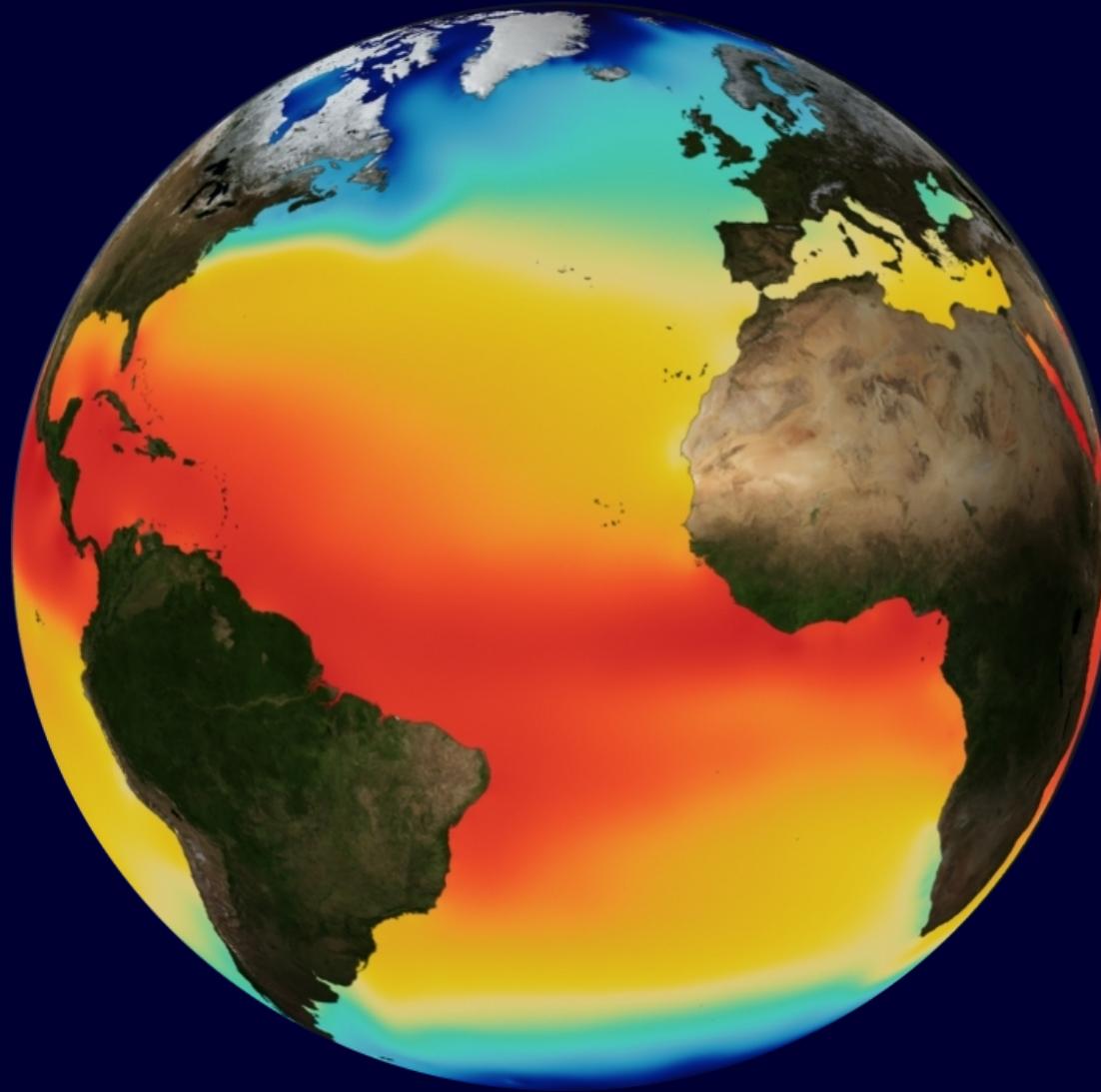


La circulation océanique et la dynamique de l'océan



Circulation thermohaline et/ou circulation méridienne de retournement

Circulation thermohaline et/ou circulation méridienne de retournement

« **Thermo** » pour température et « **halin** » pour sel.

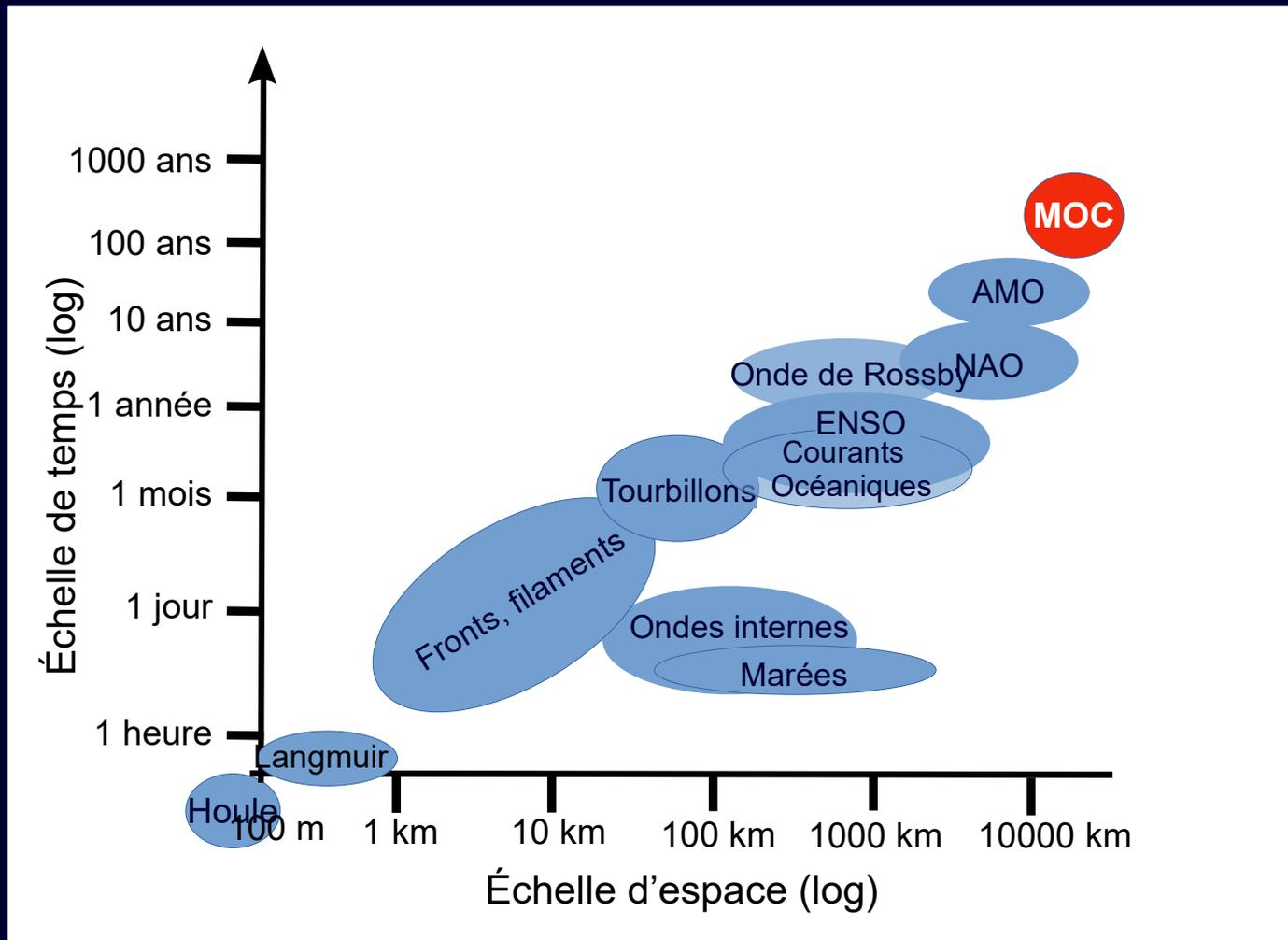
La **circulation thermohaline**, appelée aussi circulation océanique profonde, est la circulation globale de l'océan engendrée par les différences de densité de l'eau de mer, à l'origine de courants marins de profondeur.

Elle résulte principalement du contraste thermique et salin entre les hautes et les basses latitudes. Les mélanges turbulents liés au vent et aux marées y jouent aussi un rôle, notamment dans la remontée des eaux profondes.

Progressivement, la notion de **circulation méridienne de retournement** s'est substituée à celle de circulation thermohaline.

Circulation méridienne de retournement
Meridional Overturning Circulation ou MOC

Circulation thermohaline et/ou circulation méridienne de retournement

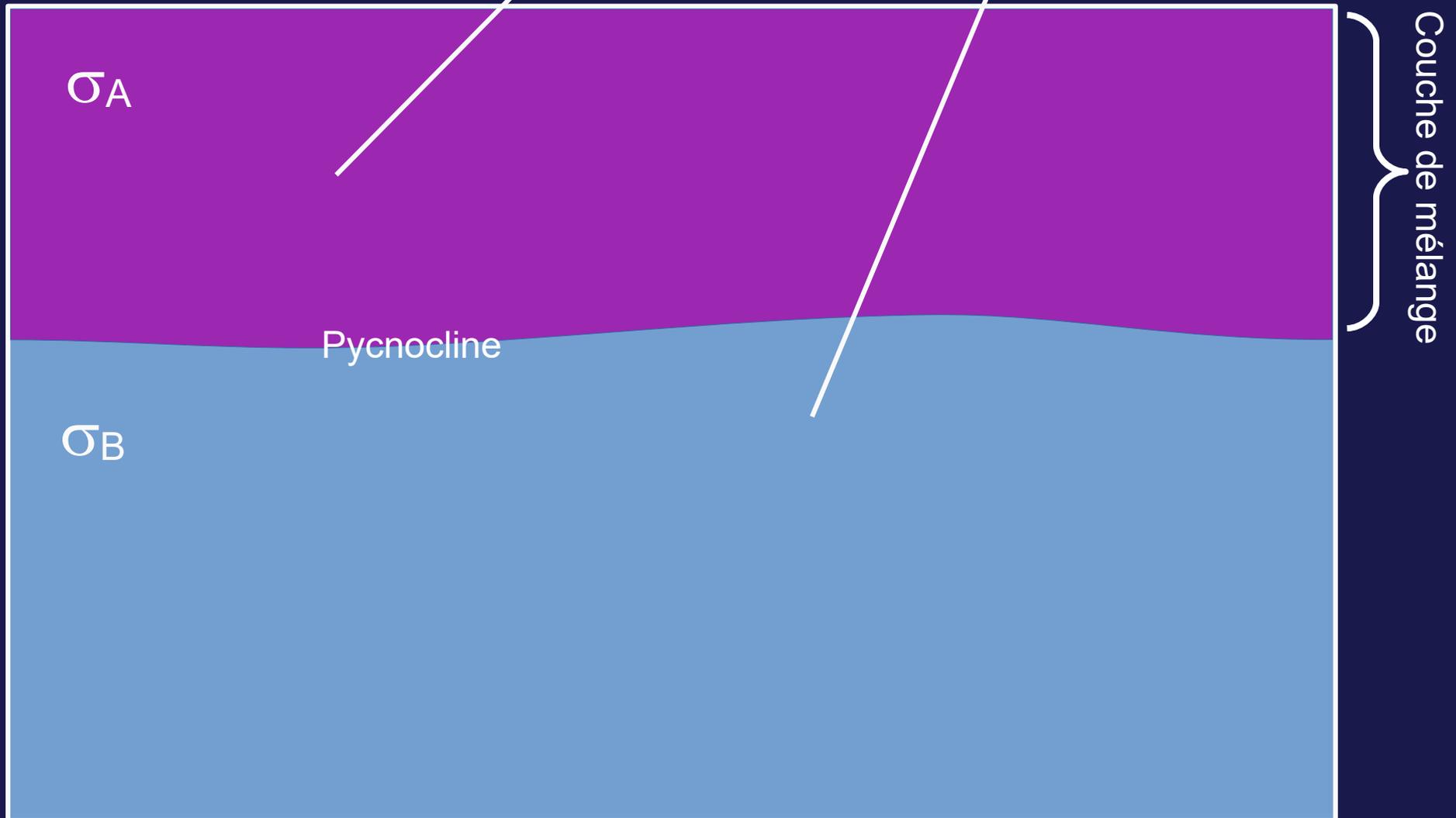


Création d'une plongée liée à la densité, stade 1

$$\sigma_A < \sigma_B$$

Couche A
d'eau de surface

Couche B
d'eau en profondeur

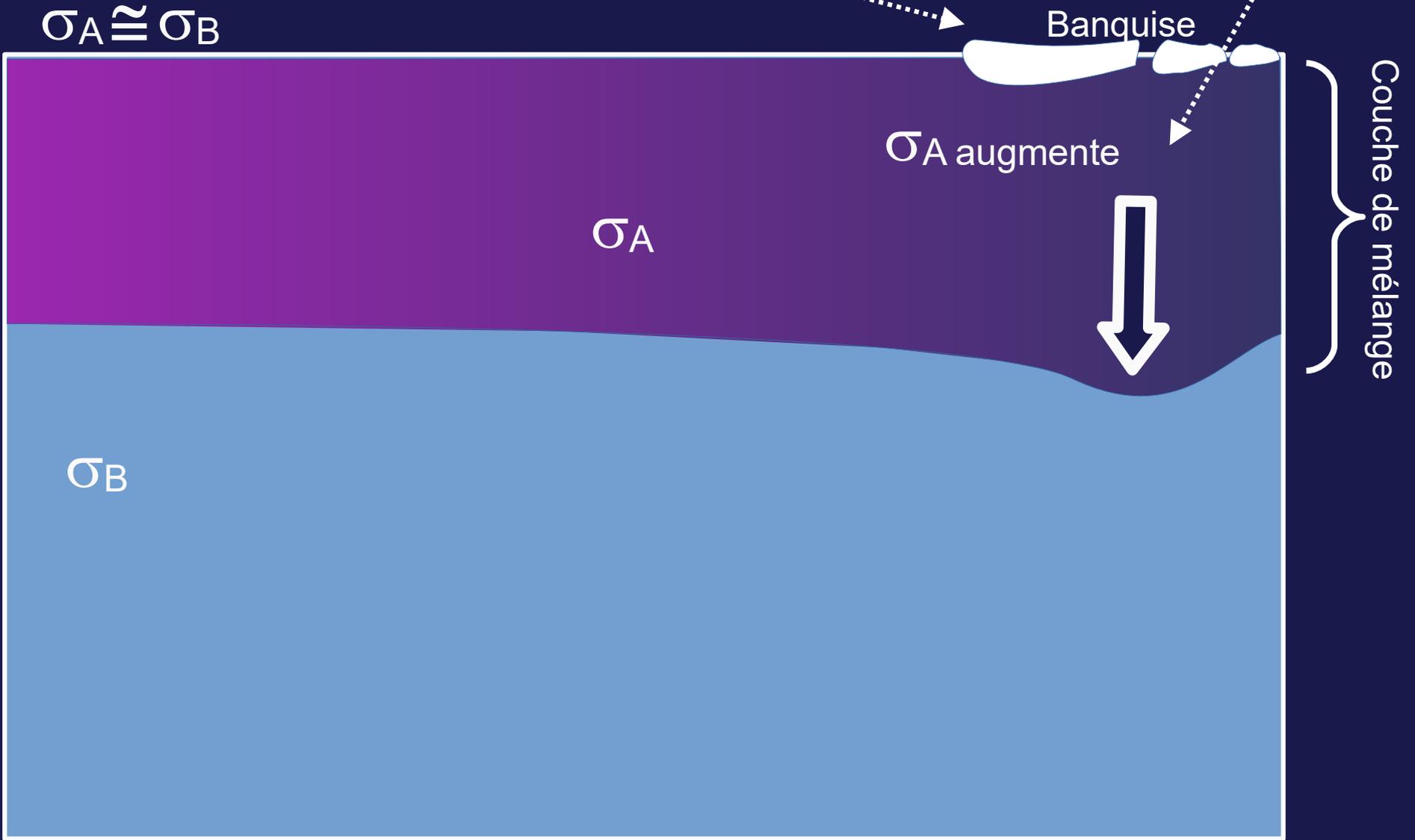


Création d'une plongée liée à la densité, stade 2

Refroidissement par évaporation et/ou augmentation de la salinité par formation de banquise :
Augmentation de la densité

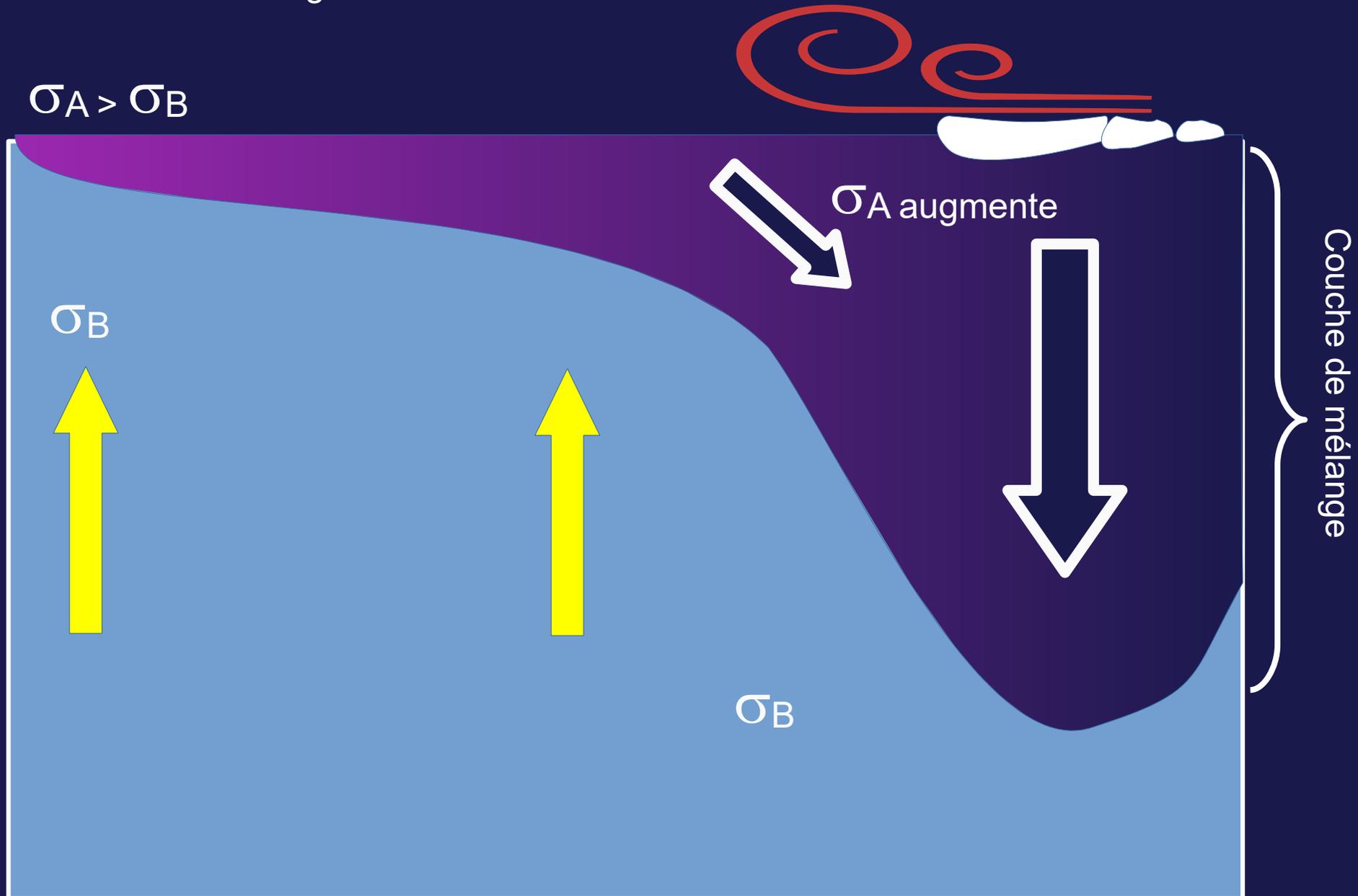


$$\sigma_A > \sigma_B$$

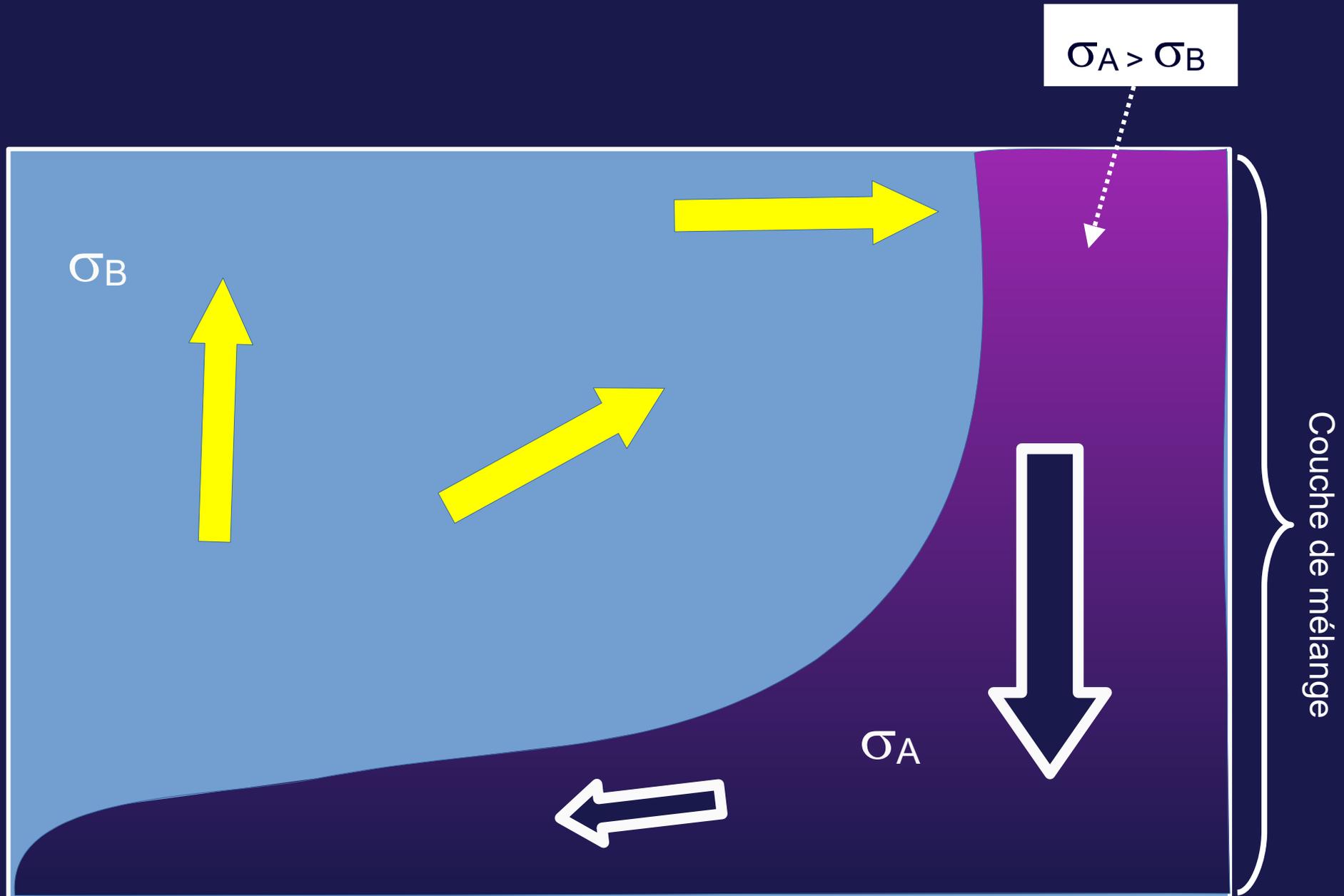


Création d'une plongée liée à la densité, stade 3

Refroidissement et/ou augmentation de la salinité :
Augmentation de la densité en surface

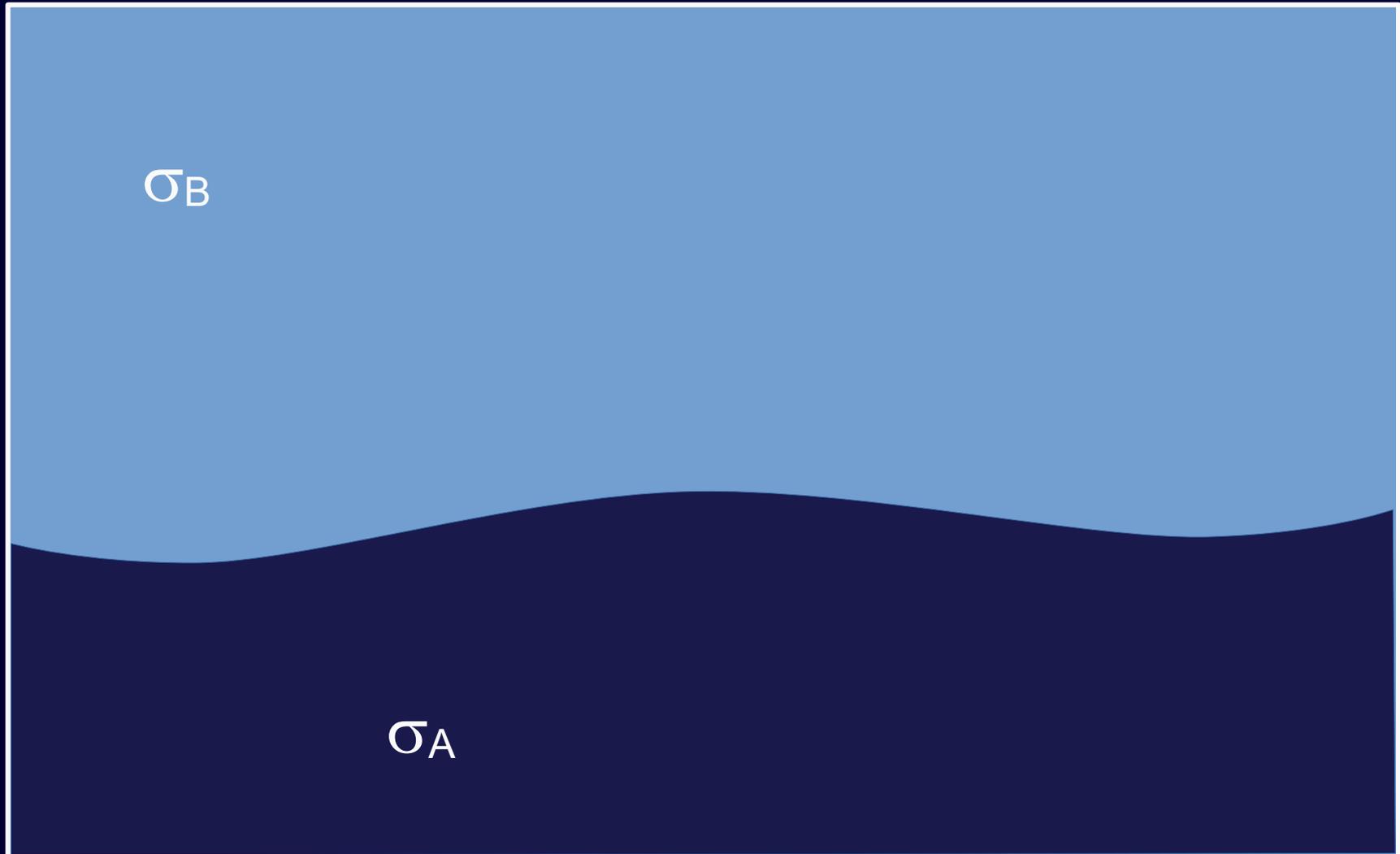


Création d'une plongée liée à la densité, stade 4



Création d'une plongée liée à la densité, stade 5

$$\sigma_A > \sigma_B$$



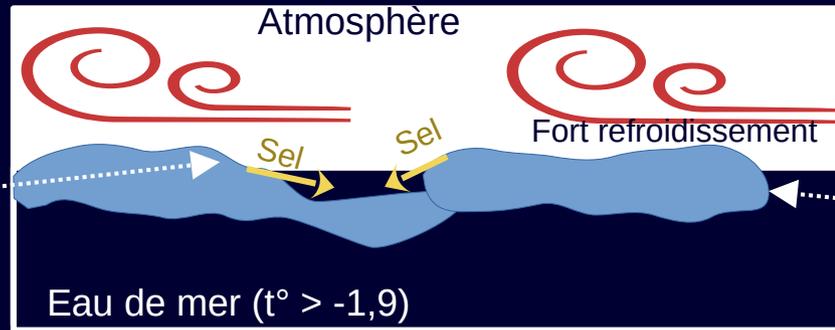
Température, salinité, glace et densité

Une petite digression à une petite échelle spatiale :
le cas des «*brinicles*»*

* de «brine» (saumure) et «icicle» (stalactite de glace)

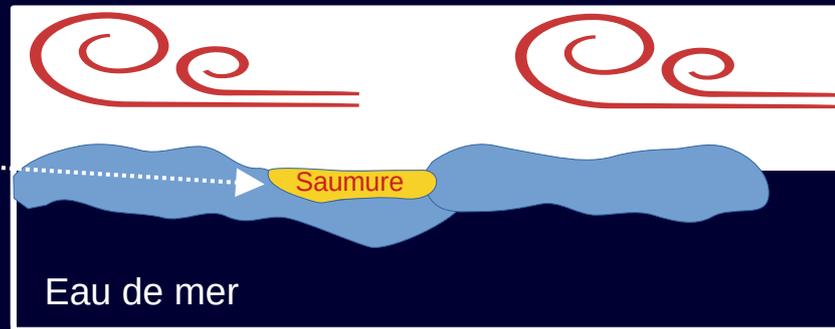
Formation de glace, salinité, densité : petit film sur une « brinicle »

Formation de la banquise : eau de mer gèle en expulsant de la saumure

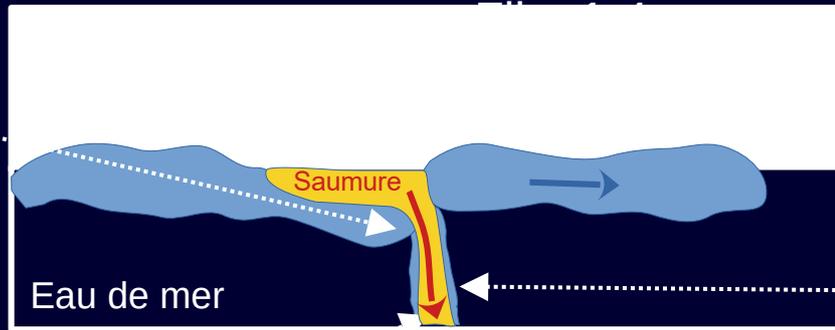


Banquise

Formation de marres de saumure, très froides et très salées



Une faille dans la banquise permet à la saumure de s'échapper



brinicle

la saumure, très salée, très froide et donc très dense, coule en gelant l'eau de mer à son contact



<https://www.dailymotion.com/video/xmjlio>

Film
1-4

Une brinicle, surnommée le doigt glacé de la mort, contraction de «brine» (saumure) et «icicle» (stalactite de glace) est une stalactite de glace qui se forme dans l'eau de mer lorsqu'un flux d'eau salée (saumure) extrêmement froid se déverse des banquises.

Plongée d'eaux profondes

Cela se produit dans des zones particulières, avec une importance très variable

Cela est dû aux actions de différentes causes souvent conjointes :

- + Refroidissement de surface
- + Évaporation
- + Formation de glace de mer

Zones de plongée d'eaux profondes contribuant à la MOC

Dans l'hémisphère nord :

- La zone sud du Groenland (1),
- La mer de Norvège (2),
- La mer du Groenland (3).

Dans l'hémisphère sud :

- La mer de Wedell (4),
- La mer de Ross (5),
- La zone du glacier Mertz (6).

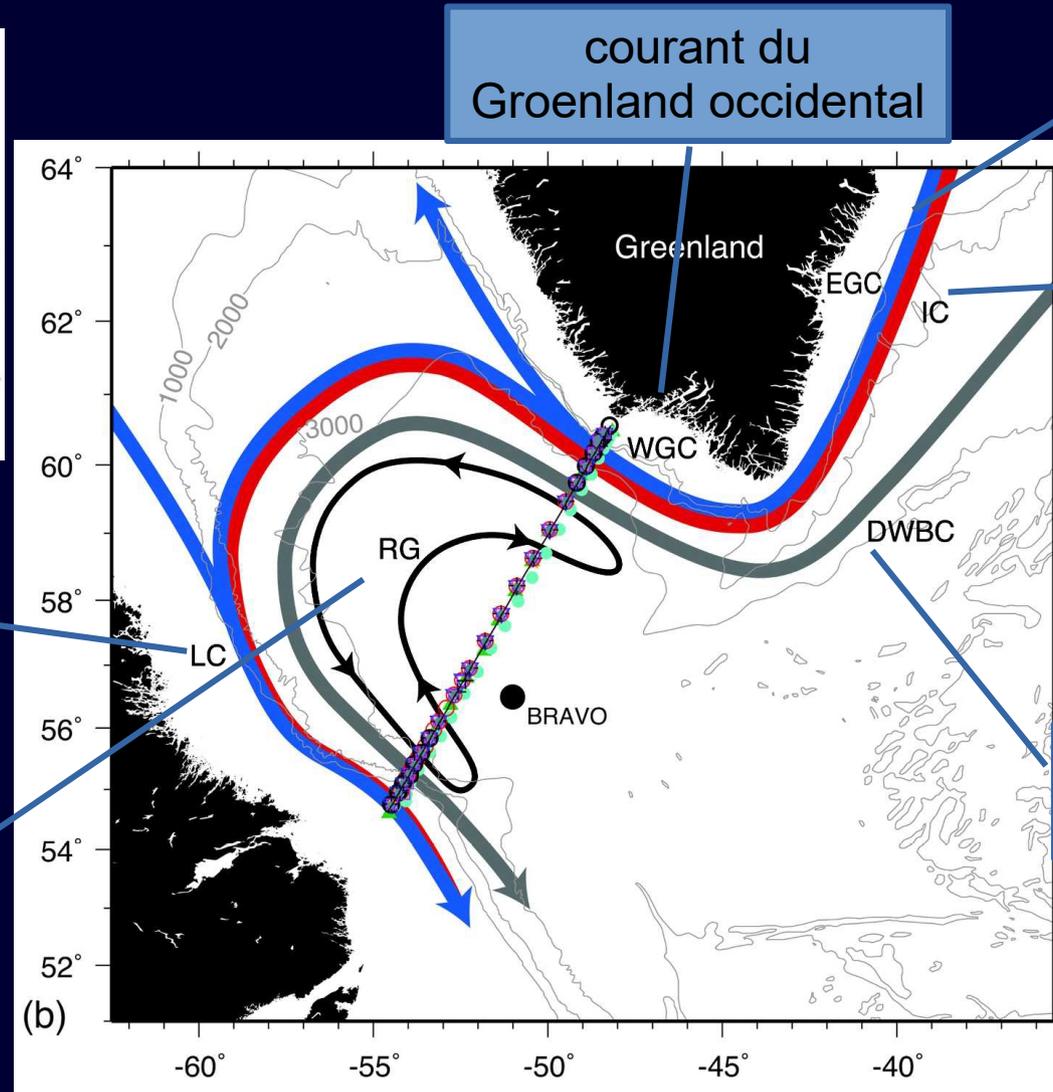
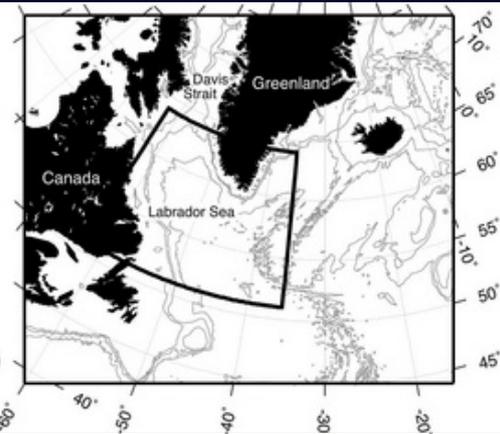


Hémisphère nord



Hémisphère sud

Exemple de formation d'eaux denses : le sud du Groenland



courant du Groenland occidental

courant du Groenland oriental

courant d'Irminger

courant du Labrador

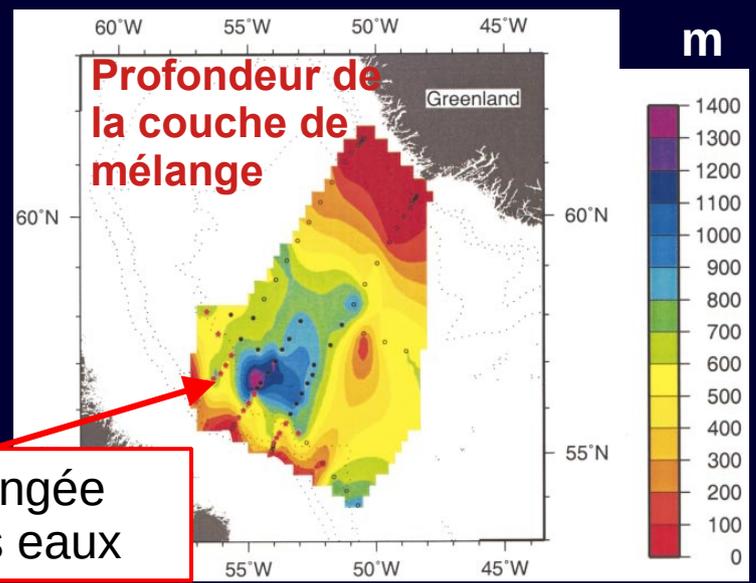
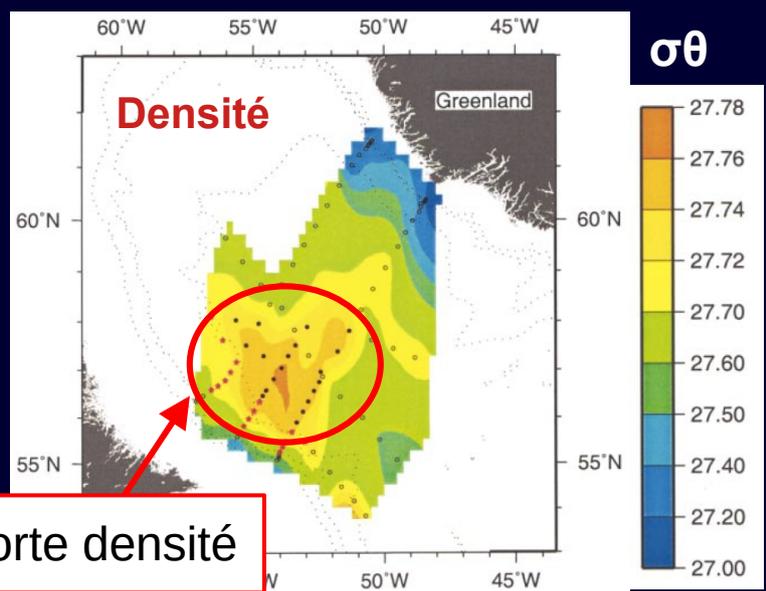
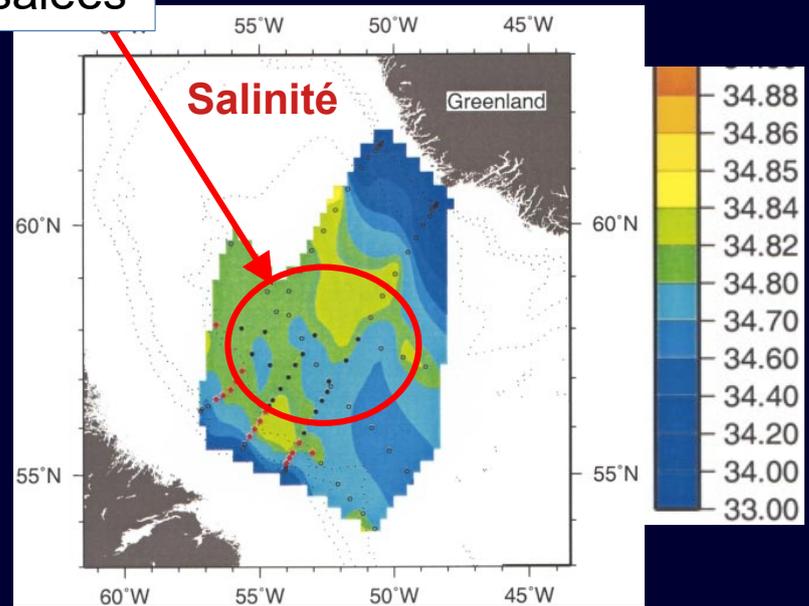
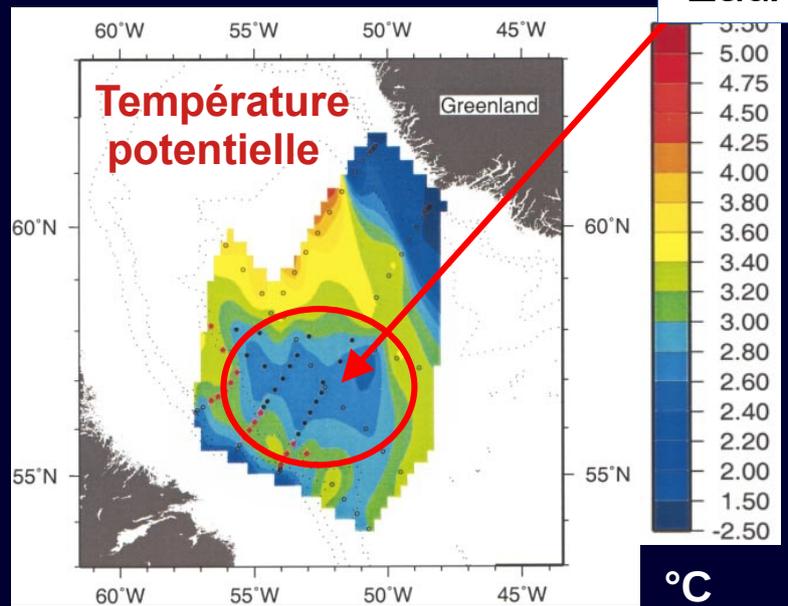
gyre cyclonique

courant profond ouest

Pickart, R. S. & Torres, D. J. Hydrography of the Labrador Sea during Active Convection. *Journal of Physical Oceanography* 32, (2002).
Pickart, R. S. & Spall, M. A. Impact of Labrador Sea Convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Journal of Physical Oceanography* 37, (2007).

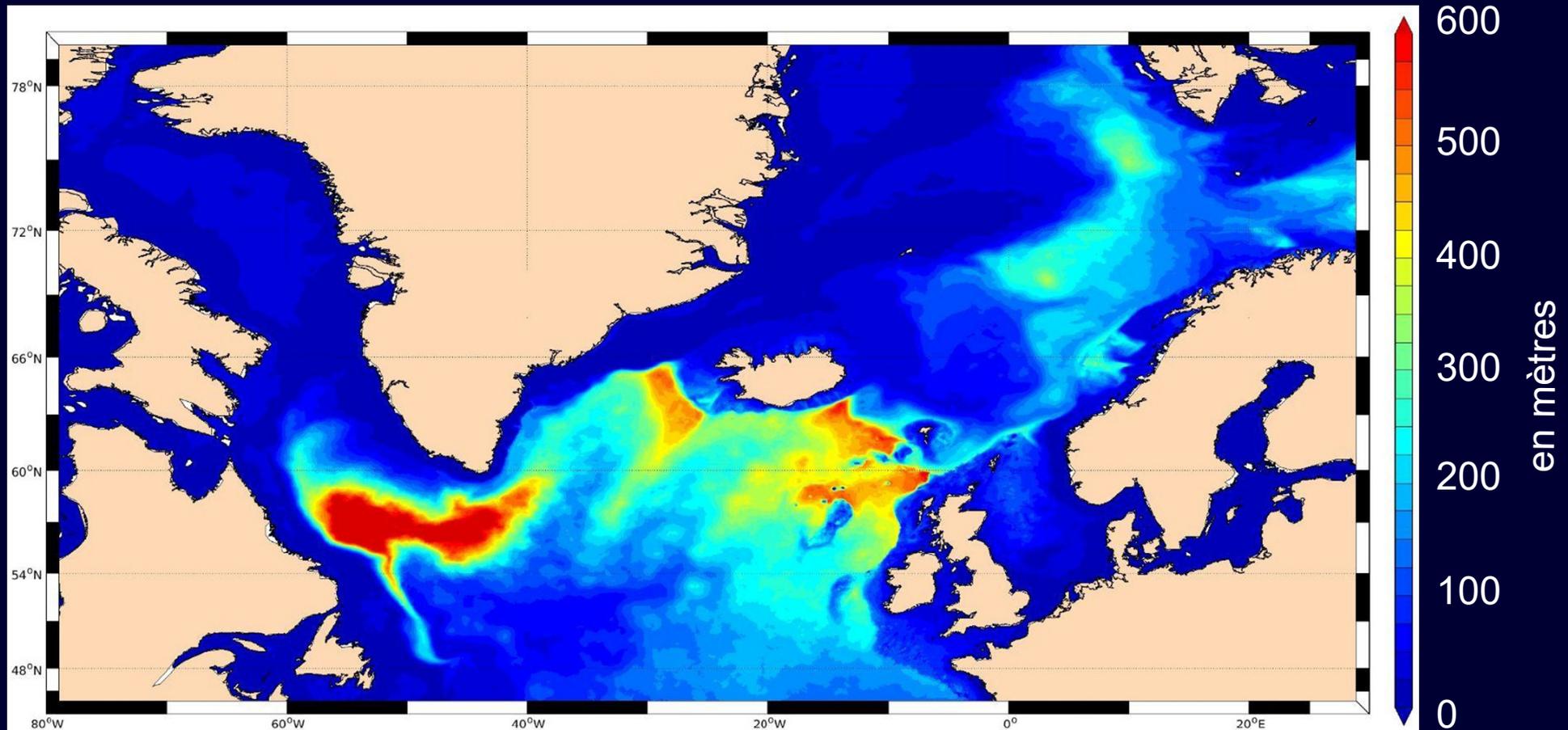
Formation d'eaux denses au sud du Groenland

Eaux froides et salées



février-mars 1997

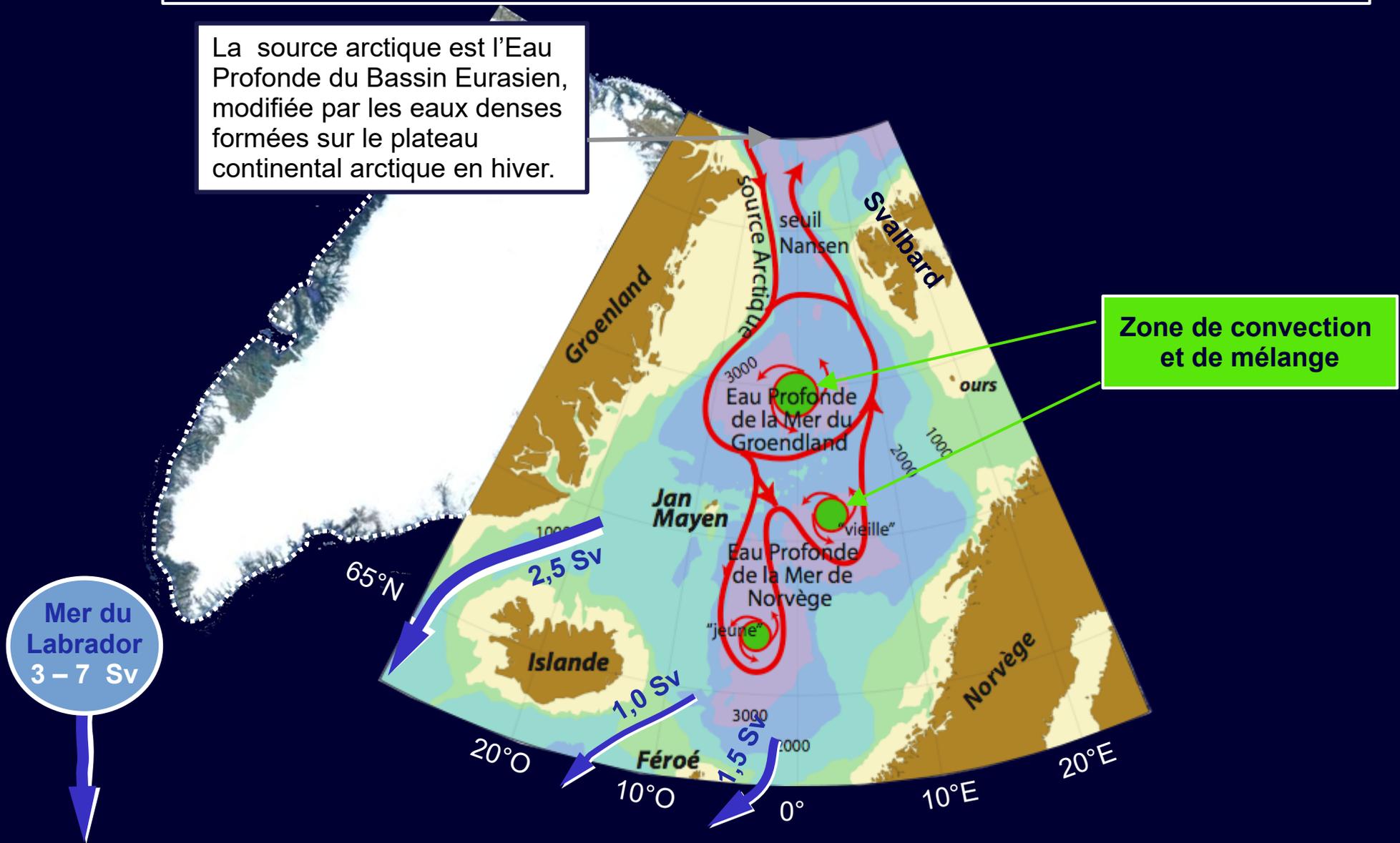
Profondeur de la couche de mélange hivernale sud Groenland



Profondeur moyenne de la couche de mélange hivernale (janvier-février-mars) (simulation entre 2004-2016)

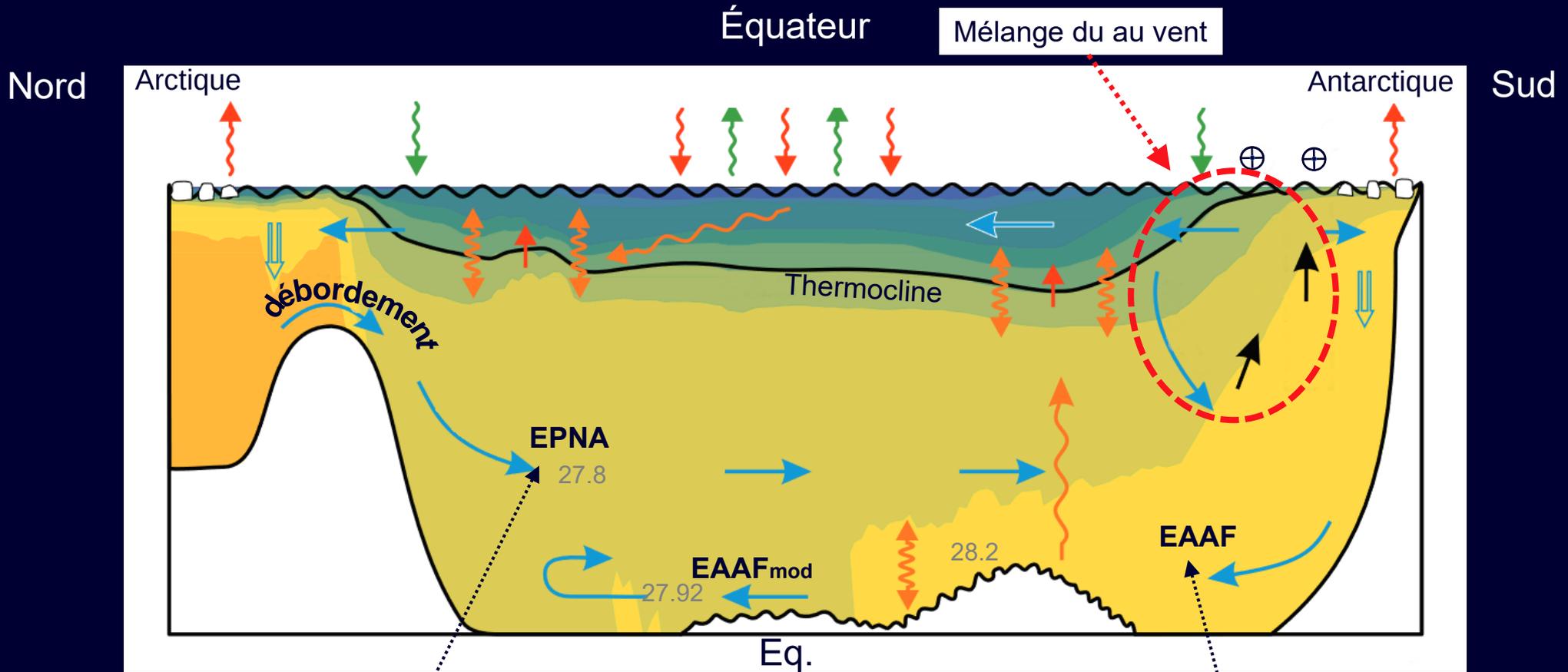
Formation d'eaux denses en mer de Norvège et du Groenland

La source arctique est l'Eau Profonde du Bassin Eurasien, modifiée par les eaux denses formées sur le plateau continental arctique en hiver.



Zone de convection et de mélange

Schéma de la circulation de l'océan atlantique et de la MOC

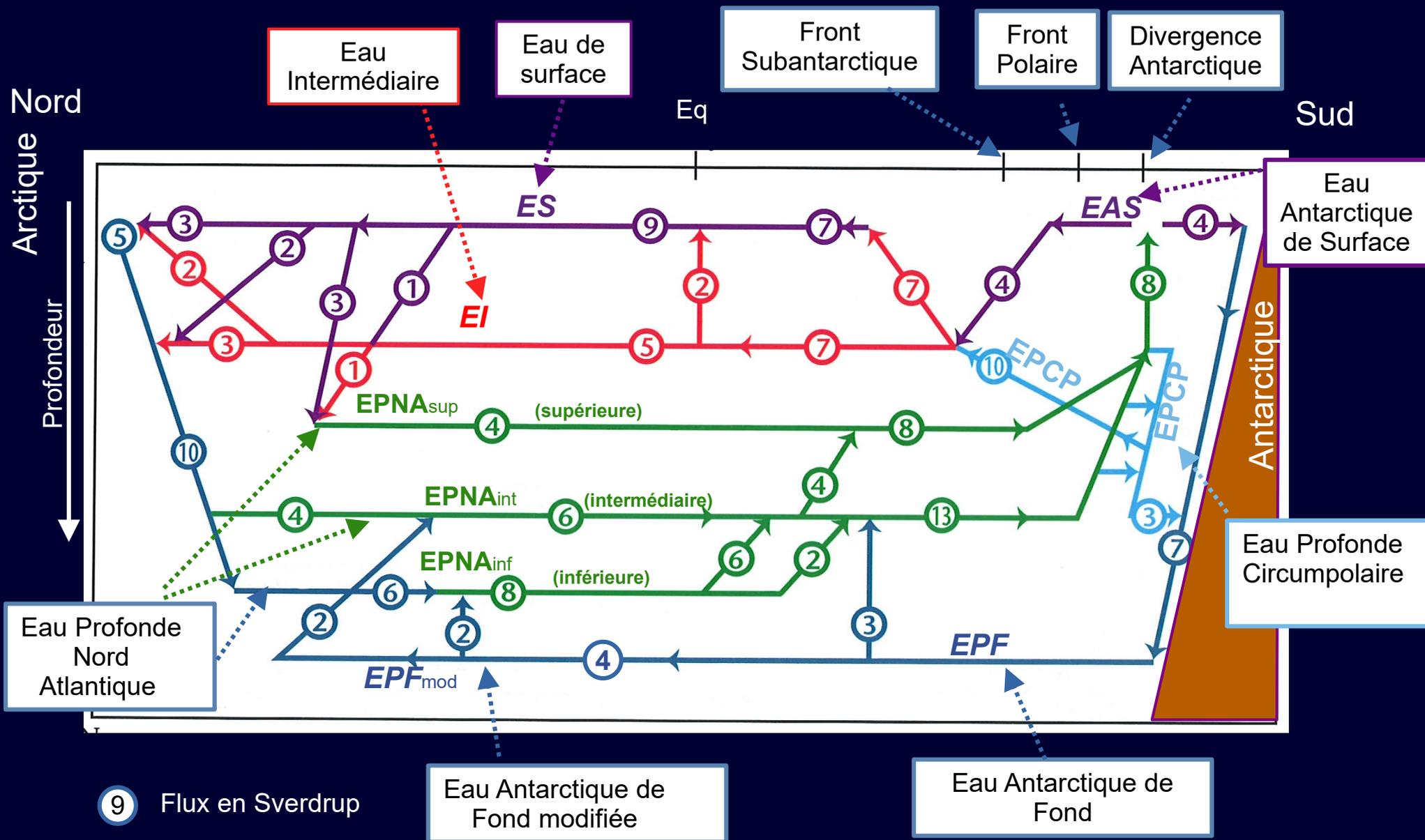


Eau Profonde Nord Atlantique

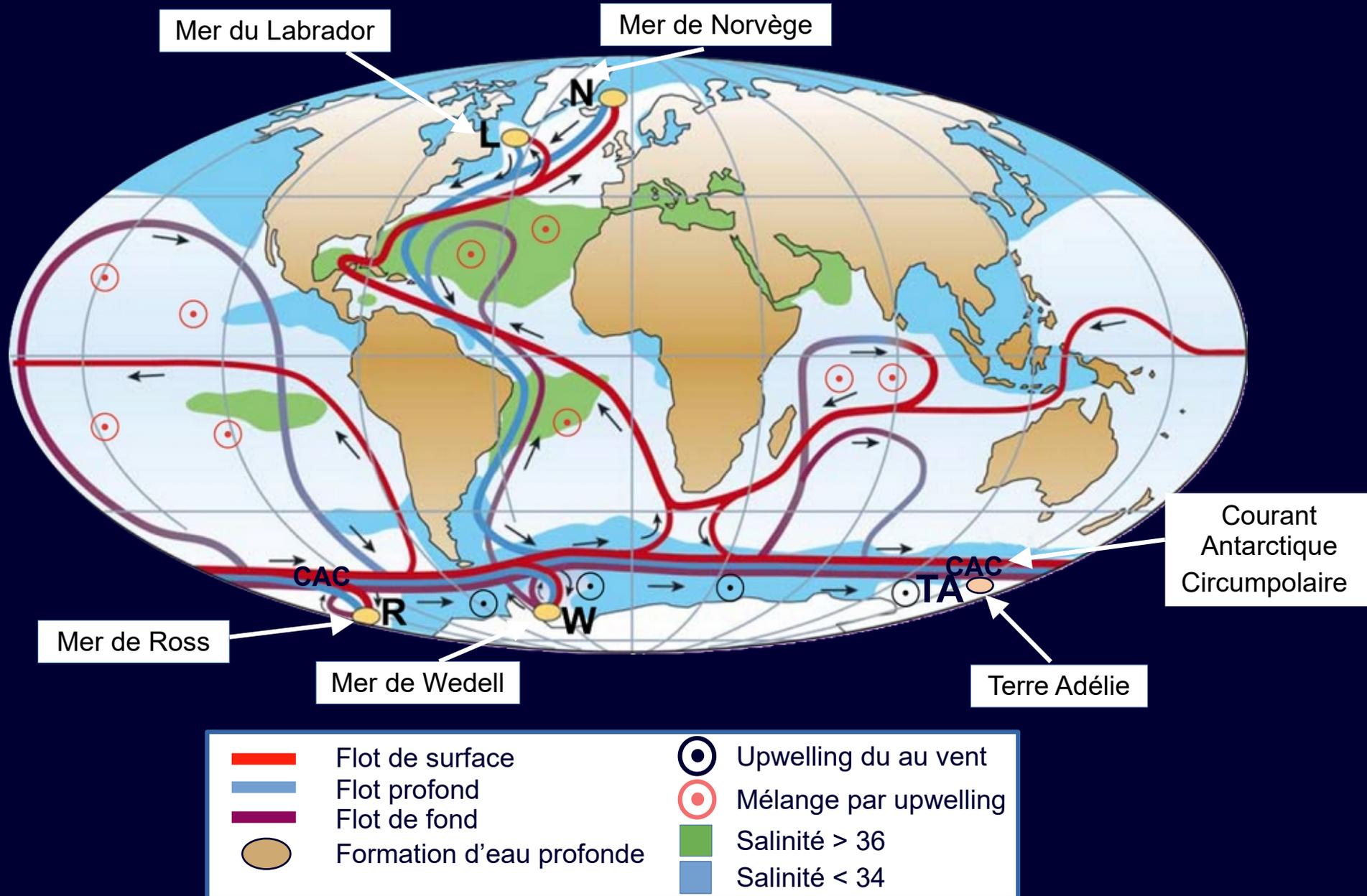
Eau Antarctique de Fond

- ➡ Transport
- ➡ Upwelling du au vent
- ⊕ Vent
- ➡ Upwelling du au mélange
- ➡ Onde interne
- ➡ Mélange diapycnal
- ➡ Formation d'eau profonde
- ➡ Flux de chaleur
- ➡ Flux d'eau douce
- □ Banquise

Schéma à 6 couches de la circulation thermohaline dans l'Atlantique



Circulation méridienne de retournement

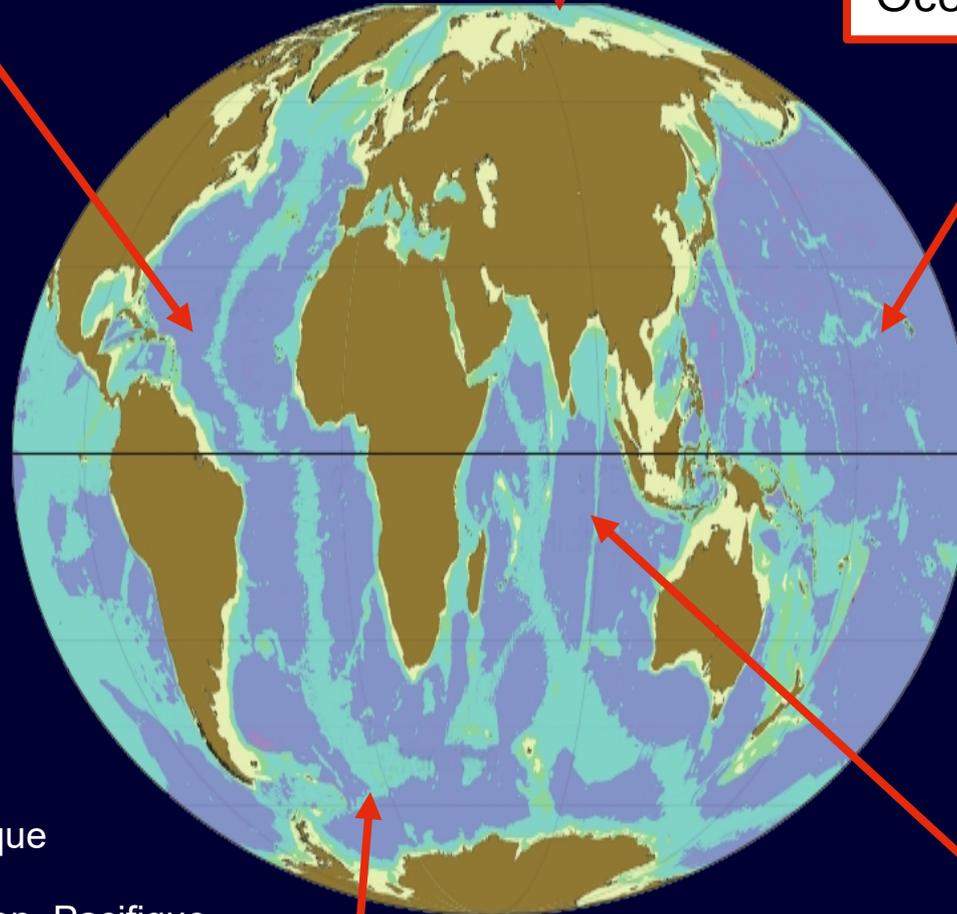


Description des Océans

Océan Atlantique

Océan Arctique

Océan Pacifique



Océan Indien

Océan Austral/Antarctique

Combien d'océans ?

1 : L'océan mondial

3 : Atlantique, Indien, Pacifique

4 : Atlantique, Austral, Indien, Pacifique

5 : Atlantique, Arctique, Austral, Indien, Pacifique

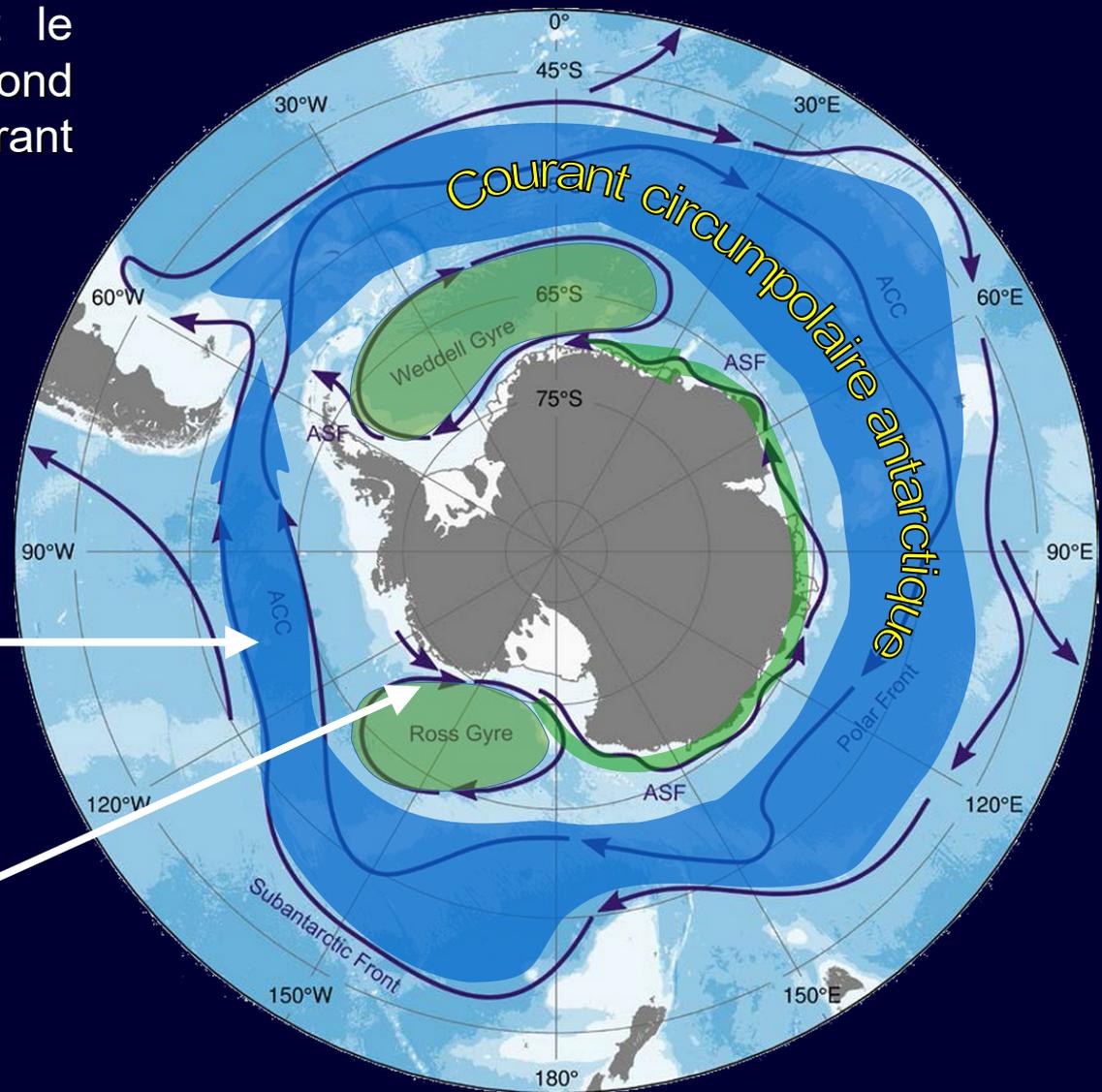
Océan Austral/Antarctique

Océan Austral/Antarctique

Océan austral : Océan baignant le continent antarctique. Il correspond aux eaux parcourues par le courant circumpolaire antarctique.

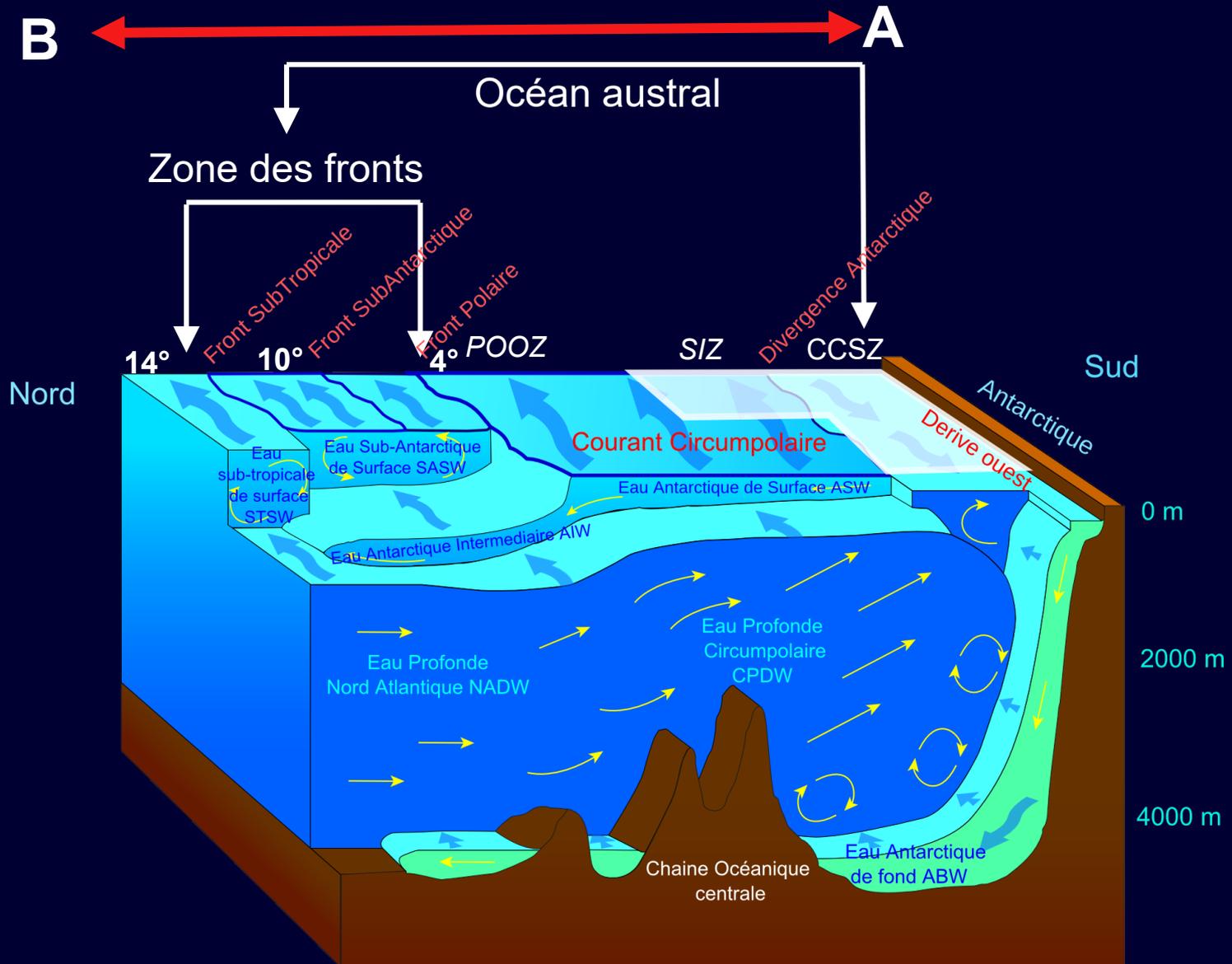
Le courant circumpolaire antarctique transporte d'ouest en est plus de 140 millions de mètres cubes d'eau par seconde (140 Sv).

Sur la côte du continent, un courant est → ouest et des gyres (« tourbillons »)



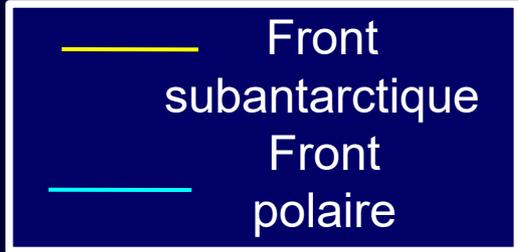
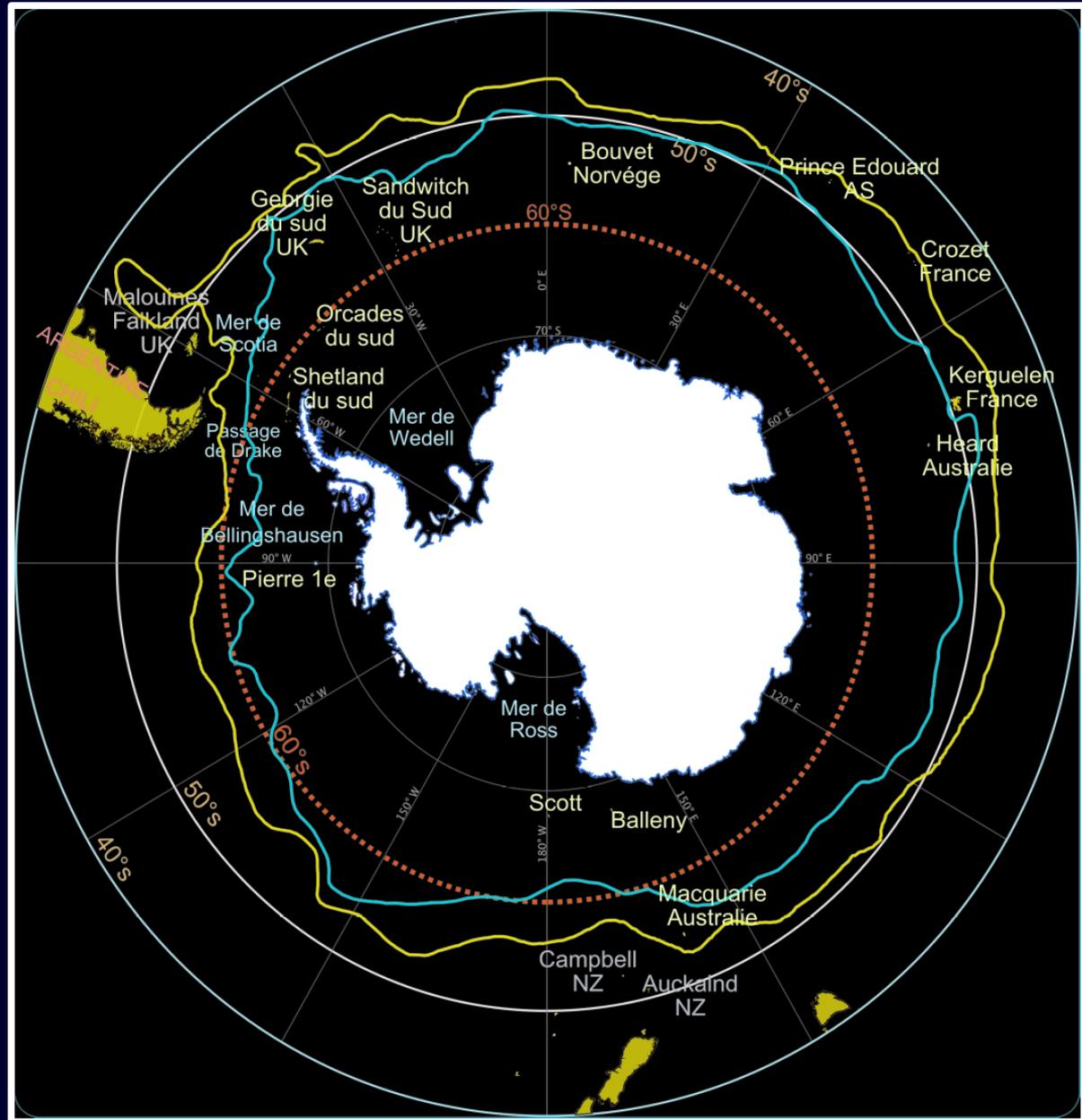
20,3 millions de km² ?
limité au 60°S

Océan Austral/Antarctique, hydrologie

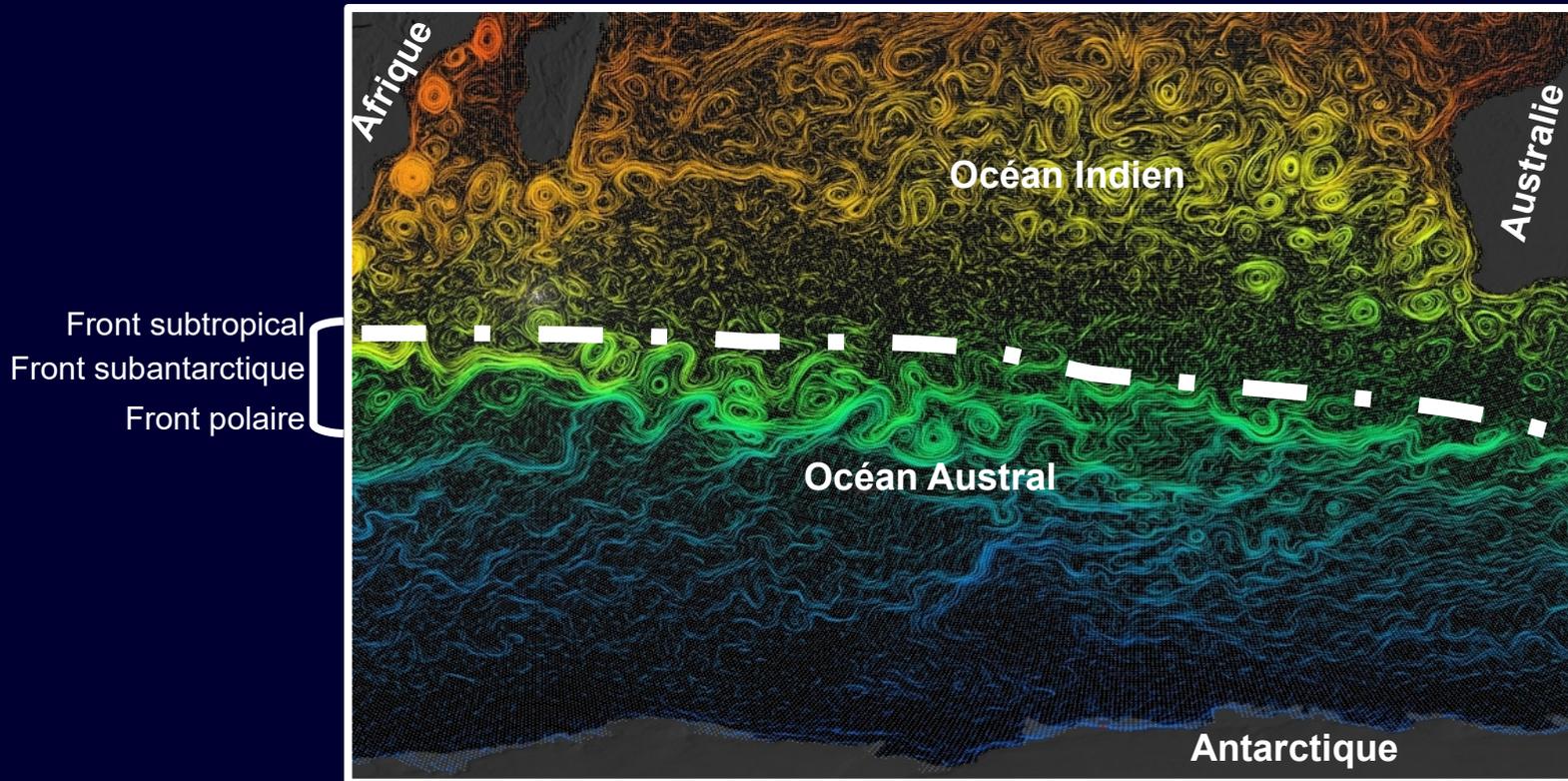


POOZ : permanently open ocean zone, SIZ : seasonal ice zone, CCSZ : coastal and continental shelf zone

Océan Austral/Antarctique, fronts océaniques



Limite nord « turbulente »



Océan Austral/Antarctique

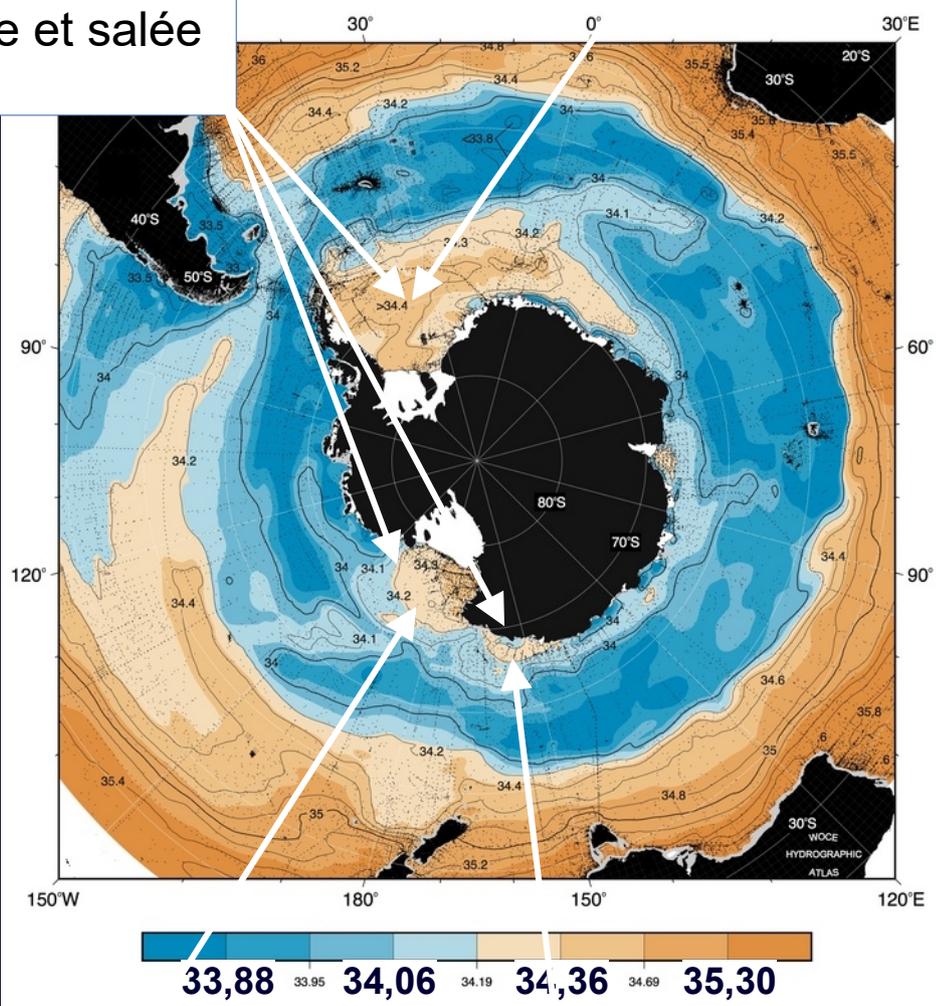
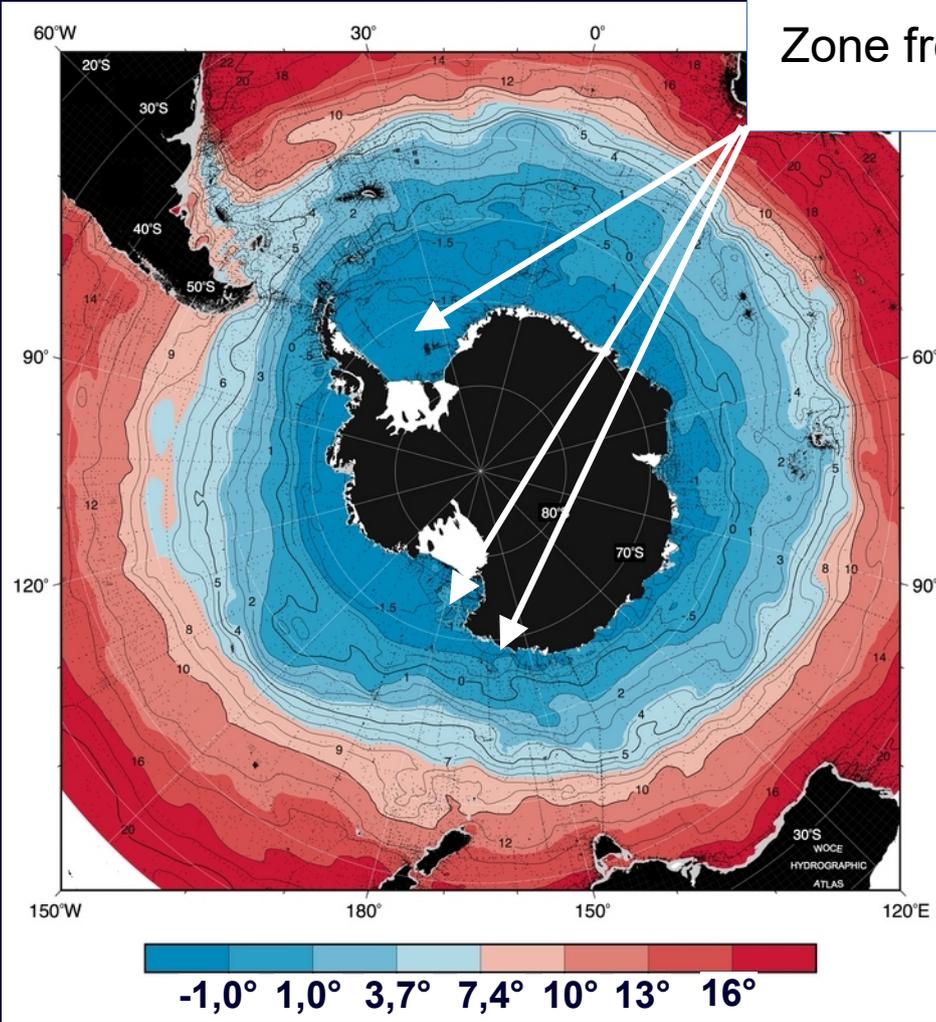
Z = 50 m

Température potentielle

Salinité

Mer de Wedell

Zone froide et salée

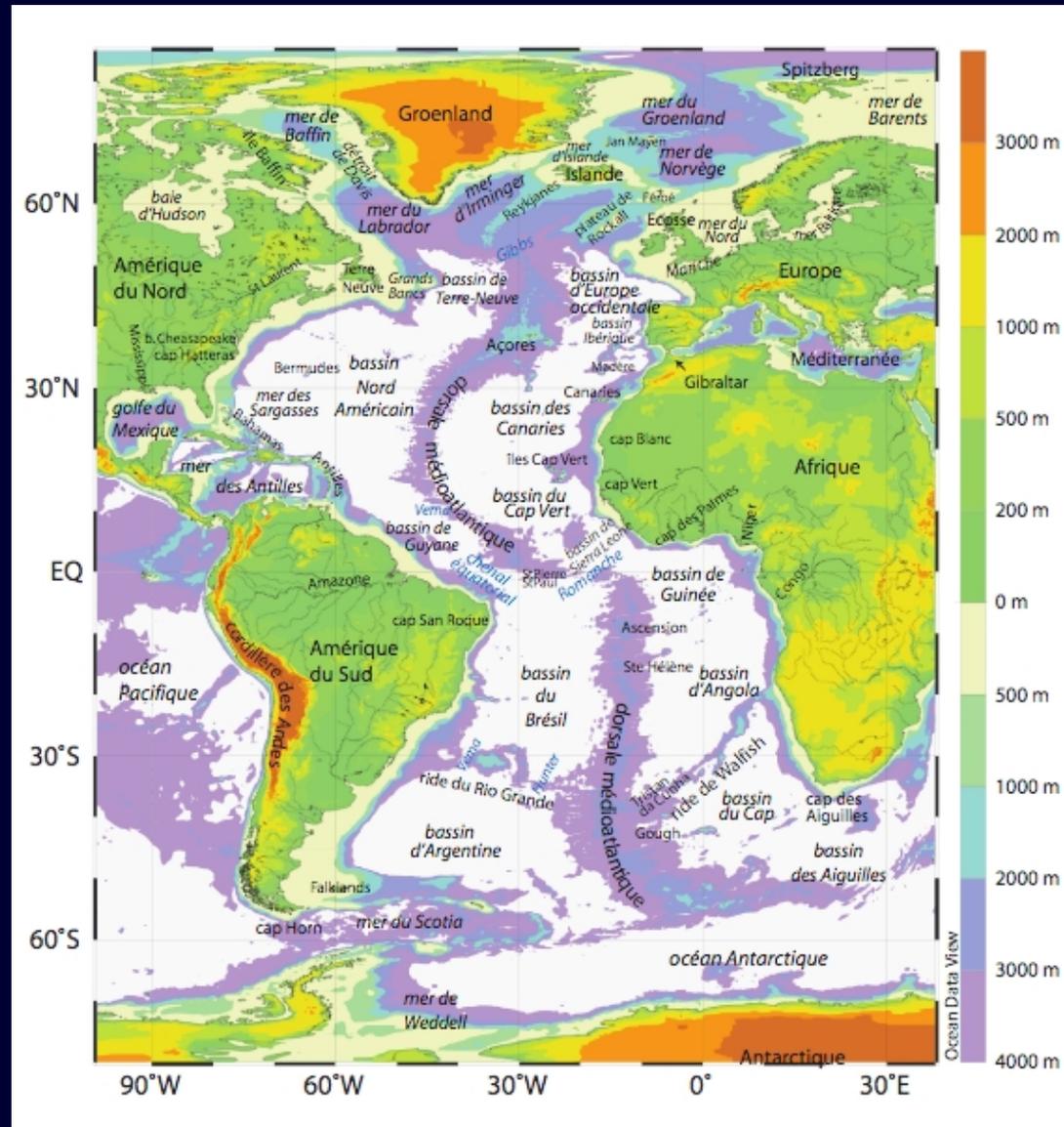


Mer de Ross

Terre Adélie

Océan Atlantique

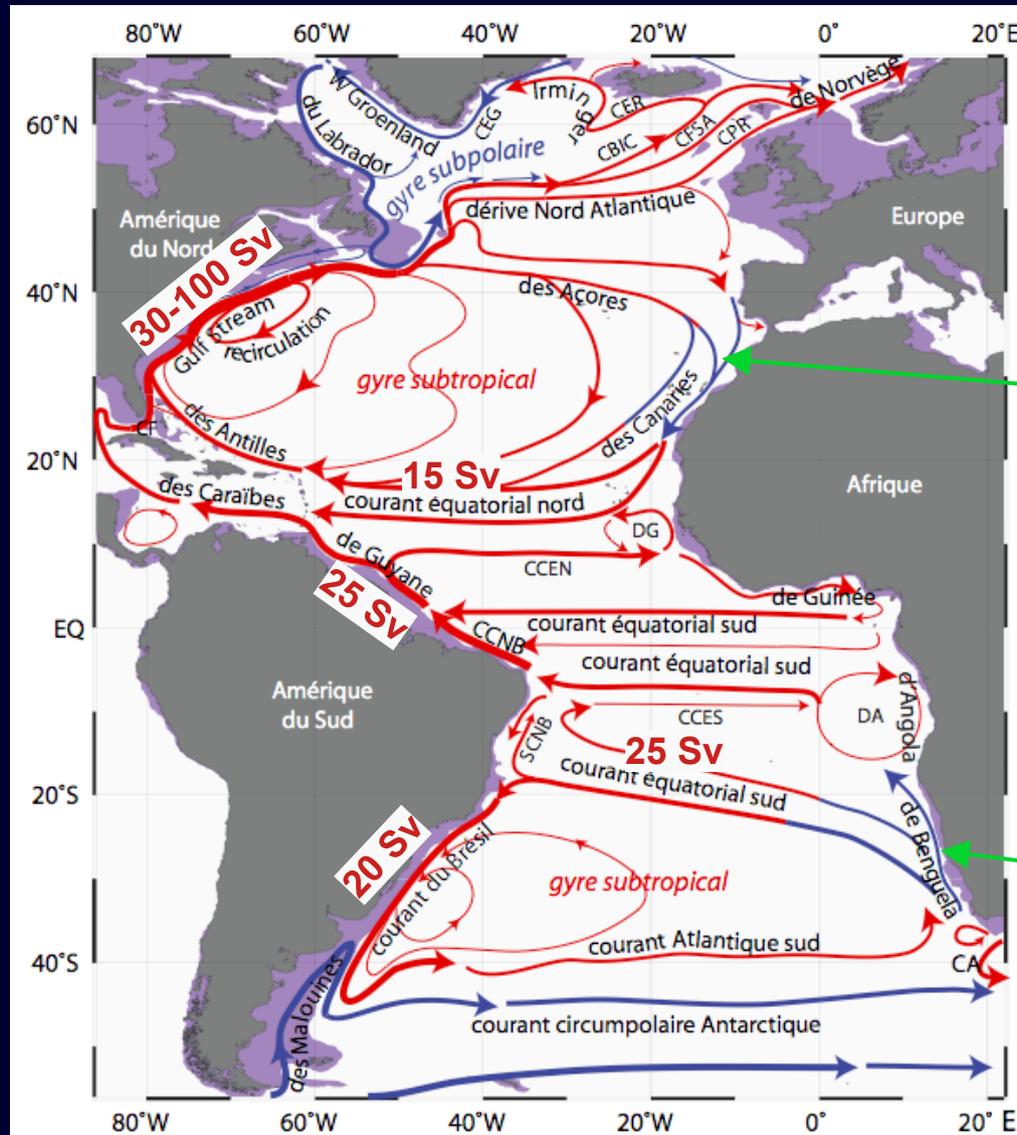
Océan Atlantique



106,5 millions km²

Bathymétrie de l'océan Atlantique
En blanc Z > 4000m

Océan Atlantique : circulation générale



CCEN et CCES Contre Courant Équatorial Nord et Sud, CBIC Courant du bassin d'Island Central, CFSA Courant du Font SubArctique, DG dôme de Guinée, DA dôme d'Angola, CA Courant des Aiguilles, SNCB Sous-Courant Nord Bresi, CCNB Courant Côtier Nord Brésilien.

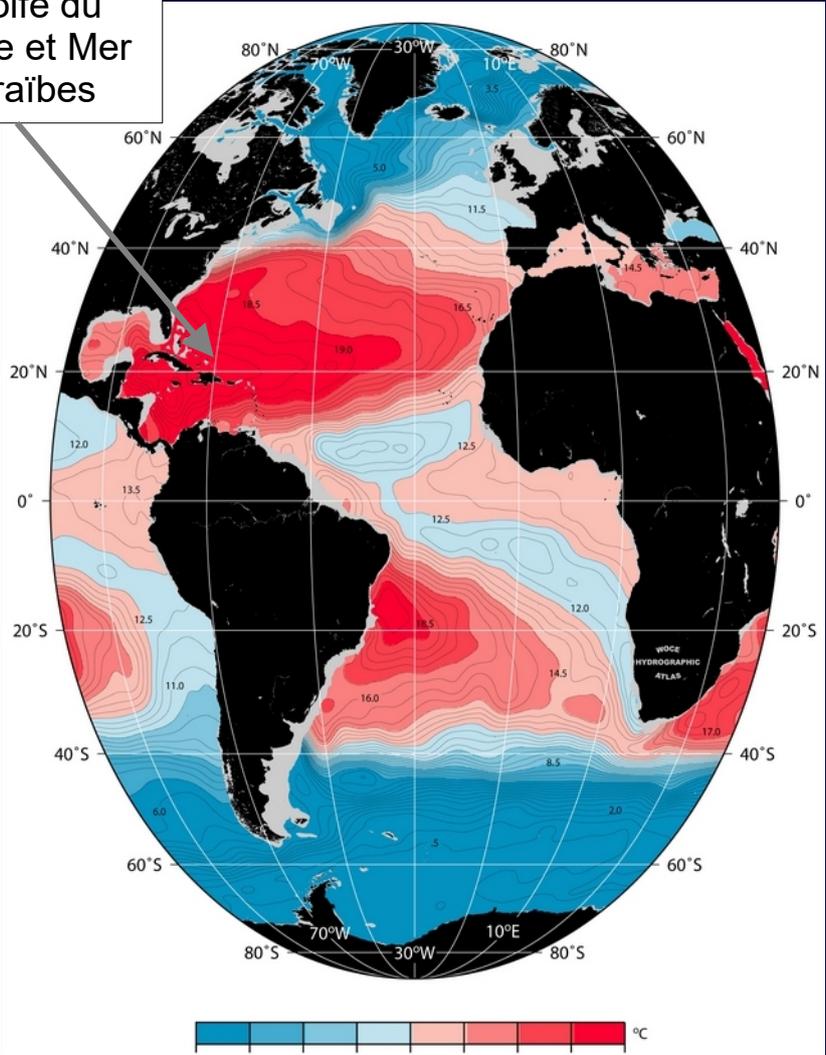
*Zone d'Upwelling : remontée d'eau.

L'océan planétaire, Michèle Fieux, 2010

Océan Atlantique, températures à 200 et 1000m

Température potentielle à 200m

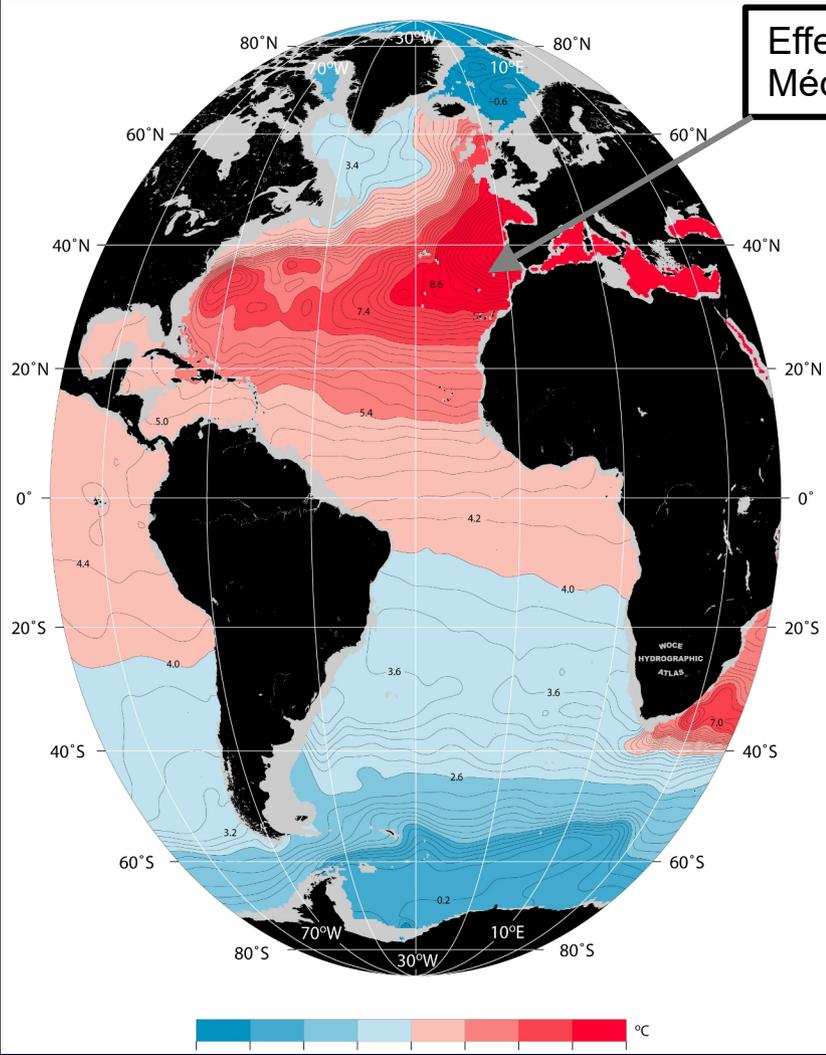
Effet Golfe du Mexique et Mer des Caraïbes



6,5° 10,5° 14,5° 18,5°

Température potentielle à 1000m

Effet de la Mer Méditerranée

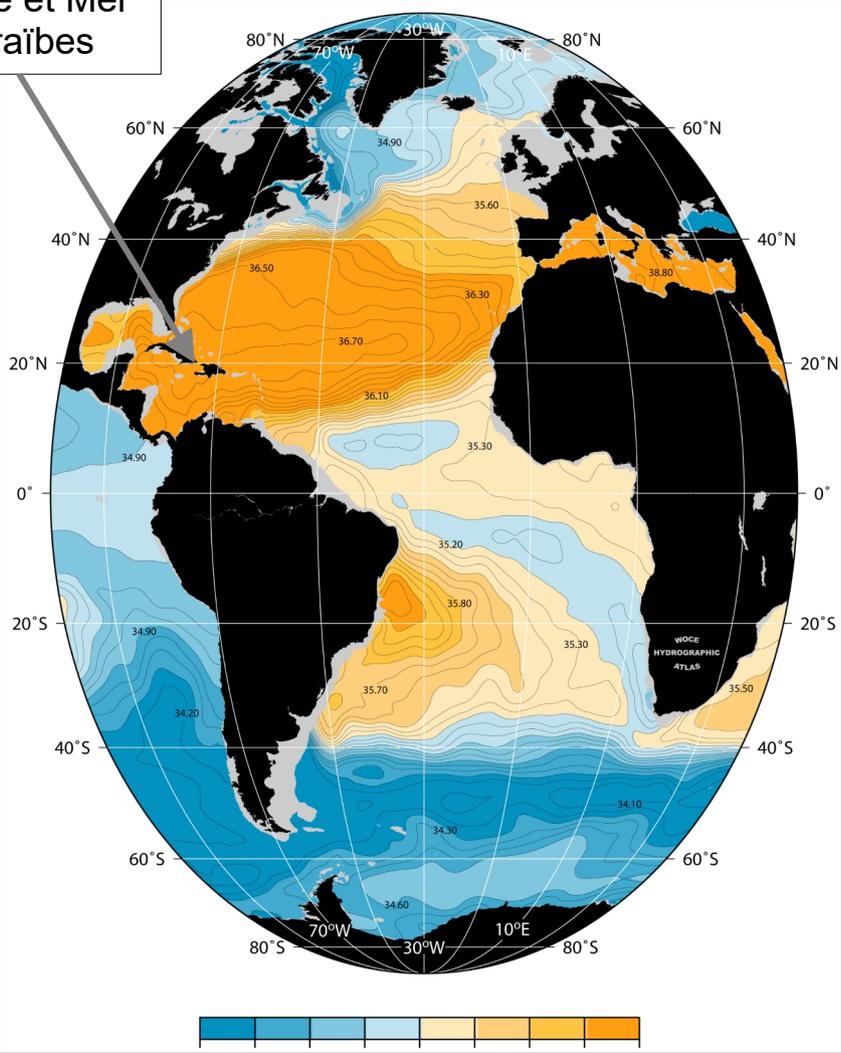


-0,2° 2,6° 5,4° 8,2°

Océan Atlantique, salinités à 200 et 1000m

Salinité à 200m

Effet Golfe du Mexique et Mer des Caraïbes



Salinité à 1000m

Effet de la Mer Méditerranée

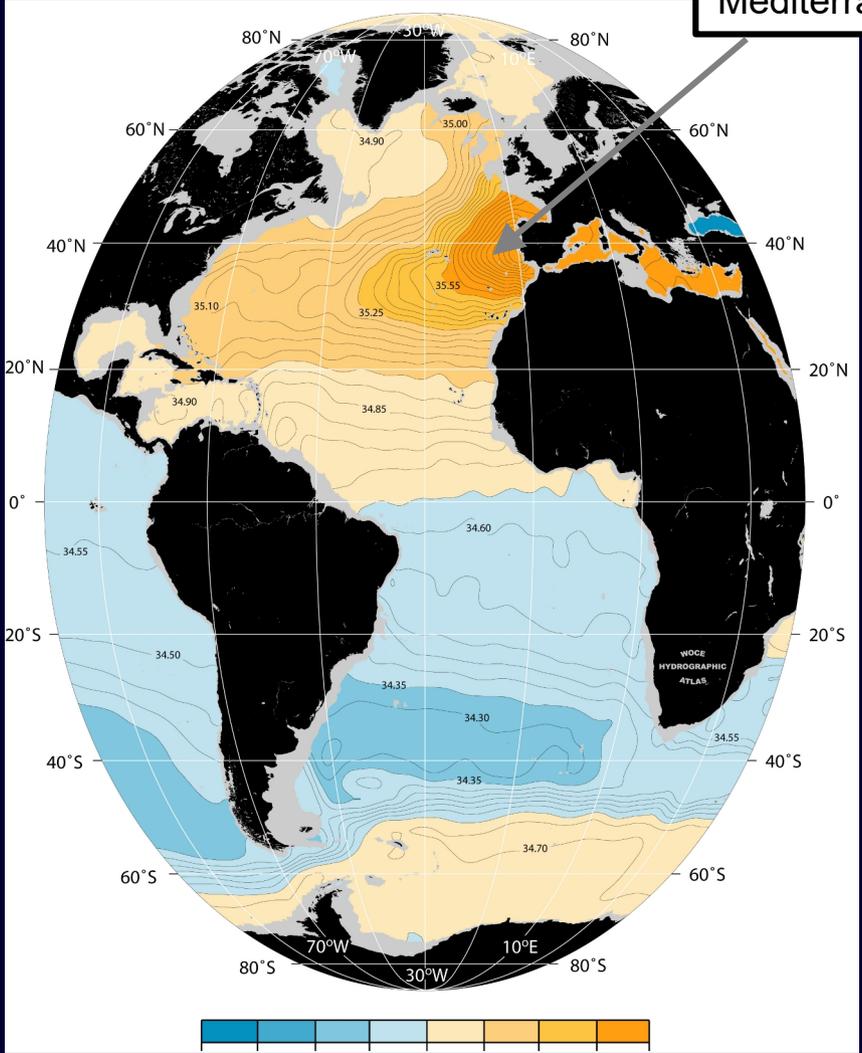
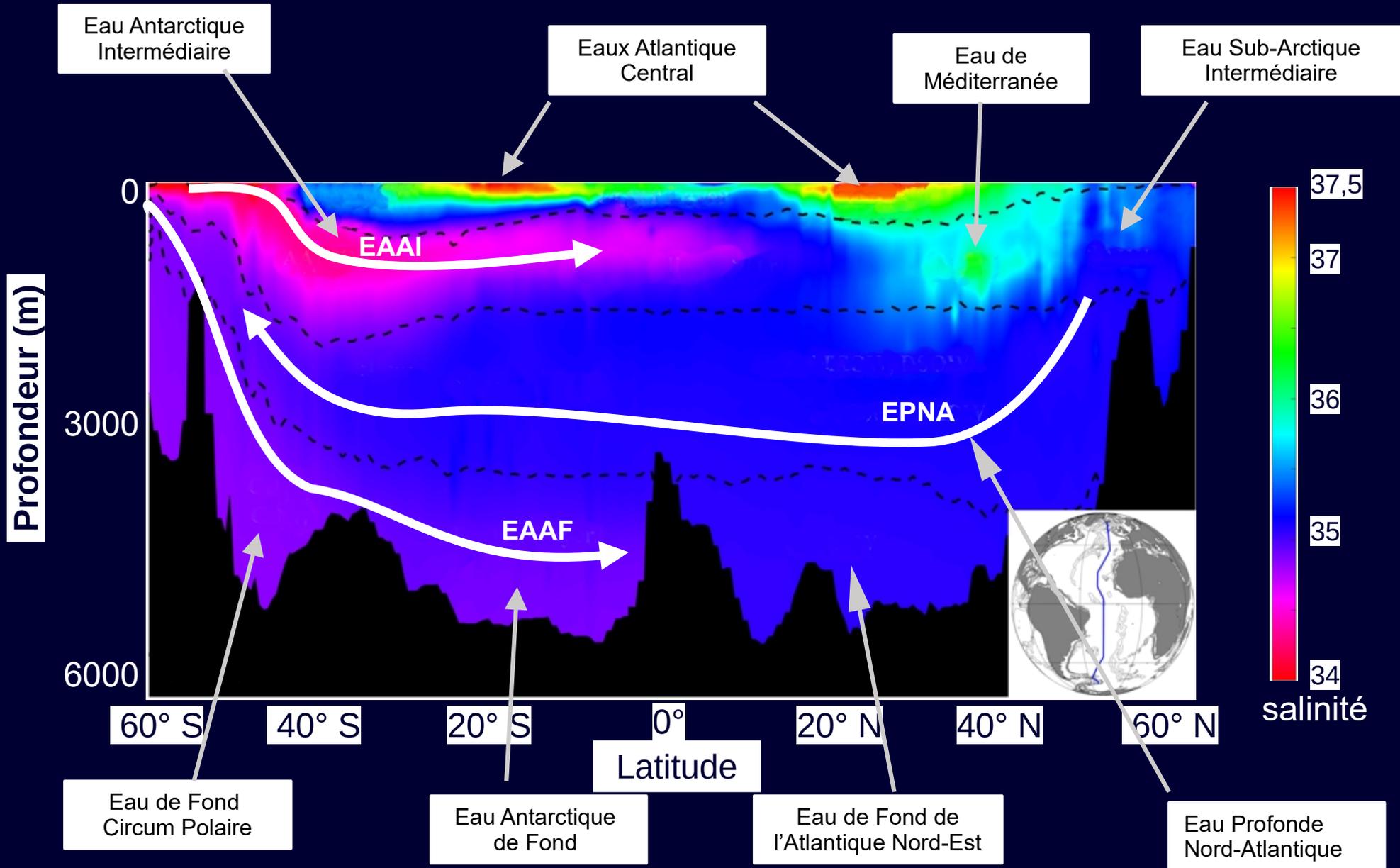
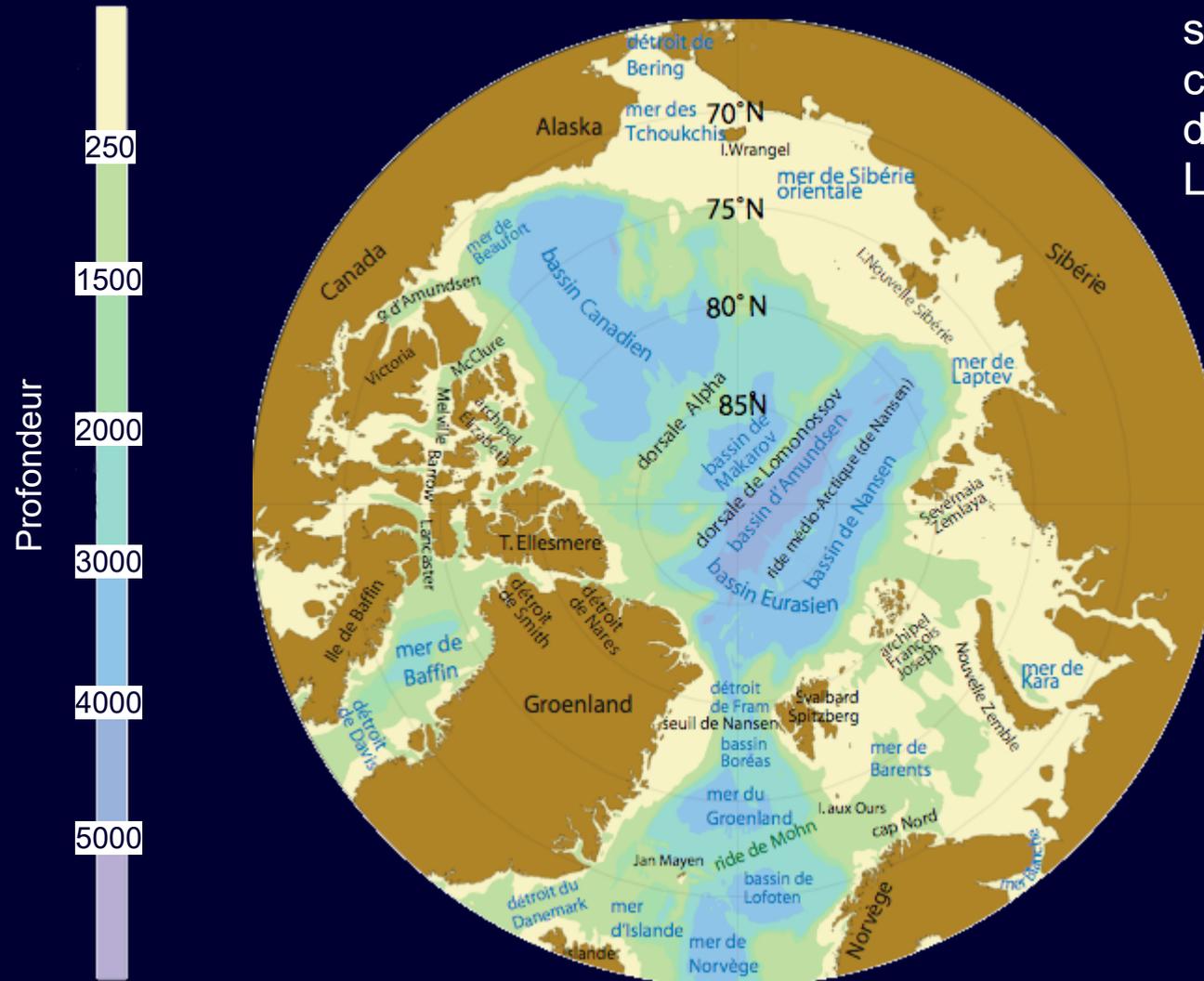


Diagramme des salinités des masses d'eaux de l'Atlantique



Océan Arctique ou méditerranée arctique ??

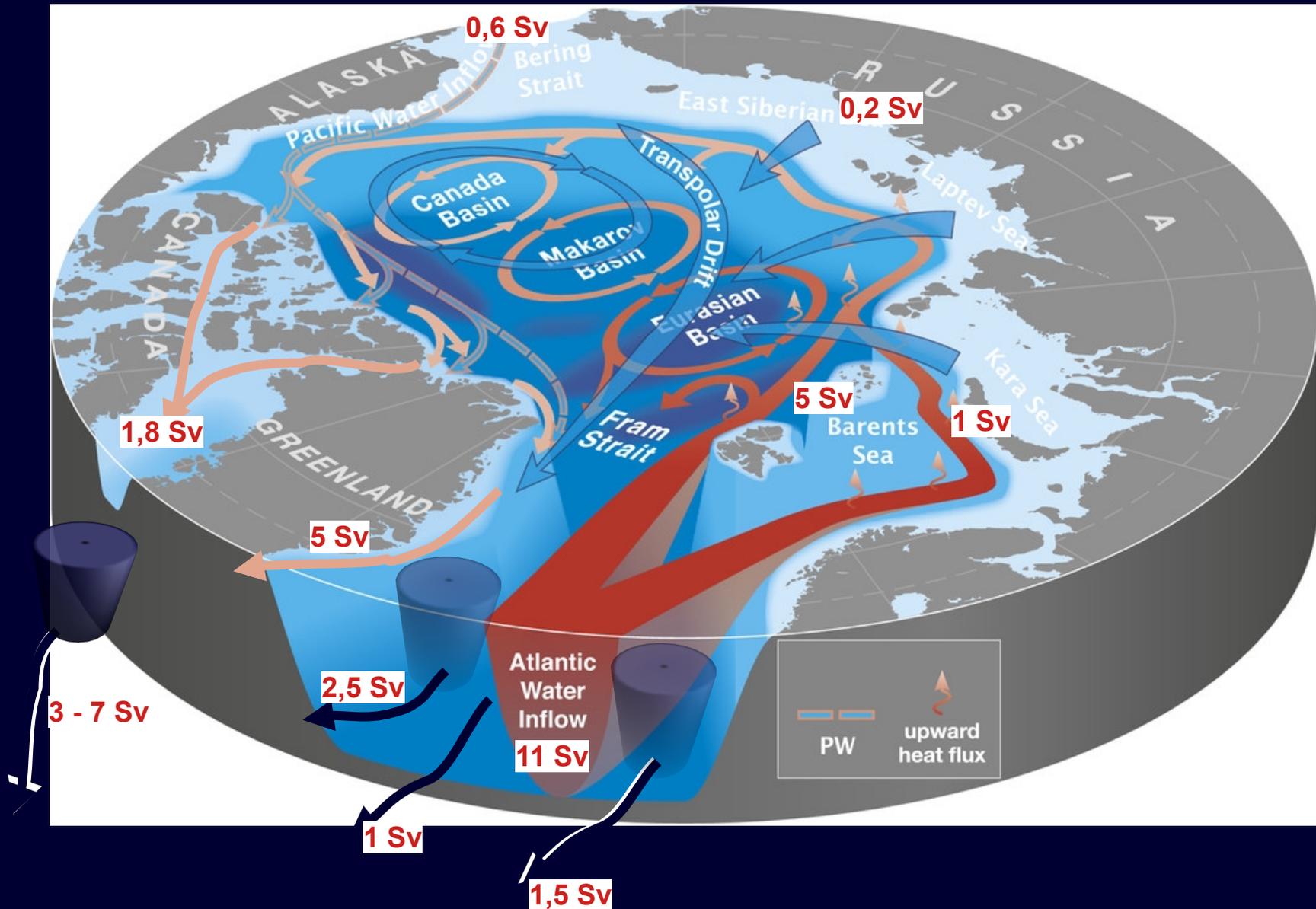
Océan Arctique ou méditerranée arctique ??



L'océan Arctique est souvent considéré comme une mer annexe de l'océan Atlantique : La méditerranée arctique

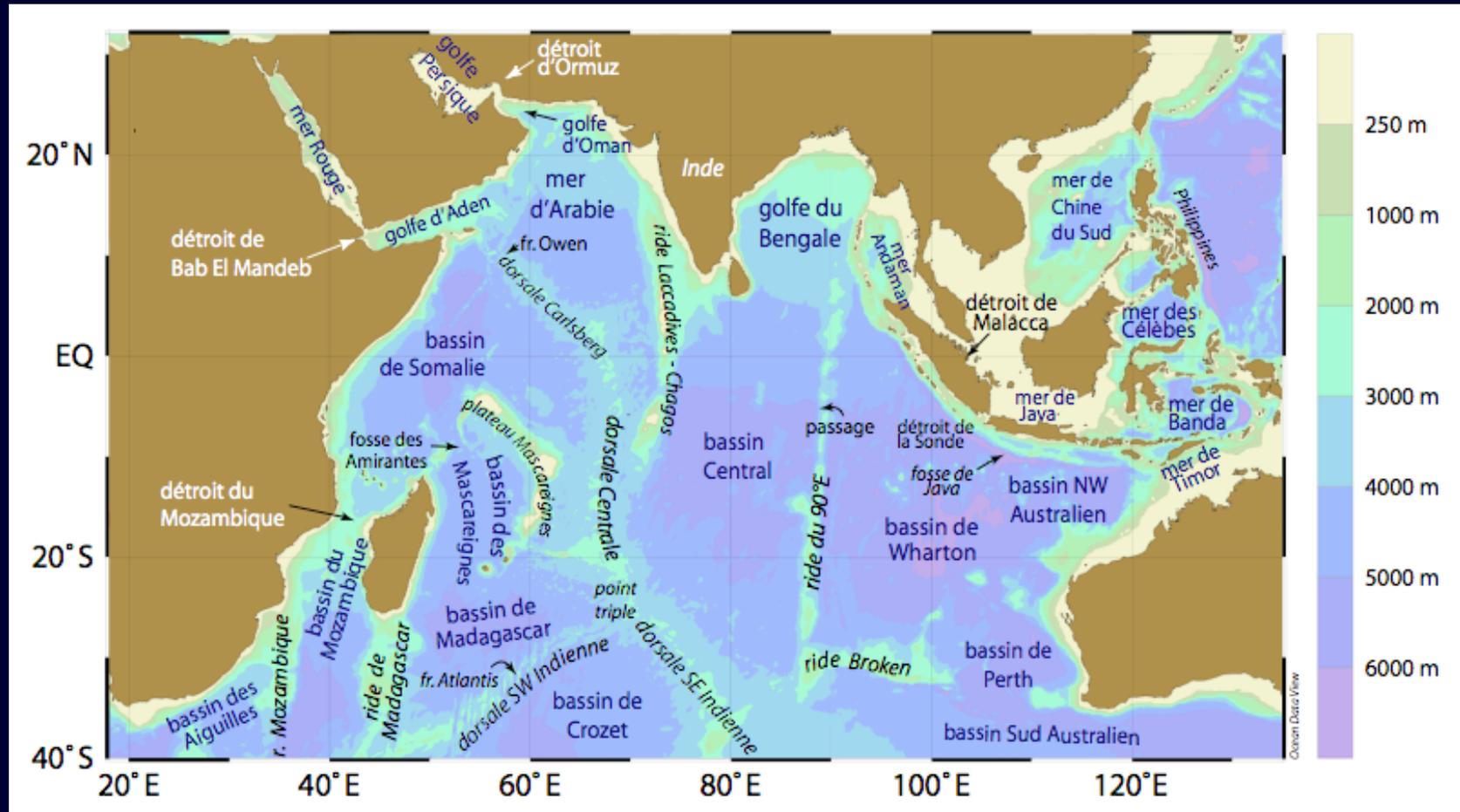
14,06 millions km²

Océan Arctique ou méditerranée arctique ?? circulation océanique



Océan Indien

Océan Indien



70,56 millions km²

Un océan fermé au nord par l'Eurasie avec un cloisonnement en de nombreux bassins profonds.

Océan Indien

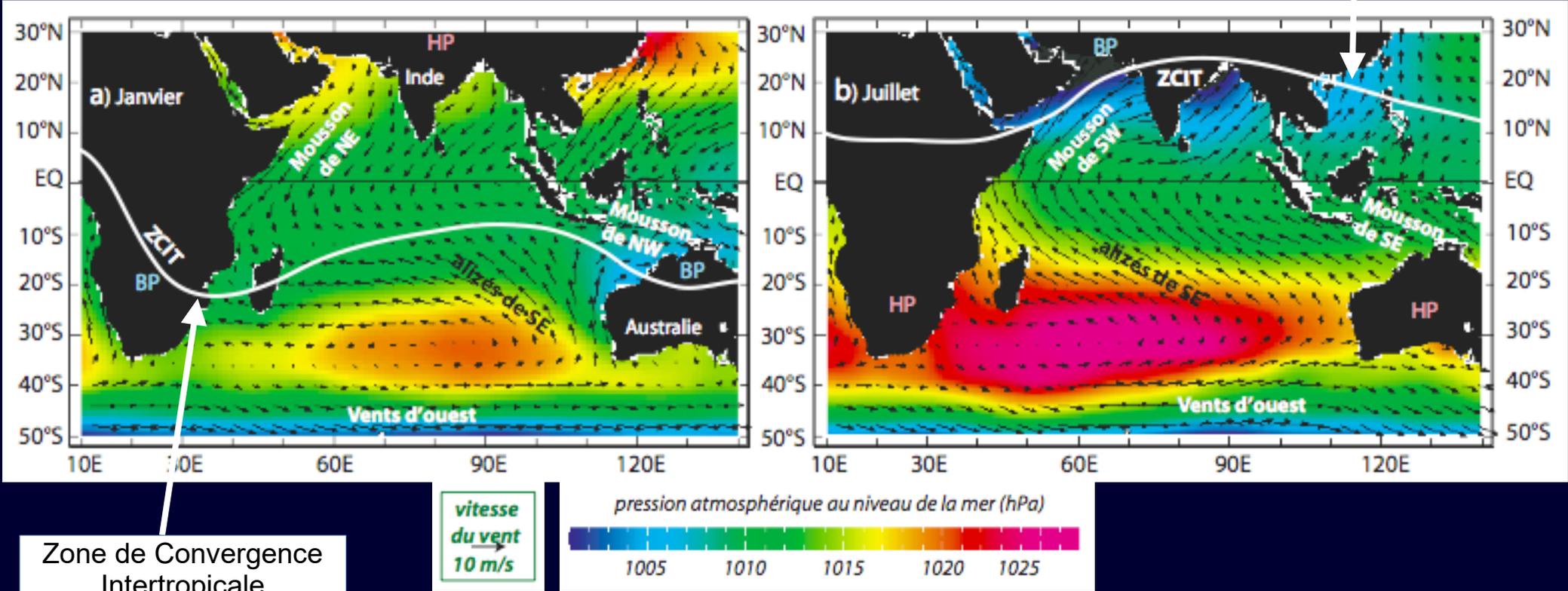
une grande variabilité saisonnière : le régime des moussons

Situation atmosphérique

Janvier

Juillet

Zone de Convergence Intertropicale



Zone de Convergence Intertropicale

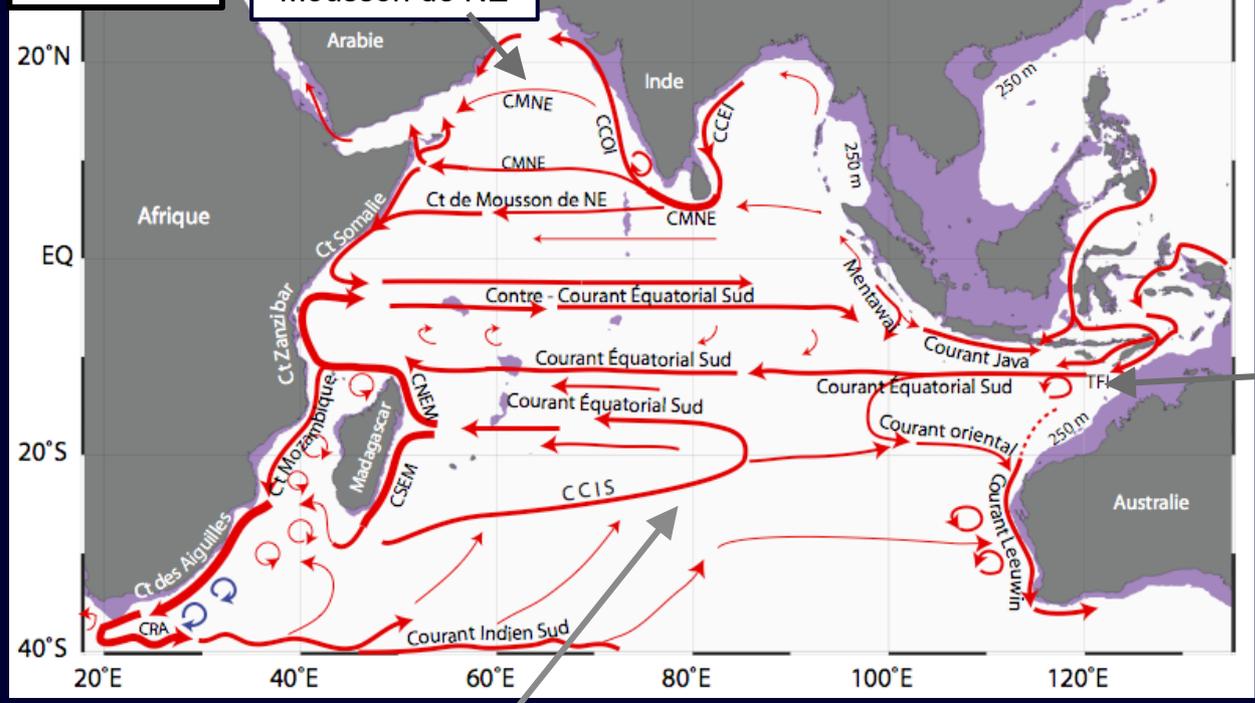
Vents moyens et pressions atmosphériques (a) en janvier, (b) en juillet.

Janvier

Courant de Mousson de NE

Janvier - Mousson de Nord-Est

Océan Indien :
Principaux courants



« Throughflow »
Indonésien

Courant de
Mousson de SW

Grand tourbillon
de Somalie

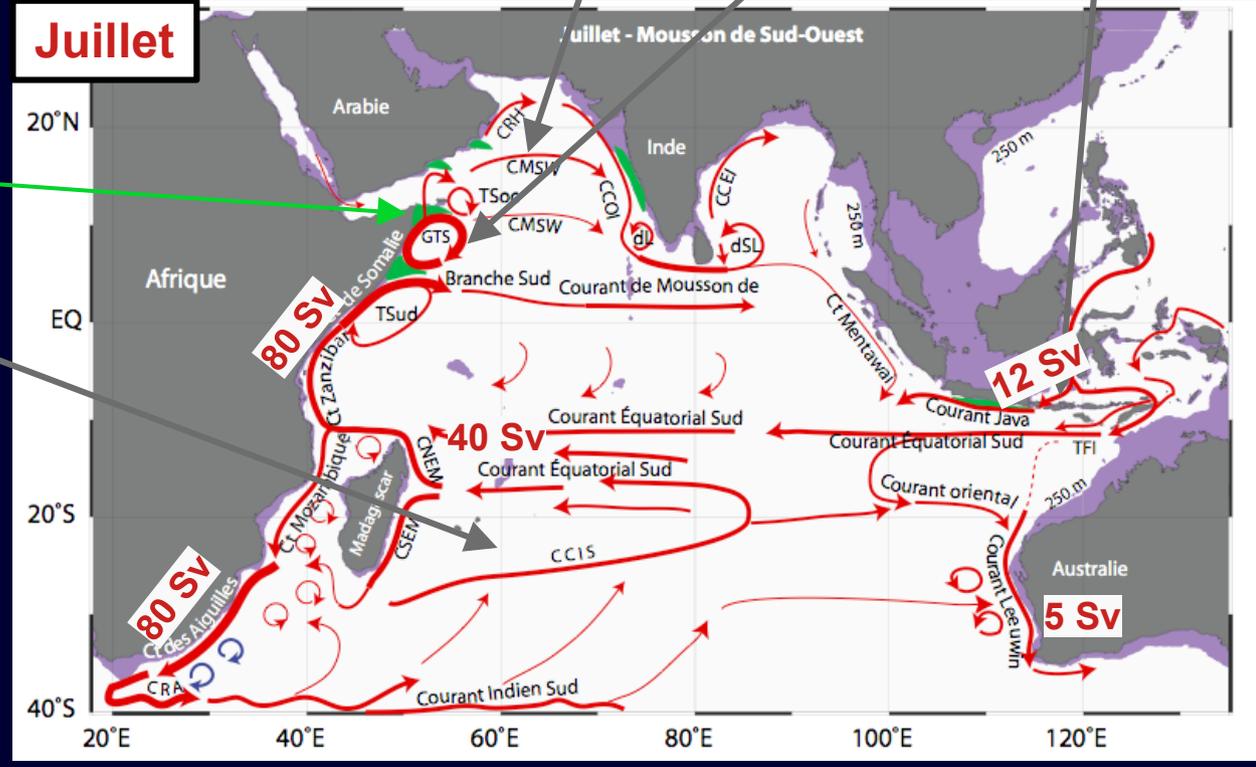
Juillet

Juillet - Mousson de Sud-Ouest

Contre-Courant
Subtropical du Sud

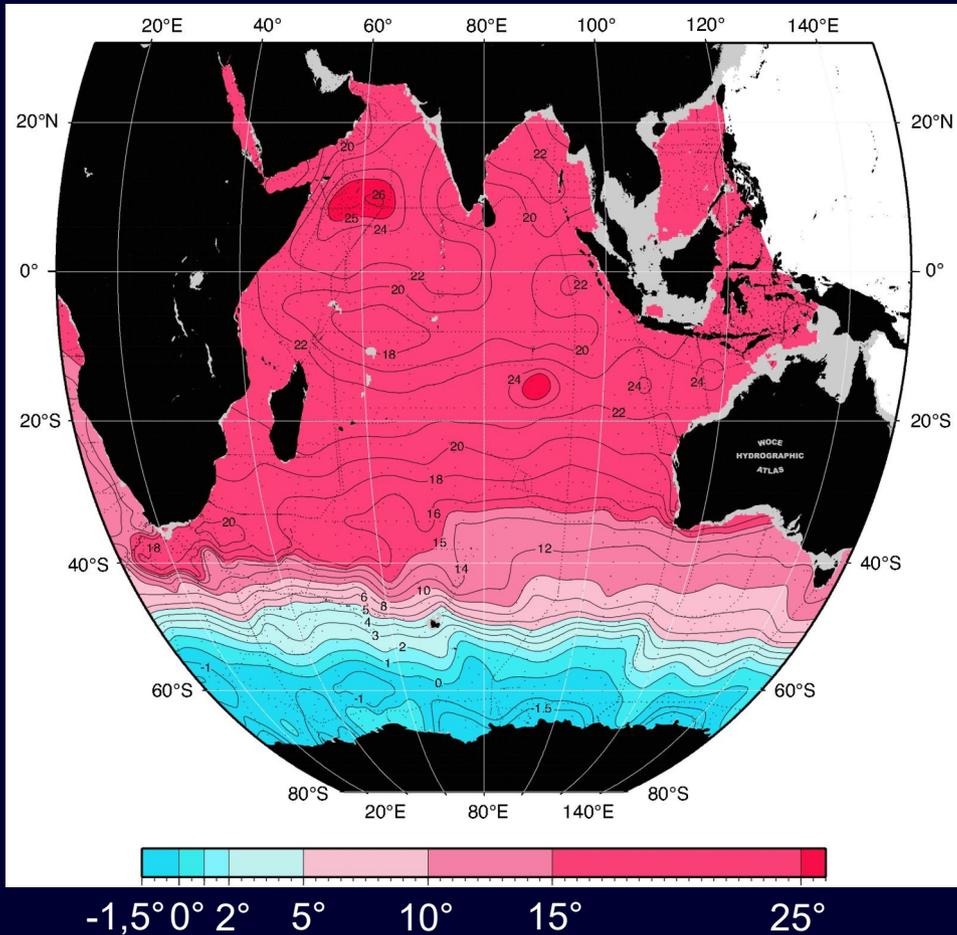
Zone
d'Upwelling

Un très fort contraste
saisonnier dû aux moussons

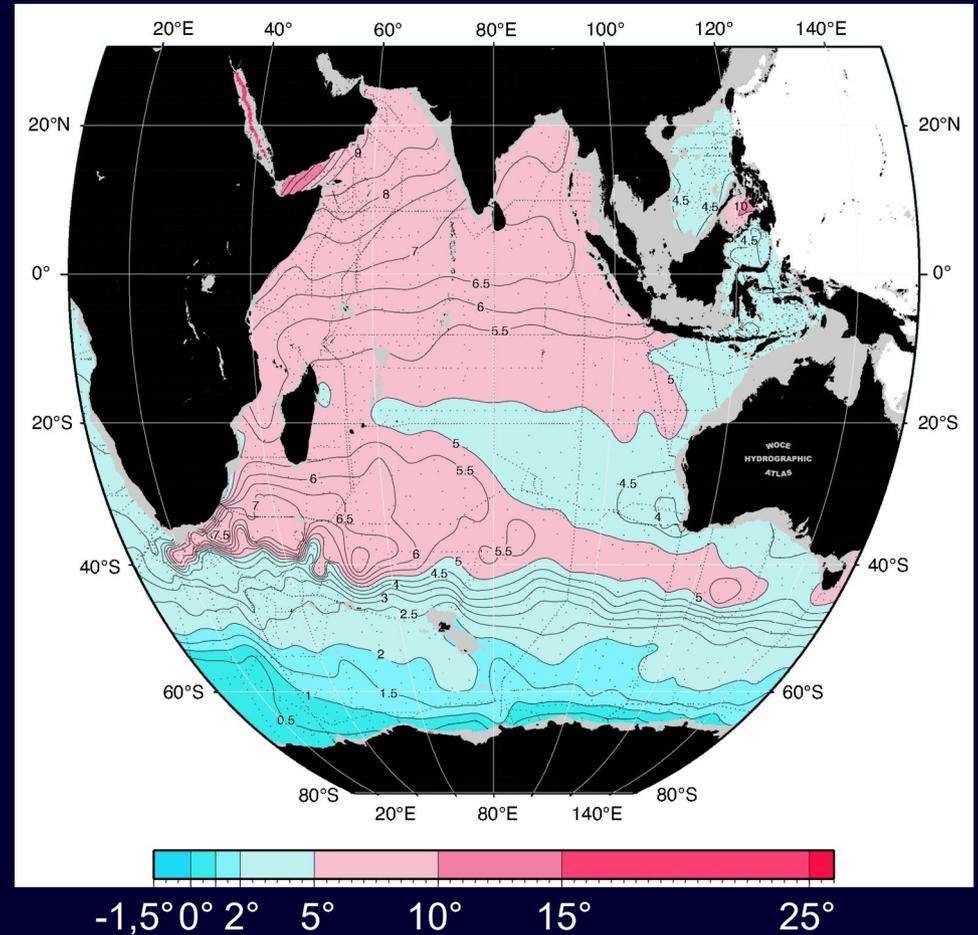


Océan Indien, températures

Température potentielle à 100m

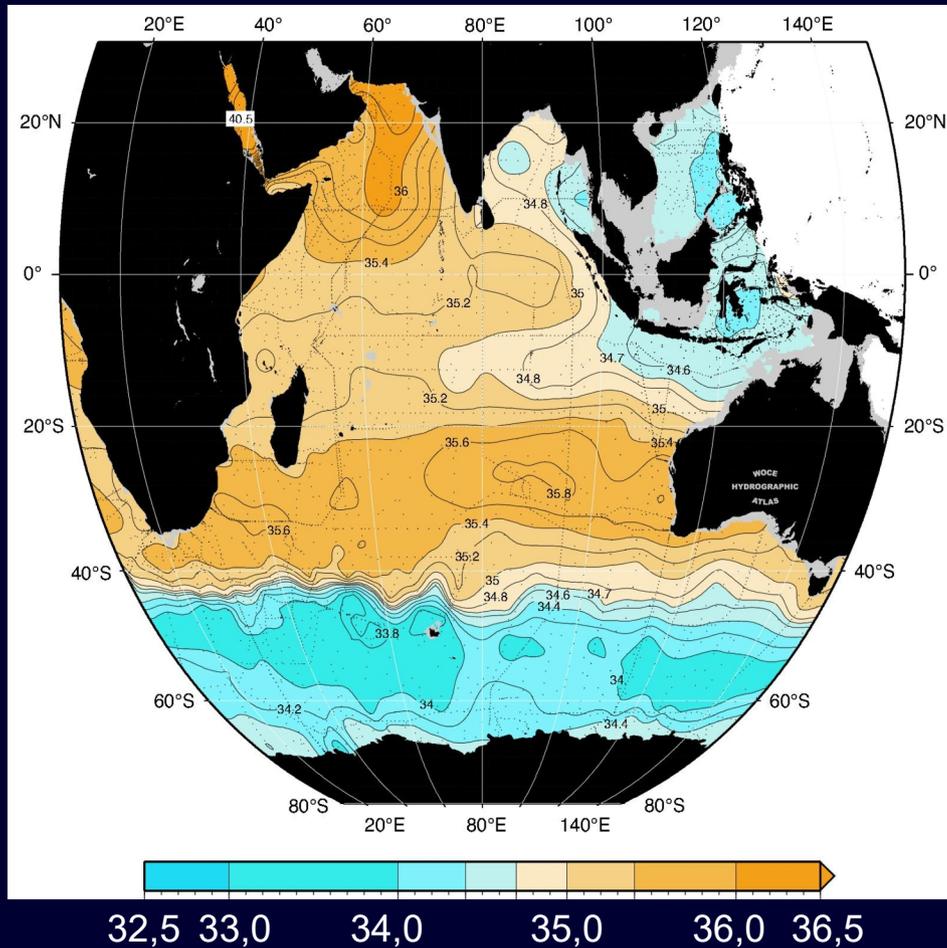


Température potentielle à 1000m

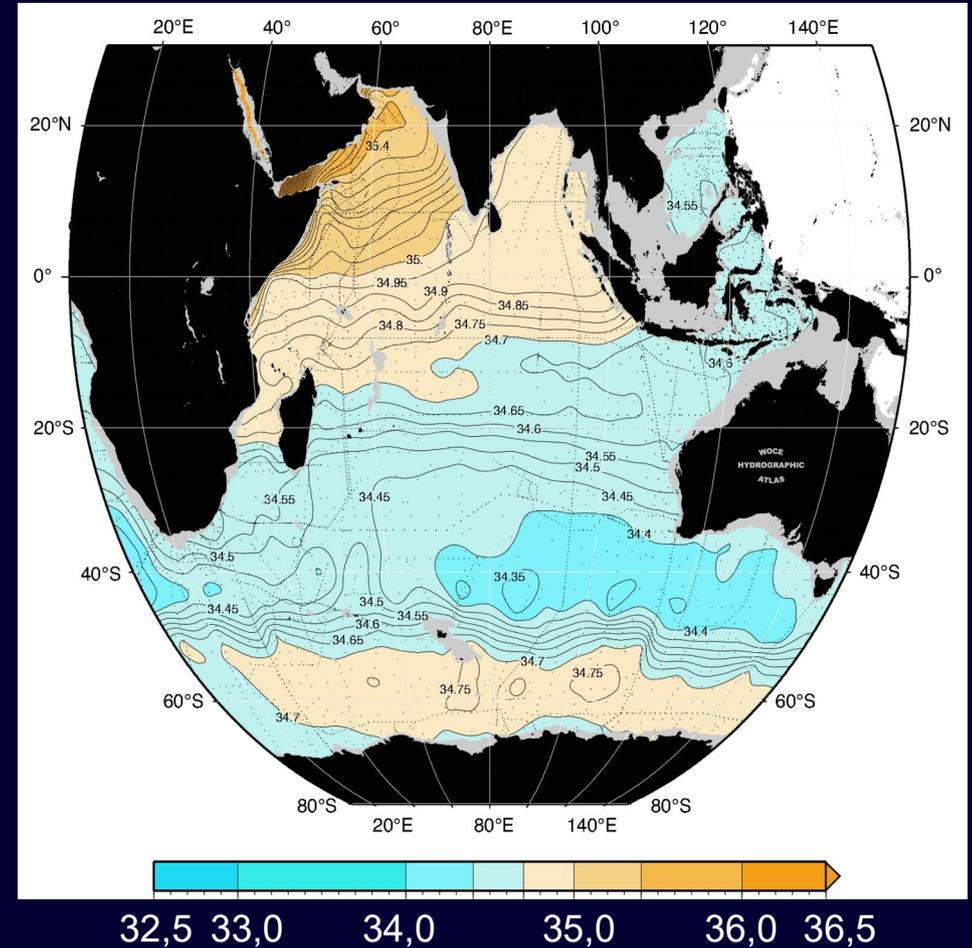


Océan Indien, salinité

Salinité à 100m



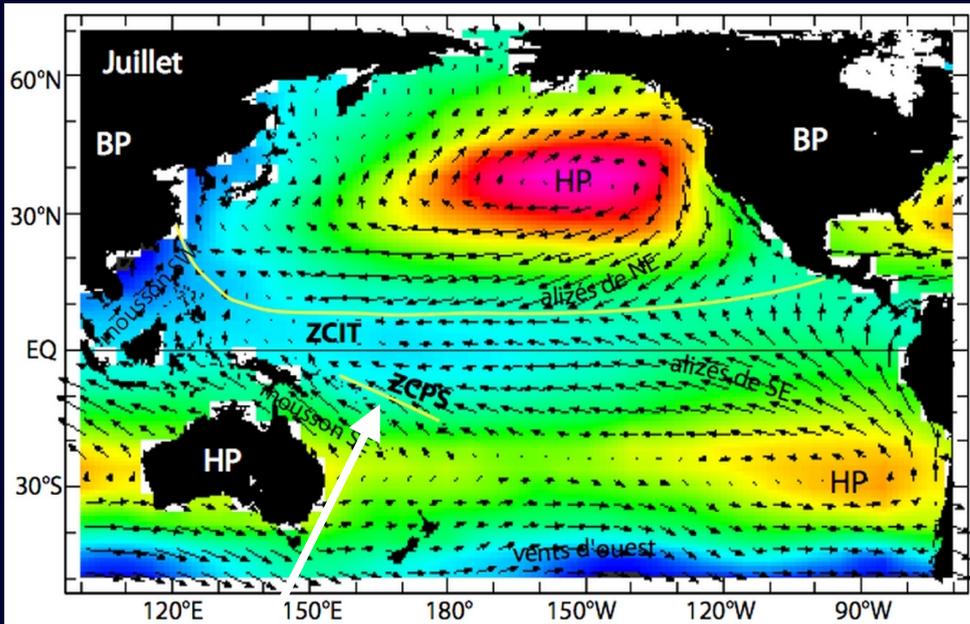
Salinité à 1000m



Océan Pacifique

Océan Pacifique

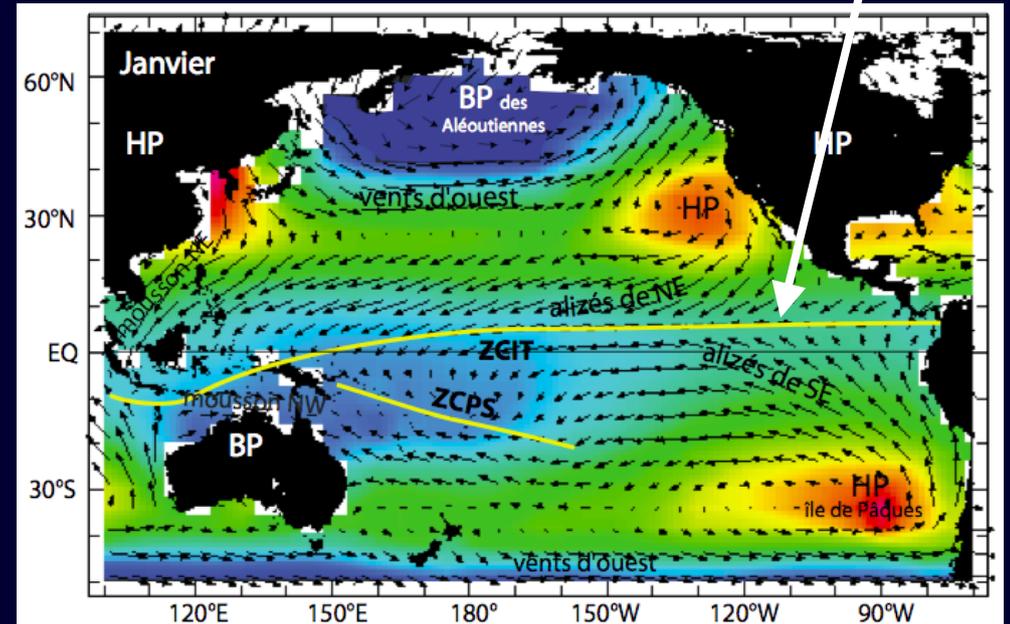
Janvier



Zone de Convergence Pacifique Sud

Juillet

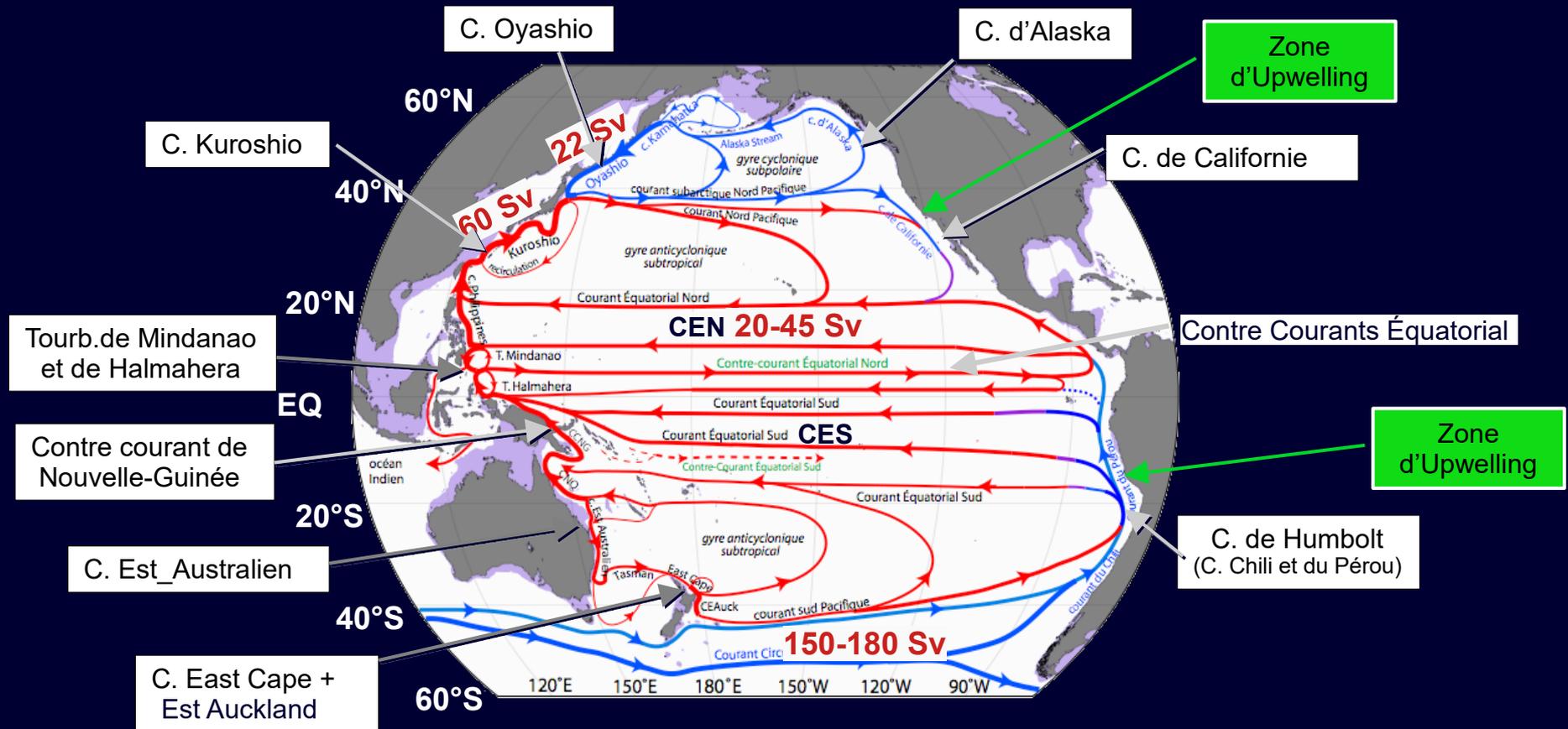
Zone de Convergence Intertropicale



Pression atmosphérique au niveau de la mer (mbar)



Circulation de surface de l'Océan Pacifique (mai à décembre).

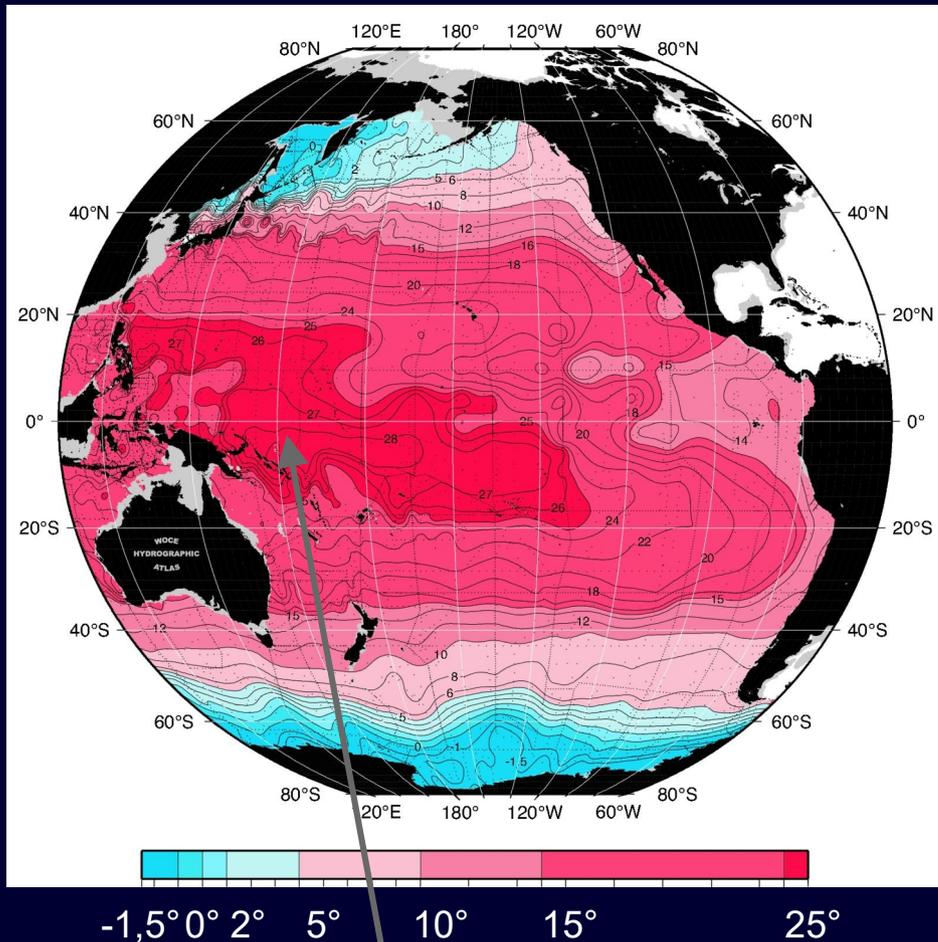


Circulation de surface de l'Océan Pacifique de mai à décembre ; de janvier à avril le CCNG (Contre courant de Nouvelle Guinée) change de sens.

Courants Équatorial Sud et Nord	CES, CEN	Courant Est Auckland	CEAuck
Contre Courants Équatorial Sud et Nord	CCES et CCEN	Courant Nord Queensland	CNQ
Sous Courants Équatorial Sud et Nord	SCE, SCES, SCEN	Tourbillon de Mindanao	
Contre courant de Nouvelle Guinée	CCNG	Tourbillon de Halmahera	
Courant Équatorial Intermédiaire	CEI	Tourbillon anticyclonique de d'East Cape	

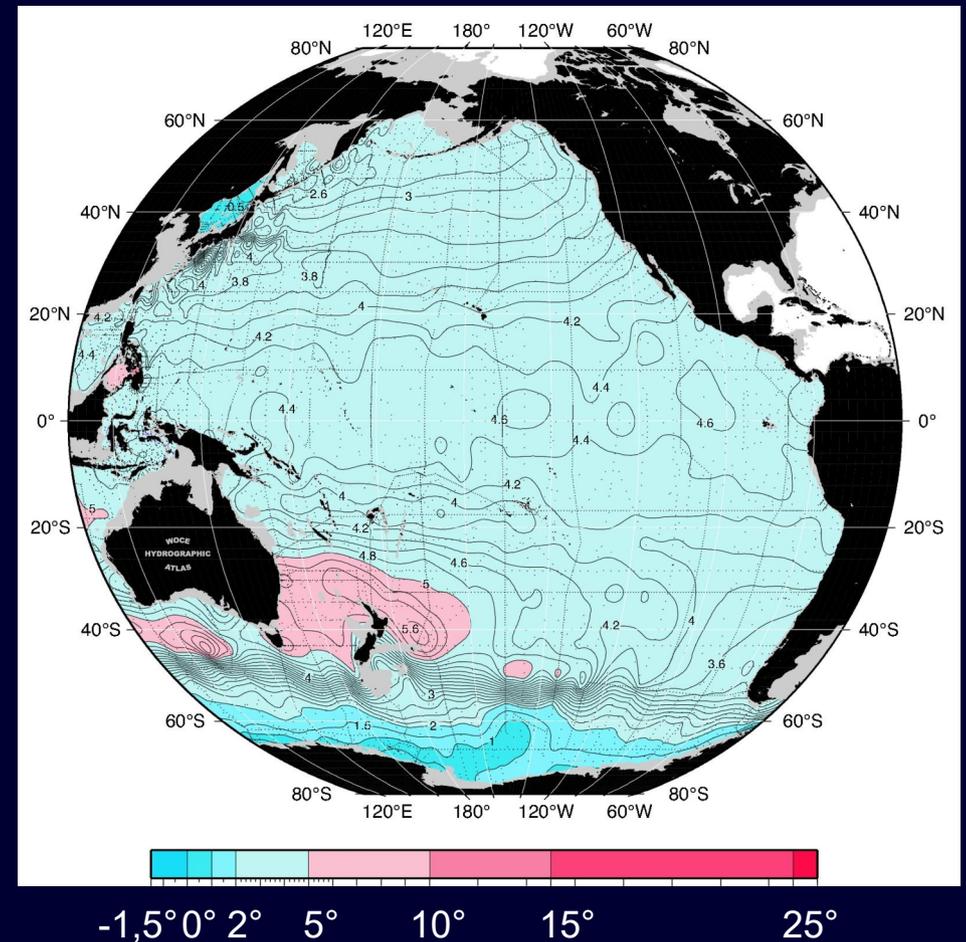
Océan Pacifique, températures

Température potentielle à 100 m



« Piscine chaude » de la terre

Température potentielle à 1000 m



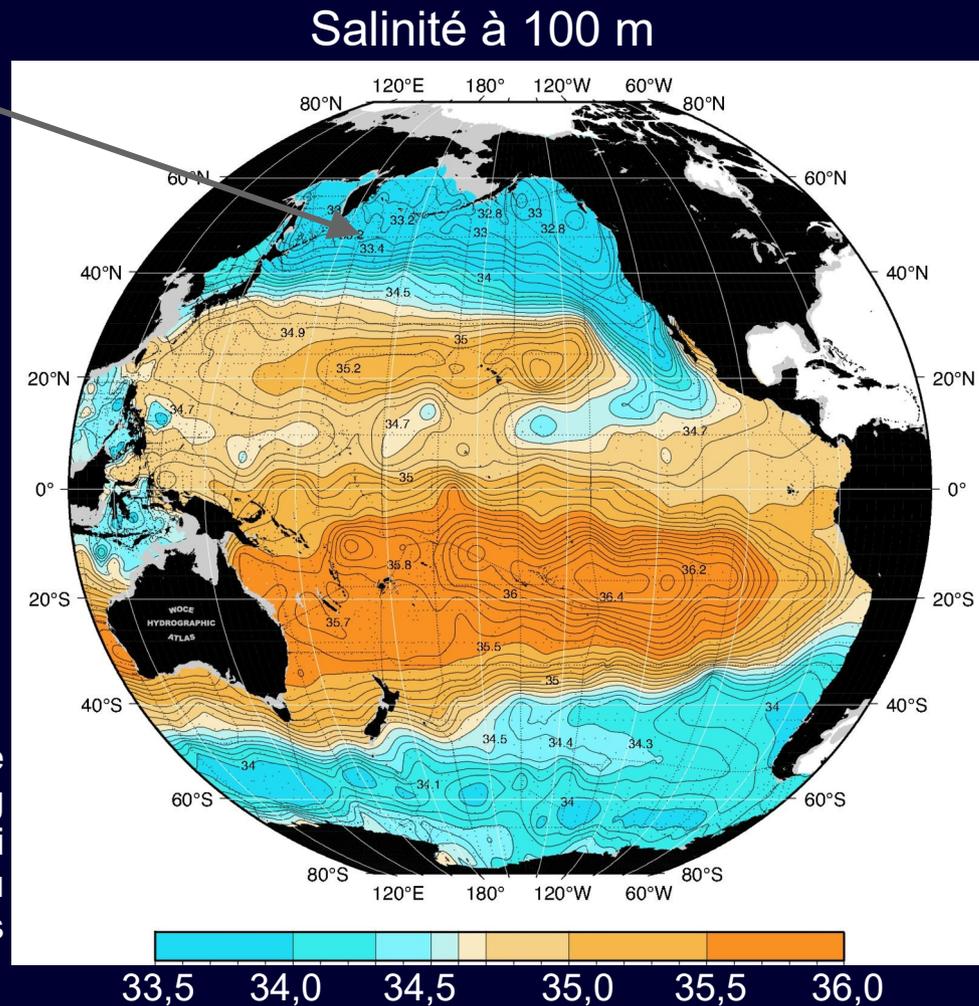
Océan Pacifique, salinité

Zone froide et dessalée

Pourquoi n'y a-t-il pas de formation d'eau profonde dans le Pacifique Nord ?

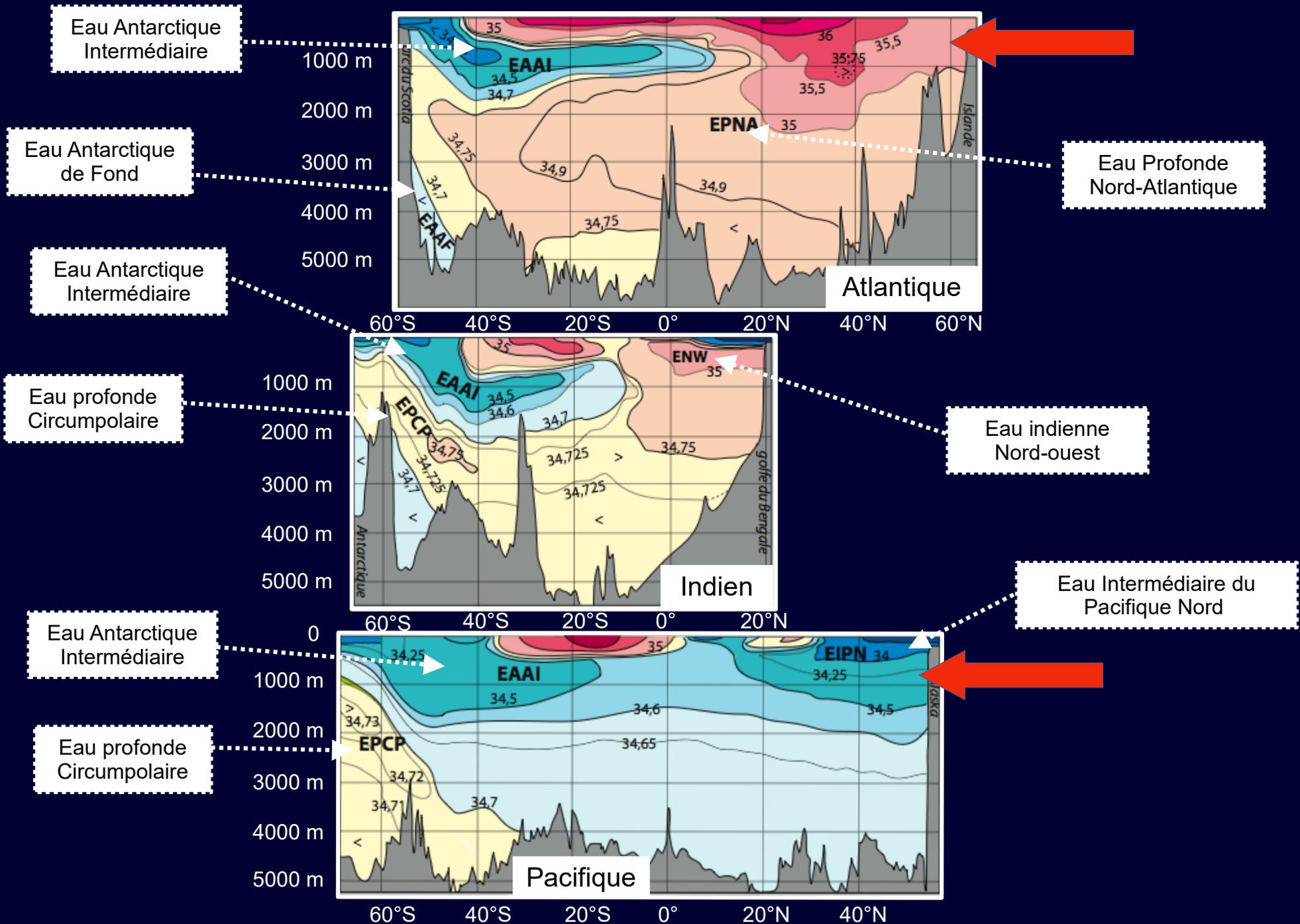
- Les eaux du Kurushio sont peu salées car il a pour origine une région où les précipitations sont supérieures à l'évaporation.
- Le Pacifique Nord : peu d'évaporation et précipitations importantes.

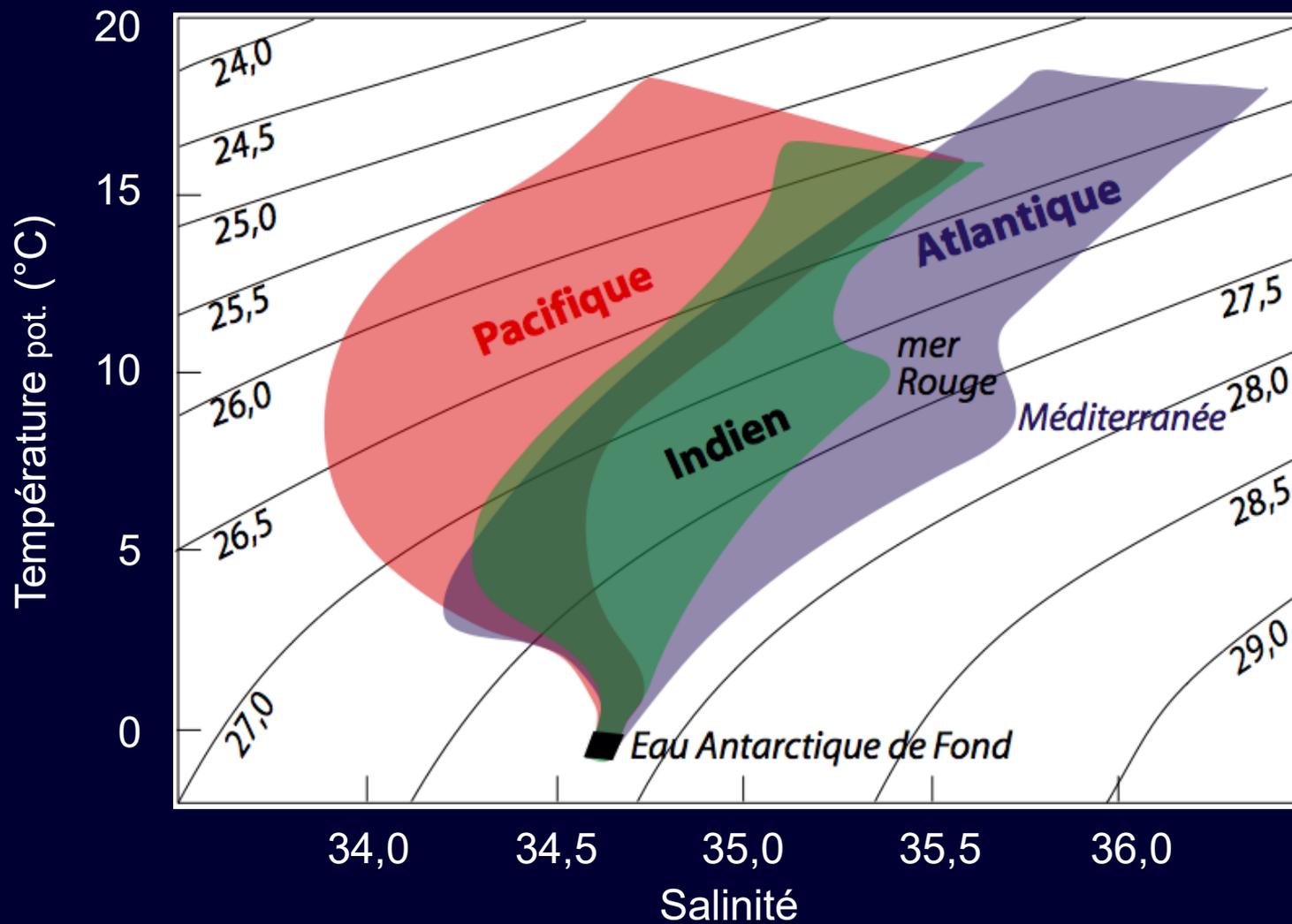
Ainsi, malgré la formation de glace de mer dans le détroit de Béring en hiver, les conditions qui permettent la plongée d'eau profonde ne sont pas toutes réunies dans le Pacifique Nord.



Comparaison des trois océans : Atlantique, Indien, Pacifique

Sections des salinités pour les océans Atlantique, Indien et Pacifique

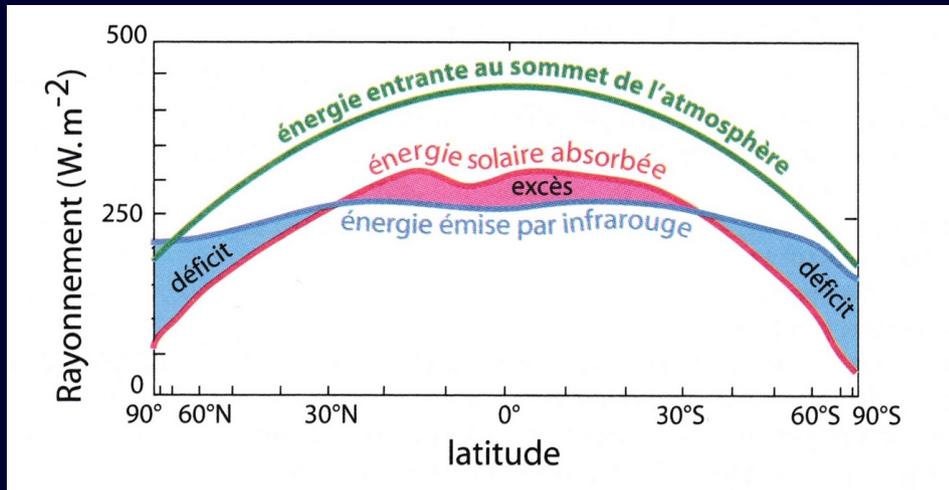




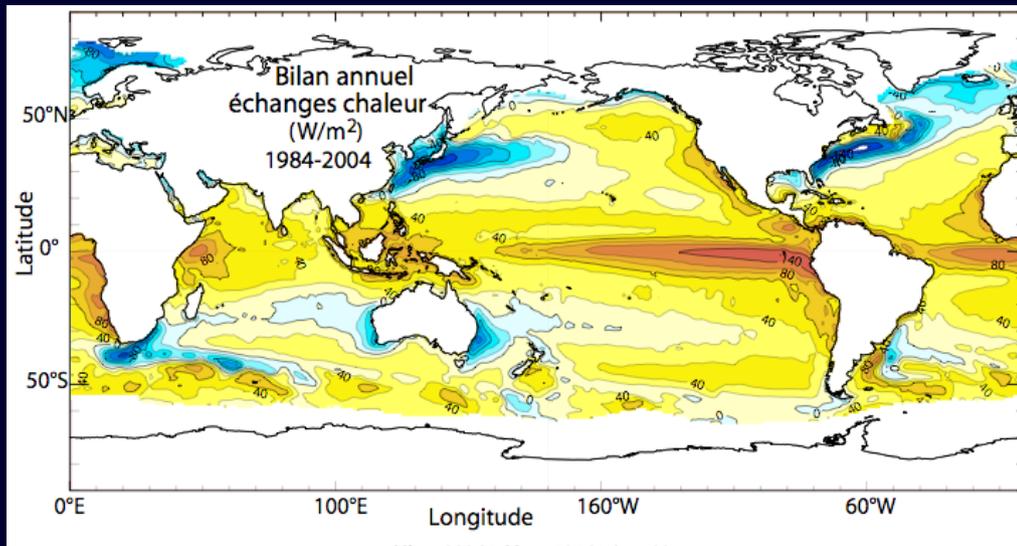
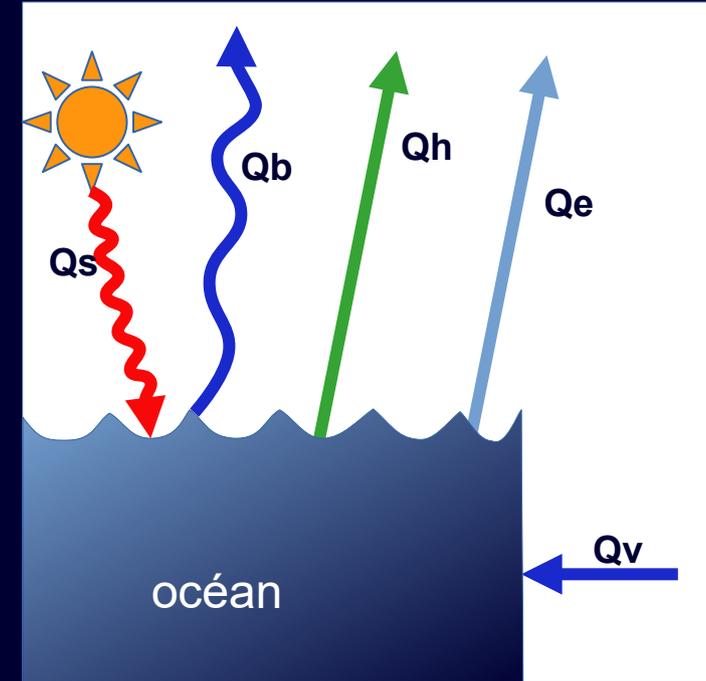
Enveloppes des caractéristiques T-S des océans sous la couche de surface chaude

Flux de chaleurs : Interaction océan/atmosphère

Bilan annuel des échanges de chaleur Océan/Atmosphère



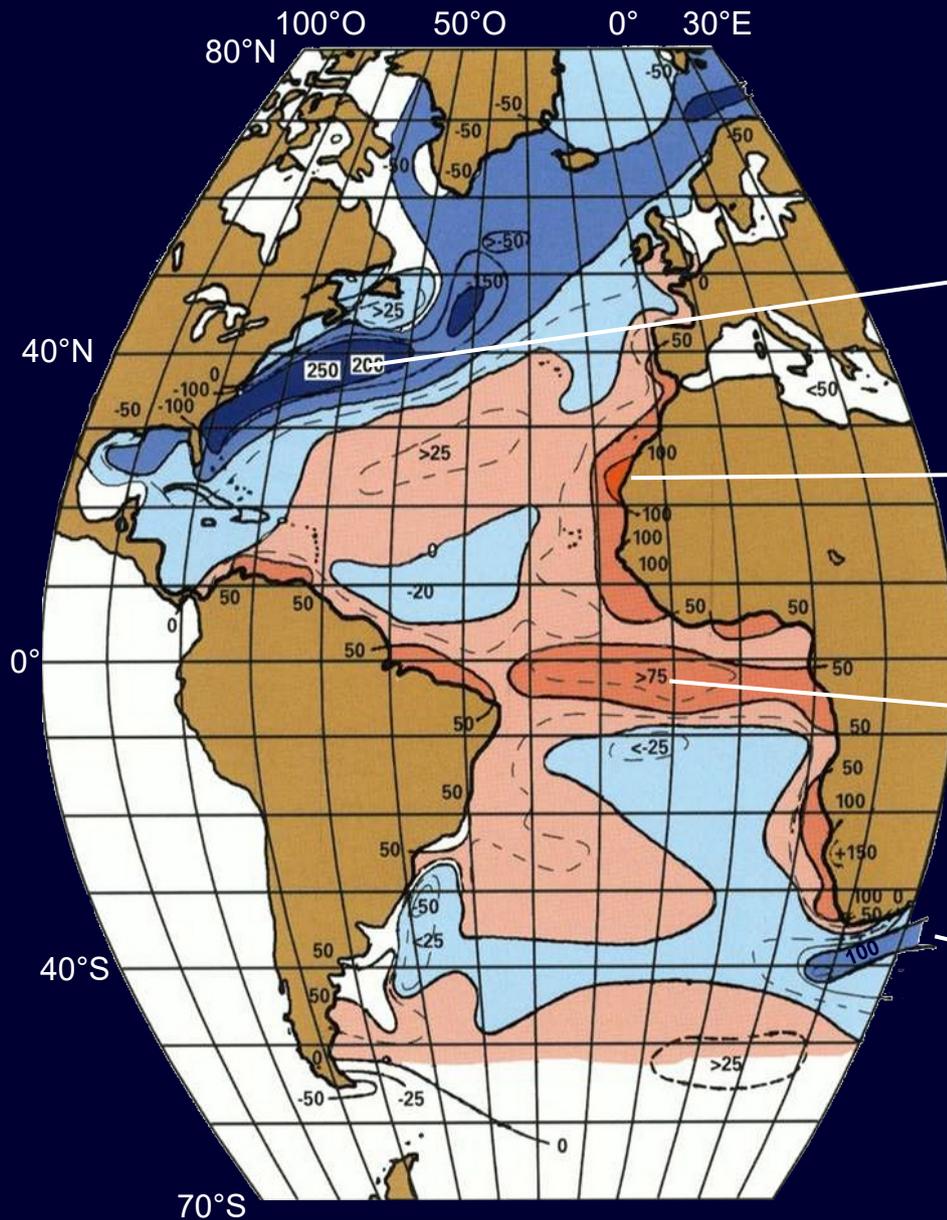
Distribution en fonction de la latitude de l'énergie solaire incidente, solaire absorbée et réémise sous forme d'infrarouge.



Échanges de chaleurs (en $W m^{-2}$) entre océan et atmosphère

Flux de chaleur	Moy. W/m^2	Variations W/m^2
Qs : Flux par rayonnement solaire	+150	80 à 200
Qb : Flux radiatif de grande longueur d'onde	-50	Faibles
Qh : Flux par conduction et convection (Chaleur sensible)	-10	0 à -40
Qe : Flux par évaporation / condensation (Chaleur latente)	-90	-50 à -160
Qv : flux par transport d'eau	0	-100 à +200

Bilan de l'échange énergétique de l'océan Atlantique.



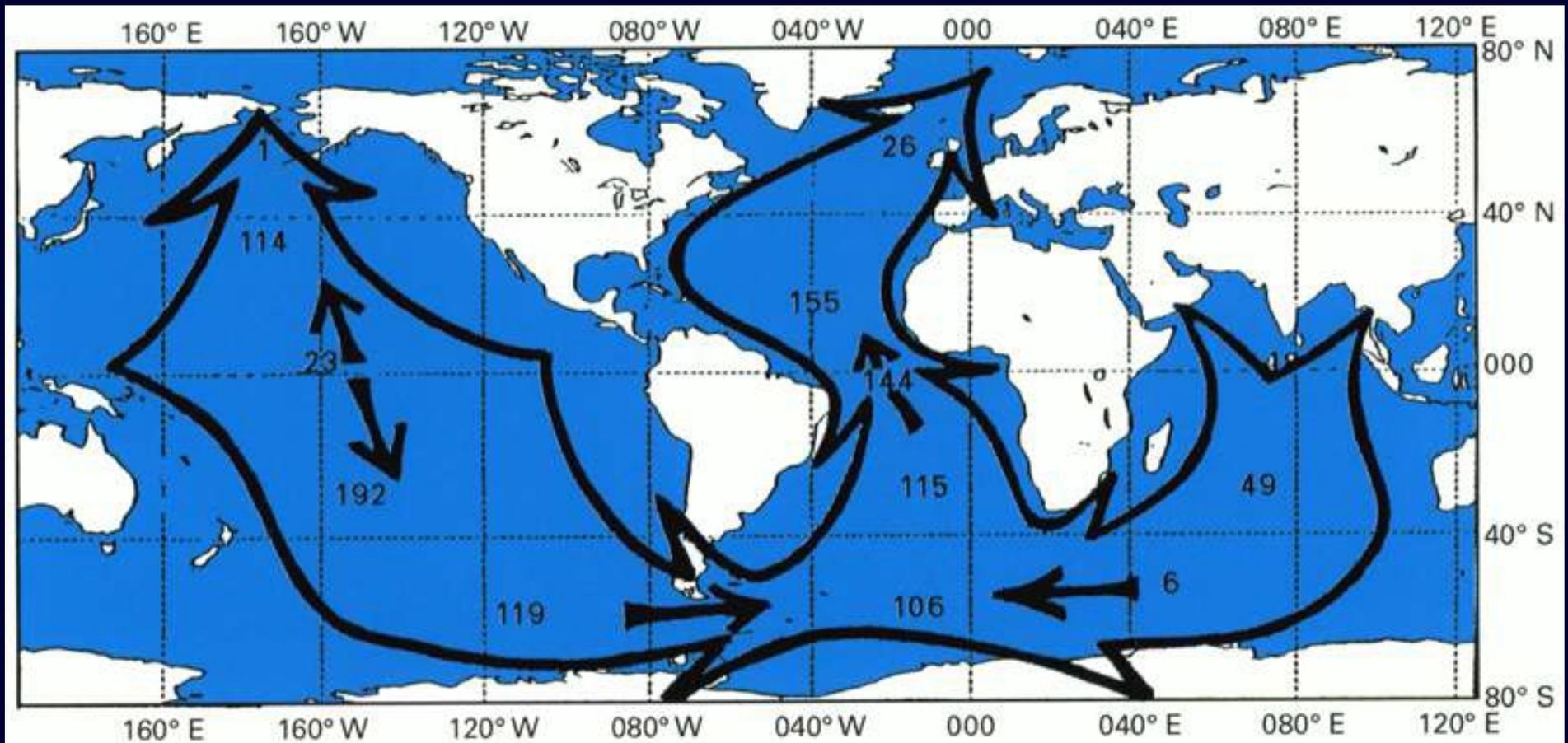
Déficit associé au Gulf Stream de 250 W/m^2 vers 40° N quand le courant chaud pénètre dans une région où l'air est sec et froid : perte de « chaleur latente » par intense évaporation.

Gain pour l'océan associé à une zone de remontée d'eau froide.

Gain pour l'océan d'environ 75 W/m^2 dans la région équatoriale.

Déficit associé au courant chaud des Aiguilles

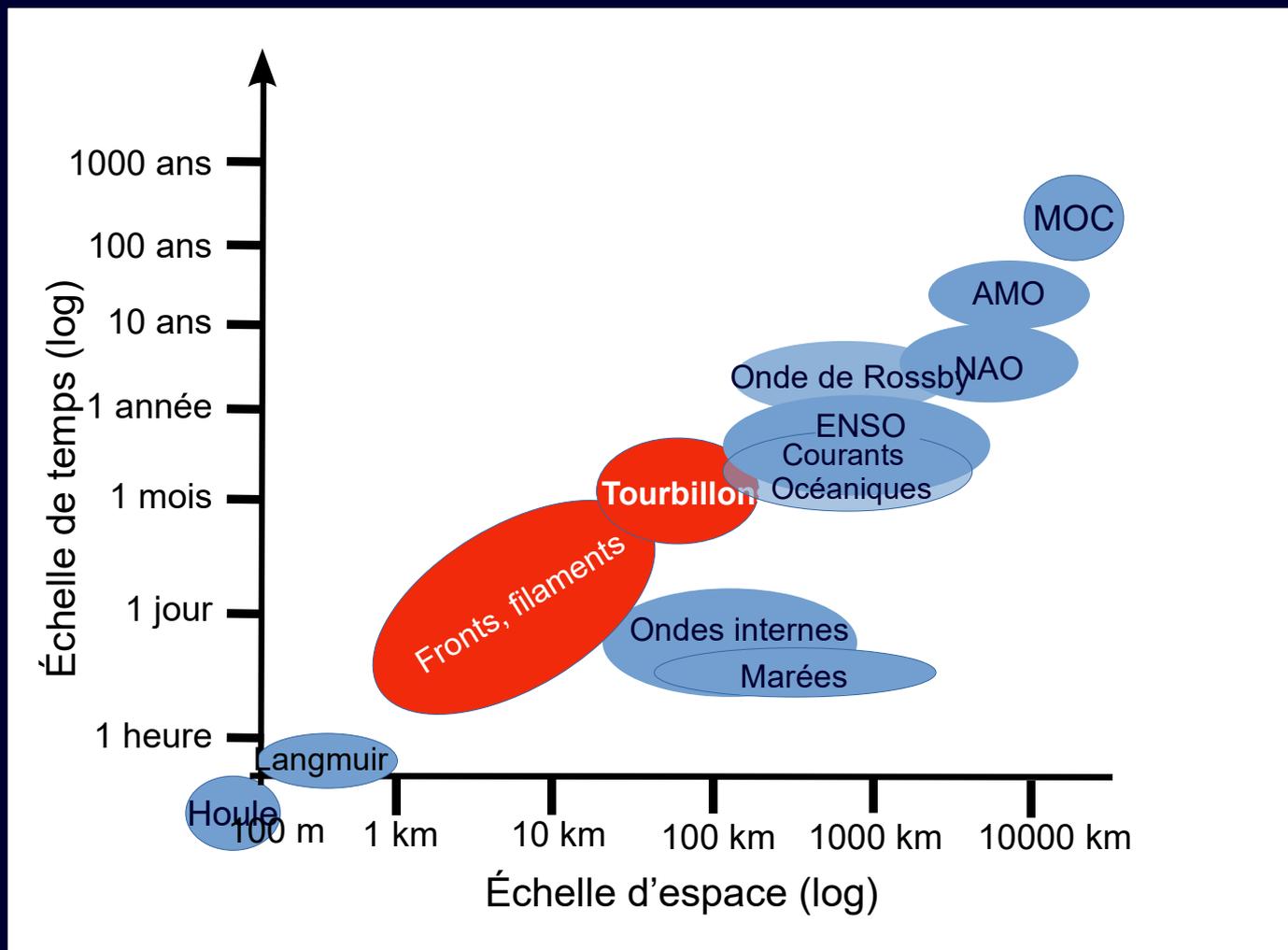
Transport thermique océanique mondial



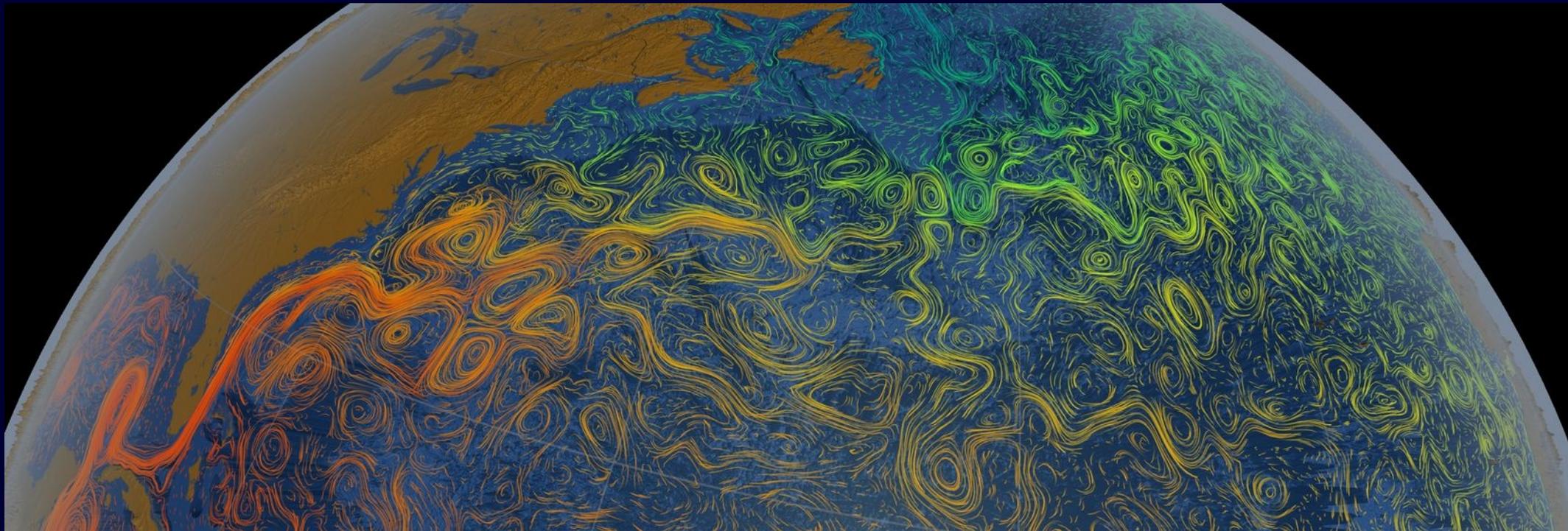
Le transport thermique océanique mondial. Schéma adapté d'une étude de STOMMEL en 1980. Les chiffres indiquent le transport thermique en 10^{13} watts, soit 0,01 petawatt. On remarque que l'Atlantique est alimenté en chaleur par les deux autres océans et cette chaleur se concentre dans l'Atlantique nord.

Changeons d'échelles dans la dynamique de l'océan

Échelles de temps et d'espace dans la dynamique de l'océan

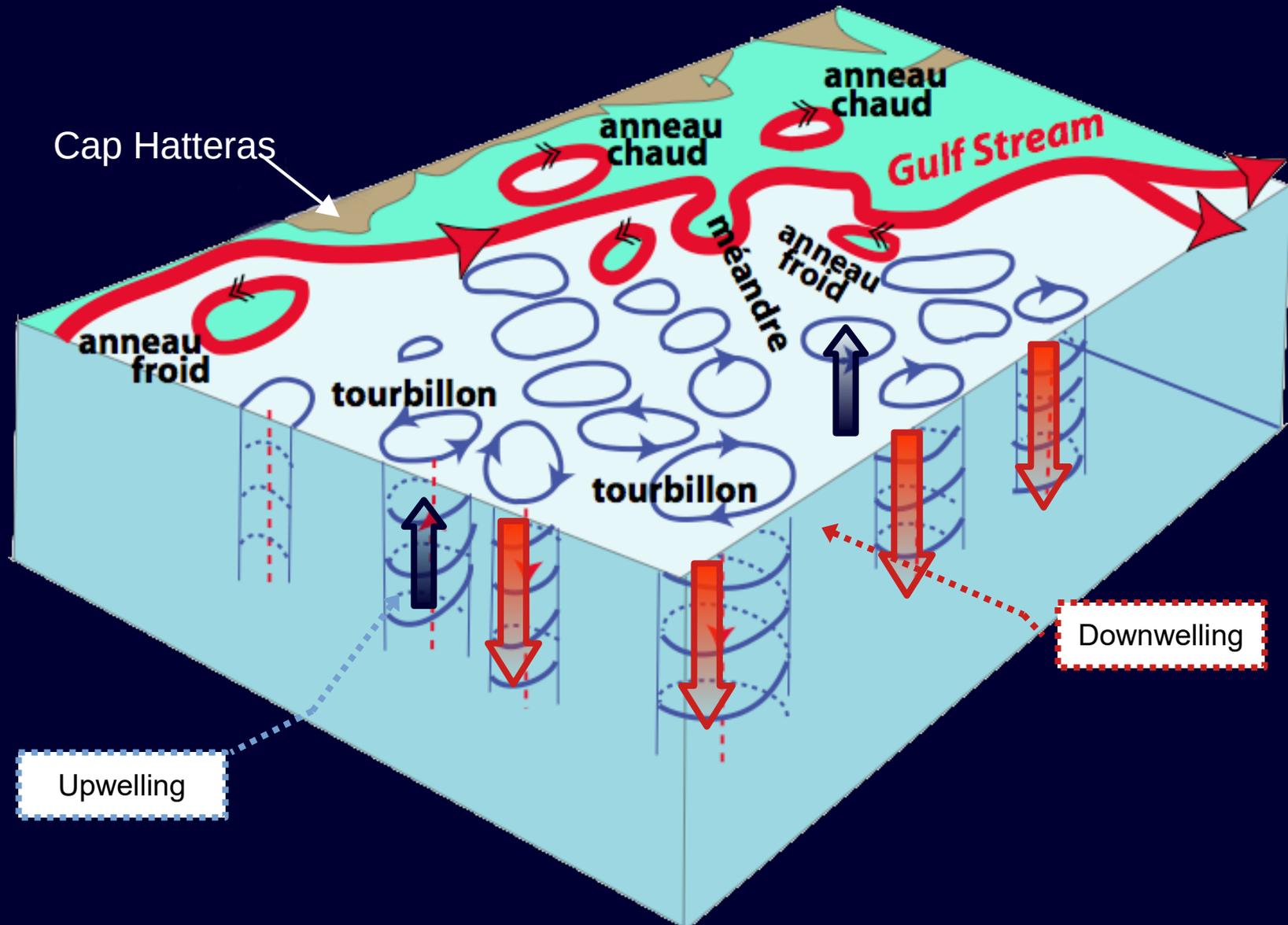


Circulation à mésoéchelle



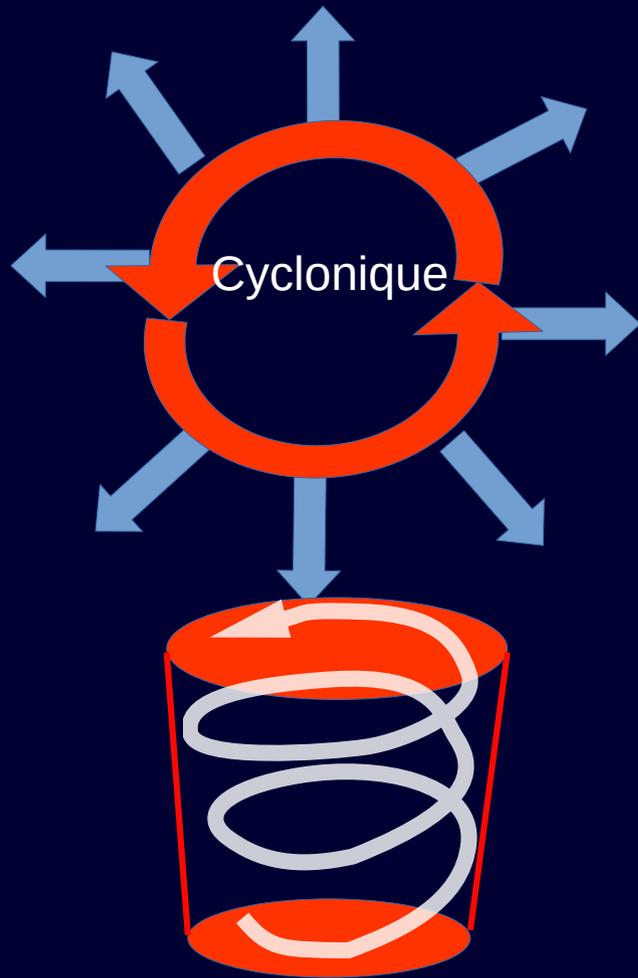
<https://svs.gsfc.nasa.gov/3913>

Méandres, anneaux et tourbillons du Gulf Stream

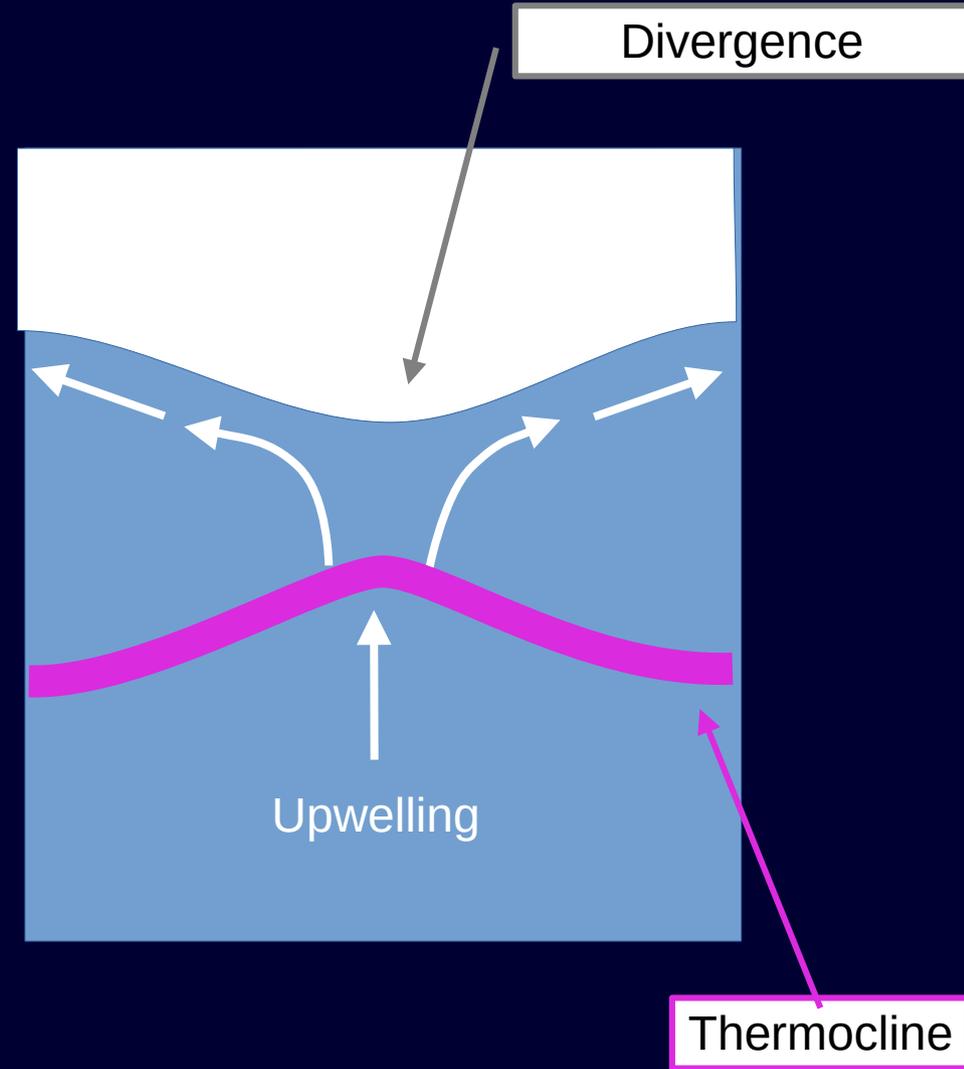


*Upwelling : remontée d'eau. Downwelling : plongée d'eau.

Tourbillon cyclonique dans l'hémisphère nord

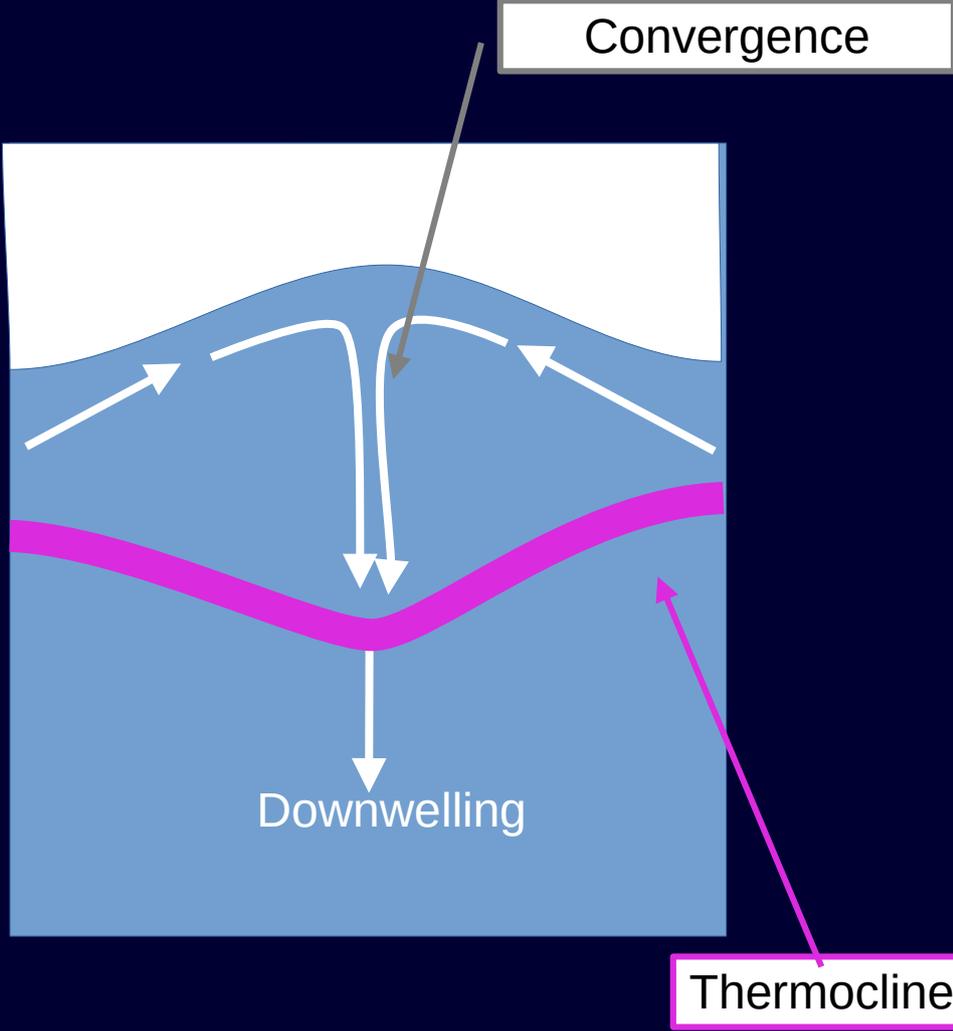
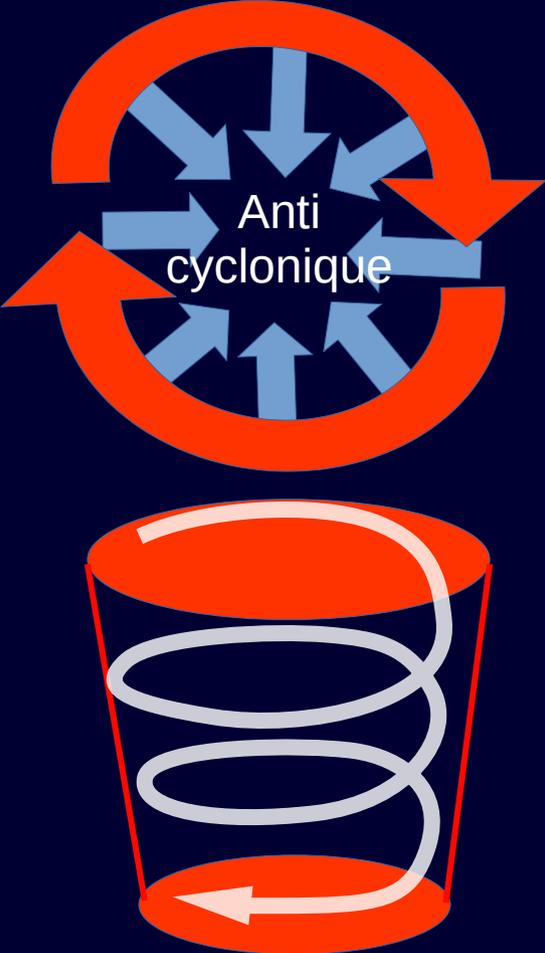


Tourbillon cyclonique

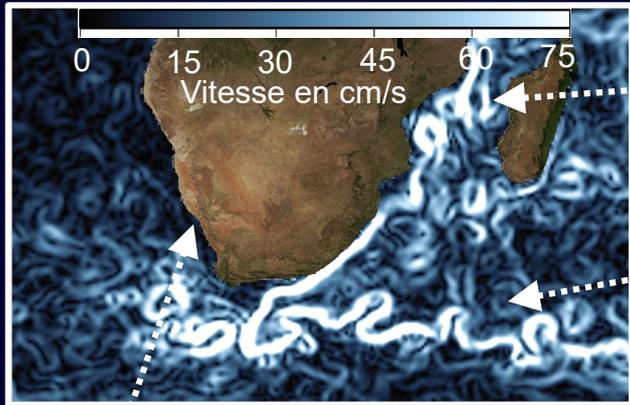


Tourbillon anticyclonique dans l'hémisphère nord

Tourbillon anticyclonique



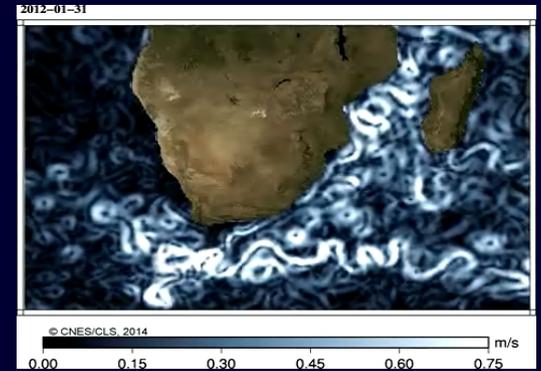
Le courant des Aiguilles : une zone d'activité mésoéchelle intense



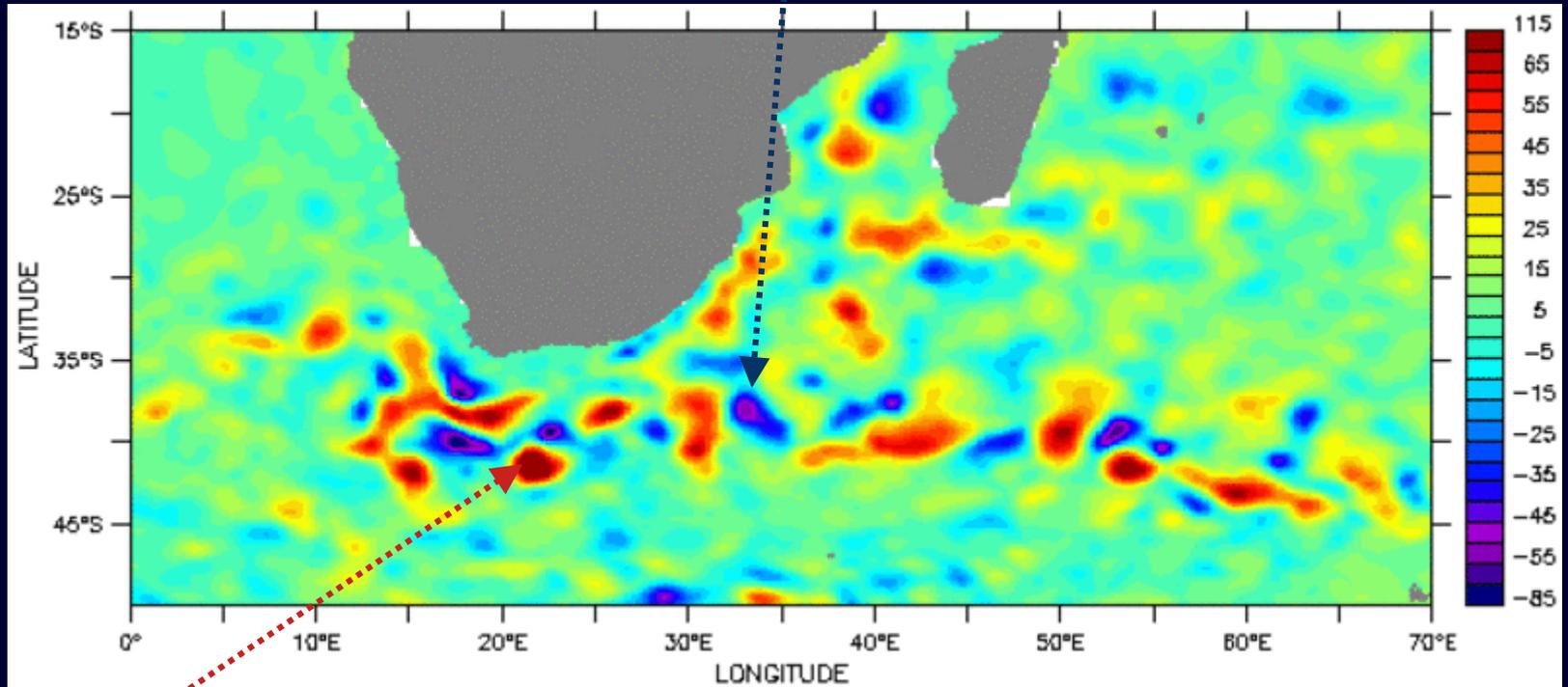
Courant des Aiguilles

Courant de retour des Aiguilles

Tourbillon cyclonique



Courant du Benguela

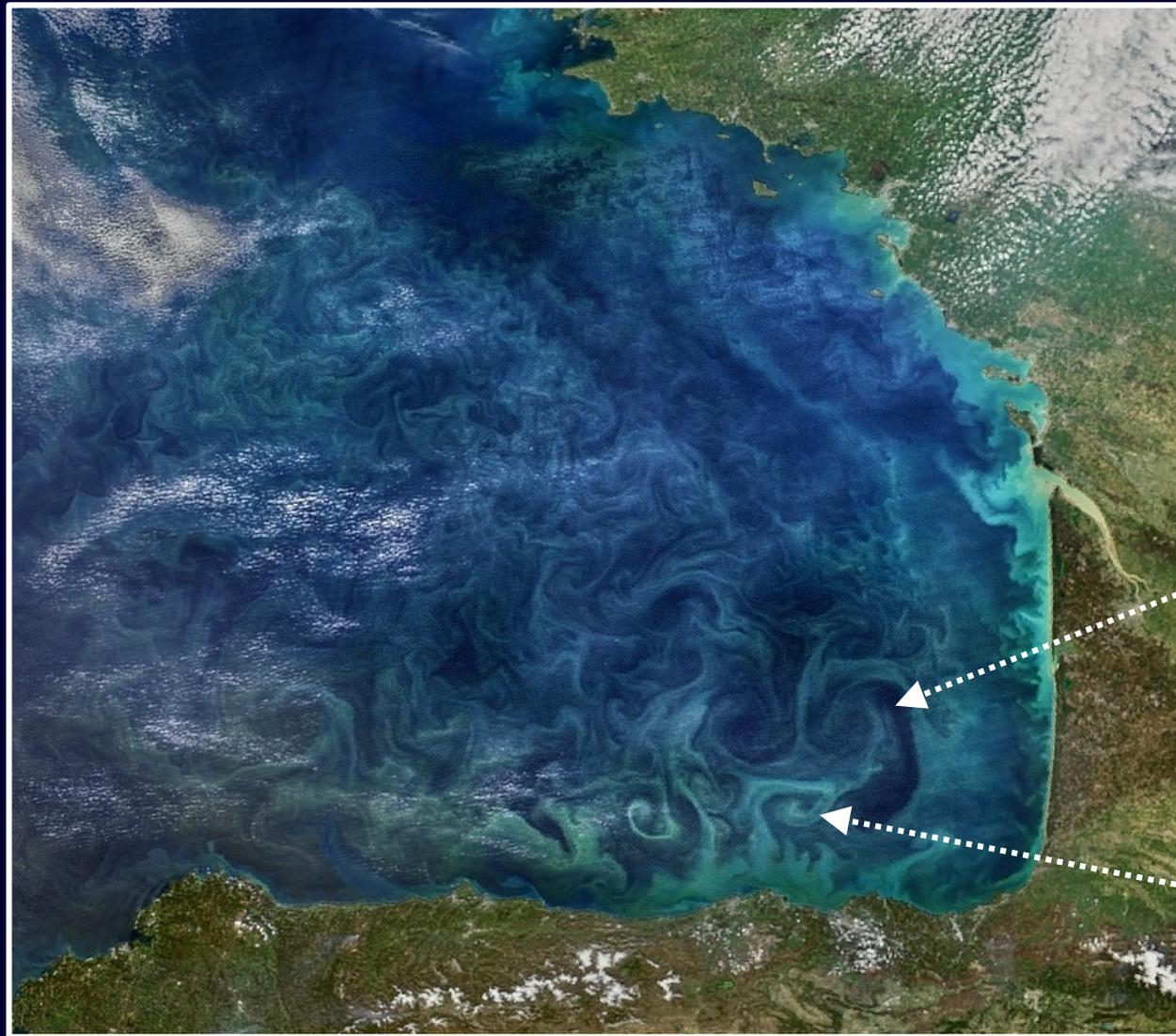


SLA (cm)

Tourbillon anticyclonique

Anomalies de hauteurs de mer (SLA) le 28 février 2007

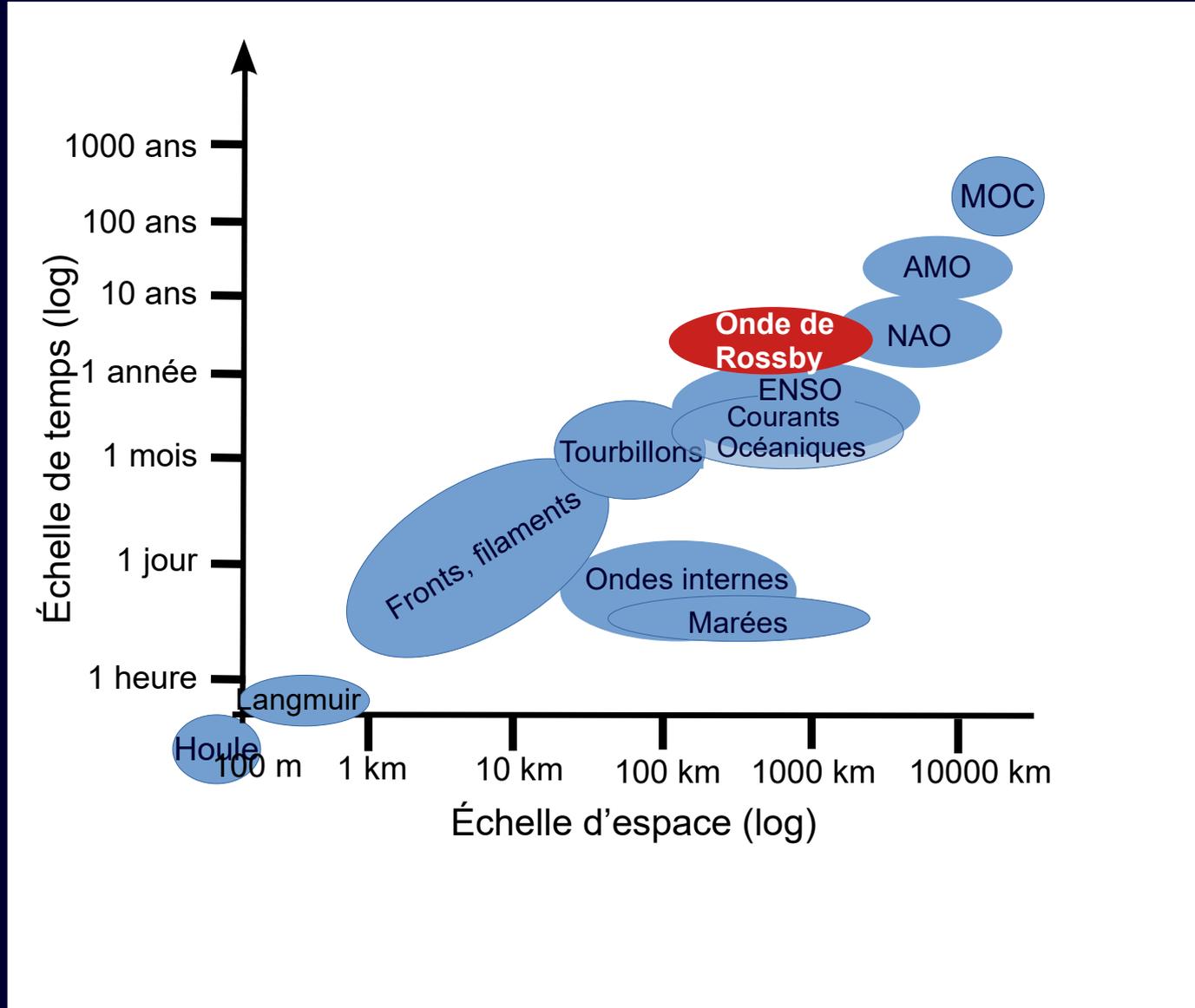
Golfe de Gascogne, mésoéchelle



Tourbillon
cyclonique

Tourbillon
anticyclonique

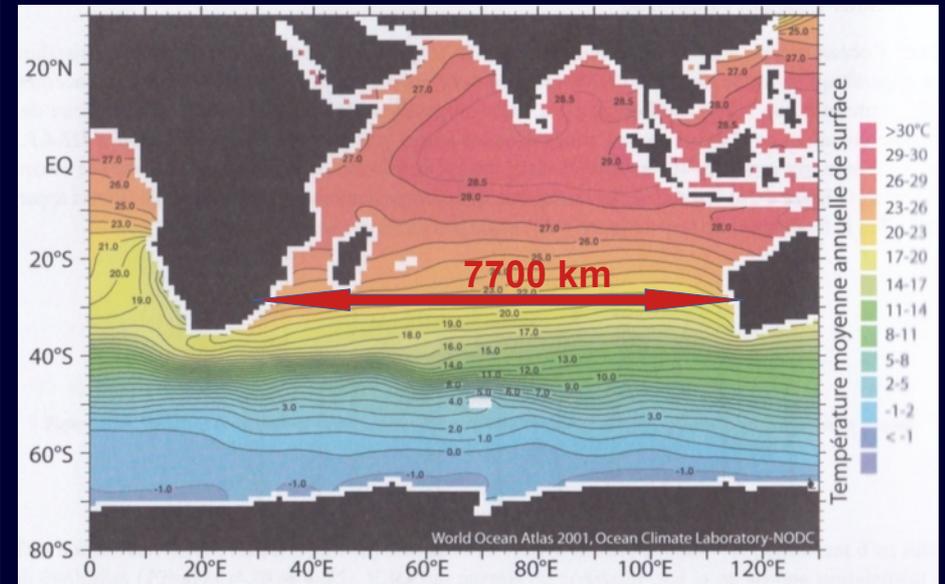
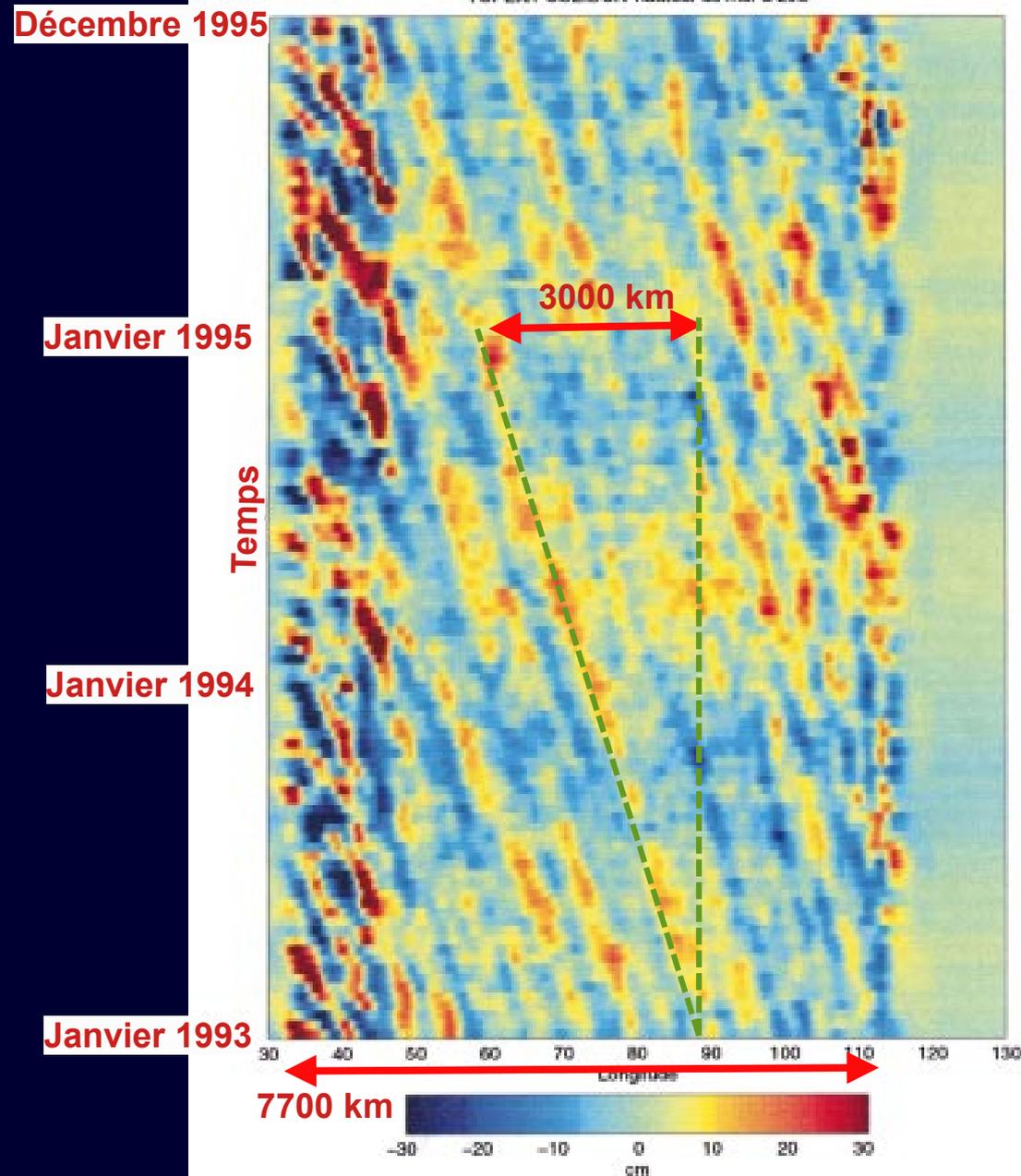
Échelles de temps et d'espace dans la dynamique de l'océan



Ondes de Rossby et ondes de Kelvin

Des ondes "planétaires" traversent les océans, d'est en ouest pour les ondes de Rossby, ou inversement pour les ondes de Kelvin.

Ondes de Rossby



Ondes de Rossby.

Évolution temporelle du niveau de la mer à une latitude de 29°S dans l'océan Indien. L'abscisse est en degré de longitude, des côtes d'Afrique (30°E) aux côtes de l'Australie (130°E), l'ordonnée en années, de décembre 1992 à décembre 1995.

Les couleurs marquent l'élévation du niveau de la mer.

Ondes de Rossby et ondes de Kelvin

Elles interagissent avec la circulation océanique générale, transportent chaleur et énergie d'une rive à l'autre et provoquent ainsi une intensification de courants comme le Gulf Stream ou le Kuroshio.

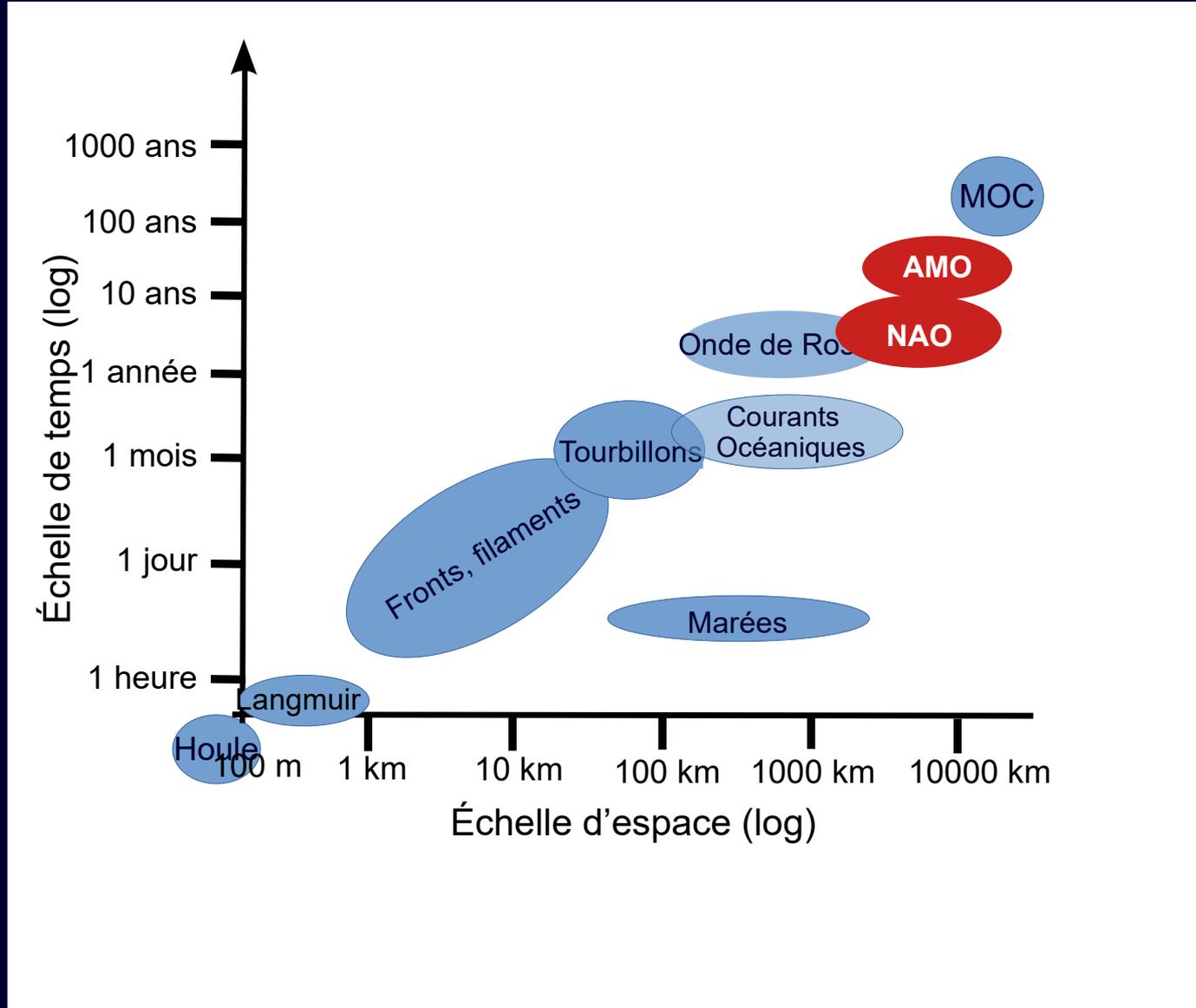
Les ondes de Rossby se propagent vers l'ouest avec des périodes longues et à des vitesses qui dépendent de la latitude ; rapides à l'équateur et plus lentes lorsque l'on s'en éloigne.

Elles constituent la principale réponse de l'océan à des perturbations de grande échelle (supérieure à 400-500km). Ces perturbations sont créées par des variations de vent, par des ondes se propageant le long des frontières Est (ondes de Kelvin) ou encore par des tourbillons.

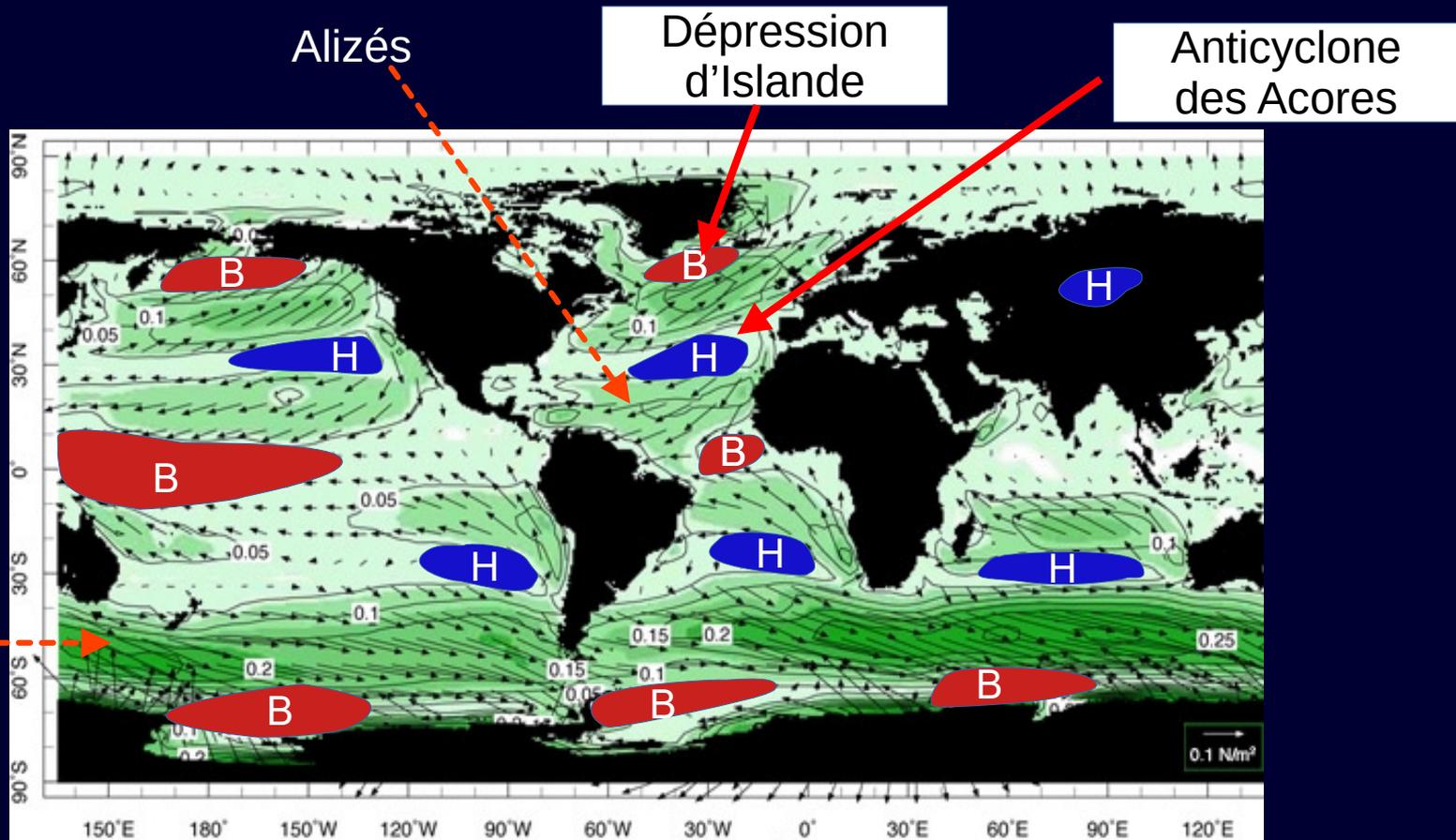
Les ondes de Kelvin se propagent principalement vers l'est en restant piégées le long d'une frontière, qui peut être une côte ou l'équateur, qui leur sert de guide. À l'équateur, elles jouent un rôle très important dans le développement du phénomène El Niño.

Interactions Océan/atmosphère à longues échelles des temps

NAO : Oscillation Nord-Atlantique

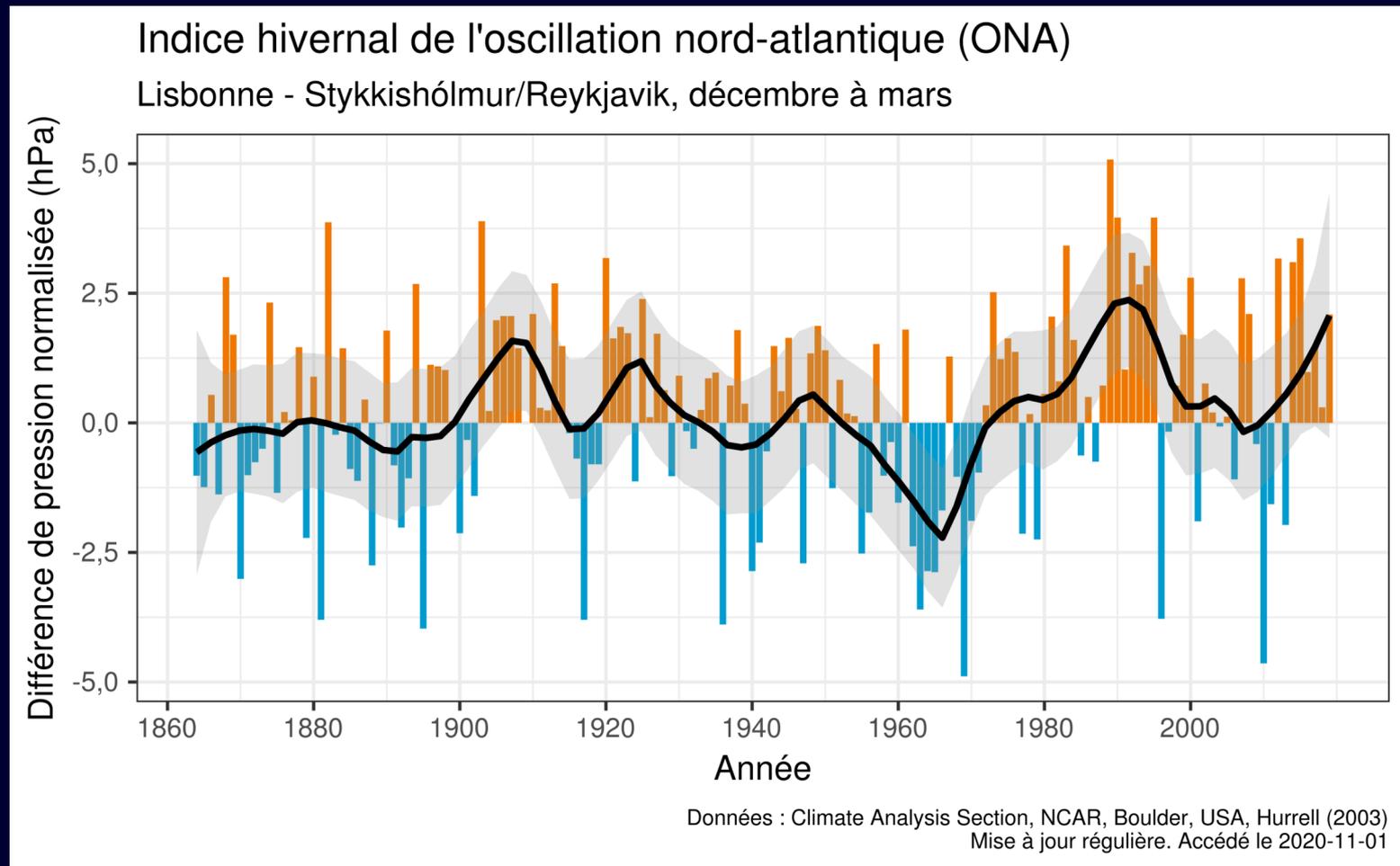


Pression atmosphérique et vents de surface sur l'océan



NAO : Oscillation Nord-Atlantique

L'oscillation nord-atlantique (plus connue sous le sigle anglais NAO) désigne un phénomène touchant le système climatique du nord de l'océan Atlantique.

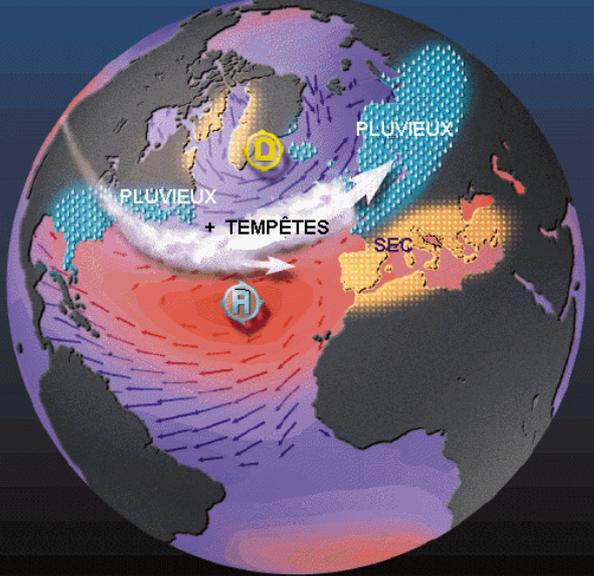


L'indice « NAO » se mesure comme la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande (anomalie de pression au niveau de la mer normalisée (décembre à mars) à Lisbonne, Portugal et Stykkisholmur, Islande..

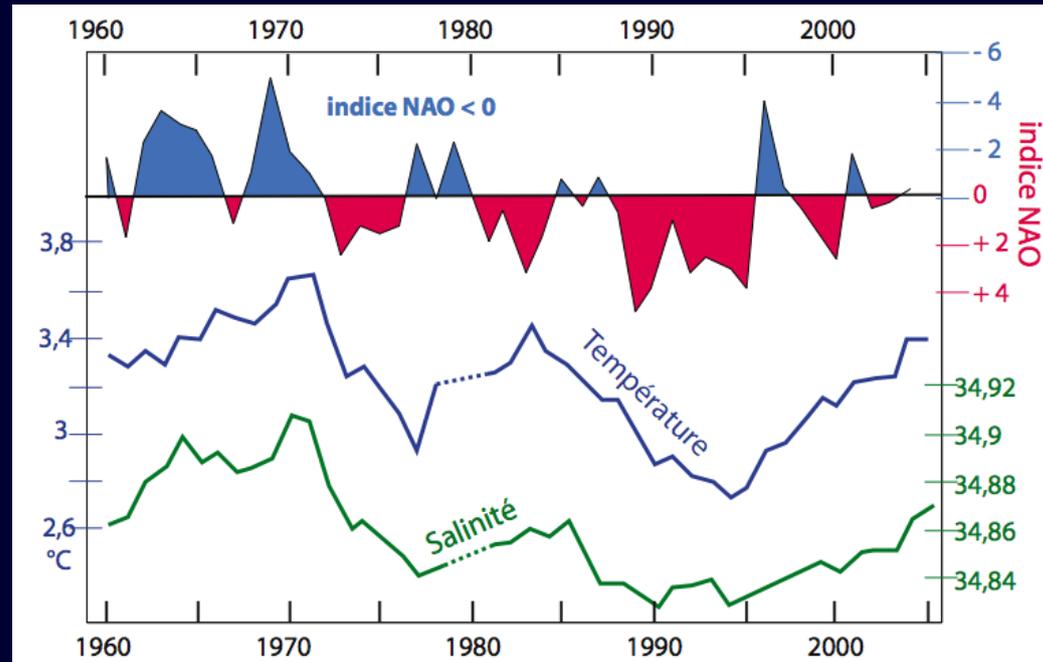
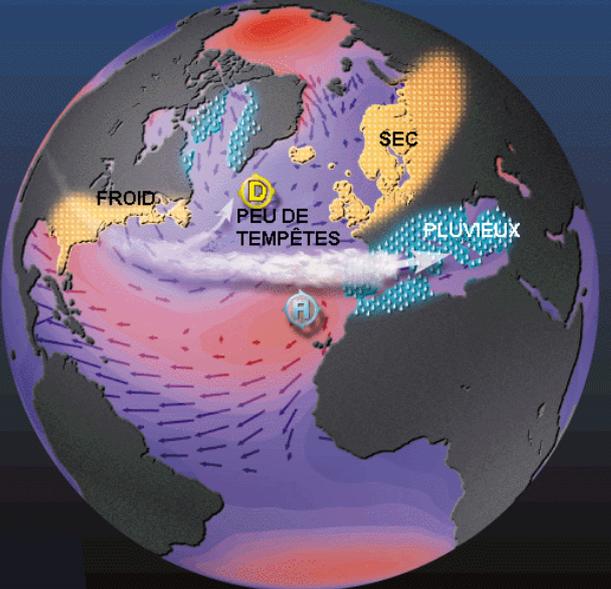
L'indice NAO : la différence entre l'anomalie de pression au niveau de la mer

NAO : Oscillation Nord-Atlantique

OSCILLATION NORD-ATLANTIQUE POSITIVE

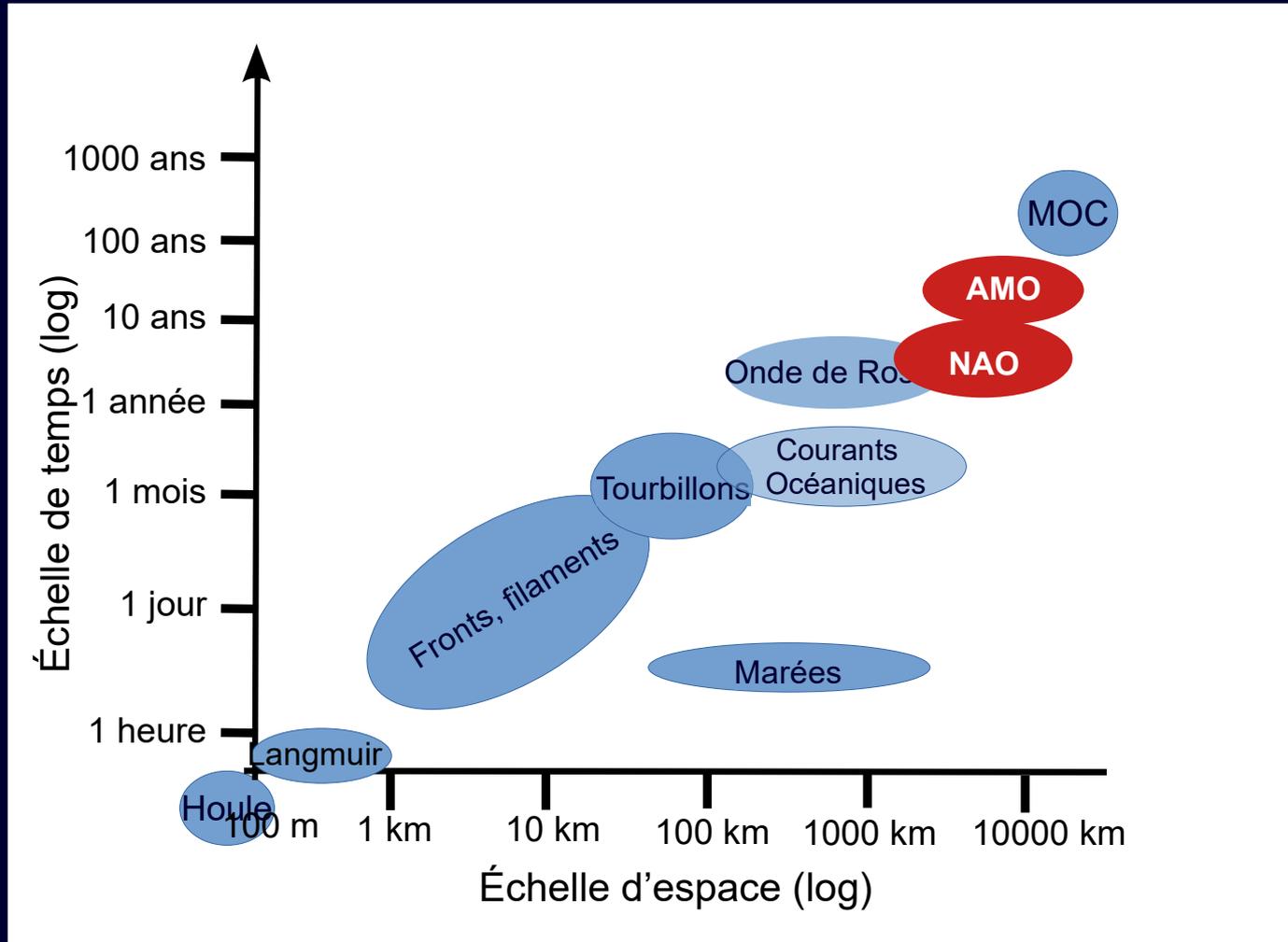


NÉGATIVE

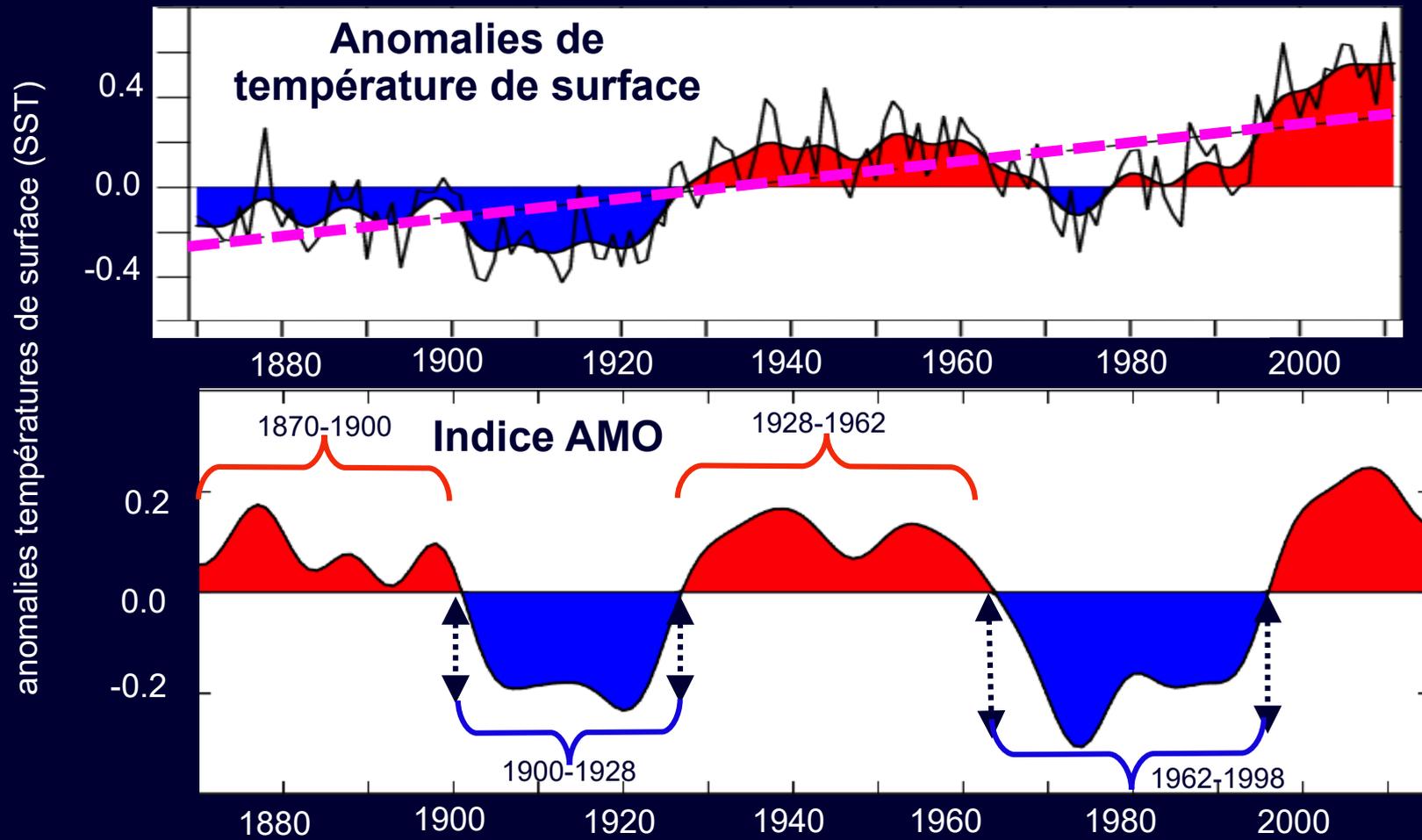


Comparaison entre l'indice NAO et la température et la salinité de l'eau de mer du Labrador de 1960 - 2005

AMO : Oscillation atlantique multidécennale

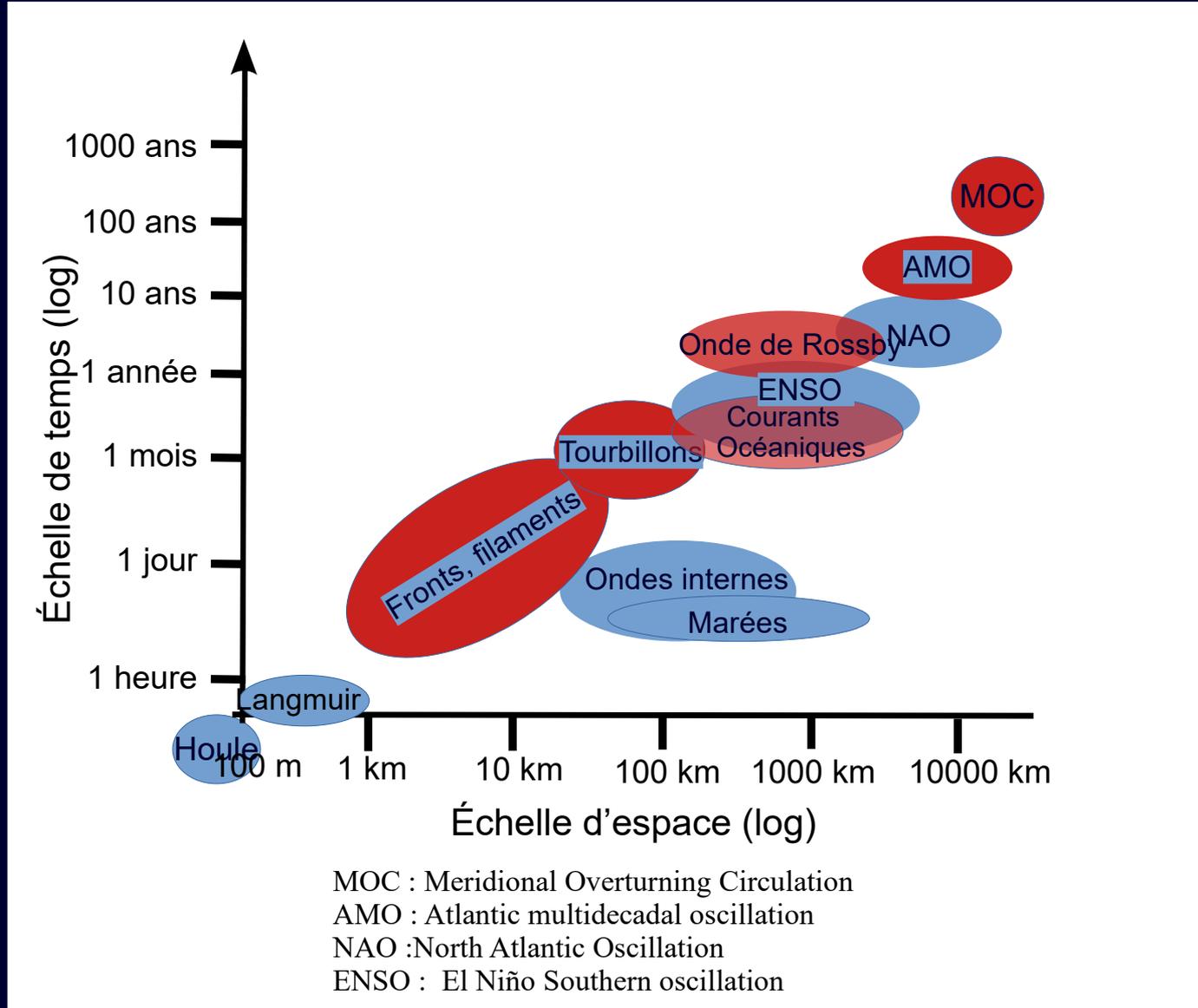


Oscillation atlantique multidécennale



L'oscillation multidécennale atlantique (AMO) : variabilité naturelle se produisant dans l'océan Atlantique Nord avec une période estimée de 60 à 80 ans. (les anomalies moyennes des températures de surface de la mer (SST) dans le bassin de l'Atlantique Nord).

Échelles de temps et d'espace dans la dynamique de l'océan



«Autovariation » du système planétaire

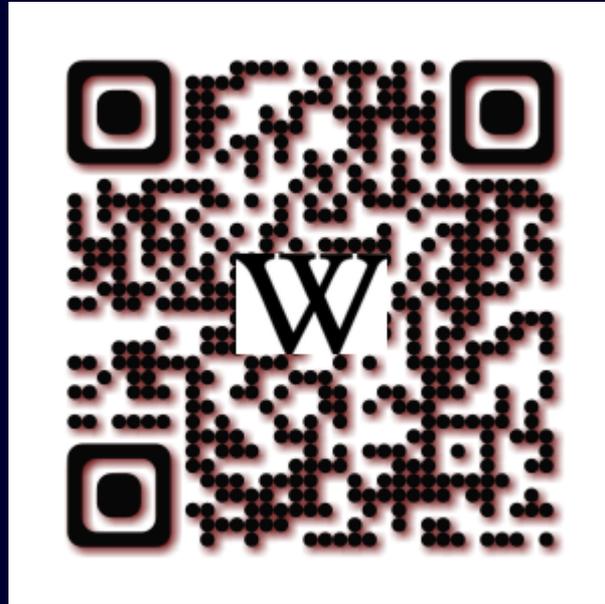
Le **système planétaire peut évoluer de manière autonome**, même sans forçages extérieurs, car la disparité des éléments qui le constituent, ainsi que leurs différents temps de réponse, font qu'un état d'équilibre statistique moyen unique ne sera jamais atteint.

C'est ce qui est appelé l'« autovariation » du système planétaire.

Ce concept rejoint celui du « **chaos** » en physique, découvert dans les années 1970 par un météorologue américain, Edward Lorenz, qui stipule que certains **systèmes physiques interactifs non linéaires**, même simples, **ne convergent pas vers un état d'équilibre unique** mais admettent plusieurs états (appelés « **attracteurs** ») vers lesquels le système physique peut converger.

Il est impossible de prédire, à partir d'une situation donnée (définie par des «conditions initiales» même très précises), vers lequel de ces états le système va évoluer. Le système est susceptible d'osciller naturellement entre plusieurs états possibles. C'est ce qui explique **l'autovariation du système climatique**, composé de plusieurs milieux qui peuvent interagir de façon très complexe.

Fin



http://jpglabat.fr/Cours_Actuels/

Documents audiovisuels

IPSL. (2018, 29 novembre). Gyres subtropicaux - Gilles Reverdin. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/73775>.

IPSL. (2018, 29 novembre). Upwellings marins - Alban Lazar. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/73787>.

IPSL. (2018, 29 novembre). El niño - Alban Lazar. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/73795>.

IPSL. (2018, 29 novembre). Convection profonde - Formation d'eaux denses - Marie-Noëlle Houssais. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/73763>

Quelques références synthétiques

- Doglioli, A. M. Notes de cours de Introduction à l'Océanographie Physique. (2014). https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli/Doglioli_NotesCours_IntroductionOceanographiePhysique.pdf
- Jørgensen, L. L. & at al. The Second World Ocean Assessment II, Volume 1. (2021).
- Jørgensen, L. L. & at al. The Second World Ocean Assessment II, Volume 2. (2021).
- Le Calvé, O. Propriétés Physiques du Milieu Marin Un cours d'introduction à l'océanographie physique. (2002). <http://lecalve.univ-tln.fr/oceano/polycop/poly.pdf>
- Orsi, A. H. & Whitworth, T. I. Hydrographic atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE). 1: Southern Ocean. (Southampton Oceanography Center, 2005).
- Koltermann, K. P. et al. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Volume 3: Atlantic Ocean. (National Oceanography Center, 2011).
- Koltermann, K. P. & Talley, L. D. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Volume 4: Indian Ocean. (National Oceanography Center, 2013).
- Talley, L. D., Sparrow, M., Chapman, P. & Gould, J. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Volume 2: Pacific Ocean. (National Oceanography Center, 2007).
- Merle, J. Océan et climat. (IRD Éditions, 2006). doi:10.4000/books.irdeditions.25499.
- L'océan à découvert. (CNRS éditions, 2017).
- Fieux, M. L'océan planétaire. (Les Presses de l'ENSTA, 2010).