



UE Sciences de la Terre :
« Climat, Energies »
L1 – PCST
Circulation océanique

Alison PEREIRA

Alison.pereira@universite-paris-saclay.fr



Plan

I/ Circulation océanique de Surface

II/ Circulation profonde ou Thermohaline

III/ Traceurs géochimiques de la circulation océanique : O₂, CO₂, Si, ...

Introduction

Deux types de circulations océaniques

Circulation de surface → forcée par les champs de vent

Circulation profonde → contrôlée par la
Densité ($T^{\circ}\text{C}$, $S\text{‰}$) = THERMOHALINE

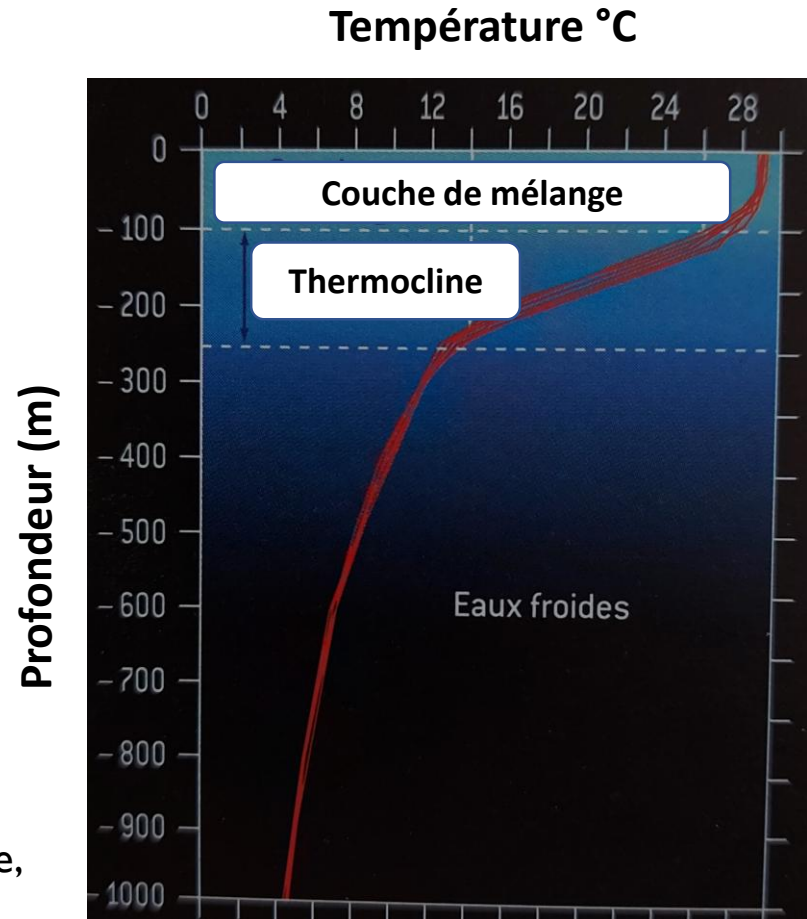
Rappels sur la Thermocline

Déf: transition entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides des profondeurs.

→ Chute brutale des températures

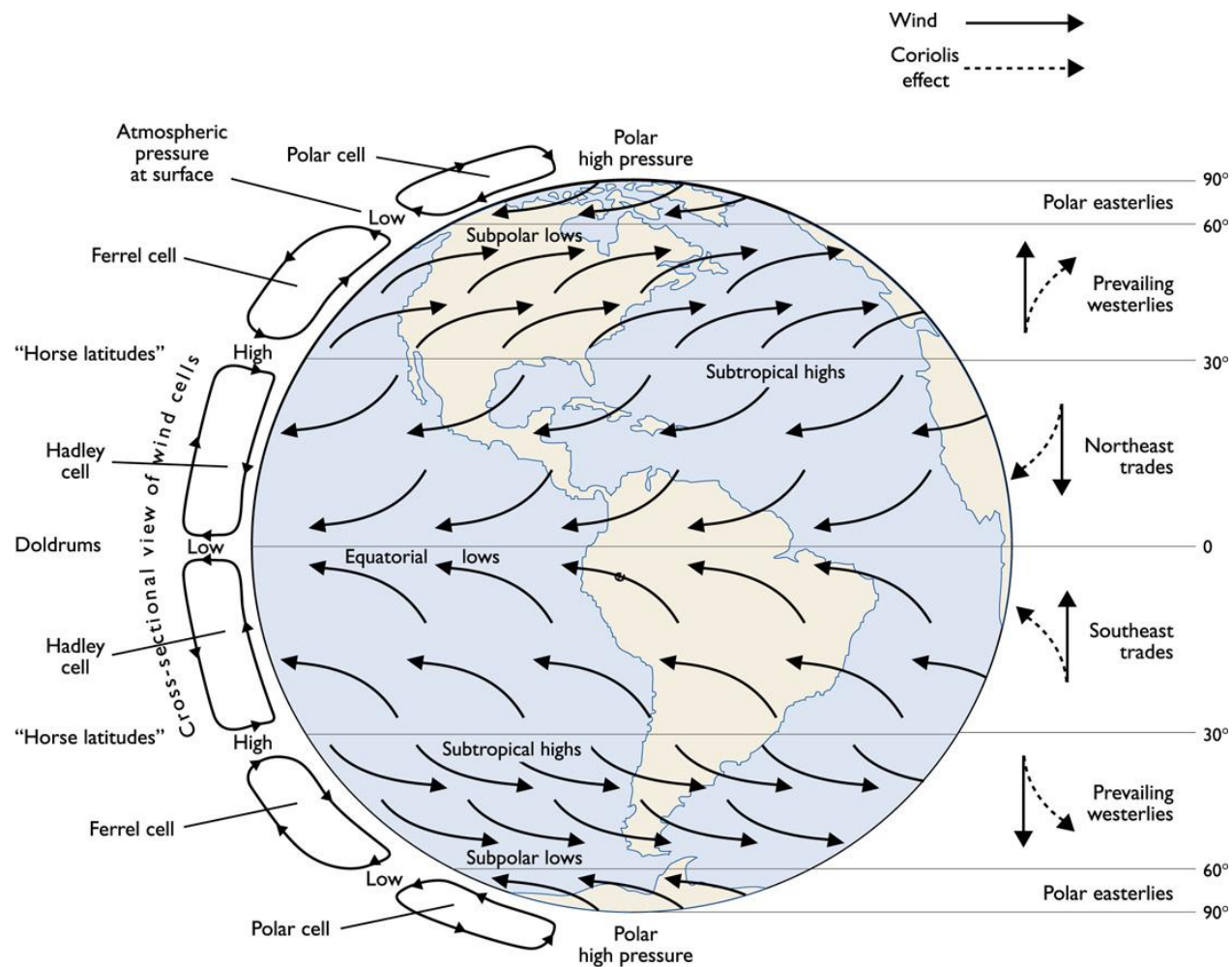
→ Variations selon les zones climatiques

Structure thermique de l'océan en zone intertropicale (Delmas et al., Atmosphère, Océans et Climats)



I/ Circulation de Surface

Rappels : Circulation atmosphérique

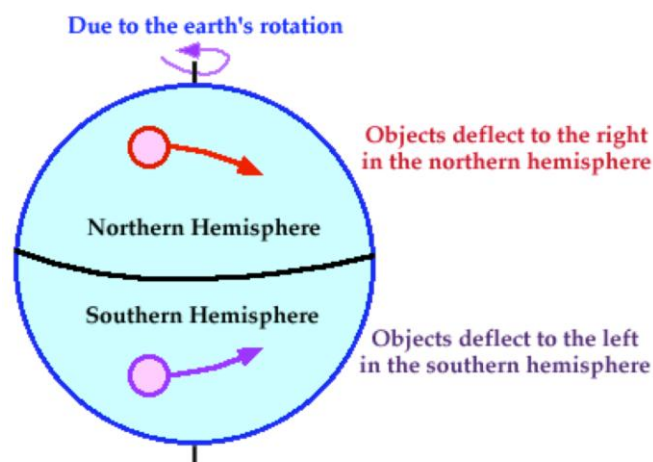


(a) GLOBAL WIND PATTERN

Rappels : Circulation atmosphérique

Conséquences de l'Effet Coriolis

- Fluides en mouvement (Atmosphère et Océan) déviés vers la droite dans l'hémisphère Nord
- Fluides en mouvement (Atmosphère et Océan) déviés vers la gauche dans l'hémisphère Sud



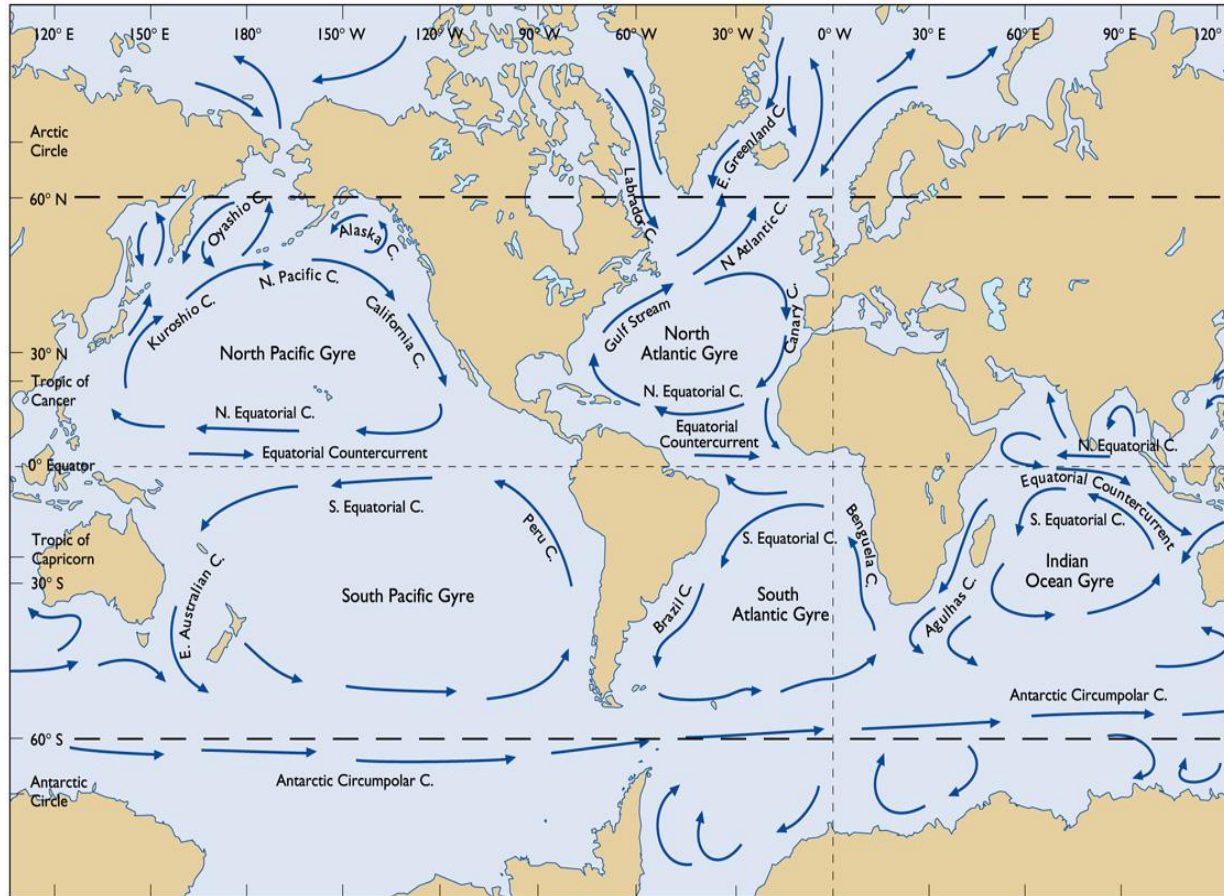
Rappels : Circulation atmosphérique

Les vents contrôlent la circulation océanique de surface

- Les vents dominants poussent les masses d'eau de surface (frottements)
- L'eau en mouvement est déviée vers la droite dans l'Hémisphère N et vers la gauche dans l'Hémisphère S.

I) Circulation de Surface

a) Principaux courants

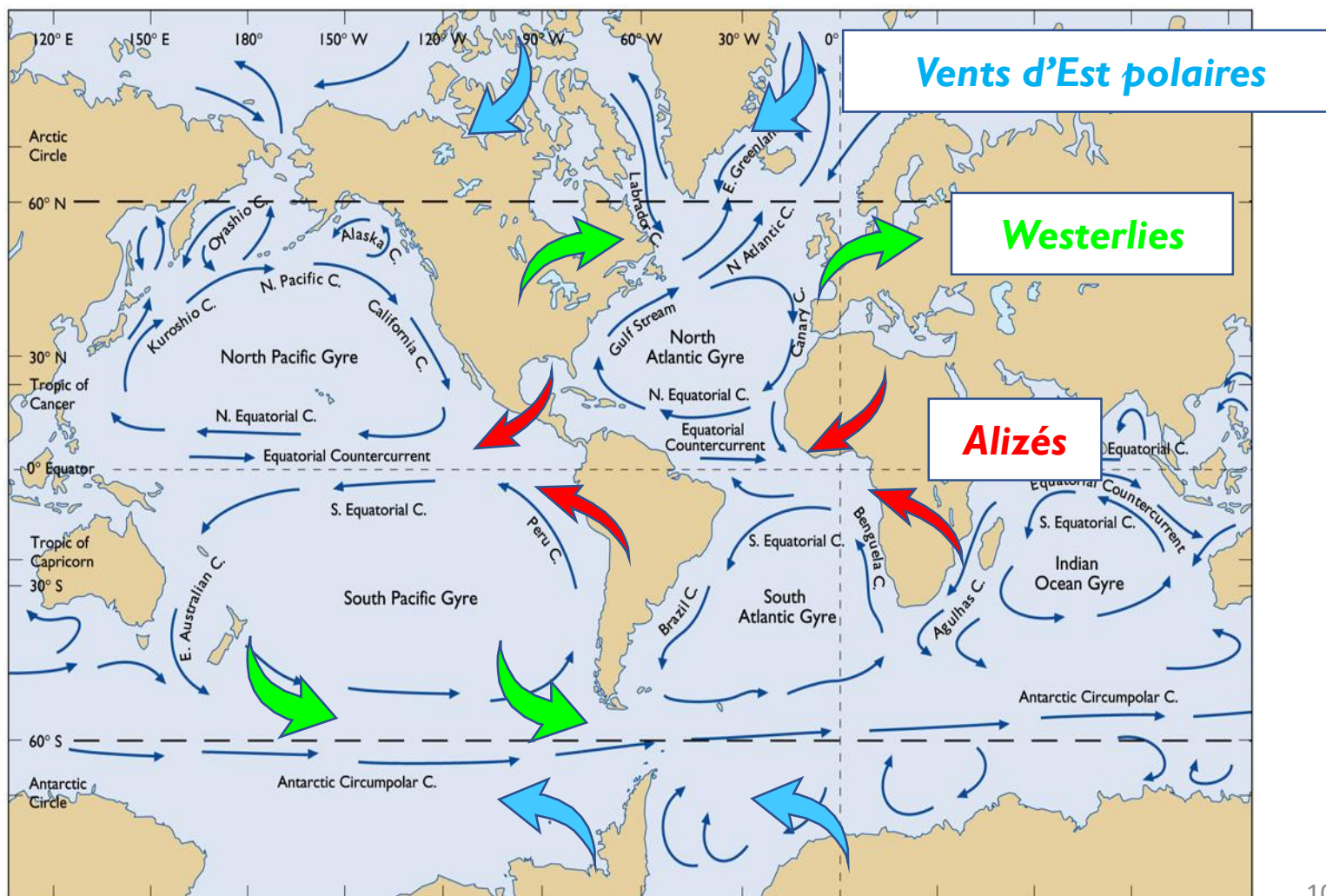


Que faut-il identifier?

(b) GLOBAL SURFACE-WATER CURRENT PATTERN

I) Circulation de Surface

a) Principaux courants



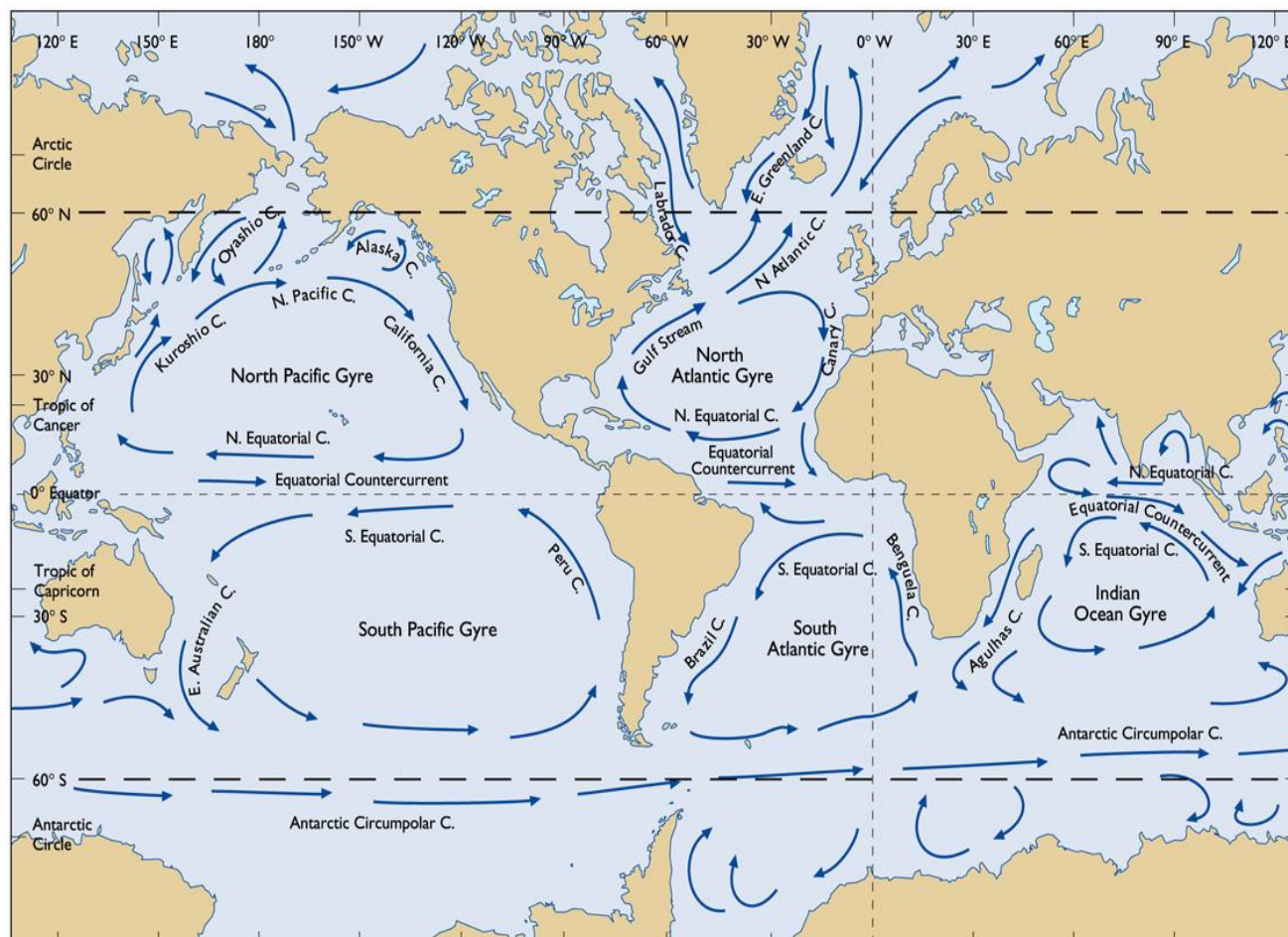
(b) GLOBAL SURFACE-WATER CURRENT PATTERN

I) Circulation de Surface

a) Principaux courants

Gyres

Courants tourbillonnaires océaniques fortement turbulents. Redistribution de la chaleur aux Hautes Latitudes

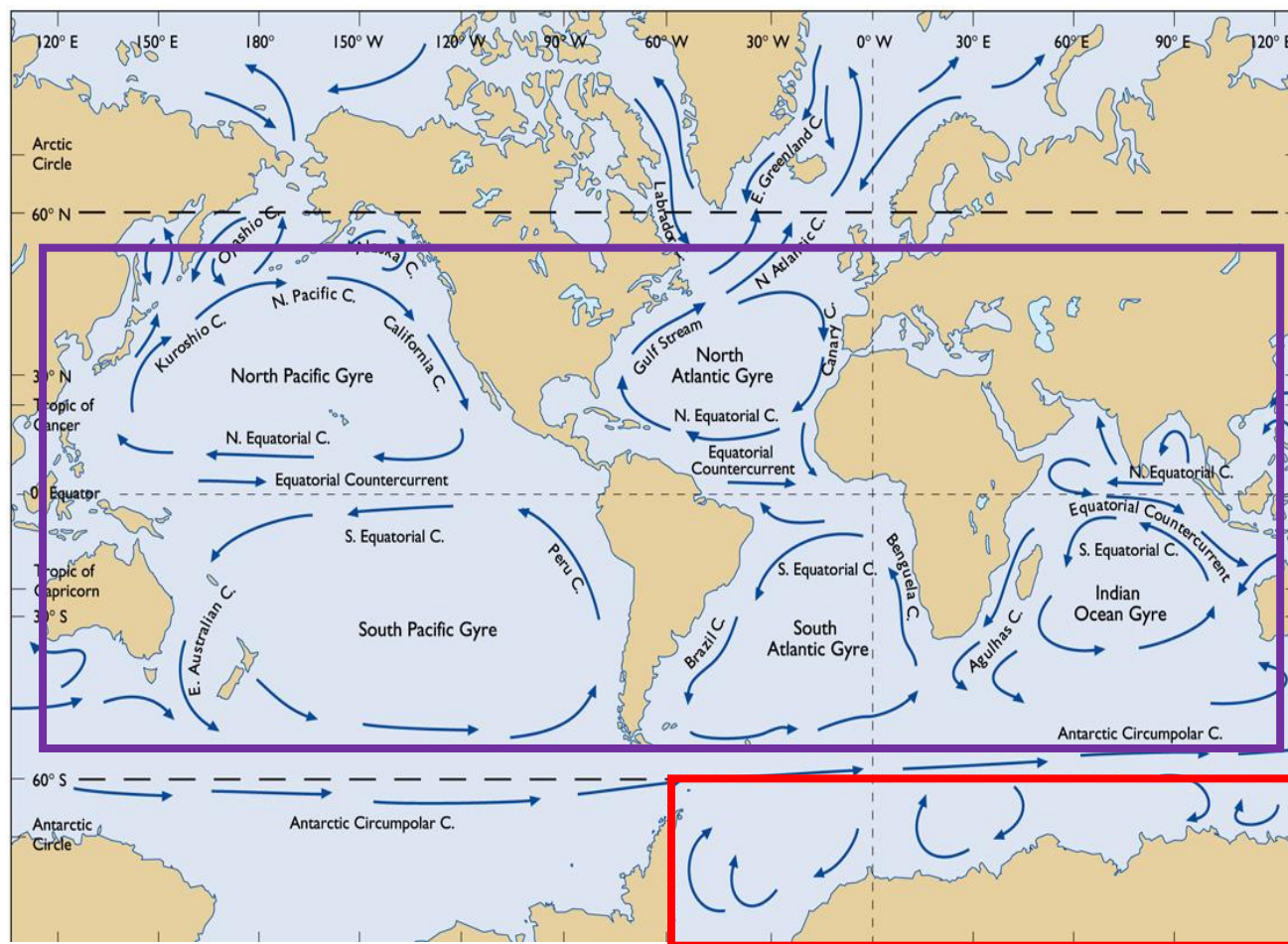


I) Circulation de Surface

a) Principaux courants

Gyres

Courants tourbillonnaires océaniques fortement turbulents. Redistribution de la chaleur aux Hautes Latitudes

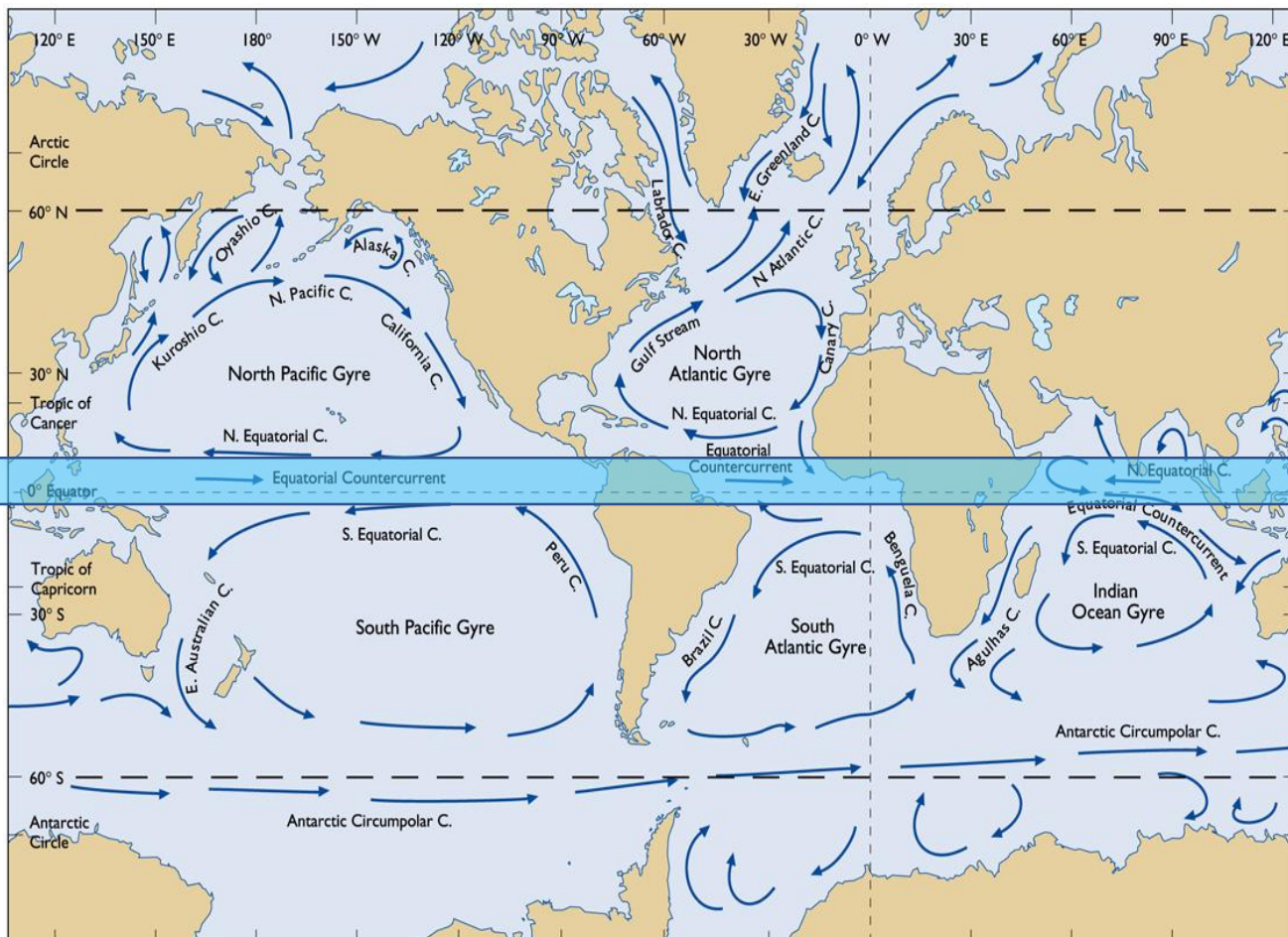


1) Gyres subtropicaux (10°-40° de latitude)

2) Gyres subpolaires

I) Circulation de Surface

a) Principaux courants

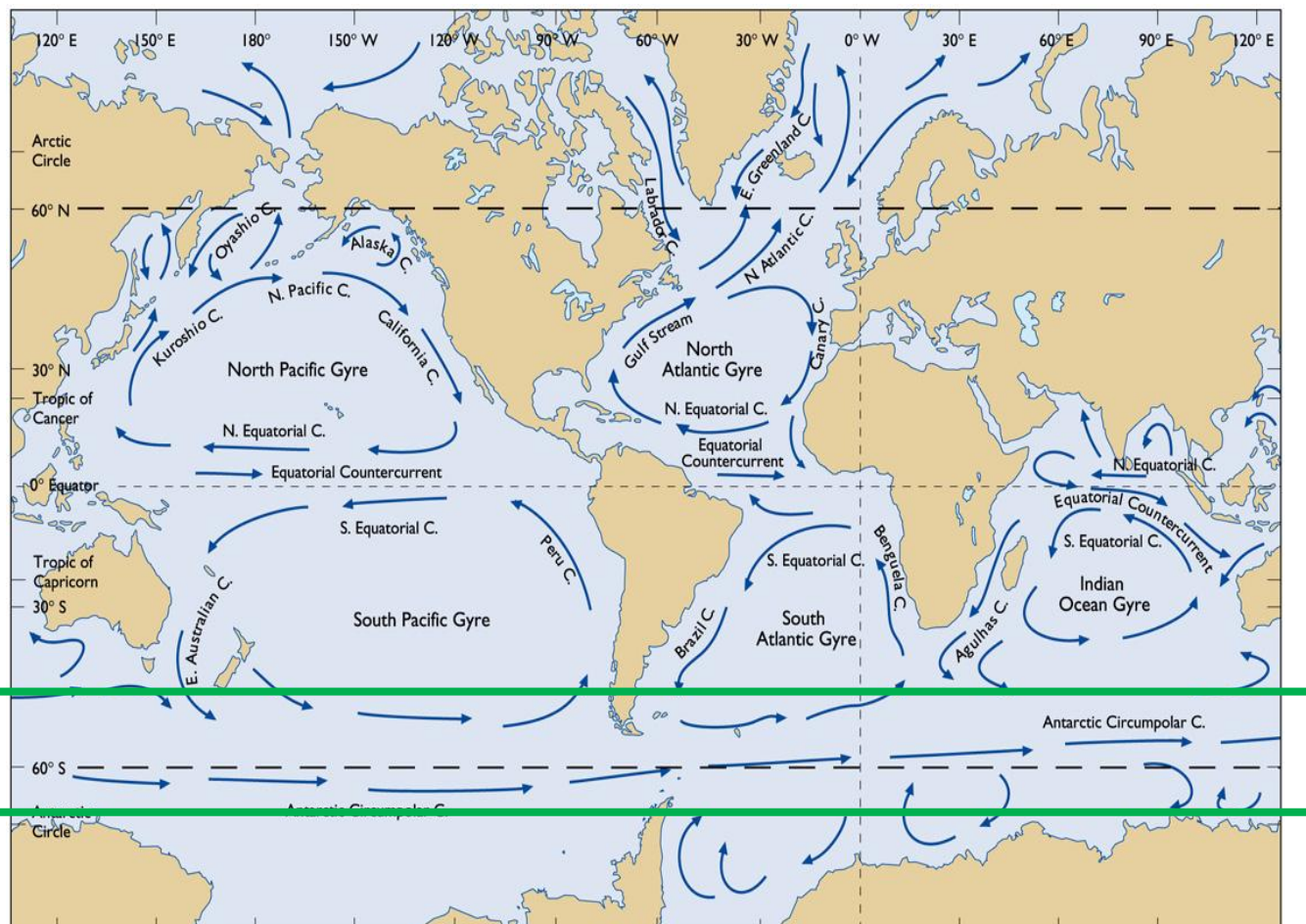


3) Contre courant équatorial

I) Circulation de Surface

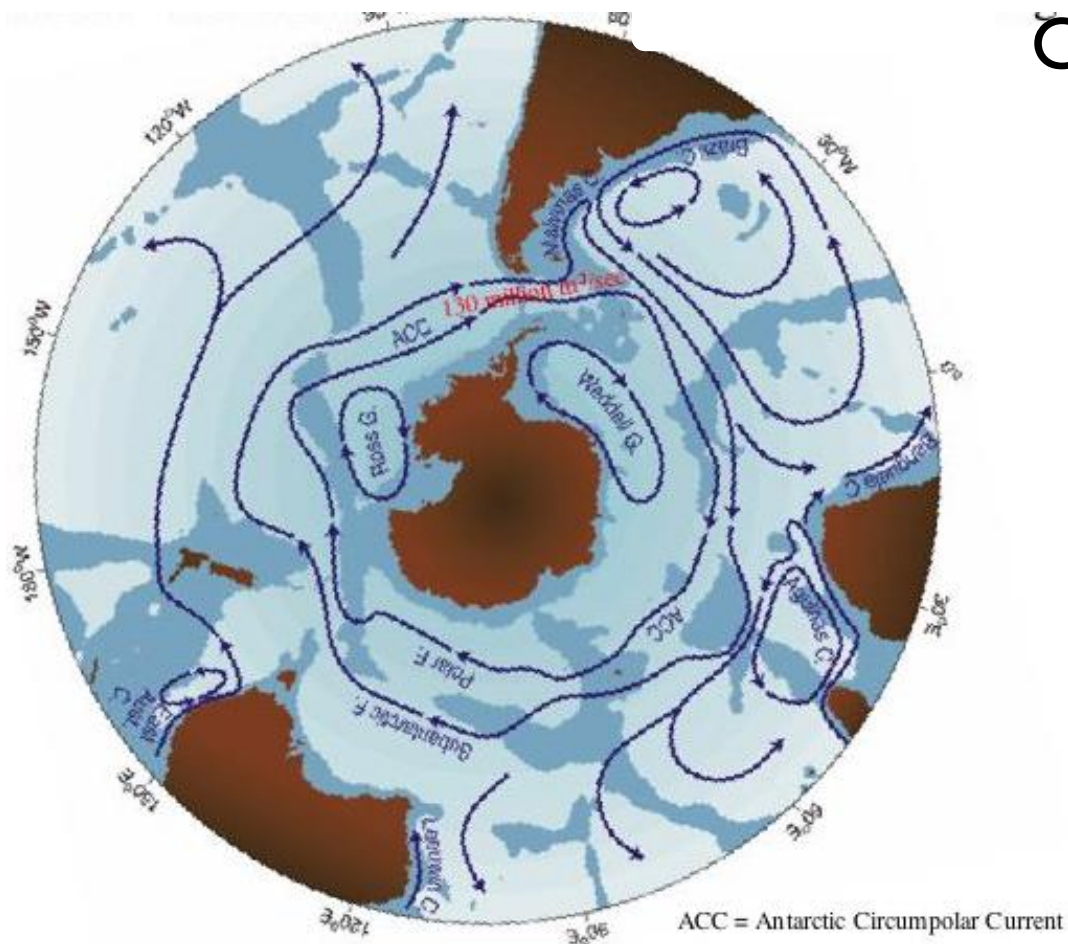
a) Principaux courants

5) Courant Circumpolaire Antarctique



I) Circulation de Surface

a) Principaux courants



Courant Circumpolaire Antarctique

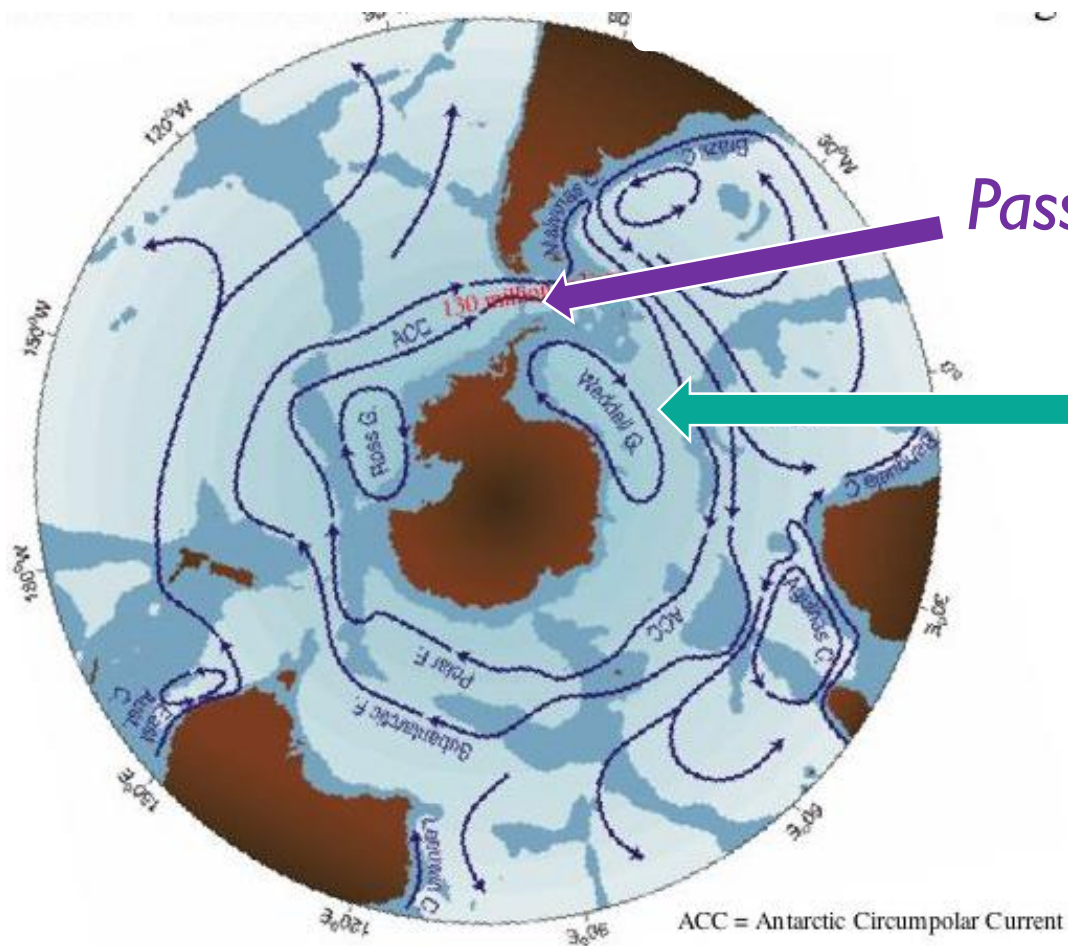
Courant très fort continu, sans contrainte continentale (eaux très froides). Formé par les Westerlies

$130 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$

20 000 km, jusqu'à 4000 m de profondeur

I) Circulation de Surface

a) Principaux courants



Passage de Drake

Mer de Weddel

20 000 km, jusqu'à 4000 m de profondeur

I) Circulation de Surface

b) Température des océans de surface

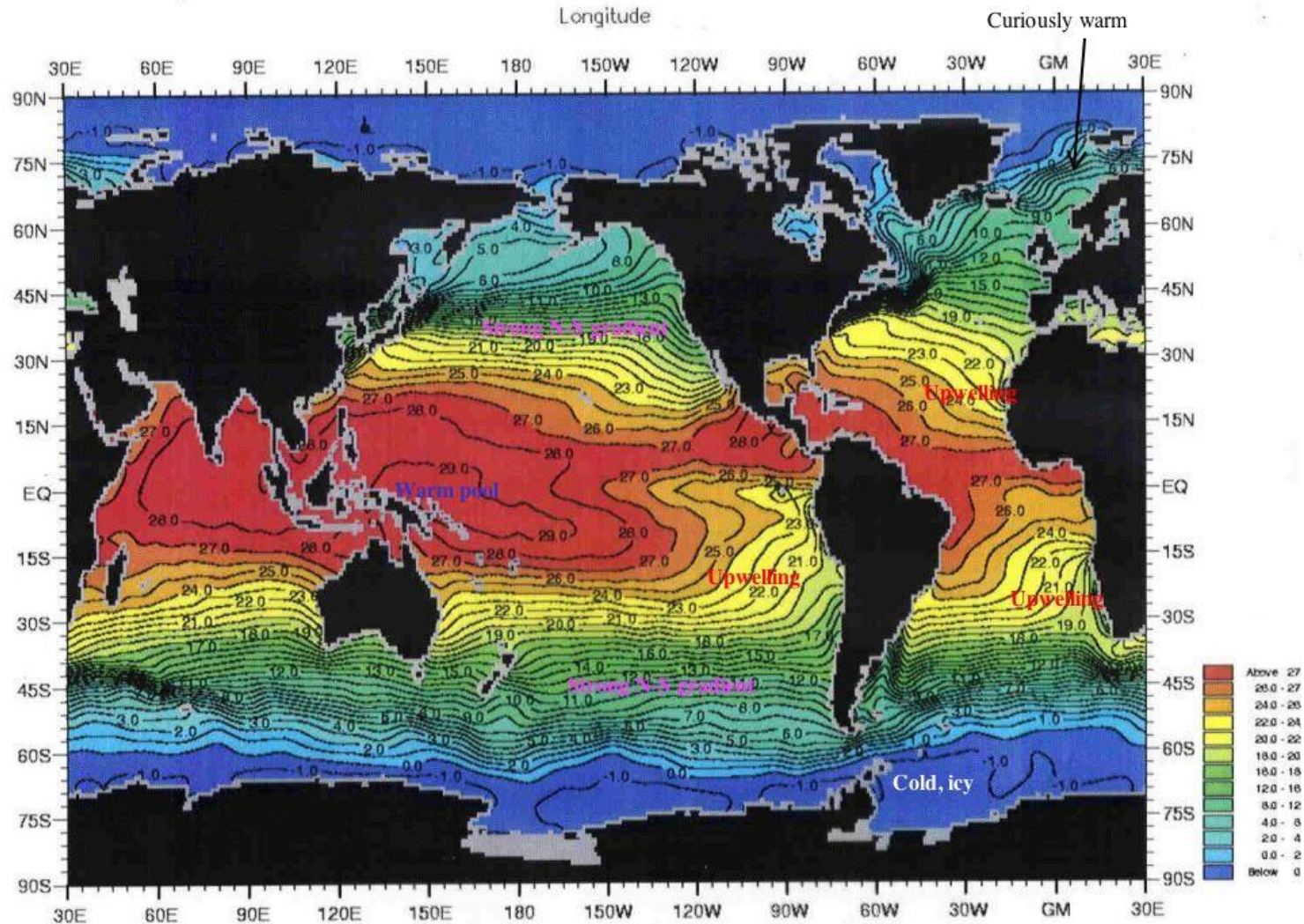
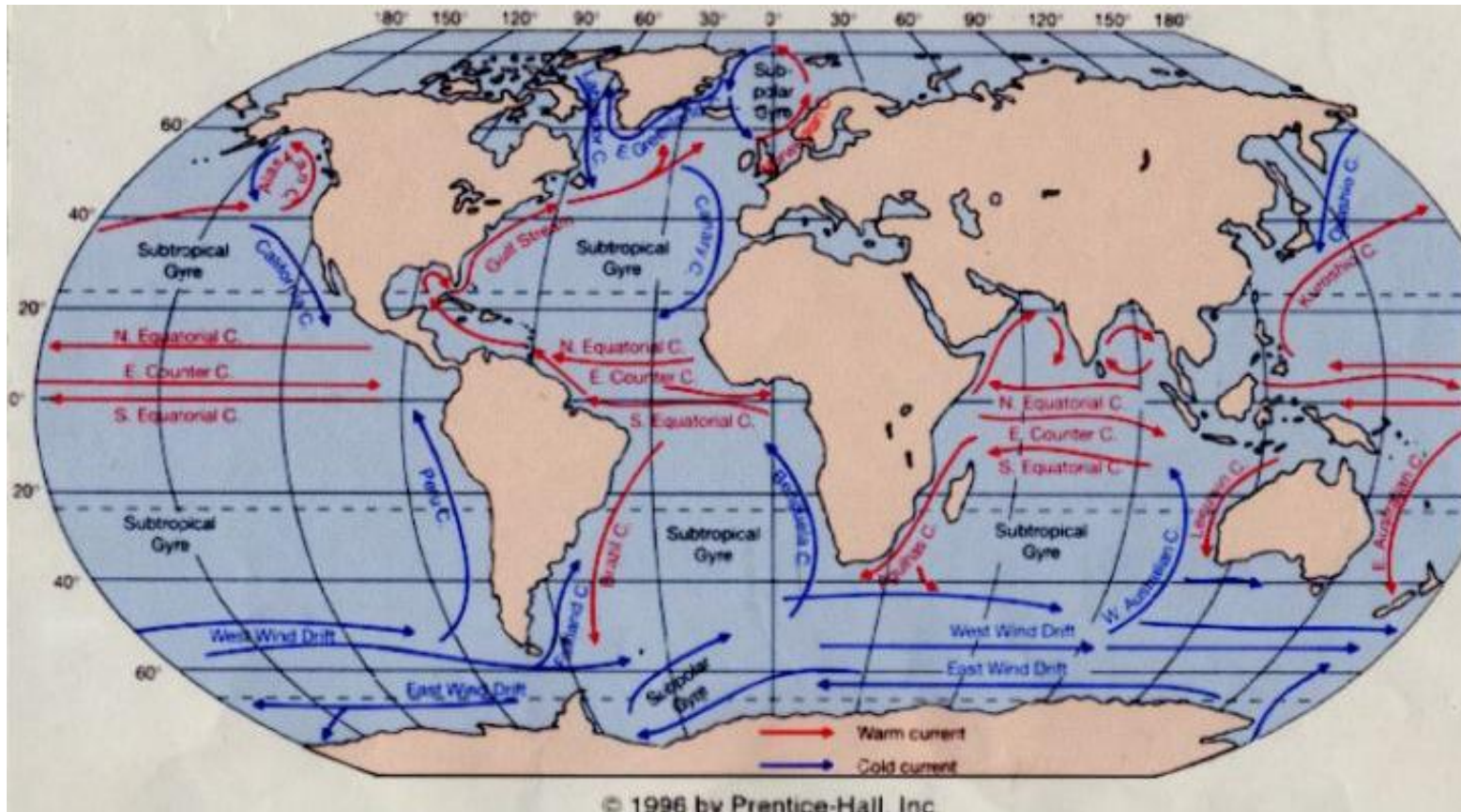


Fig. A2-2. Annual mean temperature (°C) at 10 m. depth .

I) Circulation de Surface

b) Température des océans de surface



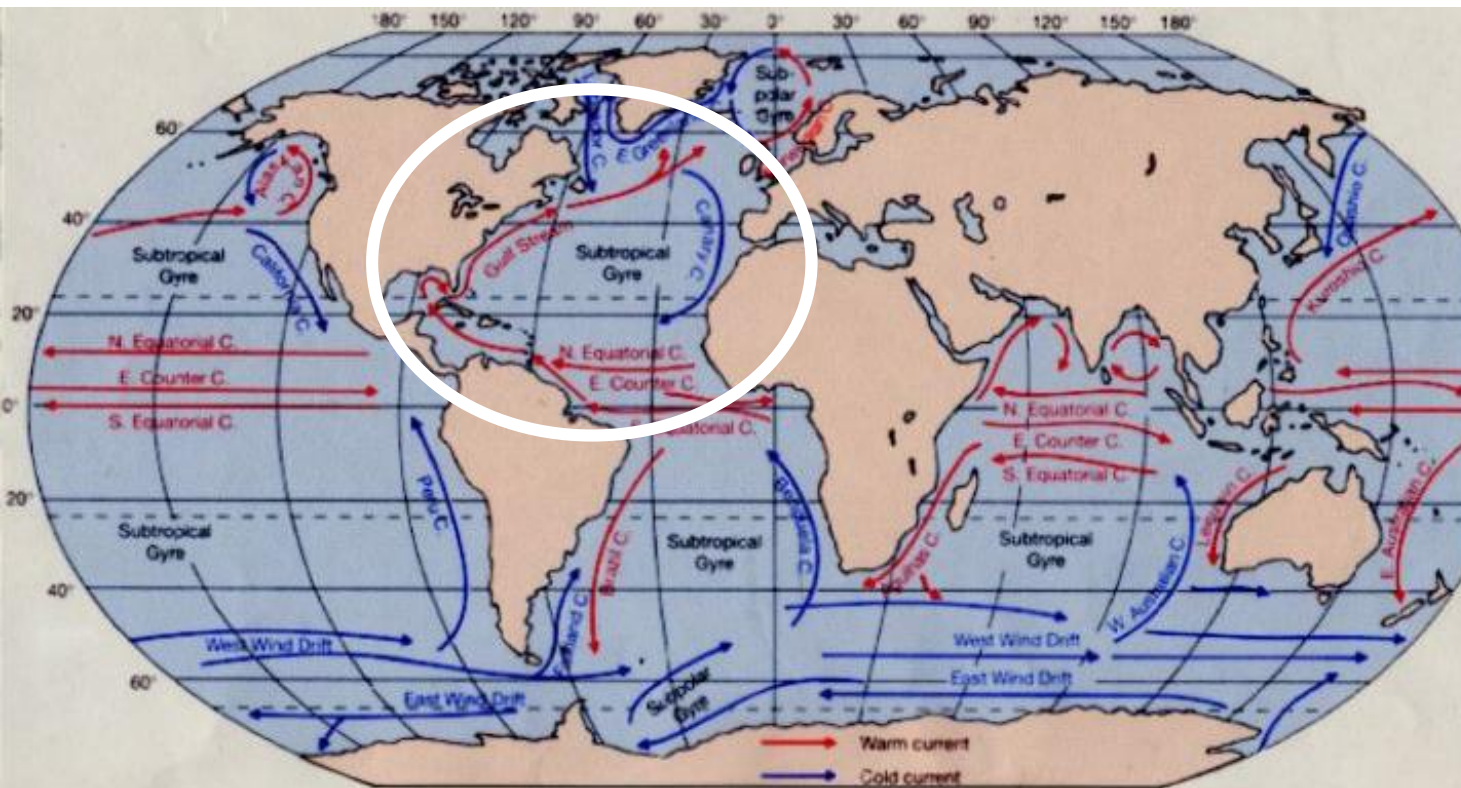
Courants de surface froids / chauds

I) Circulation de Surface

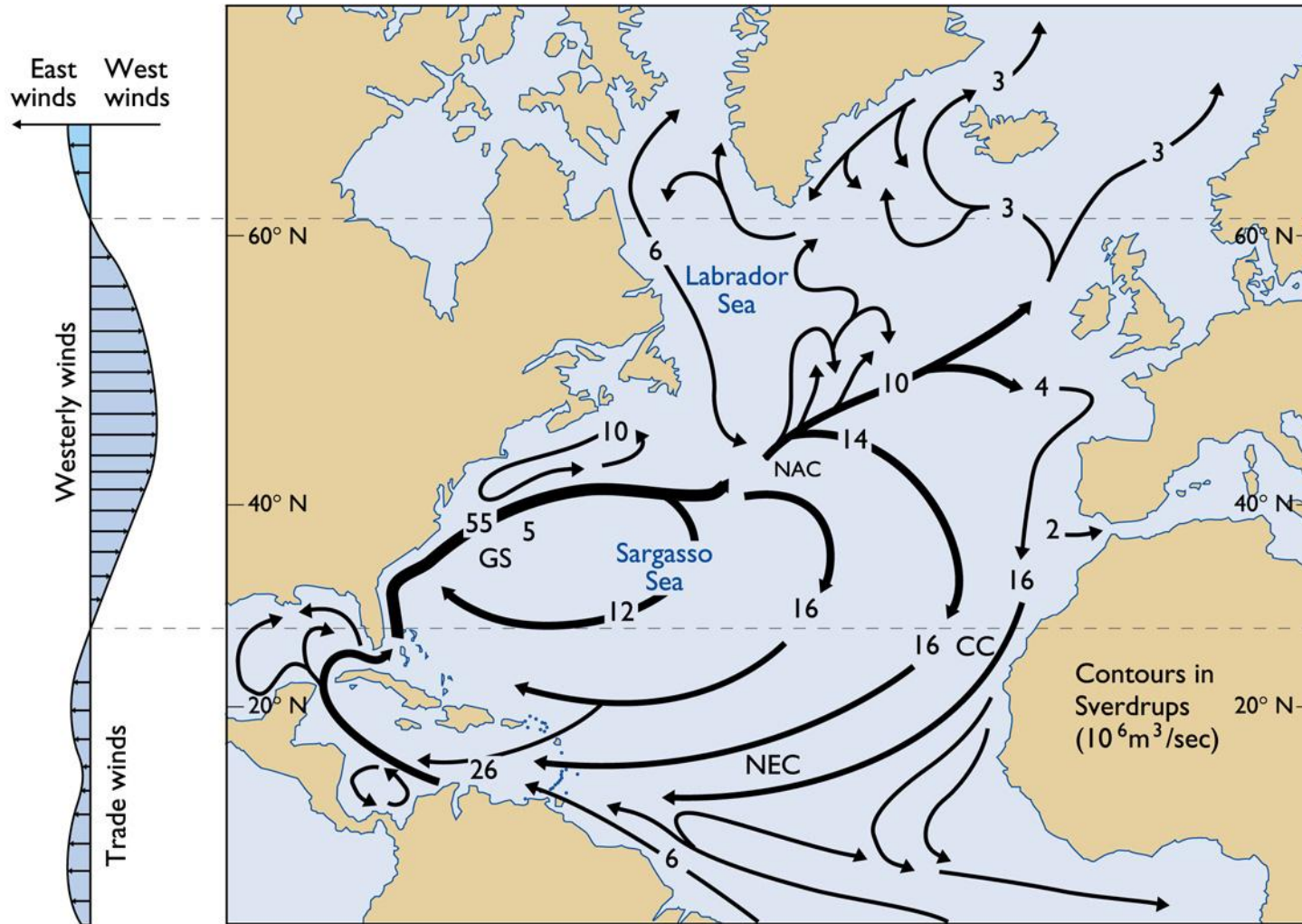
b) Température des océans de surface

Cas du Gulf Stream

C'est donc un gyre sub-tropical!



$10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sverdrup) = apports de toutes les rivières
(débit volumique)



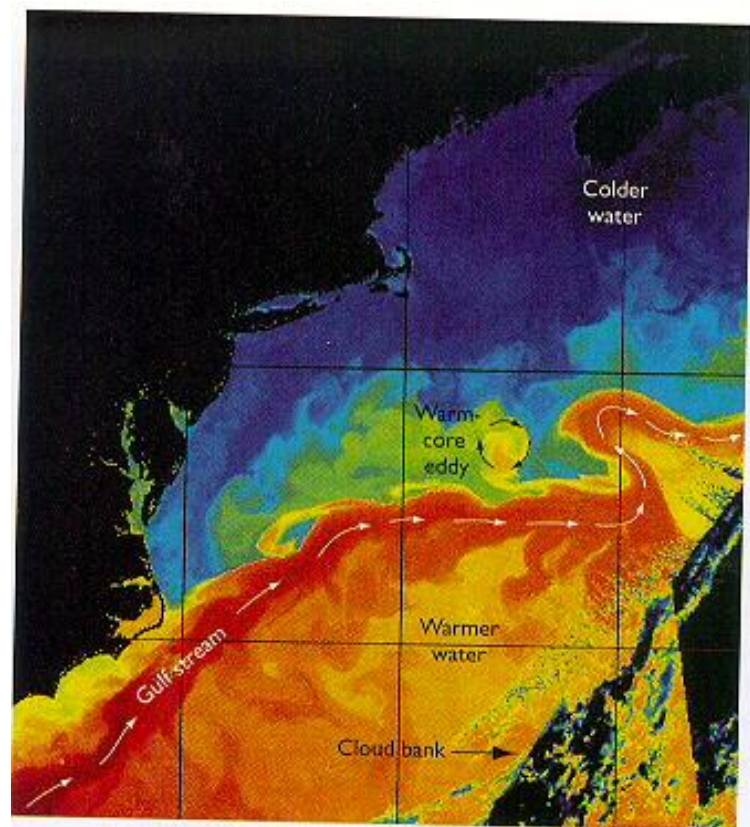
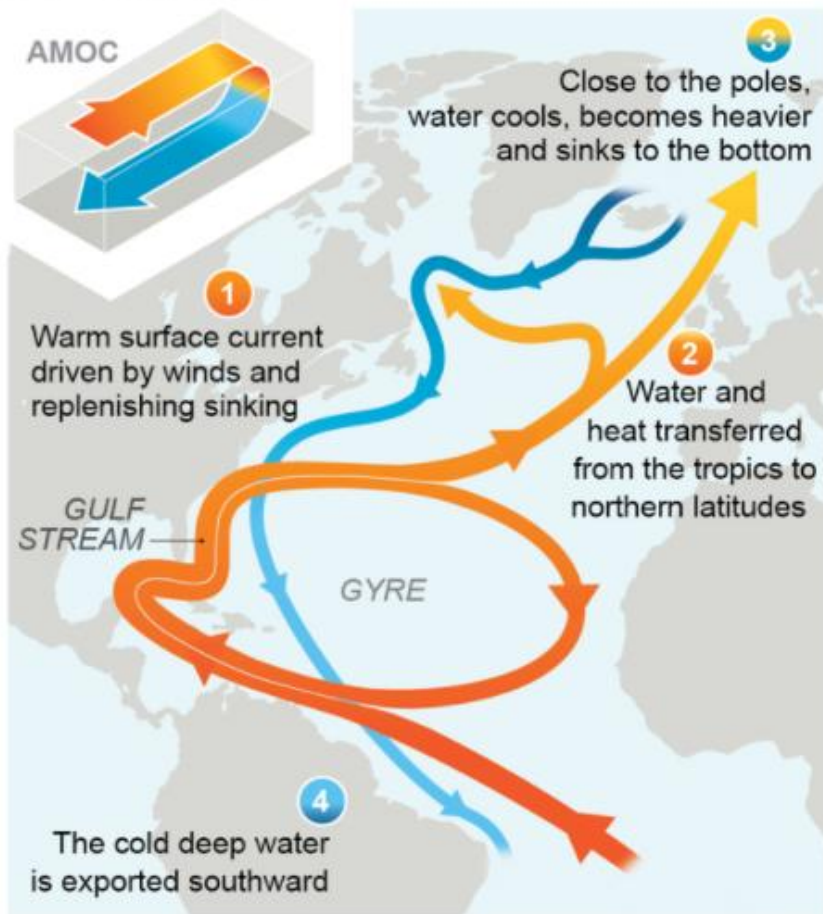
(a) FLOW RATES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

I) Circulation de Surface

b) Température des océans de surface

Today

The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



a) "HEAT" PHOTO OF GULF STREAM

I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

TRANSPORT D'EKMAN – MODELE DE COURANT DE DERIVE

Problème : Les courants **ne dérivent pas** dans le sens du Vent.

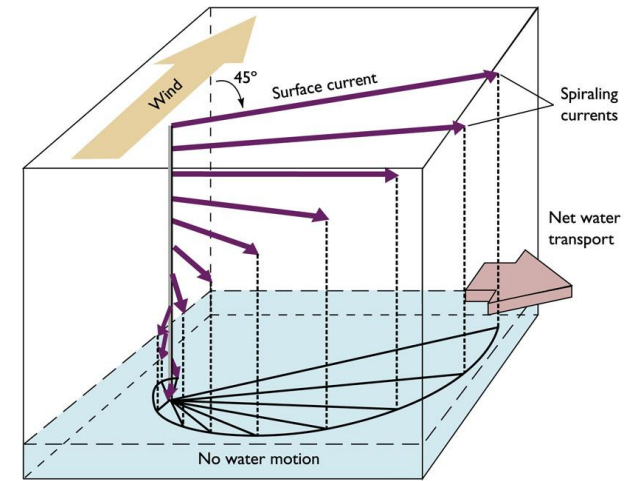
On prend en compte:

- la **tension horizontale** exercée par le vent à la surface de l'eau
- le **frottement visqueux** (résistance au mouvement d'un fluide)
- la "force" de Coriolis

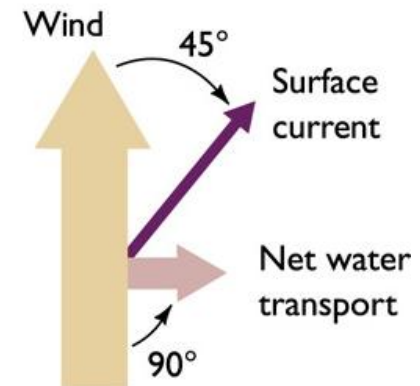
Le Transport d'Ekman montre que :

I/ le courant en surface est dirigé à 45° du vent

- sur sa **droite** dans l'hémisphère Nord
- sur sa **gauche** dans l'hémisphère Sud



(a) EKMAN SPIRAL IN THE NORTHERN HEMISPHERE

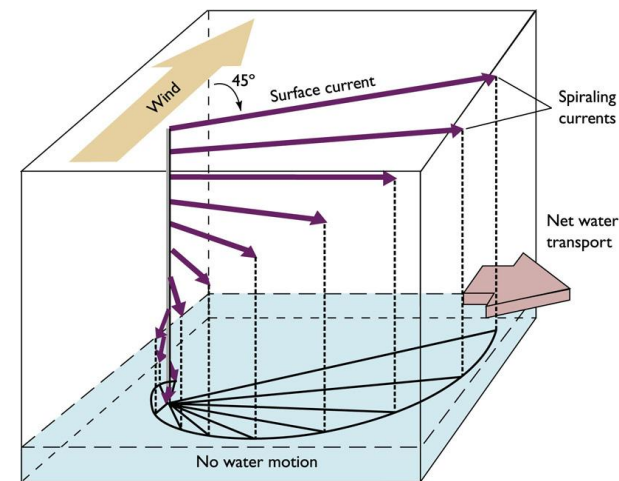


Le Transport d'Ekman montre que :

I/ le courant en surface est dirigé à 45° du vent

- sur sa droite dans l'hémisphère Nord
- sur sa gauche dans l'hémisphère Sud

II/ le courant décroît exponentiellement avec la profondeur

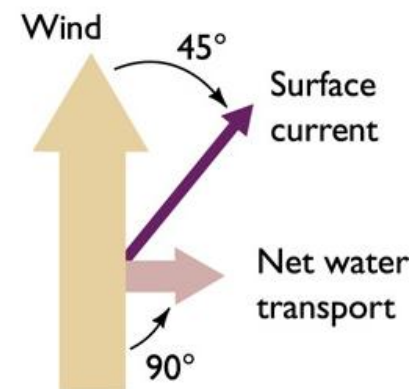


(a) EKMAN SPIRAL IN THE NORTHERN HEMISPHERE

**Transfert d'énergie
aux différentes strates**



**Dissipation d'énergie
(vitesse courant nulle)**



Le Transport d'Ekman montre que :

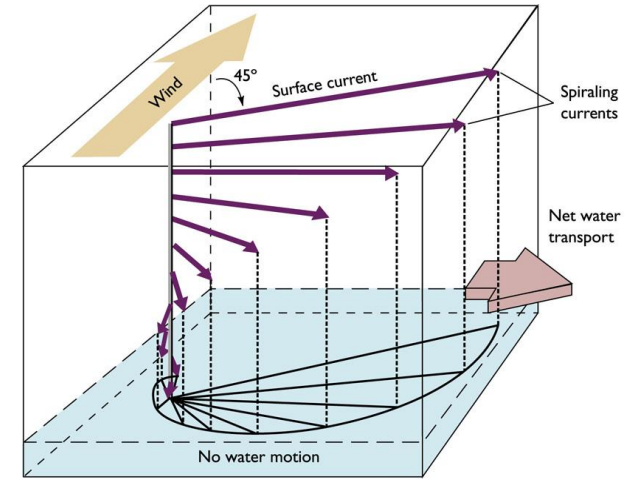
I/ le courant en surface est dirigé à 45° du vent

- sur sa droite dans l'hémisphère Nord
- sur sa gauche dans l'hémisphère Sud

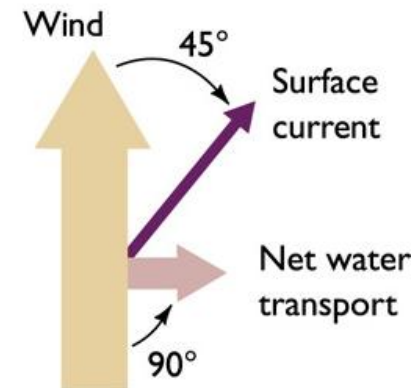
II/ le courant décroît exponentiellement avec la profondeur

III/ le courant tourne proportionnellement à la profondeur

de telle sorte qu'à une certaine immersion, dite "profondeur d'Ekman", le **courant (très faible)** est opposé à ce qu'il est en surface...



(a) EKMAN SPIRAL IN THE NORTHERN HEMISPHERE



Le Transport d'Ekman montre que :

I/ le courant en surface est dirigé à 45° du vent

- sur sa droite dans l'hémisphère Nord
- sur sa gauche dans l'hémisphère Sud

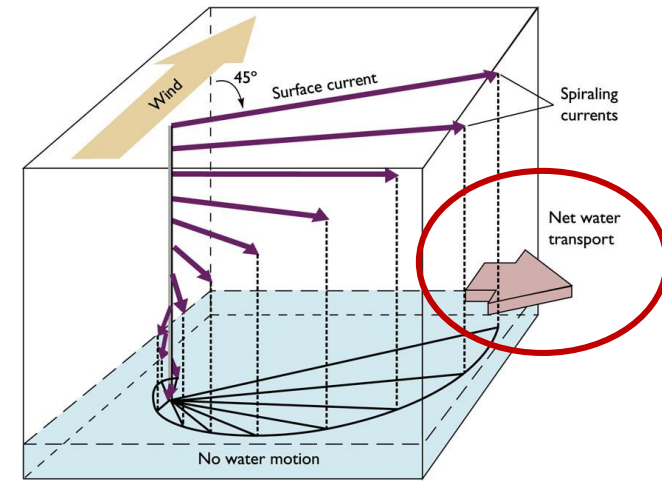
II/ le courant décroît exponentiellement avec la profondeur

III/ le courant tourne proportionnellement à la profondeur

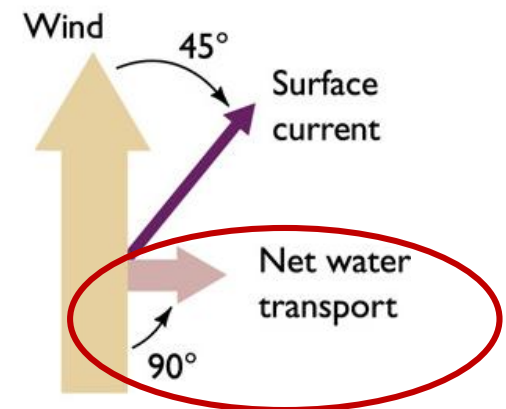
de telle sorte qu'à une certaine immersion, dite "profondeur d'Ekman", le **courant (très faible)** est opposé à ce qu'il est en surface...

IV/ le flux d'eau global est perpendiculaire au vent

- sur sa droite dans l'hémisphère Nord
- sur sa gauche dans l'hémisphère Sud



(a) EKMAN SPIRAL IN THE NORTHERN HEMISPHERE

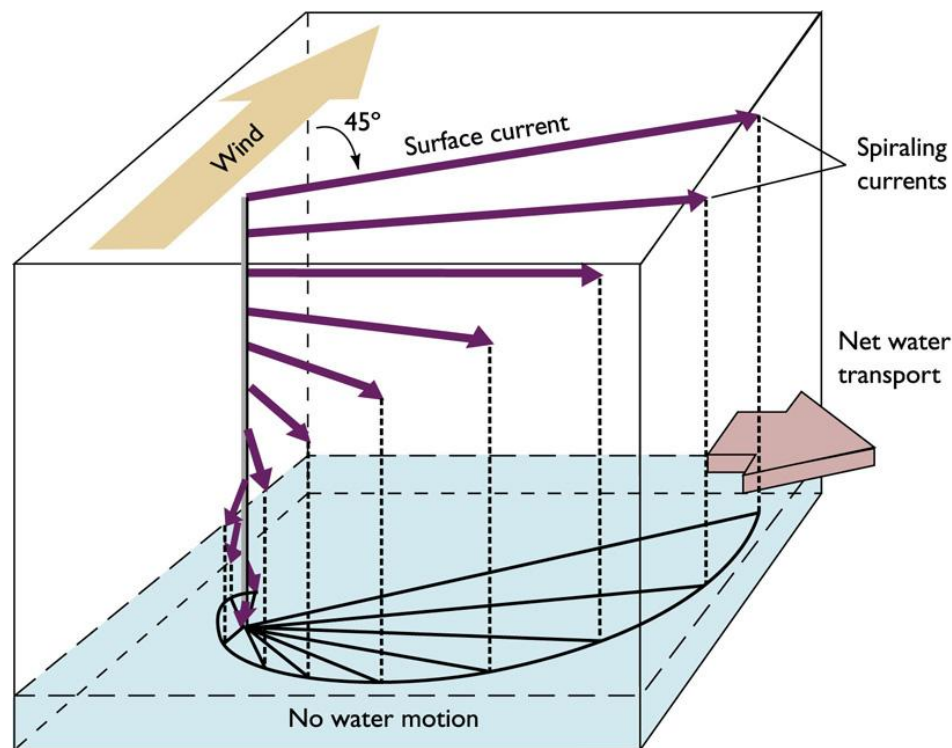


I) Circulation de Surface

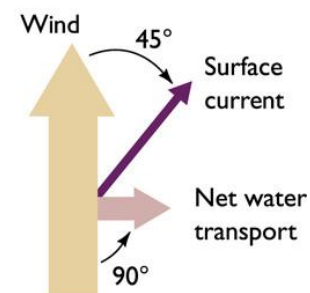
c) Mouvements des courants de surface

Transport d'Ekman- mouvements de la masse d'eau à 90° de la direction des vents

Spirale d'Ekman



(a) EKMAN SPIRAL IN THE NORTHERN HEMISPHERE

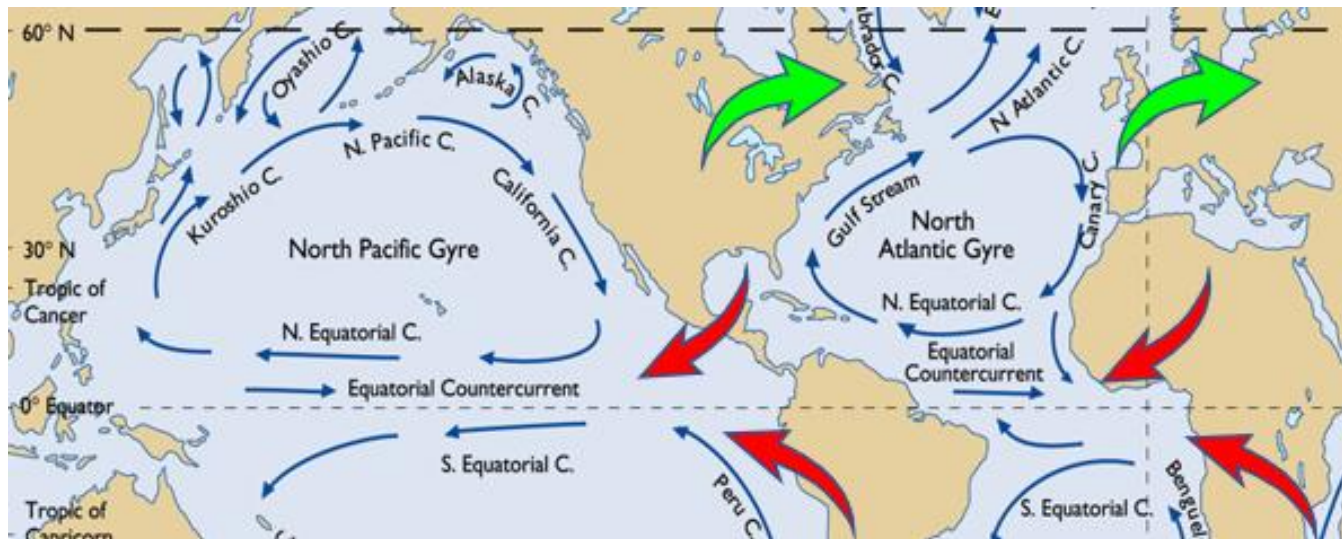


(b) MAPVIEW

I) Circulation de Surface

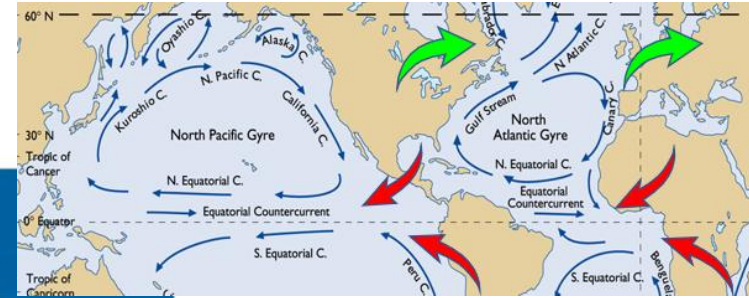
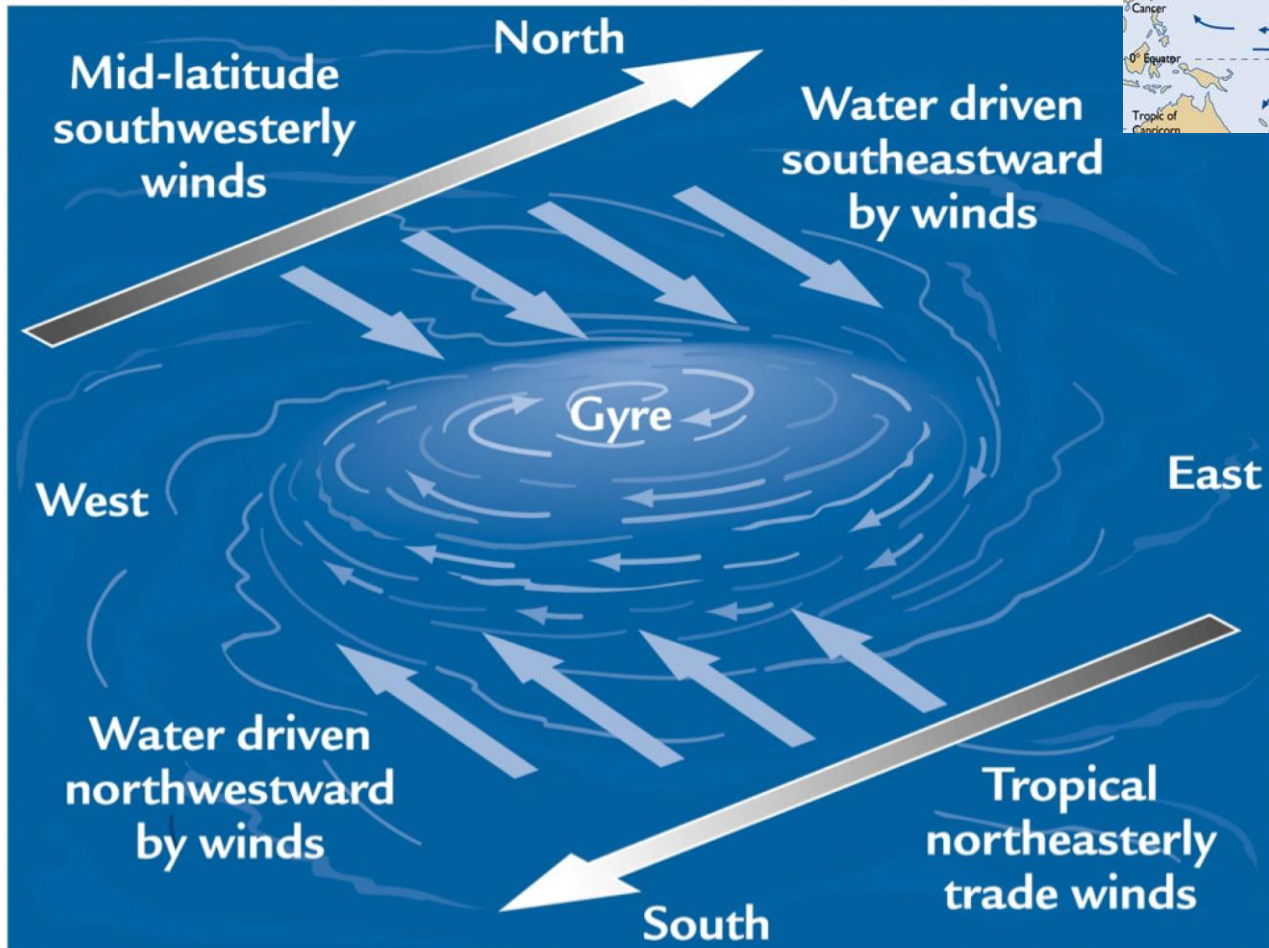
c) Mouvements des courants de surface

Hémisphère Nord, région sub-tropicale



I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

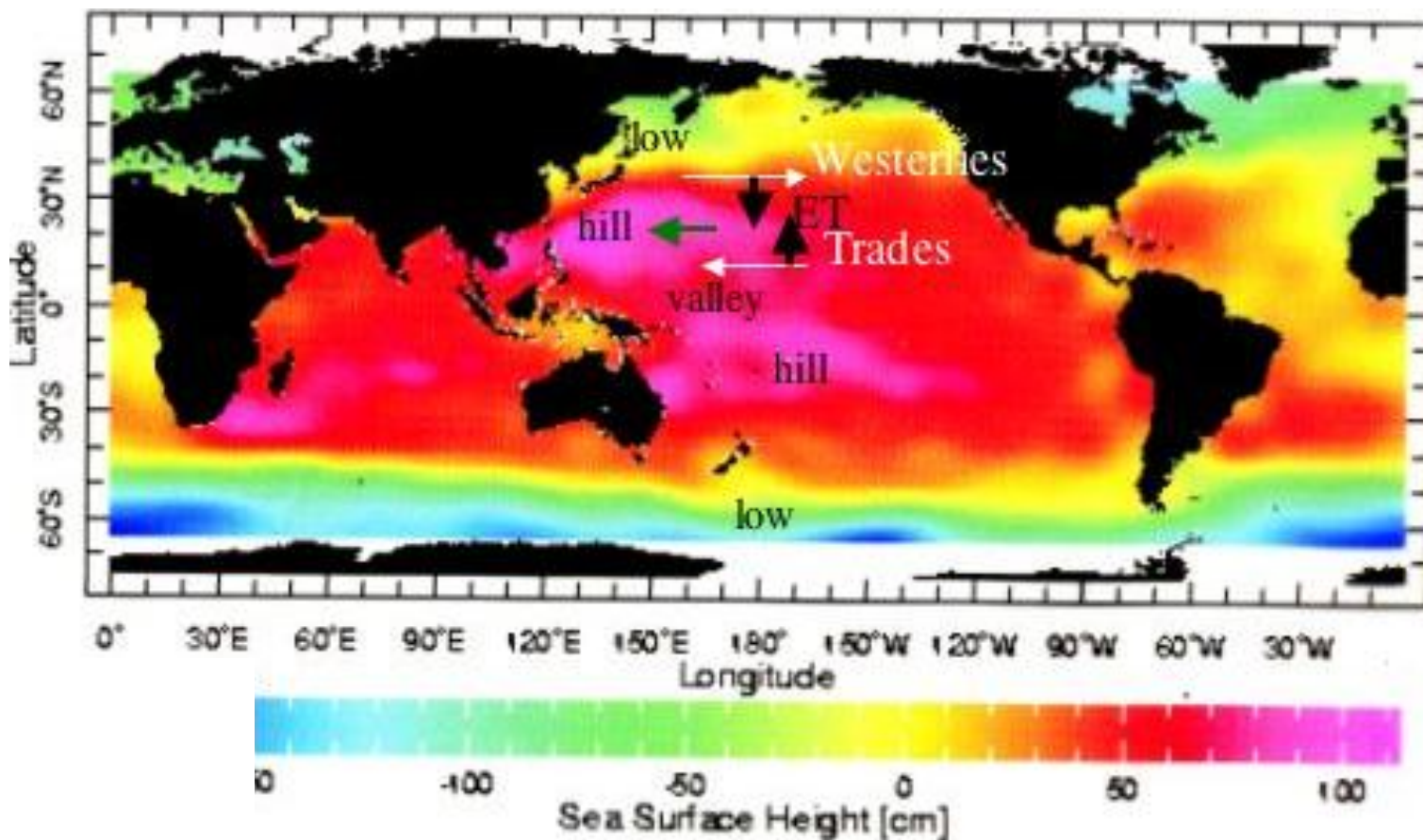


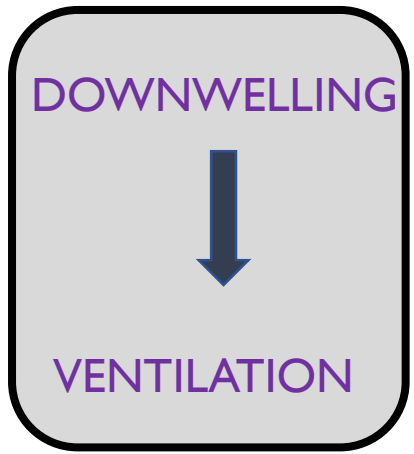
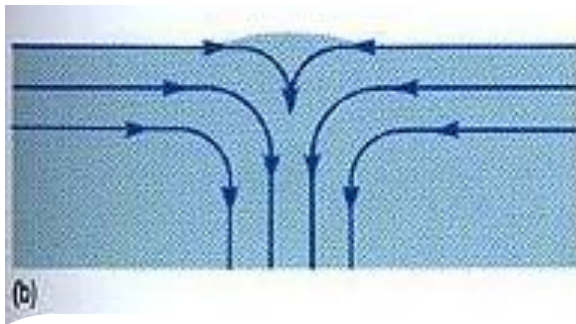
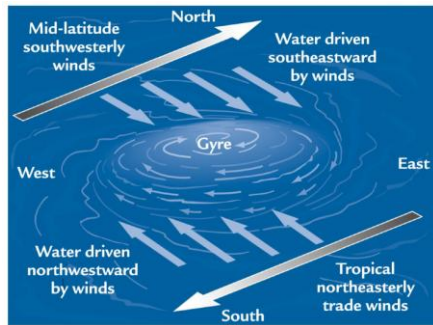
Zone anticyclonique

I) Circulation de Surface

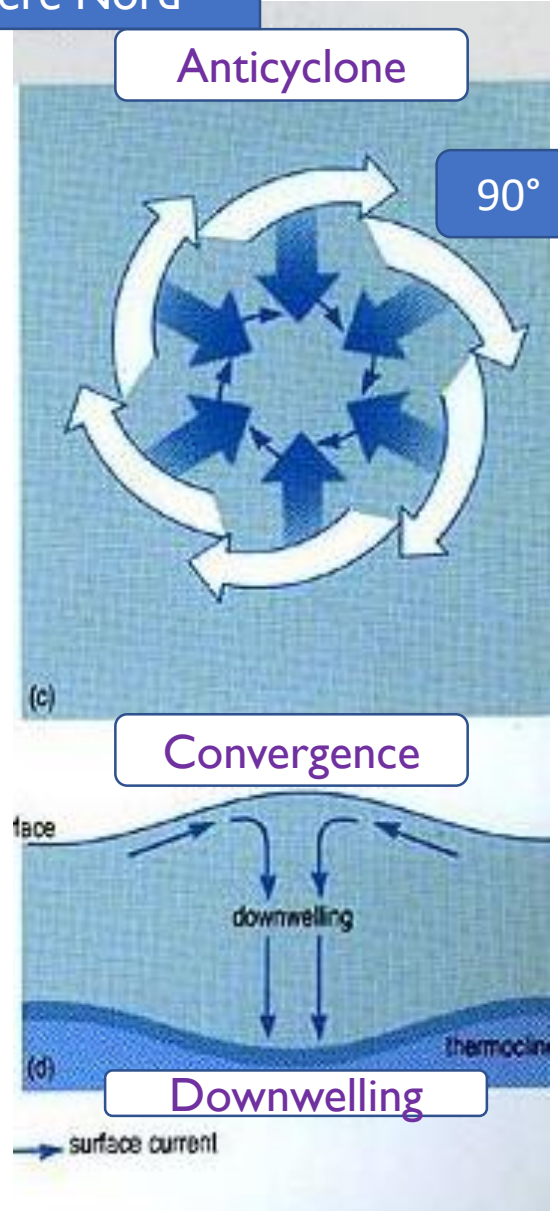
c) Mouvements des courants de surface

Topographie de surface des océans





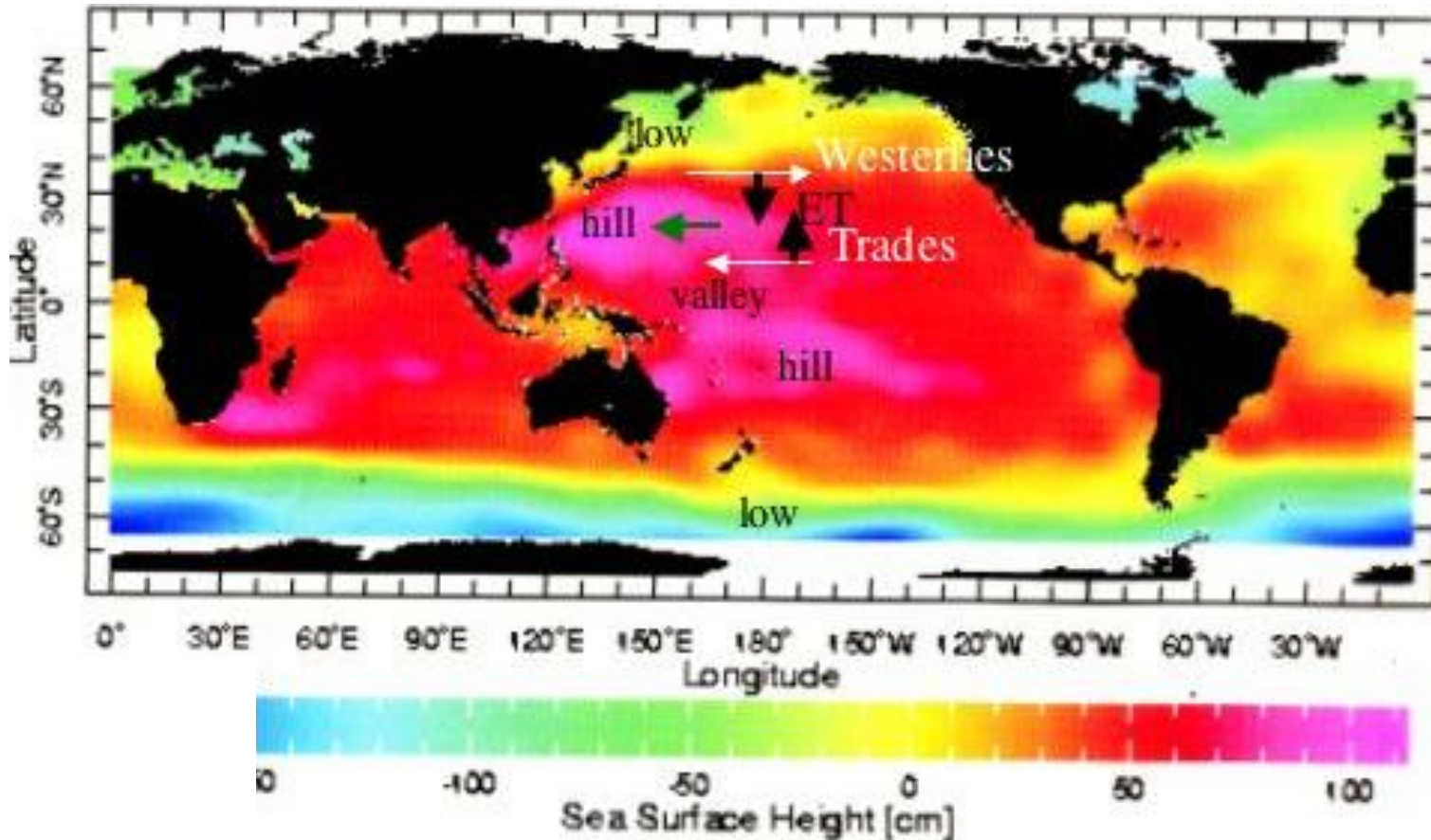
Hémisphère Nord



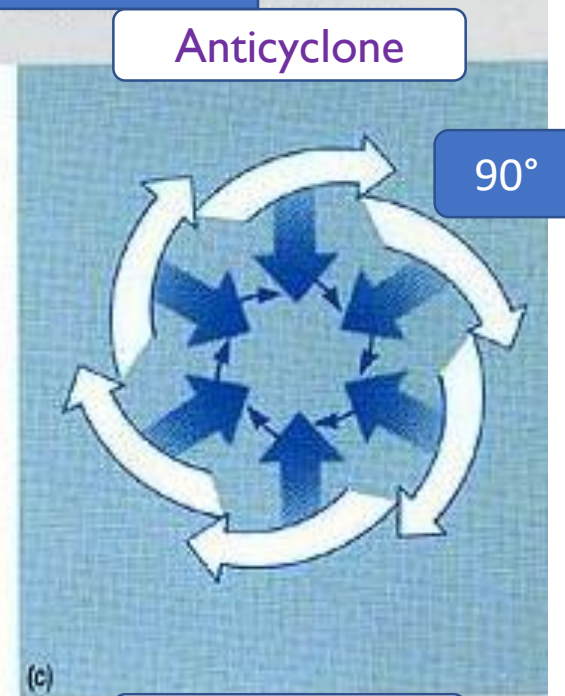
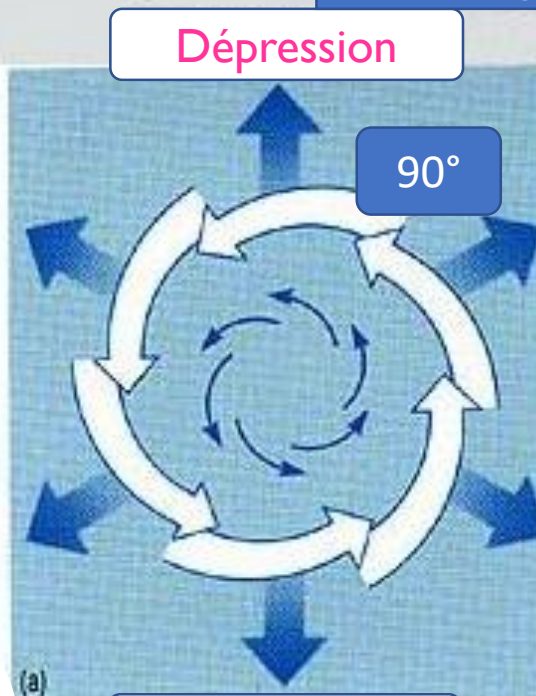
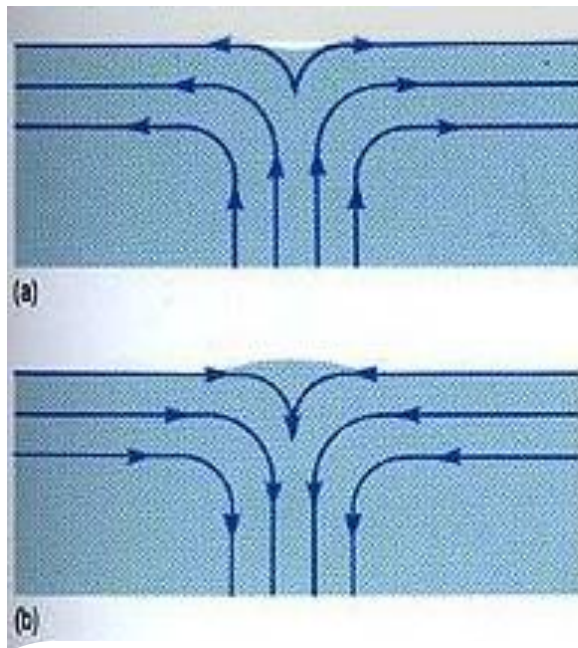
I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

Topographie de surface des océans



Hémisphère Nord



Divergence

Convergence



Upwelling



Downwelling



Remontée de la thermocline

UPWELLING

DOWNWELLING

↑

↓

POMPAGE EKMAN

VENTILATION

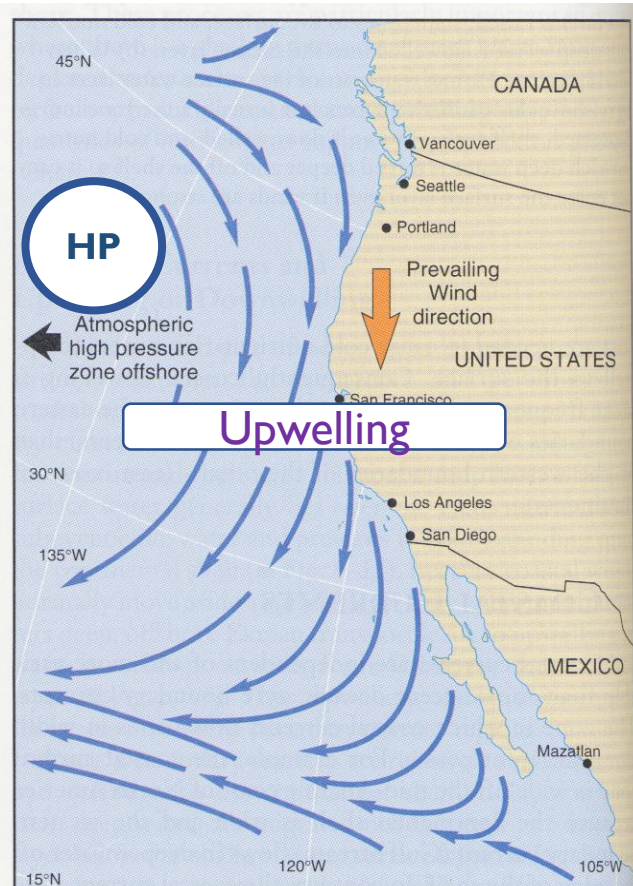
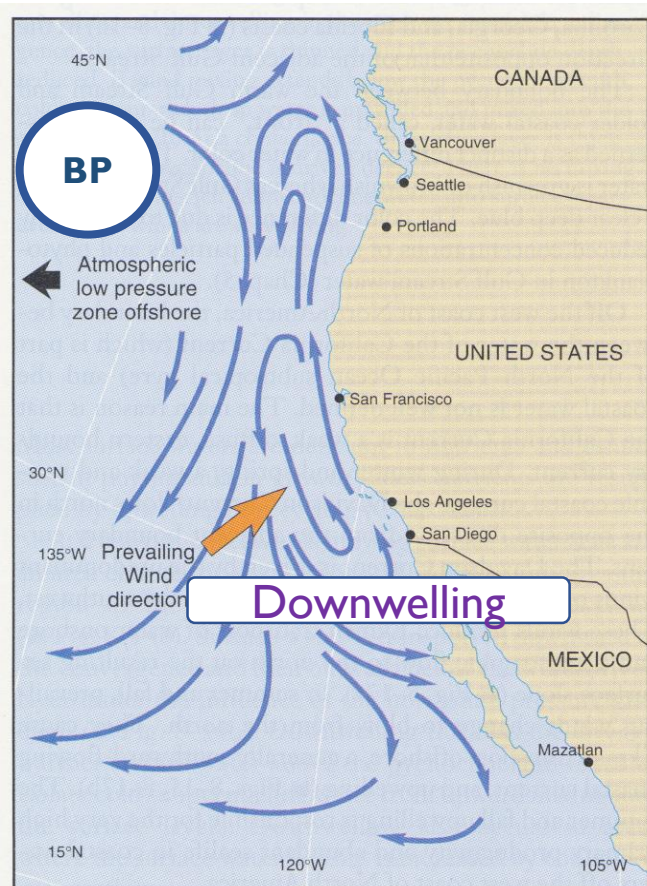
I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

Upwelling et downwelling

Hiver

Été



Gyre saisonnier

Ex. le long de la côte Ouest des Etats-Unis

I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

Exemple de la côte californienne

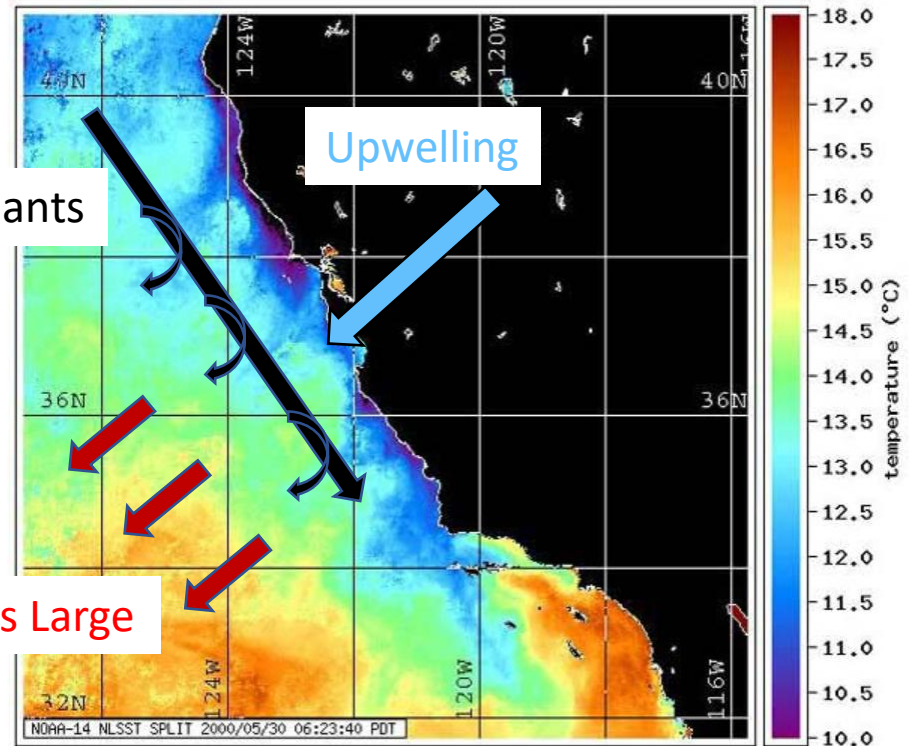


A. Upwelling
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Vents d'été dominants du Nord →
upwelling

Vents Dominants

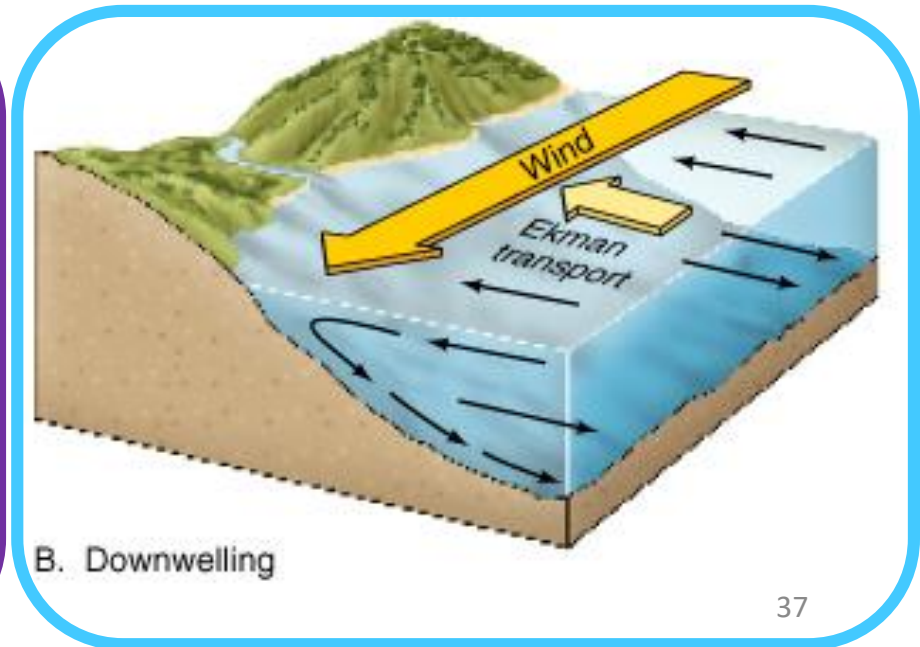
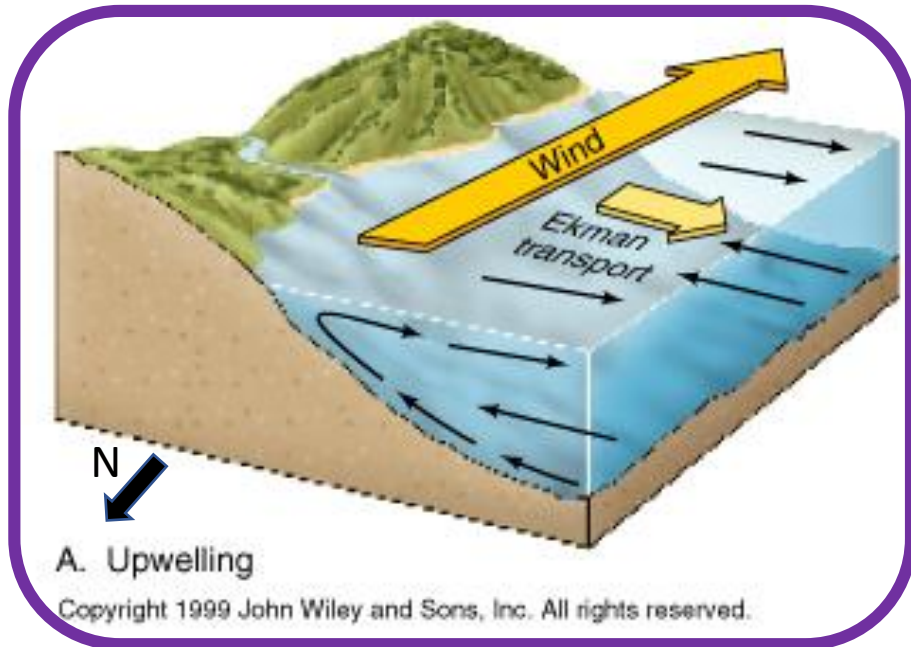
Eaux vers Large



Upwelling et downwelling le long de la côte Ouest des états Unis

Vents d'hiver dominants du Sud - Downwelling

Vents d'été dominants du Nord - Upwelling



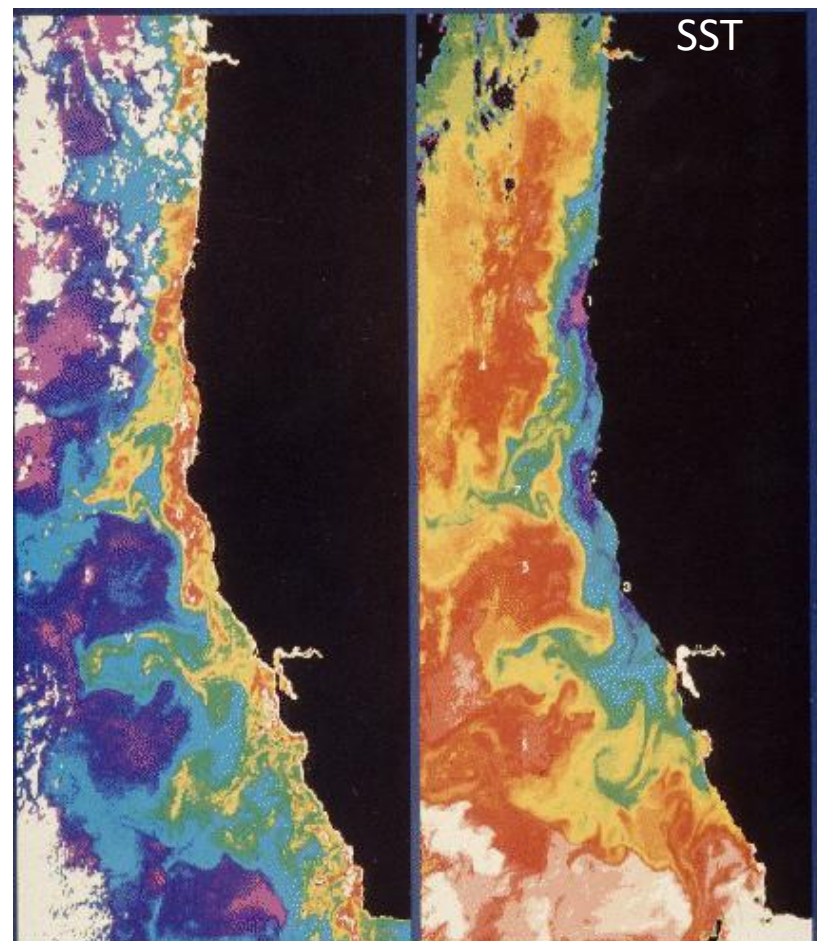
I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

Upwelling de la côte de Californie

- Vents dominants de NE en été
- Upwelling d'eaux froides et riches en nutriments (composés phosphates, azotés, ou silice)

Situation estivale

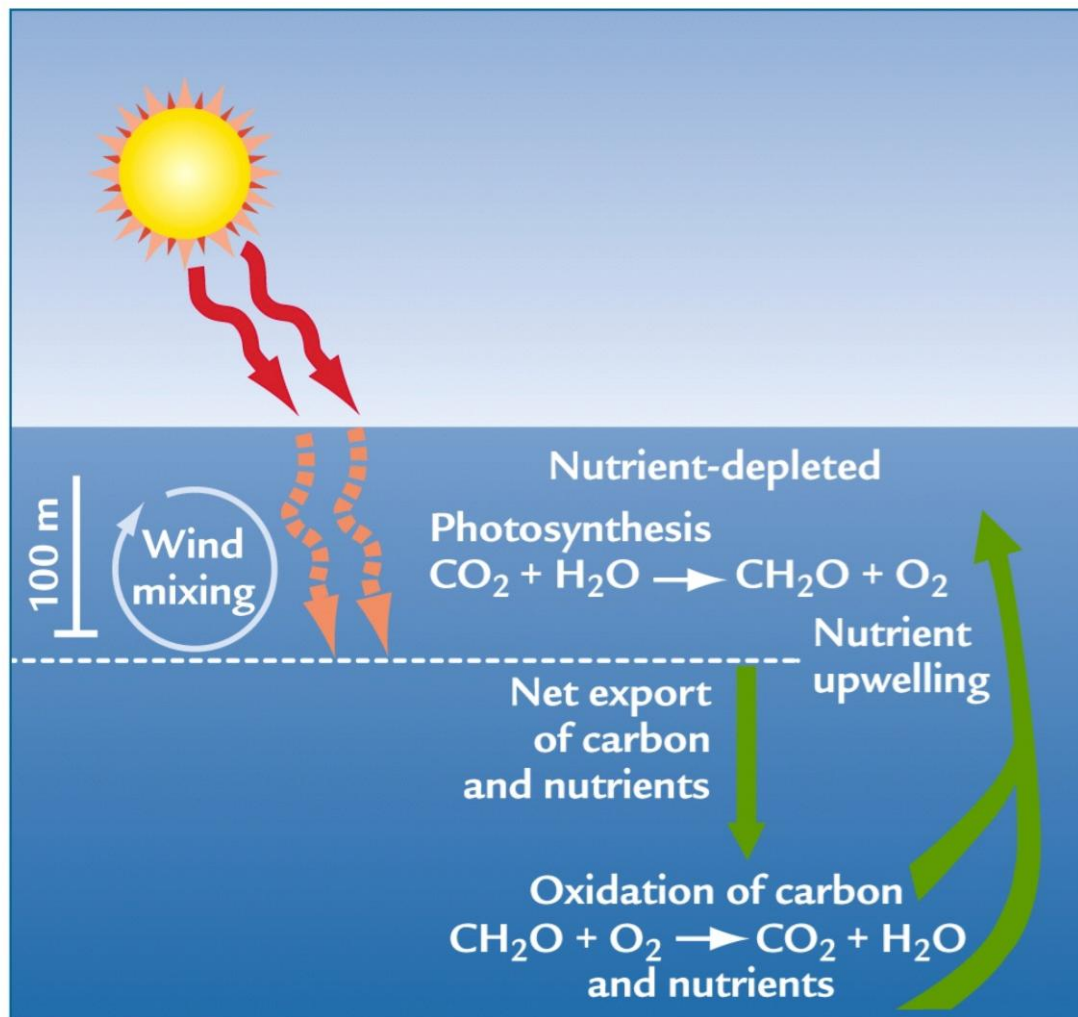


Gauche : niveau de chlorophylle (rouge plus fort).

Droite : température des eaux de surface (bleu plus froid).

I) Circulation de Surface

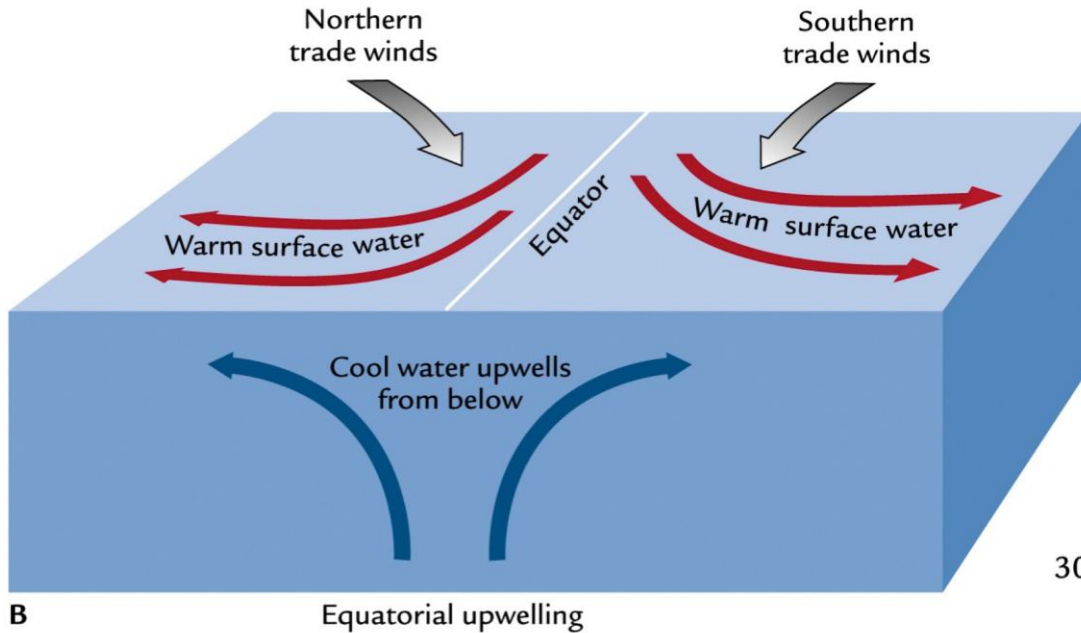
c) Mouvements des courants de surface



Nutriments = P, N, Fe, Si

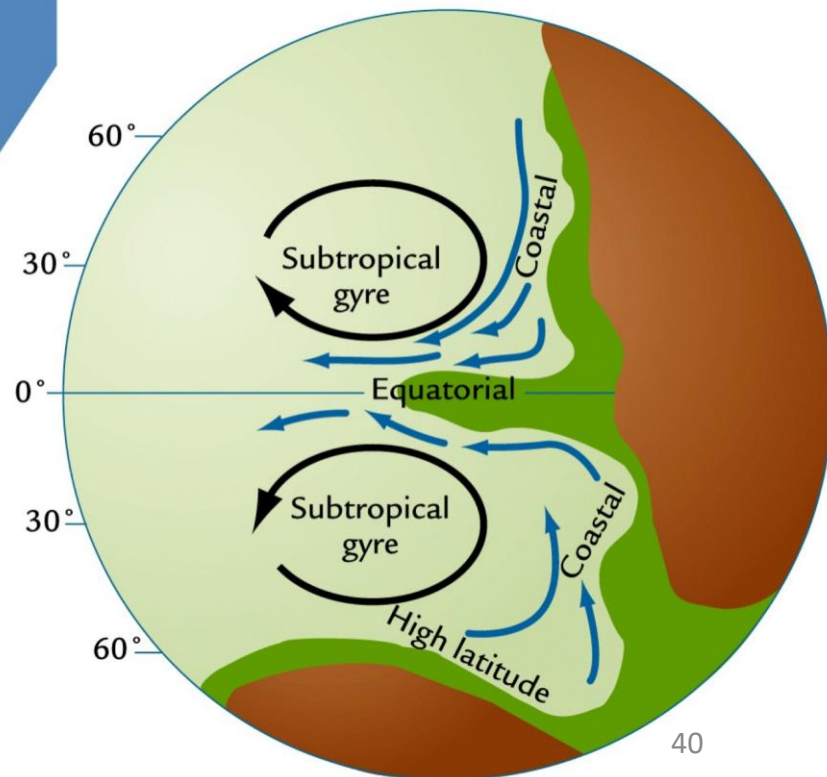
I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface



Divergence d'Ekman

Upwelling équatorial



I) Circulation de Surface

c) Mouvements des courants de surface

Divergence d'Ekman

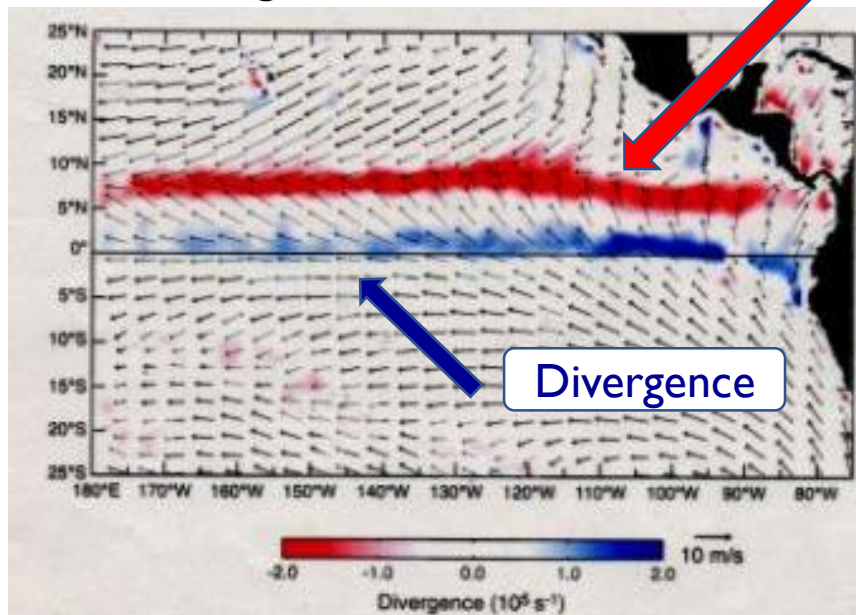


Figure 26. NASA QuikSCAT scatterometer 10-m vector wind averaged for November 1999 and the corresponding divergence field. Red and blue denote convergence and divergence, respectively.

Novembre

Convergence

Températures de Surface

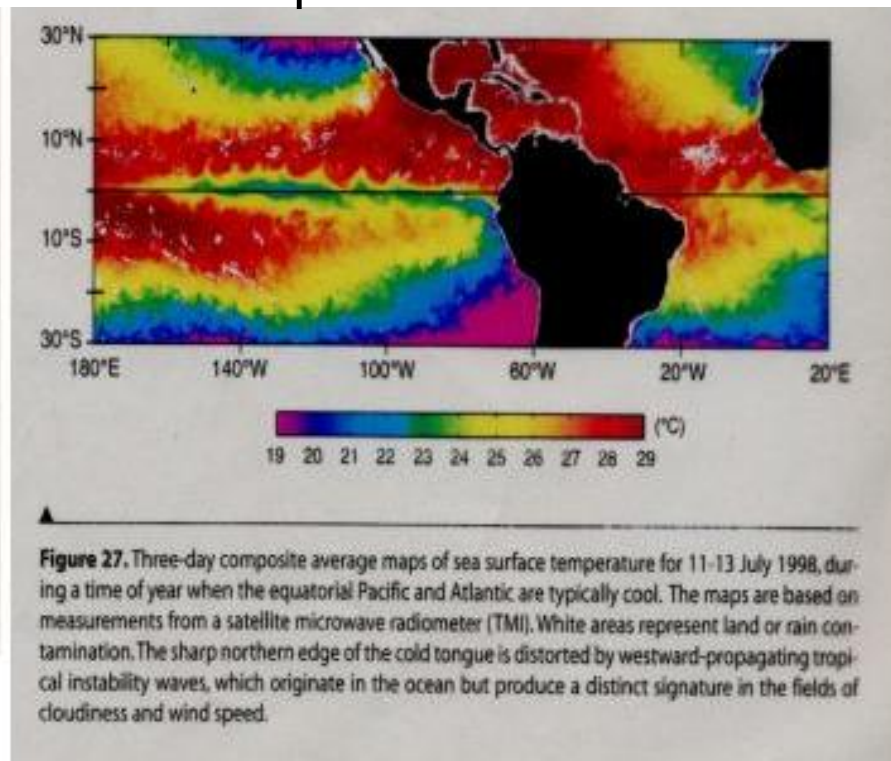


Figure 27. Three-day composite average maps of sea surface temperature for 11-13 July 1998, during a time of year when the equatorial Pacific and Atlantic are typically cool. The maps are based on measurements from a satellite microwave radiometer (TMI). White areas represent land or rain contamination. The sharp northern edge of the cold tongue is distorted by westward-propagating tropical instability waves, which originate in the ocean but produce a distinct signature in the fields of cloudiness and wind speed.

Juillet

Contre courant équatorial - Divergence équatoriale

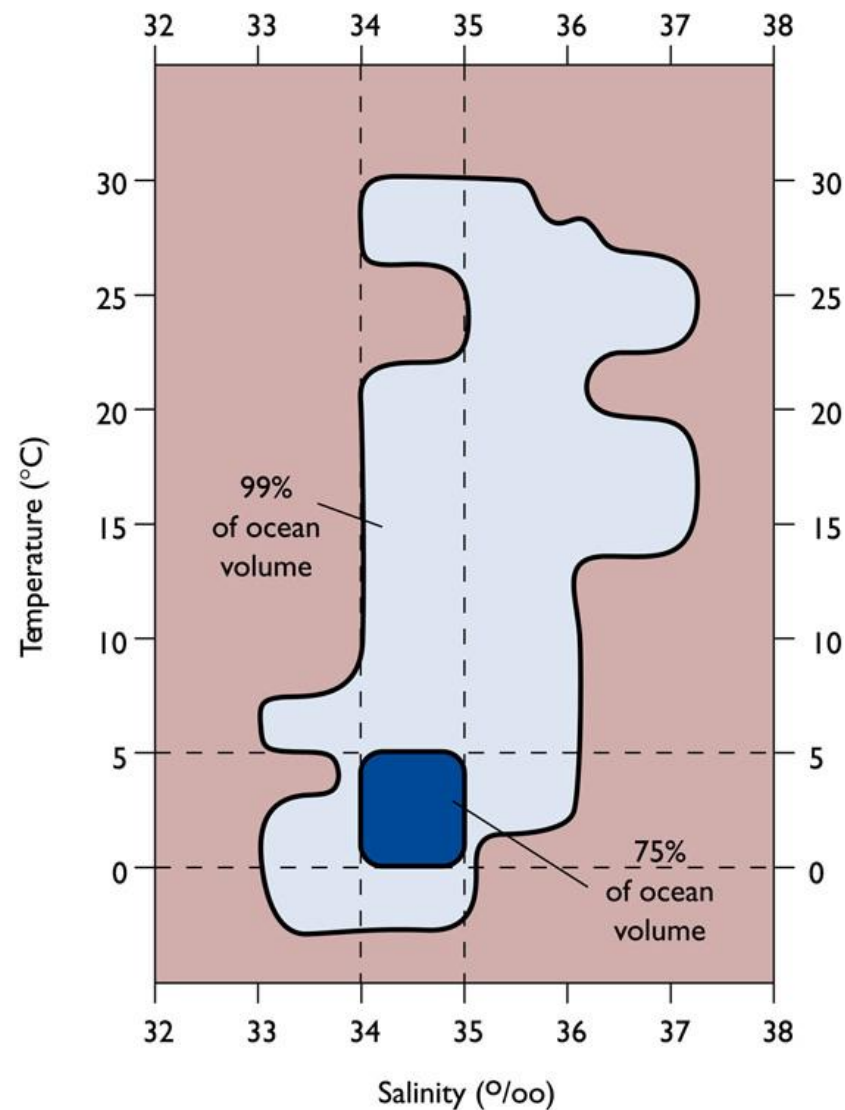
II/ Circulation Thermohaline

2) Circulation Thermohaline

- Les gyres déplacent la **chaleur** et le **sel**
- Les variations de **DENSITE** entraînent des mouvements verticaux de masses d'eau
- Formation de “masses d'eau”, caractérisées par T (°C), S (‰)

2) Circulation Thermohaline

- Les gyres déplacent la **chaleur** et le **sel**
- Les variations de **DENSITE** entraînent des mouvements verticaux de masses d'eau
- Formation de “masses d'eau”, caractérisées par T (°C), S (‰)



Gammes de T° et S‰ des masses d'eau de mer

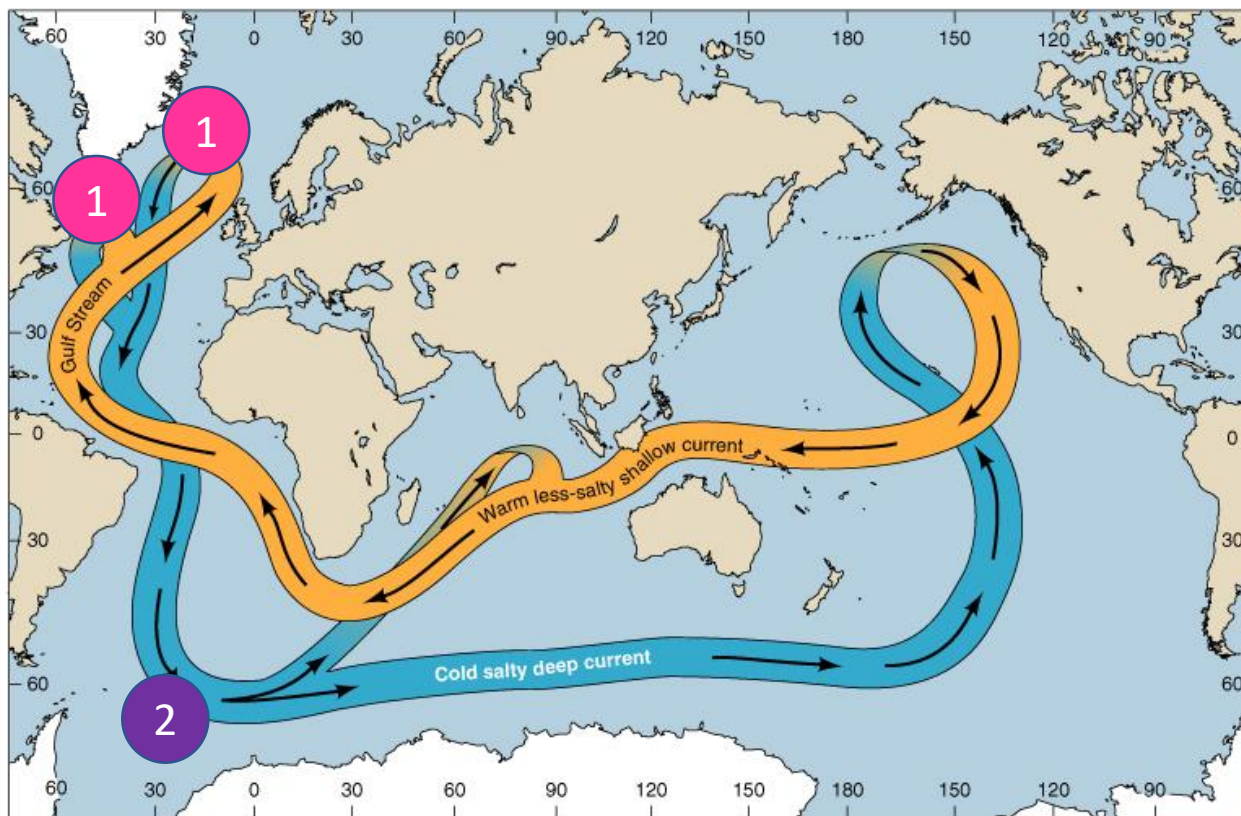
2) Circulation Thermohaline

Formation des masses d'eaux profondes

- Les eaux du fond des océans sont froides et salées (densité en profondeur plus élevée)
- Elles se sont formées aux **hautes latitudes Nord et Sud** de l'Atlantique

2) Circulation Thermohaline

Formation des masses d'eaux profondes



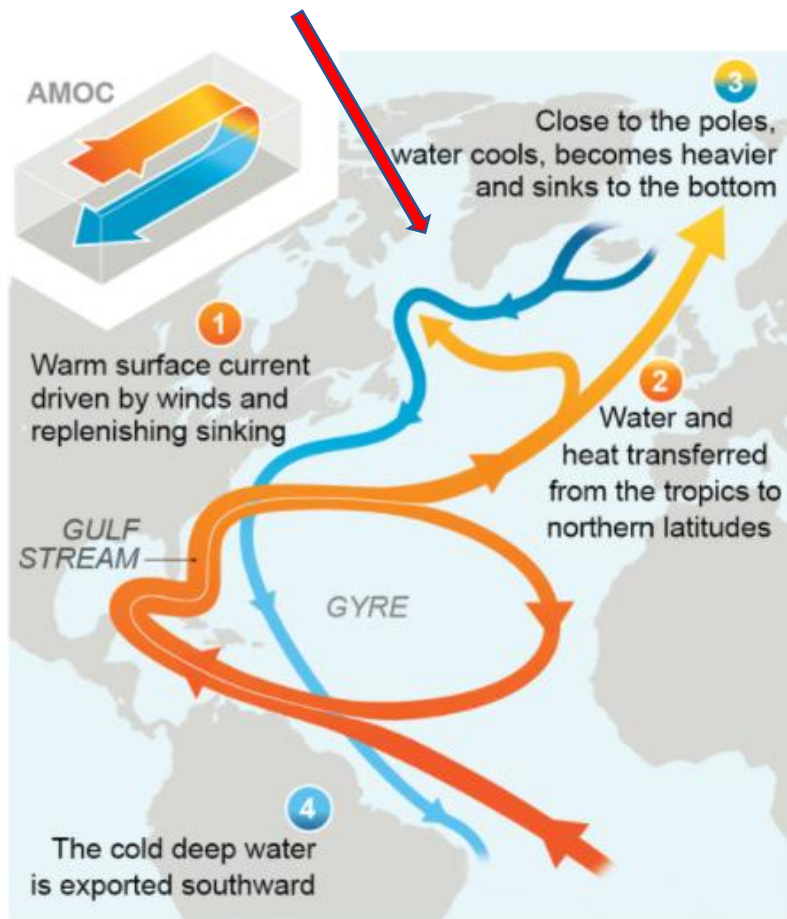
1) North Atlantic Deep Water (NADW)

2) Antarctic Bottom Water (AABW)

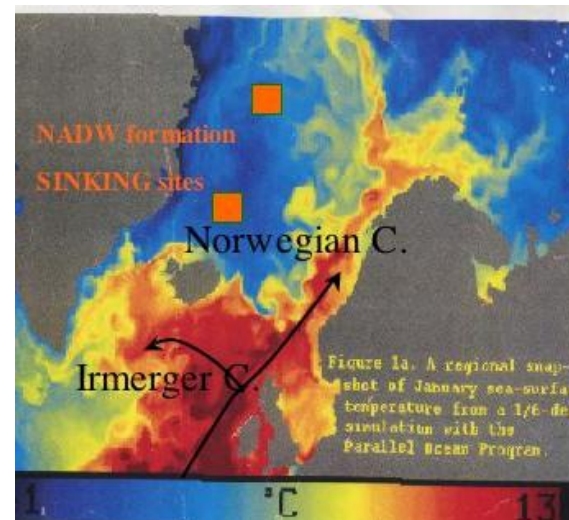
2) Circulation Thermohaline

a) Formation de la NADW (Atlantique Nord)

Mer du Labrador



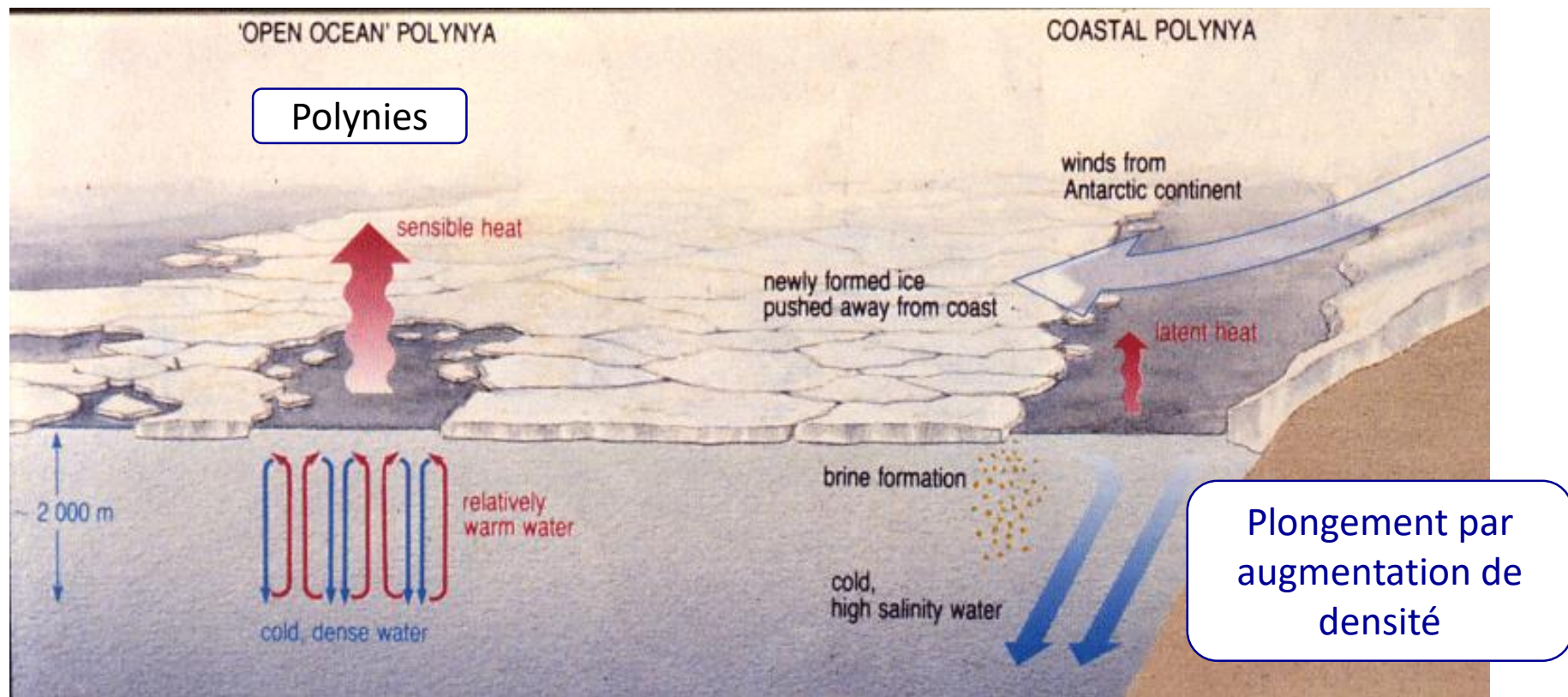
Mer de Norvège



Remontée d'eaux chaudes salées vers l'Atlantique Nord

2) Circulation Thermohaline

a) Formation de la NADW (Atlantique Nord)



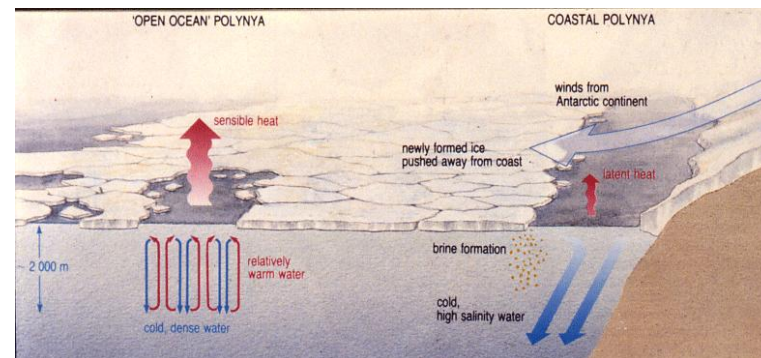
- Accumulation d'eaux salées sous la banquise (en hiver)

2) Circulation Thermohaline

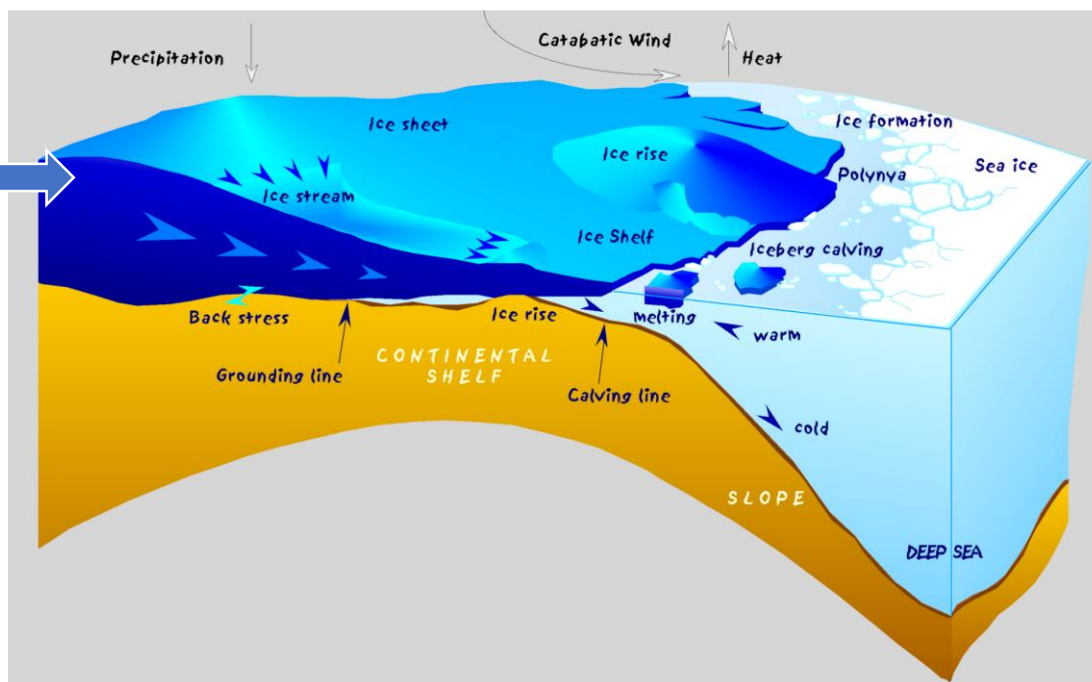
a) Formation de la NADW (Atlantique Nord)

Polynies

- Rôle des Vents d'Est polaires (Catabatiques) dans la création de polynies



Zone de Haute Pression



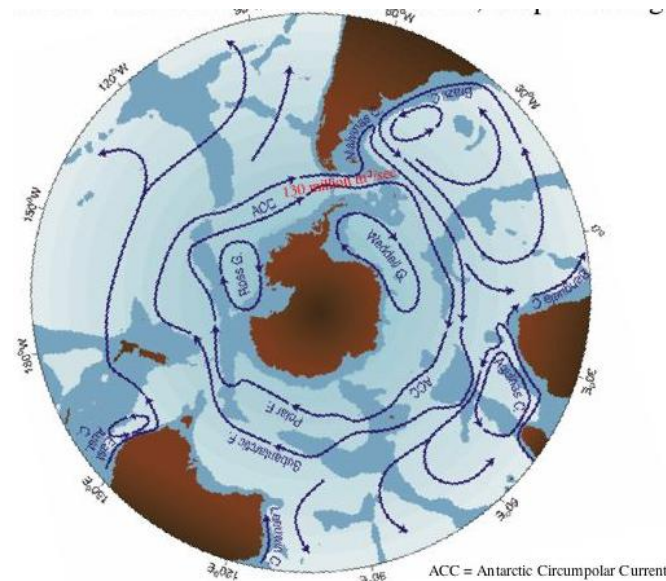
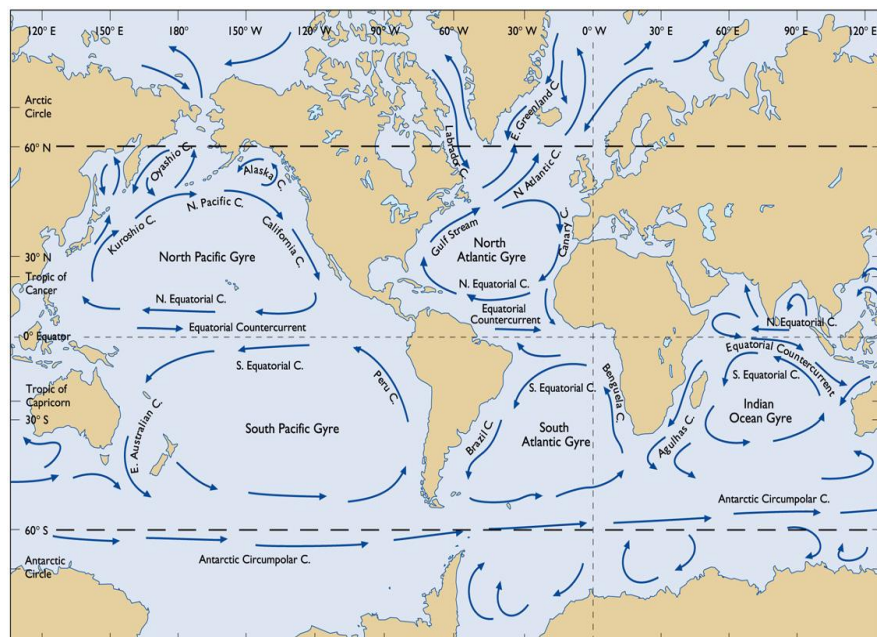
2) Circulation Thermohaline

a) Formation de la NADW (Atlantique Nord)



2) Circulation Thermohaline

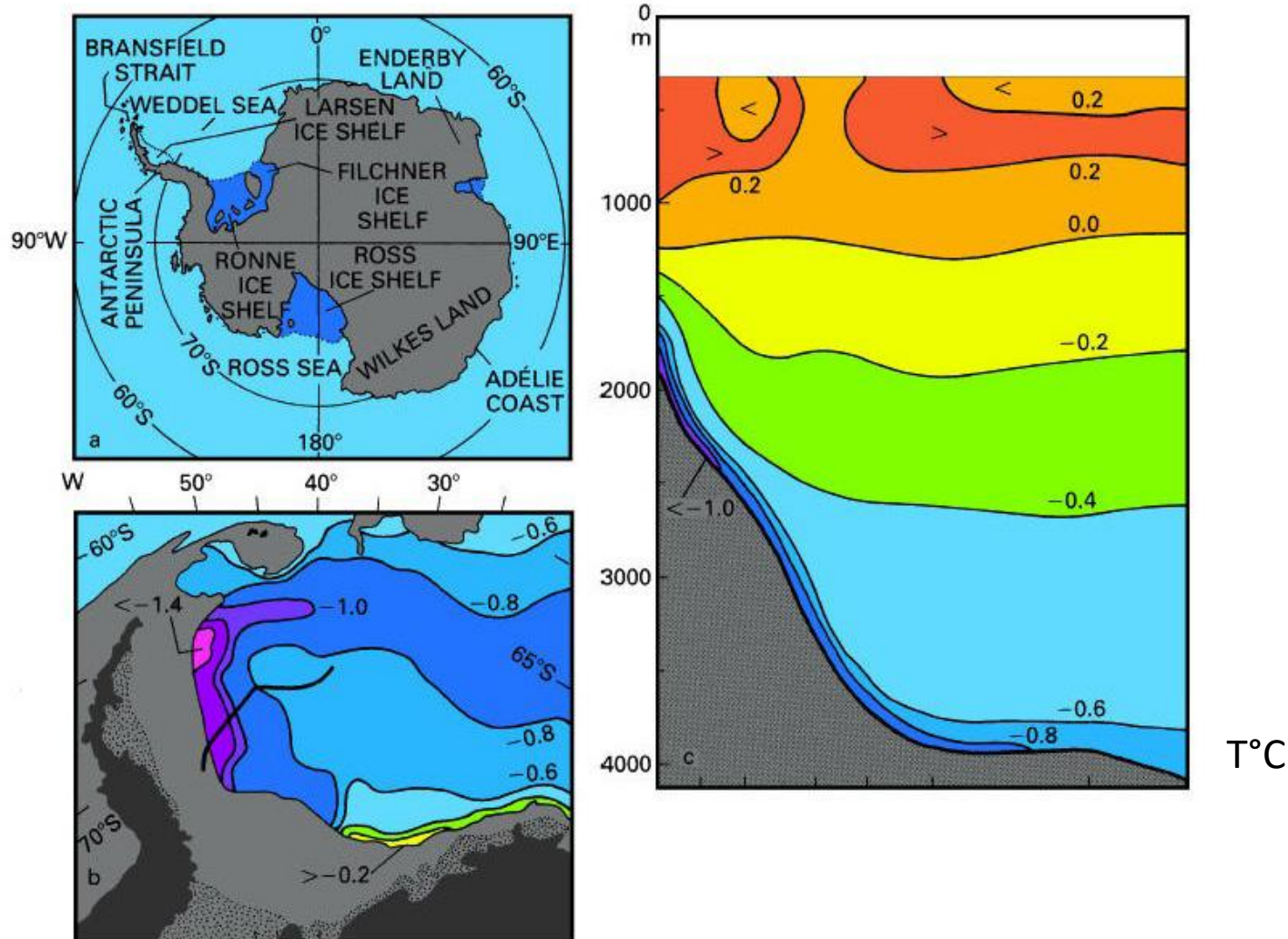
b) Formation de la AABW (Atlantique Sud)



Masses d'eau les plus froides et les plus denses (isolation thermique de l'Antarctique par le Circumpolaire antarctique)

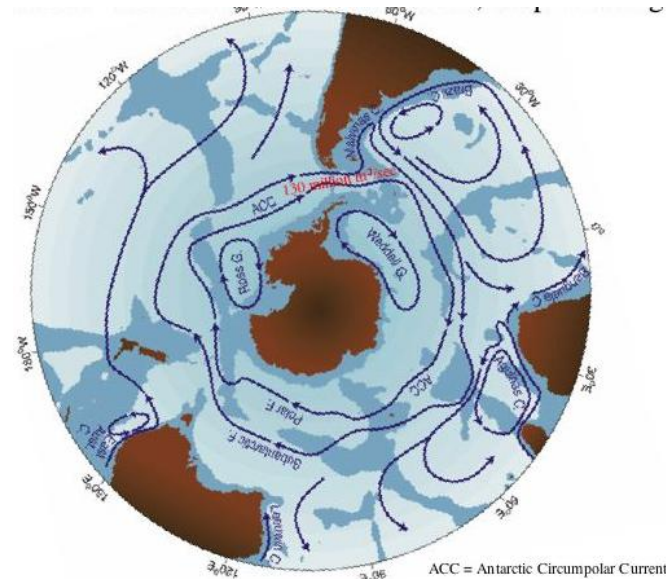
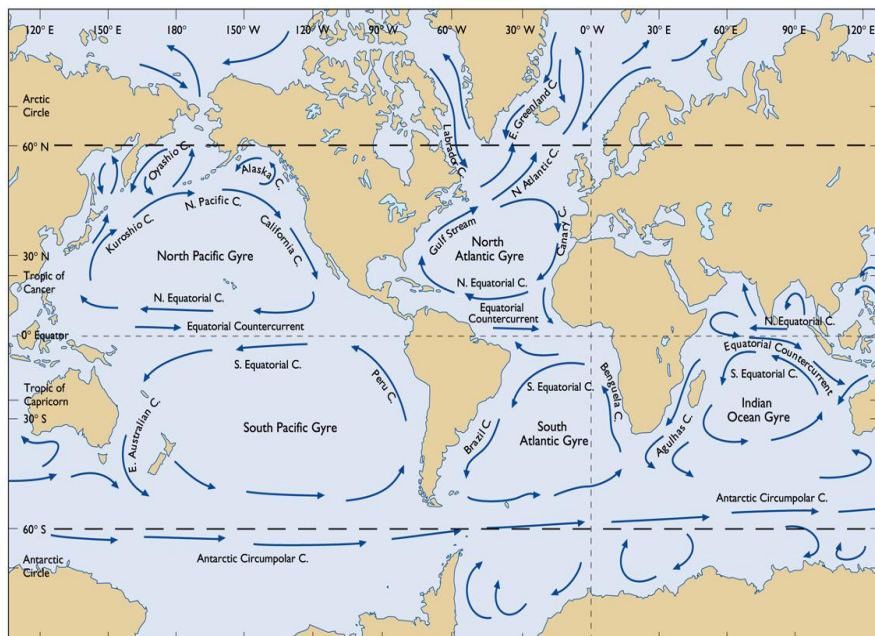
2) Circulation Thermohaline

b) Formation de la AABW (Atlantique Sud)



2) Circulation Thermohaline

b) Formation de la AABW (Atlantique Sud)



AABW est moins salée mais plus froide que la NADW

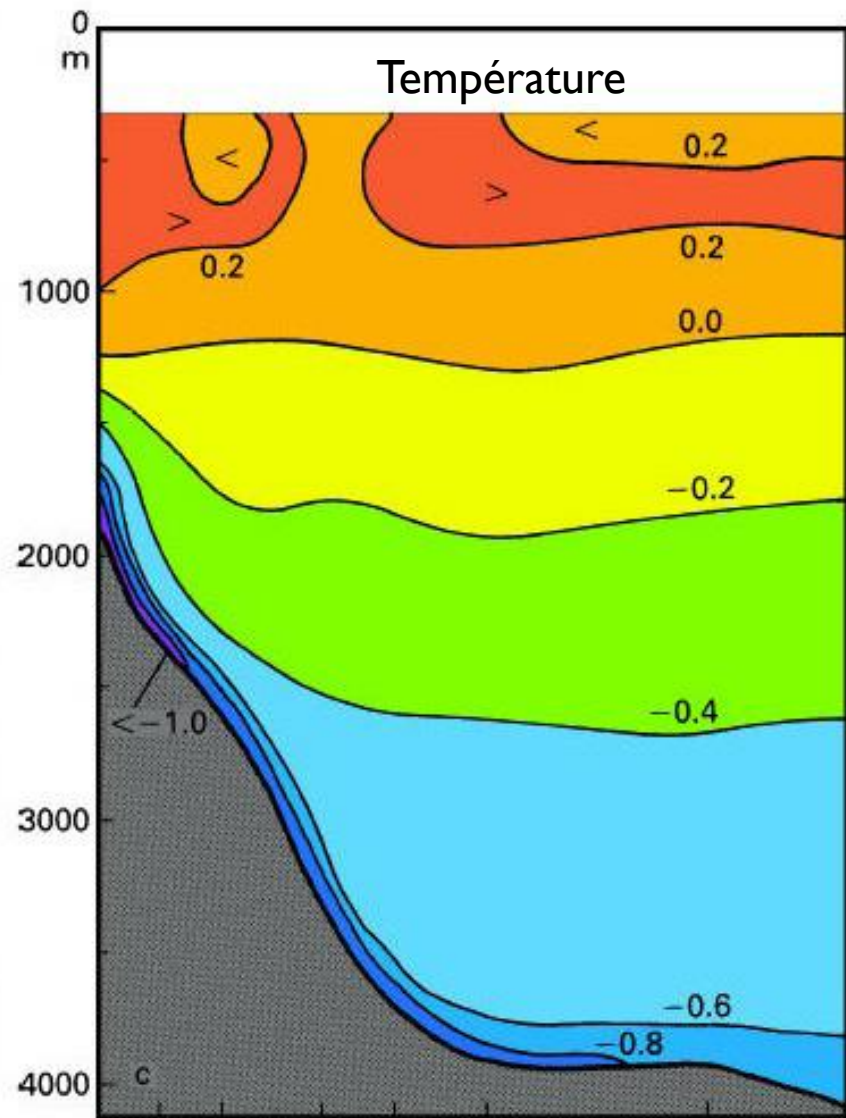
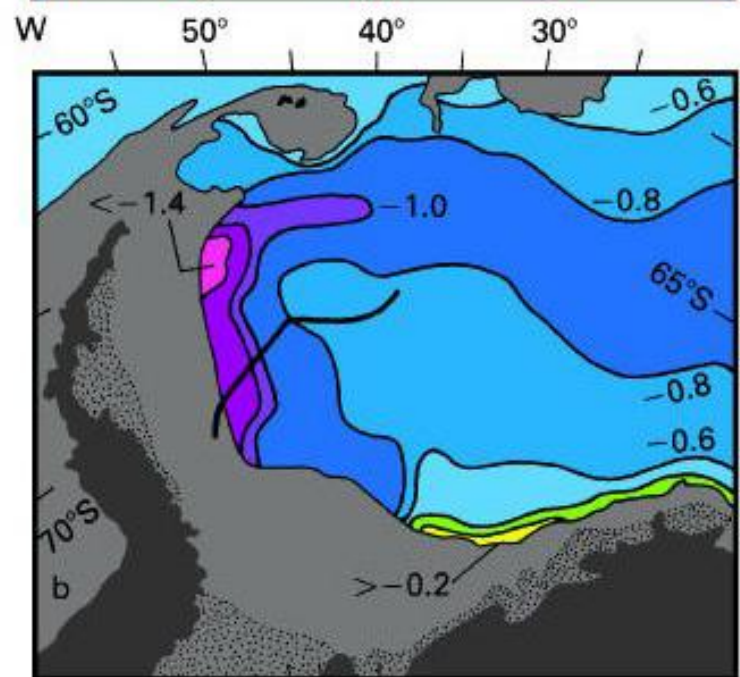
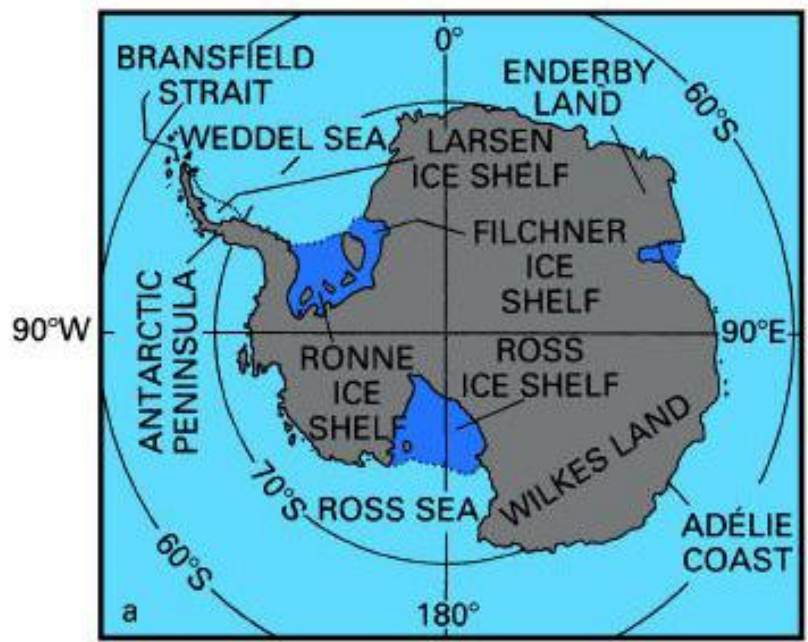
2) Circulation Thermohaline

b) Formation de la AABW

AABW se forme dans les zones des polynies de l'Antarctique

- La mer de Weddell Sea est gelée en hiver.
- Formation de zones de polynies.





Courant **Circumpolaire Antarctique**
Barrière thermique

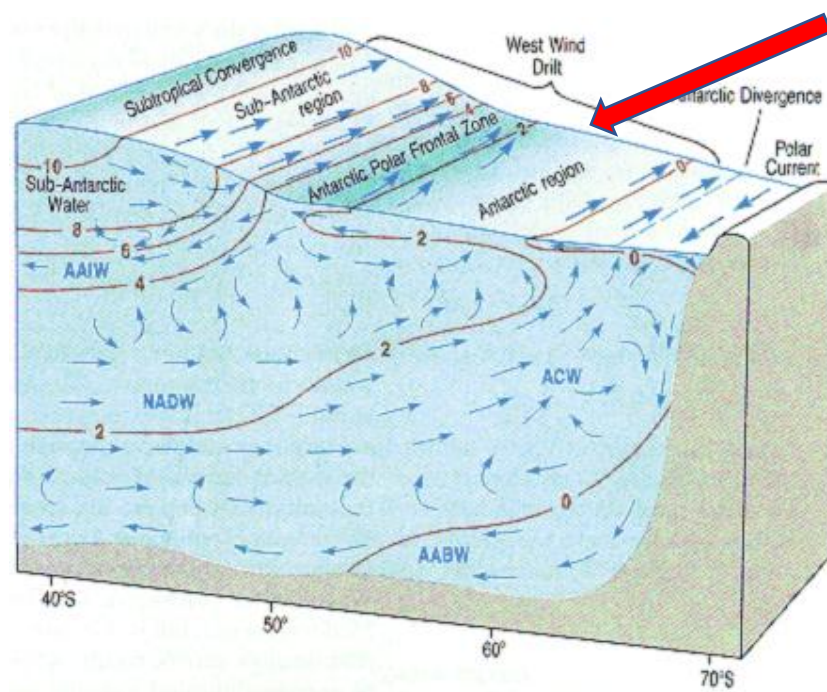
2) Circulation Thermohaline

c) Formation de la AAIW

Front polaire : Zone d'extension maximale de la banquise saisonnière

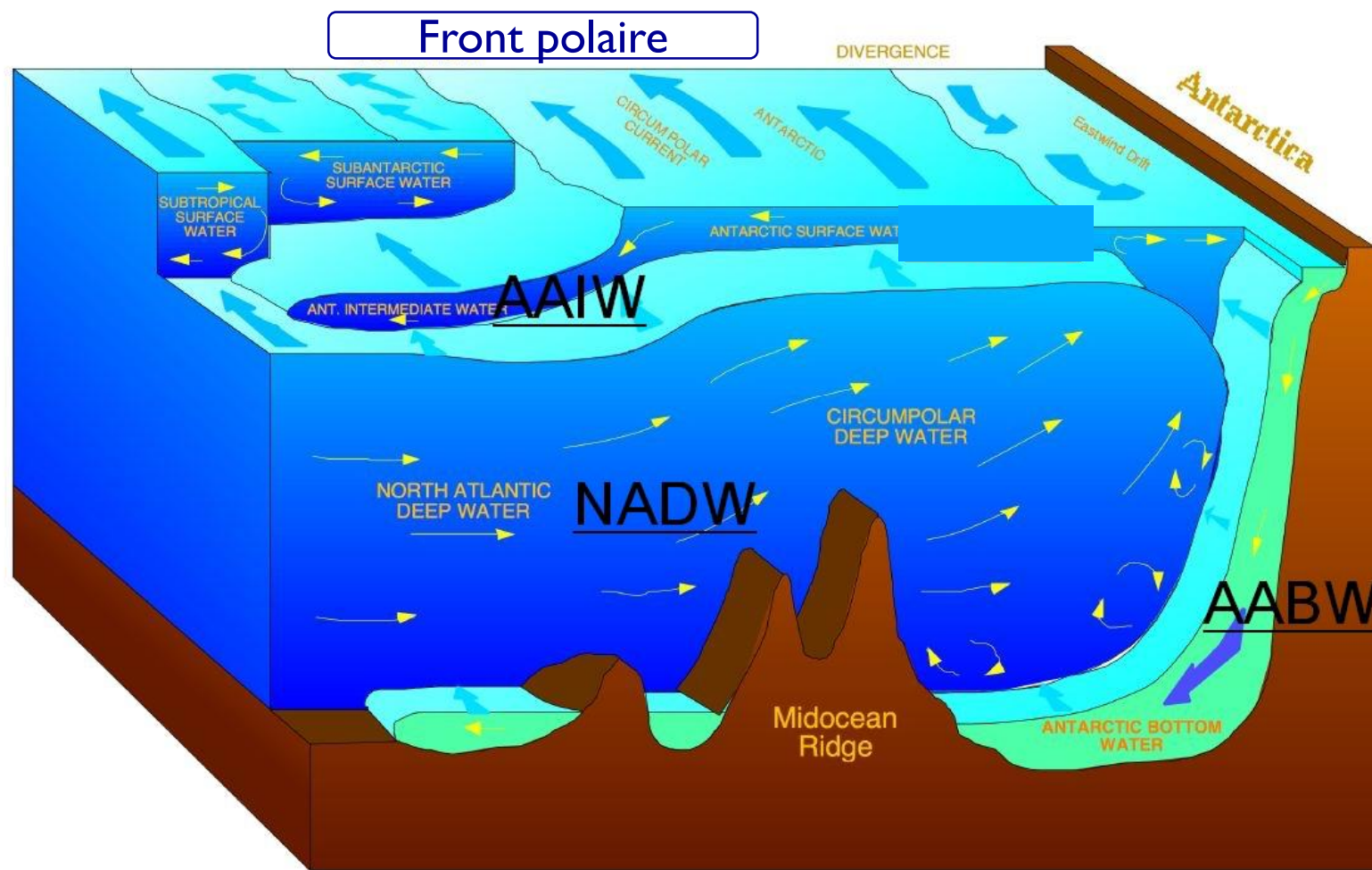
Antarctic Atlantic Intermediate Water (AAIW)

Circumpolaire Antarctique



AAIW se forme au niveau du front polaire Antarctique (entre 50-60°S). Les westerlies entraînent un transport d'Ekman il y a convergence des vents et la plongée d'eau froide (**Downwelling**).

2) Circulation Thermohaline



AABW « sous » NADW qui vient du nord. AAIW peut profonde

2) Circulation Thermohaline

Circumpolaire A., plaque tournante des courants

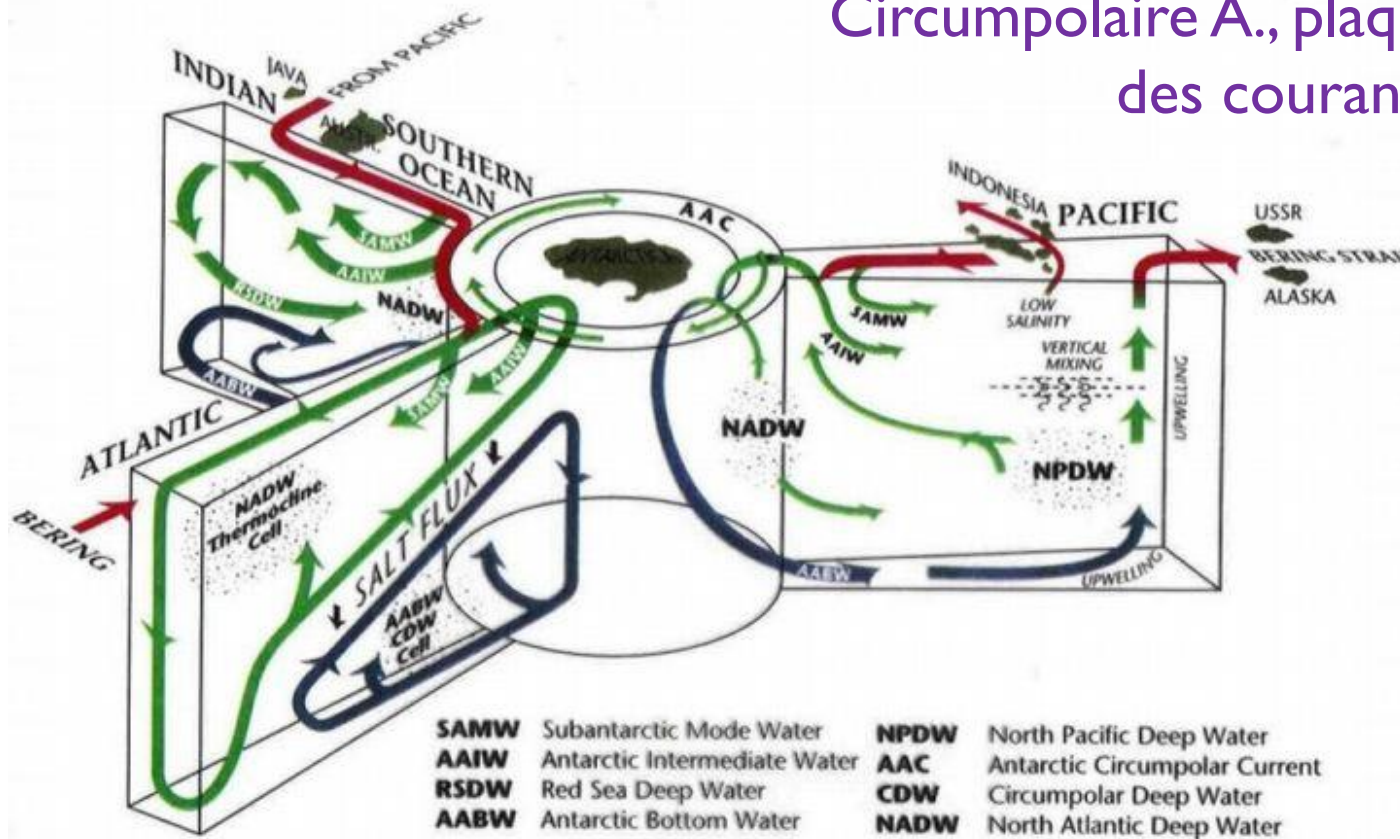
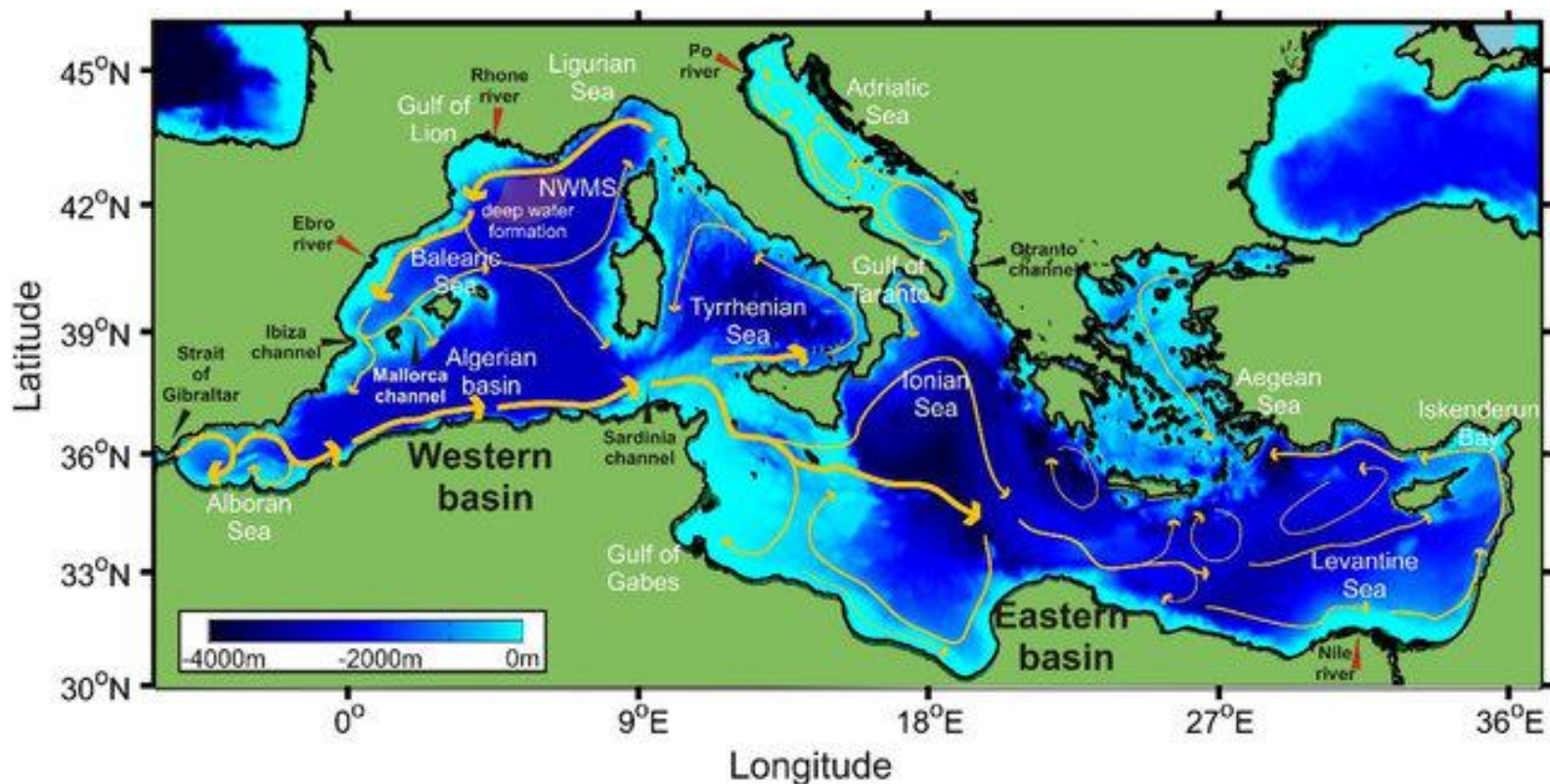


Figure I-90: Three-dimensional meridional global ocean slices that depict NADW formation and replacement, adapted with minor changes from A. Gordon (personal communication).

2) Circulation Thermohaline

d) Cas de la Méditerranée



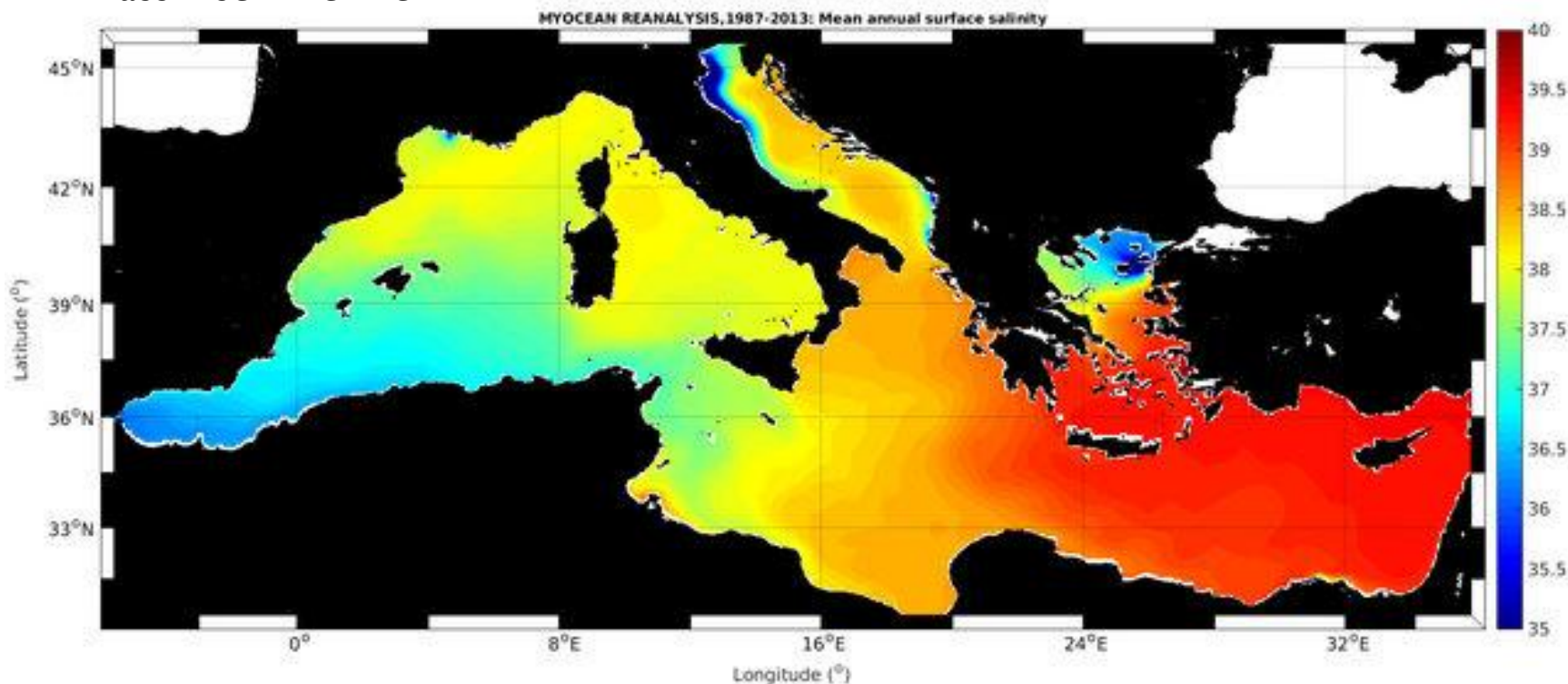
Mise en place d'une circulation thermohaline propre

2) Circulation Thermohaline

d) Cas de la Méditerranée

Bassin semi-fermé

Salinité de surface (‰)

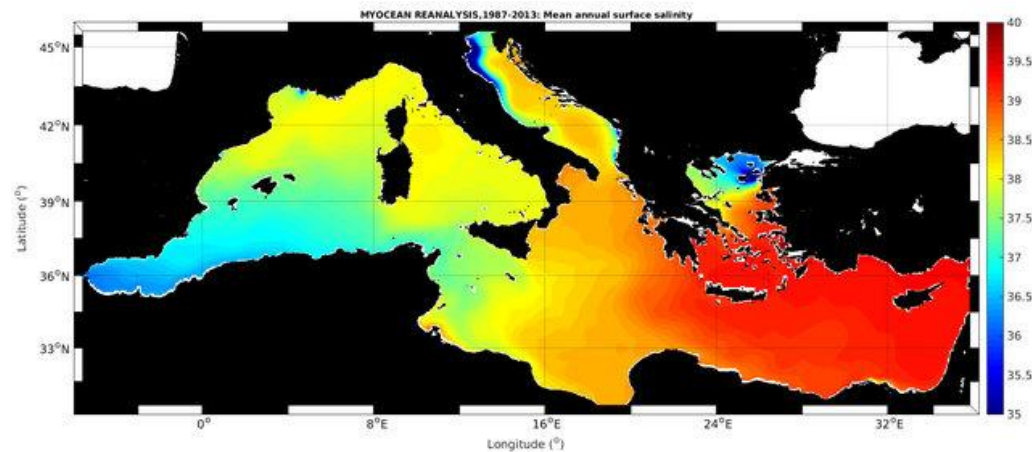
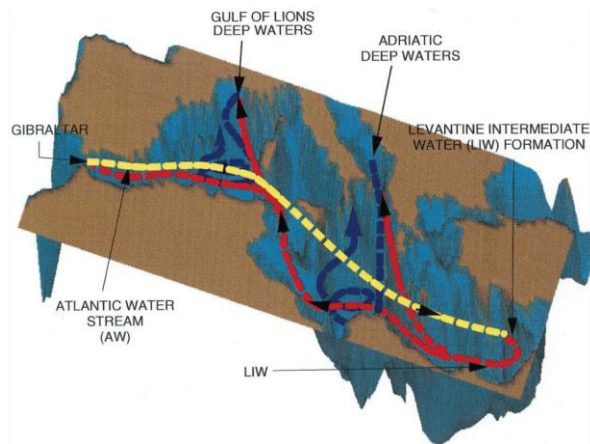


1) L'évaporation l'emporte sur les précipitations = **augmentation de la salinité**

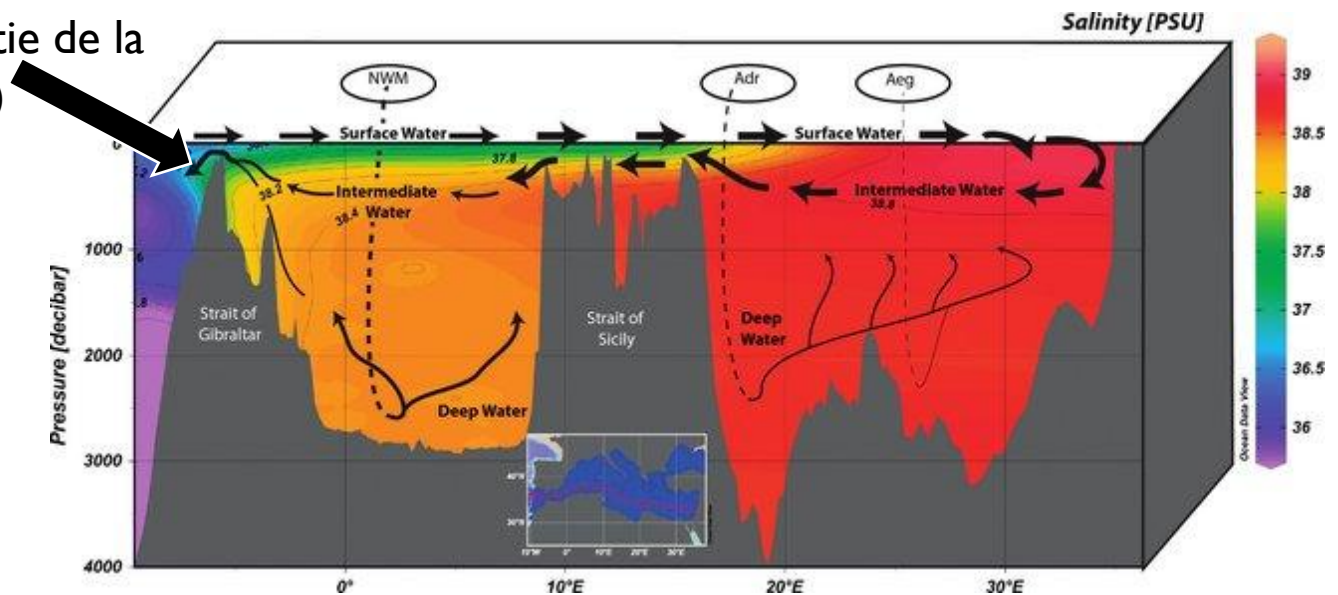
2) A l'automne et en hiver, les eaux salées se refroidissent et **plongent**.

2) Circulation Thermohaline

d) Cas de la Méditerranée



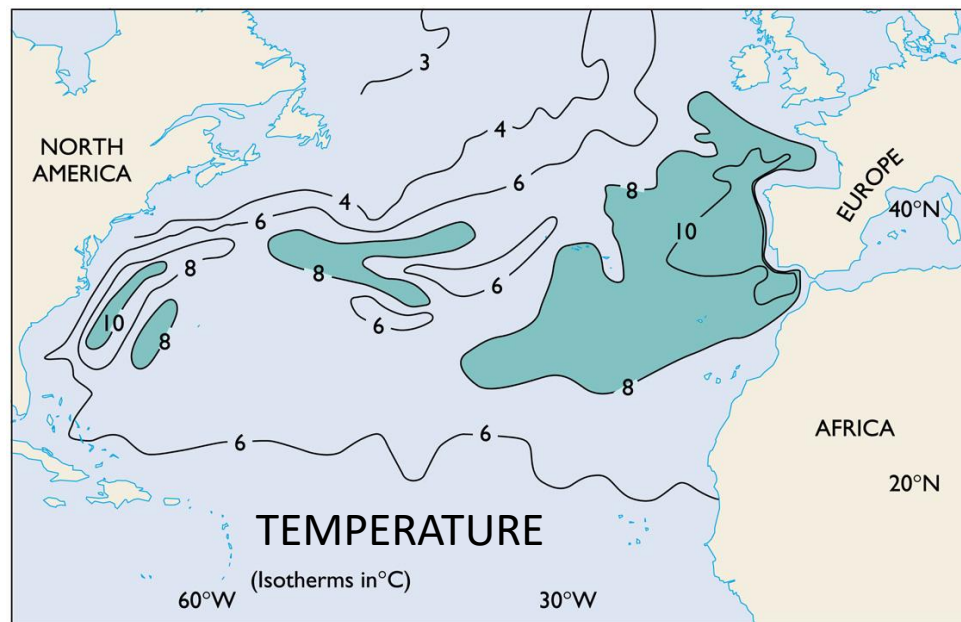
MOW : Mediterranean Outflow Waters (eaux de sortie de la Méditerranée)



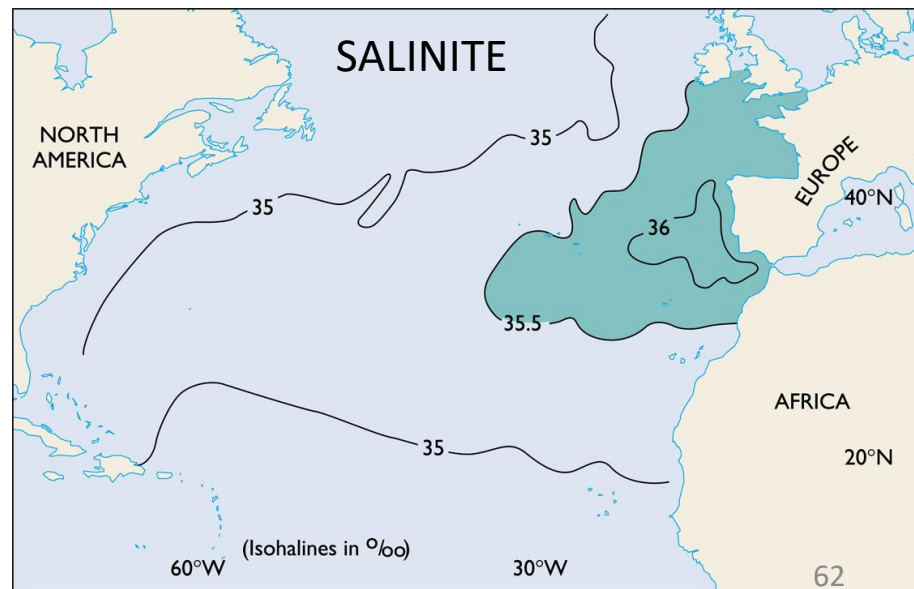
2) Circulation Thermohaline

d) Cas de la Méditerranée

- MOW à 1000 m de profondeur.
- L'Effet Coriolis dévie la MOW vers le Nord.
- Les MOW via le **Gulf Stream** apportent des eaux salées en Atlantique Nord.



(a) TEMPERATURE AT 1,000-METER DEPTH



(b) SALINITY AT 1,000-METER DEPTH

III/ Traceurs de la circulation océanique

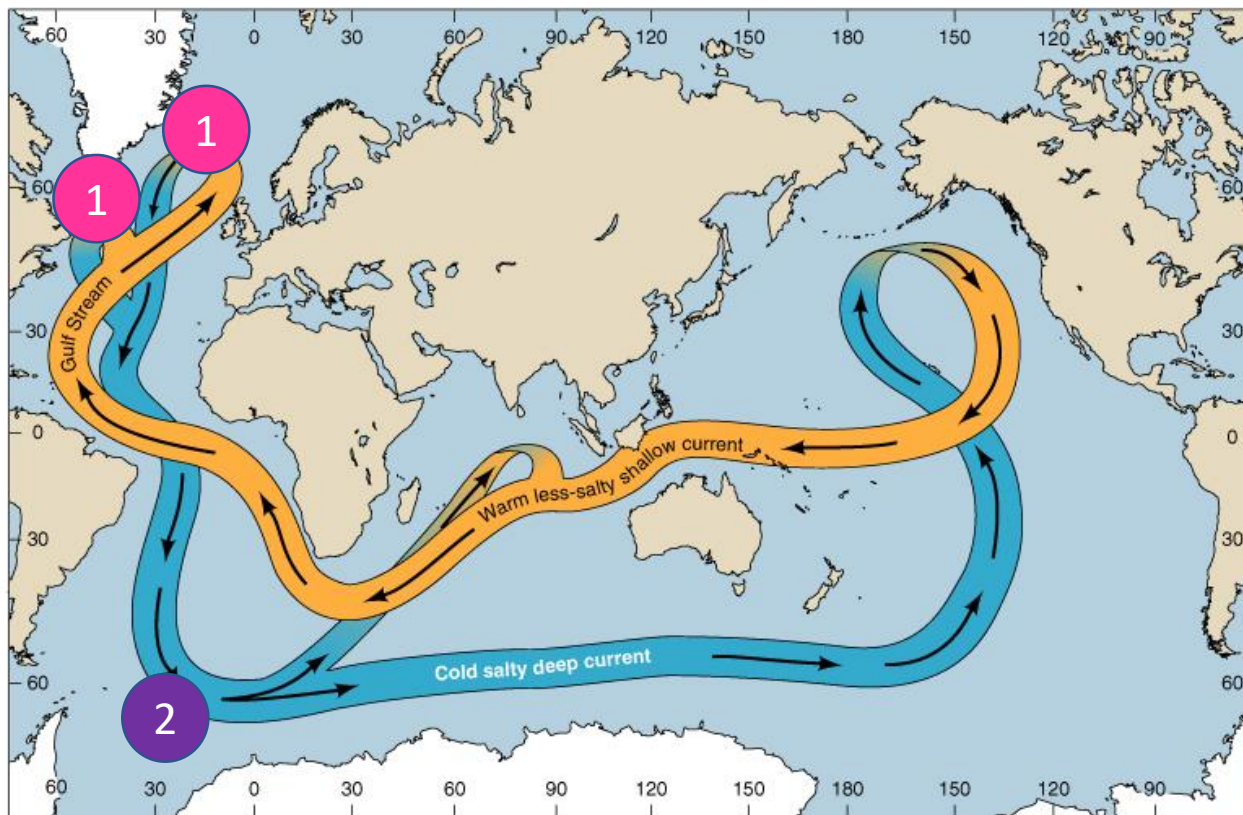
III/ Tracer la circulation océanique profonde

III/ Tracer la circulation océanique

Durée du trajet des masses d'eau?



Les masses d'eau conservent leurs propriétés



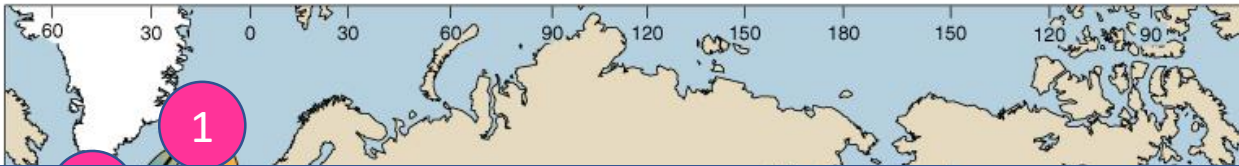
1) North Atlantic Deep Water (NADW)

2) Antarctic Bottom Water (AABW)

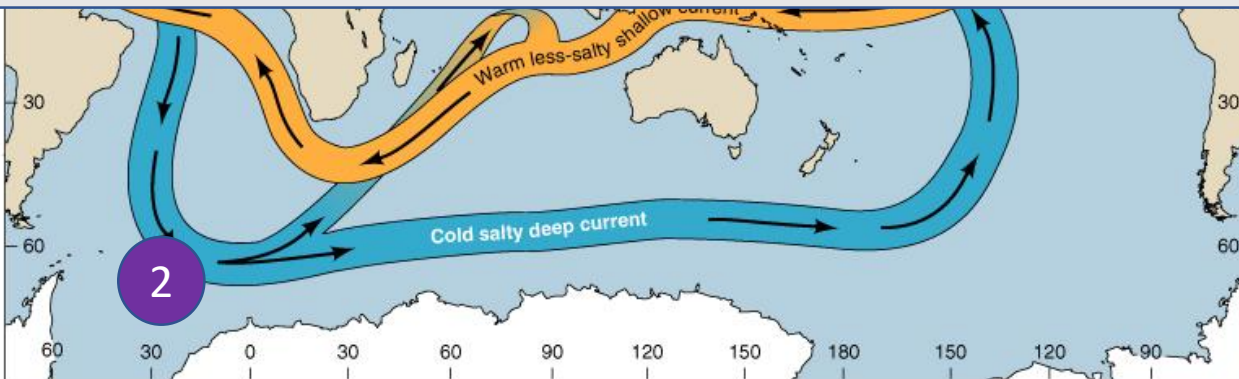
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

III/ Tracer la circulation océanique

Durée du trajet des masses d'eau?



Il est possible de « dater » le plongement des masses d'eau par datation ^{14}C qui est un isotope cosmogénique présent dans l'atmosphère.



2) Antarctic Atlantic Bottom Water (AABW)

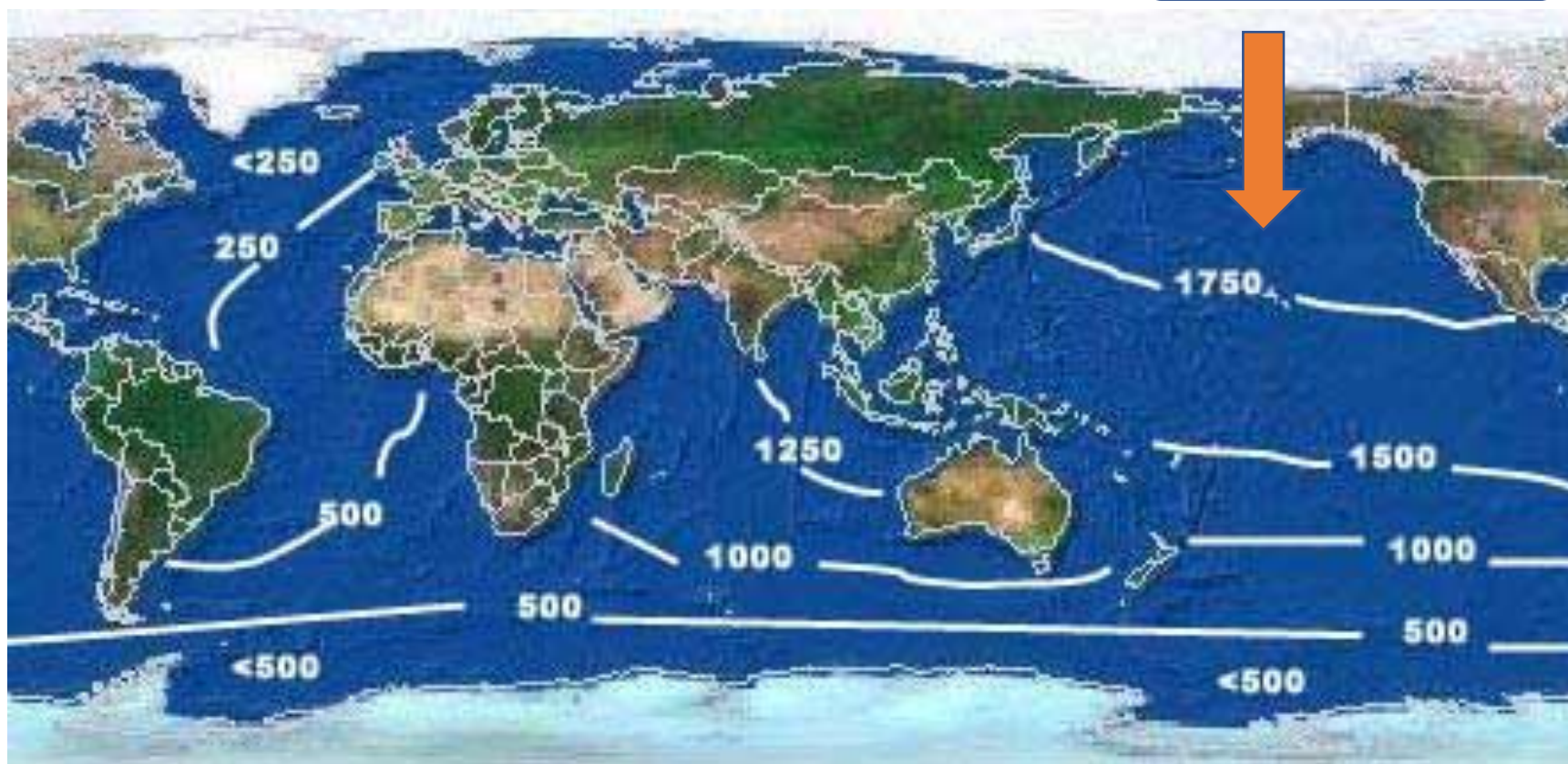
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

$(T_{1/2} \text{ } ^{14}\text{C} = 5700 \text{ ans})$

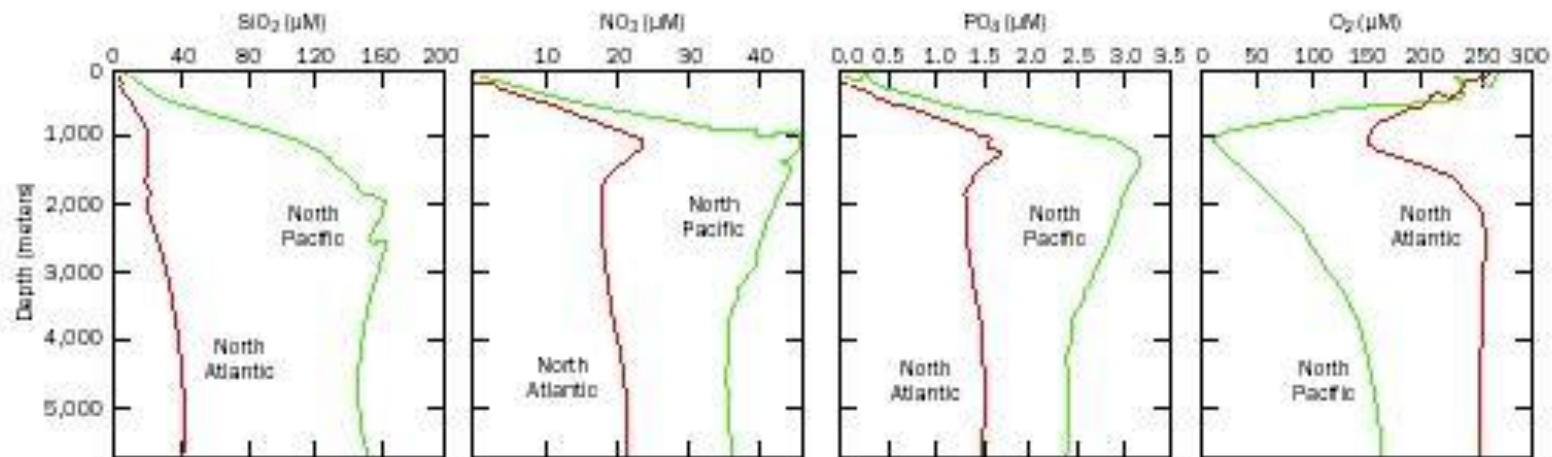
III/ Tracer la circulation océanique

“Age” de l’océan profond vers 3000 m (^{14}C)

Eaux plus vieilles,
moins oxygénées

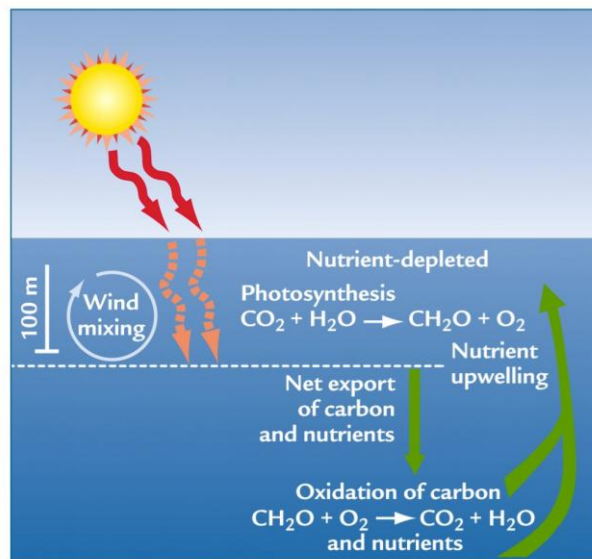


III/ Tracer la circulation océanique

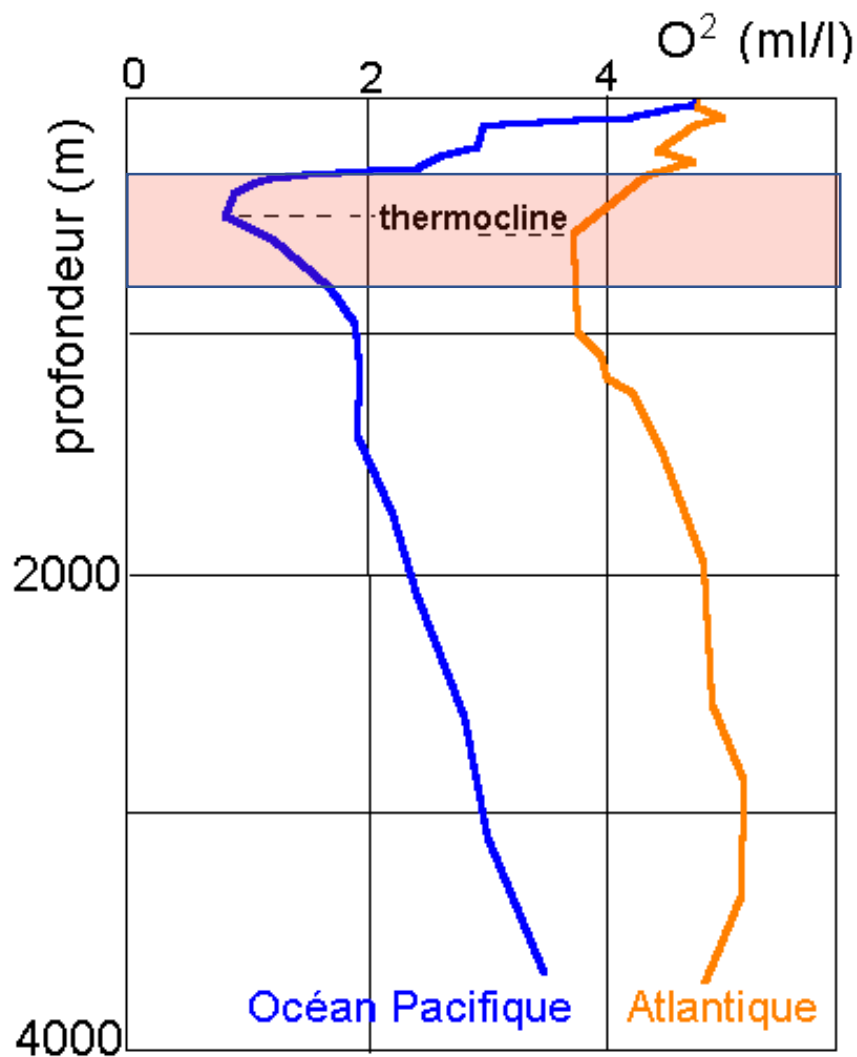


Plus de productivité
dans l'océan
Pacifique

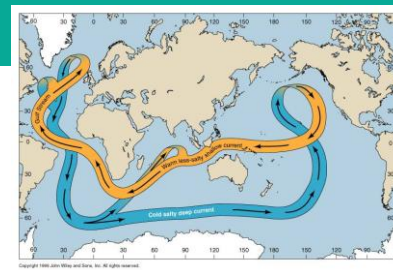
Zone minimum oxygène



III/ Tracer la circulation océanique



Zone minimum oxygène (500 – 1000 m de profondeur)



A retenir:

1) Relation circulations atmosphérique et océaniques

- Circulation de Surface (formation et sens des gyres, exemple du Gulf Stream)
- Répartition énergie calorifique

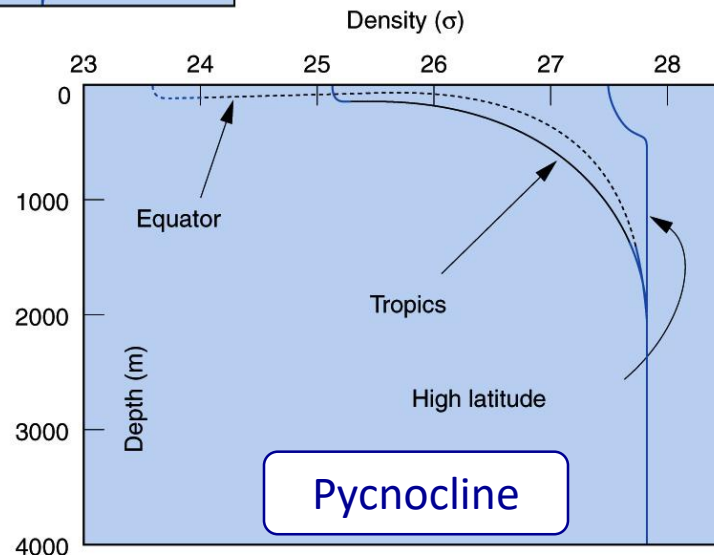
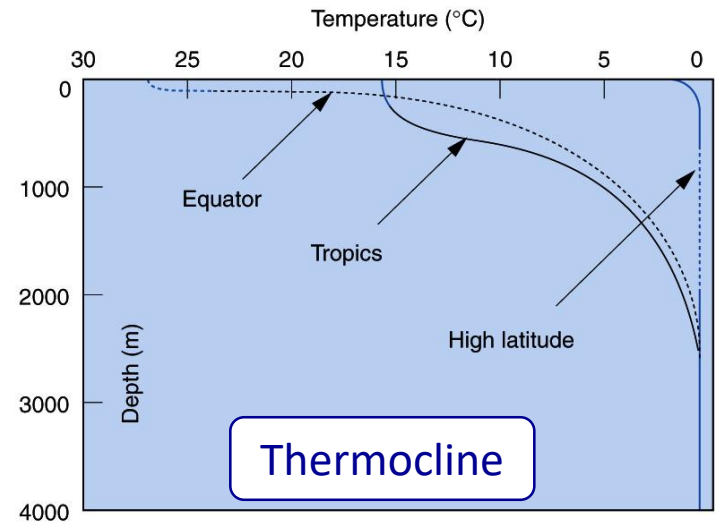
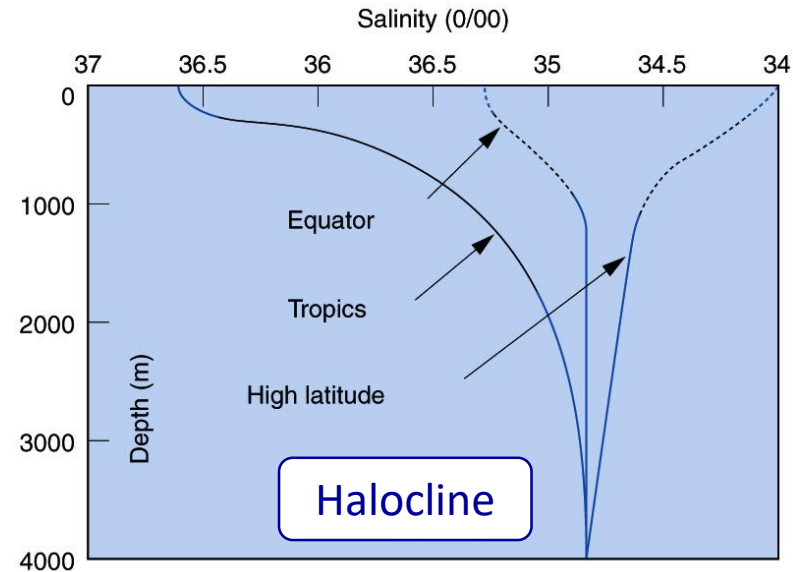
2) Circulation de Surface

- Transport d'Ekman
- Upwelling (pompage Ekman, impact pour les nutriments) et Downwelling (Ventilation)
- Fonctionnement du Gulf Stream

3) Circulation thermohaline

- Zones de formation des masses d'eaux profondes (relation salinité/température)
- Mécanismes associés
- Différences majeures entre les principales masses d'eaux
- Rôle du courant Circumpolaire antarctique dans le redistribution des masses d'eaux à travers les bassins océaniques
- Différences O_2 / nutriments entre les océans

Régions de Formation des eaux profondes



*Différences
en fonction
de la latitude*