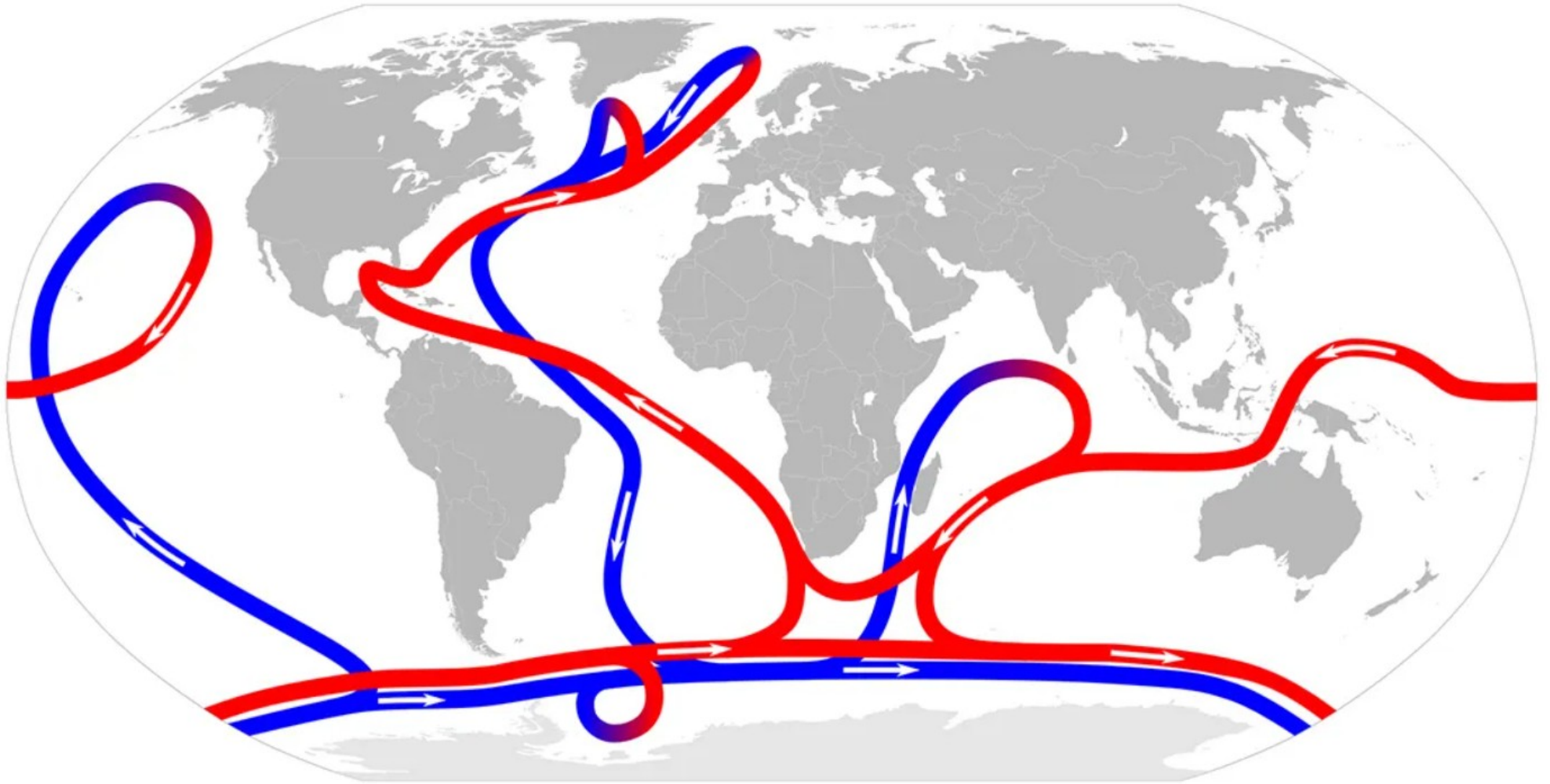
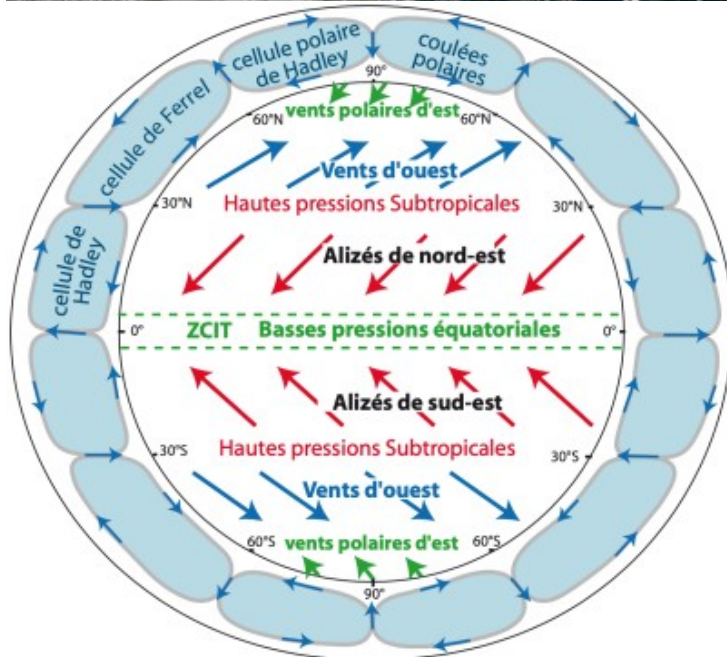
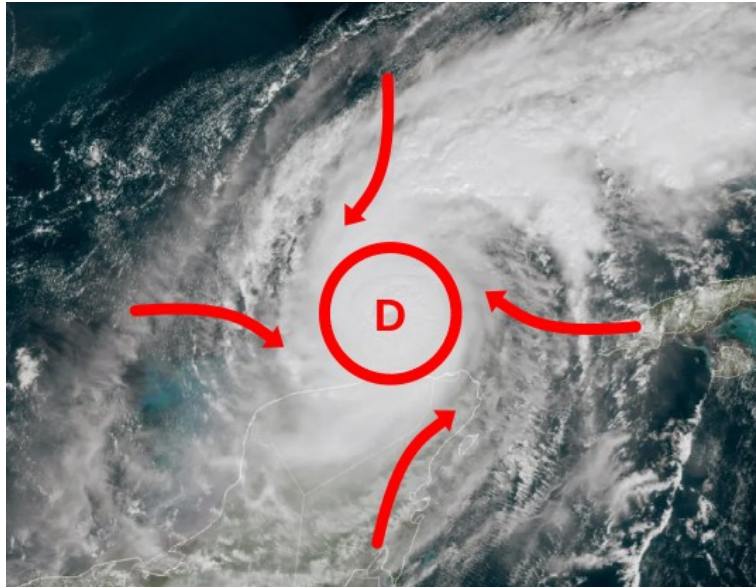


Une introduction à la circulation thermohaline



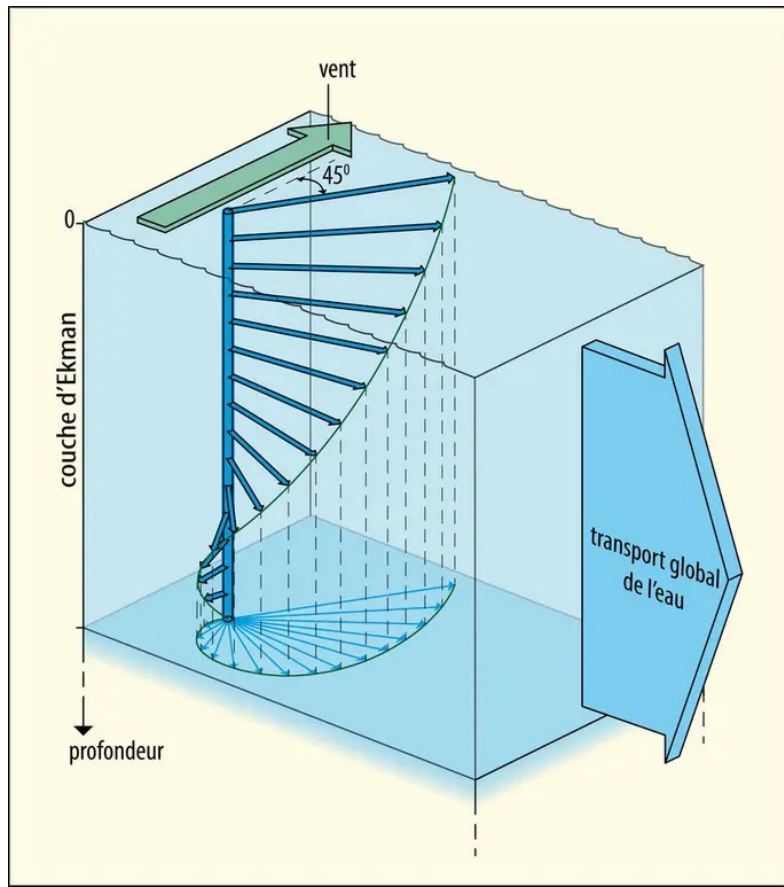
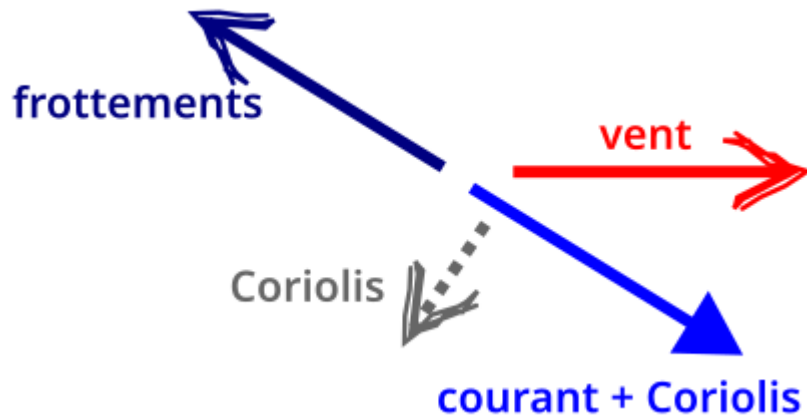
La dernière fois :



© L'océan planétaire, Michèle Fieux, ENSTA, 2019

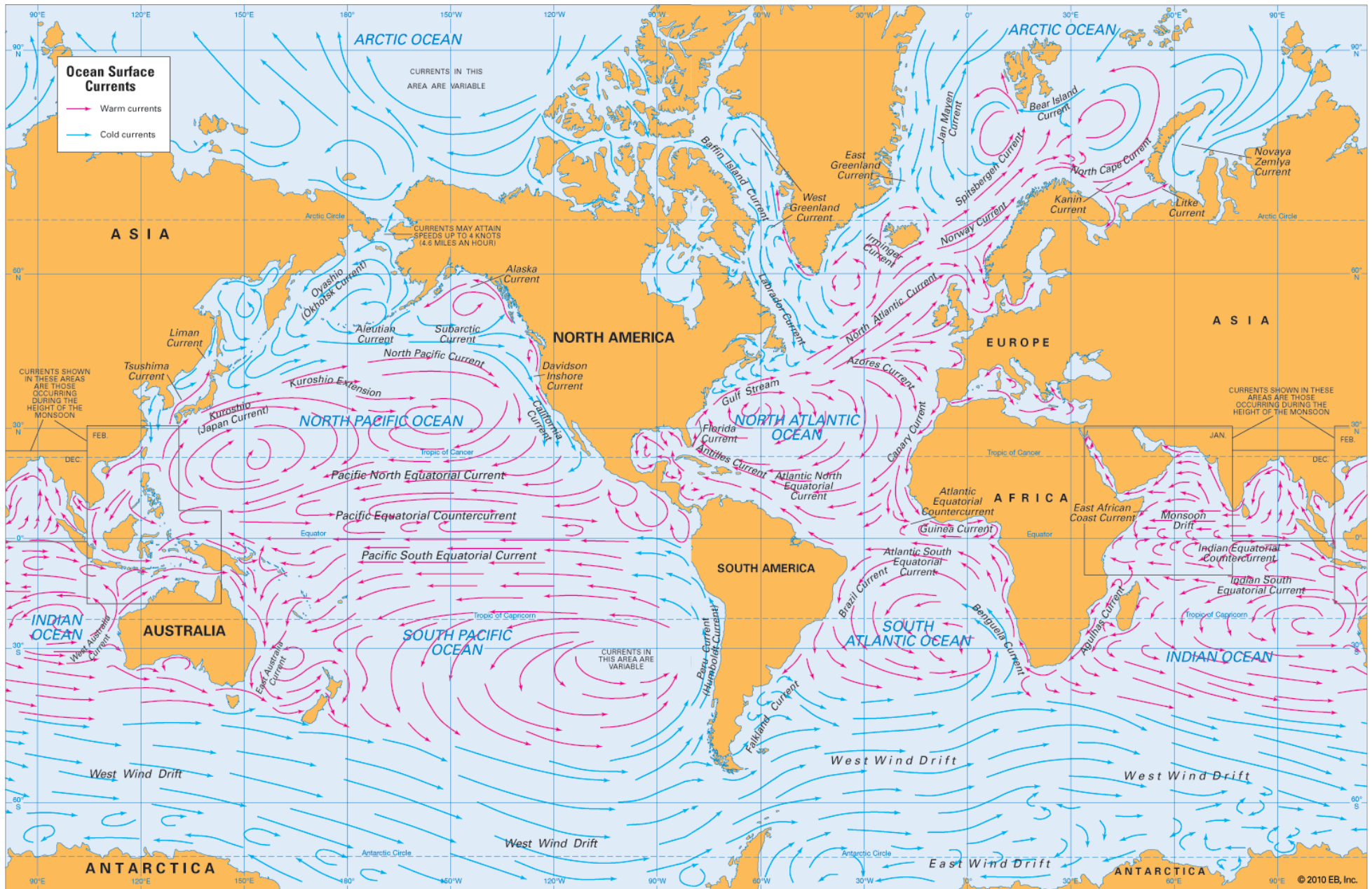
- La circulation océanique existe parce qu'il y a une source d'énergie (le soleil) + l'effet Coriolis
- L'effet Coriolis : un objet qui essaie de se déplacer en ligne droite ressentira une déviation vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud
- Grâce au soleil, on a :
 - Du vent
 - Des échanges de chaleur à l'interface océan-atmosphère

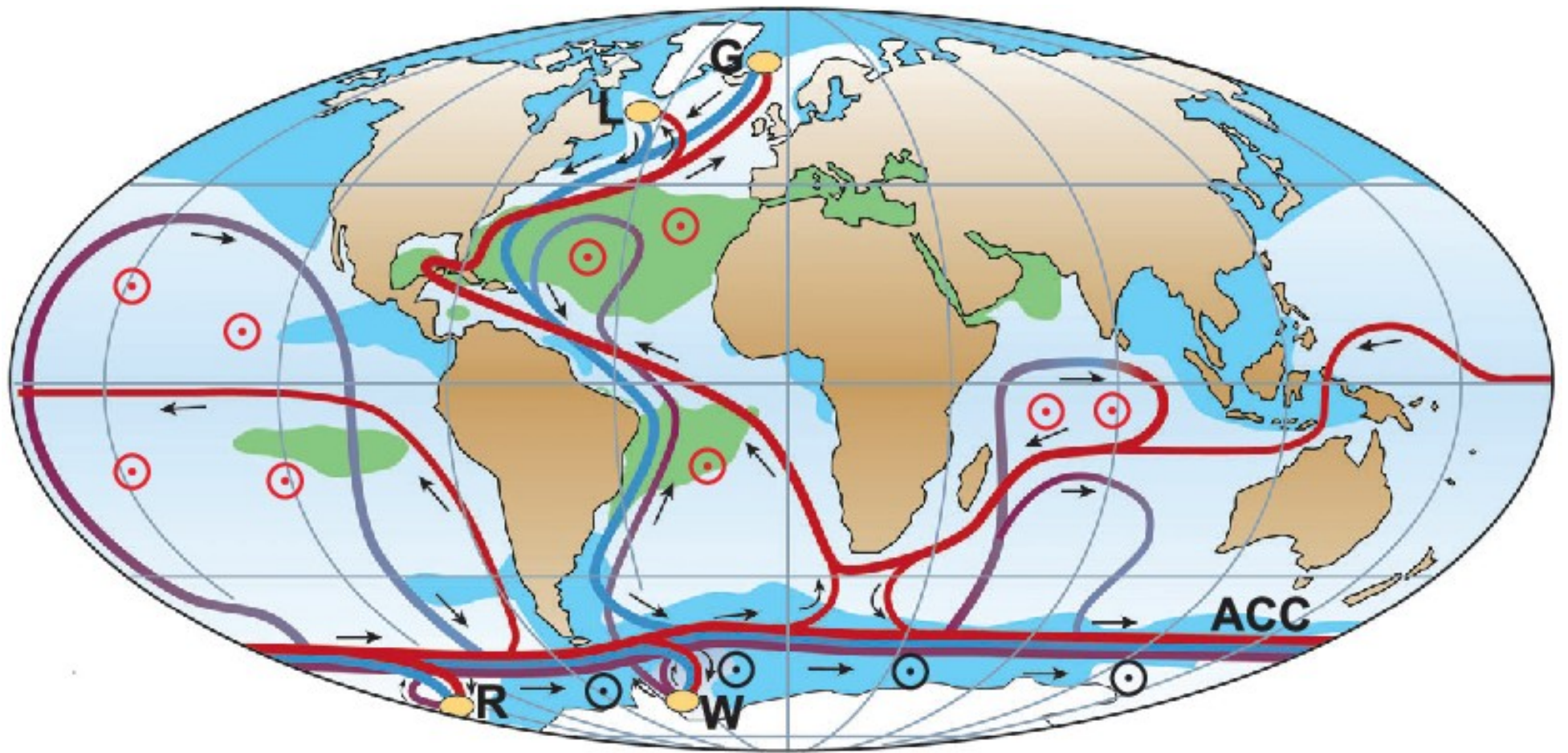
La dernière fois :



- Dans l'océan, le vent provoque un transport d'eau sur une centaine de mètres qui est dirigé à 90° à droite de la direction du vent dans l'hémisphère nord (vent + Coriolis + frottements = équilibre) = transport d'Ekman
- Ceci explique l'existence des gyres
- Et la partie verticale / méridionale de la circulation... ?

La circulation due au vent





— Surface flow
— Deep flow
— Bottom flow
● Deep Water Formation

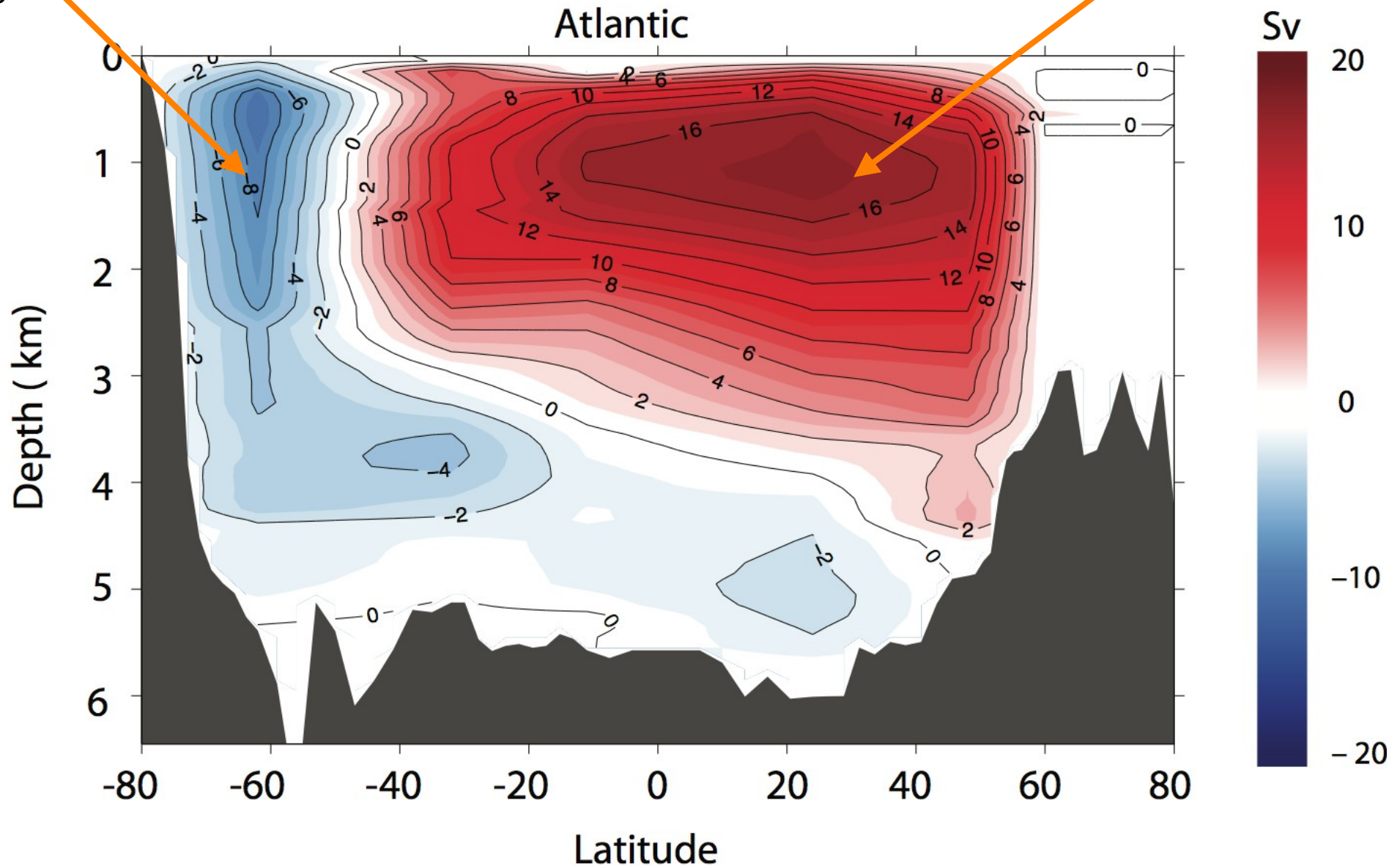
⊙ Wind-driven upwelling
⊙ Mixing-driven upwelling
■ Salinity > 36 ‰
■ Salinity < 34 ‰

L Labrador Sea
G Greenland Sea
W Weddell Sea
R Ross Sea

La circulation méridienne de retournement Atlantique

Bleu =
circulation
dans un
sens anti-
horaire

Rouge =
circulation
dans un
sens horaire

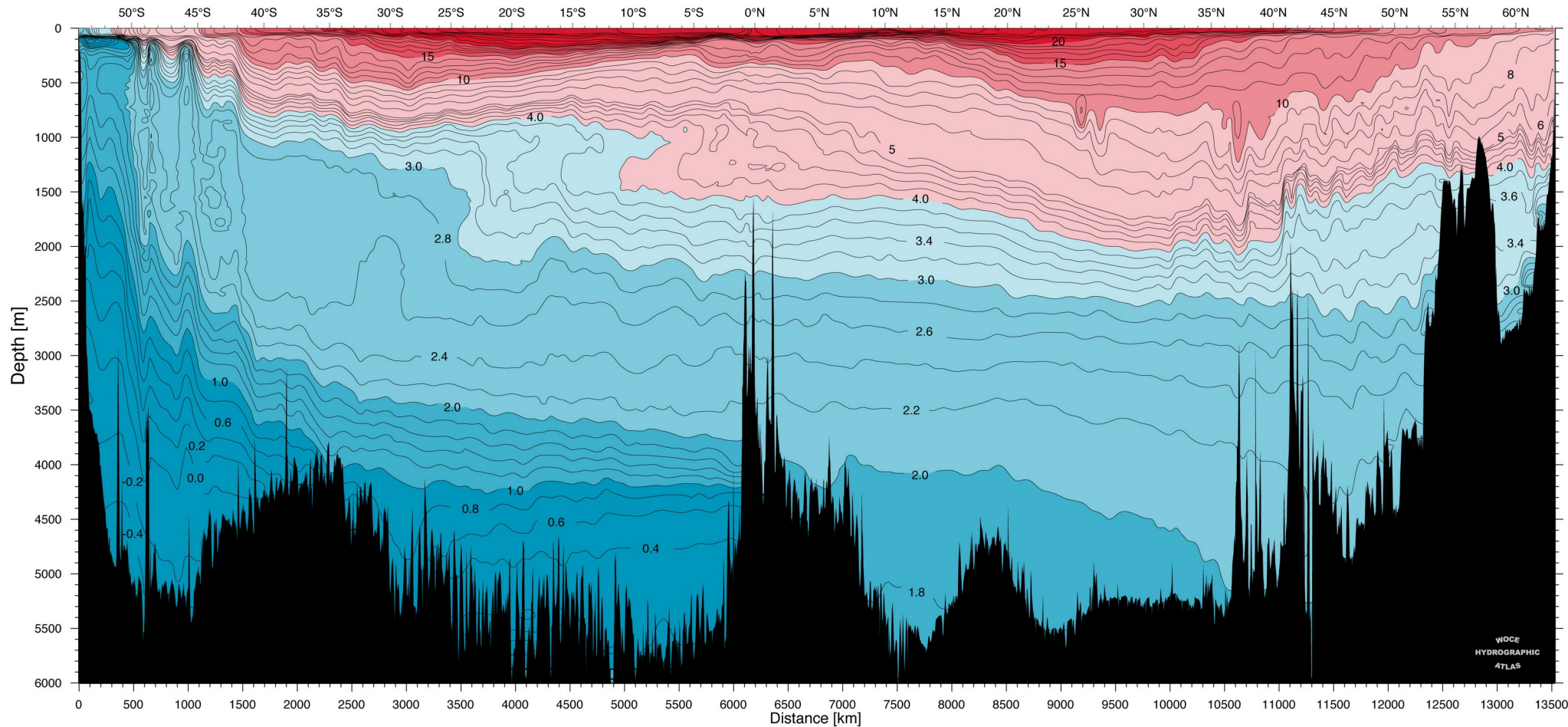
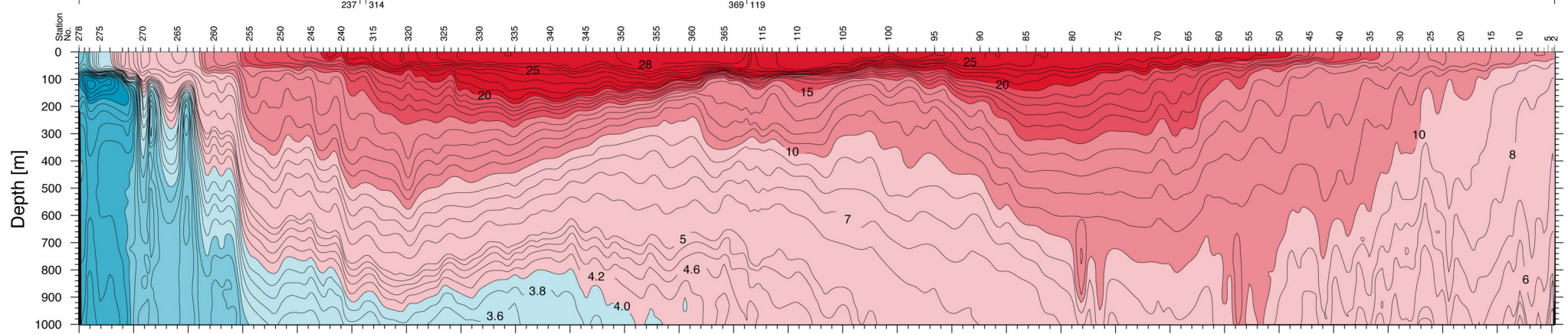


Potential Temperature [°C] for A16 25° W

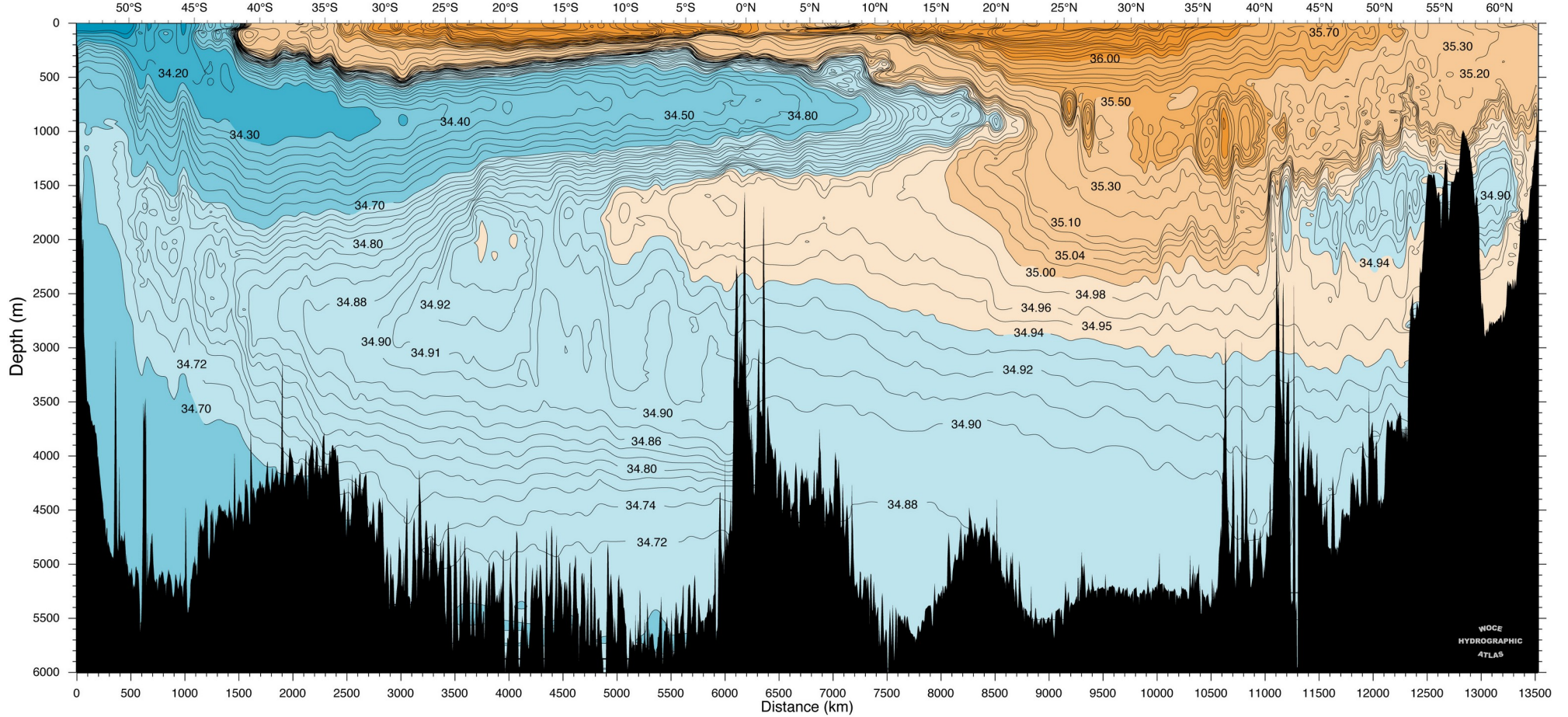
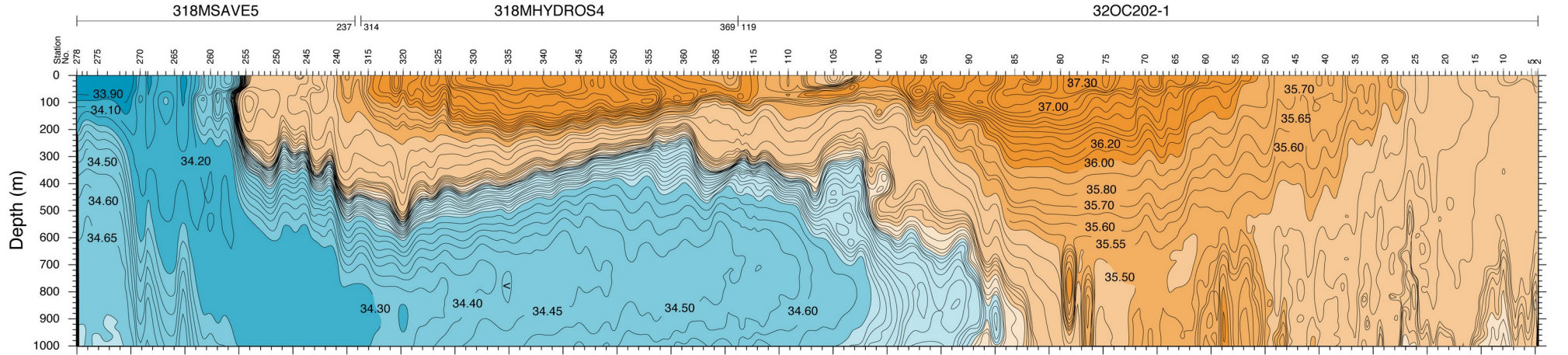
318MSAVE5

318MHYDROS4

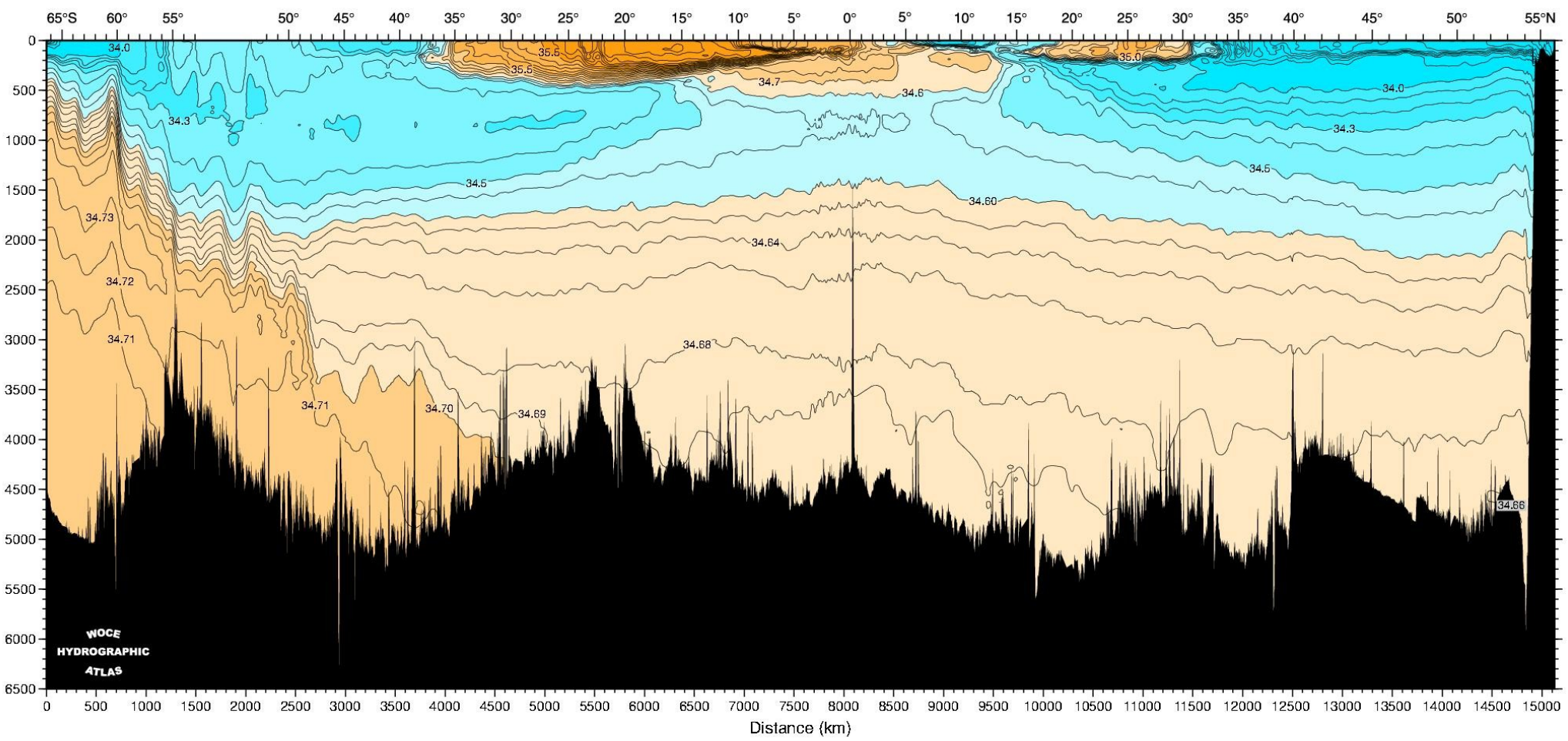
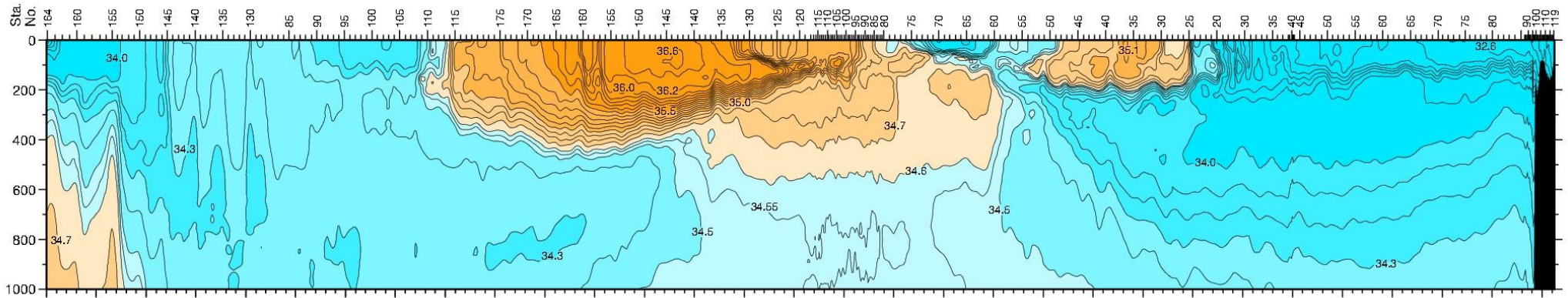
320C202-1



CTD salinity for A16 25° W

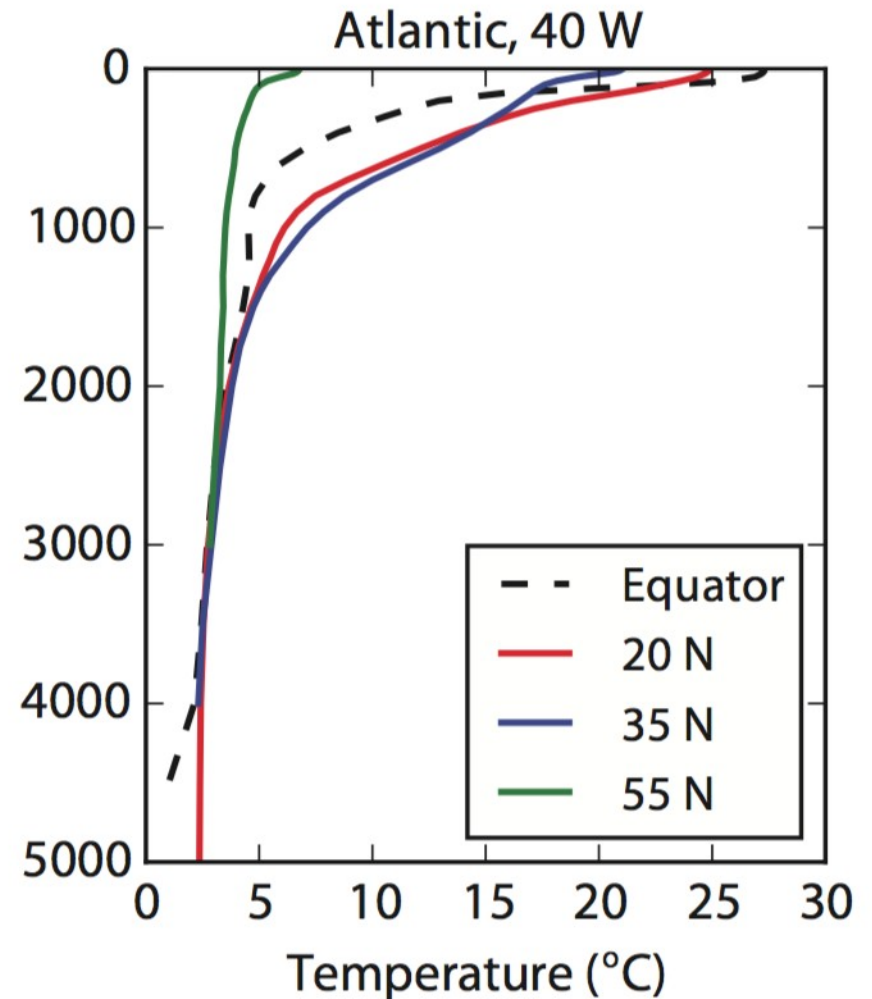


CTD Salinity for P17 135°W

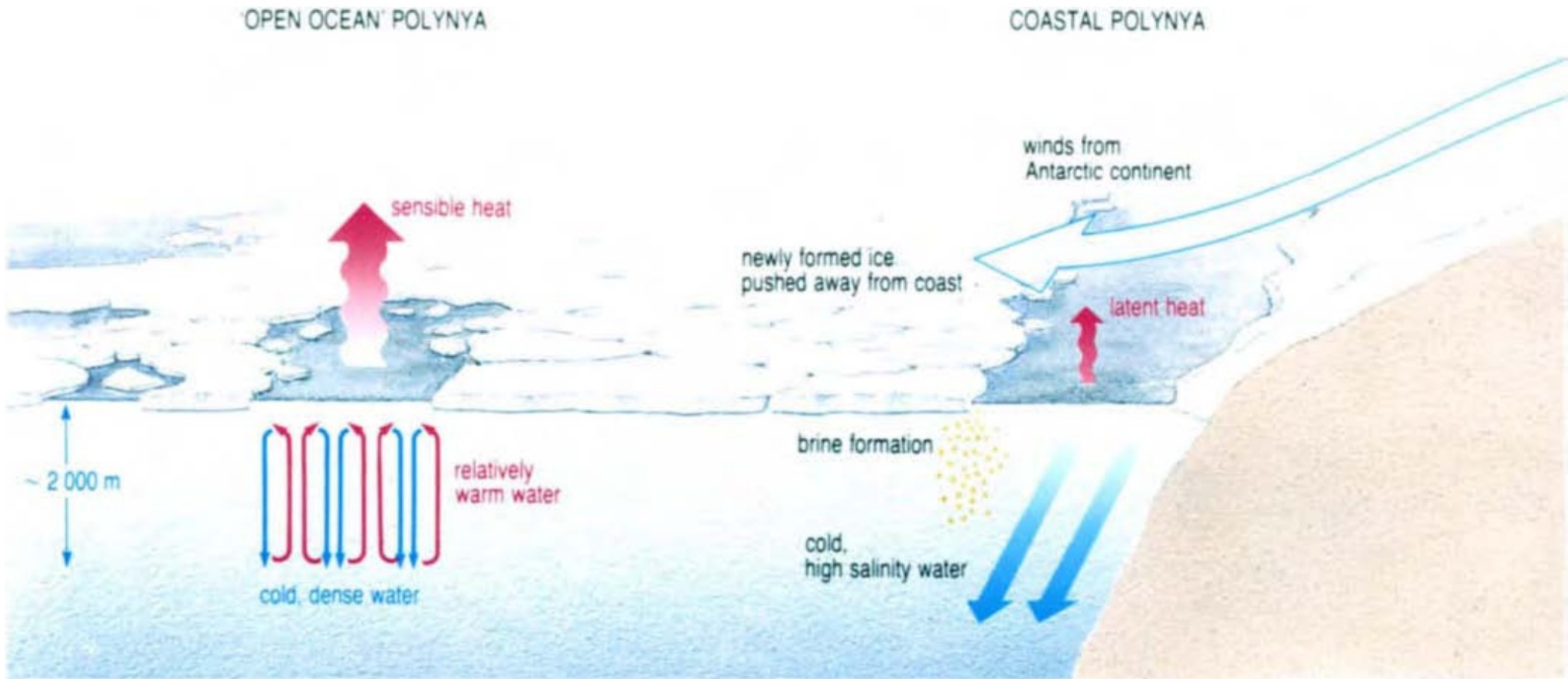


Formation d'eaux profondes

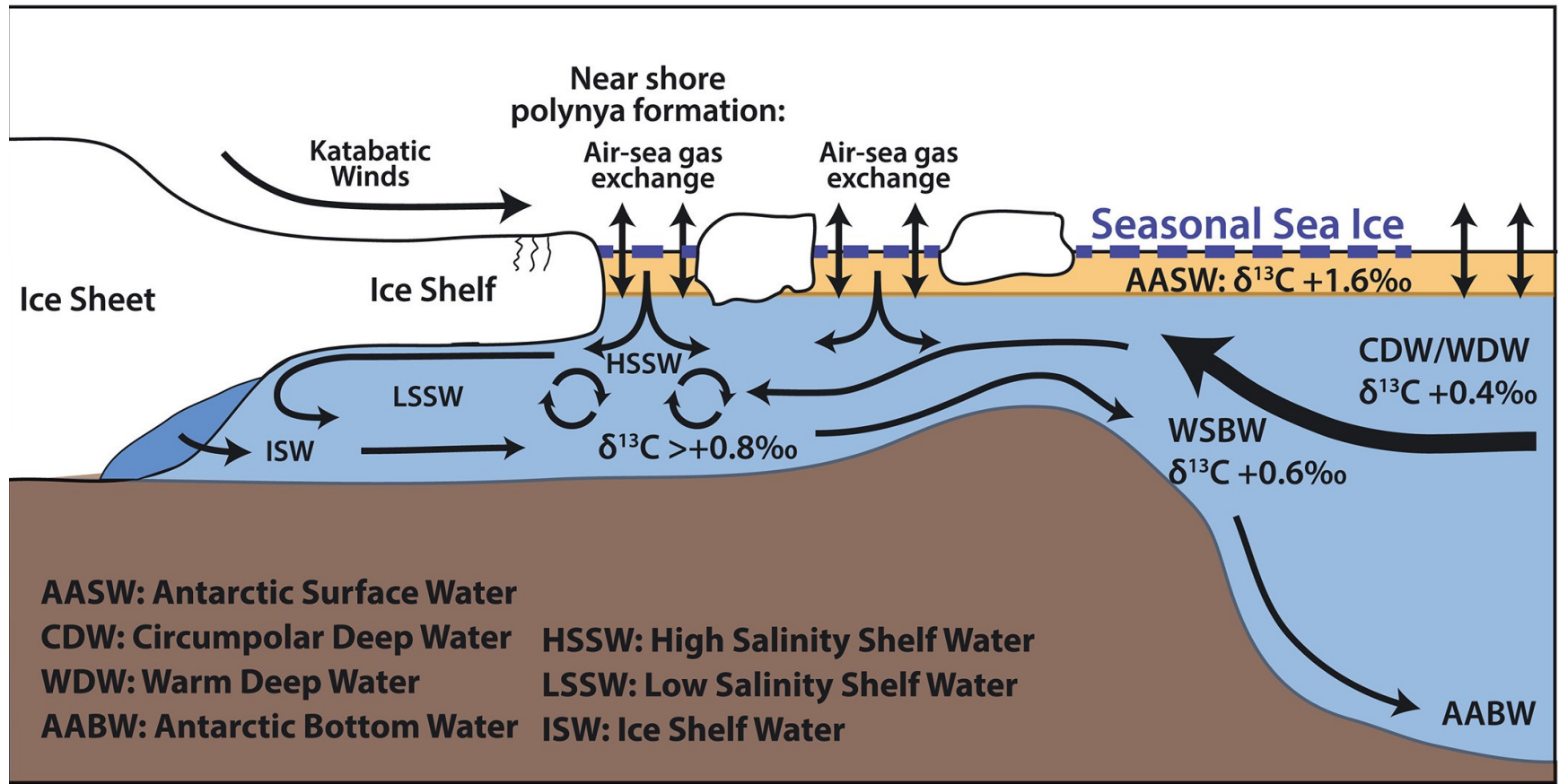
- La formation d'eaux profondes est un processus très localisé
- Elle demande une transformation de la densité des eaux de surface
- Il faut soit réduire la température de surface, soit augmenter la salinité (ou bien les 2)



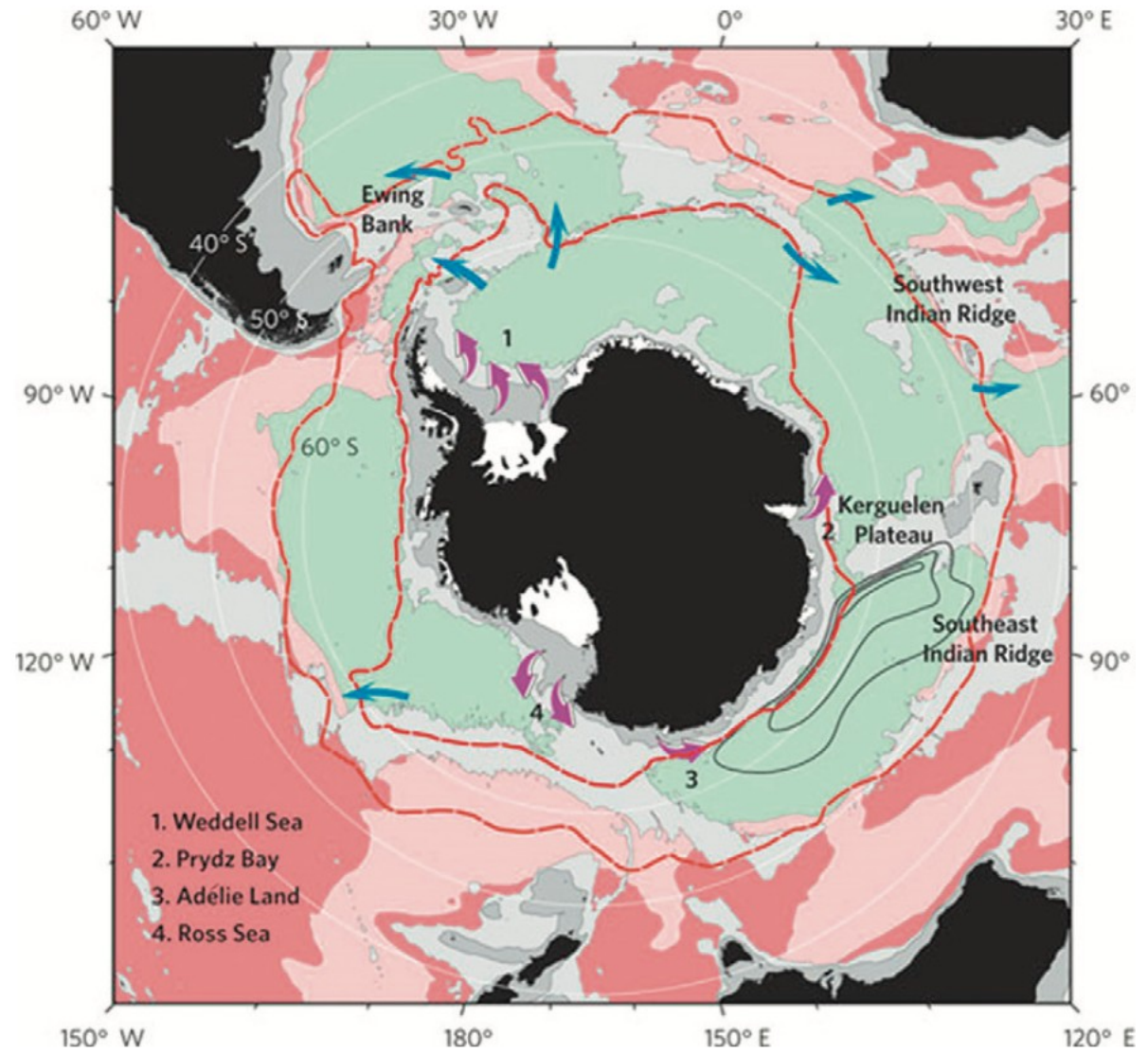
Formation d'eaux profondes



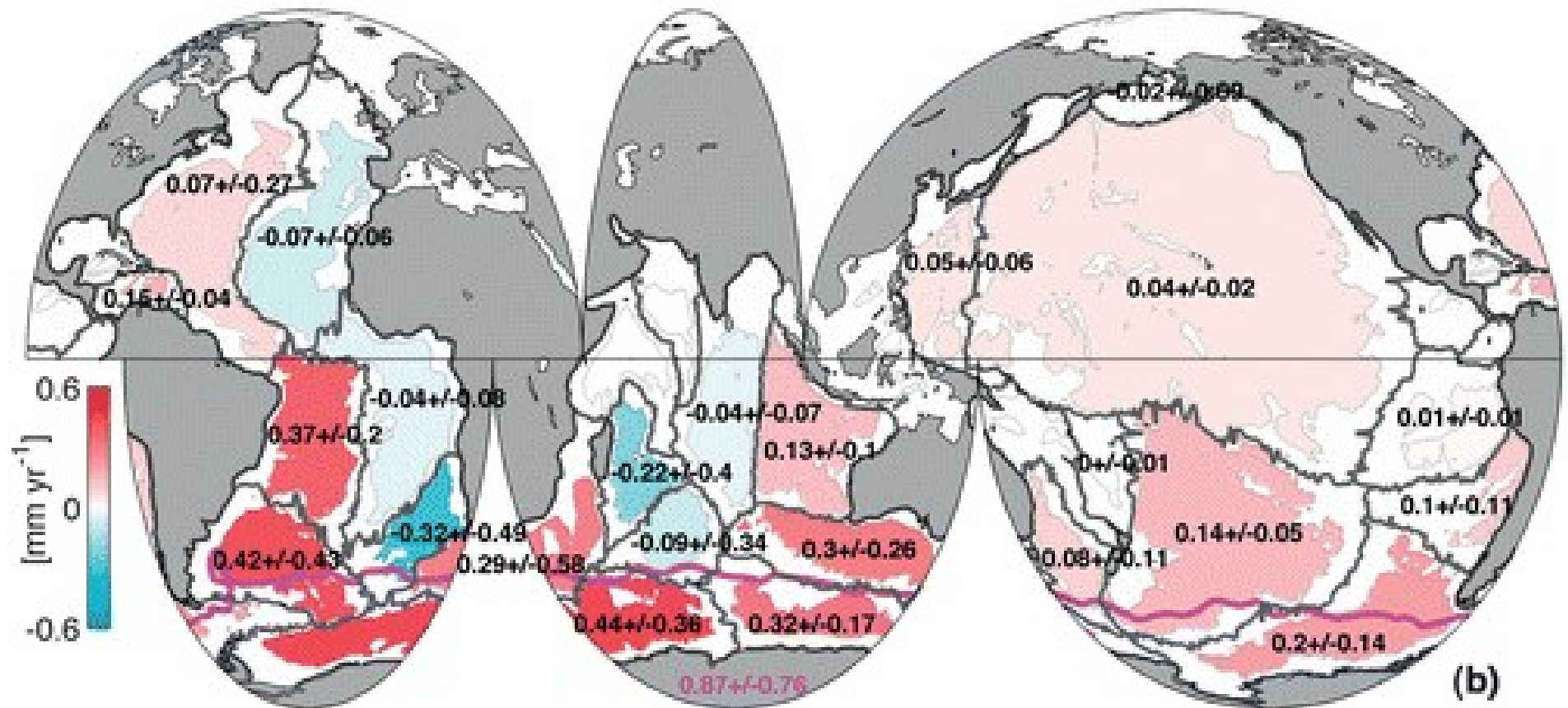
- La formation de glace de mer est associée aux températures froides, et à l'ajout du sel aux eaux sous-jacentes. Ceci déstabilise la colonne d'eau.
- En été, si la glace fond, elle laisse une couche d'eau (très) douce à la surface. Ceci stabilise la colonne d'eau.



- Les sites de formation d'eaux profondes autour de l'Antarctique sont très localisés
- Les variations climatiques vecues par ces régions seront « imprimées » sur les eaux qui y sont formées

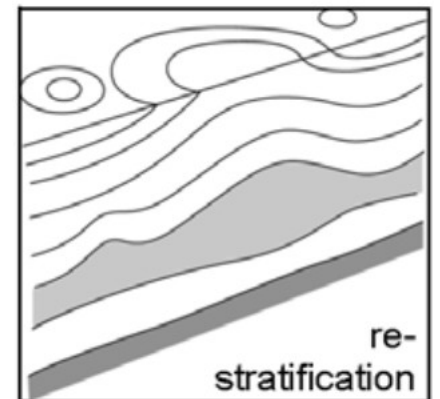
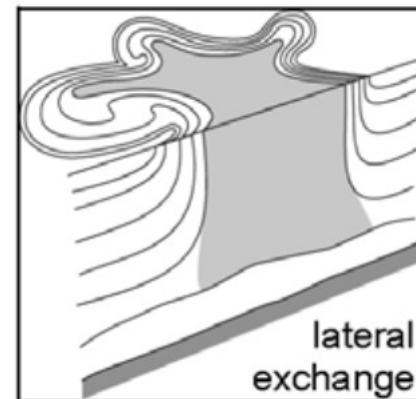
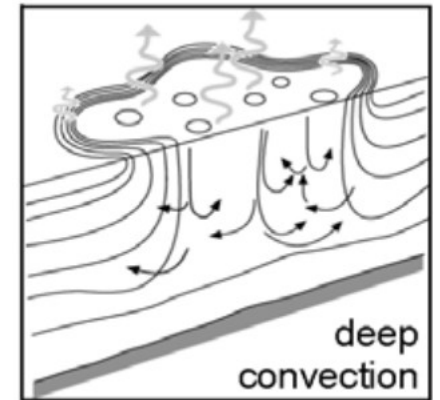
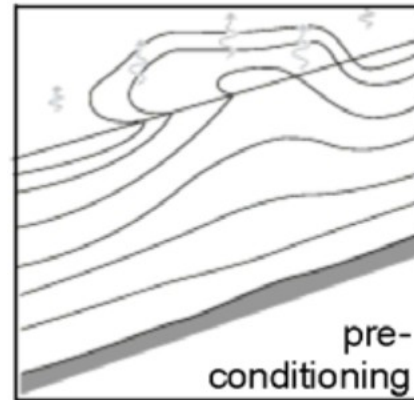


Contribution des eaux profondes à l'augmentation du niveau de la mer

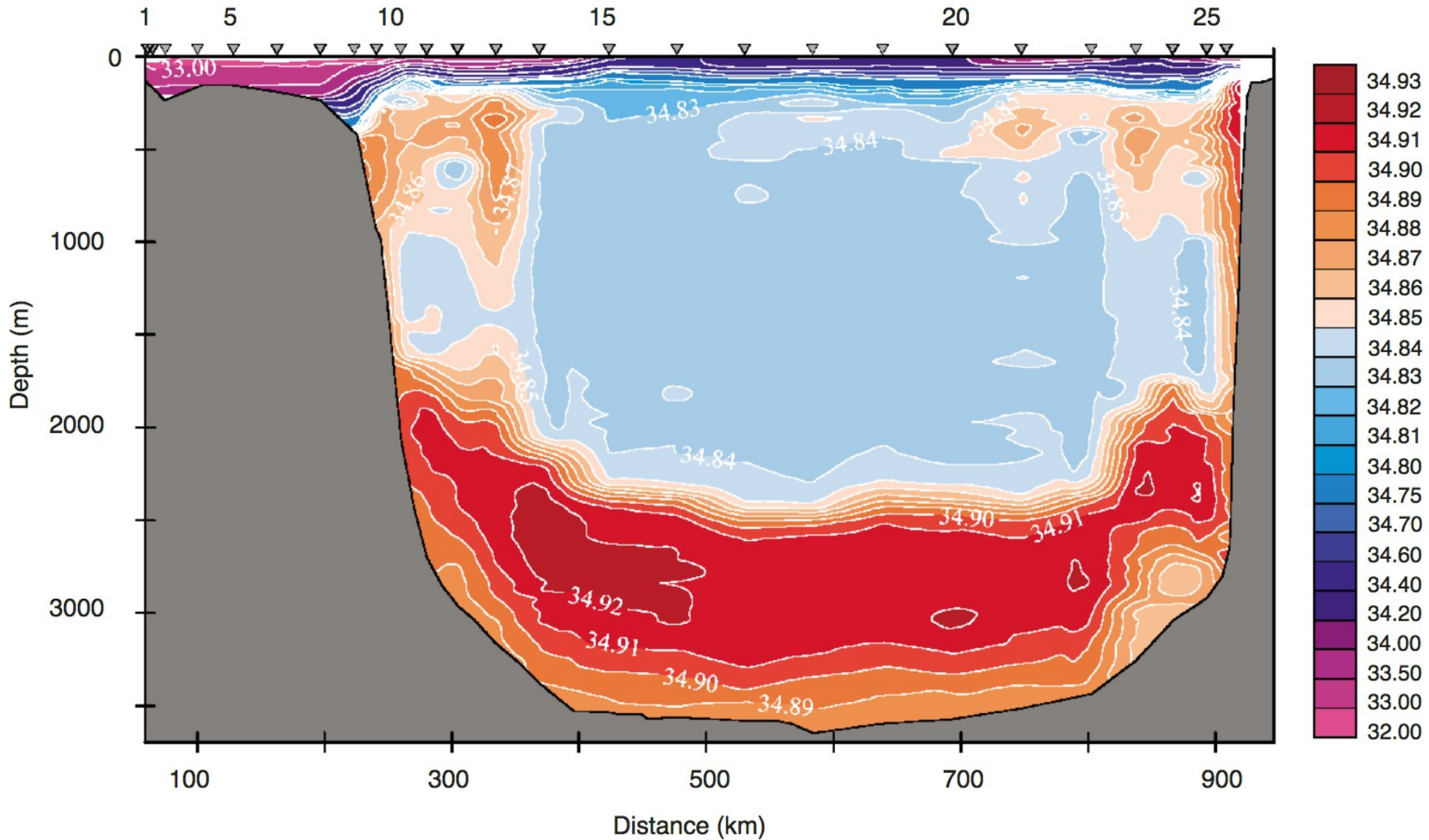


Convection profonde autour de Groenland

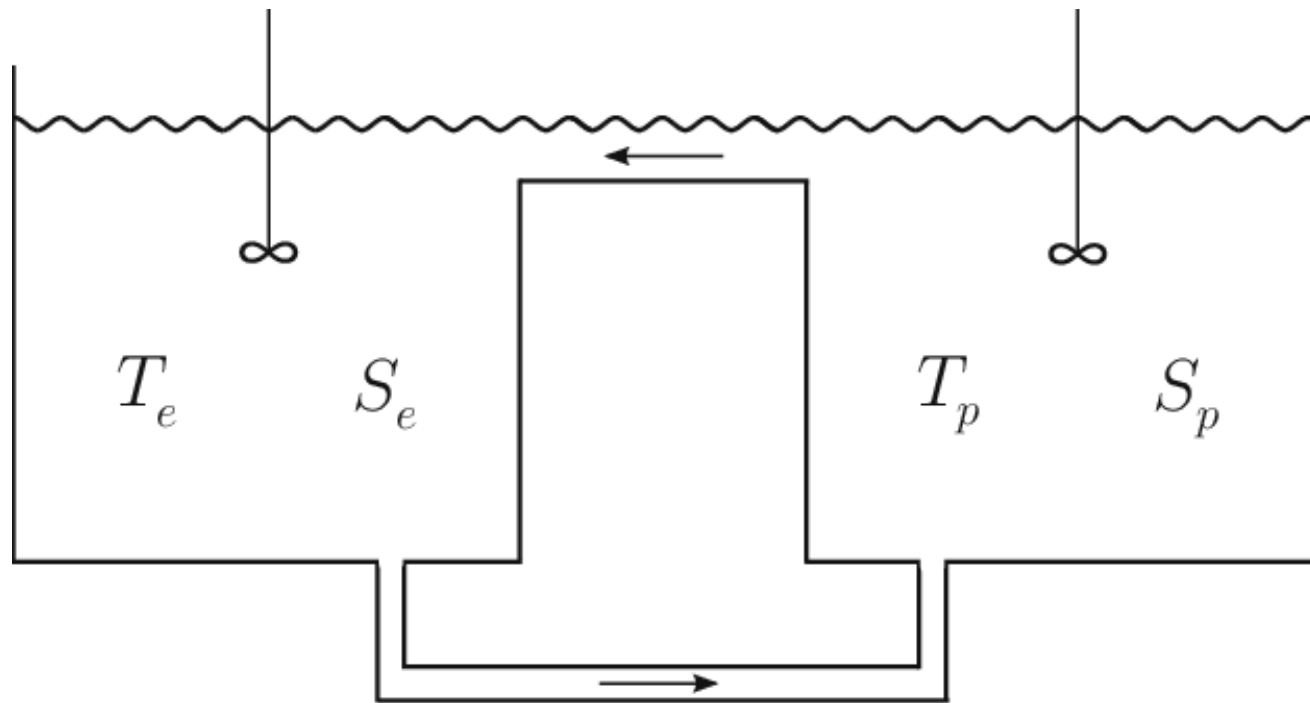
- Autour de Groenland, les eaux profondes peuvent être formées dues à l'action du vent, ainsi que la circulation, et le faible gradient de densité
- Ces eaux contribuent à la branche inférieure de la circulation thermohaline, et se déplace vers le sud
- Si la densité des eaux de surface est réduite, cela pourrait empêcher la convection profonde



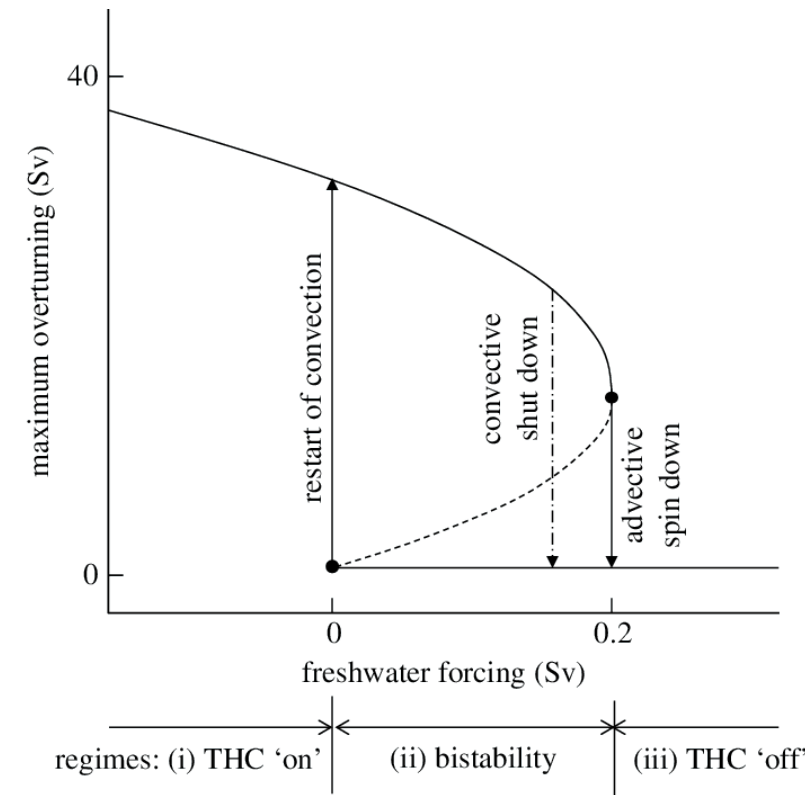
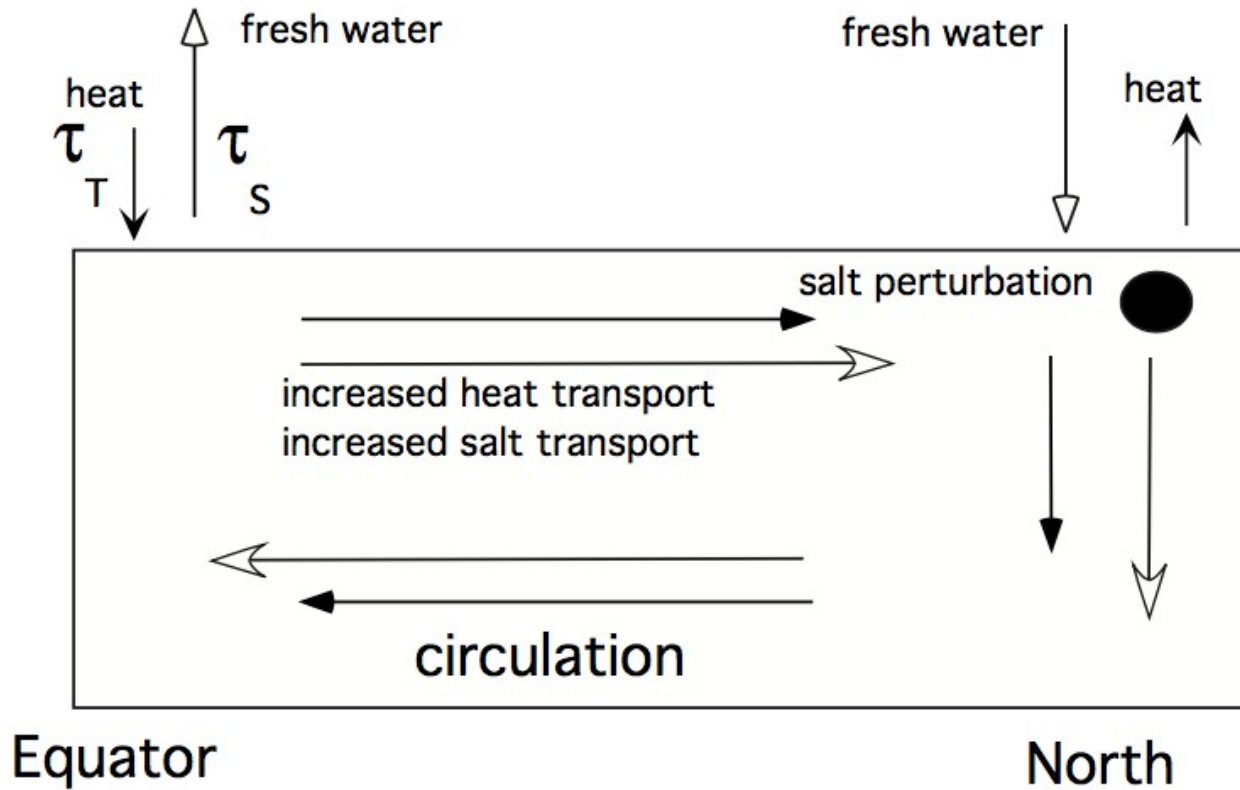
Salinité du mer de Labrador, juin 1993 :



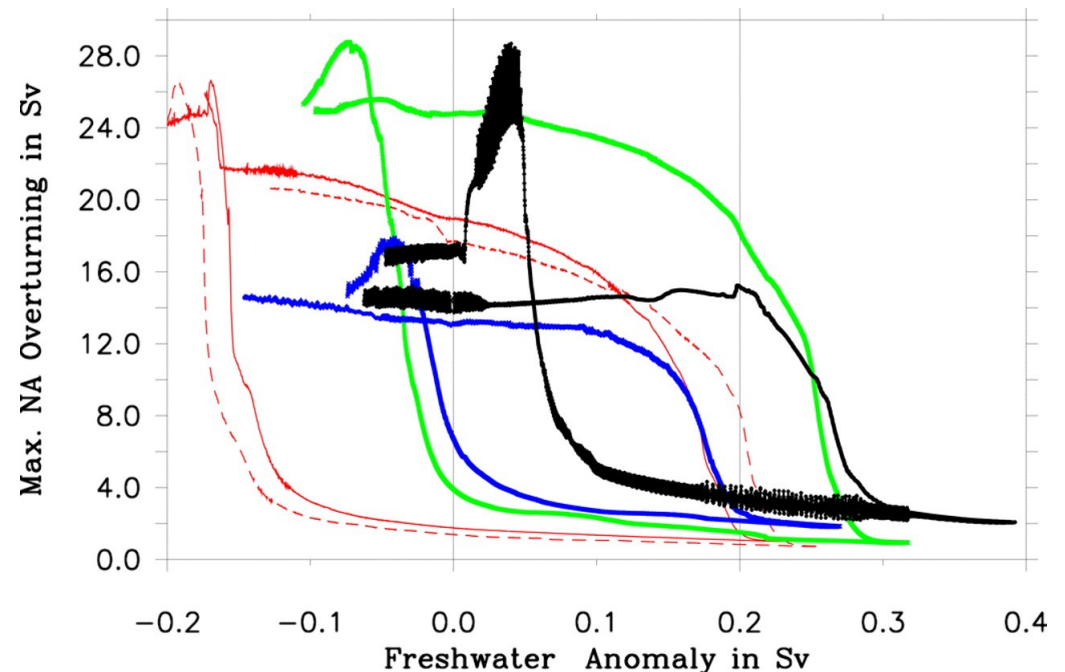
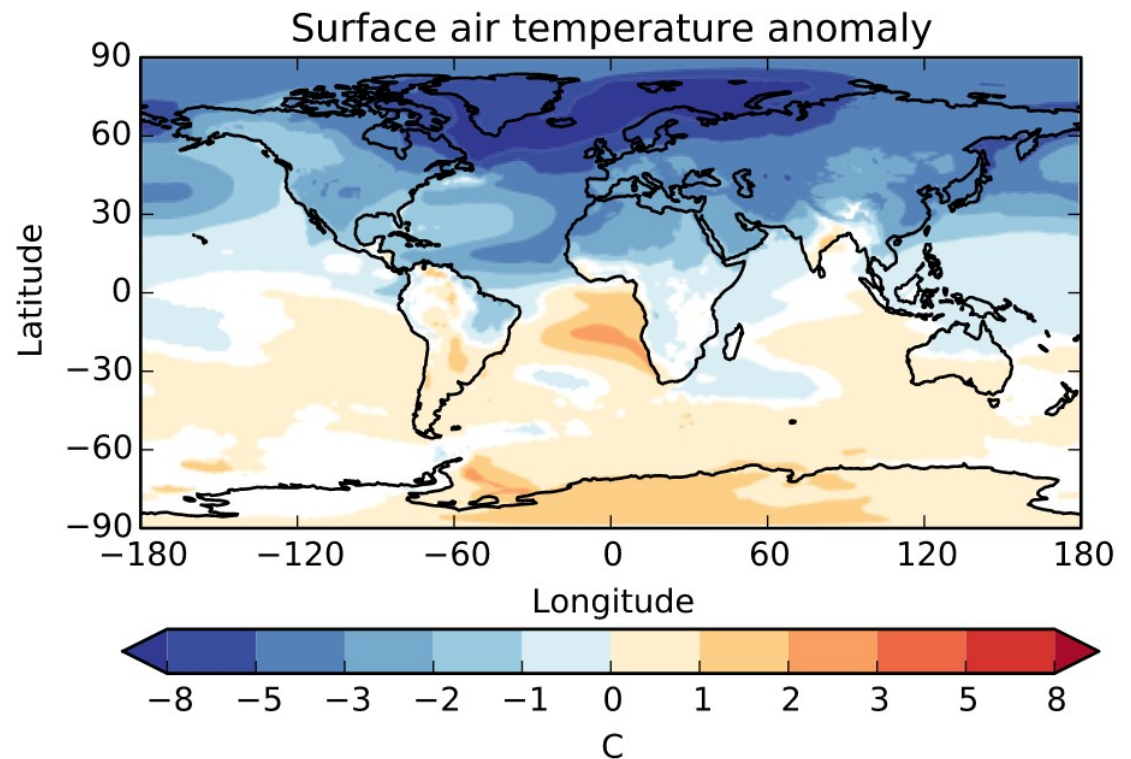
Sensibilité de la circulation au changement climatique



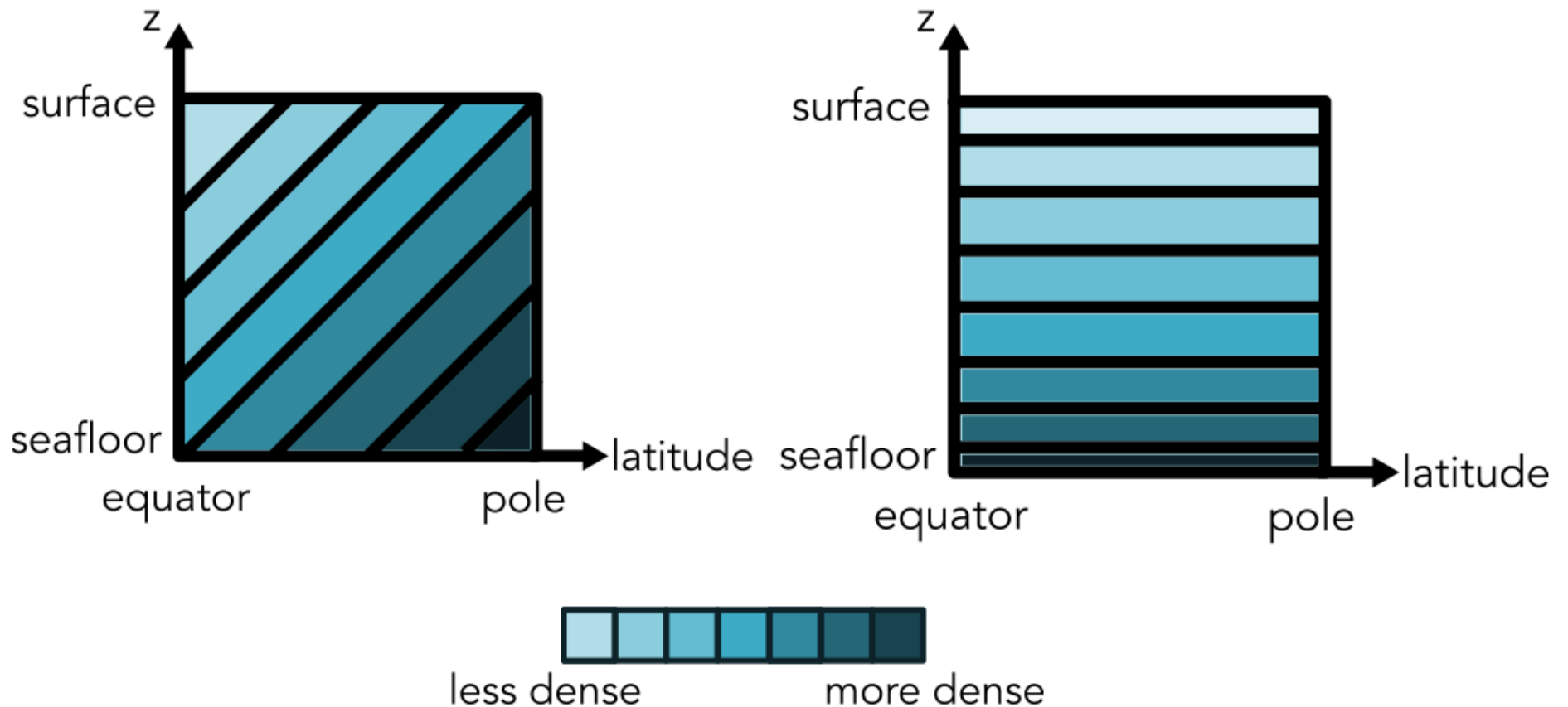
Sensibilité de la circulation au changement climatique



- La circulation thermohaline devrait être sensible aux variations d'eau douce
- Des modèles théoriques suggèrent que la circulation océanique pourrait exister dans d'autres états, où les eaux denses seraient formés plutôt dans les régions équatoriales, ou avec un PMOC au lieu d'un AMOC
- Ce comportement est reproduit par des modèles numériques, mais la pertinence des mécanismes pour le MOC n'est pas certaine
- L'interprétation des observations est compliquée en raison de la longueur des séries temporelles (~20 ans de mesures)



Comment est-ce que les eaux remontent ?

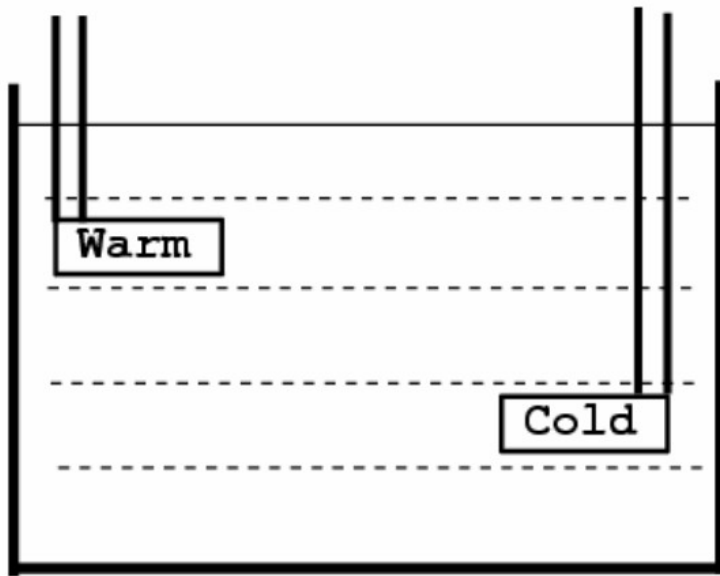


Énergie potentielle gravitationnelle = mgz

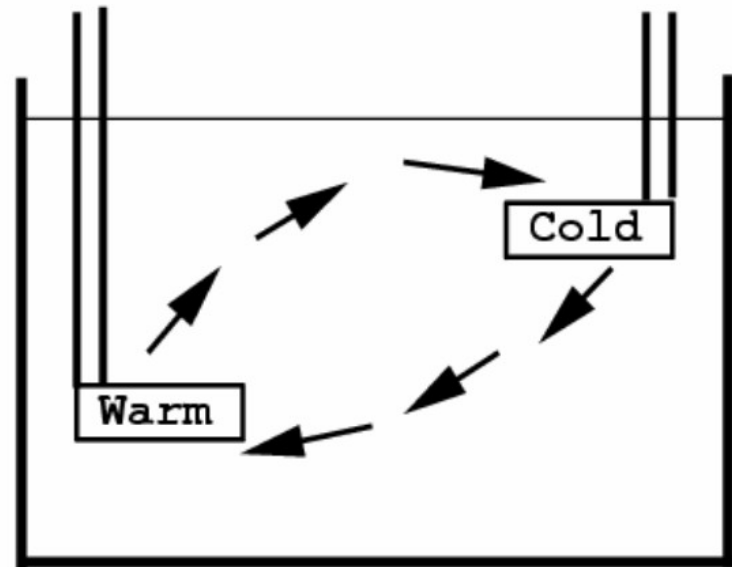
Pour que les eaux profondes puissent remonter, il faut donc une source d'énergie

Comment est-ce que les eaux remontent ?

- Par le mélange ?
- Les expériences de Sandström (1908) suggèrent qu'il faut un mécanisme pour transférer le chaleur reçu à la surface vers l'intérieur

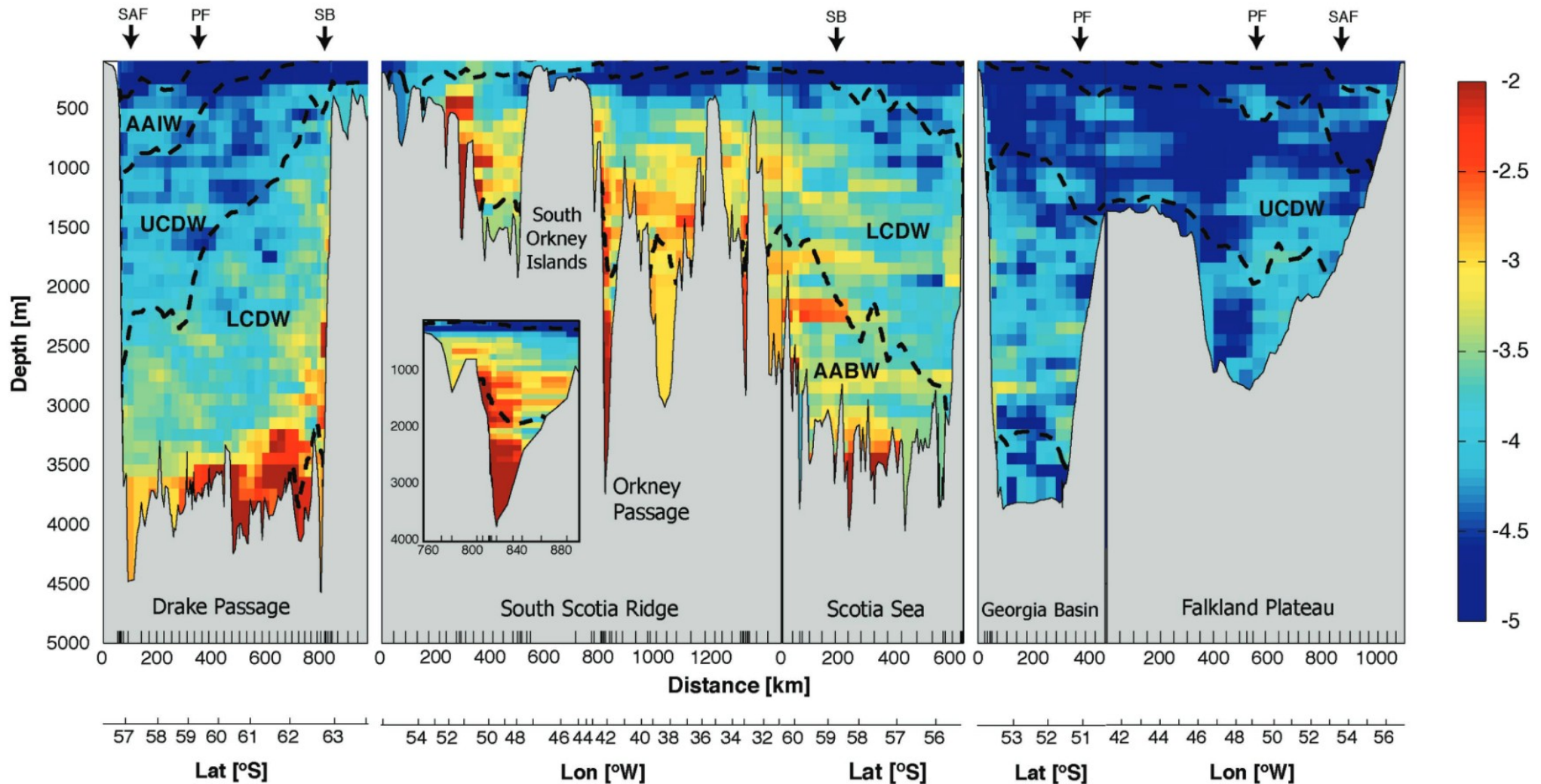


a) Heat source higher than cold source:
No circulation.

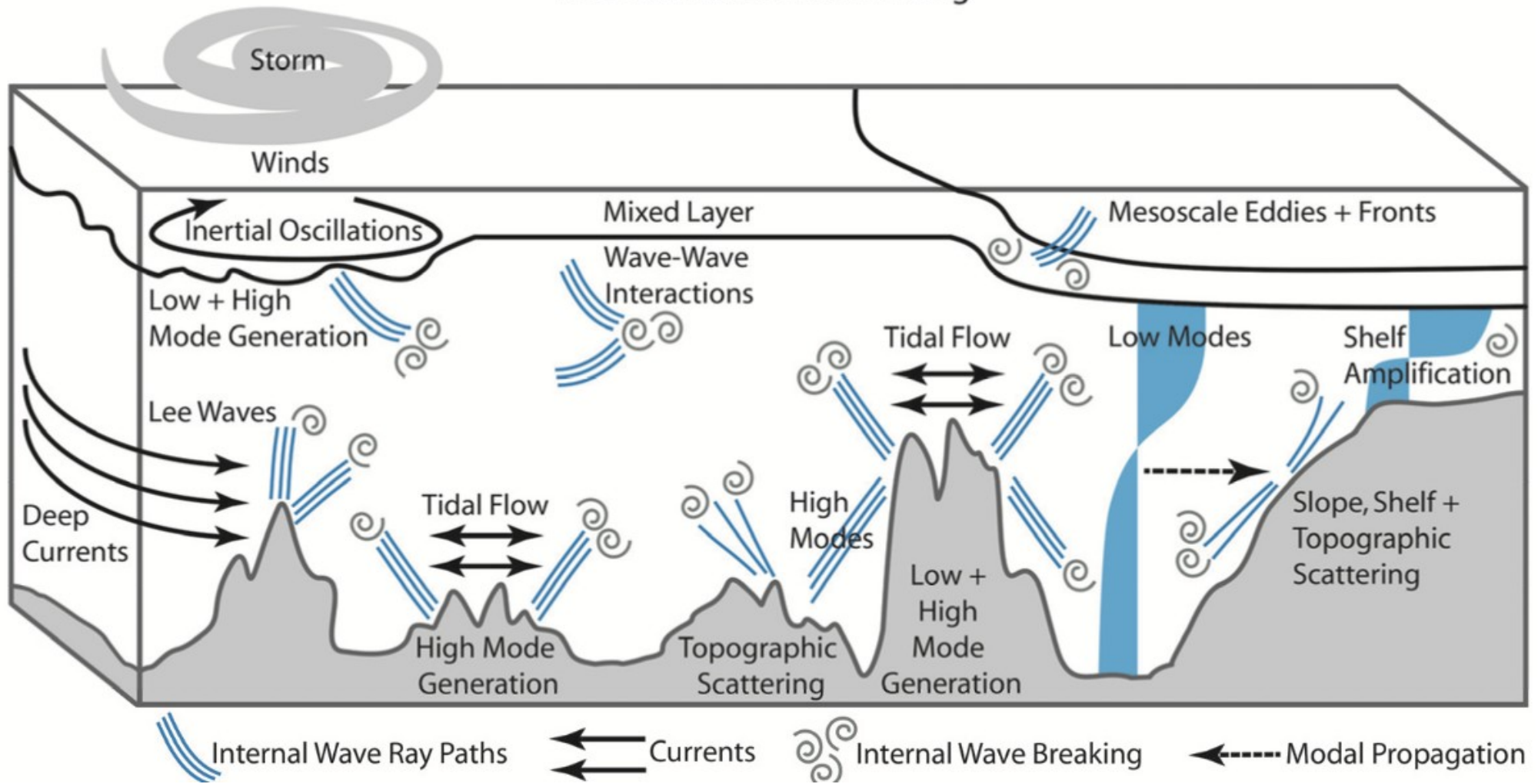


b) Cold source higher than heat source:
There is a circulation.

- Pendant longtemps (~1960-2010), les mesures du mélange diapycnal suggéraient que ce processus était trop faible pour être responsable de la circulation. Plus récemment, il a été réalisé qu'il y a des grandes variations spatiales (et éventuellement temporelles) dans son amplitude

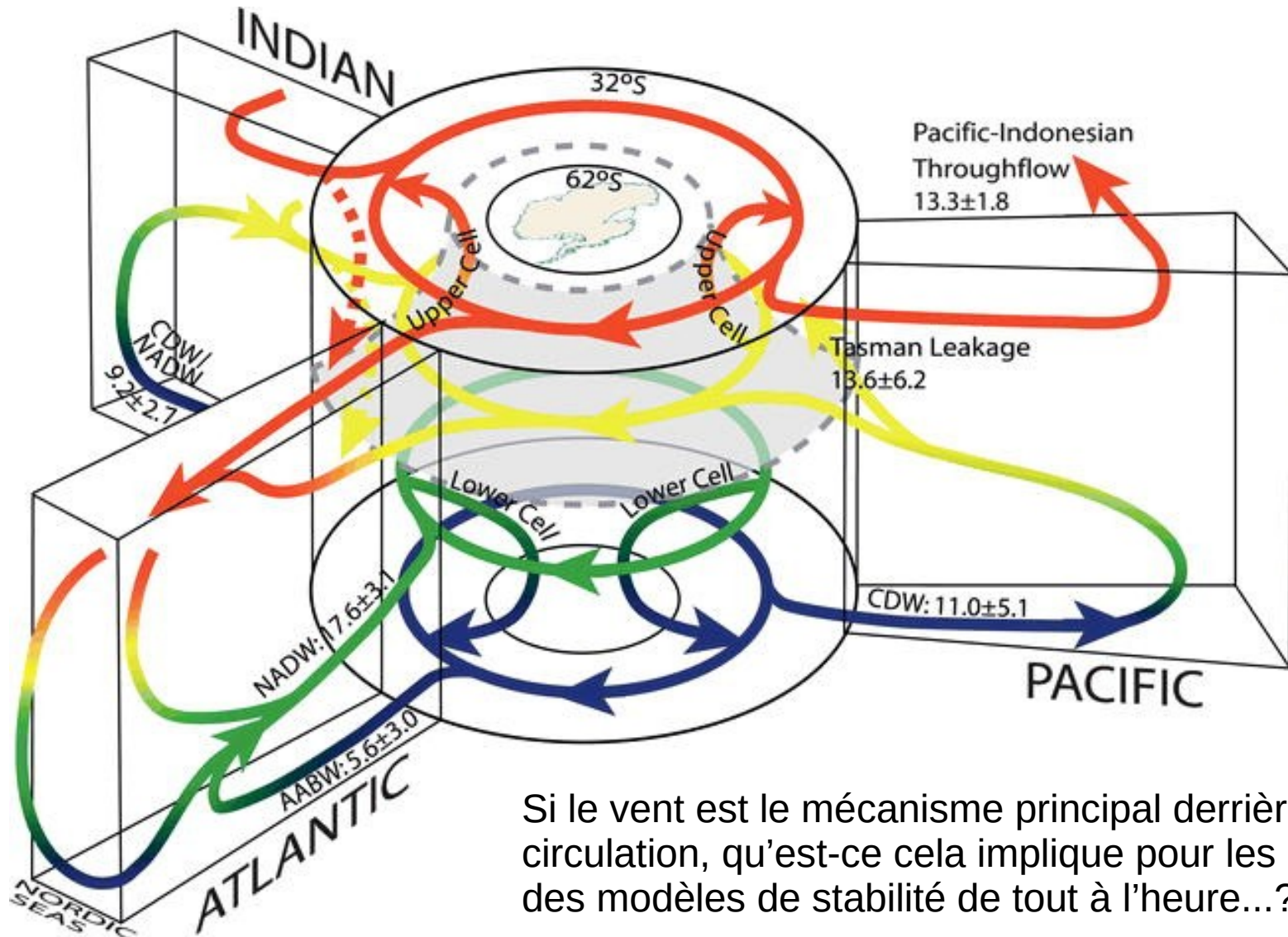


Internal Wave Driven Mixing



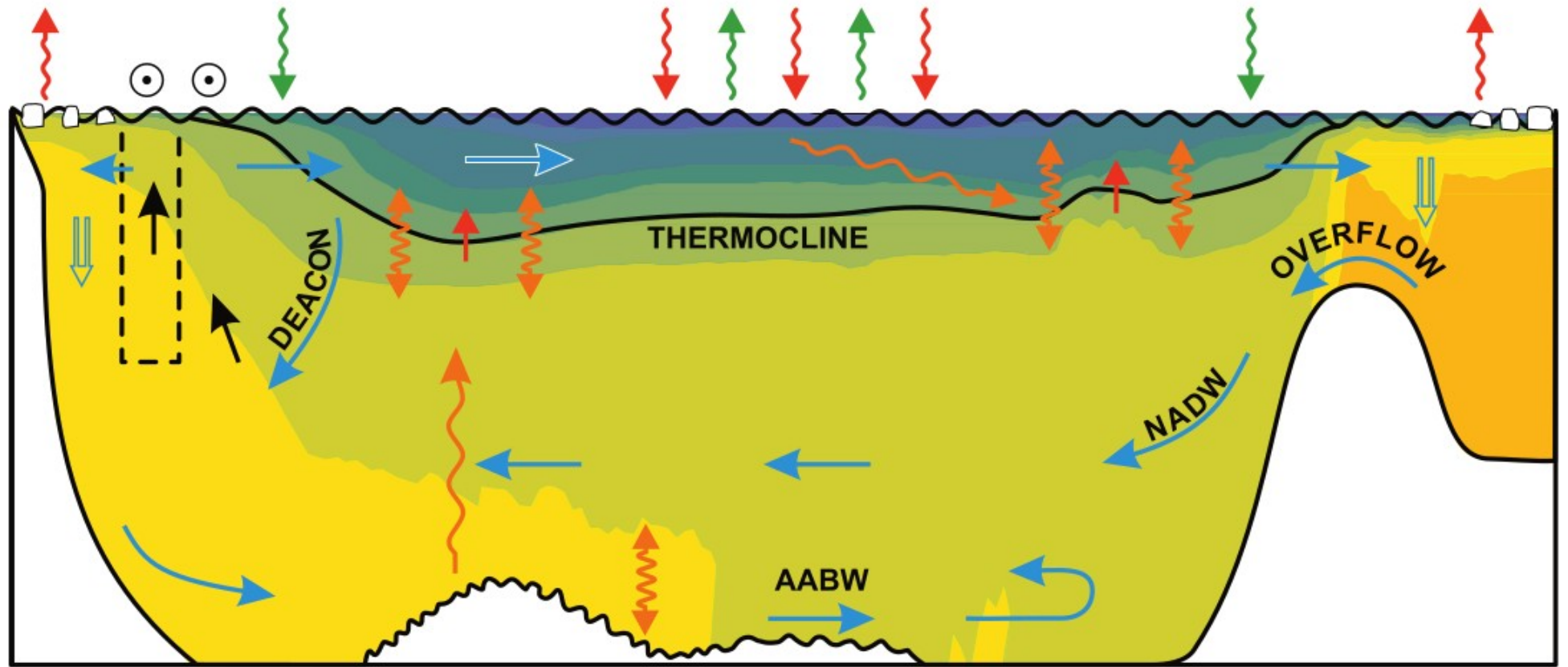
Comment est-ce que les eaux remontent ?

- Par l'action du vent ?
- Les vents circumpolaires soufflent autour de l'Antarctique. Il y a donc un transport d'Ekman vers le nord.



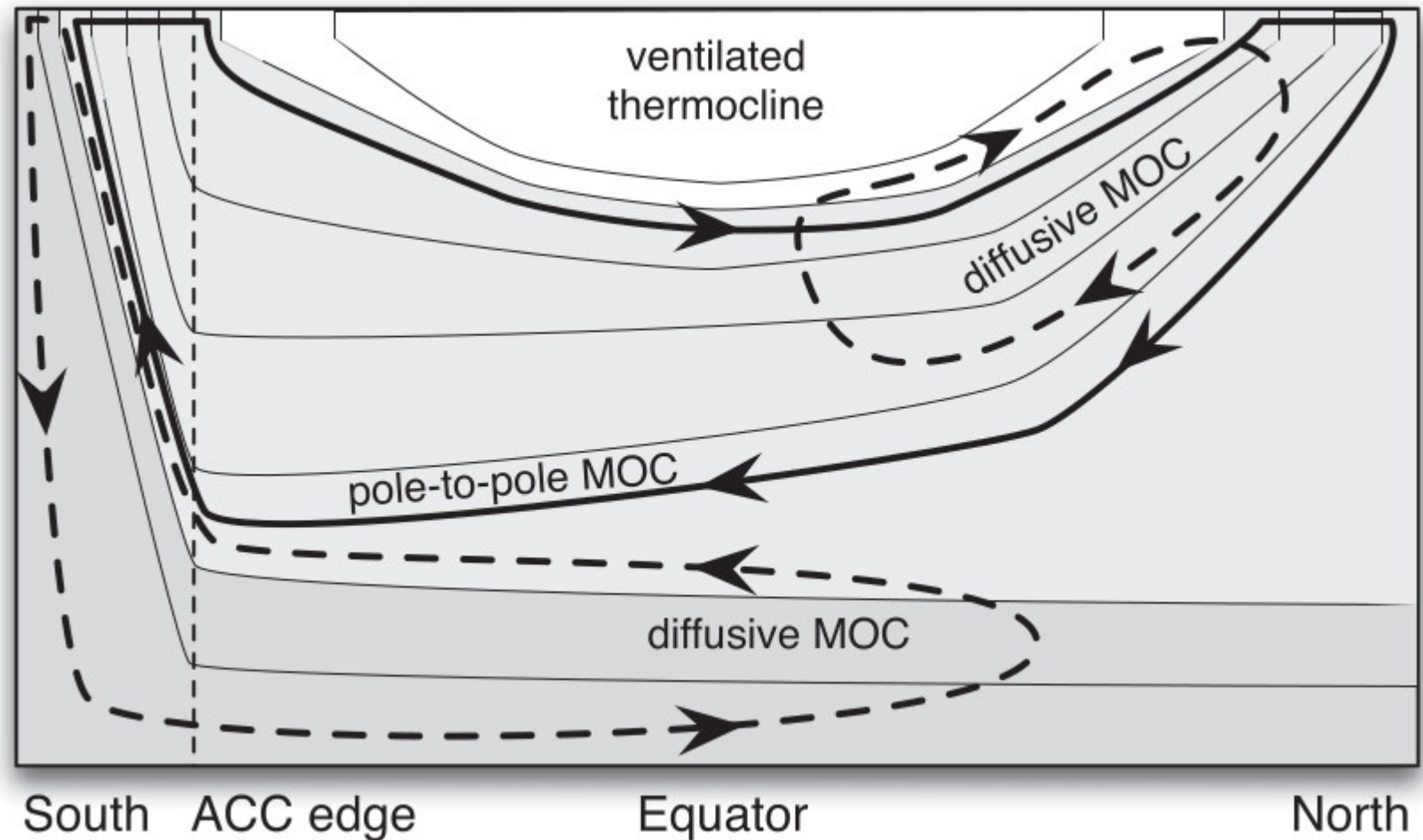
Si le vent est le mécanisme principal derrière la circulation, qu'est-ce cela implique pour les résultats des modèles de stabilité de tout à l'heure...?

Comment est-ce que les eaux remontent ?



- S EQ N
- | | | | | | |
|--|--------------------------|--|-------------------------|--|----------------------|
| | volume transport | | mixing-driven upwelling | | deep-water formation |
| | wind-driven upwelling | | internal waves | | heat fluxes |
| | wind | | diapycnal mixing | | freshwater fluxes |
| | profile of Drake passage | | | | sea ice |

- En réalité, les processus qui déterminent la forme de la MOC sont toujours un sujet de recherche active. Notre vision du système a beaucoup évolué même depuis les années 2000



Qu'est-ce qu'on peut en retenir... ?

- La circulation océanique est bien compliqué...
- On peut diviser la circulation océanique grande-échelle en (au moins) 2 parties : une partie due au vent ($z \sim 0-1000\text{m}$, les gyres) et une partie d'échelle globale qui s'étend jusqu'au fond
- On peut observer la circulation due au vent assez facilement grâce(?) aux objets qui dérivent avec les courants, le vortex de déchets, etc.
- Cette circulation serait sensible aux changements de vent. Si, dans l'avenir, la circulation atmosphérique grande-échelle évolue, les gyres devront s'ajuster aussi

Qu'est-ce qu'on peut en retenir... ?

- Le schéma simple de la circulation méridienne de retournement cache une réalité assez compliqué !
- Les eaux coulent en raison des flux atmosphériques à la surface. Les effets des changements de sel et température sont asymétriques, car il n'y a pas de rétroaction avec l'atmosphère si on change la salinité
- Le fait que les eaux coulent n'explique pas la reste de la circulation. Il faut des sources d'énergie pour remonter des eaux plus denses vers la surface. On croit que le mélange et le vent contribuent tous les 2 à ce processus, mais il s'agit d'un sujet de recherche actif.