

L'océan et le système climatique

1 – Caractérisons l'océan

Pourquoi l'océan bouge ?

La transformation des masses d'eau

La grande échelle

2- Couplage et système climatique

El Niño et la variabilité tropicale

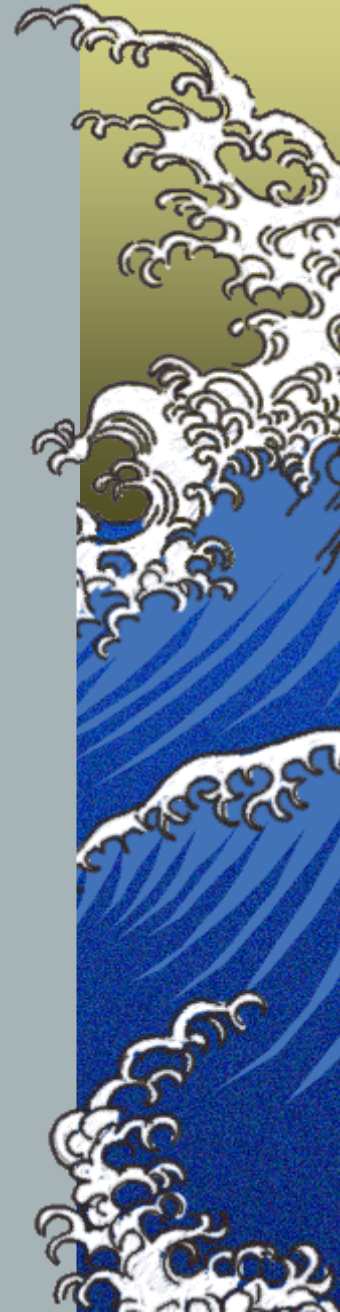
Oscillation Nord Atlantique

Surprises climatiques

3- Questions pour le 21^{ème} siècle

Niveau de la mer

Changement de régime



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 ρ (T, S, ρ):*
- ▲ **où $\rho_m = 1025 \text{ kg/m}^3$ ($1000 \times \rho_a$) from 1023 to 1028**
- ▲ **$\sigma = \rho_m - 1000$**

- ▲ *Capacité thermique*
- ▲ **Très supérieur 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

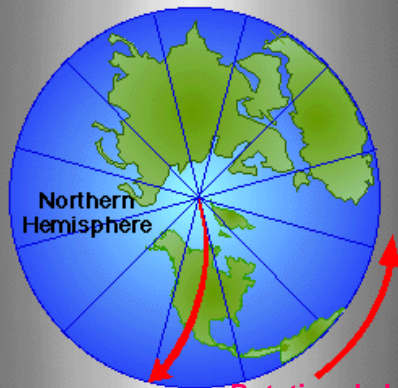
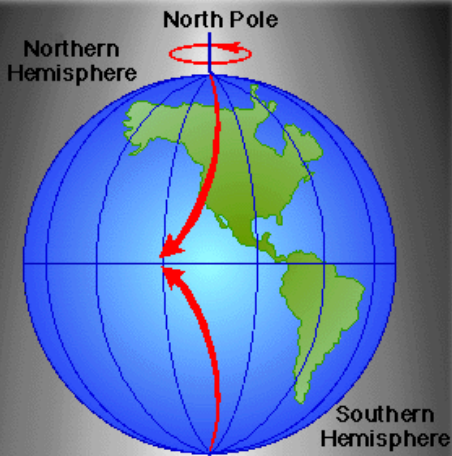
⇒ Rotation positive dans hémisphère nord, maximale au Pôle nord

⇒ Négative dans hémisphère sud

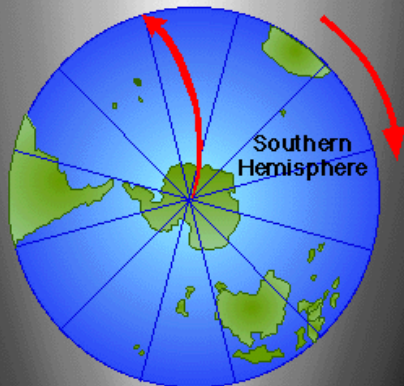
⇒ Zéro à l'équateur

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

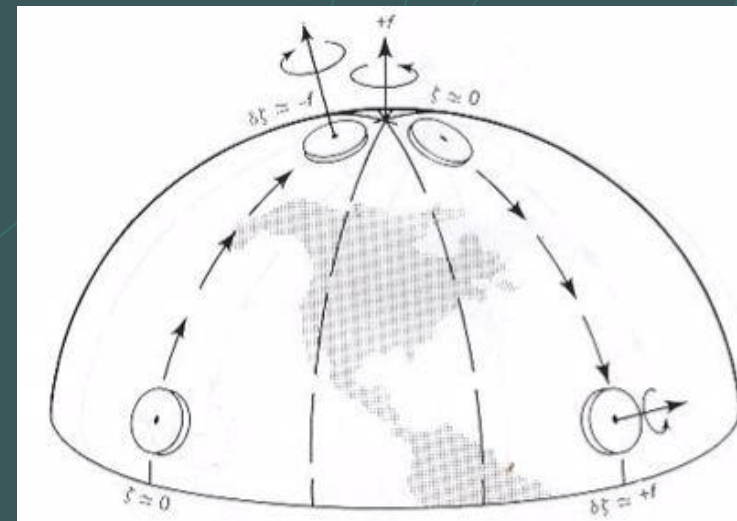
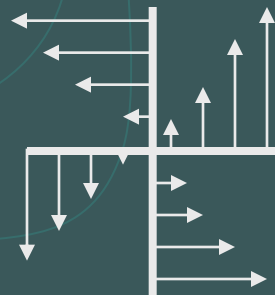
Propriétés conservative lors d'un déplacement sur la sphère



Rotation de la Terre
Earth's Rotation

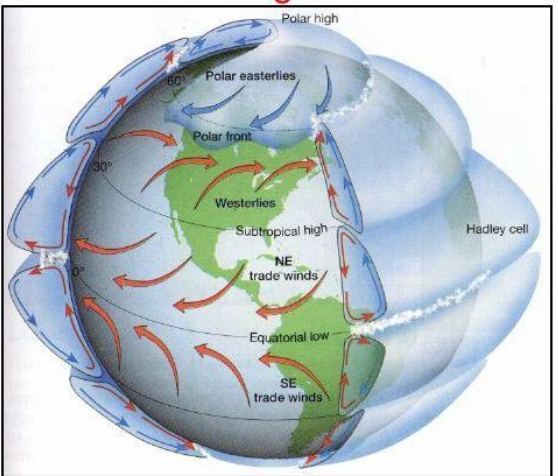


Ex: vorticité positive

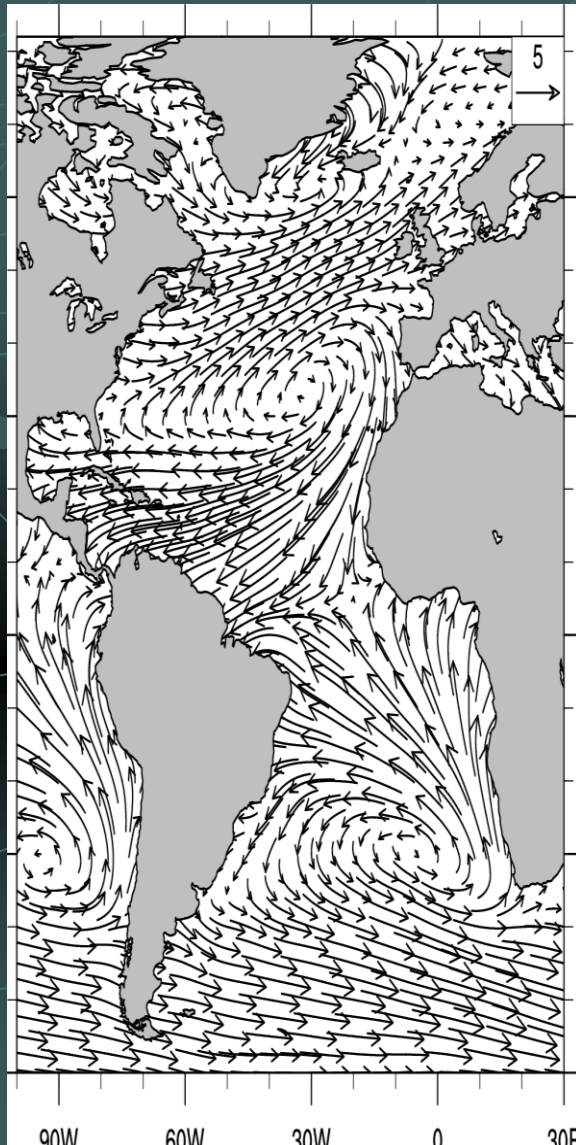


Les vents entraînent l'océan qui freine les basses couches de l'atmosphère

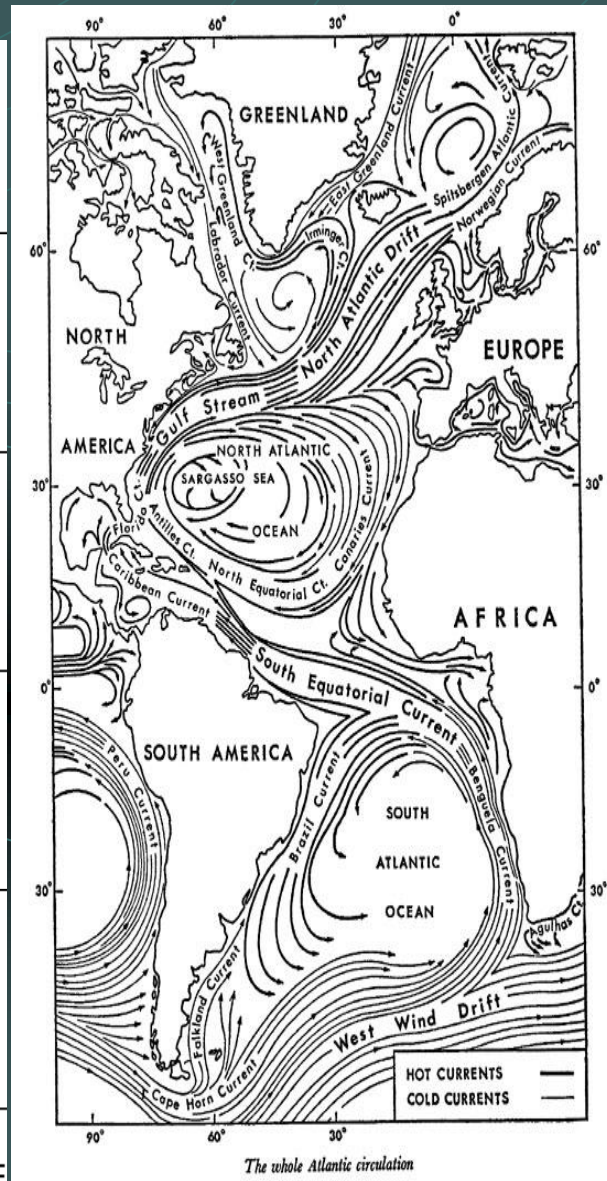
Rotating Earth



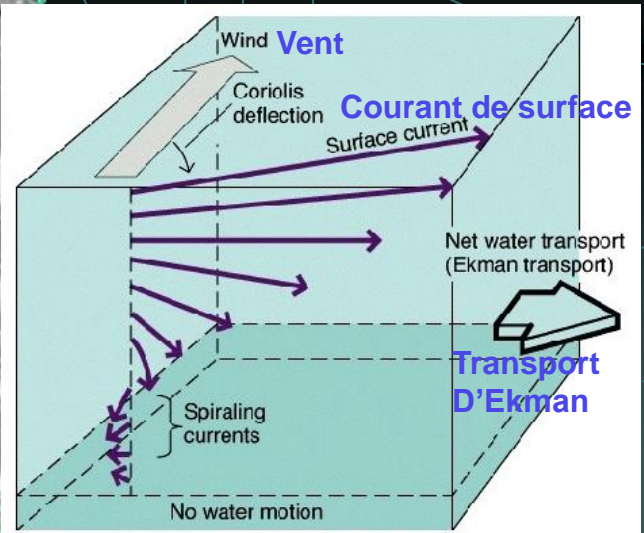
Vent de surface



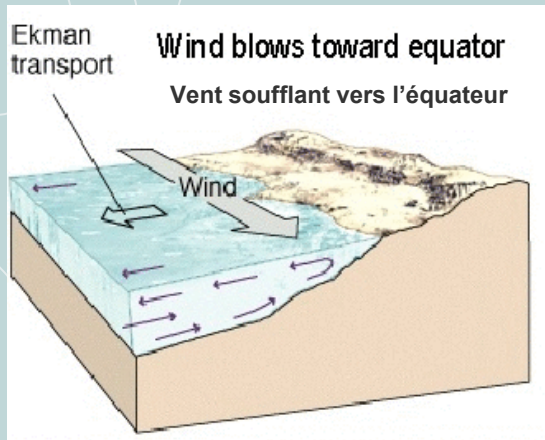
Courant de surface



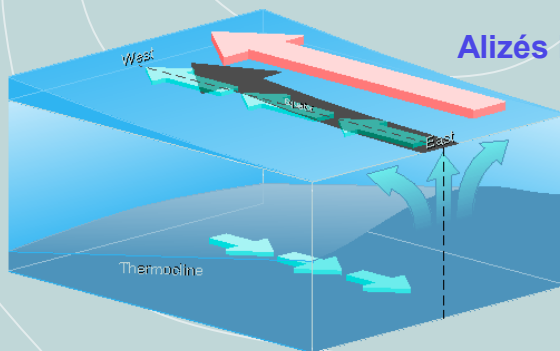
Sur une Terre en rotation



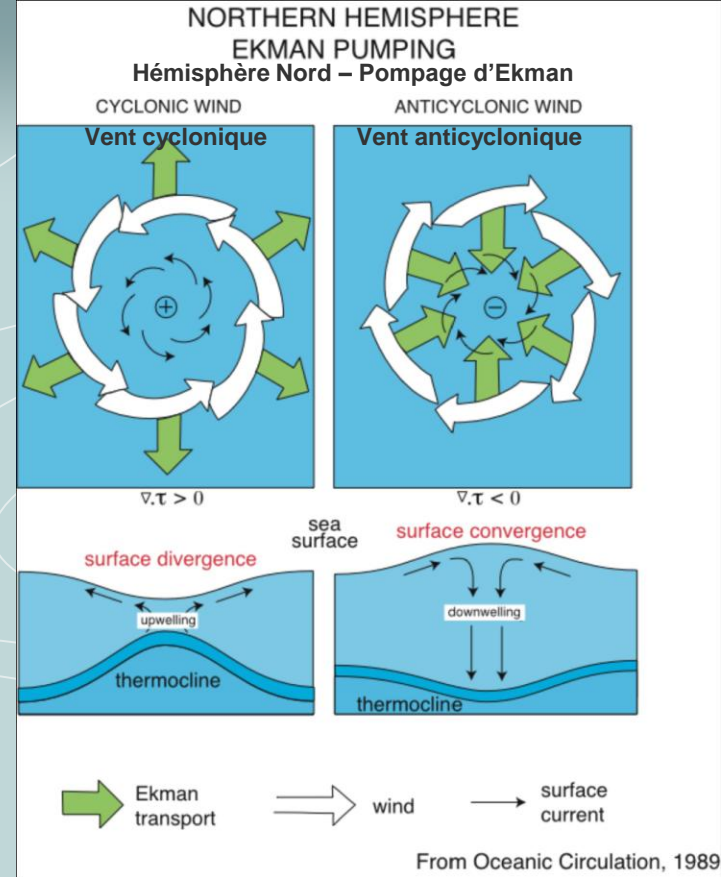
Tension de vent et rotation : Théorie du transport d'Ekman



Upwelling côtier : T_E vers le large



Upwelling équatorial:
 T_E vers les pôles

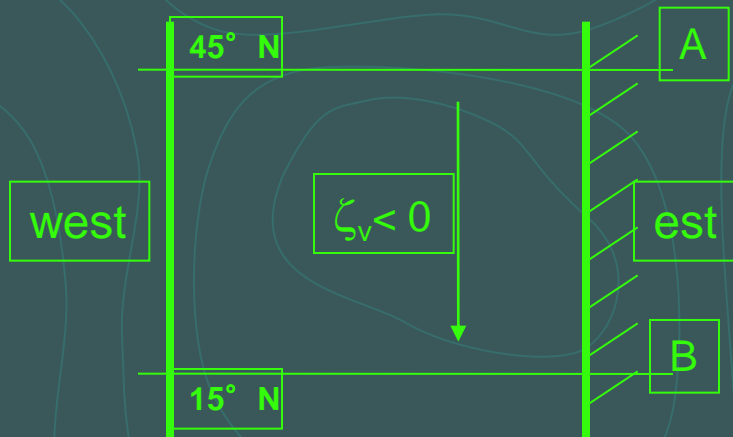


ouest

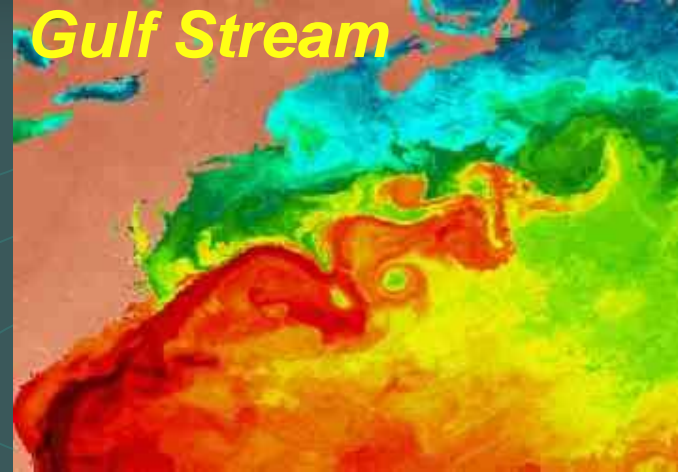
Théorie de Sverdrup : calcule le flux de masse méridien en fonction du rotationnel de vent.

Ce flux est exprimé en Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)

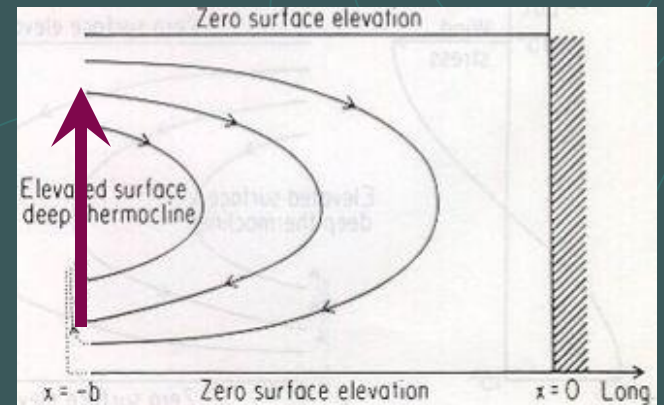
La masse fluide se déplace de A vers B pour réduire sa vorticité totale, afin d'équilibrer l'ajout de vorticité négative que lui impose le vent



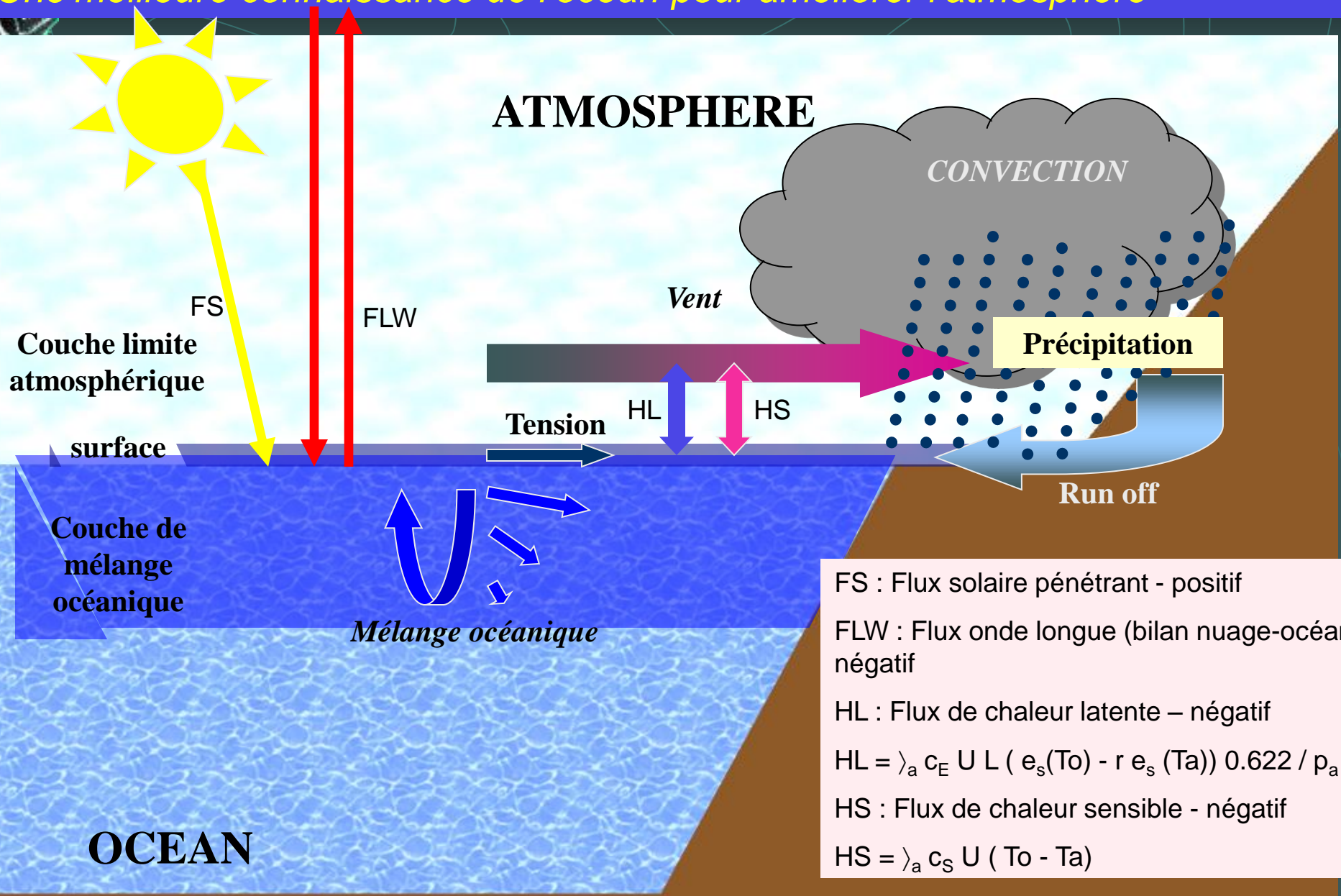
La conservation de la masse implique un flux de retour du sud vers le nord le long de la frontière ouest. Les frottements au fond et sur la frontière et les non linéarités sont source de la vorticité positive nécessaire à ce mouvement.



Les courants de bord ouest sont très non linéaires. Ils sont « rectifiés » => amplitude très supérieure à celle de la théorie linéaire



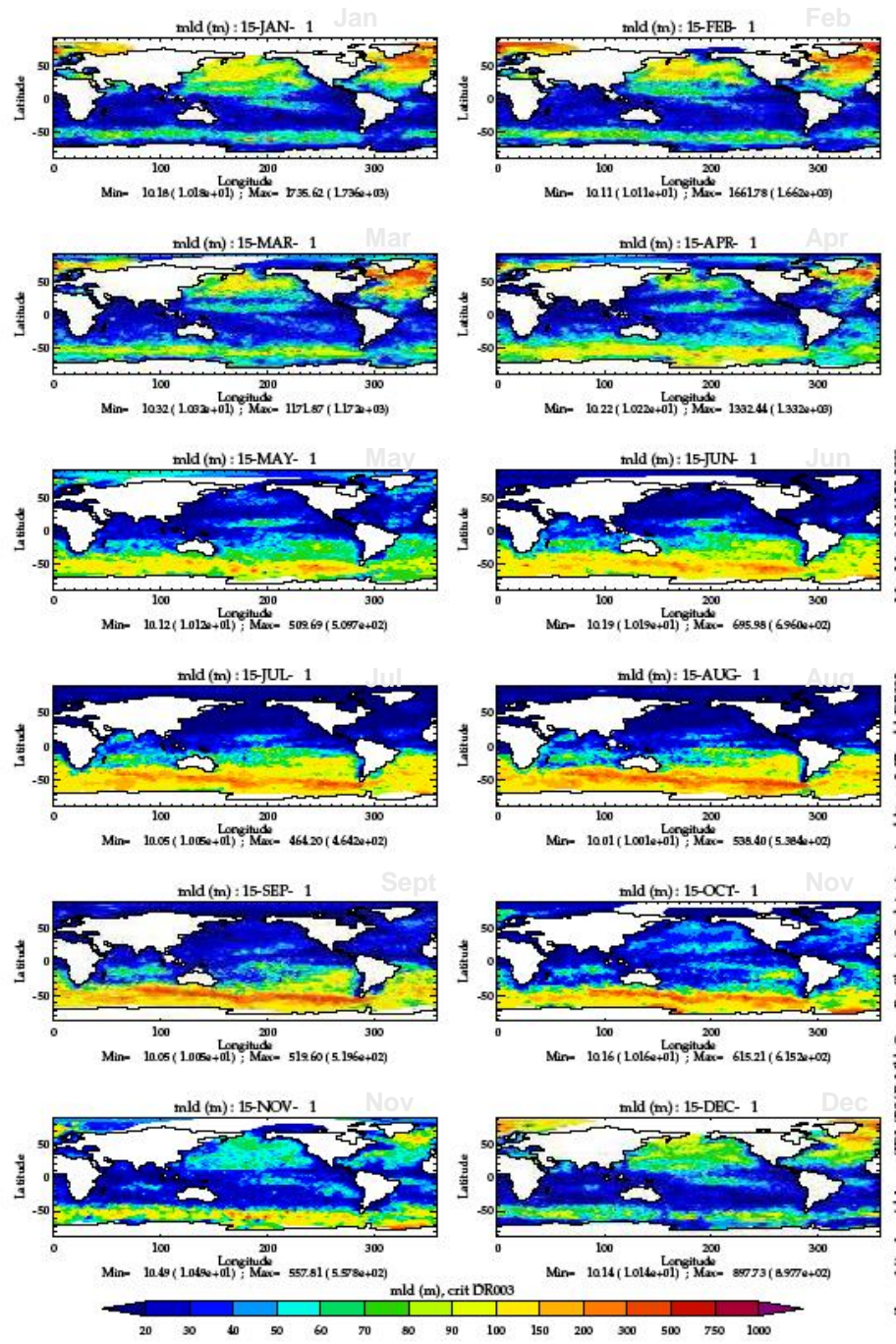
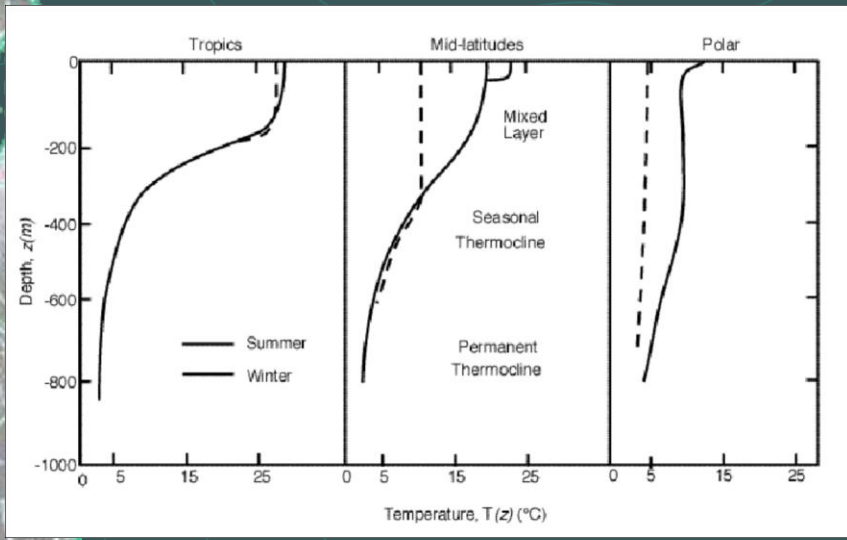
Une meilleure connaissance de l'océan pour améliorer l'atmosphère

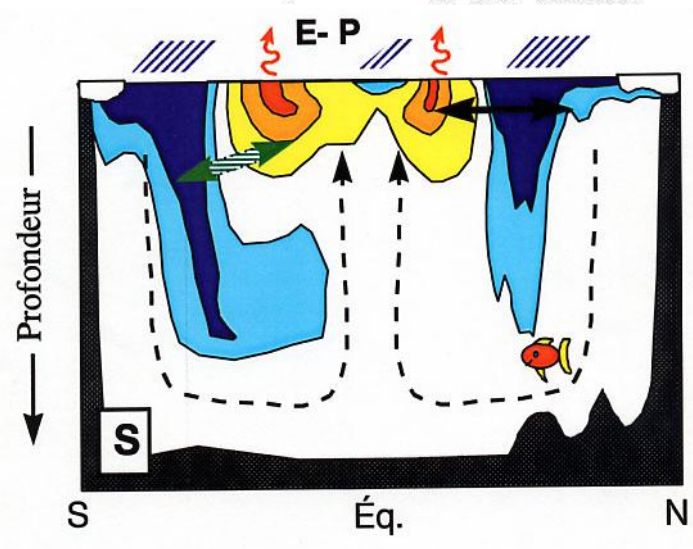
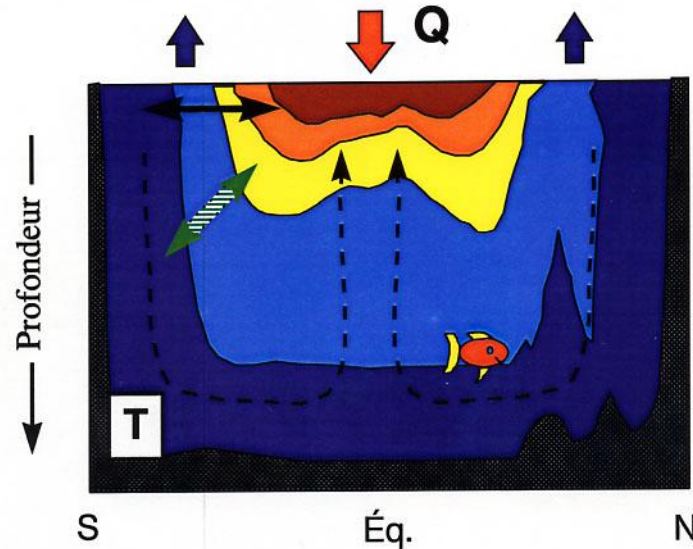
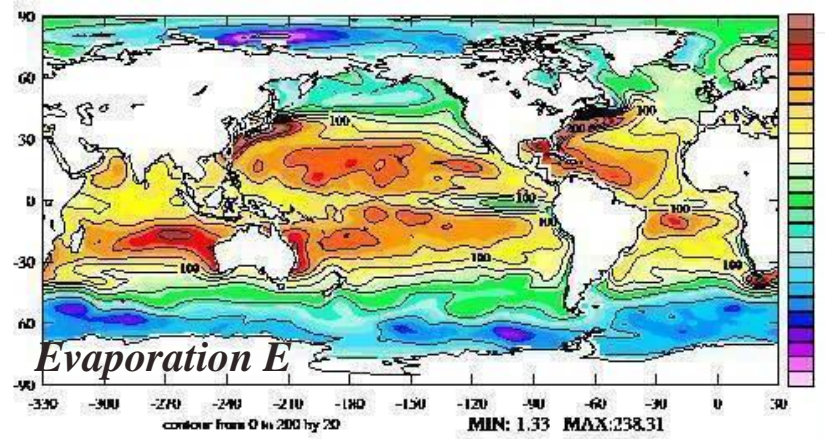
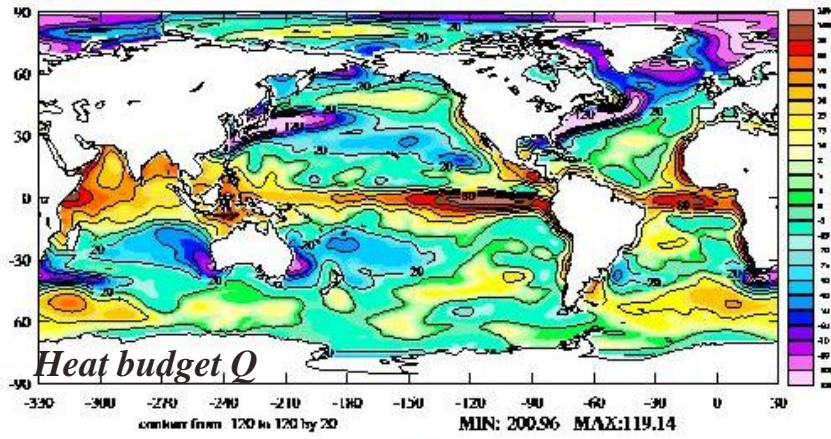


FS : Flux solaire pénétrant - positif
 FLW : Flux onde longue (bilan nuage-océan) négatif
 HL : Flux de chaleur latente – négatif
 $HL = \lambda_a c_E U L (e_s(T_o) - r e_s (T_a)) 0.622 / p_a$
 HS : Flux de chaleur sensible - négatif
 $HS = \lambda_a c_S U (T_o - T_a)$

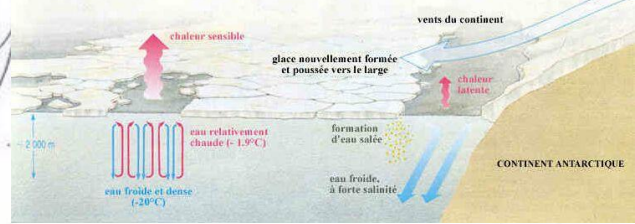
Une meilleure connaissance de l'atmosphère pour améliorer l'océan

déterminée par les flux échangés en surface et la dynamique de l'océan

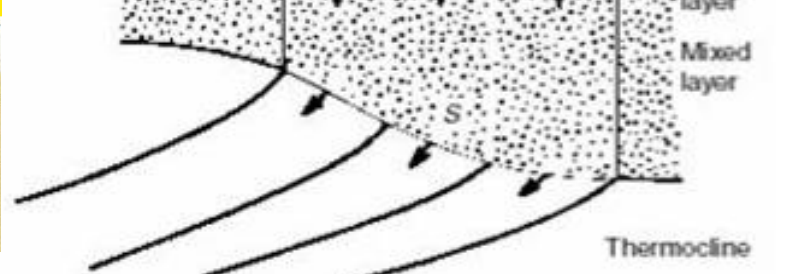




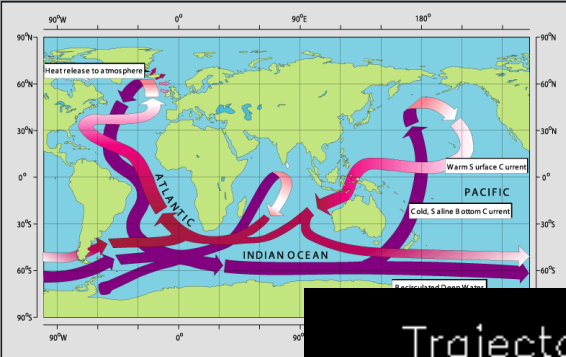
Processus de convection Non hydrostatique !



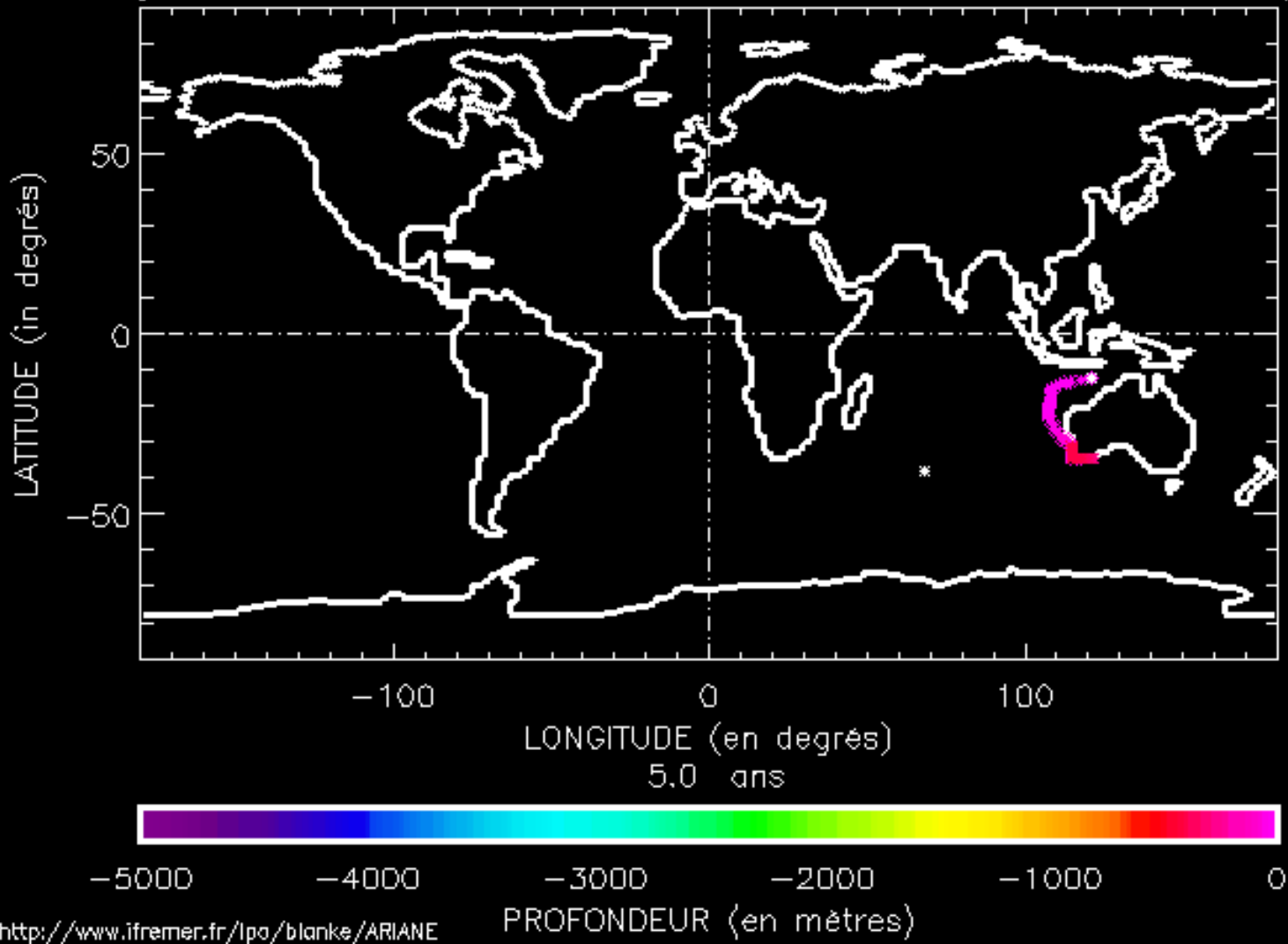
Processus de ventilation/subduction



Le tapis roulant de la circulation générale

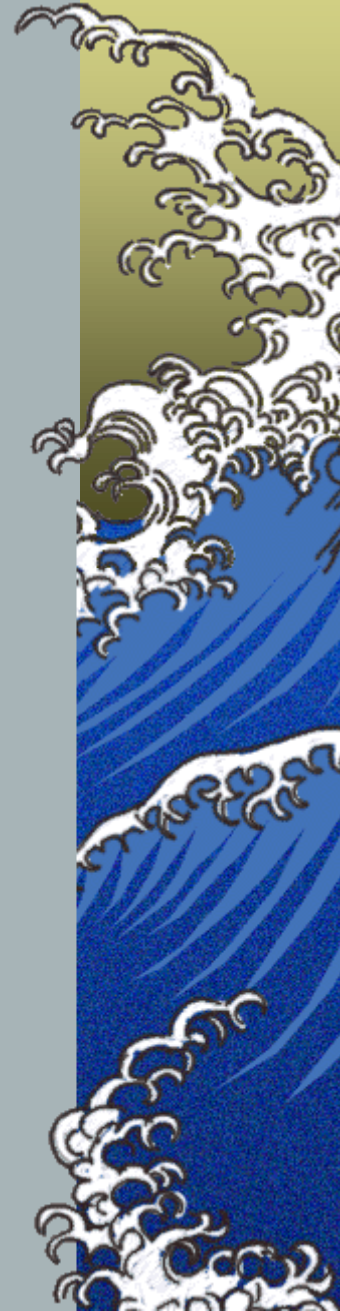


Trajectoires dans un Modèle de Circulation Générale Océanique



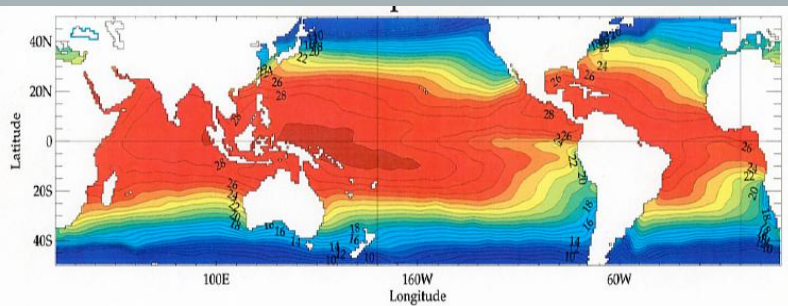
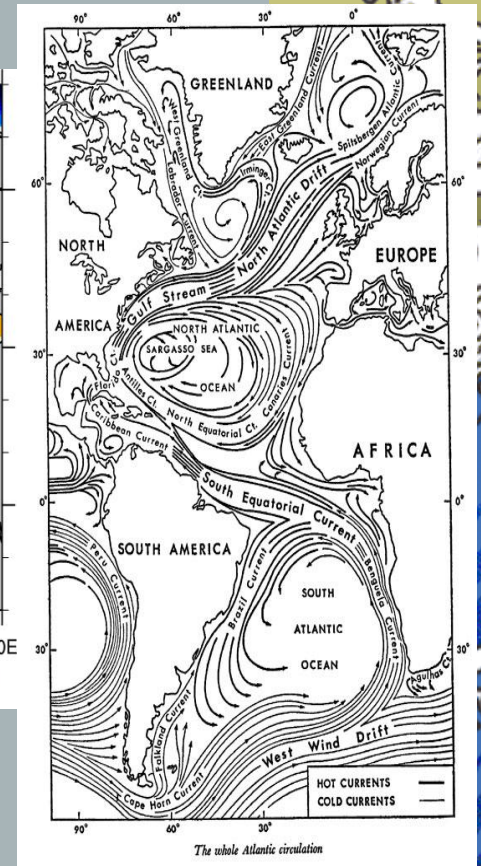
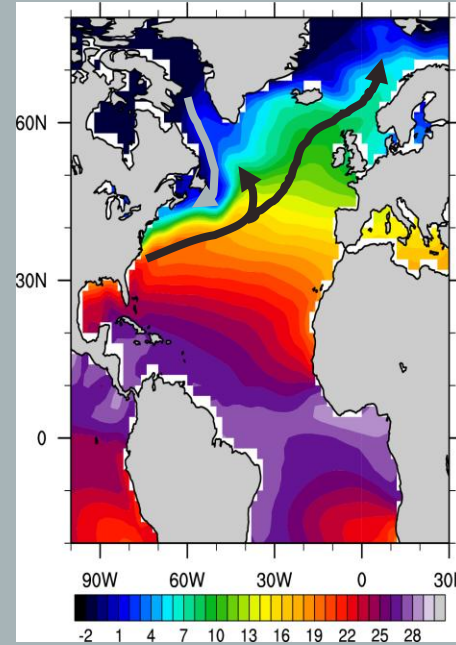
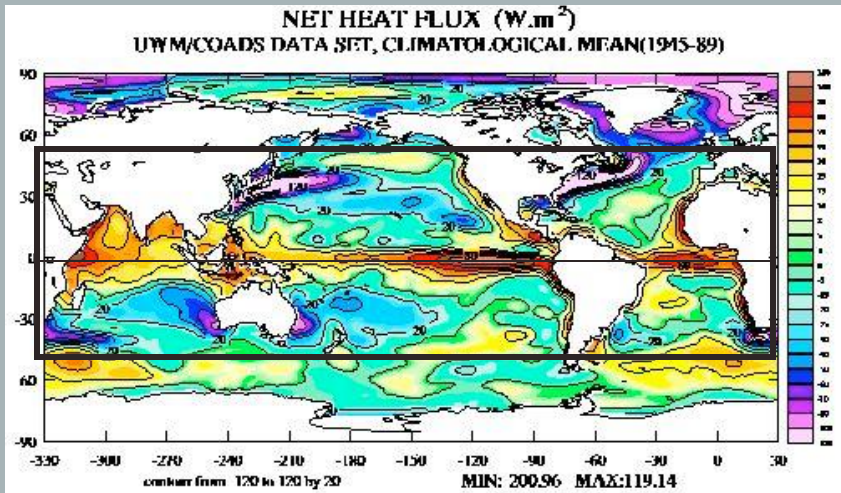
Echelles caractéristiques

- ▲ *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*



Un système couplé

Océan Atmosphère

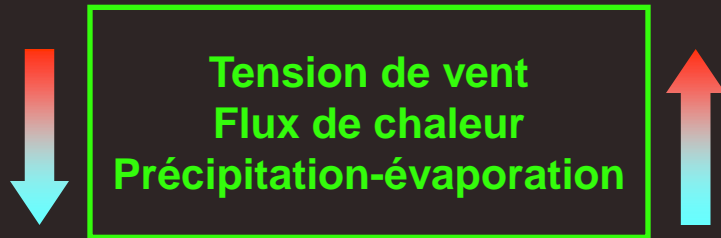


Dynamique et thermique

Océan : mémoire du climat

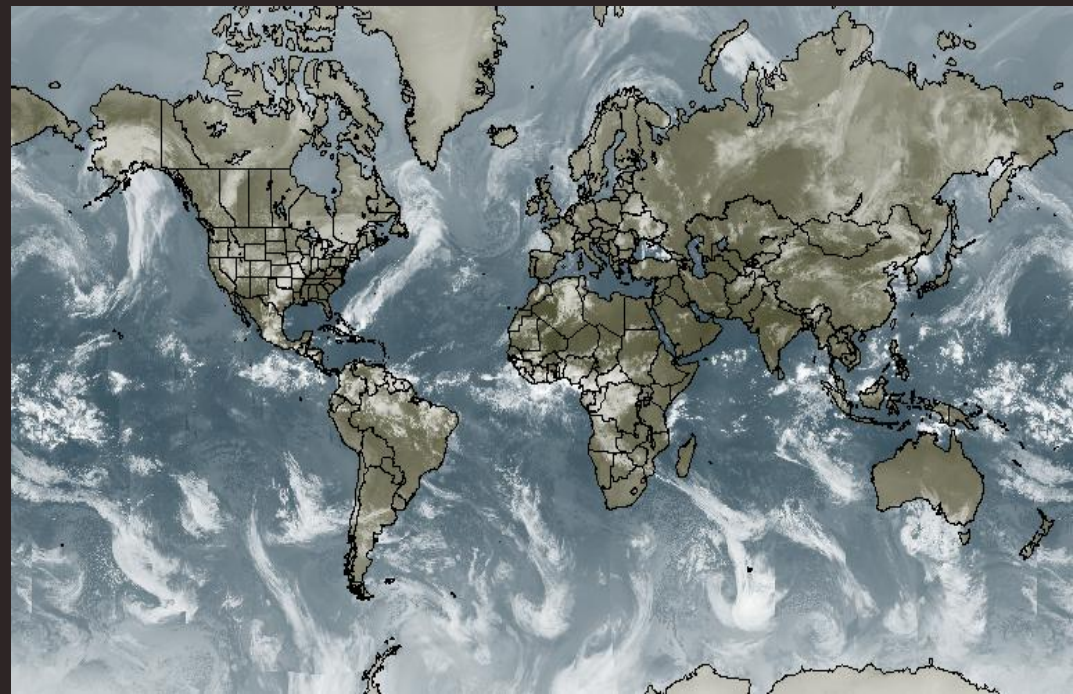
Atmosphère

- rapide (jours-semaines)
- peu de mémoire
- réchauffée par surface : instable



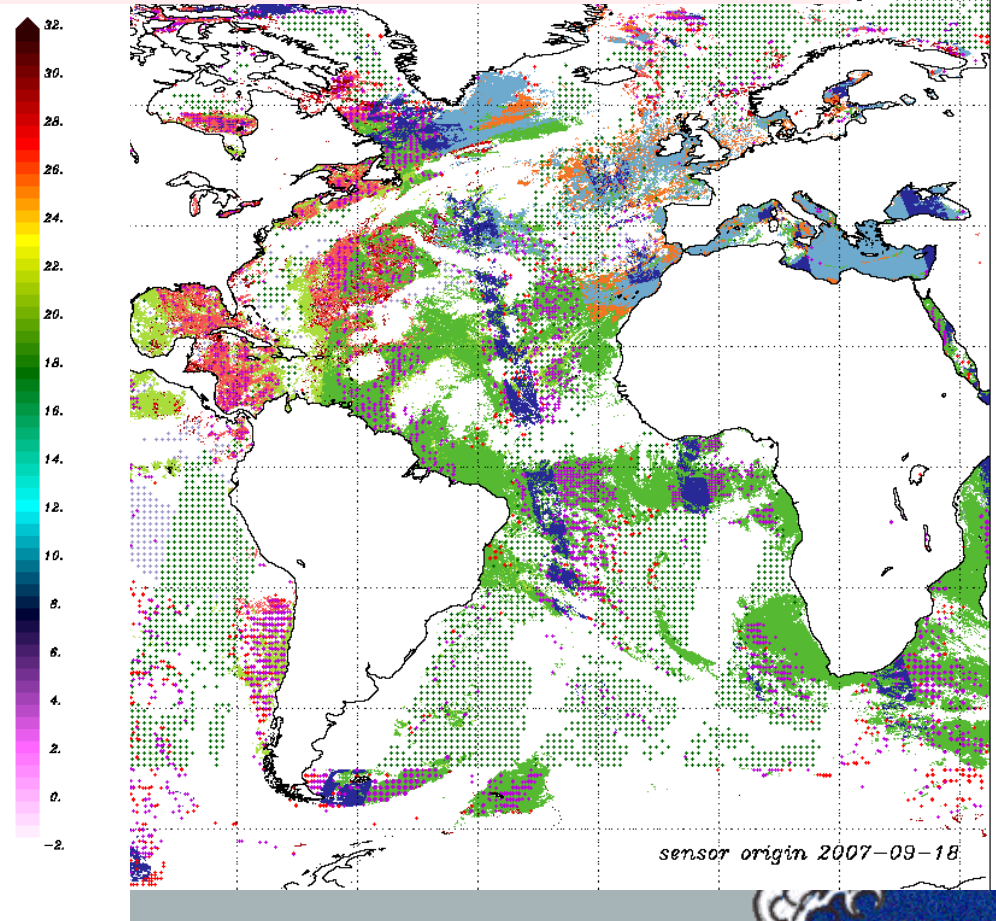
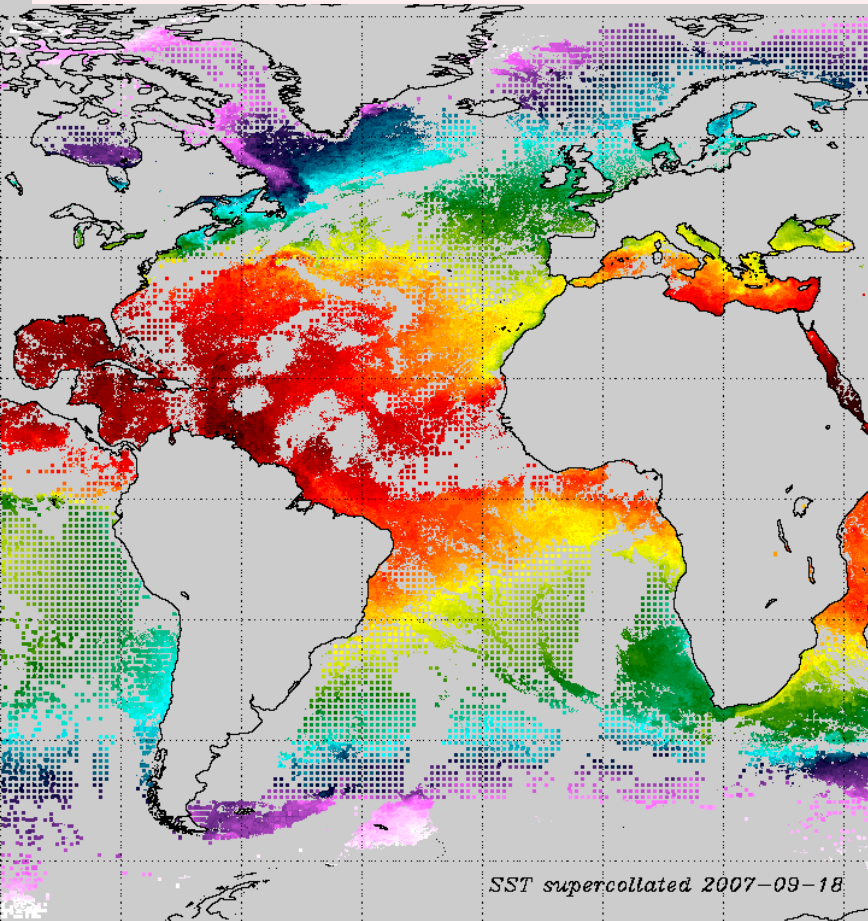
Océan

- Lent (saison - 1000 ans)
- Inertie thermique
- Réchauffé par surface (stable)
- Rayonnement pénétrant



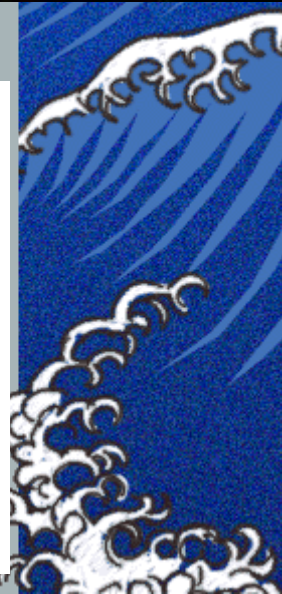
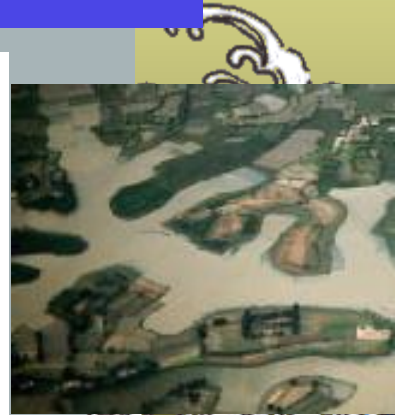
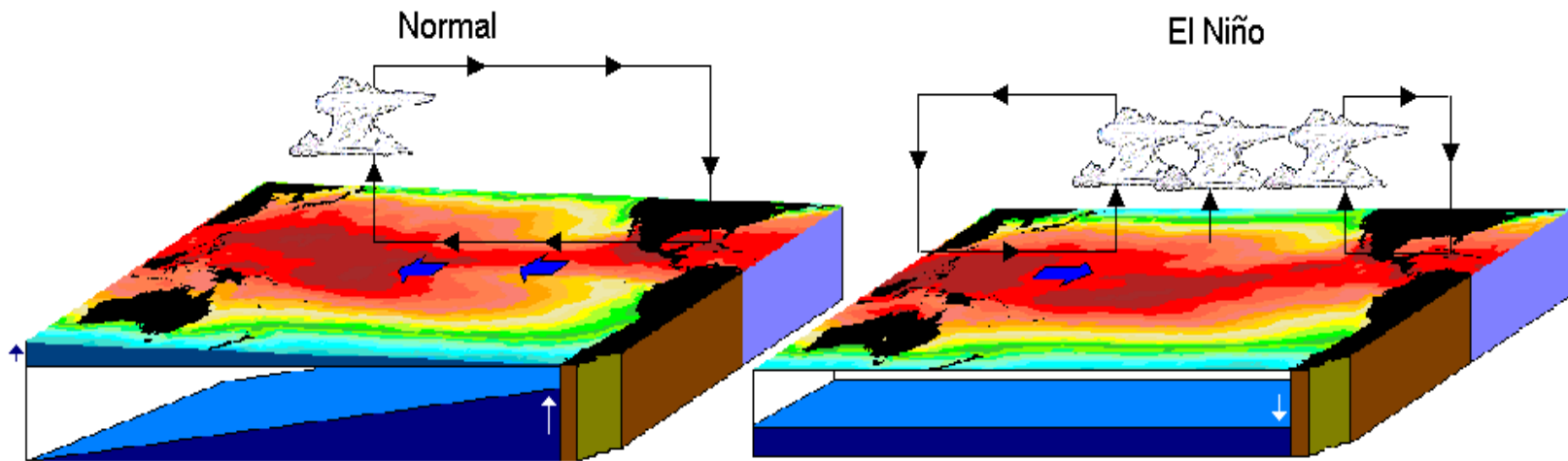
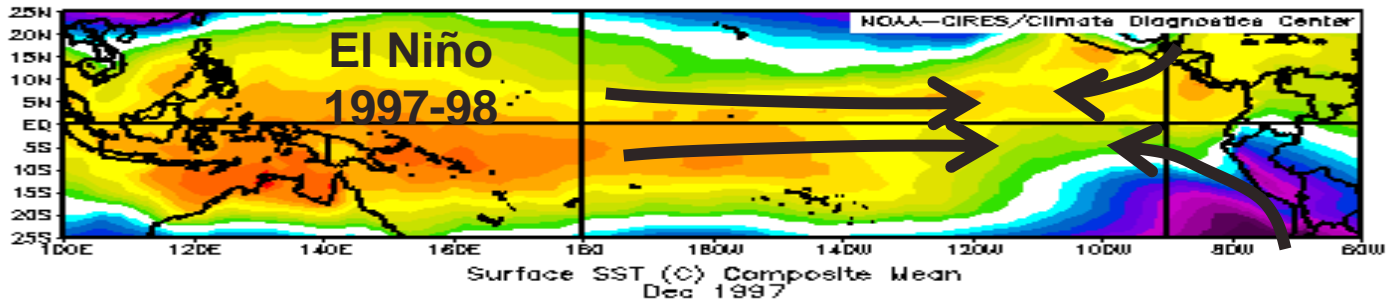
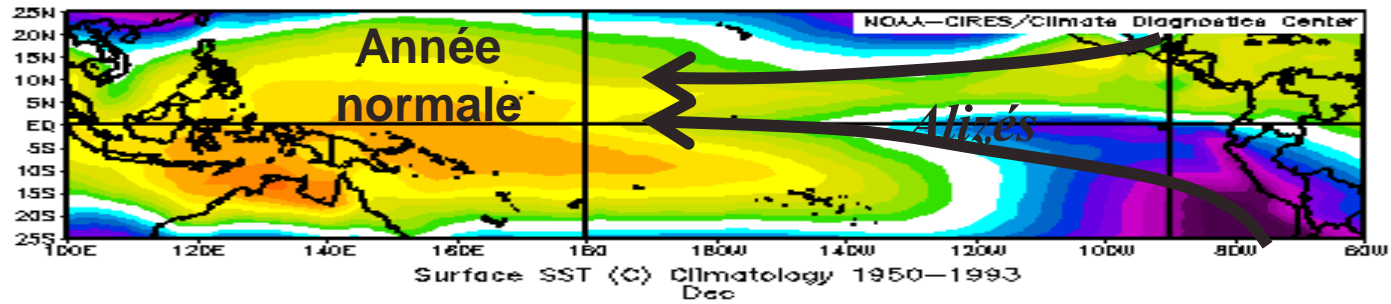
Température de surface océanique un produit multi-capteur (MERSEA)

Une condition limite essentielle pour la prévision météorologique



- CO
- SE
- AT
- AM
- TM
- AV
- AV
- AV
- AV
- AV
- NA
- NA

Caractéristiques d'un événement El Niño



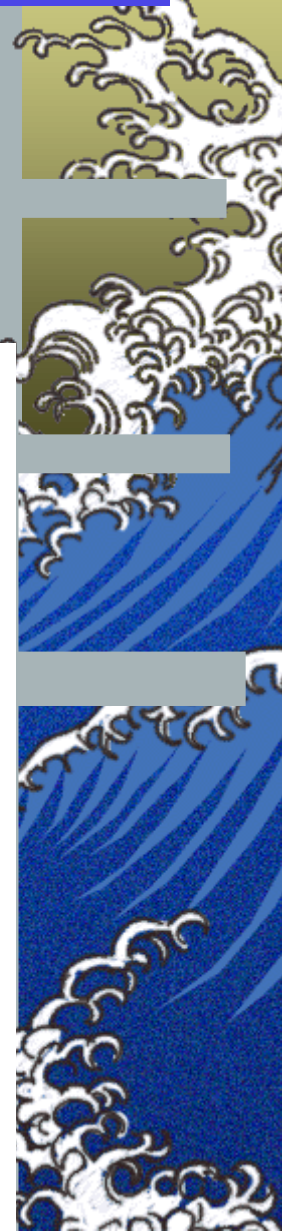
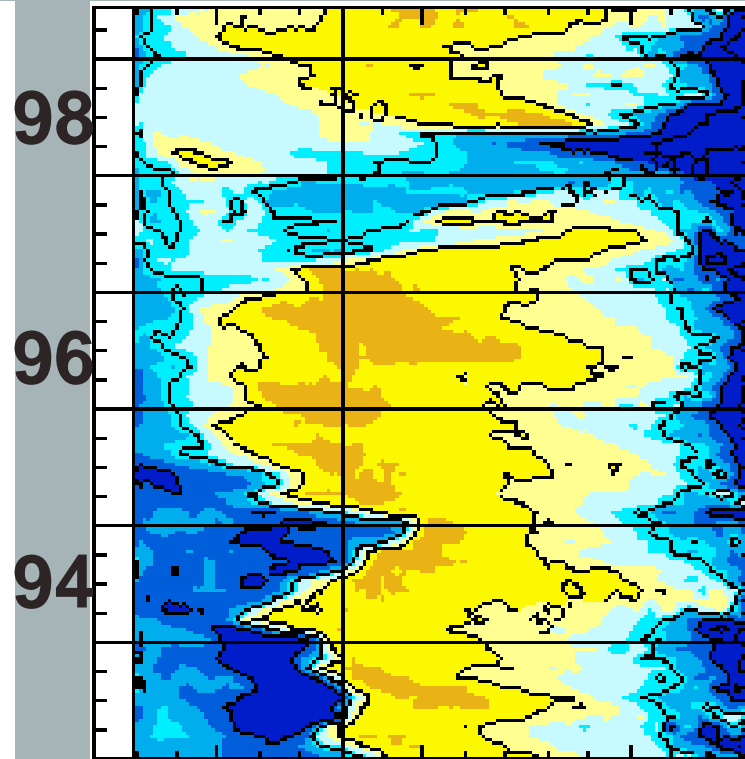
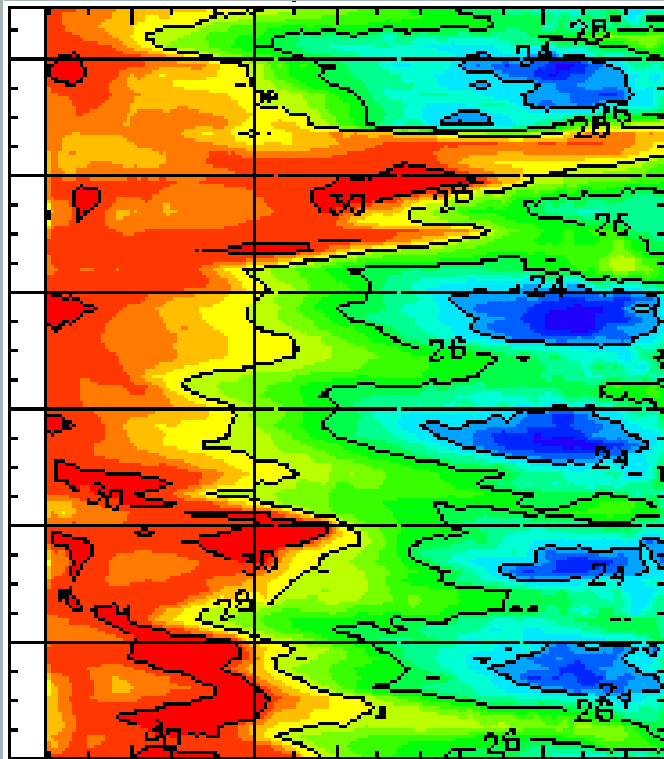
Caractéristiques d'un événement El Niño

El Niño: déplacement vers l'est des eaux chaudes (et douces) du Pacifique ouest

Température de surface

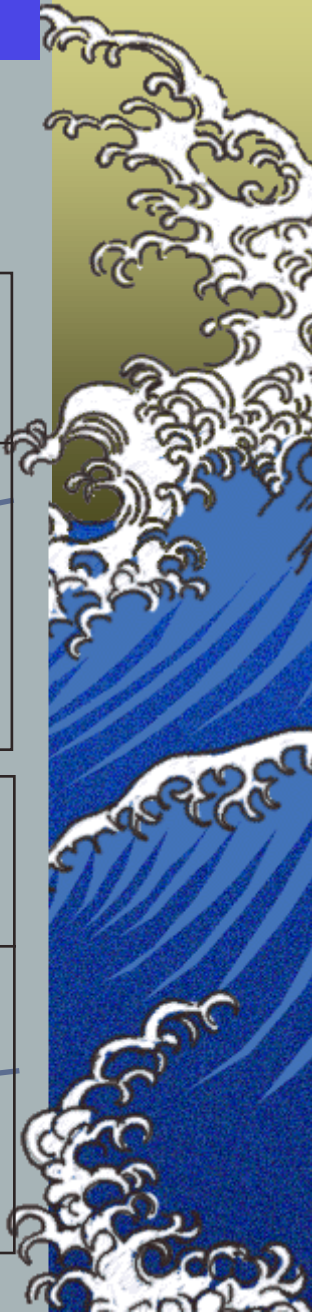
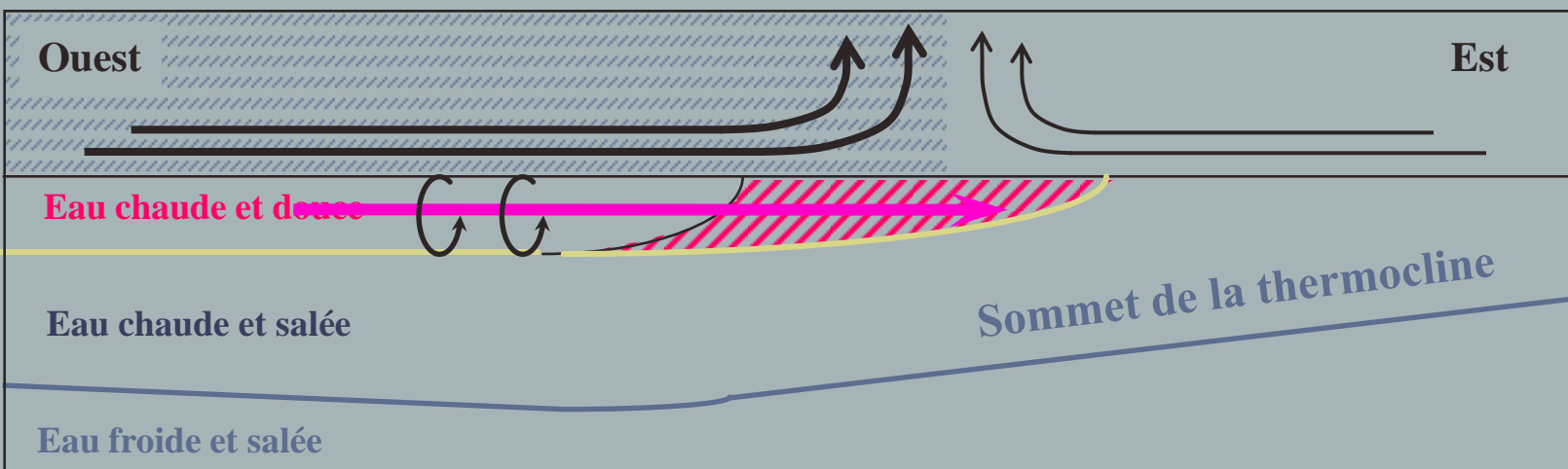
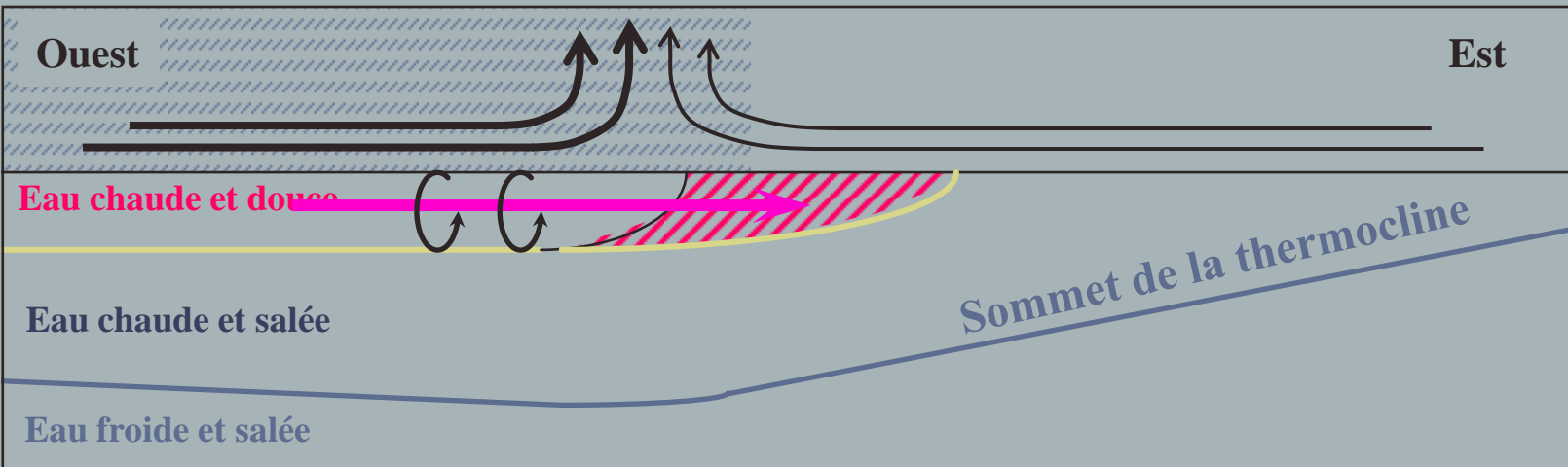
Salinité de surface

Temps



Quels sont les mécanismes El Niño ?

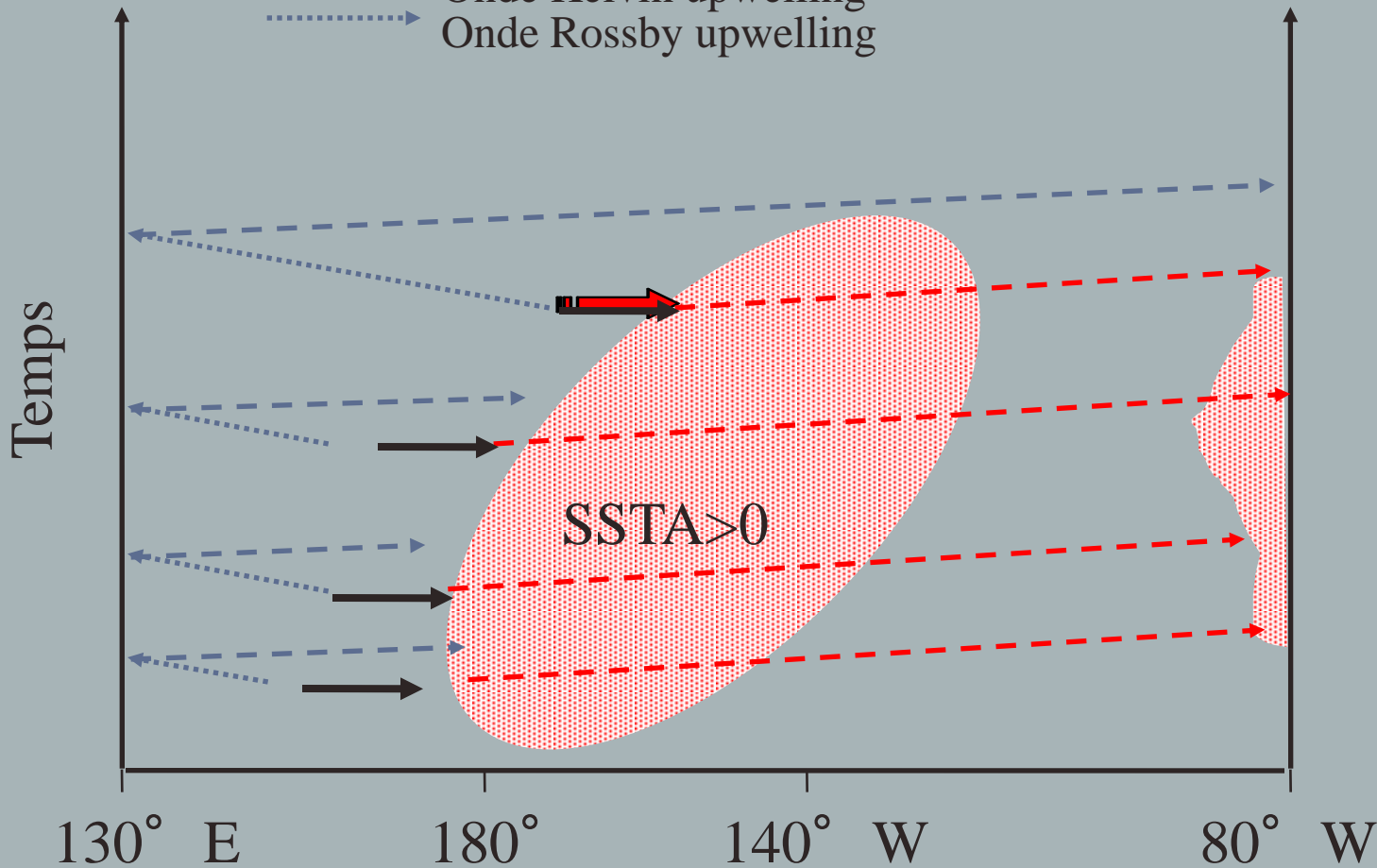
Idée de Bjerknes: une instabilité couplée..

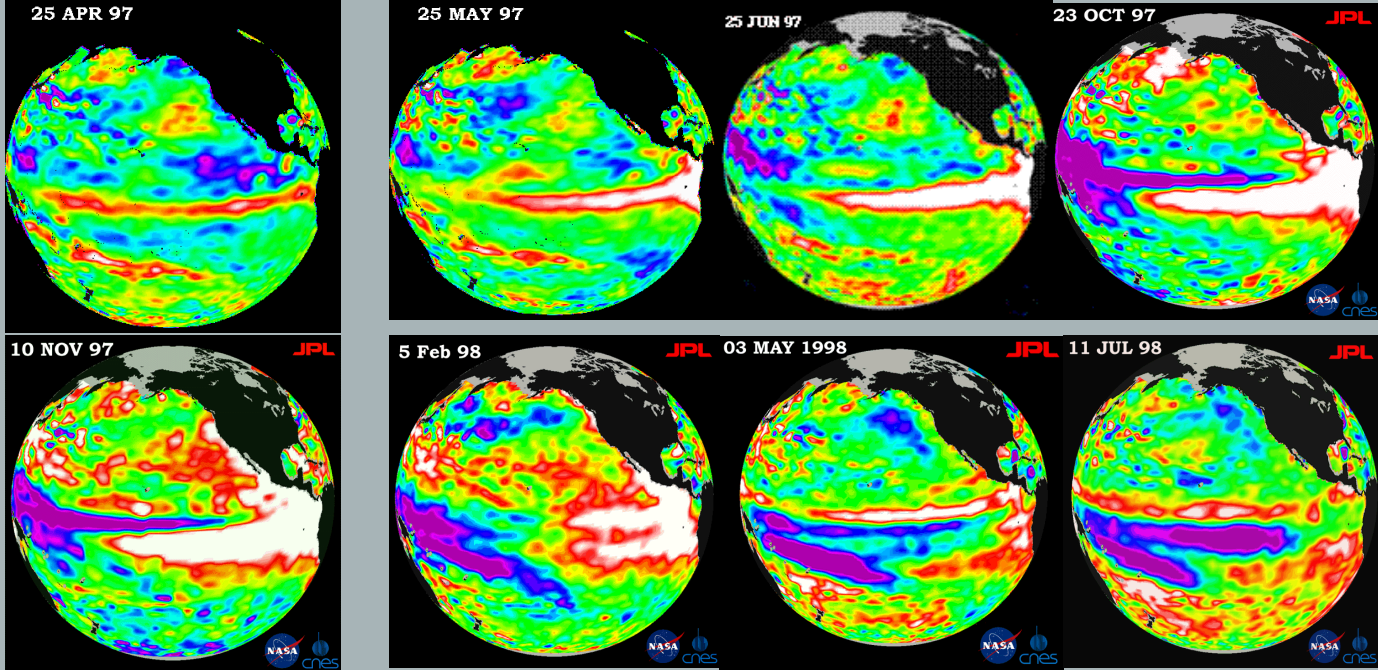


Quels sont les mécanismes El Niño ?

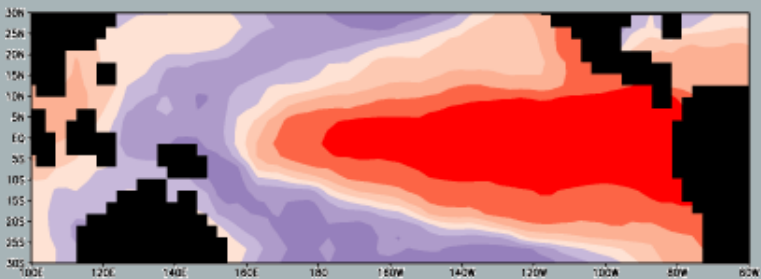
L'oscillateur retardé

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

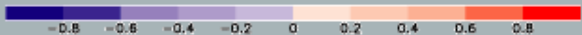
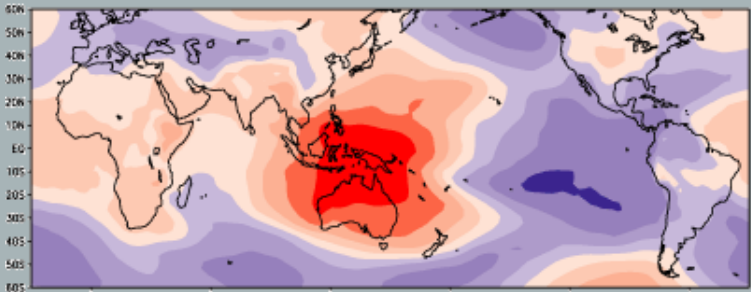




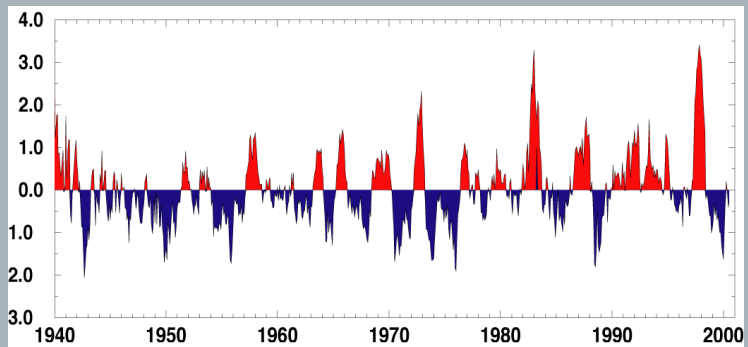
El Niño



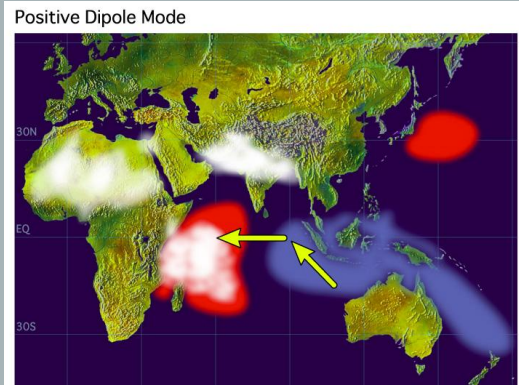
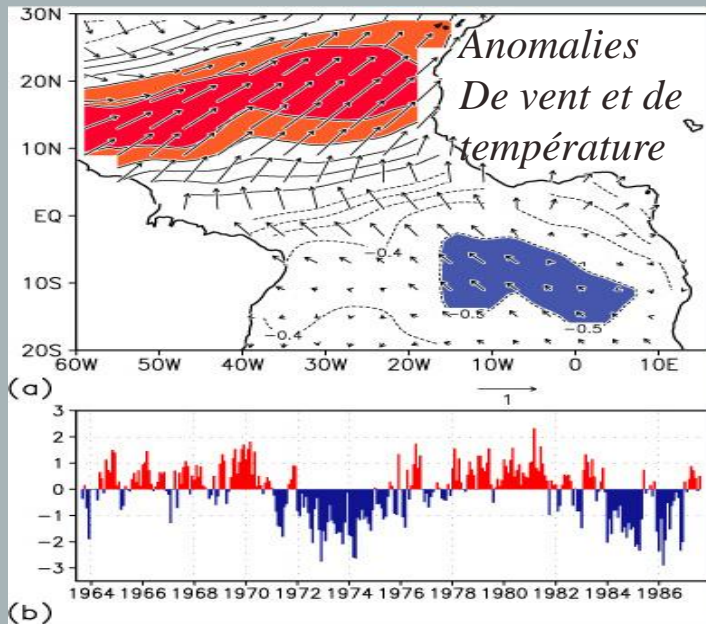
Southern Oscillation



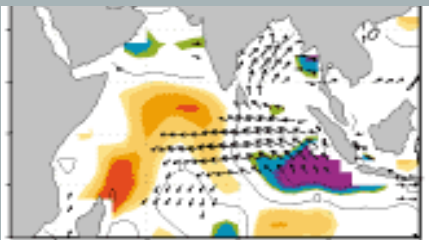
*ENSO :
Une histoire complexe*



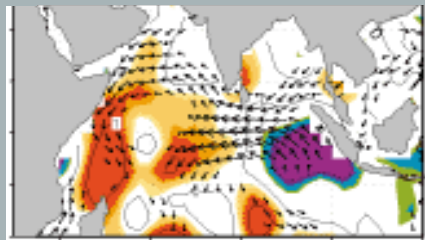
Les autres océans tropicaux



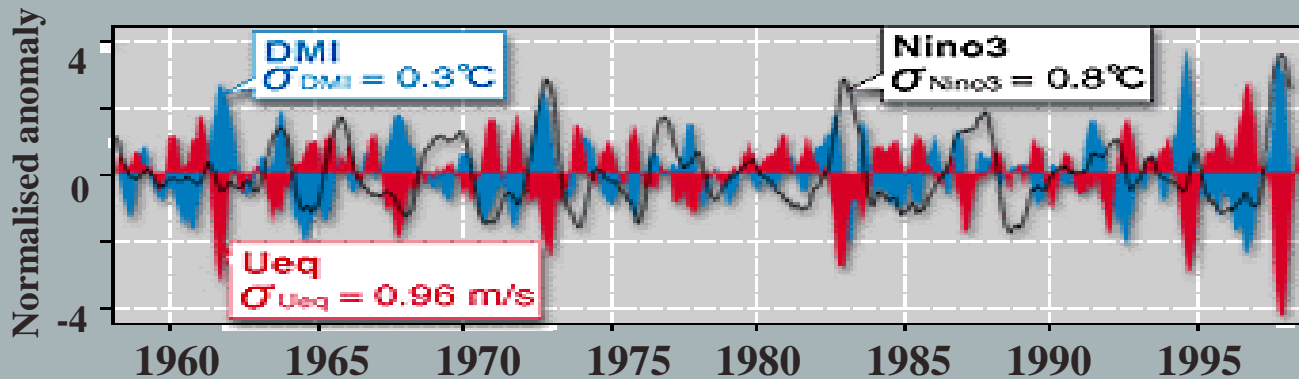
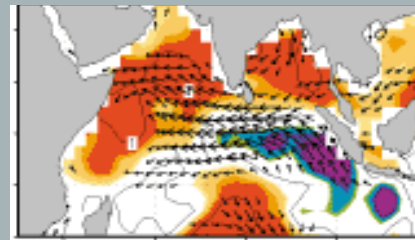
Octobre 1961



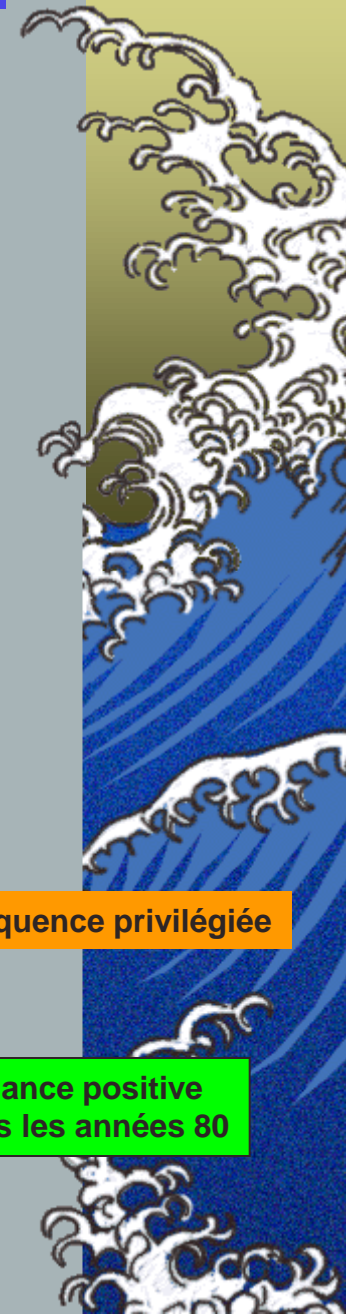
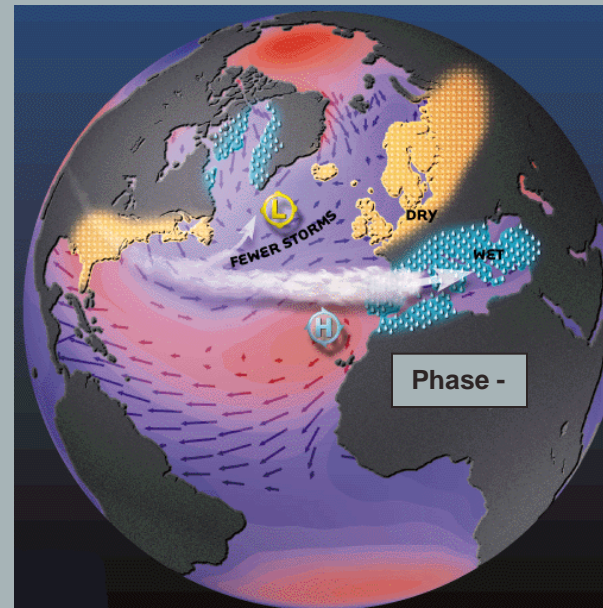
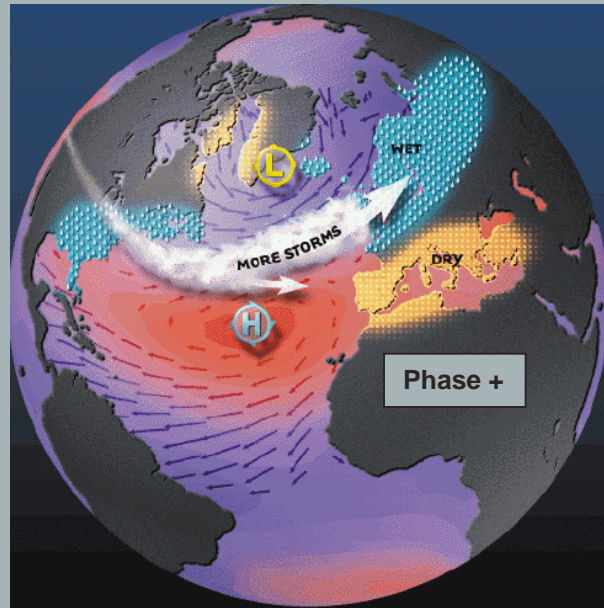
Octobre 1994



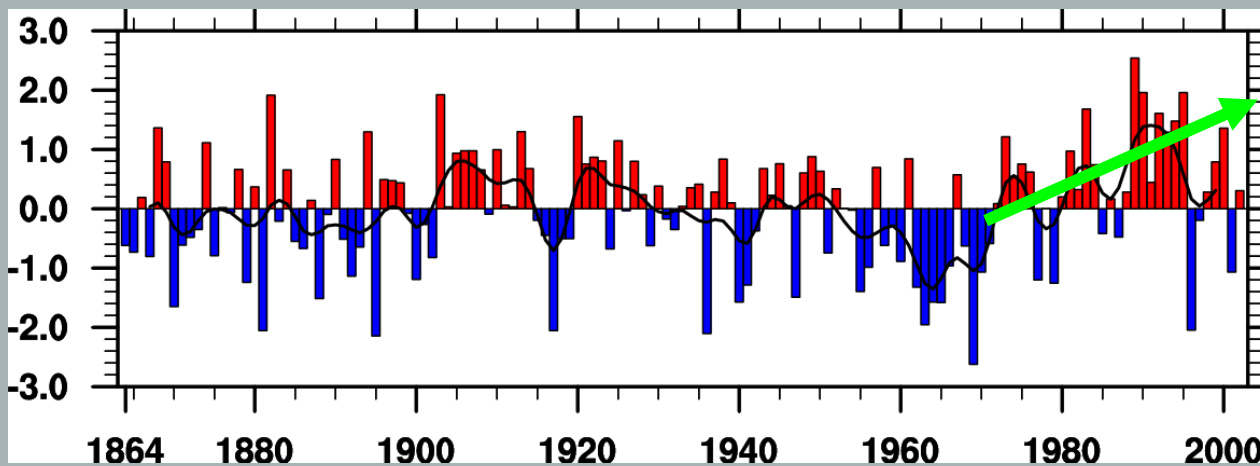
Octobre 1997



Oscillation Nord Atlantique (NAO)



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

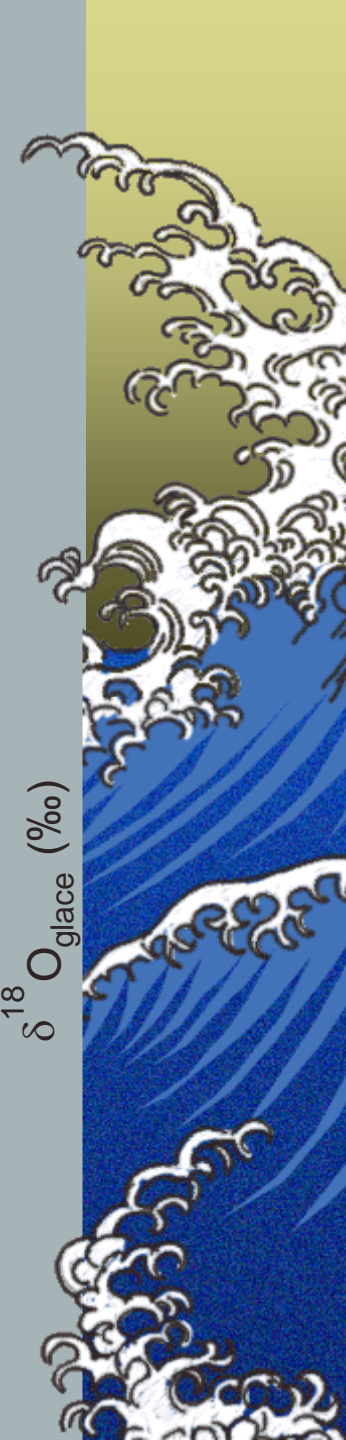
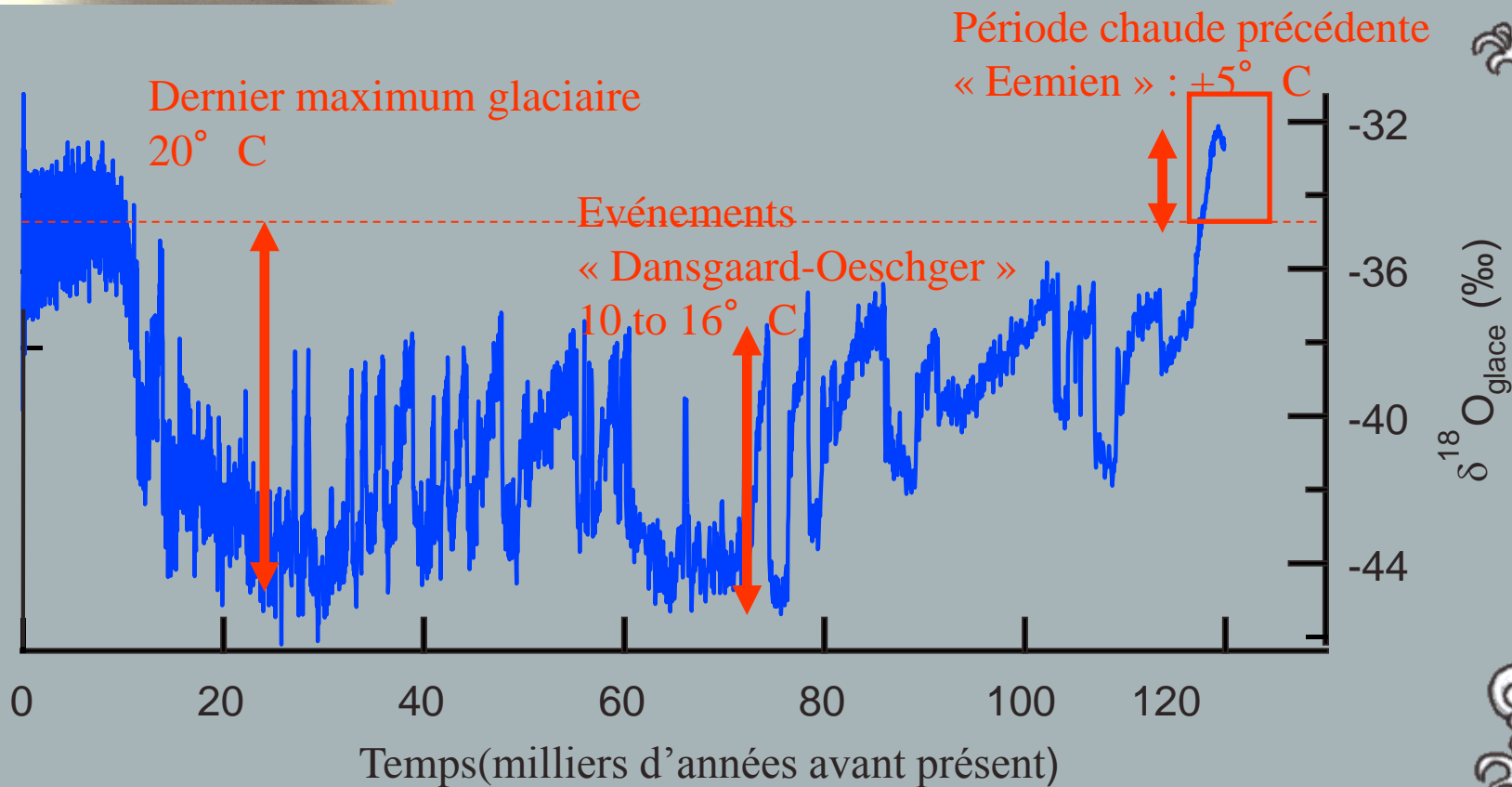


Pas de fréquence privilégiée

Tendance positive depuis les années 80



Accidents climatiques



Evènement d'Heinrich

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

=> Les icebergs atteignent le détroit de Gibraltar.

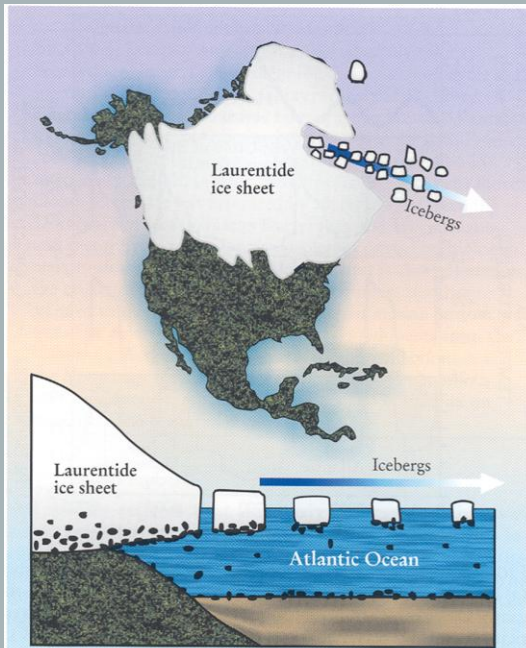


FIGURE 3. DURING A HEINRICH EVENT, icebergs surge into the North Atlantic Ocean. The lower panel illustrates the entrainment of debris (black) by icebergs and the subsequent sedimentation of the debris in the deep North Atlantic.

foraminifera tests

250 μm

sédiment glaciaire de l'Atlantique Nord



sédiment des niveaux de Heinrich

De provenance continentale

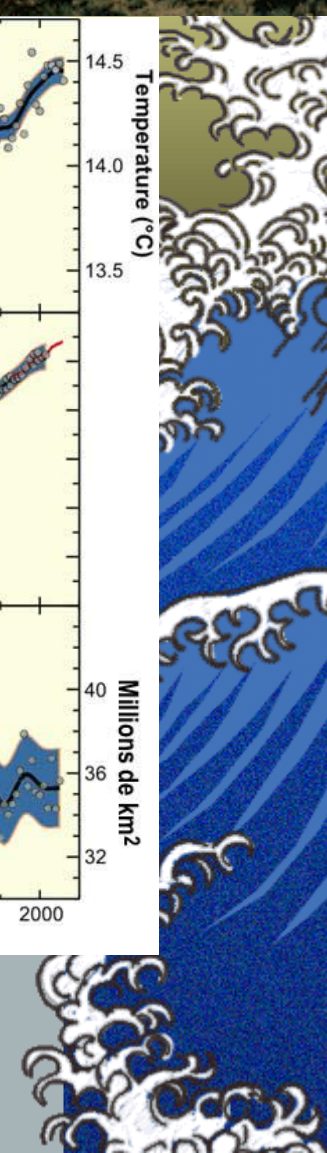
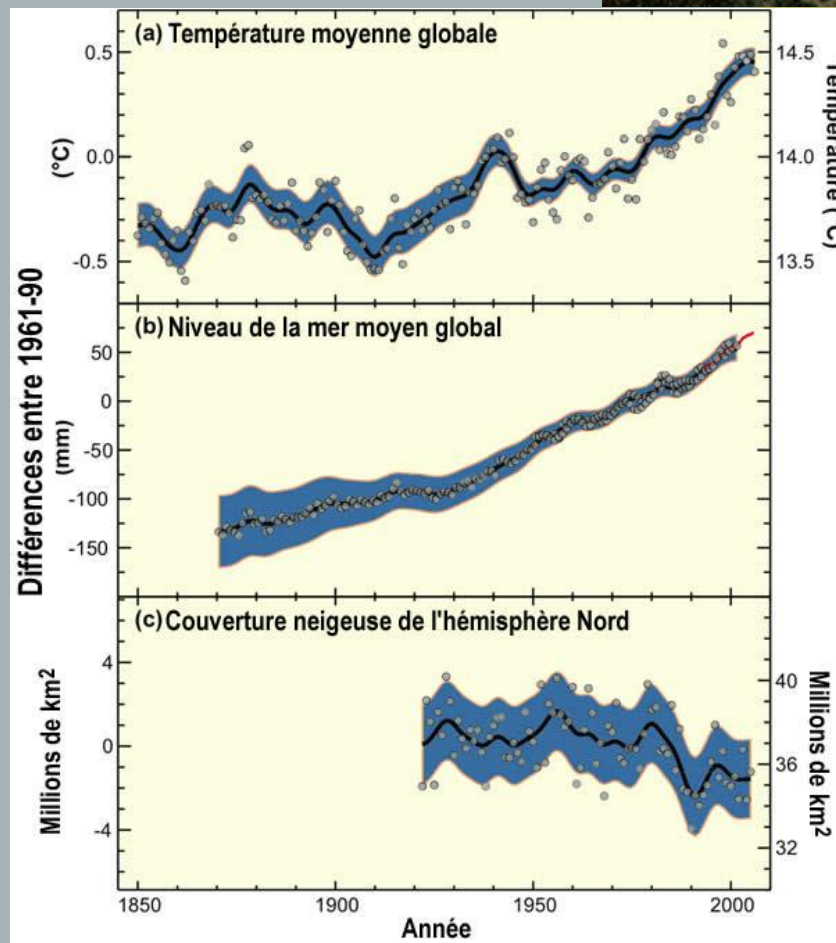
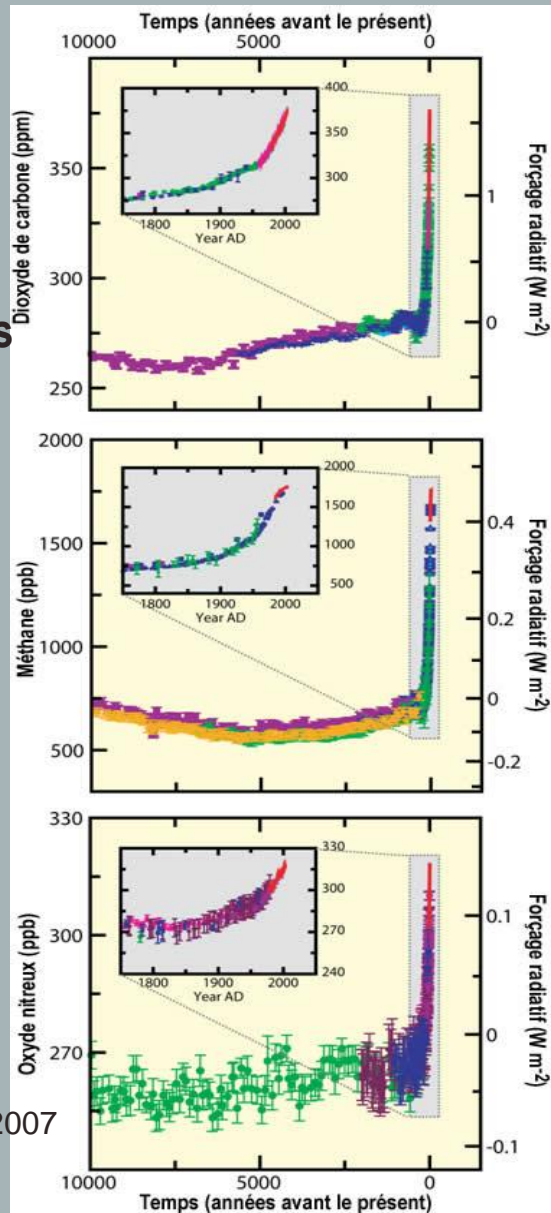
Un monde où la concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) croît



CO₂
+36 %
depuis
250 ans

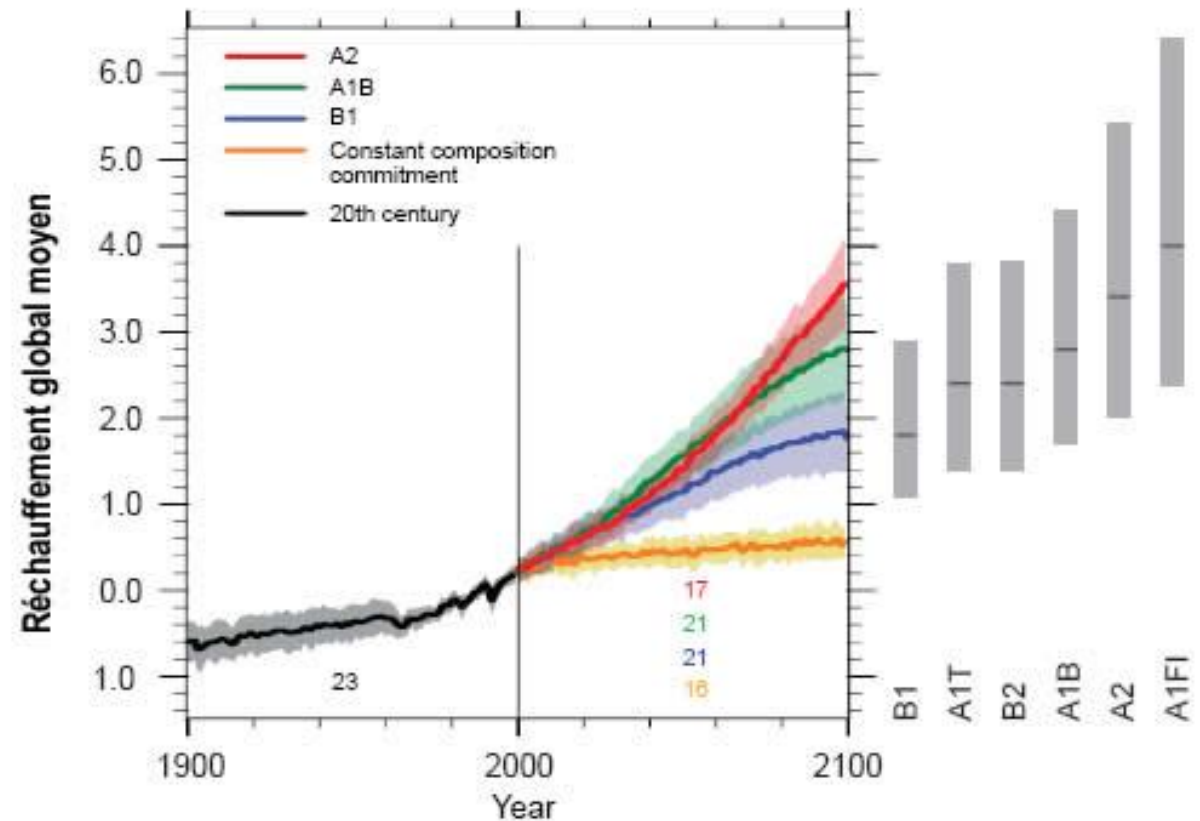
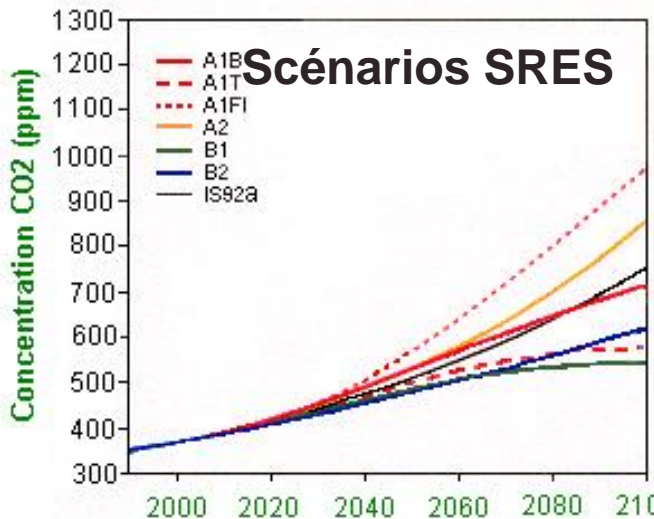
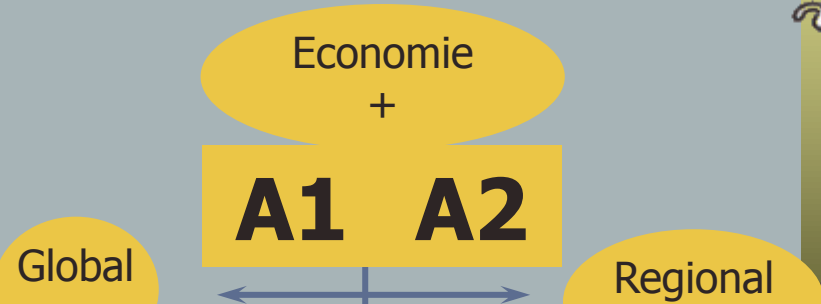
CH₄
+30 %
depuis
25 ans
12 ans

N₂O
114 ans



Projections : scénarios socio-économiques, développement, géopolitique

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



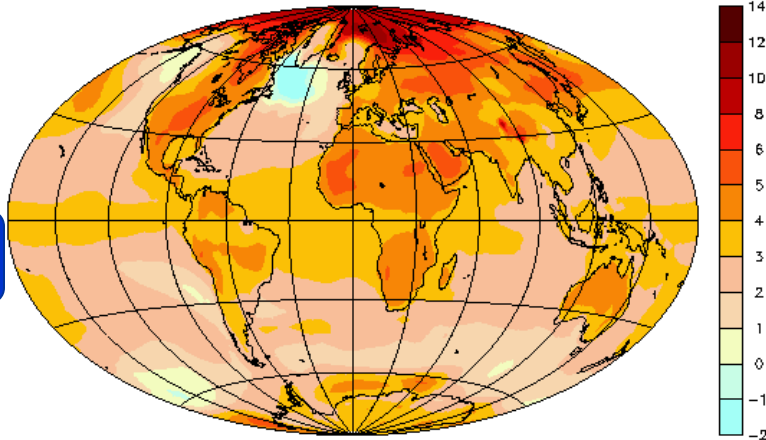
Modélisation des scénarios GIEC

Température in 2090-2100

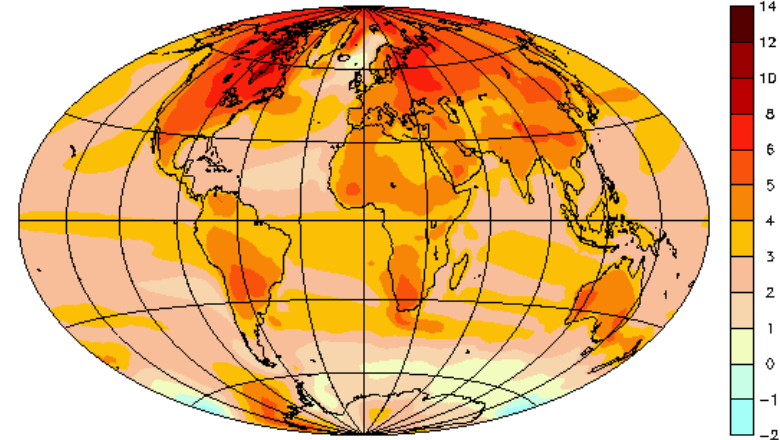
CNRM

IPSL

A2

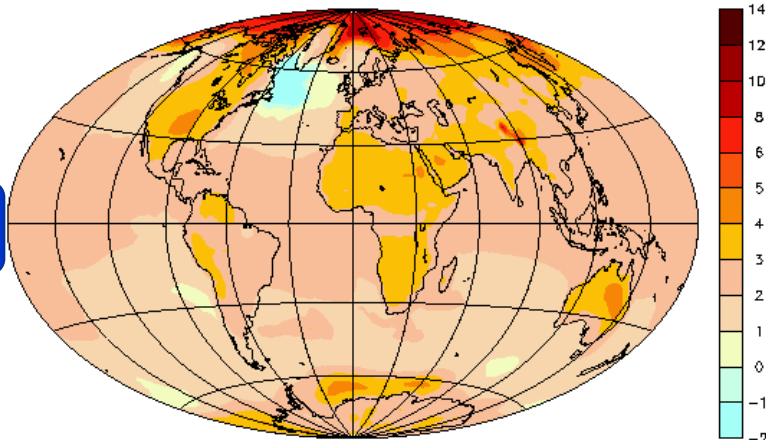


IPCC / CNRM – SRESA2 scénario – Anomalies de la température (deg C)
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

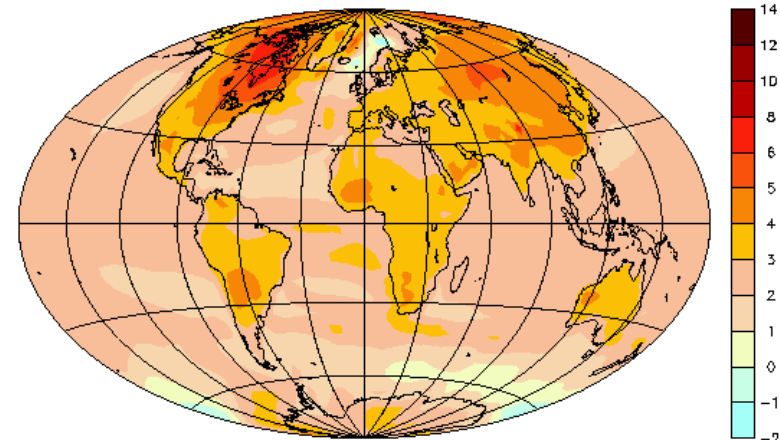


IPCC / IPSL – SRESA2 scénario – Anomalies de la température (deg C)
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

B1



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

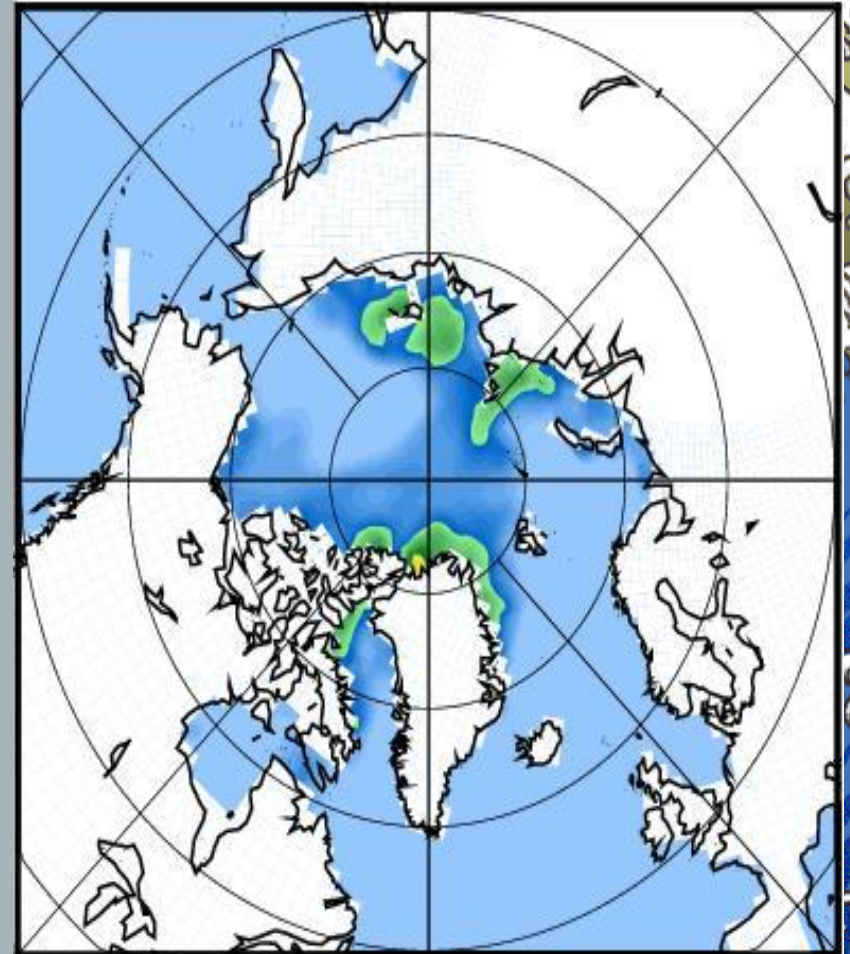


IPCC / IPSL – SRESA1B scénario – Anomalies de la température (deg C)
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

Évolution de la banquise Arctique

Concentration
simulée de la
banquise
arctique de
1999 jusqu'en
2099
(SRES A2)

SA2-Conc. glace-2099/00



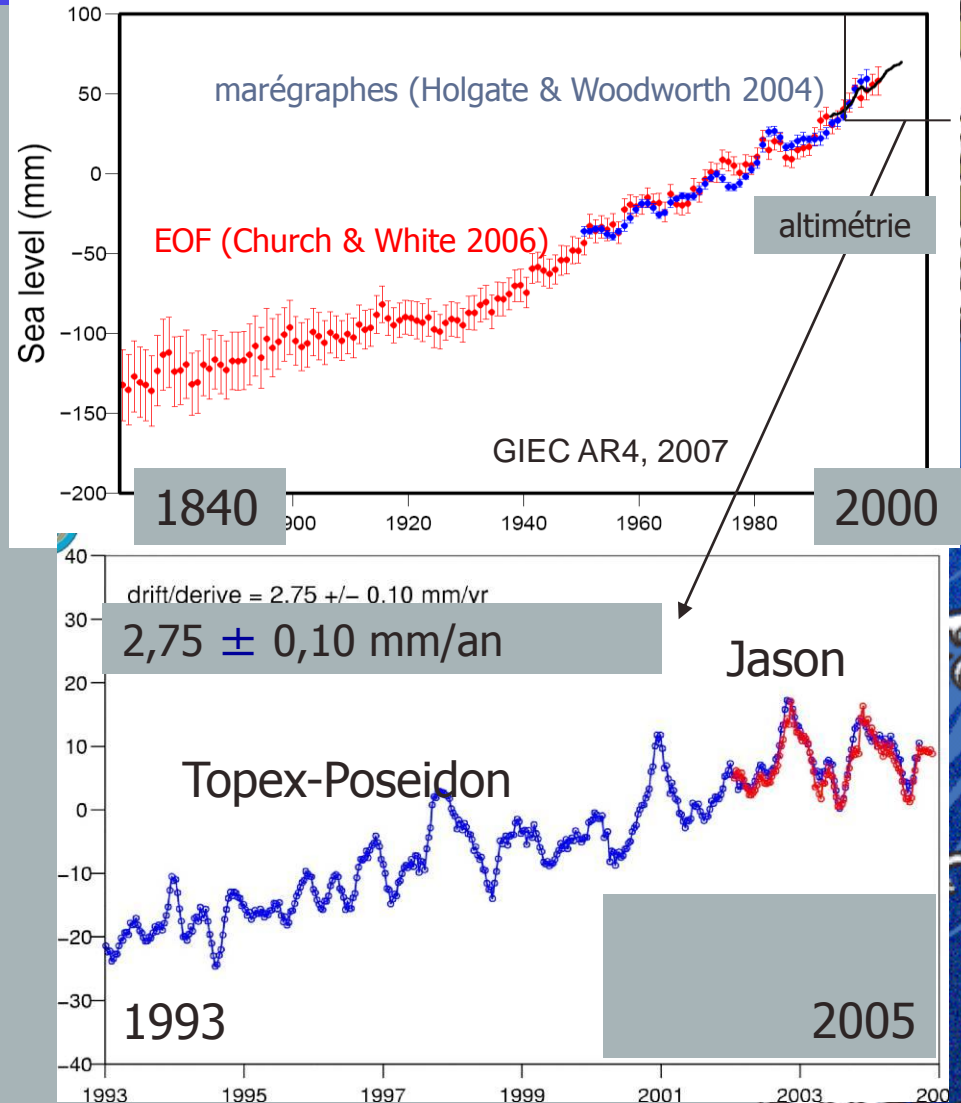
Niveau de la mer observé

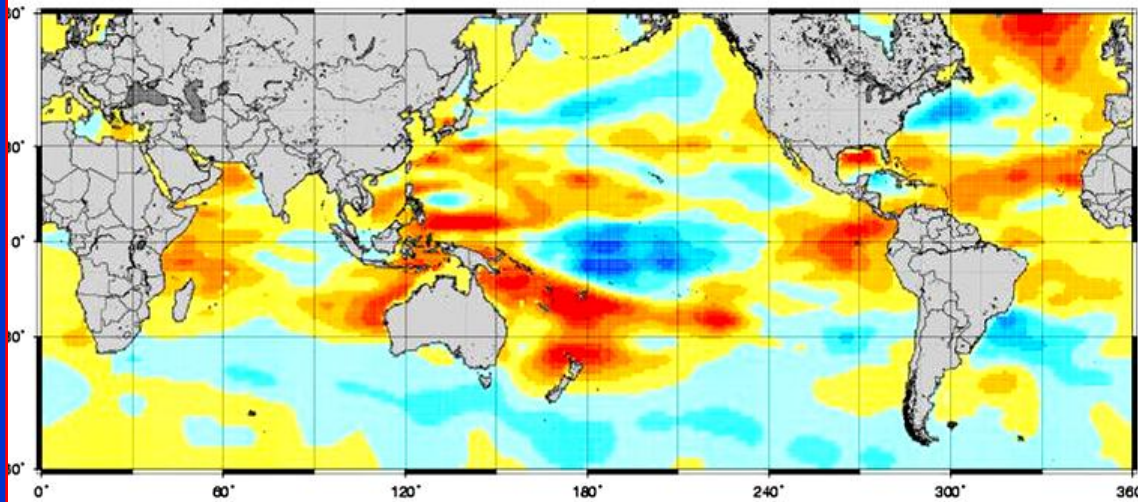
Tendances en augmentation

1900-2000 : **1,7** ± 0,5 mm/an

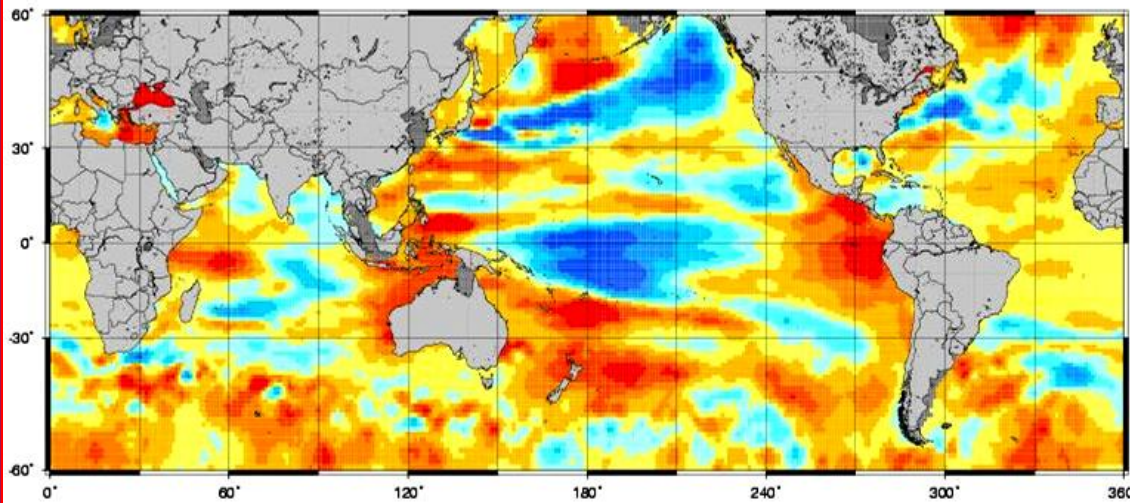
1961-2003 : **1,8** ± 0,5

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

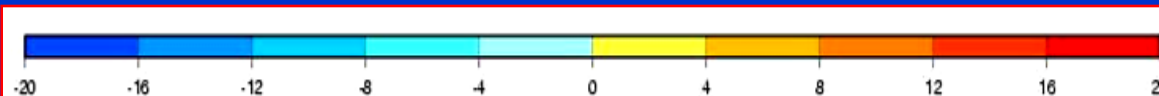




**Augmentation du niveau
de la mer due à la
dilatation thermique des
océans
(1993-1998)**



**Augmentation du
niveau de la mer
observée par
Topex/Poseidon
(1993-1998)**

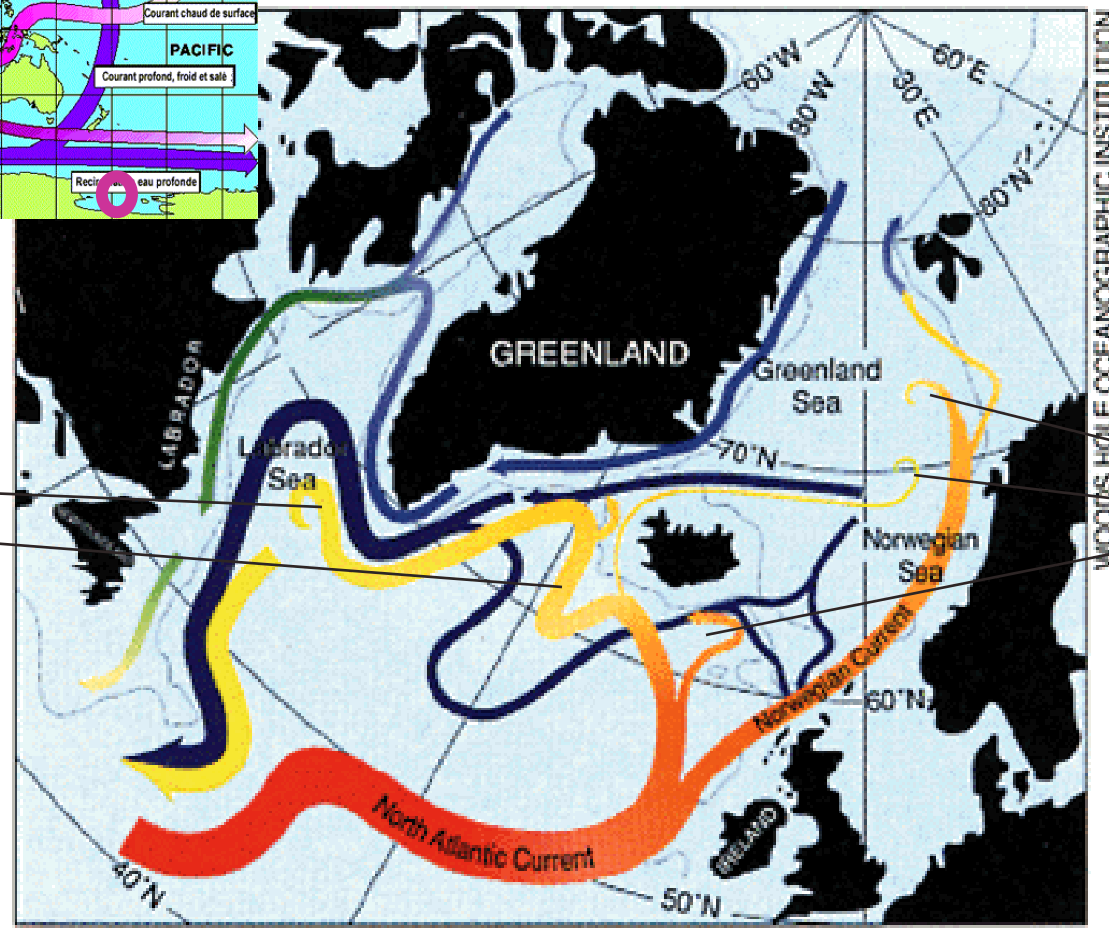
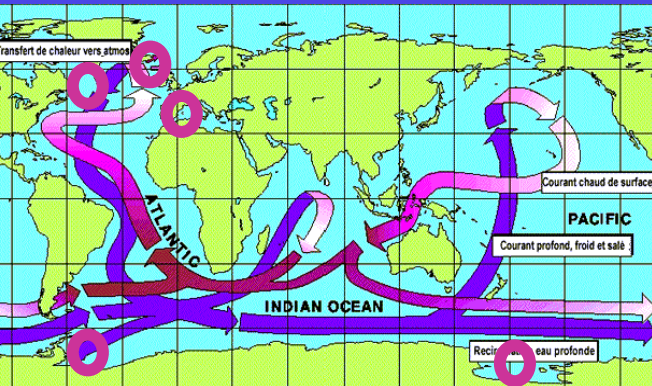


De : Anny Cazenave
LEGOS, Toulouse, France, 2007

-20 mm/an

+20 mm/an

Circulation de surface et subsurface dans les mers sub-arctiques



Convection

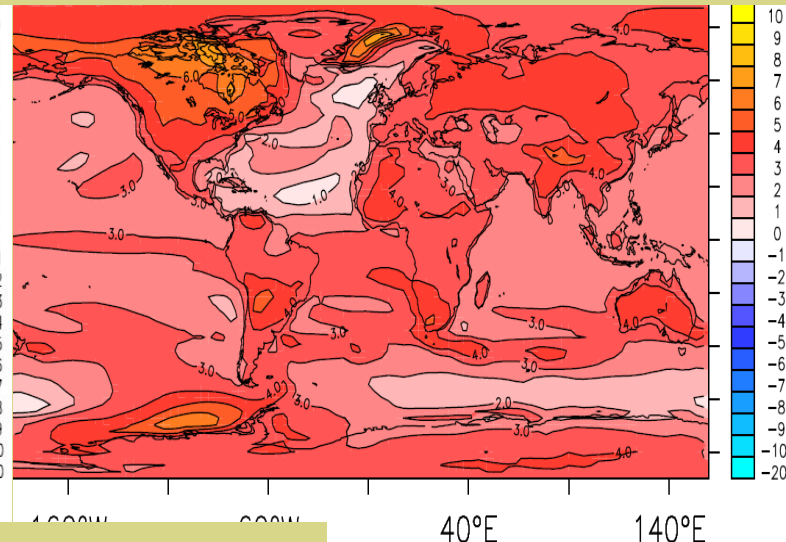
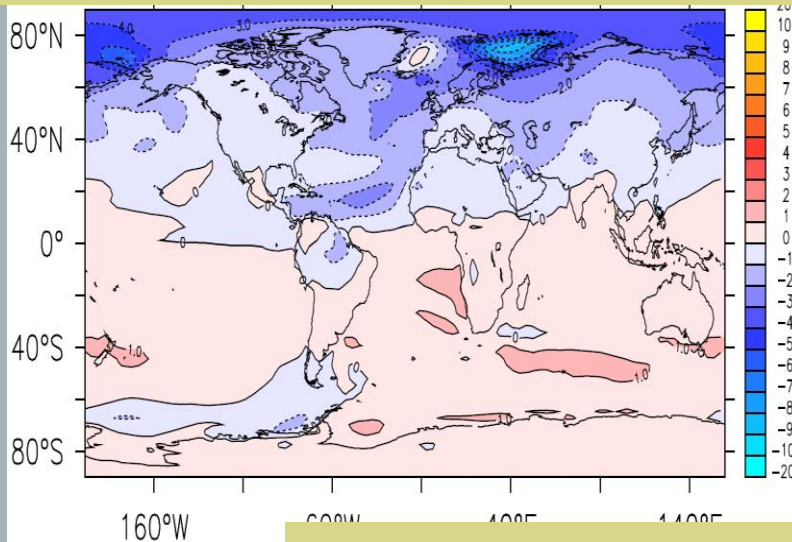
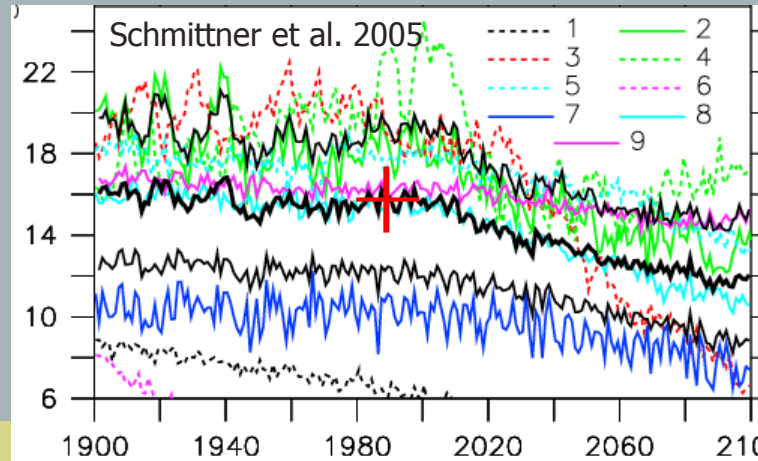
Convection



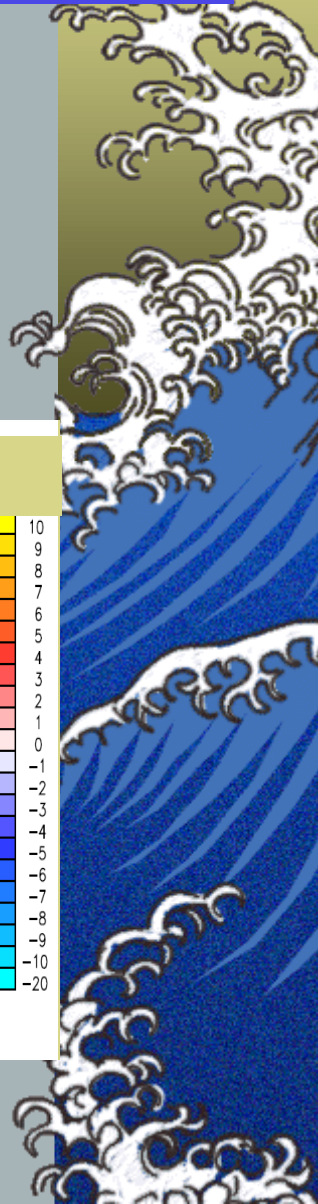
Projections : conséquences inconnues

Une circulation océanique modifiée?

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

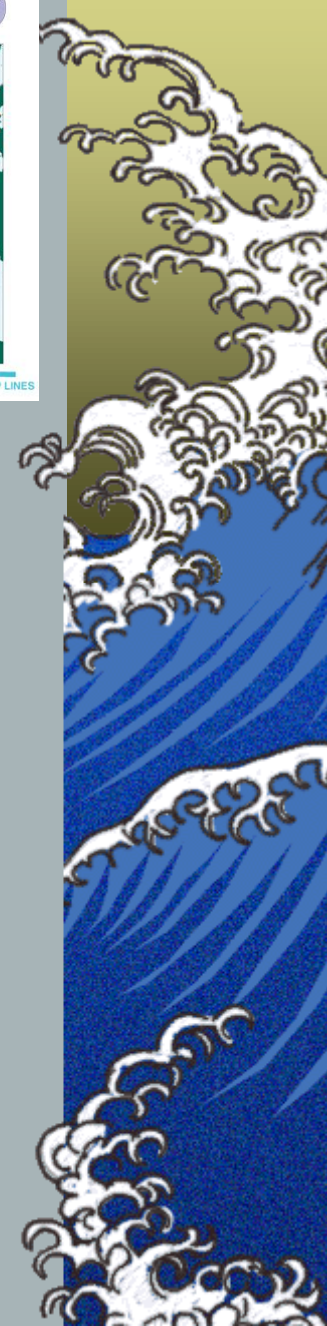
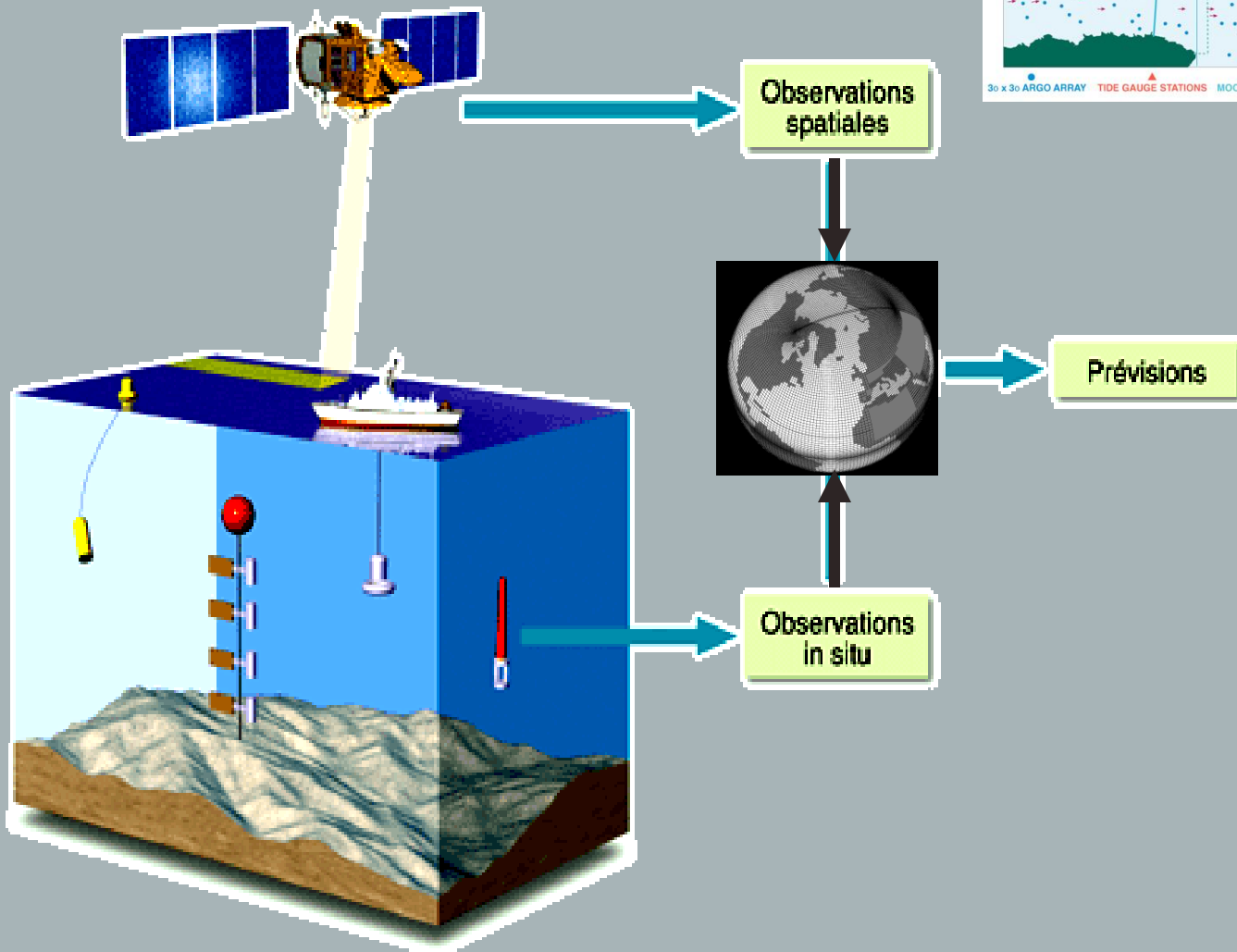
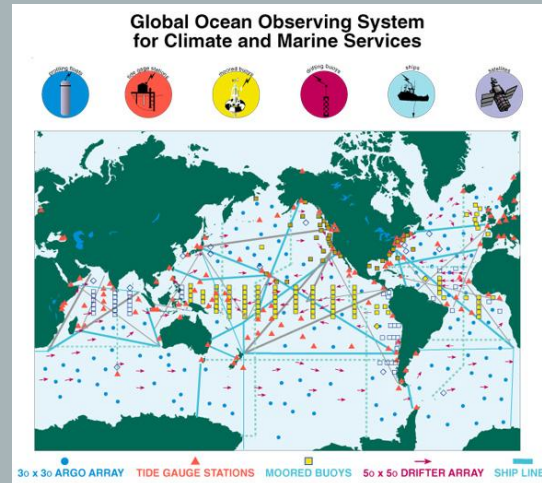


Avec – sans fonte de calotte, dans 4 à 5 siècles
Swingedouw et al., 2006



Surveiller l'océan

Le système MERCATOR



Conclusions

- De par sa masse et sa capacité thermique, l'océan est un joueur de poids dans le système.
- Sa dynamique, conduite par les « équations primitives » sur la sphère, 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.