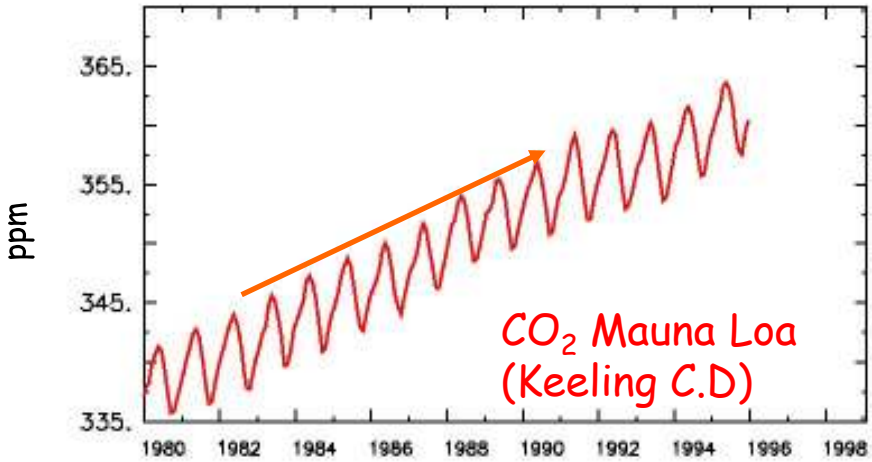
Asia : 1.08
Am. Del Sur : 0.55
Africa : 0.29



Los sumideros de Carbono ?



El oxígeno atmosférico como 'constraint' para el ciclo del carbono



Varias hipótesis y datos son necesarias para tratar el problema :

- Para la fotosíntesis, 1.1 mol de O_2 son producidas para cada mol de CO_2 que entra dans la biosfera.
- Para la combustión de combustibles fósiles, 1.43 mol de O_2 son utilizados para la liberación de 1 mol de CO_2 . Se supone que para este período 6.3 GtC son liberadas cada año.
- Se supone que los intercambios netos oceánicos de oxígeno son nulos para el período considerado.

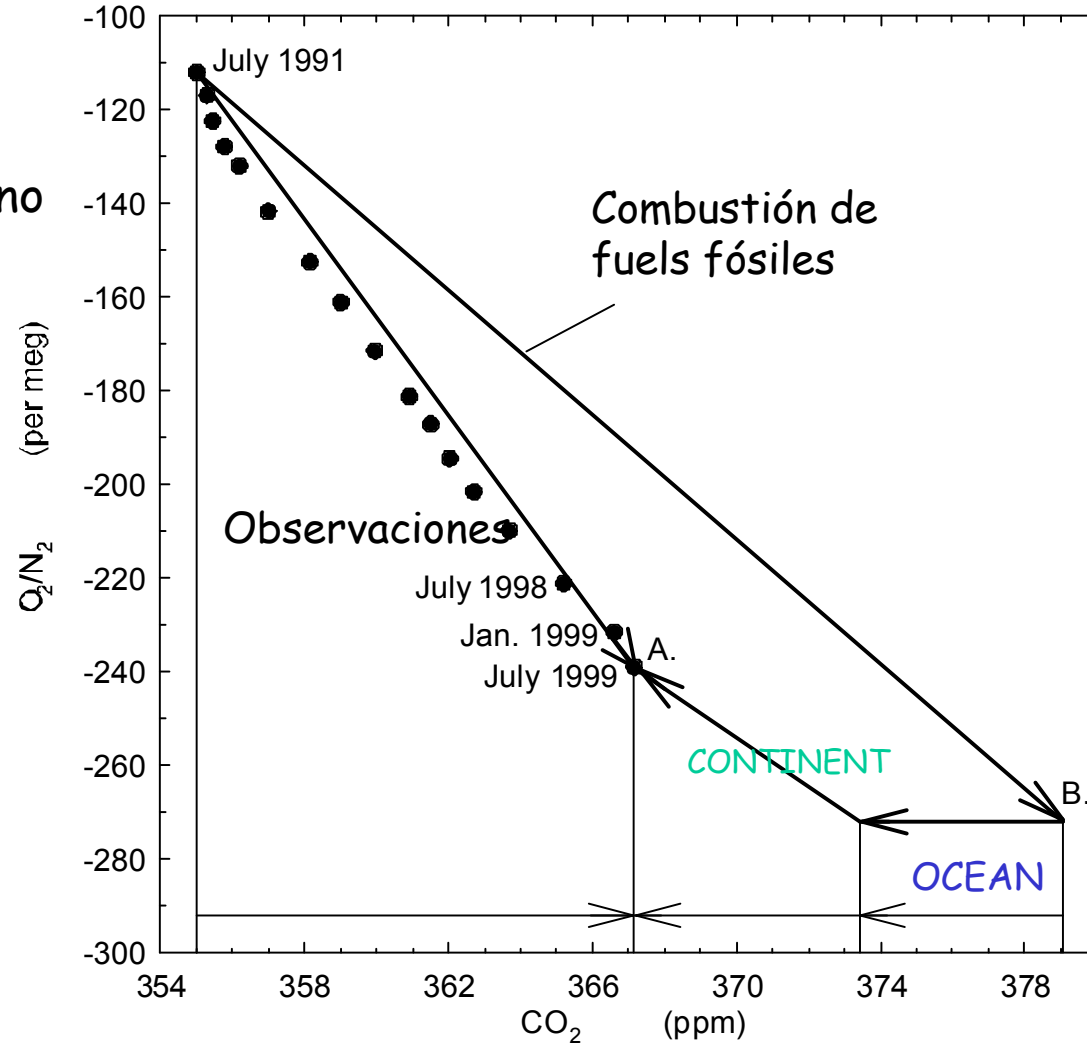
Finalmente, las medidas atmosféricas muestran para el período considerado :

- Un aumento de CO_2 atmosférico medio de 1.5 ppm/año.
- Una disminución de oxígeno de 14.7 Mg/an. (con estequiometría igual, 4.18 Mg de O_2 corresponden à 1 ppm de CO_2).

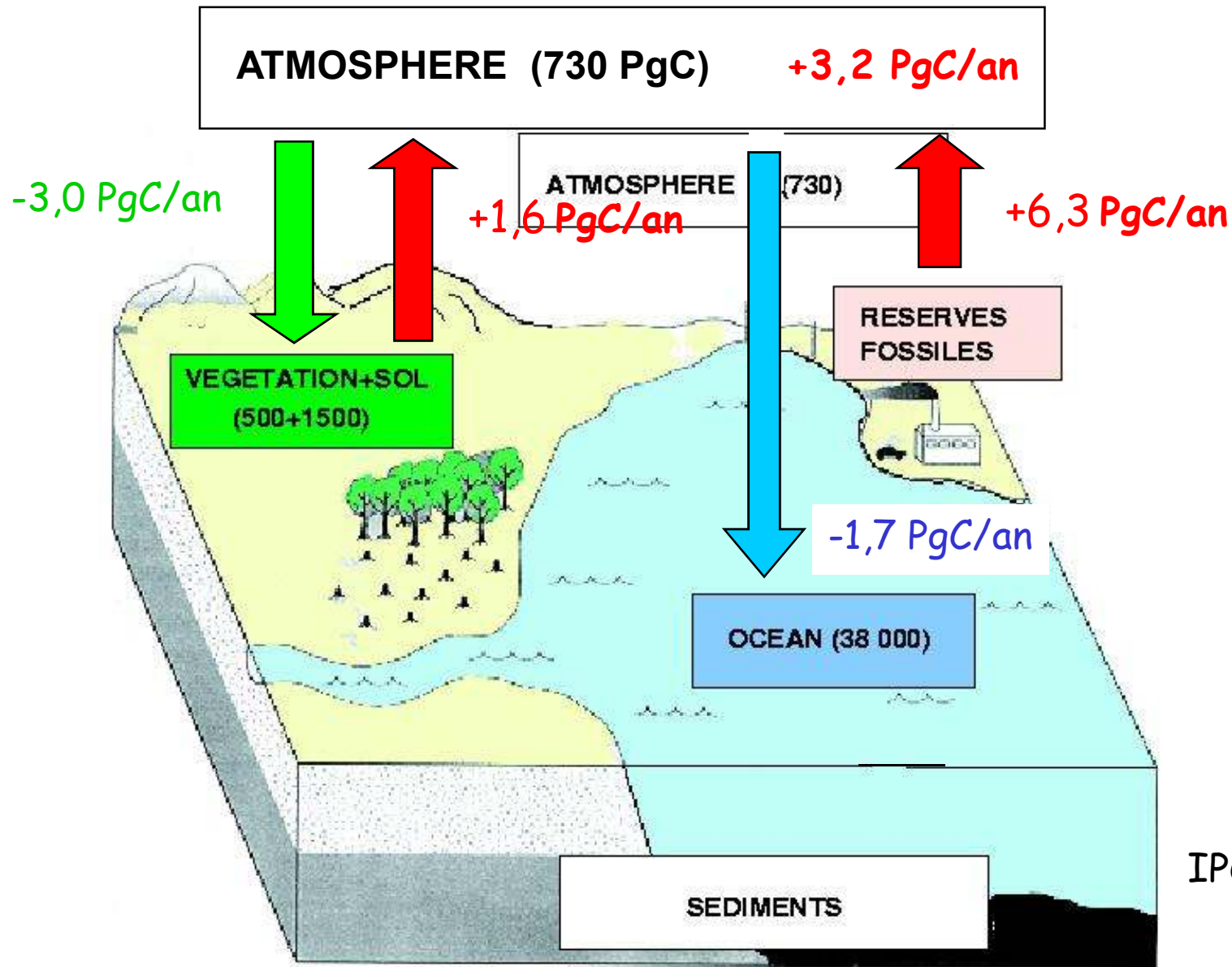
El oxígeno atmosférico para contraindrear el ciclo del carbono

$$CO_2 = FF - Cont. - Océano$$

$$O_2 = \alpha FF - \beta Cont.$$



El Ciclo del Carbono y su Perturbación (1990-1999)



IPCC, 2001

Plan del curso

Introducción -

I. Cuál es la realidad para el cambio climático ?

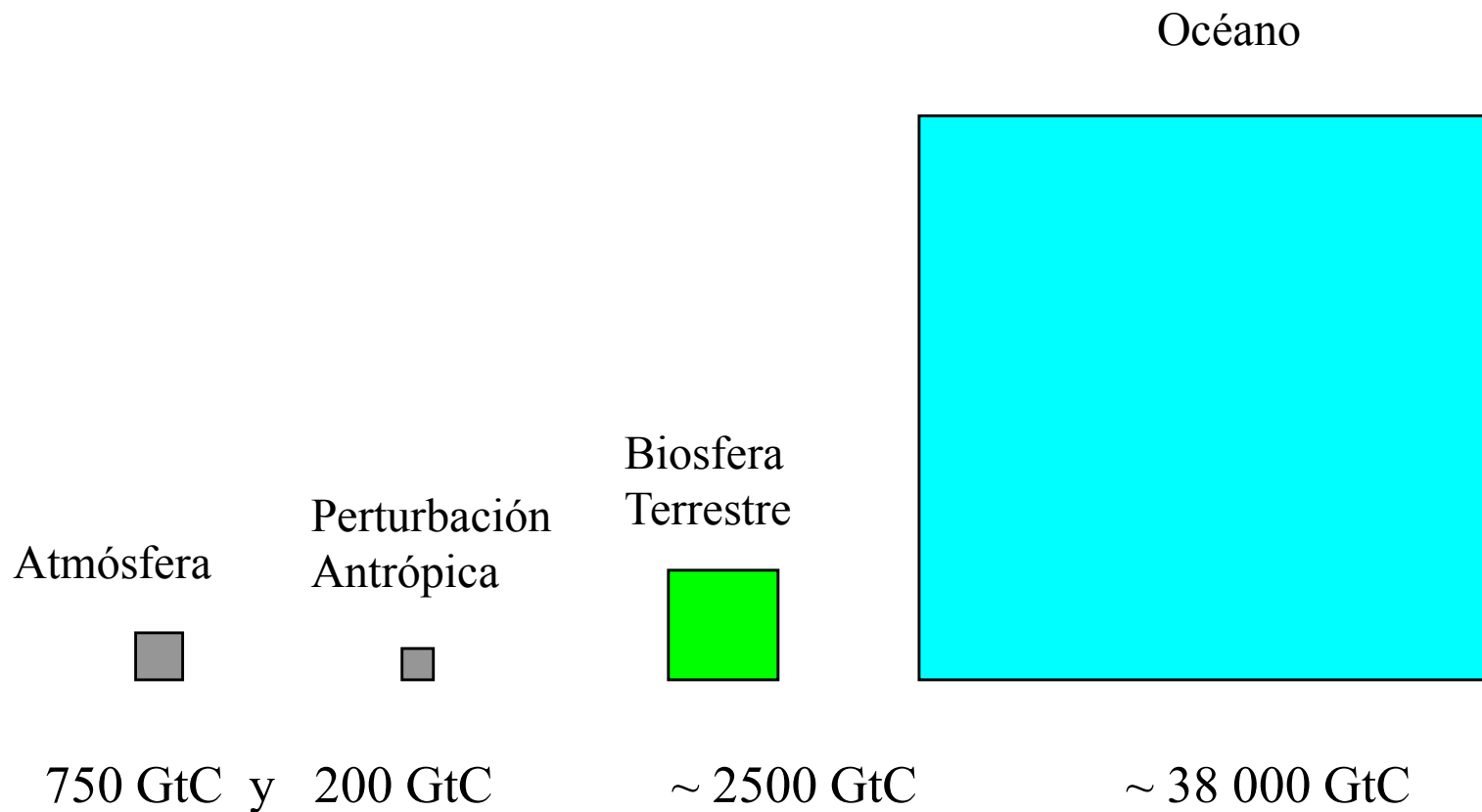
- 1- La observación de los parámetros climáticos
- 2- Evolución de los componentes atmosféricos
- 3- El ciclo del carbono en el corazón del cambio climático

II. Cuál es el rol del ciclo del carbono oceánico ?

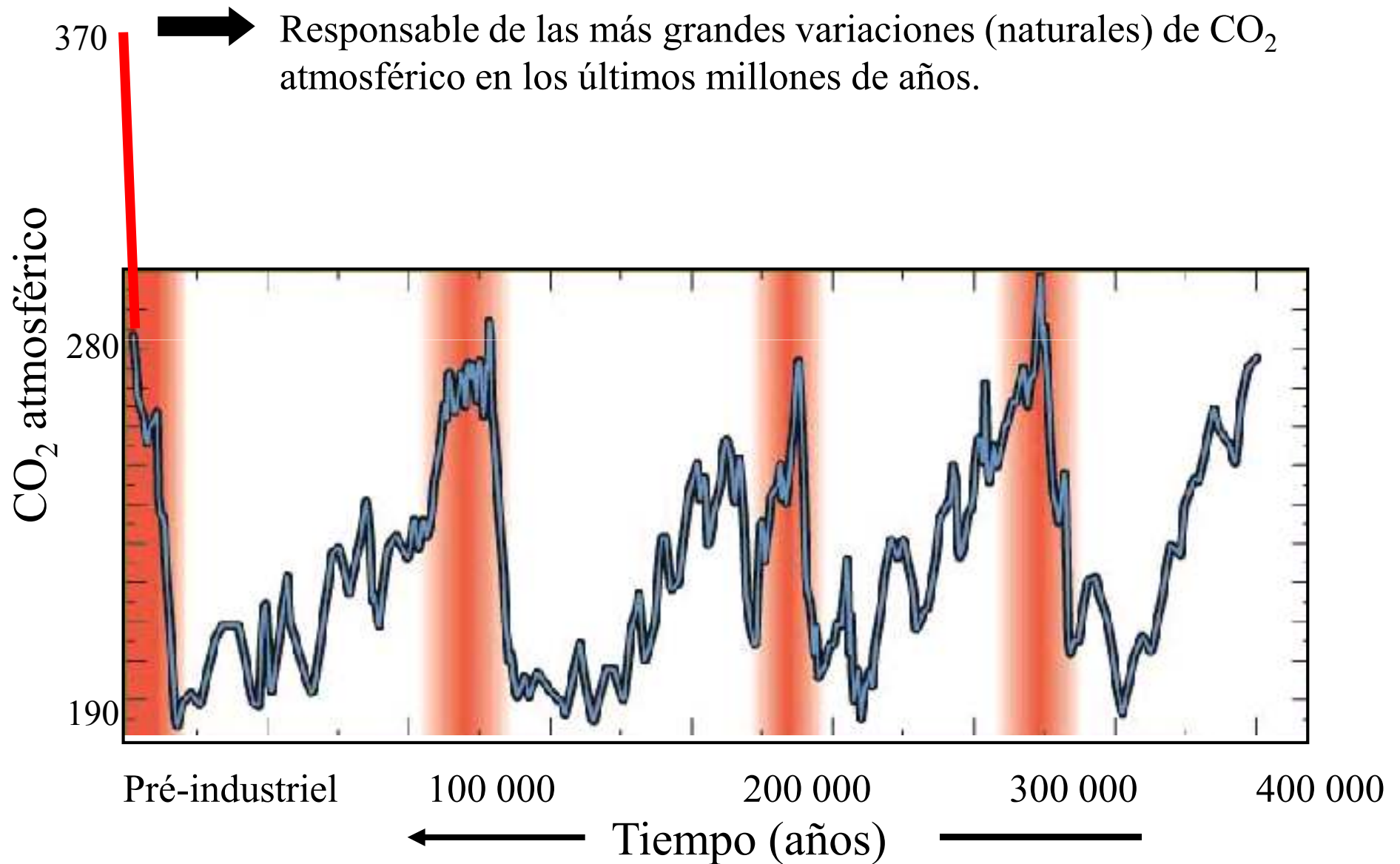
- 1- El ciclo natural del carbono en el océano
- 2- La perturbación antrópica
- 3- Escenarios del mañana ?
 - Físico
 - Biológico
 - Carbono
 - Acoplamiento clima-carbono : Retroacción positiva

Por qué interesarse en el océano ?

➔ Tamaño del reservorio oceánico

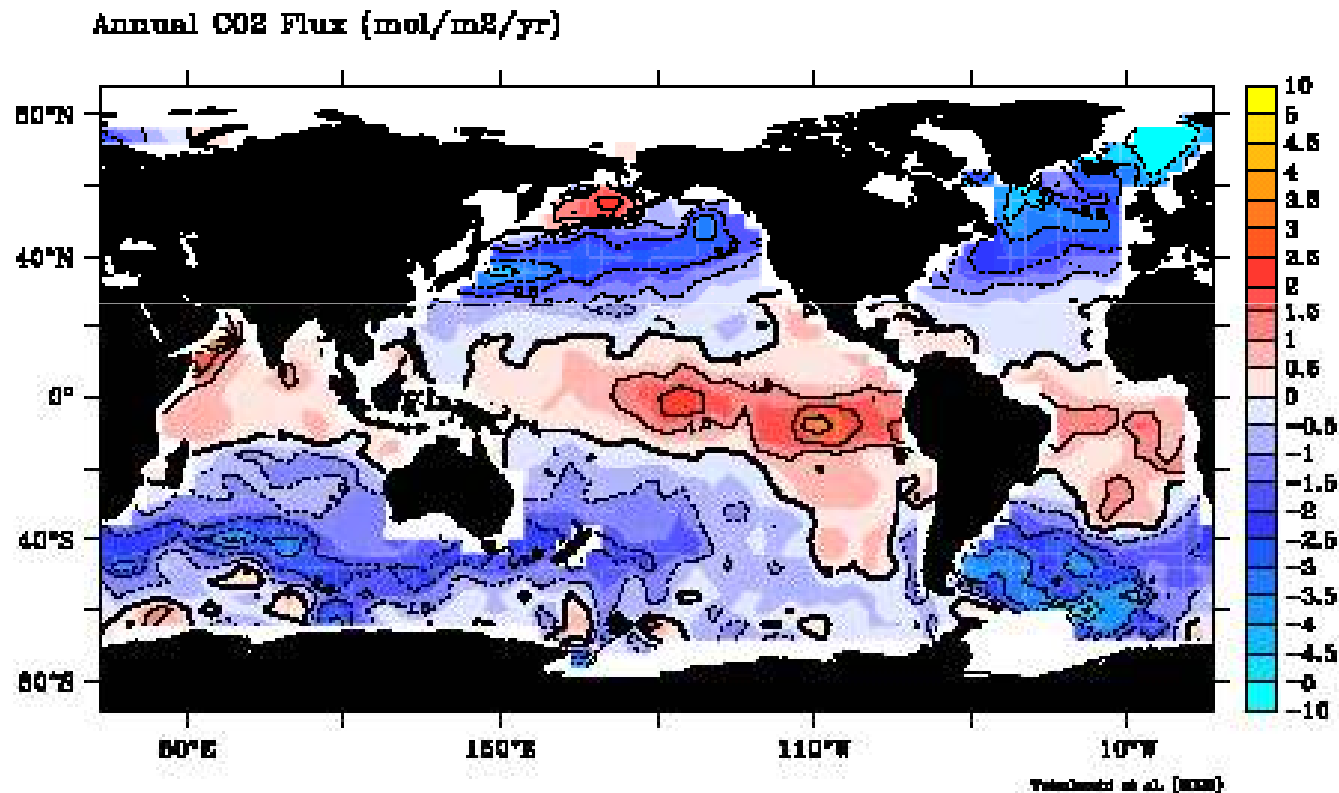


Por qué interesarse en el océano ?



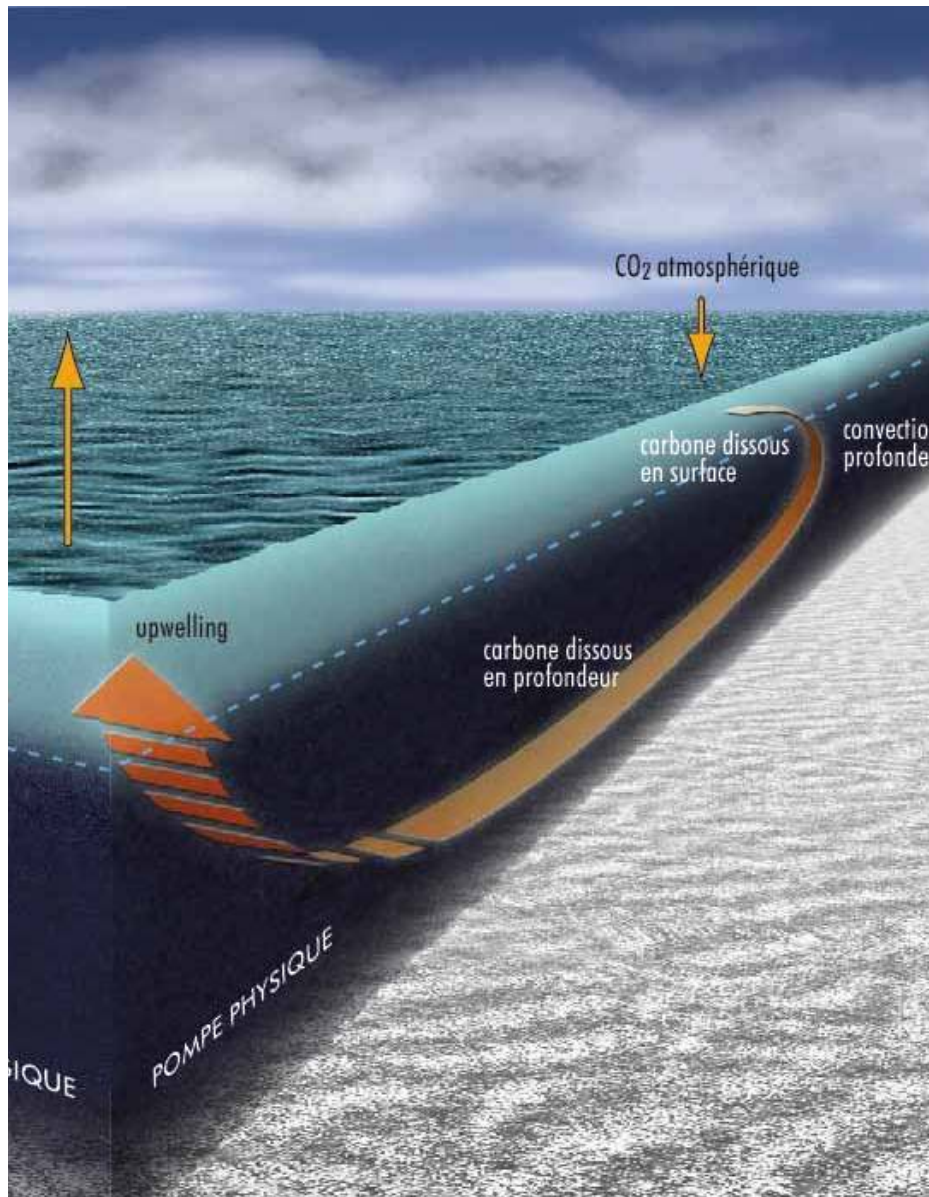
Mecanismos de absorción del carbono antrópico

Compilación de medidas (> 100.000) de $p\text{CO}_2$ en la superficie del océano



Takahashi (1999)

Ciclo natural del C en el océano



Bomba de solubilidad

- Disolución en las aguas frías de altas latitudes
- Transporte de masas de agua para la circulación gran escala
- Liberación hacia la atmósfera en las zonas cálidas de las bajas latitudes

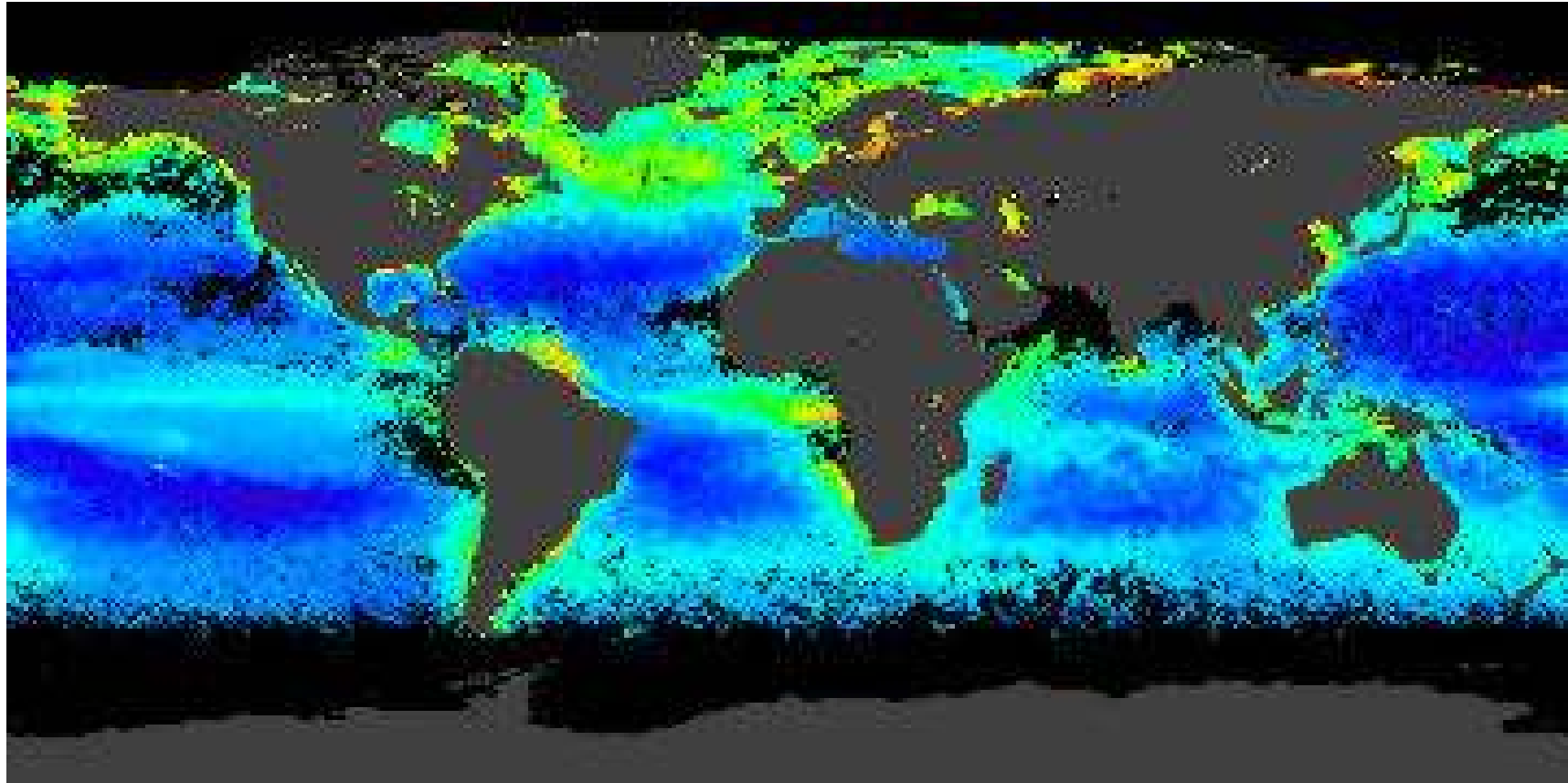
Constantes de tiempo

- intercambio de gas en superficie ~ 1 mes
- transporte en profundidad ~ 1000 años

Ciclo natural del C en el océano

Clorofila superficial del océano

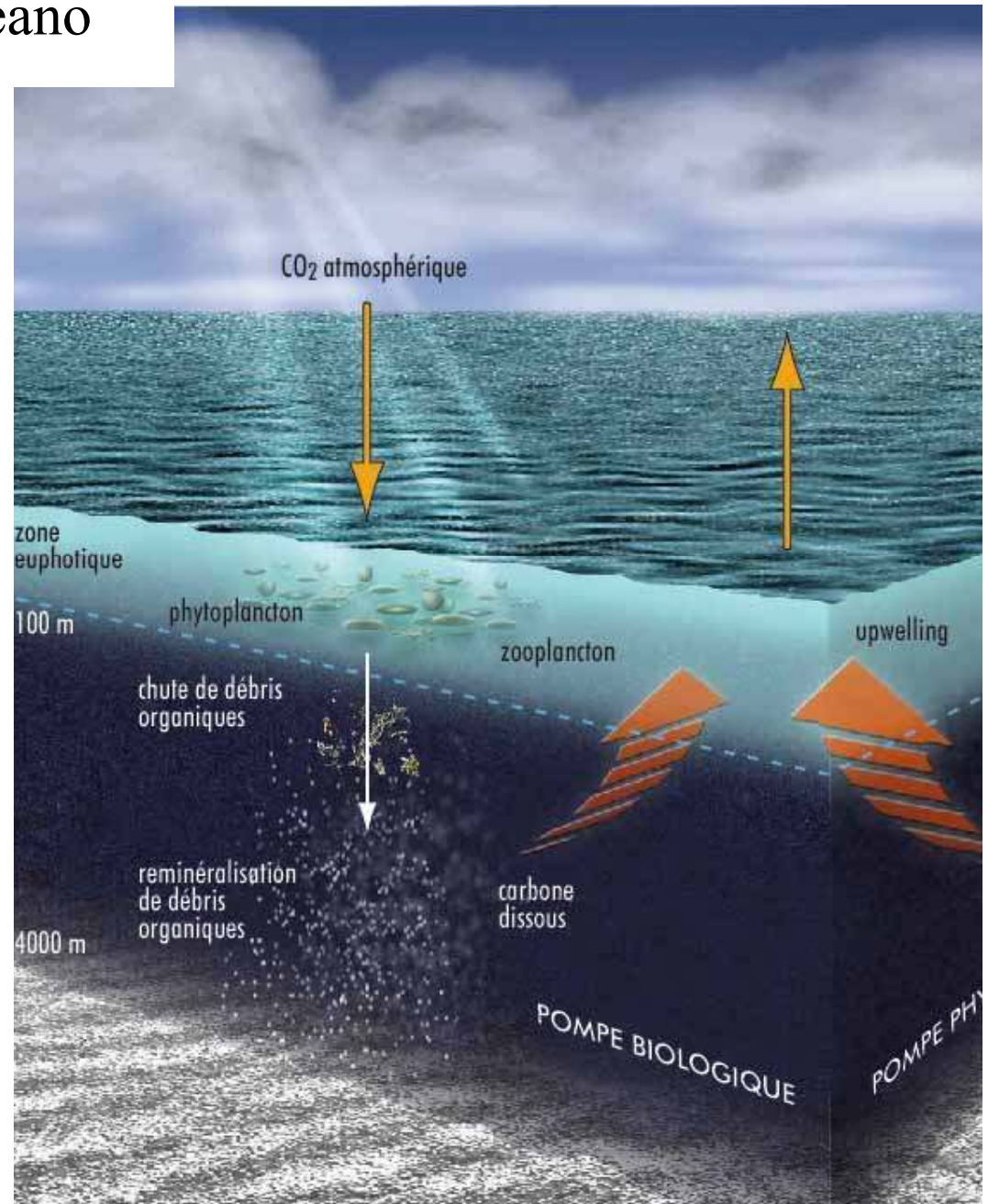
(Satélite SeaWiifs)



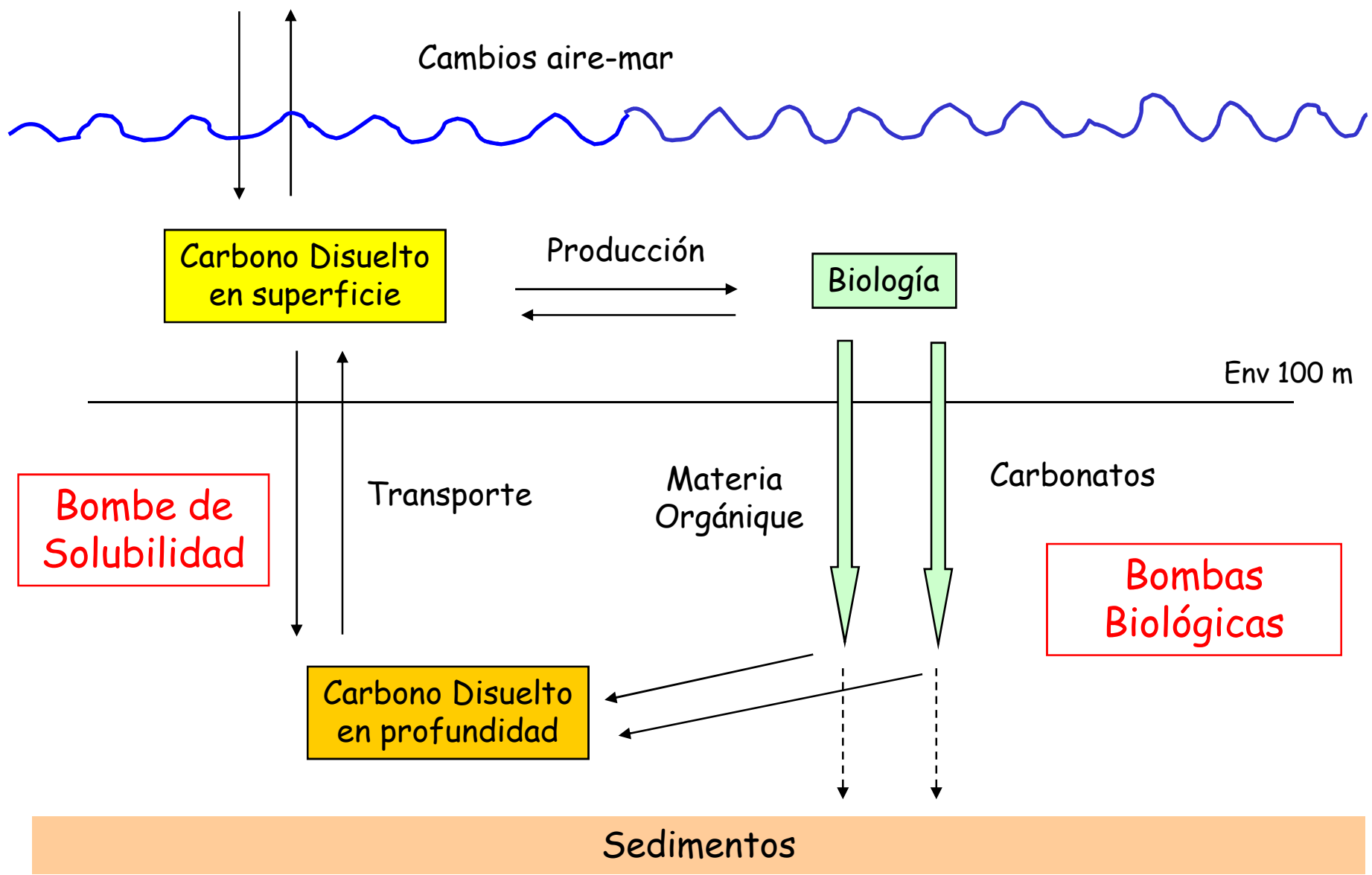
Ciclo natural del C en el océano

Bomba biológica

- Fijación de C en superficie (fotosíntesis)
- La mayor parte se recicla rápidamente en la superficie
- Una parte de la materia orgánica es exportada hacia el fondo

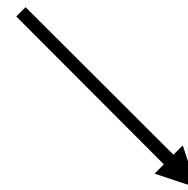
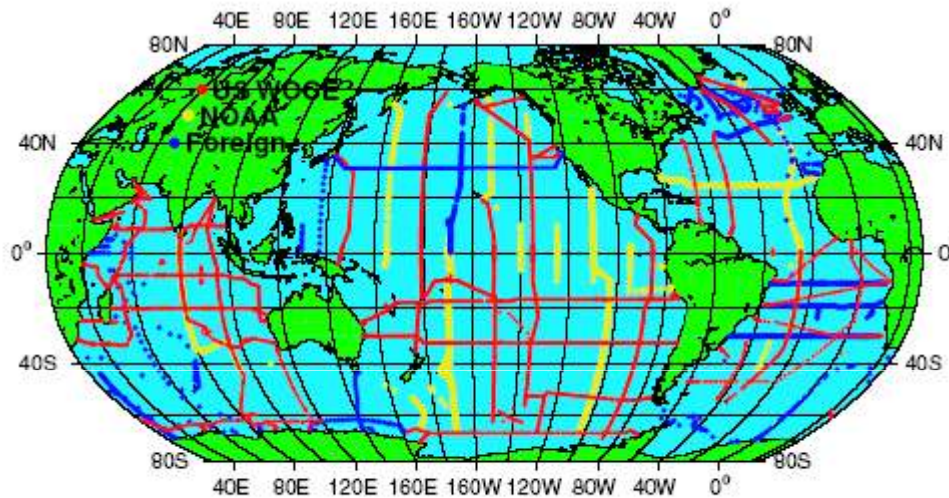


El Ciclo del Carbono Oceánico



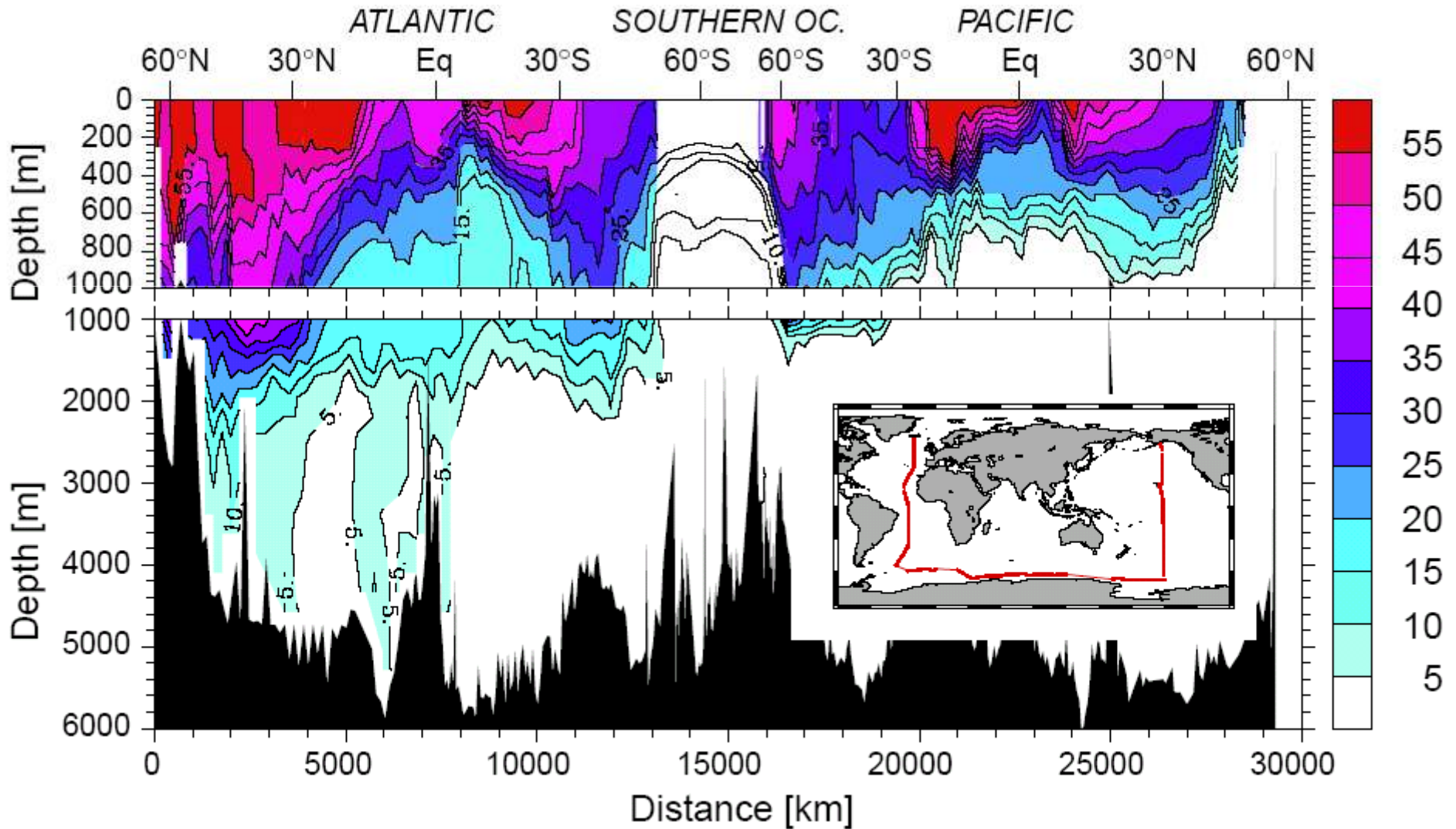
Penetración del carbono antrópico en el océano

Medidas del Carbono Inorgánica Disueltas a lo largo de Secciones Oceánicas (WOCE)



Determinación del CO_2 antrópico utilizando las informaciones provistas por otros trazadores (O_2 , alcalinidad, CFCs. ...)

Penetración del carbono antrópico en el océano



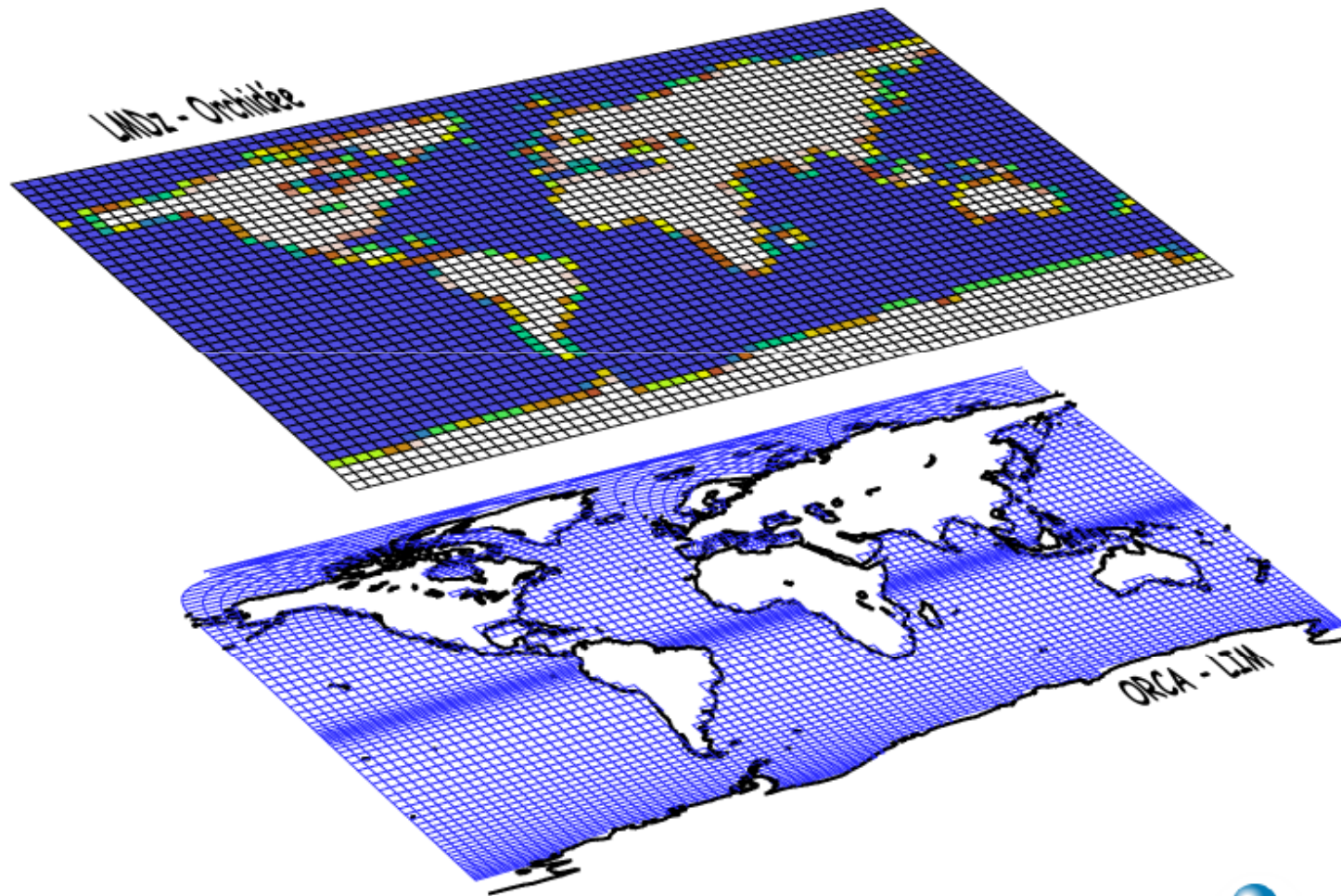
Desde el comienzo de la Era industrial ...

El océano ha absorbido cerca de 120 GtC (1/3 de las Emisiones)

Absorbe actualmente cada año aproximadamente 2 GtC

Cómo va a evolucionar este sumidero ?

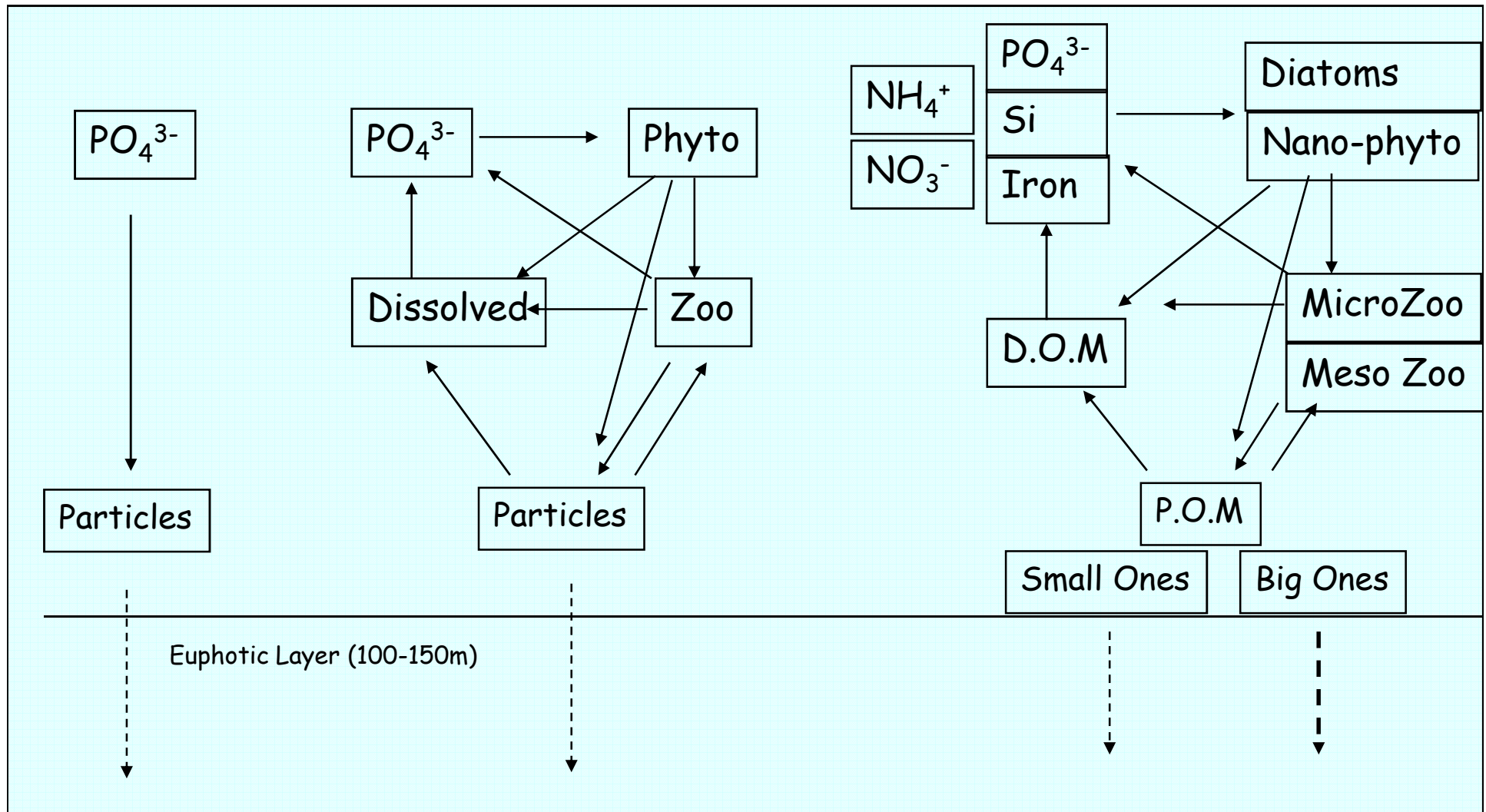
Herramientas : Modelos del Sistema Climático



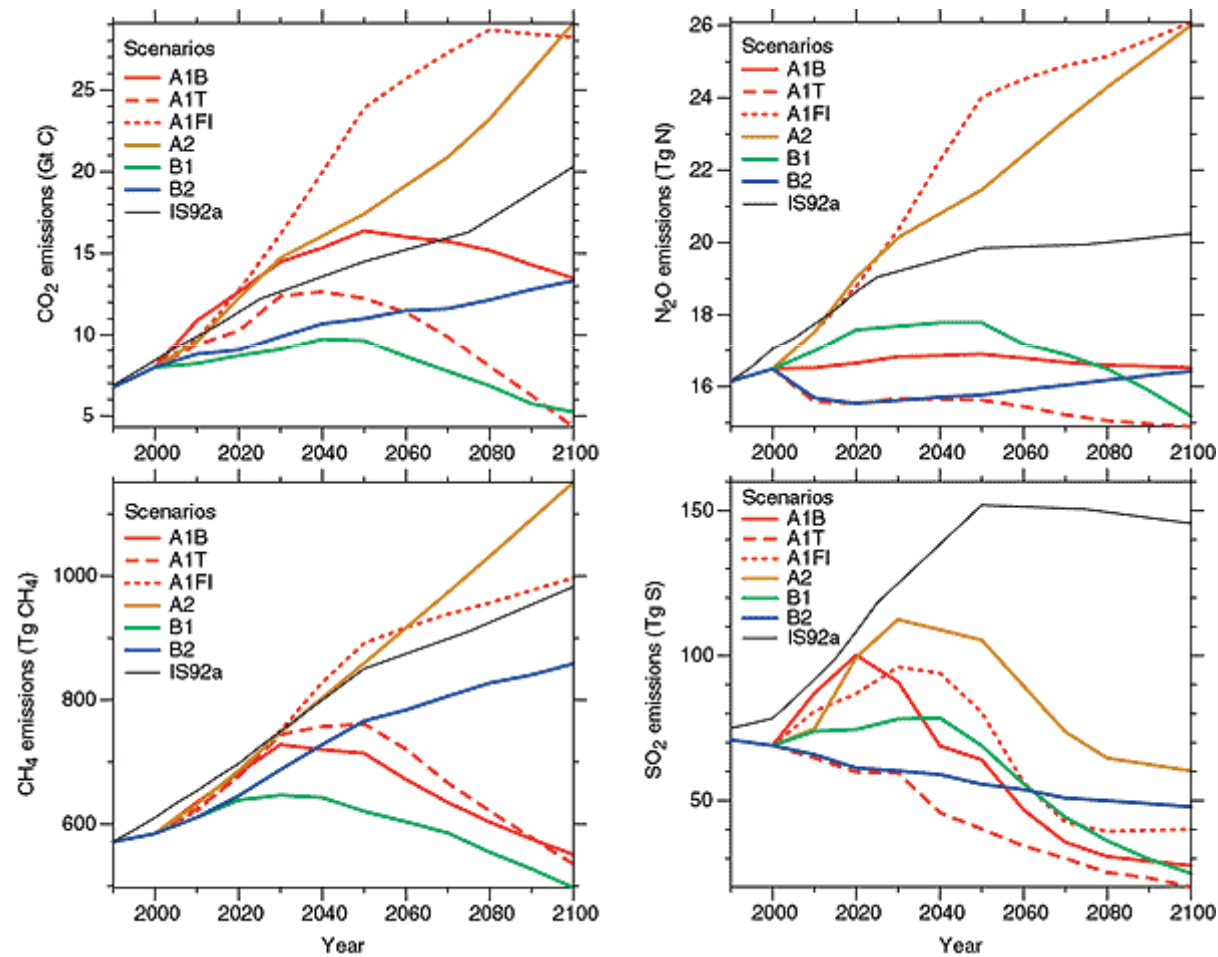
Modelo acoplado de l'IPSL

Herramientas : Modelos biogeoquímicos oceánicos

Geochemical Models to Simple Ecosystem Models



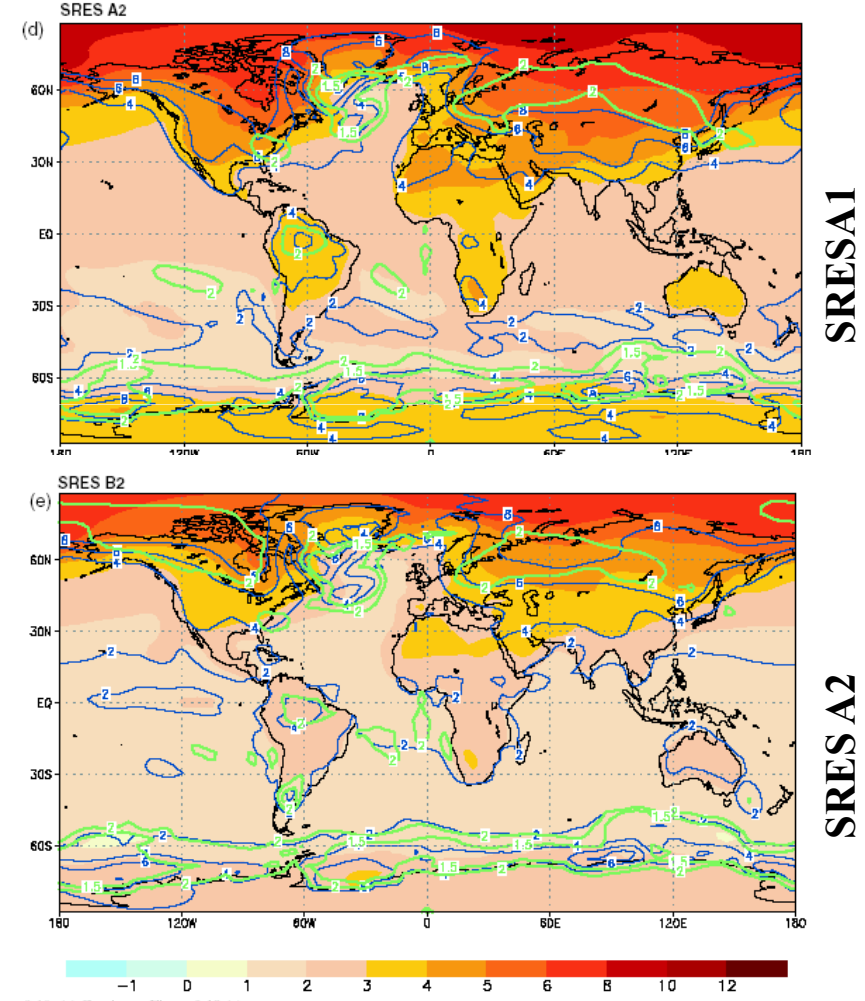
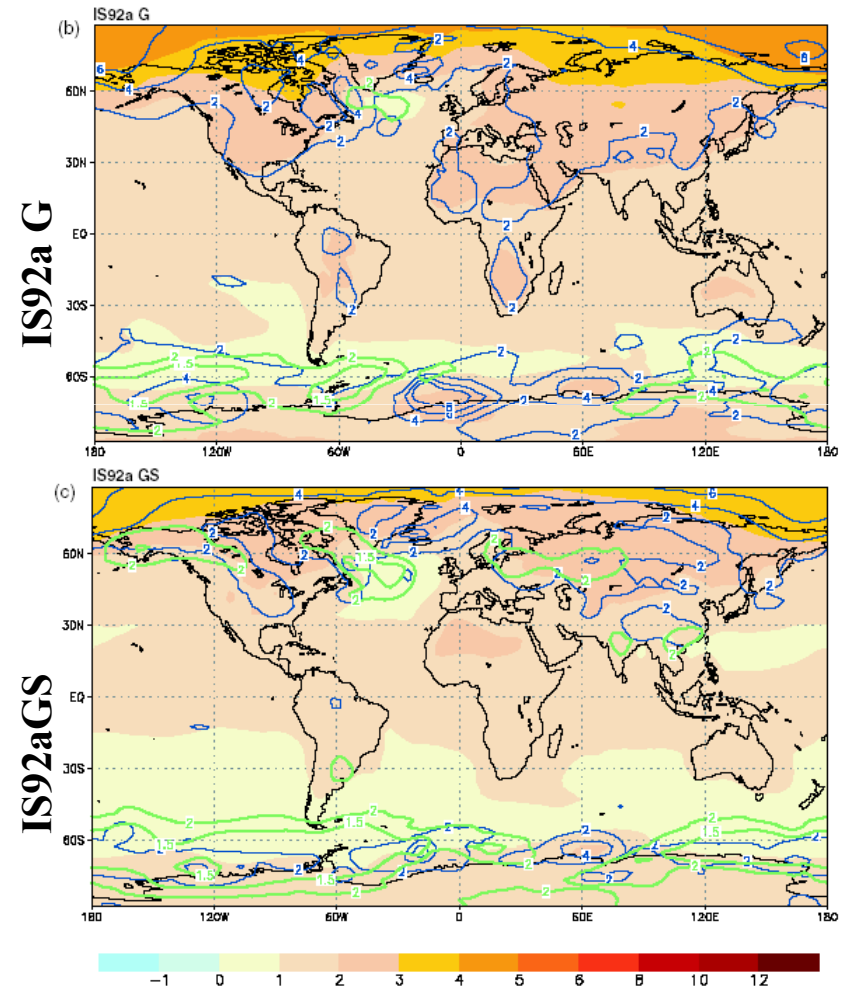
Los escenarios de emisiones futuras



Cambio de temperatura

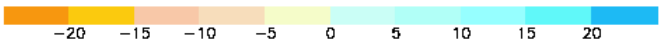
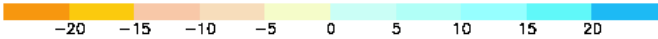
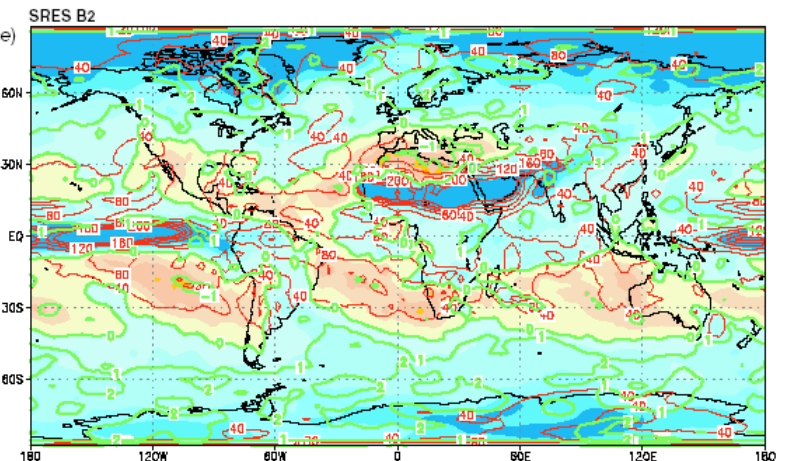
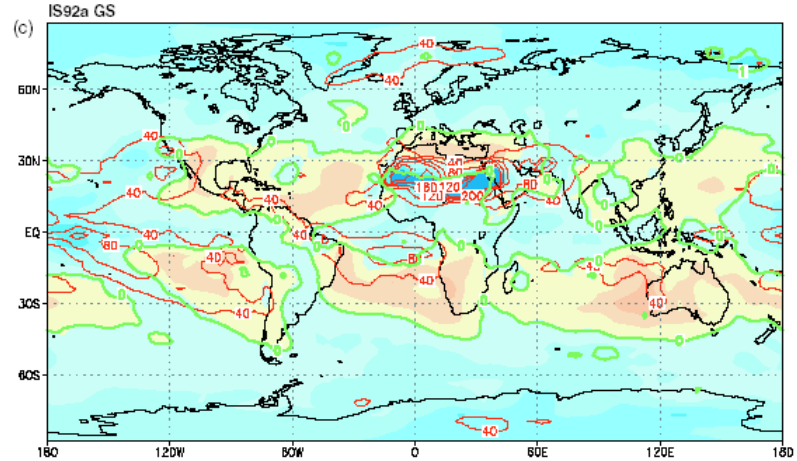
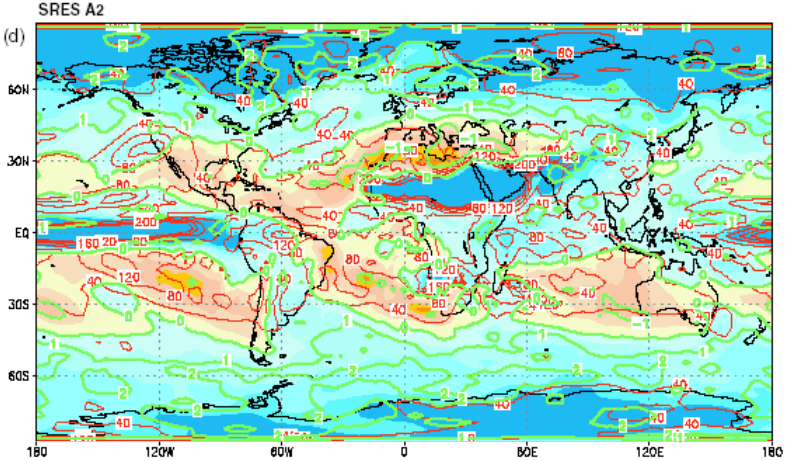
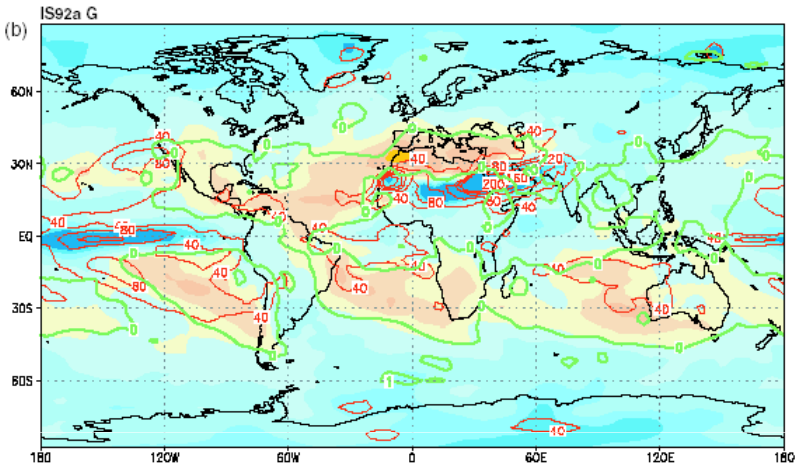
2021-2050/1961-1990

2071-2100/1961-1990



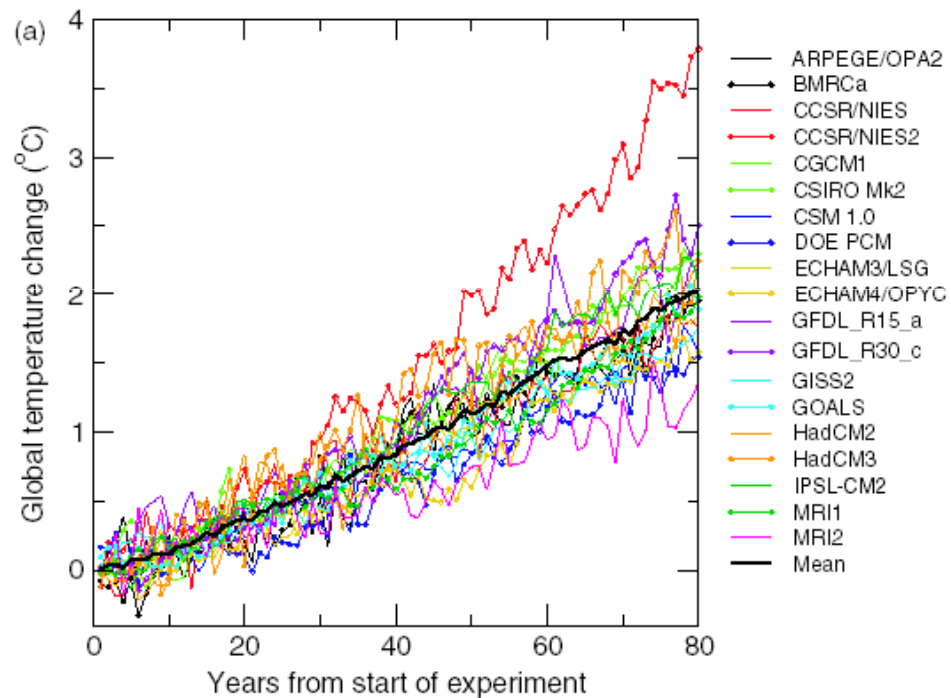
© 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change

Cambio de precipitación

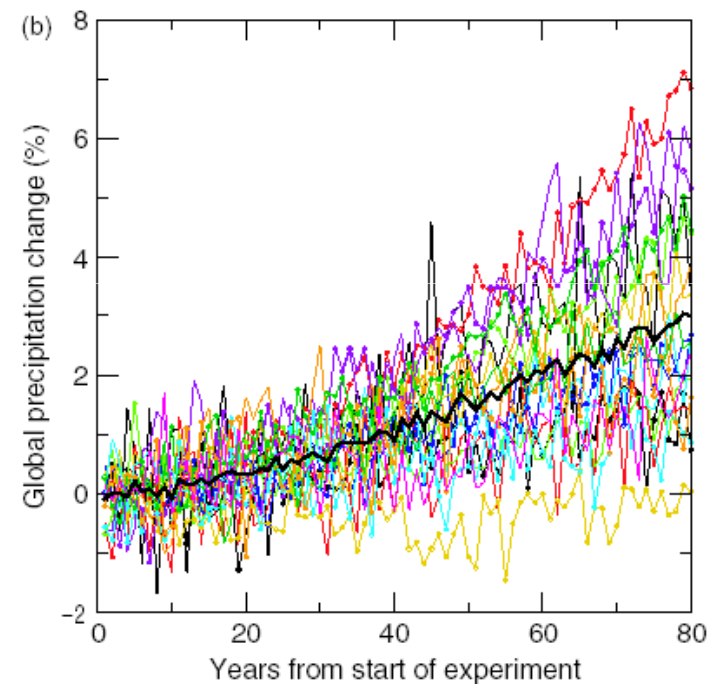


Resultados CMIP2 (1% CO₂/AN)

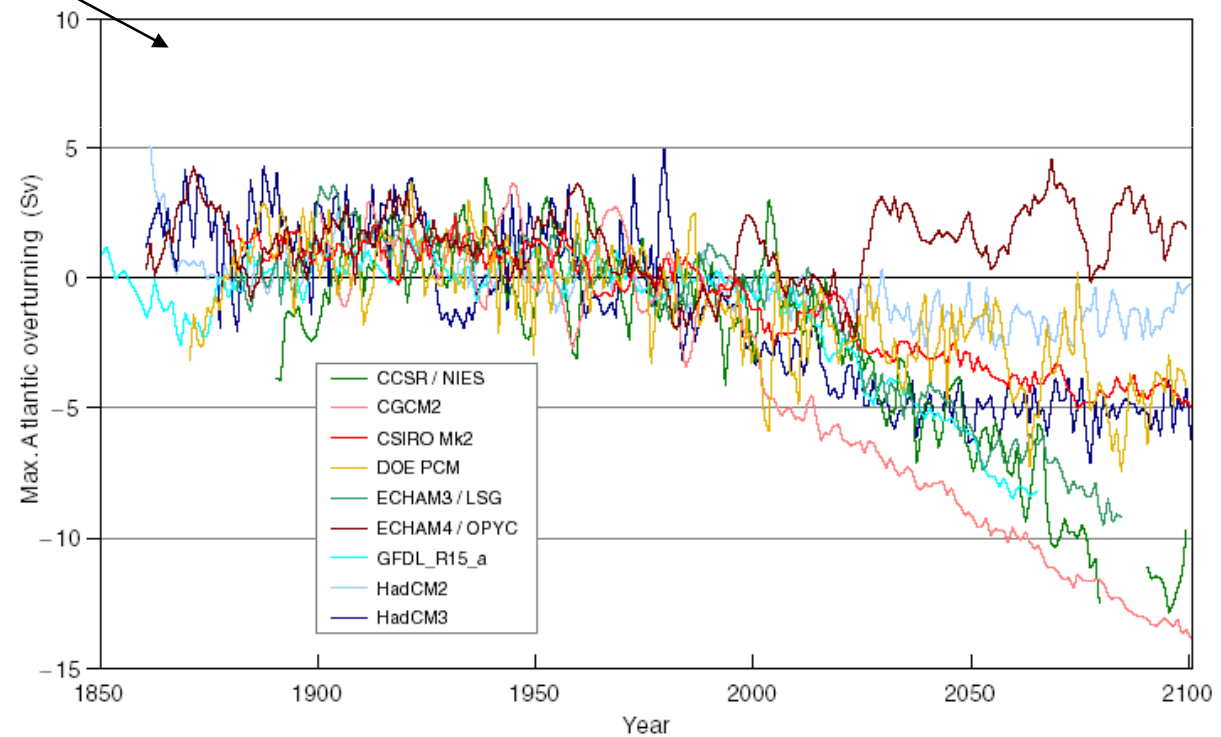
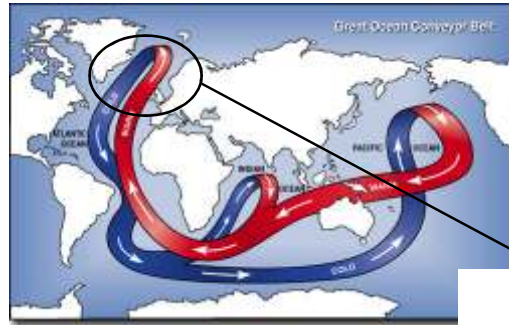
Temperatura



Precipitación

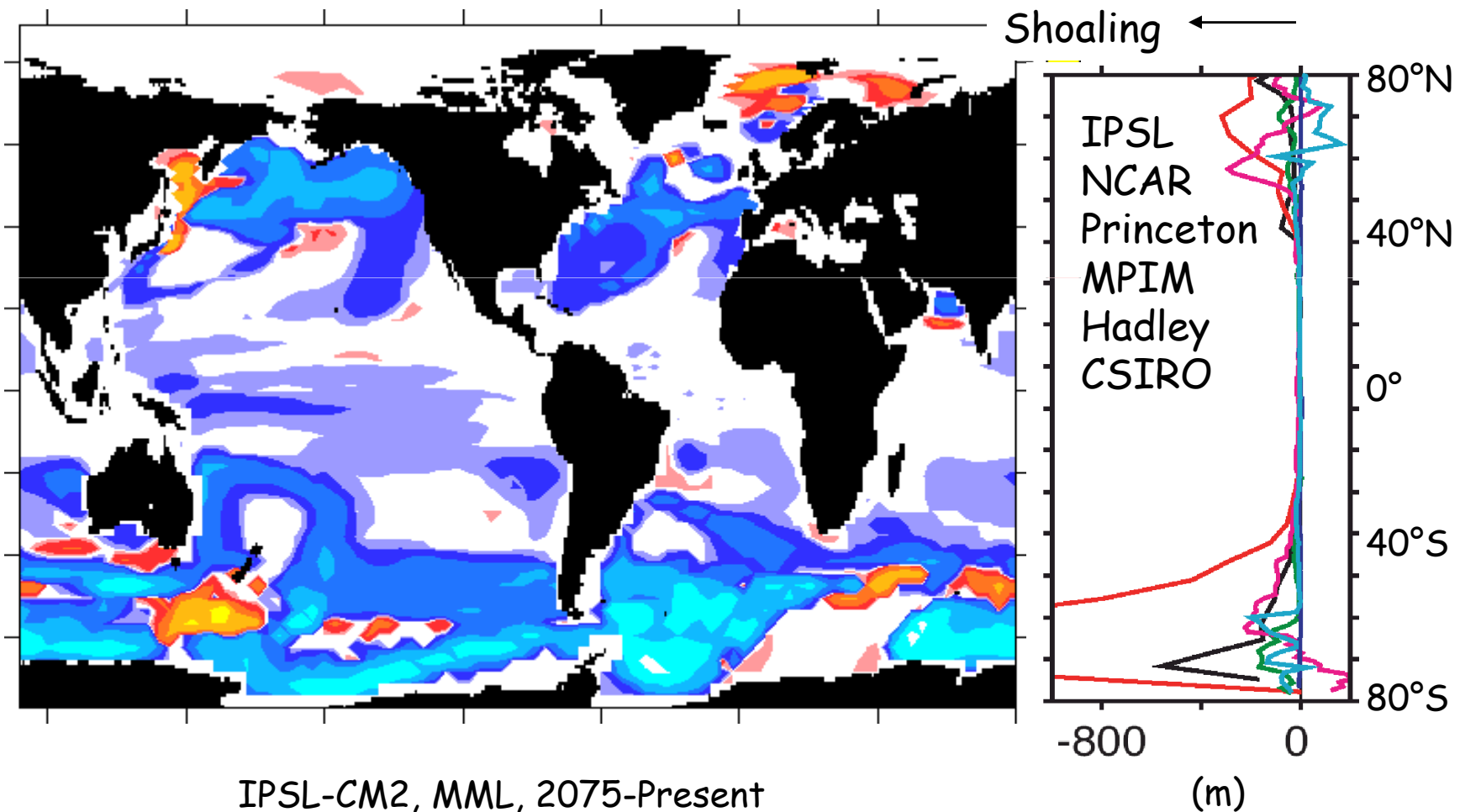


Modificación de la circulación thermohalina del océano



Modificación de la física del océano: Estratificación

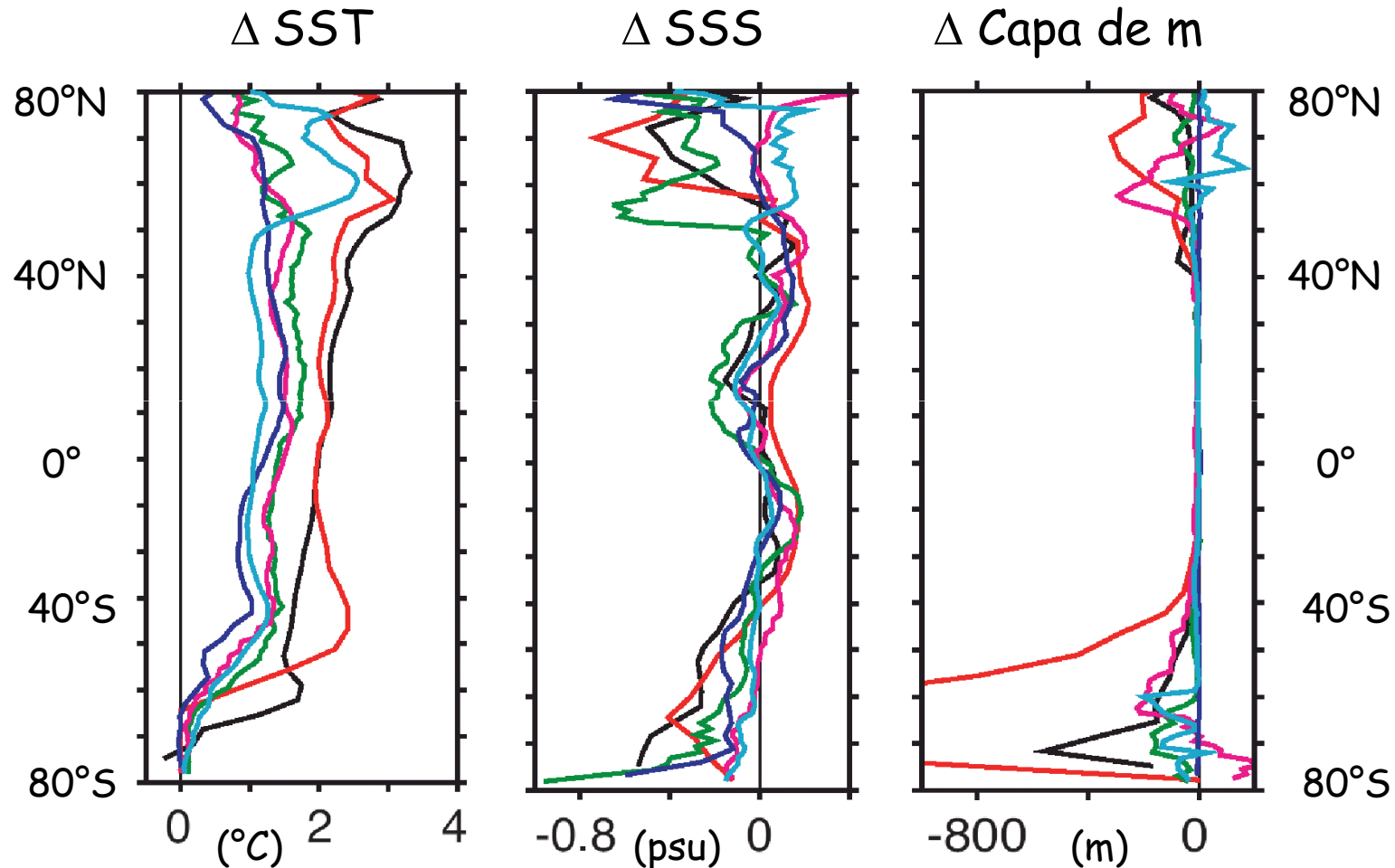
- ▶ Shoaling of Max. Mixed Layer Depth... Consistent in 6 OAGCMs



Modificación de la física del océano: Estratificación

► Mécanismes

Sarmiento et al. in press



► Modificación de los vientos : aumento en H.S

Changes in Ocean Physics & Marine Productivity

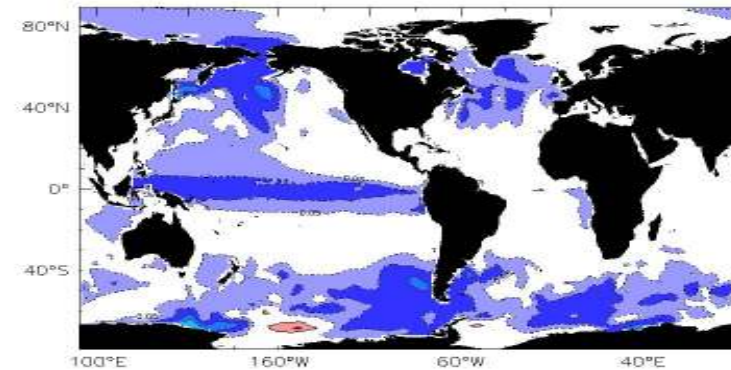
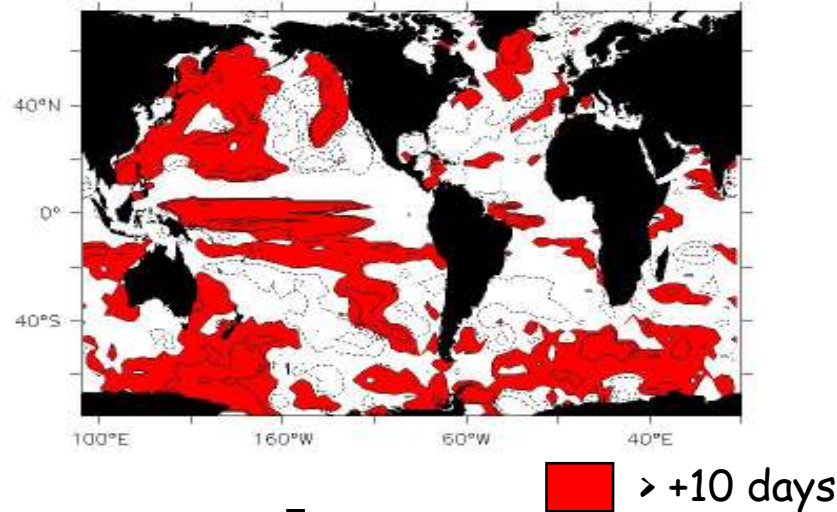
Ocean Stratification increases

(NPZD-IPSL)

Surface nutrient

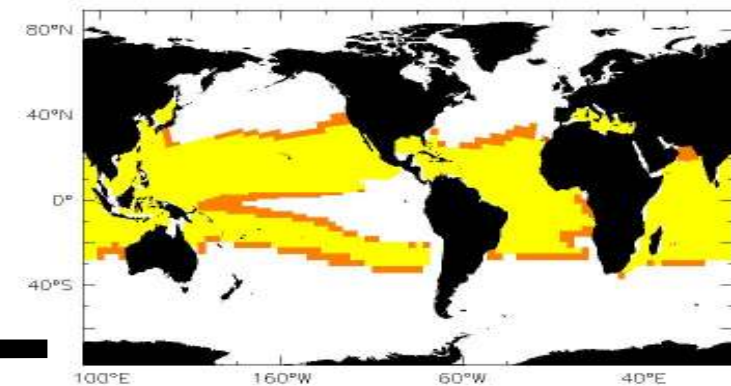
→ -5 to -10 %

Growing Season lengthens



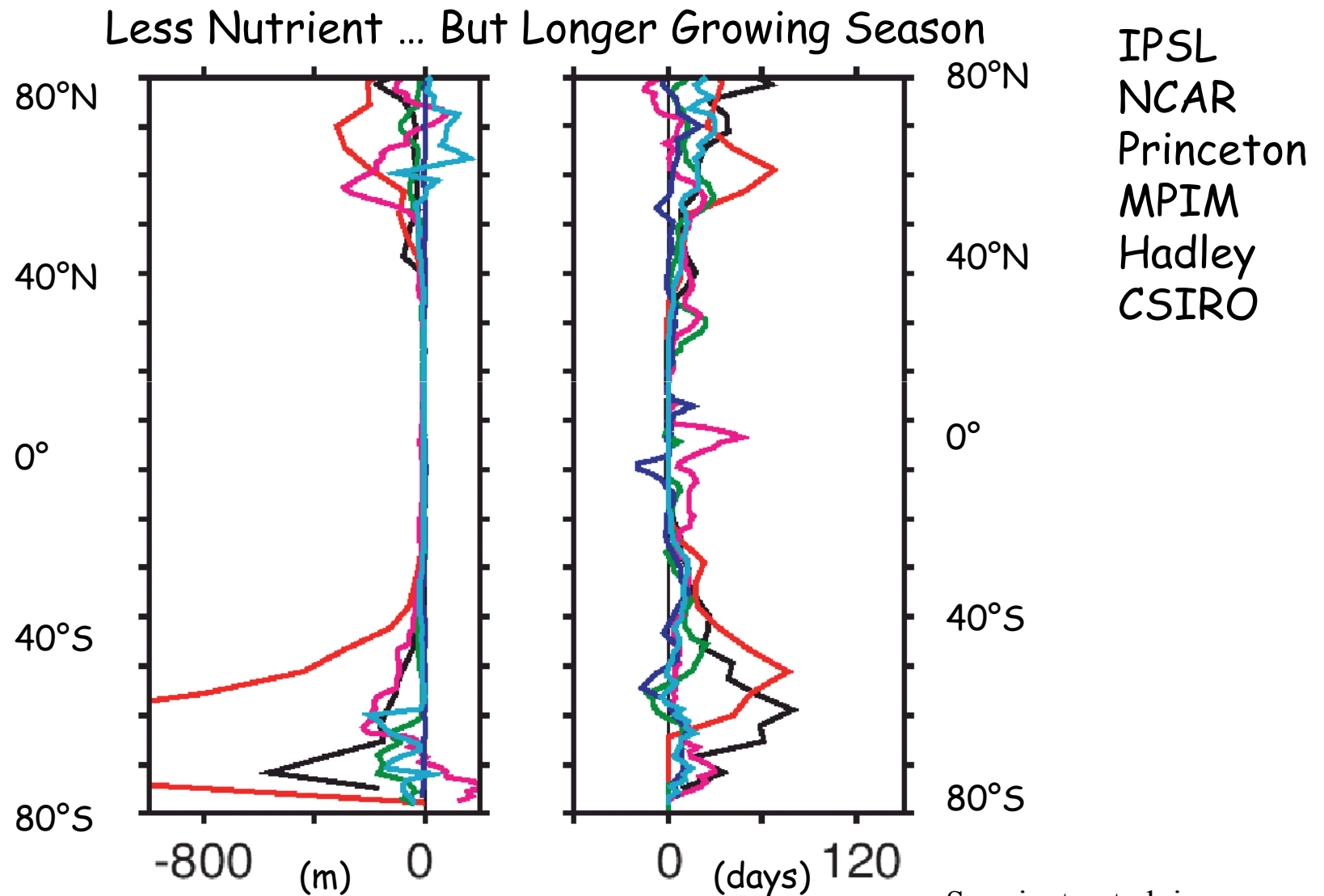
Oligotrophic Gyres Area increases

Opposition high/low latitudes



1xCO₂ 2xCO₂-1xCO₂

Changes in Ocean Physics & Marine Productivity

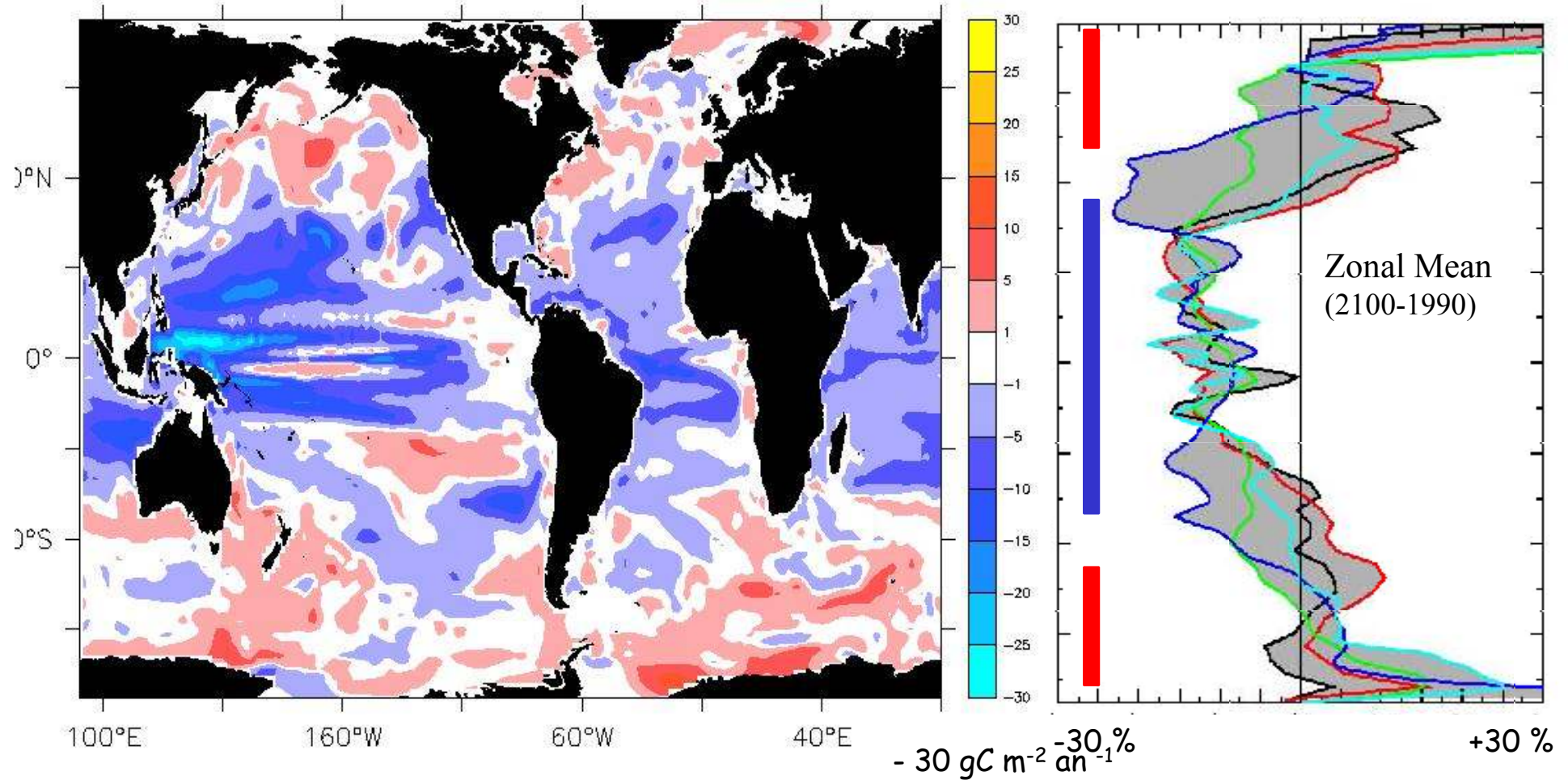


Sarmiento et al. in press

Changes in Ocean Physics & Marine Productivity

Simulation NPZD-IPSL, 2100-1990

$30 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$

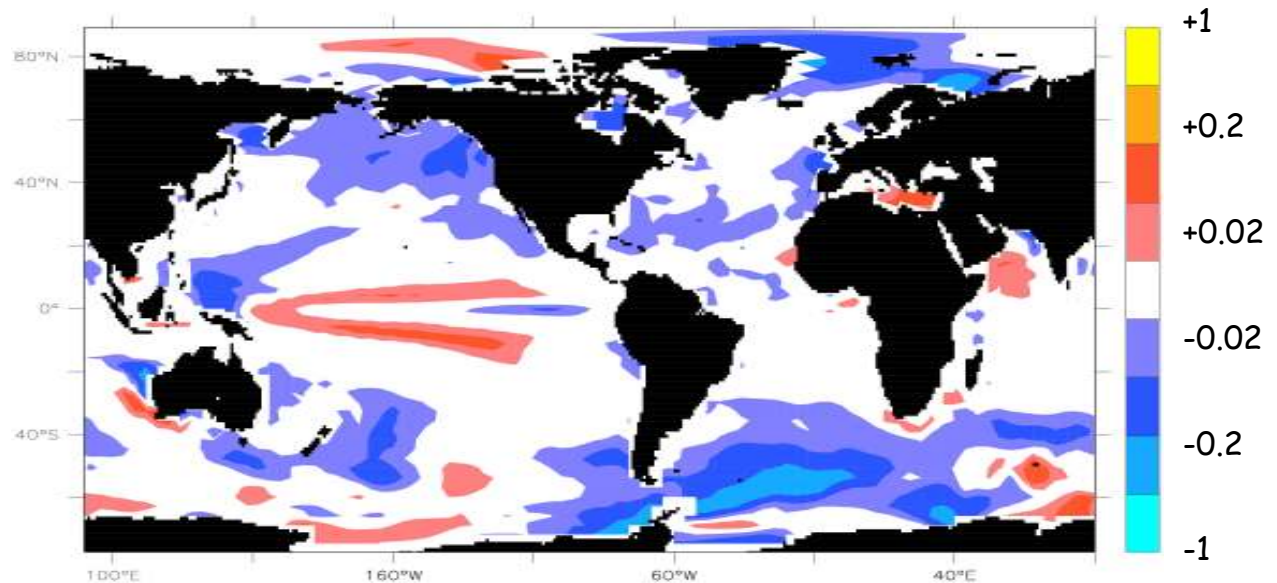


- Decreases globally (-5/10%) BUT increases at high latitudes (+20/30%)
- Similar response with different bio & dynamical models

Changes in Ocean Physics & Marine Ecosystem

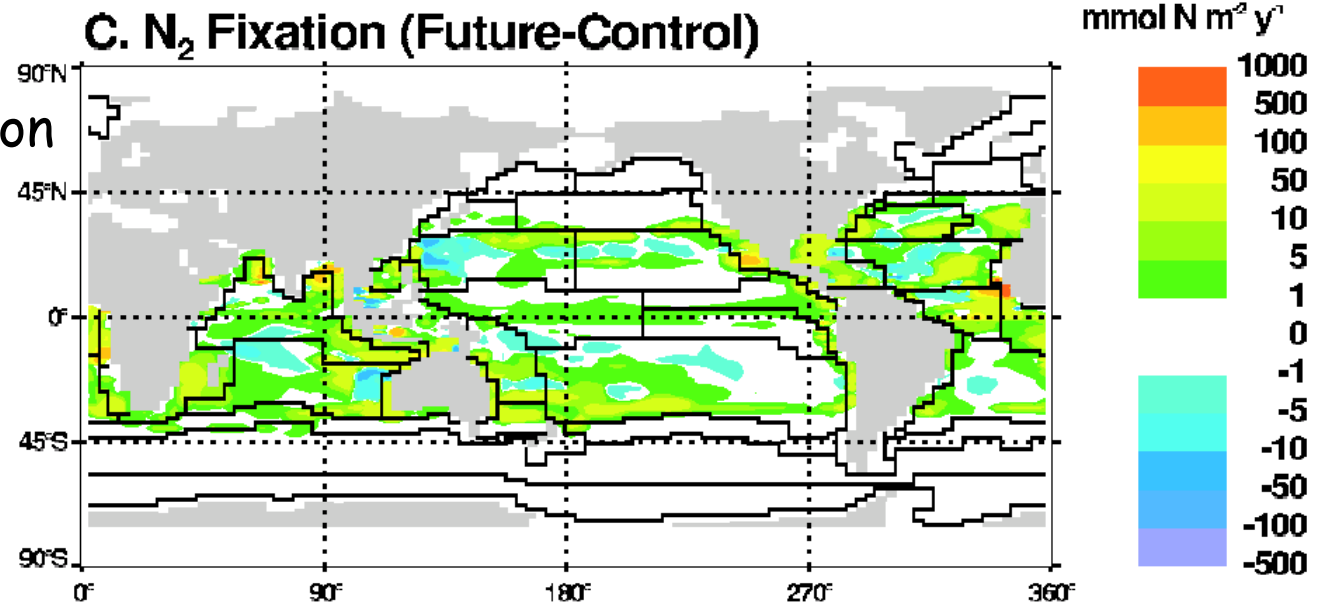
- ▶ Decrease in diatoms relative abundance

Bopp (2001)



- ▶ Increase in N_2 fixation with Global Warming

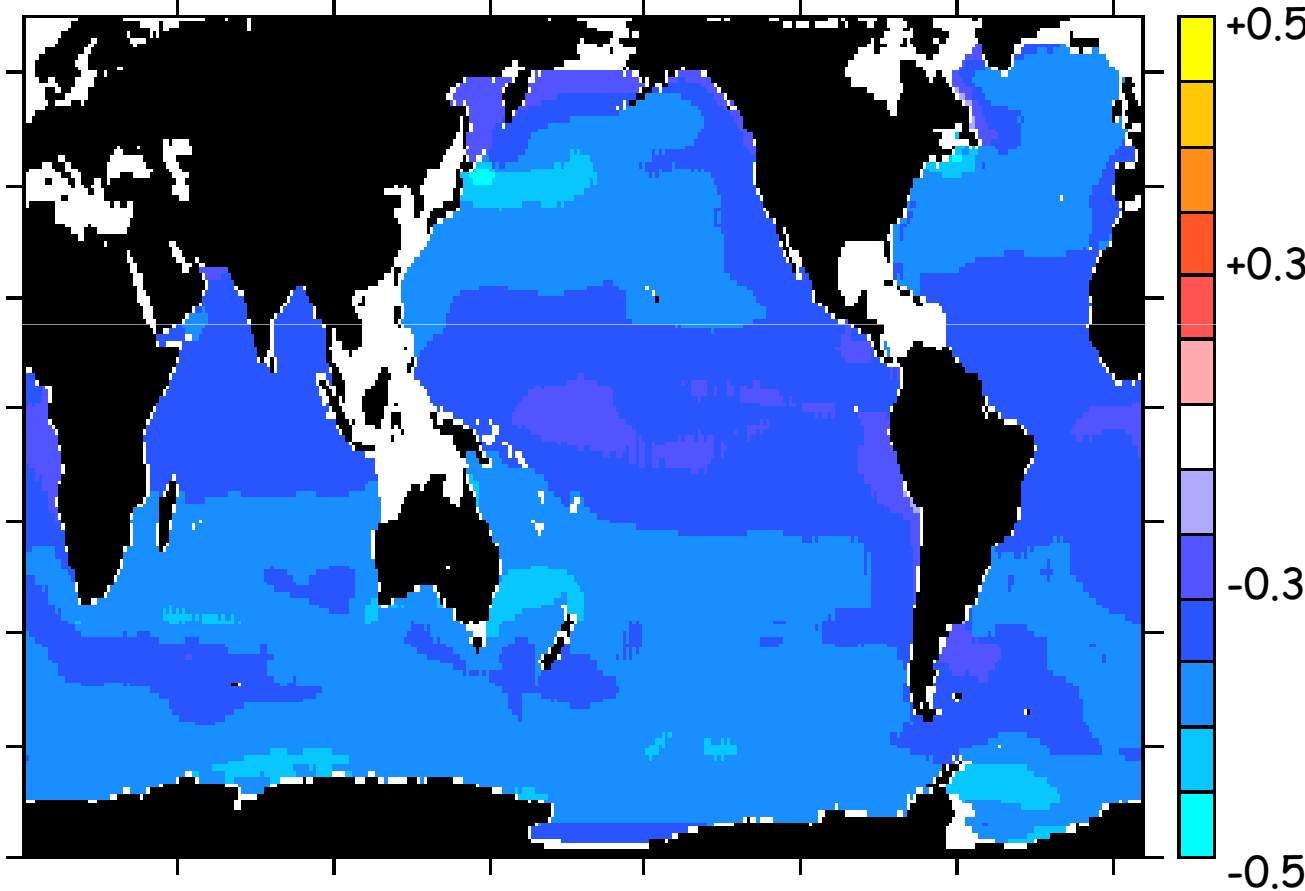
Boyd and Doney (2002)



Changes in pH : Acidification

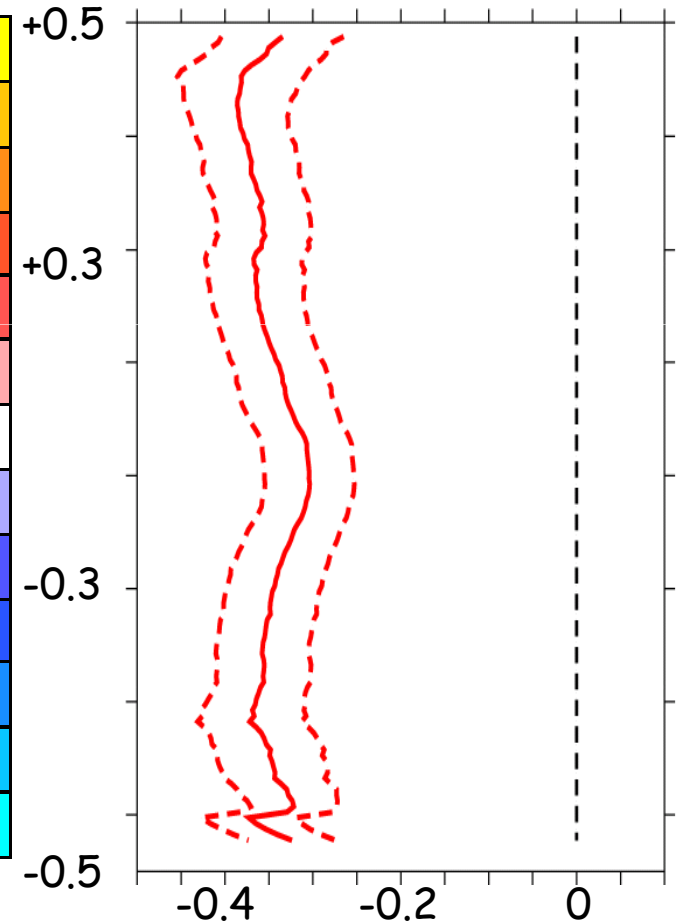
- ▶ Increase in DIC leads to an acidification of Ocean waters

Changes in pH



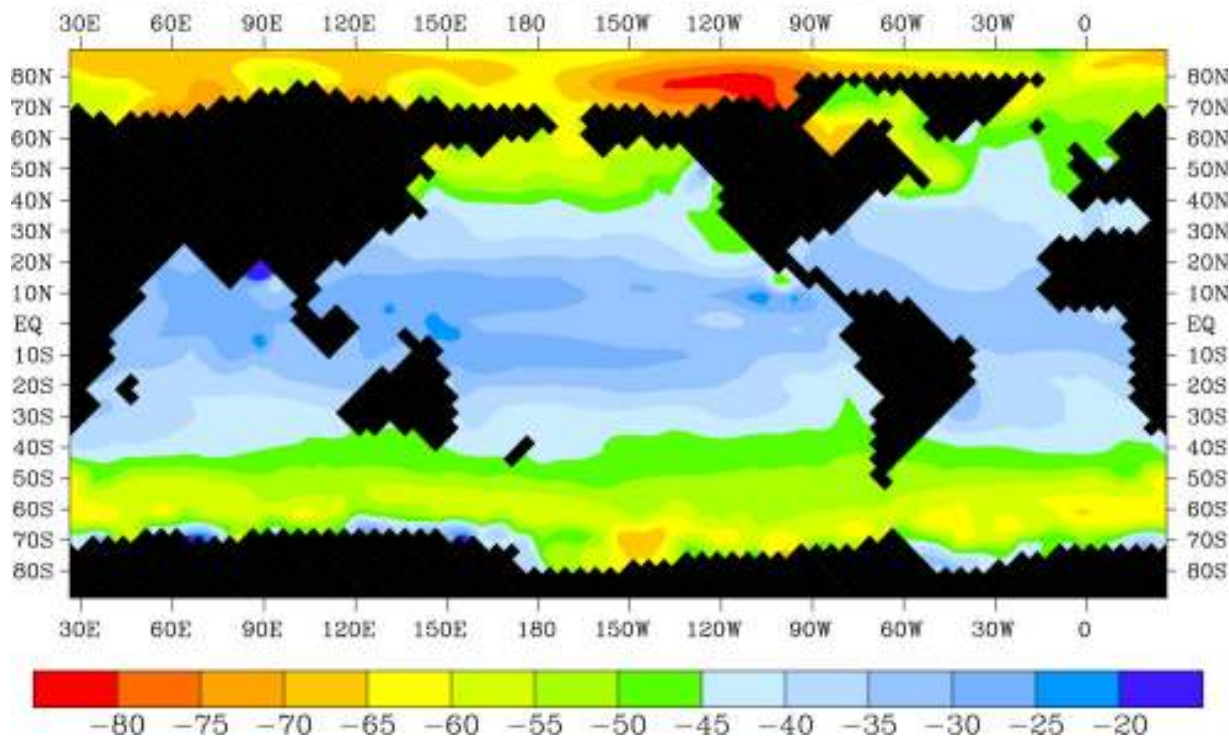
IS92a, IPSL model, 2099-PreIndus

All OCMIP2 Models



Changes in pH & Marine Production / Ecosystem

- ▶ Many studies have revealed/estimated the impact on marine ecosystems
- ▶ Impact of Acidification on Marine CaCO_3 Production (C. Heinze, HAMOCC4)



Changes in CaCO_3 Production (%), 2200 - PreIndustrial

Plan del curso

Introducción -

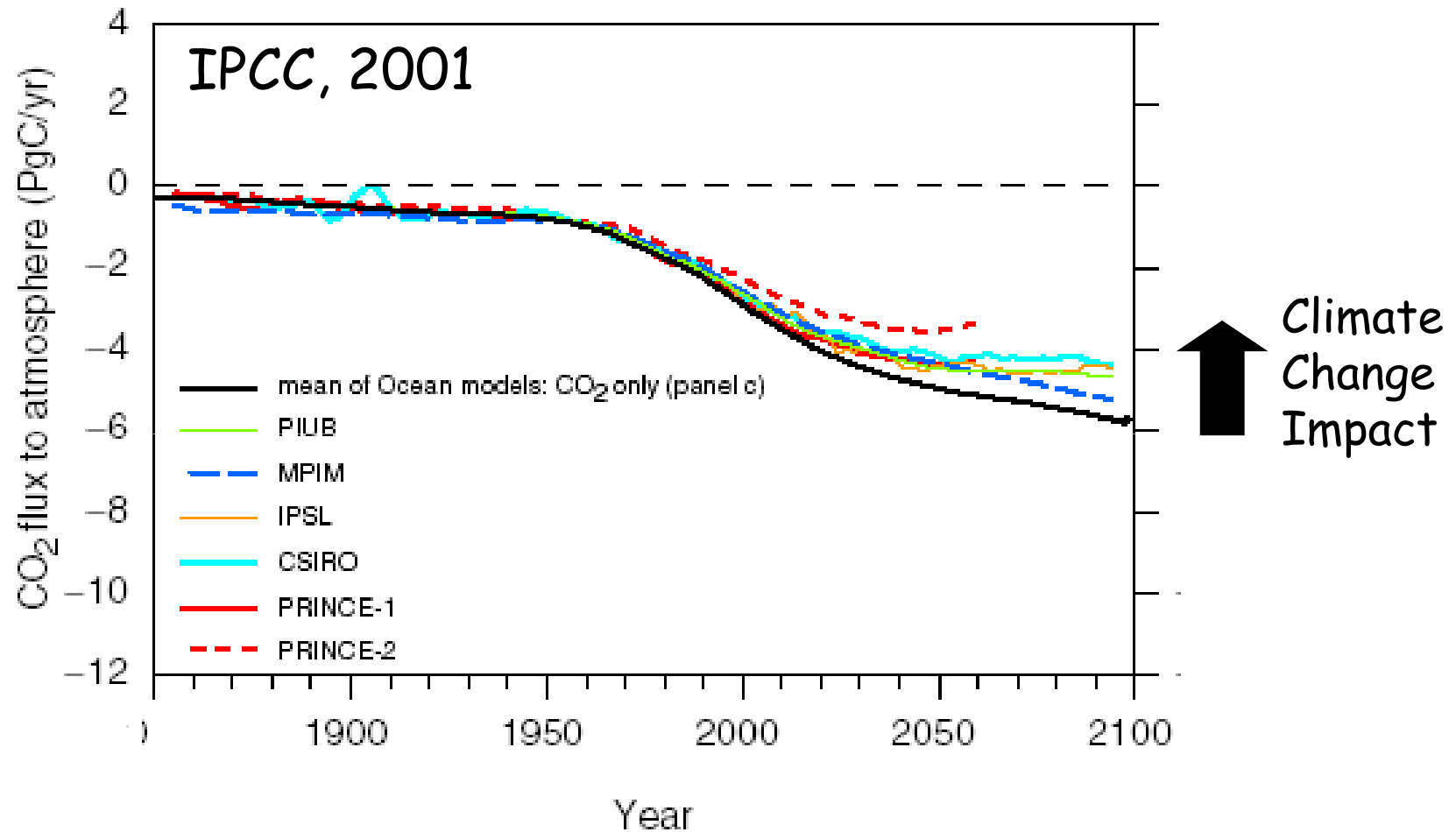
I. Cuál es la realidad para el cambio climático ?

- 1- La observación de los parámetros climáticos
- 2- Evolución de los componentes atmosféricos
- 3- El ciclo del carbono en el corazón del cambio climático

II. Cuál es el rol del ciclo del carbono oceánico ?

- 1- El ciclo natural del carbono en el océano
- 2- La perturbación antrópica
- 3- Escenarios del mañana ?
 - Físico
 - Biológico
 - **Carbono**
 - **Acoplamiento clima-carbono : Retroacción positiva**

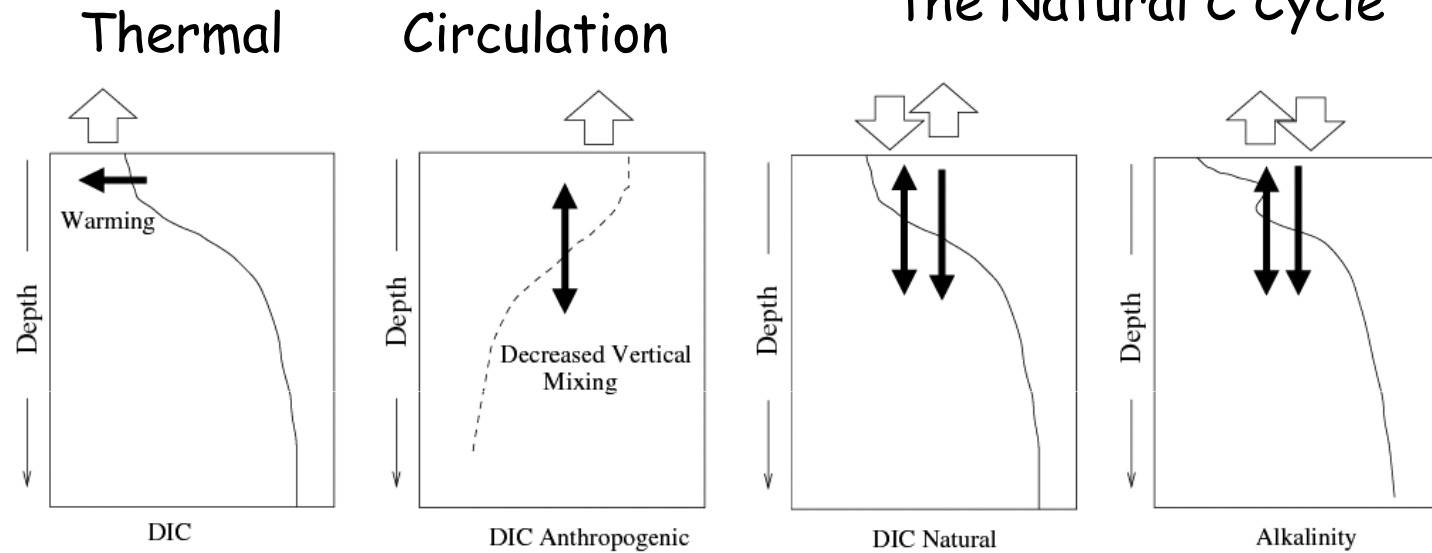
Changes in Ocean Physics & Carbon Cycle



- ▶ Climate Change reduces ocean CO₂ sink
(from -6% to -25% in 2050)

Changes in Ocean Physics & Carbon Cycle

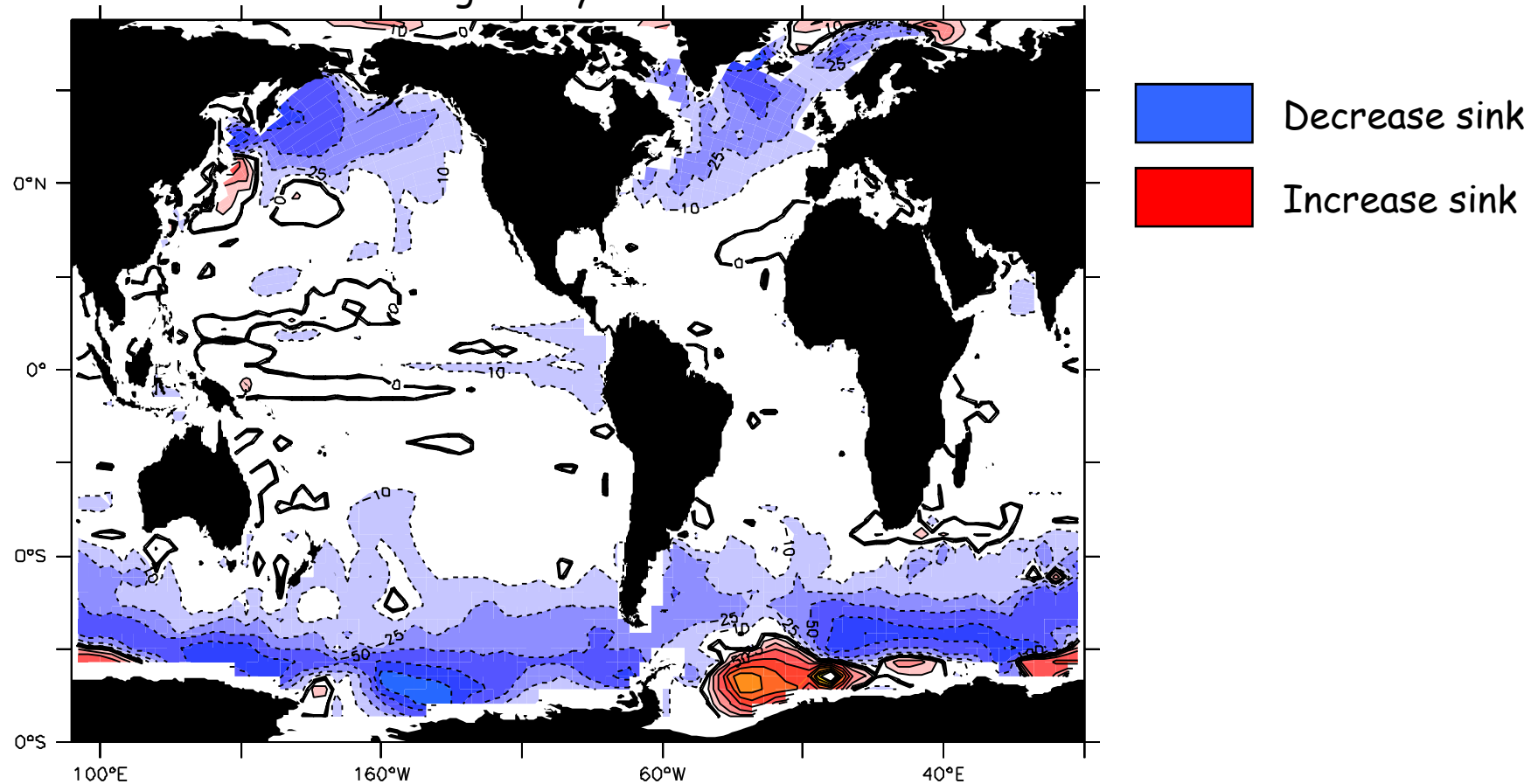
► Mechanisms



Changes in Ocean Physics & Carbon Cycle

Climatic Effect on CO_2 sink at $4 \times CO_2$
 $gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$

(HAMOCC3-OPA-LMD)



- ▶ Main Effect : Stratification prevents anthropogenic CO_2 penetration

Evolución de los sumideros oceánicos de carbono

Qué retroacciones ?

	Sentido	y	certeza
1. Química : La acidificación reduce la capacidad del océano para absorber CO ₂	+		Cierto
2. Térmica : El aumento de las temperaturas de superficie disminuye la solubilidad del CO ₂ por lo tanto conduce a un desgasaje	+		Muy probable

Evolución de los sumideros oceánicos de carbono

Qué retroacciones ?

Senido y certeza

3. Circulación :

El aumento de la estratificación
(calentamiento, debilitamiento) reduce
la formación de aguas intermedias y
profundas en altas latitudes y consecuentemente
el transporte de C antrópico hacia el fondo

+

Probable

4. Biología :

Producción / Exportación de C
Estructura del ecosistema planctónico

+ / -

?

Evolution du puits océanique de carbone

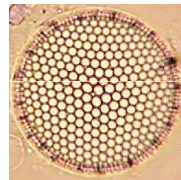
4. Biologie :

+ / -

?

Production / Export de C
Structure de l'écosystème planctonique

15 μm



Diatomées :

grosses cellules
à tests siliceux

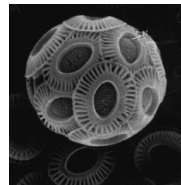
0.1 μm



Prochlorococcus :

petites cellules, recyclées
en surface

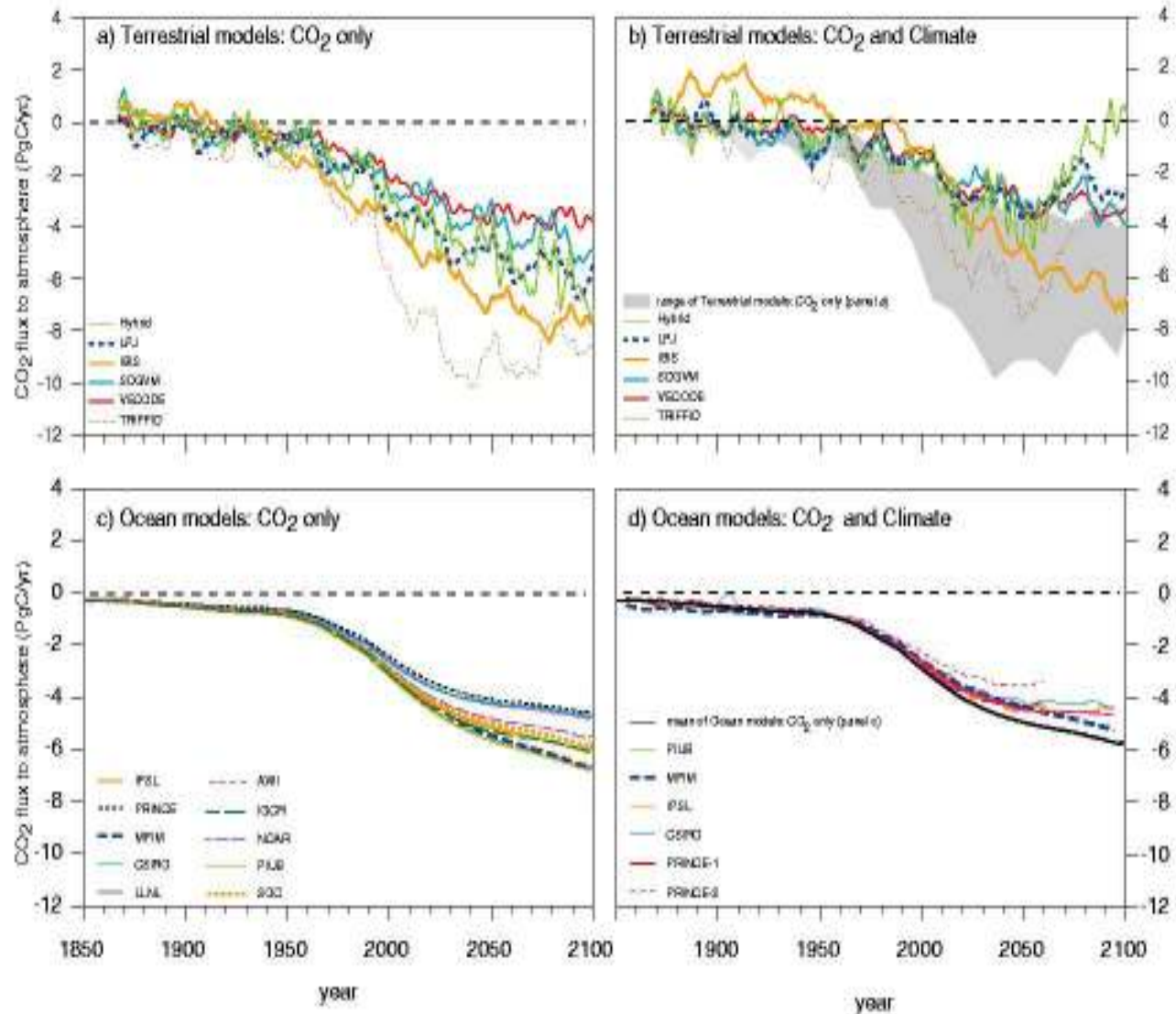
1 μm



Coccolithophoridés :

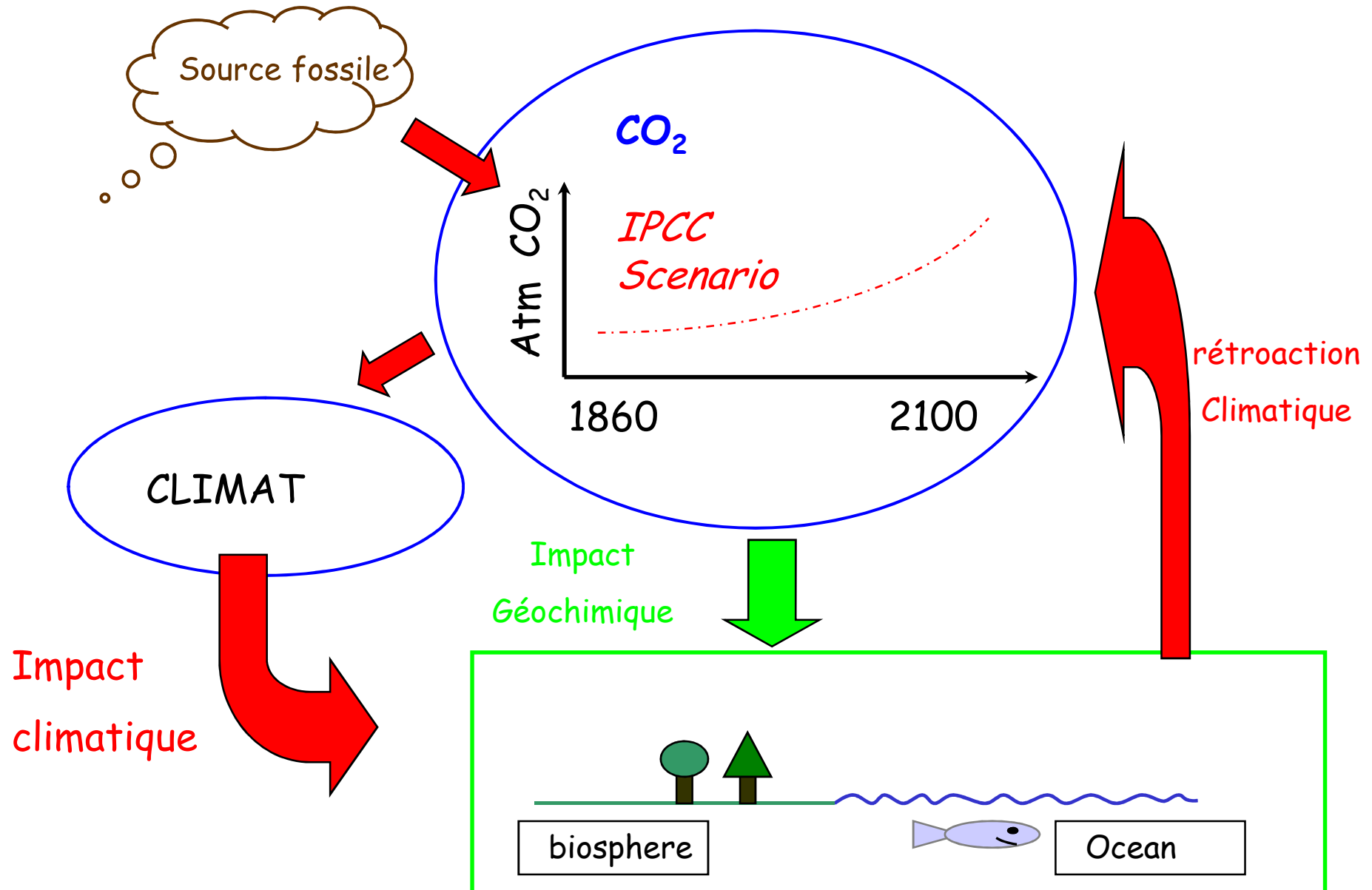
tests calcaires
cycle des carbonates

Augmentation du CO_2 : puits \uparrow
 Changement climatique : puits \downarrow



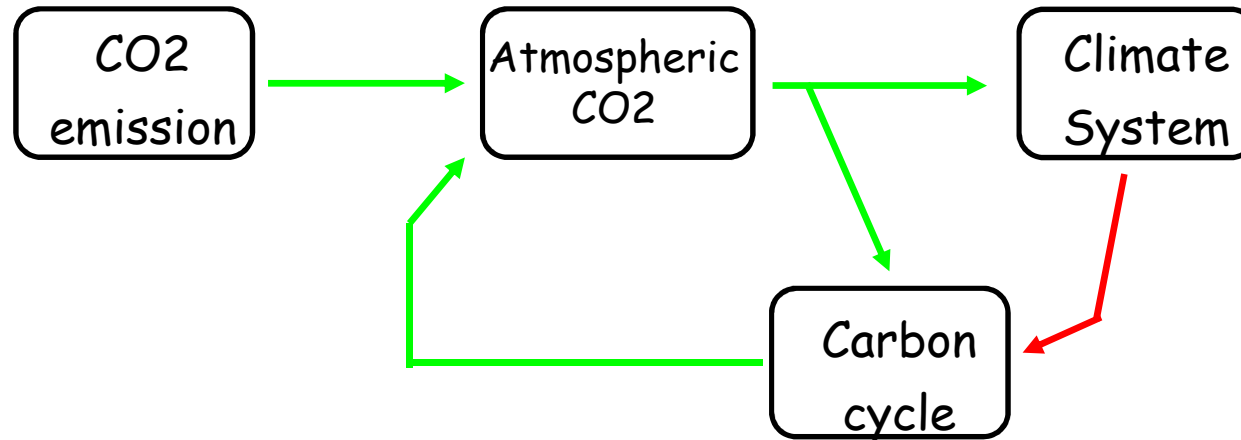
L'évolution du CO₂ au 21ème siècle

Modèles couplés climat carbone

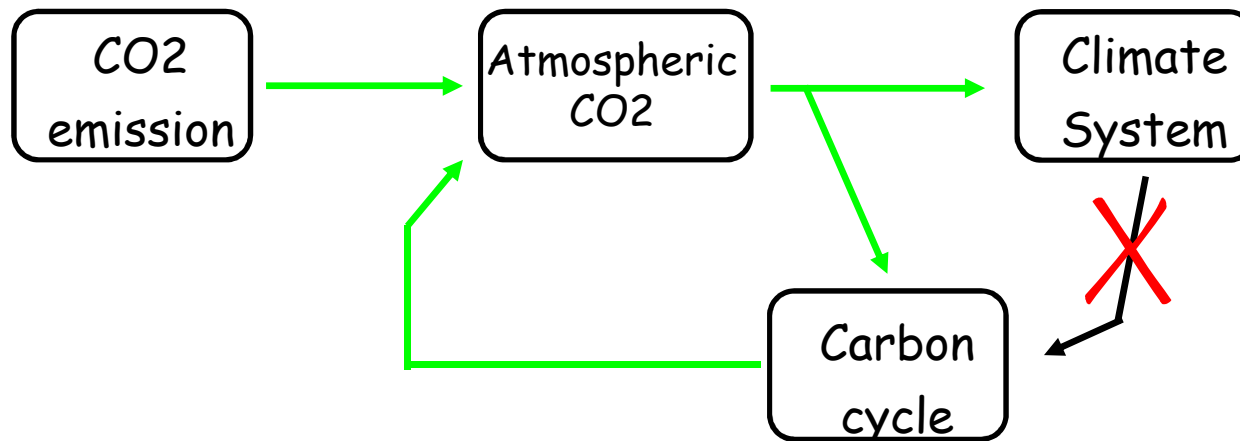


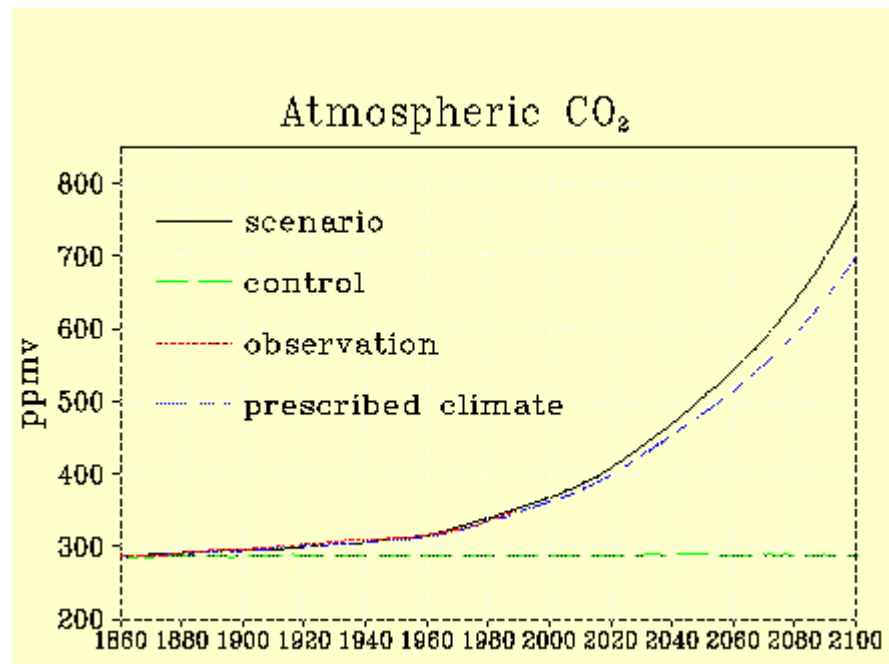
More simulations

A) Coupled run

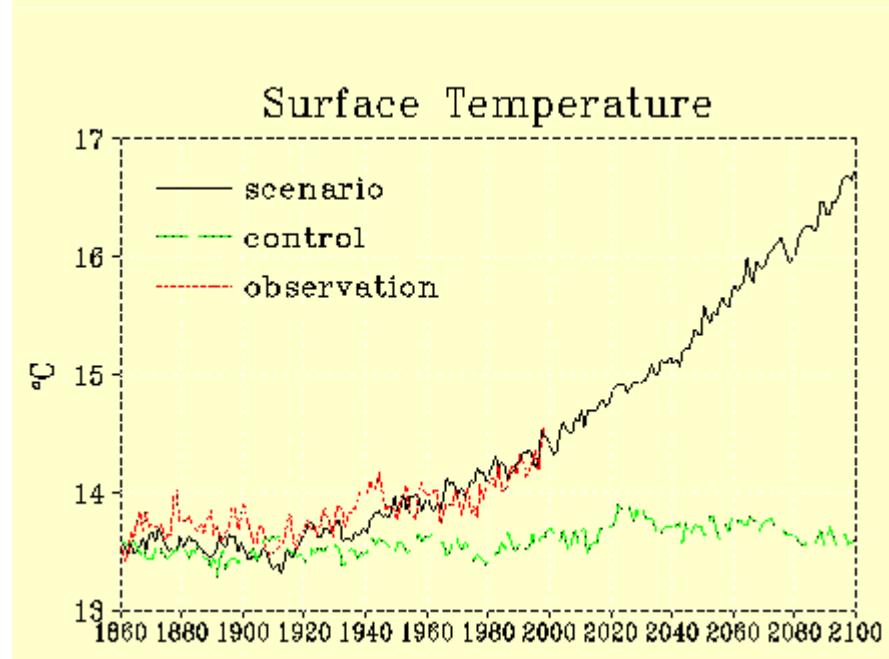


A) Uncoupled run

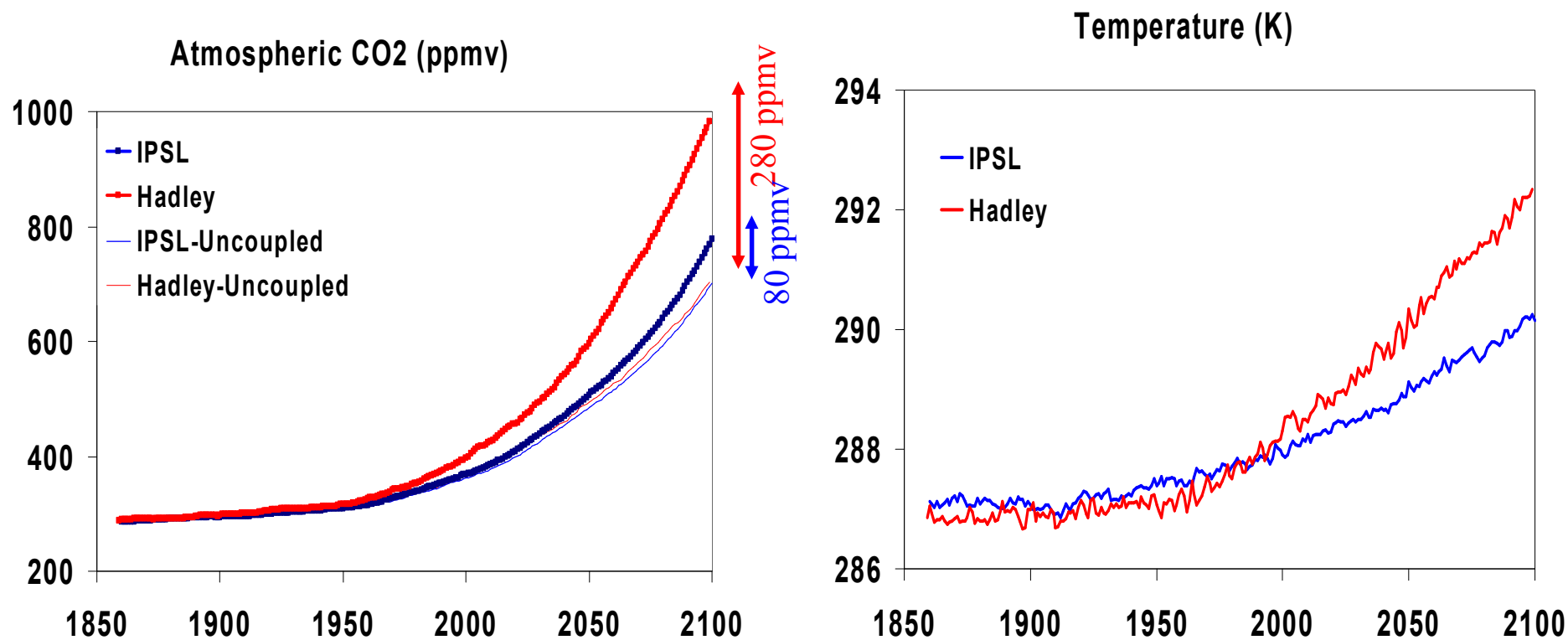




*Positive
feedback*

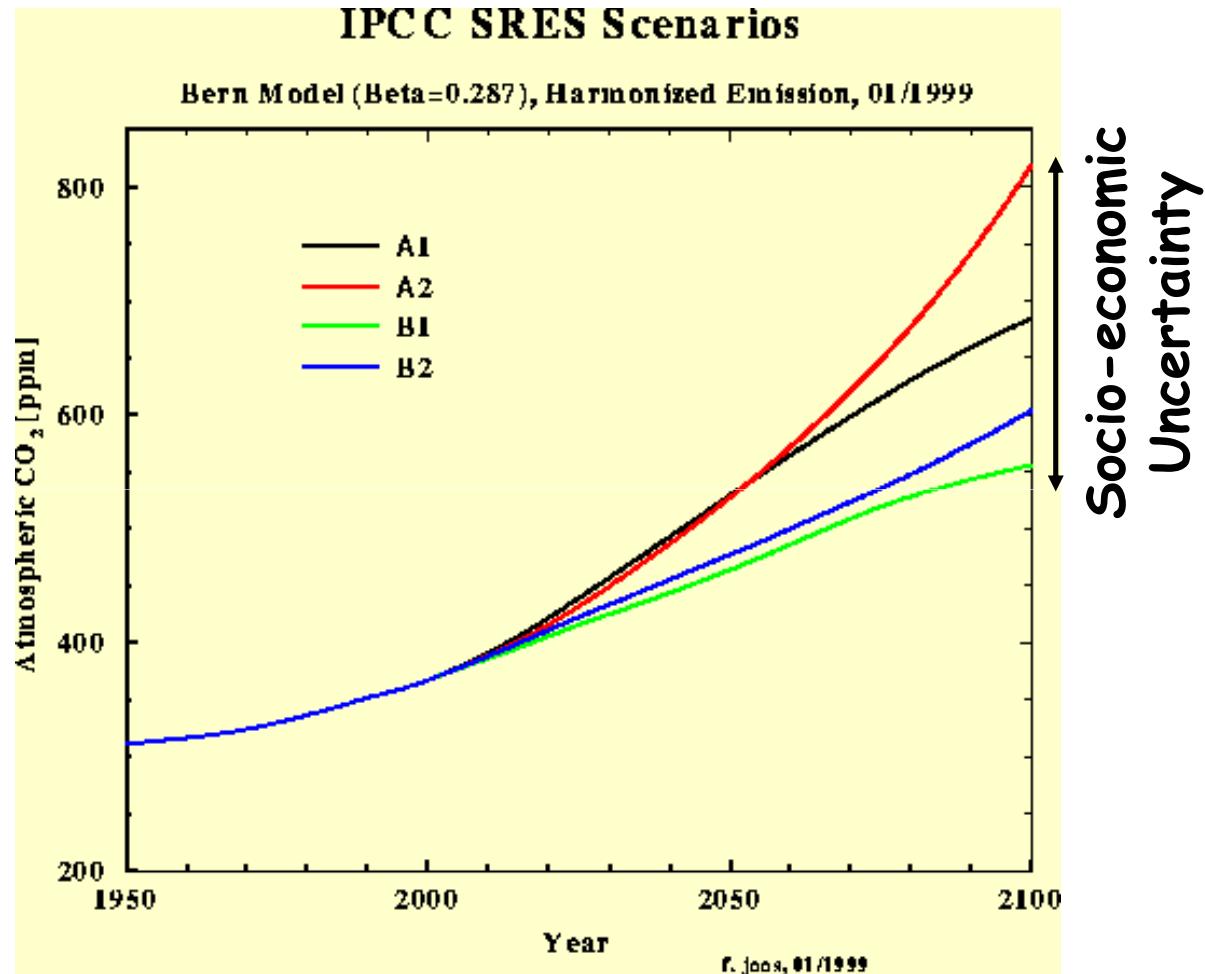


Comparaison avec les simulations du Hadley Centre (Cox et al, 2000)

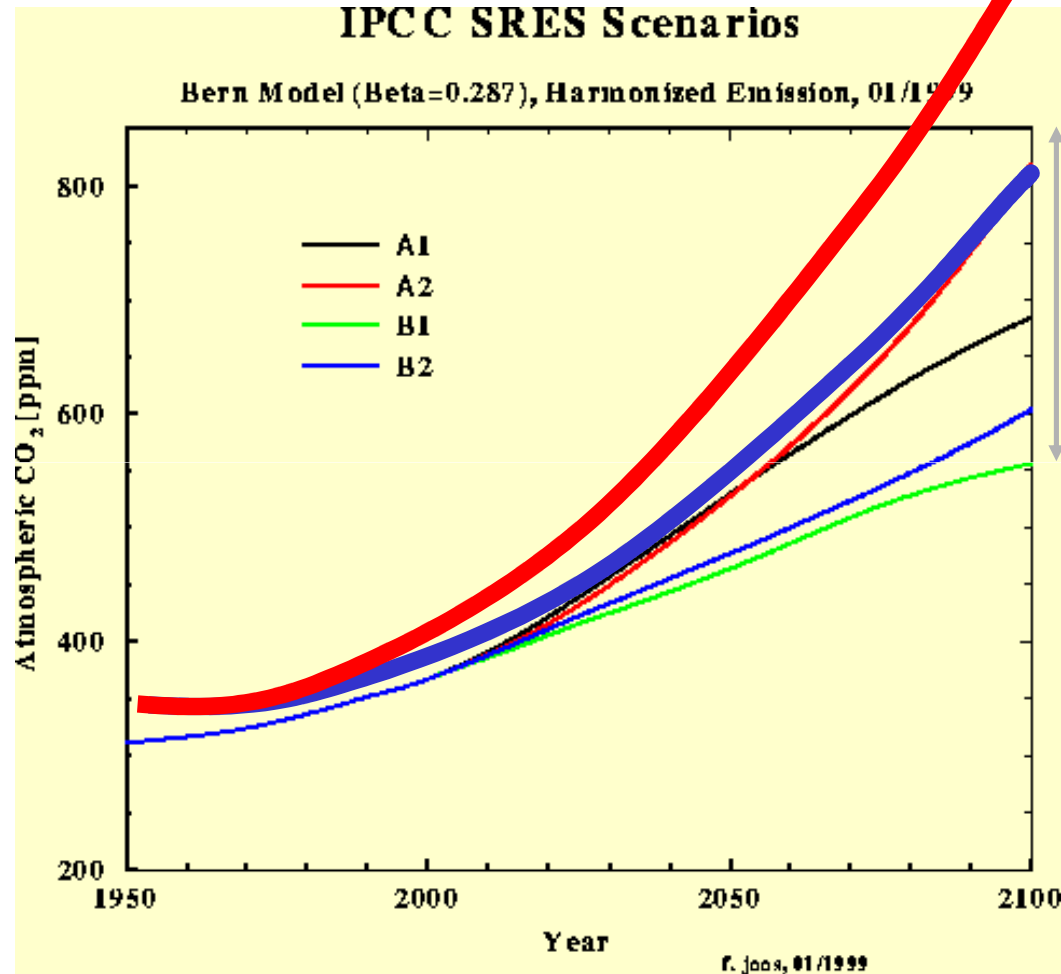


Rétroaction positive dans les deux cas
Mais, amplitude très différente

Incertitude des scénarios d'émission



Incertitude des rétroactions climat/carbone



Socio-economic
Uncertainty
Incertitude
climat/carbone

Même ordre
de grandeur

Analyse de la rétroaction

$$\Delta \text{CO}_2 = \text{émissions} - \Delta F_{\text{ao}} - \Delta F_{\text{ab}} \quad (1)$$

$$\Delta T = \alpha \Delta \text{CO}_2 + \Delta T_{\text{ind}} \quad (2)$$

with:

$$\Delta F_{\text{ao}} = \beta_{\text{ao}} \Delta \text{CO}_2 + \gamma_{\text{ao}} \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta F_{\text{ab}} = \beta_{\text{ab}} \Delta \text{CO}_2 + \gamma_{\text{ab}} \Delta T \quad (4)$$

(3) et (4) dans (1), puis (1) dans (2) donne:

$$\Delta T = 1/(1-g) \Delta T_{\text{unc}}$$

avec:

$$g = \alpha (\gamma_{\text{ao}} + \gamma_{\text{ab}}) / (1 + \beta_{\text{ao}} + \beta_{\text{ab}})$$

g est le gain de la rétroaction

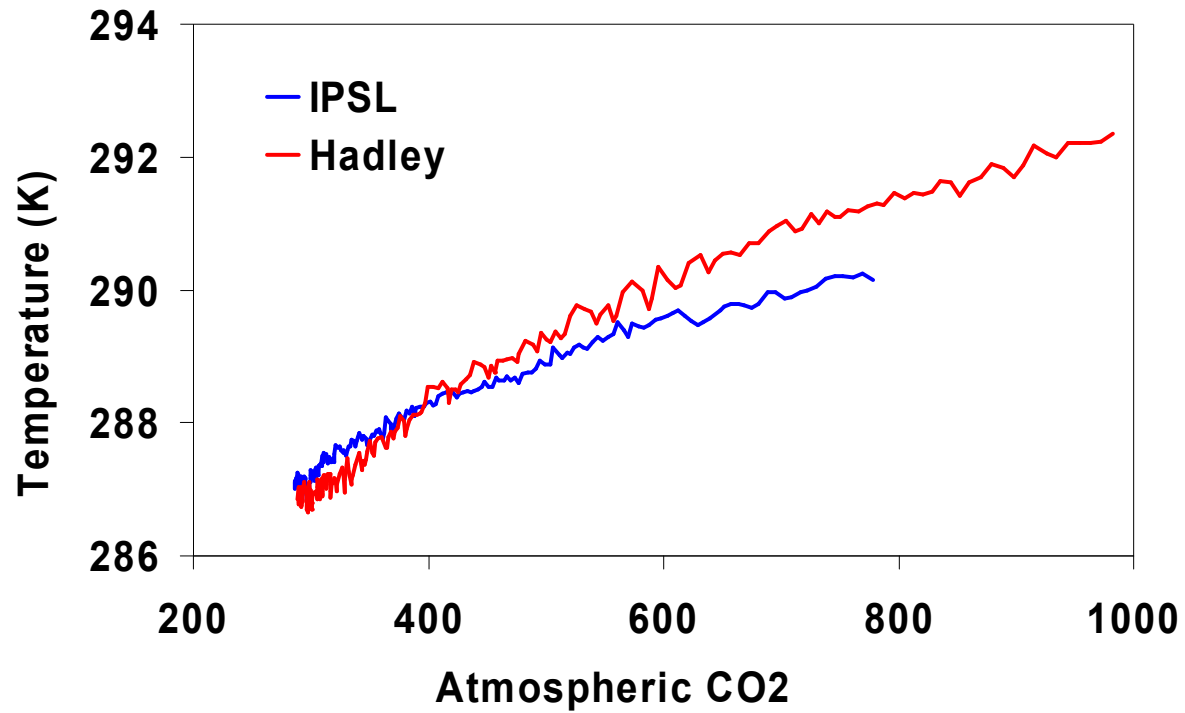
g est important si :

α , la sensibilité de la température au CO_2 est **grande**

γ_{ao} et γ_{ab} , les sensibilités du carbone océanique et biosphérique au changement climatique sont **grands**

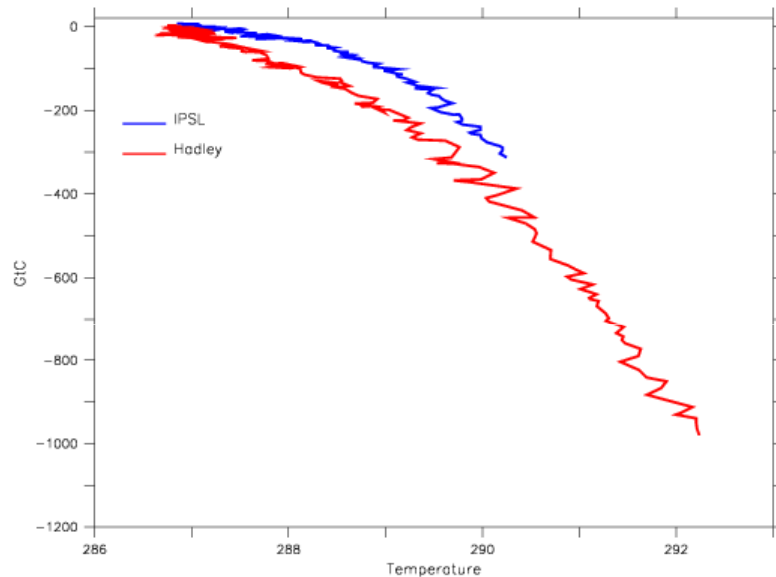
β_{ao} and β_{ab} , les sensibilités du carbone océanique et biosphérique au CO_2 atm. sont **faibles**

(1) GCM sensitivity to CO₂

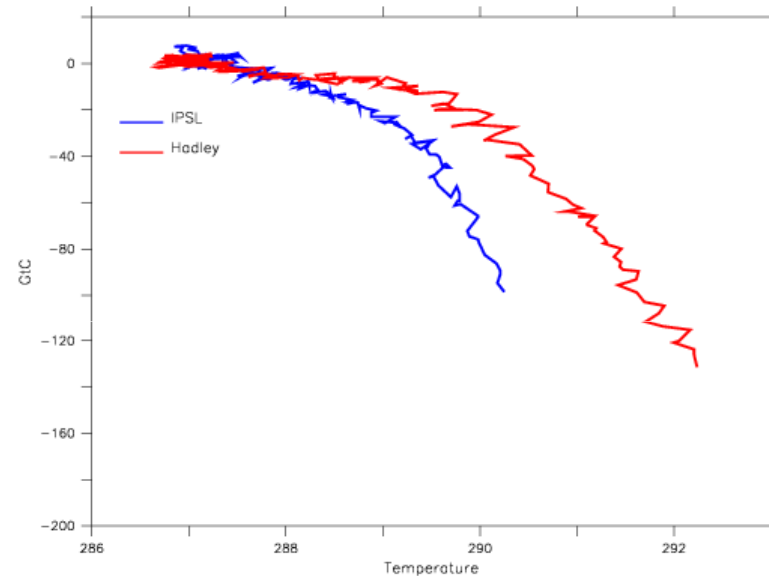


(2) C-cycle sensitivity to climate change

Land Carbon uptake sensitivity



Ocean Carbon uptake sensitivity



$$\gamma_{ab}^{\text{Hadley}} < \gamma_{ab}^{\text{IPSL}}$$

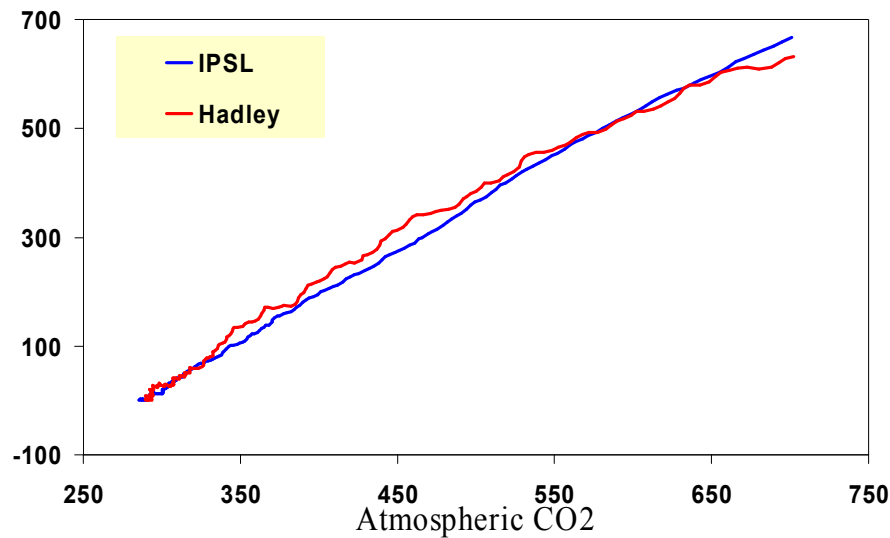


$$g^{\text{Hadley}} \gg g^{\text{IPSL}}$$

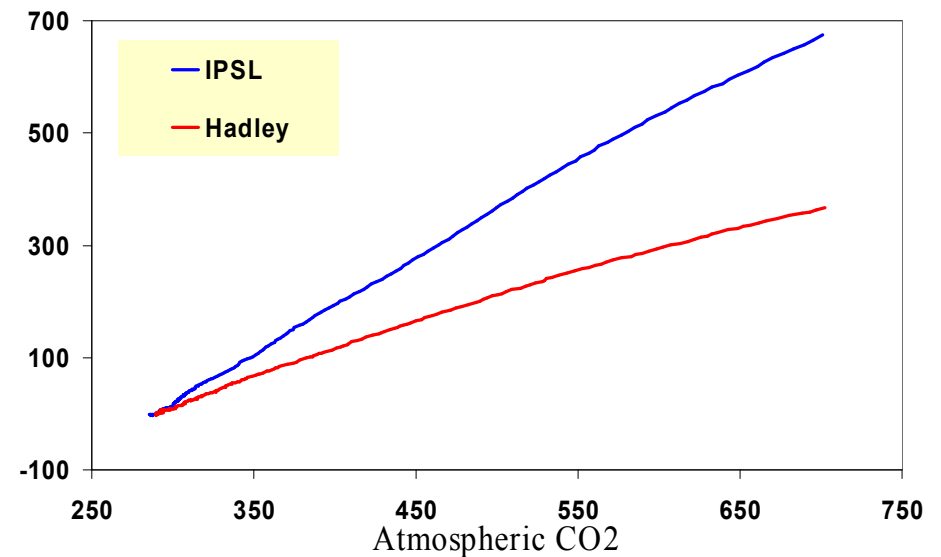
$$\gamma_{ao}^{\text{Hadley}} > \gamma_{ao}^{\text{IPSL}} \quad (2\text{nd order})$$

(3) C-cycle sensitivity to CO₂

Land Uptake Sensitivity to CO₂ (GtC/ppm)



Ocean Uptake Sensitivity to CO₂ (GtC/ppm)



$$\beta_{ao}^{\text{Hadley}} > \beta_{ao}^{\text{IPSL}}$$

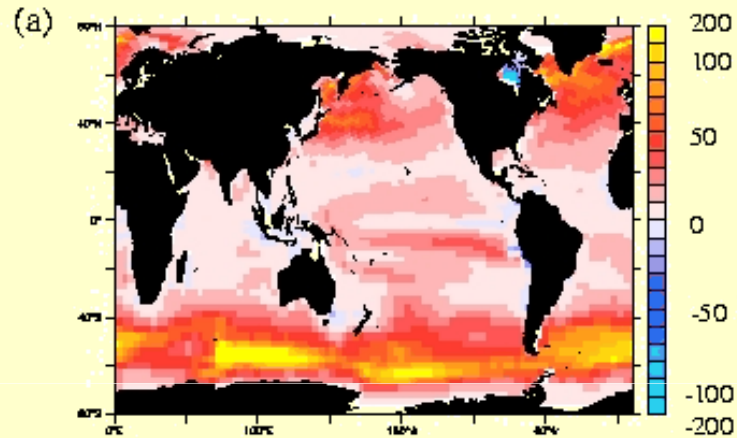


$$g^{\text{Hadley}} \gg \gg g^{\text{IPSL}}$$

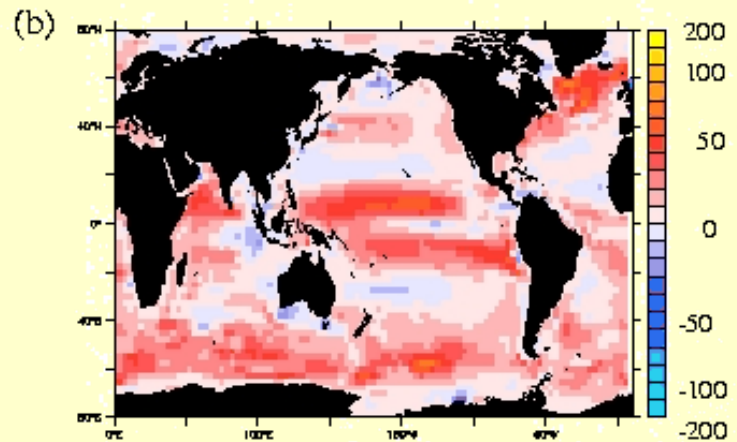
Importance of Ocean Circulation

Air-sea flux of anthropogenic CO₂

IPSL



Hadley



Plan du Cours

Introduction -

I. Quelle réalité pour le changement climatique ?

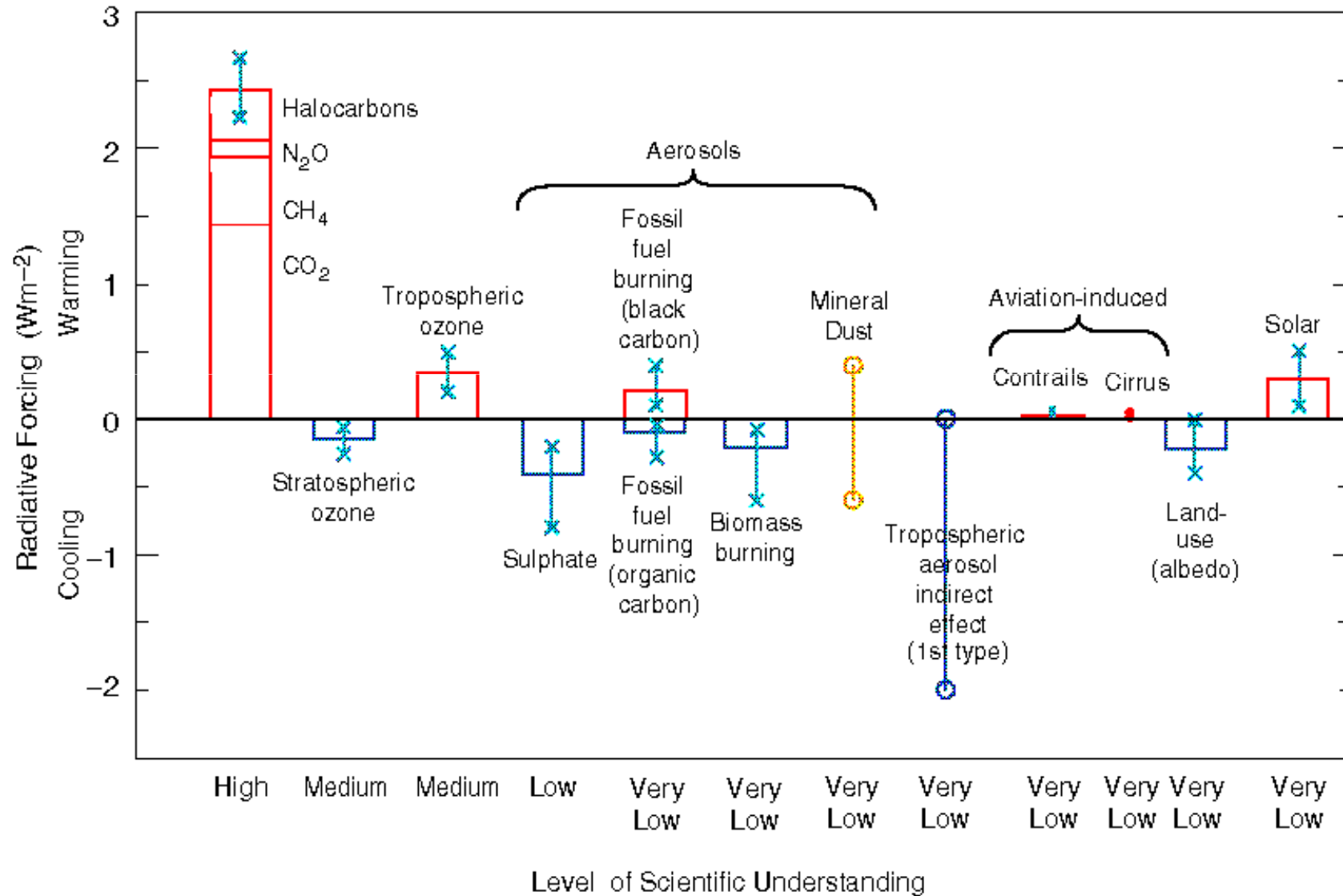
- 1- L'observation des paramètres climatiques
- 2- Evolution des composés atmosphériques
- 3- Le cycle du carbone au cœur du changement climatique

II. Quel rôle pour le carbone océanique ?

- 1- Le cycle naturel du carbone dans l'océan
- 2- La perturbation anthropique
- 3- Quels scénarios pour demain ?
 - Physique
 - Biologie
 - Carbone
 - Couplage climat-carbone : Rétroaction positive

Conclusion

Bilan : Forçage radiatif anthropique/naturel pour l'année 2000 (/1750)



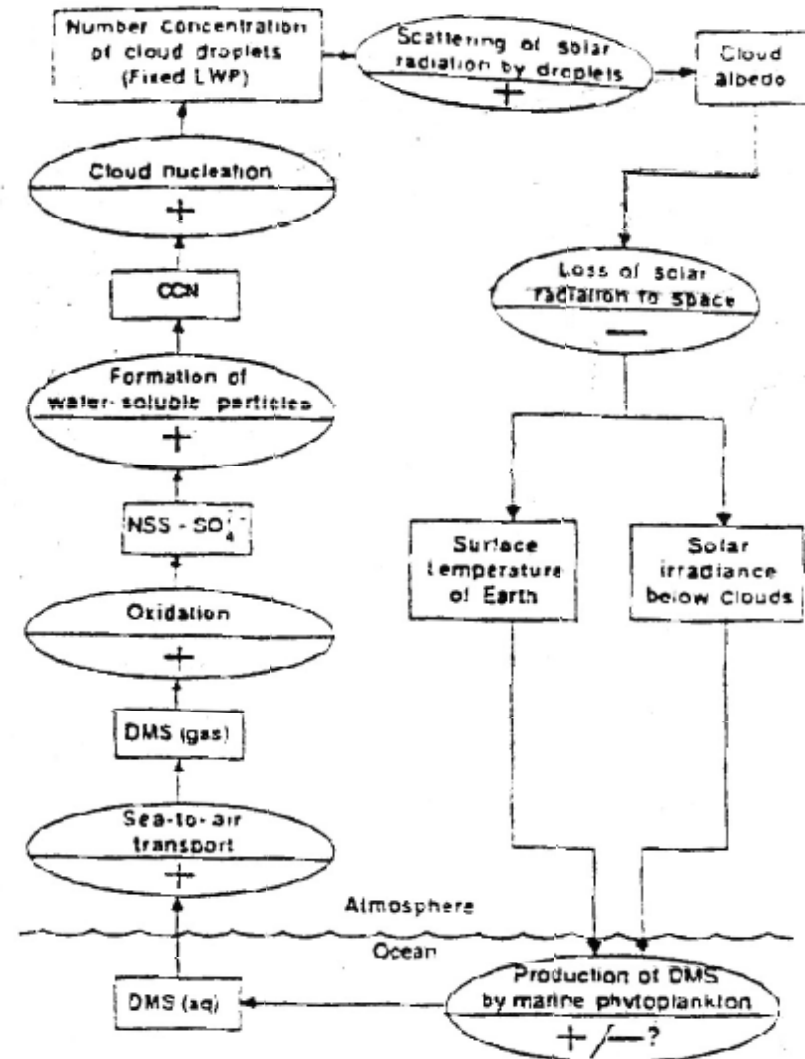
Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate

Robert J. Charlson*, James E. Lovelock*, Meinrat O. Andreae* & Stephen G. Warren*

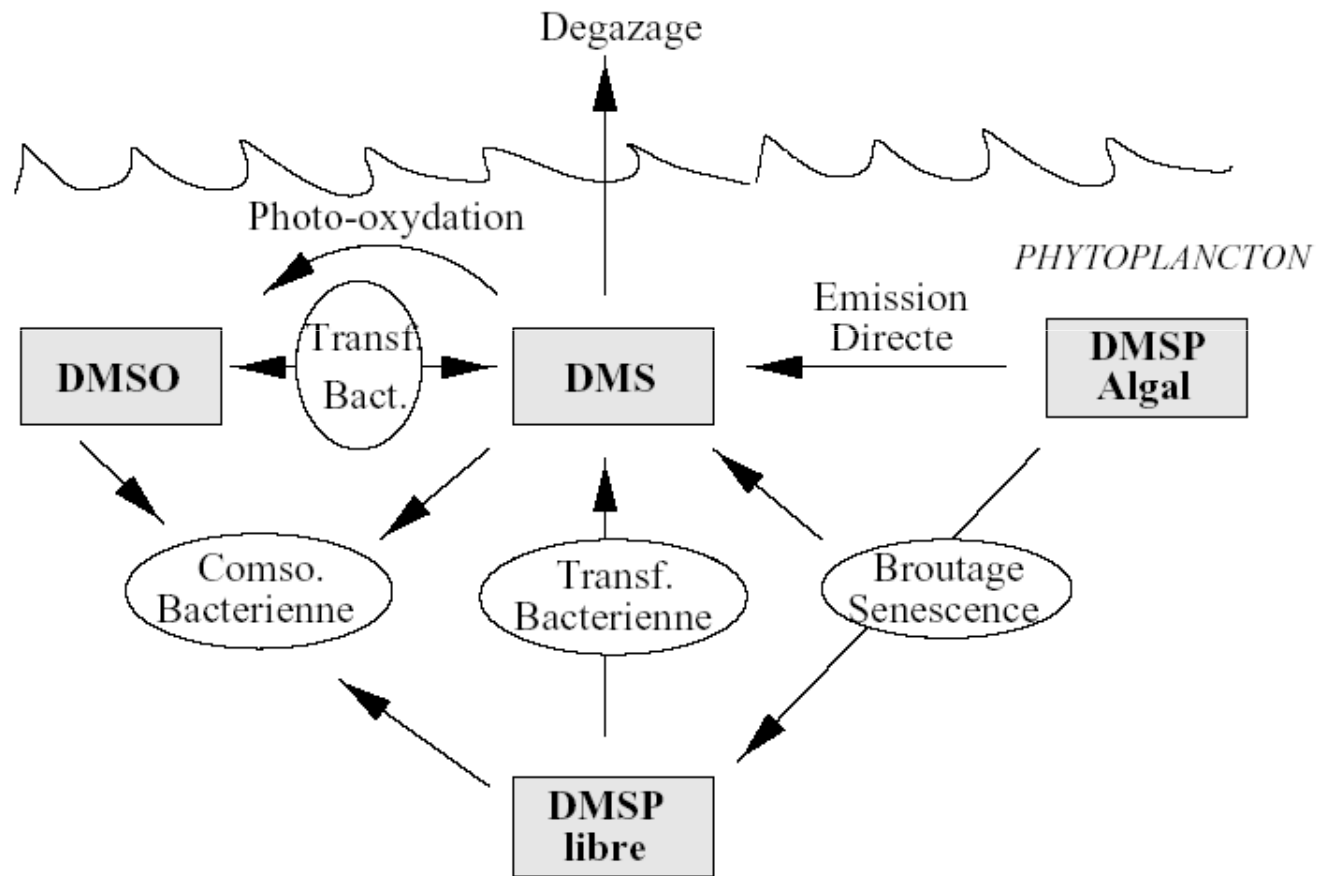
▶ Charlson et al. , Nature, 1987

▶ Key questions :

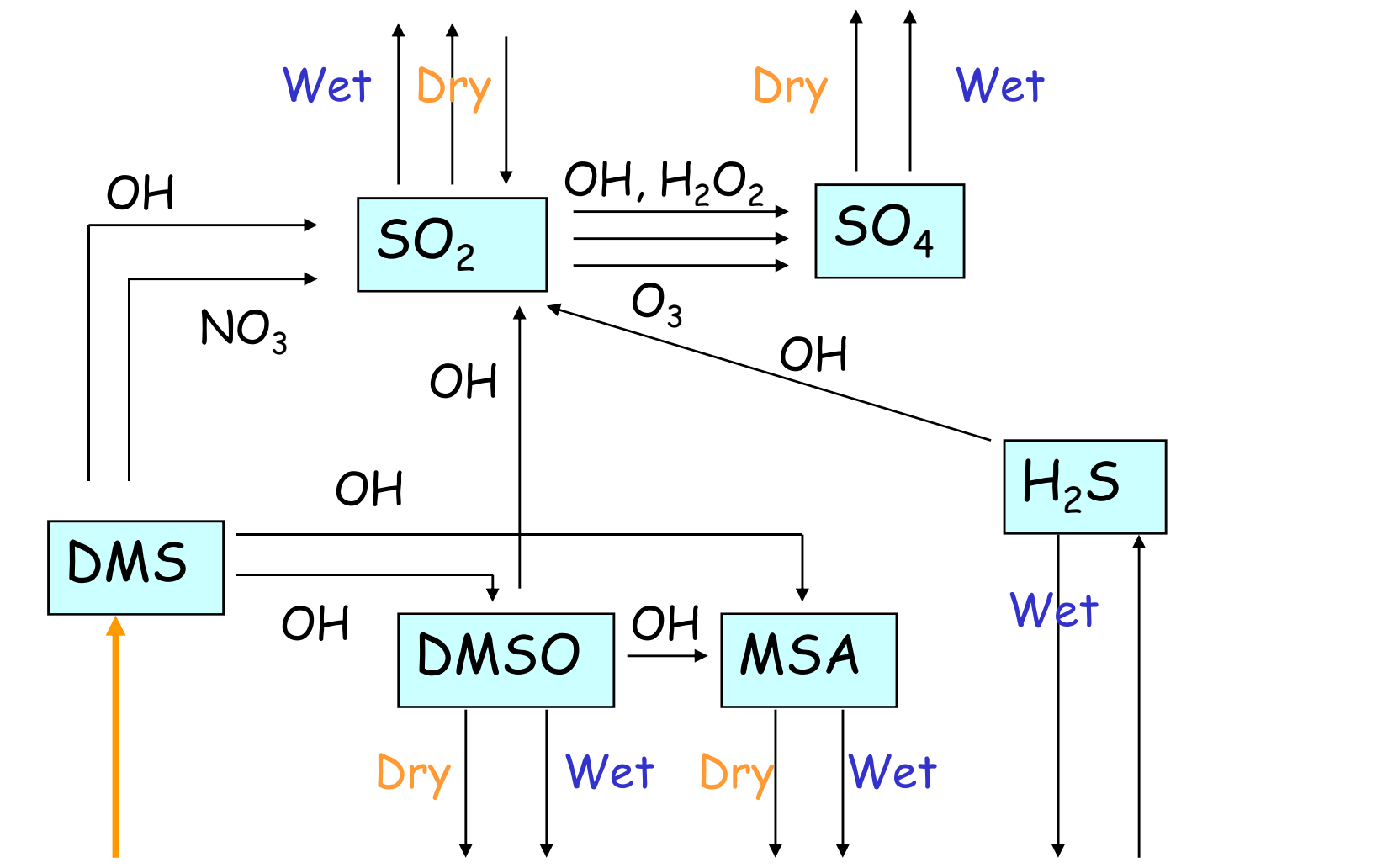
1. How will DMS emissions respond to climate change ?
2. What is the potential impact on climate ?



Dans l'océan ?

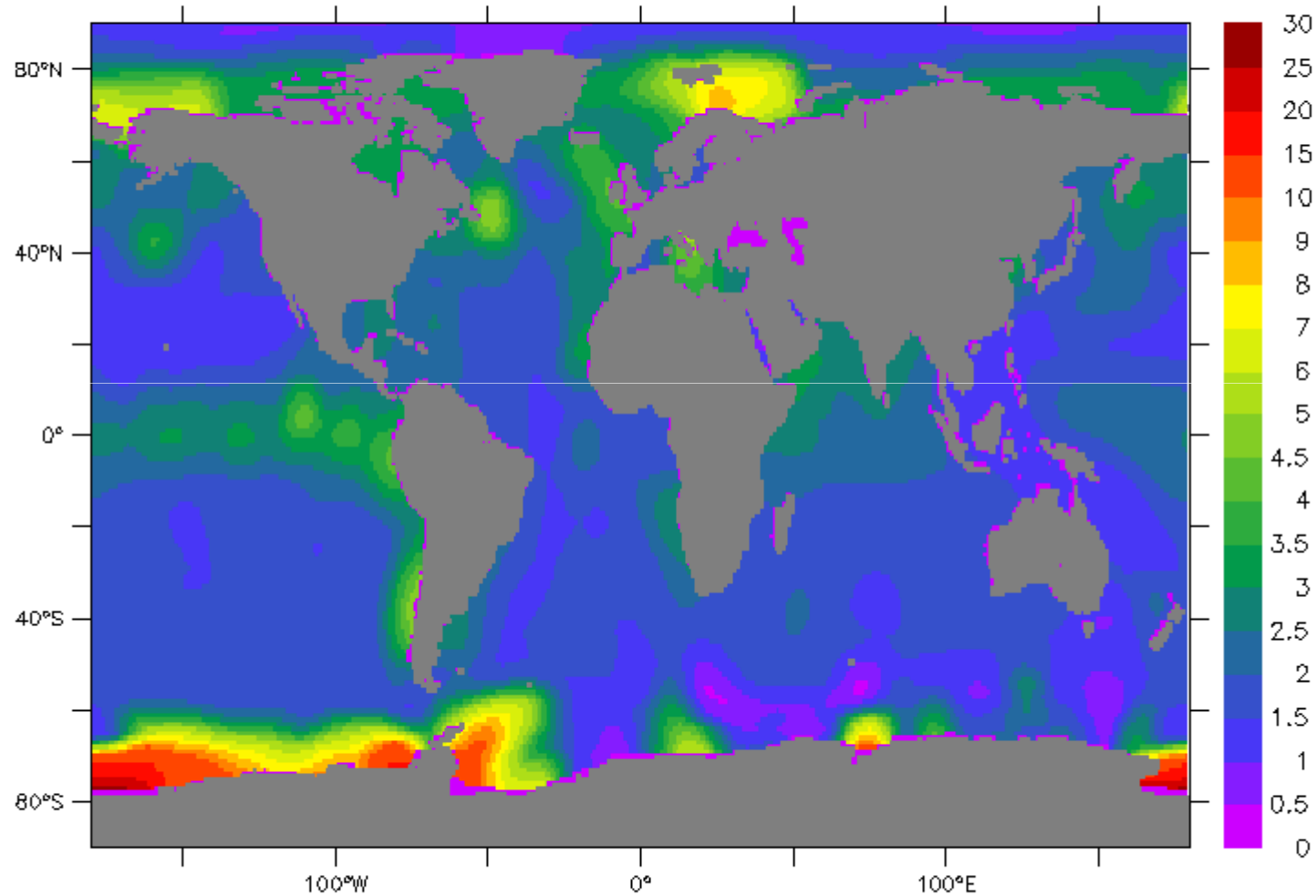


Et dans l'atmosphère ?



Concentrations de DMS dans les eaux de surface (nM)

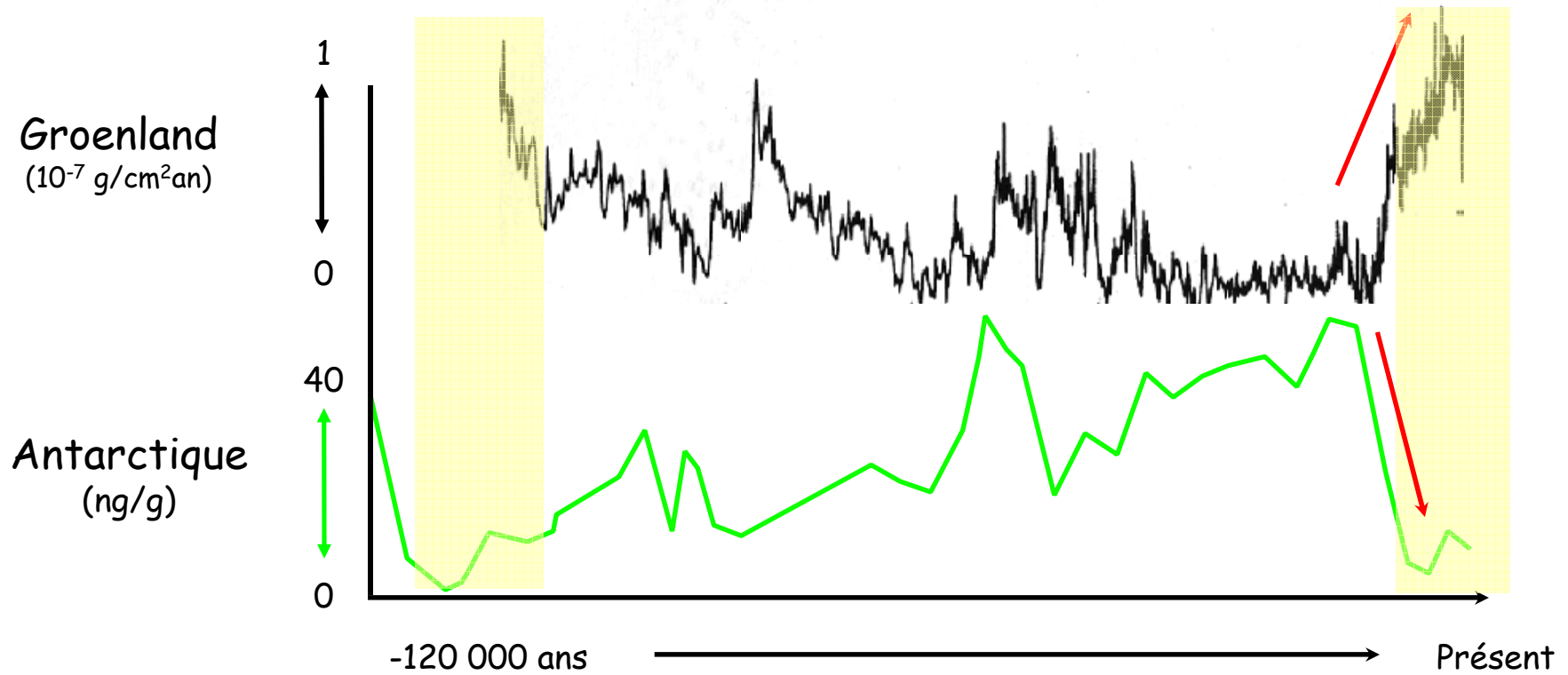
(carte réalisée à partir de 15000 observations ponctuelles)



Kettle et al. 2002

Et dans le passé ?

Methanesulfonate (de l'oxydation du DMS) : Proxy de l'état de la biogéochimie marine ?



Méthode

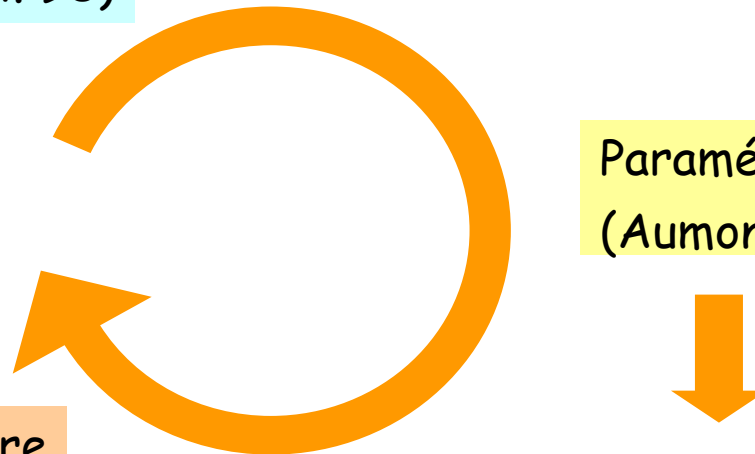
Simulations Climatiques
 $1xCO_2 \rightarrow 2xCO_2$
(IPSL model, Barthelet et al. 98)

Biogéochimie Marine
(P3ZD & PISCES, Aumont et al. 2002)

Paramétrisation du DMS
(Aumont et al. 2002)

Cycle du S dans l'Atmosphère
&
Forçage Radiatif
(LMDZT-Soufre,
Boucher et al. 2002)

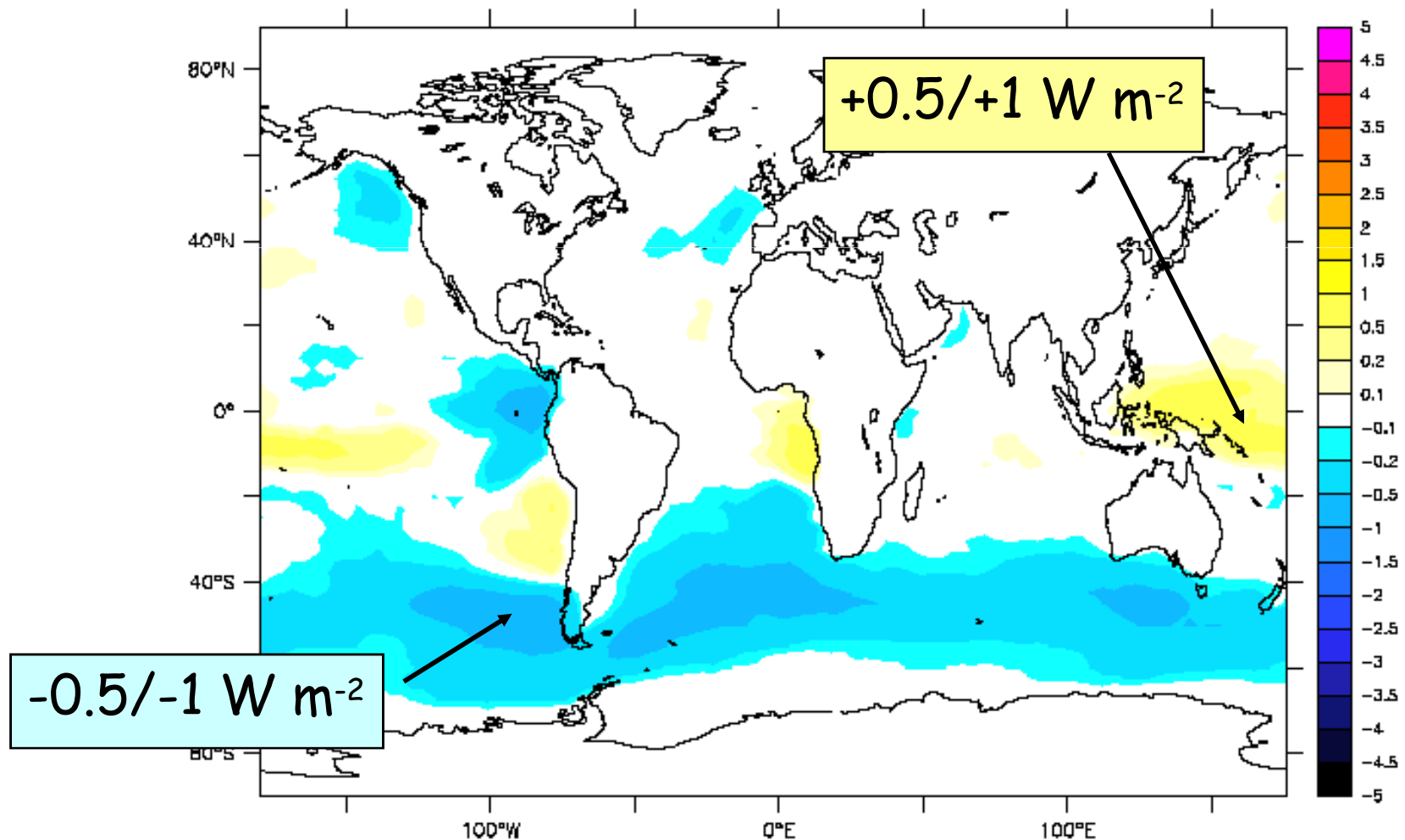
Emissions Marines du DMS



Résultats

Forçage Radiatif Indirect
Lié aux modifications des Emissions de DMS

- ▶ A l'échelle globale : presque négligeable ... -0.05 W m^{-2}
- ▶ A l'échelle régionale : de -1 à $+1 \text{ W m}^{-2}$

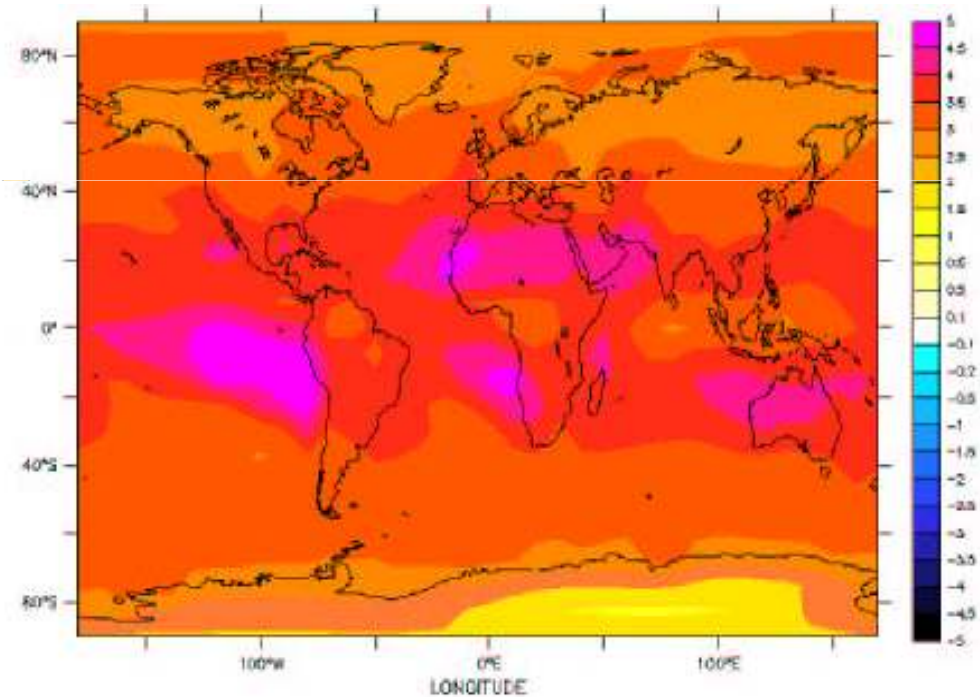
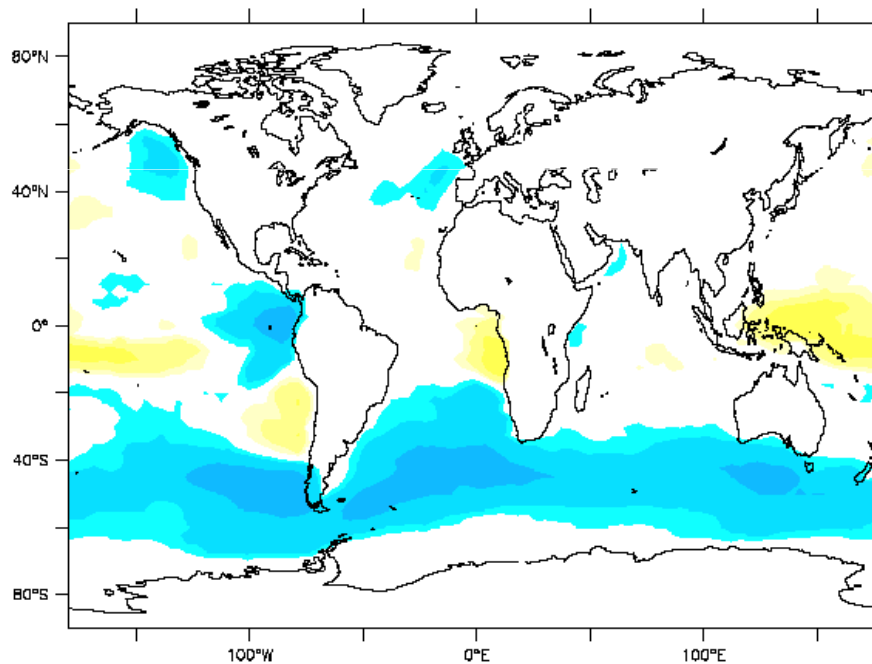


Amplification ou Diminution du Réchauffement Global

Forçage radiatif lié à ...

... augmentation du $p\text{CO}_2$ ($2\times\text{CO}_2$ - $1\times\text{CO}_2$)

... modifications des émissions de DMS



Espèce	Source/Puits Océanique	Toutes Sources Naturelles	Sources Anthropiques (1990s)	Rôle Climatique	Mécanisme de production dans l'océan
CO₂	-2 PgC/an	/	+7 PgC/an	Gaz à effet de serre	Pompe physique Pompe biologique
DMS	13-50 TgS/an	13-50 TgS/an	/	Précurseur d'aérosols troposphériques	Phytoplancton / Bactéries/Photochimie
N₂O	1-6 TgN/an	5-15 TgN/an	7 TgN/an	Gaz à effet de serre	Bactéries (Nitrification / Dénitrification)
CH₄	10 Tg CH ₄ /an	250 Tg CH ₄ /an	350 Tg CH ₄ /an	Gaz à effet de serre	Conditions anoxiques / Plateau continental
COS	40 GgS/an	-	60 GgS/an	Précurseur d'aérosols stratosphériques	Photoproduction (mat. org., lumière)
CO	20-200 TgC/an	80-360 TgC/an (émissions)	1350 TgC/an (émissions)	Capacité oxydante de l'atmosphère	Photoproduction (mat. org., lumière)
NMHC	< 10 TgC/an	> 300 TgC/an	200 TgC/an	Capacité oxydante de l'atmosphère	Photoproduction (mat. org., lumière)