

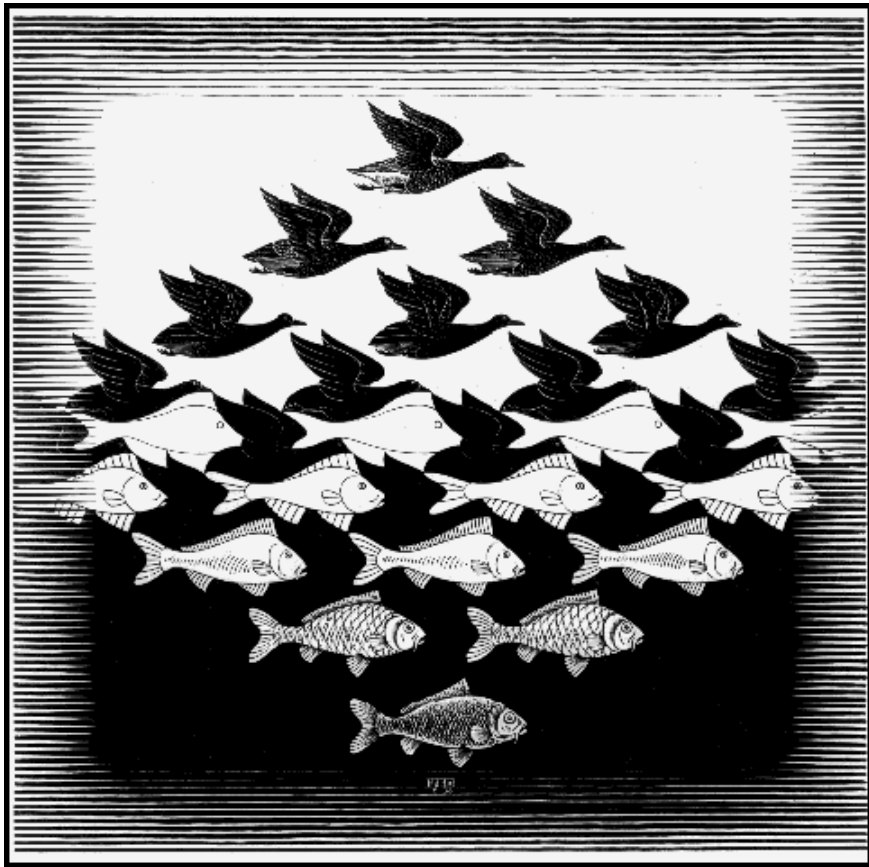
La convection dans l'océan

A photograph of a turbulent ocean with white-capped waves under a clear blue sky. The water is a deep, vibrant blue, and the waves are breaking, creating white foam. The sky is a pale, clear blue. The overall scene conveys a sense of dynamic movement and energy in the marine environment.

Convection dans l'océan

- Concept paradoxal
- Caractéristiques de l'océan
- Forçage de la convection
- Moteurs de la convection
- Exemples de convection

Convection dans l'océan



- Complexe
- Couplage avec atmosphère
- Enveloppes fluides
- Composants dynamiques
- Spécificités de l'océan

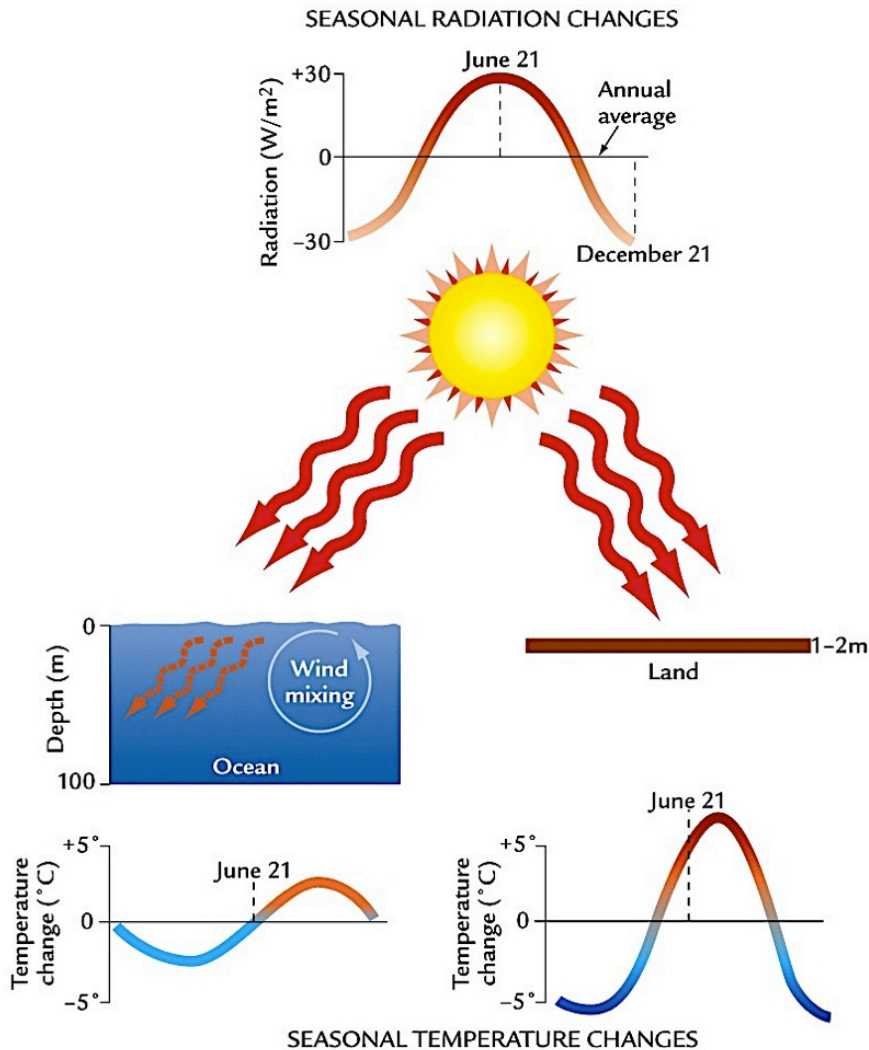
Convection dans l'océan

- Concept paradoxal
- **Caractéristiques de l'océan**
- Forçage de la convection
- Moteurs de la convection
- Exemple de convection

Caractéristiques de l'océan

- 70% surface terre
- Profondeur moyenne : 3800 m
- $\text{Masse}_{\text{océan}} = 300 \times \text{Masse}_{\text{atmosphère}}$
- Couche mince : $1/1700 R_{\text{terre}}$
- Propriété majeure océan : capacité thermique
- $\text{Capacité}_{\text{thermique océan}} = 1000 \times \text{Capacité}_{\text{atmosphère}}$

Capacité thermique océan



- Amplitude thermique
- Stockage énergie
- Rétroaction

Caractéristiques de l'océan

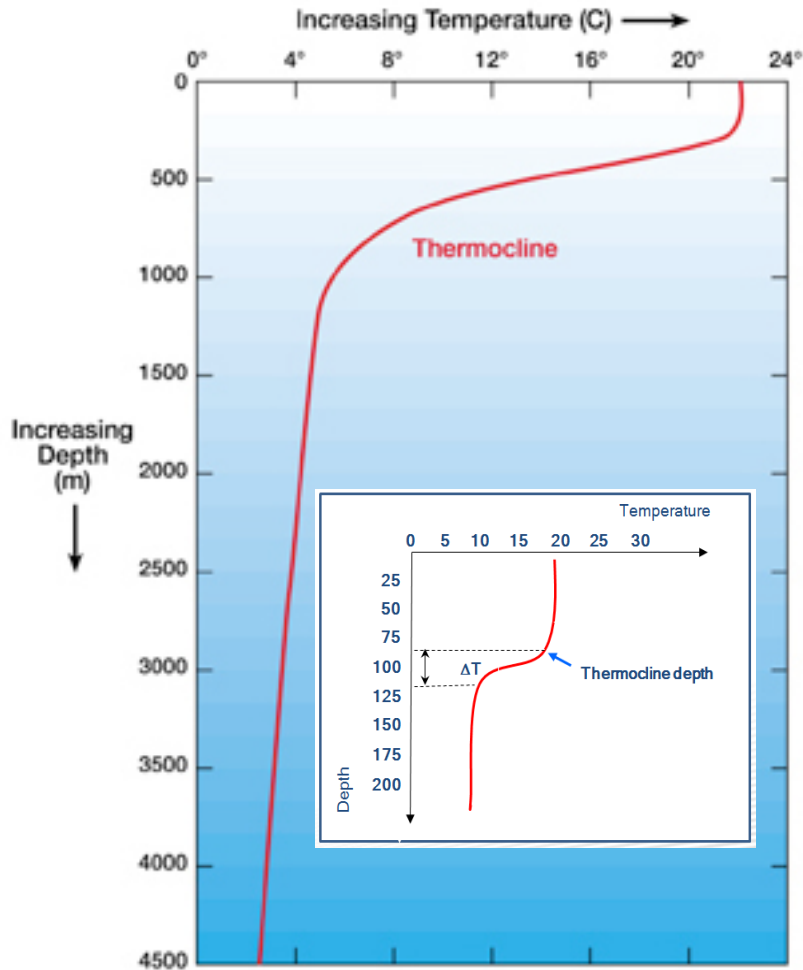
- **Océan est stratifié**
 - Propriétés physico-chimiques
 - Variations horizontales \ll Variations verticales

Caractéristiques de l'océan



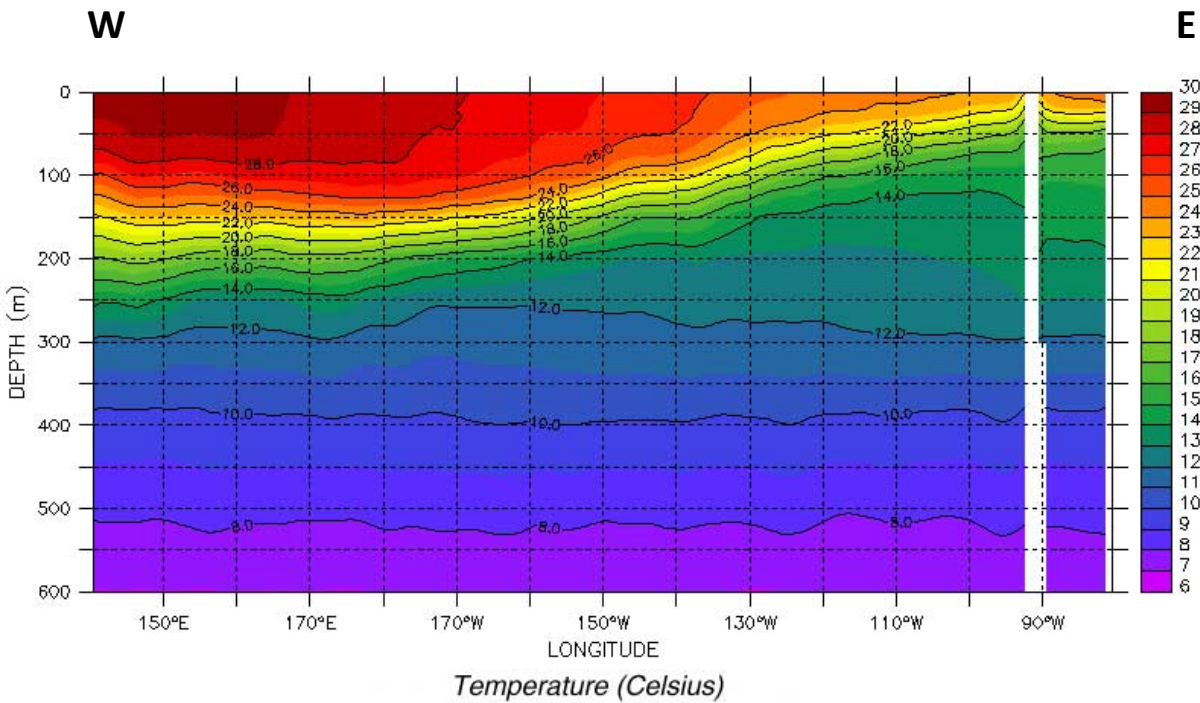
Stratification de l'océan

Stratification de l'océan



- Zone de transition → Thermocline
 - Eaux superficielles chaudes et eaux profondes froides
 - Gradient max de température
 - <1000 m : eau toujours froide

Stratification de l'océan



- Stratification

- Pente faible thermocline

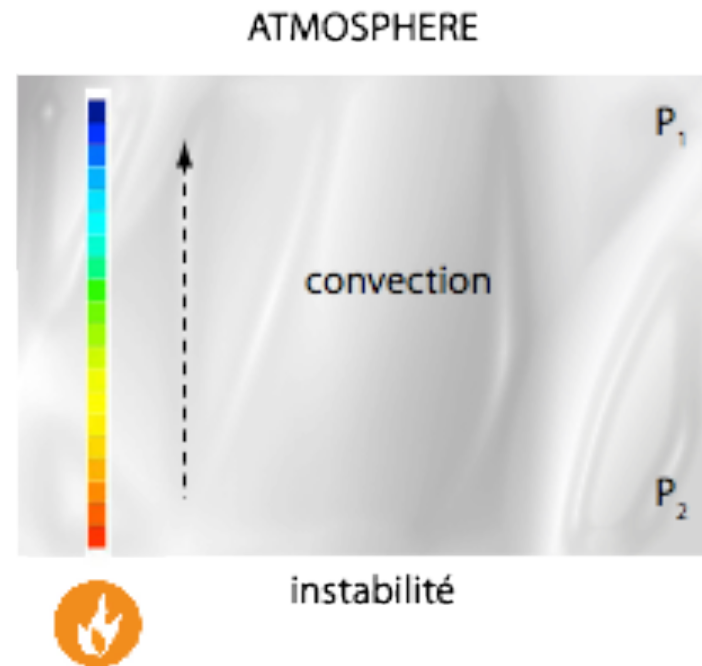
- Couche de mélange

- Stabilité couches profondes

Caractéristiques de l'océan

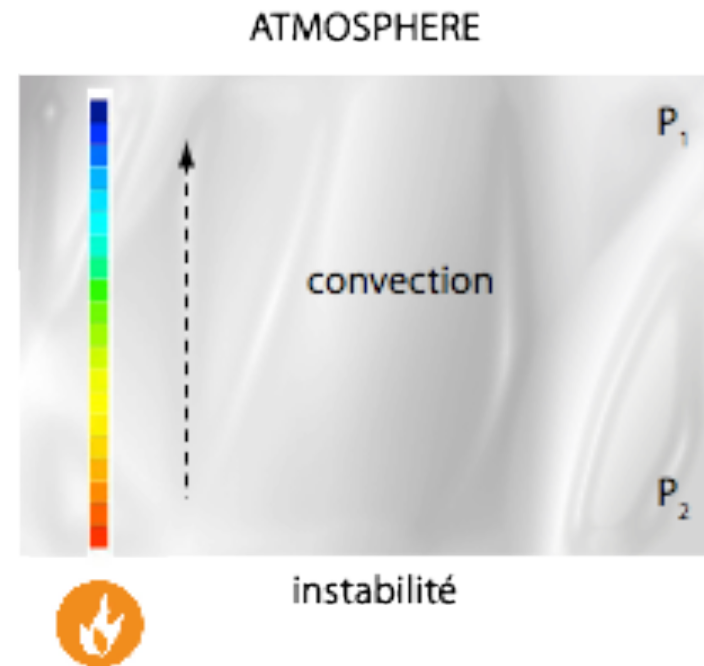
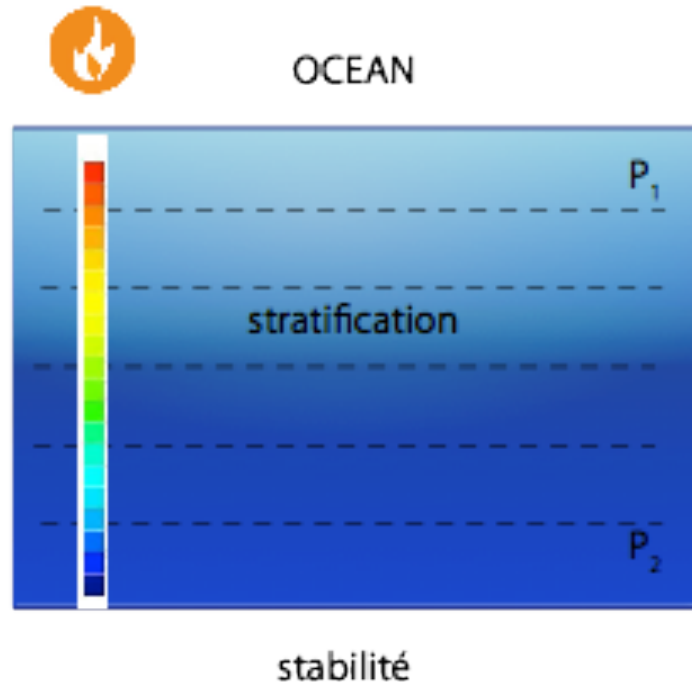
- **Océan est stratifié**
 - Propriétés physico-chimiques spécifiques
 - Variations horizontales \ll Variations verticales
- Équations et équilibres similaires dans l'atmosphère MAIS conditions **de stabilité différentes**

Conditions de stabilité



- Atmosphère: chauffée par le bas
- Convection

Conditions de stabilité



- Océan: chauffé par le haut
- stratification

- Atmosphère: chauffée par le bas
- Convection

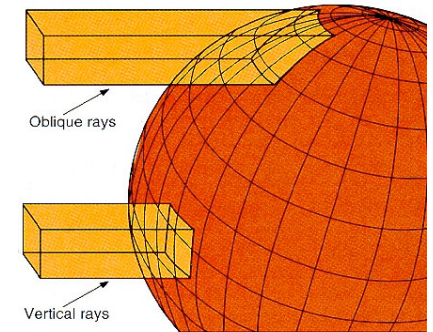
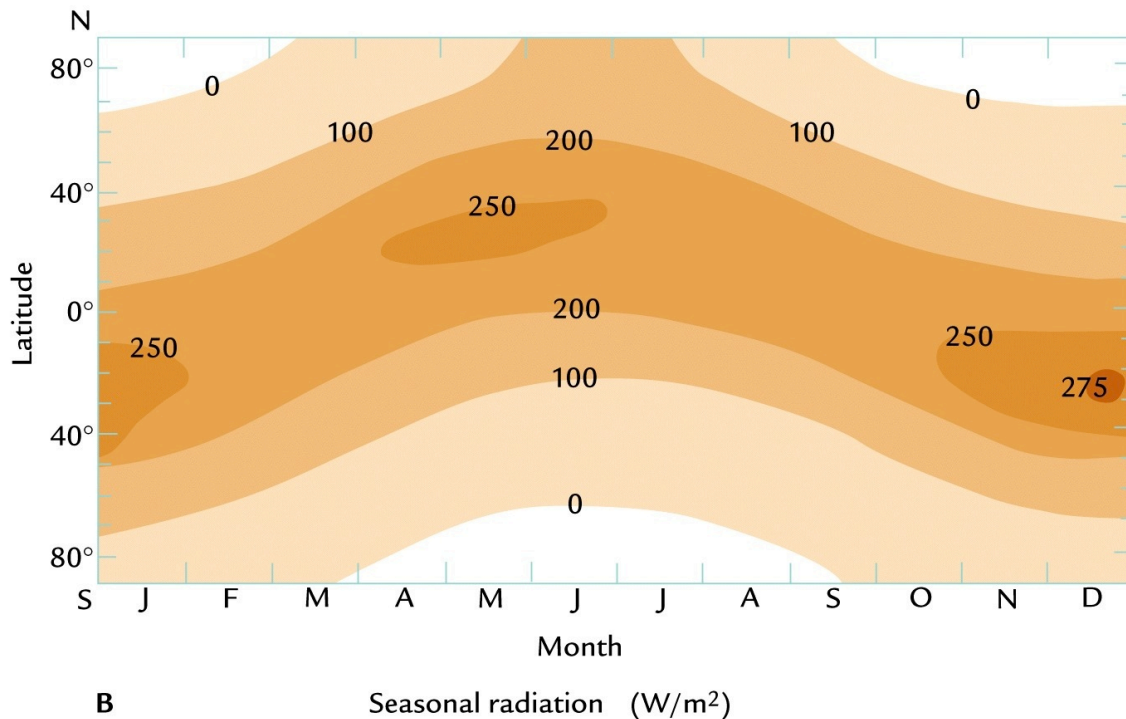
Convection dans l'océan

- Concept paradoxal
- **Caractéristiques de l'océan → stratification inhibe les échanges verticaux**
- Forçage de la convection
- Moteurs de la convection

Convection dans l'océan

- Concept paradoxal
- Stratification de l'océan
- **Forçage de la convection → déséquilibre distribution énergie à la surface de la terre**
- Moteurs de la convection

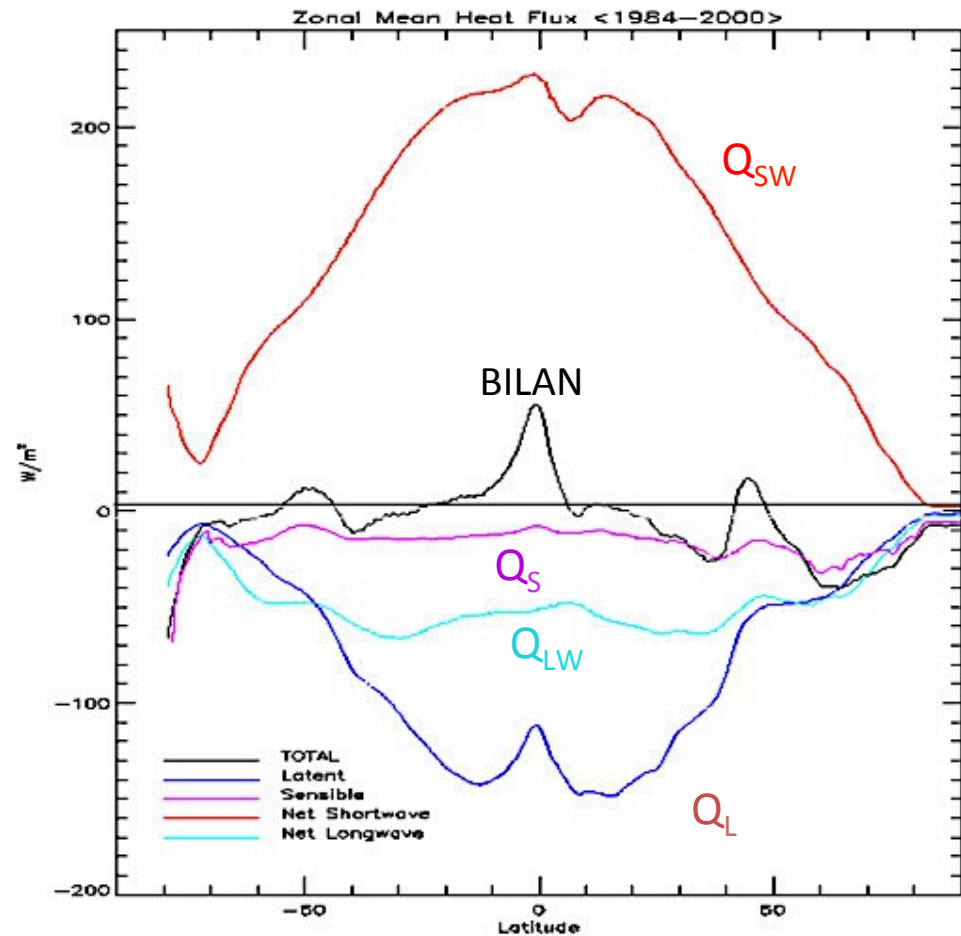
Déséquilibre de la distribution d'énergie



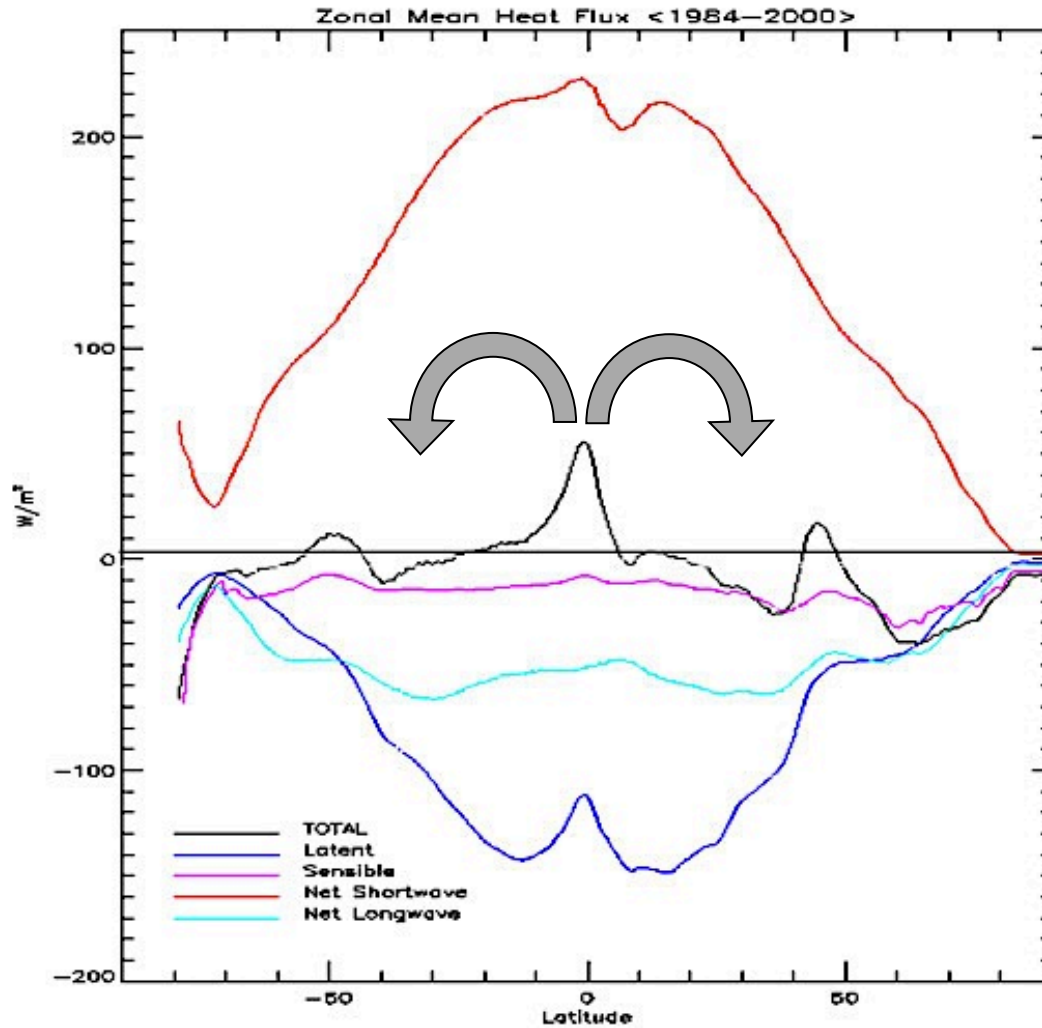
- Latitude
- Inclinaison Terre

Bilan radiatif

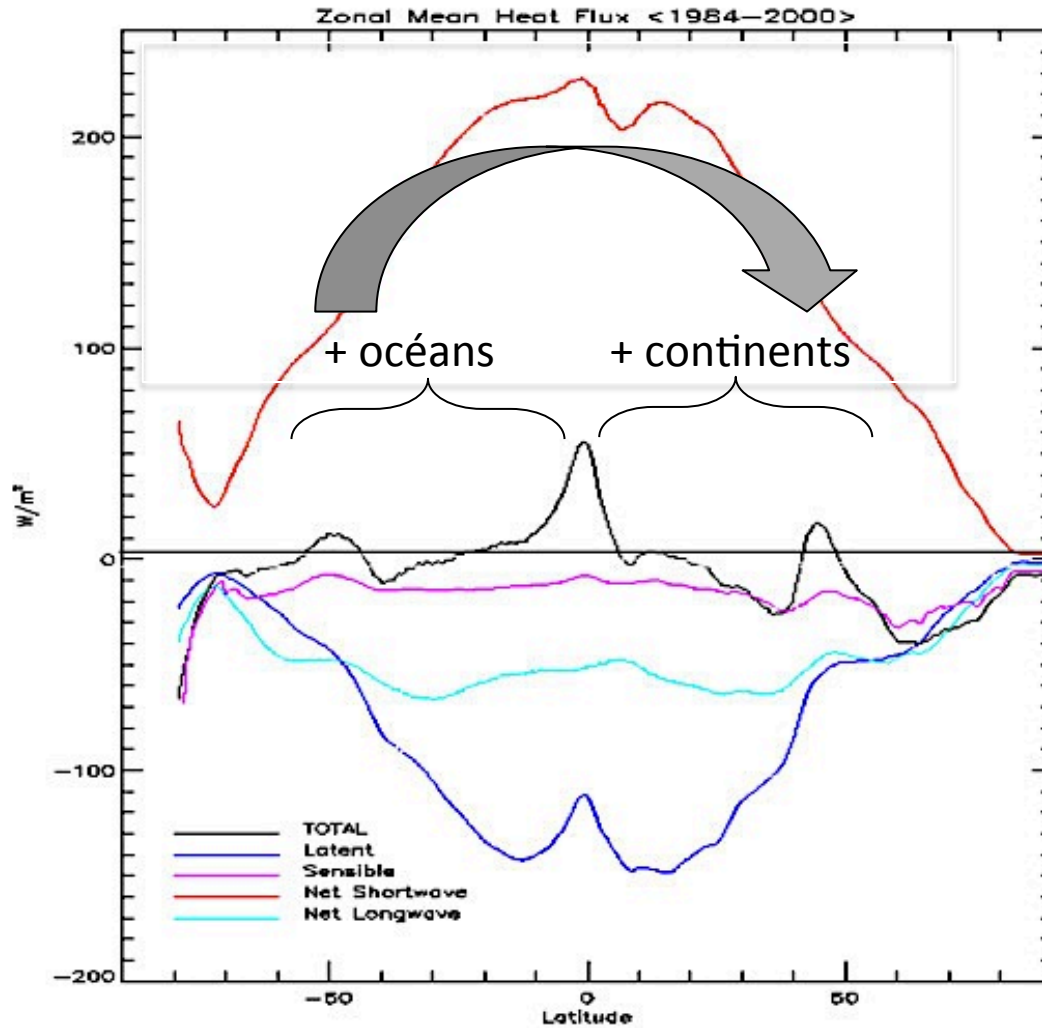
- Rayonnement absorbé (Q_{SW})
- Rayonnement émis (Q_{LW}) → IR
- Chaleur latente (Q_L) → chaleur échangée lors des changements d'état = évaporation
- Chaleur sensible (Q_S) → chaleur échangée sans changement de phase: conduction thermique



Transfert d'énergie

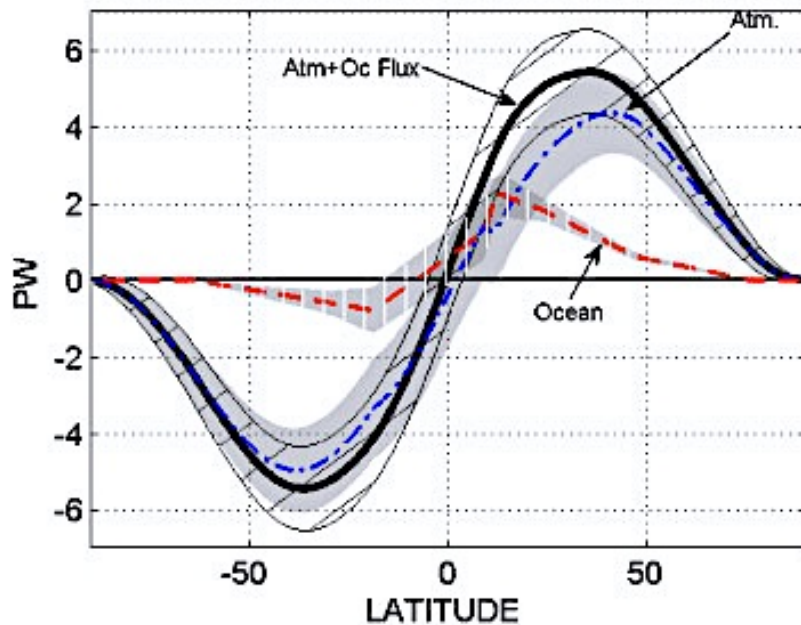


Transfert d'énergie



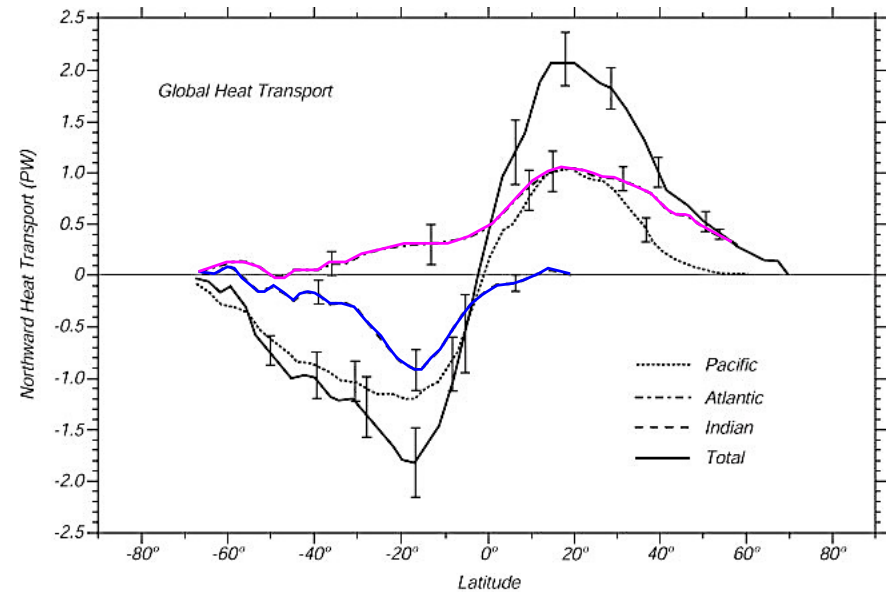
Transfert d'énergie

PW = 10^{15} Watts



- Valeurs négatives indiquent un transport vers le Sud

Transport océanique



- Maximum transfert océanique chaleur à 20°N
- Océan atlantique = transport vers le N même dans HS

Convection dans l'océan

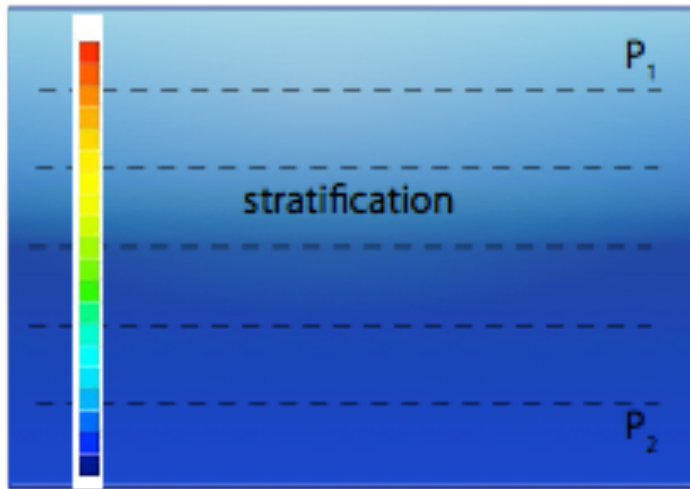
- Concept paradoxal
- Stratification de l'océan
- Forçage de la convection → déséquilibre distribution énergie à la surface de la terre
- **Moteurs de la convection**

Moteurs de la convection

Stratification inhibe les transferts



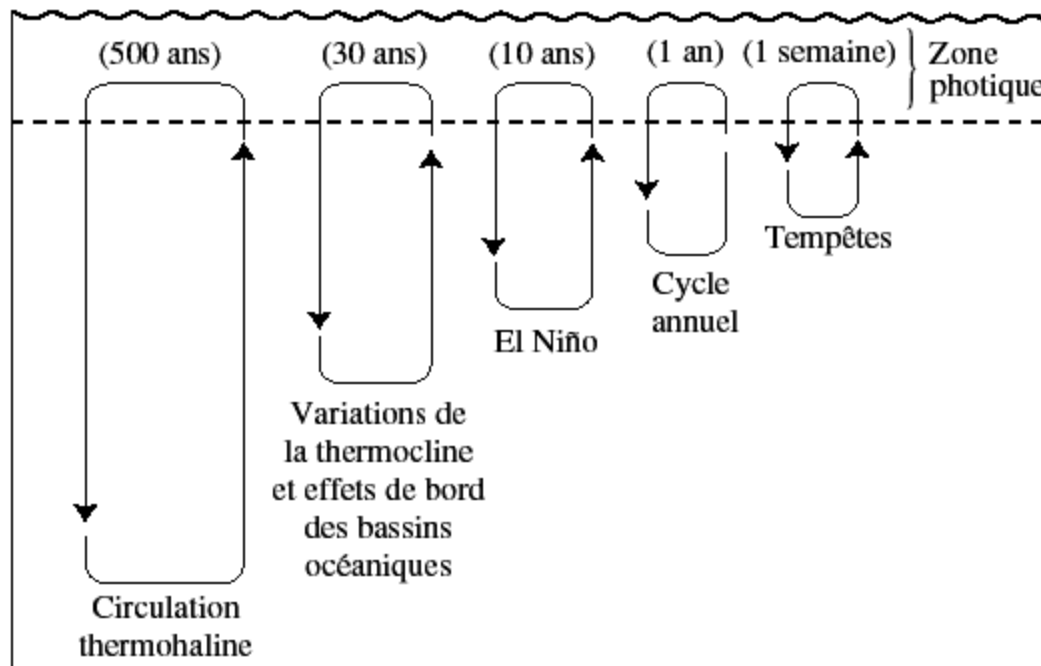
OCEAN



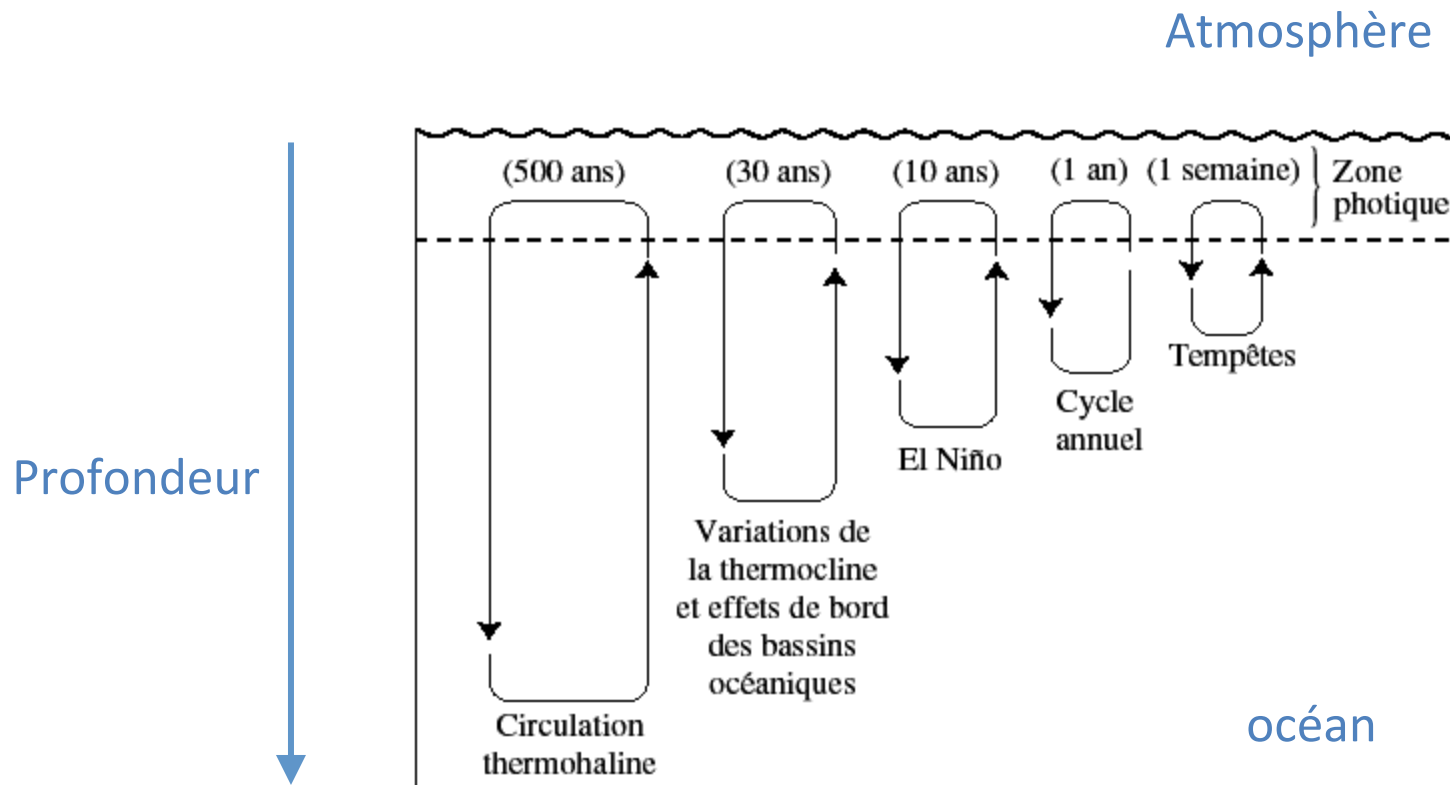
stabilité

- Transferts horizontaux
→ énergie mécanique
- Transferts verticaux
→ contraste de densité

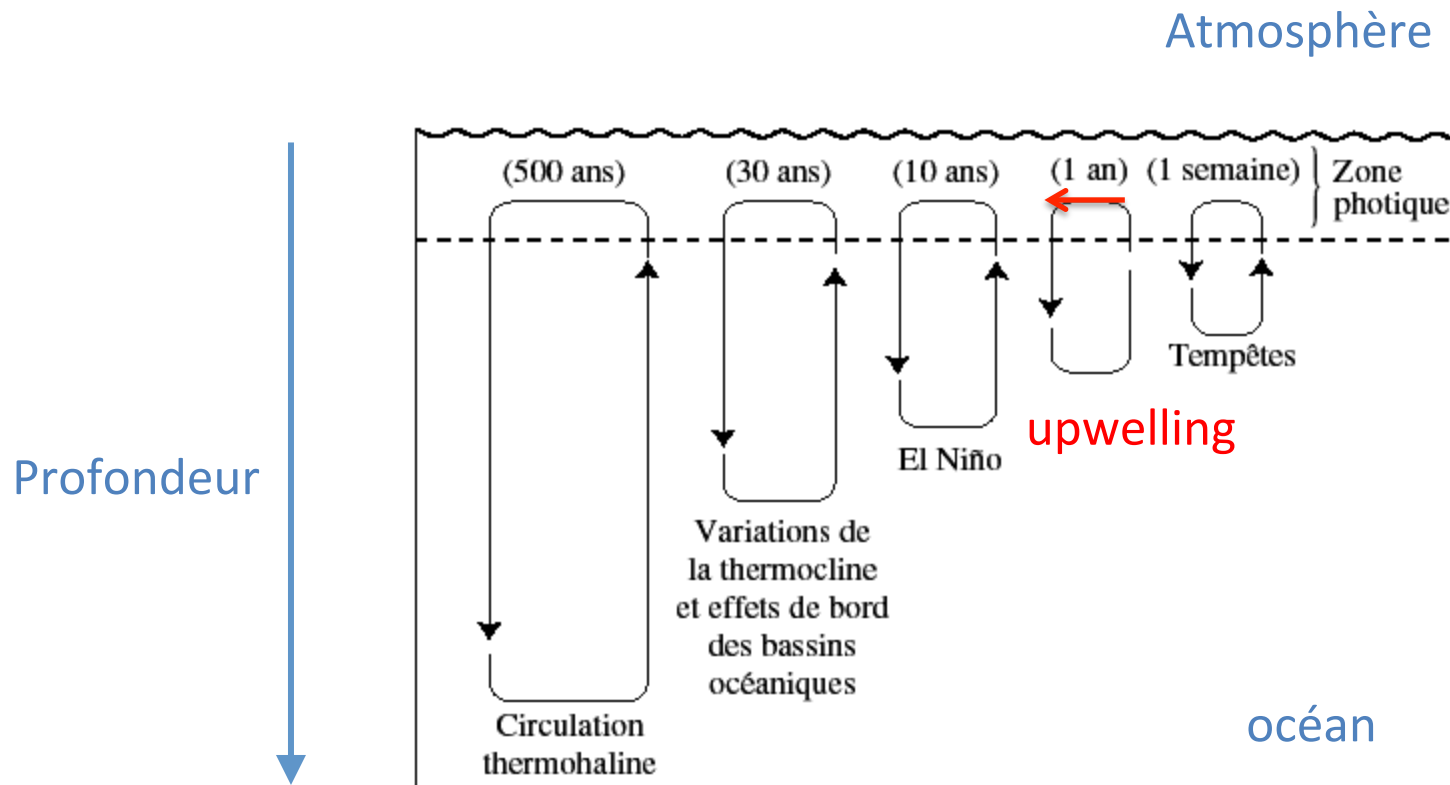
Exemple de convection à différentes échelles



Exemple de convection à différentes échelles



Exemple de convection à différentes échelles



Vent et convection à l'échelle locale



Illustration d'un upwelling

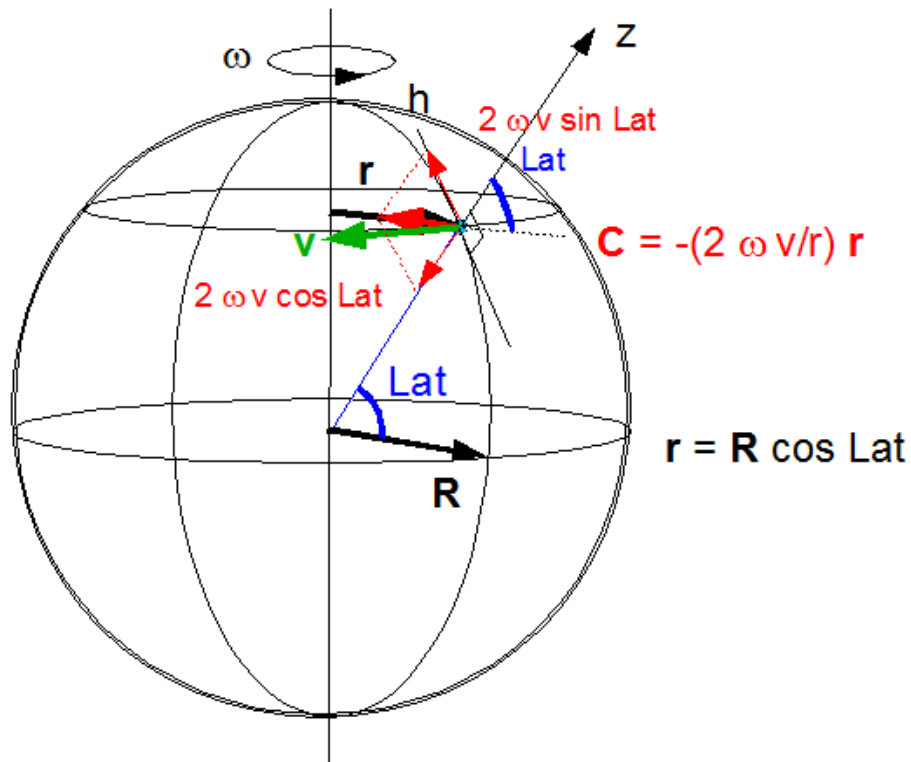
Vent et convection à l'échelle locale

- Observation expérimentale
 - Action du vent : tension du vent
 - Déplacement de la couche d'eau superficielle
 - Remontée d'eau plus profonde

Vent et convection à l'échelle locale

- Observation expérimentale
 - Action du vent : tension du vent
 - Déplacement de la couche d'eau superficielle
 - Remontée d'eau plus profonde
- Théorie est plus complexe
 - Force de Coriolis
 - Spirale d'Ekman

Force de Coriolis

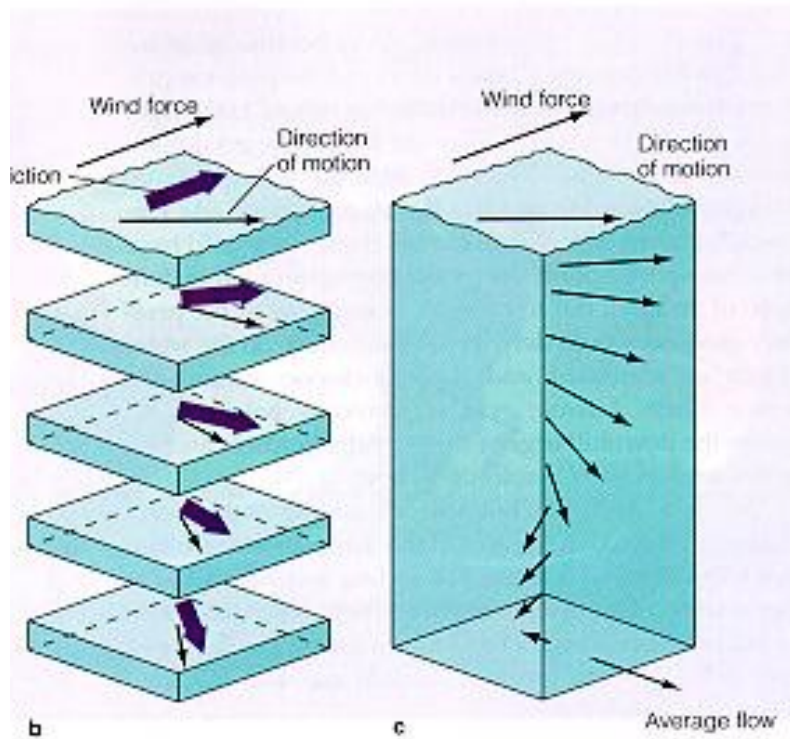


- Force inertielle – fictive
- Résulte rotation uniforme de la Terre
- Notion de vitesse angulaire ω
- Distance /axe de rotation: R et r
- f_C : 0 à l'équateur
- f_C : max aux pôles

$$a = 2\omega \cdot v \cdot |\sin \Phi|$$

$$\vec{F}_C = -2m \cdot \vec{\Omega}_{(t)} \wedge \vec{v}_{(t)}$$

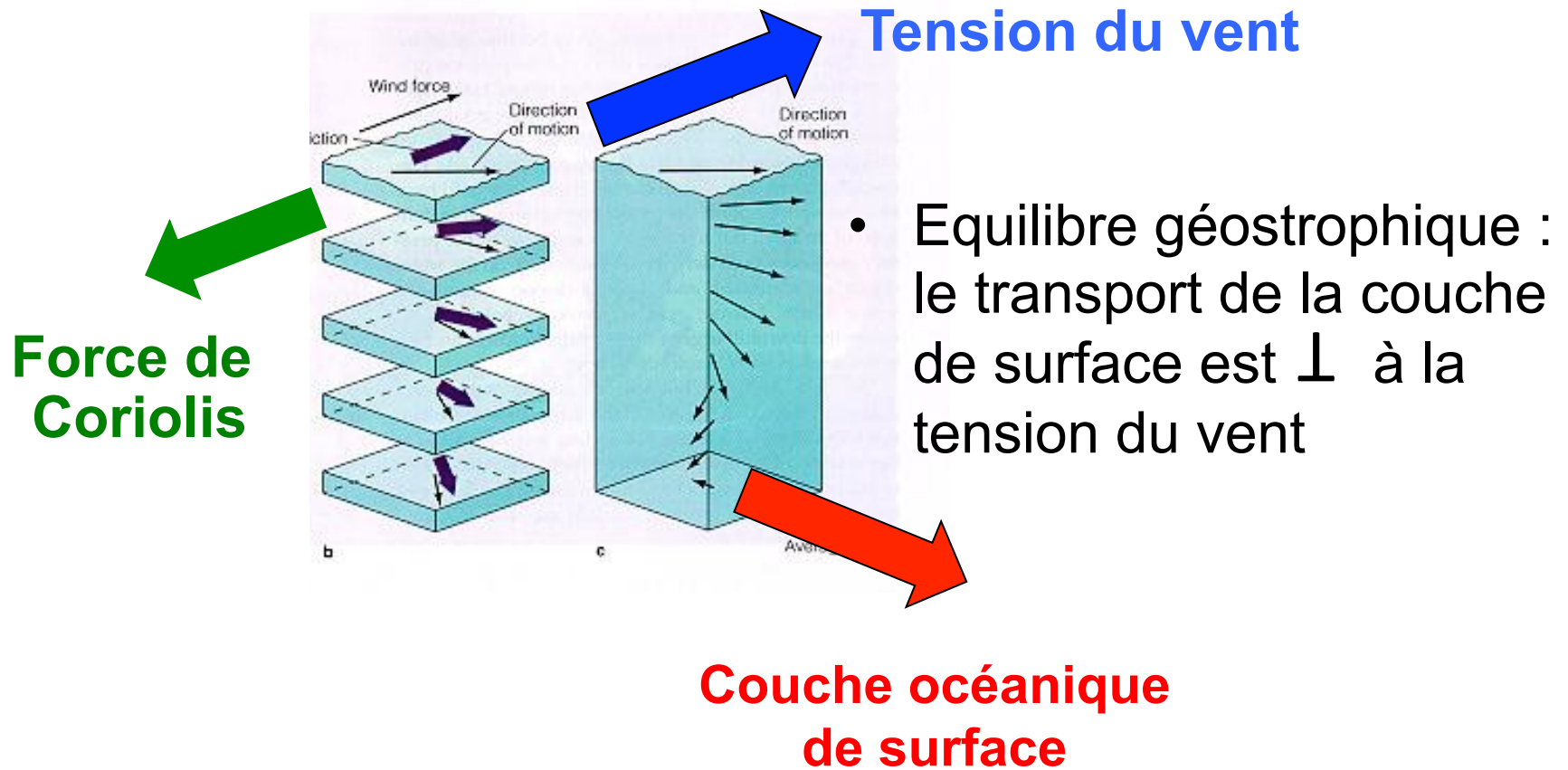
Spirale d'Ekman



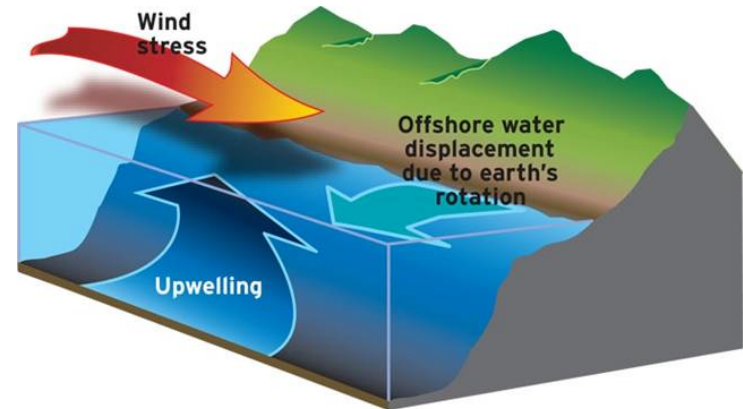
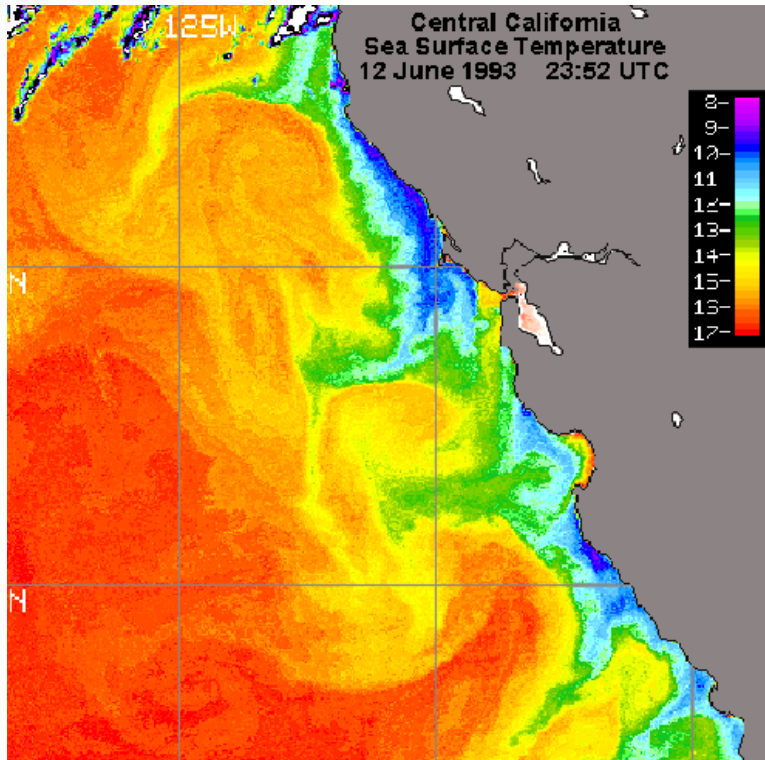
- Tension du vent
- Force de Coriolis
- Spirale d'Ekman

⊥

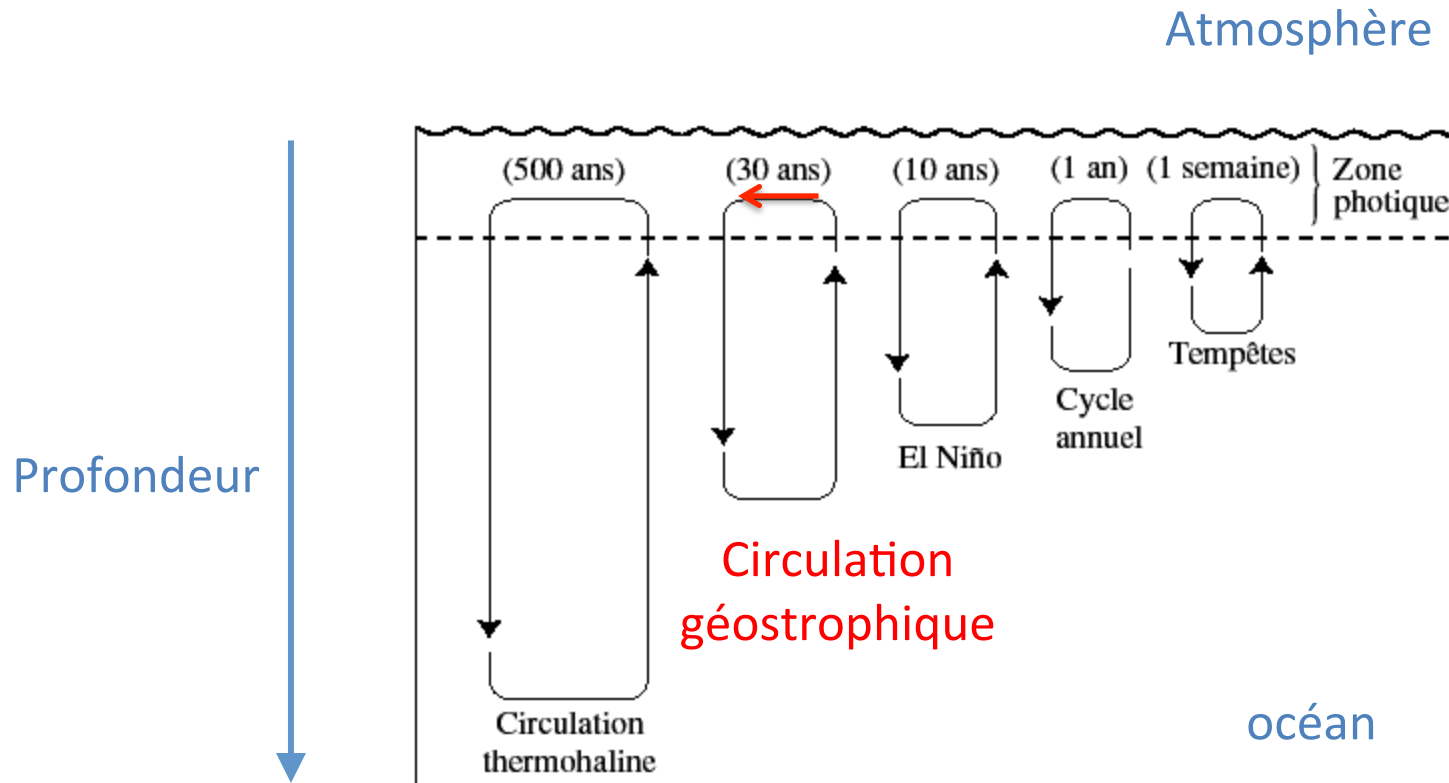
Spirale d'Ekman



Upwelling



Exemple de convection à différentes échelles

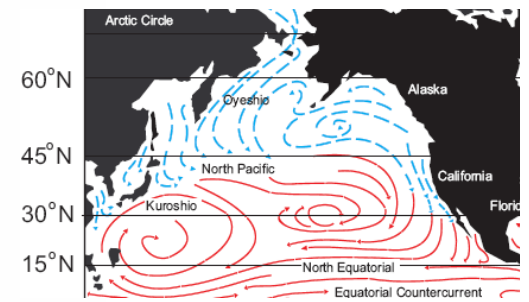
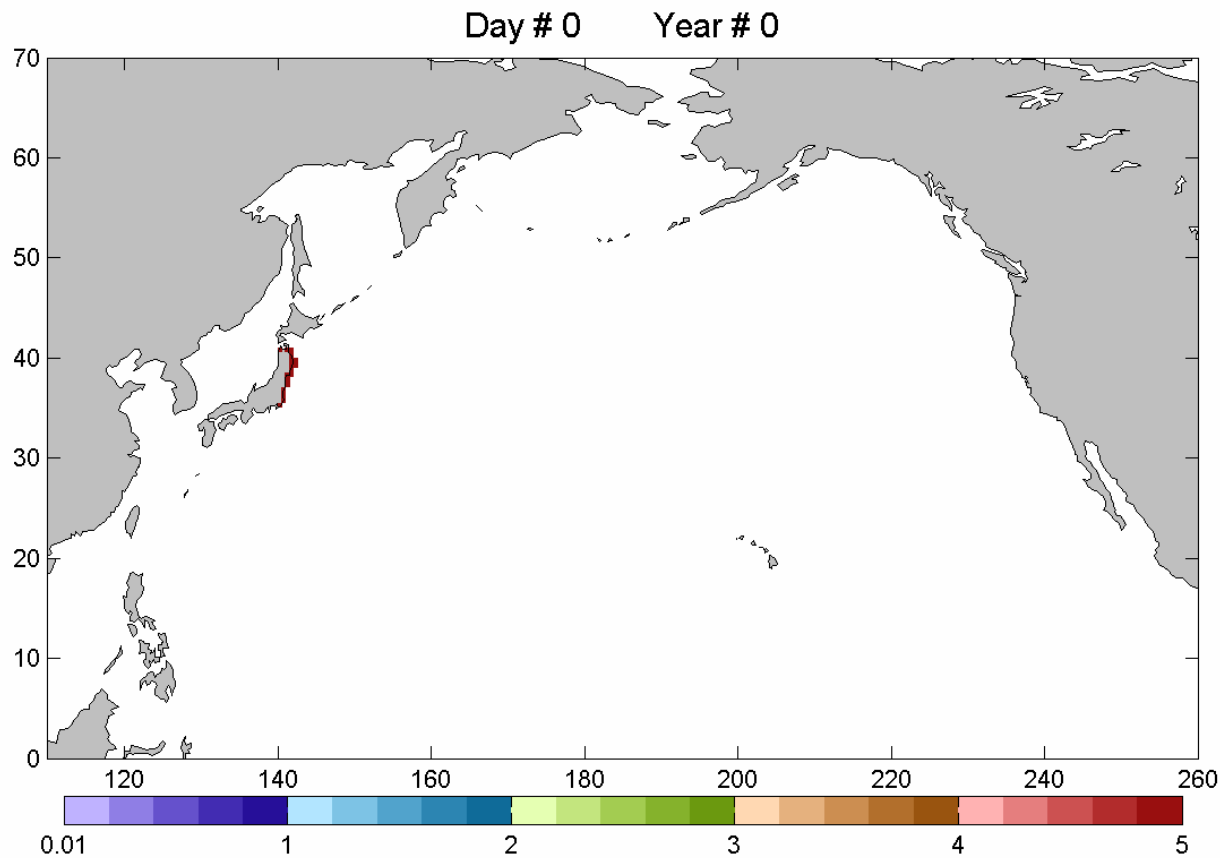


Convection à l'échelle des bassins océaniques

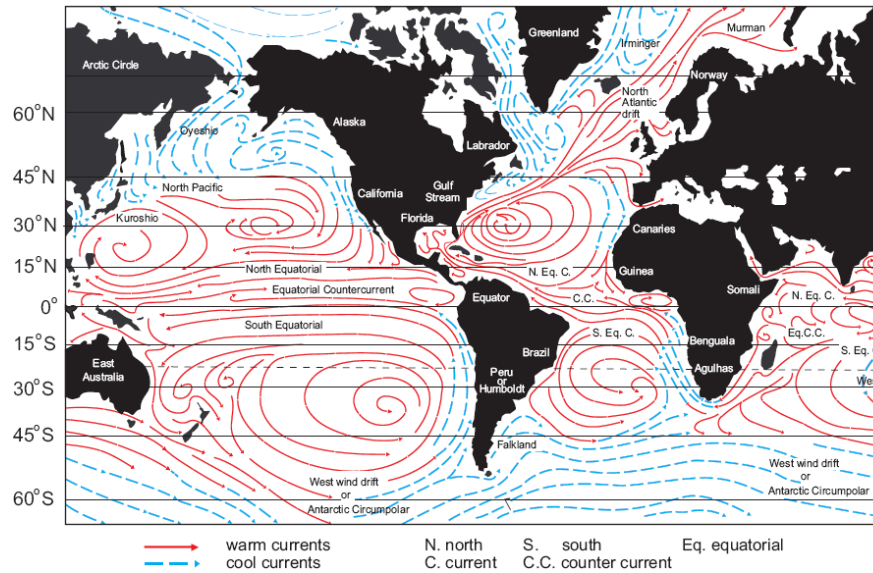


- Accident de Fukushima 11 mars 2011 : tremblement de terre + tsunami
- Modélisation de la dispersion radioactivité (^{134}Cs et ^{137}Cs)
- Trace la composante horizontale convection océanique

Convection à l'échelle des bassins océaniques

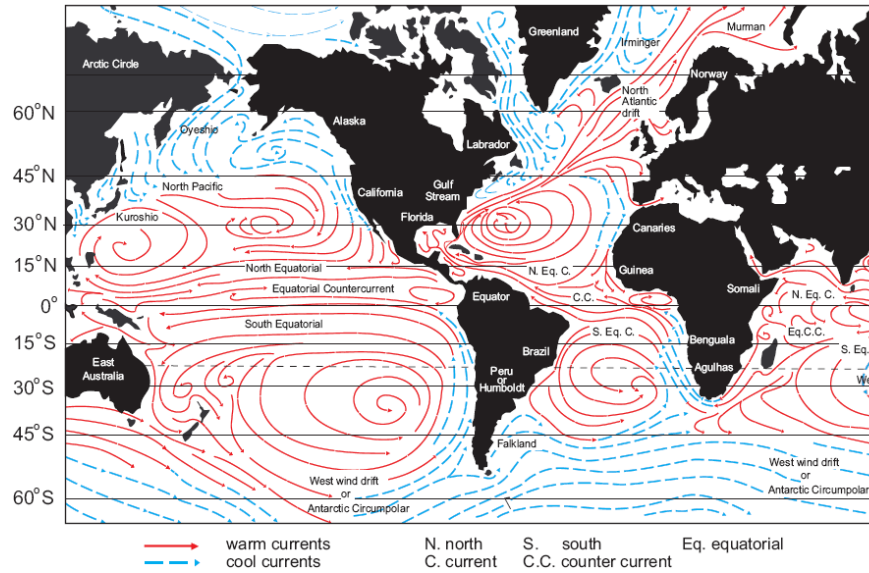


Relation vents - gyres océaniques

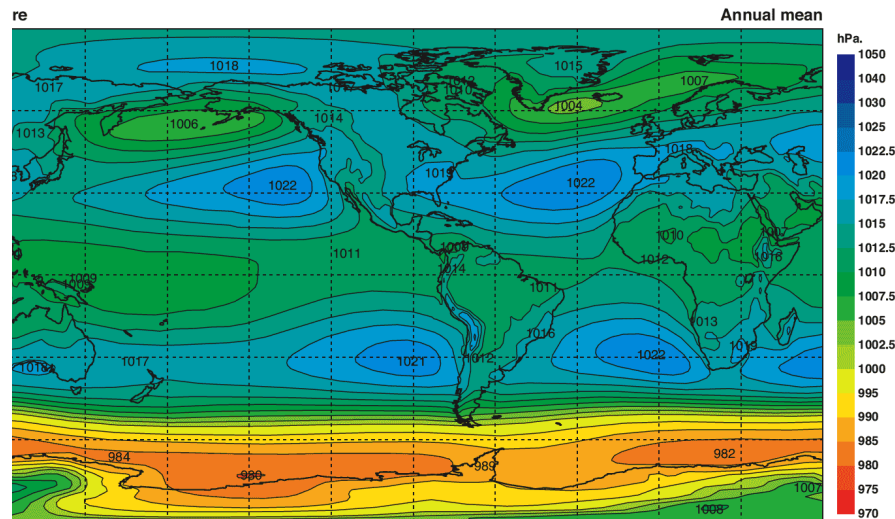


- Distribution gyres océaniques

Relation vents - gyres océaniques



- Distribution gyres océaniques

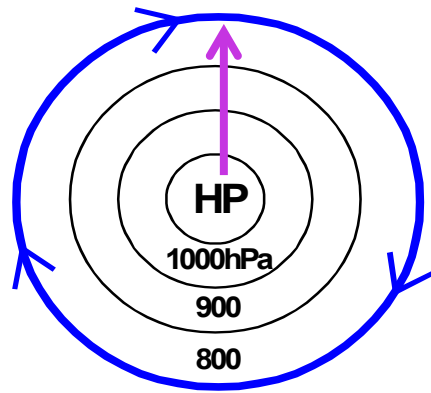


- Distribution HP - BP
- Couplage entre circulation atmosphérique et océanique de surface géostrophique

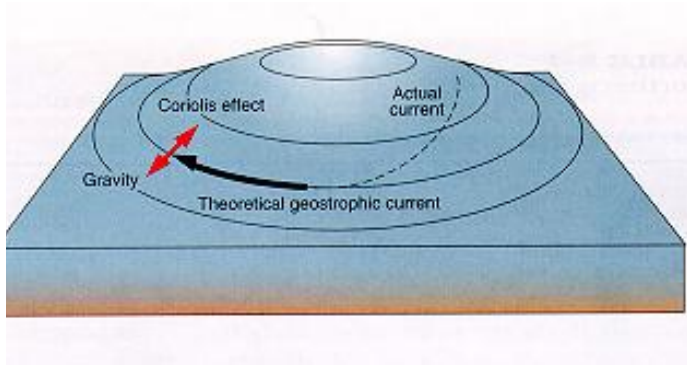
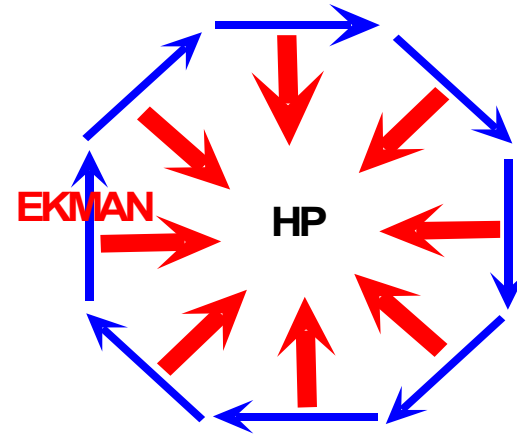
Cellule de haute pression atmosphérique ventilation de l'océan

Gradient de pression
atmosphérique

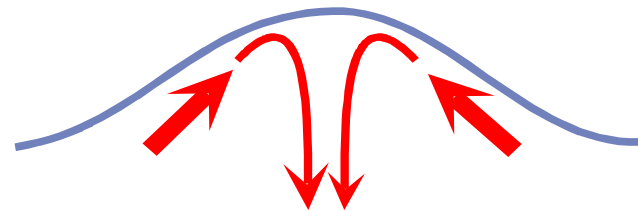
Vue horizontale



Tension vent → transport Ekman



convergence



plongée d'eau = VENTILATION

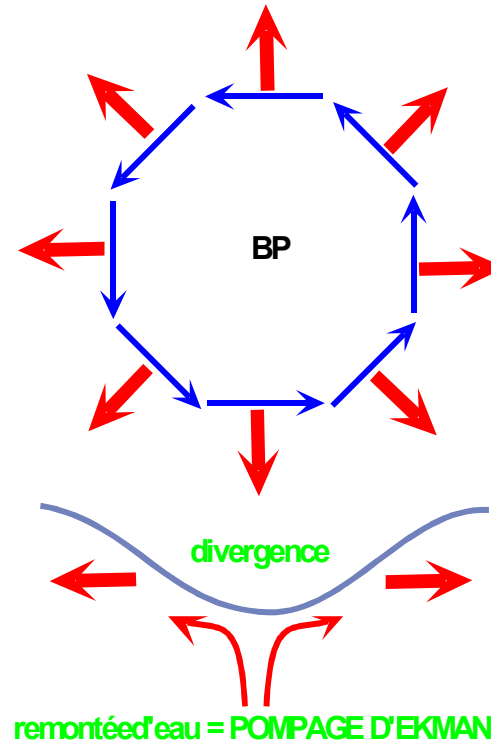
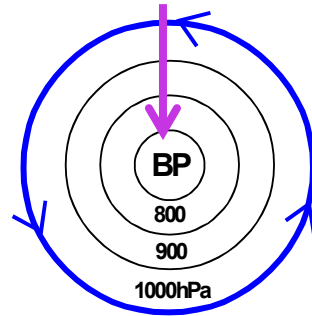
Vue en coupe

Cellule de basse pression atmosphérique et pompage d'Ekman

Tension vent → pompage Ekman

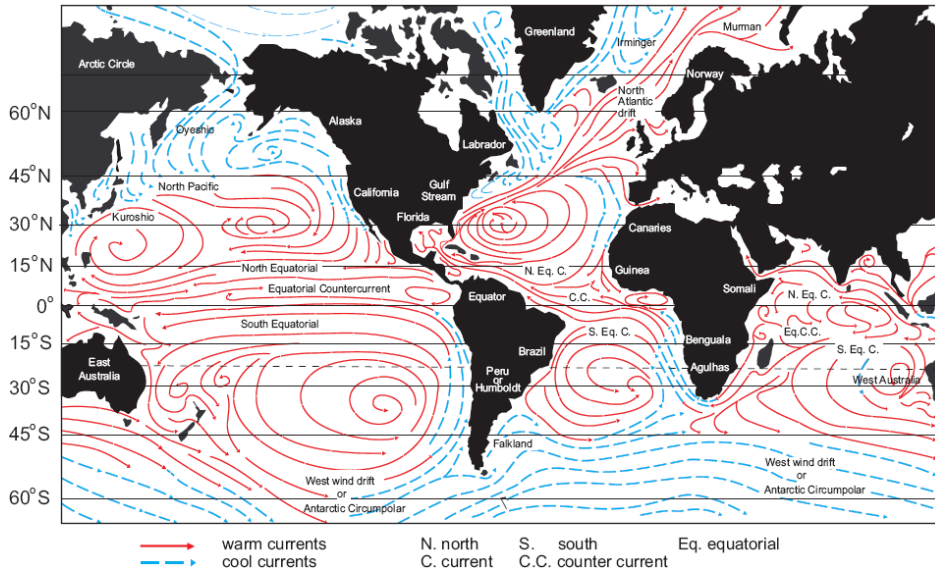
Gradient de pression
atmosphérique

Vue horizontale

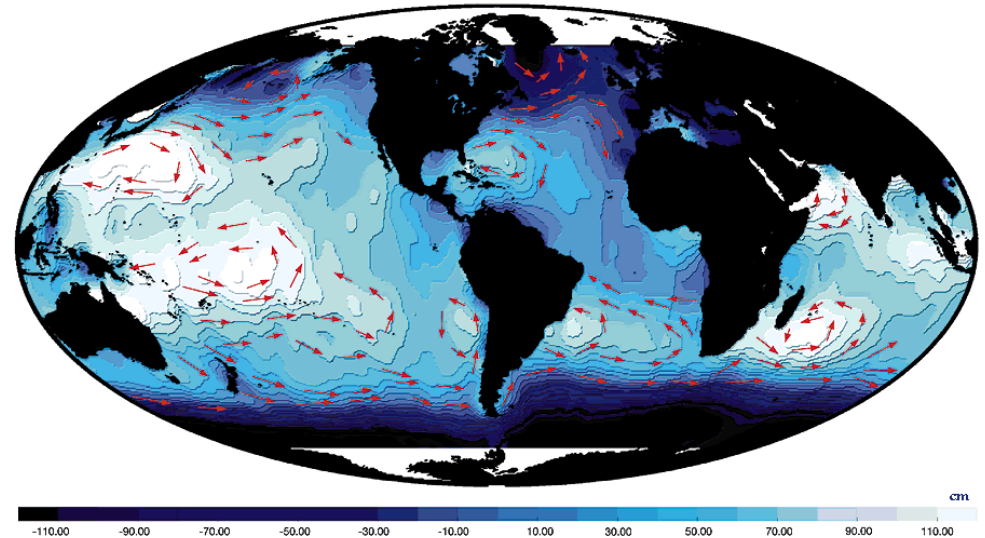


Vue en coupe

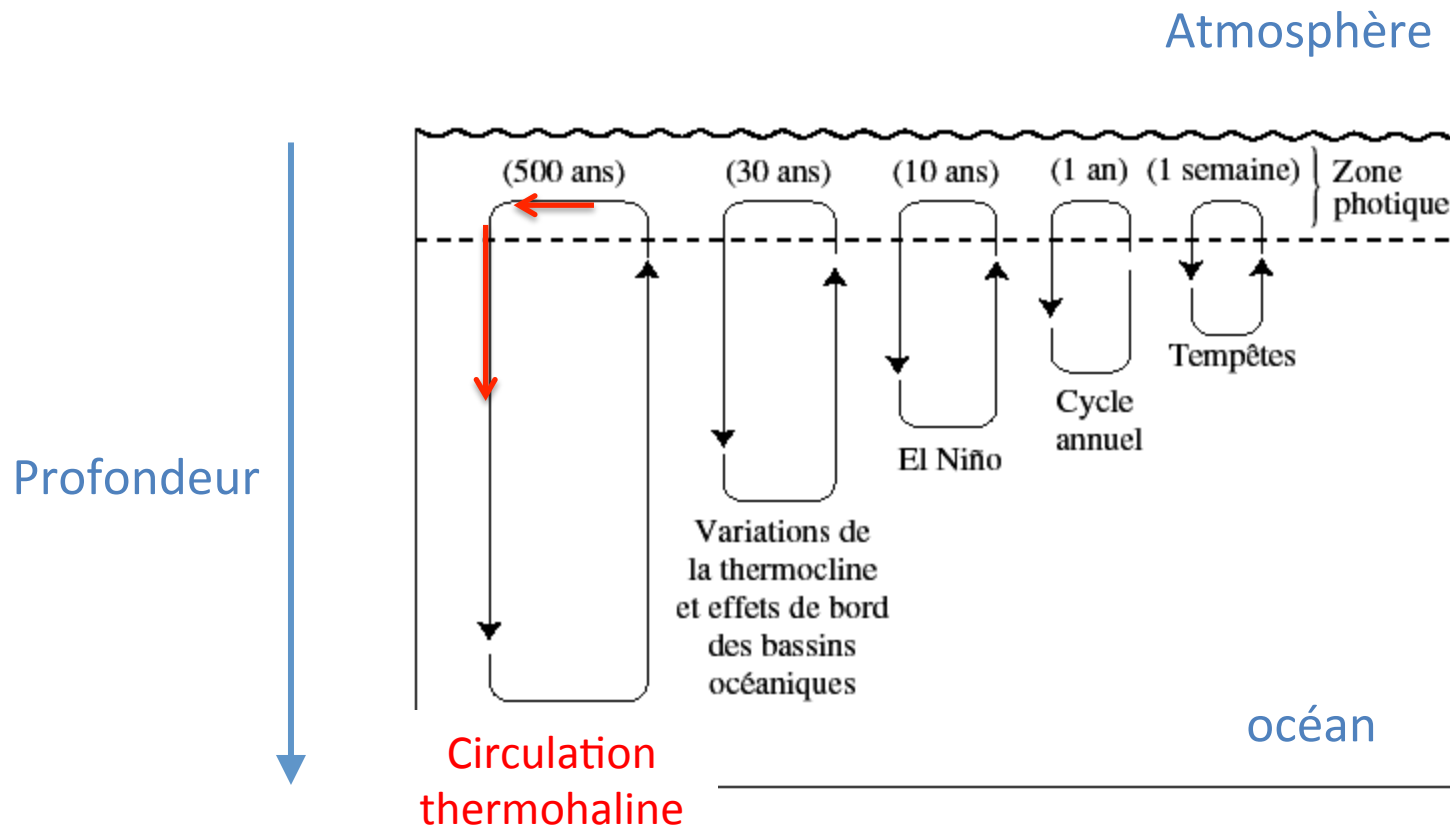
Topographie dynamique



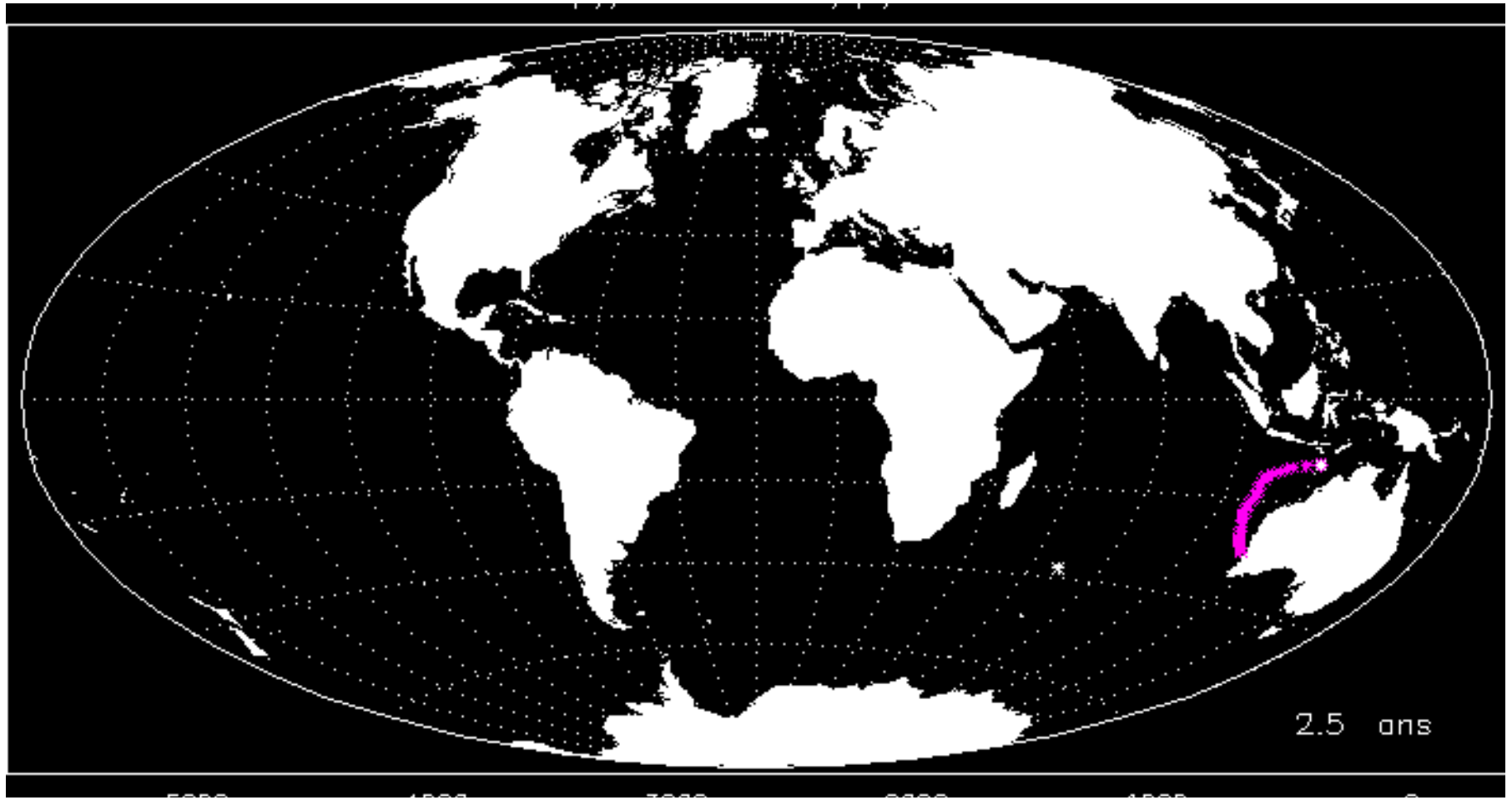
sea surface dynamic topography as observed by TOPEX/POSEIDON



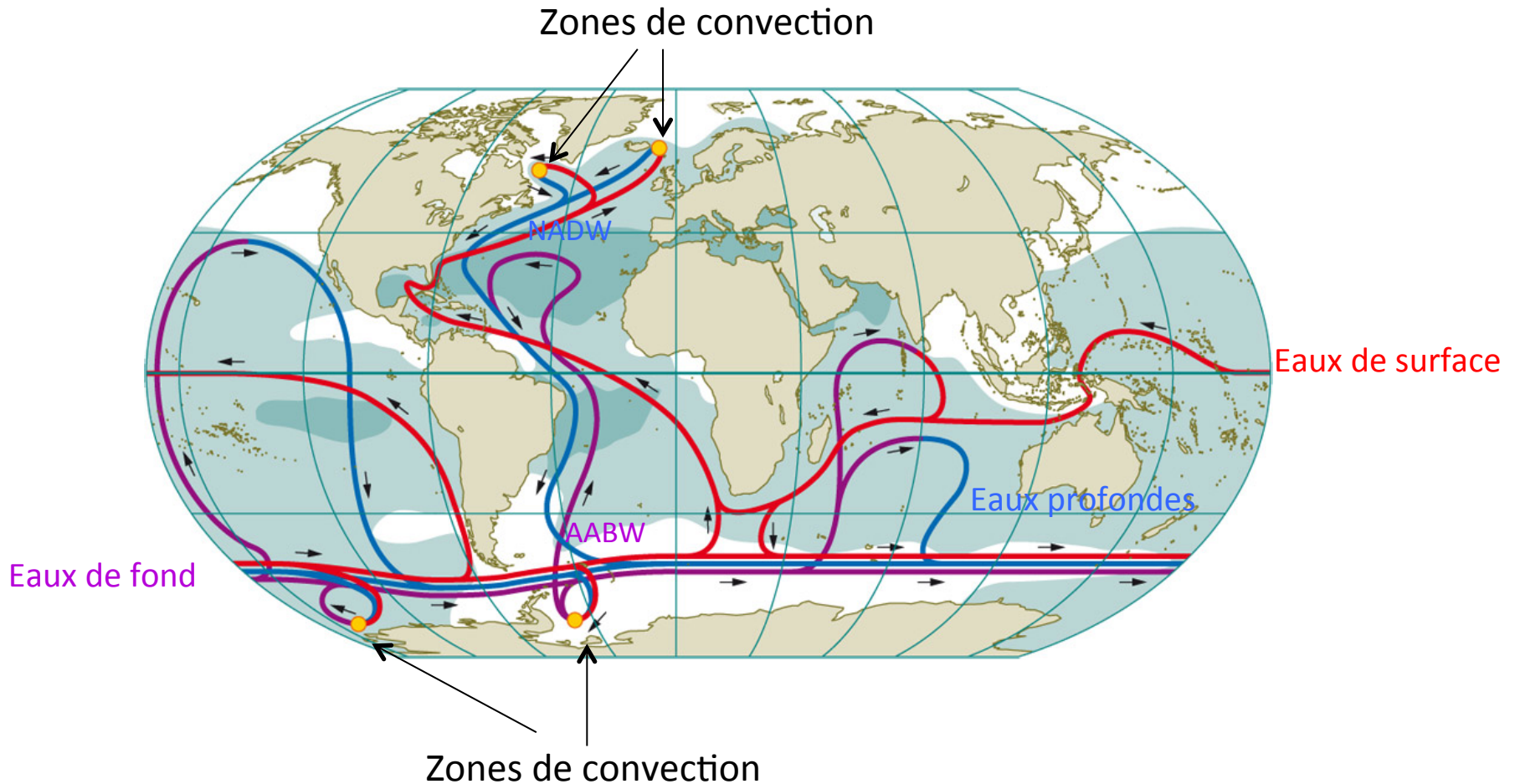
Exemple de convection à différentes échelles



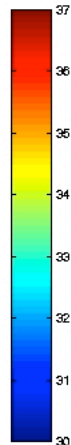
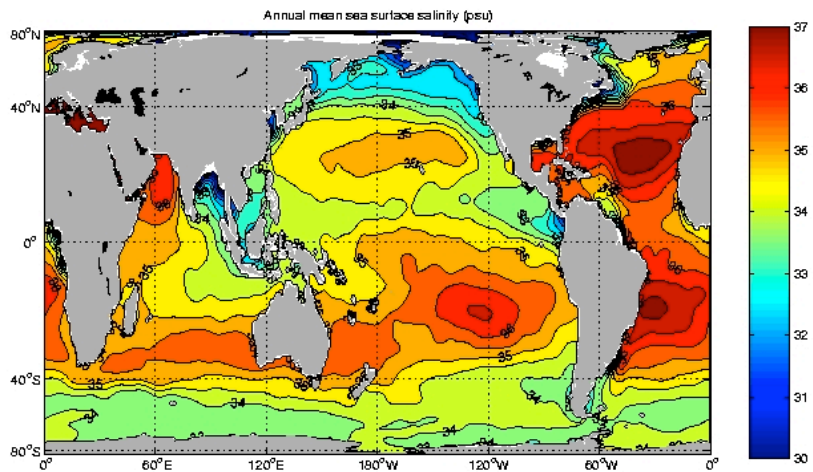
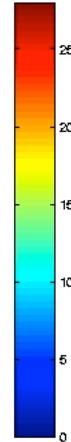
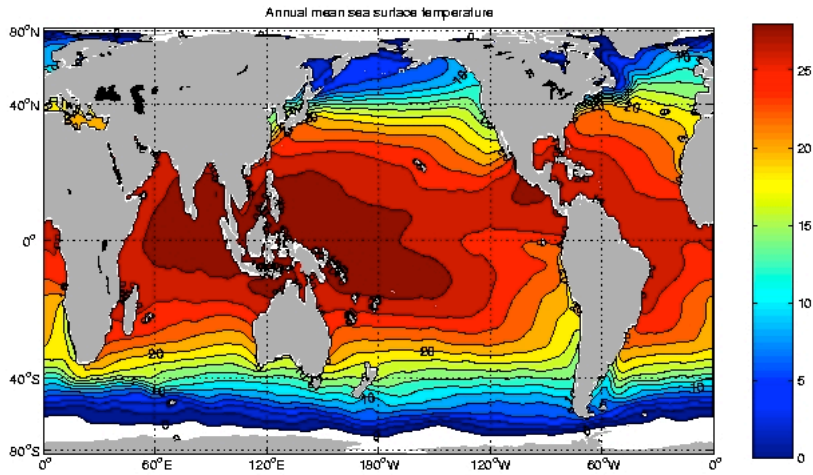
Circulation thermohaline



Circulation thermohaline

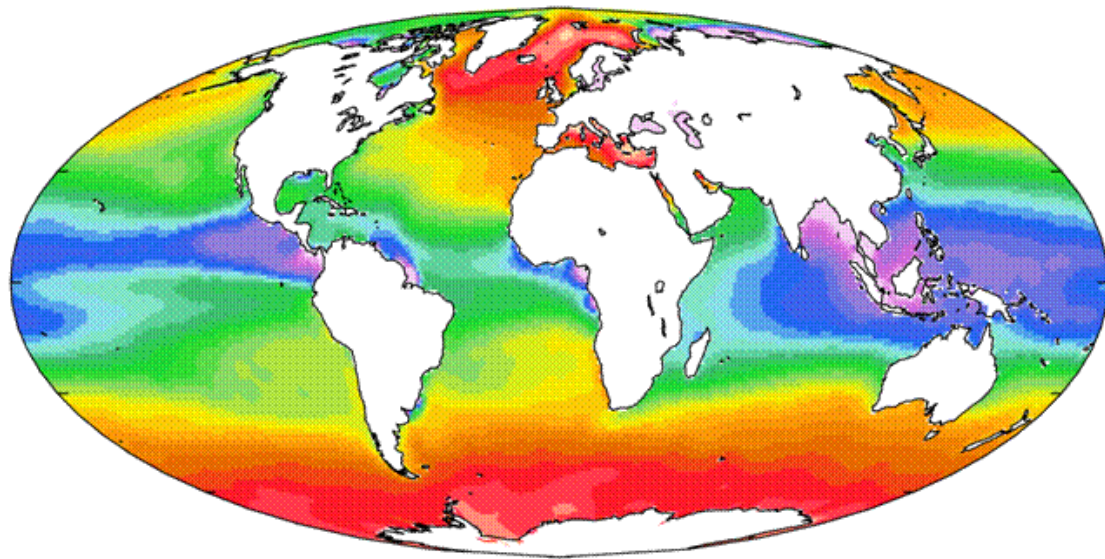


Température – salinité de surface

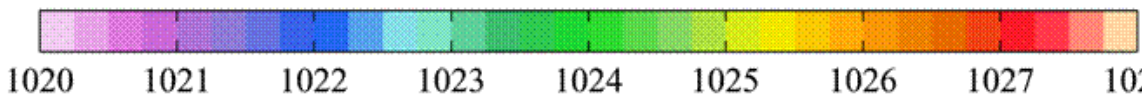


- Eaux de surface
 - Distribution températures
 - Distribution salinité
- Contrastes température / salinité
 - Distorsion
 - Accumulation eaux chaudes sur bordure W des bassins océaniques
 - Accumulation sel dans atlantique car $E \gg P$

Densité des eaux de surface

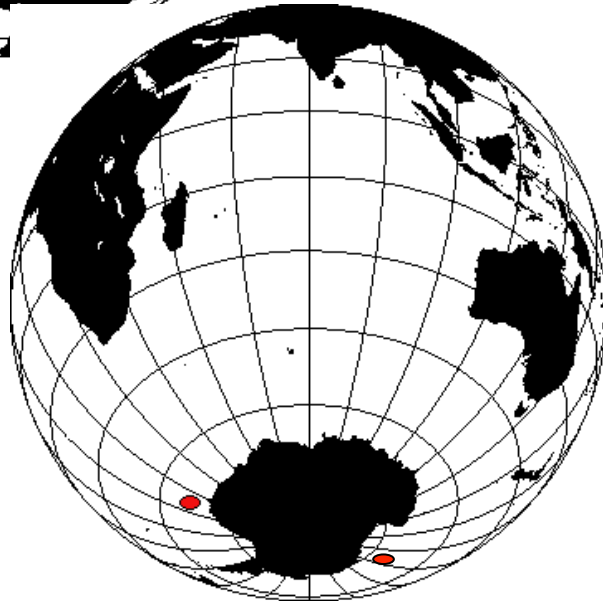


Sea-surface density [kg m^{-3}]



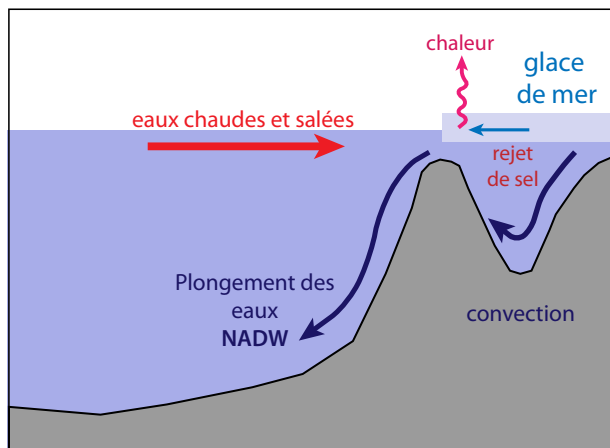
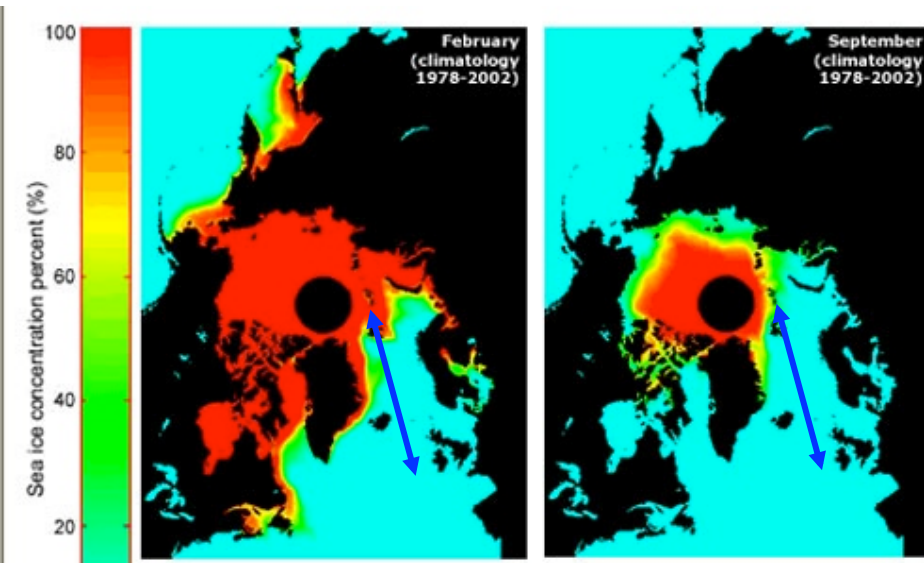
- Contrastes température / salinité \rightarrow contrastes densité
- Zones océaniques denses
 - Nord de l'Atlantique nord
 - Océan austral
 - Méditerranée

Zones de convection



- Zones où gradient densité >0
 - Action des vents
 - Formation de glace de mer
 - Température et salinité
- Instabilité
- Zones de convection thermohaline
- Échanges entre océan surface/océan profond

Convection profonde



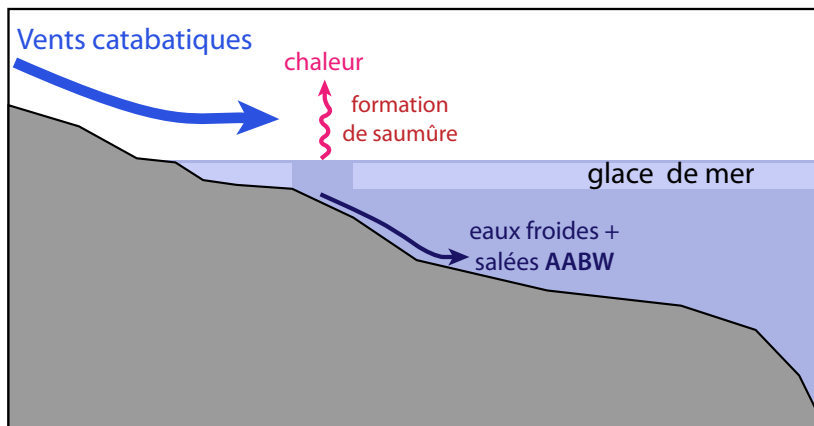
- Mer de Norvège
- Eaux de surface salées
- Formation glace de mer → rejet de sel
- Perte de chaleur latente + sensible
- Augmentation densité → gradient densité >0
- Plongée des eaux de surface → convection profonde d'eaux très salées et assez chaudes
- North Atlantic Deep Water : NADW (eaux profondes)

Convection profonde



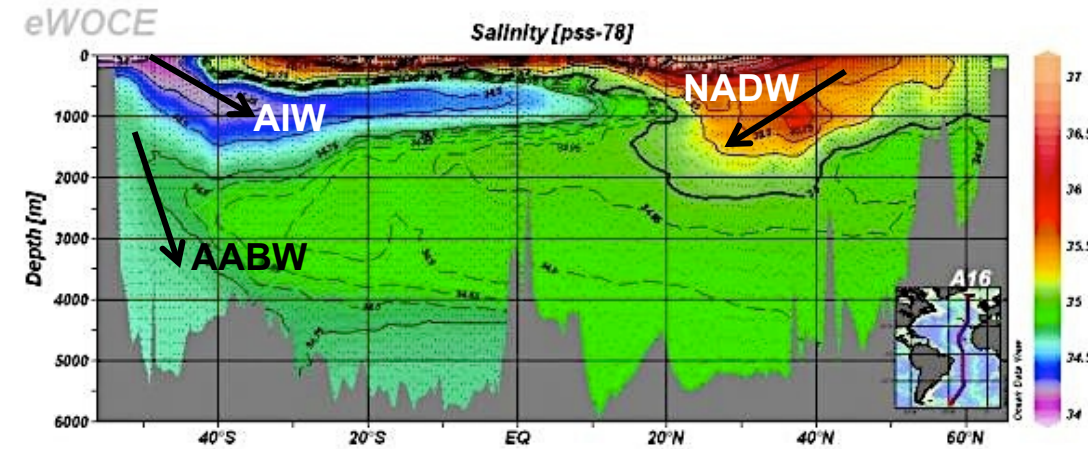
Continent Antarctique

Océan Austral

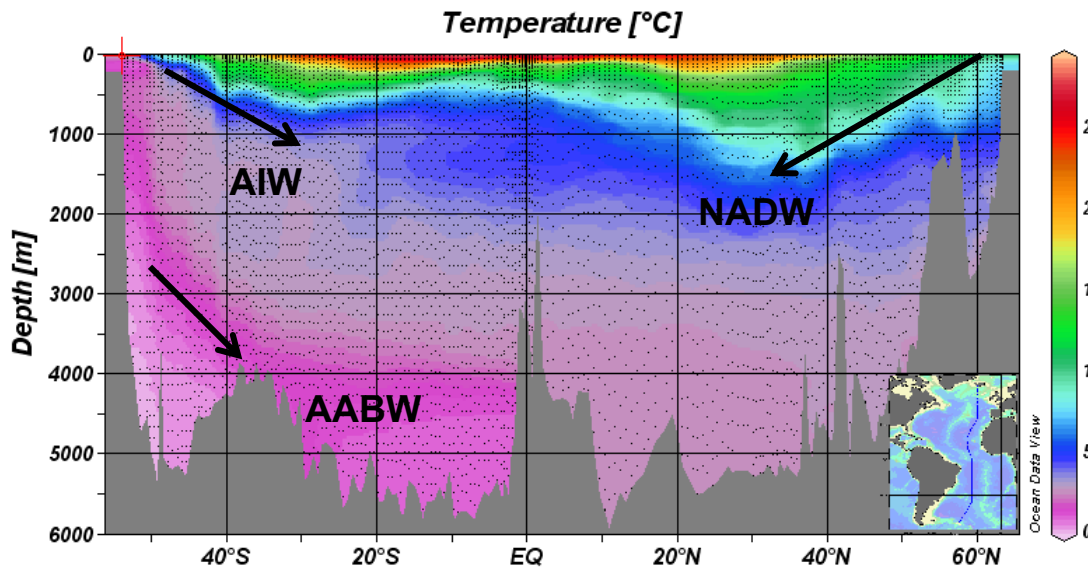


- Océan Austral
- Polynies : zones libres de glace, eaux très froides
 - vents catabatiques
- Perte de chaleur sensible + latente
- Plongée des eaux de surface → convection profonde d'eau de fond extrêmement froide et peu salée
- Antarctic Atlantic Bottom Water AABW (eaux de fond)

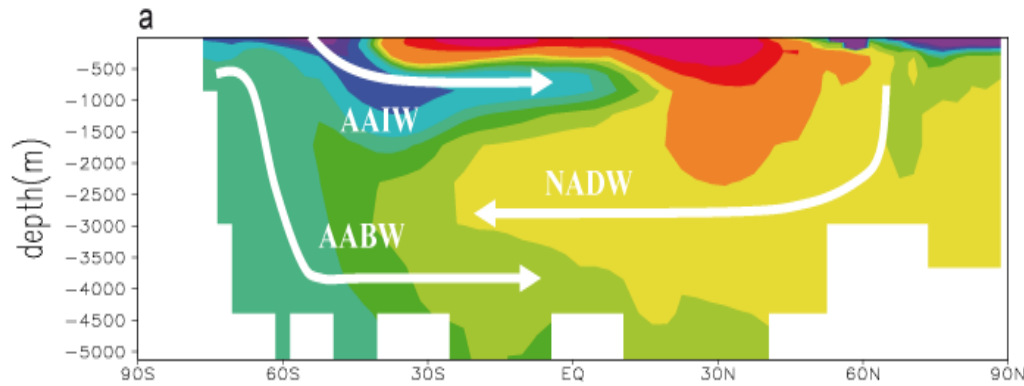
Circulation thermohaline



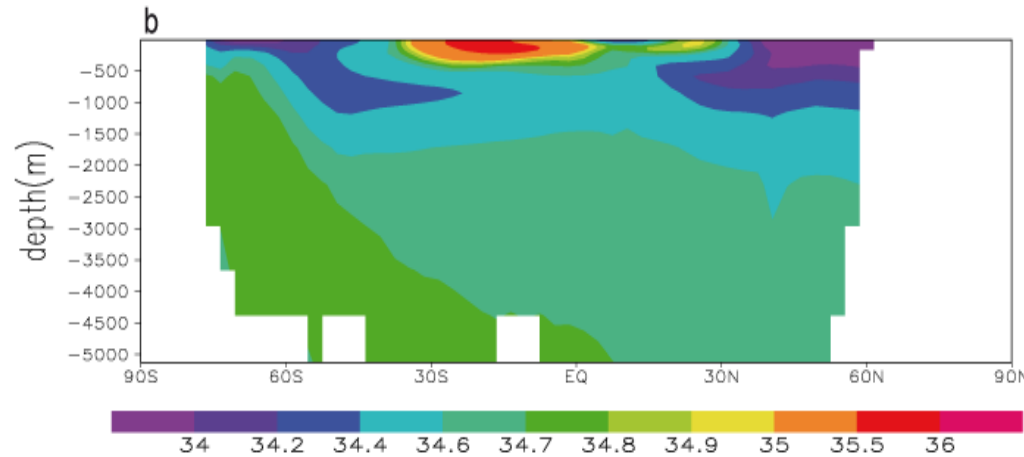
- Mise en évidence de 3 masses d'eau
- NADW = North Atlantic Deep Water (froide et très salée) → 40°S
- AABW = Antarctic Atlantic Bottom Water (très froide)
- AIW = Antarctic Intermediate Water (froide assez peu salée) depuis 60°S



Salinité atlantique-pacifique

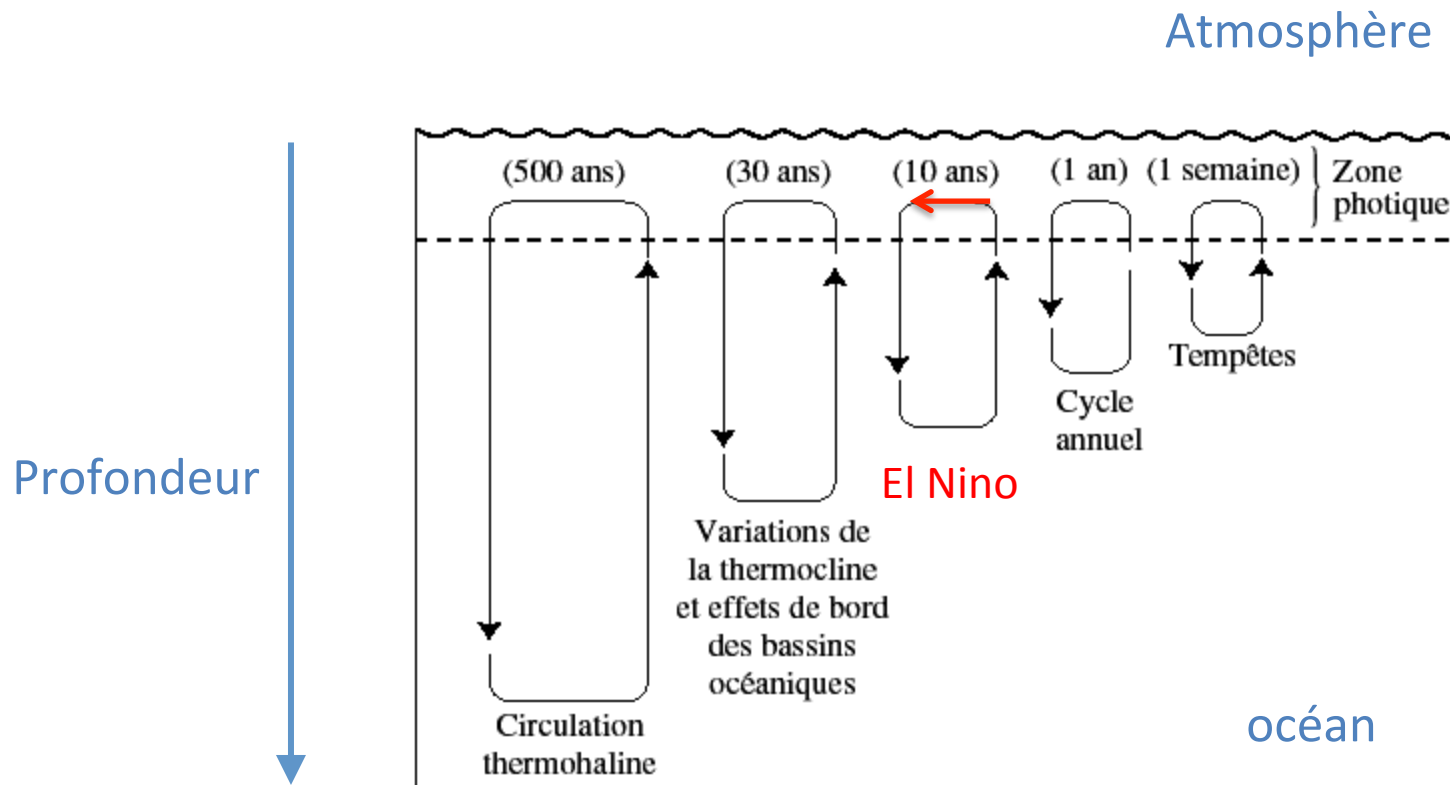


Atlantique

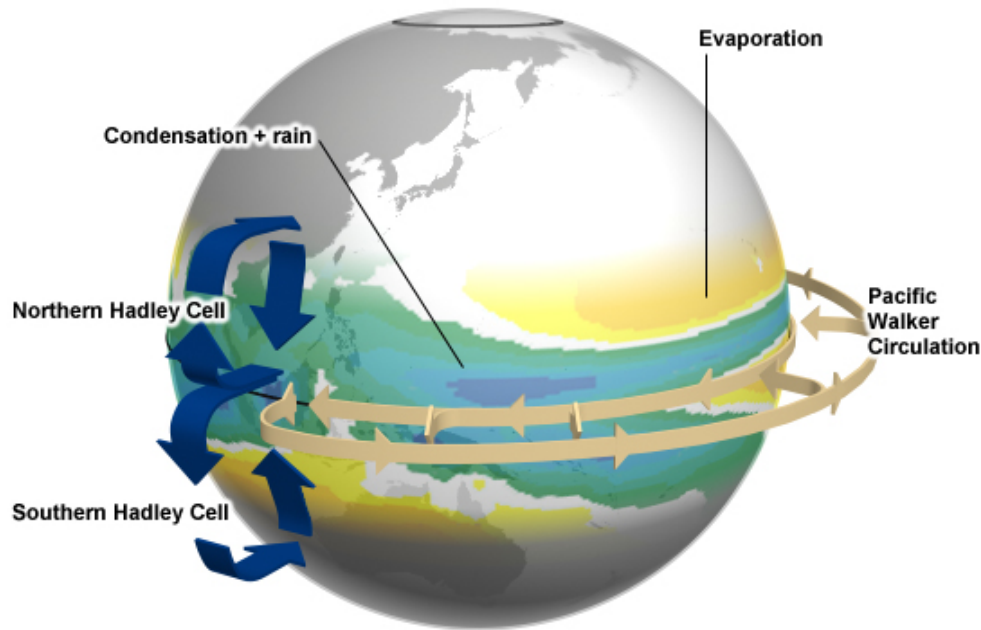


Pacifique : pas de convection

Exemple de convection à différentes échelles

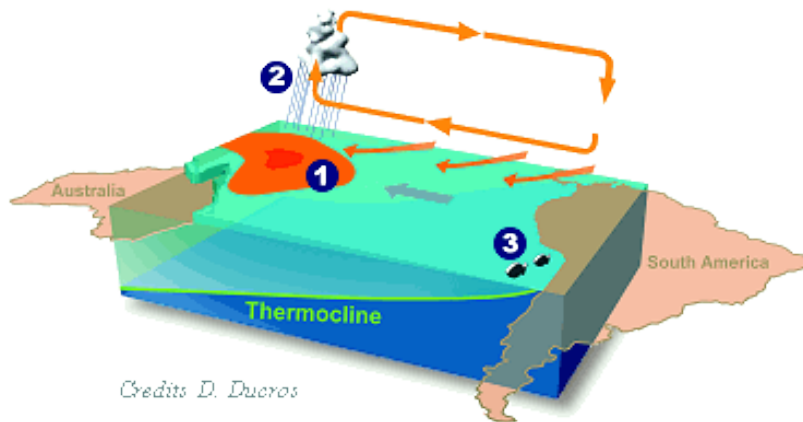


Convection et circulation zonale

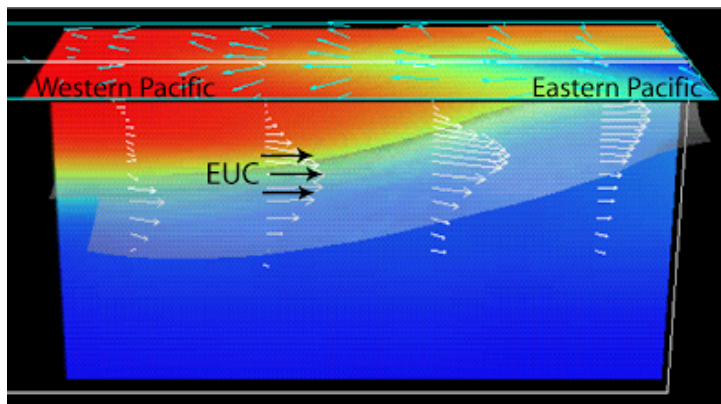


- Circulation atmosphérique méridienne
- Situation particulière dans le domaine équatorial
 - $F_{\text{CORIOLIS}} = 0$ à l'équateur
- Circulation atmosphérique zonale dite de Walker
 - Vents E-W au sol
 - Vents W-E en altitude
 - Relation avec circulation Hadley

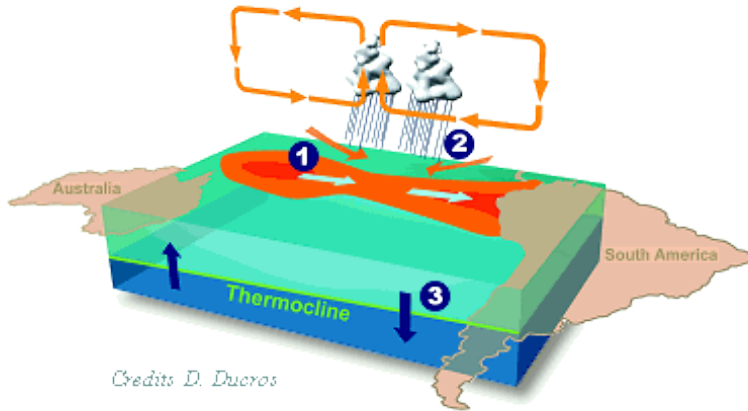
Conditions normales



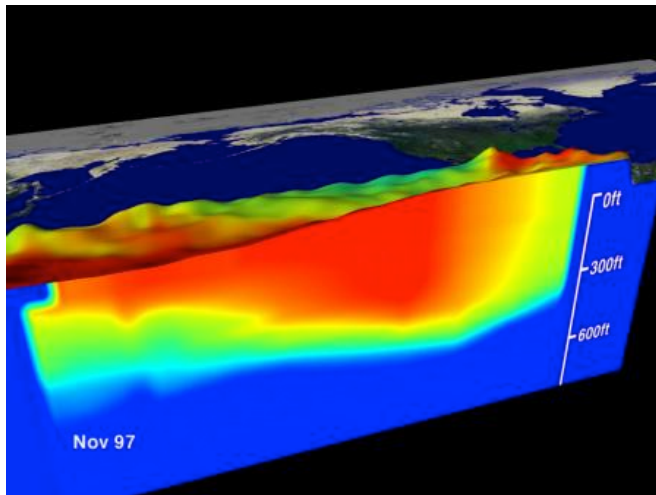
- Système vents E-W surface
- Eaux chaudes de surface accumulées (warm-pool) → pacifique W
- Zone de convection continent maritime
- Upwelling Pérou actif
- Thermocline profonde à l'W



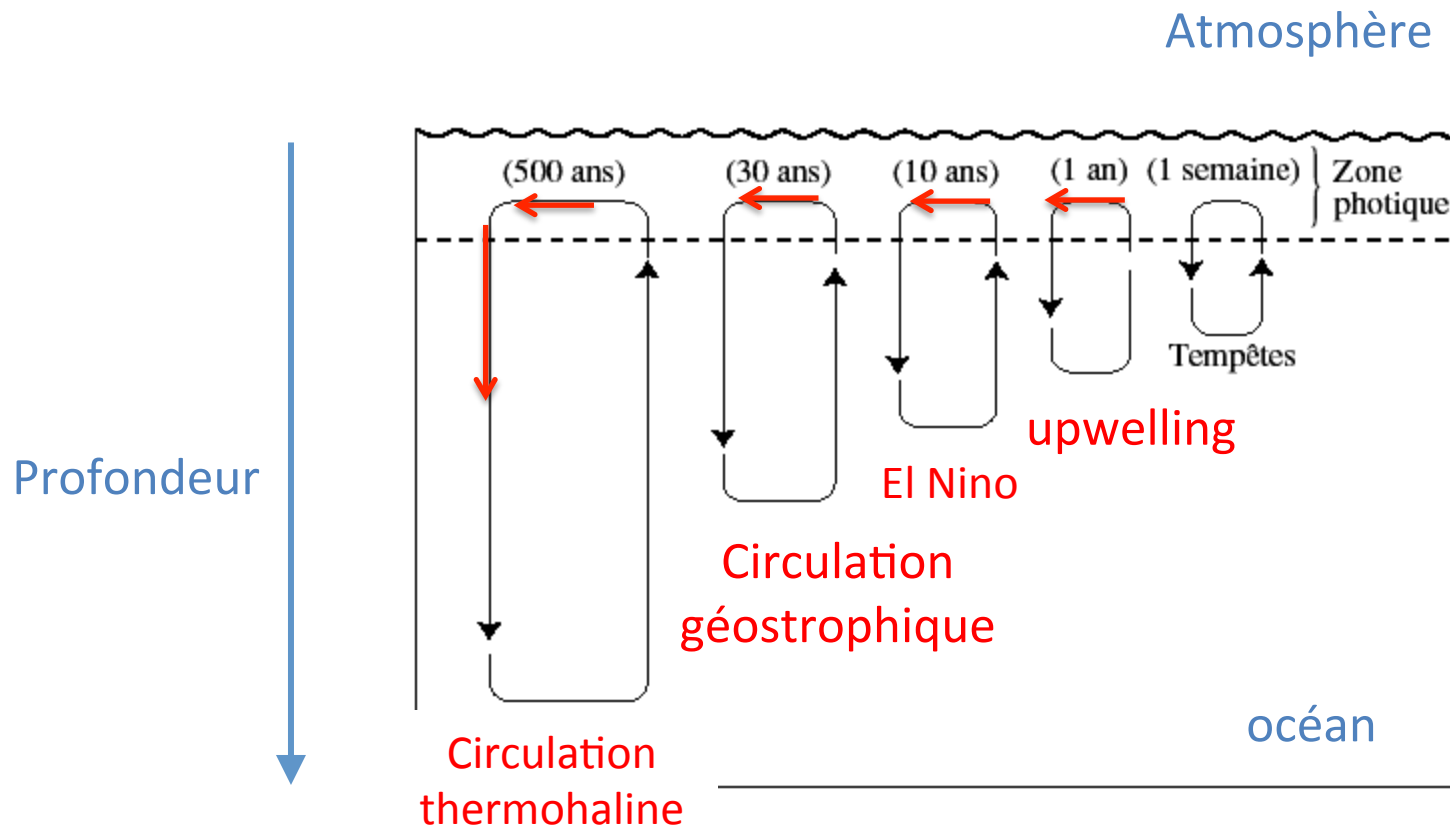
Conditions El Niño



- Eaux chaudes de surface se déplacent vers l'E
- Zone de convection sur Pacifique central
- Système vents découplé
- Upwelling Pérou inactif
- Thermocline aplanie



Exemple de convection à différentes échelles



Convection dans l'océan

- Concept paradoxal
- Stratification océan
- Déséquilibre bilan radiatif = forçage
- Vents et contrastes de densité = moteurs de la convection
- Exemple de convection à différentes échelles de temps, spatiales avec contraintes physiques différentes