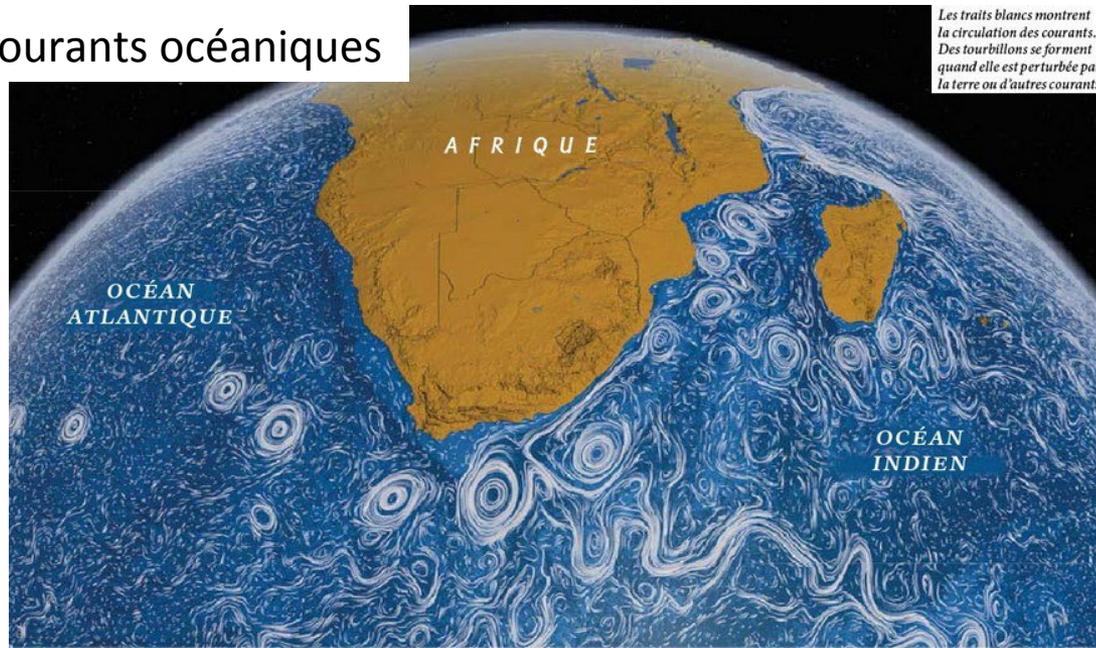
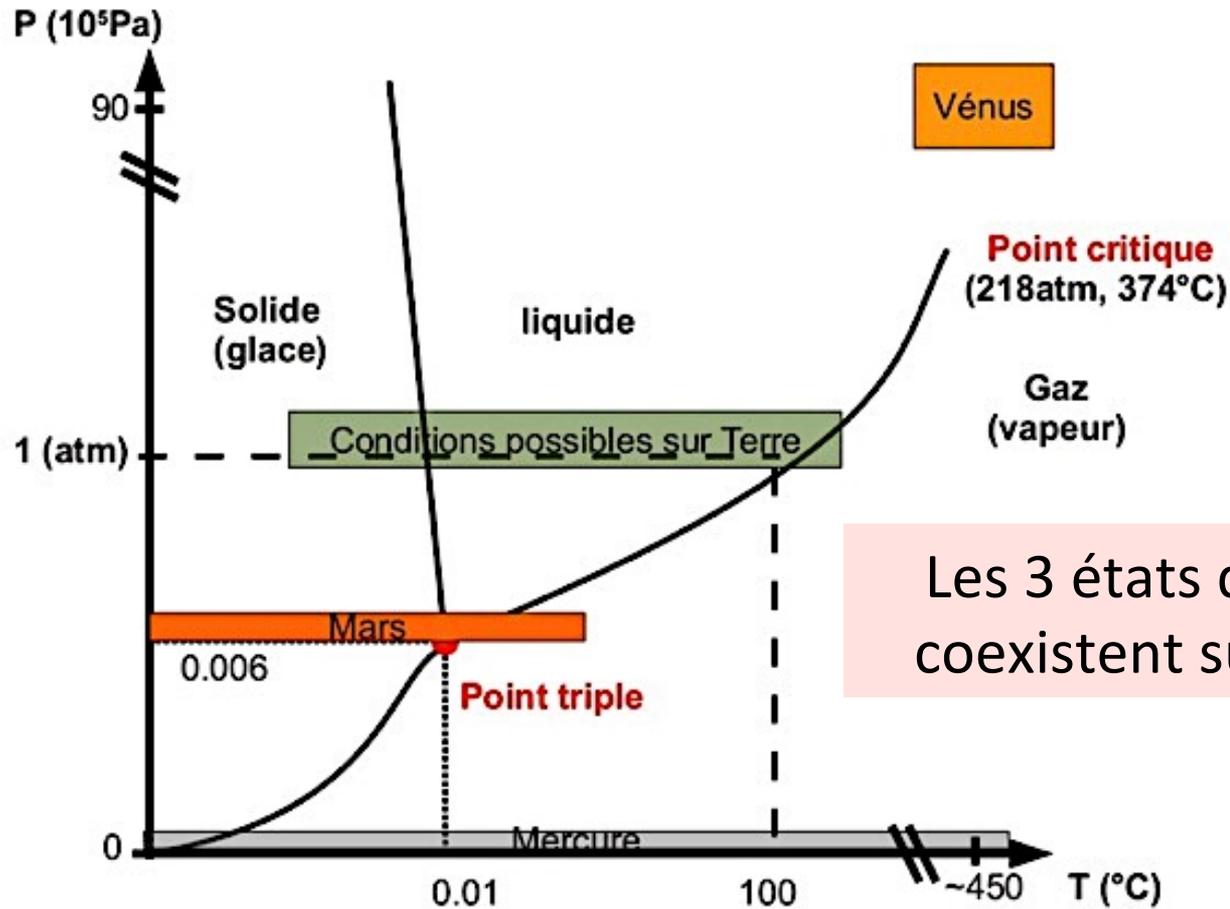


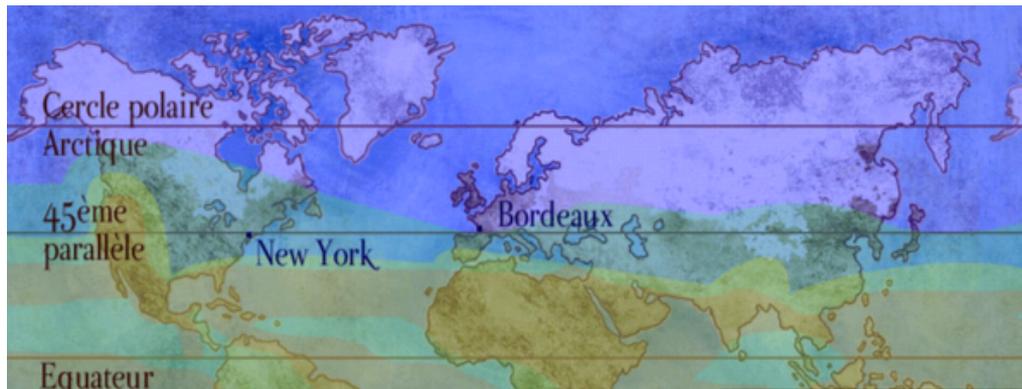
Chapitre 2 – Les océans et leur dynamique

Modélisation des courants océaniques

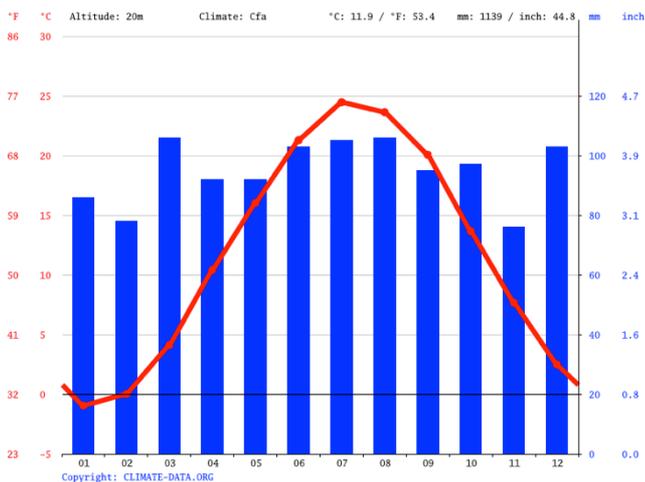


Les 3 états de l'eau

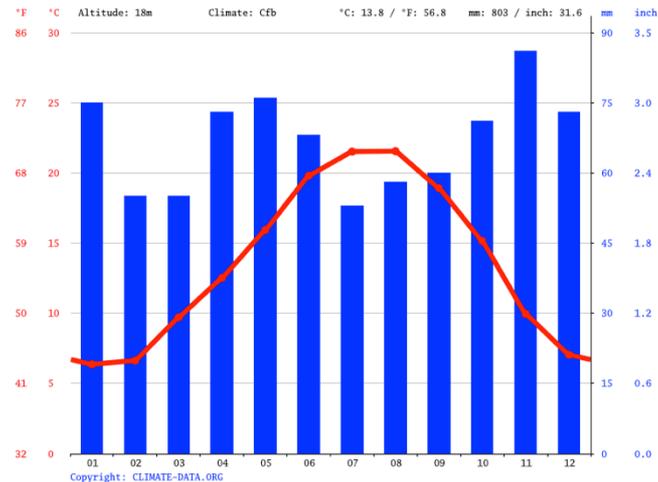




New York : 11,9°C de moyenne
entre -1,0 et 24,5°C



Bordeaux : 13,7°C de moyenne
entre 6,4 et 21,5°C



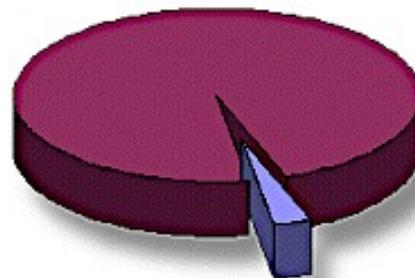
1. L'hydrosphère et ses stratifications

1.1. L'hydrosphère, un vaste réservoir d'eau

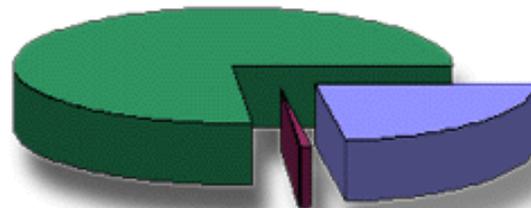
Répartition de l'eau sur Terre

Les réservoirs	Les stocks
Océans	1 350 000 000
Eaux continentales	35 976 700
Glaciers	27 500 000
Eaux souterraines	8 200 000
Mers intérieures	105 000
Lacs d'eau douce	100 000
Humidité des sols	70 000
Rivières	1 700
Atmosphère (humidité de l'air)	13 000
Biosphère (cellules vivantes)	1 100

■ eaux salées
■ eaux douces

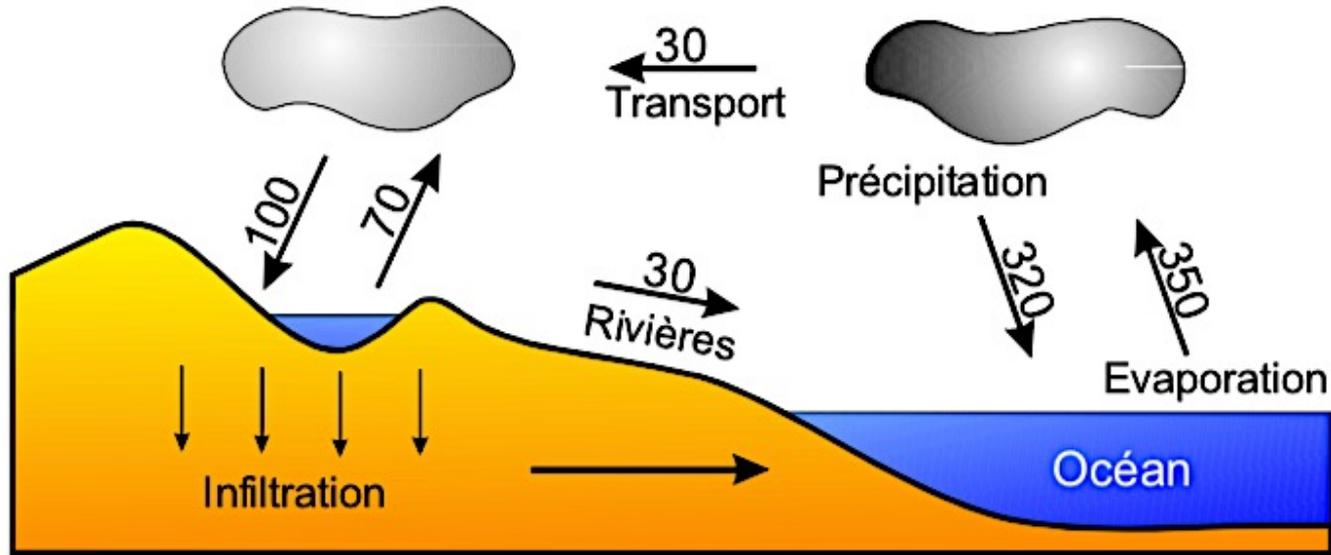


■ eaux souterraines
■ eaux superficielles
■ glaces polaires



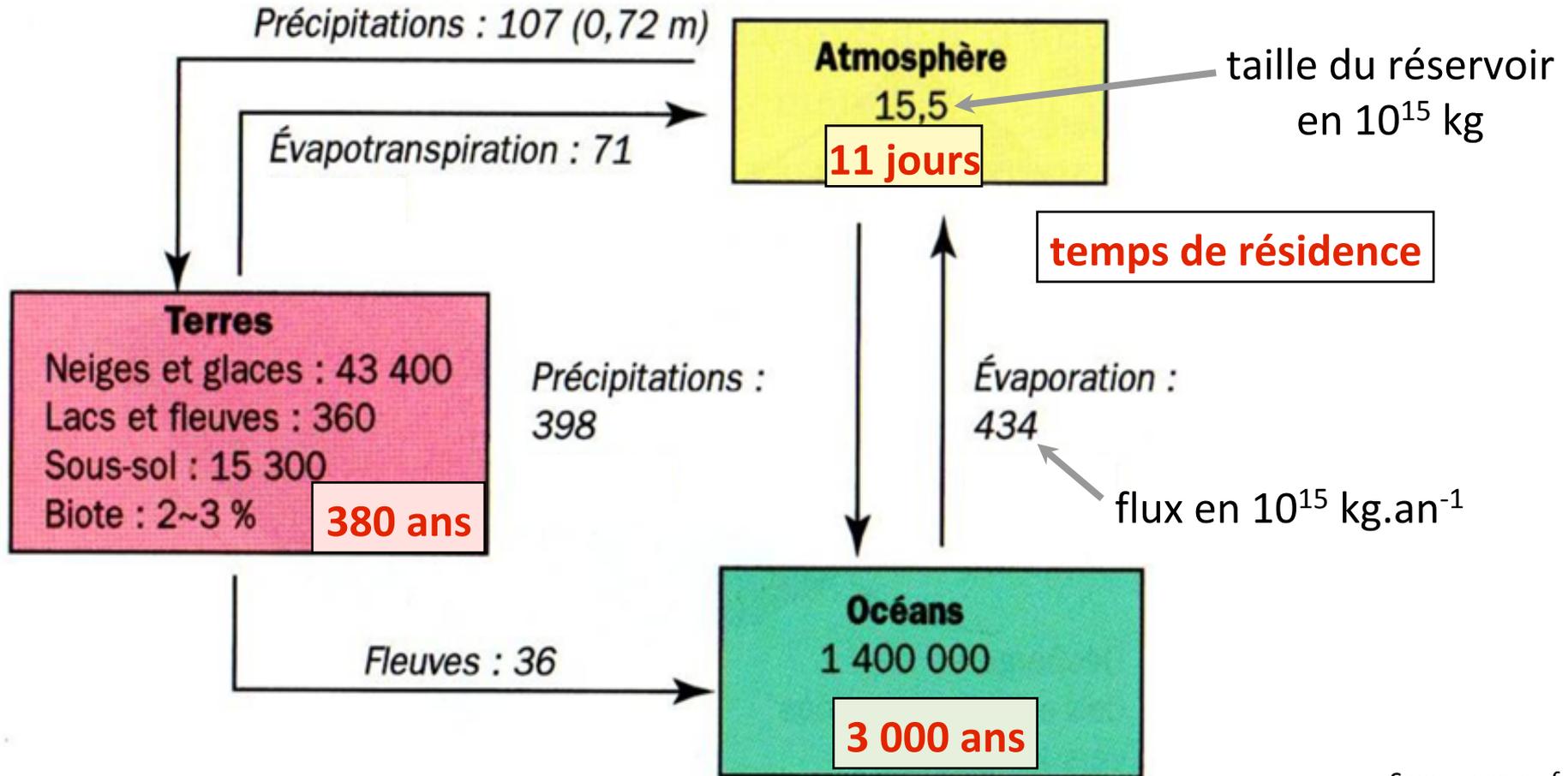
Le cycle de l'eau

La masse d'eau sur Terre est constante



Les chiffres indiquent les flux en milliers de $\text{km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$

Flux entre réservoirs et temps de résidence

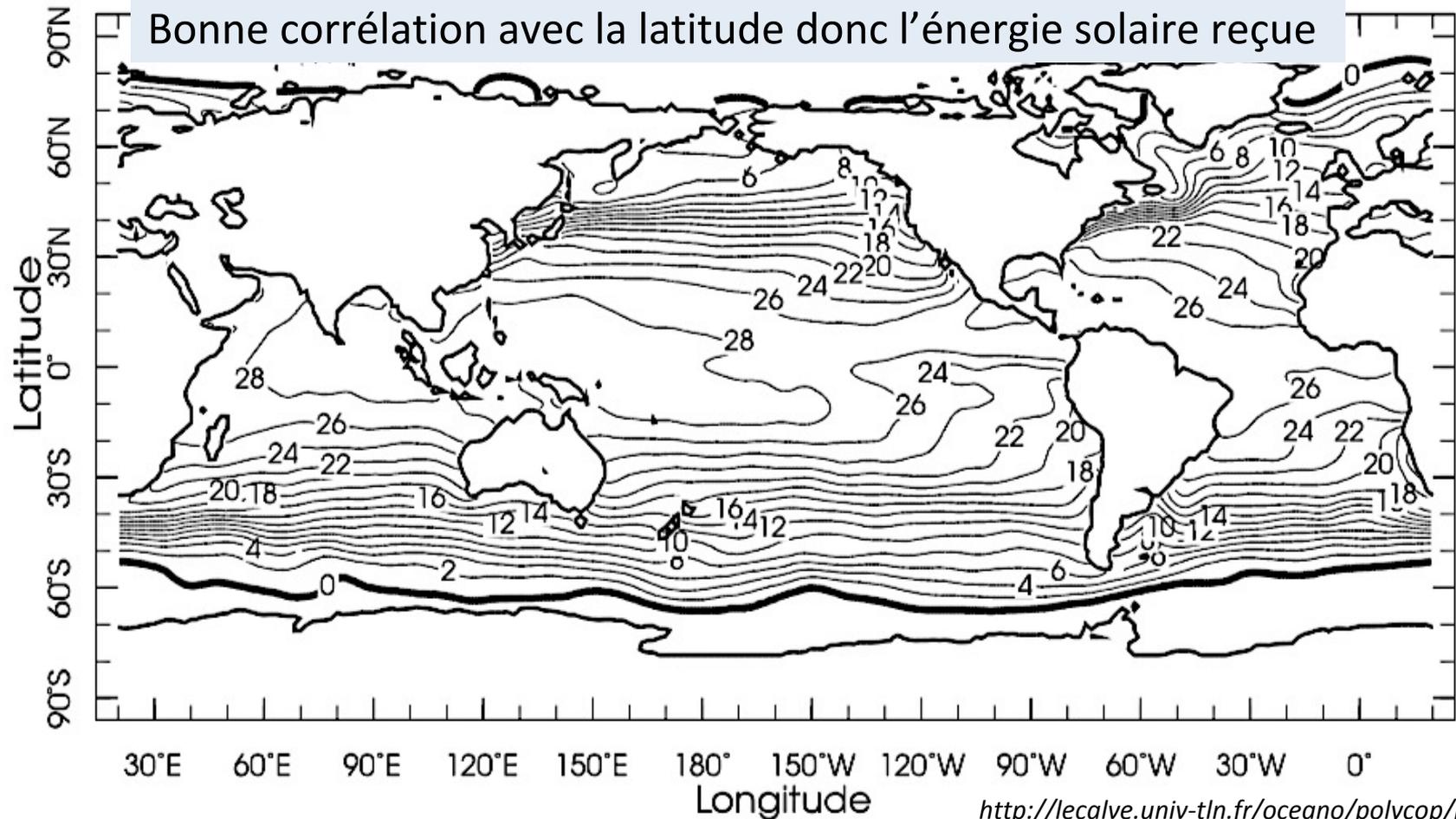


1. L'hydrosphère et ses stratifications

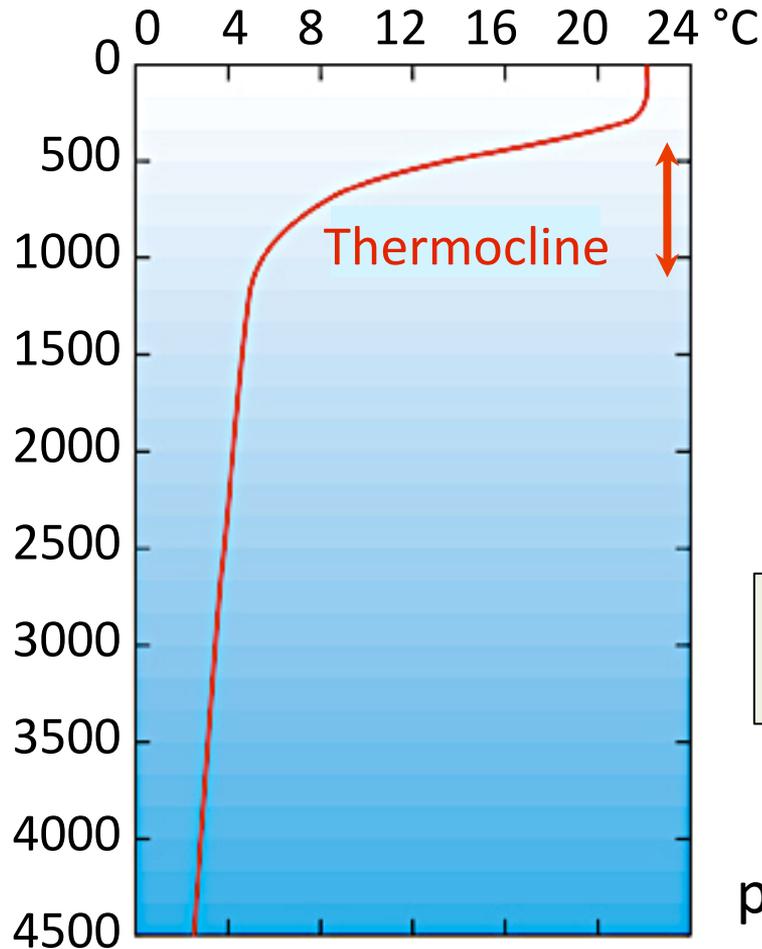
1.2. Deux variables : température et salinité

Carte des températures de surface (°C)

Bonne corrélation avec la latitude donc l'énergie solaire reçue



La thermocline

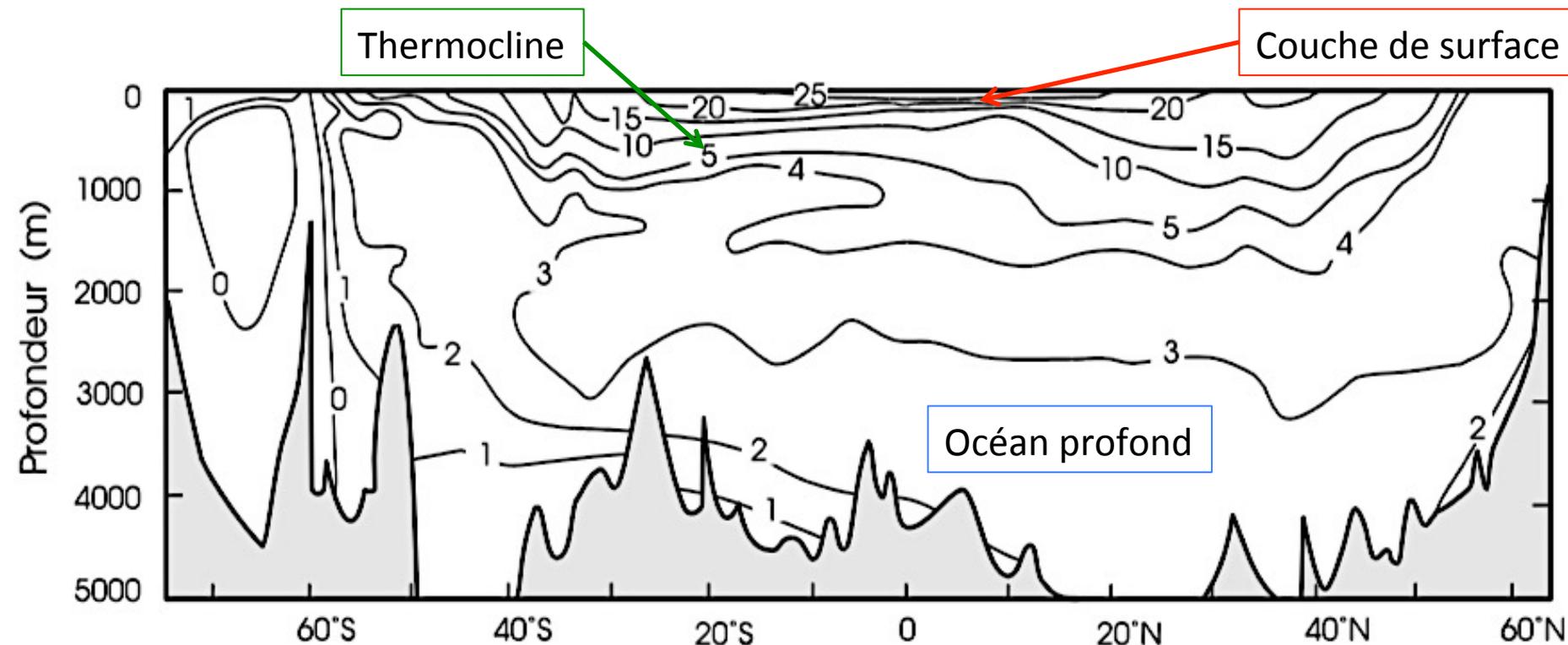


Thermocline = couche de transition entre l'eau chaude de surface et les eaux profondes

La température des eaux océaniques est comprise entre $-1,9^{\circ}\text{C}$ et 30°C .

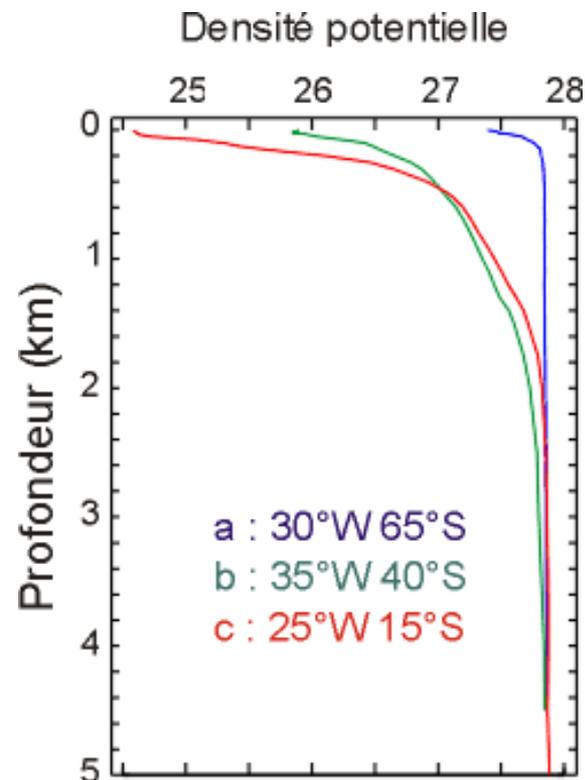
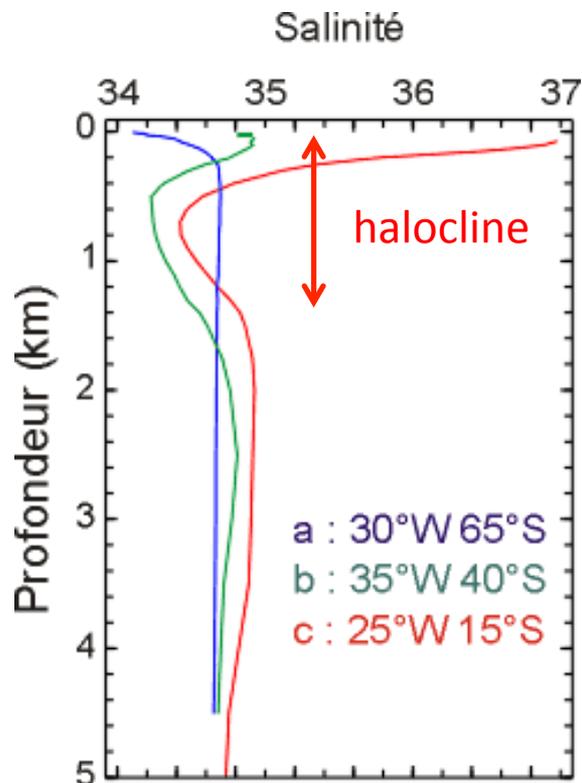
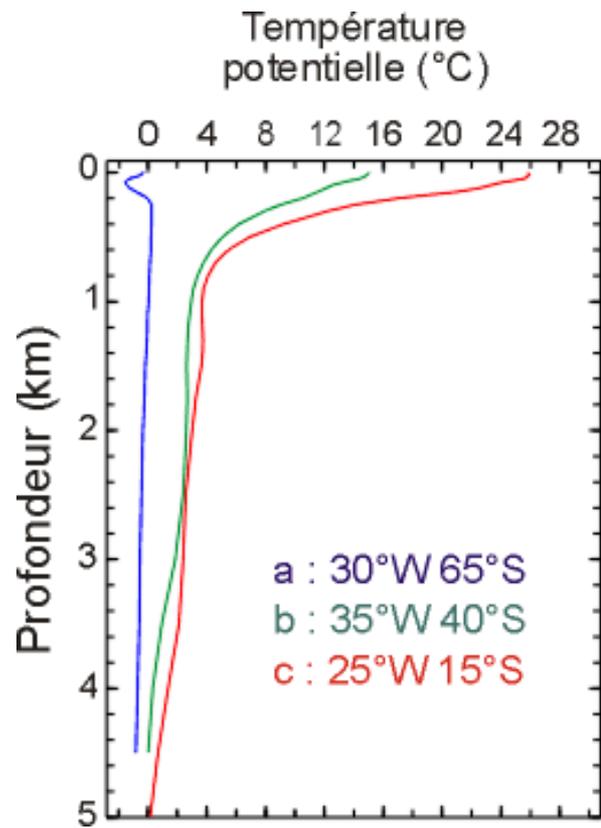
profondeur en m

Profil thermique de l'Atlantique



distribution moyenne de la température (en °C) sur une coupe de l'océan Atlantique Ouest

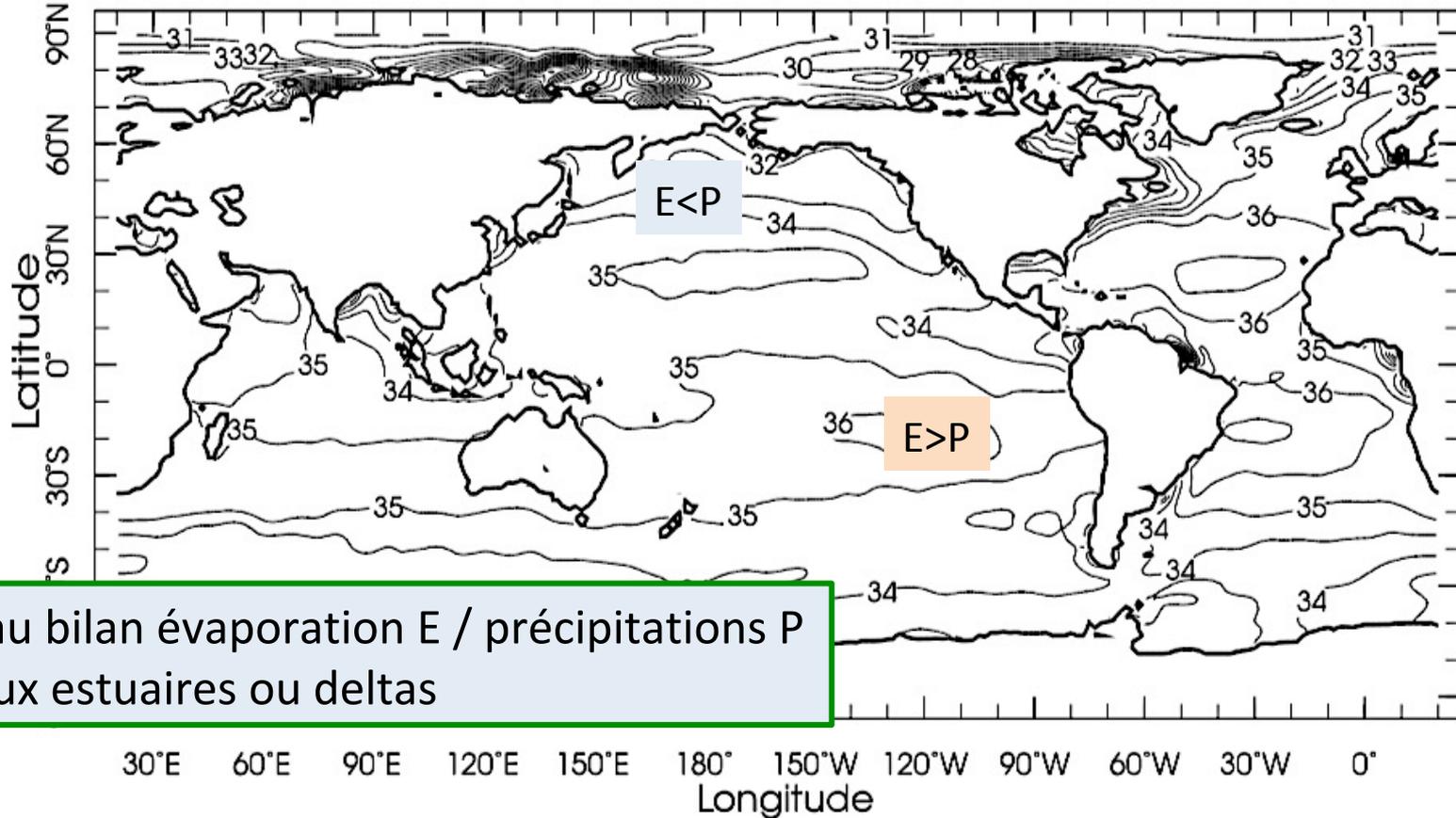
L'halocline



Salinité moyenne de 35 g.L⁻¹

NOM	SALINITE G/L
Mer Baltique	07,00
Océan Antarctique	34,70
Océan Pacifique	35,00
Océan Indien	36,50
Océan Atlantique	36,50
Mer Méditerranée	38,50
Mer Rouge	39

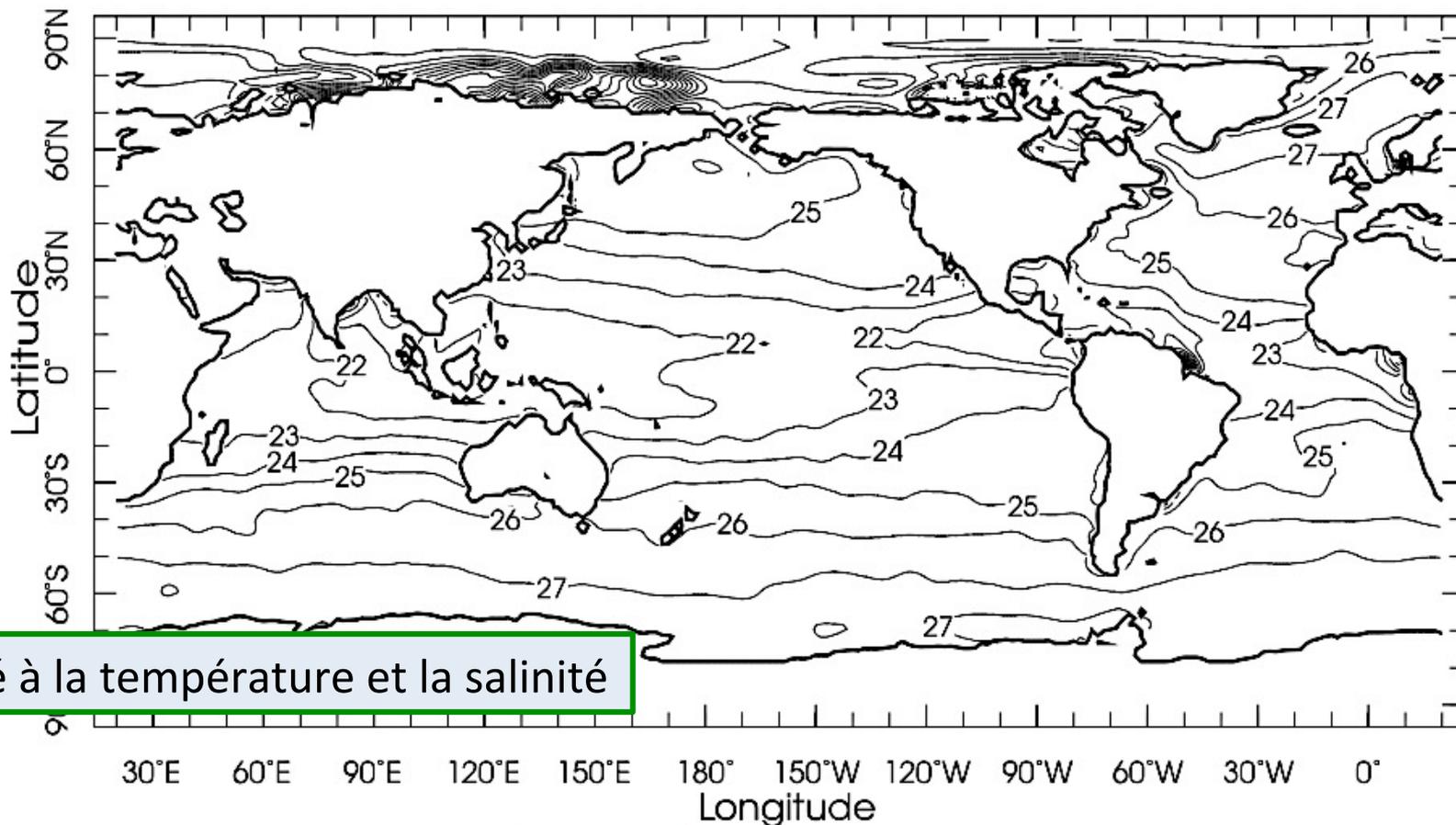
Carte de salinité de surface



Lié au bilan évaporation E / précipitations P
et aux estuaires ou deltas

Moyenne annuelle de la salinité de surface en g.L⁻¹

Carte des densités de surface



Lié à la température et la salinité

Moyenne annuelle des densités de surface

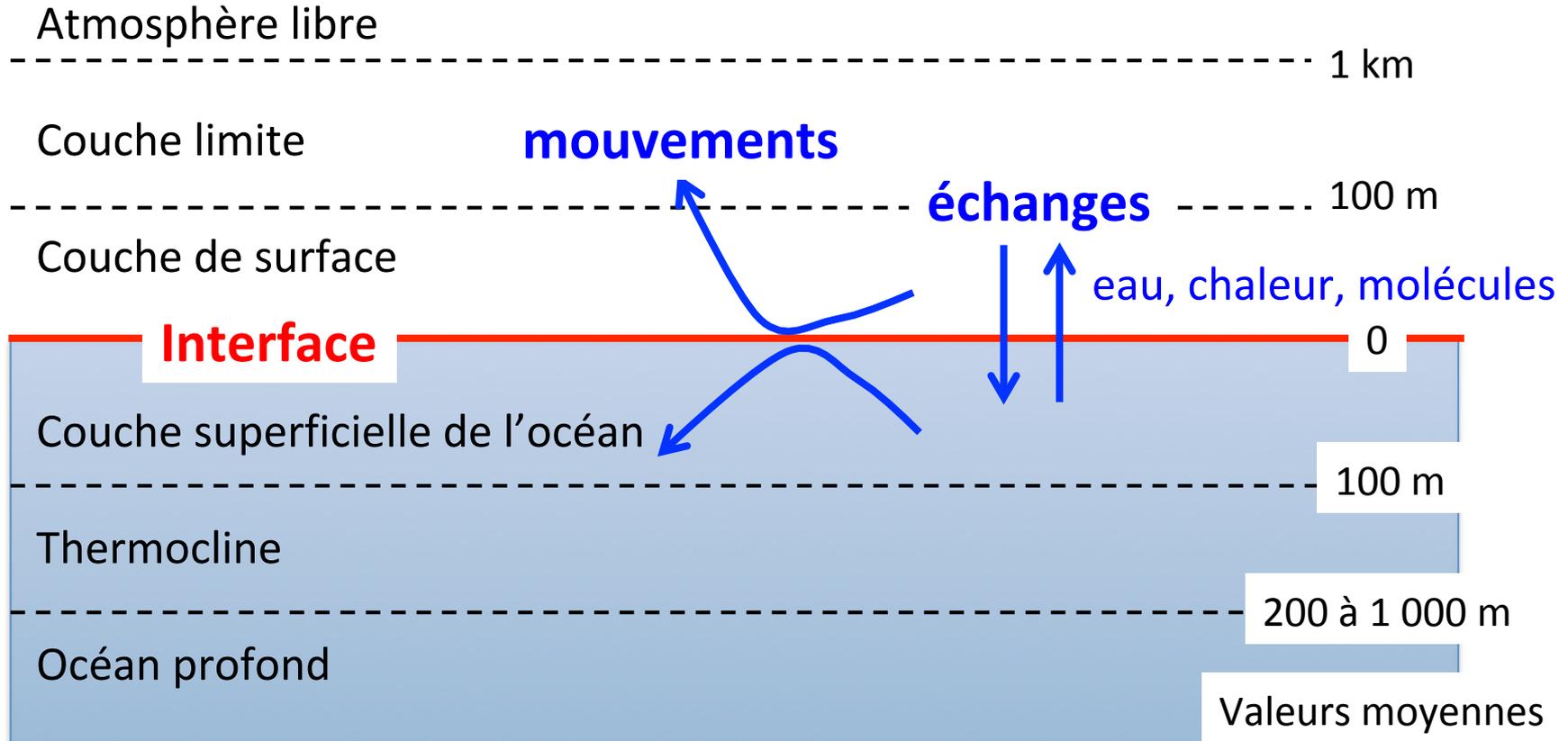
2. Le couplage atmosphère-océans

2.1. Océans et atmosphère ont des caractéristiques très différentes

Des compartiments différents

	Océan	Atmosphère
Temps de résidence	3 000 ans	11 jours
Volume d'eau	$1\,370 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	$13\,000 \text{ km}^3$
Température moyenne	3,5°C	15°C
Capacité de stockage d'énergie thermique	300 fois celle de l'atmosphère	
Capacité thermique massique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	4 000	1 000
Capacité calorifique (résultant des précédents)	1 200 fois celle de l'atmosphère	

Une interface, lieu d'échanges



2. Le couplage atmosphère-océans

2.2. Les échanges océans - atmosphère

Bilan hydrologique des échanges

Océan	Précipitation cm / an	Fleuves cm / an	Evaporation cm / an	Bilan cm / an
Pacifique	+133	+7	-132	+8
Atlantique	+89	+23	-124	-12
Indien	+117	+8	-132	-7
Global	+114	+12	-126	0

atmosphère



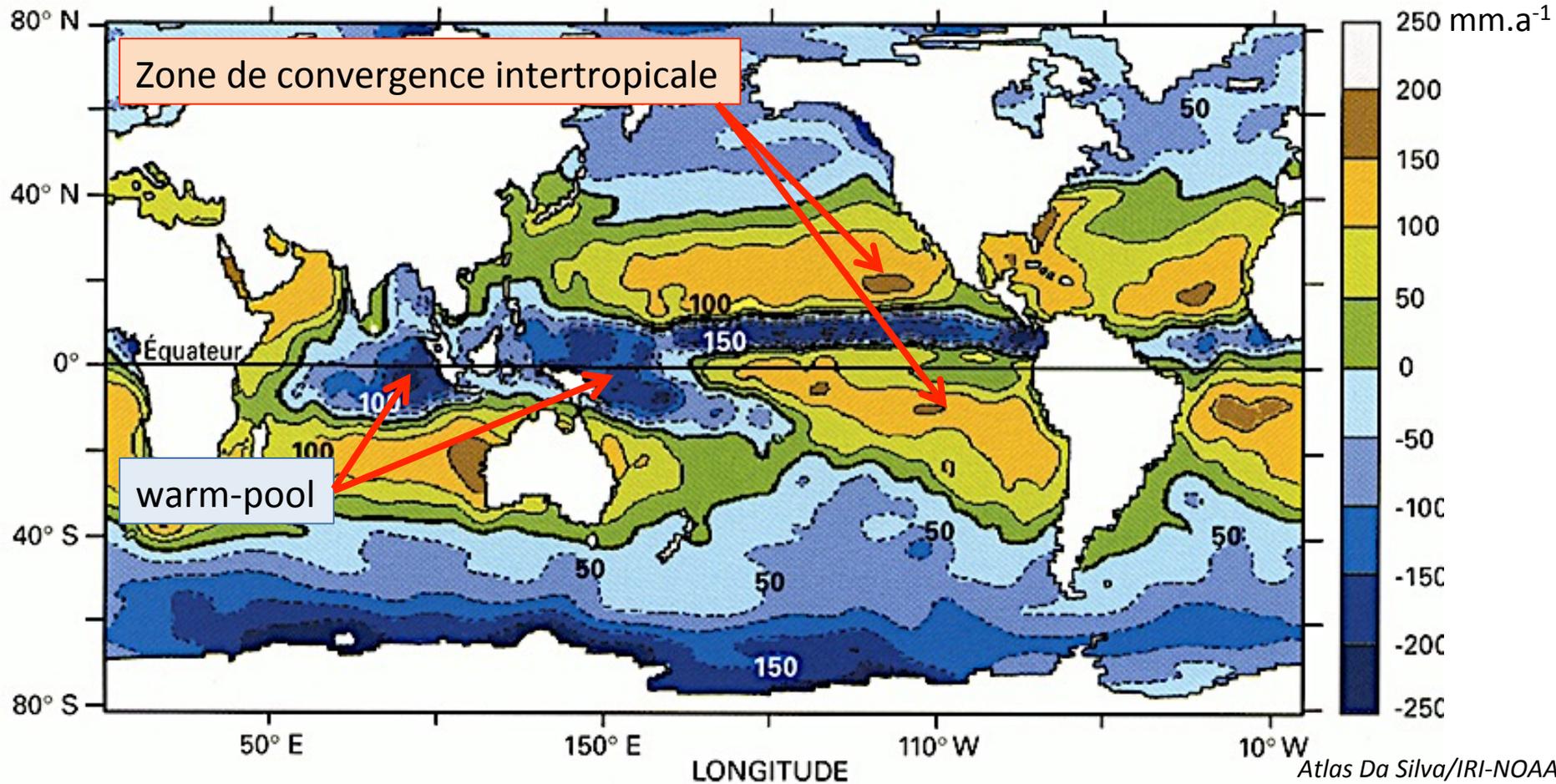
océans

océans

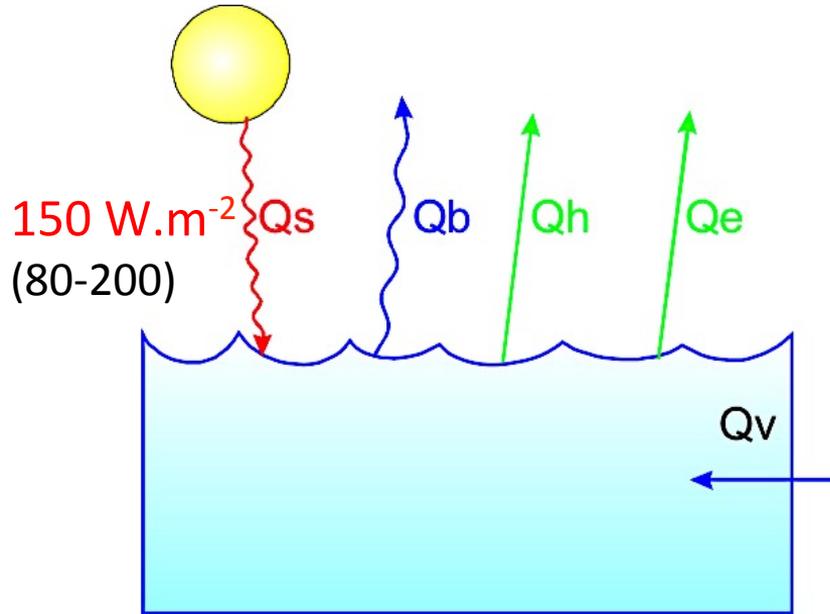


atmosphère

Bilan net d'échange de l'eau : E - P



Bilan thermique à l'interface eau-atmosphère



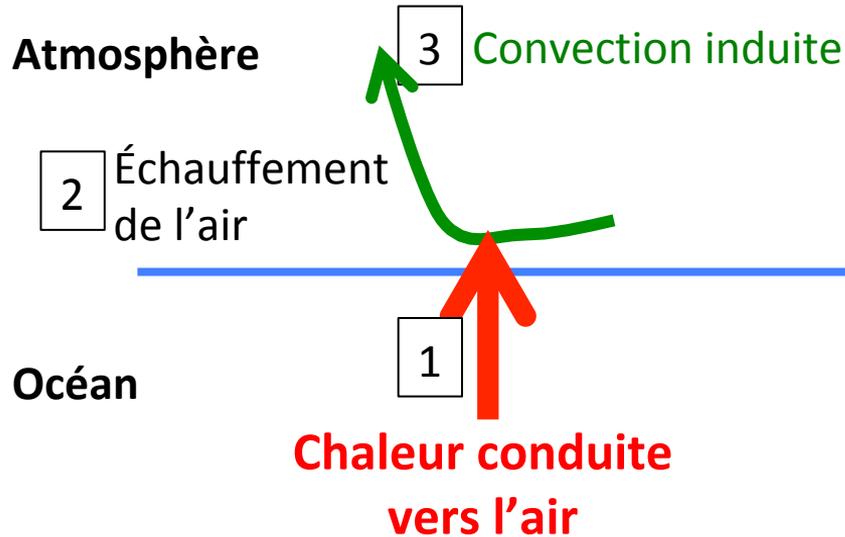
Q_v = chaleur distribuée par transport d'eau

Flux de chaleur perdu par	Moyenne en $W.m^{-2}$	Variations en $W.m^{-2}$
Q_b : radiation (IR)	- 50	faibles
Q_h : conduction et convection	- 10	0 à - 40
Q_e : évaporation / condensation	- 90	- 50 à - 160

Le flux solaire sur l'océan est de 150 (et non 160) $W.m^{-2}$ en raison de l'albédo (5%).

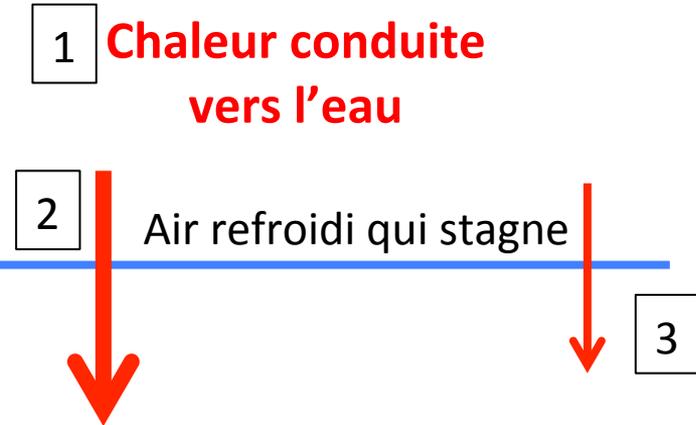
Flux de chaleur par conduction et convection

Quand l'océan est plus chaud que l'air



La convection induite entretient le renouvellement de l'air et donc les échanges de chaleur.

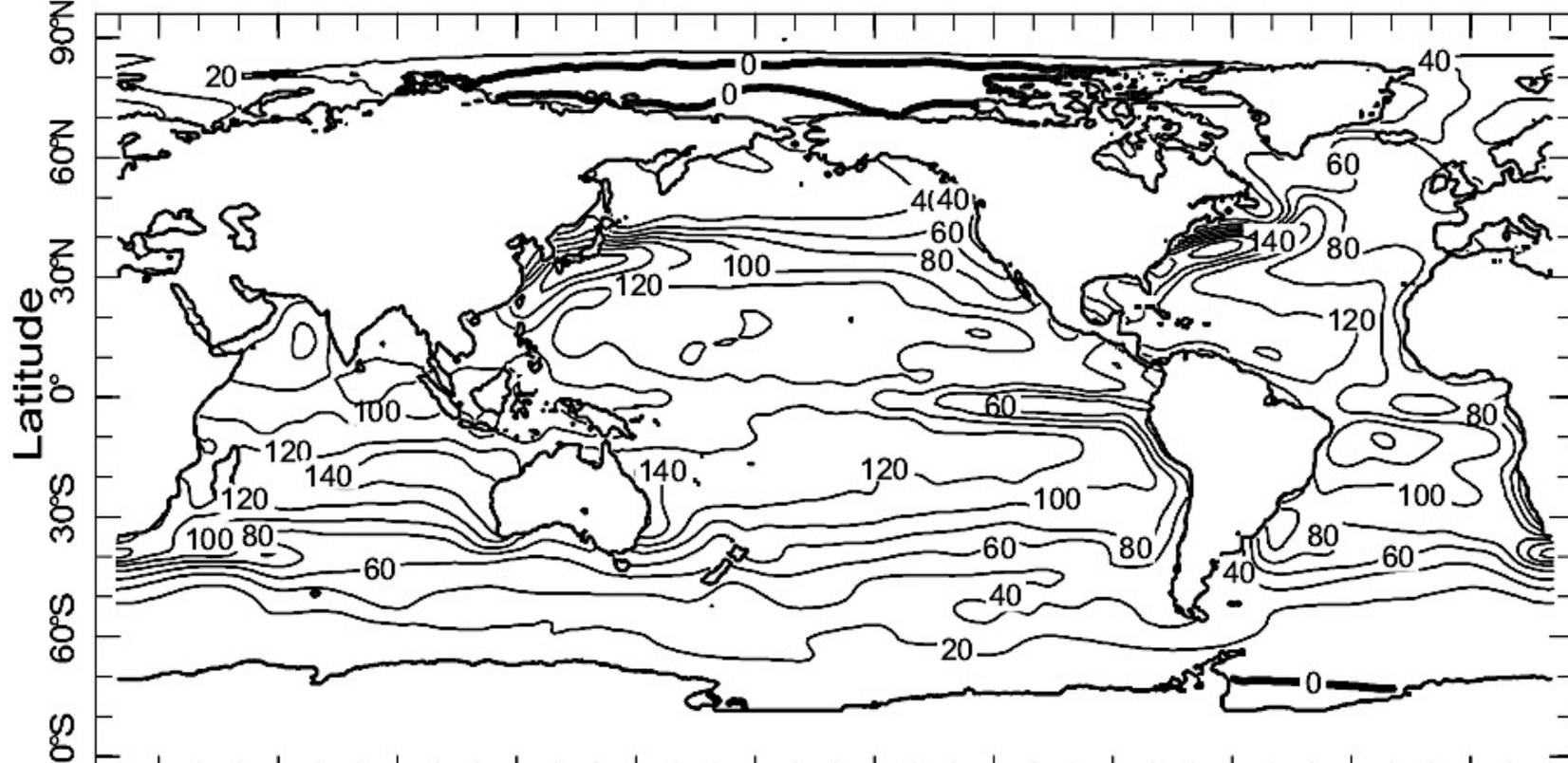
Quand l'air est plus chaud que l'océan



L'air est refroidi donc cela diminue les échanges thermiques.

Flux perdu par évaporation en $W.m^{-2}$

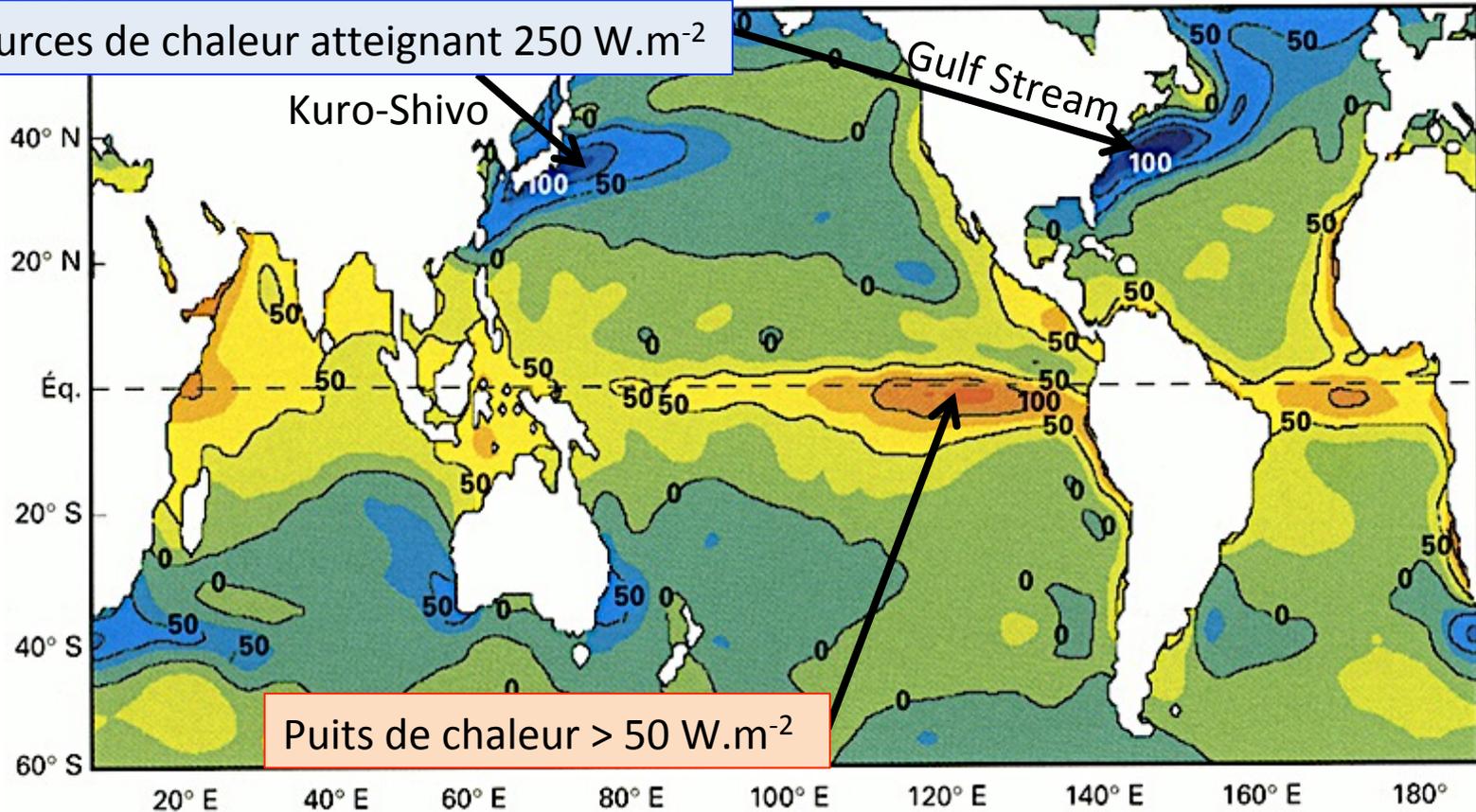
Moyennes annuelles



Ce flux est particulièrement important dans les zones subtropicales et au dessus des courants chauds comme le Gulf Stream

Bilan thermique océan-atmosphère

Sources de chaleur atteignant 250 W.m^{-2}



Puits de chaleur $> 50 \text{ W.m}^{-2}$

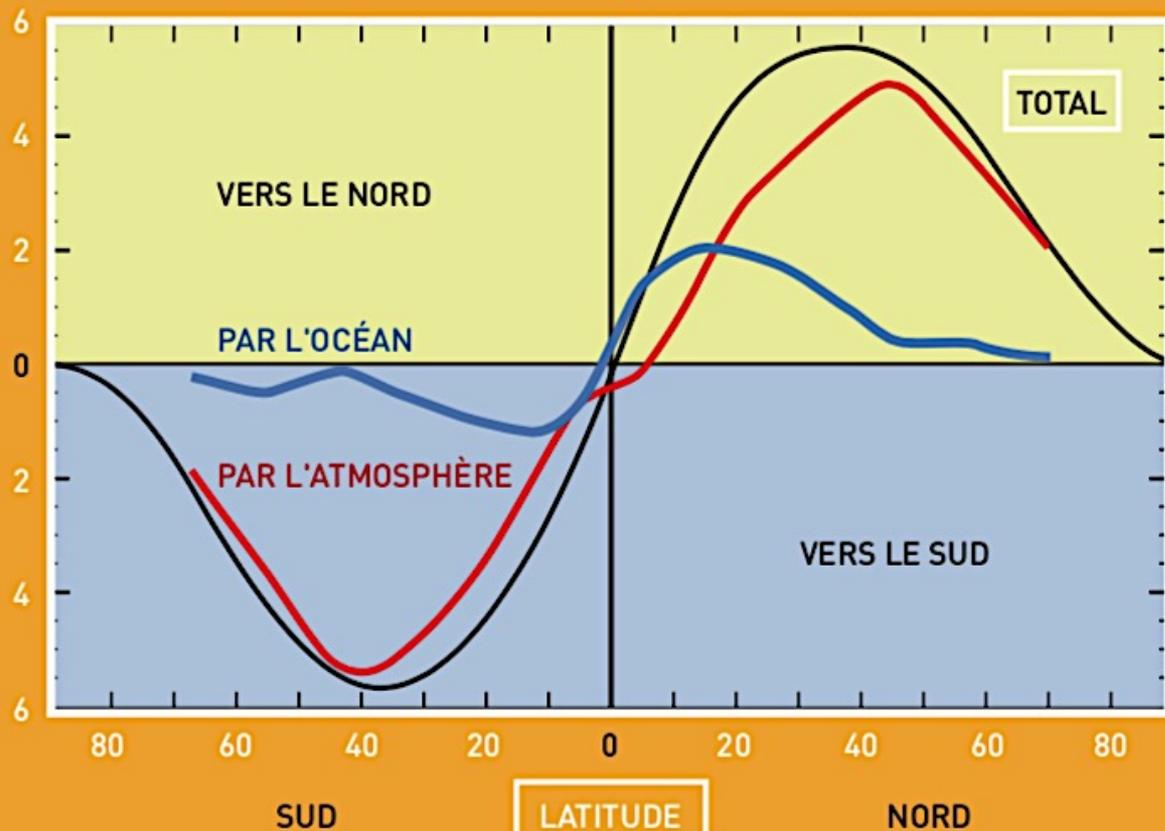
Valeurs en W.m^{-2}

Source : Océans et climats, Jacques Merle, Open Edition

L'océan véhicule une quantité colossale d'énergie

TRANSPORT D'ÉNERGIE (PÉTAWATTS)

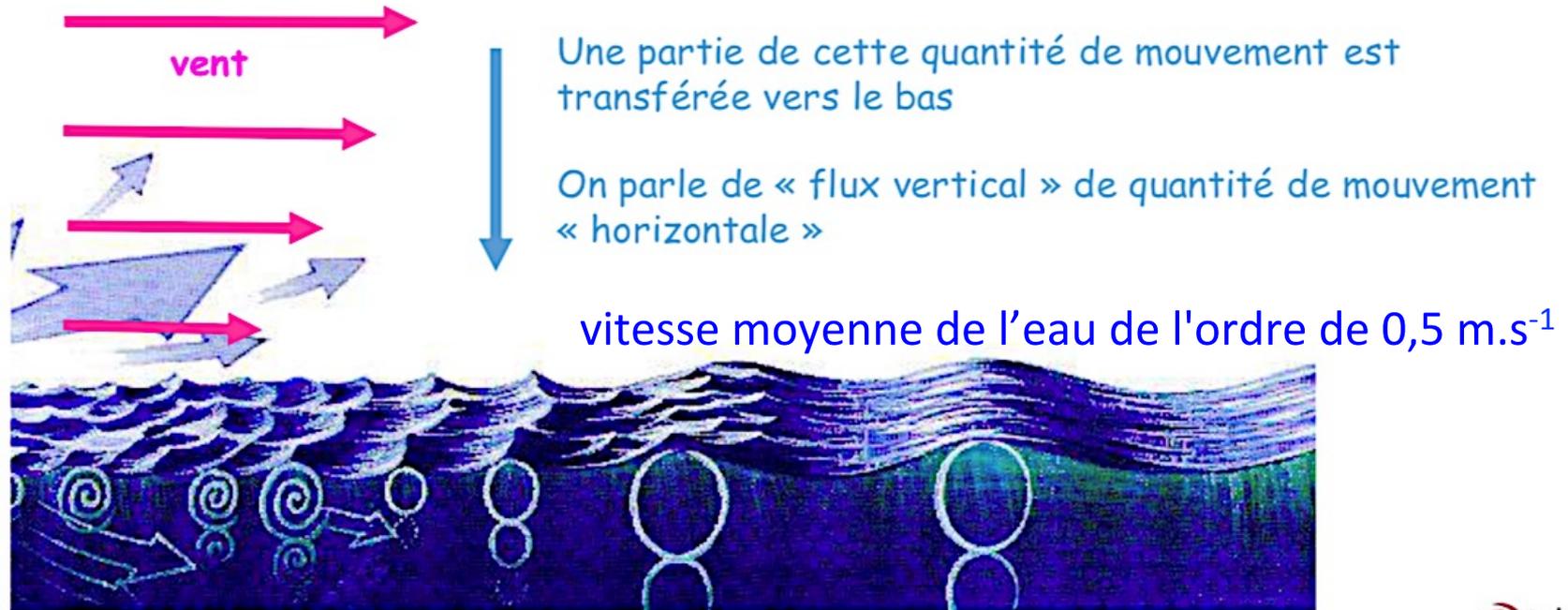
1 pétawatt = 10^{15} W



Transport total mesuré par satellite.
Transport par l'océan déduit de données météorologiques.
Par différence, on obtient le transport par l'atmosphère.

Échanges de quantité de mouvement

Le vent qui souffle sur la mer induit un transport très important de quantité de mouvement: $\vec{q} = m \vec{U}$



Courants générés par les vents, qui poussent mécaniquement les molécules d'eau de la surface, entraînant ainsi les premières dizaines de mètres de l'océan

3. Les courants océaniques

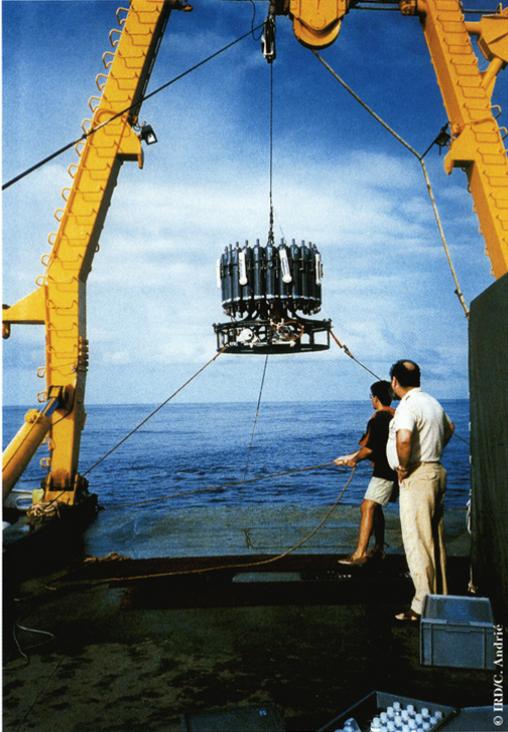
3.1. Le suivi des courants : outils et méthodes

Des connaissances de plus en plus pointues



Le Gulf Stream dessiné par Benjamin Franklin - Carte dressée en 1777. Le Gulf Stream, courant marin chaud, était représenté comme un grand fleuve isolé du reste de l'océan et traversant l'Atlantique nord en portant les navires. C'est une image qui correspondait à la vision des navigateurs de l'époque.

Explorer les fonds océaniques



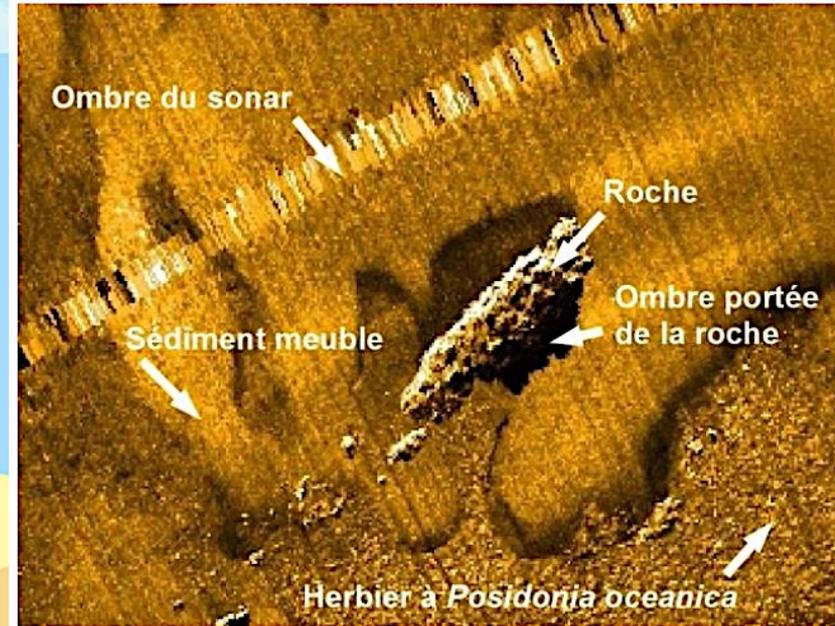
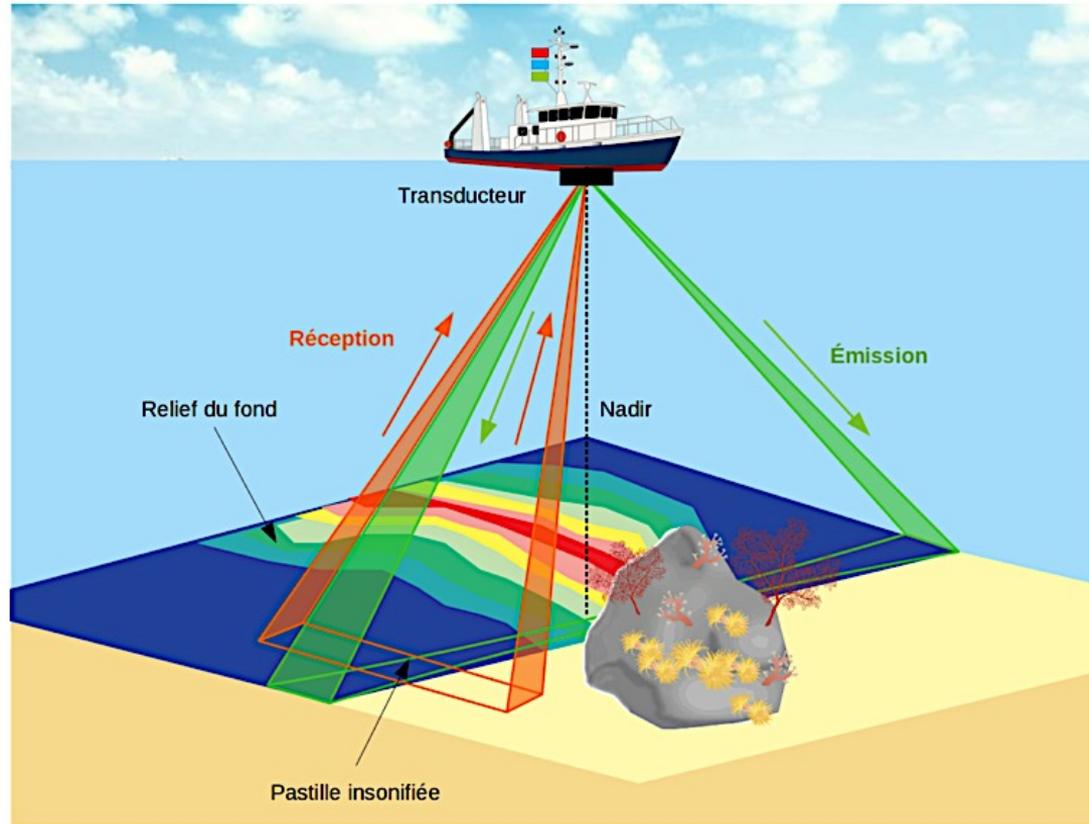
Bathysonde et rosette composée de bouteilles à renversement pour les prélèvements d'eaux en profondeur. Campagne Orstom.



Patrouille anti-sous-marins du *HMS Anthony* dans le détroit de Gibraltar en 1944. Un opérateur sonar utilise un ASDIC pour détecter les sous-marins ennemis. Photo (Domaine Public) : R G G Coote/Royal Navy.

Exploration avec sonar

Une qualité d'image sonar de plus en plus précise



Interprétation d'une image sonar sur un fond marin de Méditerranée (Corse). Source : Arnaud Abadie.

Des outils de géophysique

- Des sondes CTD mesurant température, salinité et pression, permettant de remonter de l'eau pour analyser pH, O₂, ions...
- Une mesure de la vitesse et l'orientation des courants par balises flotteurs ou planeurs profonds équipés de GPS, courantomètre à doppler...
- Un suivi par satellite de la densité de chlorophylle a donc de phytoplancton...



sonde CTD

Des marqueurs biogéochimiques

- Utilisation d'isotopes radioactifs atmosphériques qui se dissolvent dans les eaux océaniques :

- ^3H

- ^{14}C

- ^{90}Sr ...

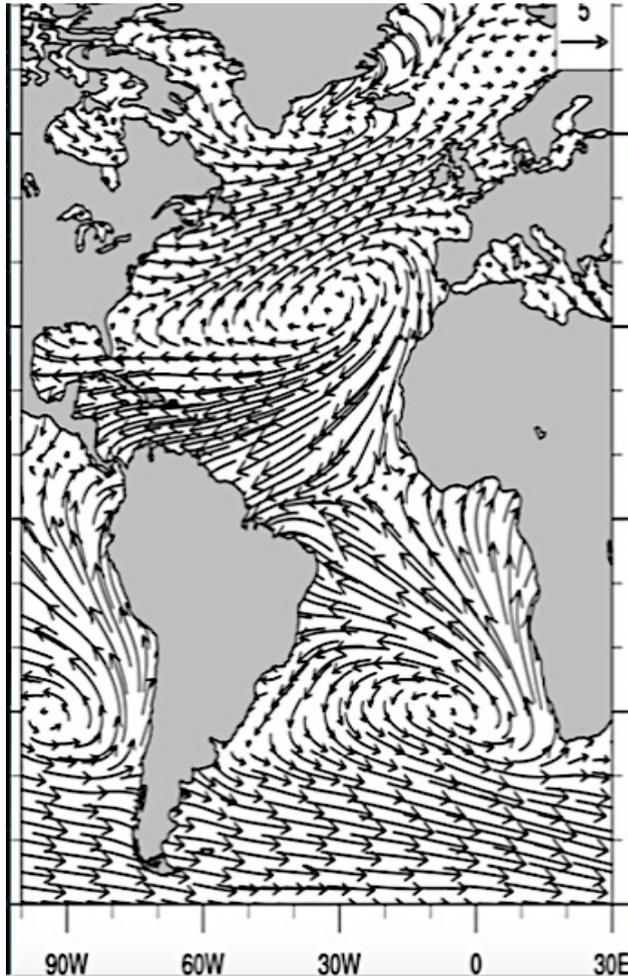
Ils permettent une datation des courants profonds.

3. Les courants océaniques

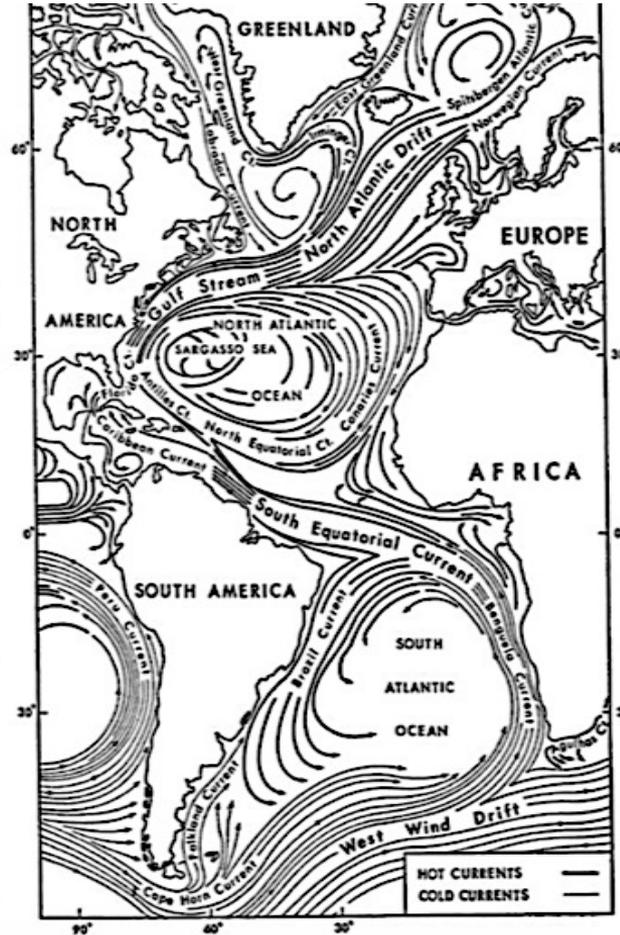
3.2. La circulation de surface, liée aux courants atmosphériques

Une corrélation entre courants et vents

Carte des vents de surface



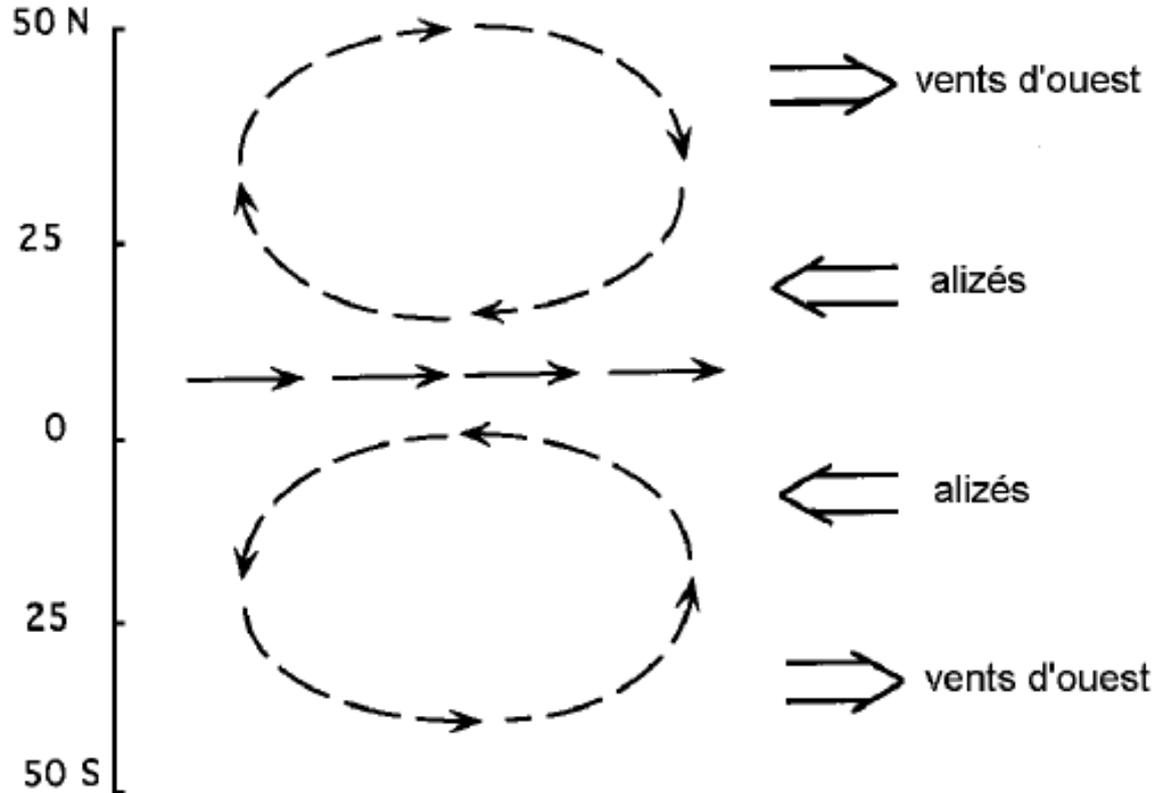
Carte des courants de surface



The whole Atlantic circulation

Source : Delecluse, Université de Dijon

L'amorçage des tourbillons subtropicaux



Les courants de surface

Tourbillon arctique

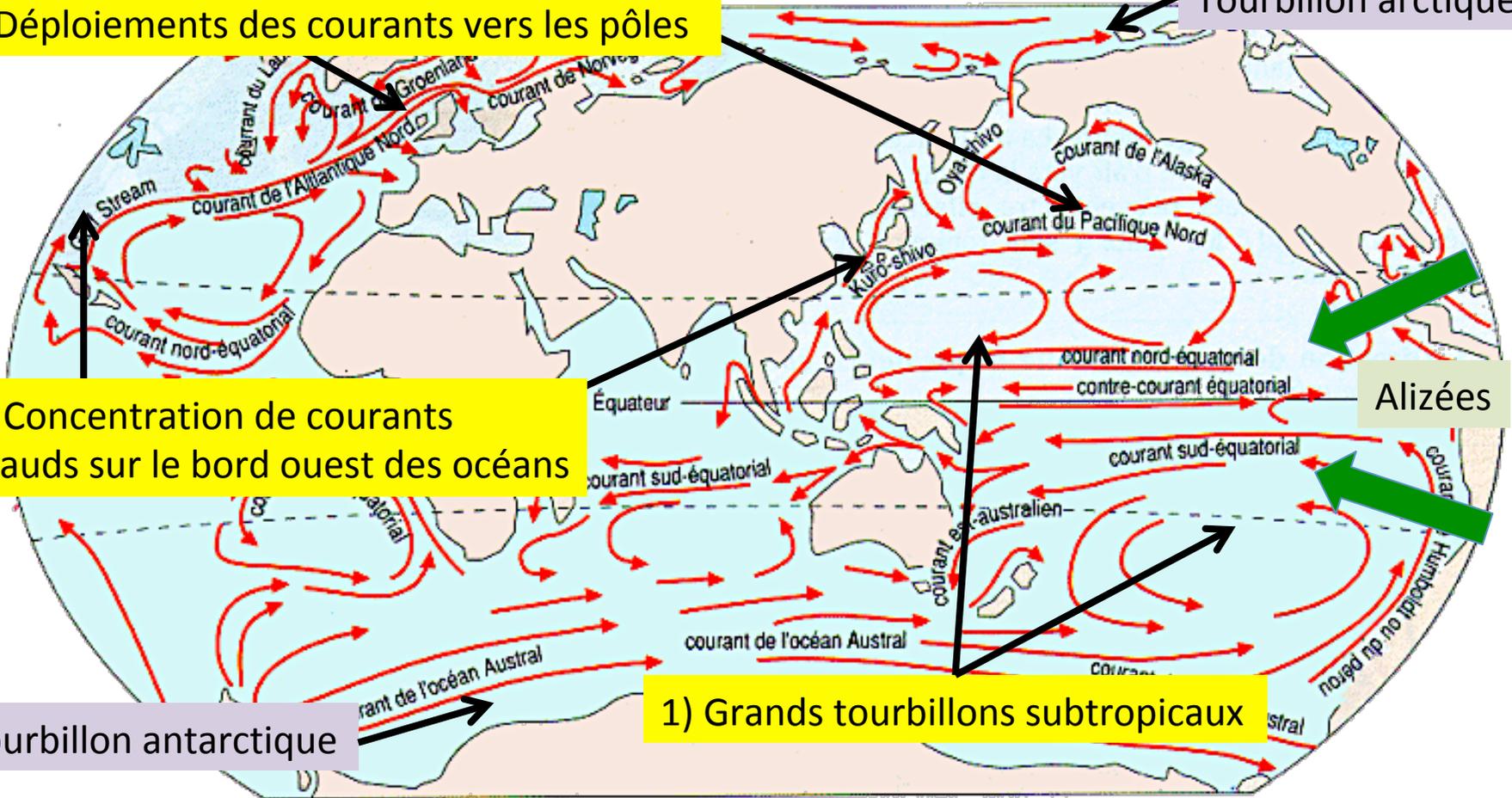
3) Déploiements des courants vers les pôles

2) Concentration de courants chauds sur le bord ouest des océans

1) Grands tourbillons subtropicaux

Tourbillon antarctique

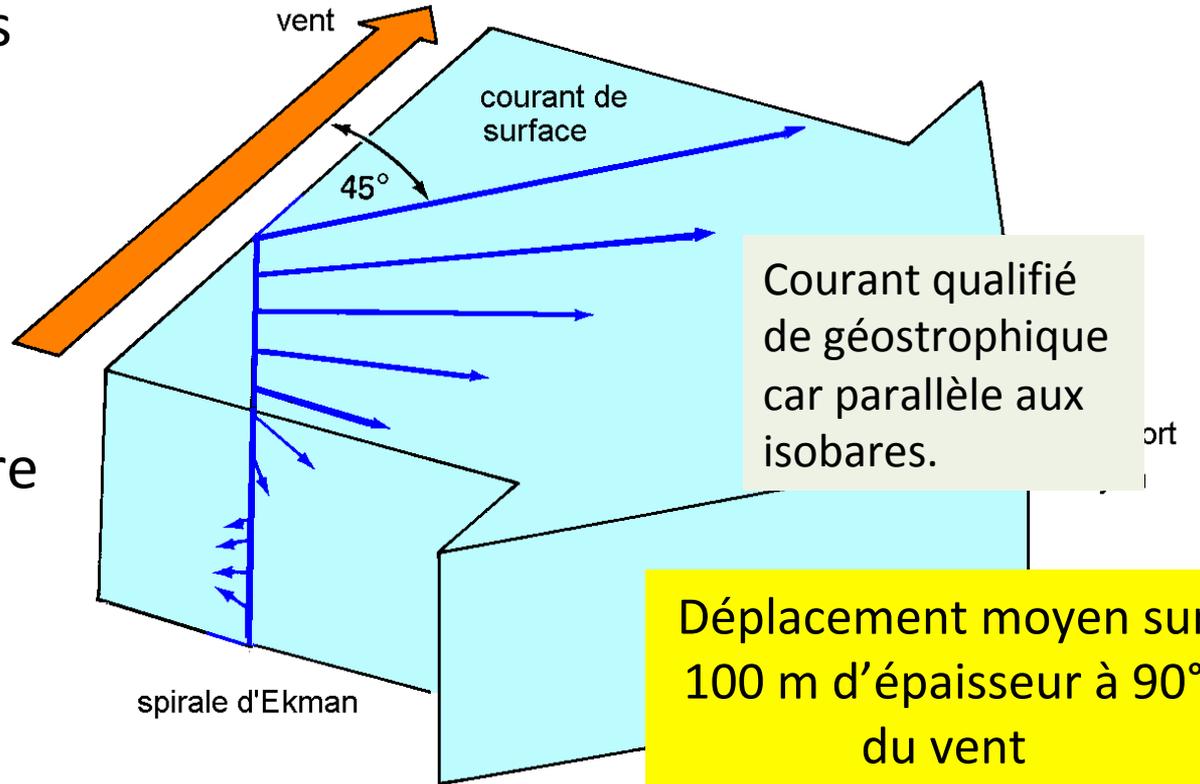
Alizées



La spirale d'Ekman

Le vent pousse l'eau mais la force de Coriolis dévie le courant vers la droite (hémisphère Nord).

La couche d'eau inférieure est entraînée par le courant de surface, donc également déviée... et ainsi de suite.

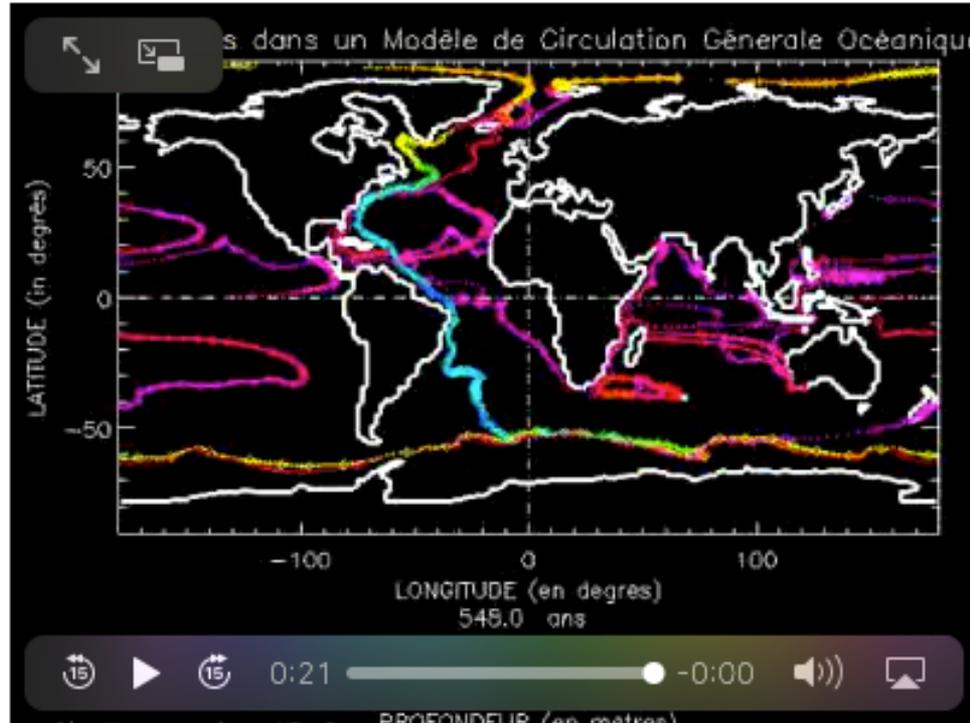


3. Les courants océaniques

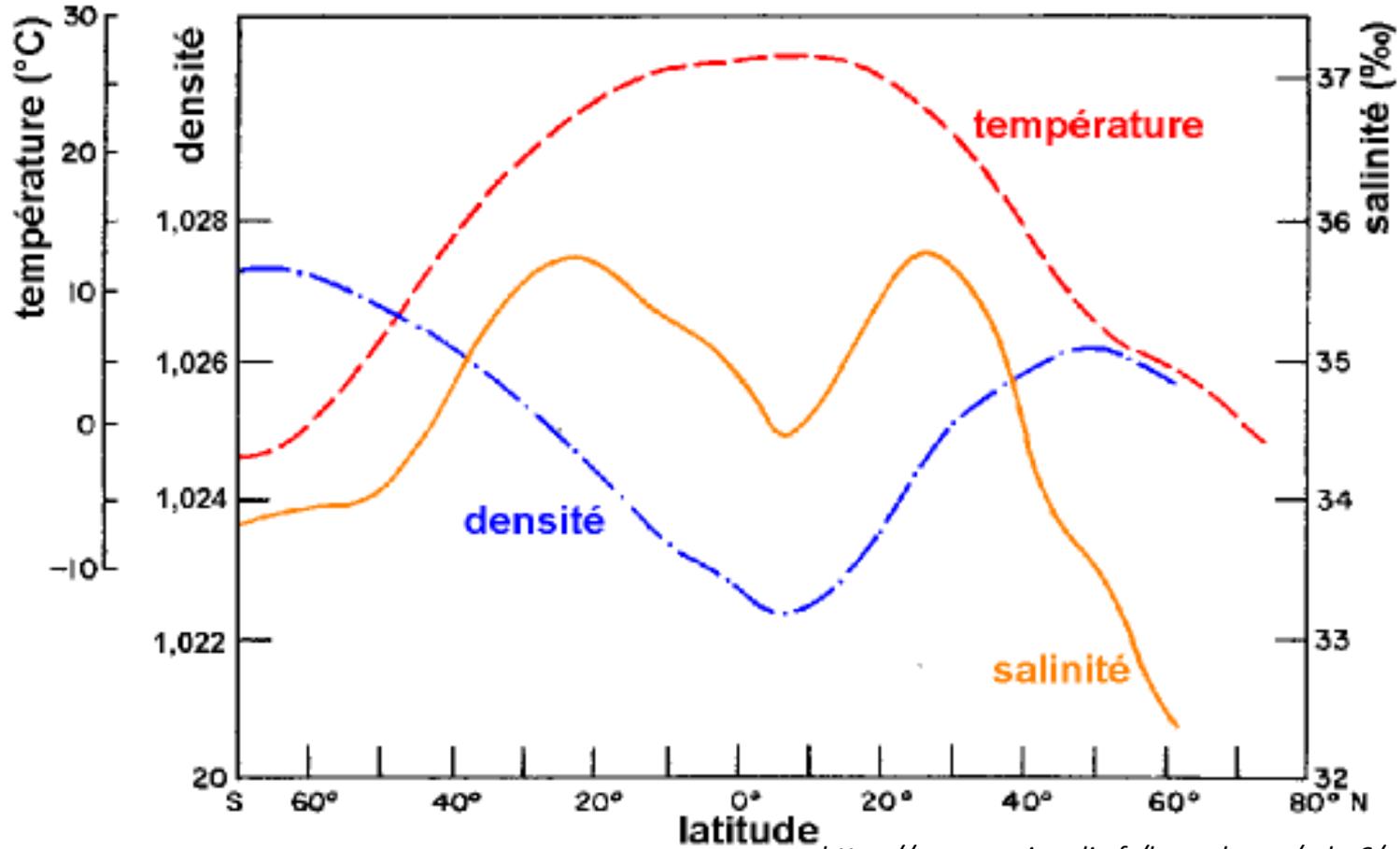
3.3. La circulation méridienne de retournement

Suivi d'une particule dans l'océan mondial

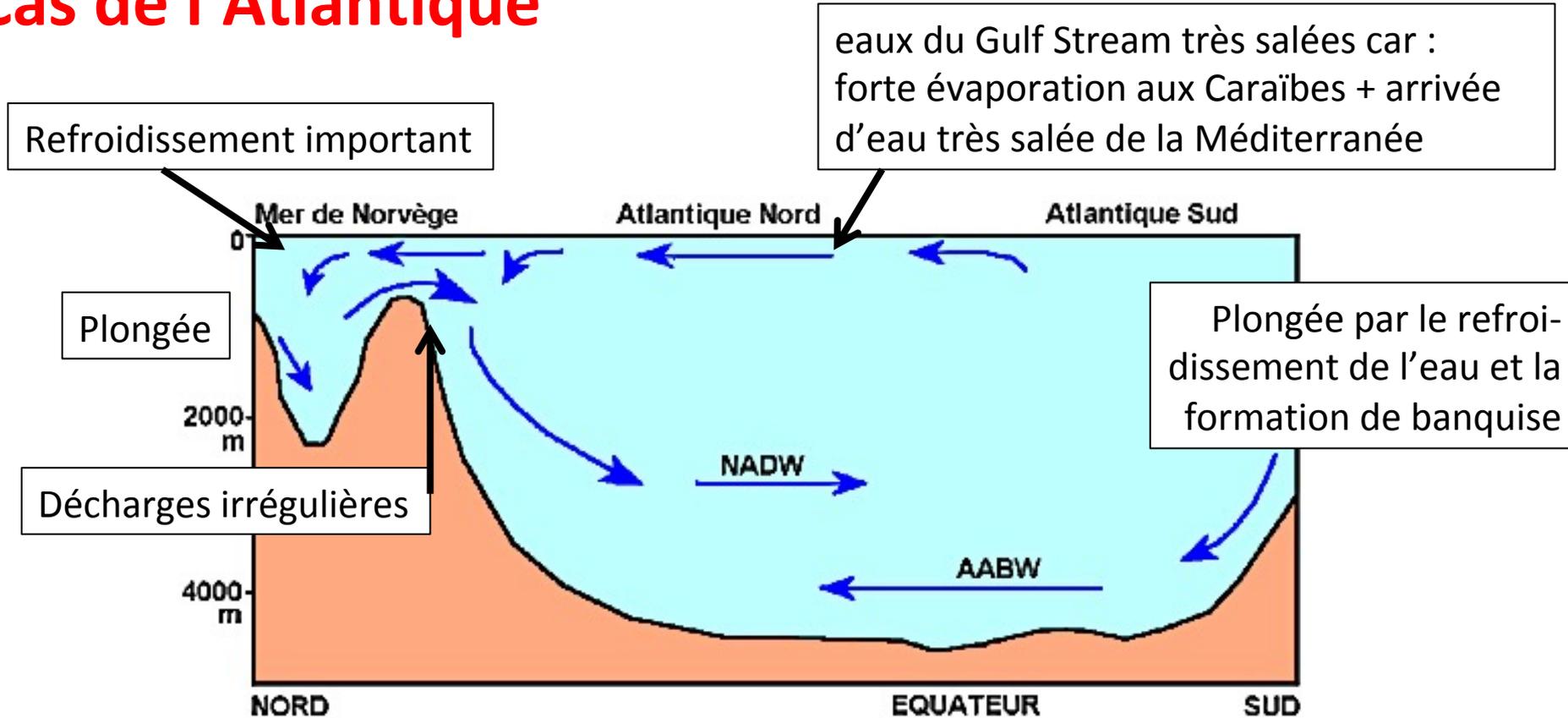
Animation : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/thermohalin-antarctique.xml>



Variations de densité selon la latitude



Cas de l'Atlantique



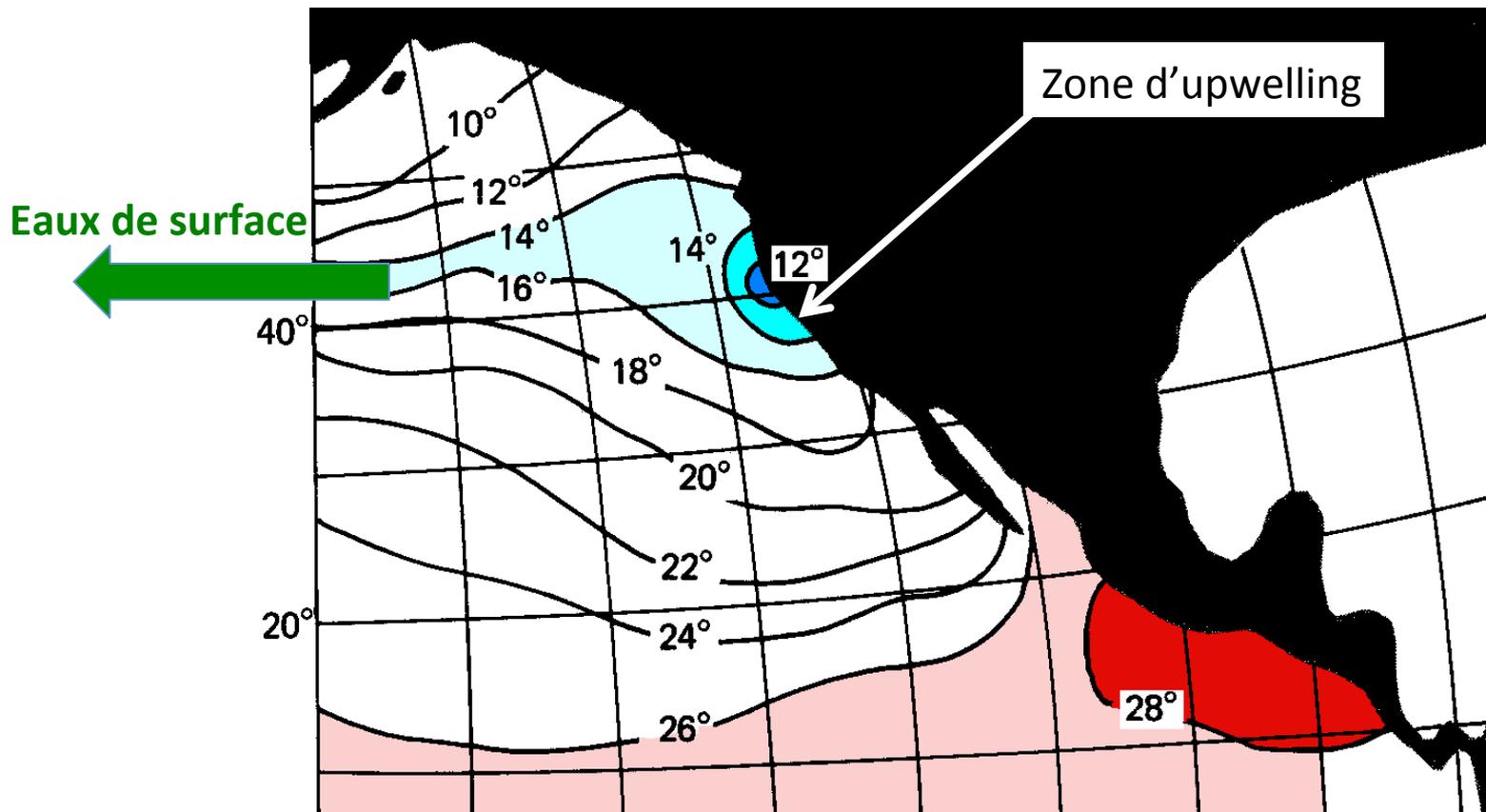
NADW : North Atlantic Deep Water

AABW : AntArctic Bottom Water

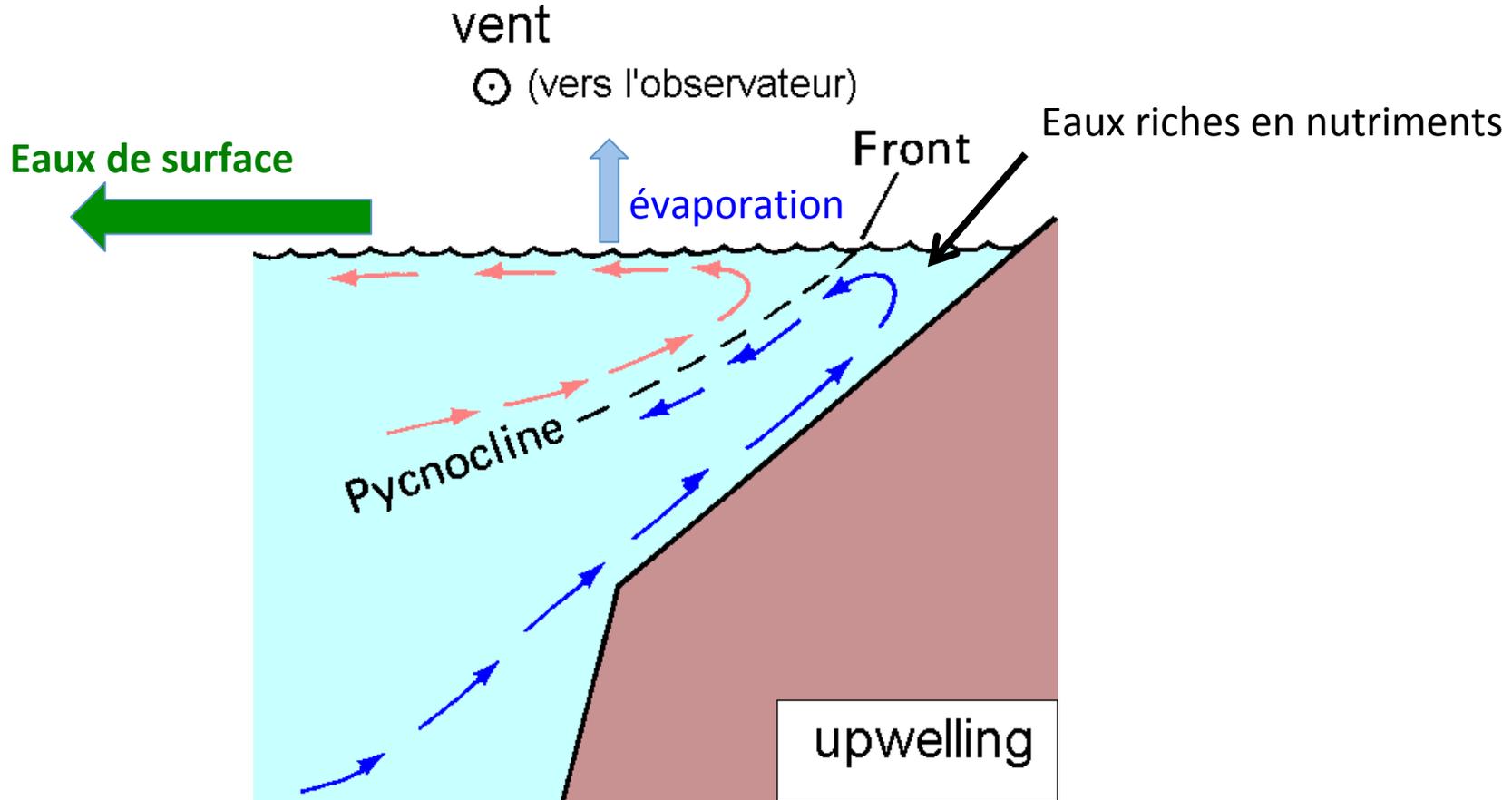
<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/thermohalin-antarctique.xml>

<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mbg6/oceano/oceano.htm>

Les remontées d'eaux froides profondes

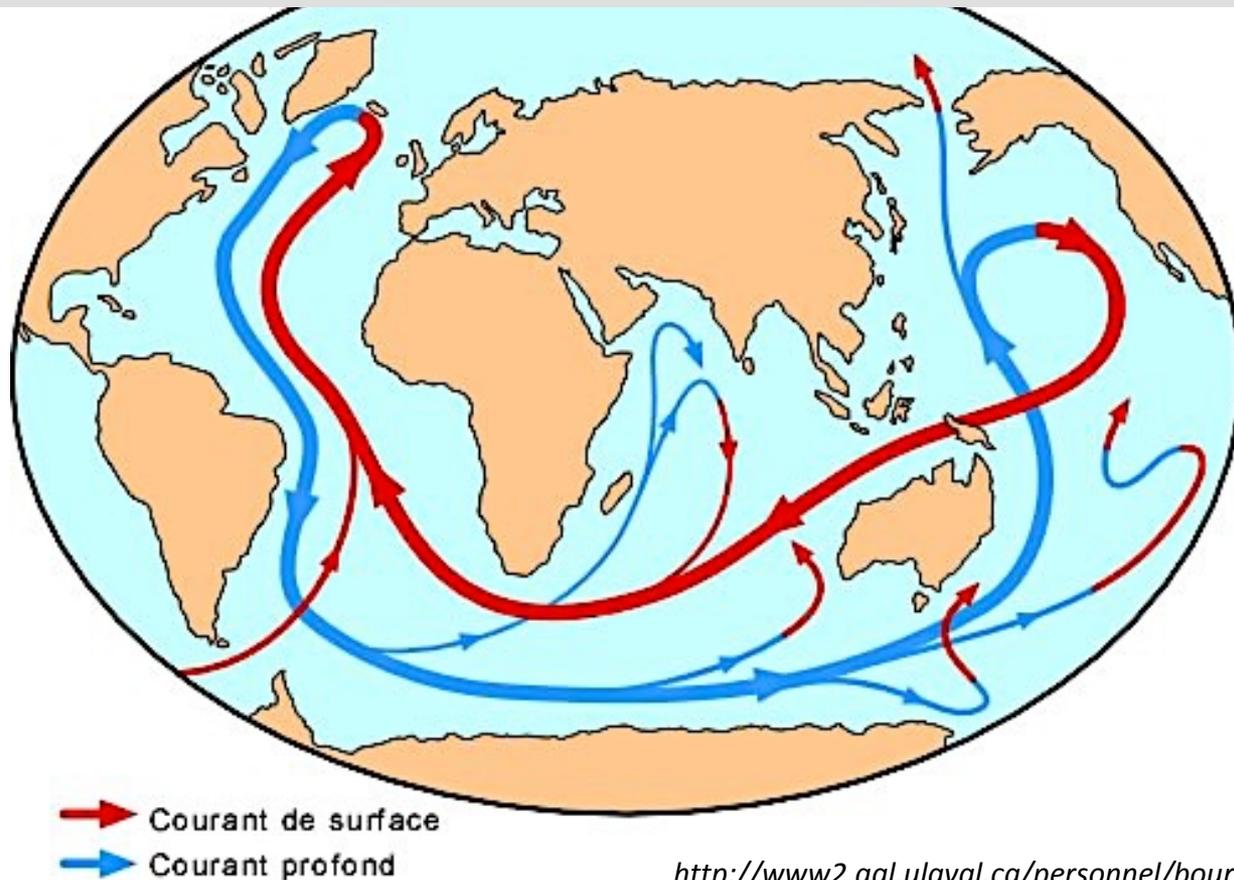


Les upwellings



BILAN : la circulation méridienne de retournement

AMOC = circulation méridienne de retournement de l'Atlantique



CONCLUSION

- Couplage important entre les océans et l'atmosphère
- Les océans régulent le climat sur Terre

Bilan des couplages atmosphère - océan

