

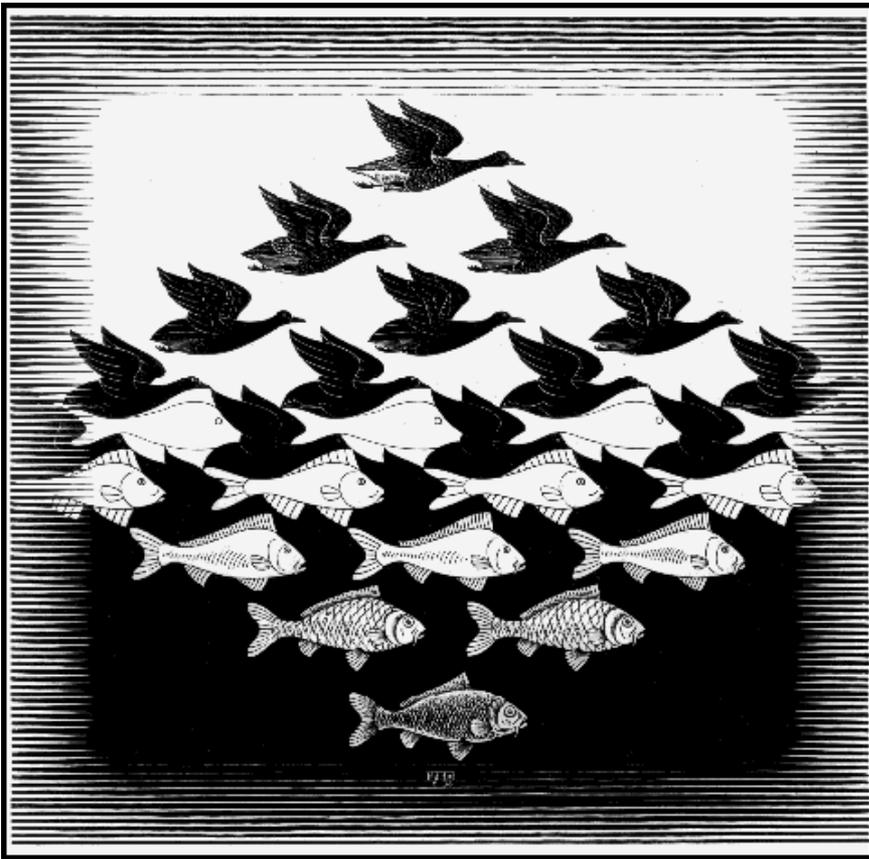
# La convection dans l'océan

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 ocean.

# 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

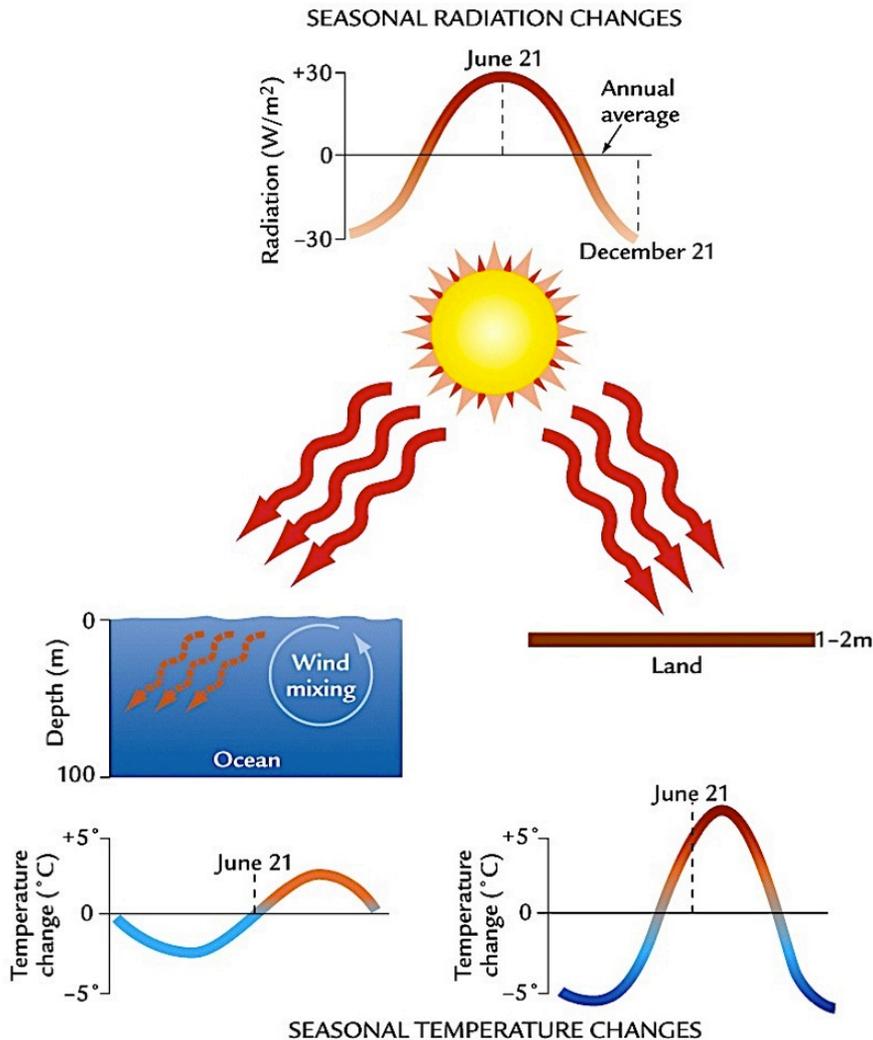
# Convection dans l'océan

- 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

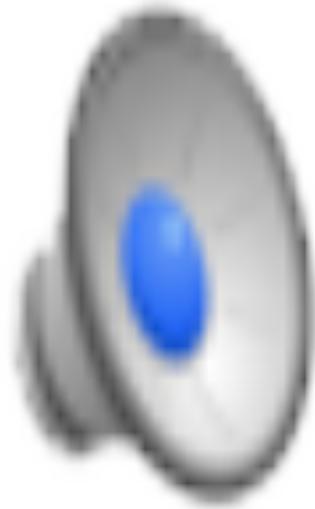


- Amplitude thermique
- Stockage énergie
- Rétroaction

# Caractéristiques de l'océan

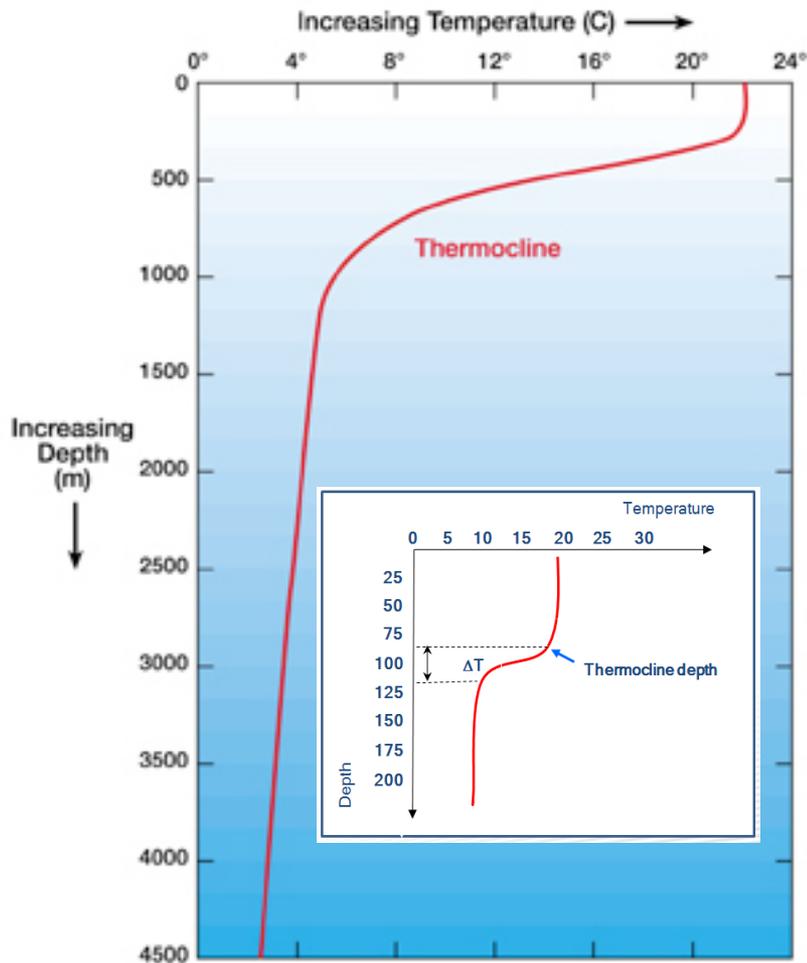
- **Océan est stratifié**
  - Propriétés physico-chimiques
  - Variations horizontales  $\ll$  Variations verticales

# Caractéristiques de l'océan



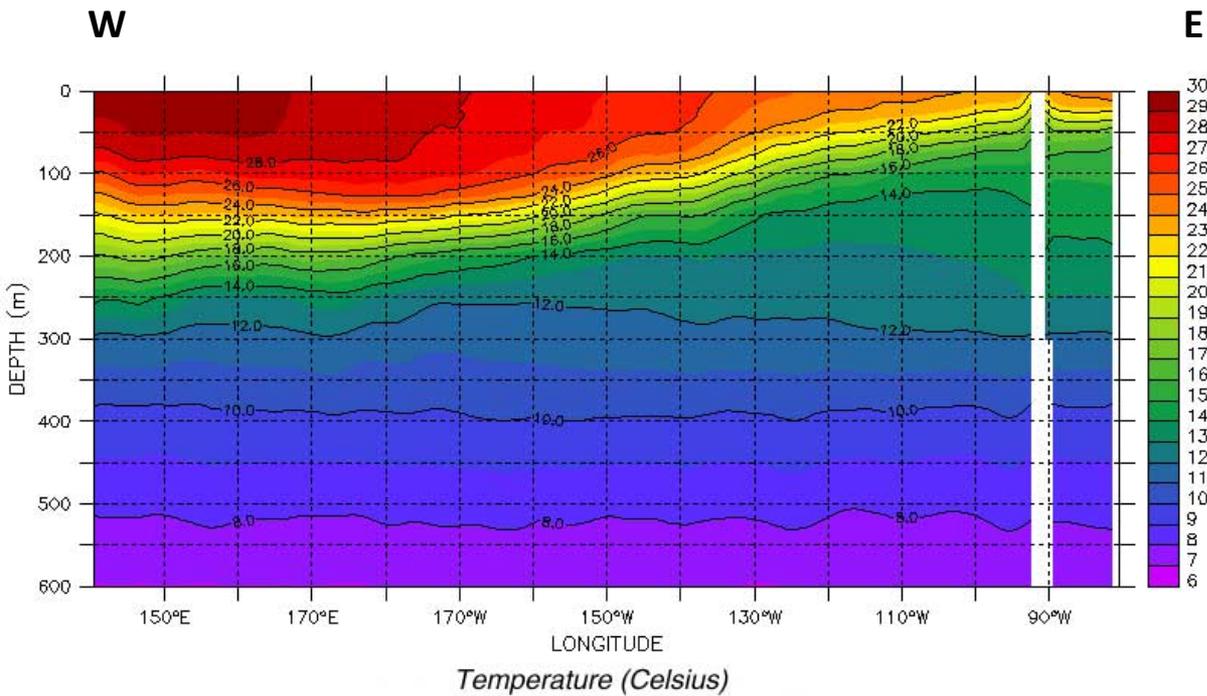
**Stratification de l'océan**

# 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

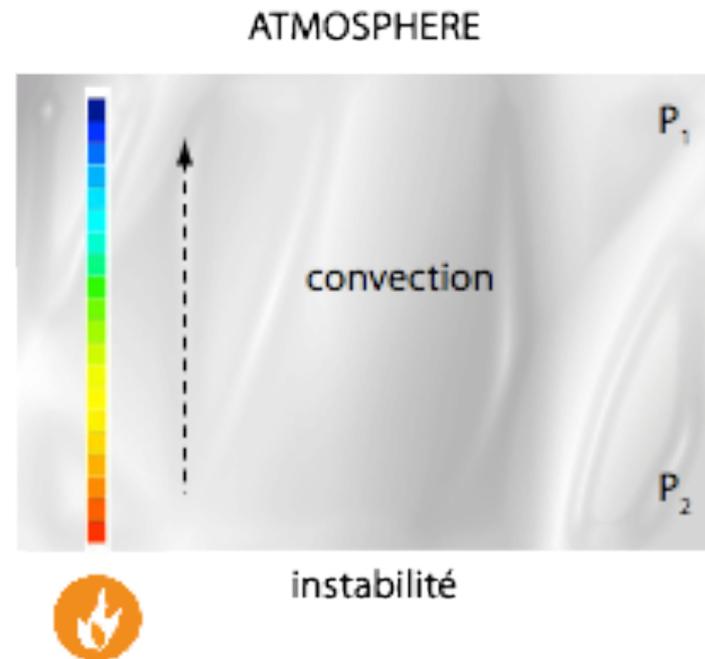
- Couche de mélange

- Stabilité couches profondes

# Caractéristiques de l'océan

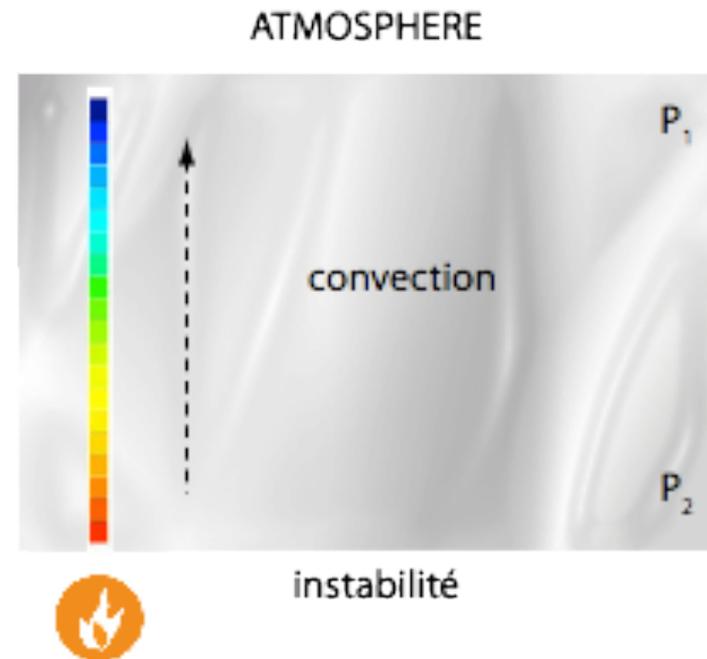
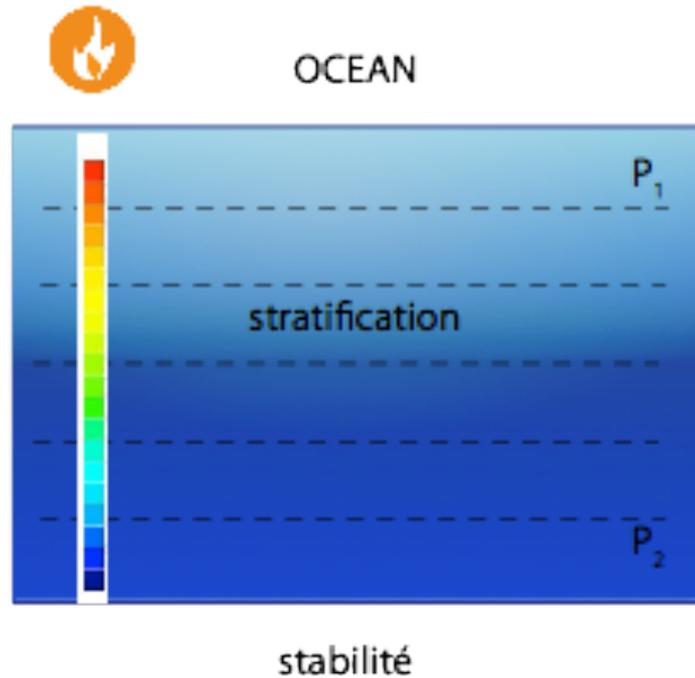
- **Océan est stratifié**
  - Propriétés physico-chimiques spécifiques
  - Variations horizontales  $\ll$  Variations verticales
- Équations et équilibres similaires dans l'atmosphère MAIS conditions **de stabilité différentes**

# Conditions de stabilité



- Atmosphère: chauffée par le bas
- Convection

# Conditions de stabilité



- Océan: chauffé par le haut
- stratification

- Atmosphère: chauffée par le bas
- Convection

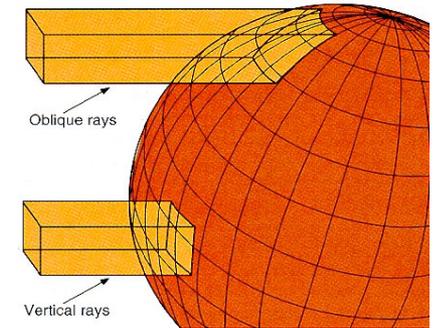
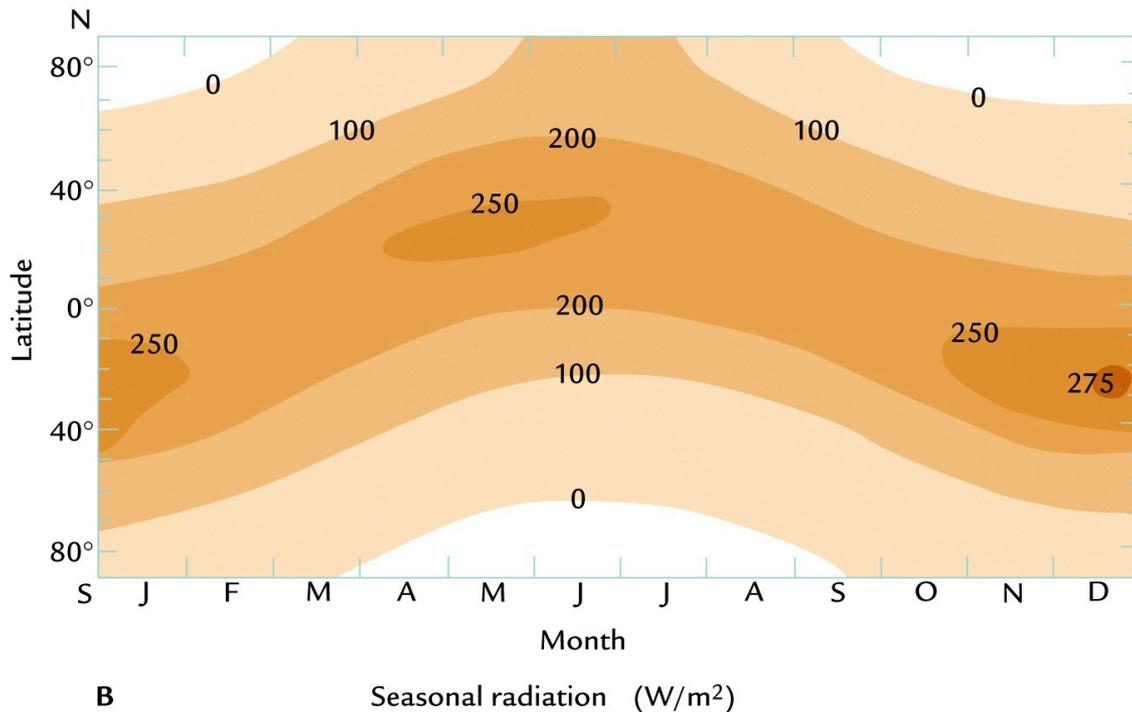
# Convection dans l'océan

- 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

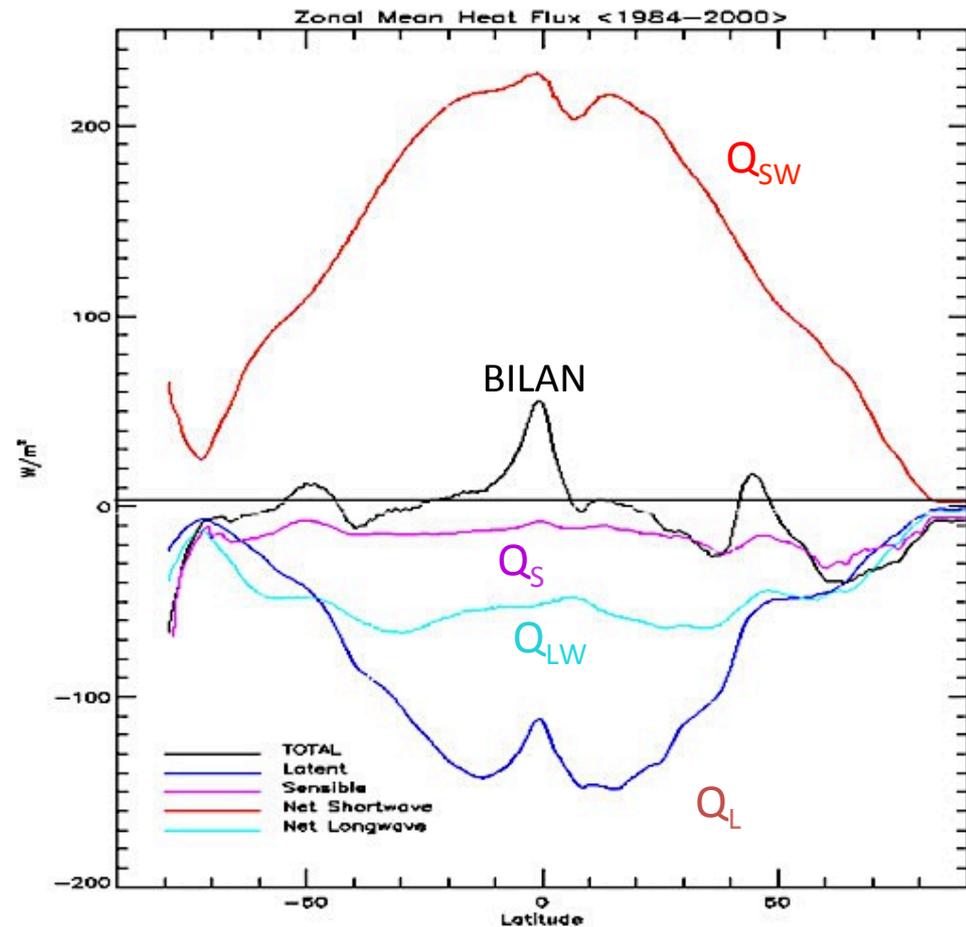
# Déséquilibre de la distribution d'énergie



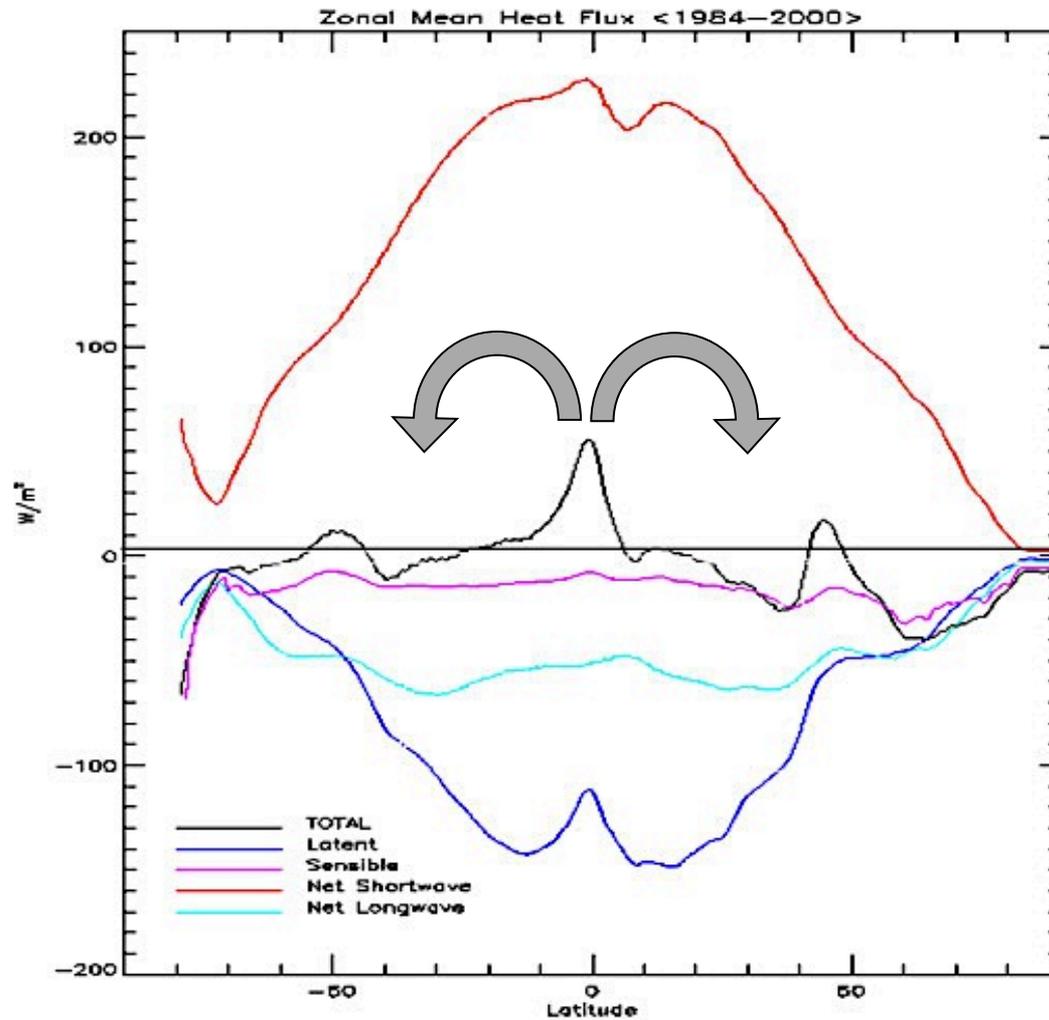
- Latitude
- Inclinaison Terre

# Bilan radiatif

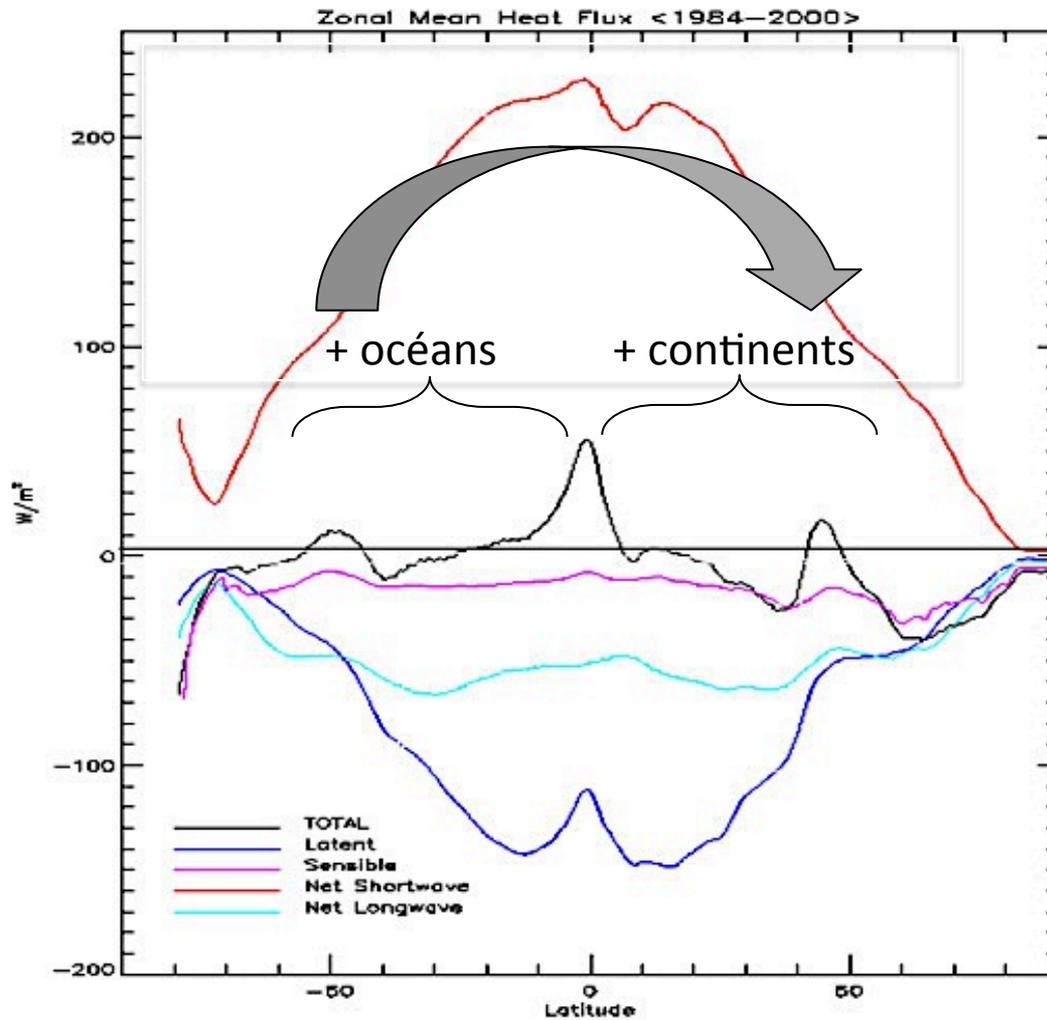
- Rayonnement absorbé ( $Q_{SW}$ )
- Rayonnement émis ( $Q_{LW}$ ) → IR
- Chaleur latente ( $Q_L$ ) → chaleur échangée lors des changements d'état = évaporation
- Chaleur sensible ( $Q_S$ ) → chaleur échangée sans changement de phase: conduction thermique



# Transfert d'énergie

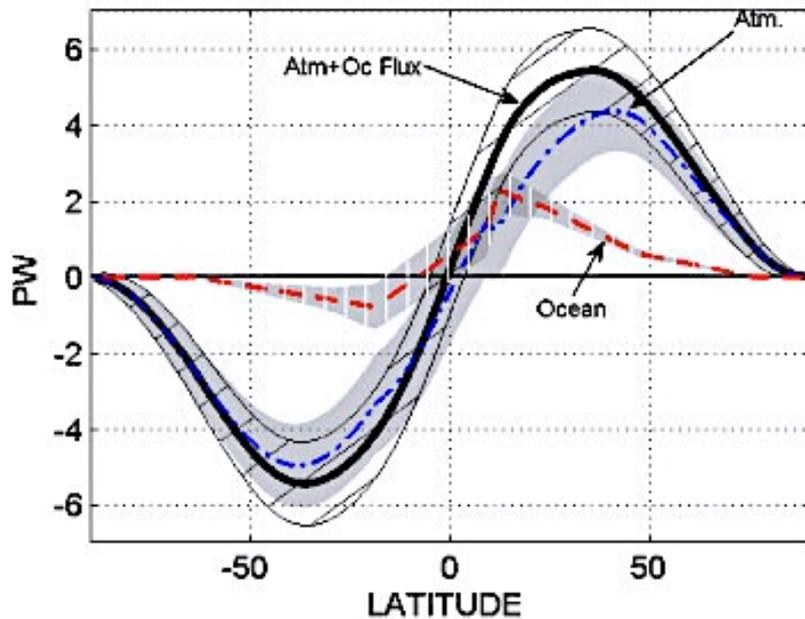


# Transfert d'énergie



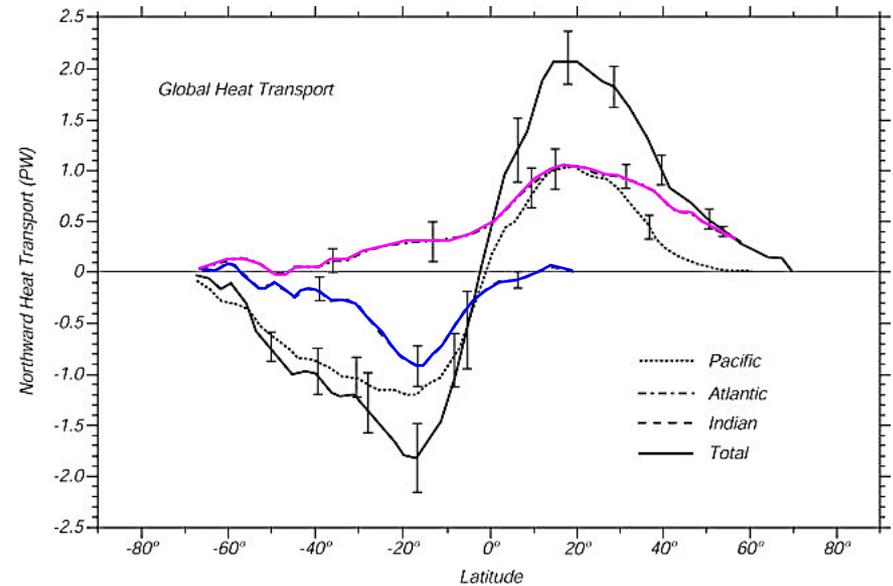
# Transfert d'énergie

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



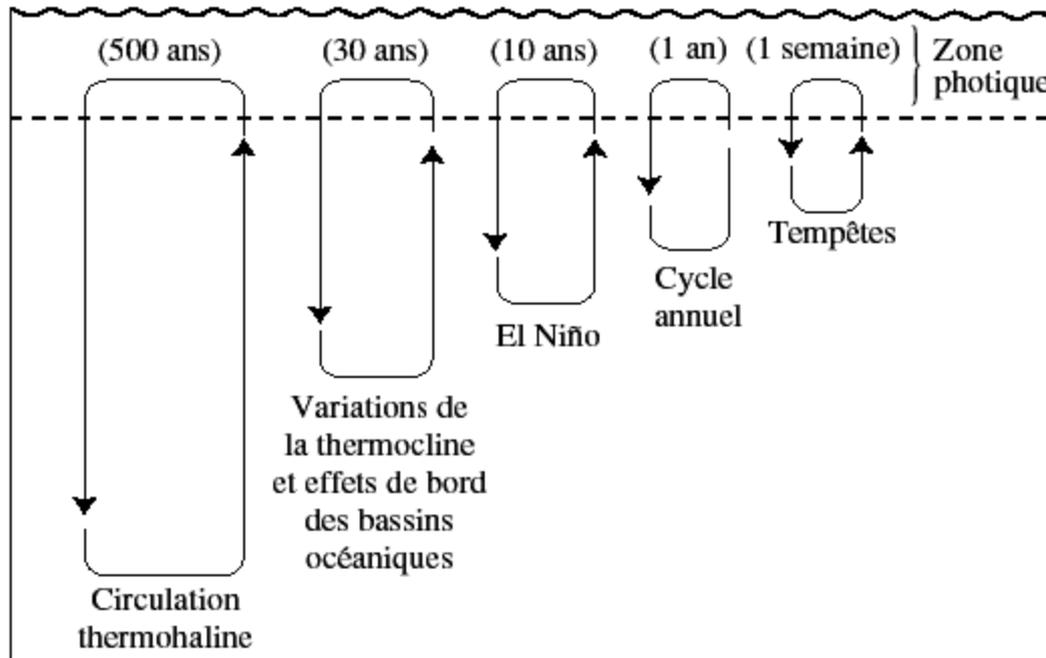
OCEAN



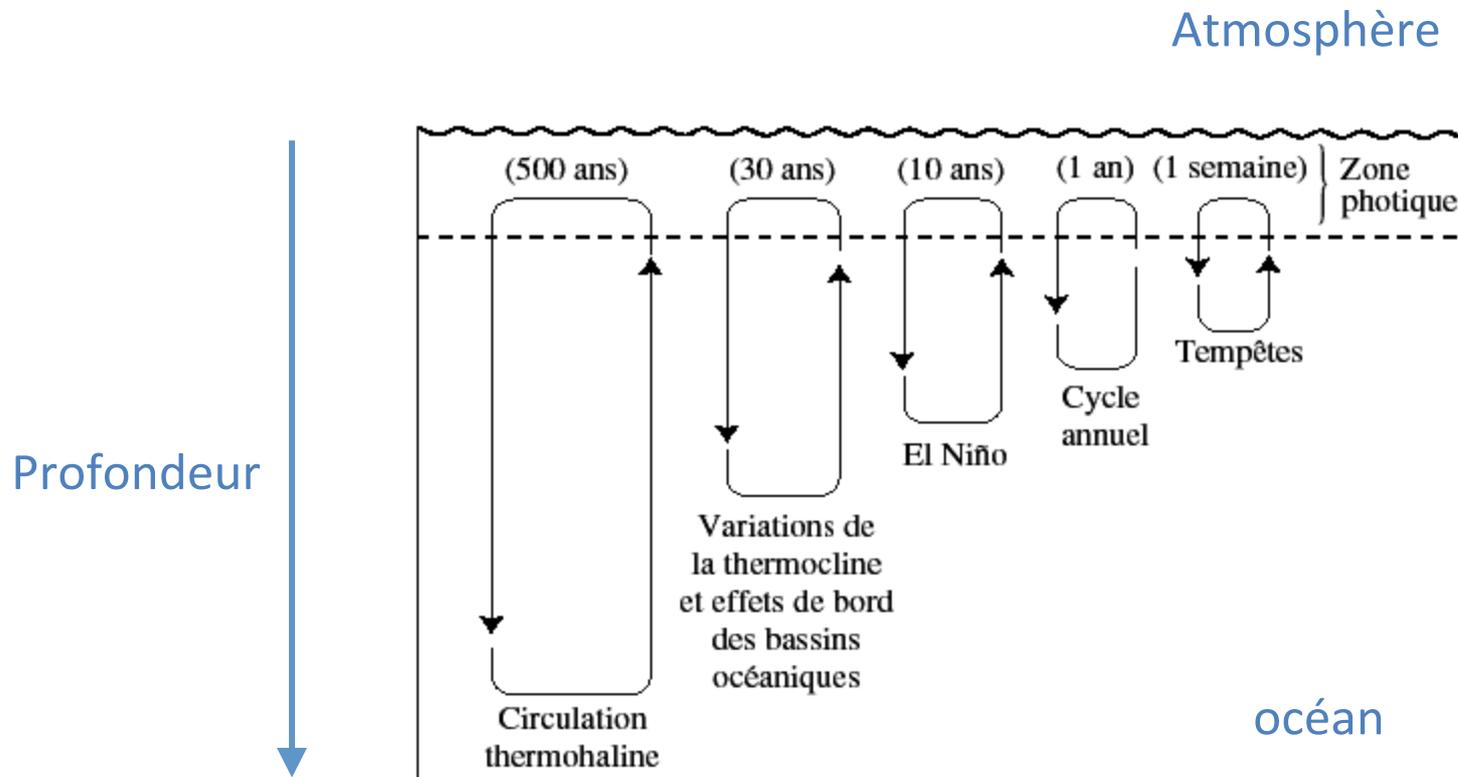
stabilité

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

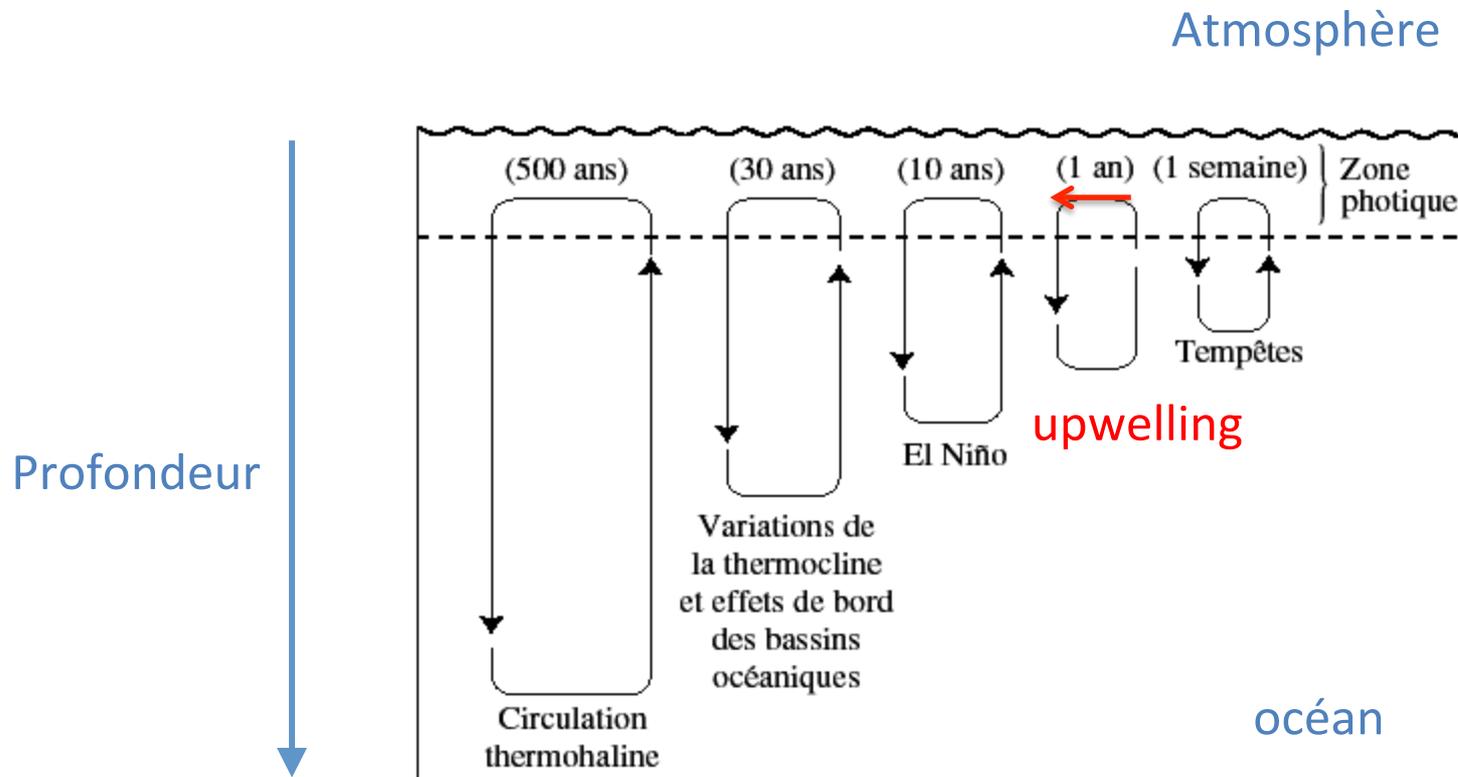
# Exemple de convection à différentes échelles



# Exemple de convection à différentes échelles



# Exemple de convection à différentes échelles



# Vent et convection à l'échelle locale

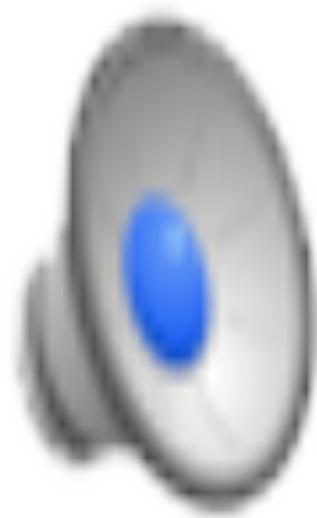


Illustration d'un upwelling

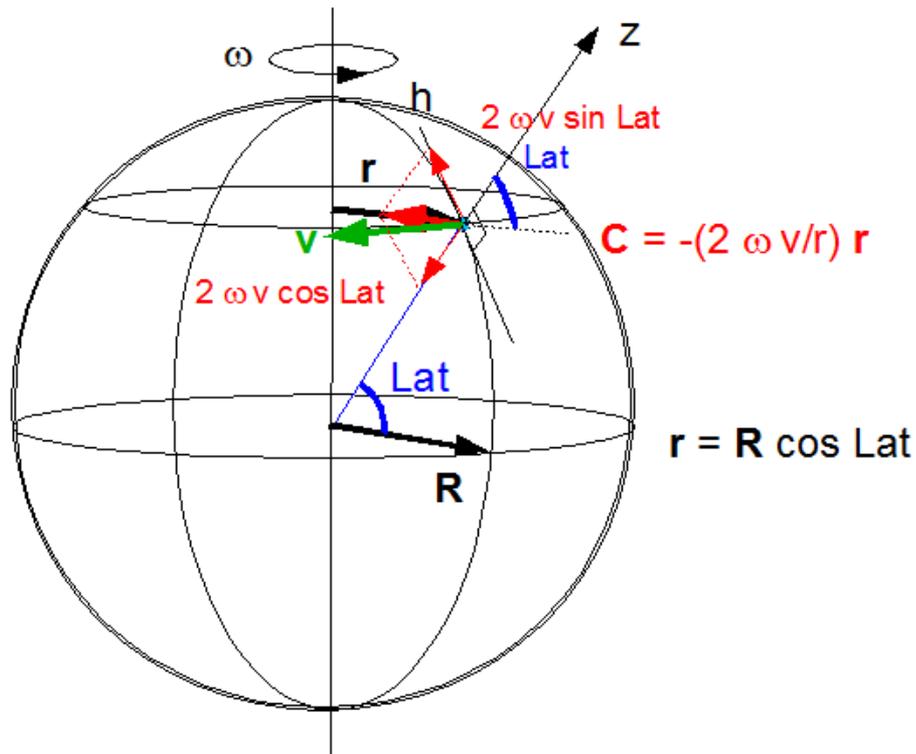
# Vent et convection à l'échelle locale

- 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

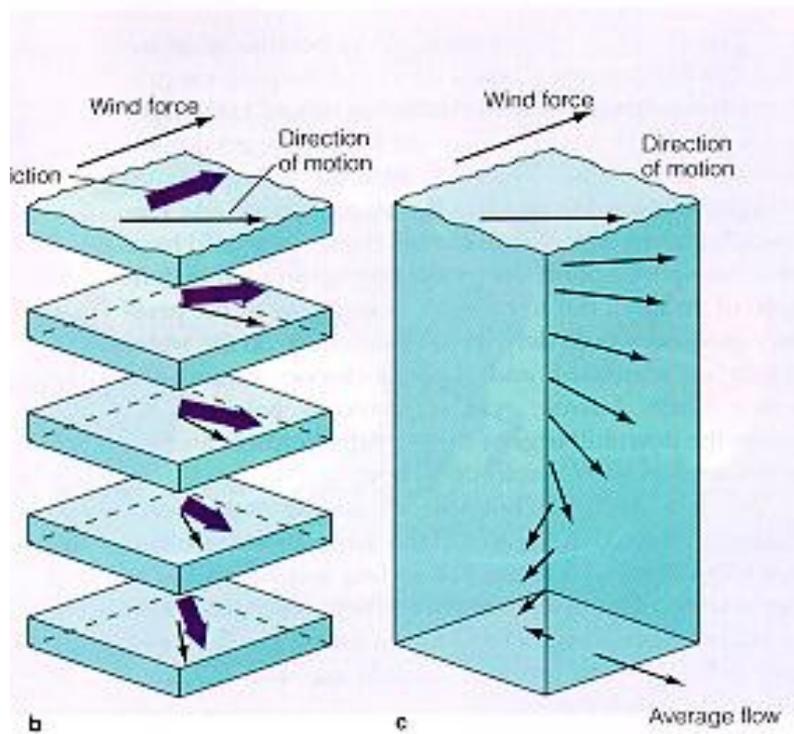


- Force inertielle – fictive
- Résulte rotation uniforme de la Terre
- Notion de vitesse angulaire  $\omega$
- Distance /axe de rotation:  $R$  et  $r$
- $f_C$  : 0 à l'équateur
- $f_C$  : max aux pôles

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

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

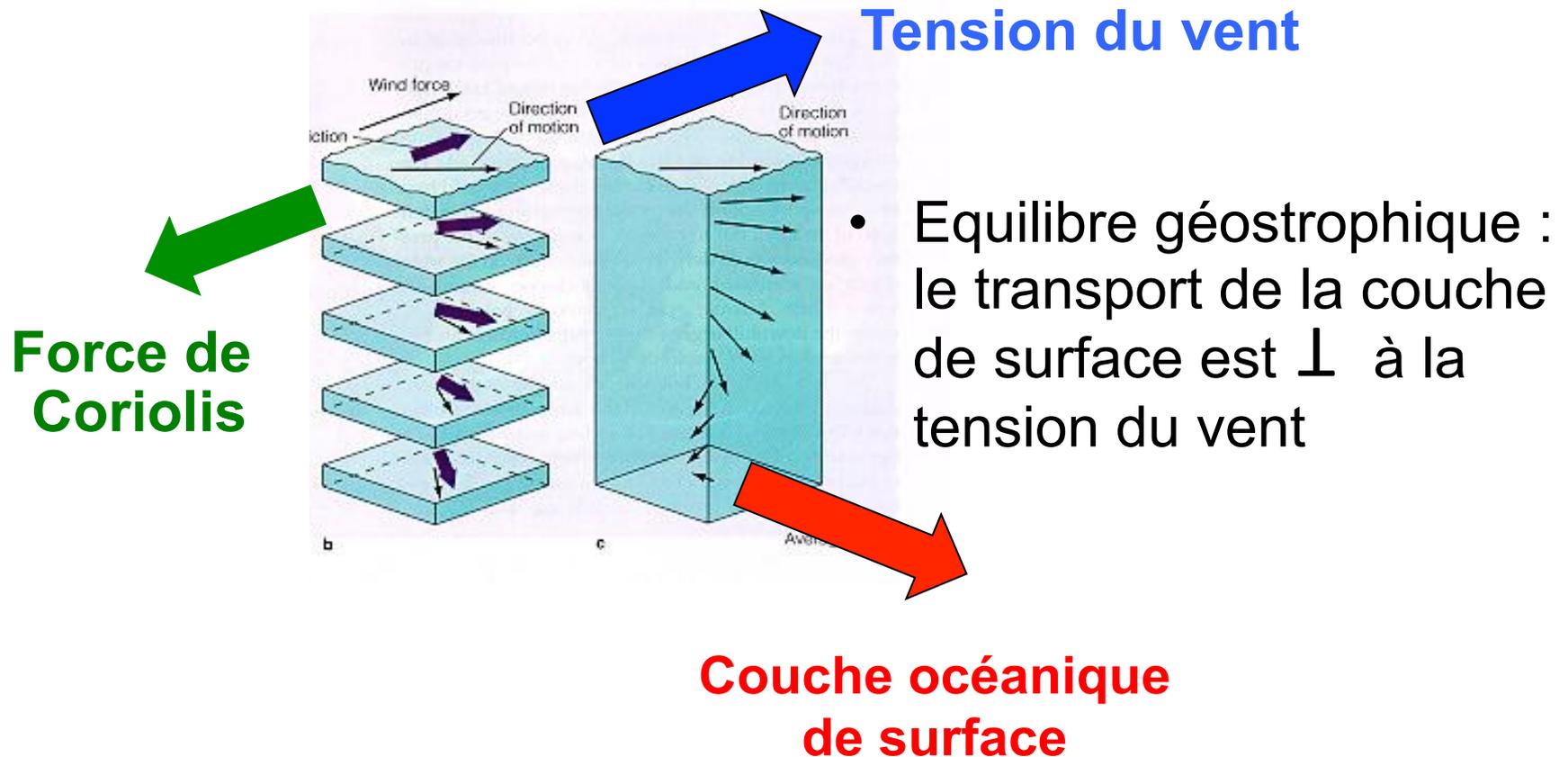
# Spirale d'Ekman



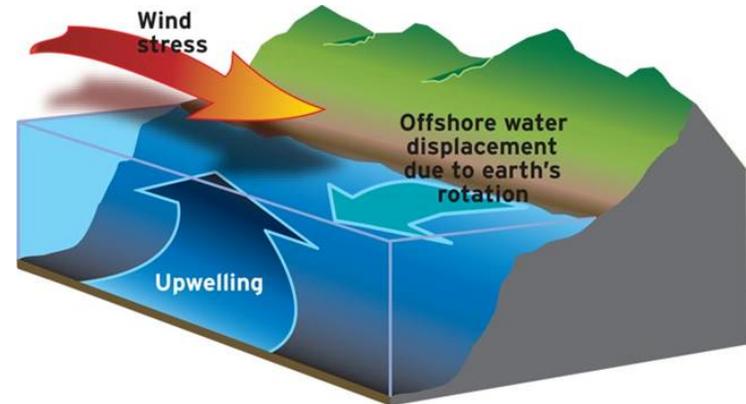
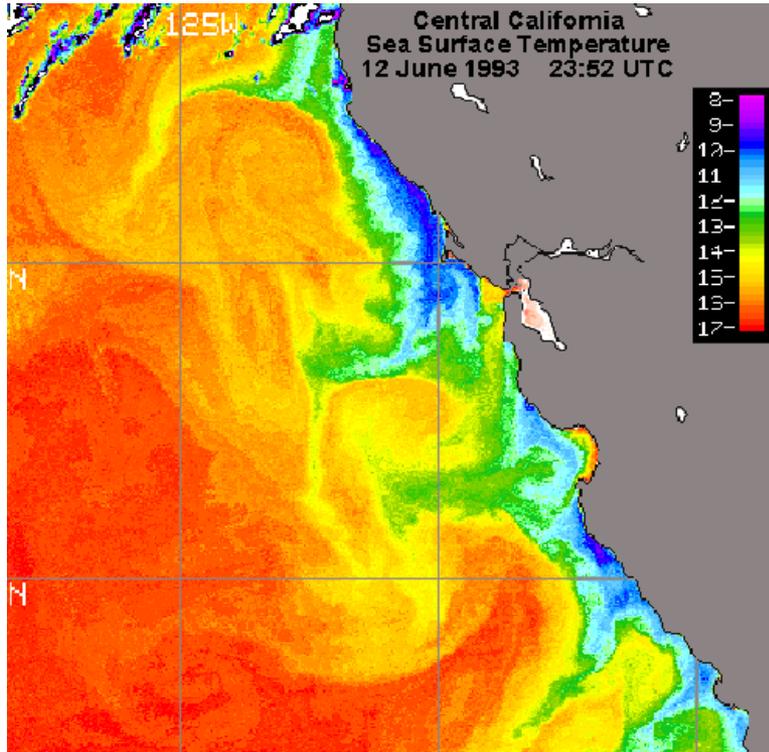
- Tension du vent
- Force de Coriolis
- Spirale d'Ekman

⊥

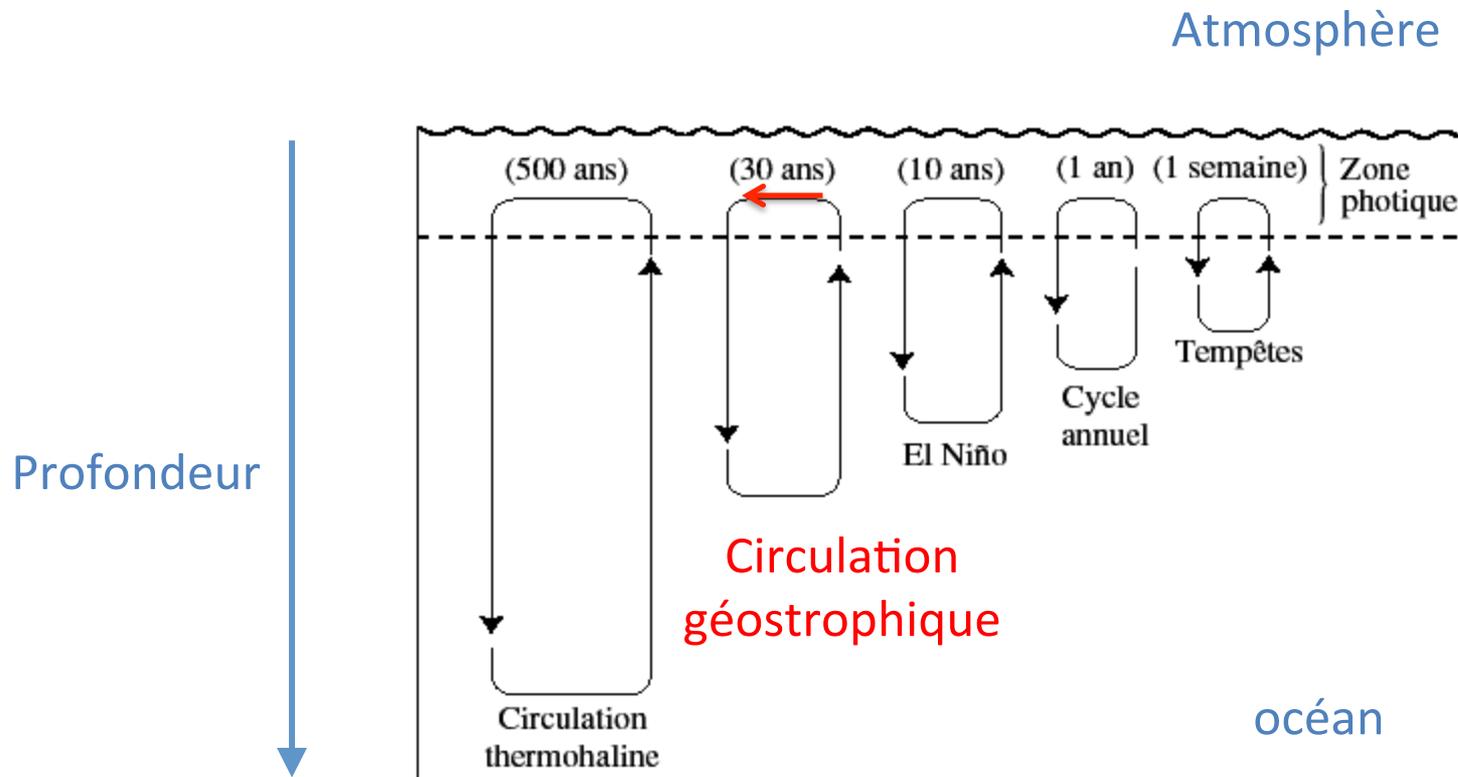
# Spirale d'Ekman



# Upwelling



# Exemple de convection à différentes échelles

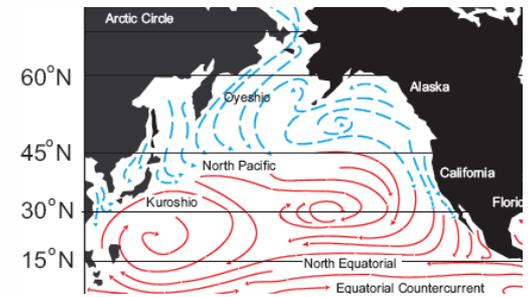
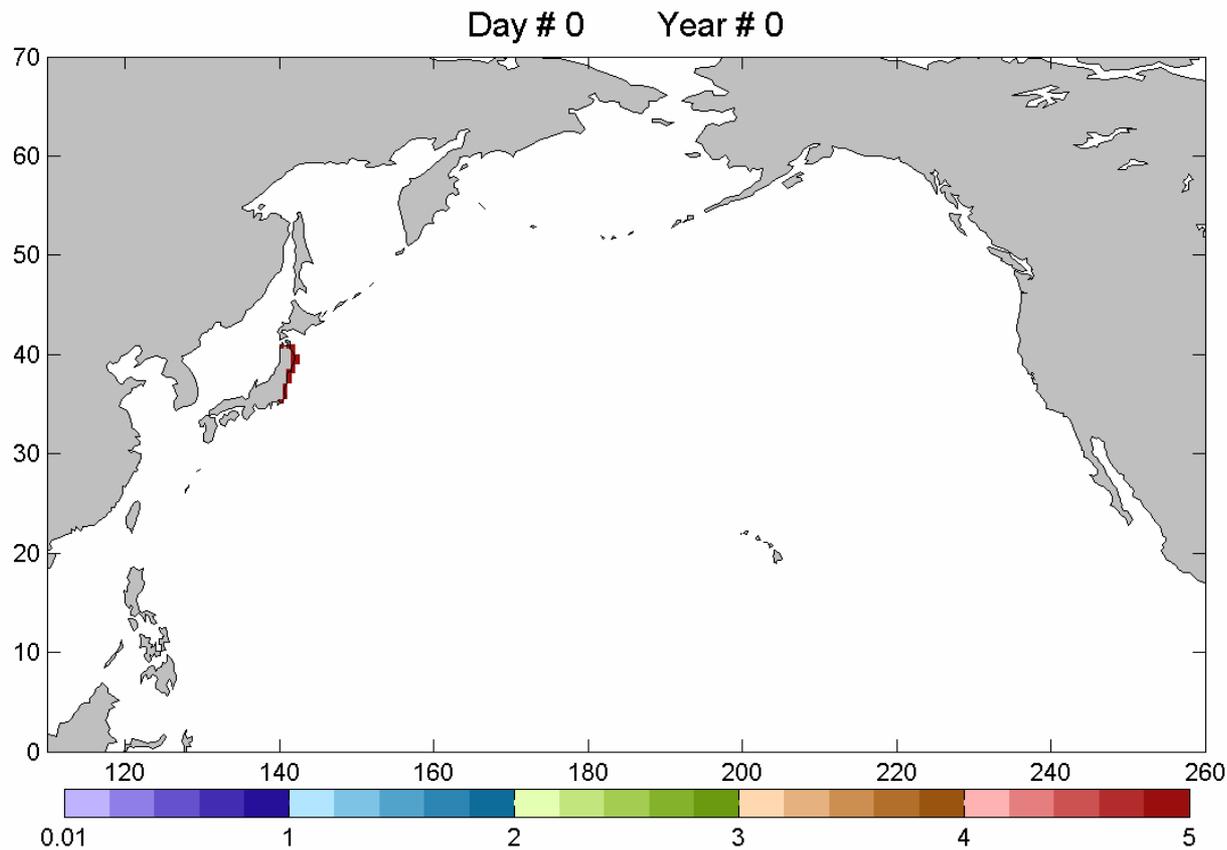


# Convection à l'échelle des bassins océaniques

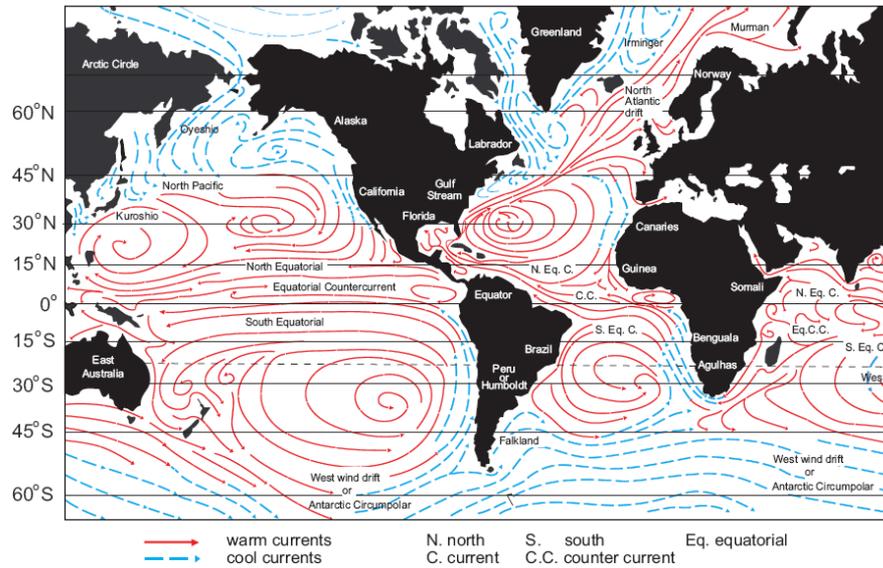


- Accident de Fukushima 11 mars 2011 : tremblement de terre + tsunami
- Modélisation de la dispersion radioactivité ( $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$ )
- Trace la composante horizontale convection océanique

# Convection à l'échelle des bassins océaniques

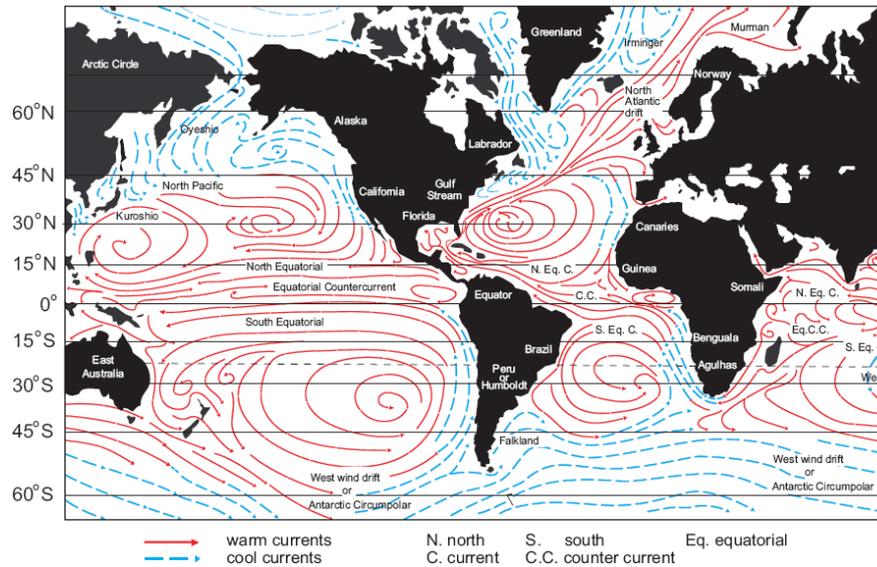


# Relation vents - gyres océaniques

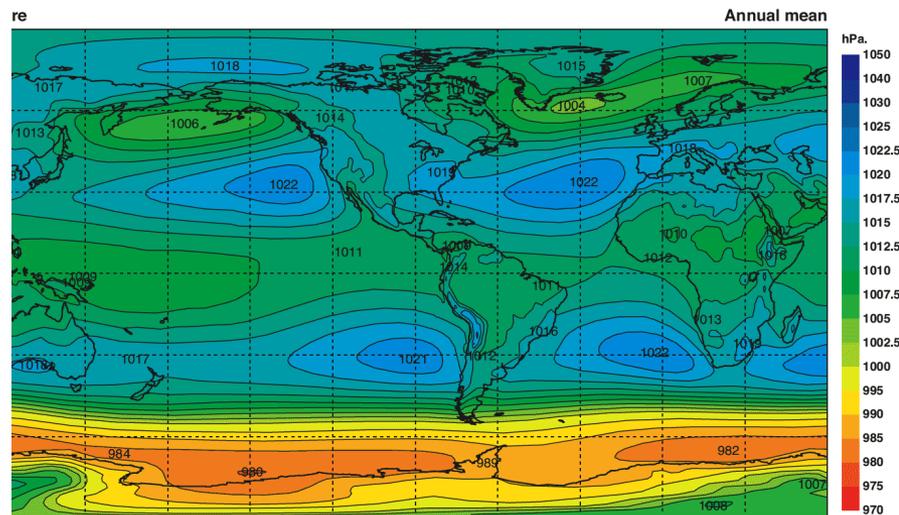


- Distribution gyres océaniques

# Relation vents - gyres océaniques



- Distribution gyres océaniques

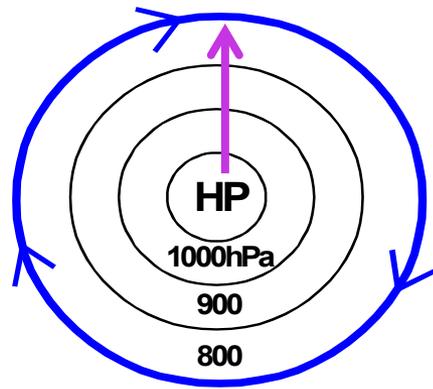


- Distribution HP - BP
- Couplage entre circulation atmosphérique et océanique de surface géostrophique

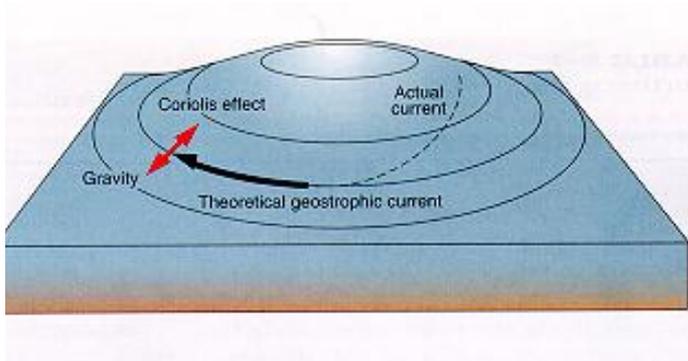
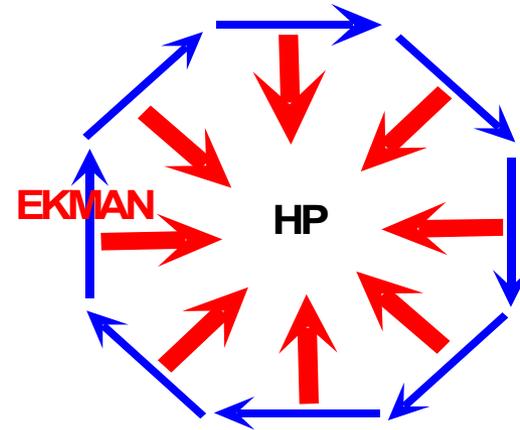
# Cellule de haute pression atmosphérique ventilation de l'océan

Gradient de pression  
atmosphérique

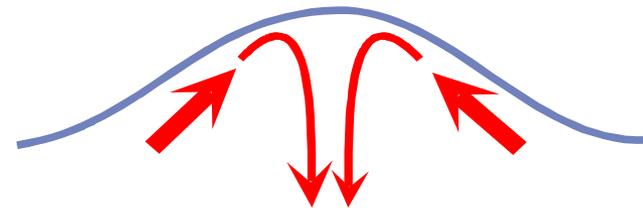
Vue horizontale



Tension vent → transport Ekman



convergence



plongée d'eau = VENTILATION

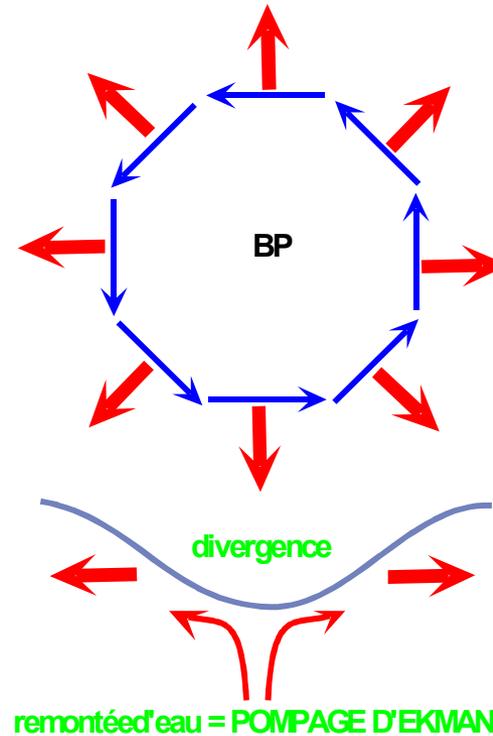
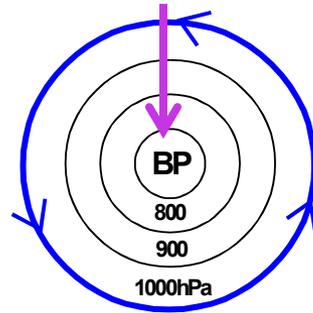
Vue en coupe

# Cellule de basse pression atmosphérique et pompage d'Ekman

Tension vent → pompage Ekman

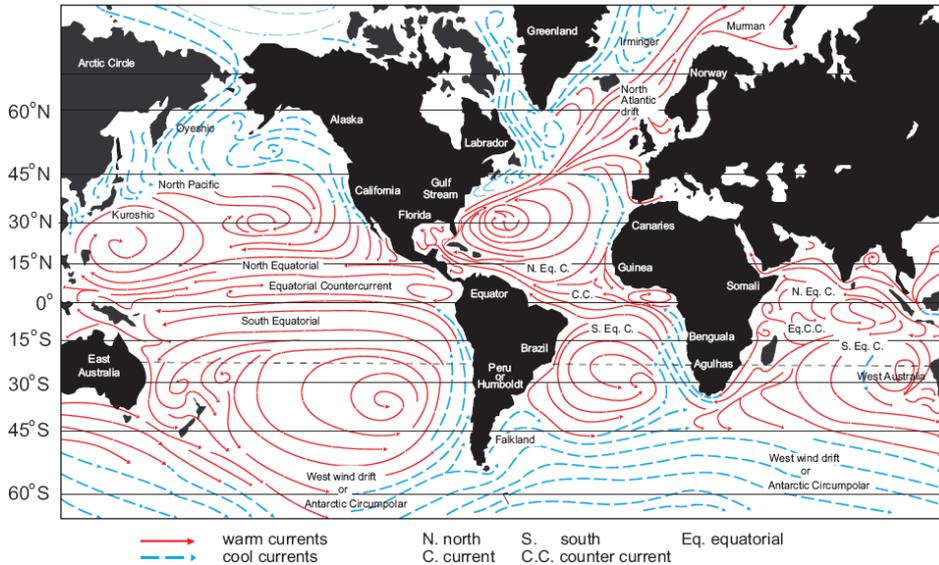
Gradient de pression  
atmosphérique

Vue horizontale

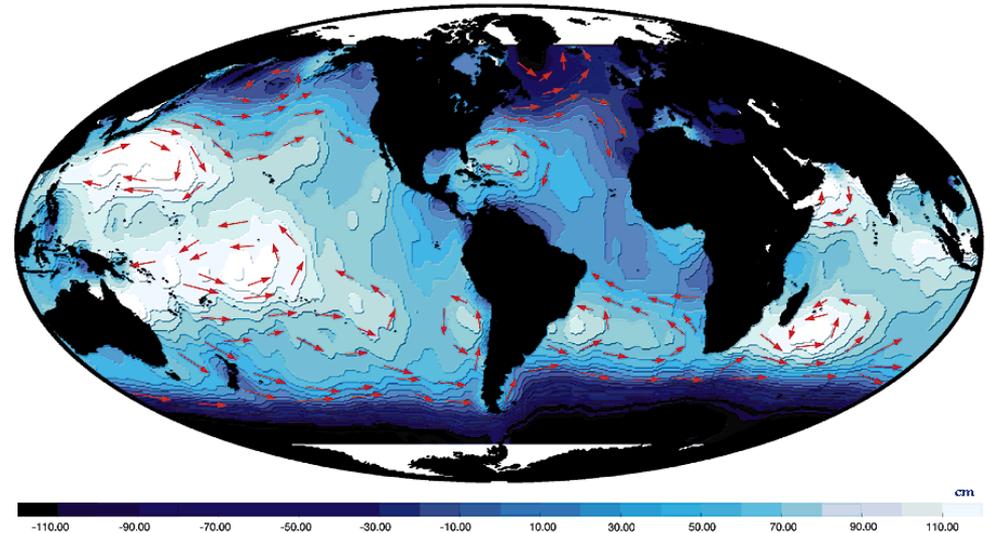


Vue en coupe

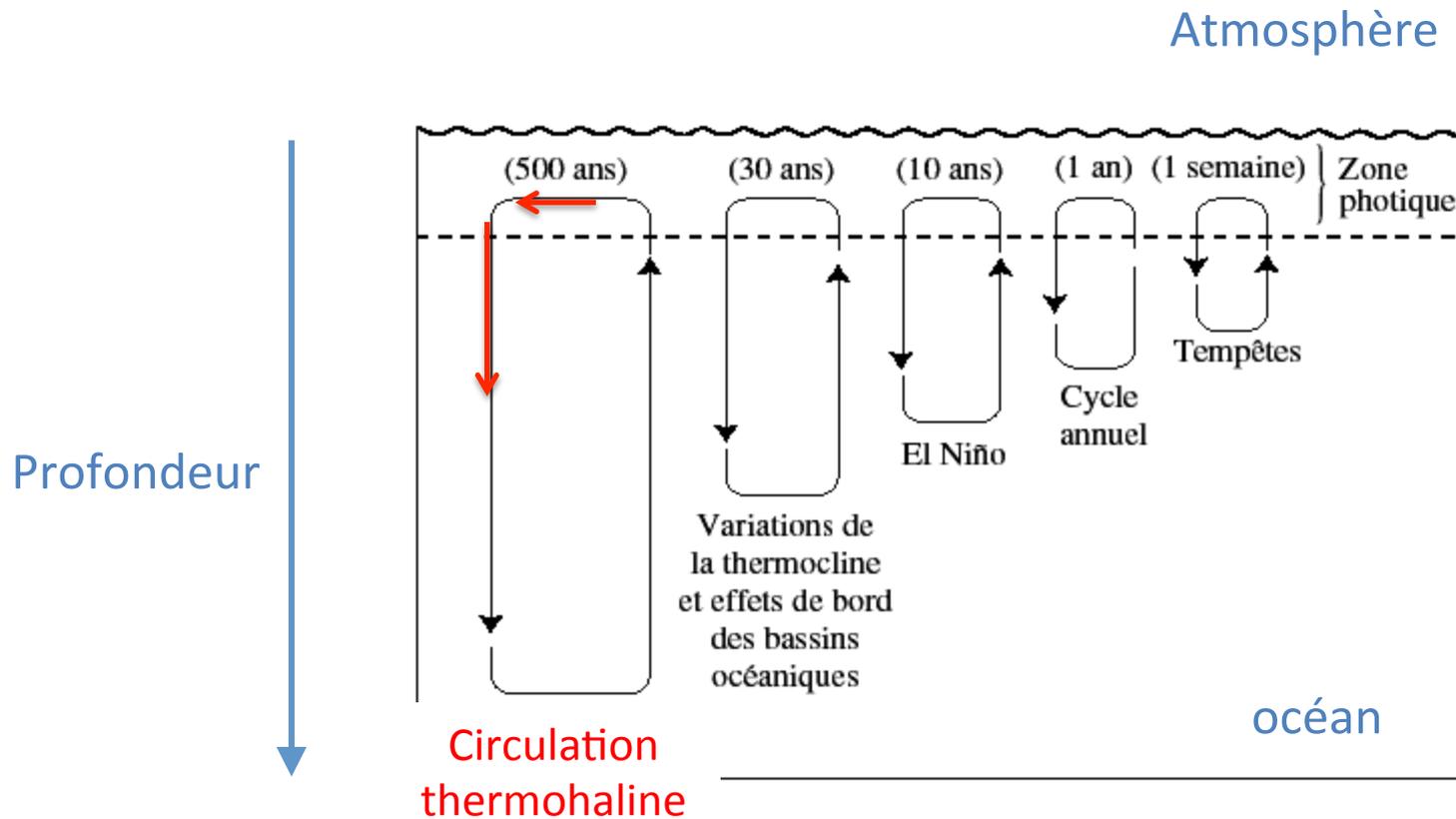
# Topographie dynamique



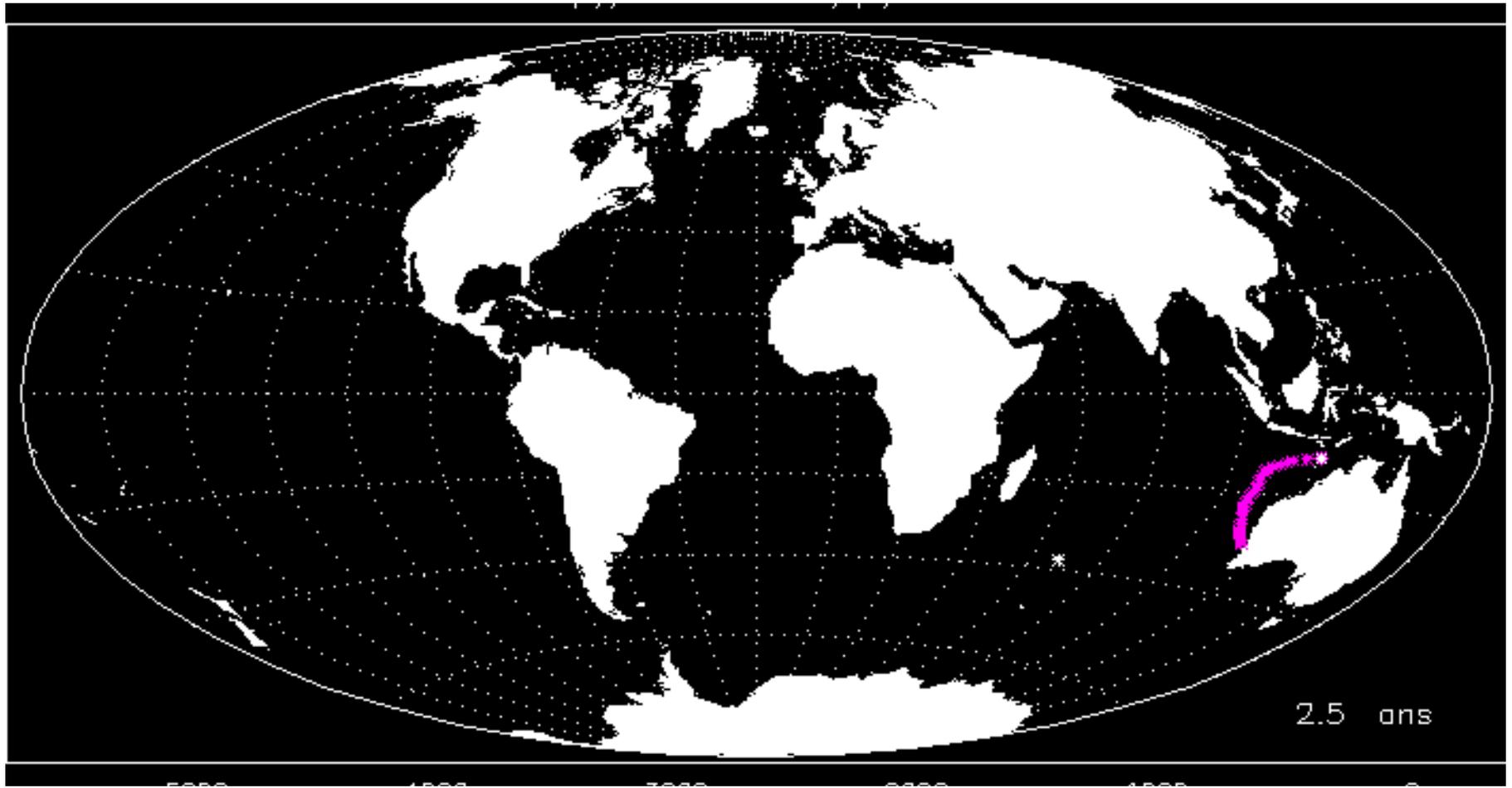
Sea surface dynamic topography as observed by TOPEX/POSEIDON



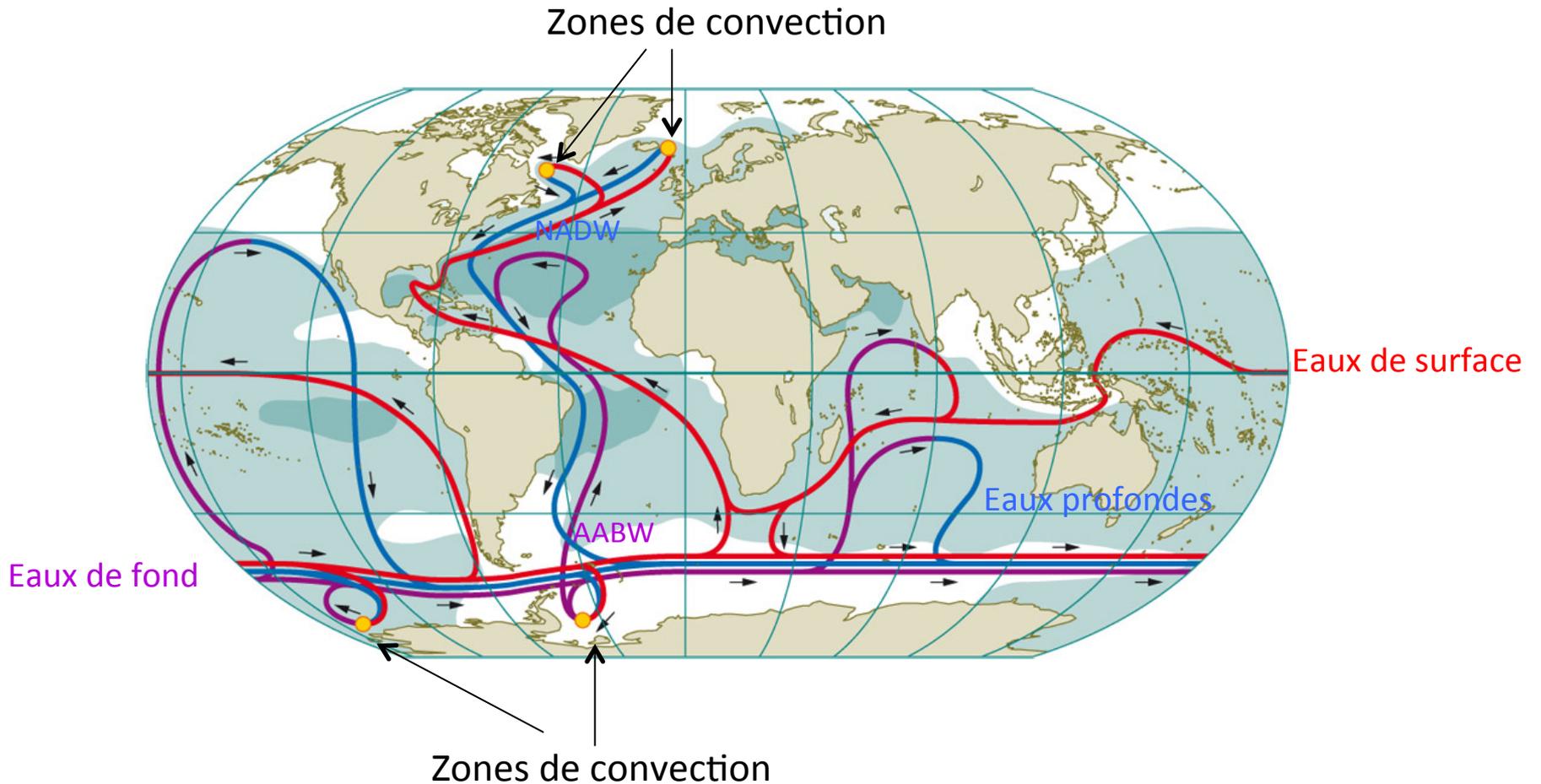
# Exemple de convection à différentes échelles



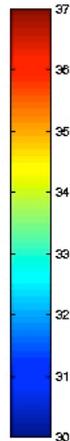
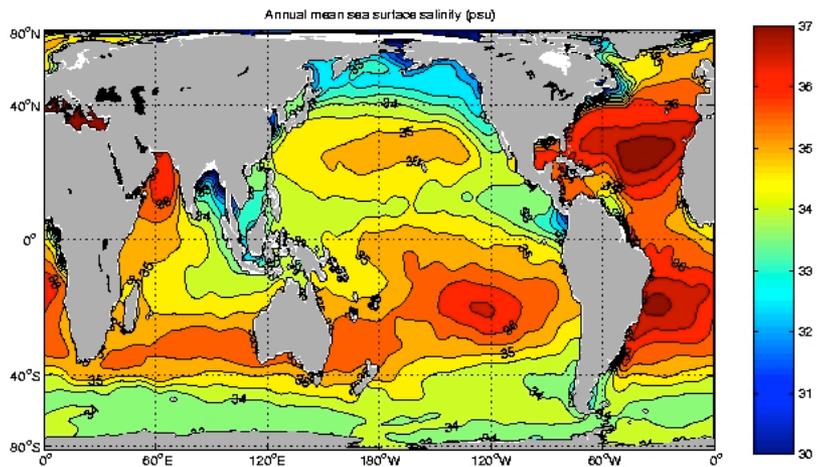
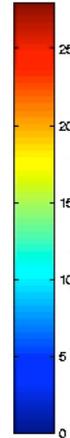
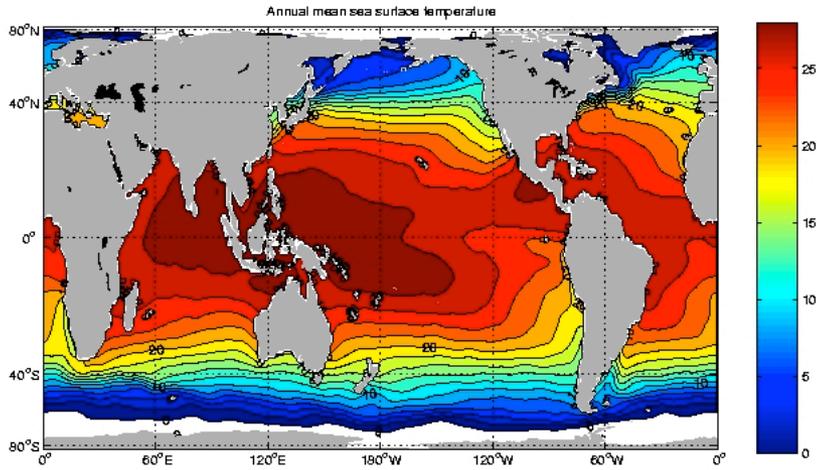
# Circulation thermohaline



# Circulation thermohaline

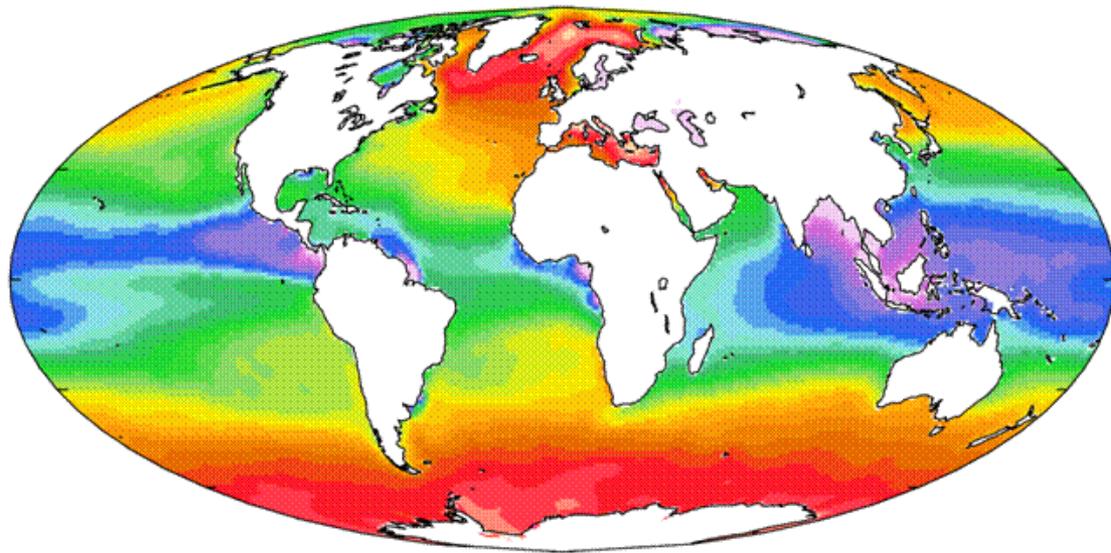


# Température – salinité de surface

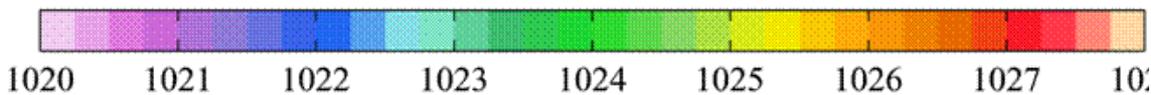


- Eaux de surface
  - Distribution températures
  - Distribution salinité
- Contrastes température / salinité
  - Distorsion
  - Accumulation eaux chaudes sur bordure W des bassins océaniques
  - Accumulation sel dans atlantique car  $E \gg P$

# Densité des eaux de surface

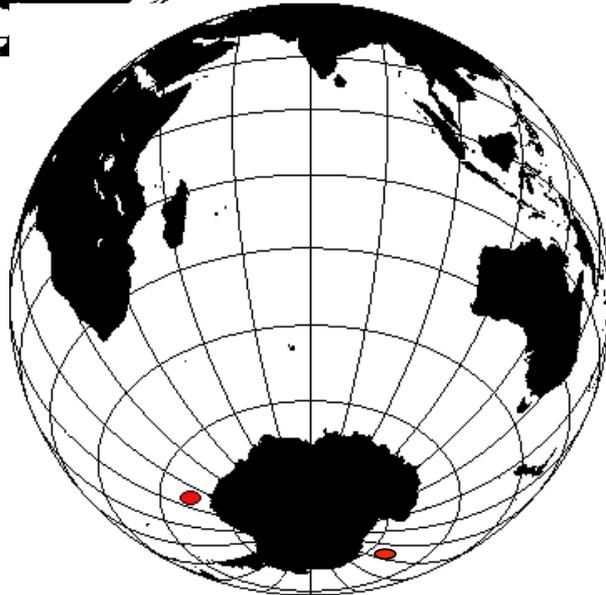
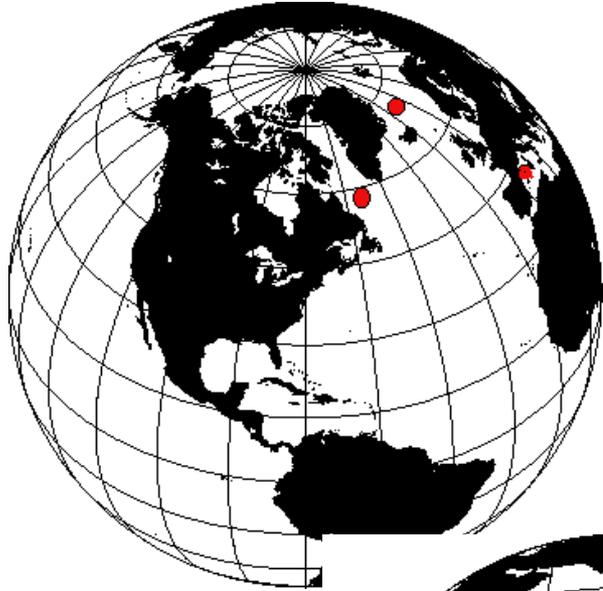


Sea-surface density [ $\text{kg m}^{-3}$ ]



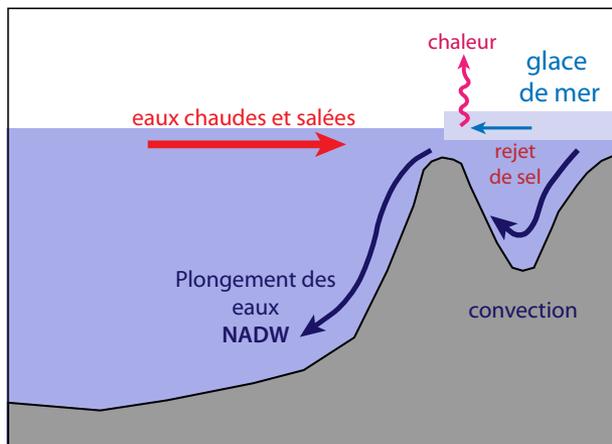
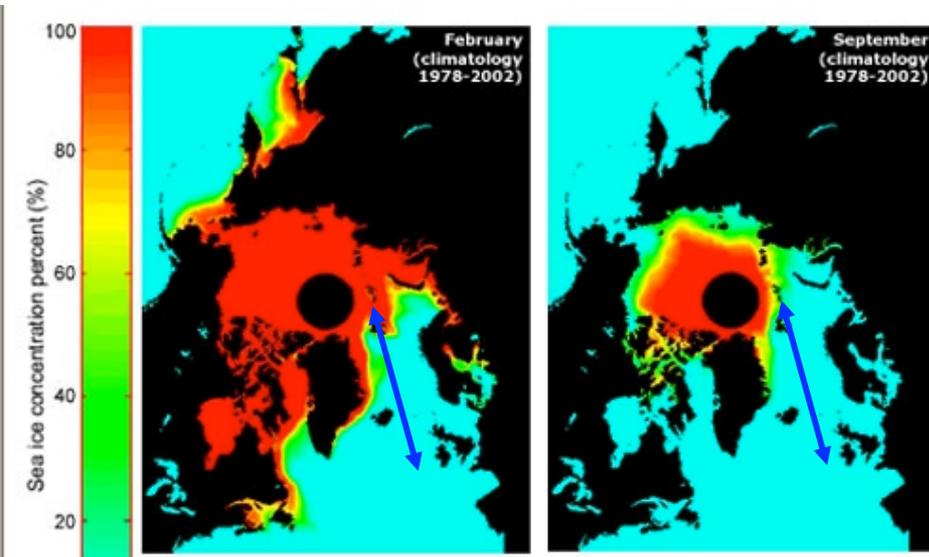
- Contrastes température / salinité → contrastes densité
- Zones océaniques denses
  - Nord de l'Atlantique nord
  - Océan austral
  - Méditerranée

# 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



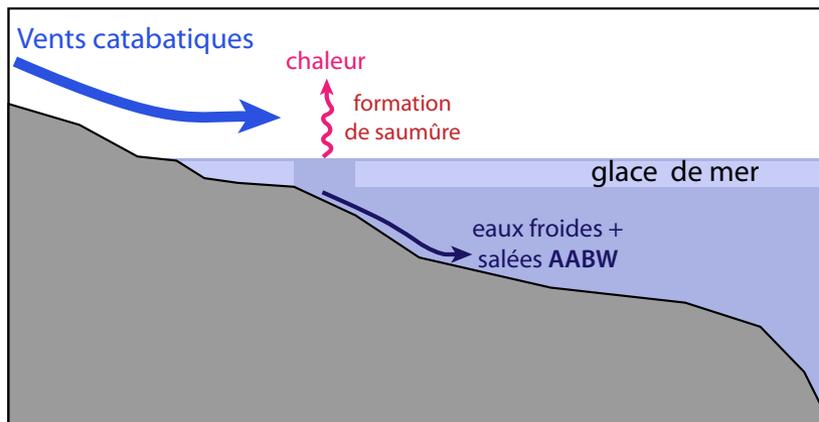
- Mer de Norvège
- Eaux de surface salées
- Formation glace de mer → rejet de sel
- Perte de chaleur latente + sensible
- Augmentation densité → gradient densité  $>0$
- Plongée des eaux de surface → convection profonde d'eaux très salées et assez chaudes
- North Atlantic Deep Water : NADW (eaux profondes)

# Convection profonde



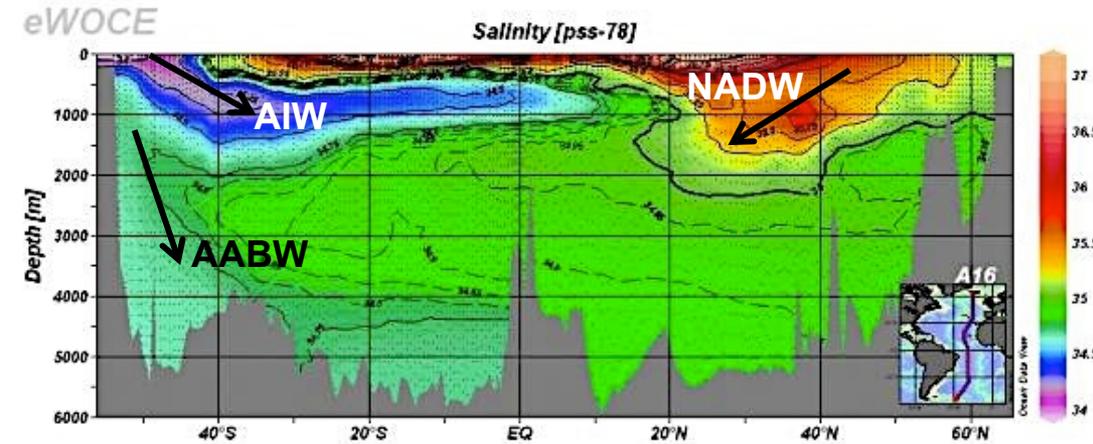
Continent Antarctique

Océan Austral

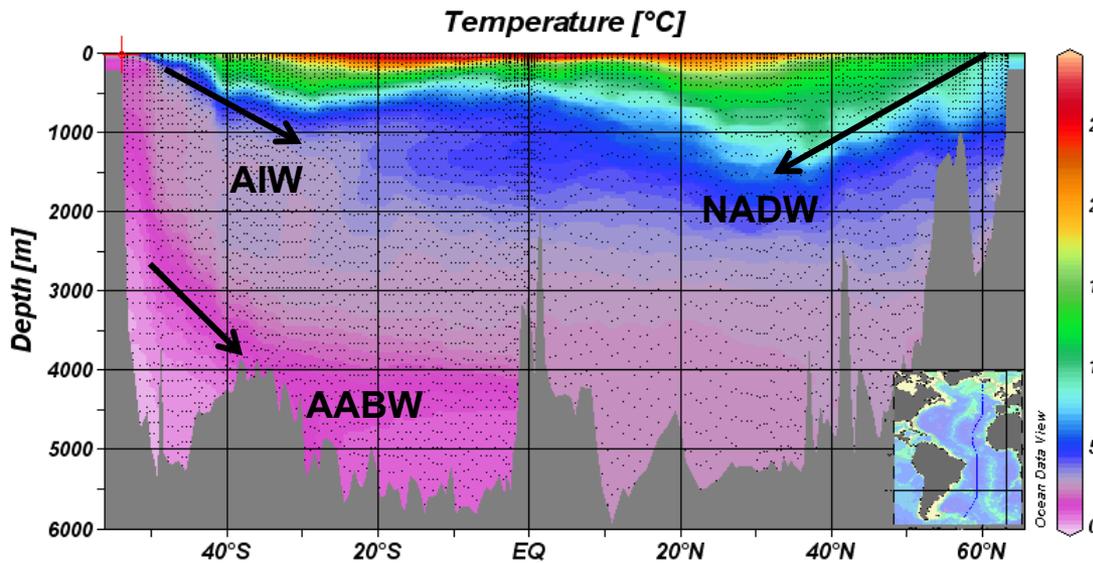


- Océan Austral
- Polynies : zones libres de glace, eaux très froides
  - vents catabatiques
- Perte de chaleur sensible + latente
- Plongée des eaux de surface → convection profonde d'eau de fond extrêmement froide et peu salée
- Antarctic Atlantic Bottom Water AABW (eaux de fond)

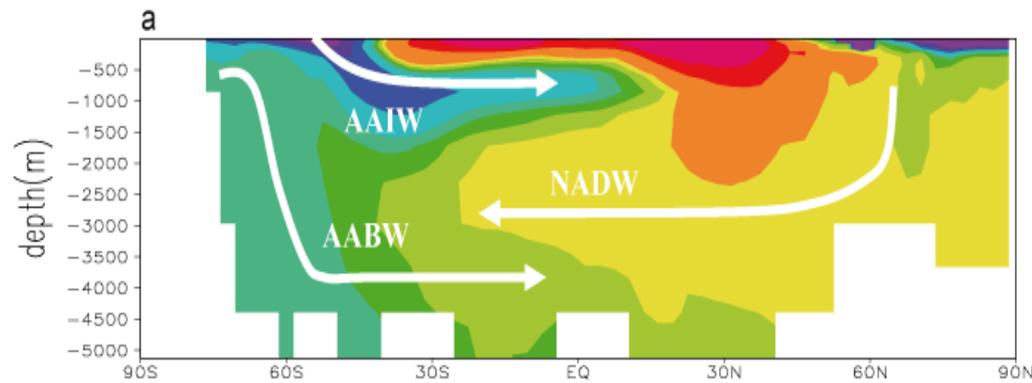
# Circulation thermohaline



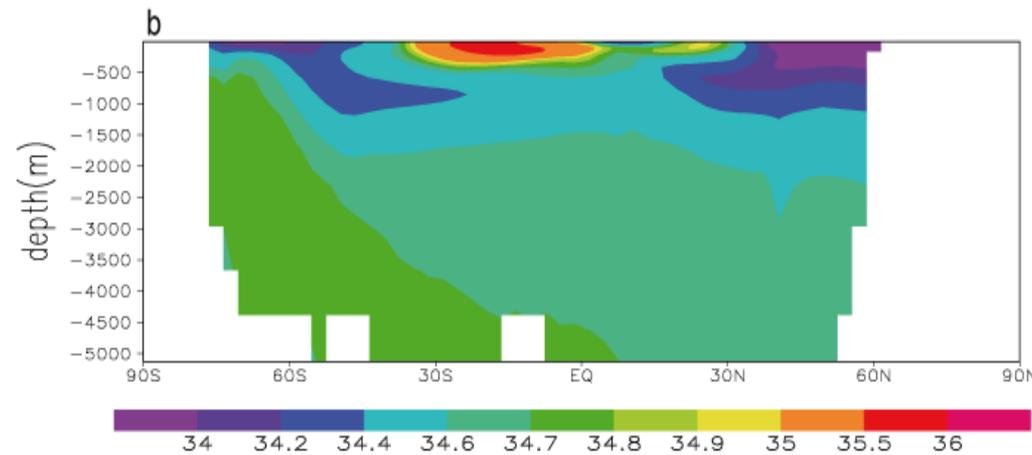
- Mise en évidence de 3 masses d'eau
- NADW = North Atlantic Deep Water (froide et très salée) → 40°S
- AABW = Antarctic Atlantic Bottom Water (très froide)
- AIW = Antarctic Intermediate Water (froide assez peu salée) depuis 60°S



# Salinité atlantique-pacifique

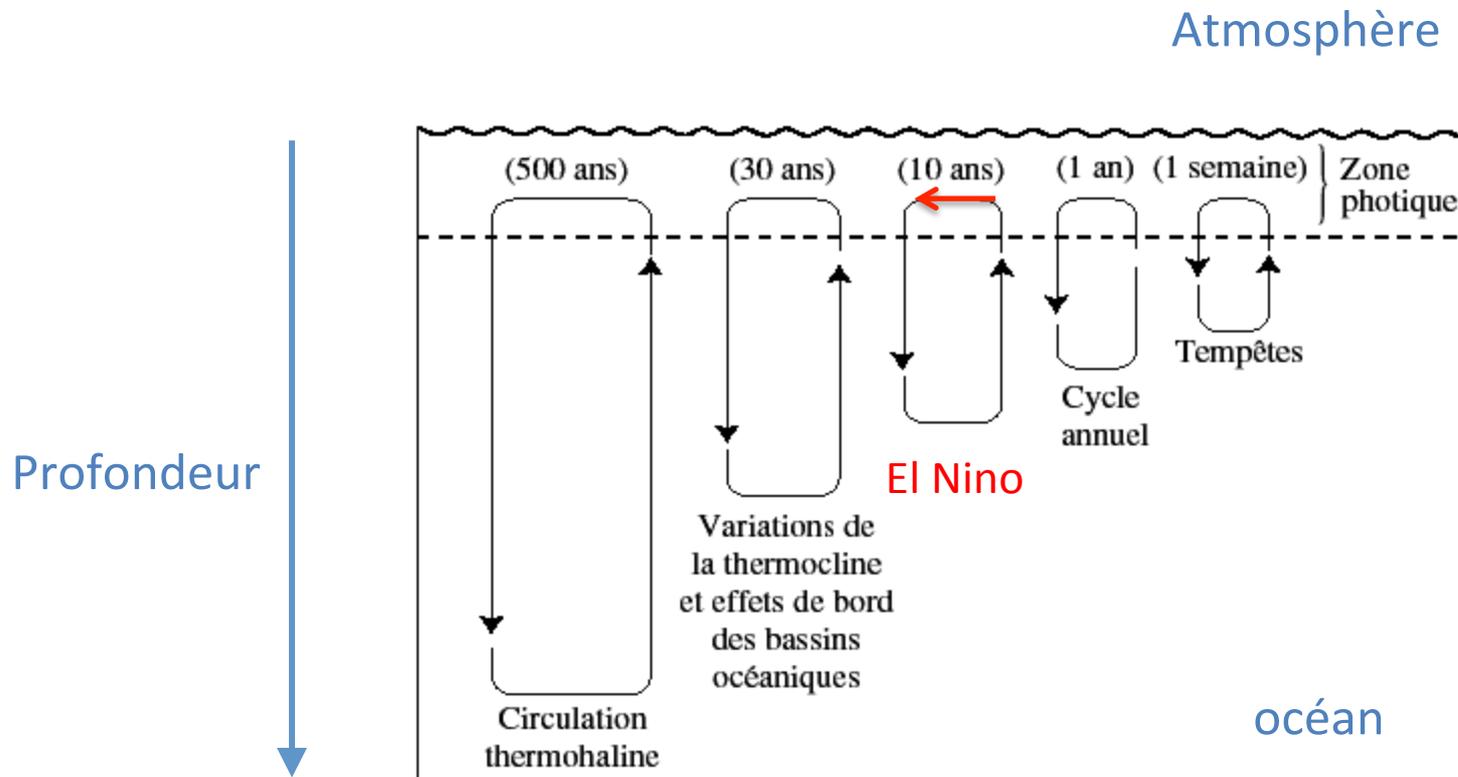


Atlantique

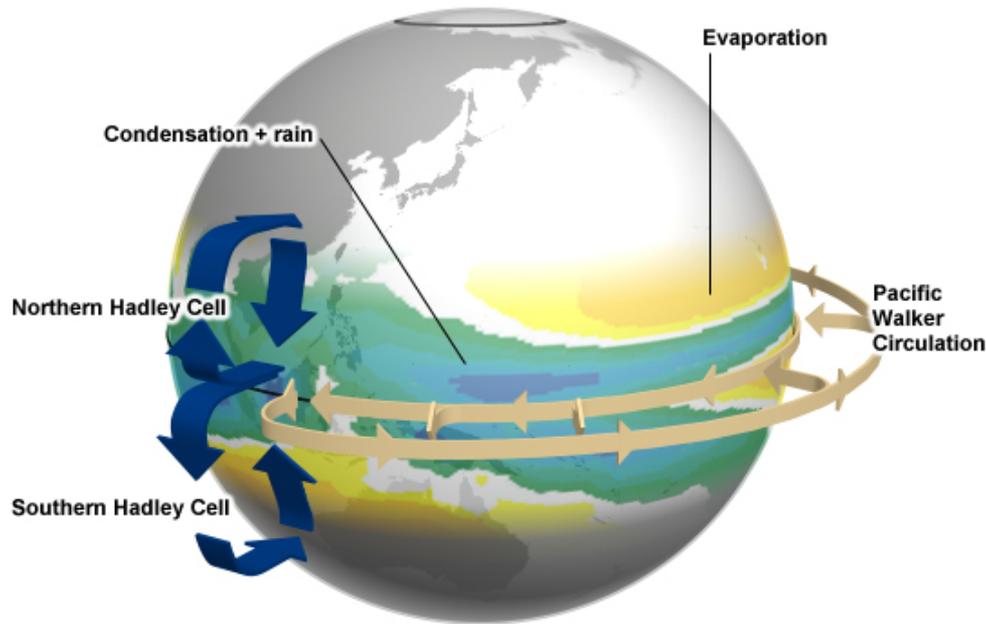


Pacifique : pas de convection

# Exemple de convection à différentes échelles

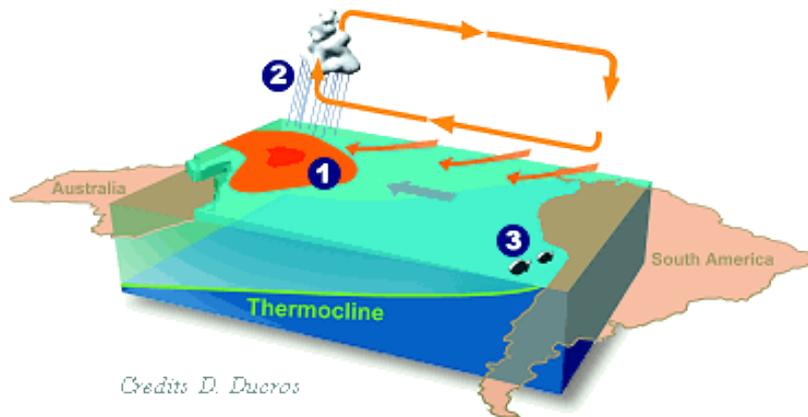


# Convection et circulation zonale

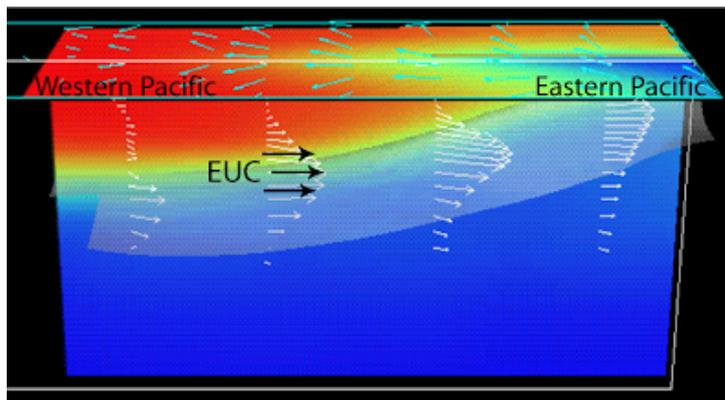


- Circulation atmosphérique méridienne
- Situation particulière dans le domaine équatorial
  - $F_{\text{CORIOLIS}} = 0$  à l'équateur
- Circulation atmosphérique zonale dite de Walker
  - Vents E-W au sol
  - Vents W-E en altitude
  - Relation avec circulation Hadley

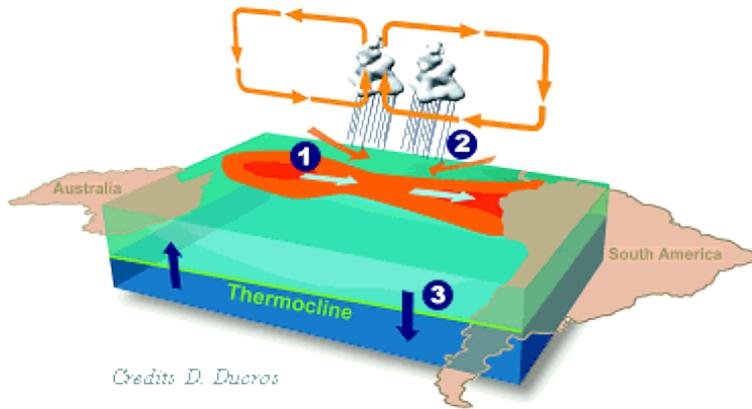
# Conditions normales



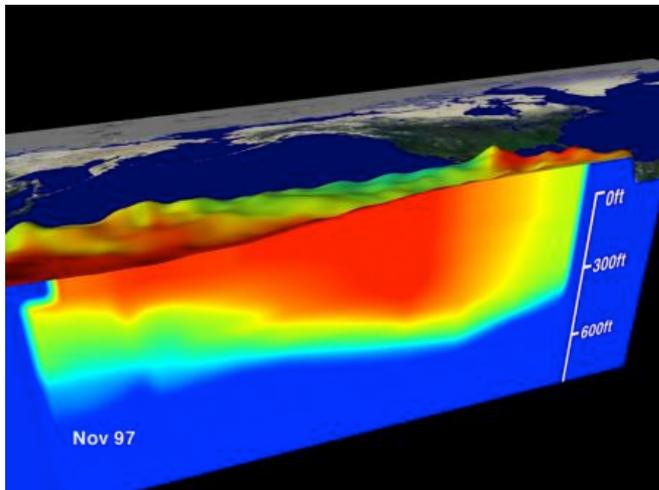
- Système vents E-W surface
- Eaux chaudes de surface accumulées (warm-pool) → pacifique W
- Zone de convection continent maritime
- Upwelling Pérou actif
- Thermocline profonde à l'W



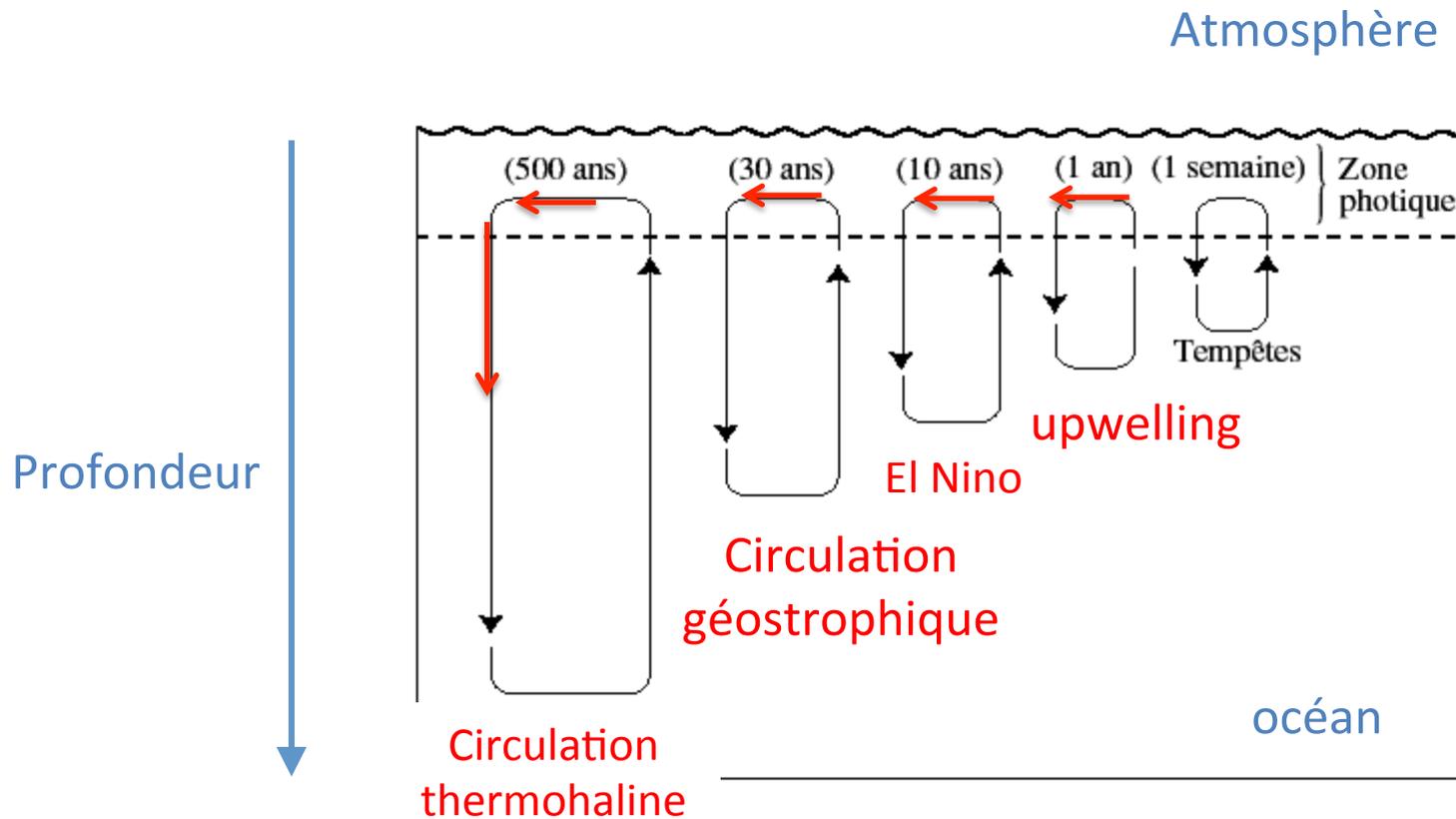
# Conditions El Niño



- 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