



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

L'OCÉAN ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

# Changement climatique et Biogéochimie Marine : Apports de la modélisation numérique

Laurent Bopp

CNRS, IPSL / LSCE, Gif sur Yvette

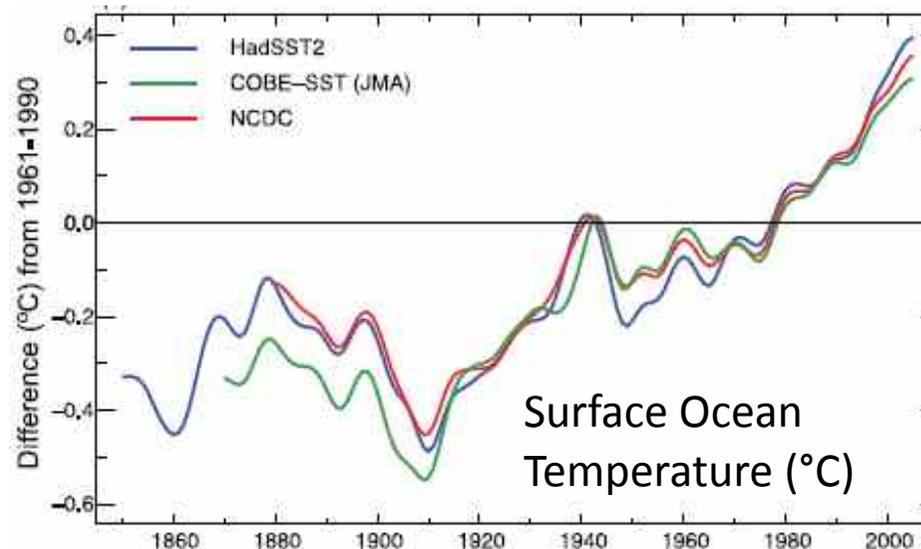


Laurent Bopp – Changements Climatiques et Biogéochimie Marine  
Collège de France – 27 Mai 2011



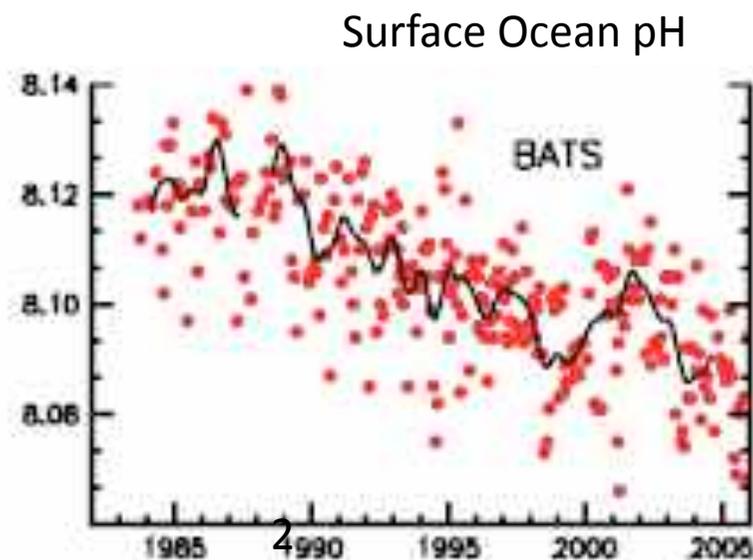
## Des modifications de la physique / chimie de l'océan...

- Un océan plus chaud...  
(+0.8°C en surface depuis 1900)



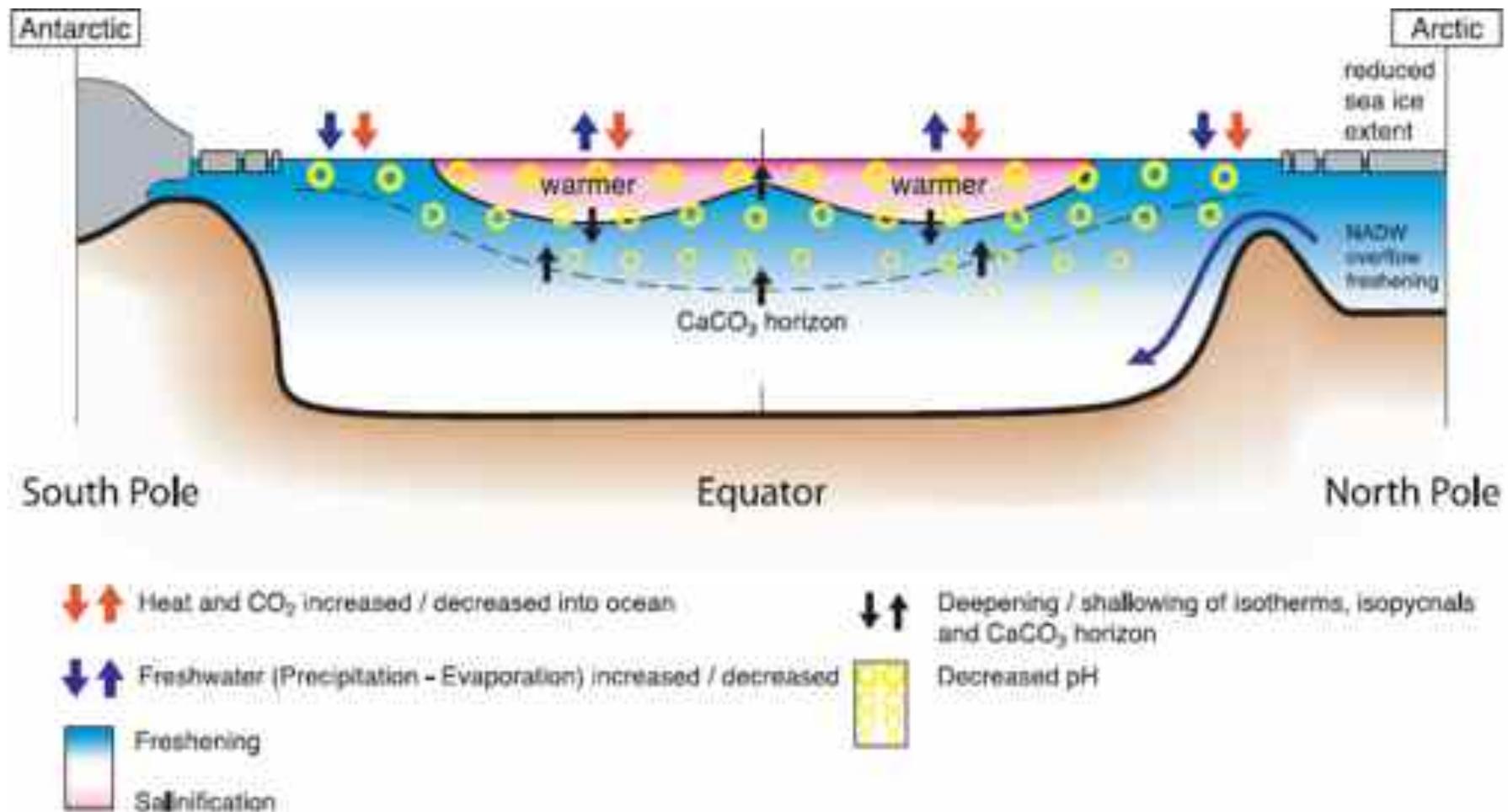
- ... des modifications de l'hydrologie
  - Augmentation de la stratification ?
  - Changements de la circulation ?

- ... plus acide ( pH : -0.1 depuis 50 ans)



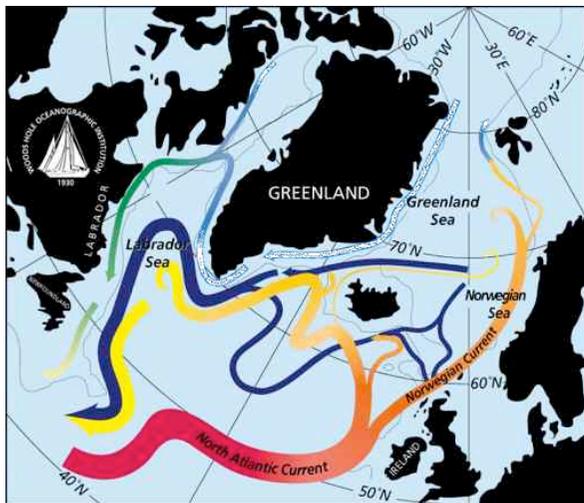
# Des modifications de la physique / chimie de l'océan...

Un océan plus chaud, plus « acide », plus stratifié, ....

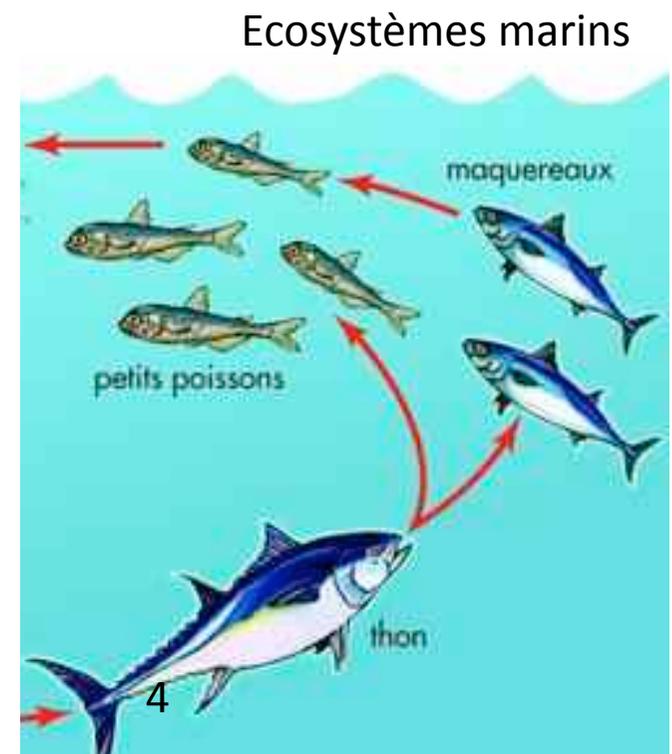


# Quelles conséquences pour la biogéochimie marine ?

- Biogéochimie Marine : de la dynamique océanique aux écosystèmes marins...

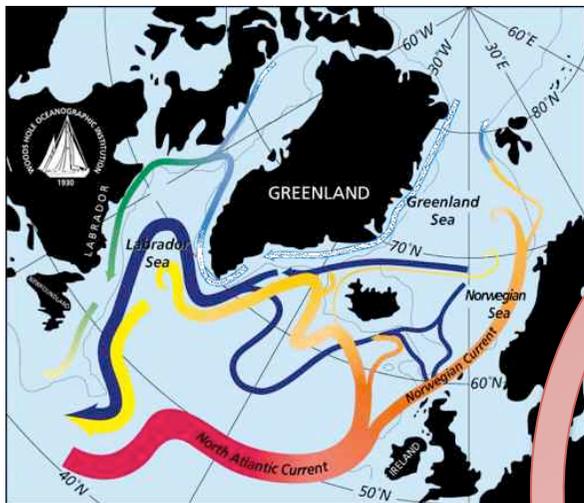


Physique / Dynamique  
Océanique



# Quelles conséquences pour la biogéochimie marine ?

- Biogéochimie Marine : de la dynamique océanique aux écosystèmes marins...

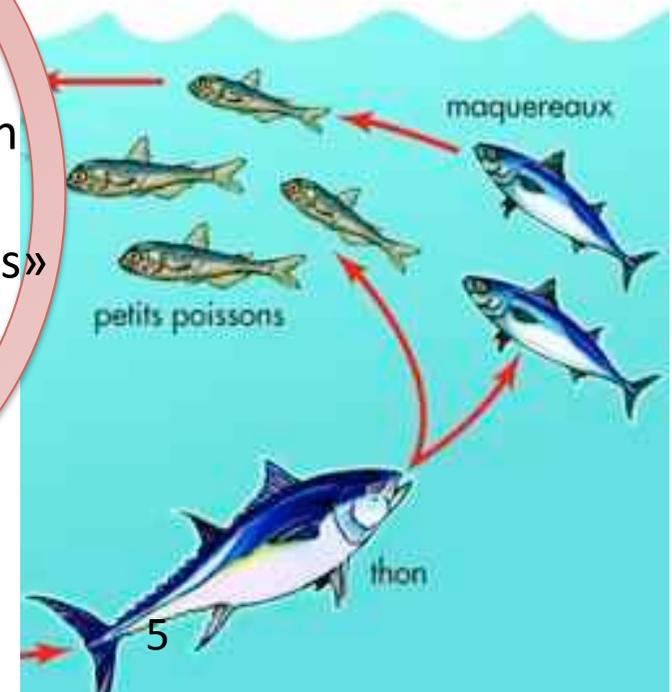


Physique / Dynamique  
Océanique

Cycle du Carbone /  $\text{CO}_2$   
Productivité Marine  
Phytoplancton / Zooplancton  
Éléments nutritifs  
Autres composés «climatiques»  
( $\text{N}_2\text{O}$ , DMS, ...)

.....

Ecosystèmes marins



## Quelles conséquences pour la biogéochimie marine ?

---

- Biogéochimie Marine : de la dynamique océanique aux écosystèmes marins...
- Changement climatique / biogéochimie marine :

Comment les modifications du climat peuvent elles se transmettre à la productivité marine et aux écosystèmes océaniques ?

Comment les modifications de la biogéochimie marine peuvent elles rétroagir sur l'évolution du climat ? (*via* les échanges air-mer de CO<sub>2</sub>)

## Quelles conséquences pour la biogéochimie marine ?

---

- Quels modèles pour représenter la Biogéochimie Marine ?
- Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?
- Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?
- Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

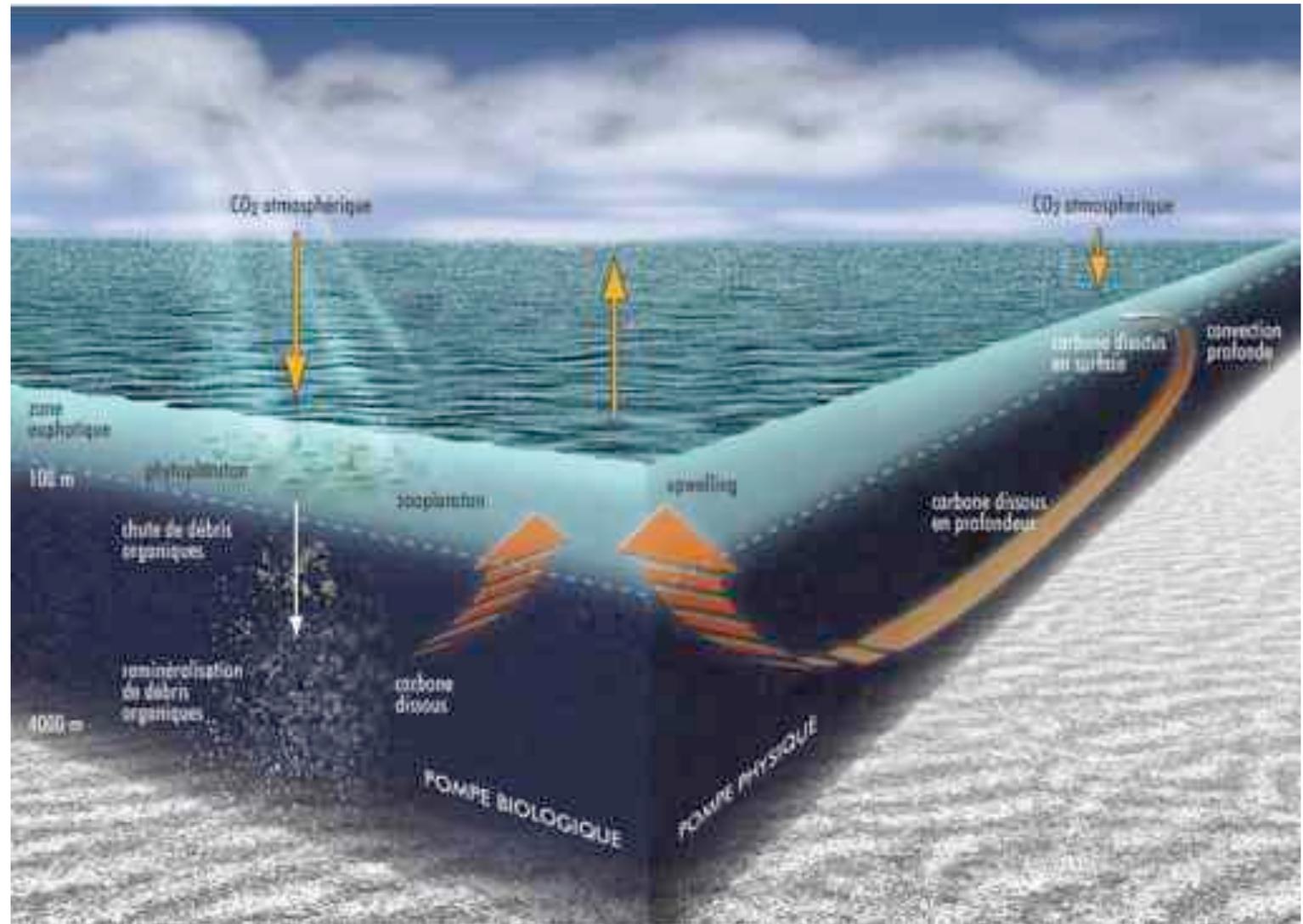


Quels modèles pour représenter la biogéochimie marine ?

---

# Quels modèles pour représenter la biogéochimie marine ?

Cycle du Carbone : échanges air-mer de gaz, chimie des carbonates, transport des espèces dissoutes, production biologique, chute des particules, reminéralisation, ...



# Quels modèles pour représenter la biogéochimie marine ?

## Géochimiques



Particles

Euphotic Layer (100-150m)



→ Une seule équation pour toute la « biologie » :

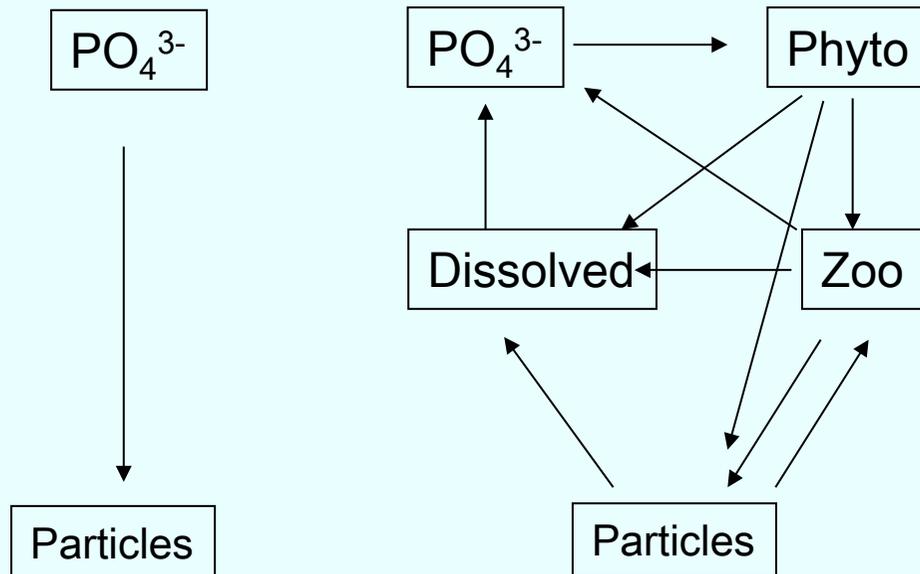
$$\text{Production Exportée} = f(\text{Temp}) \cdot f(\text{Lumière}) \cdot \text{PO}_4^2 / K_s + \text{PO}_4$$

→ Modèles intégrés dans les GCM océaniques

# Quels modèles pour représenter la biogéochimie marine ?

Géochimiques

NPZD



Euphotic Layer (100-150m)

Fasham et al.

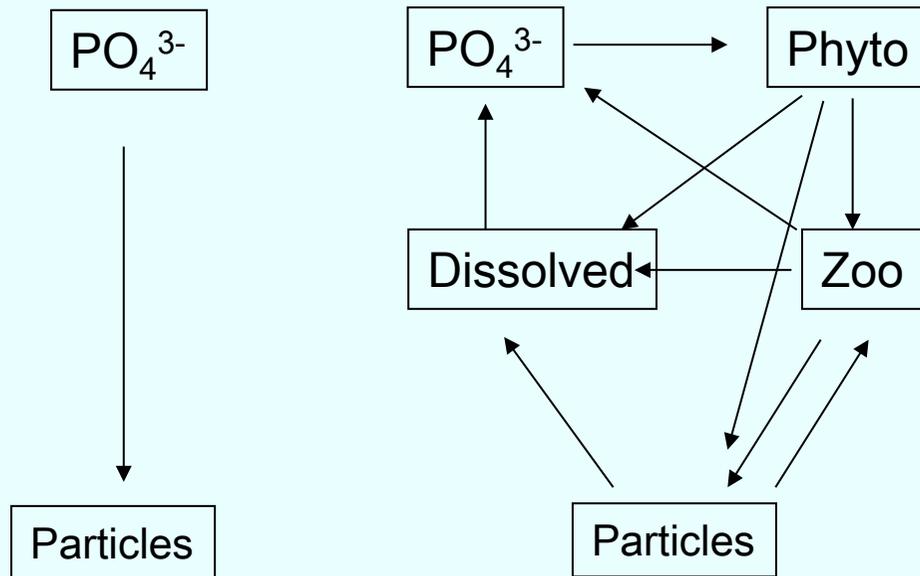
# Quels modèles pour représenter la biogéochimie marine ?

Géochimiques

NPZD

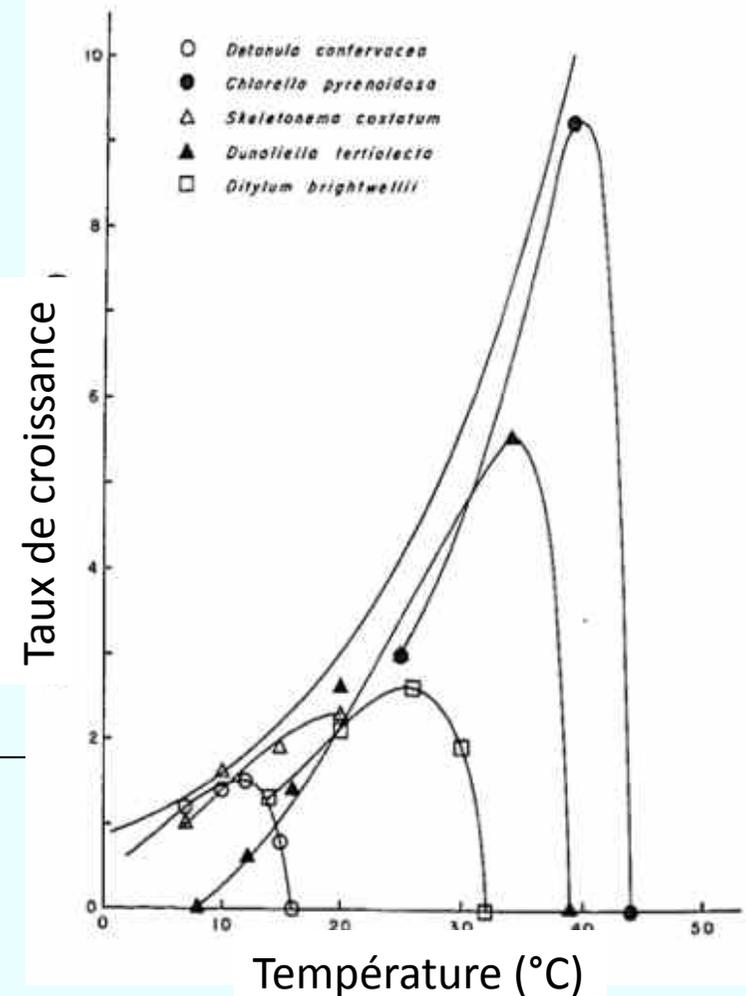
Relation Taux de croissance /Temp.

(Eppley, 1972)



Euphotic Layer (100-150m)

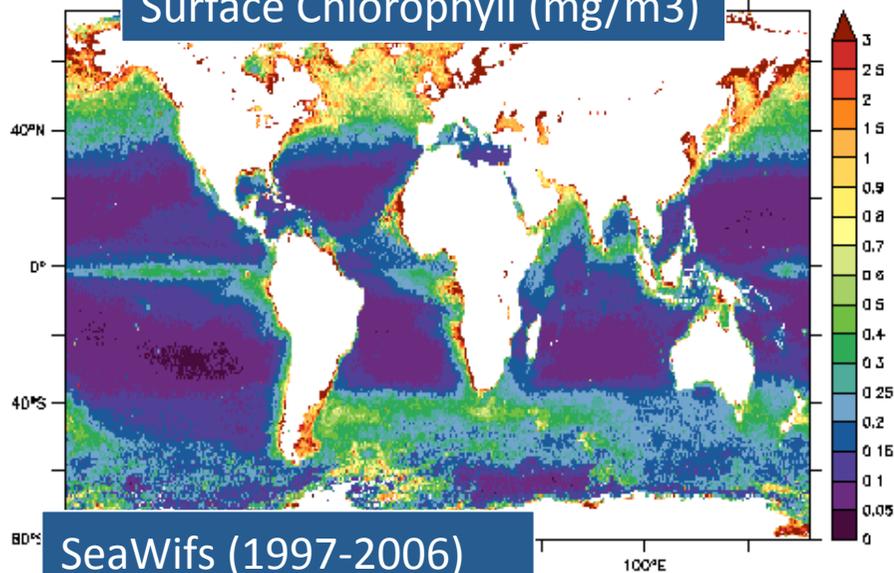
Fasham et al.





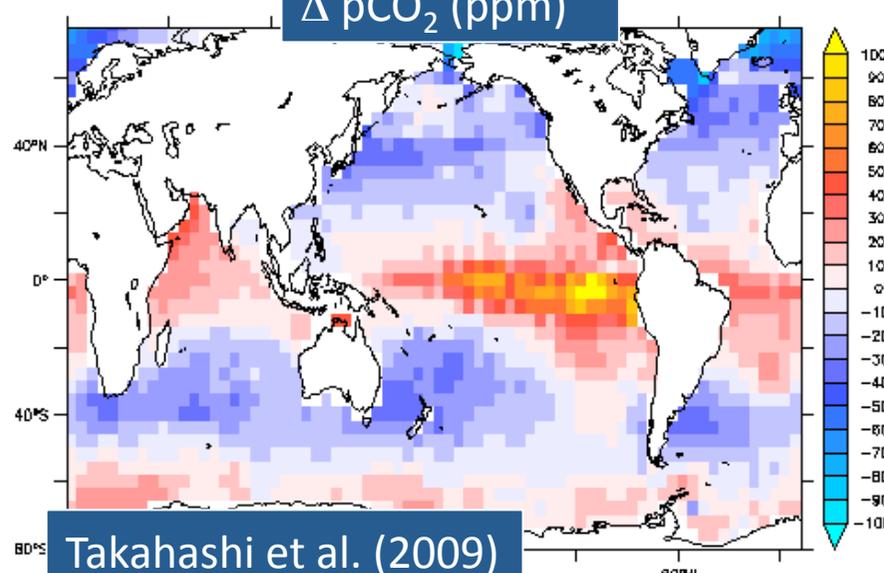
# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)

Surface Chlorophyll (mg/m<sup>3</sup>)



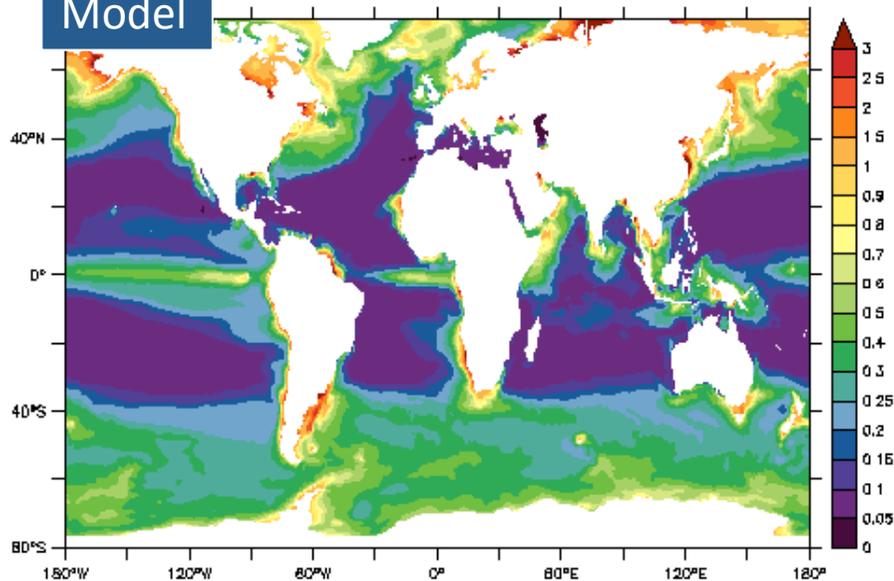
SeaWifs (1997-2006)

$\Delta pCO_2$  (ppm)

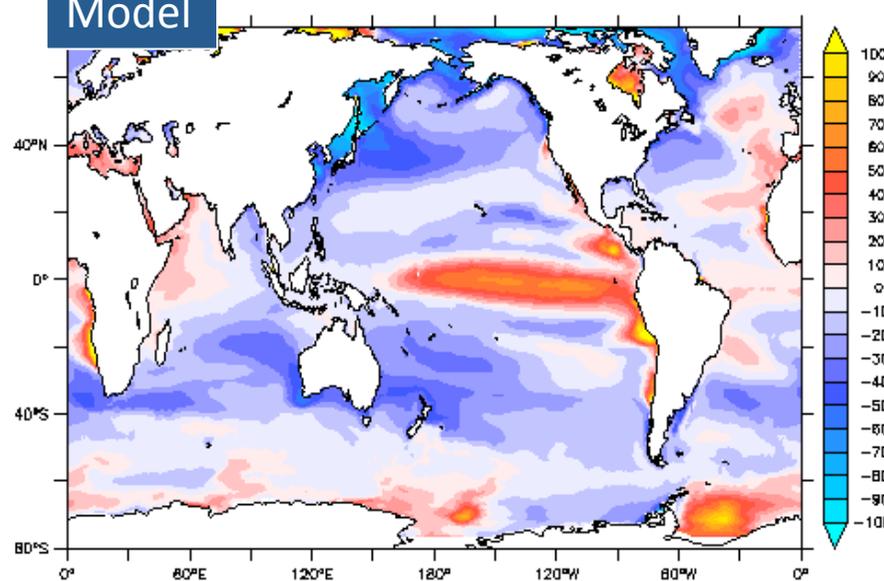


Takahashi et al. (2009)

Model

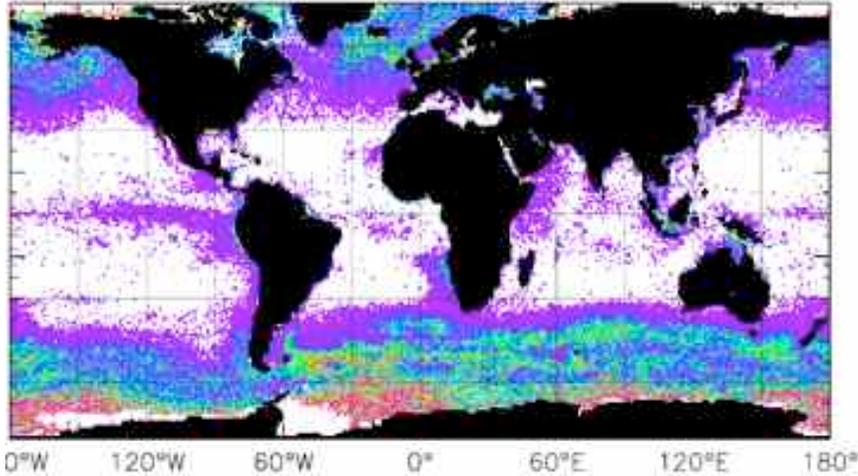


Model



# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)

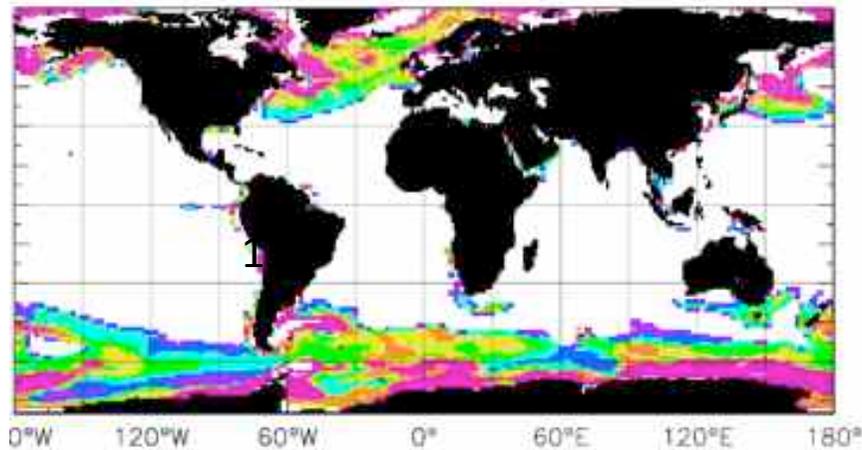
PHYSAT (Alvain et al.)



Diatoms Index (Relative Unit)



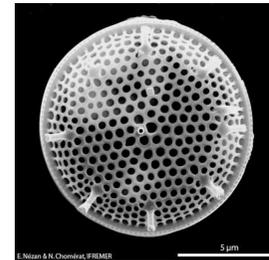
PISCES



→ 2 groupes de phytoplancton :

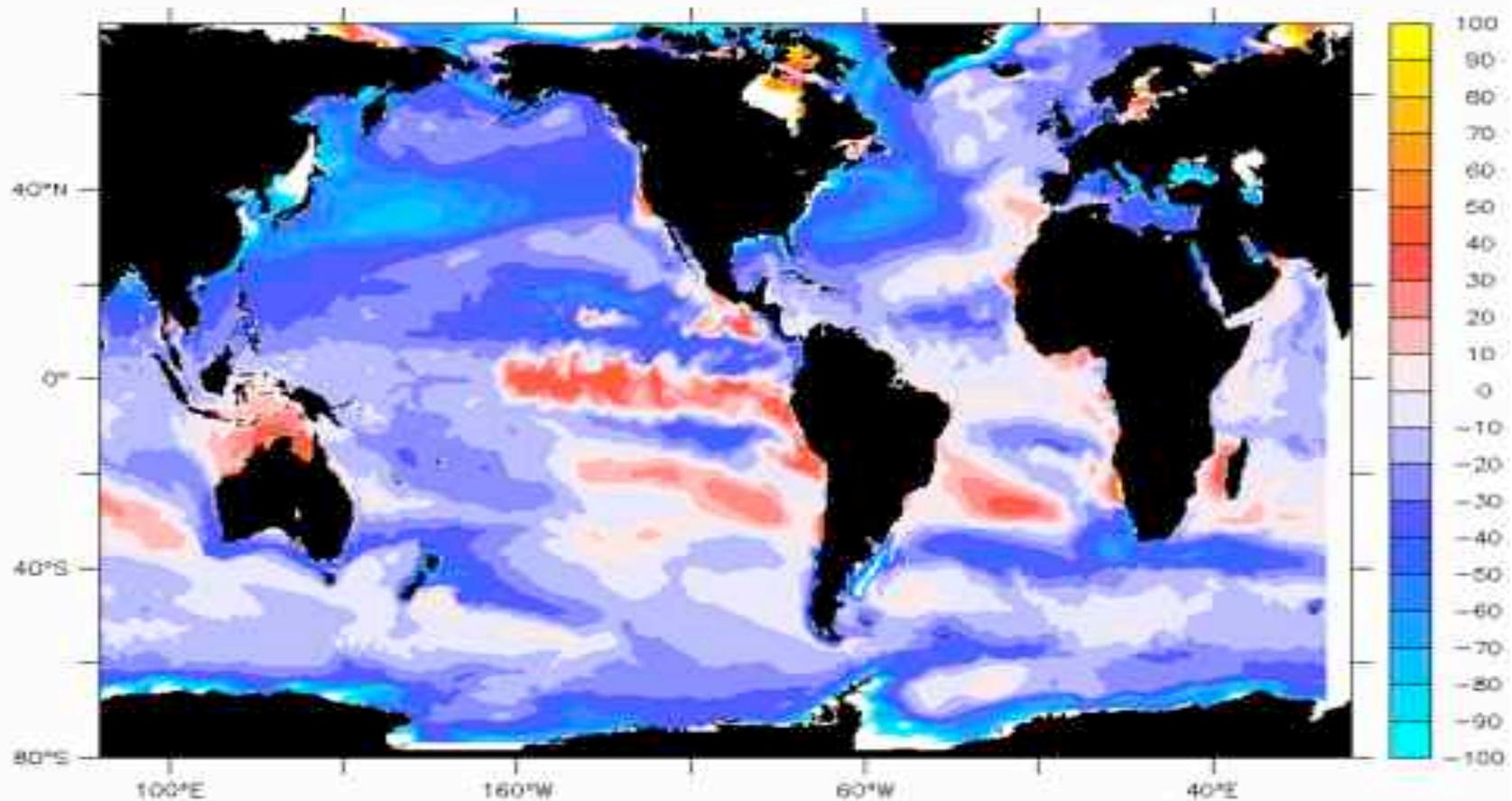
diatomées

picophytoplancton



## Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)

Flux air-mer de carbone dans une simulation globale NEMO-PISCES au  $\frac{1}{2}^\circ$

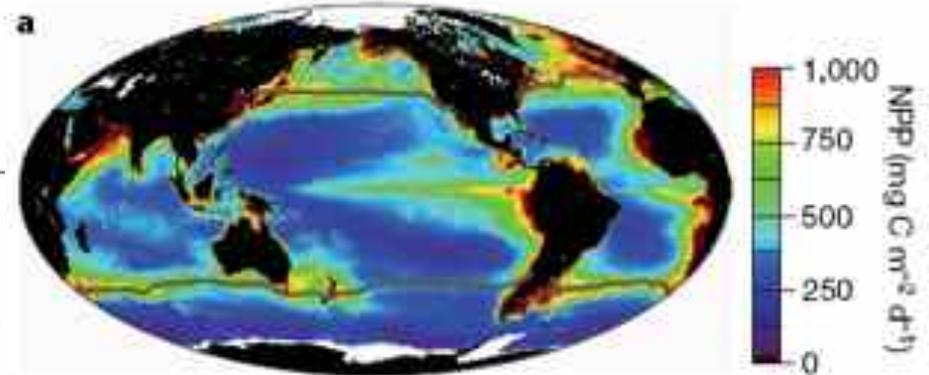


# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)

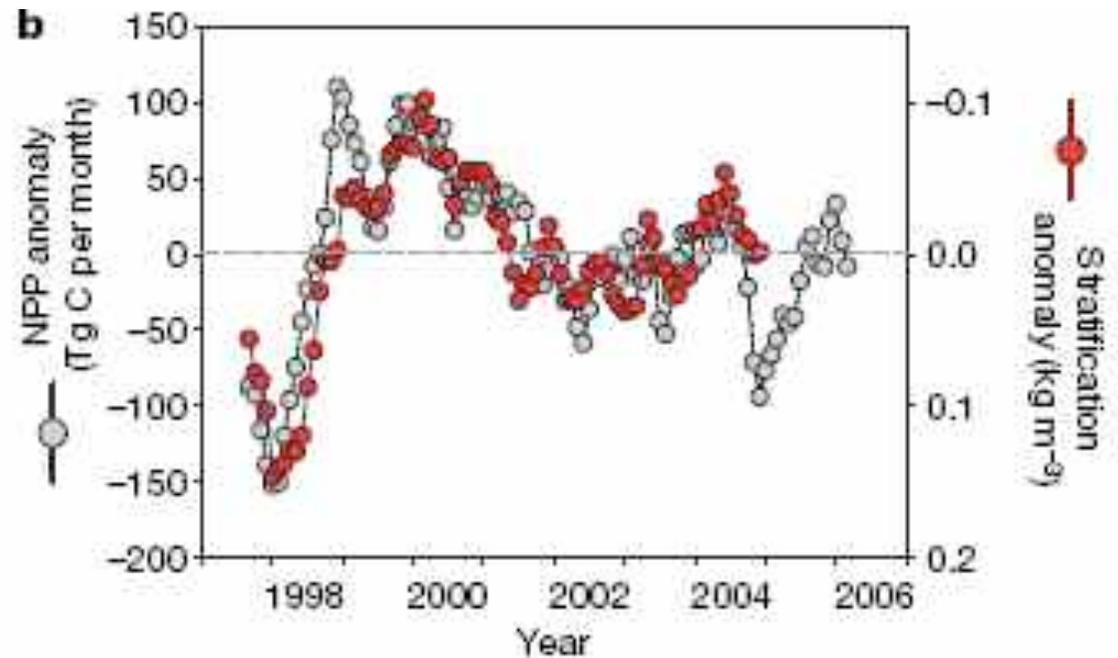
LETTERS

## Climate-driven trends in contemporary ocean productivity

Michael J. Behrenfeld<sup>1</sup>, Robert T. O'Malley<sup>1</sup>, David A. Siegel<sup>3</sup>, Charles R. McClain<sup>4</sup>, Jorge L. Sarmiento<sup>5</sup>, Gene C. Feldman<sup>6</sup>, Allen J. Milligan<sup>1</sup>, Paul G. Falkowski<sup>7</sup>, Ricardo M. Letelier<sup>2</sup> & Emmanuel S. Boss<sup>7</sup>

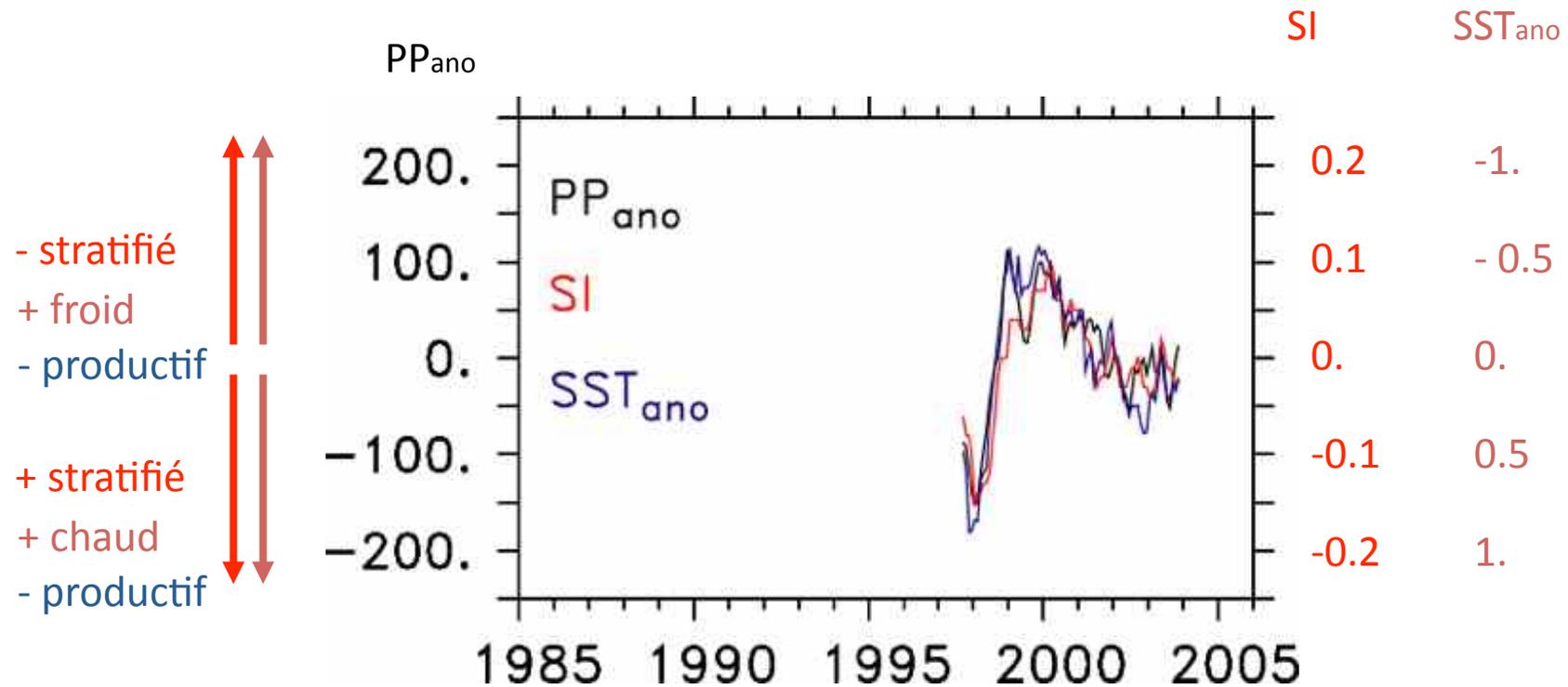


Lien étroit entre productivité marine totale et variabilité climatique interannuelle (El Nino ou SOI)



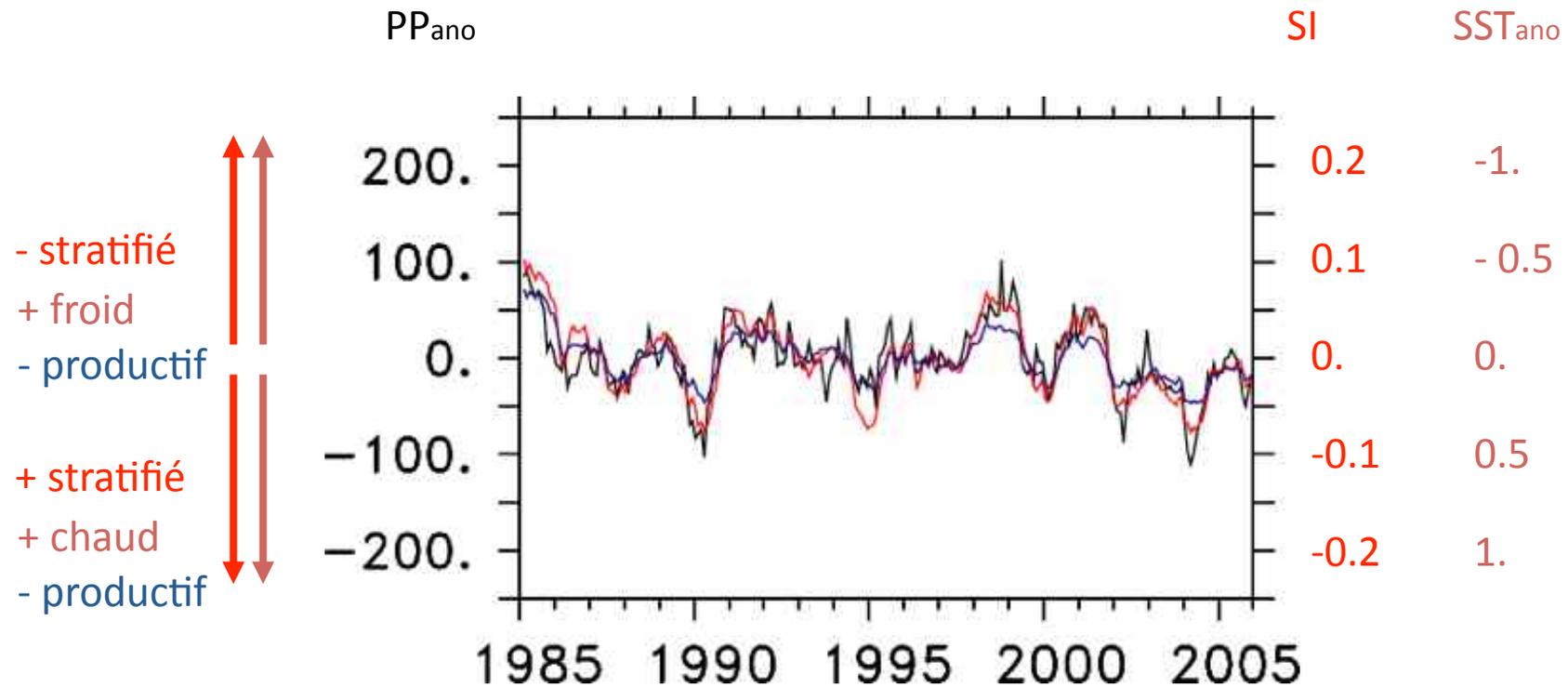
(Behrenfeld et al. 2006)

# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)



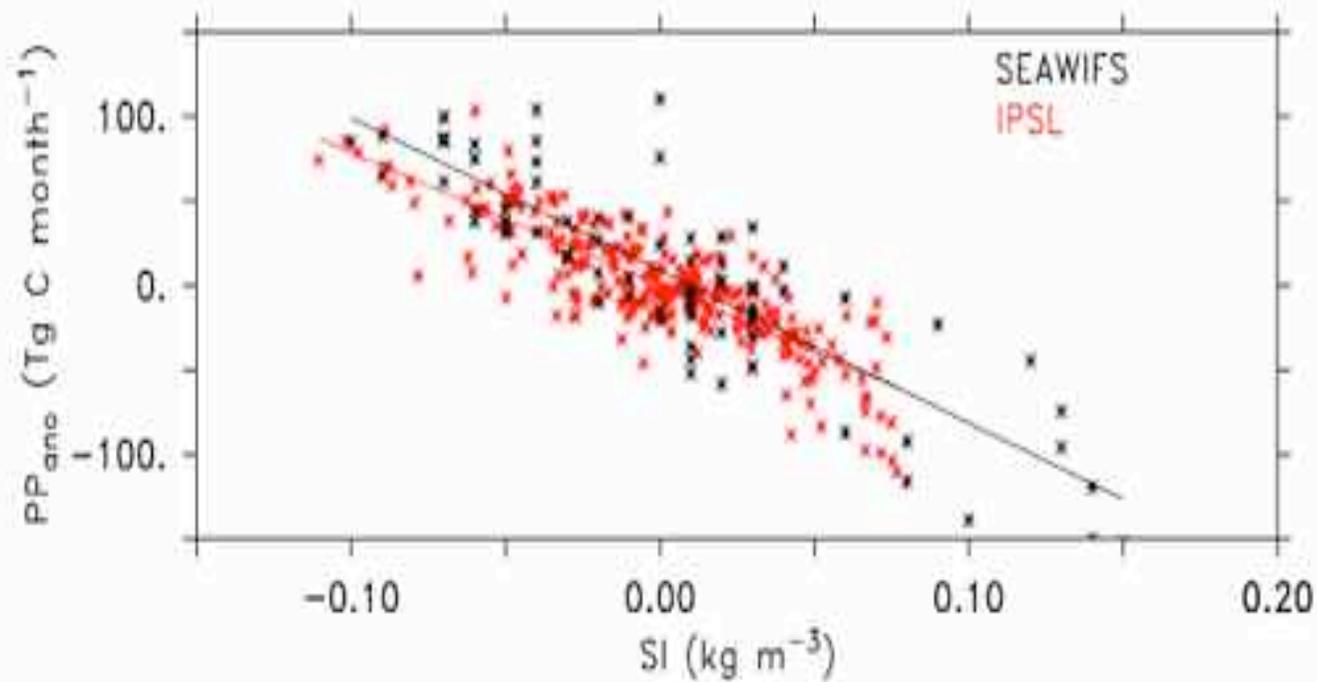
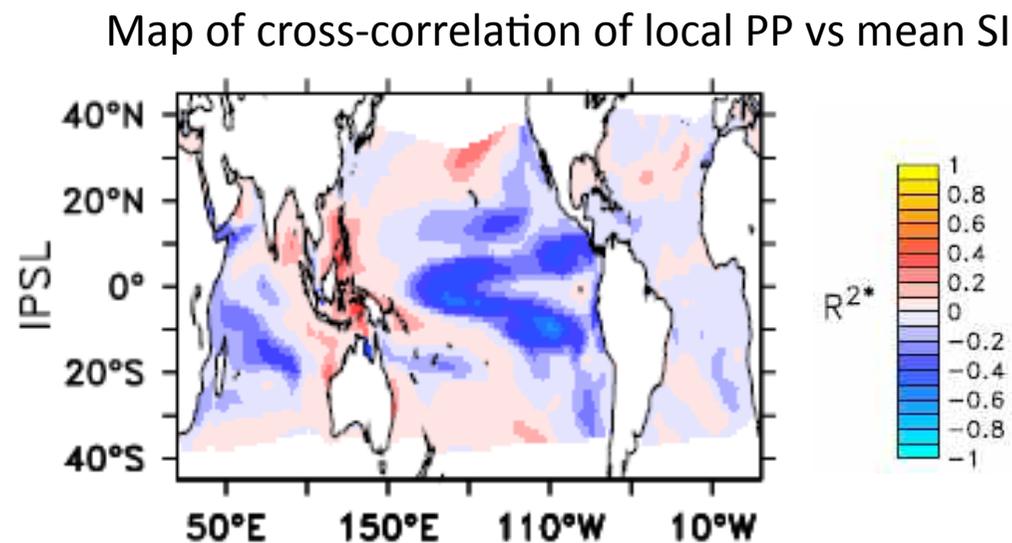
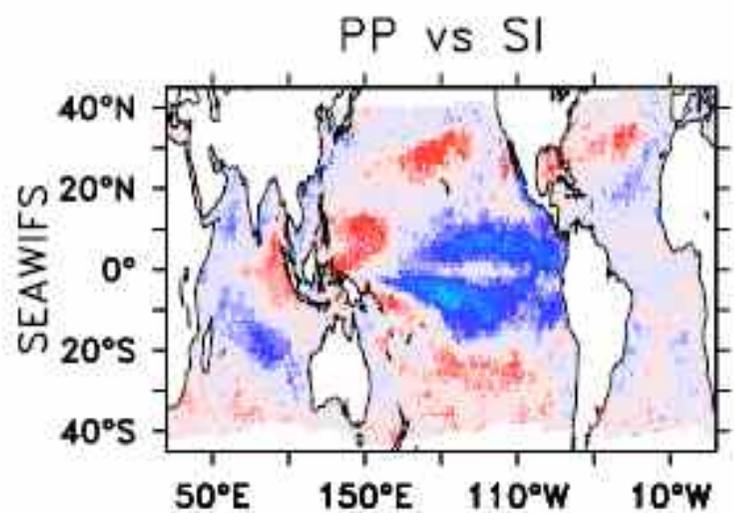
Données (Behrenfeld et al. 2006):

# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)



Modèle : IPSL - PISCES

# Comment évaluer ces modèles : le modèle PISCES (Aumont and Bopp, 2006)

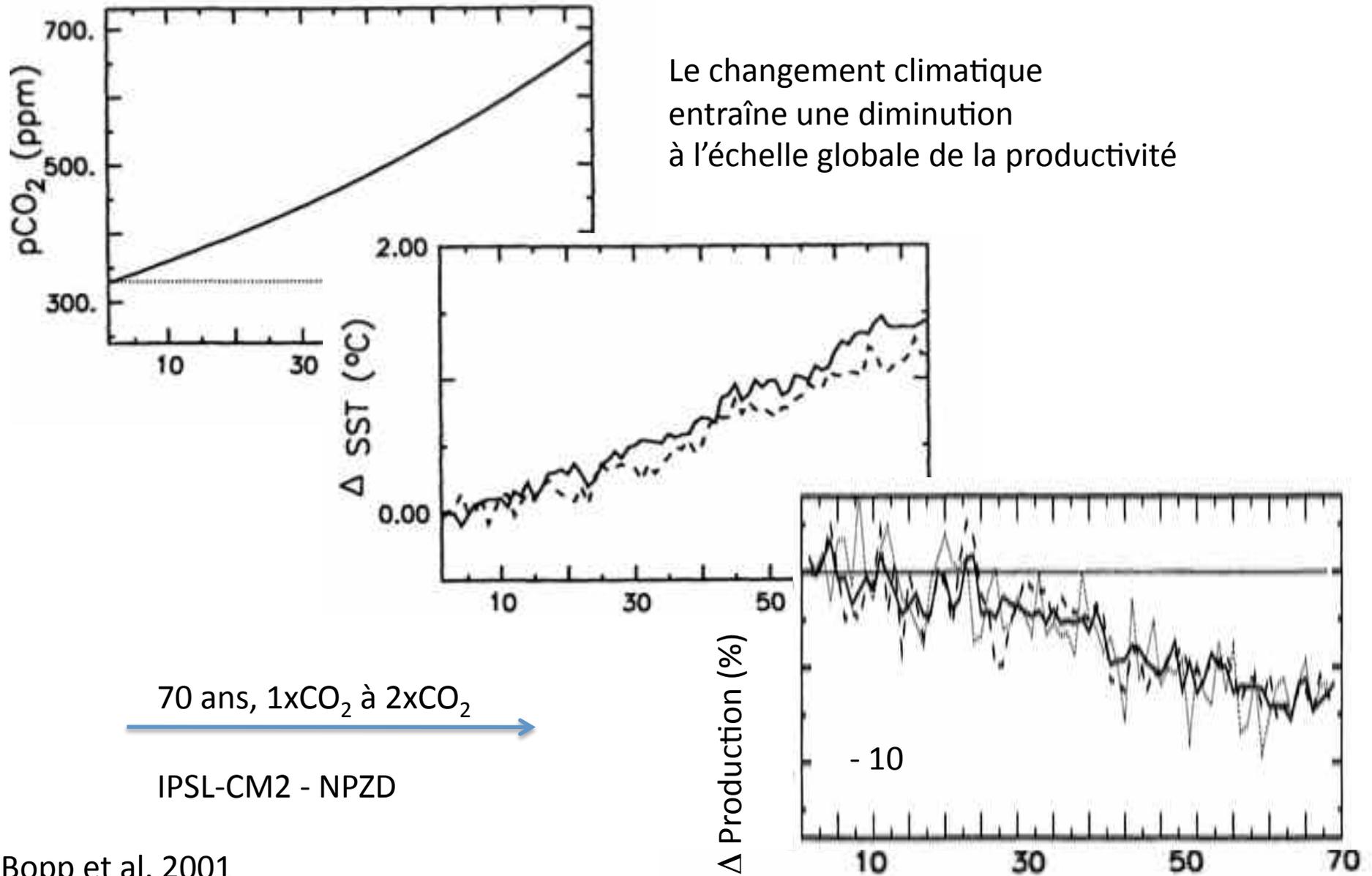




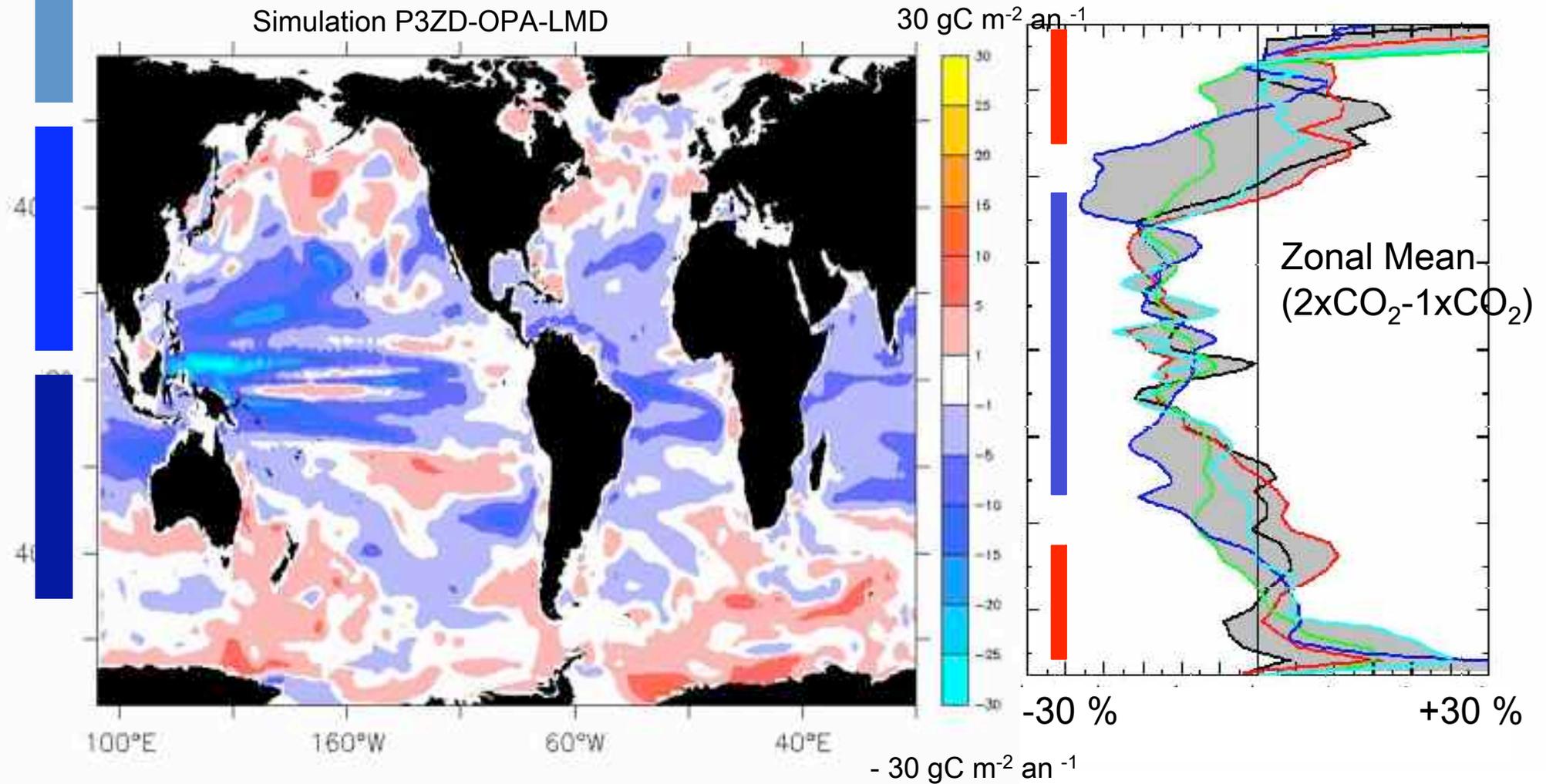
# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?

---

# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?



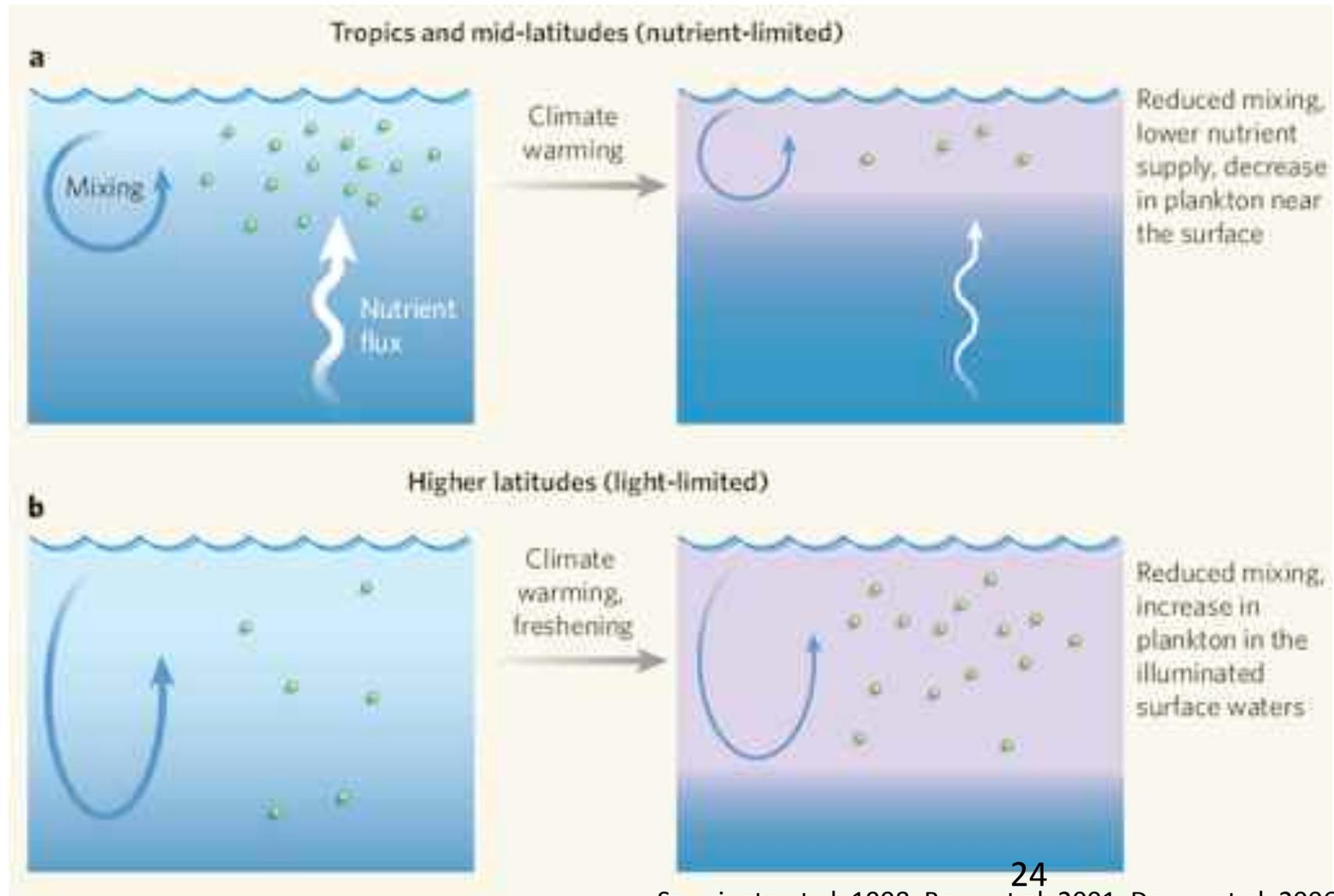
# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?



- Diminution à l'échelle globale (-5 / -10 %) mais augmentation aux hautes latitudes

# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?

## Les mécanismes...



# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?

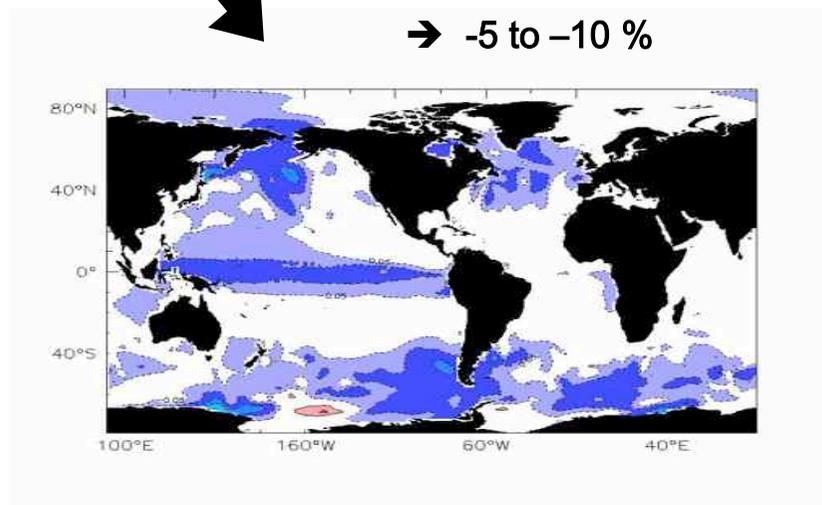
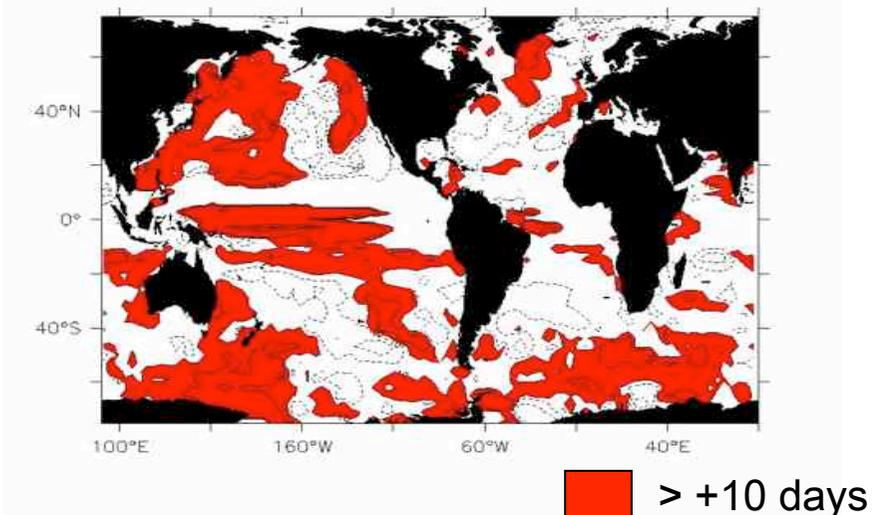
La stratification de l'océan augmente

(P3ZD-OPA-LMD)

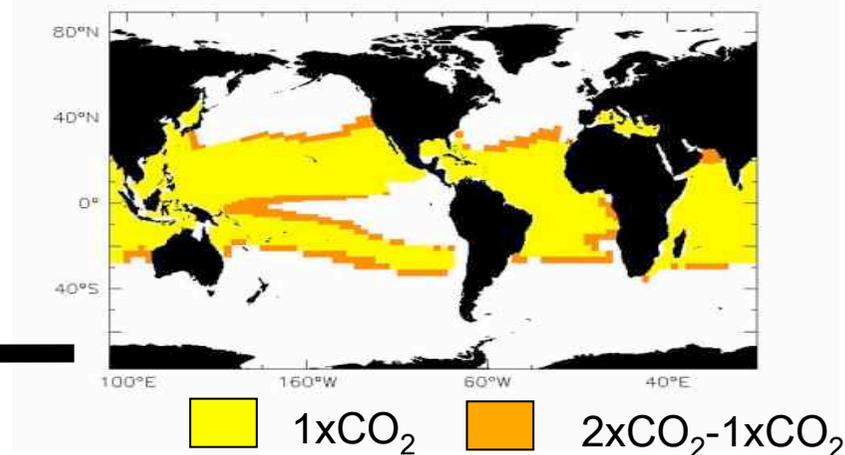
Elements nutritifs

→ -5 to -10 %

La saison de croissance augmente



Augmentation de la surface des gyres



Opposition hautes / basses latitudes

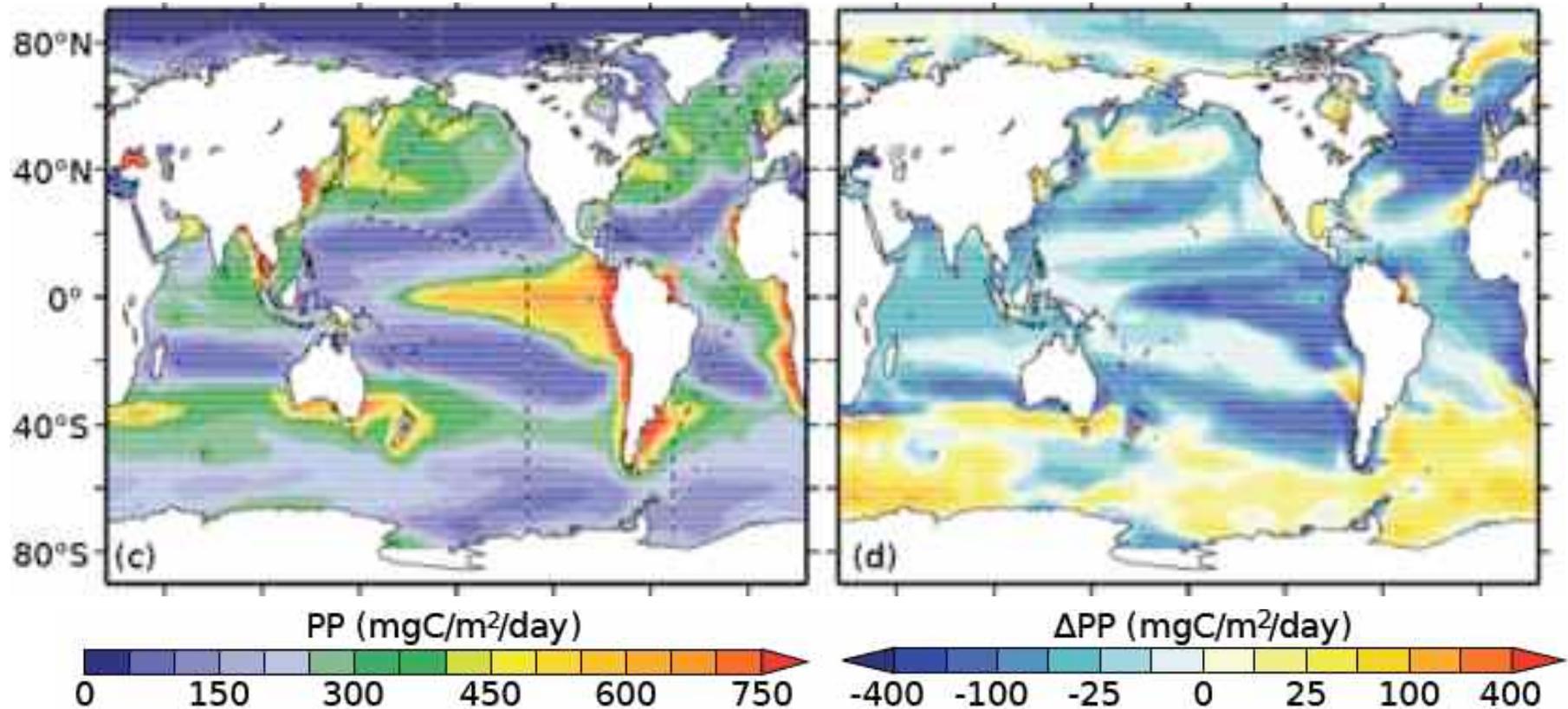
# Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?

## Réponse de la NPP en 2100 (Scénario A2)

IPSL-PISCES

NPP in 2000

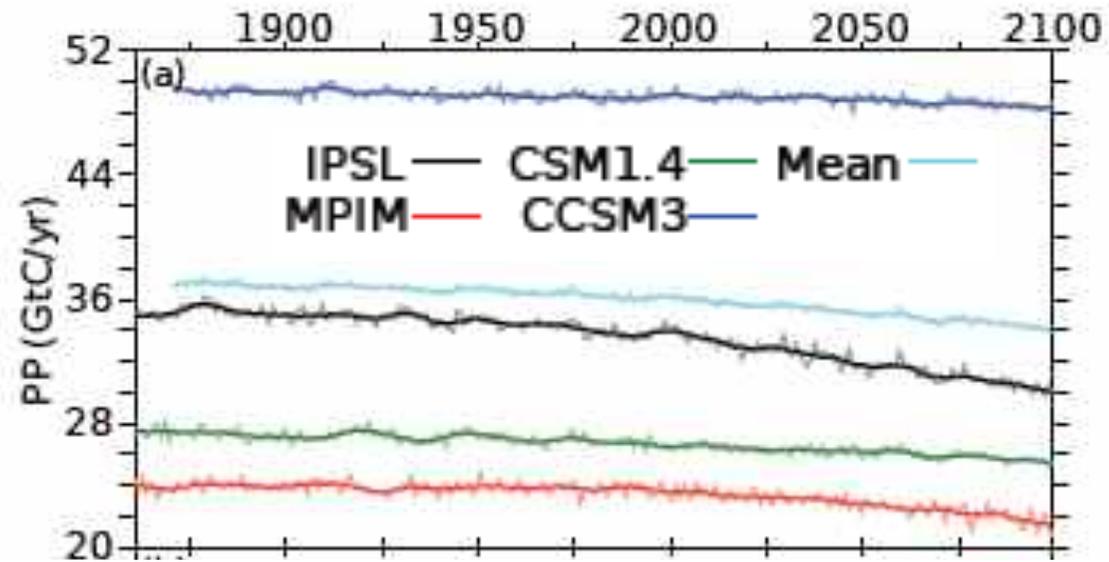
Changes in NPP in 2100  
(Scenario SRES-A2)



(Steinacher et al. 2010)

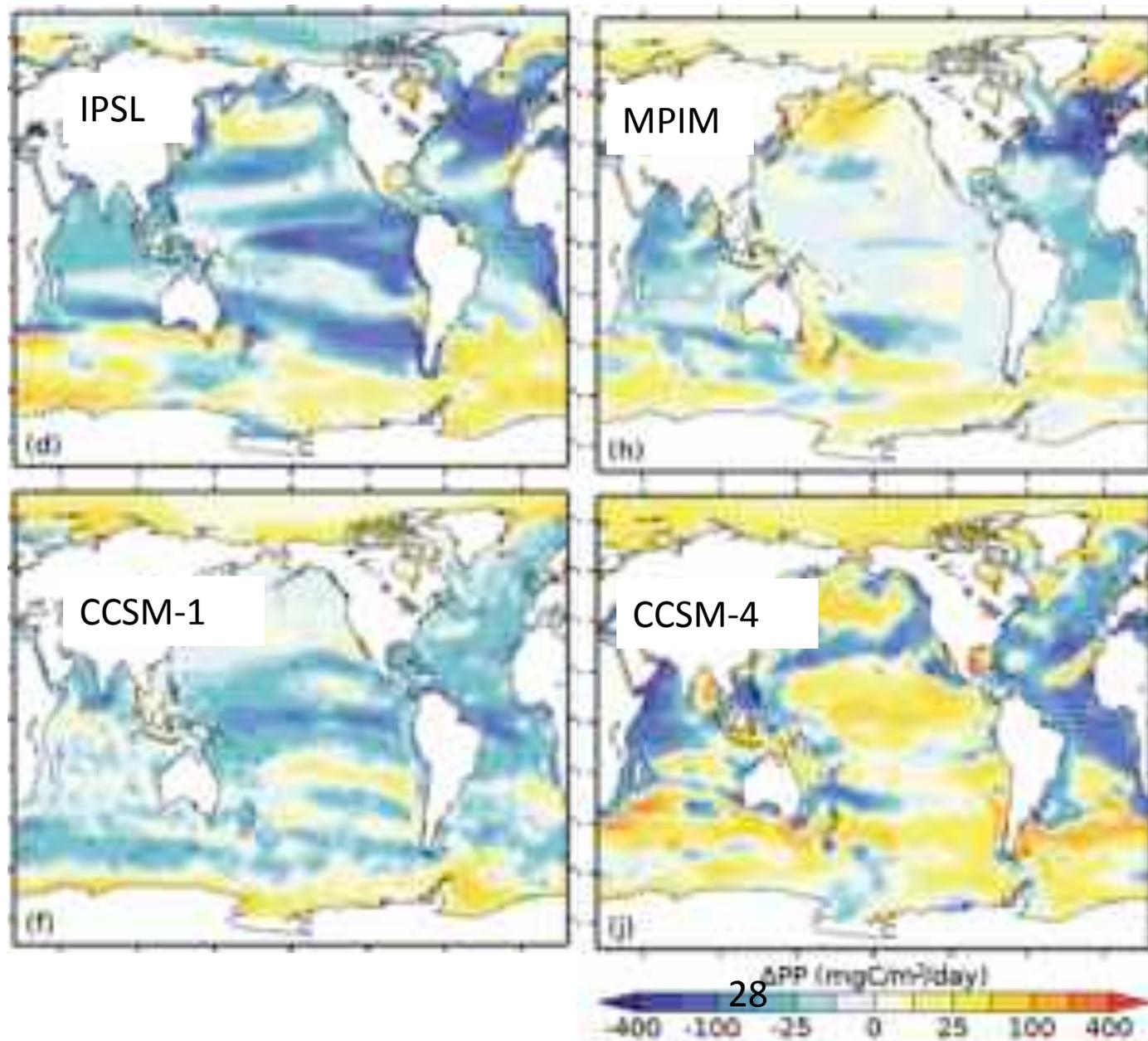
# Comparaison de modèles couplés climat-écosystèmes marins

Réponse de  
la NPP  
(Scénario A2)



# Comparaison de modèles couplés climat-écosystèmes marins

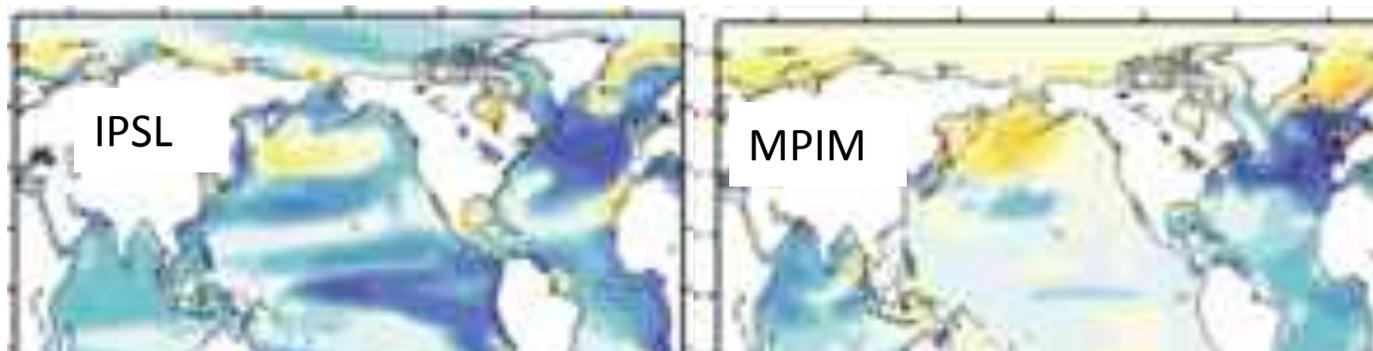
Réponse de  
la NPP en 2100  
(Scénario A2)



(Steinacher et al. 2010)

# Comparaison de modèles couplés climat-écosystèmes marins

## Réponse de la NPP en 2100 (Scénario A2)

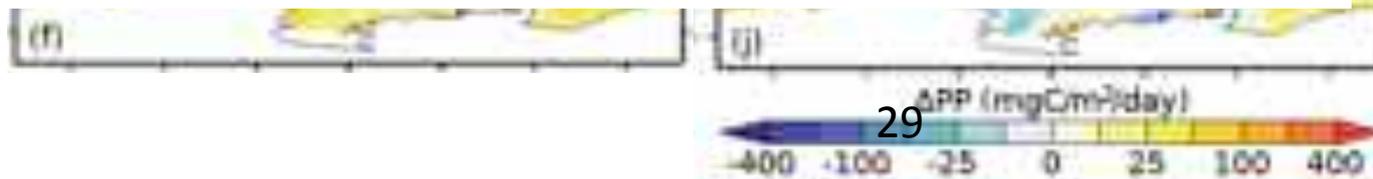


Tous les modèles (4) sont d'accord :

- PP diminue dans l'Atl. Nord
- PP diminue dans les tropiques
- PP augmente dans l'océan Austral

Les régions de désaccord :

- Arctique: 3 modèles : PP  $\searrow$ , sauf IPSL
- EqPac : 3 modèles : PP  $\searrow$ , sauf CCSM3

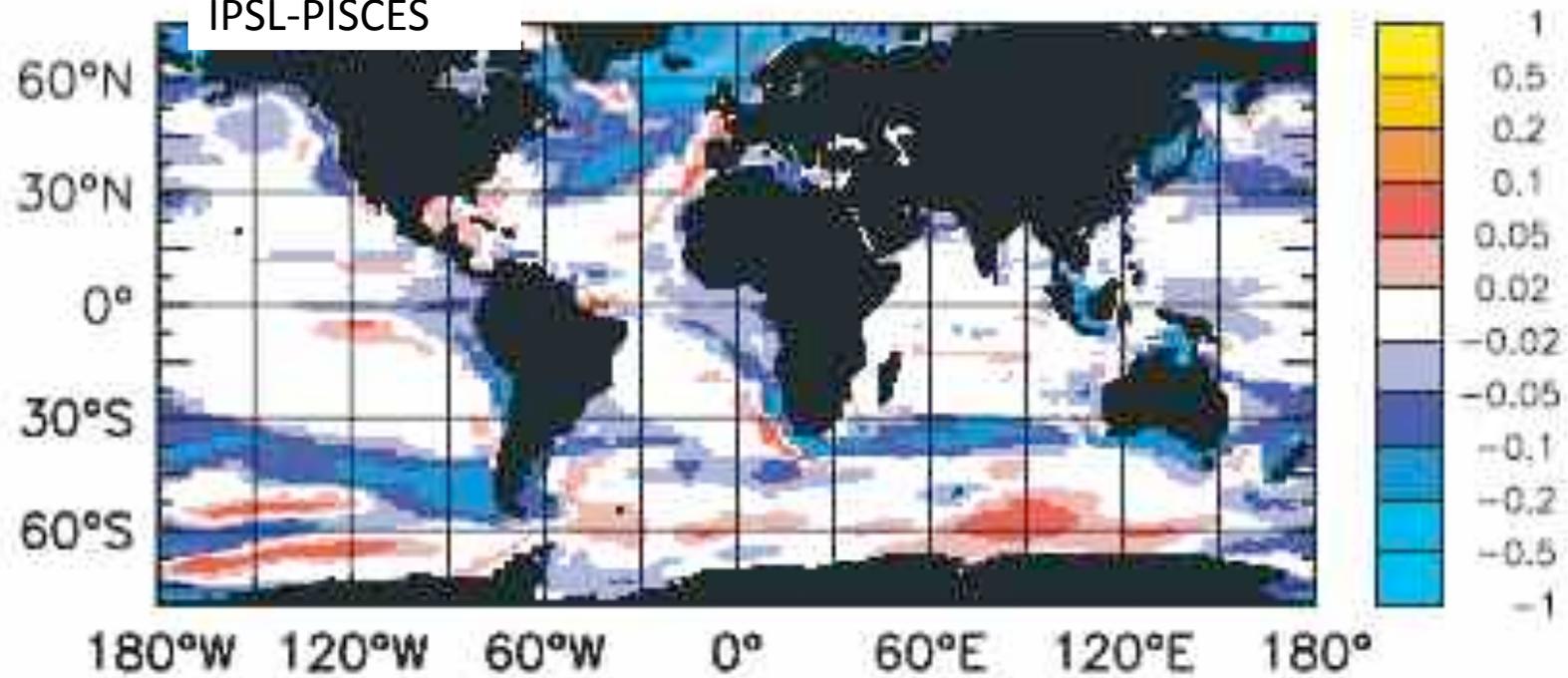


## Impact sur la structure de l'écosystème...

Modification de la taille du phytoplancton : diatomées → nano/pico phytoplancton

(4xCO<sub>2</sub> – 1xCO<sub>2</sub>)

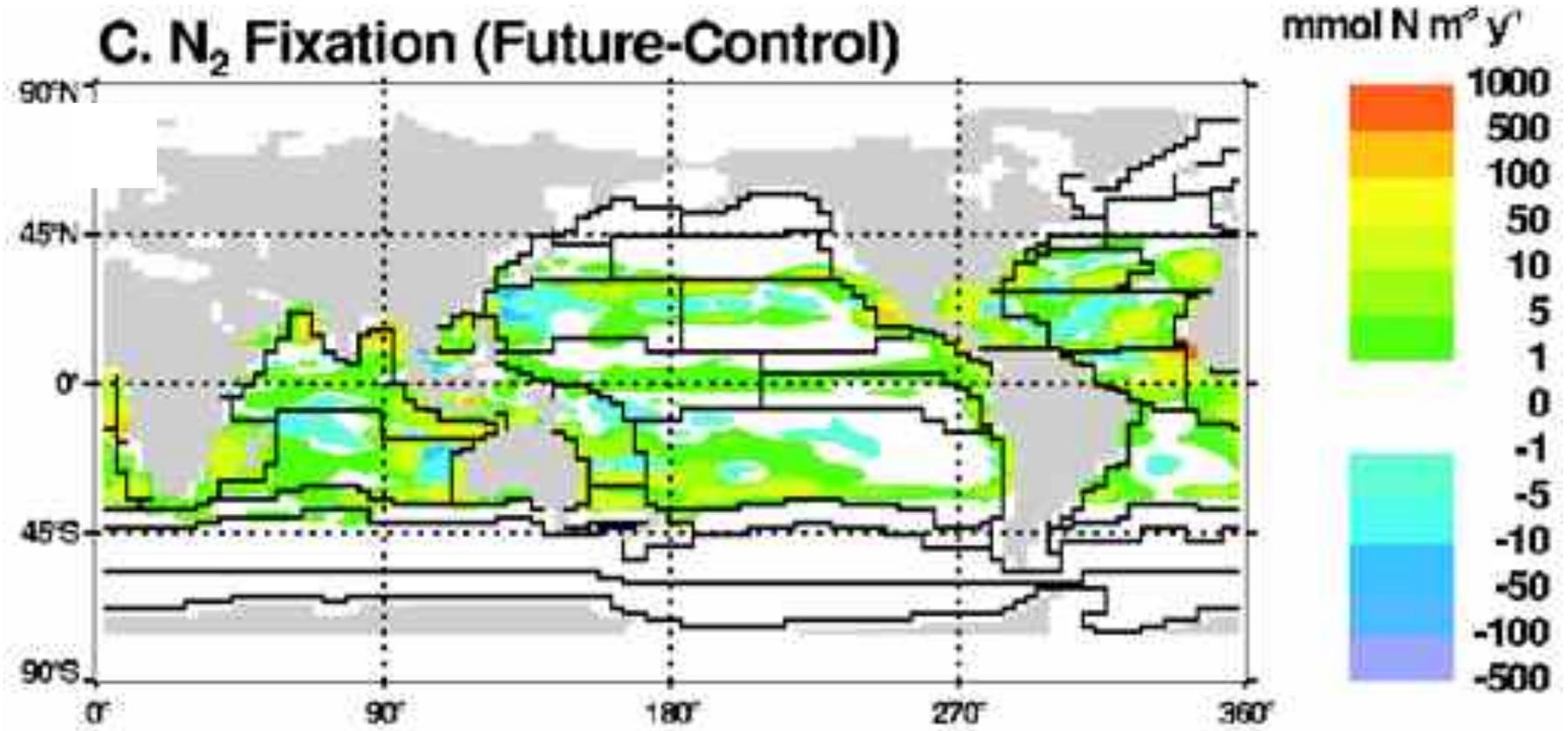
IPSL-PISCES



Changement de la proportion relative de diatomées

## Impact sur la structure de l'écosystème...

Modification de la fixation d'azote atmosphérique : Cyanobactéries



(Boyd and Doney, 2002)

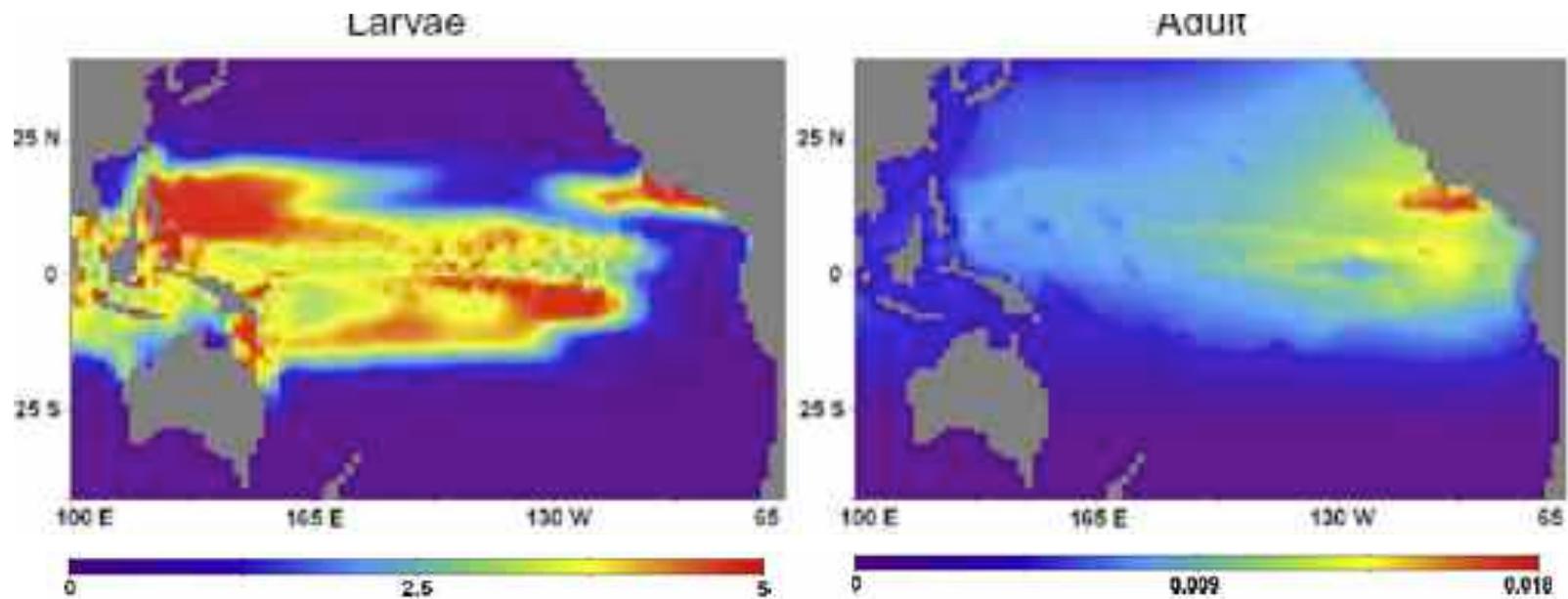
# Impact sur les niveaux trophiques supérieurs

Impact du changement climatique sur une espèce de thon tropicale

(Lehodey et al. 2010)

PISCES → SEAPODYM (Lehodey et al.)

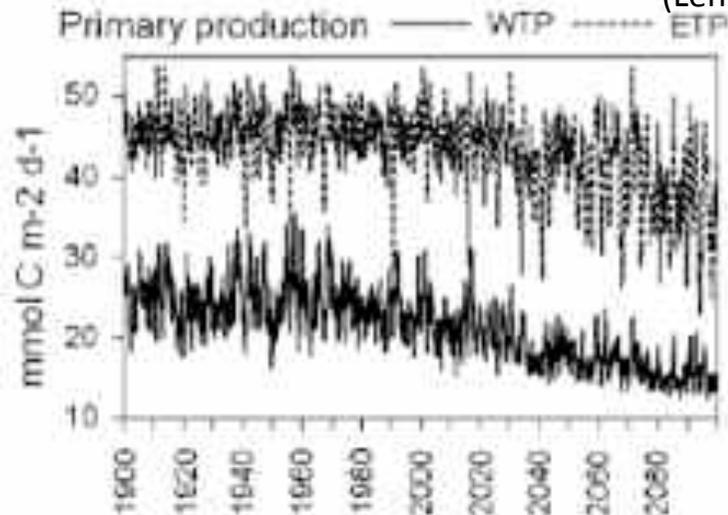
Bigeye Tuna



# Impact sur les niveaux trophiques supérieurs

## Impact du changement climatique sur une espèce de thon tropicale

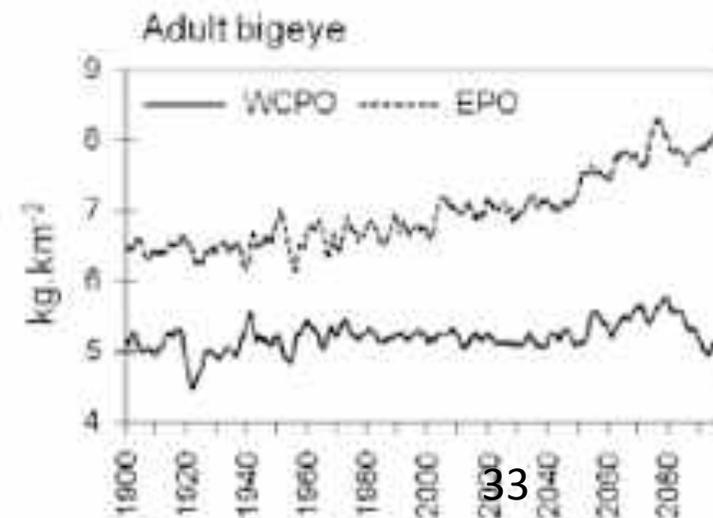
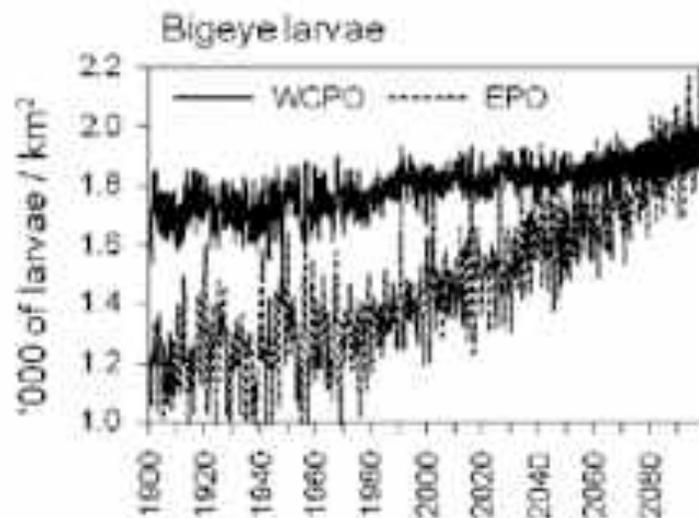
(Lehodey et al. 2010)



WTP: West Tropical Pacific  
ETP : East Tropical Pacific

Facteurs principaux :

- Température : habitat, ponte, mortalité, ...
- Oxygène : habitat
- Nourriture
- Pas de pêche...



## Impact du changement climatique sur la Productivité Marine ?

Les modèles simulent....

- Une réduction de la production primaire marine en réponse au changement climatique
- Opposition entre hautes latitudes (+ de production ) et basses latitudes (- de production)
- Mécanismes : + de limitation par les nutritifs / - de limitation par la lumière
- Changement de la structure de l'écosystème, en défaveur des diatomées (grosses cellules)
- Des modifications potentielles « transmises » aux plus hauts niveaux trophiques

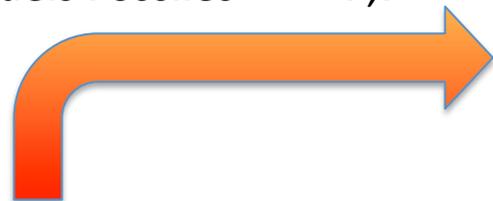


# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

---

# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

Fuels Fossiles 7,7



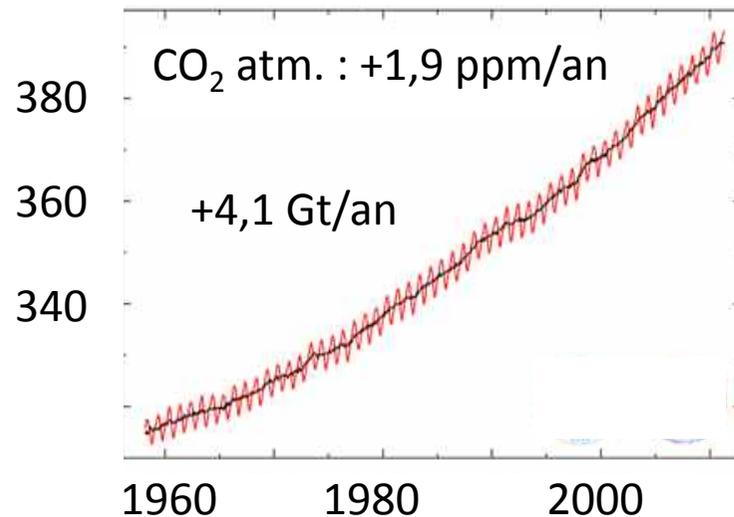
Déforestation 1,1



2,4



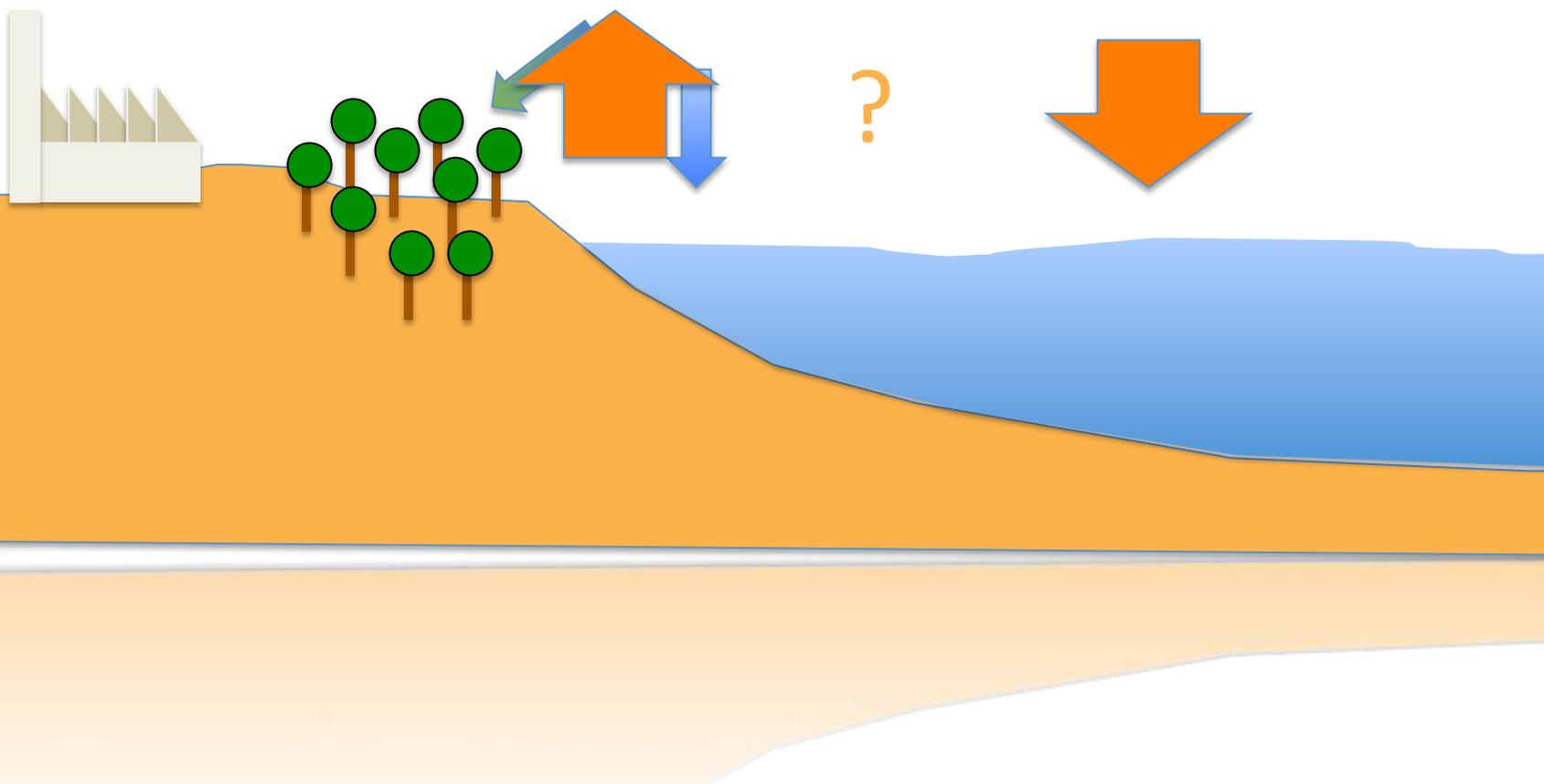
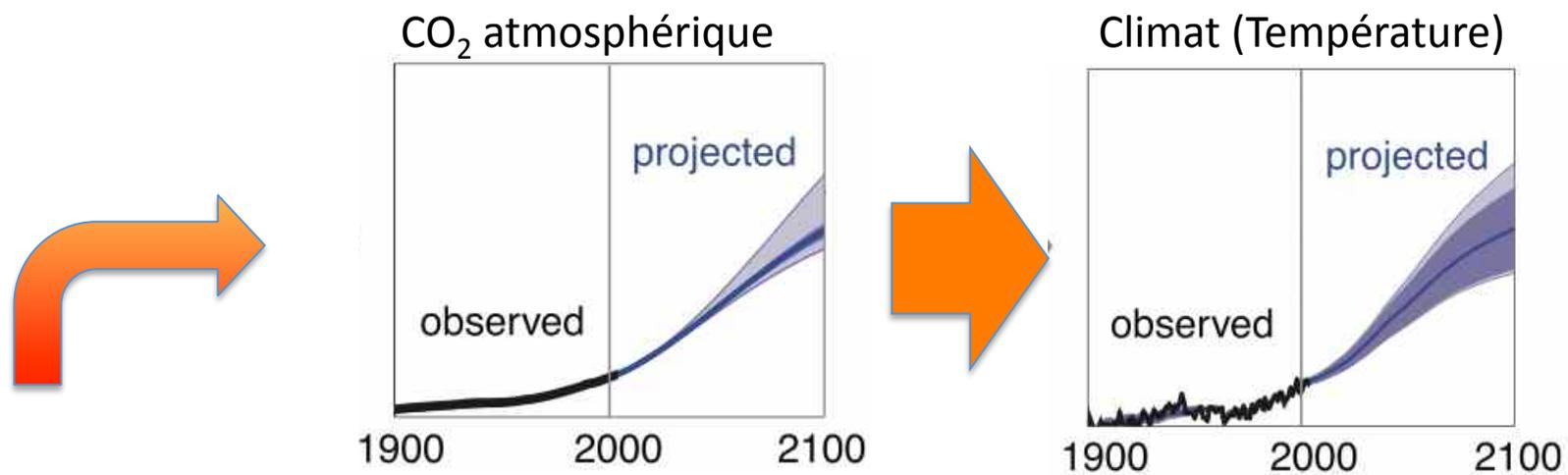
2,3



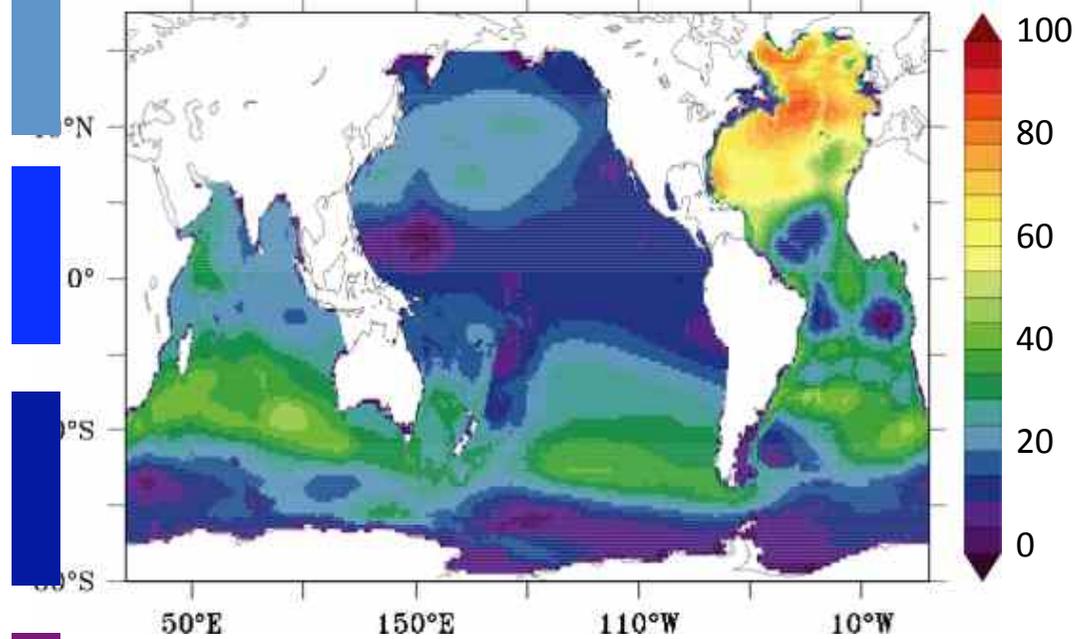
Flux de carbone en GtC/an – 2000-2009  
(Le Quéré et al. 2009)

Cycle du Carbone : 2000-2009

# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?



# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

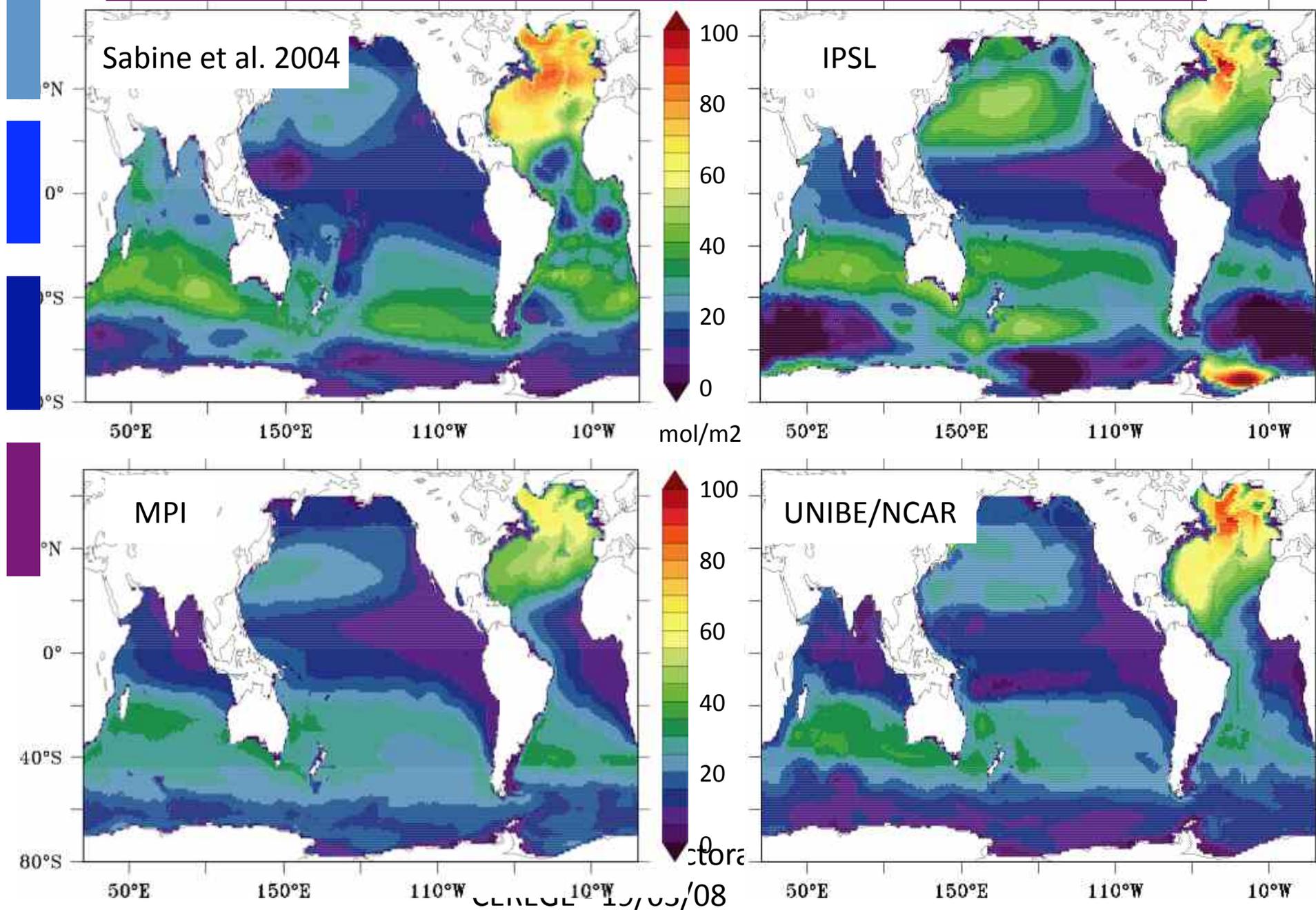


Sabine et al. 2004

Inventaire de  
Carbone Anthropique en 1994

Evaluation des flux de carbone anthropique

# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?



# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

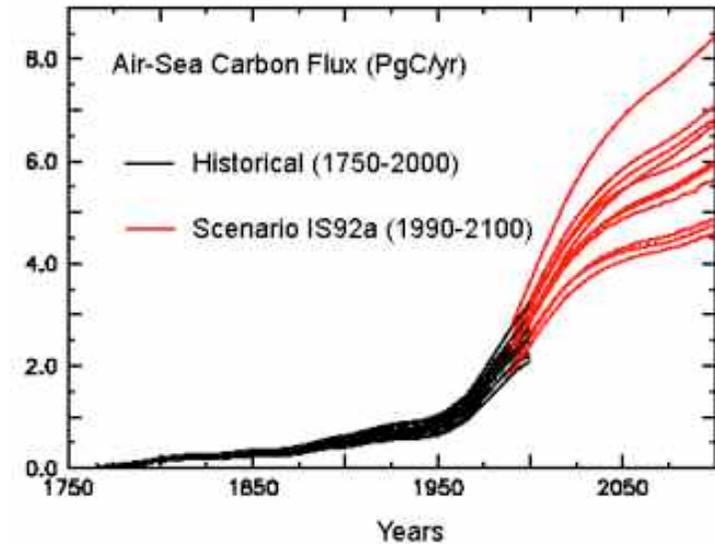
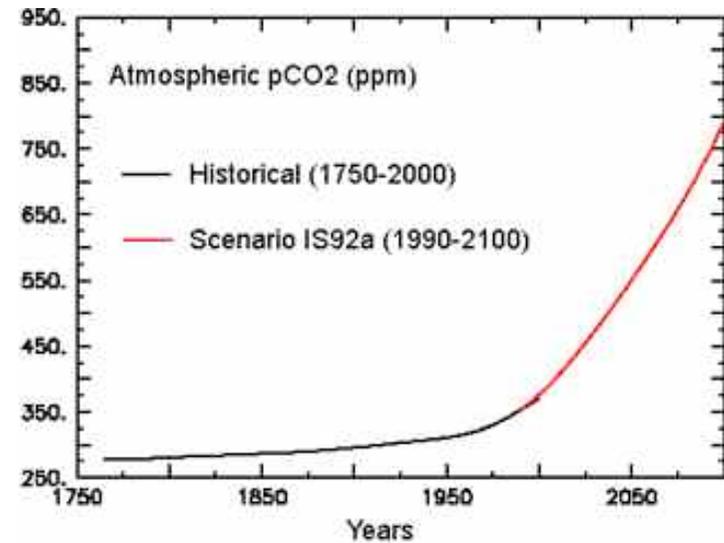
## Réponse du puits océanique au changement climatique

- Saturation du puits à cause de la chimie des carbonates dans l'eau de mer



(Revelle et Suess, 1957)

(bien mis en évidence par les simulations OCMIP Orr et al. 2002)

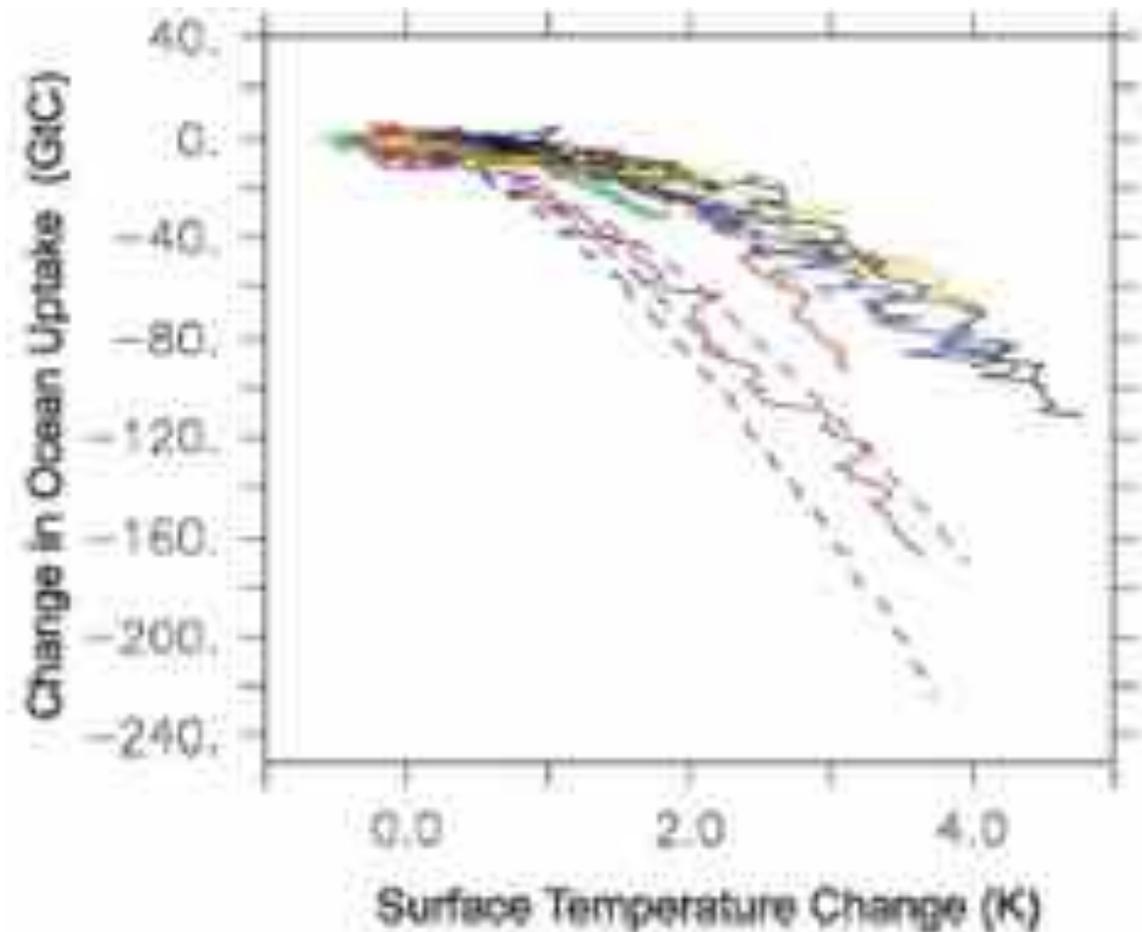


# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

---

## Réponse du puits océanique au changement climatique

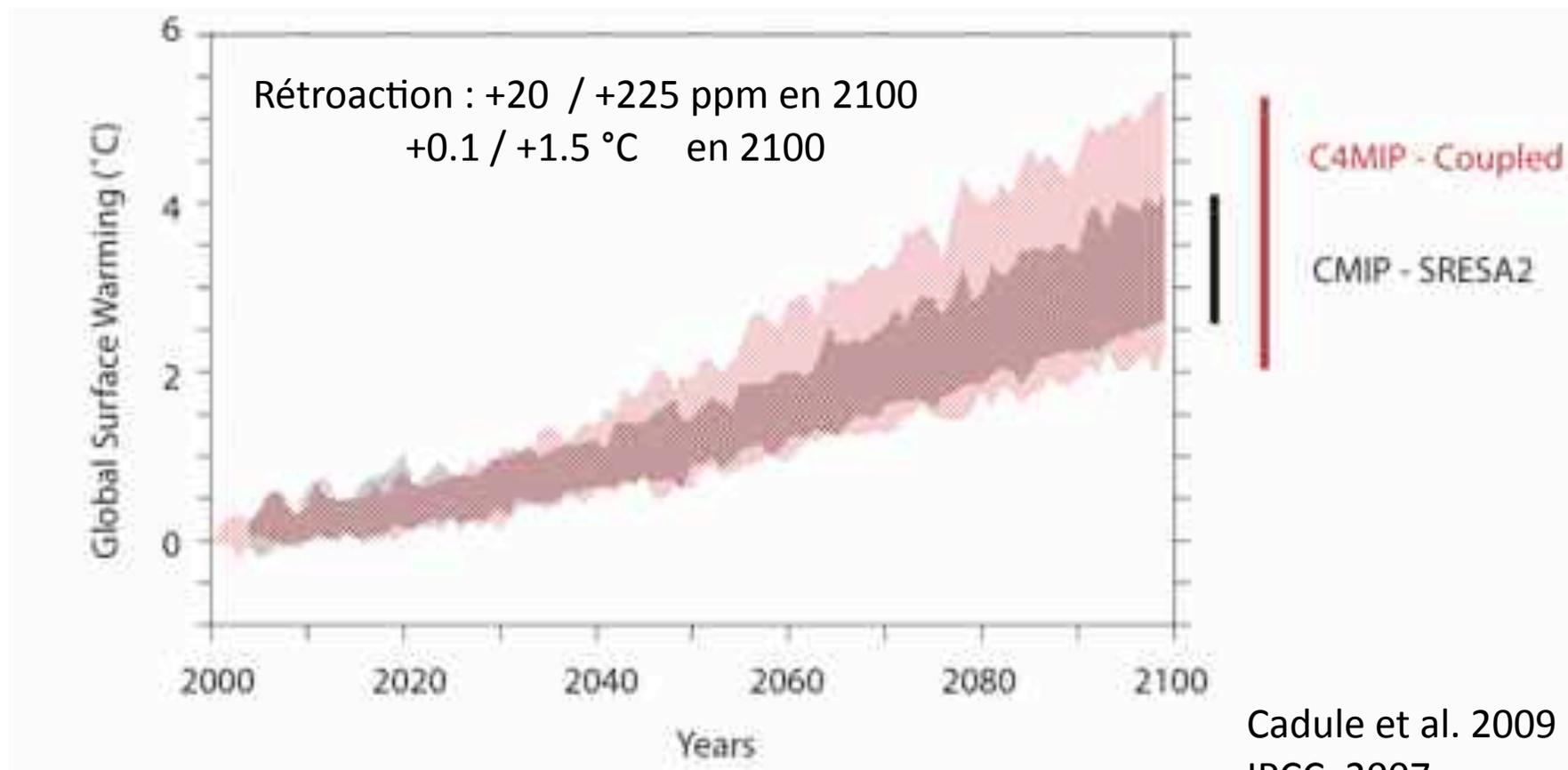
- Effet de du réchauffement sur la solubilité du gaz
- Effet de la stratification de l'océan sur la pénétration du carbone anthropique



Réduction du puits de carbone entre 6 et 25 % en 2100 !

## Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

- Le projet C4MIP : Coupled Carbon Cycle – Climate Models InterComparison
- > 10 groupes dans le monde – standard dans IPCC – AR5 (2013)



# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

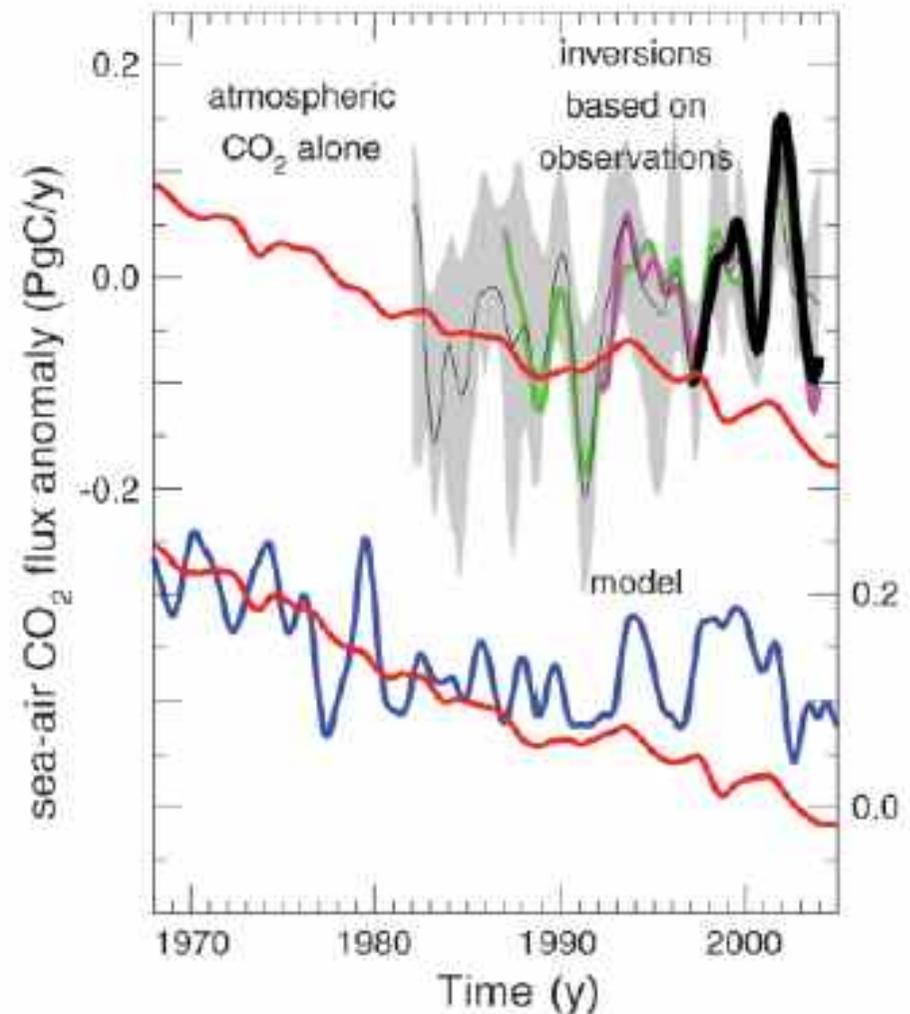
Des observations récentes montrent  
un ralentissement du puits océanique...  
plus rapide que « simulé » par les modèles couplés

Dans l'océan Austral :

(inversion atmosphériques,  
données océaniques, ...)

→ Rôle des vents

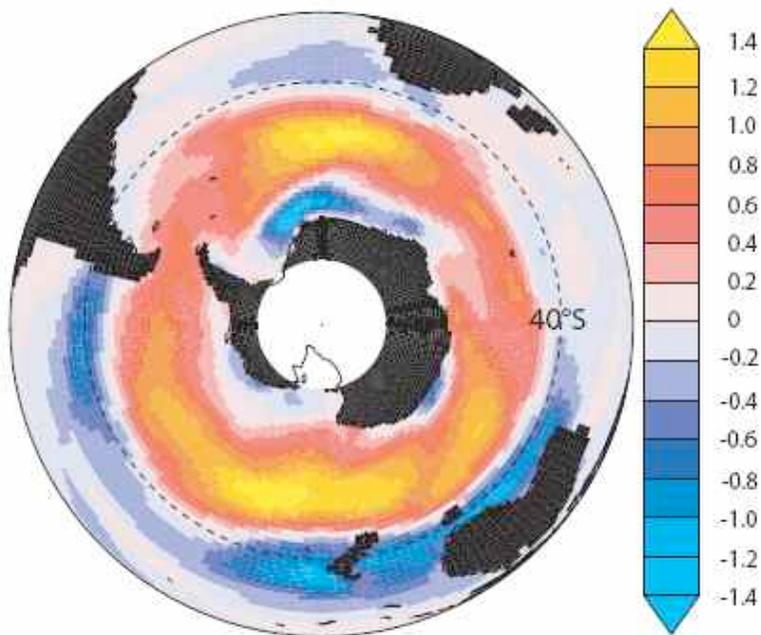
Le Quéré et al. , Science, 2007



# Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

## Un rôle pour l'ozone stratosphérique ?

IPSL Coupled model: Ensemble runs  
with/without stratospheric O<sub>3</sub> depletion over 1975-2004

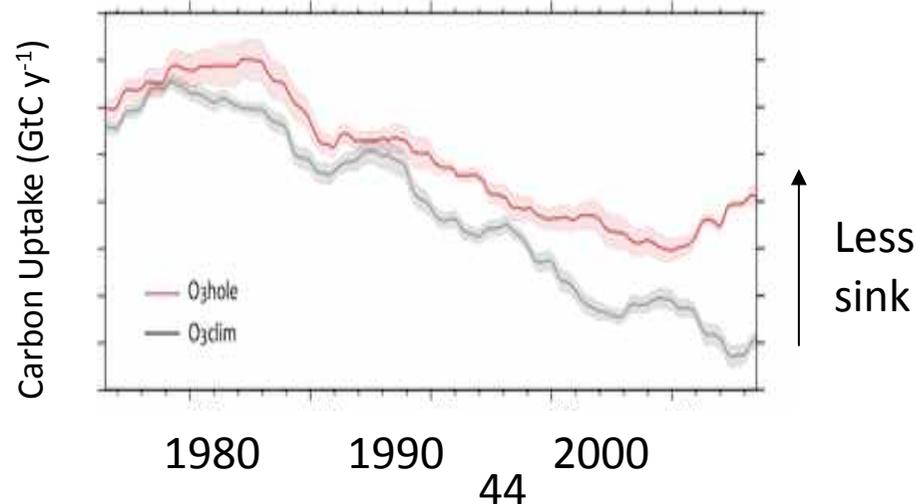


Lenton et al. 2010

$\Delta T_{aux}$   
(Pa x 100)

Trou d'ozone

- vents d'W plus forts
- - d'absorption de carbone



## Changement climatique et flux air-mer de CO<sub>2</sub> ?

---

Les modèles simulent....

- Un puits de carbone toujours positif au cours du XXIème siècle
- Mais le changement climatique réduit l'efficacité de ce puits
- Mécanismes : diminution de la solubilité  
/ stratification de l'océan  
/ (biologie : rôle secondaire pour 2000-2100)
- Importante variabilité décennale / Rôle d'autres forçages (O<sub>3</sub>)



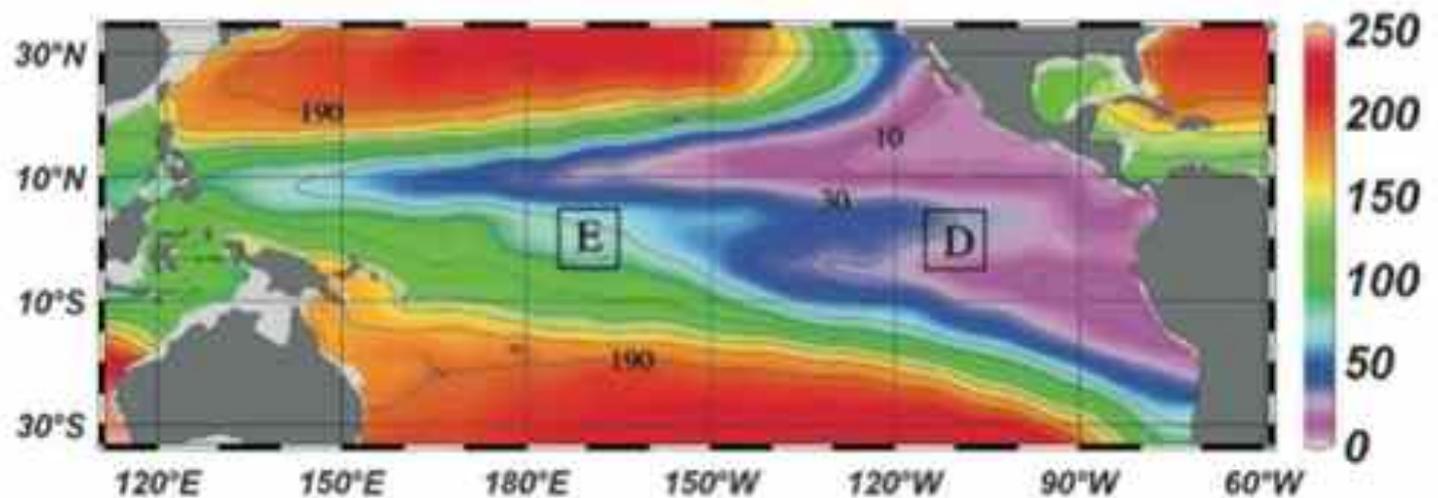
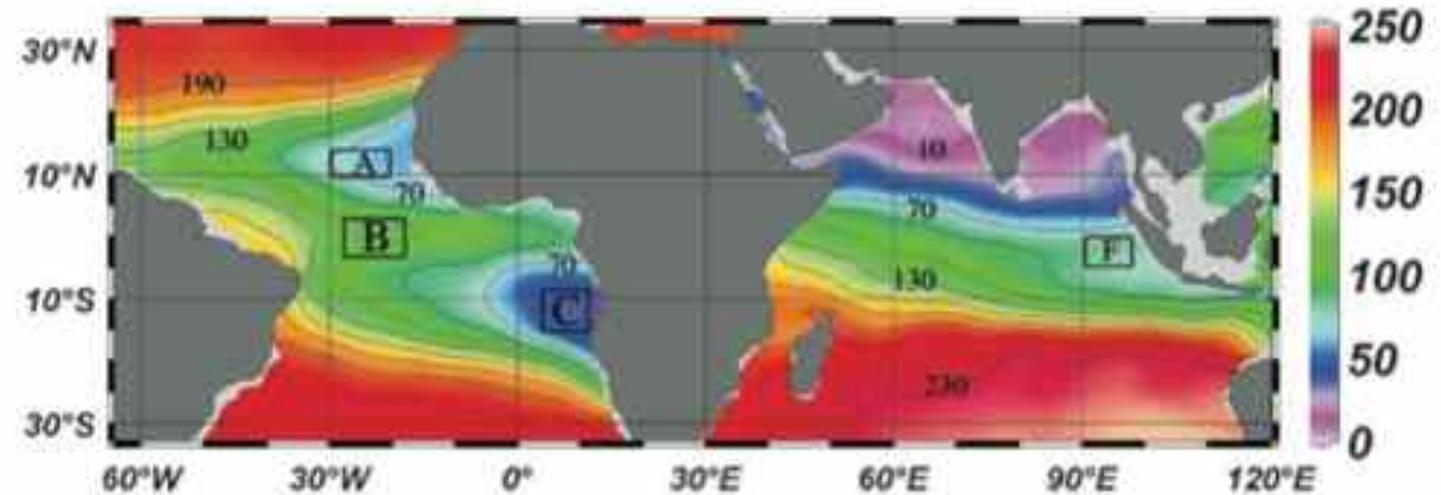
# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

---

# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

## Pourquoi l'oxygène ?

Concentration d'[O<sub>2</sub>] à 400m de profondeur (micromol/L)



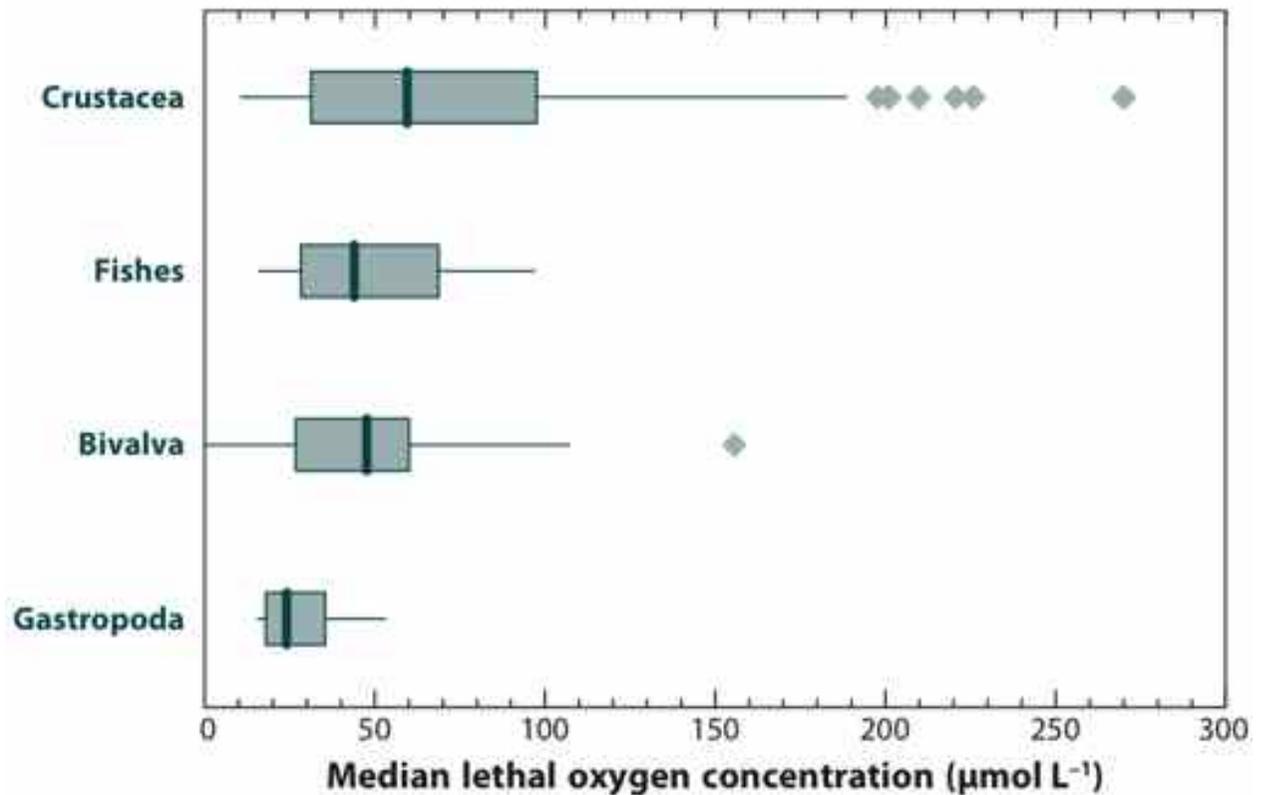
# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

Pourquoi l'oxygène ?

Zones à minimum d'oxygène (< 60 micromol/L : hypoxie)

→ Dénitrification, Production de N<sub>2</sub>O

→ Liées à des écosystèmes très particuliers

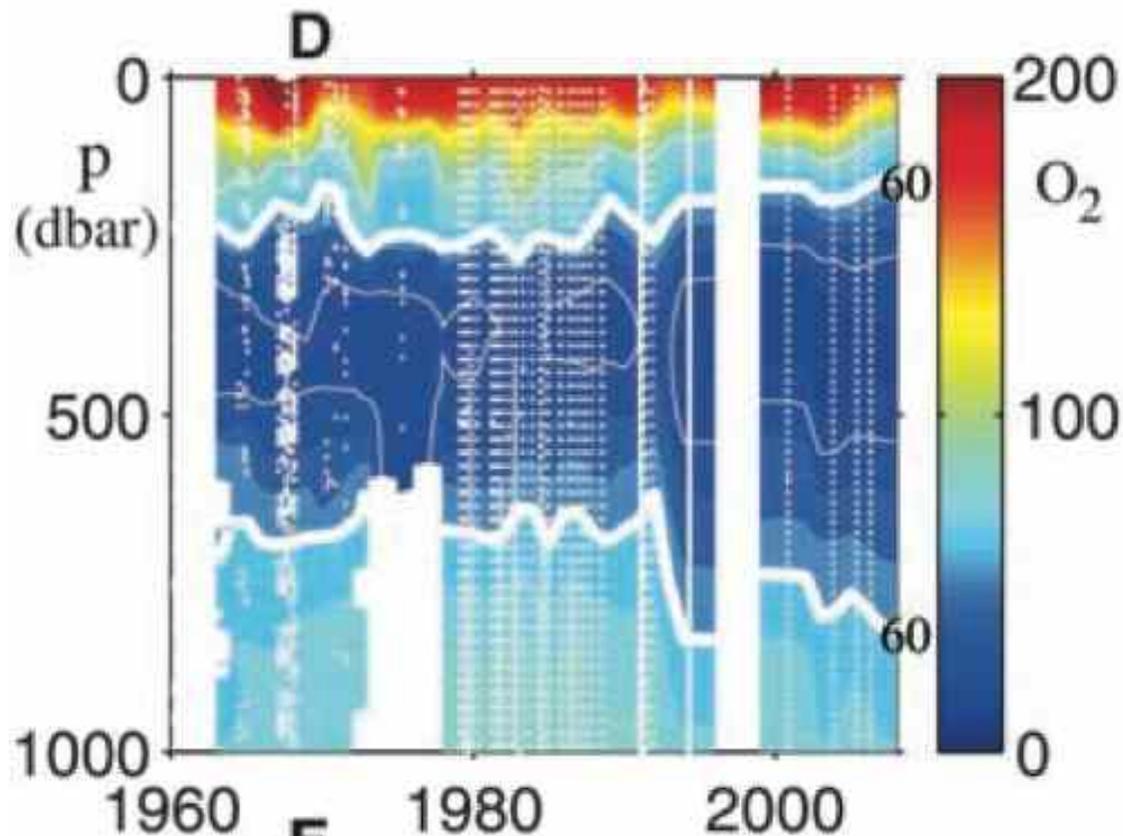


(Keeling et al. 2010)

# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

Pourquoi l'oxygène ?

Zones à minimum d'oxygène (< 60micromol/L : hypoxie)

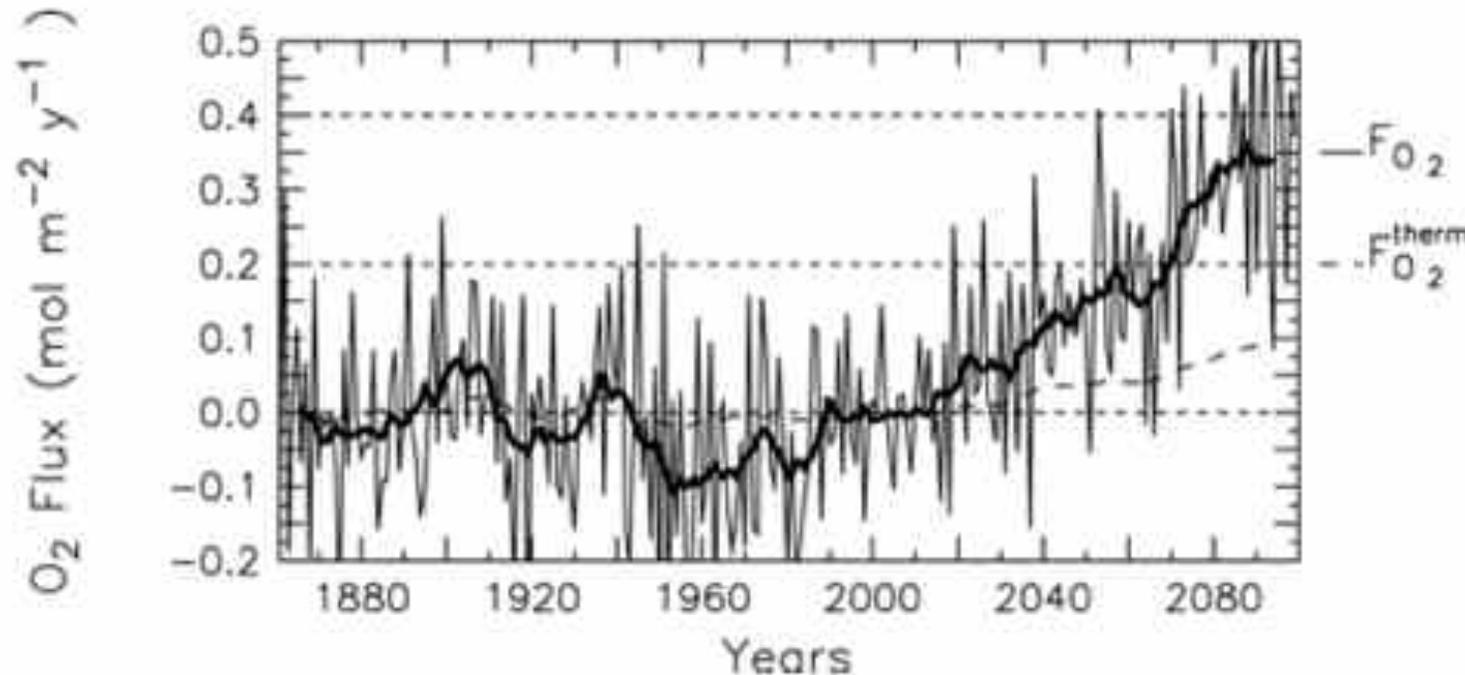


-> Expansion dans le Pacifique Est Equatorial

(Stramma et al; 2008)

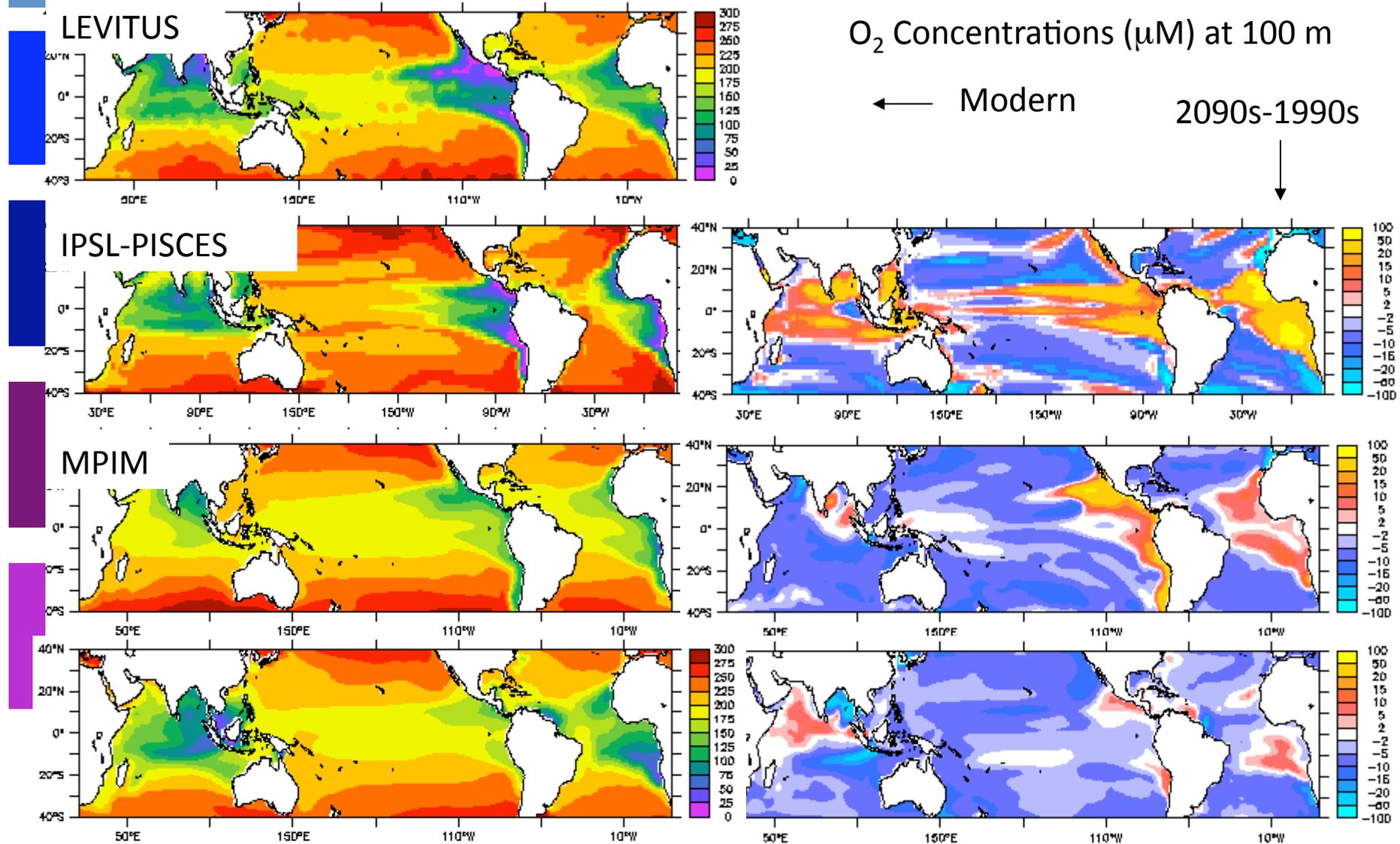
## Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

- Désoxygénation en réponse au changement climatique
  - : diminution de la solubilité
  - : changement de la circulation / stratification



→ En 2100, entre -1 et -7 % de l'oxygène de l'océan...

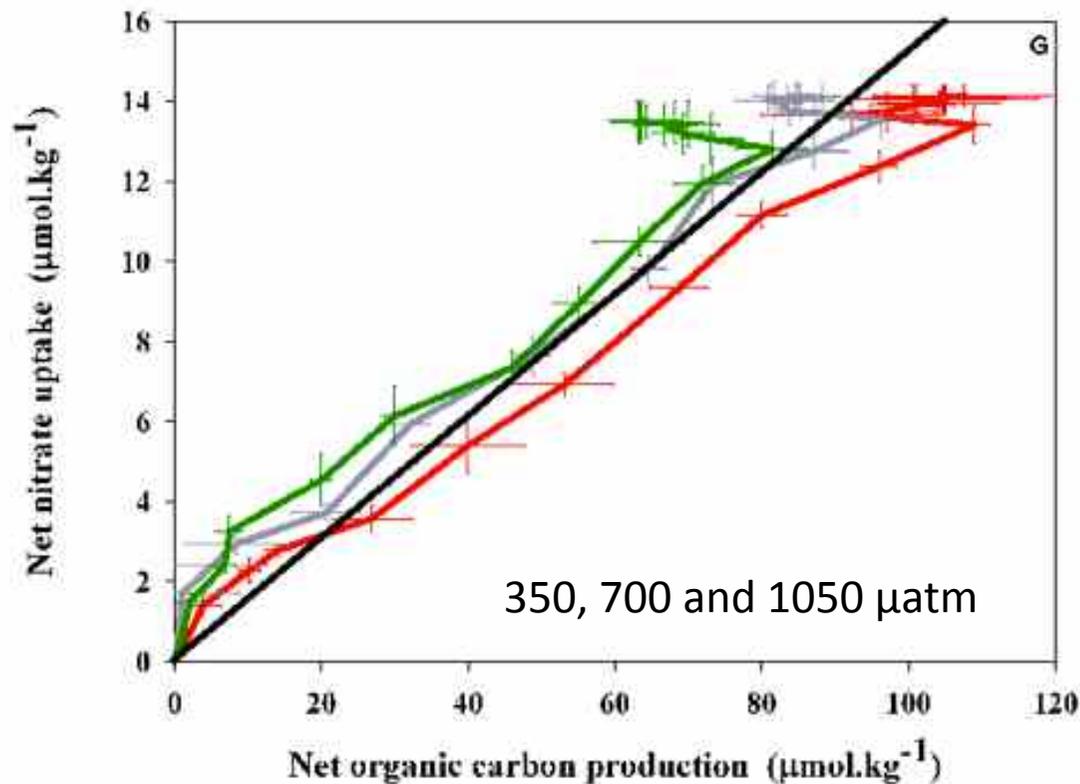
# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?



# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

→ Acidification, Rapports C/N de la matière organique et désoxygénation

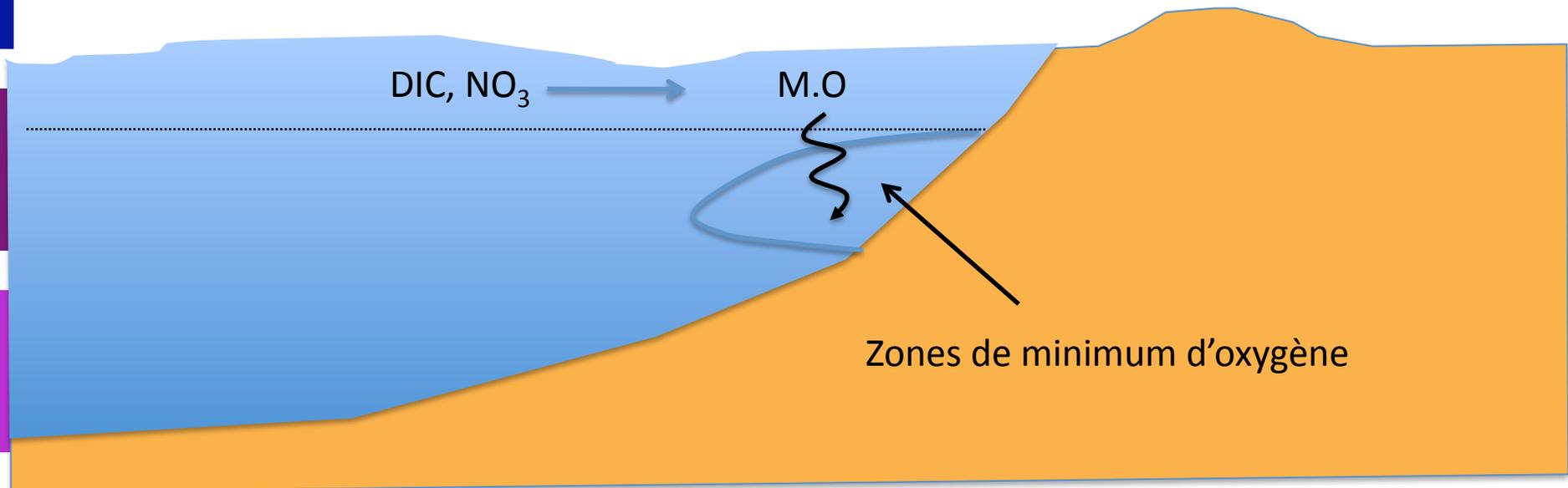
. Riebesell et al. (2009) : [CO<sub>2</sub>] augmente → C/N de la matière organique augmente



# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

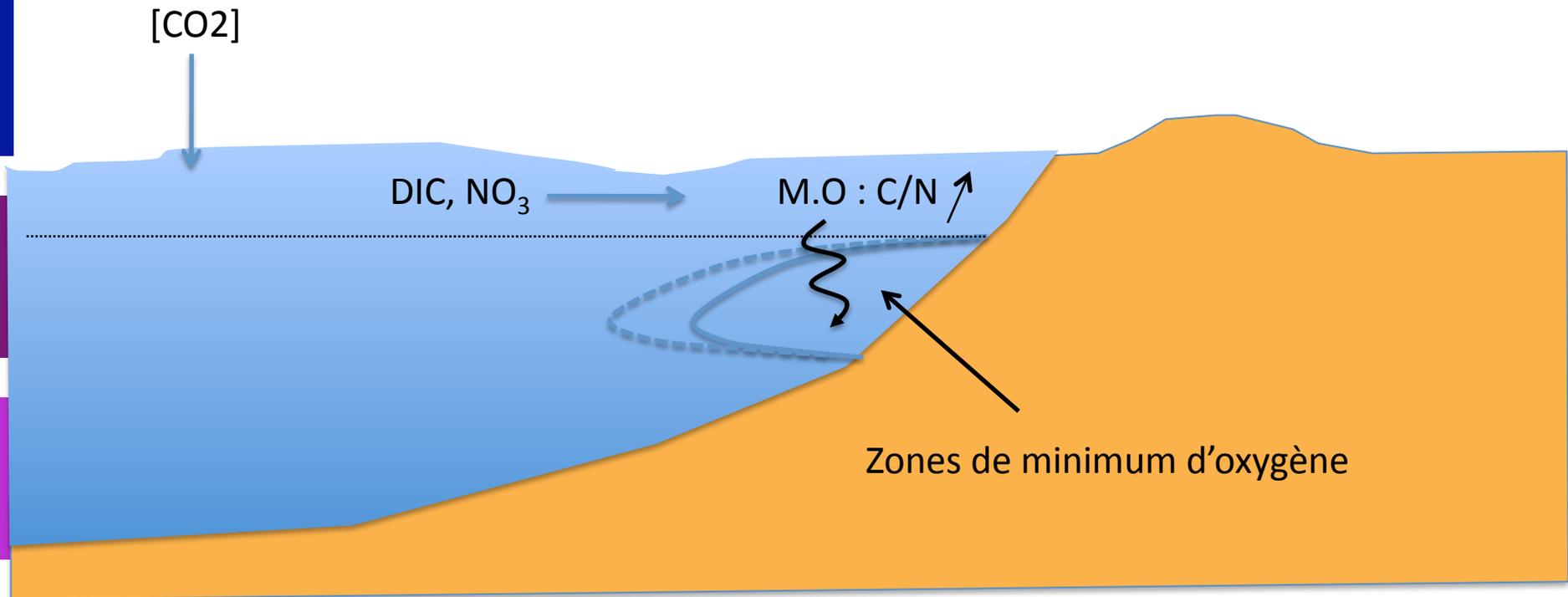
---

→ Acidification, Rapports C/N de la matière organique et désoxygénation



# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

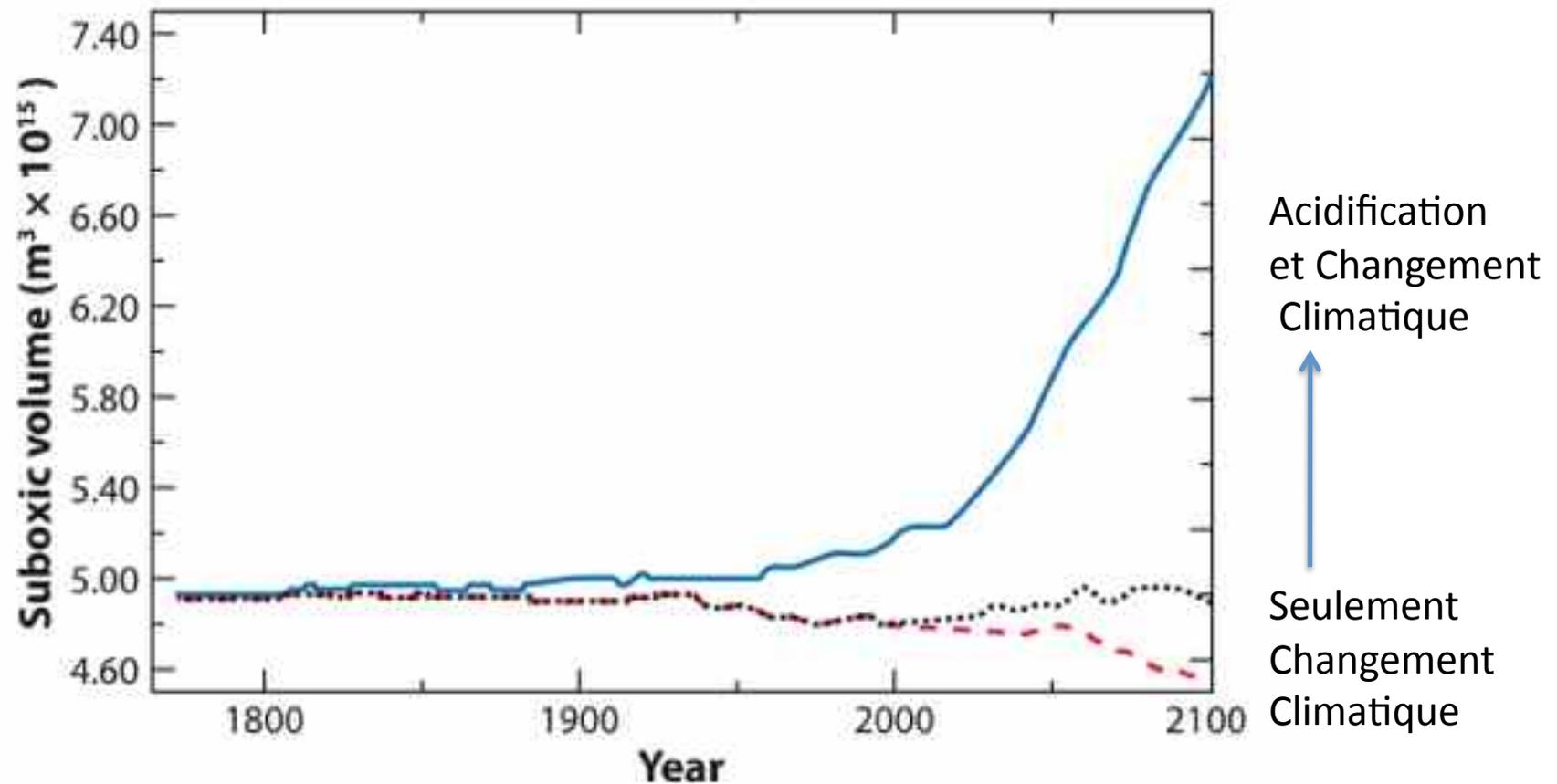
→ Acidification, Rapports C/N de la matière organique et désoxygénation



Oschlies et al. 2010, Tagliabue et al; 2011

# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

→ Acidification, Rapports C/N de la matière organique et désoxygénation



# Changement climatique, acidification et désoxygénation de l'océan ?

---

Les modèles simulent....

- Une désoxygénation de l'océan en réponse au changement climatique
- Cette réponse est principalement localisée aux hautes et moyennes latitudes
- Mécanismes : diminution de la solubilité / stratification de l'océan
- La réponse des zones à minimum d'oxygène plus incertaine...
- Rôle couplé entre changement climatique (T, circulation) et acidification



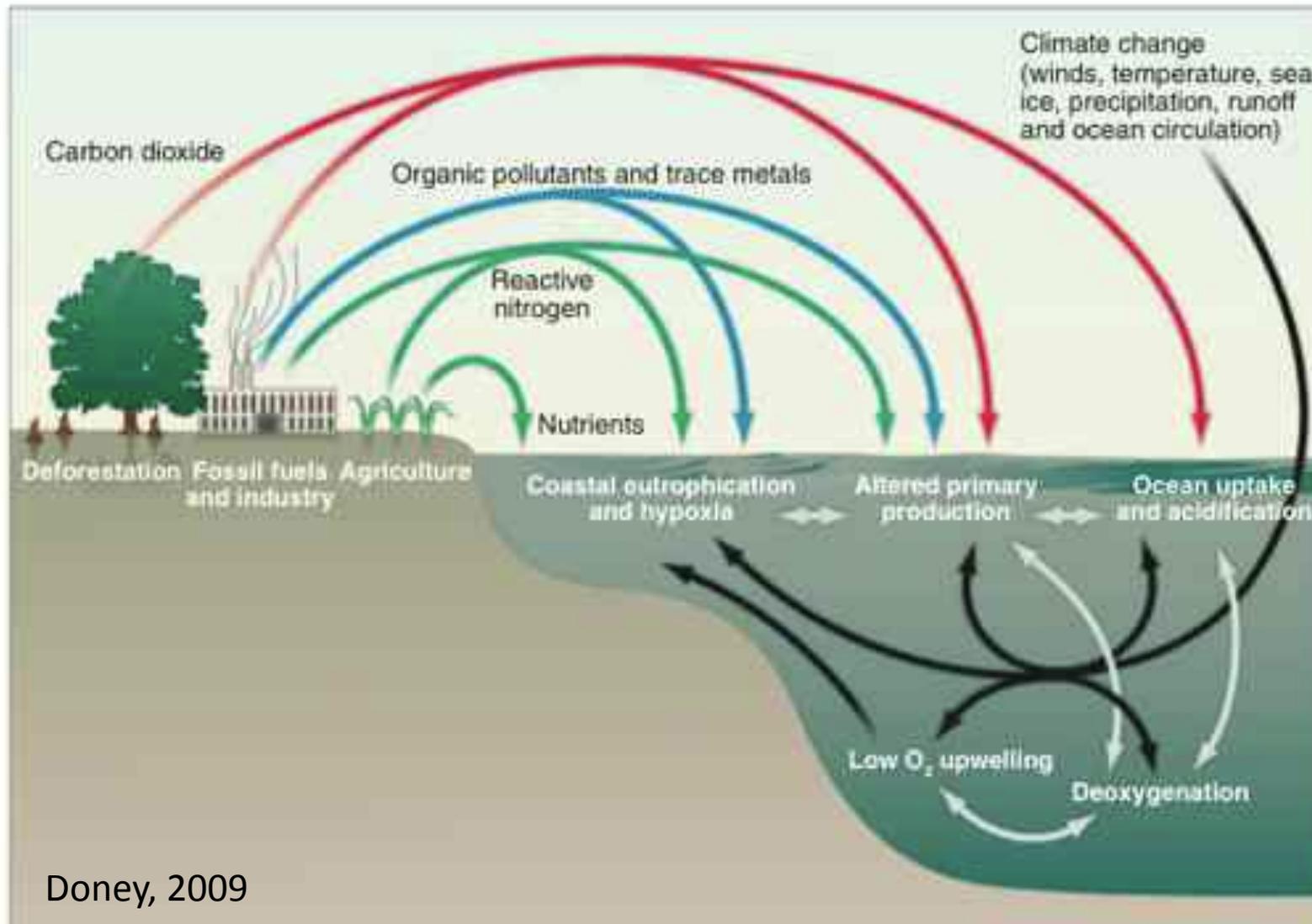
## Conclusions...

---

Changement Climatique, Acidification,... Mais pas seulement !

## Conclusions...

Changement Climatique, Acidification,... Mais pas seulement !

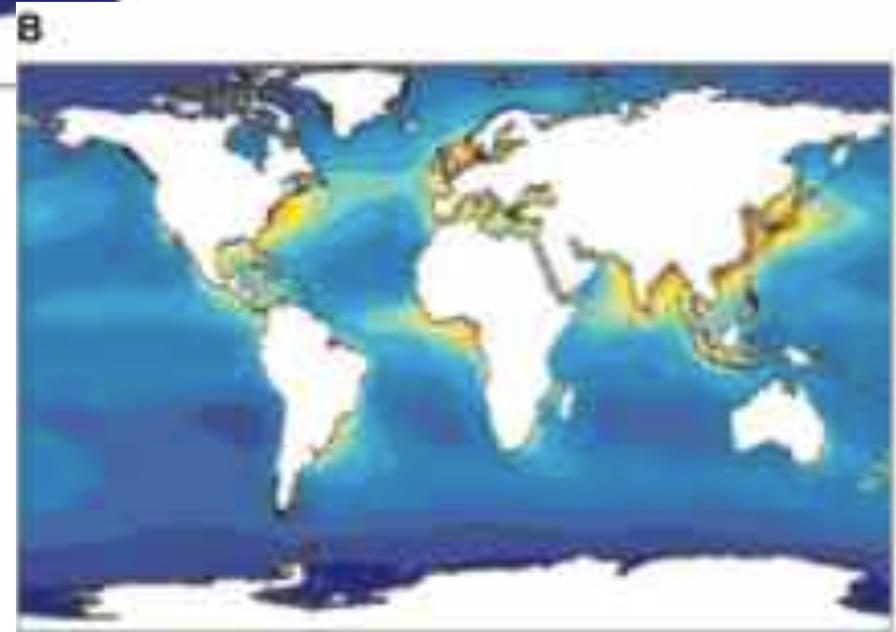
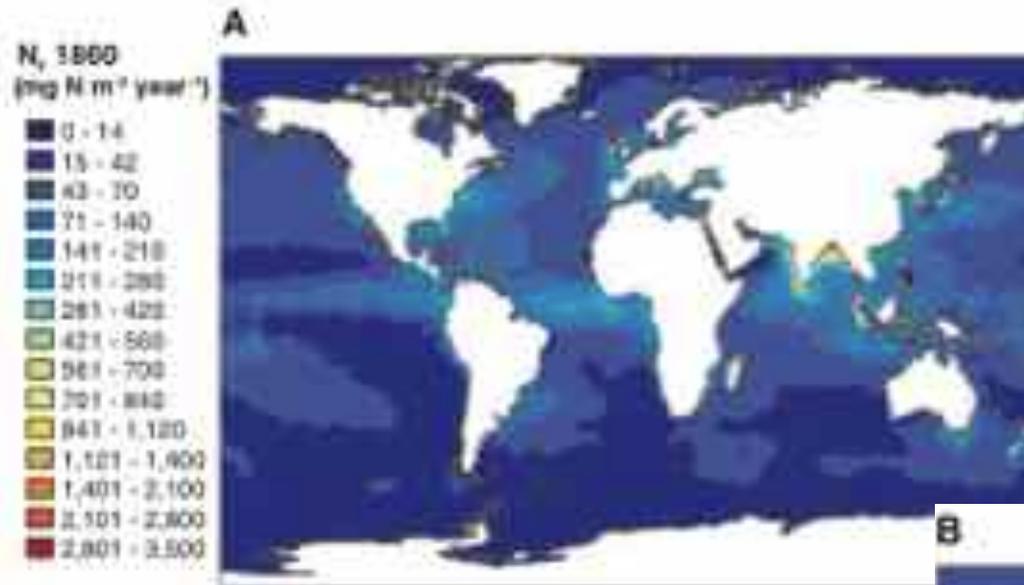


## Conclusions...

---

→ Apports de nutriments par les rivières et par l'atmosphère

(agriculture, combustion...)



1860 : ~14.3 TgN/an

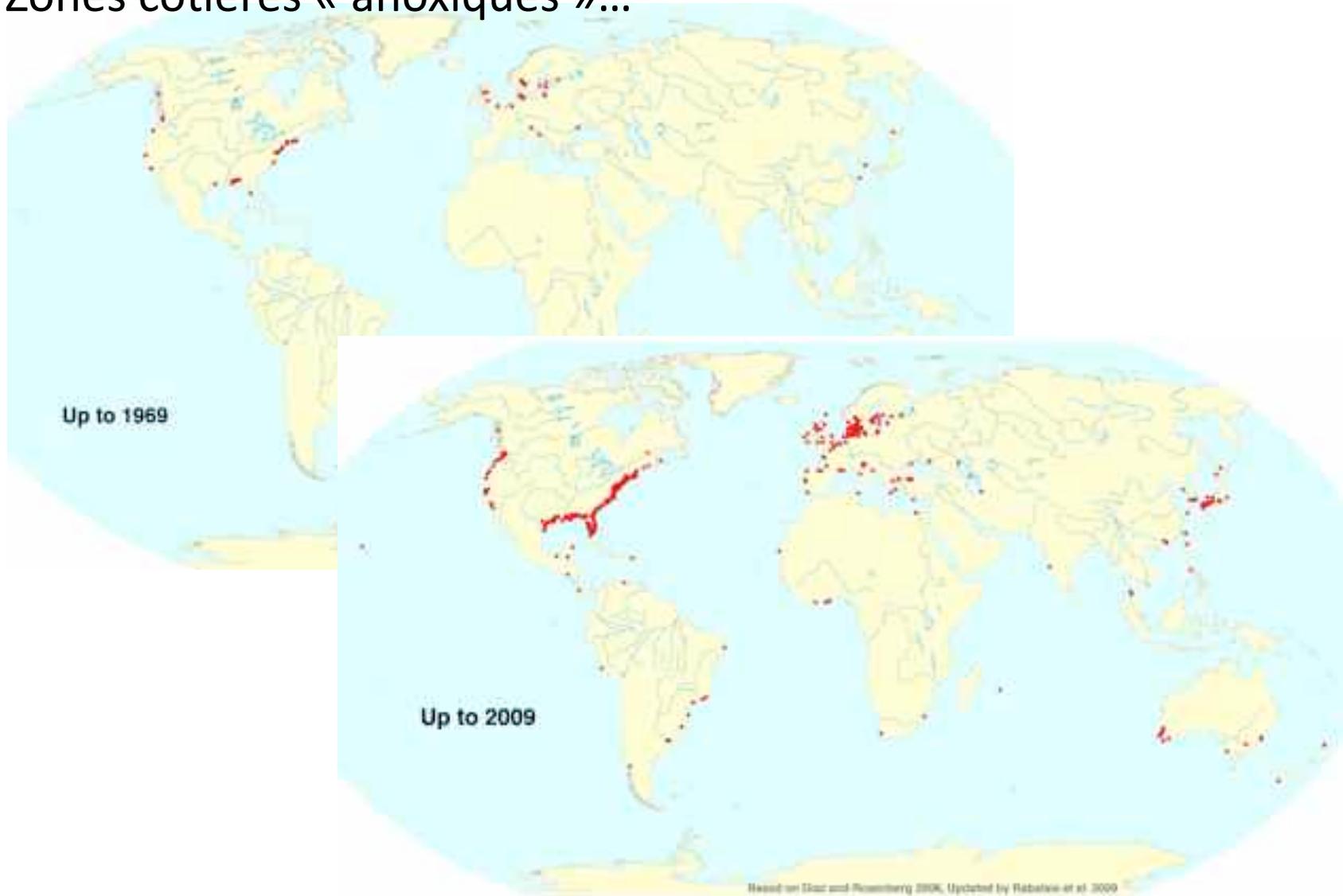
2000 : ~67 TgN/an

(Duce et al; 2008)

## Conclusions...

---

→ Zones cotières « anoxiques »...



Diaz and Rosenberg, 2008