

# *Le rôle des océans dans le système climatique*

***La circulation générale***

***Couplage et système climatique***

***Questions pour le 21<sup>ème</sup> siècle***



# Quelques chiffres pour décrire l'océan

## 70% de la surface terrestre, 97% son eau

- ▲ *Température :*
- ▲ **de -1,8°C dans les régions polaires à 32°C dans les mers semi-fermées**
- ▲ **75% de l'océan entre 0°C et 4°C**
  
- ▲ *Salinité :*
- ▲ **De 33 psu (g/kg) à 37 psu (g/kg)**
- ▲ **75% de l'océan entre 34,4 et 34,7**
  
- ▲ *Densité  $\rho$  (T, S, p):*
- ▲ **où  $\rho_m = 1025 \text{ kg/m}^3$  (  $1000 \times \rho_a$  ) de 1023 to 1028**
- ▲  **$\sigma = \rho_m - 1000$**
  
- ▲ *Capacité thermique*
- ▲ **Très supérieure à celle de l'air**
- ▲ **2,5 m d'eau = toute la colonne d'air**



# Un fluide sur une Terre en rotation

Chaque point lié à la terre a une vitesse intrinsèque vers l'est, fonction de la latitude (vitesse maximale à l'équateur).

Chaque point lié à la terre a une capacité de rotation intrinsèque : vorticité planétaire  $f$

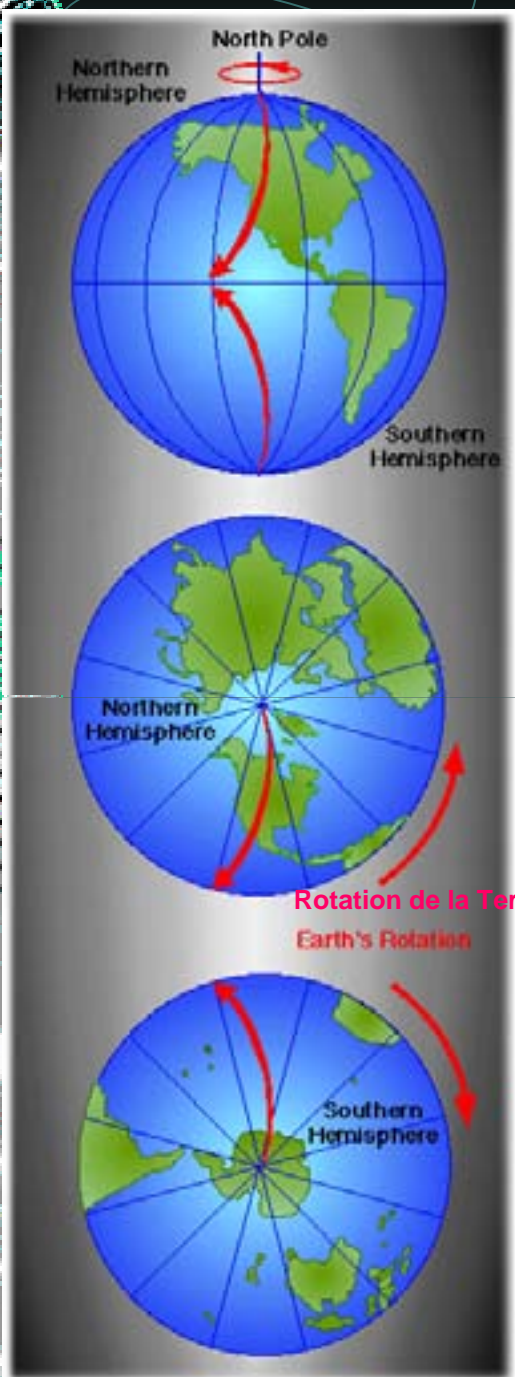
⇒ Rotation positive dans hémisphère nord, maximale au Pôle nord

⇒ Négative dans hémisphère sud

⇒ Zéro à l'équateur

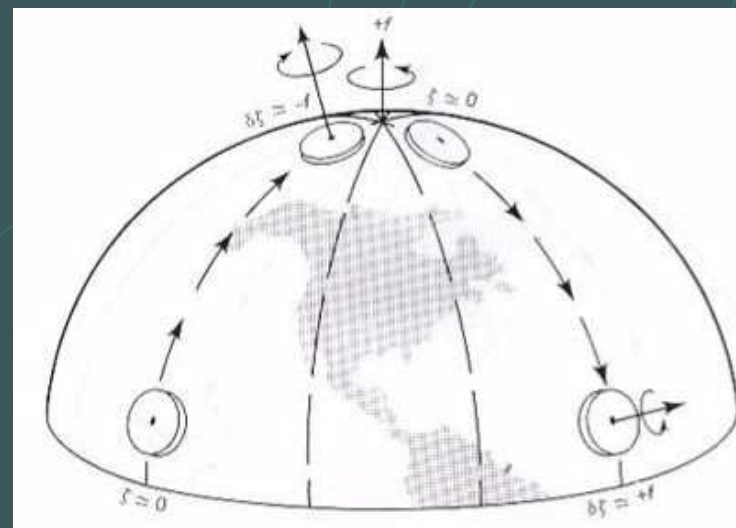
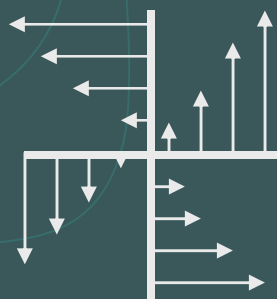
Vorticité totale :  $\zeta_t = \zeta + f$  où  $\zeta$  est la vorticité relative

Propriété conservative lors d'un déplacement sur la sphère



Rotation de la Terre  
Earth's Rotation

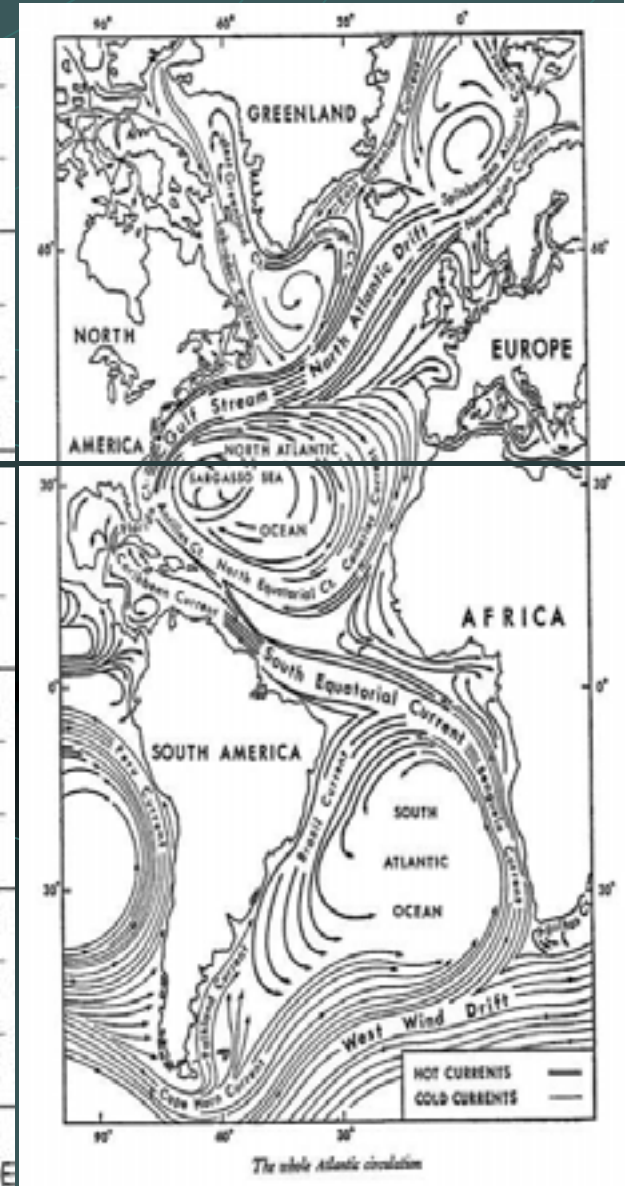
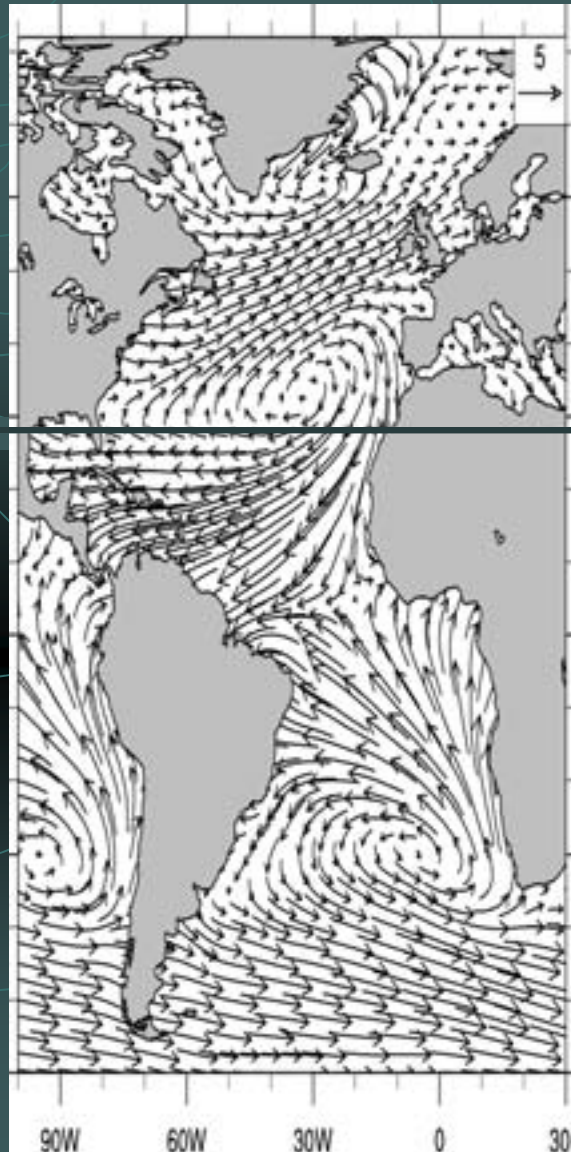
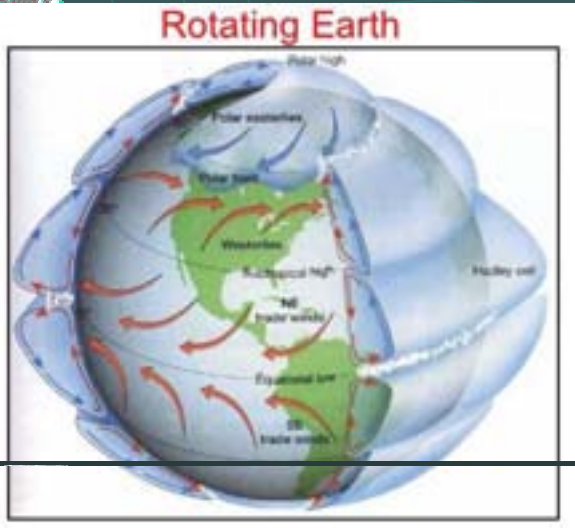
Ex: vorticité positive



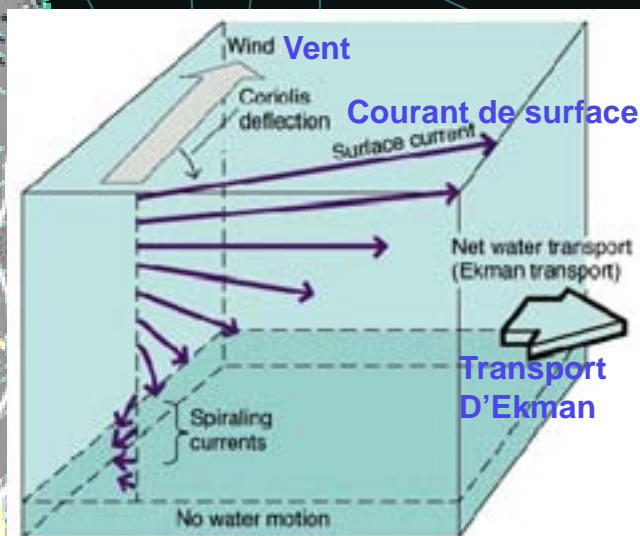
# Les vents entraînent l'océan qui freine les basses couches de l'atmosphère

Courant de surface

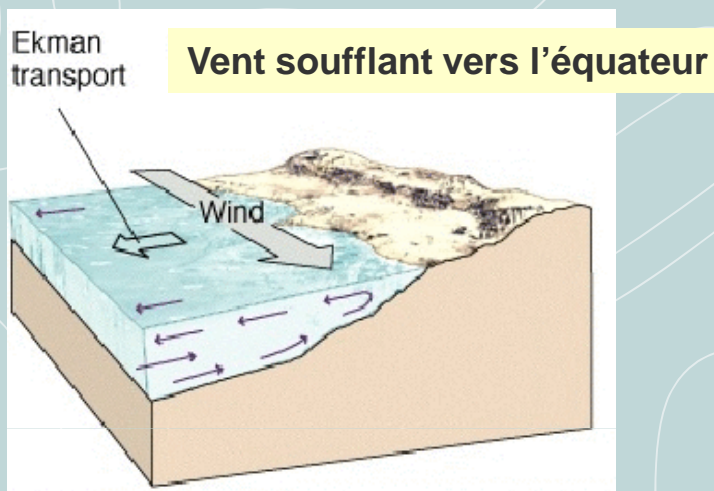
Vent de surface



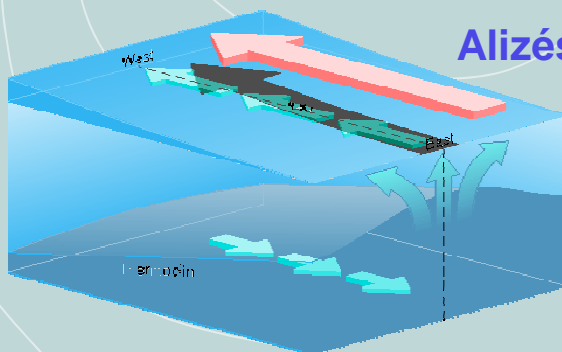
Sur une Terre en rotation



# Tension de vent et rotation : Théorie du transport d'Ekman



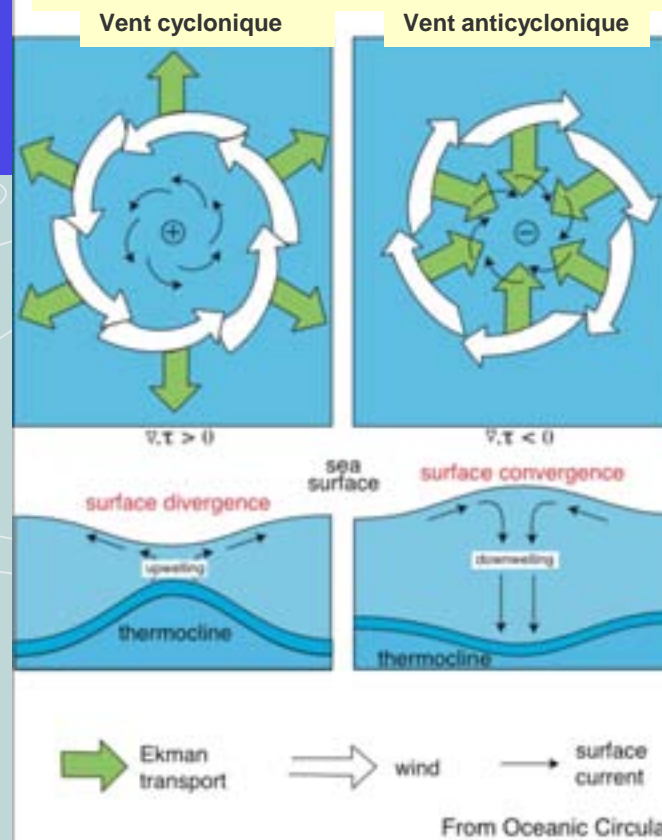
Upwelling côtier :  $T_E$  vers le large



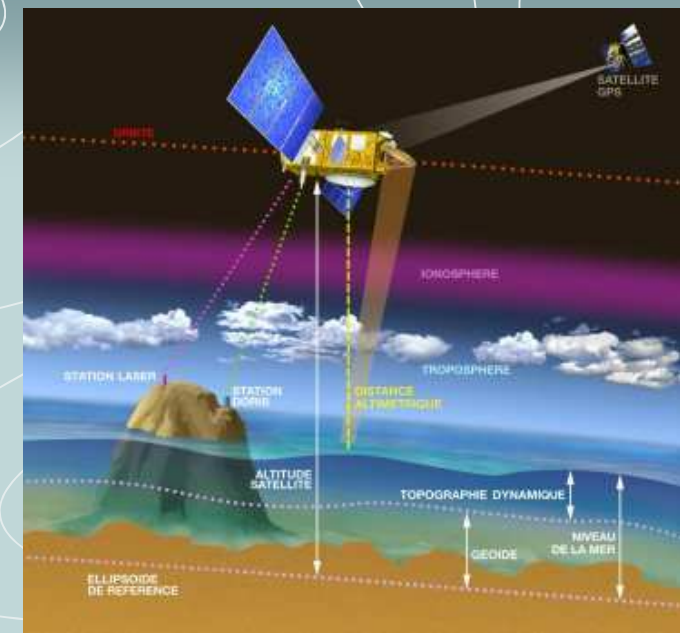
Alizés le long de l'équateur

Upwelling équatorial:  
 $T_E$  vers les pôles

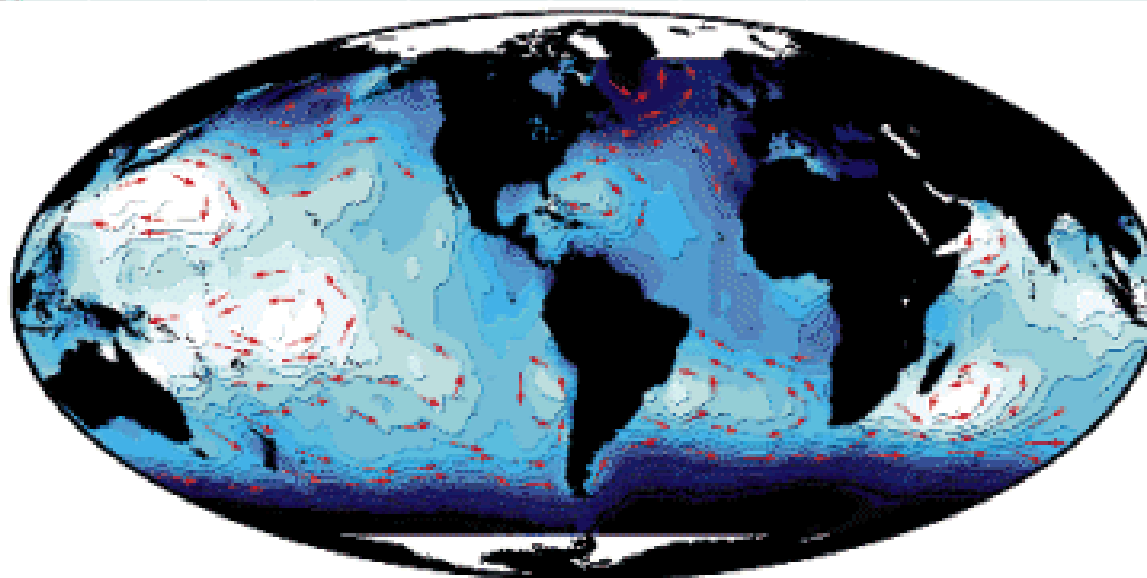
## Hémisphère Nord – Pompage d'Ekman



# Observer la surface de l'océan depuis l'espace



Sea surface dynamic topography as observed by Topex/Poseidon

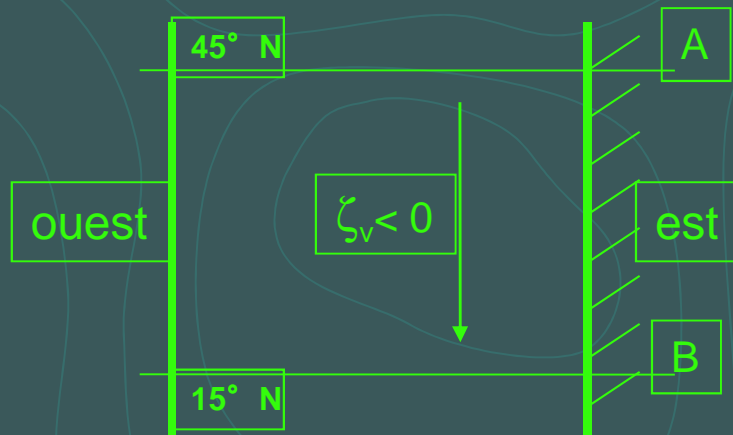


-10.00 -5.00 0.00 5.00 10.00

# ouest

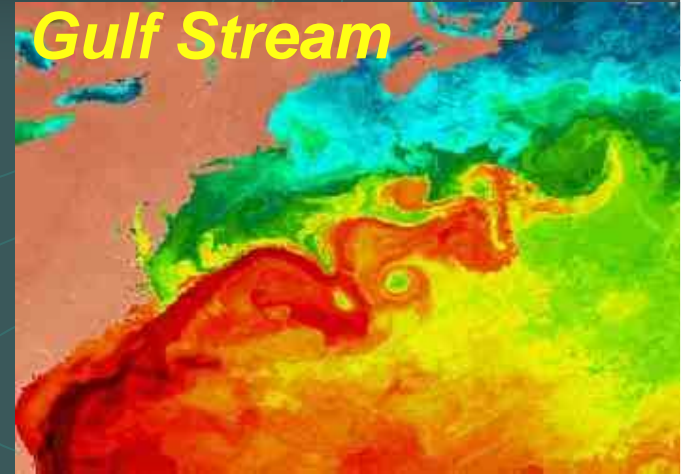
*Théorie de Sverdrup : calcule le flux de masse méridien en fonction du rotationnel de vent.*

*La masse fluide se déplace de A vers B pour réduire sa vorticité totale, afin d'équilibrer l'ajout de vorticité négative que lui impose le vent*

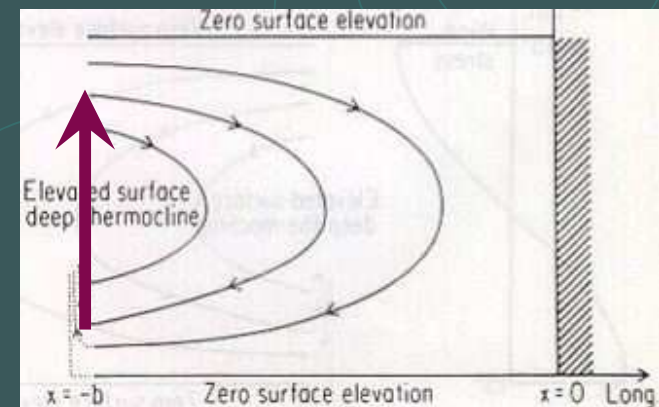


*La conservation de la masse implique un flux de retour du sud vers le nord le long de la frontière ouest.*

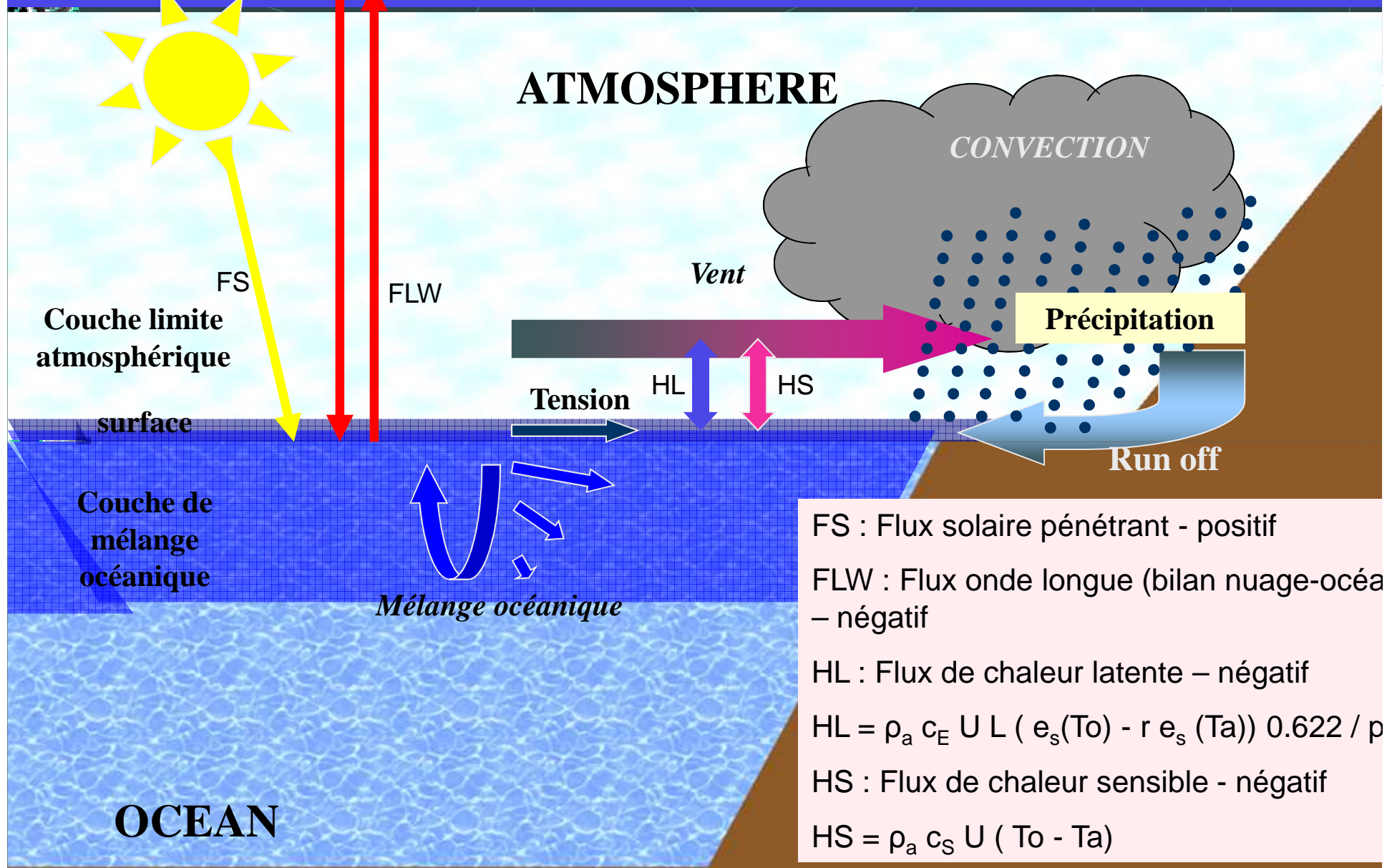
## Gulf Stream



*Les courants de bord ouest, concentrés et forts, ont une amplitude très supérieure à celle de la théorie linéaire*



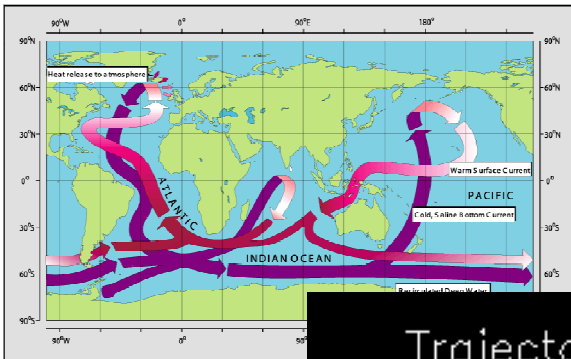
Une meilleure connaissance de l'océan pour améliorer l'atmosphère



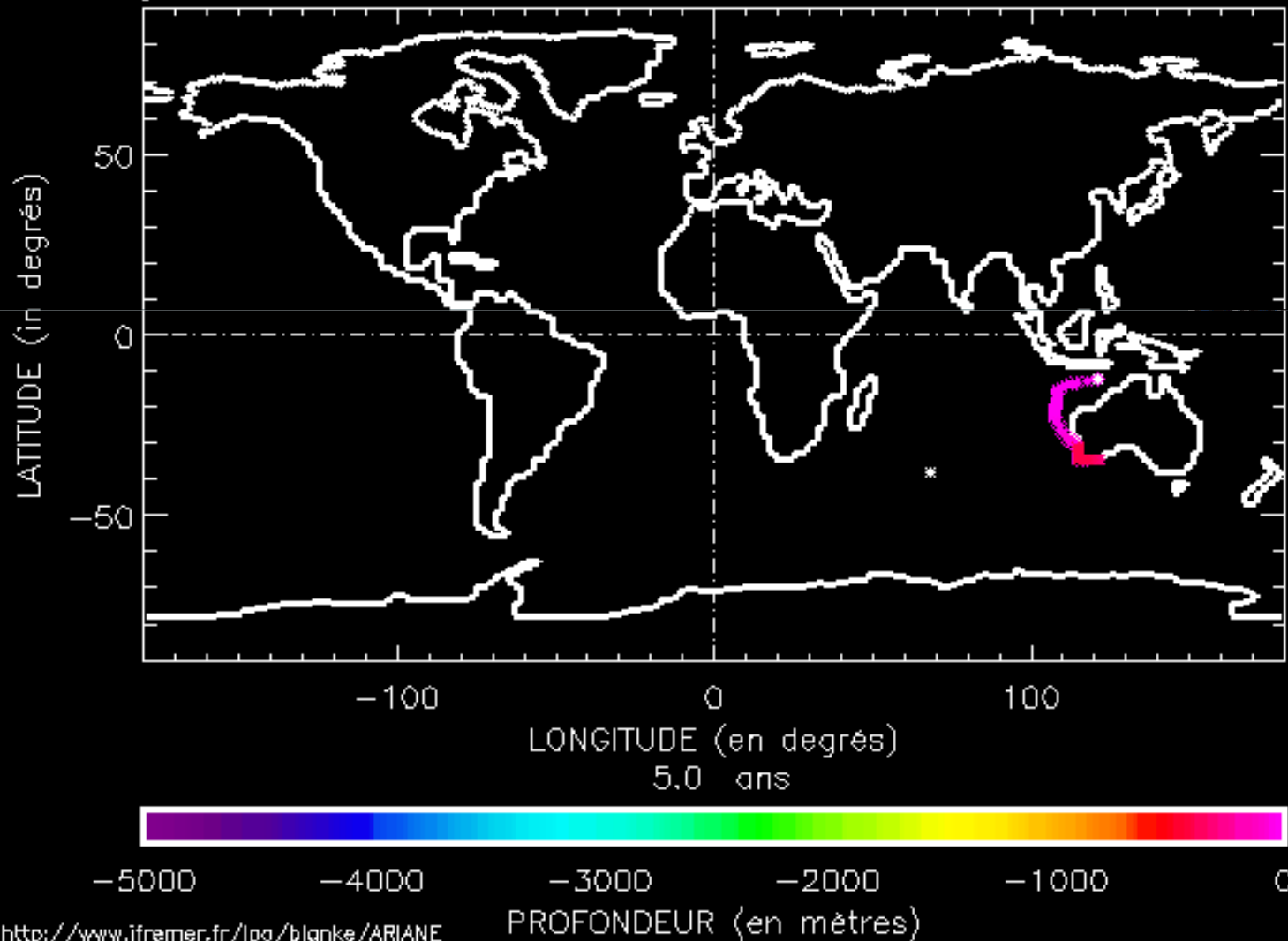
Une meilleure connaissance de l'atmosphère pour améliorer l'océan



# Le tapis roulant de la circulation générale



Trajectoires dans un Modèle de Circulation Générale Océanique



# Echelles caractéristiques

- ▶ *Latitudes tropicales*
  - ▶ *Rayon interne : 300 km*
  - ▶ *Courants feuilletés*
  - ▶ *Anisotropie :  $L_x = 800 \text{ km}$   $L_y = 100 \text{ km}$*
  - ▶ *Echelle de temps : quelques mois*
- ▶ *Moyennes latitudes*
  - ▶ *Rayon interne : 50 km*
  - ▶ *Courant de bord ouest : 30 - 80 km*
  - ▶ *Echelles de temps : décennies*
- ▶ *Hautes latitudes*
  - ▶ *Rayon interne: 10 - 30 km*
  - ▶ *Processus intermittent : convection*
- ▶ *Circulation thermohaline (ou tapis roulant)*
  - ▶ *advection-diffusion : 1000 ans*



# *Océan : mémoire du climat*

## *Atmosphère*

- Rapide (jours-semaines)
- Peu de mémoire
- Réchauffée par le bas: instable

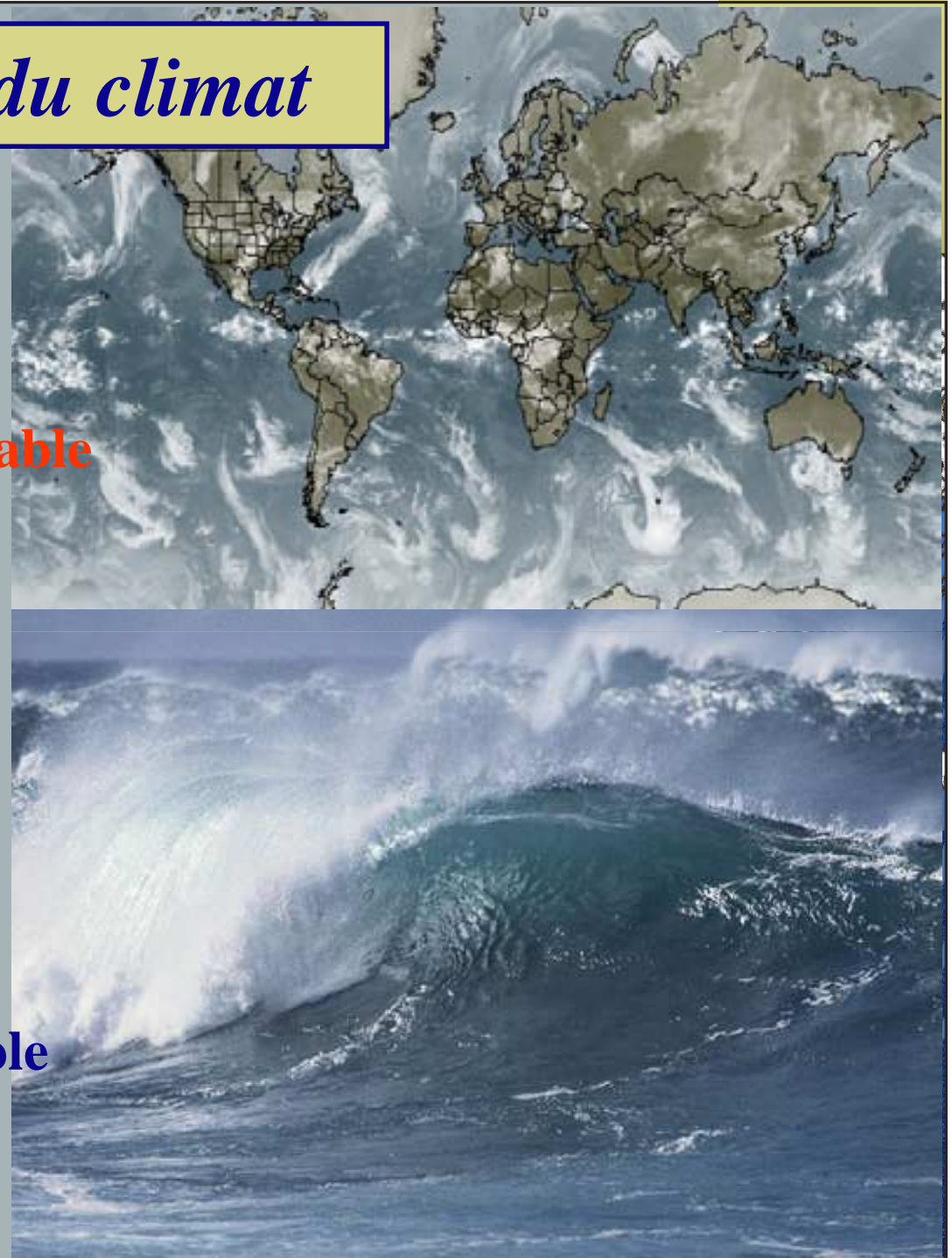


Tension de vent  
Flux de chaleur  
Précipitation-  
évaporation

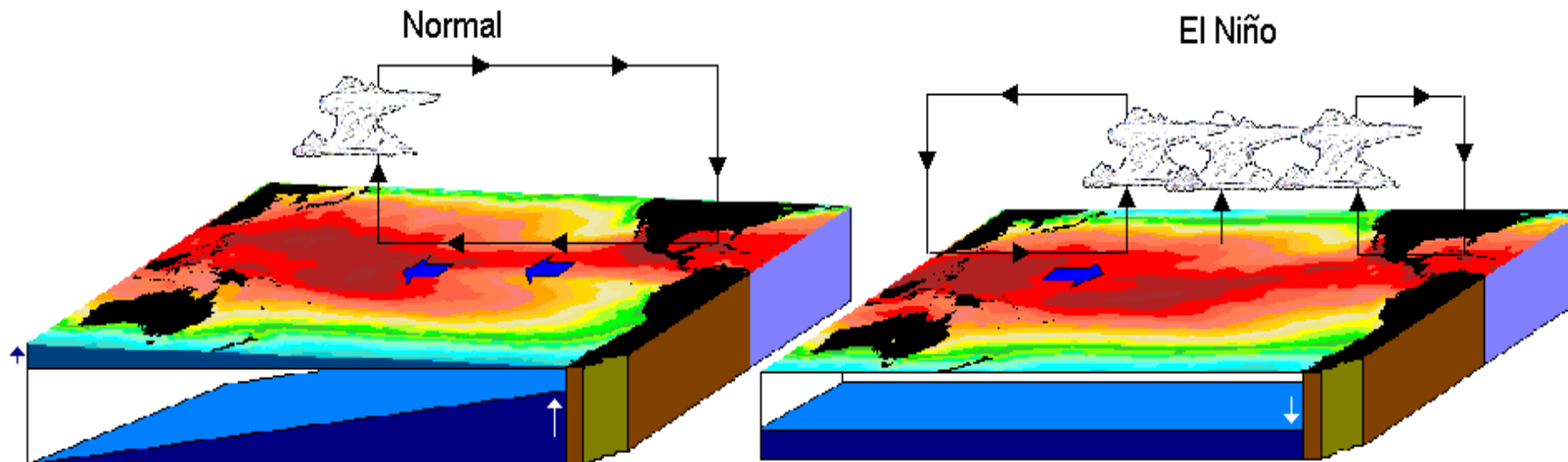
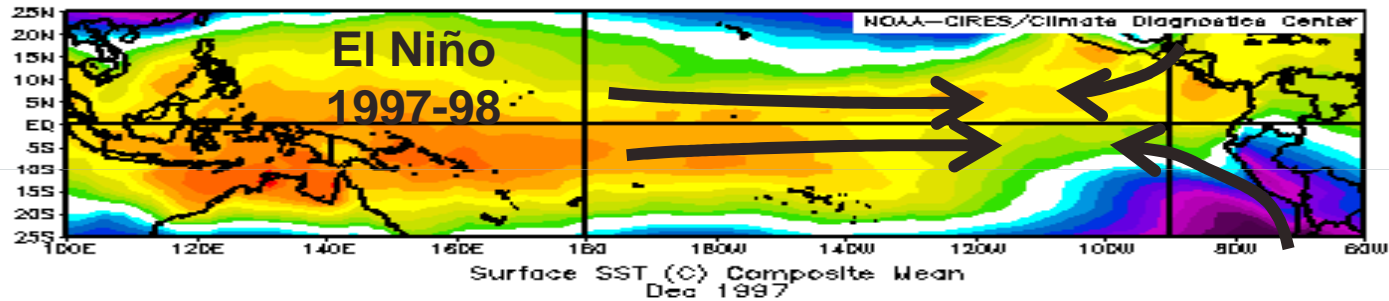
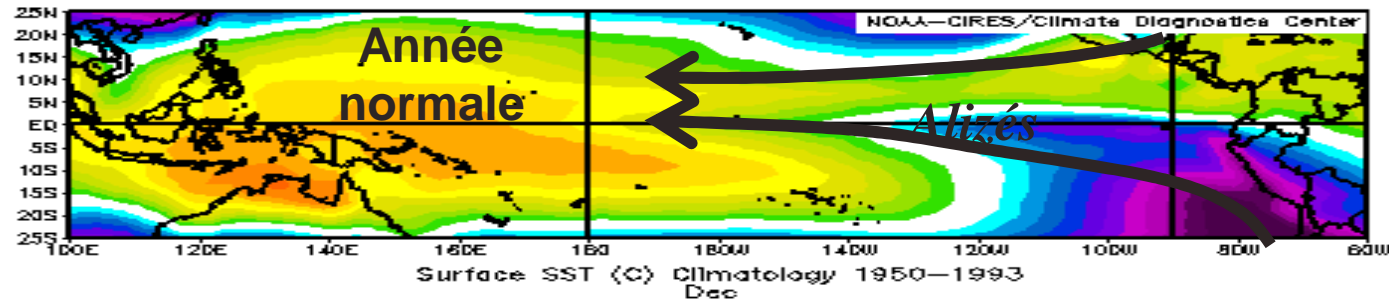


## *Océan*

- Lent (saison - 1000 ans)
- Inertie thermique
- Réchauffé par le haut :stable
- Rayonnement pénétrant



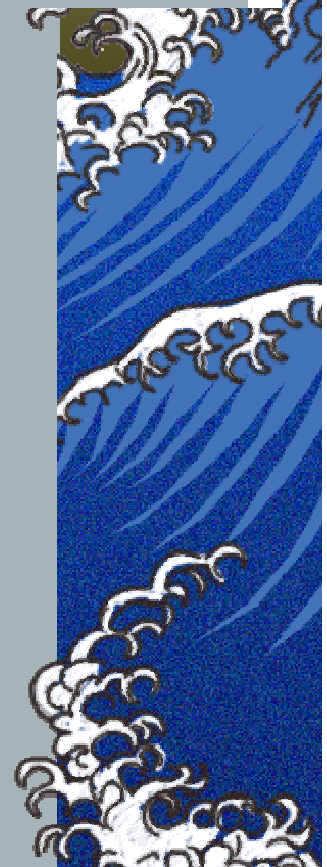
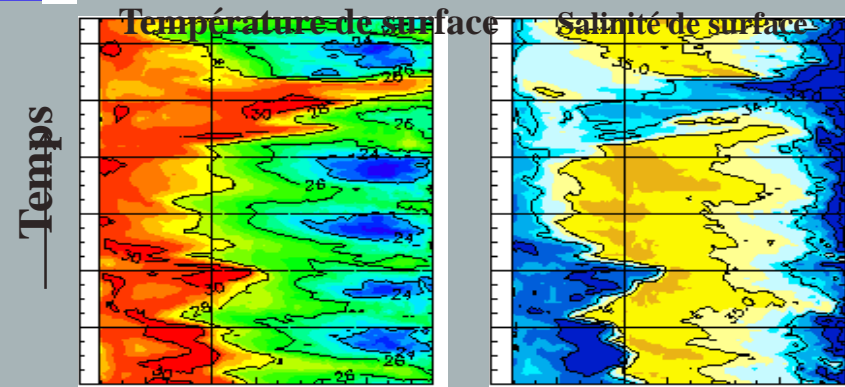
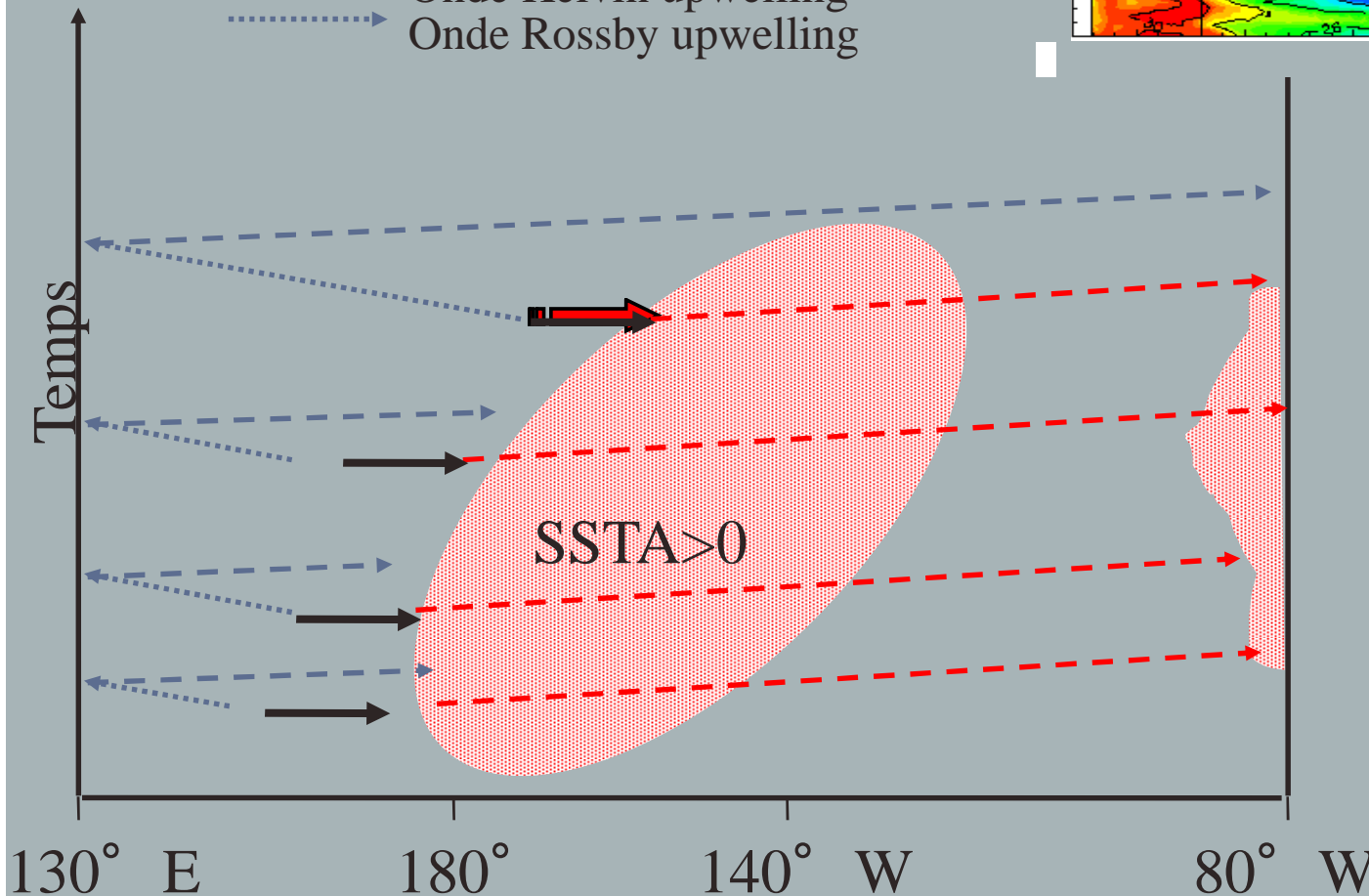
# Caractéristiques d'un événement El Niño

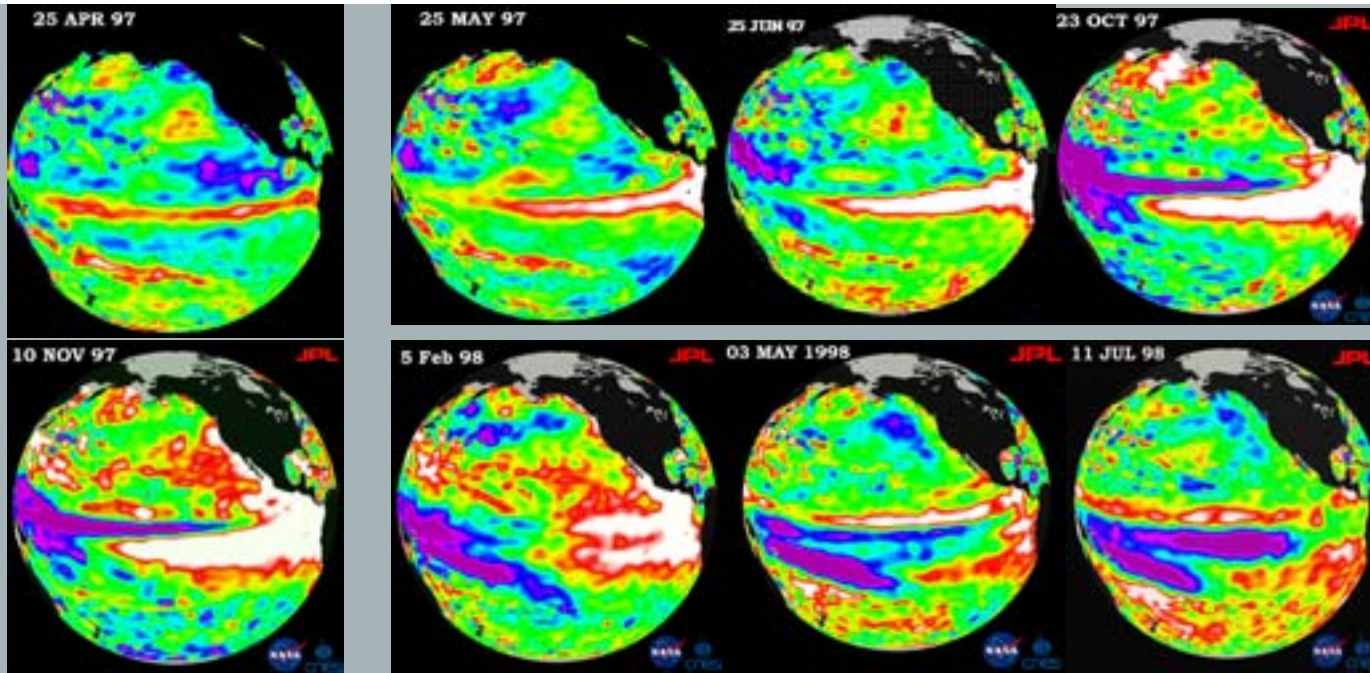


# Quels sont les mécanismes El Niño ?

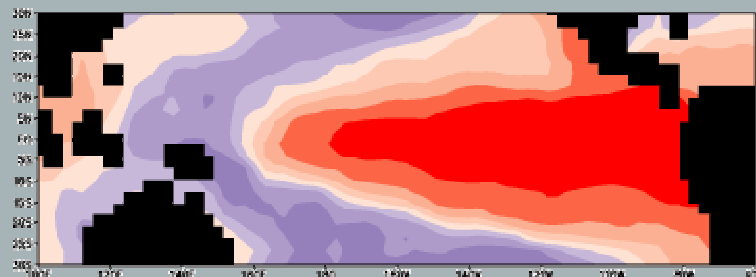
## L'oscillateur retardé

- Anomalies de vent d'ouest
- - - - -> Onde Kelvin downwelling
- - - - -> Onde Kelvin upwelling
- ⋯⋯⋯> Onde Rossby upwelling

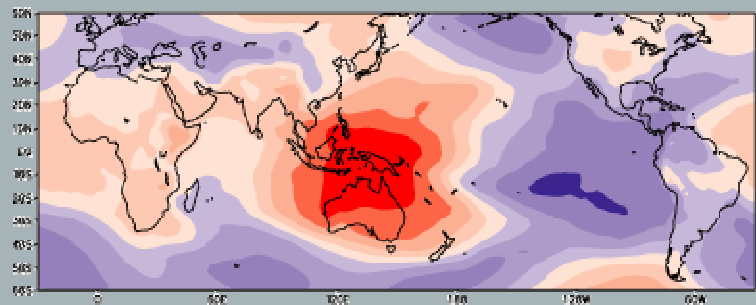




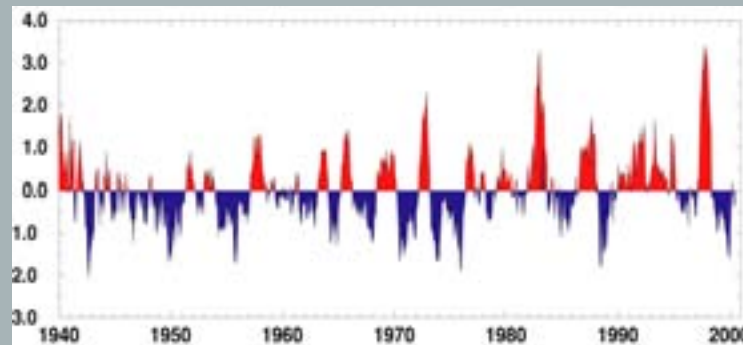
**El Niño**



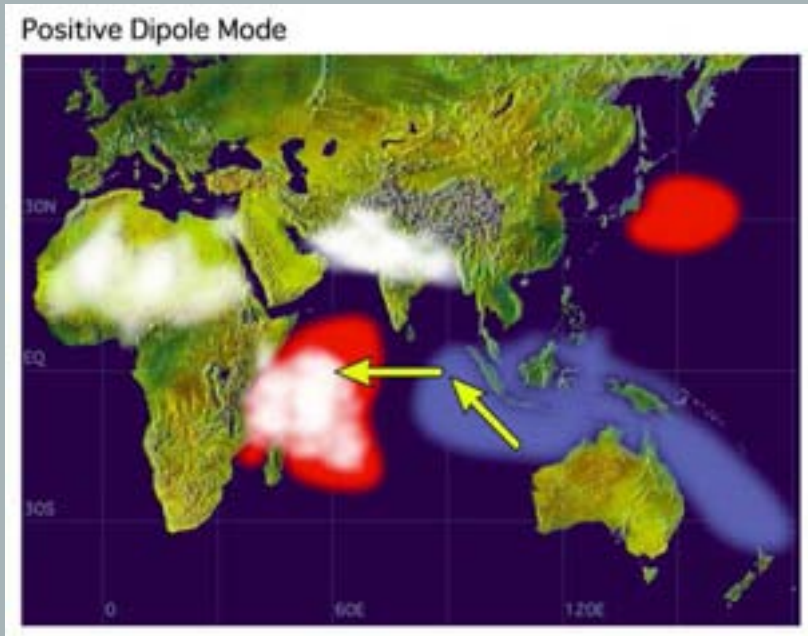
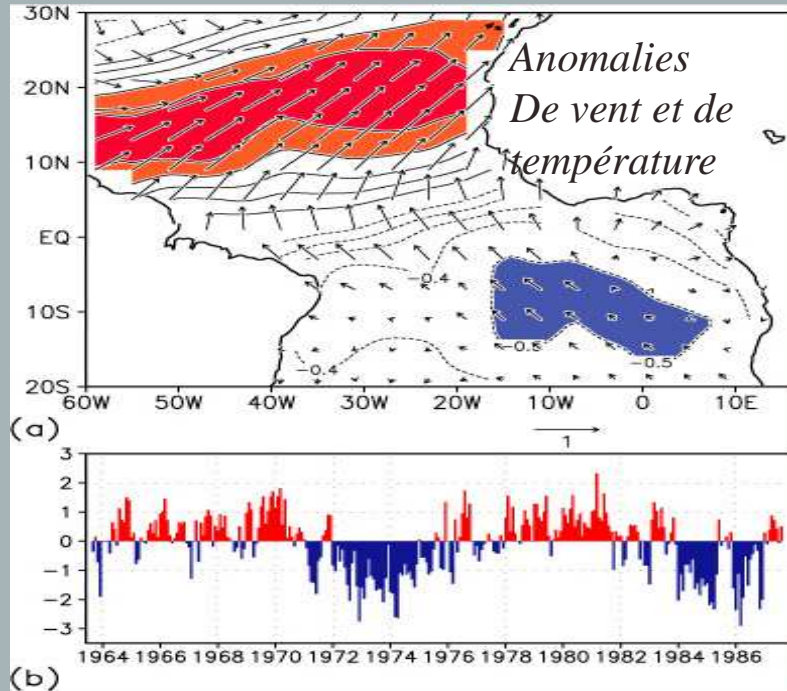
**Southern Oscillation**



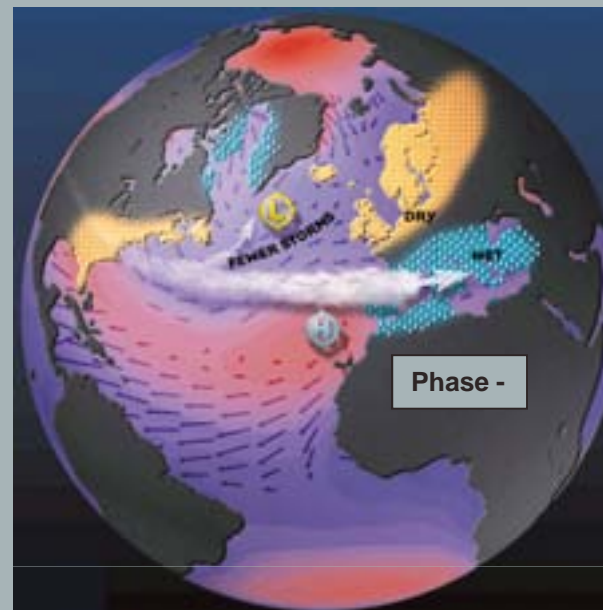
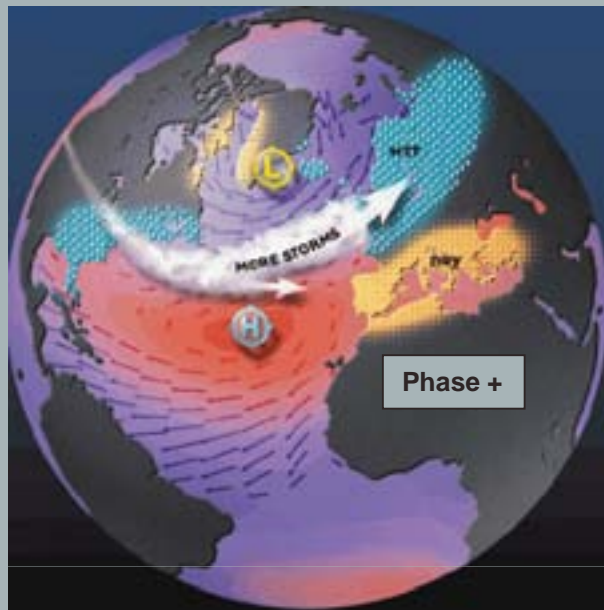
*ENSO :  
Une histoire complexe*



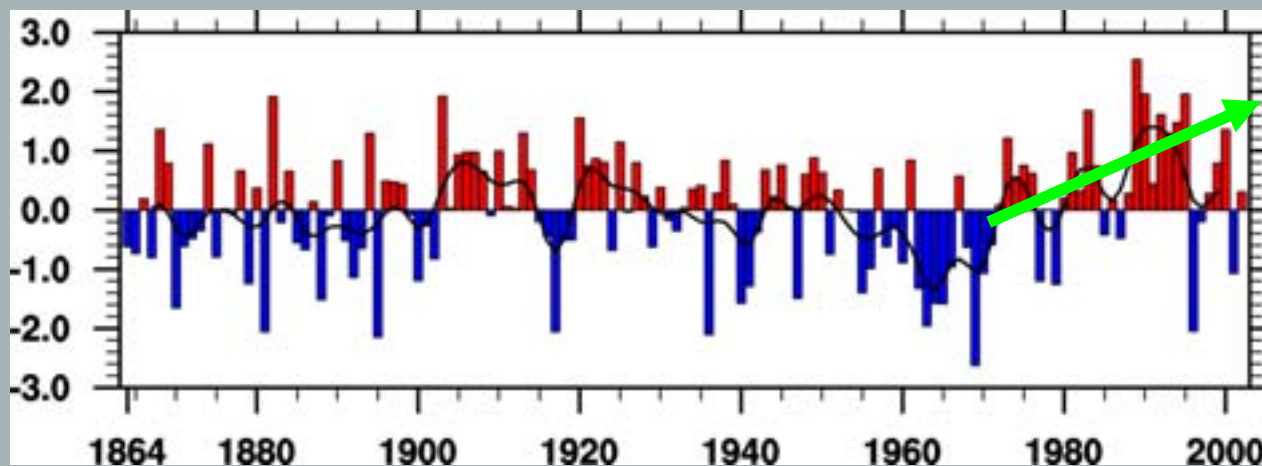
# Les autres océans tropicaux



# Oscillation Nord Atlantique (NAO)



fluctuation simultanée et statique  
De la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores

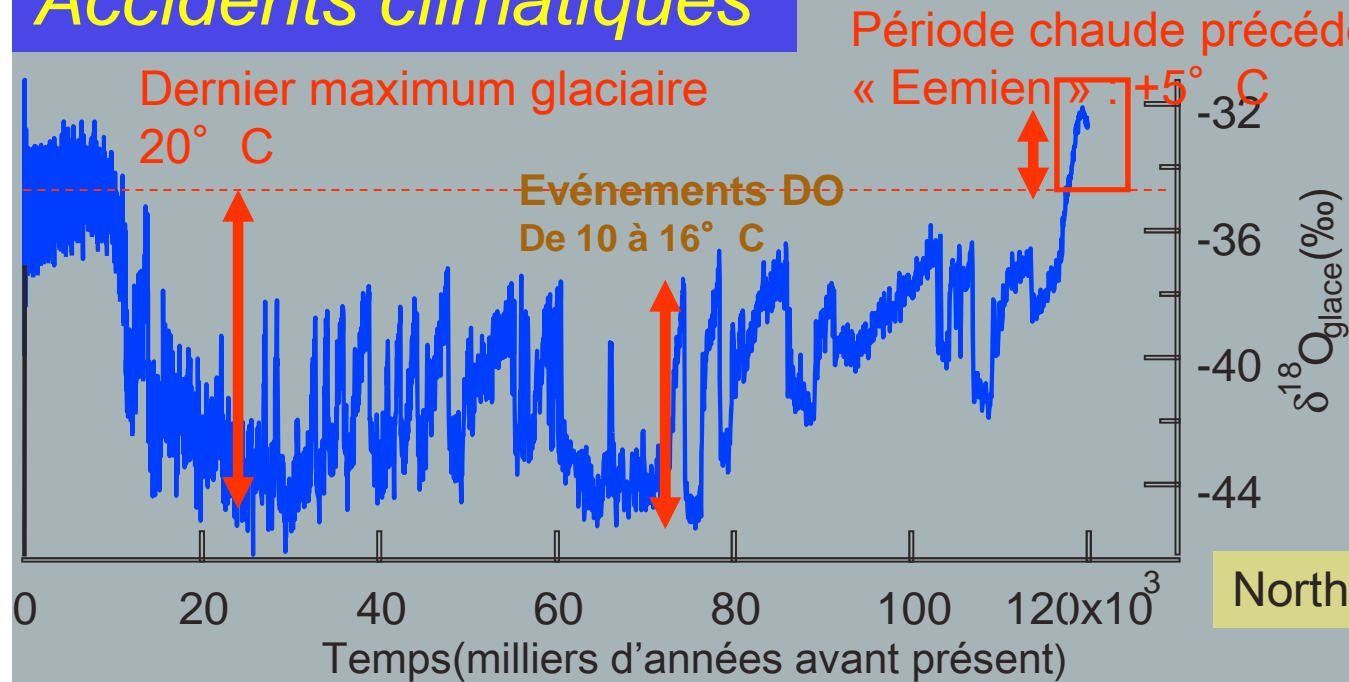


Pas de fréquence privilégiée

Tendance positive  
depuis les années 80



# Accidents climatiques



NorthGRIP, Nature, 2004



FIGURE 3. DURING A HEINRICH EVENT, icebergs surge into the North Atlantic Ocean. The lower panel illustrates the entrainment of debris (black) by icebergs and the subsequent sedimentation of the debris in the deep North Atlantic.

250  $\mu\text{m}$   
sédiment glaciaire de l'Atlantique Nord



sédiment des niveaux de Heinrich

## Evénement d'Heinrich

sédiments détritiques jusqu'au milieu de l'Atlantique nord (40° N to 55° N)

=> Les icebergs atteignent le détroit de Gibraltar.

# Un monde où la concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) croît

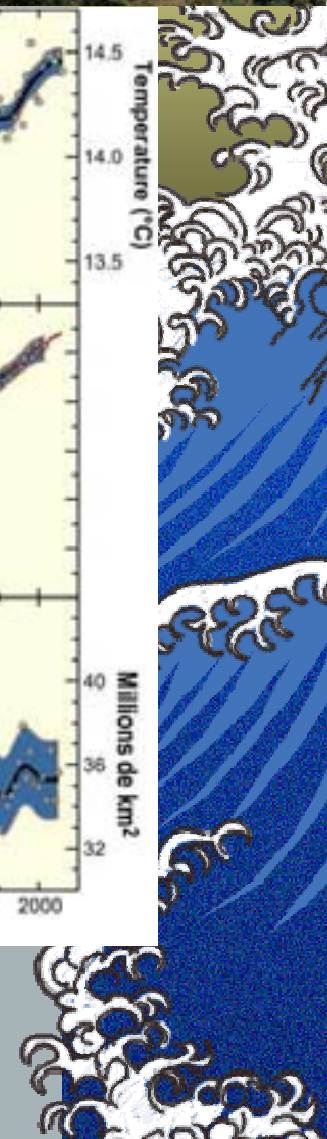
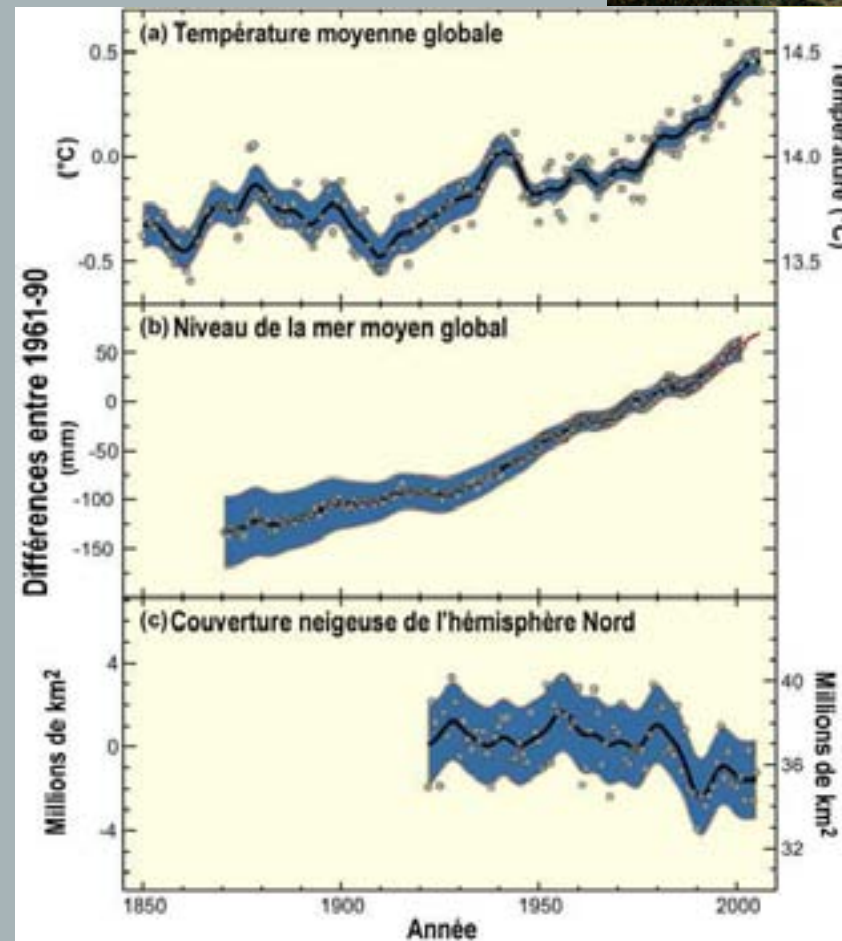
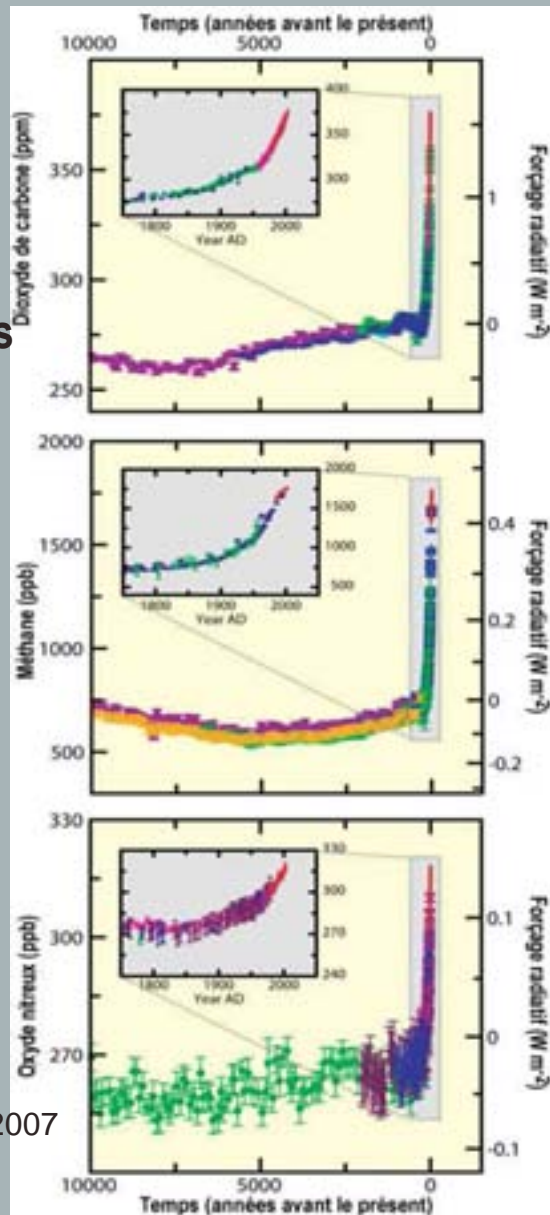


CO<sub>2</sub>  
+36 %  
depuis  
250 ans

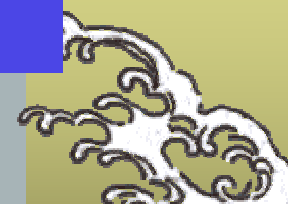
CH<sub>4</sub>  
+30 %  
depuis  
25 ans  
12 ans

N<sub>2</sub>O  
114 ans

GIEC AR4, 2007

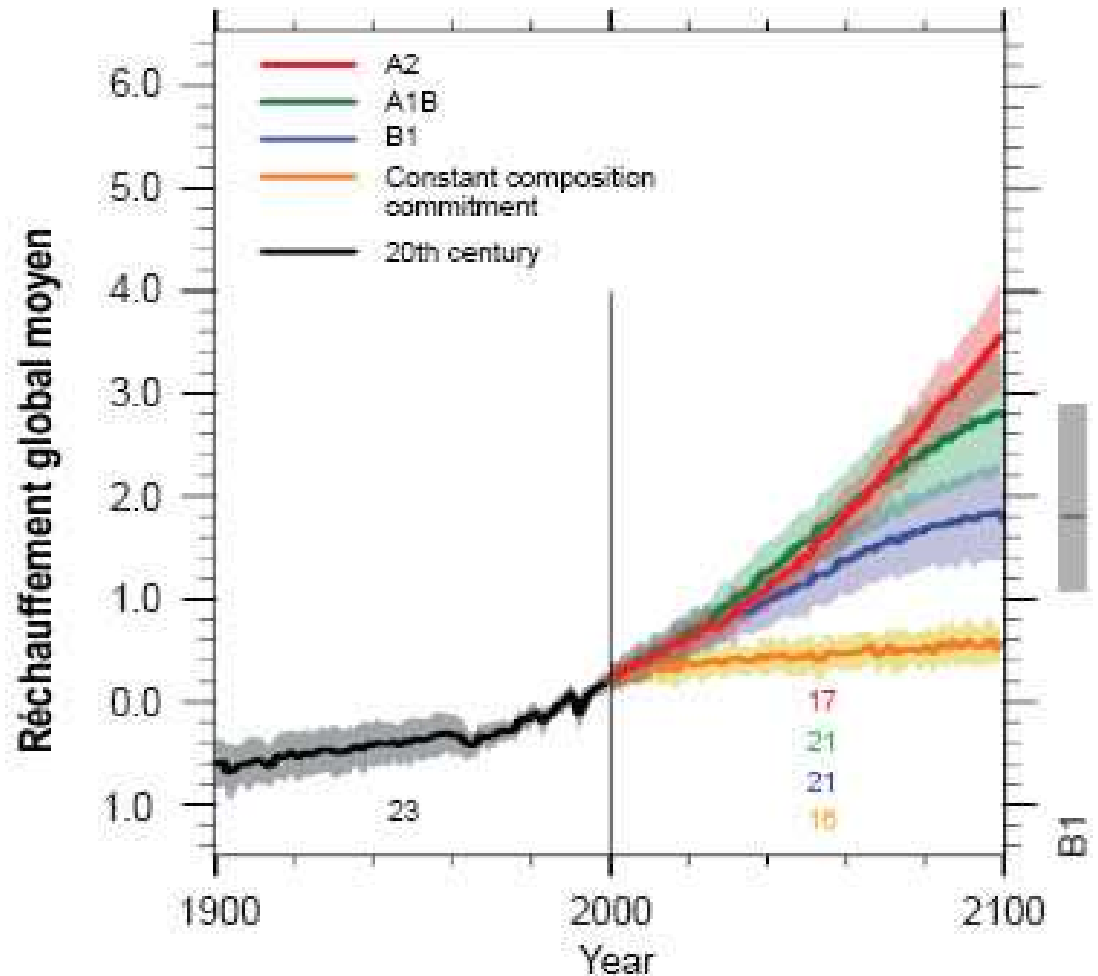
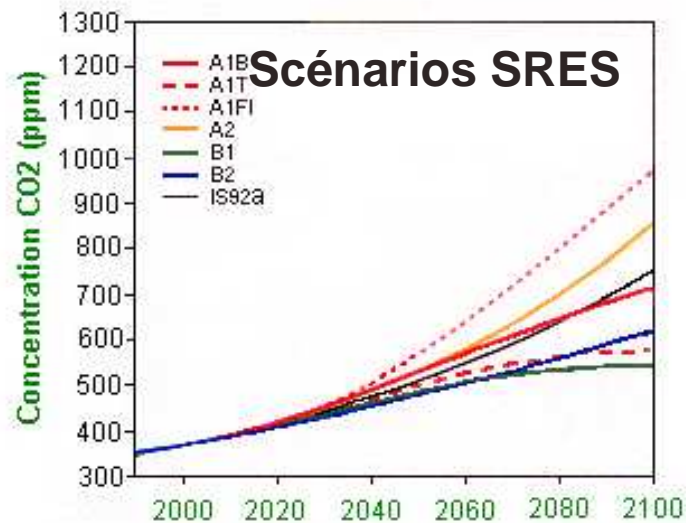


# Projections : scénarios socio-économiques, développement, géopolitique



Economie

Scénario	Population	Economie	Environ.	Equité	Technologie	Mondial.
A1FI	↘	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↘	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘



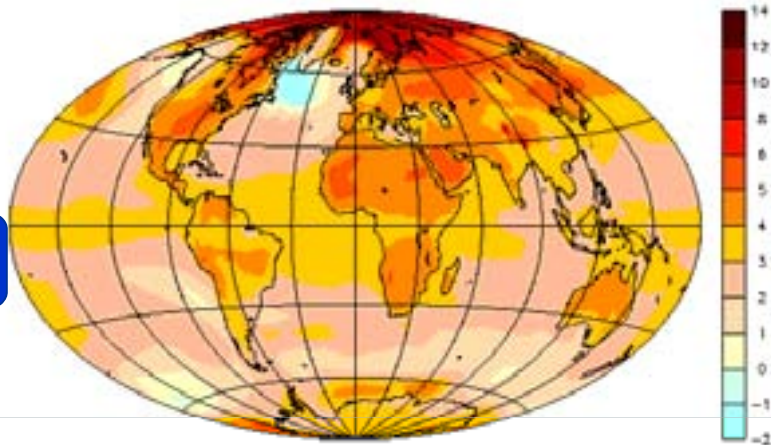
# Modélisation des scénarios GIEC

## Température in 2090-2100

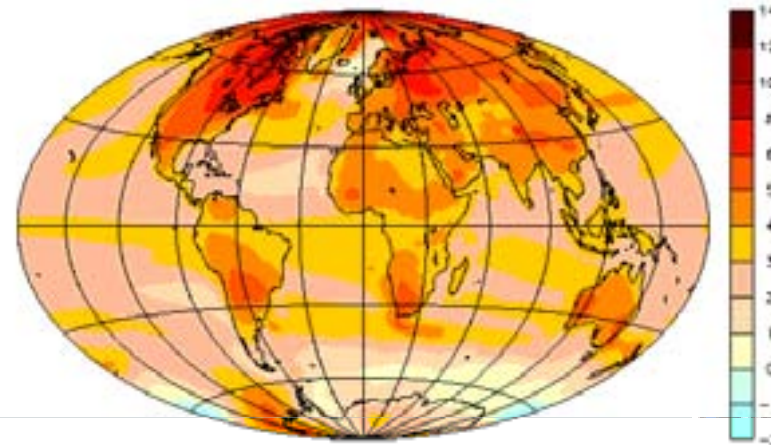
CNRM

IPSL

A2

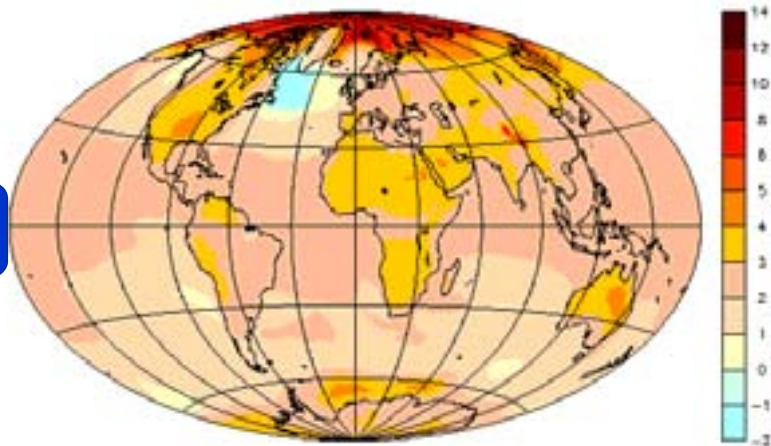


IPCC / CNRM - SRESA2 scénario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) (2090-2099)

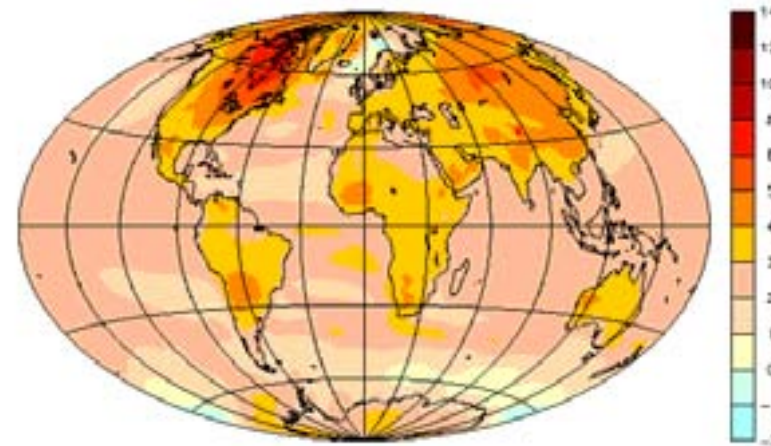


IPCC / IPSL - SRESA2 scénario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) (2090-2099)

B1

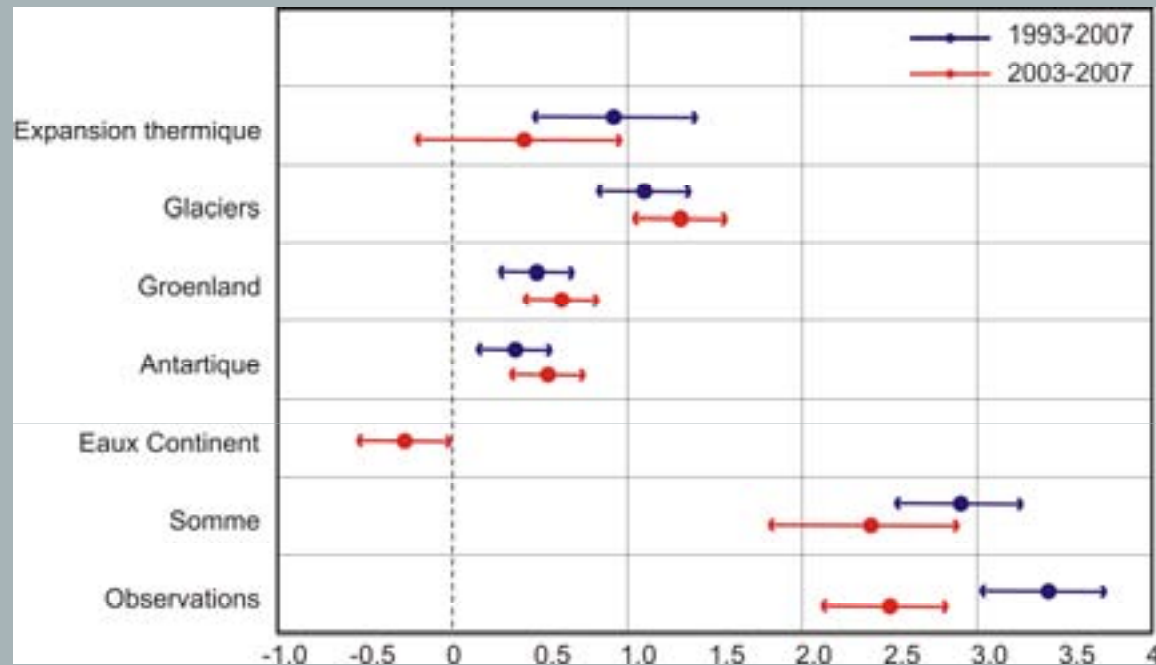


IPCC / CNRM - SRESA1B scénario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)



IPCC / IPSL - SRESA1B scénario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)

# Contributions au niveau de la mer



Cazenave et Llovel, 2009

En bleu : taux estimé sur 1993-2007

En rouge : taux estimé sur 2003-2007

## • Au niveau global

- Variations de température et de salinité de l'eau de mer
- Echange d'eau entre les océans et les réservoirs continentaux, les glaciers et les calottes polaires

## • Distribution régionale

- Déformation de la croûte terrestre et rebond post glaciaire

- Ajustement dynamique de la surface marine

## • Phénomènes transitoires au niveau local

- Houle et vagues
- Surcote marine
- Jet de rive

# Niveau de la mer

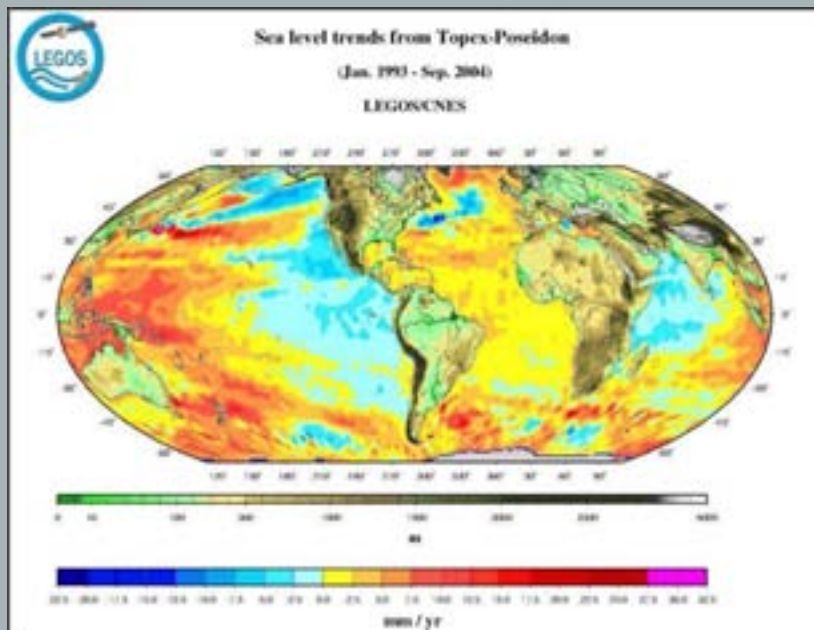
## Des marégraphes à l'altimétrie spatiale

Tendances en augmentation

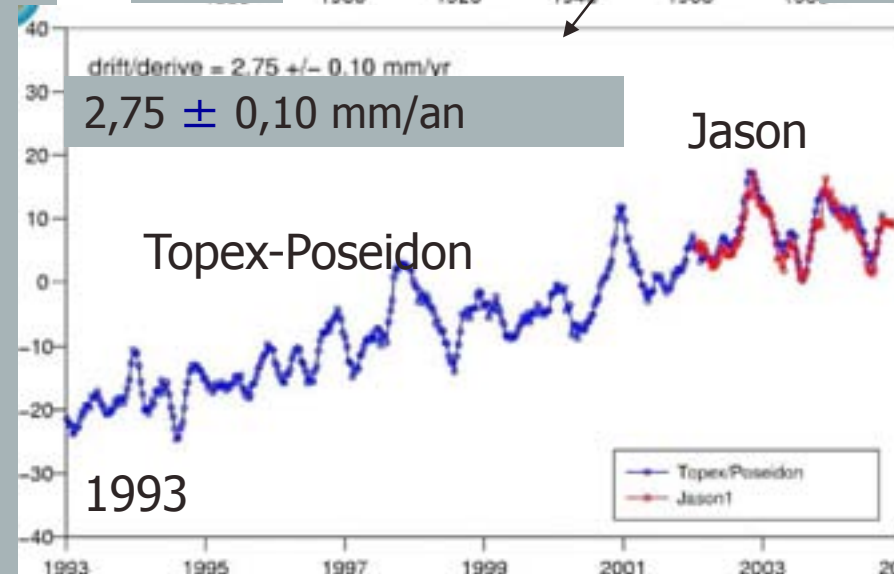
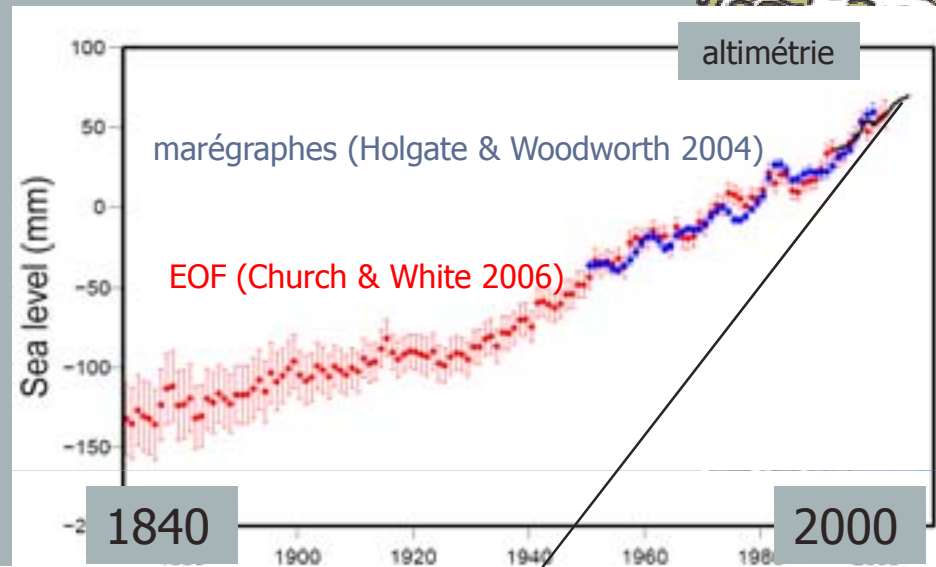
1900-2000 : **1,7** ± 0,5 mm/an

1961-2003 : **1,8** ± 0,5

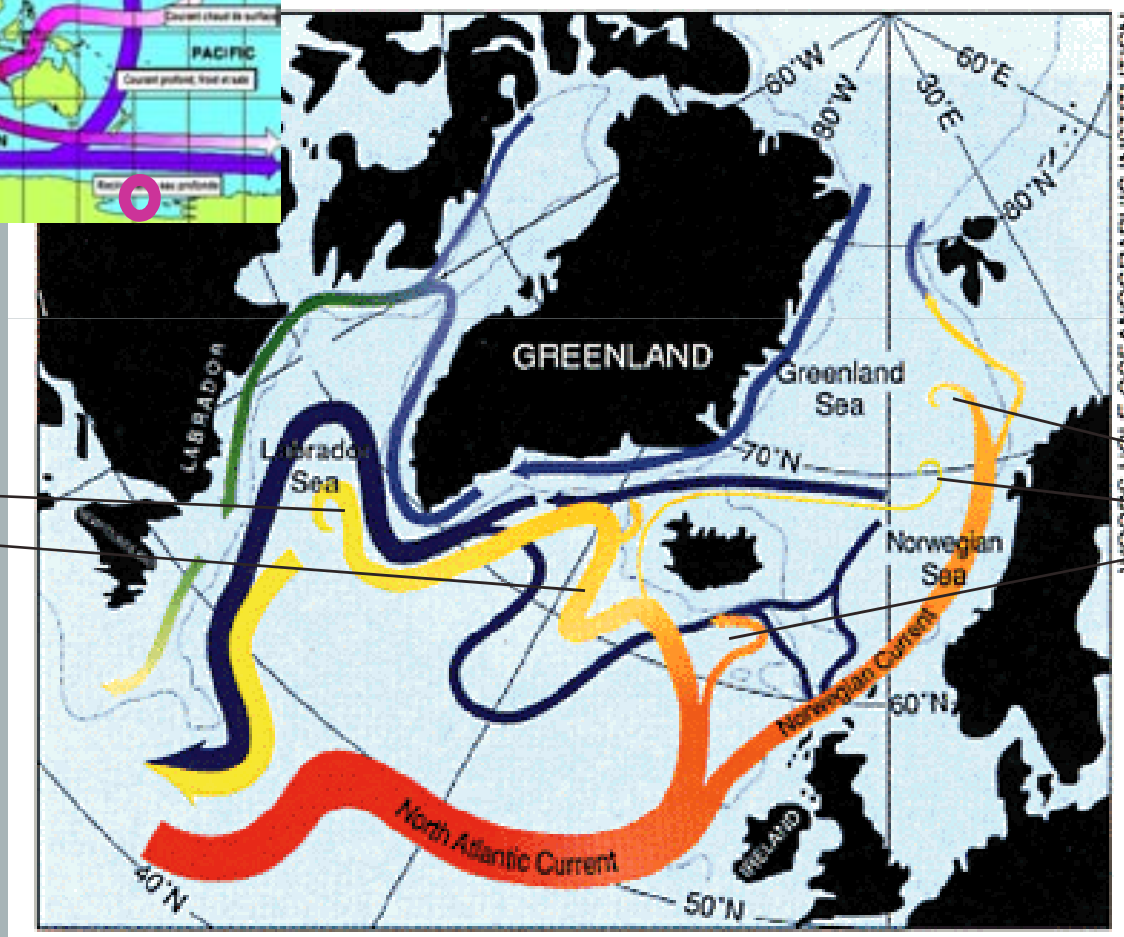
1993-2003 : **3,1** ± 0,7 (**31 cm/siècle**)



Cabannes et al. 2006, LEGOS



# Circulation de surface et subsurface dans les mers sub-arctiques



Convection

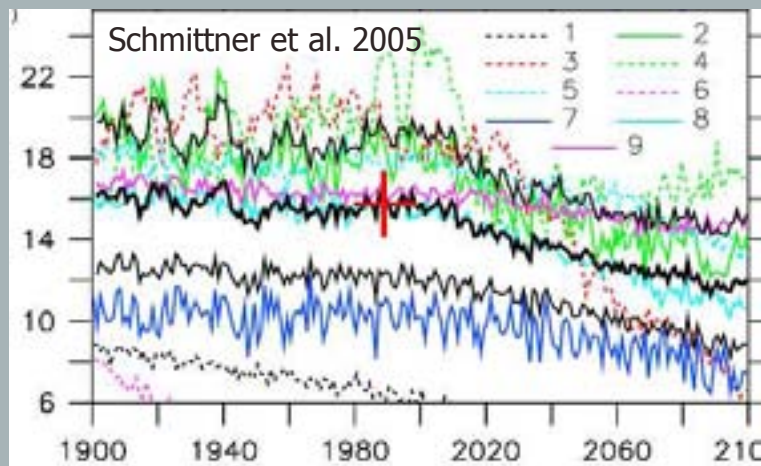
Convection



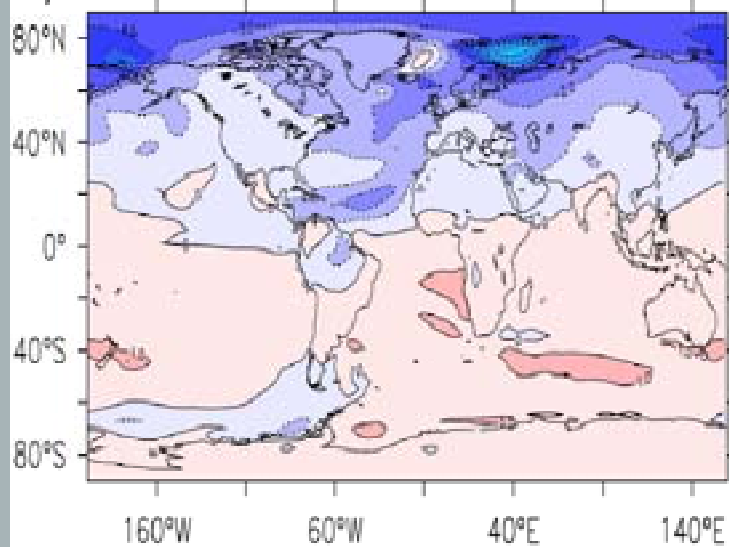
# Projections : conséquences inconnues

## Une circulation océanique modifiée?

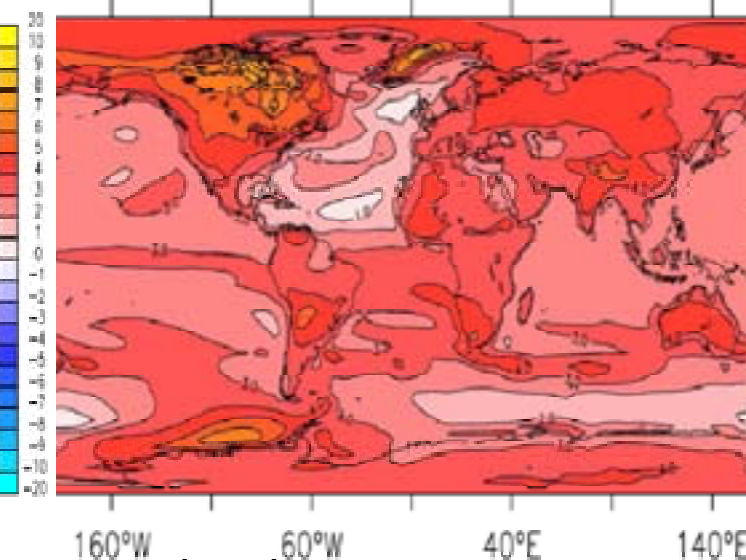
Flux de masse océanique  
en Sv ( $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



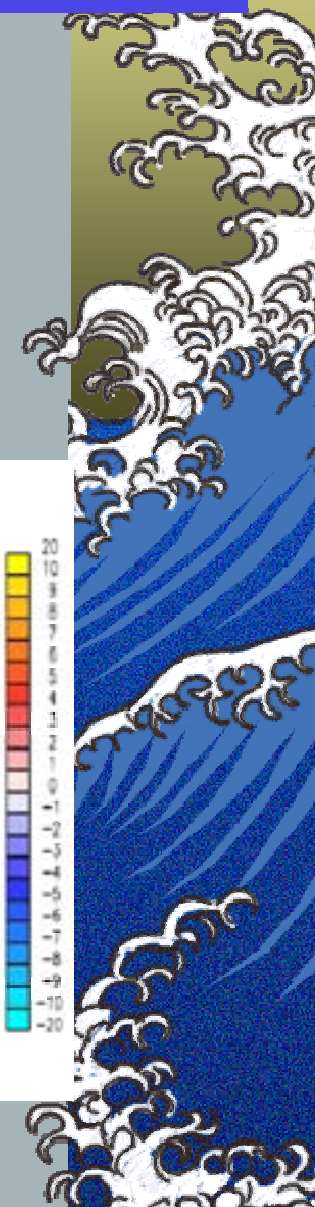
e) WIS2-NIS2



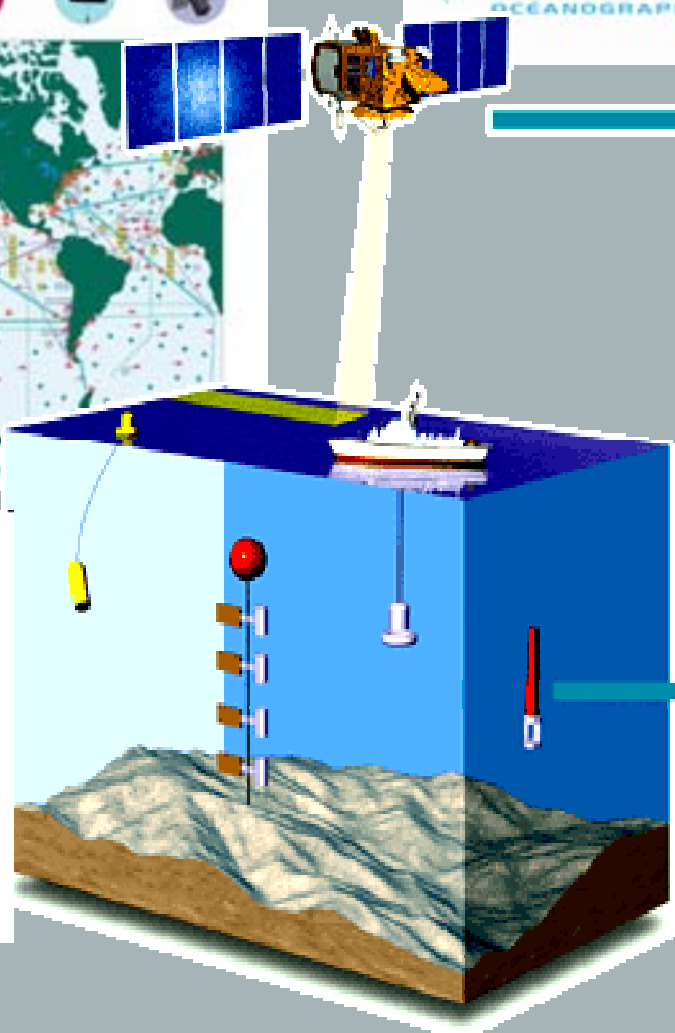
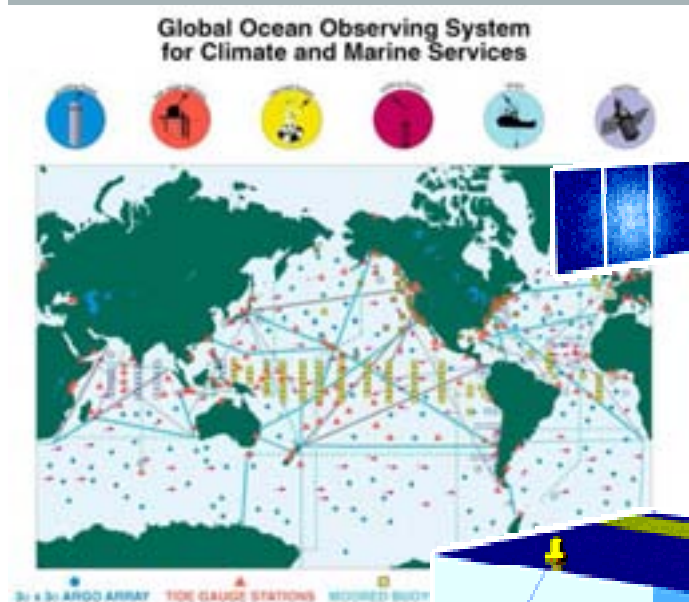
WIS2-CTRL



Avec – sans fonte de calotte, dans 4 à 5 siècles  
Swingedouw et al., 2006



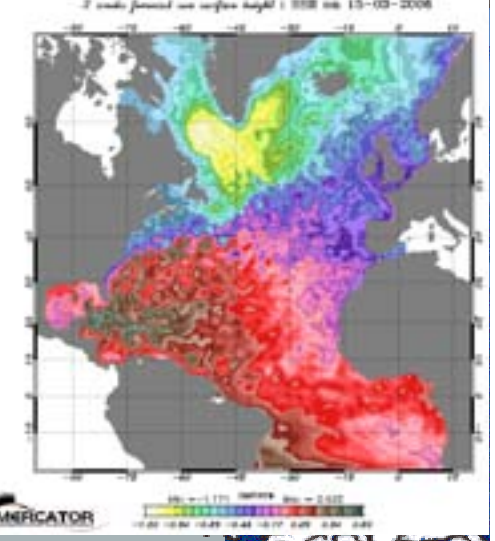
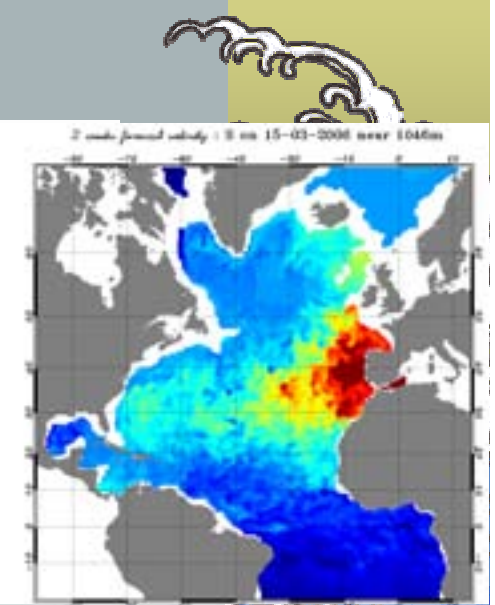
# Quel océan fera-t-il demain ?



Observations spatiales

Modèle

Observations in situ





## Conclusions

- *De par sa masse et sa capacité thermique, l'océan est un joueur de poids dans le système climatique.*
- *Sa dynamique est fortement contrainte par les échanges de surface avec l'atmosphère, le partenaire rapide.*
- *L'Océan agit comme un modérateur de la variabilité climatique locale, comme un partenaire dans la variabilité interannuelle et comme un amplificateur potentiel pour les tendances à long terme, du fait de sa circulation complexe.*
- *Pour diminuer les incertitudes sur l'amplitude de la tendance de réchauffement pour le siècle à venir, développer la surveillance de l'océan est une priorité.*