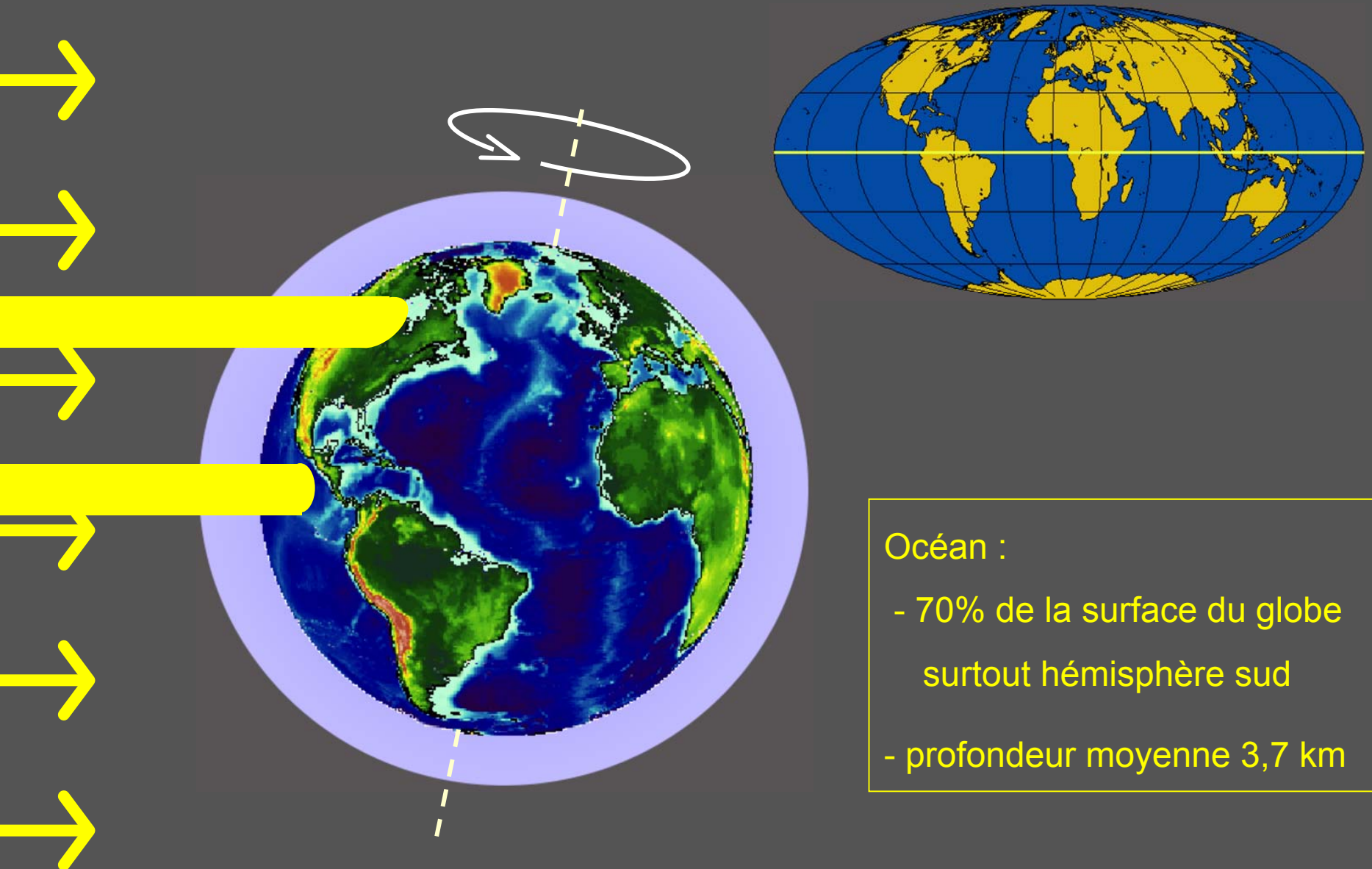




# Océan et Réchauffement climatique

- l'océan dans la machine climatique
- influences du réchauffement sur l'océan
  - ce qui a été observé
  - les projections sur le futur
- impacts attendus

# Machine climatique

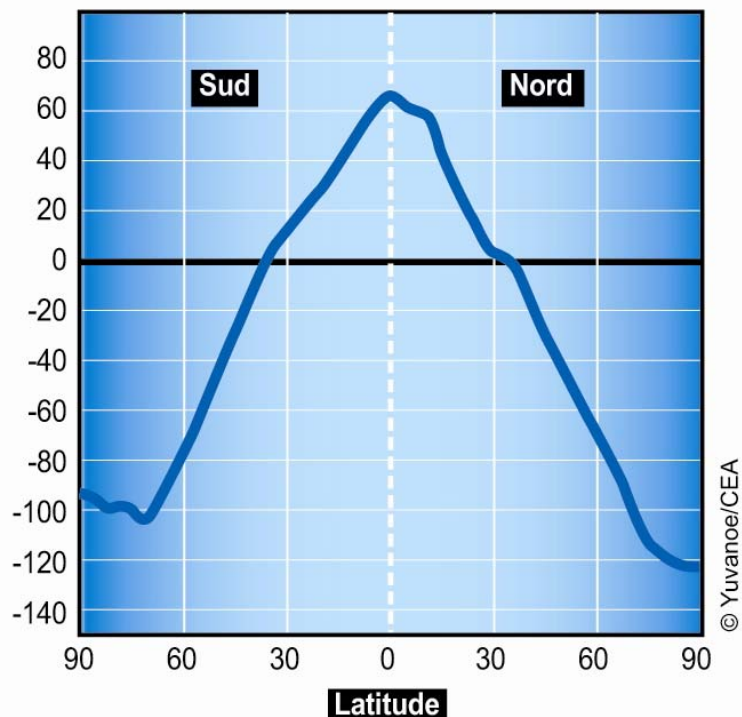


Océan :

- 70% de la surface du globe  
surtout hémisphère sud
- profondeur moyenne 3,7 km

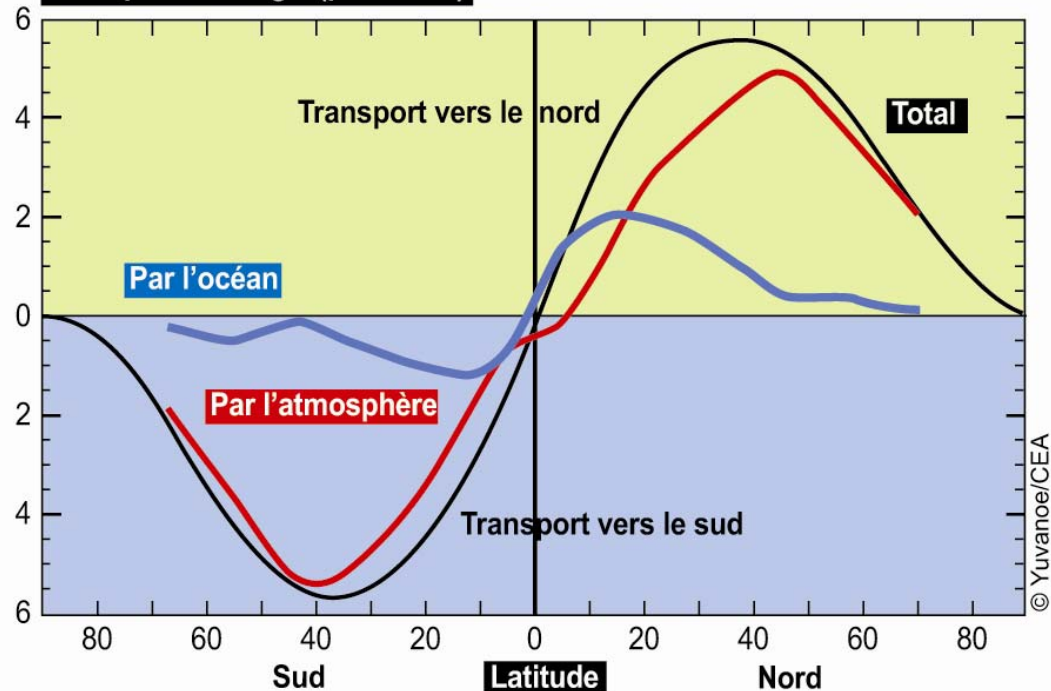
# Répartition de l'énergie en latitude

Bilan radiatif ( $W/m^2$ )



énergie reçue - sortante  
au sommet de l'atmosphère

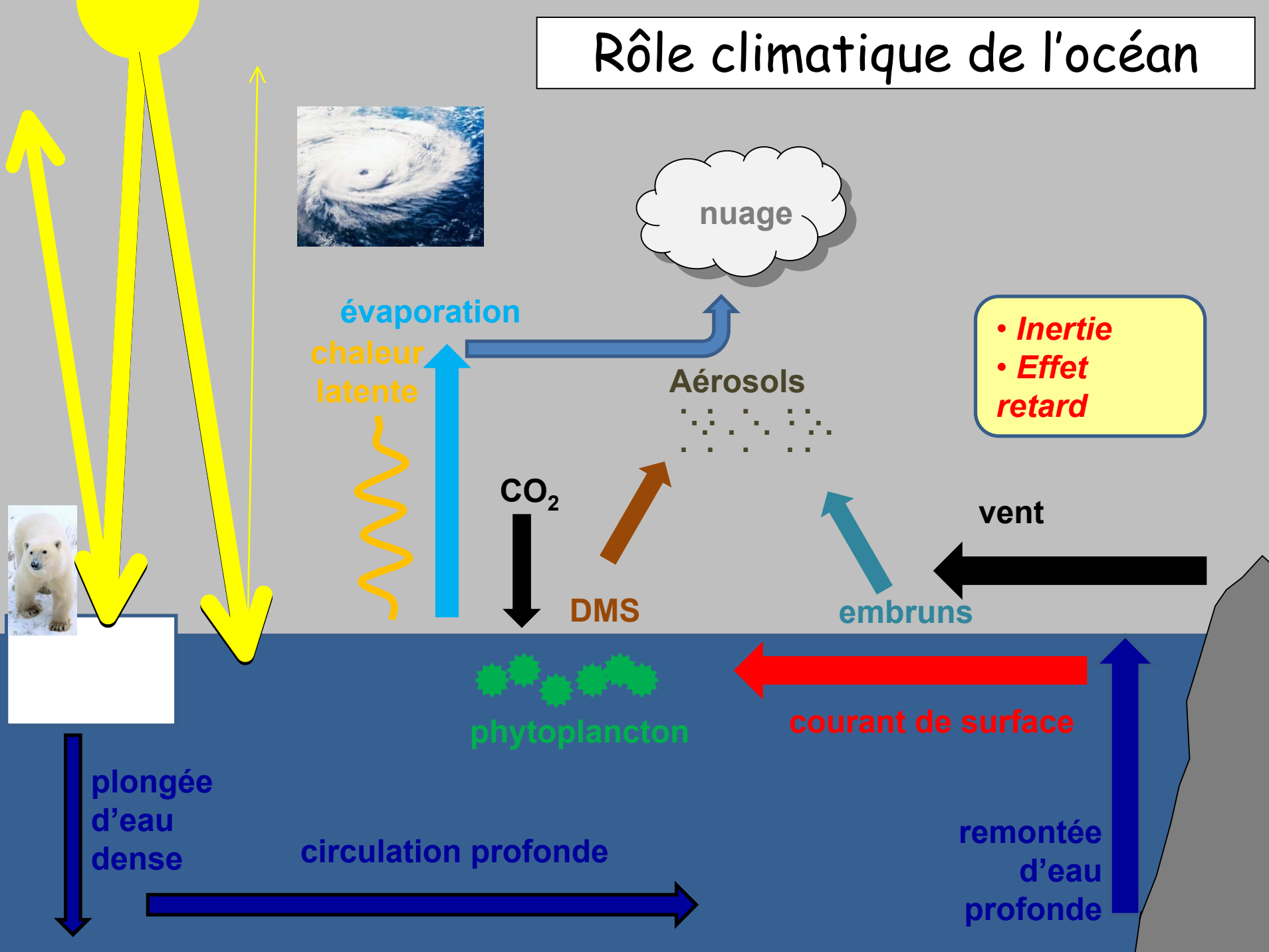
Transport d'énergie (pétawatts)



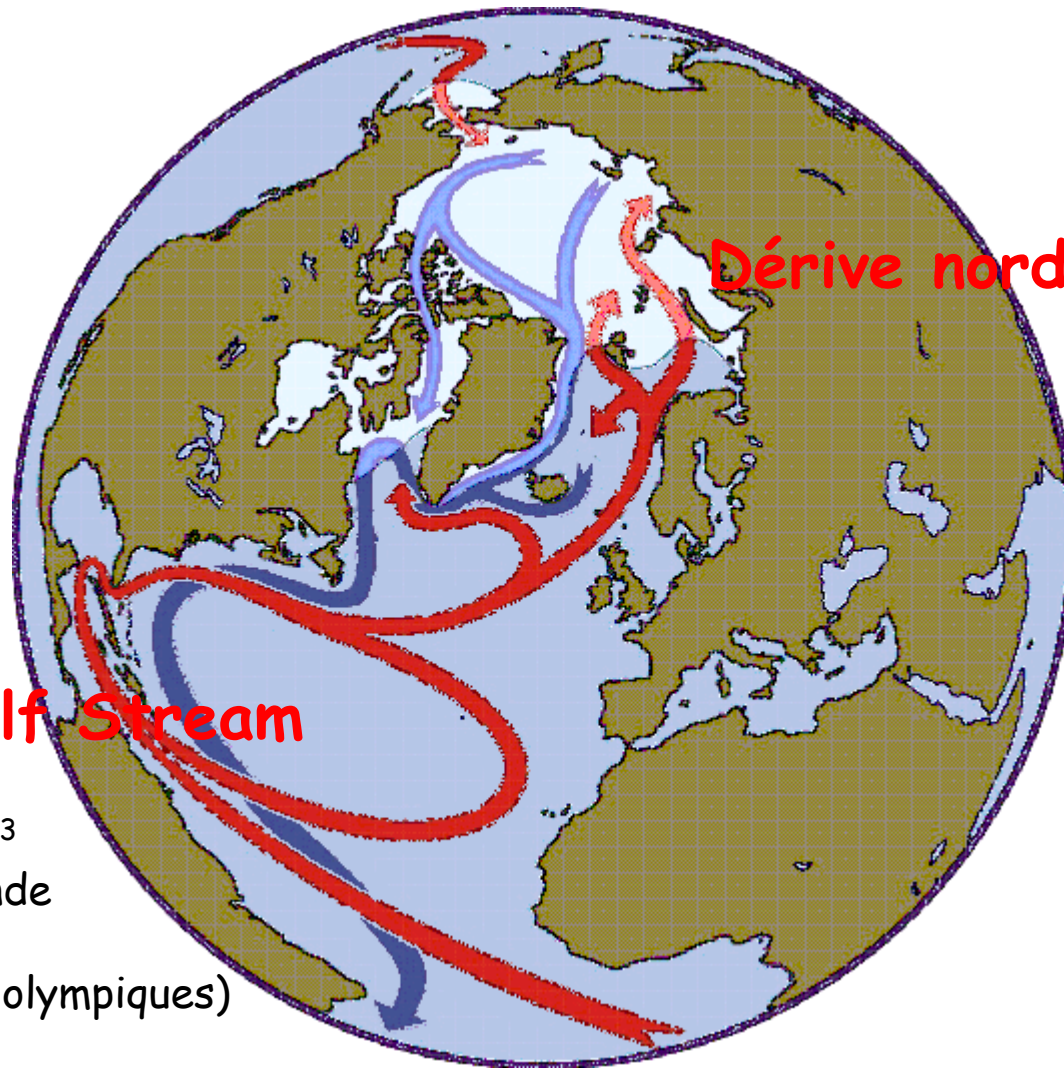
L'énergie est redistribuée à la surface du globe  
par les océans et par l'atmosphère

Bilan = Energie reçue - Energie rayonnée

# Rôle climatique de l'océan



# Courants marins dans l'Atlantique nord

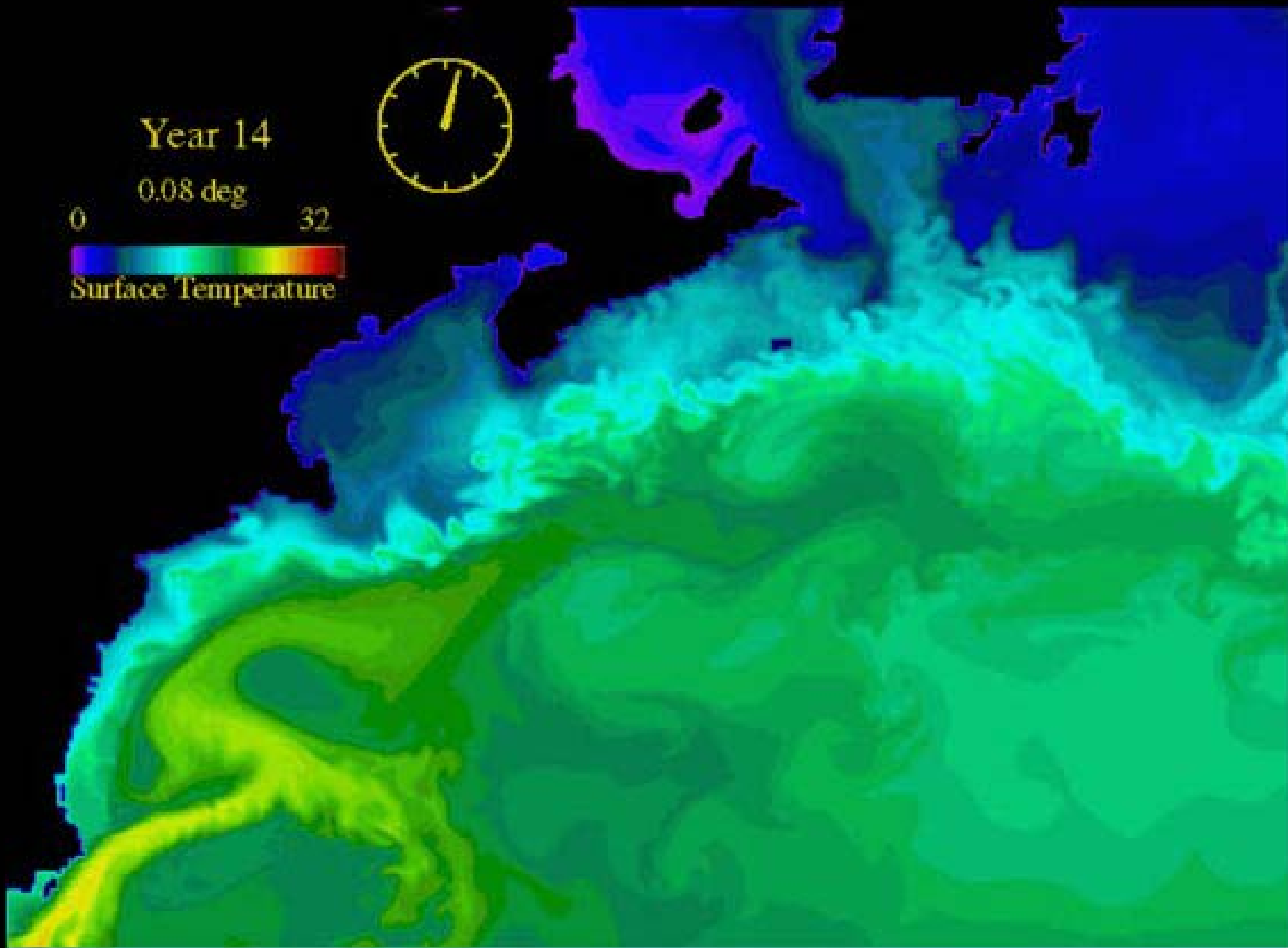


Dérive nord atlantique

Gulf Stream

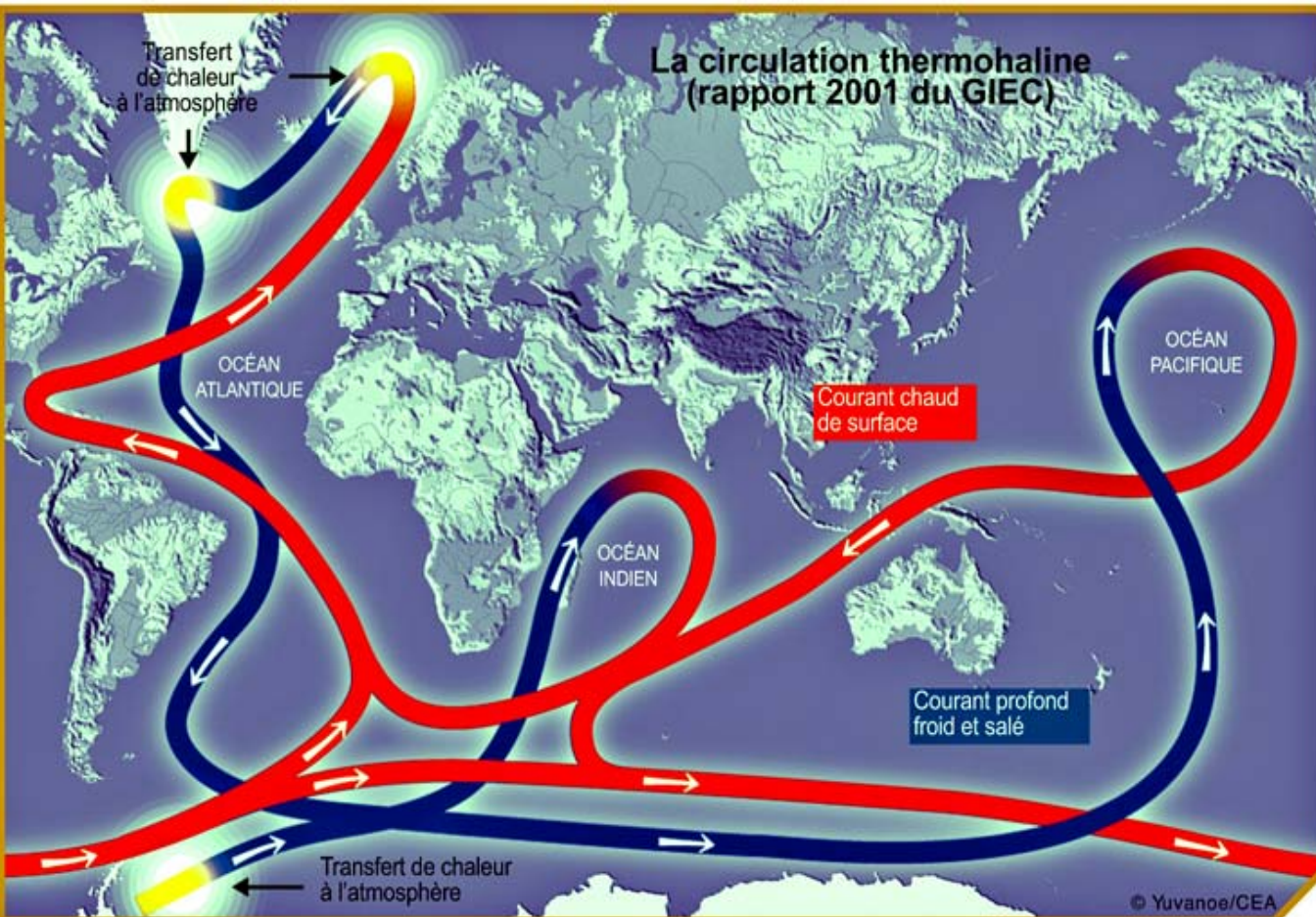
150 millions de m<sup>3</sup>  
par seconde

(30 000 piscines olympiques)



# Circulation thermohaline

Circulation provoquée par les différences de température et de salinité

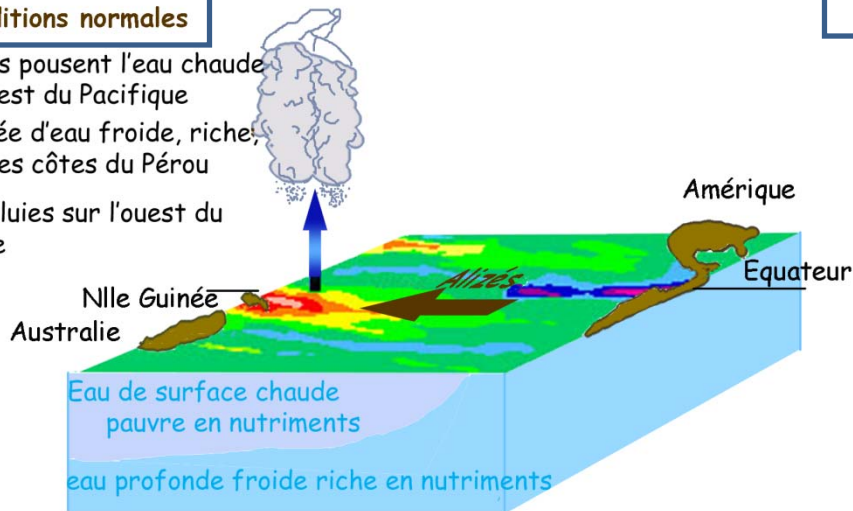


une goutte d'eau  
parcourt l'ensemble  
de la boucle en 500  
à 1000 ans.

# El Niño

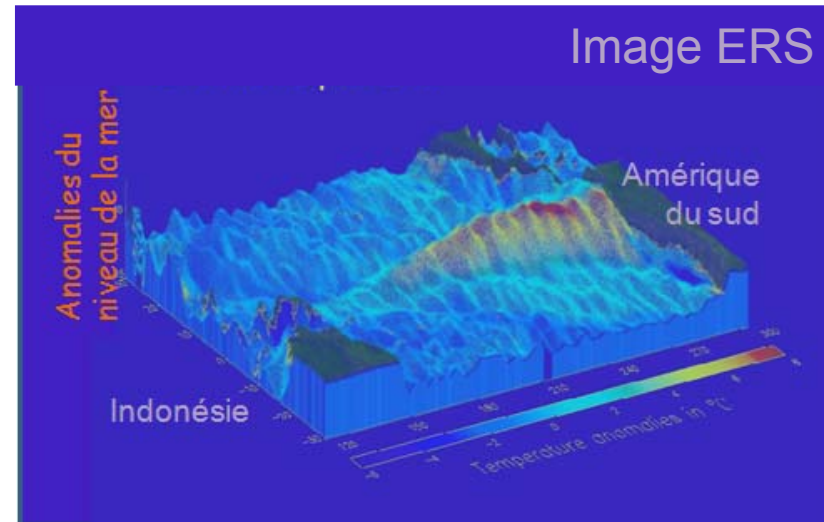
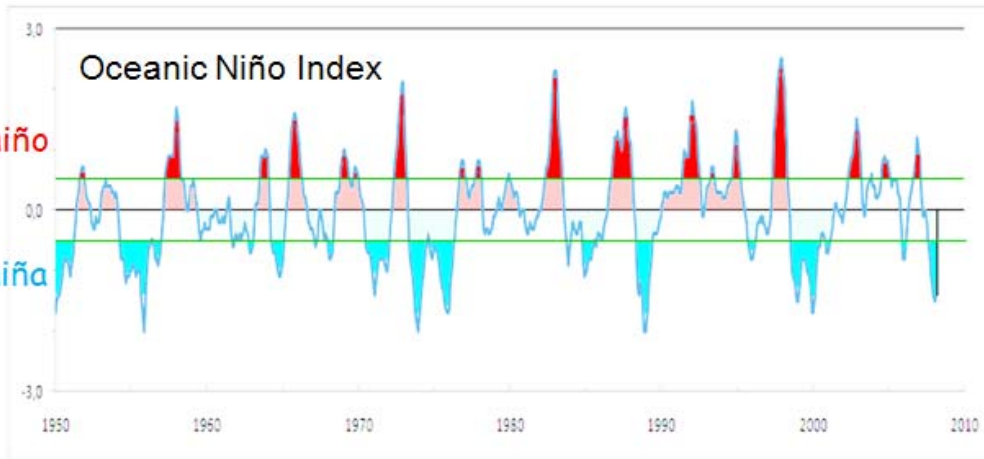
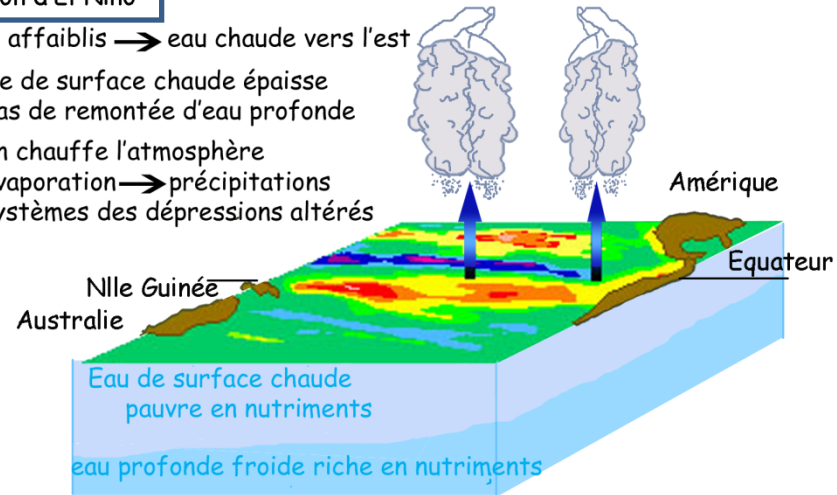
## Conditions normales

- les alizés poussent l'eau chaude vers l'ouest du Pacifique
- remontée d'eau froide, riche, le long des côtes du Pérou
- fortes pluies sur l'ouest du Pacifique



## Situation d'El Niño

- alizés affaiblis → eau chaude vers l'est
- couche de surface chaude épaisse → pas de remontée d'eau profonde
- l'océan chauffe l'atmosphère → évaporation → précipitations systèmes des dépressions altérés





# Evolution de l'océan

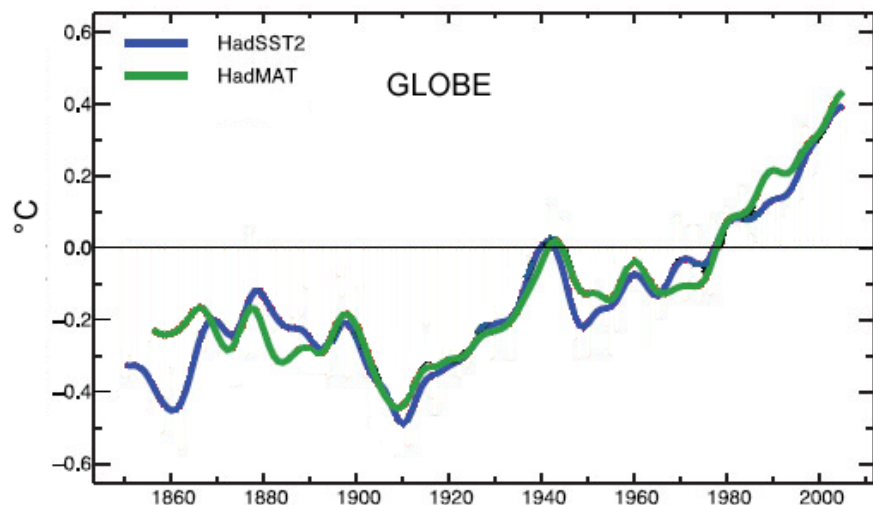
- **Température, contenu en chaleur**
- Niveau de la mer
- Glace de mer
- Circulation thermohaline
- Acidité
- Salinité

# Température de surface de la mer

Ecarts en température par rapport à [1961 - 1990]

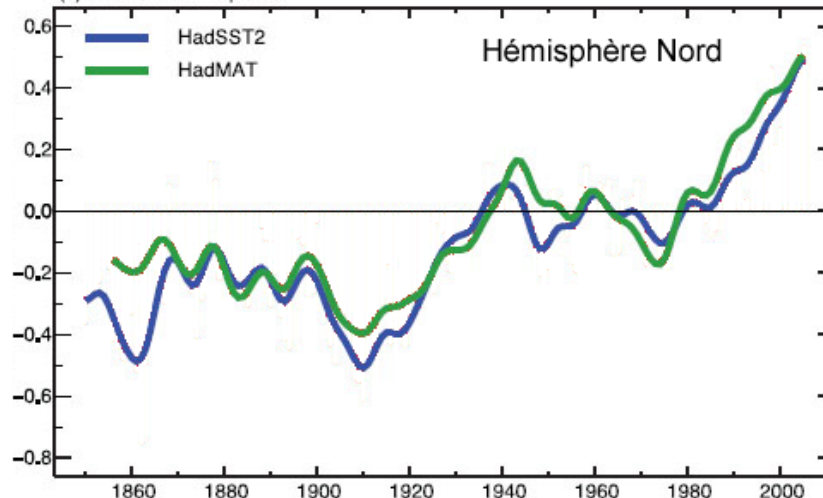
— Global

— Nuit

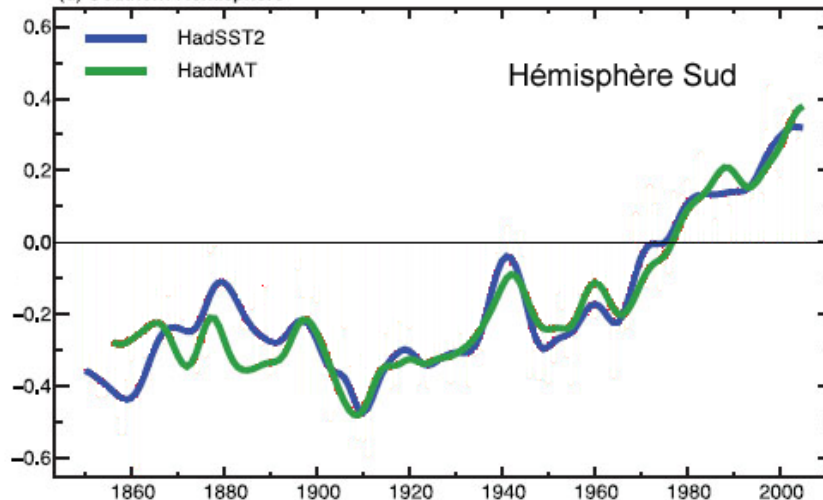


L'océan a emmagasiné beaucoup de chaleur au cours du 20<sup>ème</sup> siècle

(c) Northern Hemisphere



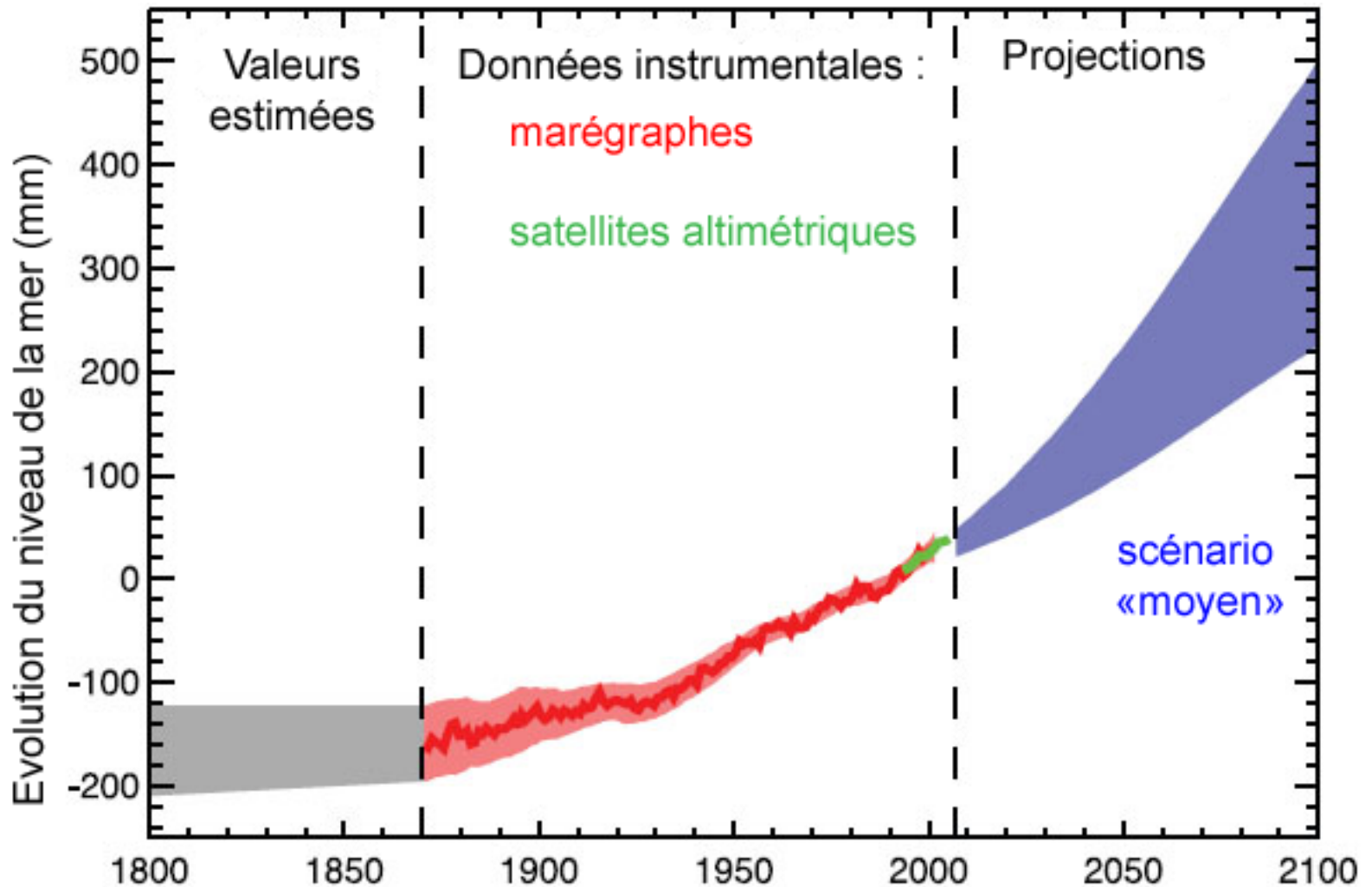
(d) Southern Hemisphere



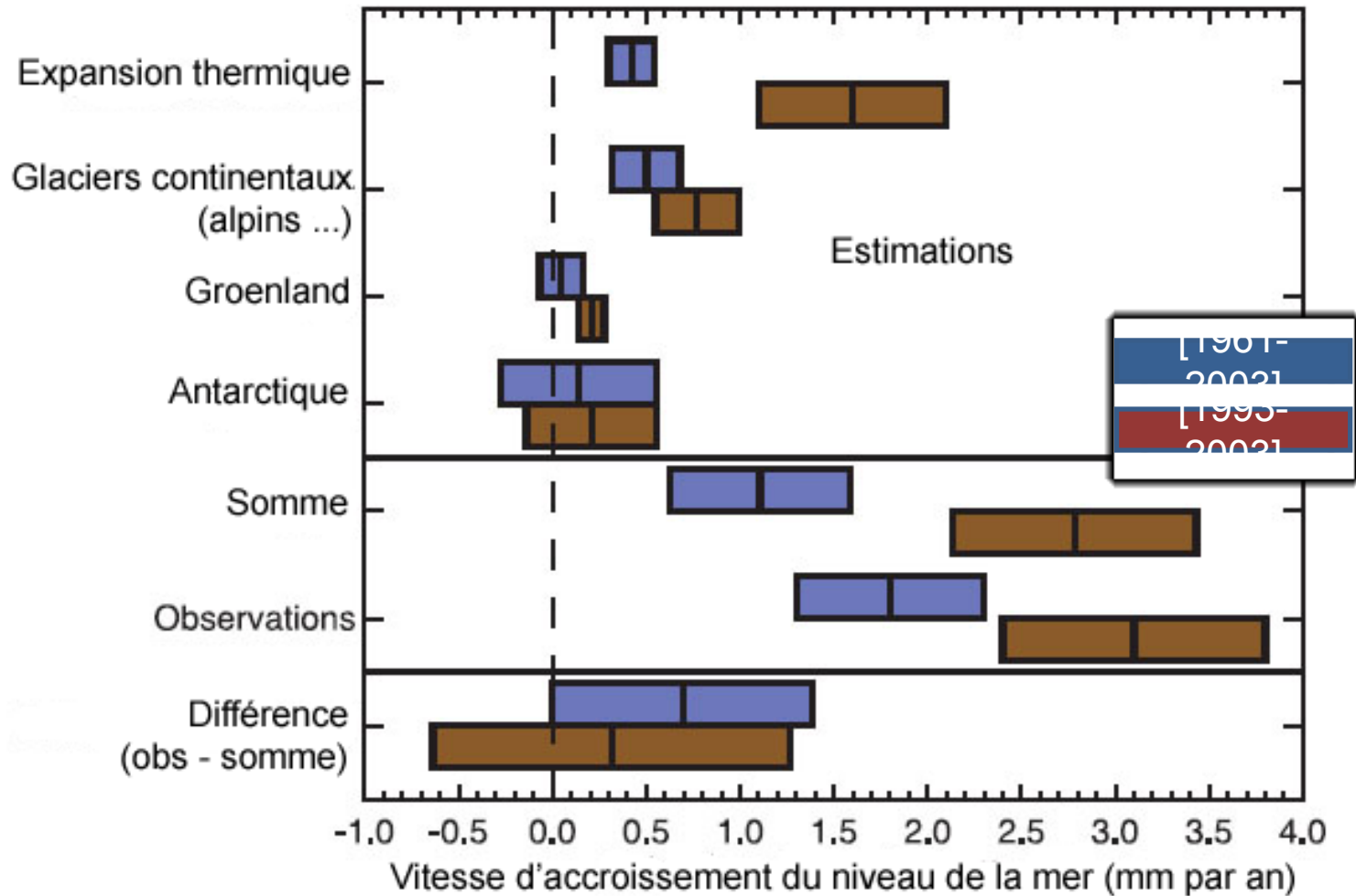
# Evolution de l'océan

- Température, contenu en chaleur
- **Niveau de la mer**
- Glace de mer
- Circulation thermohaline
- Acidité
- Salinité

# Evolution passée et à venir du niveau de la mer



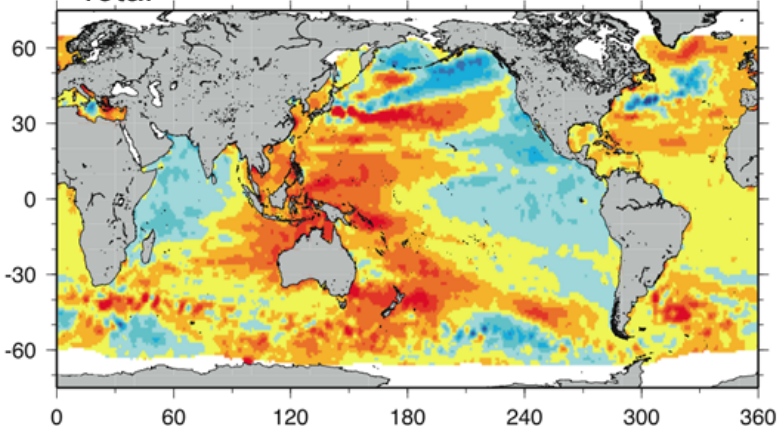
# Contributions à l'augmentation du niveau de la mer



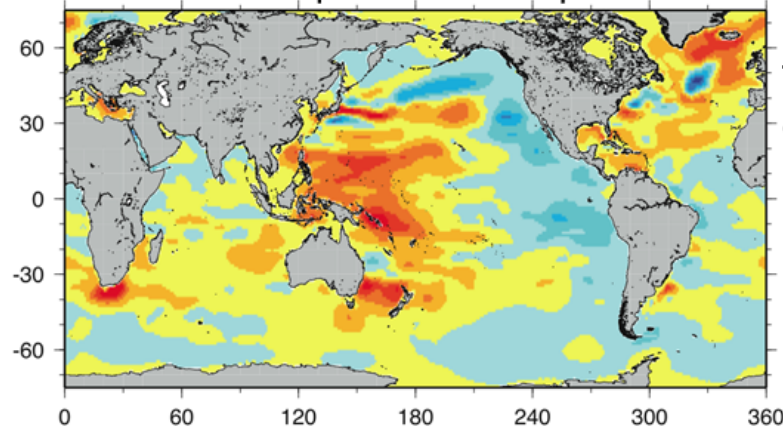
augmentation due majoritairement à l'expansion thermique

# Accroissement du niveau de la mer

Total

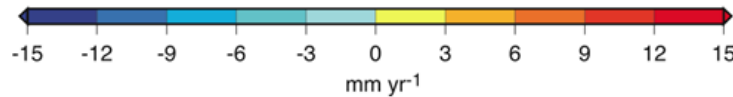


Part due à l'expansion thermique

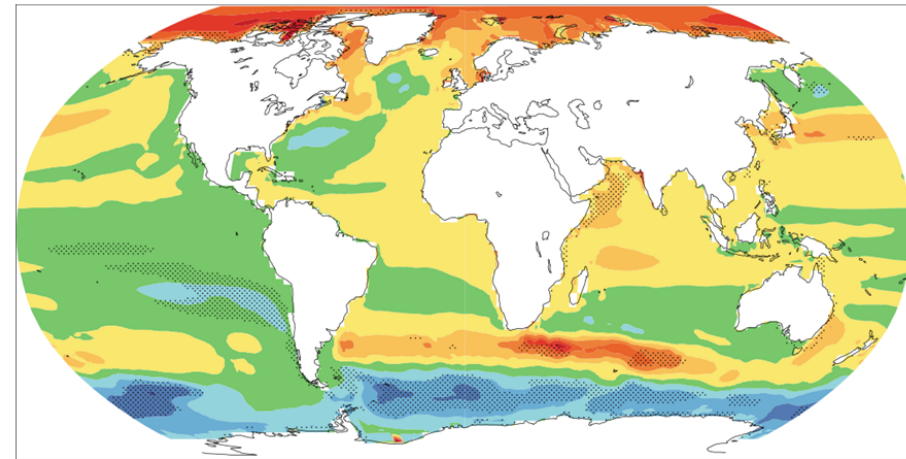


taux annuel  
de 1993 à 2003

données  
TOPEX-Poseidon



mm yr<sup>-1</sup>



(m)

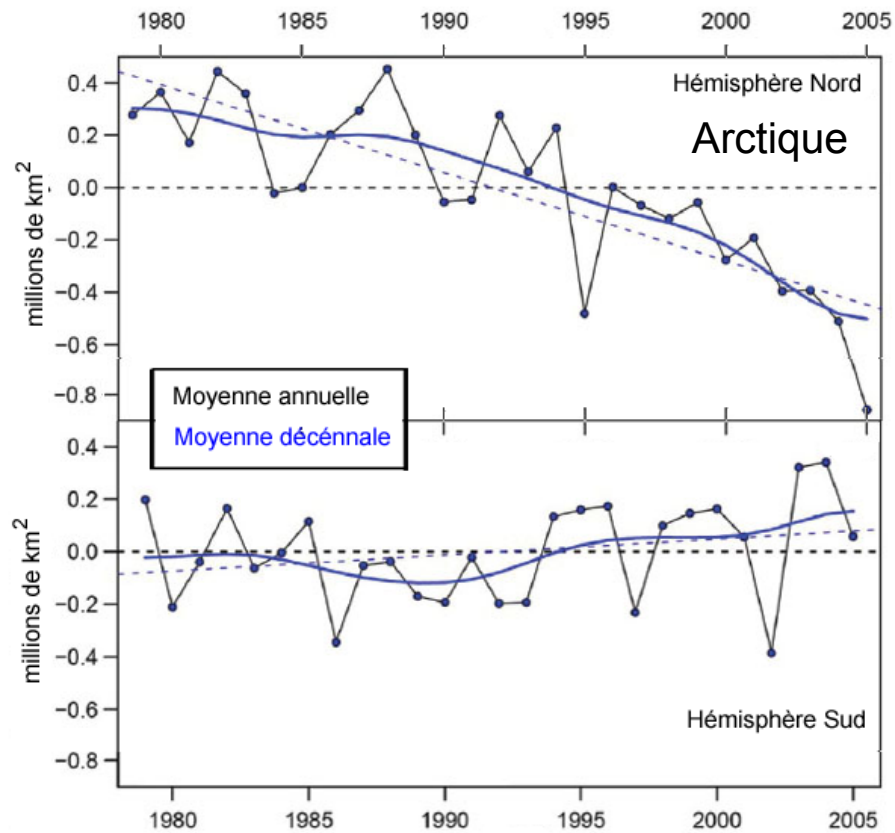
2010 – 1990 : écart à l'évolution moyenne

Les écarts proviennent  
- des variations locales de densité  
- de la circulation océanique

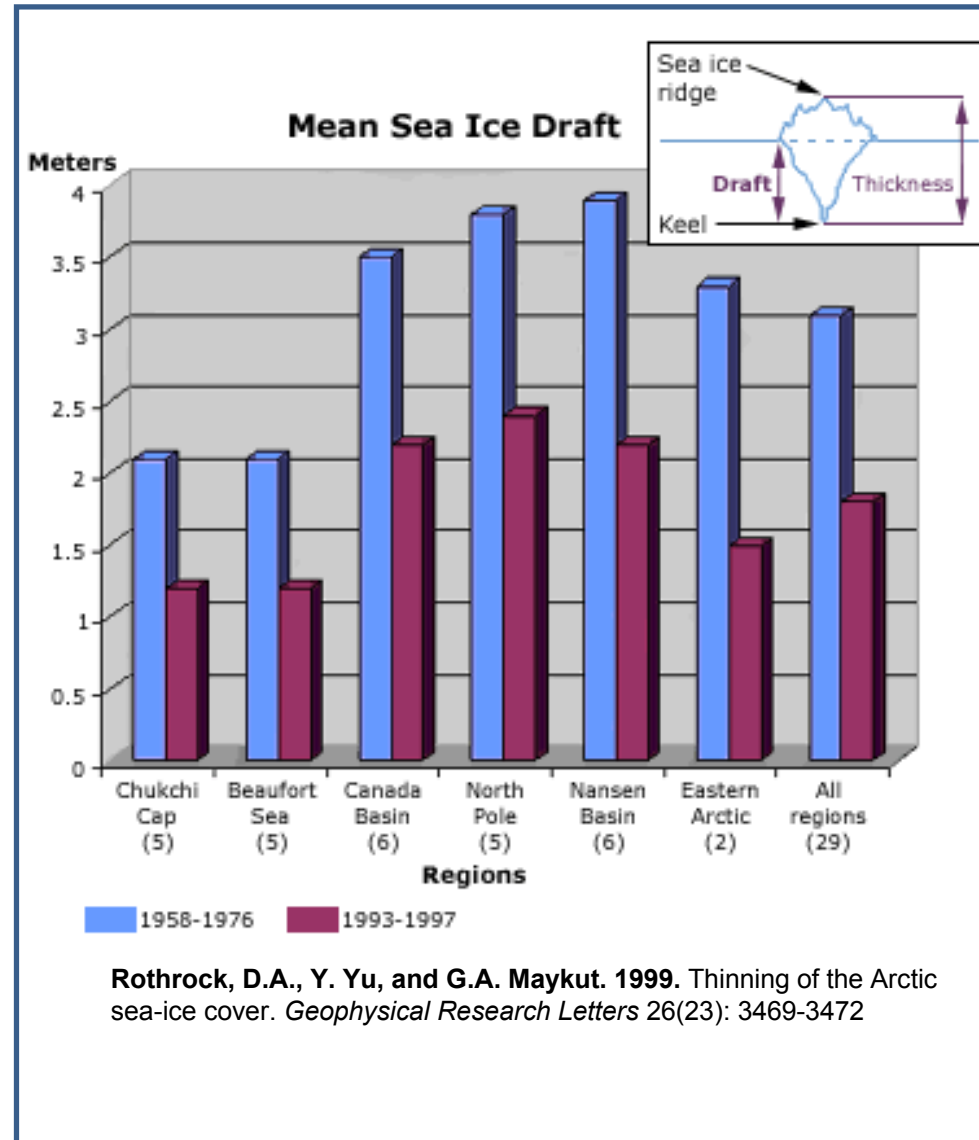
# Evolution de l'océan

- Température, contenu en chaleur
- Niveau de la mer
- **Glace de mer**
- Circulation thermohaline
- Acidité
- Salinité

# Diminution de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer



Extension de la glace de mer : écarts à la moyenne de [1980, 2005]



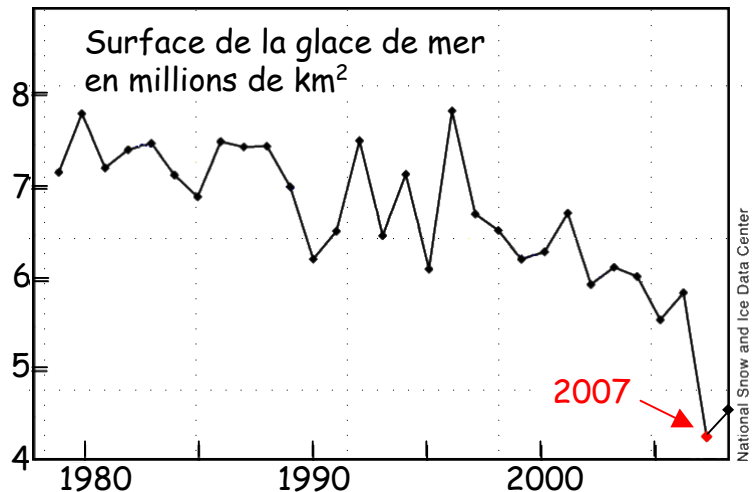


# Minimum annuel de la glace de mer arctique

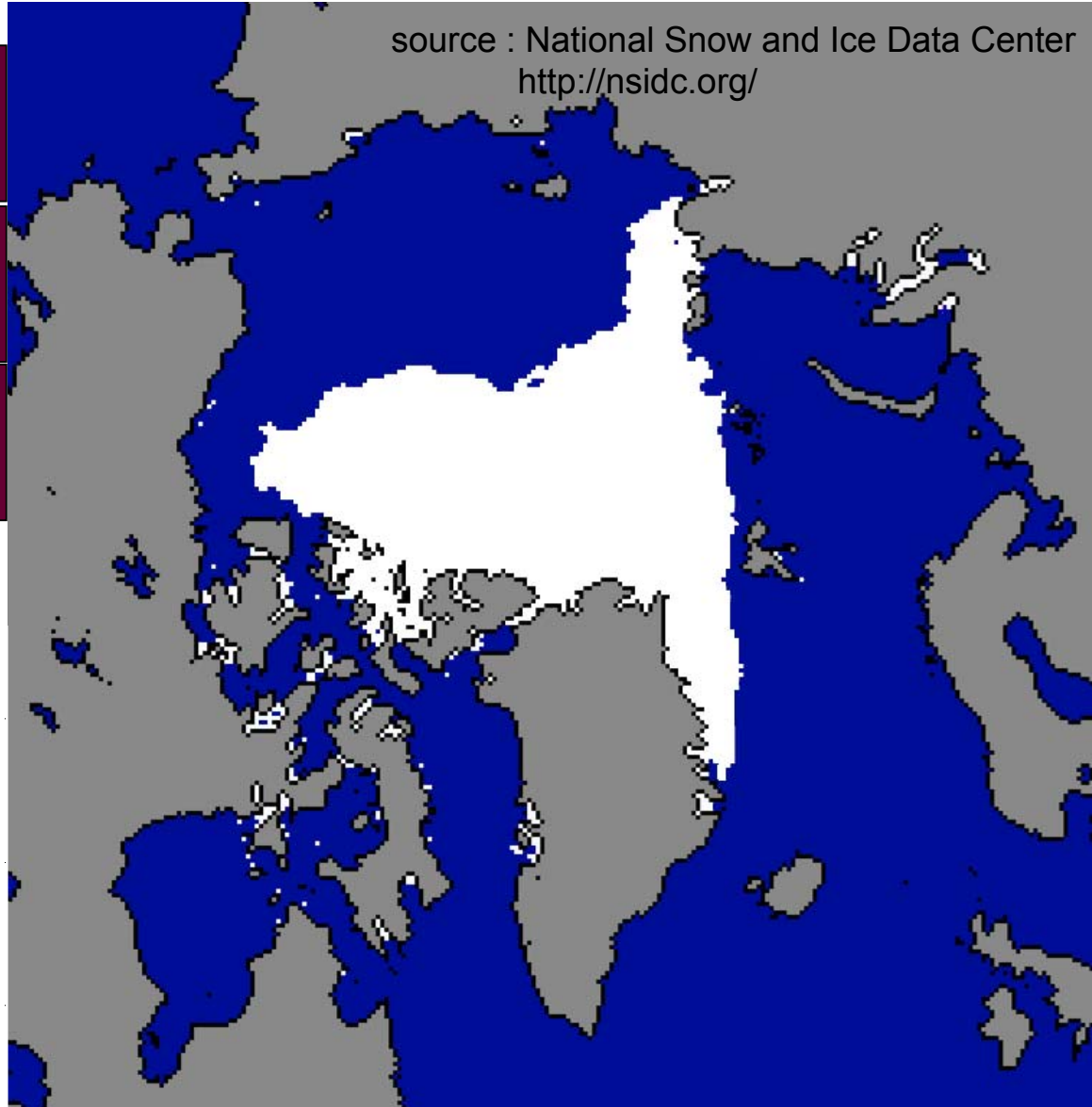
Minimum annuel moyenné sur  
1970 - 2000 (6 740 000 km<sup>2</sup>)

21 septembre 2005  
(5 300 000 km<sup>2</sup>)

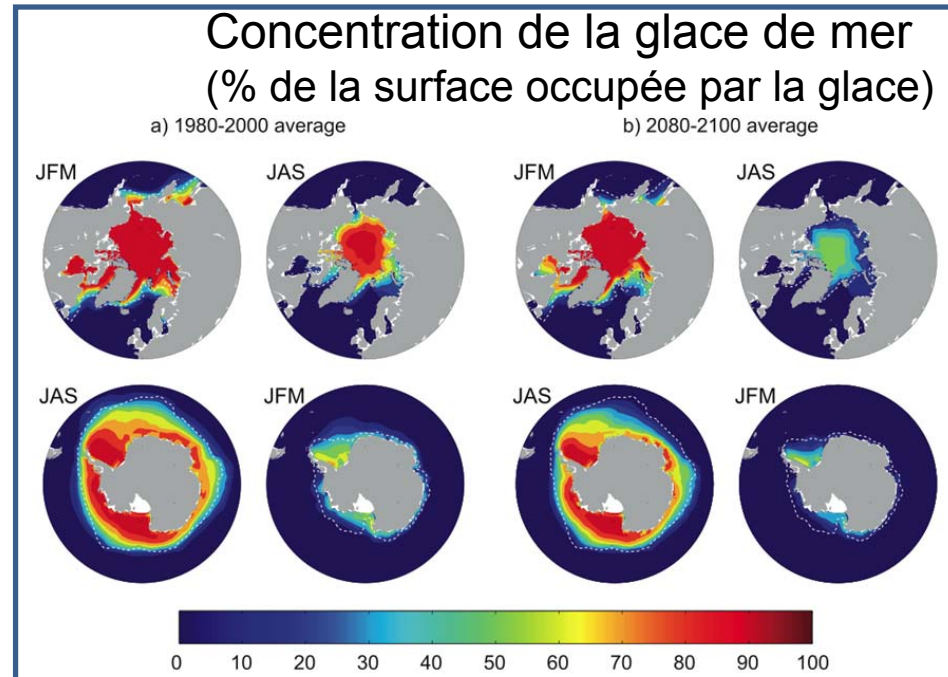
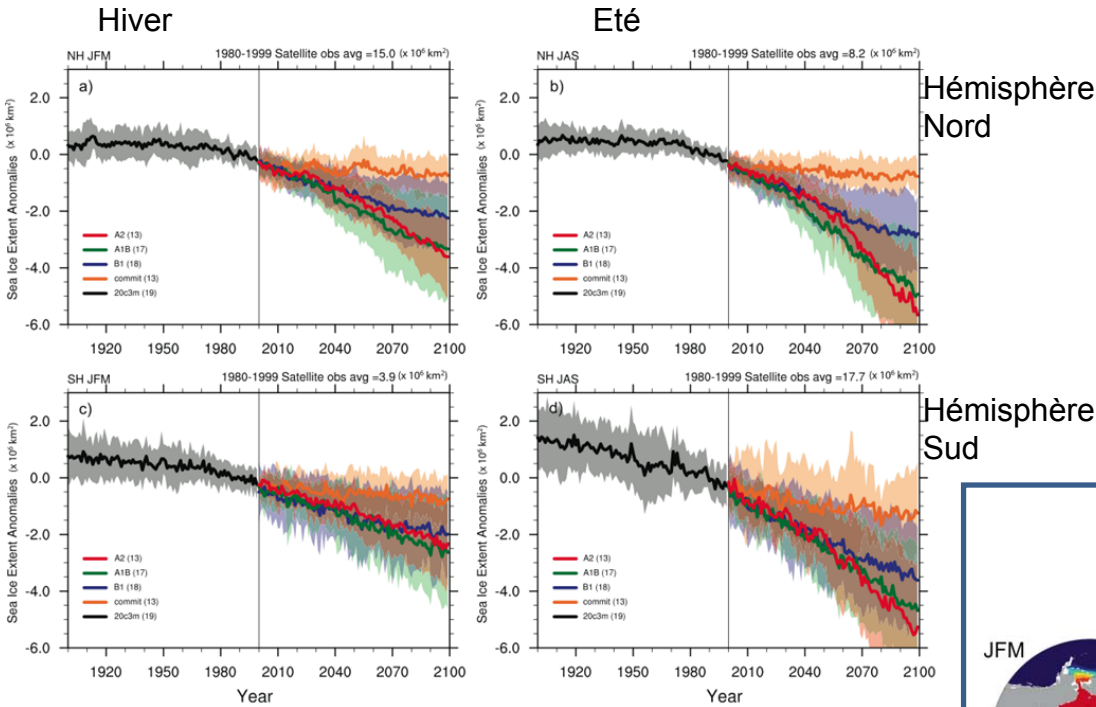
16 septembre 2007  
(4 100 000 km<sup>2</sup>)



source : National Snow and Ice Data Center  
<http://nsidc.org/>



# Evolution de la glace de mer (scénario A1B)



Surface de la glace de mer

**Selon les observations des dernières années  
⇒ la banquise estivale pourrait disparaître  
beaucoup plus rapidement**

# Conséquences locales de la fonte de la banquise

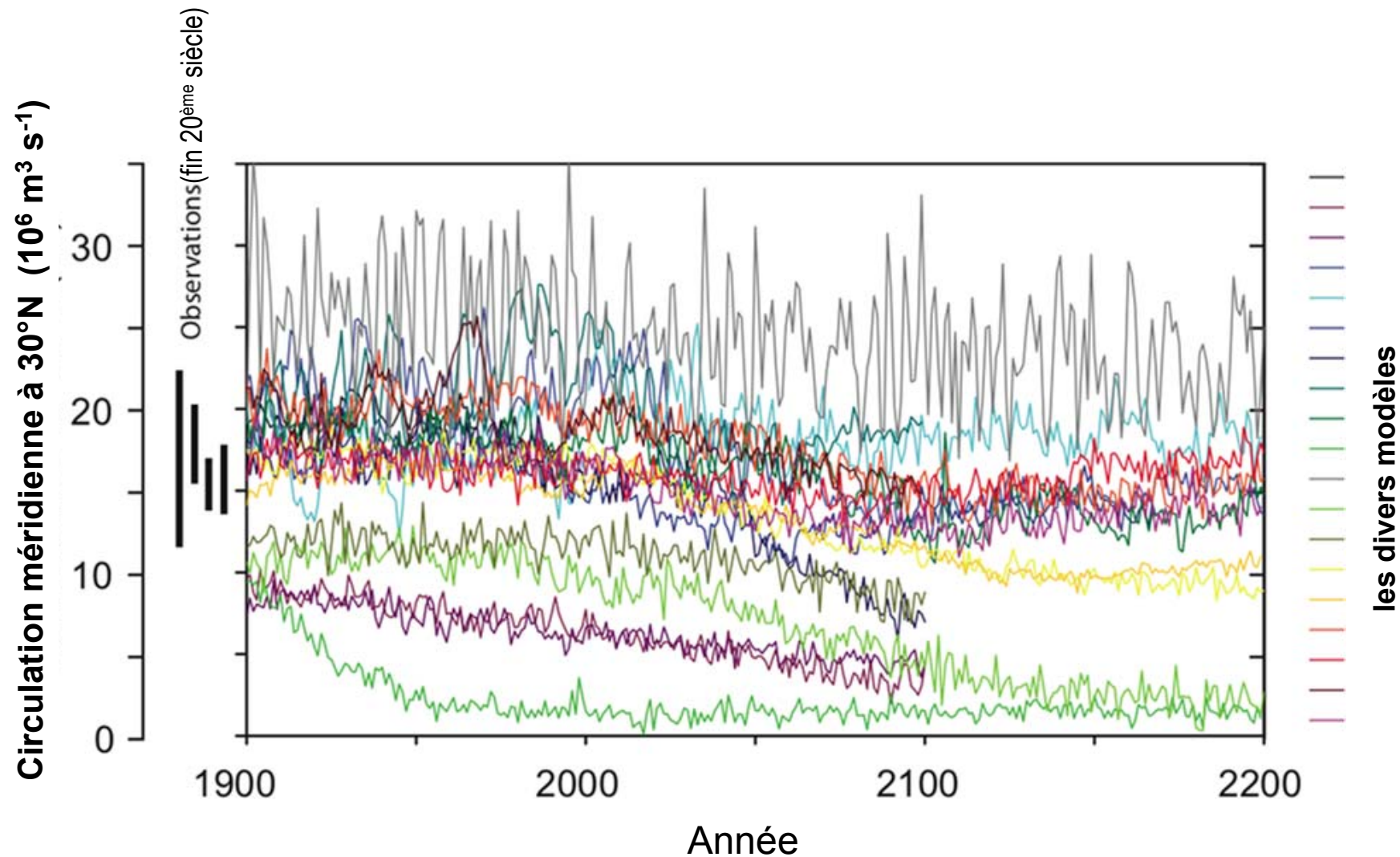
## Fonte de la banquise

- ⇒ forte diminution de l'albédo ⇒ forte augmentation de l'énergie solaire absorbée
- ⇒ échauffement local des eaux de surface (+ 7°C en 2007)
- ⇒ augmentation de la température à la surface des continents avoisinants
- ⇒ déstabilisation du permafrost
- ⇒ favorise l'activité biologique elle-même génératrice de chaleur

# Evolution de l'océan

- Température, contenu en chaleur
- Niveau de la mer
- Glace de mer
- **Circulation thermohaline**
- Acidité
- Salinité

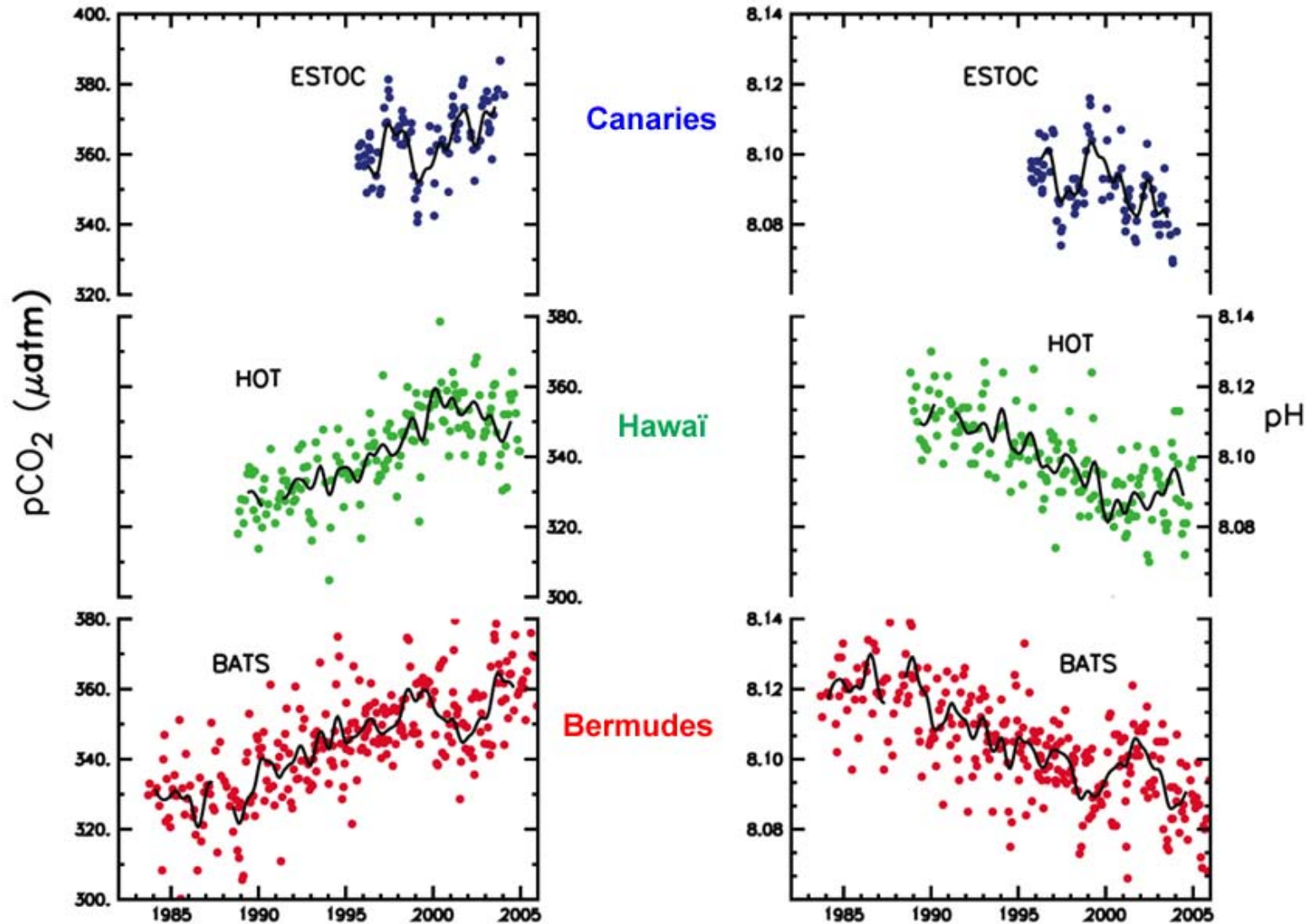
# Circulation méridienne



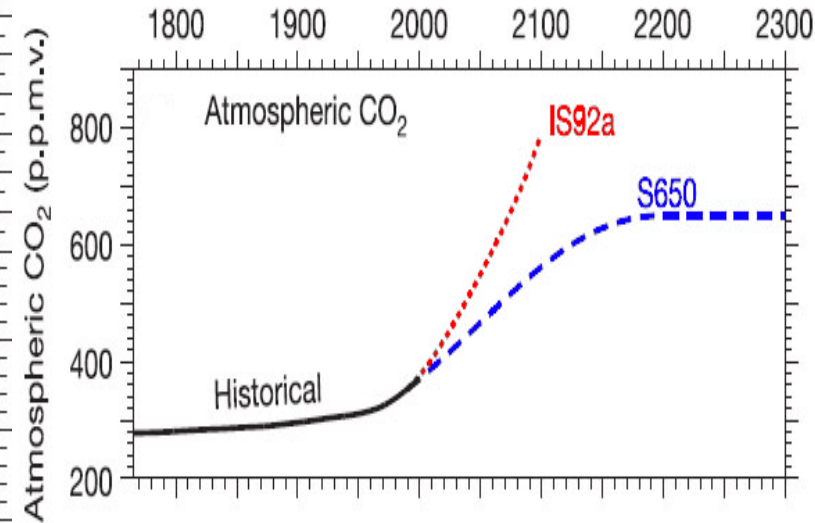
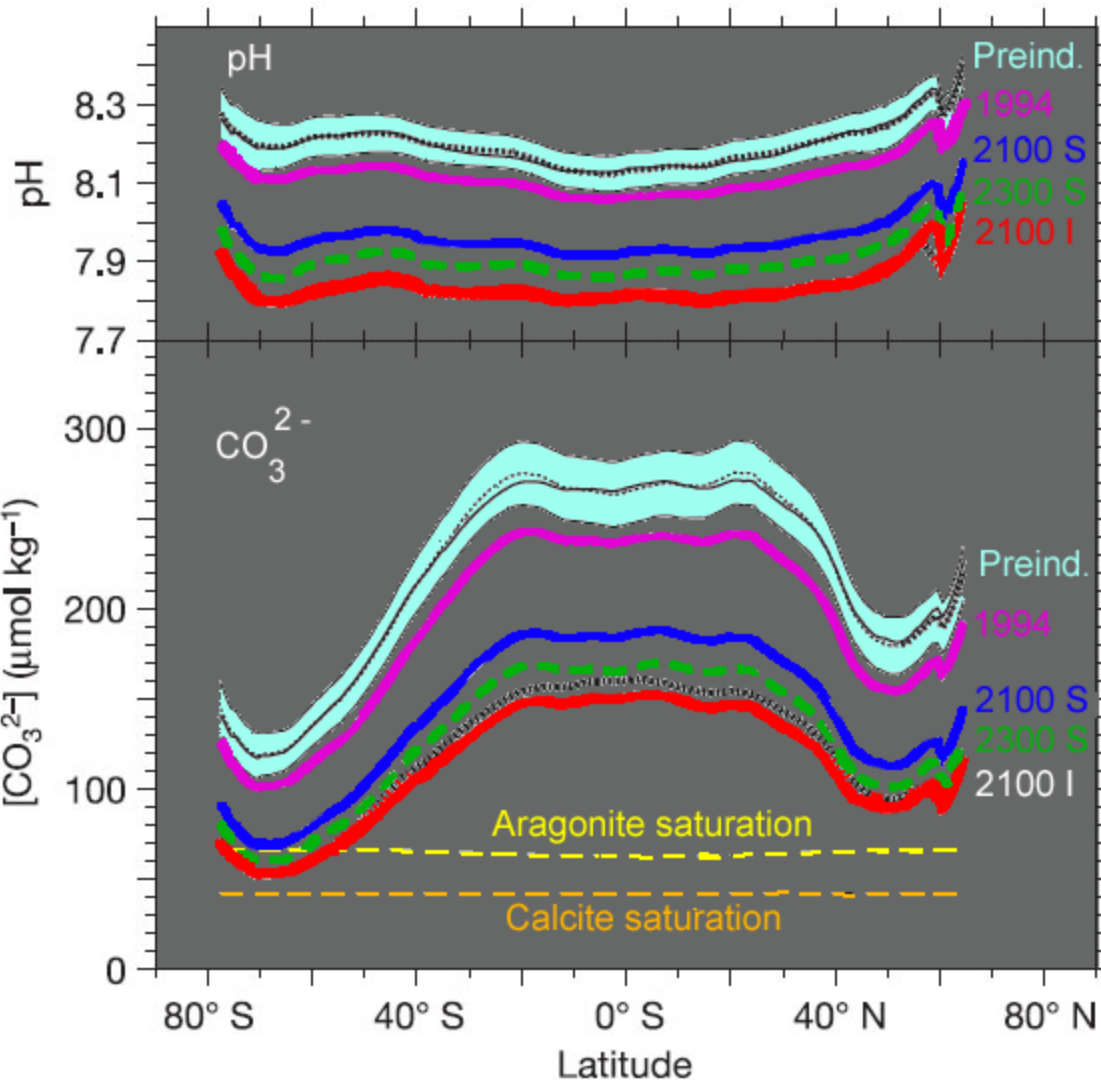
# Evolution de l'océan

- Température, contenu en chaleur
- Niveau de la mer
- Glace de mer
- Circulation thermohaline
- **Acidité**
- Salinité

# Acidification de l'Océan



# Acidité des eaux de surface et carbonates de calcium



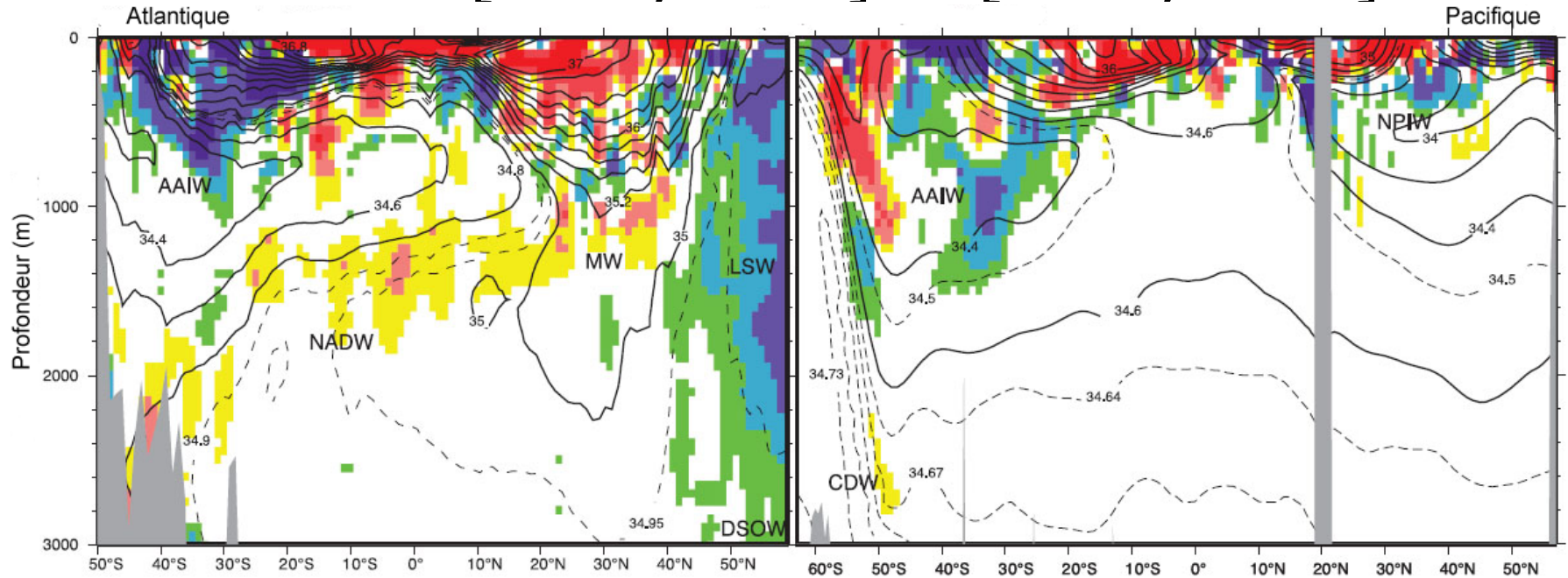
Survie des organismes à coquille en aragonite ?



# Evolution de l'océan

- Température, contenu en chaleur
- Niveau de la mer
- Glace de mer
- **Circulation thermohaline**
- Acidité
- **Salinité**

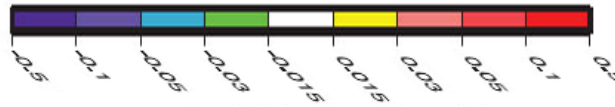
# Evolution de la salinité entre [1955, 1969] et [1985, 1999]



AAIW Antarctic intermediate water  
DSOW Denmark strait overflow water  
LSW Labrador sea water  
MW Mediterranean water  
NADW North Atlantic deep water

AAIW Antarctic intermediate water  
CDW Circumpolar deep water  
NPIW North Pacific Intermediate water

Variation de salinité (g de NaCl par litre)



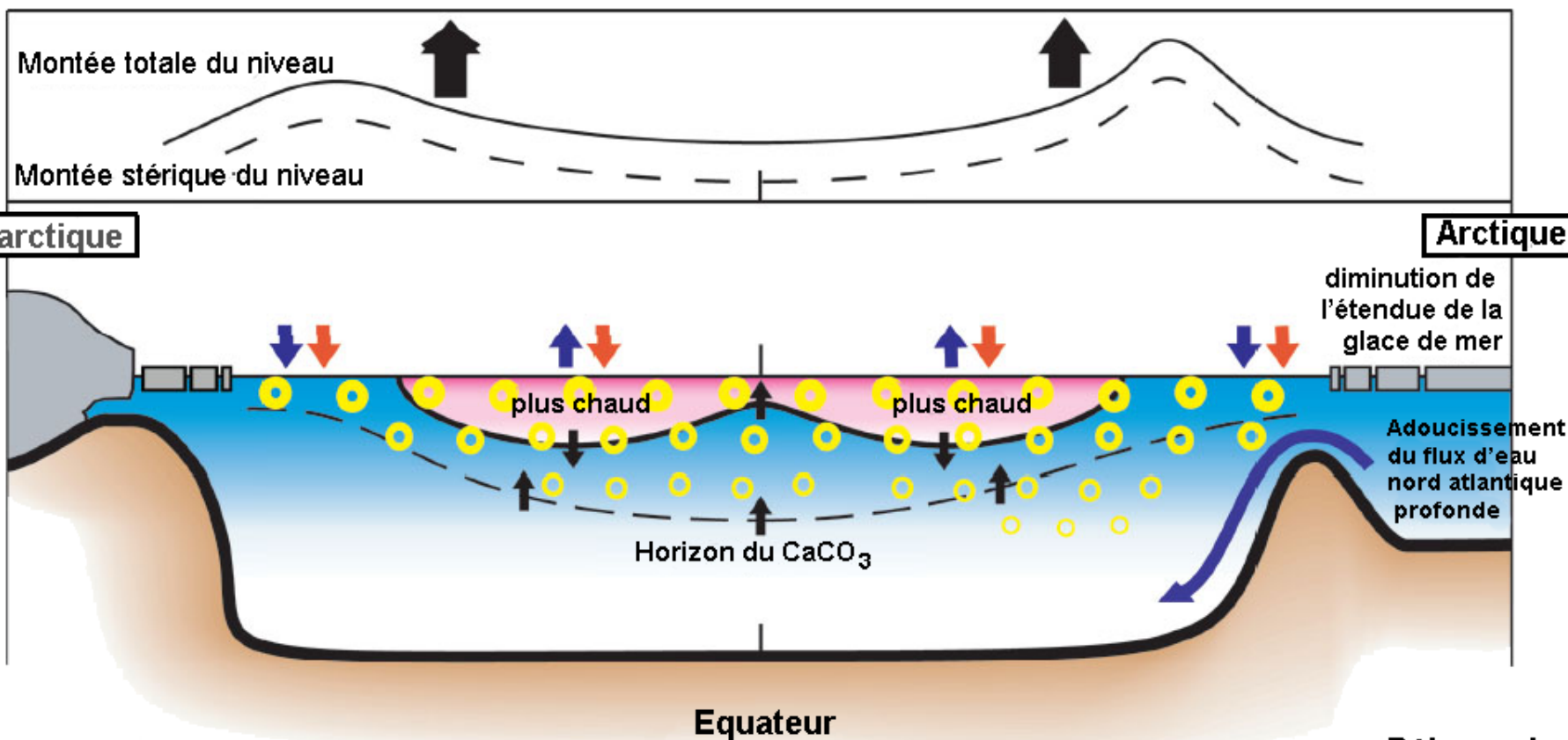
- Augmentation de la salinité des eaux de surface aux basses latitudes

- Diminution de la salinité aux hautes latitudes, même en profondeur, (arctique)



Bilan évaporation vs précipitations, fonte des glaces

# Résumé changements observés



Pôle sud

Pôle nord

↕↕ Contenu en chaleur et CO<sub>2</sub> accru / décréu dans l'océan

↕↕ Approfondissement / remontée des isothermes, des isopycnales et de l'horizon du CaCO<sub>3</sub>

↕↕ Eau douce (précipitation - évaporation) accrue / décréue

⊙⊙ Diminution du pH

⬢ Eau plus douce

⬢ Eau plus salée

# Impacts attendus

- impacts sur le climat
- impacts sur l'environnement
- conséquences pour l'homme

# Impacts sur le climat

- ⇒ évaporation ⇒ précipitations
  - ⇒ cyclones ; tempêtes
- ⇒ circulation thermohaline modifiée
  - ⇒ influence sur le réchauffement de l'hémisphère nord
- ⇒ puits de carbone moins efficace (⇐ température et pH)
- ⇒ disparition de la glace de mer
  - ⇒ absorption du rayonnement solaire très augmentée
  - ⇒ réchauffement renforcé

# Impacts sur les écosystèmes

écosystèmes affectés par

- l'accroissement des températures
- la hausse du niveau de la mer
- la salinité
- le pH

concerne

- toutes les catégories d'animaux
  - plancton
  - organismes à « squelette » ou coquille calcaire  
plancton, mollusques, coraux ...
  - poissons
  - les prédateurs marins jusqu'aux plus grands  
poissons, oiseaux, ours, baleines ...
- les écosystèmes côtiers
  - coraux
  - mangroves

# Impacts sur les régions côtières

## Population proche du littoral

- plus de 60% de la population mondiale à moins de 100km des côtes
- 10% de la population mondiale à moins de 10 m d'altitude
- 75% des grandes villes à moins de 60km
- 16 des 23 villes de + de 2,5Mhabitants
- 6 des 8 villes de + de 10Mhabitants

- Erosion des côtes  
*niveau de la mer*  
*perte des protections naturelles : coraux, mangroves*
- Vulnérabilité aux tempêtes
- Inondations
- Envahissement des terres arables par le sel

*Problèmes aggravés par la dégradation des barrières naturelles (mangroves, corail ...), en partie à cause de l'homme*

# Impacts sur les hautes latitudes

Les premières à pâtir de la diminution du pH

Disparition de la glace de mer (arctique)

⇒ survie des ours blancs

⇒ formation des eaux profondes

Dégradation / disparition du permafrost ⇒ déstabilisation des sols



# Conséquences pour l'homme

- ✓ Habitat
- ✓ Agriculture
- ✓ Mode de vie
- ✓ Ressources
- ✓ Tourisme



- Dégradation de l'environnement
  - érosion des côtes
  - déstabilisation des sols (*inuits*)
  - salinité des sols
  - vulnérabilité aux tempêtes / inondations
- Disparition des écosystèmes / barrières naturelles
  - récifs coraliens, mangroves
- Disparition des ressources halieutiques

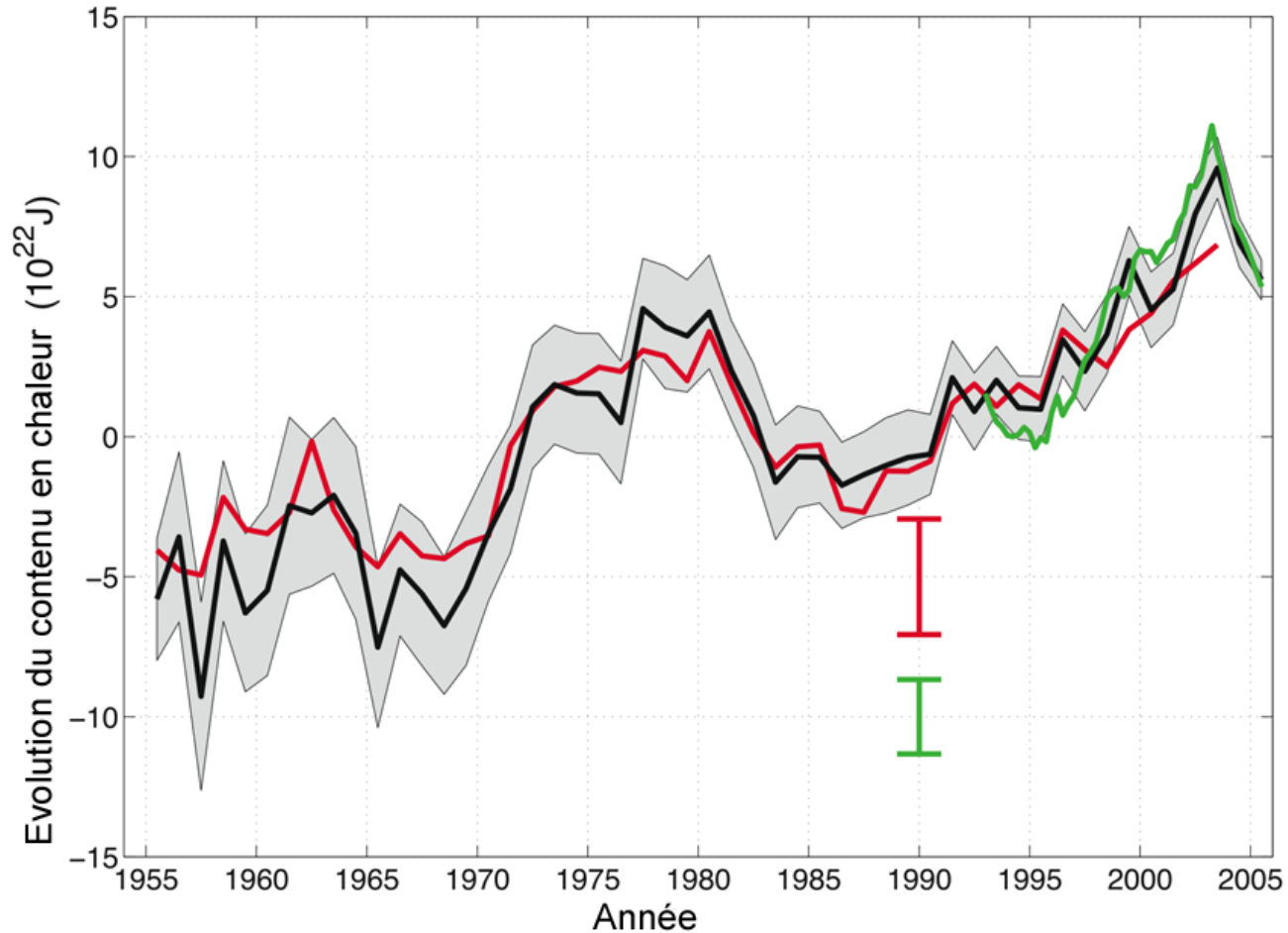
## Cas particulier de l'arctique :

- Ouverture de la route maritime Atlantique ↔ Pacifique
- Exploitation des ressources minières (pétrole ...)

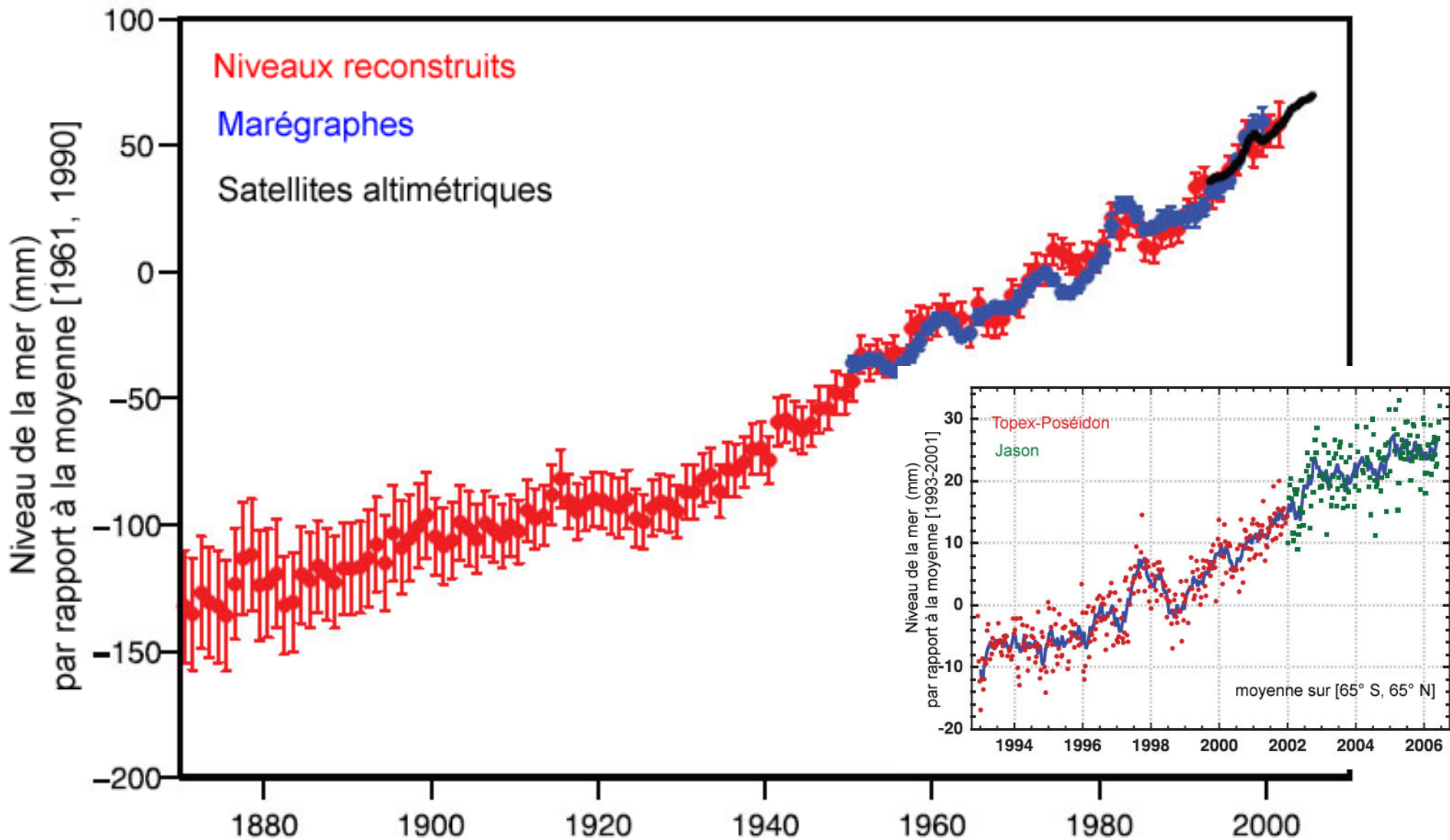


# Contenu en chaleur de l'océan [0 - 700 m]

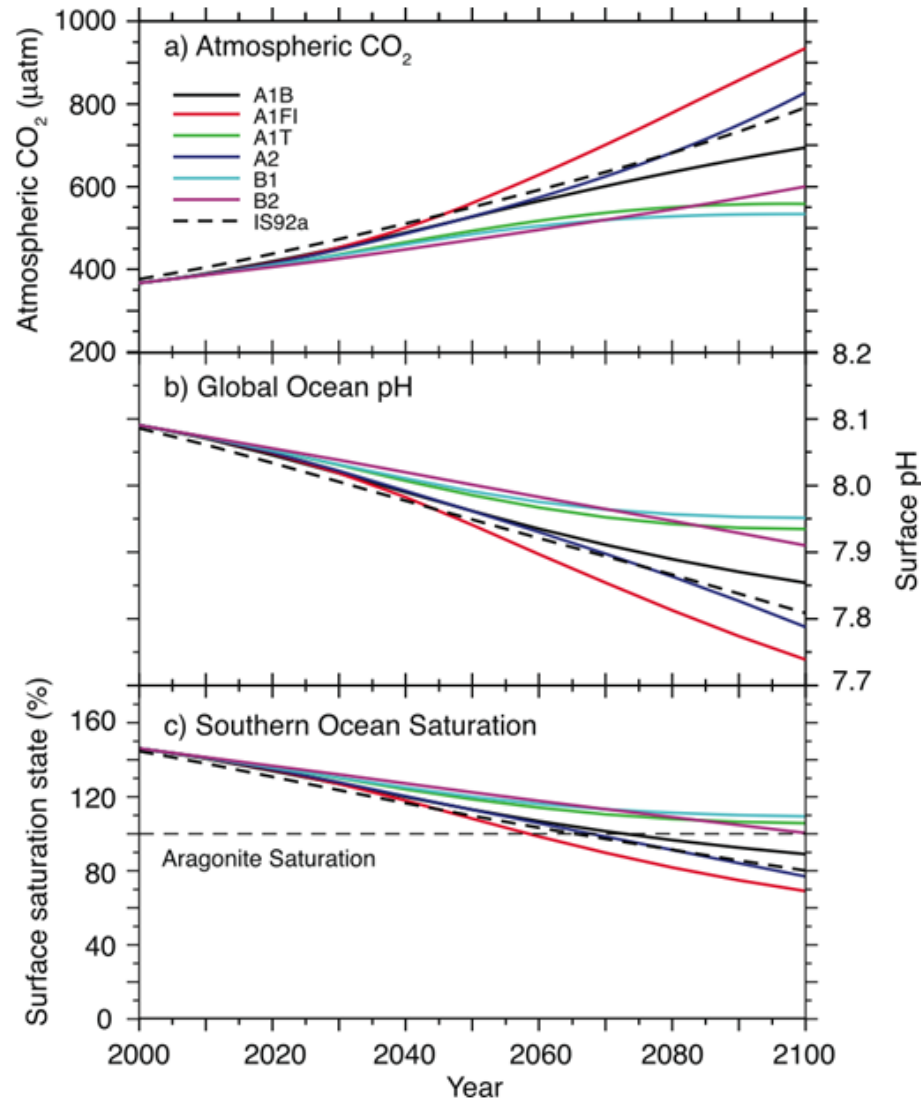
écart par rapport à la moyenne de [1961, 1990]



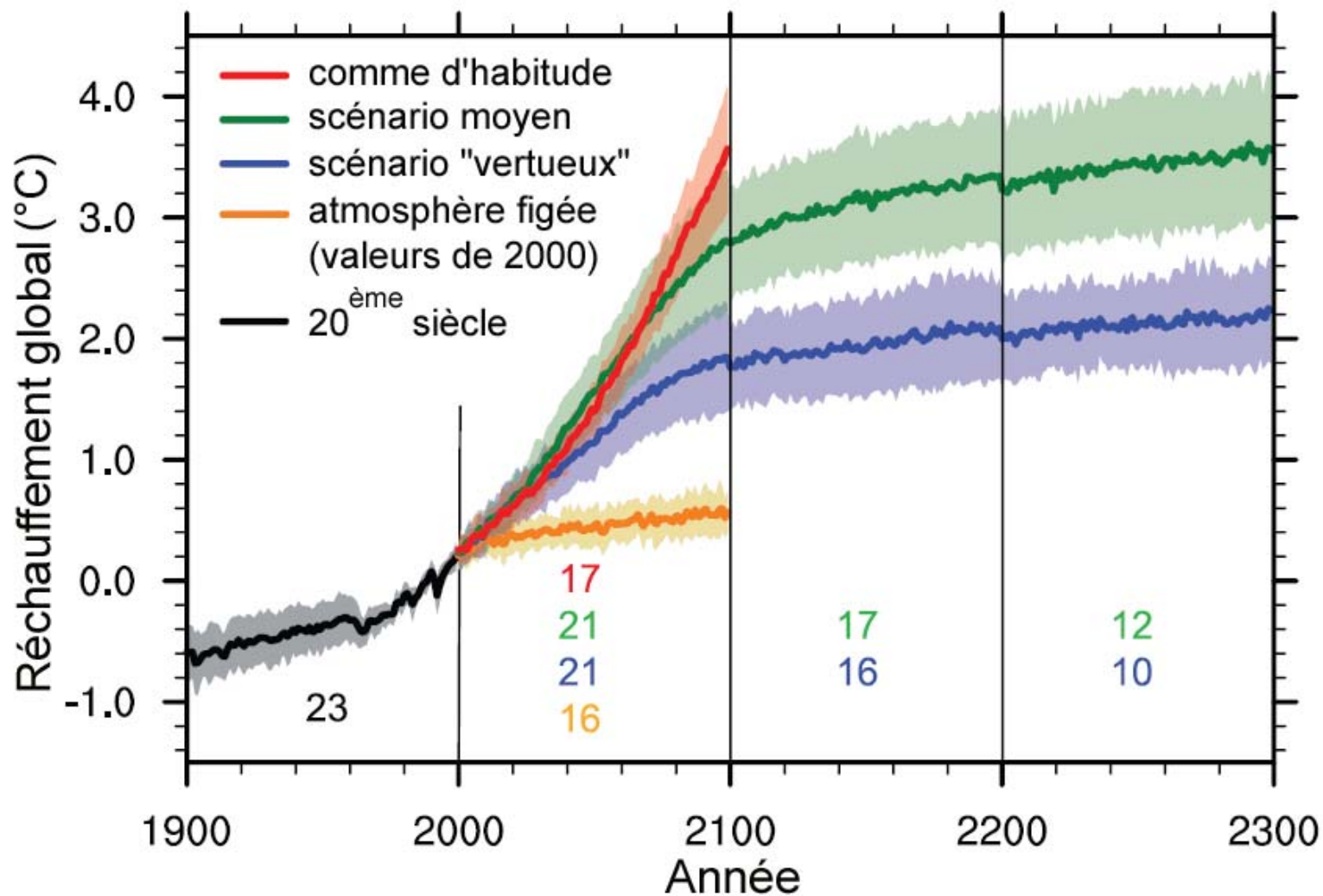
# Niveau de la mer depuis 1870



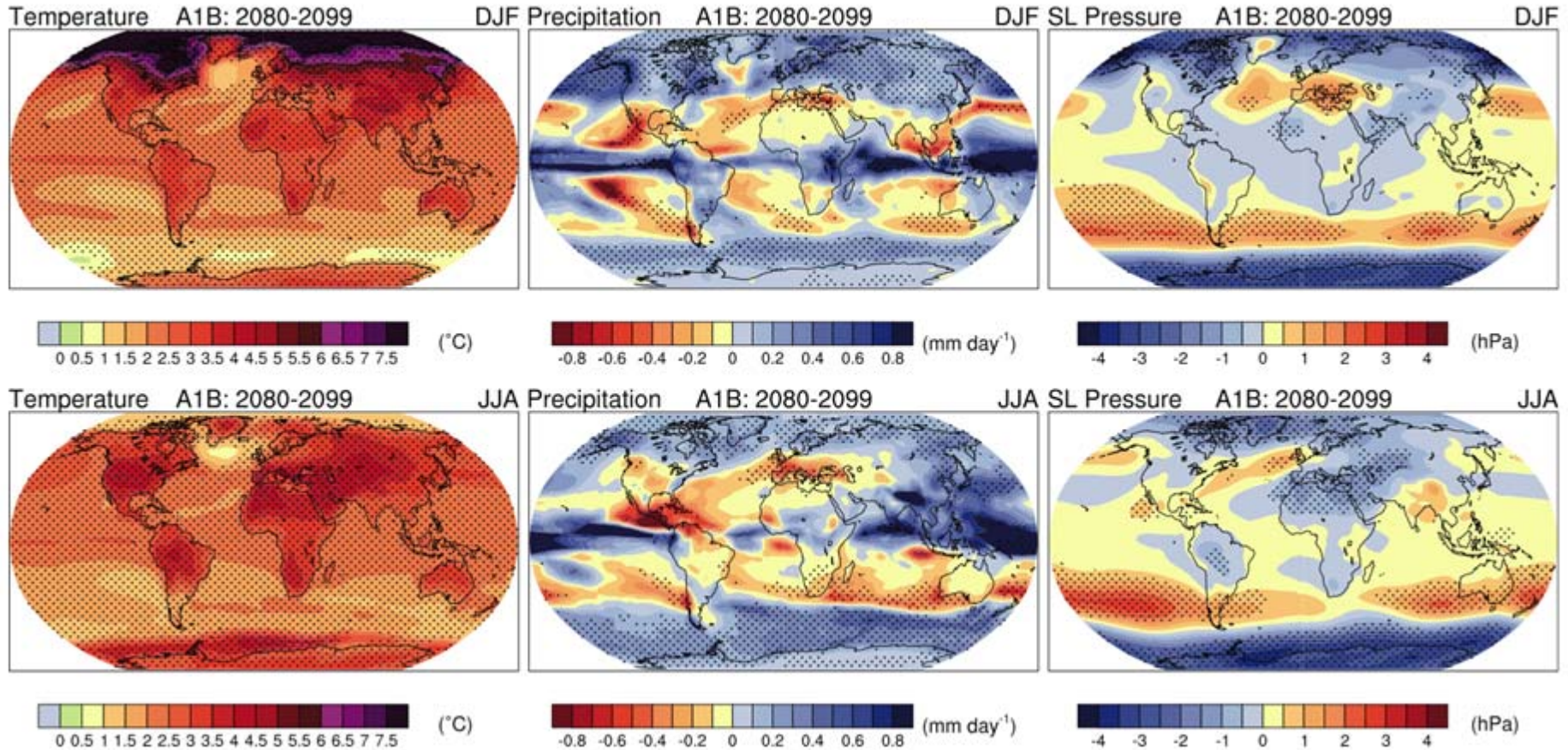
# pH et saturation de l'aragonite pour l'océan austral



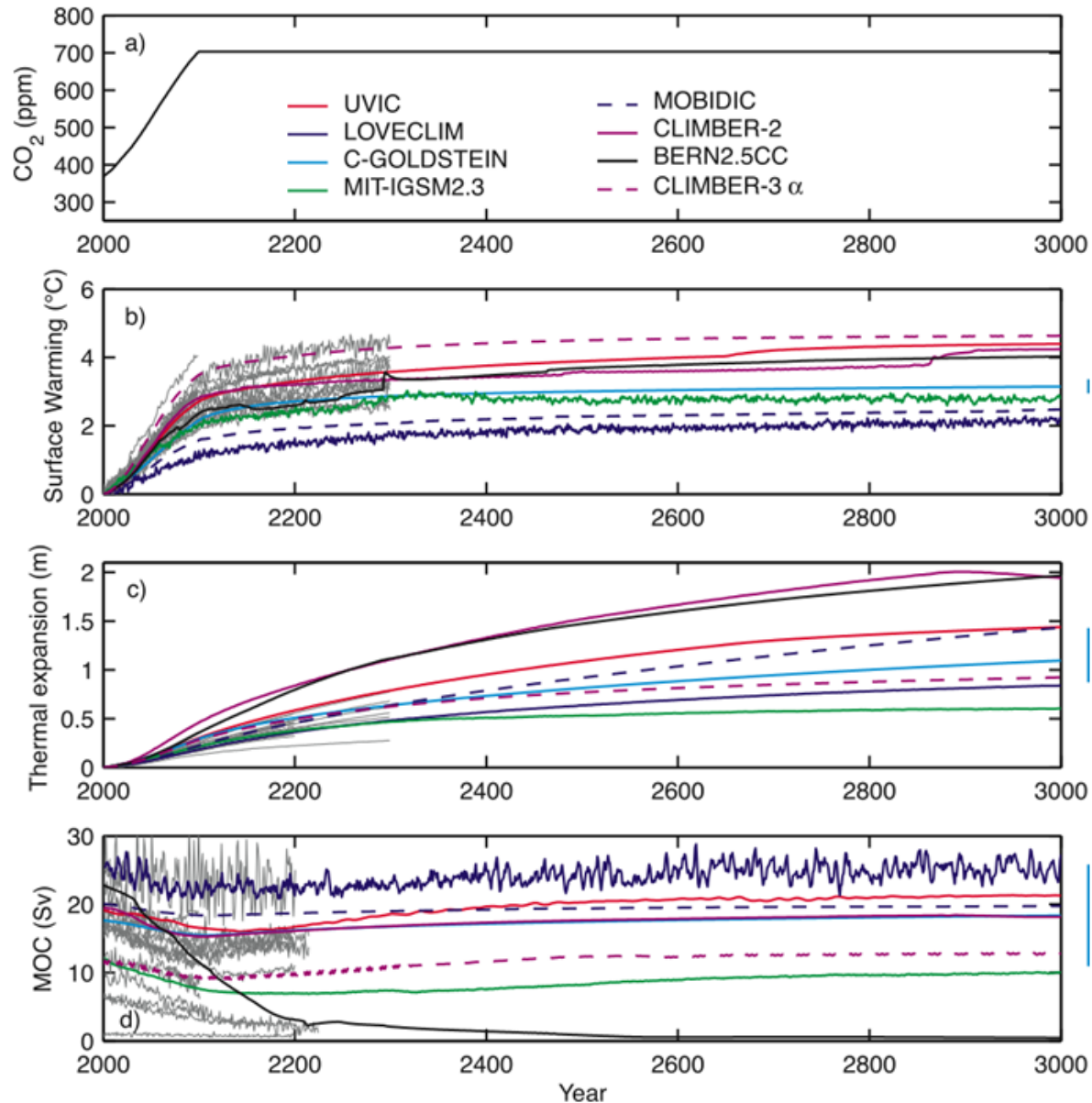
# Réchauffement global simulé



# Climat en 2090

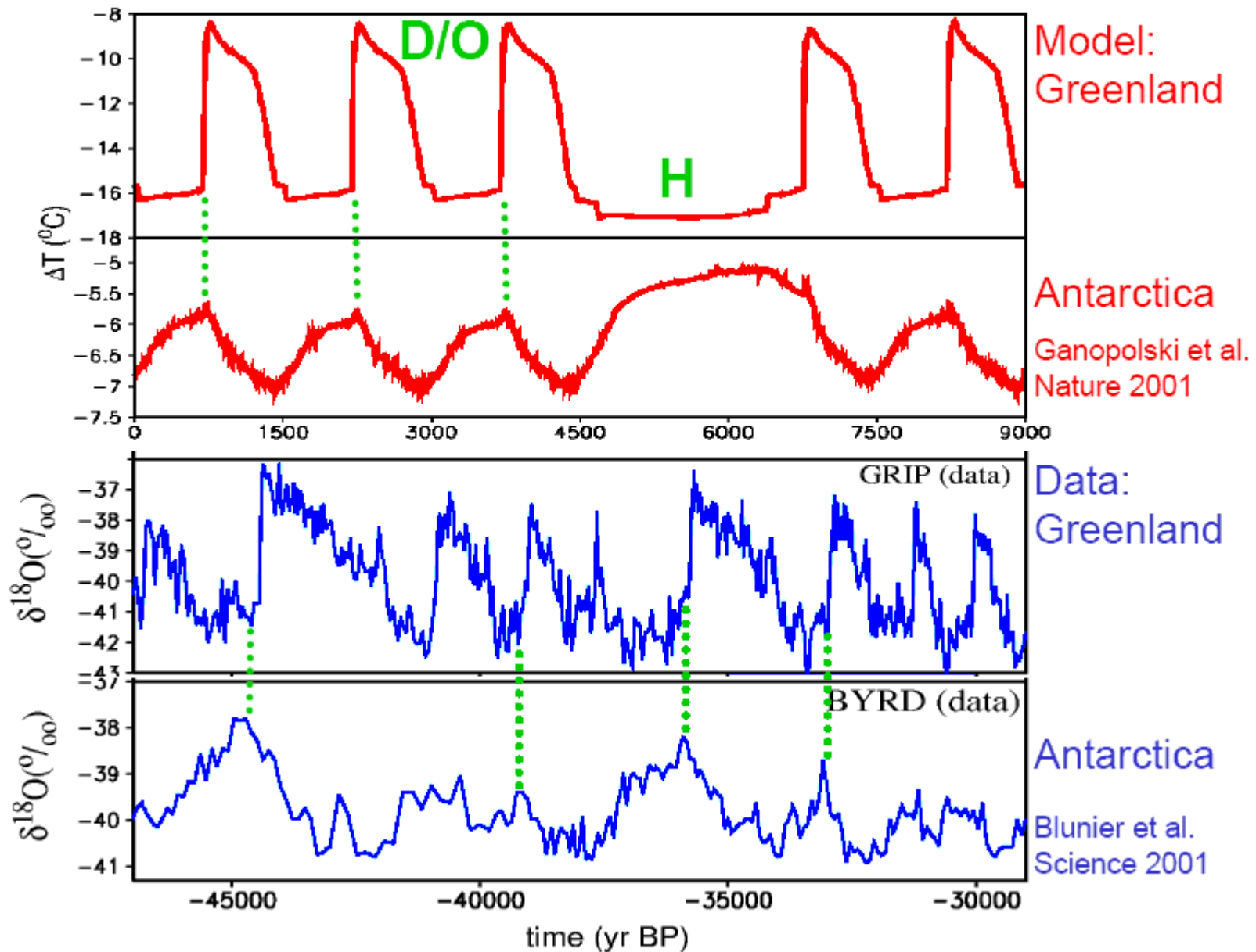


# Evolutions avec un scénario de stabilisation du $CO_2$

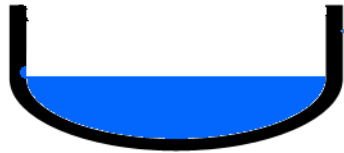




# Transitions climatiques abruptes



# transitions rapides



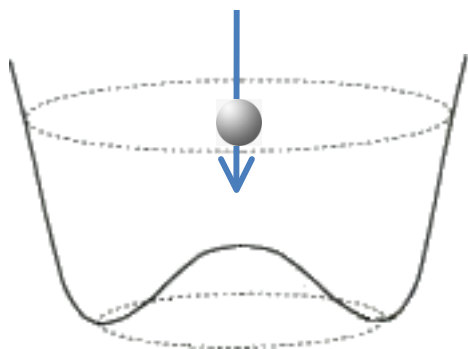
*comment faire arriver  
l'eau à ce niveau ?*



*par un mouvement  
de bascule*



*en ajoutant de l'eau*



Question pour le météorologue :  
quel va être le chemin de la bille et où va-t-elle s'arrêter?

Question pour le climatologue :  
si on répète l'expérience un grand nombre de fois, quelle sera la répartition des chemins et des positions finales des billes ?