

# Chapitre 2

## **Composition et propriétés de l'eau de mer**

Généralités

Eau douce

Sels dissous (salinité)

Température

Masses d'eau

Le son dans l'eau de mer

# Origine de l'eau sur Terre ?

**théorie classique** : dégazage progressif des couches profondes de la planète (vapeur d'eau et autres gaz)

**actuellement** : apport significatif par météorites et comètes entrant dans l'atmosphère beaucoup plus dense durant les premiers milliards d'année de la vie de la Terre

► existence d'eau liquide sur Terre primordiale pour apparition de la vie

# Cycle de l'eau

- E évaporation
- Q transport de vapeur d'eau par l'atmosphère
- P précipitations
- R "runoff" fluvial et sous-terrain

Temps de résidence =  $\frac{\text{volume réservoir}}{\text{flux}}$

océans : 4000 ans  
 continents : 400 ans  
 atmosphère : 12 jours

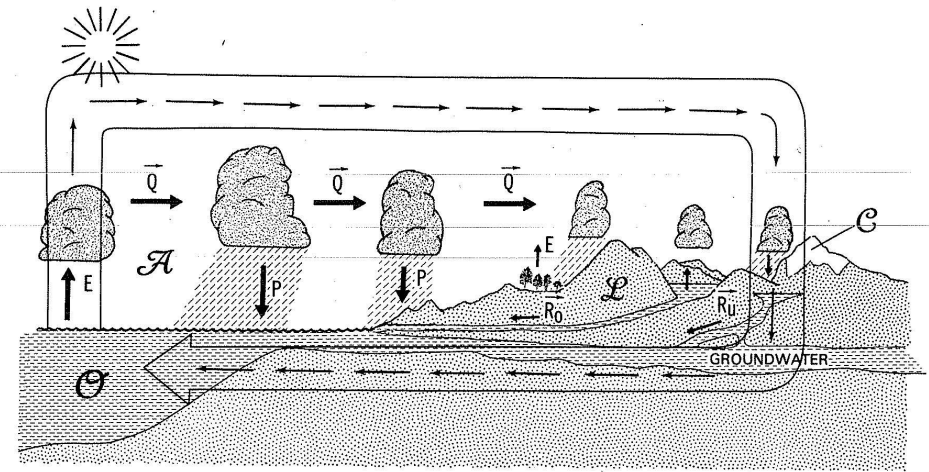


FIGURE 12.1. Schematic diagram of the atmospheric and terrestrial branches of the hydrological cycle showing the importance of evaporation  $E$ , advection of water vapor in the atmosphere  $Q$ , precipitation  $P$ , river runoff  $R_0$ , and underground runoff  $R_u$ .

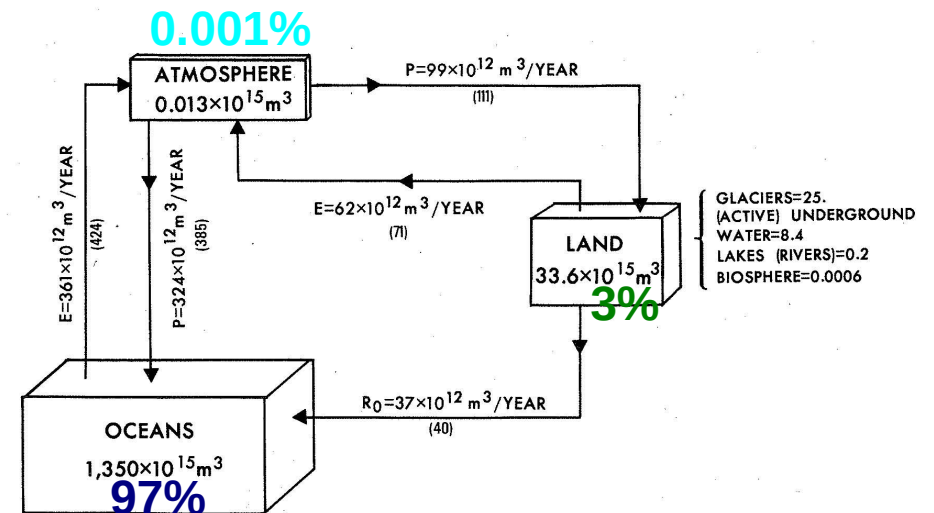
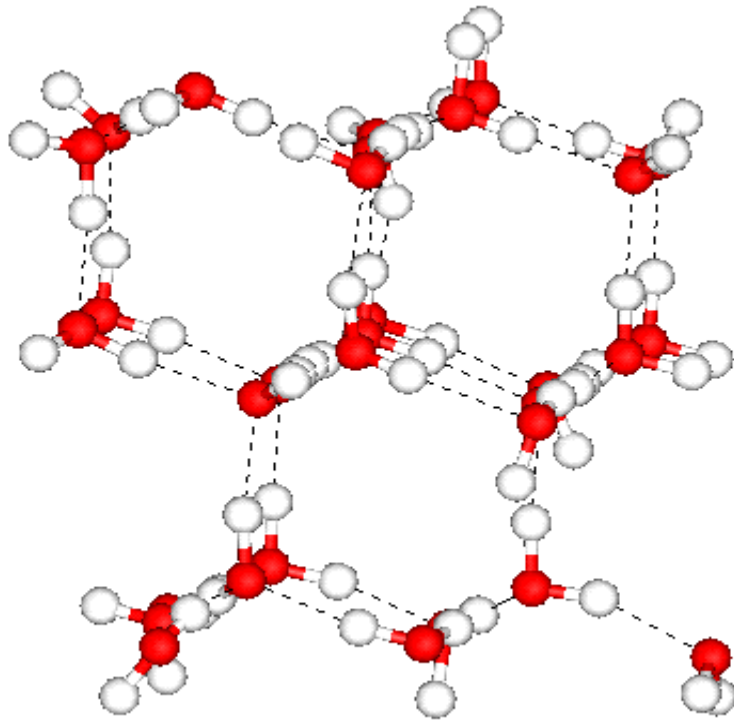
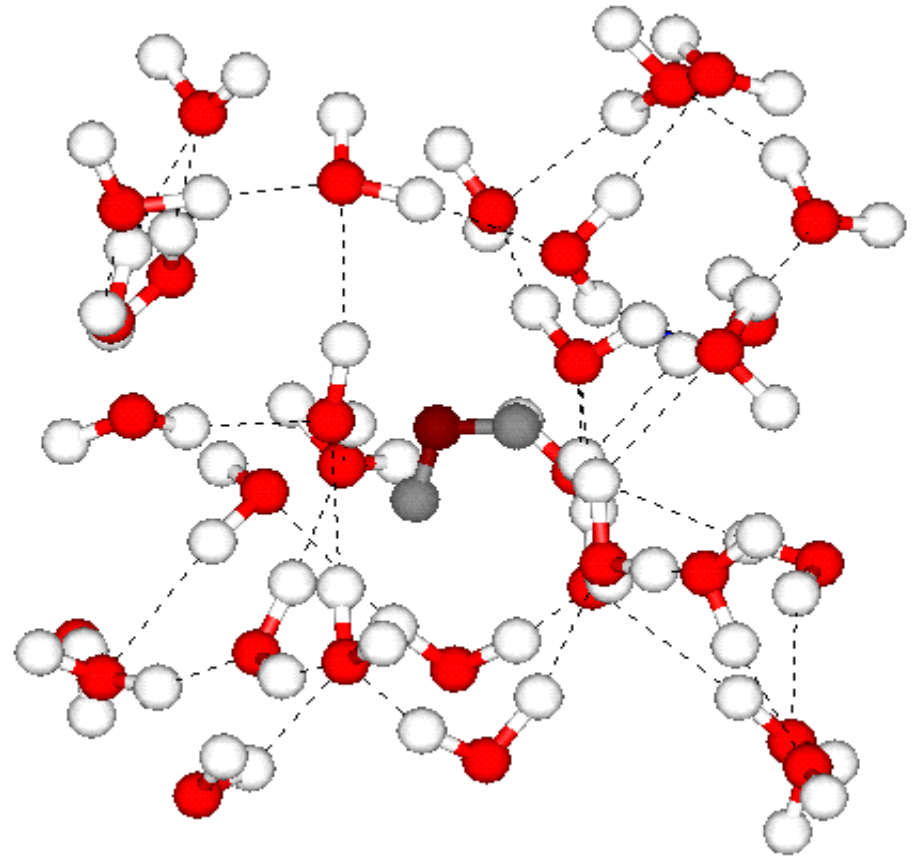


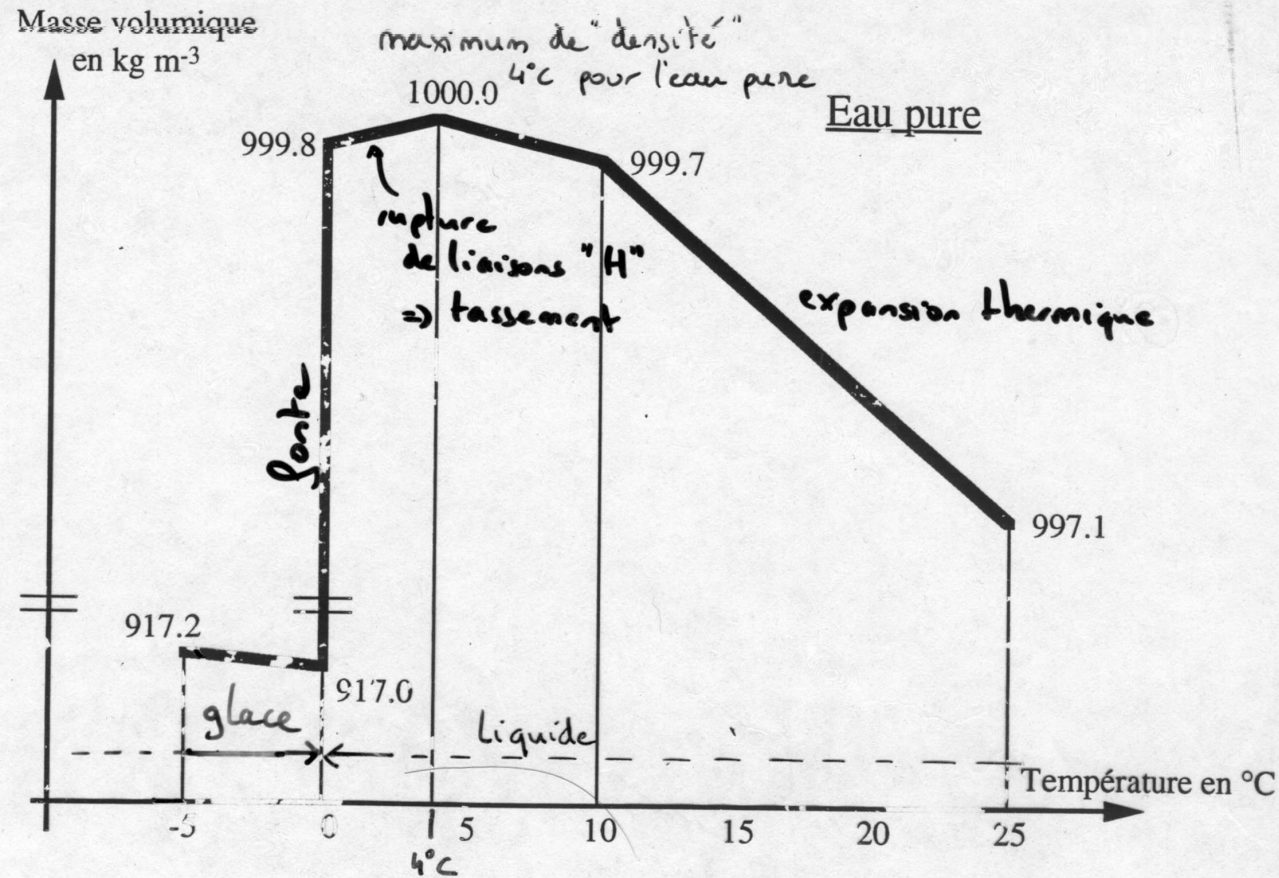
FIGURE 12.2. The amounts of water stored in the oceans, land, and atmosphere, and the amounts exchanged annually between the different reservoirs through evaporation, precipitation, and runoff (estimates are from Peixoto and Kettani, 1973, and, in parentheses, from Baumgartner and Reichel, 1975).

La glace : structure  
tétraédrique



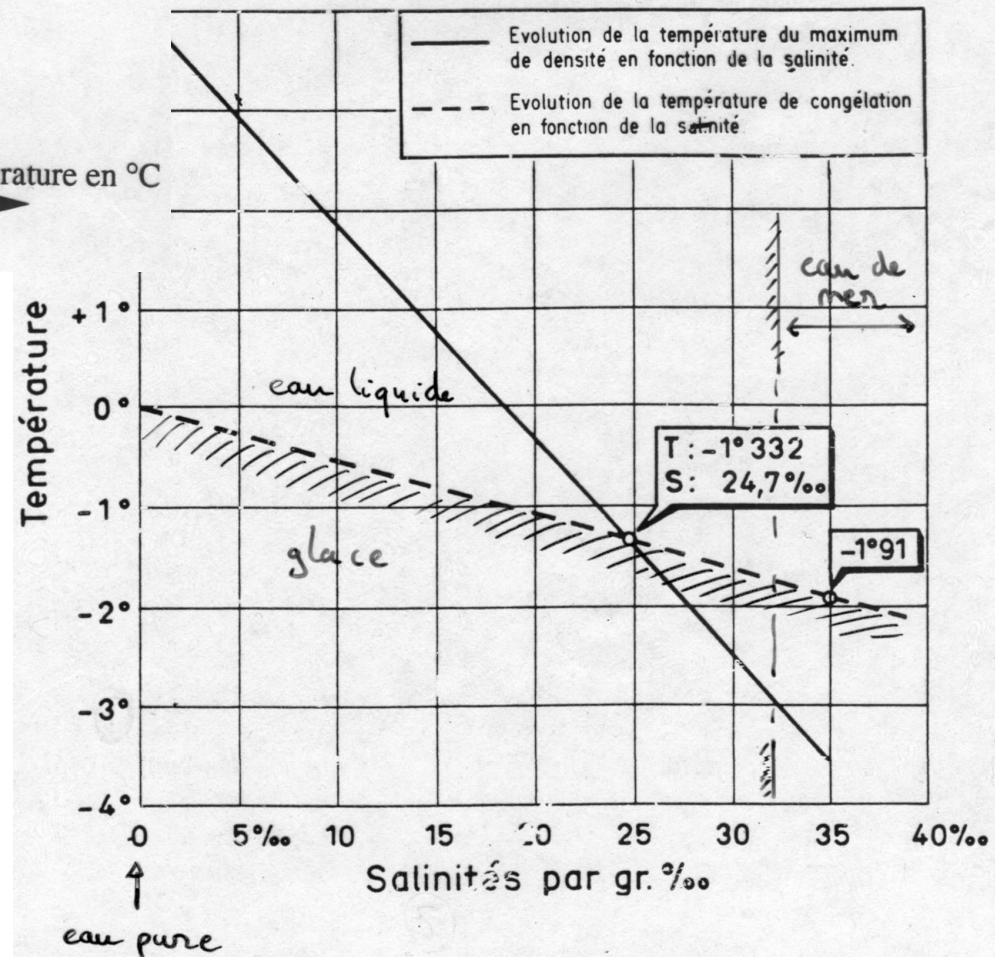
L'eau liquide : liaisons covalentes,  
masse volumique supérieure à  
la glace





# Equation d'état de l'eau pure

« Rectification »  
 par la salinité

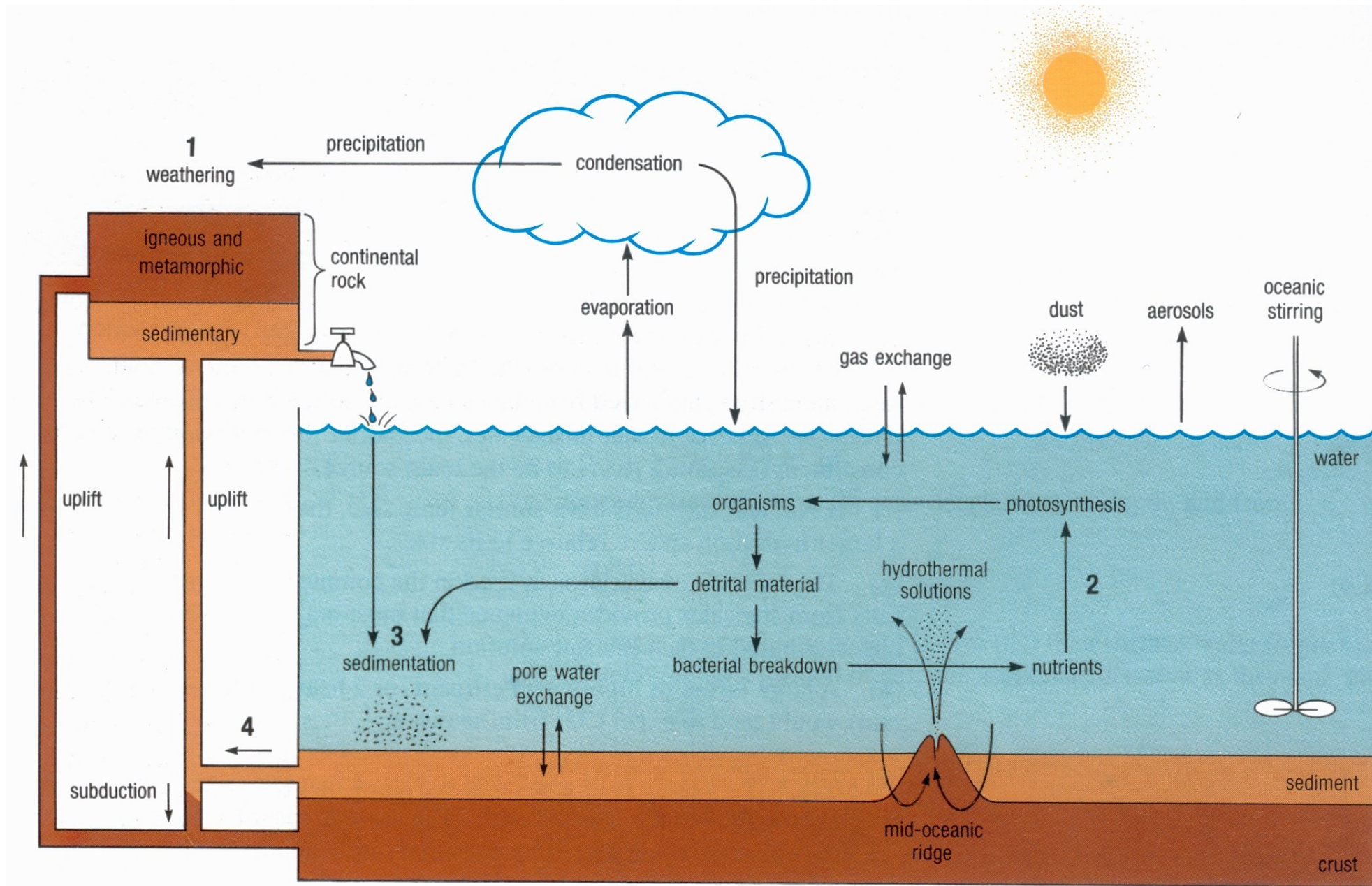


## LE SEL EN QUELQUES CHIFFRES

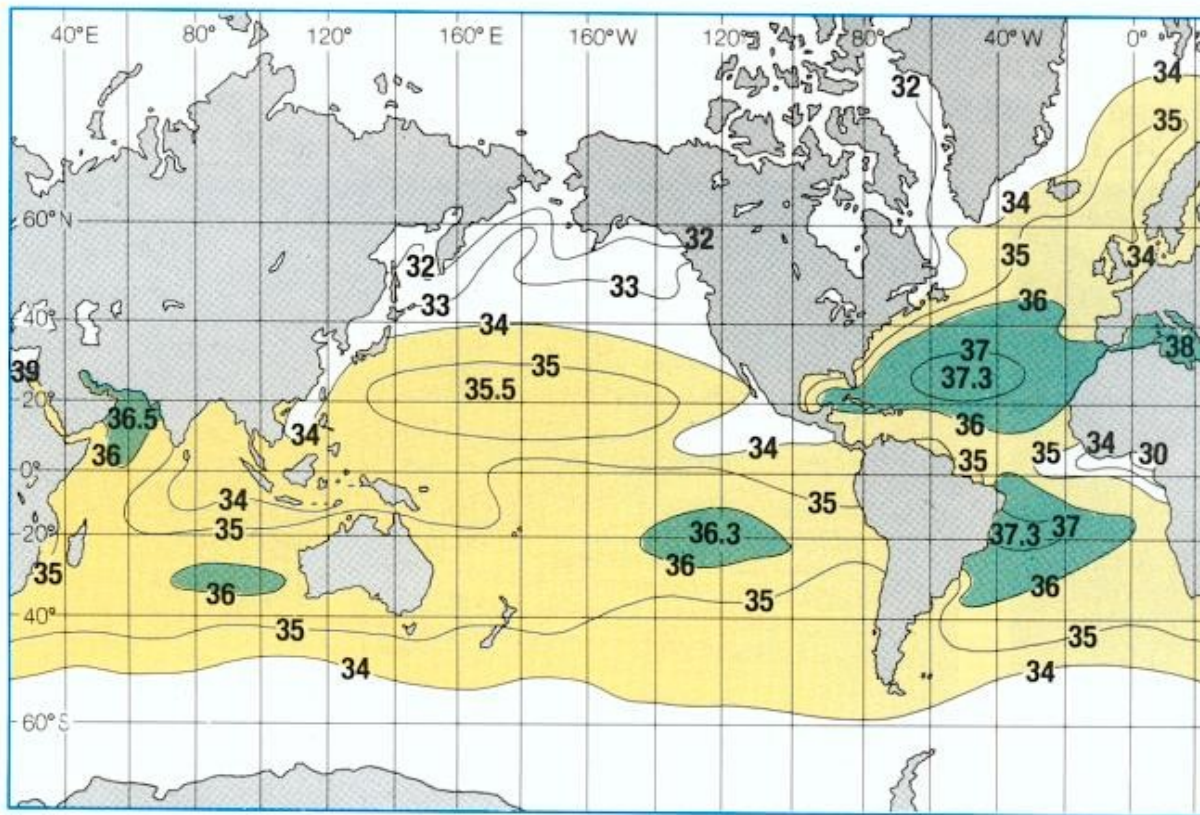
Élément	Concentration dans l'eau de mer (g/kg)	Sources	Puits
Chlore	18,97	Volcanisme, rivières	Sédimentation (NaCl), rejet dans l'atmosphère
Sodium	10,55	Rivières	Sédimentation (NaCl), rejet dans l'atmosphère
Sulfates	2,65	Volcanisme	Dépôt/rejet dans l'atmosphère
Magnésium	1,27	Rivières	Adsorption par l'argile
Calcium	0,4	Volcanisme, rivières	Squelette micro-organismes marins/sédimentation (calcite)
Potassium	0,38	Rivières	Adsorption par l'argile



# Les sels dissous : un équilibre complexe établi sur des centaines de millions d'années

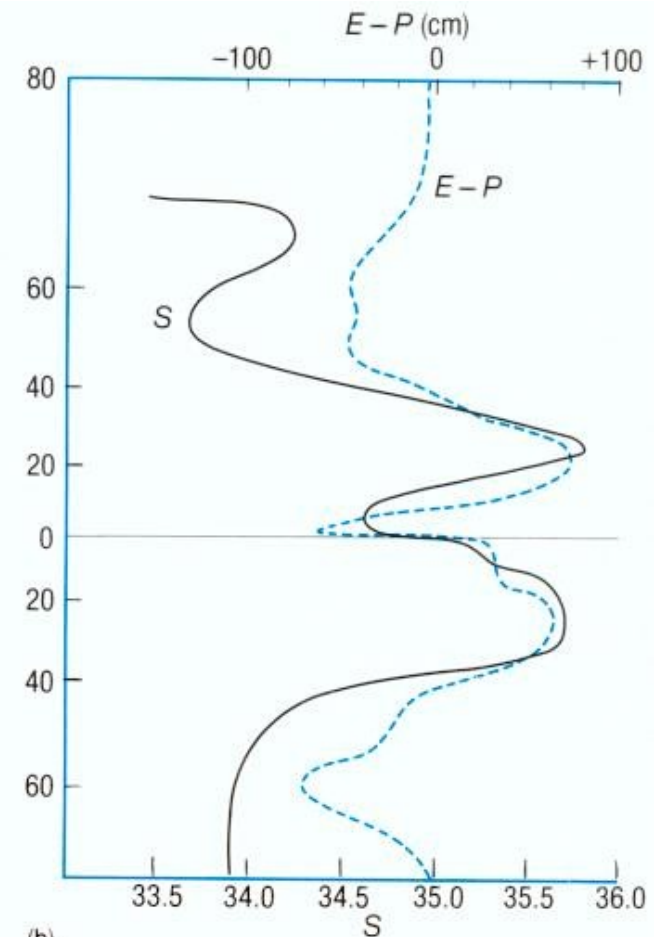


Qu'est-ce qui modifie la salinité de l'eau de mer ?  
 évaporation = concentration ; précipitation = dilution



(a)

Salinité de surface de l'océan (SSS Sea Surface Salinity)

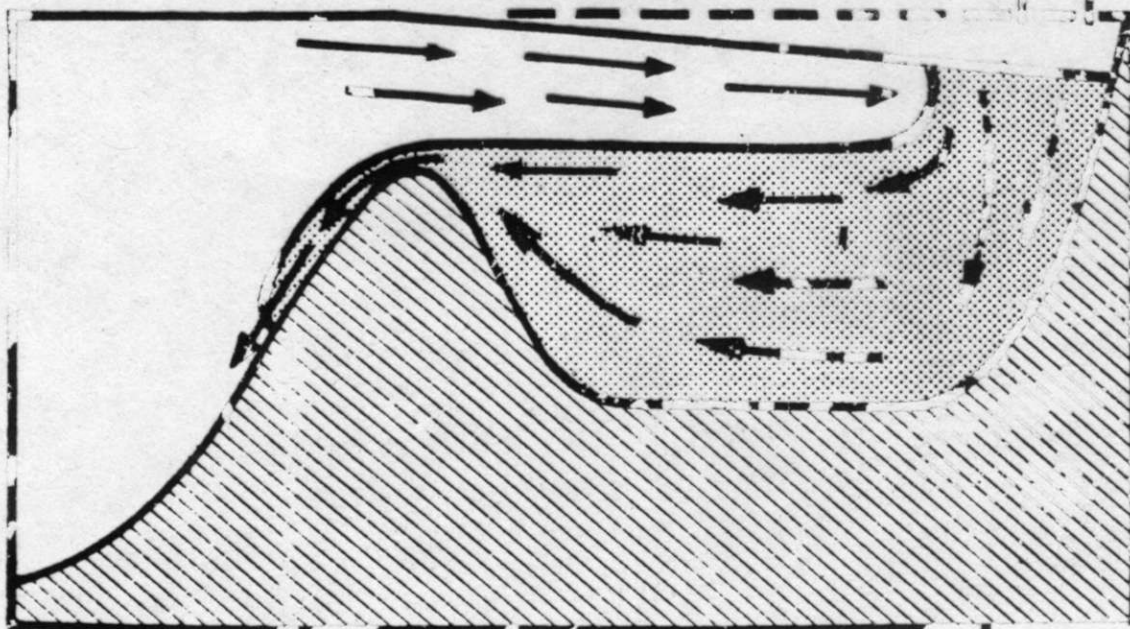


(b)

Evaporation - Précipitation



EVAPORATION

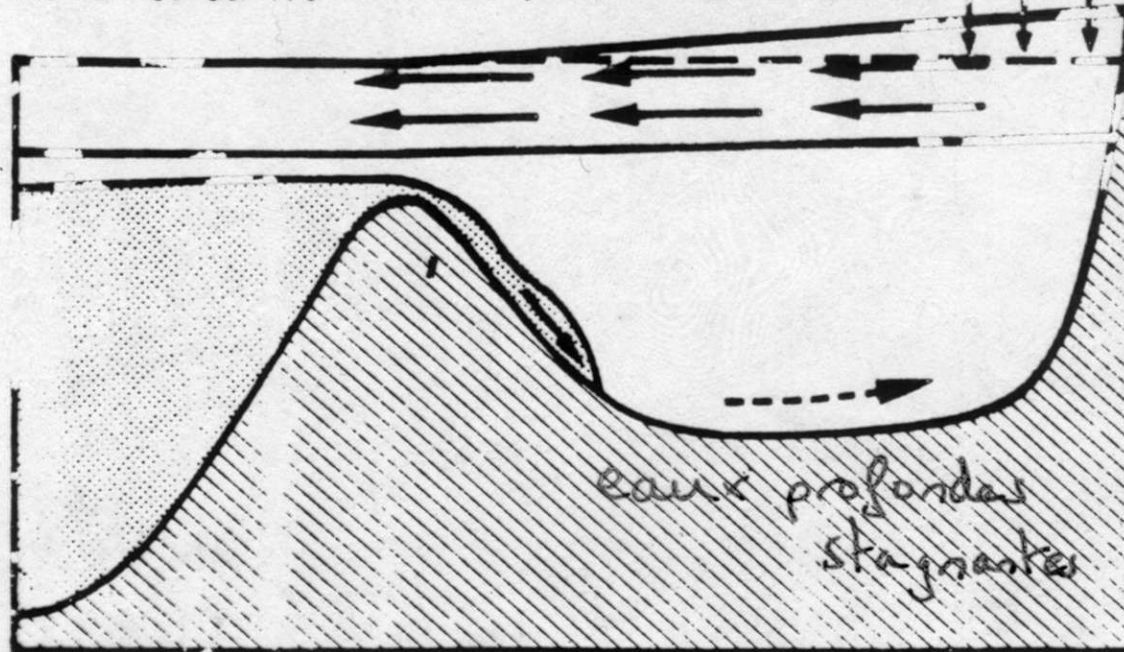


$E - P > 0$

ex: Méditerranée

## Les deux types de bassins à seuil

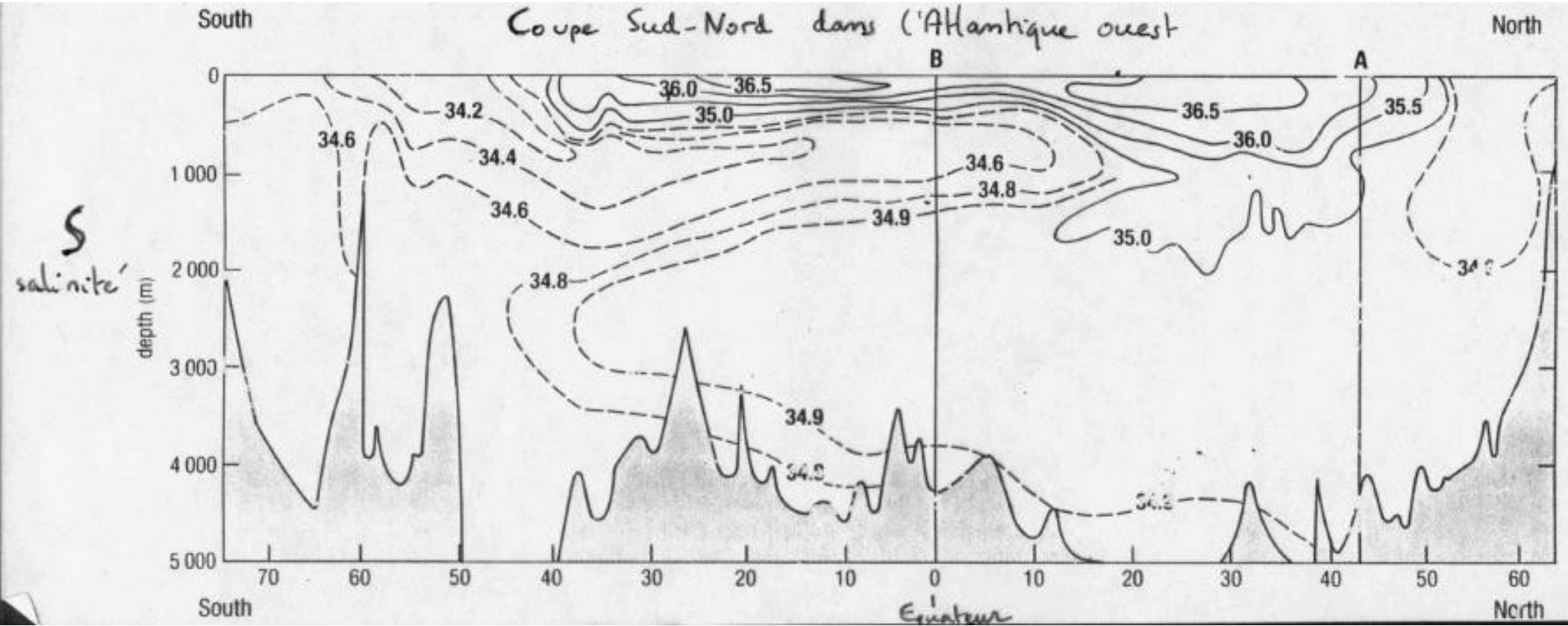
PRECIPITATIONS ET RUISSELLEMENT



$E - P < 0$

ex: Mer Noire

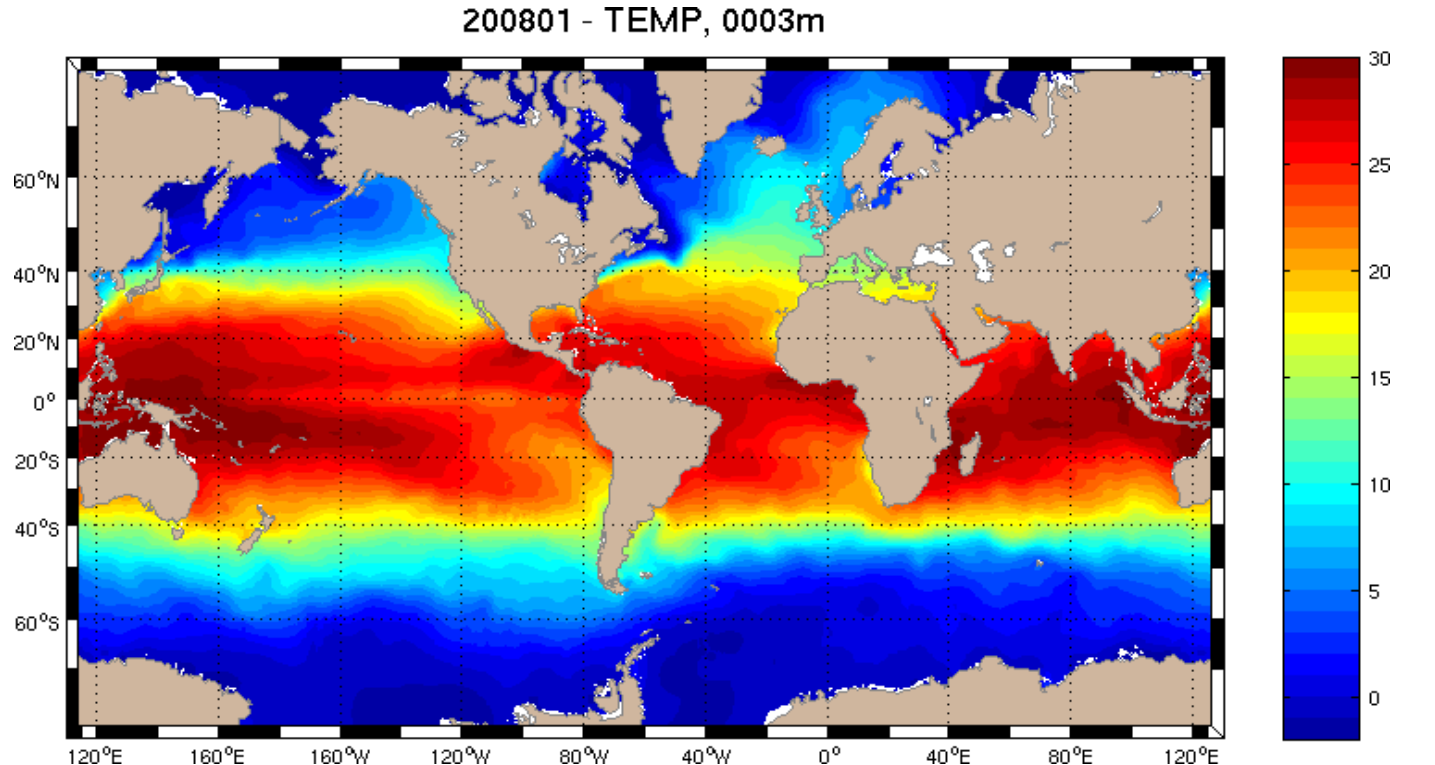
# Section verticale de salinité (psu) dans l'Atlantique occidental



La gamme de salinité de surface est bien plus vaste que dans l'océan profond, du fait de l'influence des conditions météorologiques : évaporation et précipitation. Essayez de déterminer l'origine des eaux profondes ?

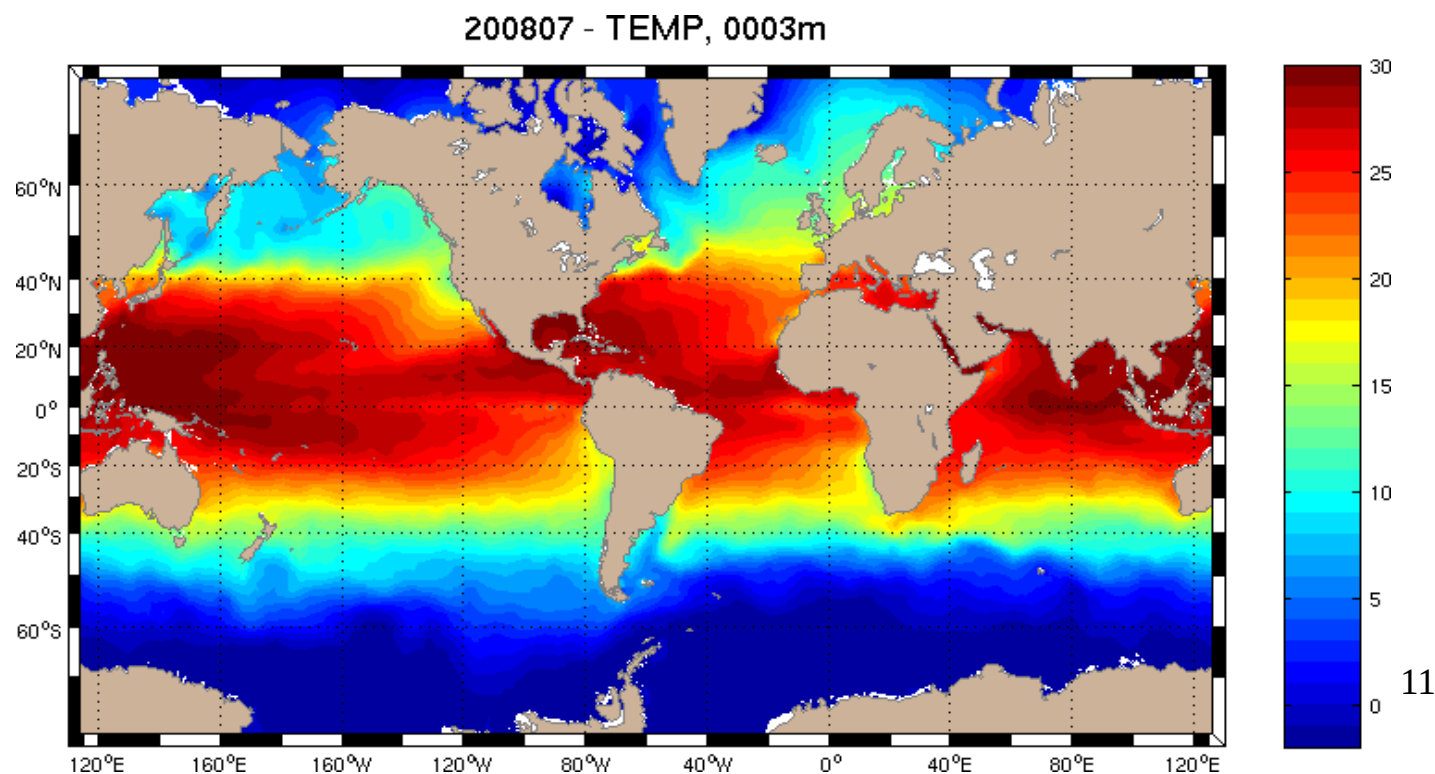
# Température de Surface de l'Océan (SST)

Janvier 2008

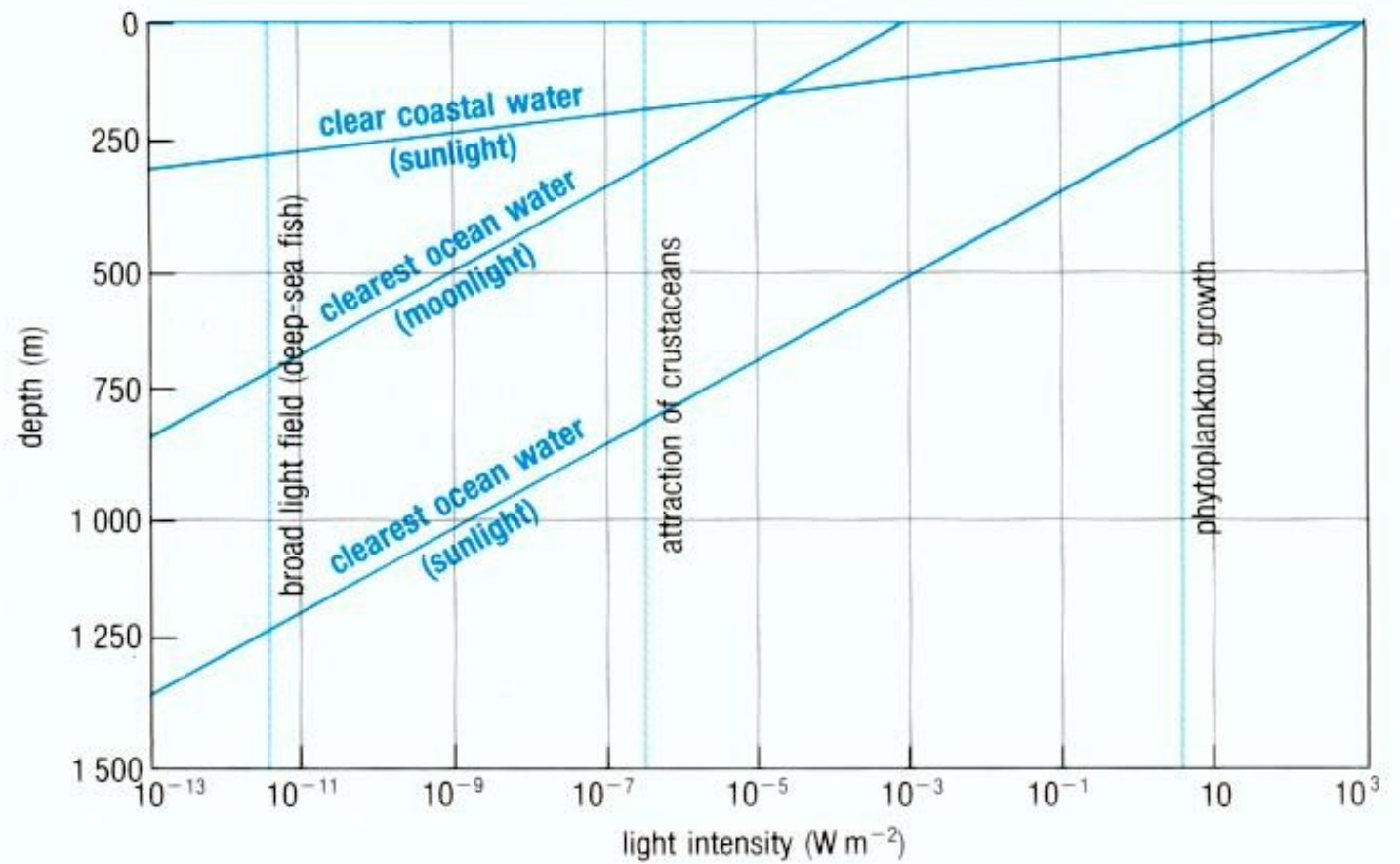


Juillet 2008

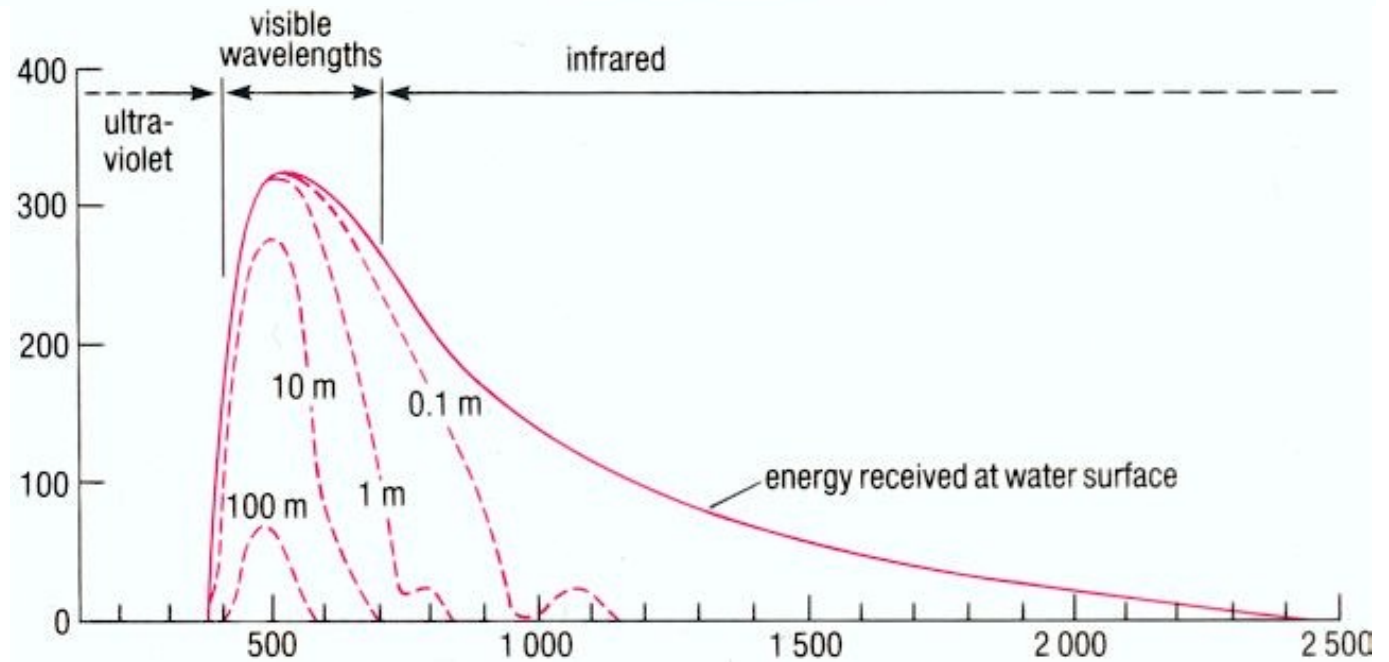
Données des  
flotteurs Argo  
Coriolis/Ifremer



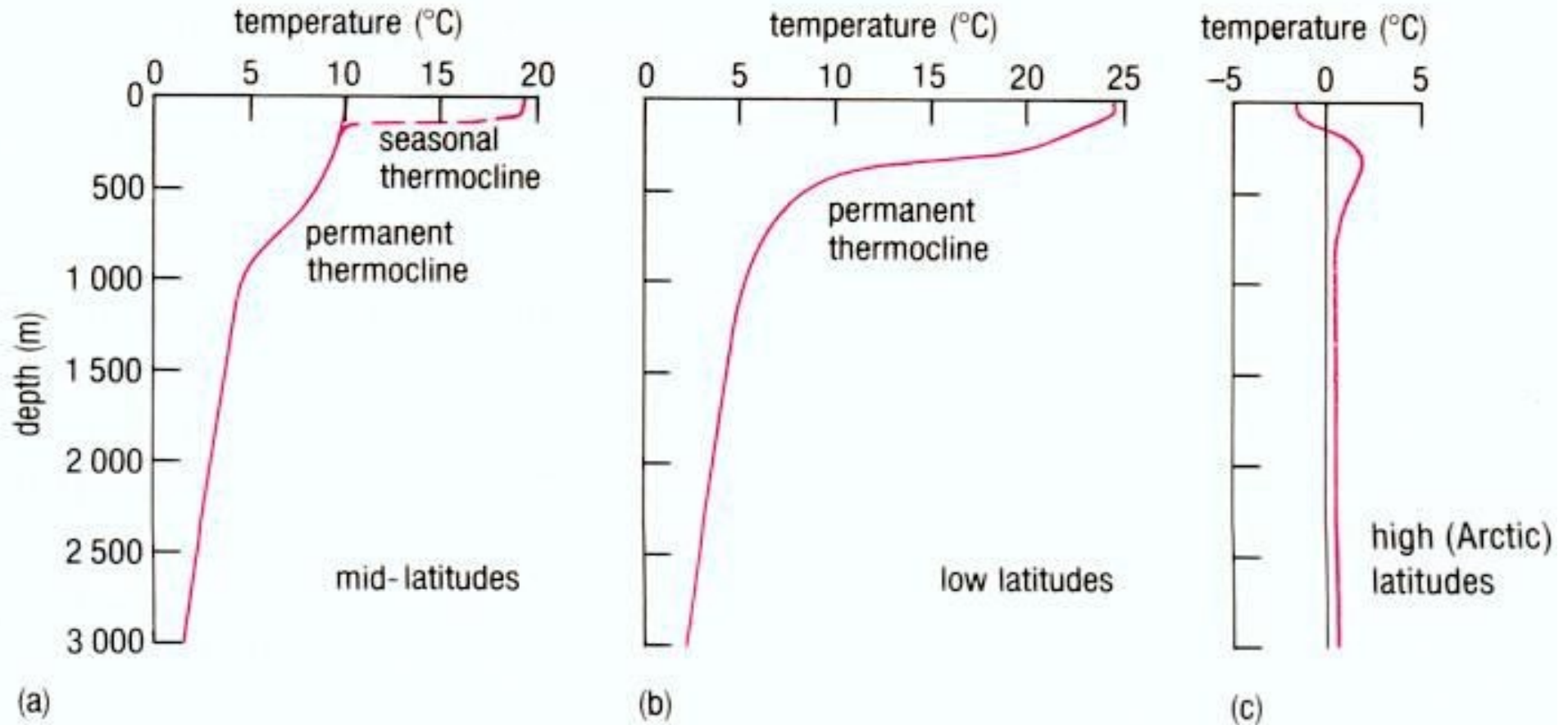
Relation entre  
éclairage et  
profondeur dans  
l'océan



Spectre de  
l'énergie  
lumineuse reçue  
à la surface de  
l'océan puis  
transmise jusqu'à  
différentes  
profondeurs



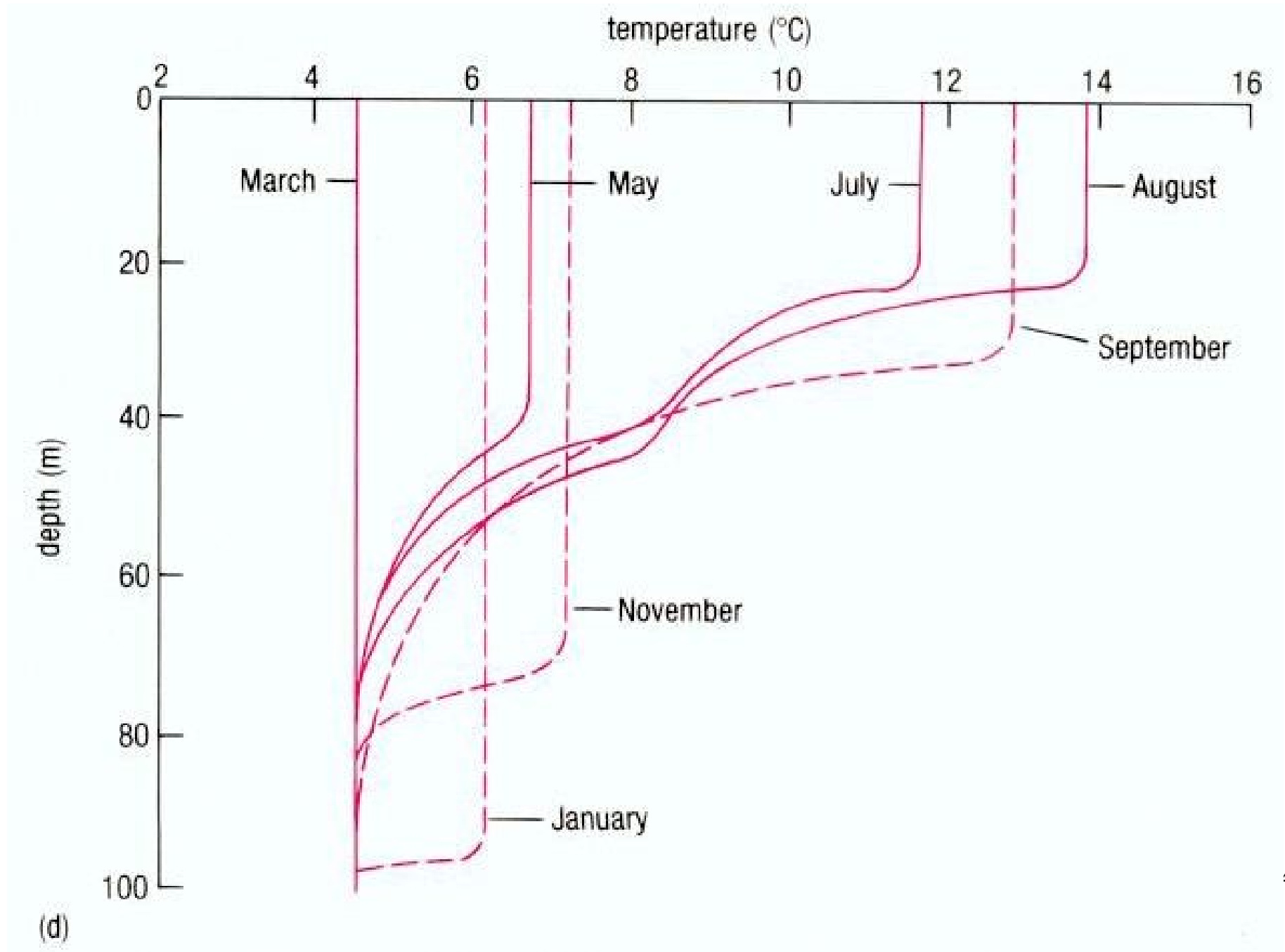
# Température: la thermocline



La thermocline est d'amplitude très variable suivant la région observée

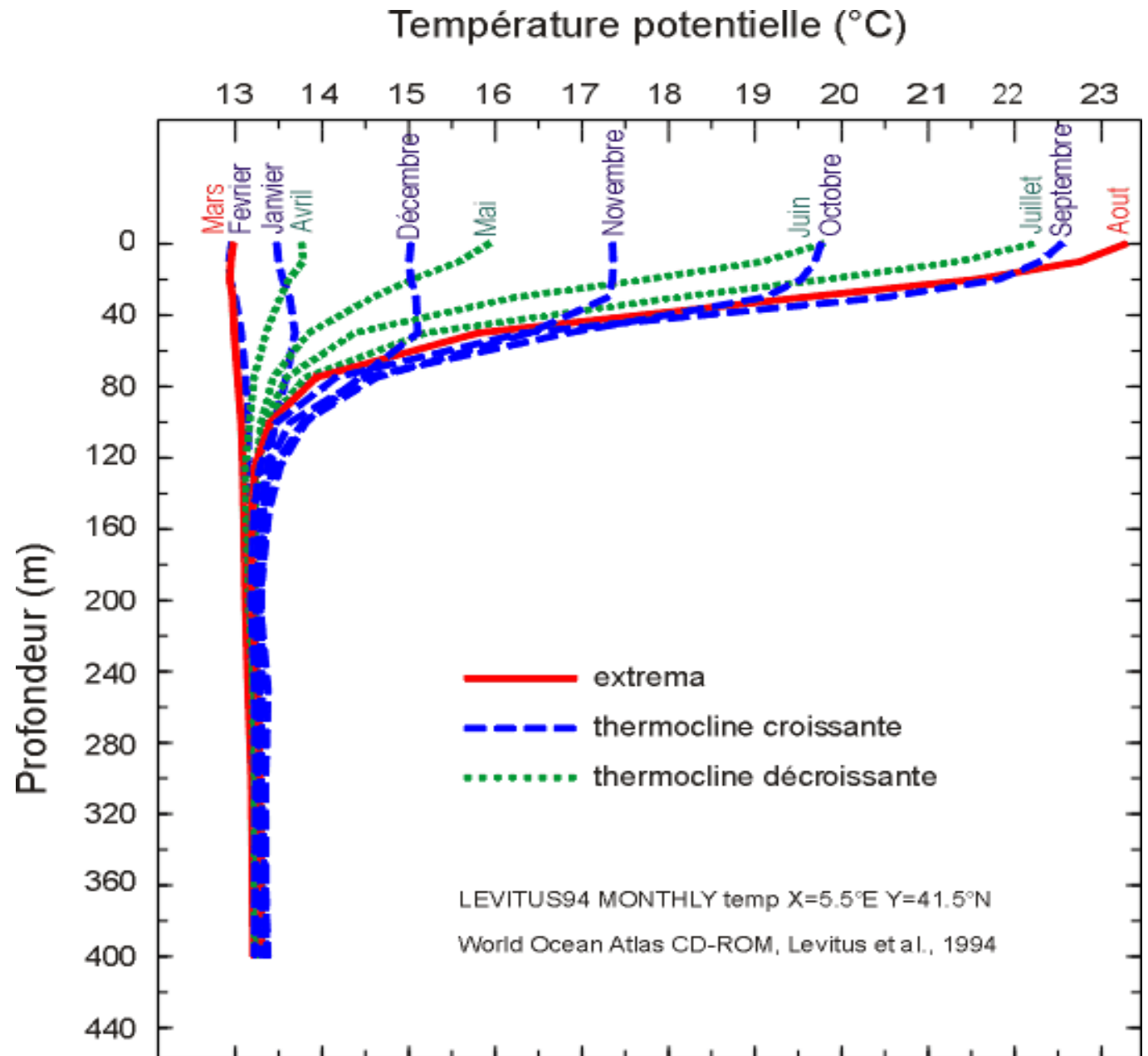
# cycle saisonnier dans les 100 premiers mètres de l'océan

► apparition d'une thermocline saisonnière en période estivale

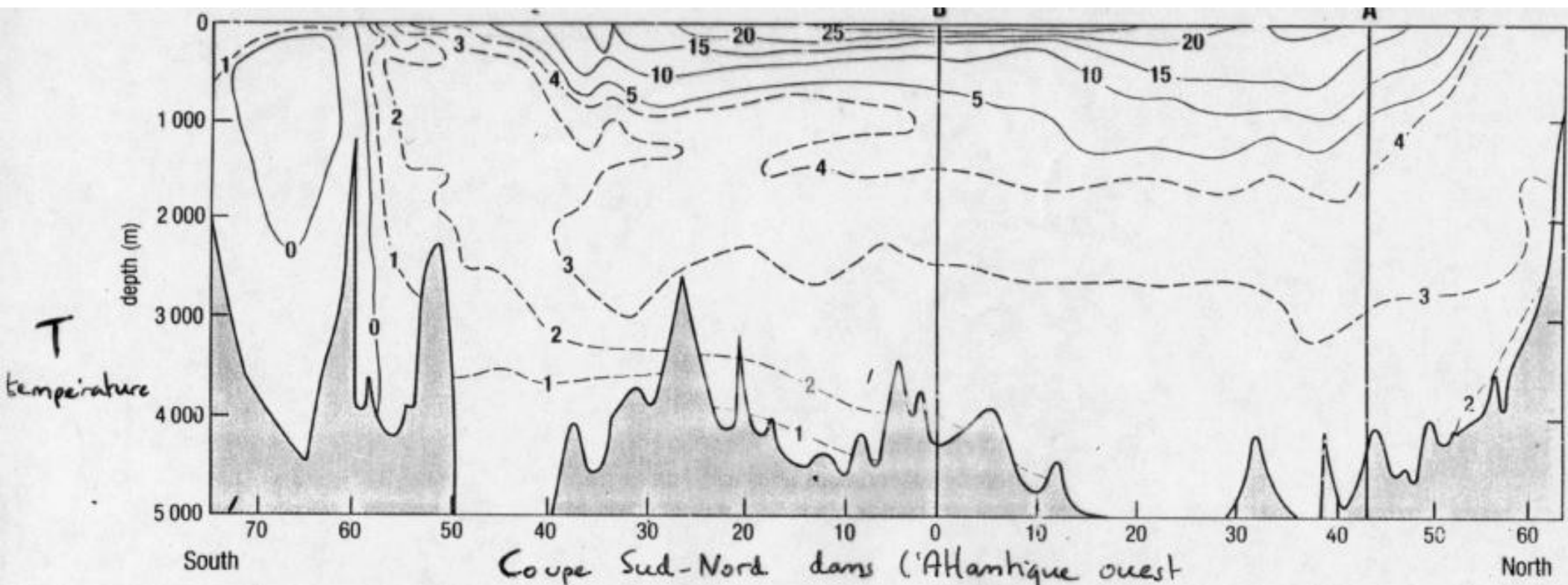


# Température : thermocline saisonnière

En Méditerranée  
à 5°30' E 41°30'N



# Section verticale de température (°C) dans l'Atlantique occidental



Comme pour la salinité, la gamme de température de surface est bien plus vaste que dans l'océan profond (>1000m).

Essayez à nouveau de déterminer l'origine des eaux profondes ?



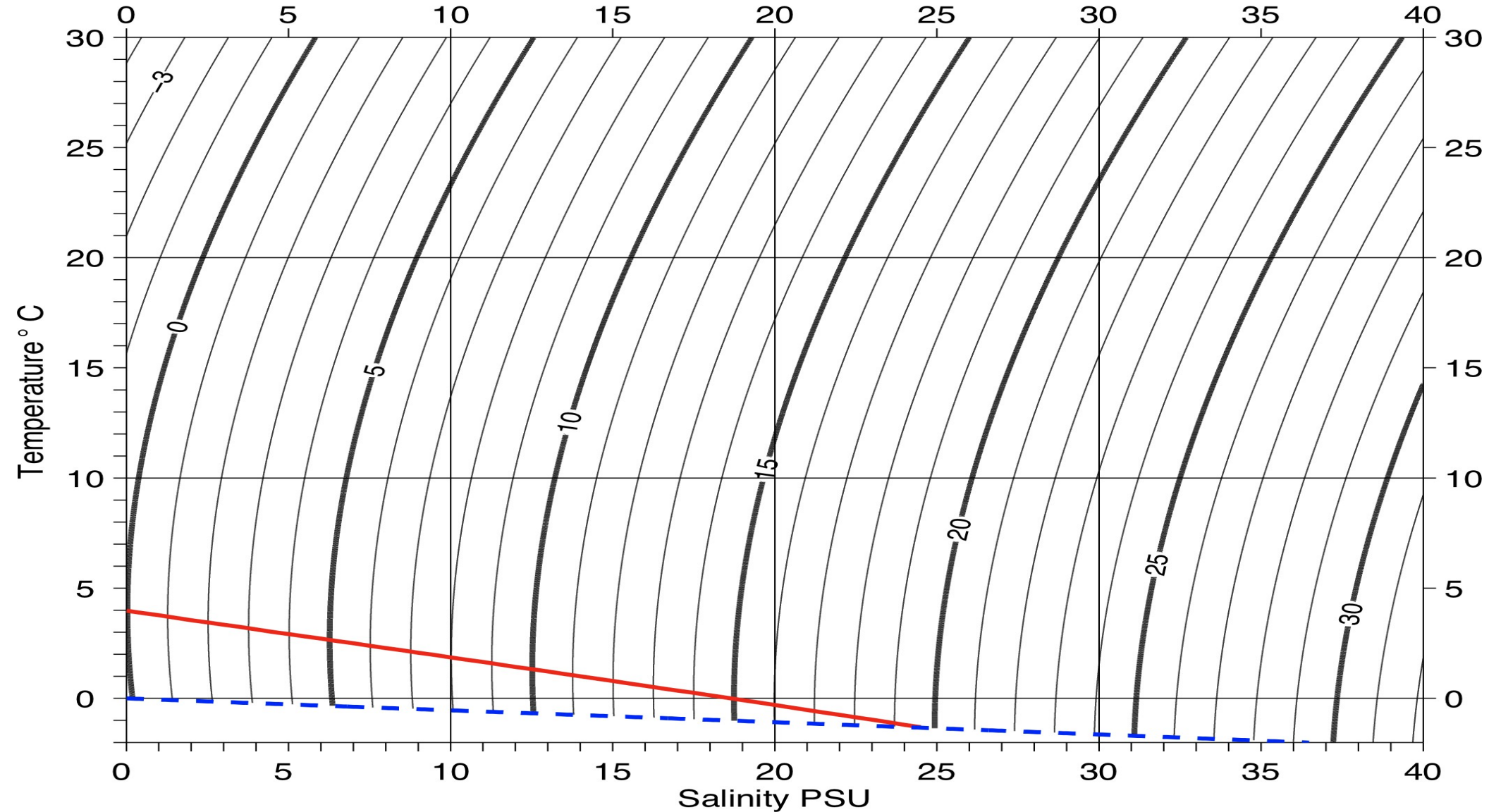
# Propriétés physiques de l'eau de mer

- Dépendent de Température, pression et composition chimique
- Les différents sels dans l'eau de mer sont en proportion quasi invariable:  $\text{Cl}^-$  (55%),  $\text{Na}^+$  (30%),  $\text{SO}_4^{2-}$  (8%),  $\text{Mg}^{2+}$  (4%),  $\text{K}^+$  (1%),  $\text{Ca}^{2+}$  (1%).
- Il suffit donc de connaître une seule concentration. On utilise en fait le contenu total en sels : c'est la salinité  $S$  en  $\text{g kg}^{-1}$ .
- L'équation d'état donne la masse volumique  $\rho = \rho(S, T, p)$
- L'erreur absolue sur  $S$ ,  $T$  et  $p$  est de  $3 \cdot 10^{-3} \text{ g kg}^{-1}$ ,  $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  et  $3 \text{ dbar}$
- L'erreur absolue sur  $\rho$  est  $5 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$

# L'anomalie de masse volumique

$$\gamma = \rho - 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

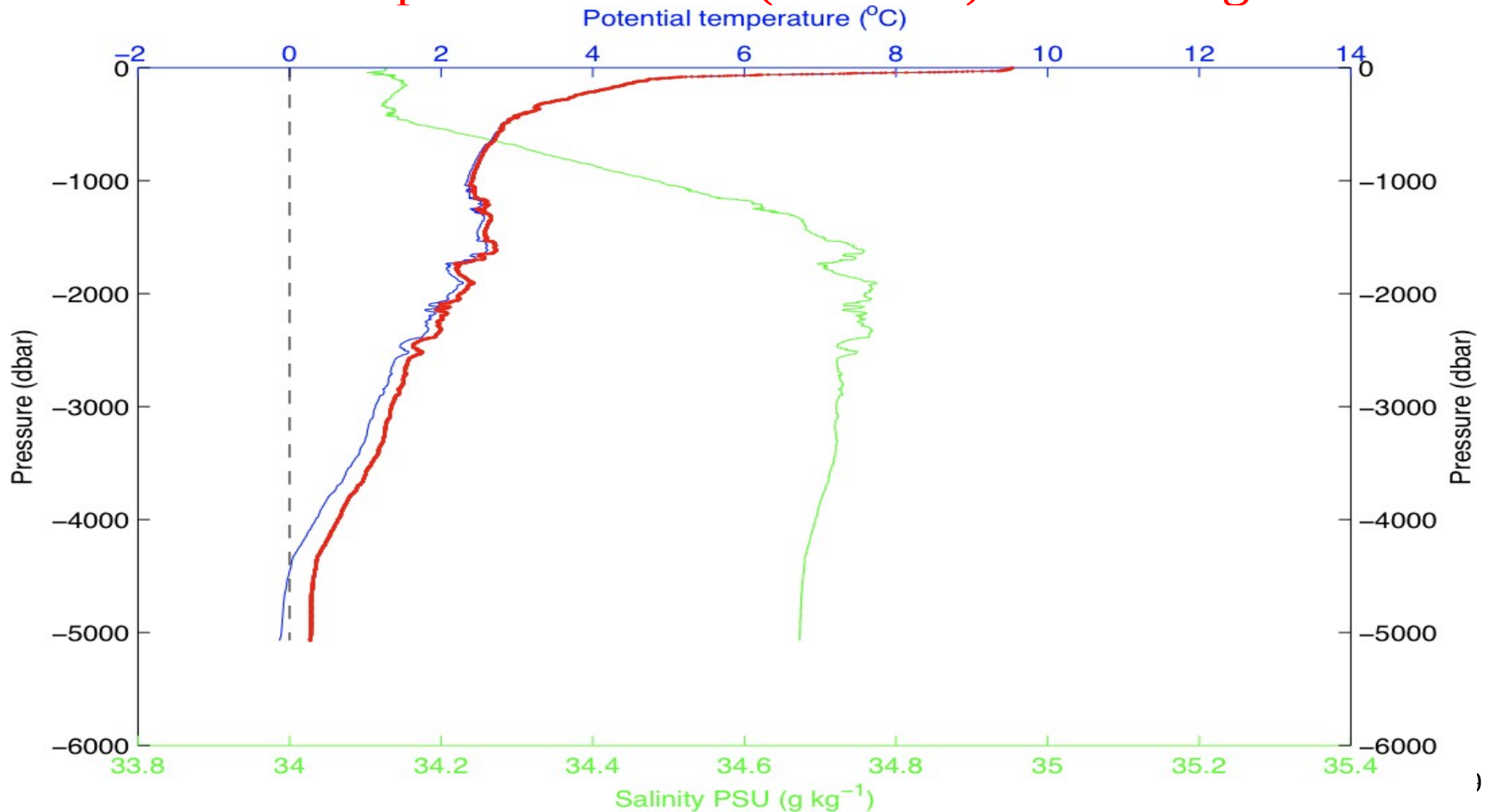
sur ce diagramme  $T$ - $S$ ,  $p = 0$  dbar (par convention cela correspond à une pression absolue de  $p + p_{\text{atm}}$ )



# Température potentielle $\theta$ °C

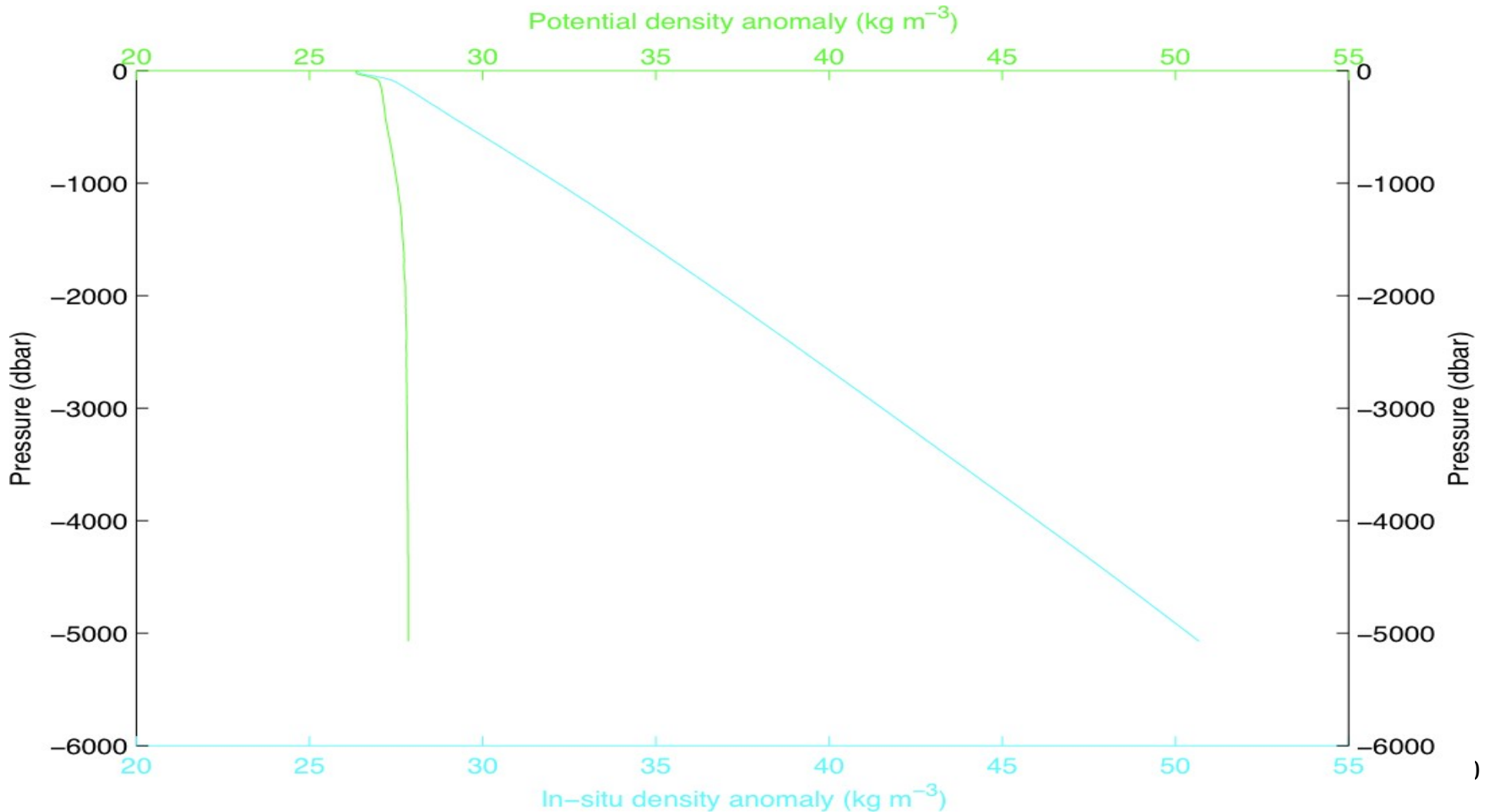
C'est la température qu'aurait la particule d'eau ramenée adiabatiquement à la surface, i.e. à  $p = 0$  dbar (sans échange de chaleur ni de sel)

La température **in situ** (mesurée) est en rouge



# Anomalies de masse volumique in situ et **potentielle**

$$\gamma_{\text{in situ}} = \rho(S, t, p) - 1000 \text{ kg m}^{-3} \quad \text{et} \quad \gamma_{\theta} = \rho(S, \theta, 0) - 1000 \text{ kg m}^{-3}$$



# Masse volumique

la masse volumique de l'eau de mer dépend des 3 paramètres **température salinité pression**, c'est l'équation d'état de l'eau de mer, une relation complexe et fortement non-linéaire.

sa linéarisation autour de 15°C et 35 psu à la surface donne :

$$\rho = \rho_0 ( 1 - \alpha T + \beta S )$$

avec  $\rho_0 = 1023 \text{ kg/m}^3$   $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  ,  $\beta = 8 \cdot 10^{-4} \text{ psu}^{-1}$

$$+5^\circ\text{C} \Rightarrow -1 \text{ kg/m}^3$$

$$+1\text{psu} \Rightarrow +0.8 \text{ kg/m}^3$$

# Masse volumique et fréquence de stabilité

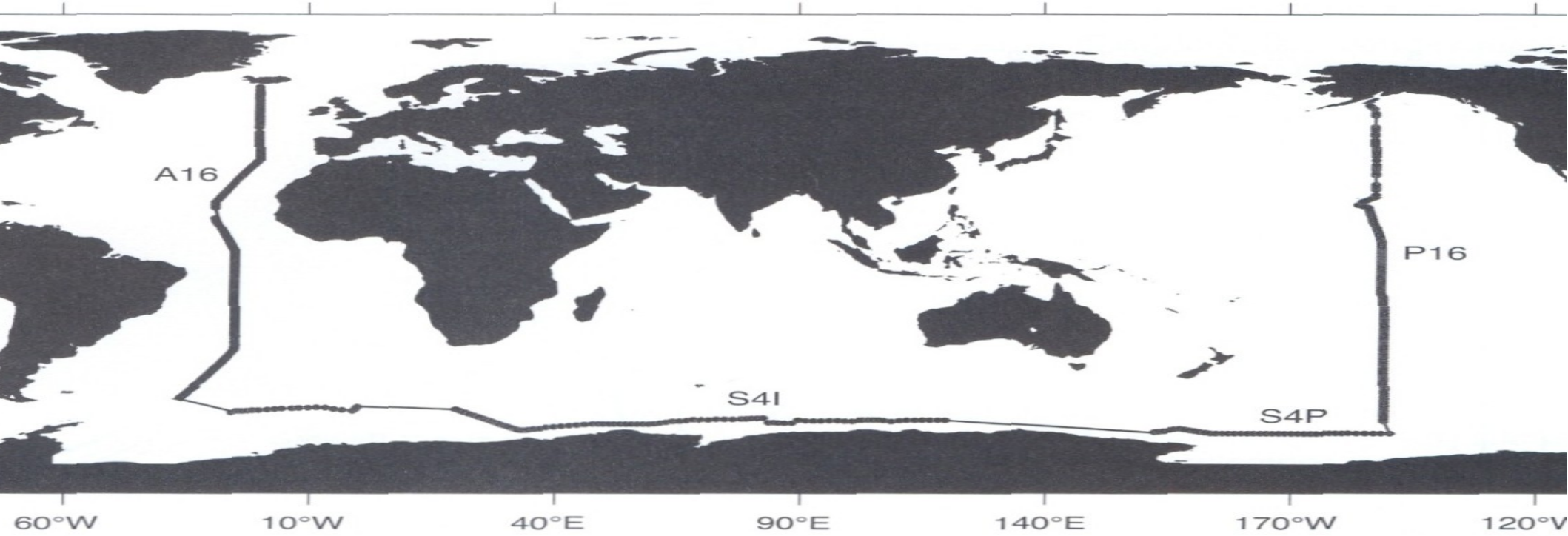
Poussée d'Archimède et pesanteur => oscillations à la fréquence angulaire (pulsation)  $N$  telle que:

$$N^2 \approx -g/\rho_0 \, d\sigma_\theta/dz \quad \text{en s}^{-2}$$

$\sigma_\theta(z)$  est le profil vertical de masse volumique potentielle

- $N^2 > 0$  : stratification stable : oscillateur
- $N^2 < 0$  : stratification hydrostatiquement instable : convection

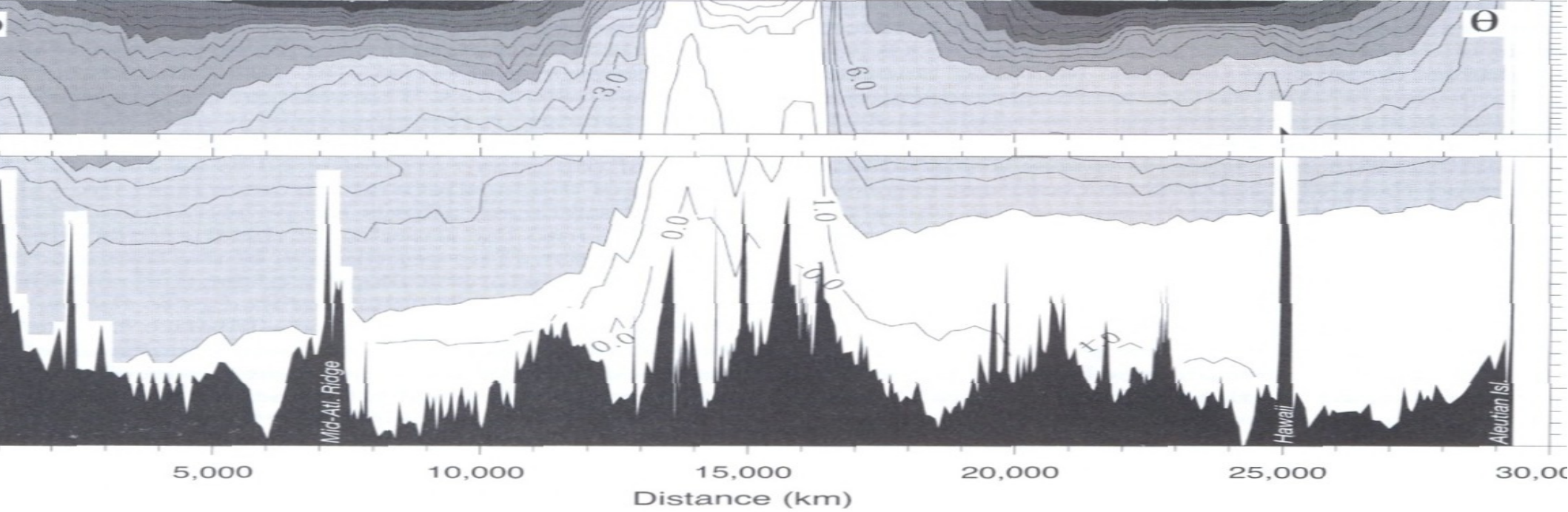
Valeur typique dans la pycnocline :  $2\pi/N \approx 10\text{min}$   
en profondeur : 1 à 2 h



60°W 10°W 40°E 90°E 140°E 170°W 120°W

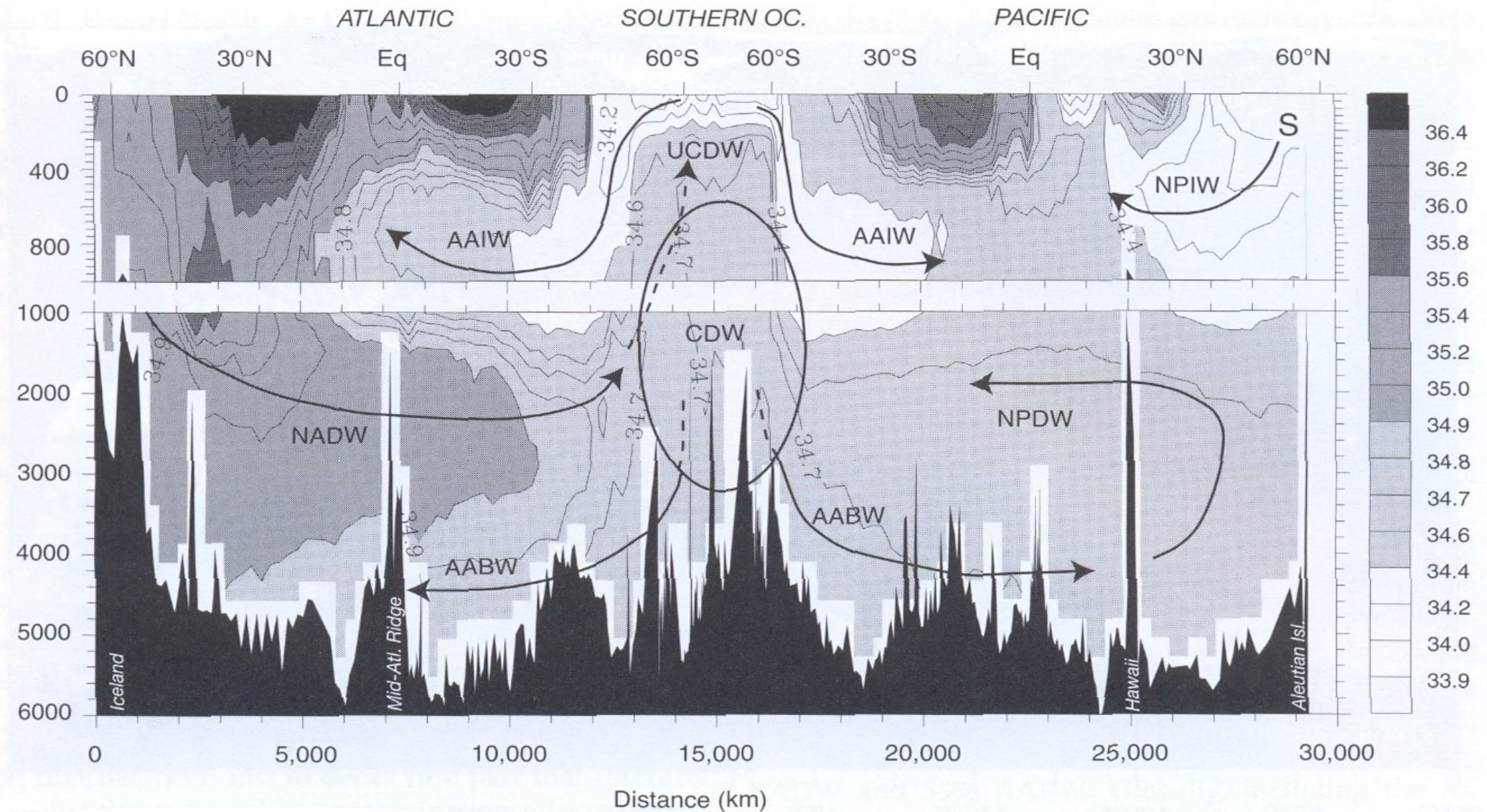
ATLANTIC SOUTHERN OC. PACIFIC

30°N Eq 30°S 60°S 60°S 30°S Eq 30°N 60°N



# La salinité est un traceur des différentes masses d'eau:

l'eau antarctique intermédiaire (AAIW), l'eau profonde nord atlantique (NADW), et l'eau antarctique de fond (AABW)

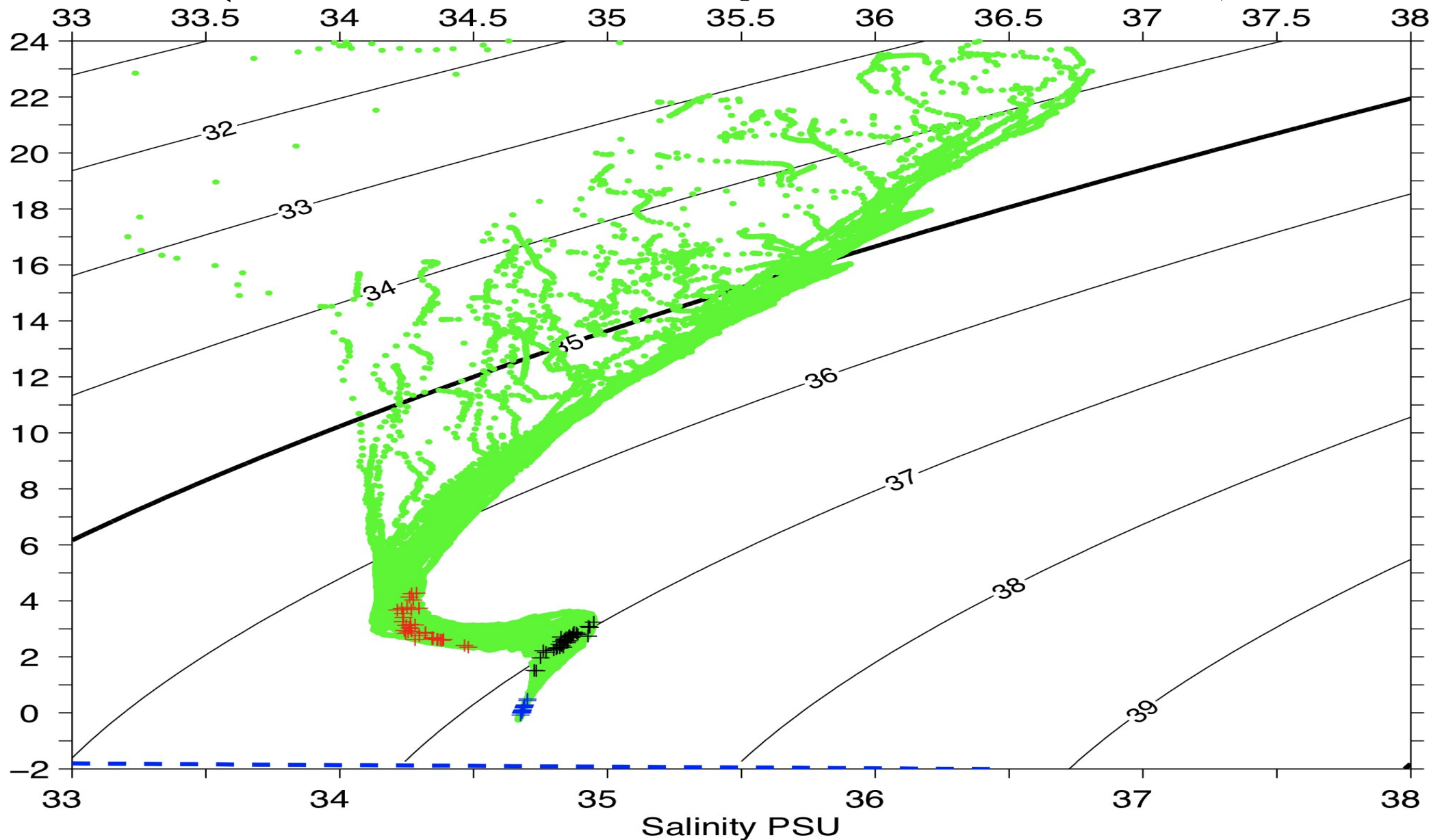




# Diagramme $\theta$ -S (dans le bassin d'Argentine):

l'eau antarctique intermédiaire (AAIW), l'eau profonde nord atlantique (NADW), et l'eau antarctique de fond (AABW)

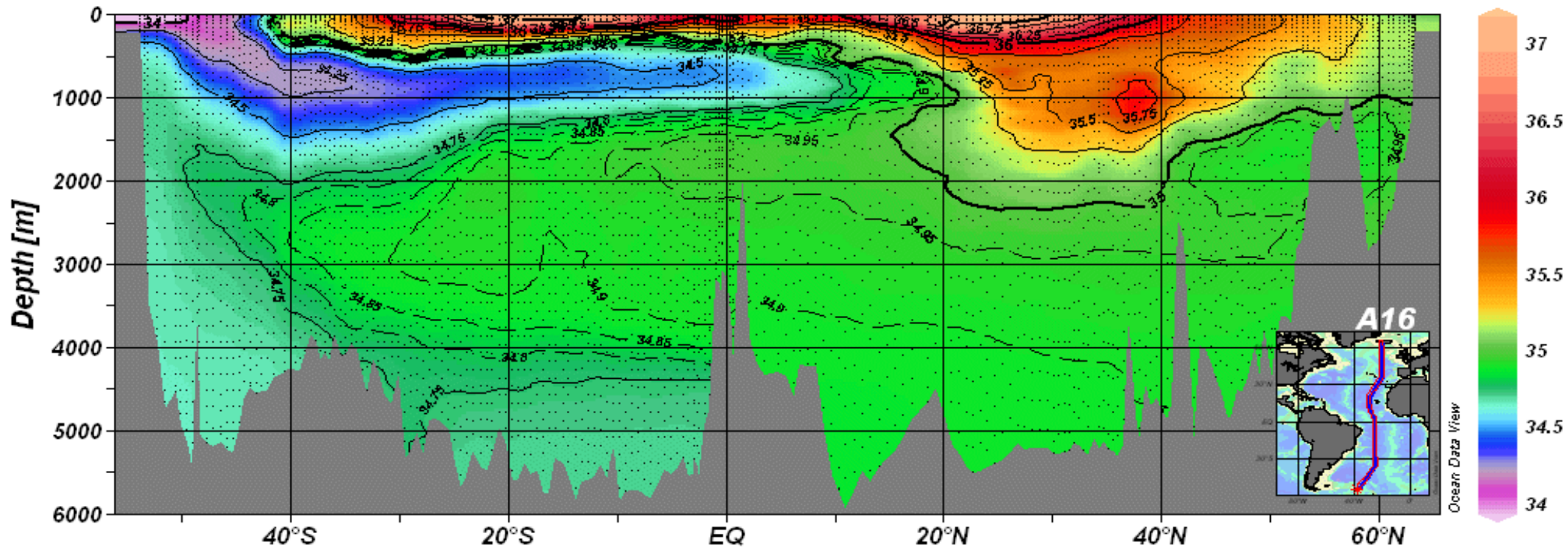
(Anomalies de masse volumique référencées à 2000 dbar)



# Salinité: Distribution verticale

eWOCE

Salinity [pss-78]



Au dessous de 1500m,  $S \in [34.7, 35]$

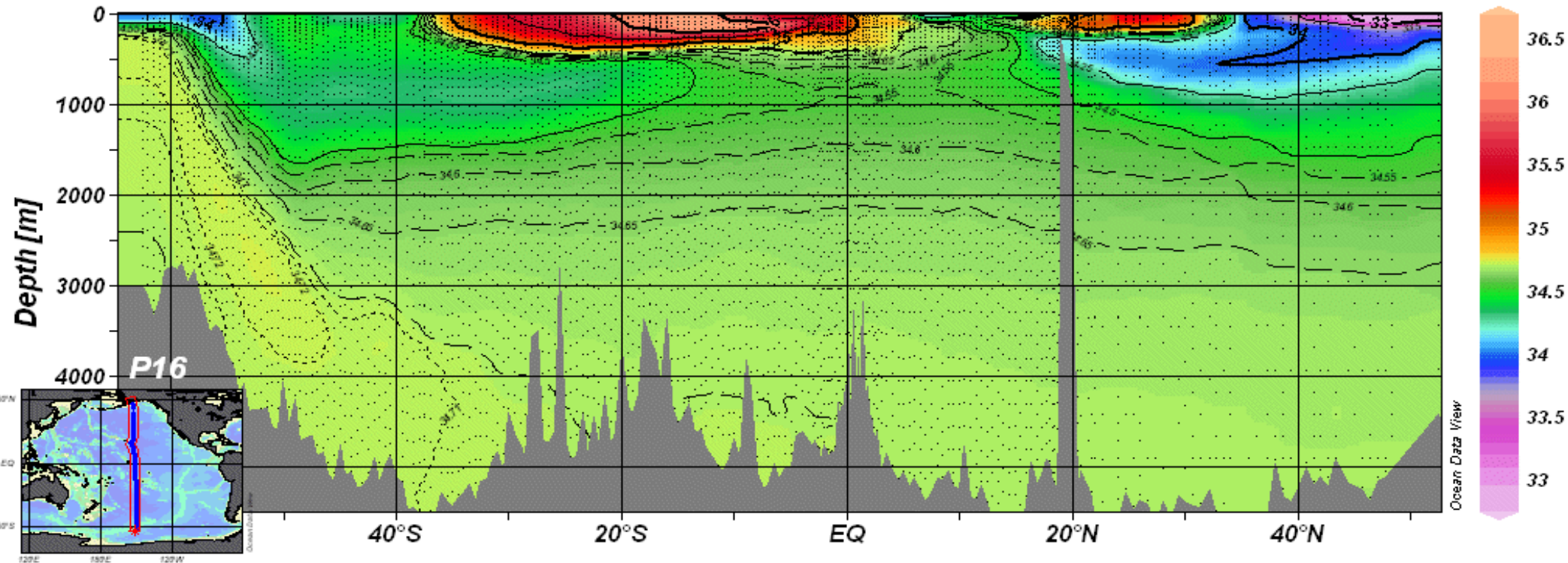
Halocline = zone de fort gradient vertical de salinité

Salinité = un traceur conservatif sous la surface mais actif (densité)

# Salinité: Distribution verticale

eWOCE

Salinity [pss-78]

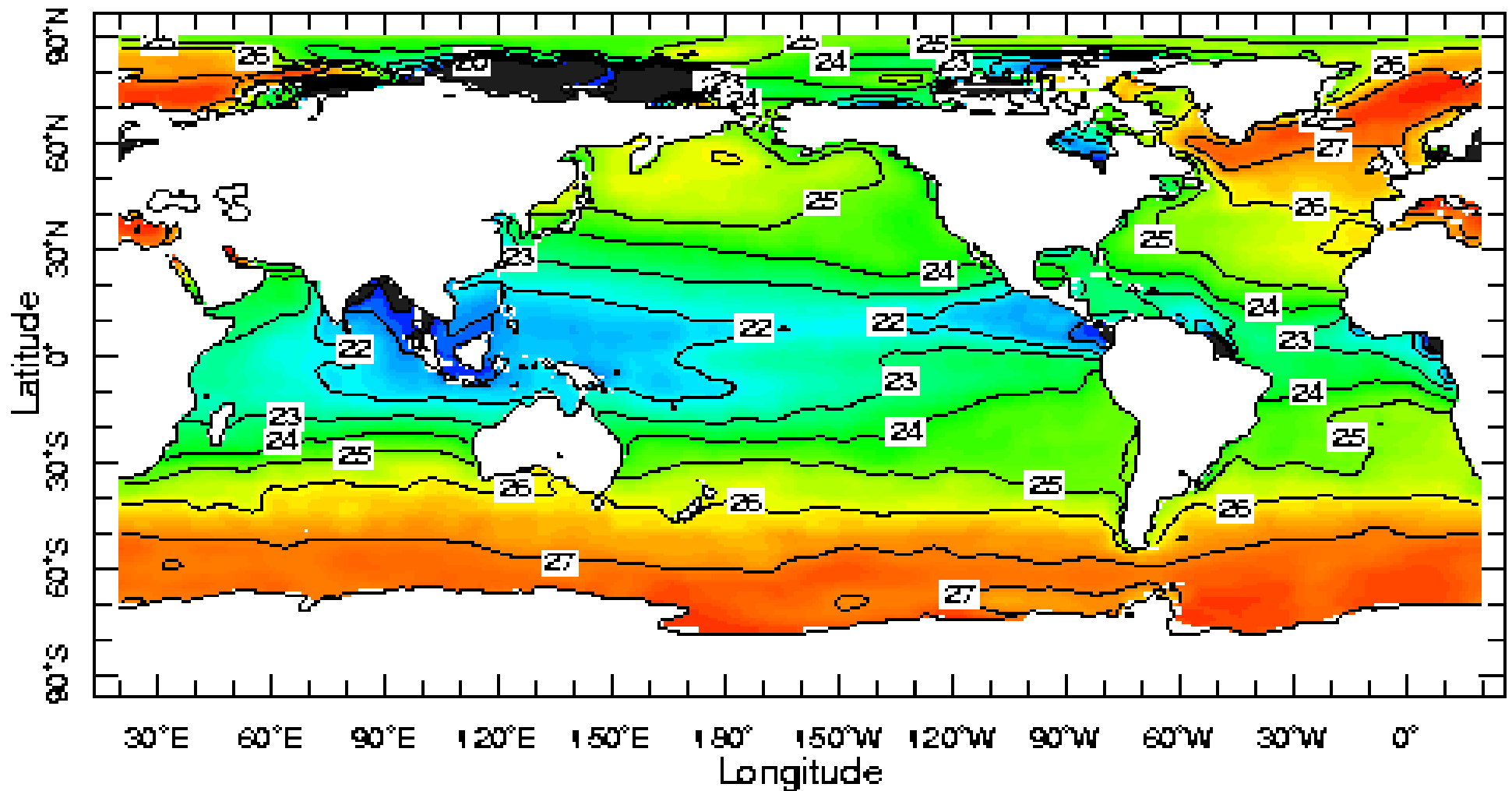


Au dessous de 1000m,  $34.5 < S < 34.7$  PSU

Faible salinité de surface dans le Pacifique Nord

D'une manière générale, le Pacifique est moins salé que l'Atlantique.  
Salinité moyenne en dessous de 1000 m  $\sim 34.7$  PSU

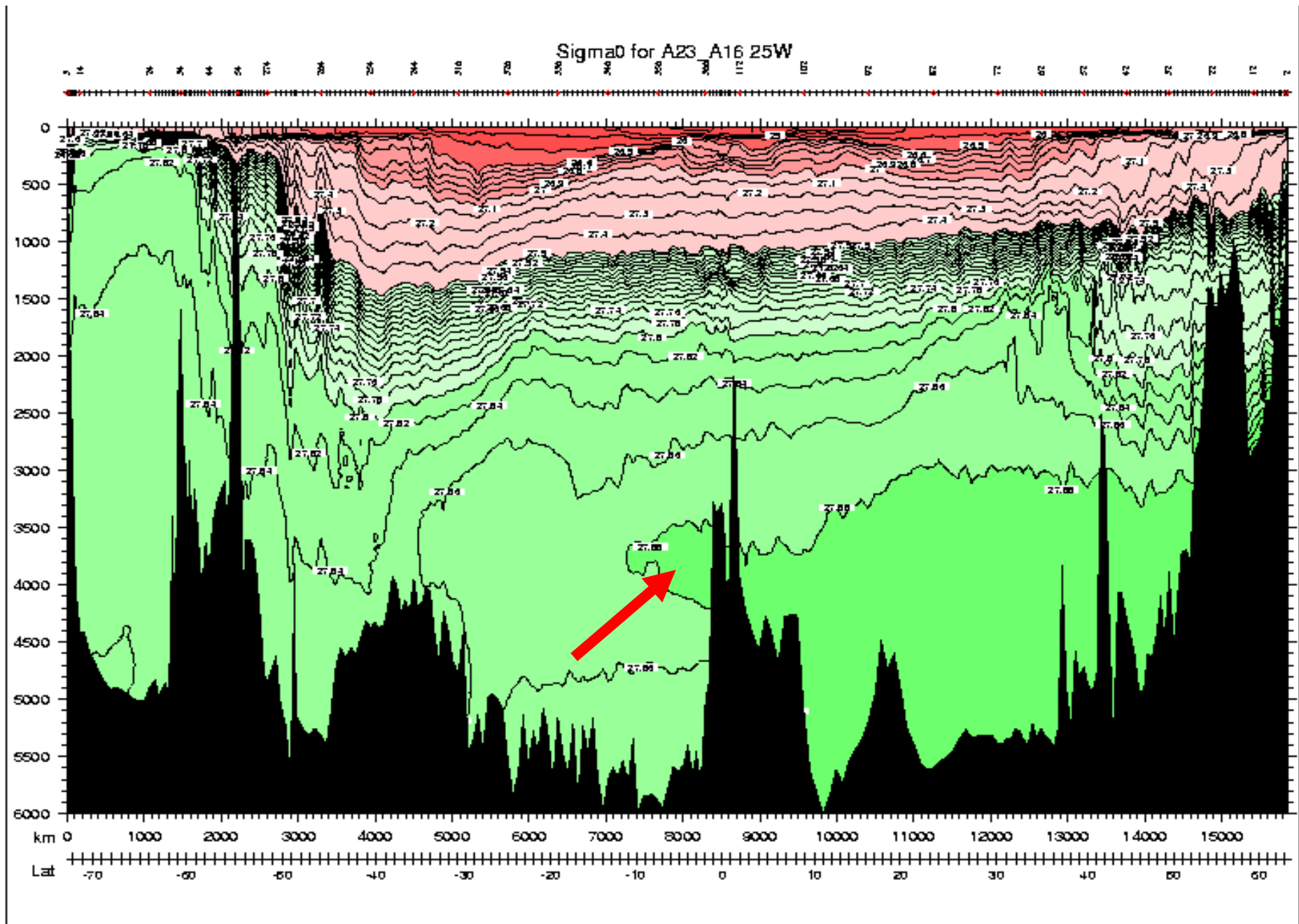
# Masse volumique: Distribution horizontale



Variations latitudinales: principalement liées à la température

Variations locales: régimes de pluie, fleuves, glaces

# Masse volumique: Distribution verticale - pycnocline



## Eau type et masse d'eau

### Définitions:

Une *eau-type* est une eau comportant des propriétés spécifiques en température et salinité acquises au moment de sa formation. La température et la salinité étant des *traceurs conservatifs*, seul le mélange peut modifier les caractéristiques des eaux types loin de toute frontière.

Une *masse d'eau* résulte du mélange d'un certain nombre d'eaux types. Ses propriétés sont alors intermédiaires.

Dans la pratique, masse d'eau est plus couramment utilisé.

# Diagramme $\theta$ -S: Exemple en Atlantique à 9°S

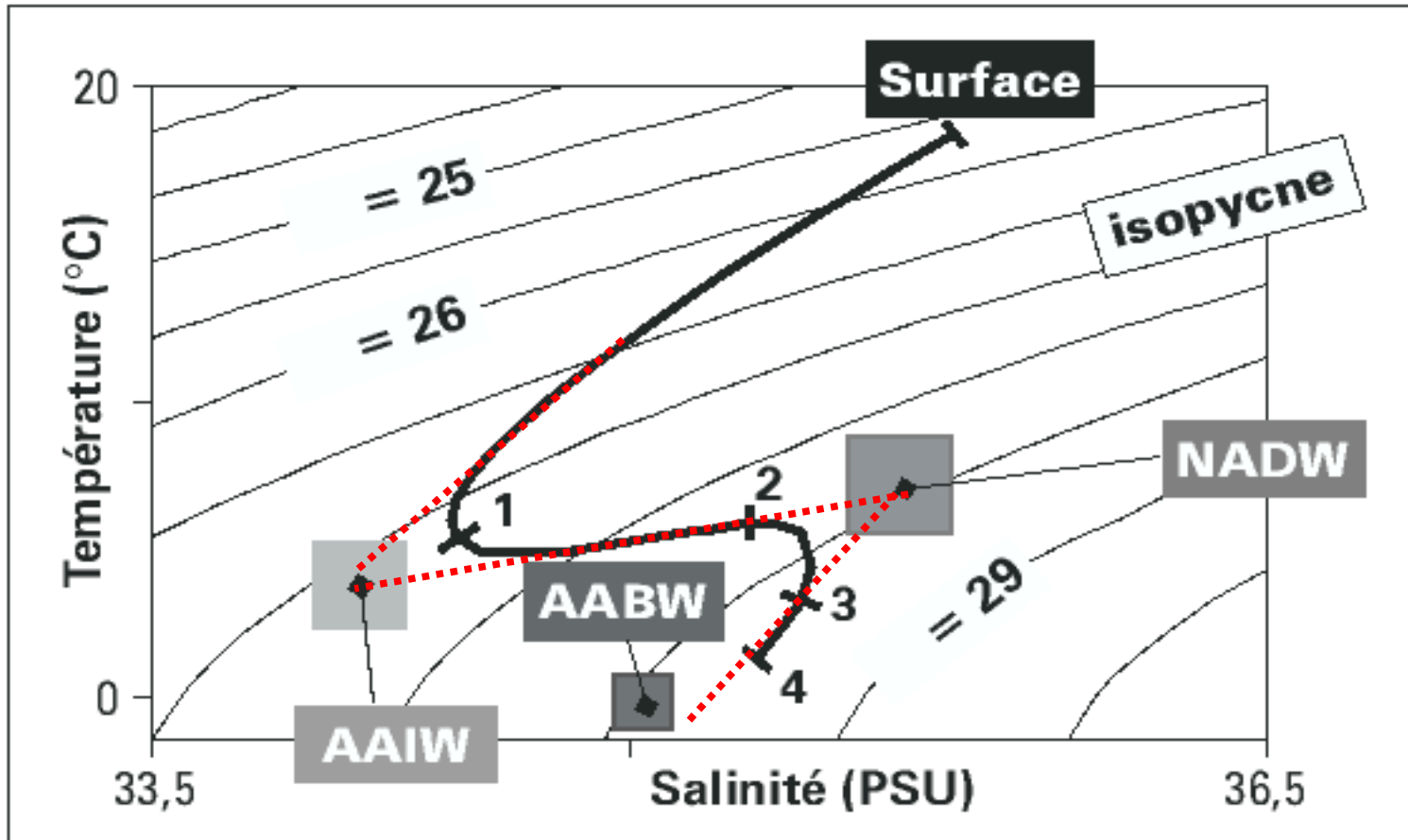


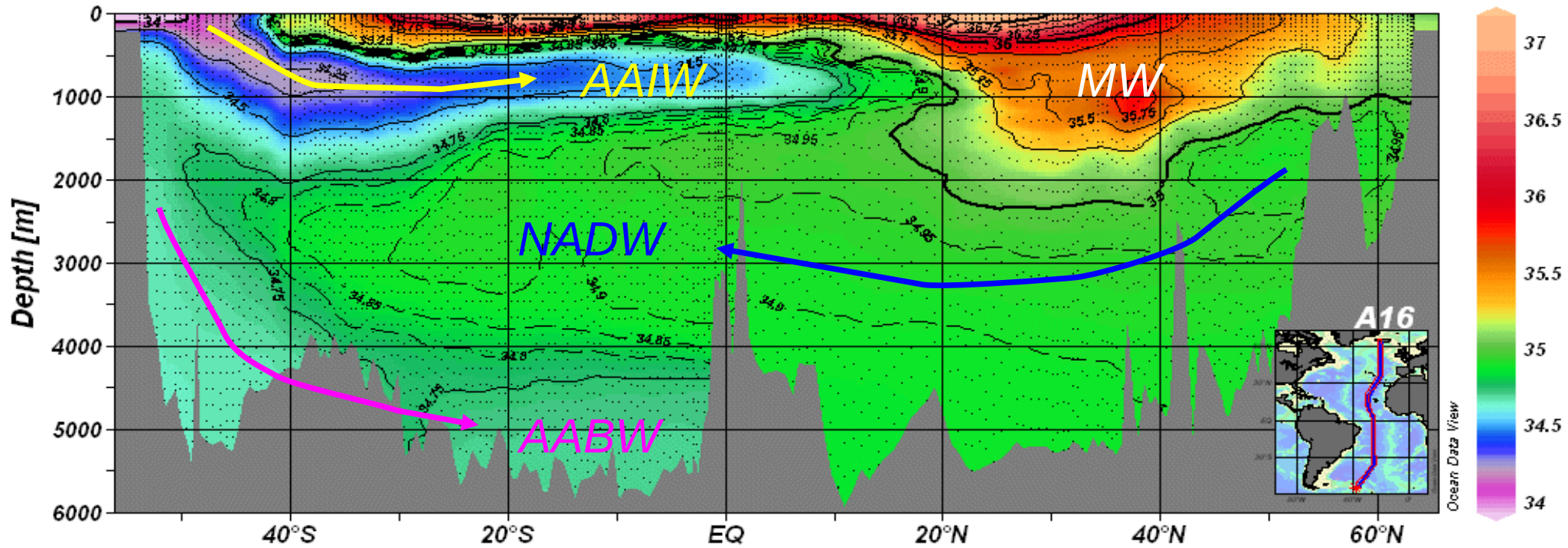
Diagramme issu d'un profil vertical réalisé à 9°S en Atlantique  
Comment pourrait-on faire pour déterminer l'origine /déplacement des masses d'eau ?

En ayant un même diagramme plus au nord ou au sud...

# Masses d'eau en Atlantique coupe N-S

eWOCE

Salinity [pss-78]

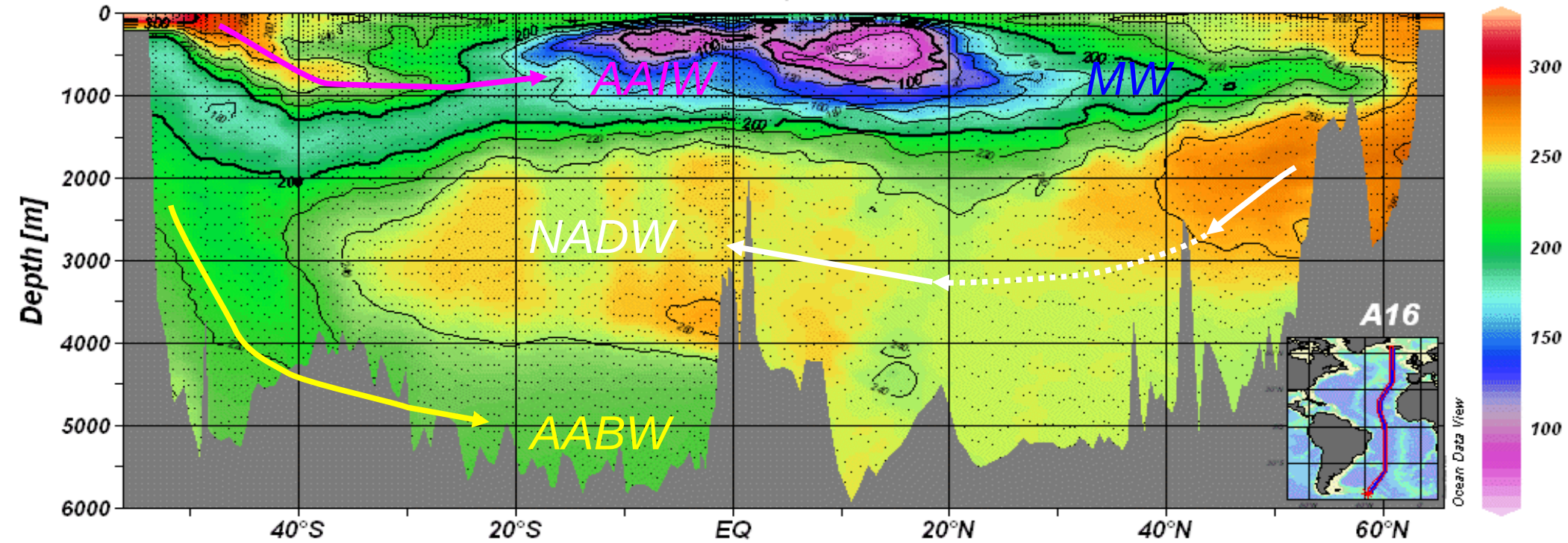




# Masses d'eau en Atlantique coupe N-S

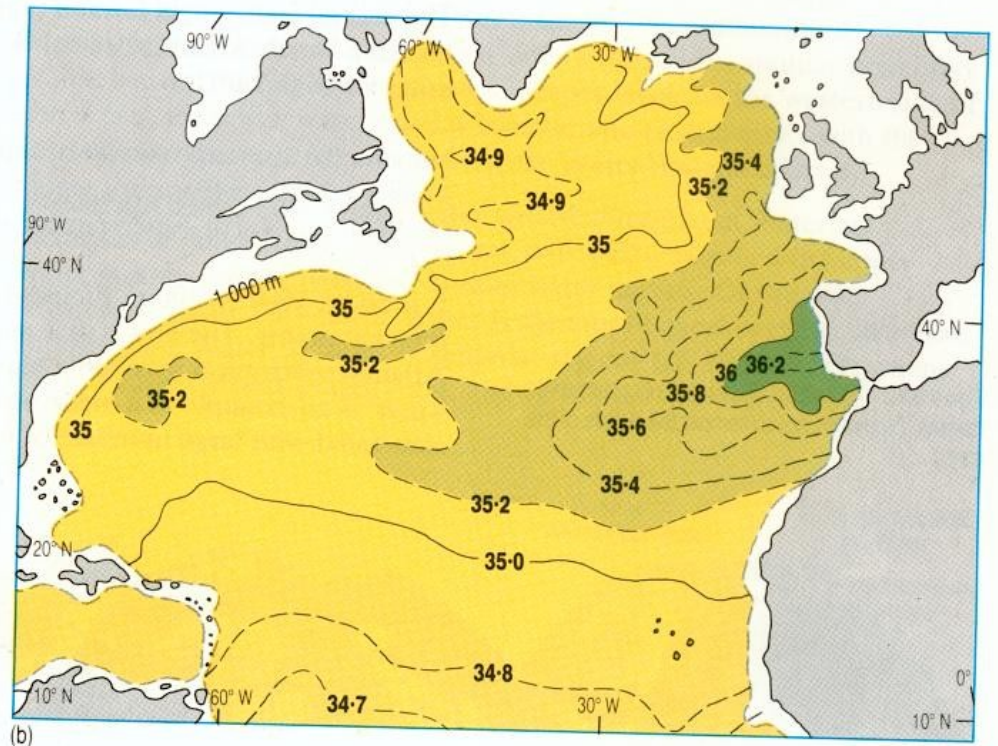
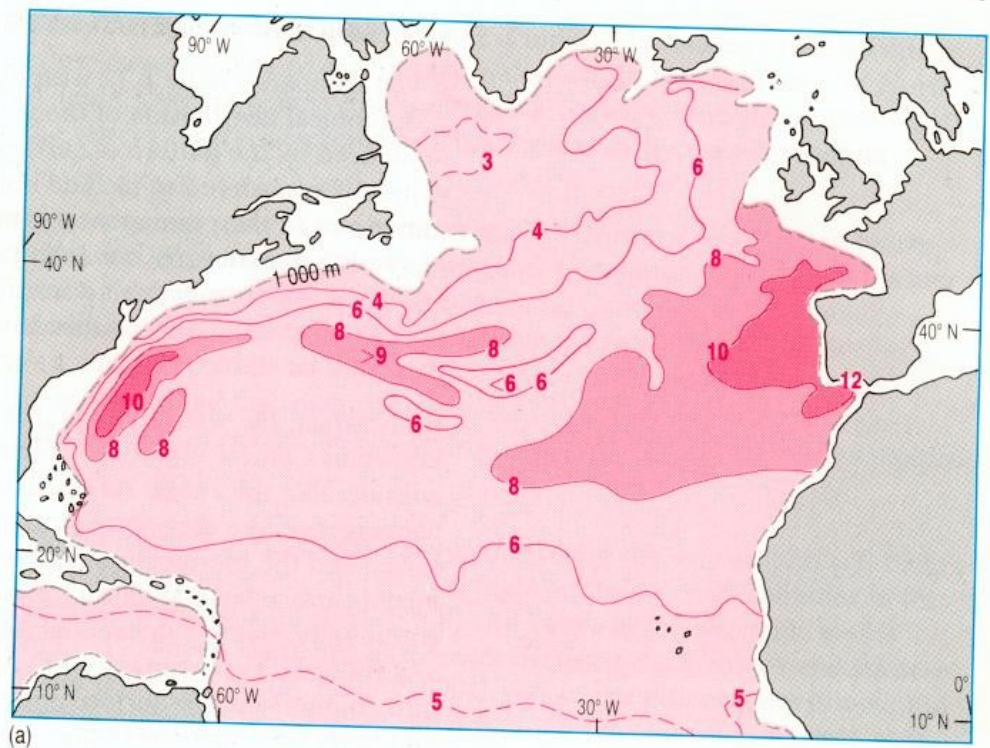
eWOCE

Oxygen [ $\mu\text{mol/kg}$ ]

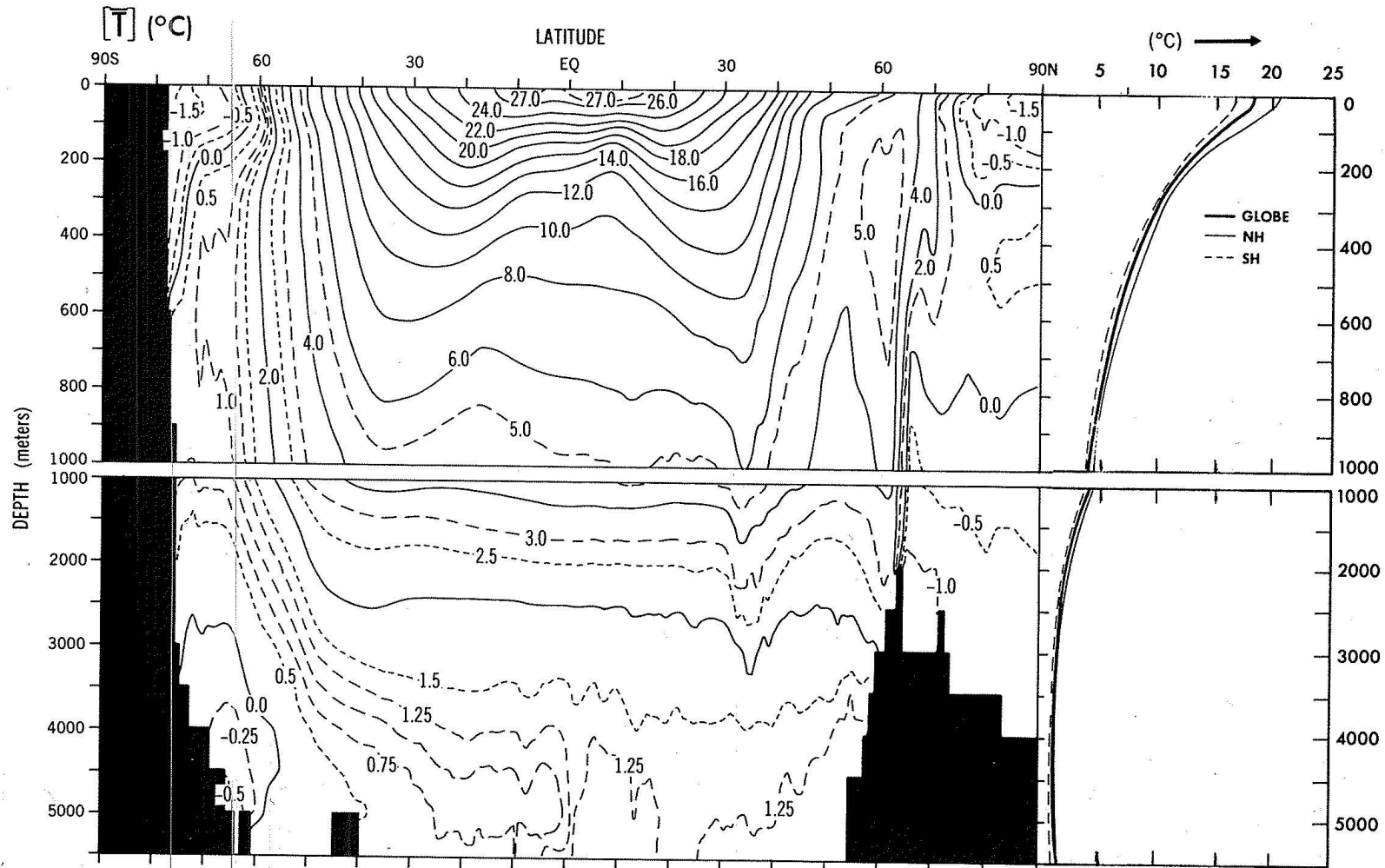


Température et  
salinité à 1000m  
dans l'Atlantique

Nord : progression de  
l'eau méditerranéenne

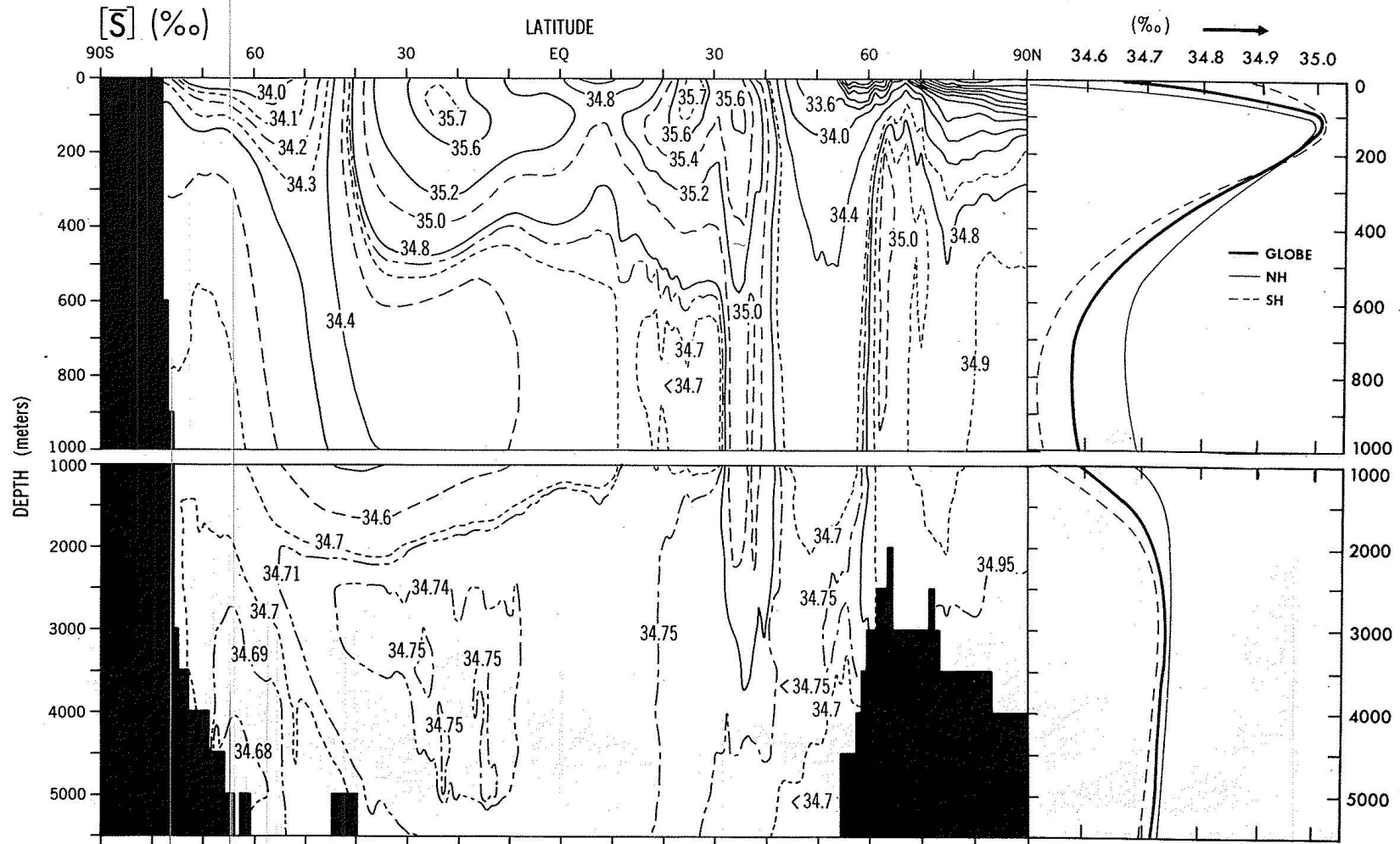


# température moyenne de l'océan 3.57°C



**FIGURE 8.4.** Zonal-mean cross section of temperature for the top ocean layer 0–1000 m and the layer below 1000 m in °C for annual-mean conditions. Vertical profiles of the hemispheric and global mean temperatures are shown on the right (after Levitus, 1982).

# salinité moyenne de l'océan 34.72psu

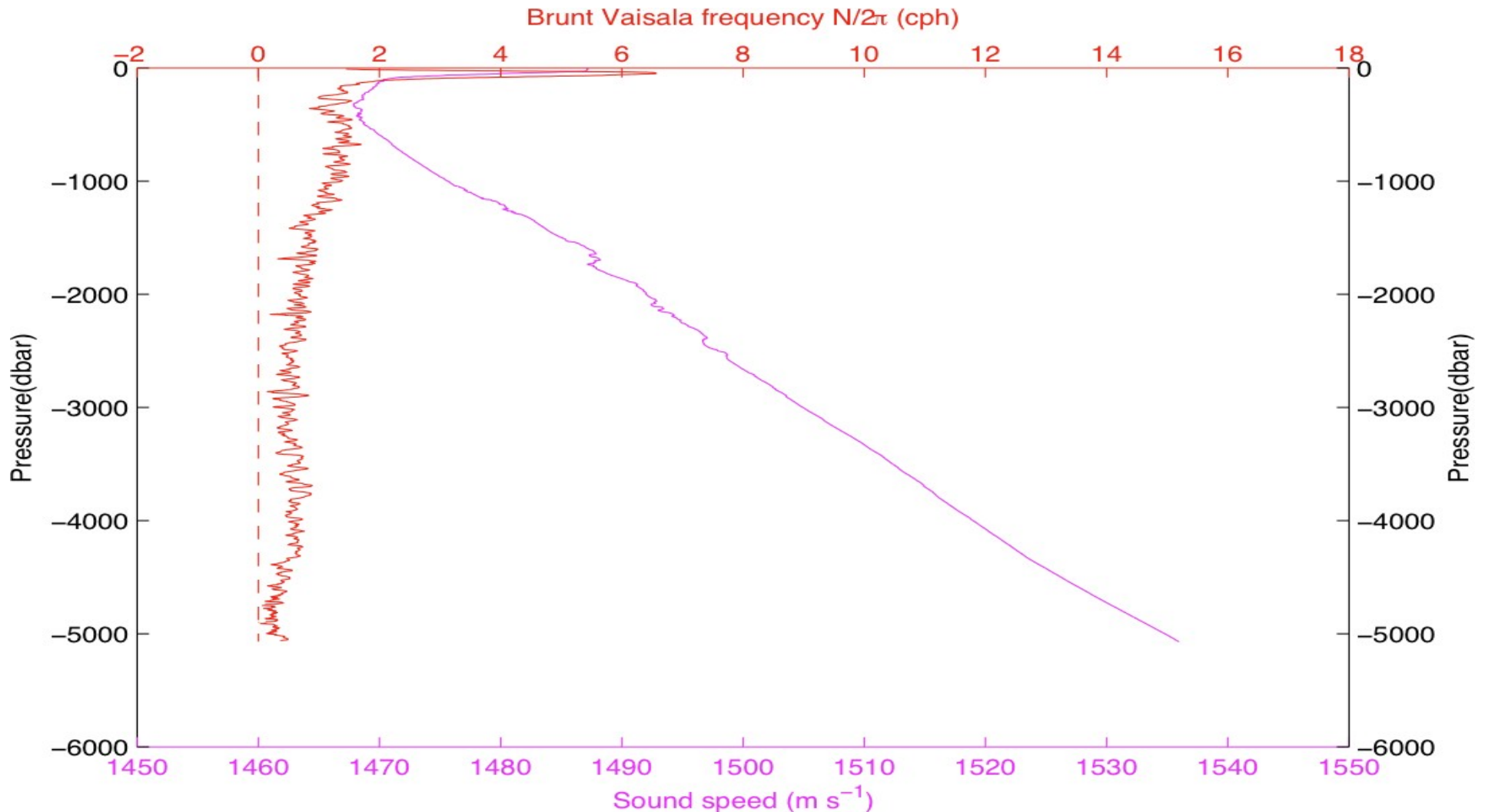


**FIGURE 8.12.** Zonal-mean cross section of salinity for the top ocean layer 0–1000 m and the layer below 1000-m depth in ‰ for annual-mean conditions. Vertical profiles of the hemispheric and global mean salinity are shown on the right (after Levitus 1982).

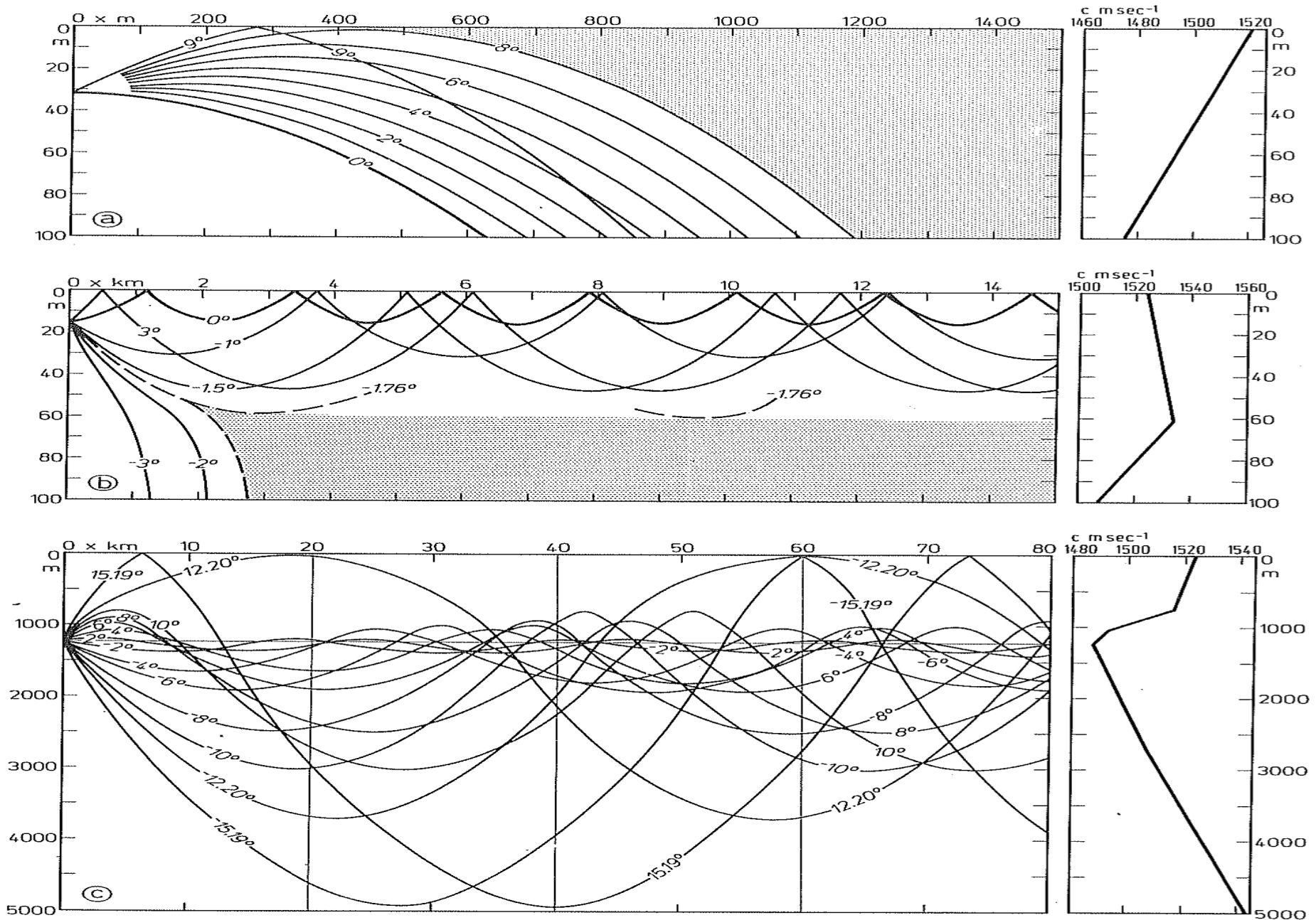
# Vitesse du son et fréquence de stabilité

$$c^2 = (\partial p / \partial \rho)_{\theta, S} \quad \text{et} \quad N^2 = -\frac{g}{r} \frac{dr}{dz} + \frac{g}{c^2} \frac{dc^2}{dz}$$

$N/2\pi$  est la fréquence d'oscillation maximale des ondes internes

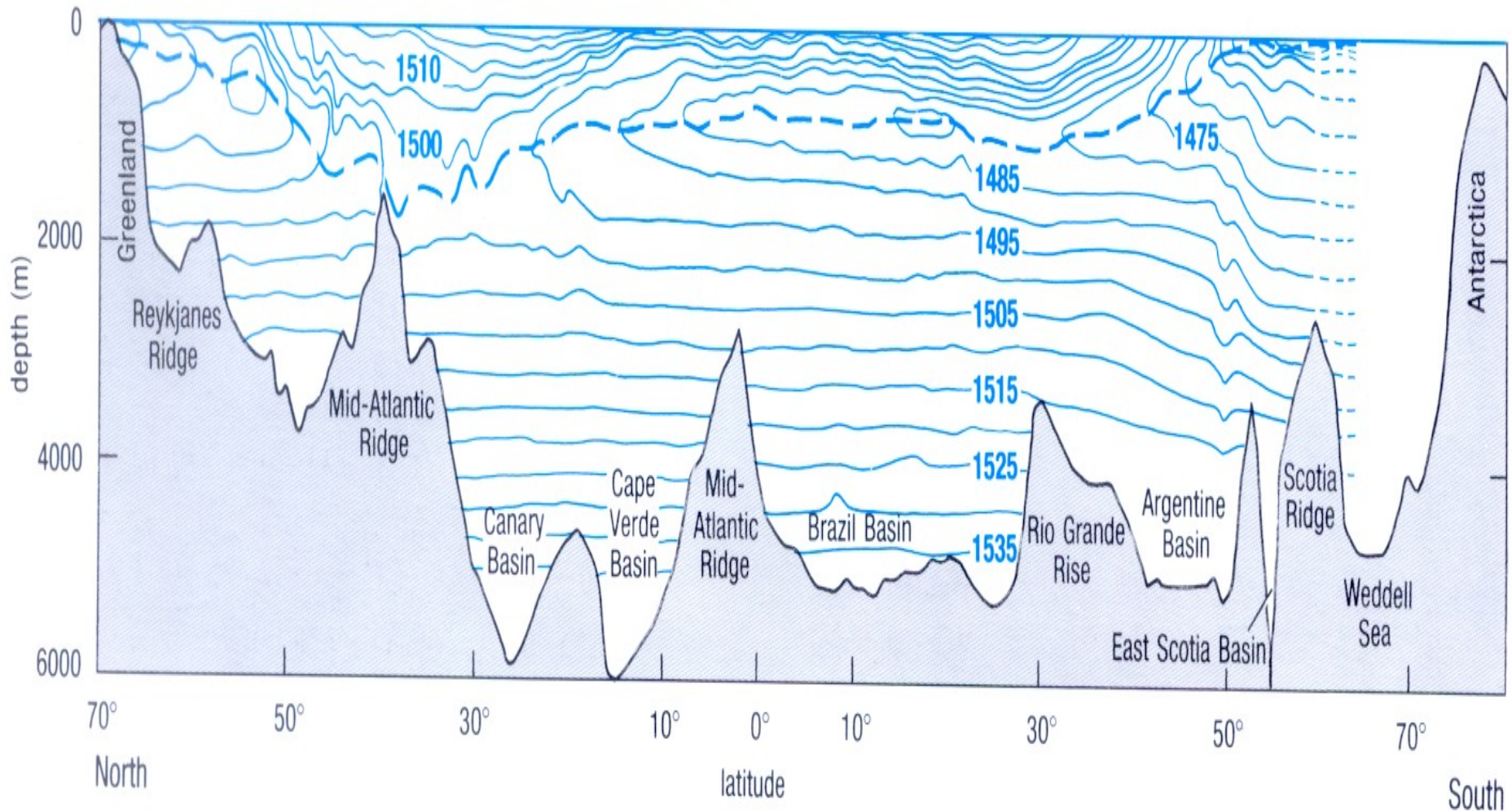


# Propagation d'un signal sonore (réfraction)

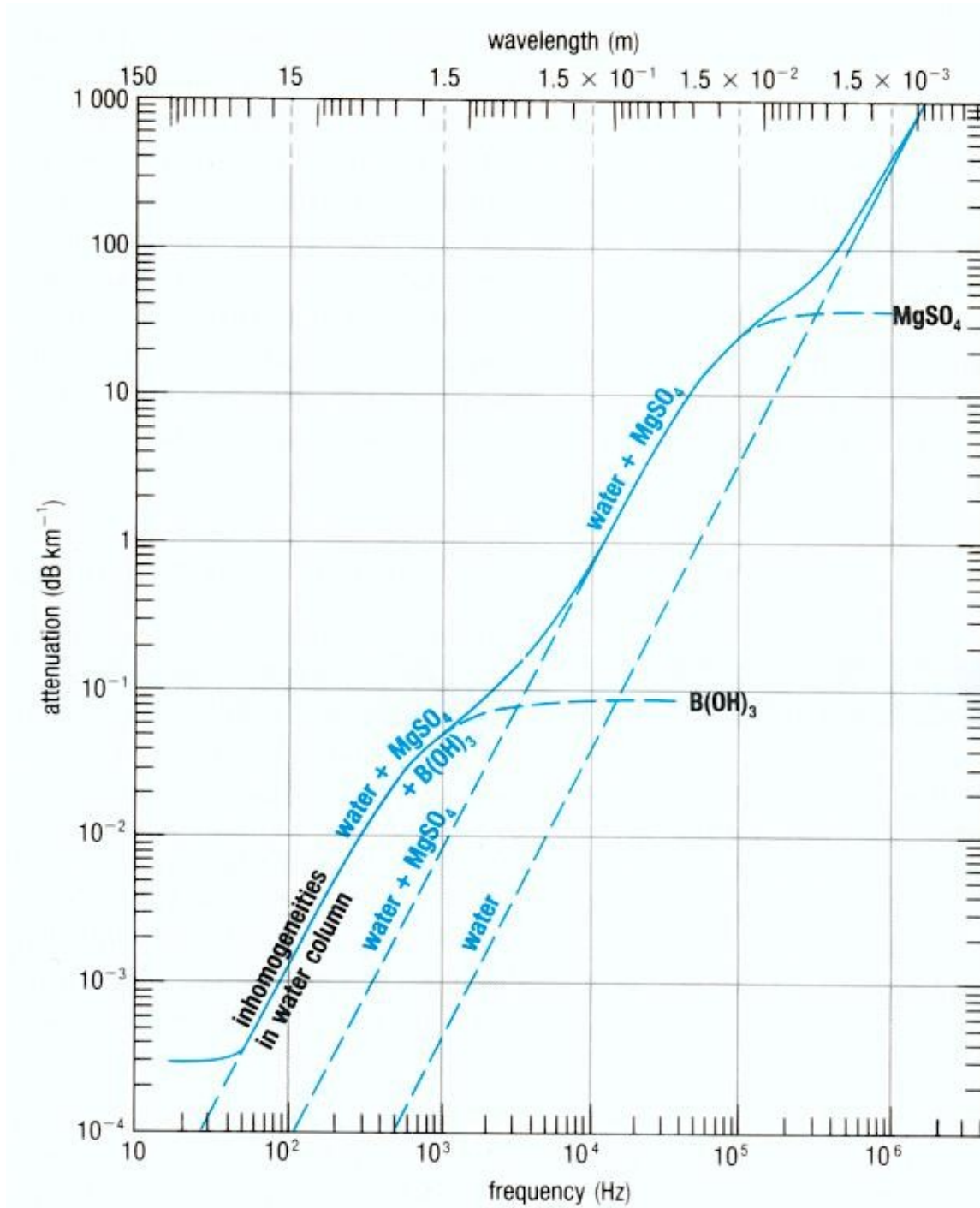


# Chenal SOFAR autour du minimum de vitesse du son

Les signaux sonores basses fréquence, e.g. à 250 Hz, vont se propager à plusieurs milliers de km sans atténuation importante. C'est la technique utilisée pour positionner les flotteurs dérivants de subsurface, de type RAFOS (i.e. acoustiques).



# Atténuation du son dans l'eau de mer



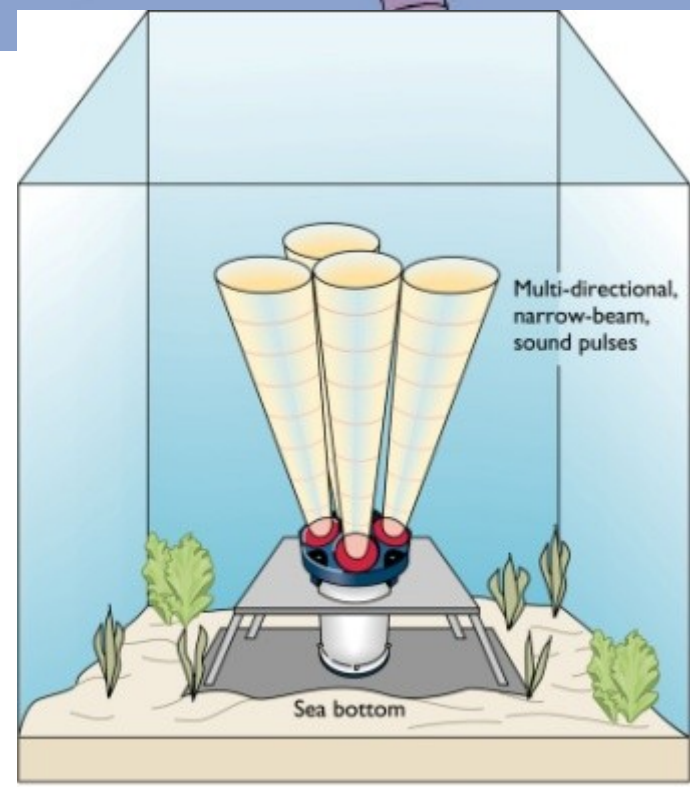
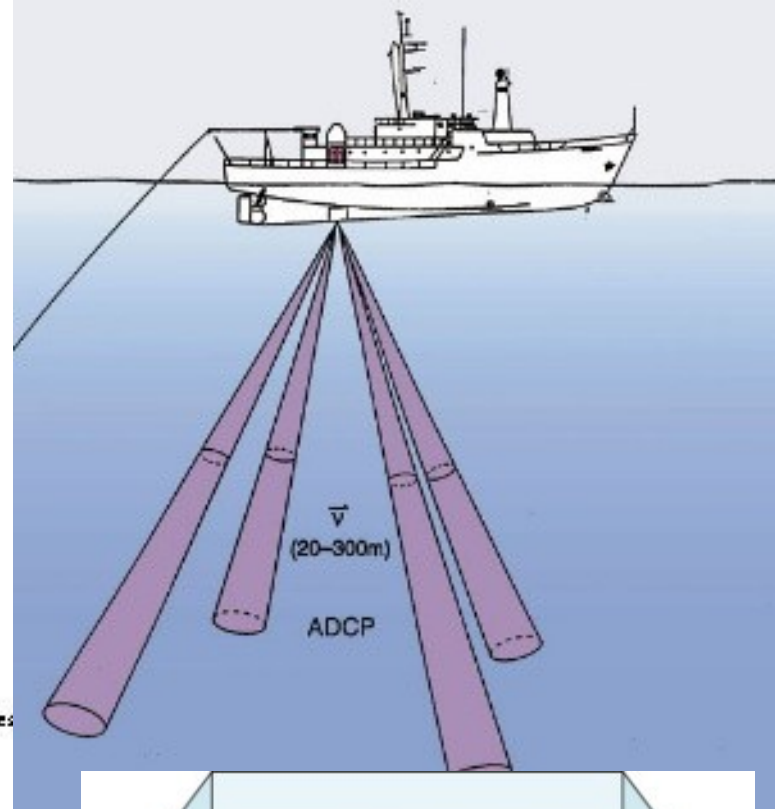
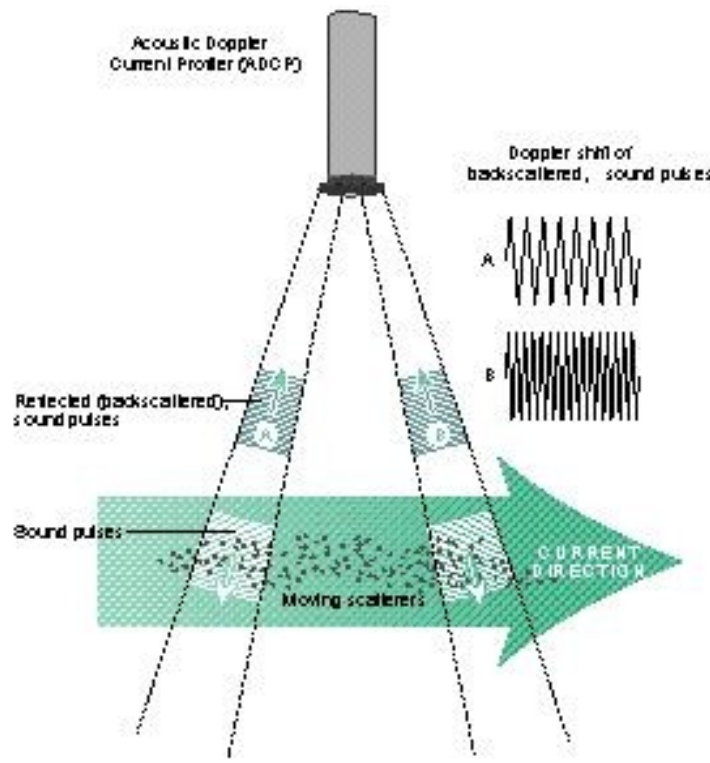


# Applications de l'acoustique à l'océanographie

- **sondeur** : mesure du fond, bathymétrie (multifaisceau), sédiments, poissons
- **localisation** de mouillages et flotteurs sous marins par triangulation
- sources acoustiques insonifient une région
- flotteurs acoustiques (technologie RAFOS puis SOFAR) : mesure de trajectoires et courants
- largeur acoustique sur mouillages (pilotage à distance)
  - **tomographie** : mesure de température
  - principe : temps de trajet fonction de température
  - approche inverse pour reconstruire champ de température entre plusieurs stations émission/écoute
  - mesure de la température moyenne de l'océan (projet ATOC : Acoustic Tomography of the Ocean Climate)
    - **ADCP** : mesures de courant
    - principe : effet Doppler (déphasage lié à vitesse de la particule qui réfléchit le signal)
    - ADCP = profileur acoustique de courant par effet Doppler
    - instrument embarqué, sur châssis immergé, sur mouillage ou au fond
    - accès à concentration de particules en suspension (biologie)

# ADCP

## Acoustic Doppler Current Profiler



(b) DOPPLER ACOUSTIC CURRENT METER