



# Comprendre la circulation en Atlantique Nord pour comprendre l'évolution du climat

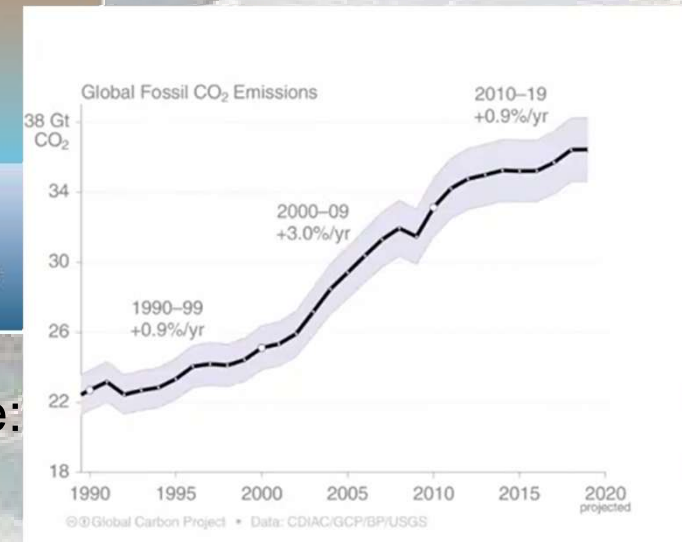
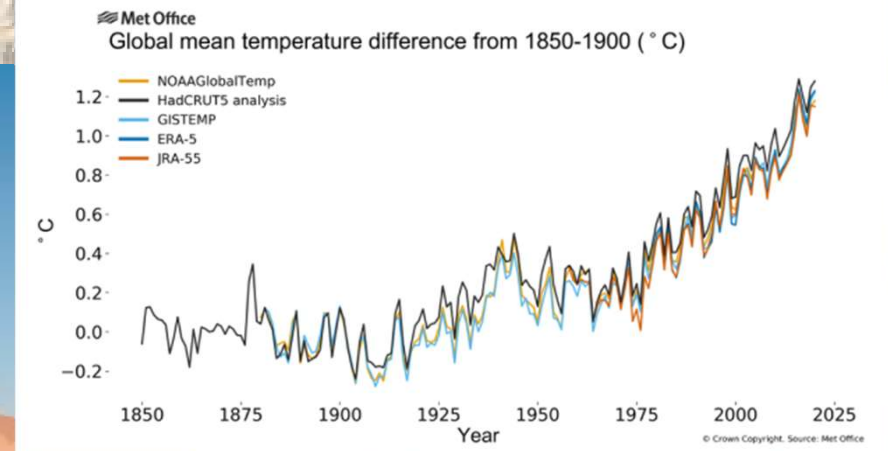
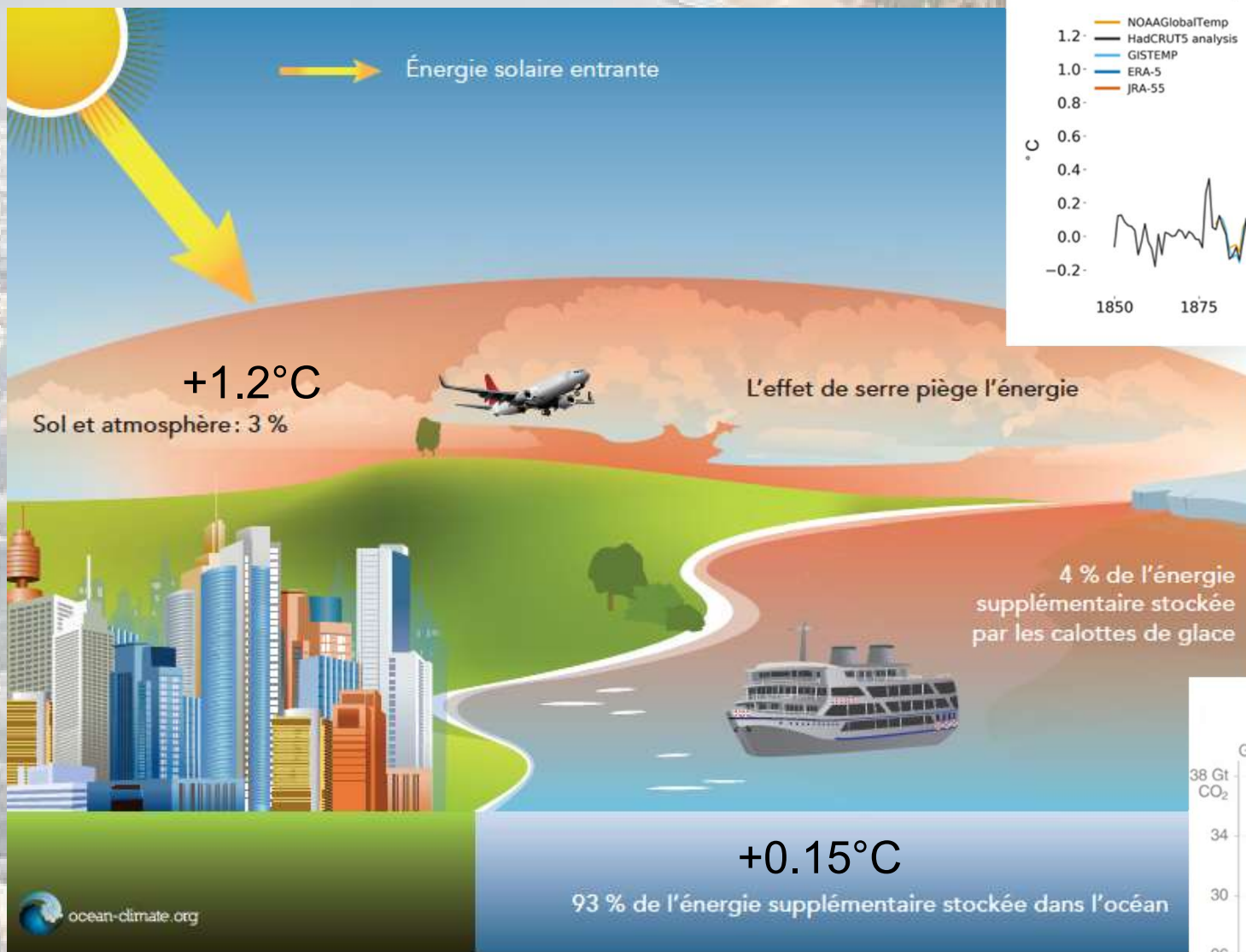
**P. Lherminier, H. Mercier , N. Daniault,  
A. F. Rios, F. F. Perez, M. I. García-Ibáñez,  
A. Falina, F. Gaillard, P. Morin, P. Zunino,  
D. Desbruyères, B. Ferron, T. Huck,  
V. Thierry, Virginie Racapé, Marion Gehlen,  
Laurent Bopp, et l'équipe technique du LOPS**



A large robotic arm, likely from a research vessel, is lowering a complex scientific instrument into a vast field of icebergs. The instrument consists of a cylindrical metal frame with various sensors and equipment attached. The icebergs are numerous and vary in size, floating on a dark blue sea. The background shows a hazy horizon under a pale sky.

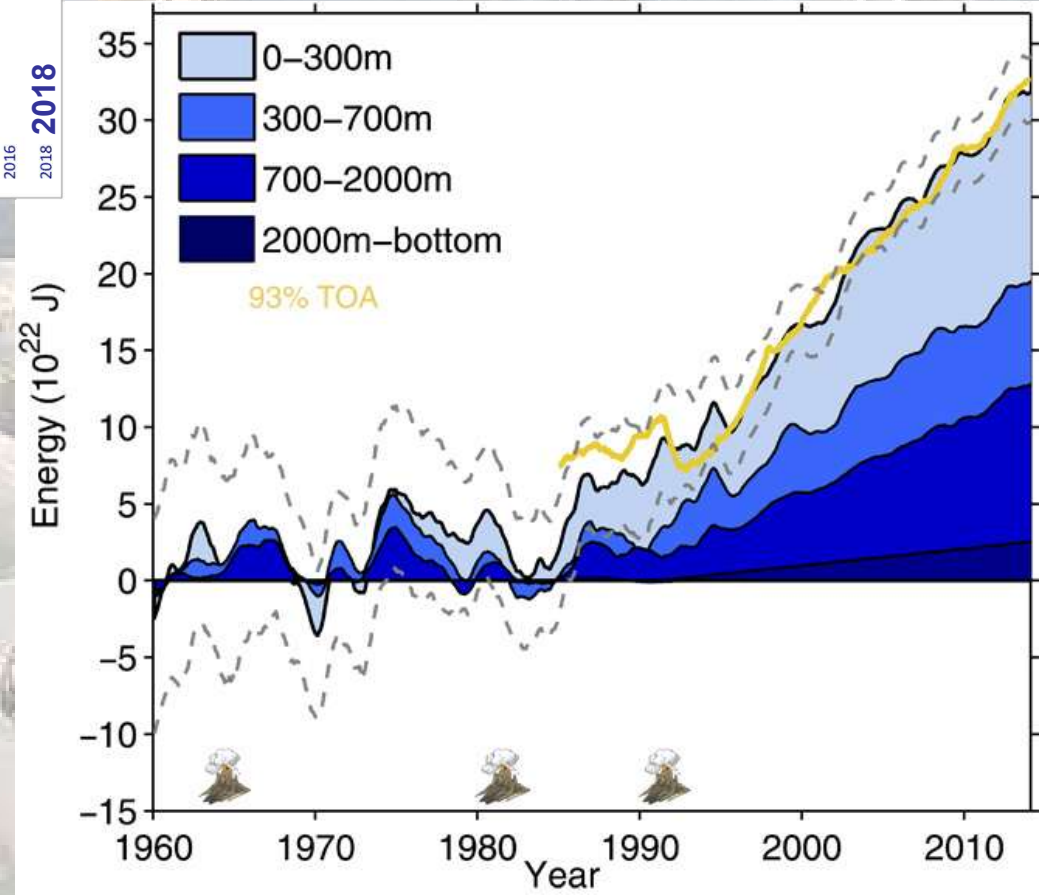
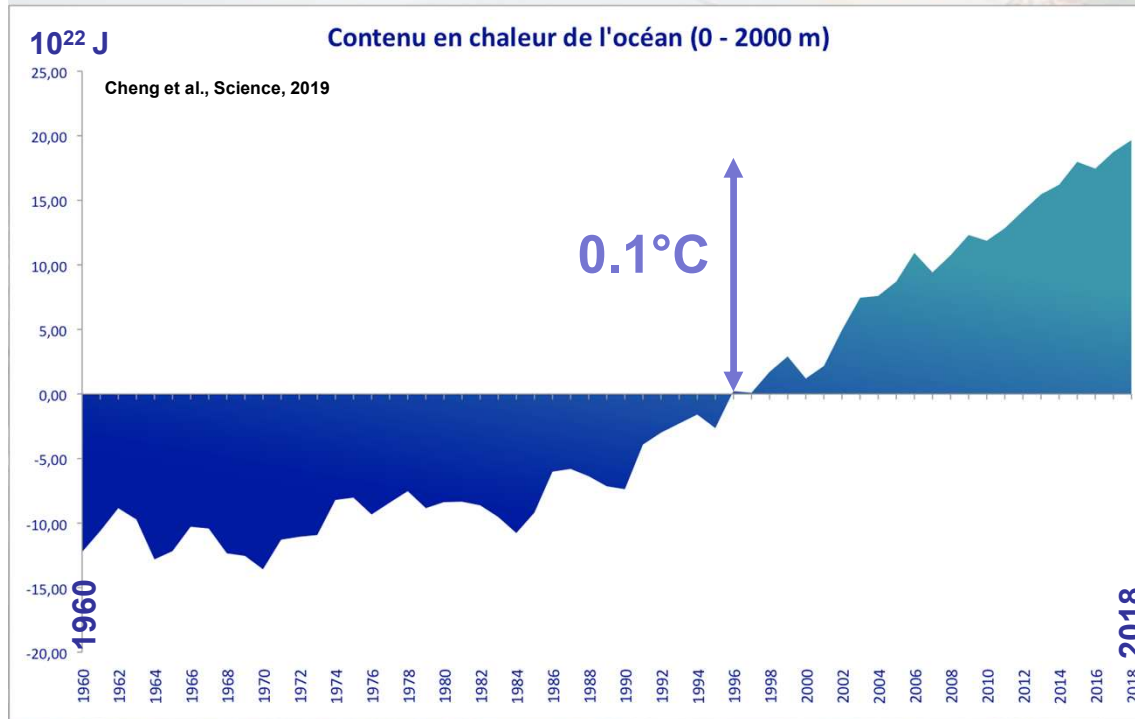
# **LE CONTEXTE CLIMATIQUE**

# L'effet de serre

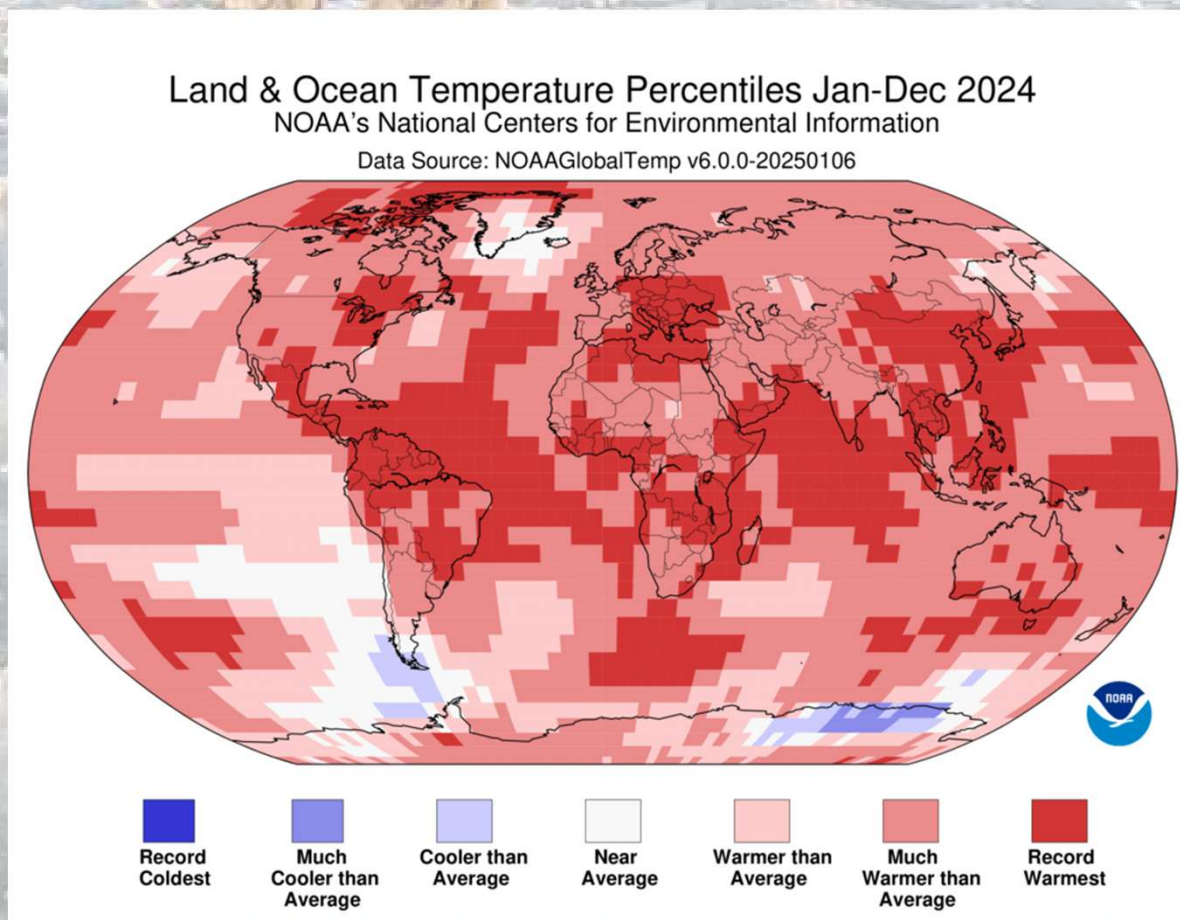
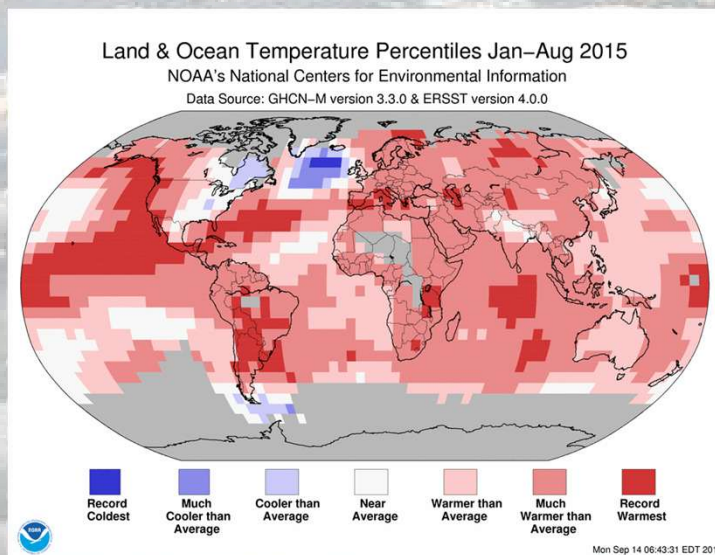


Mieux comprendre l'effet de serre sur la Science Etonnante:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ewc8FBtEKPs>

# Distribution verticale du réchauffement de l'océan



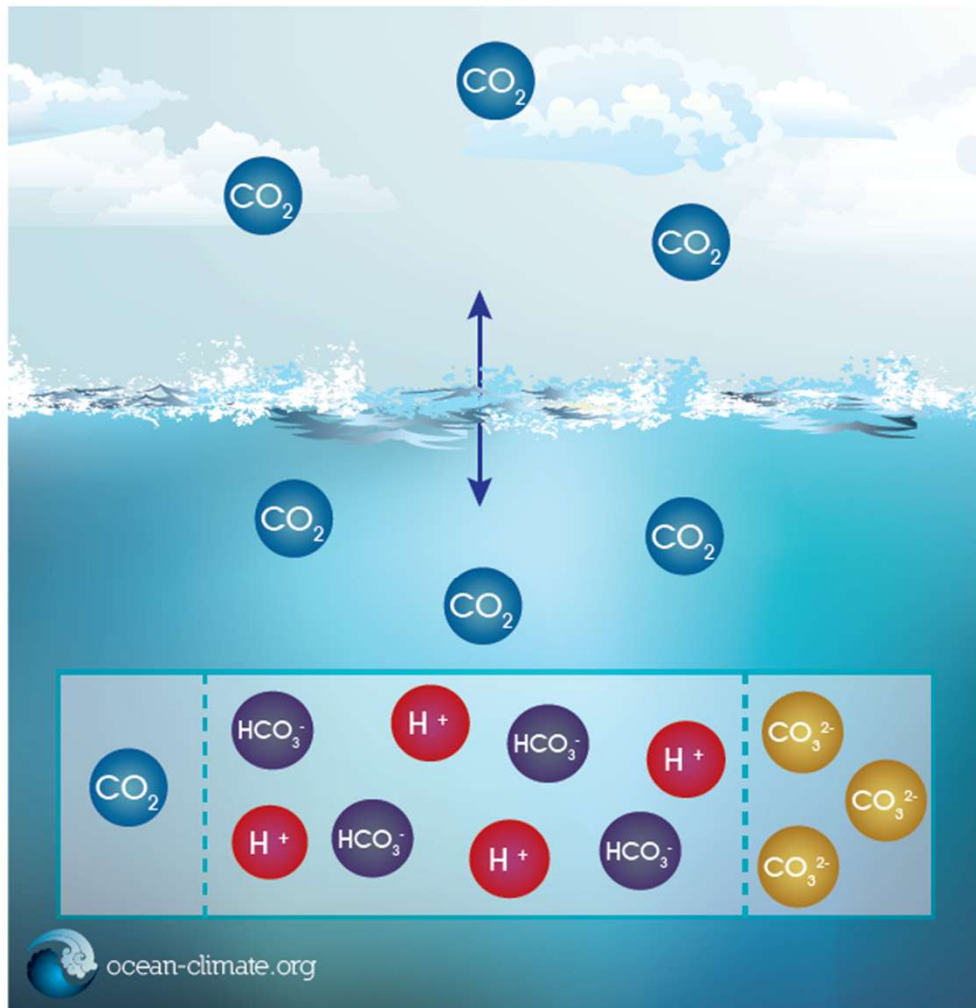
# Distribution spatiale du réchauffement de l'océan



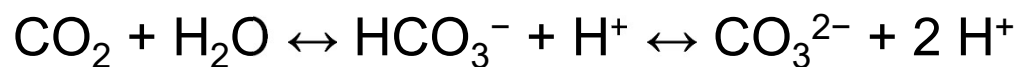
NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2024, published online January 2025, retrieved from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413>. DOI: <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00672>

# L'acidification de l'océan, c'est quoi ?

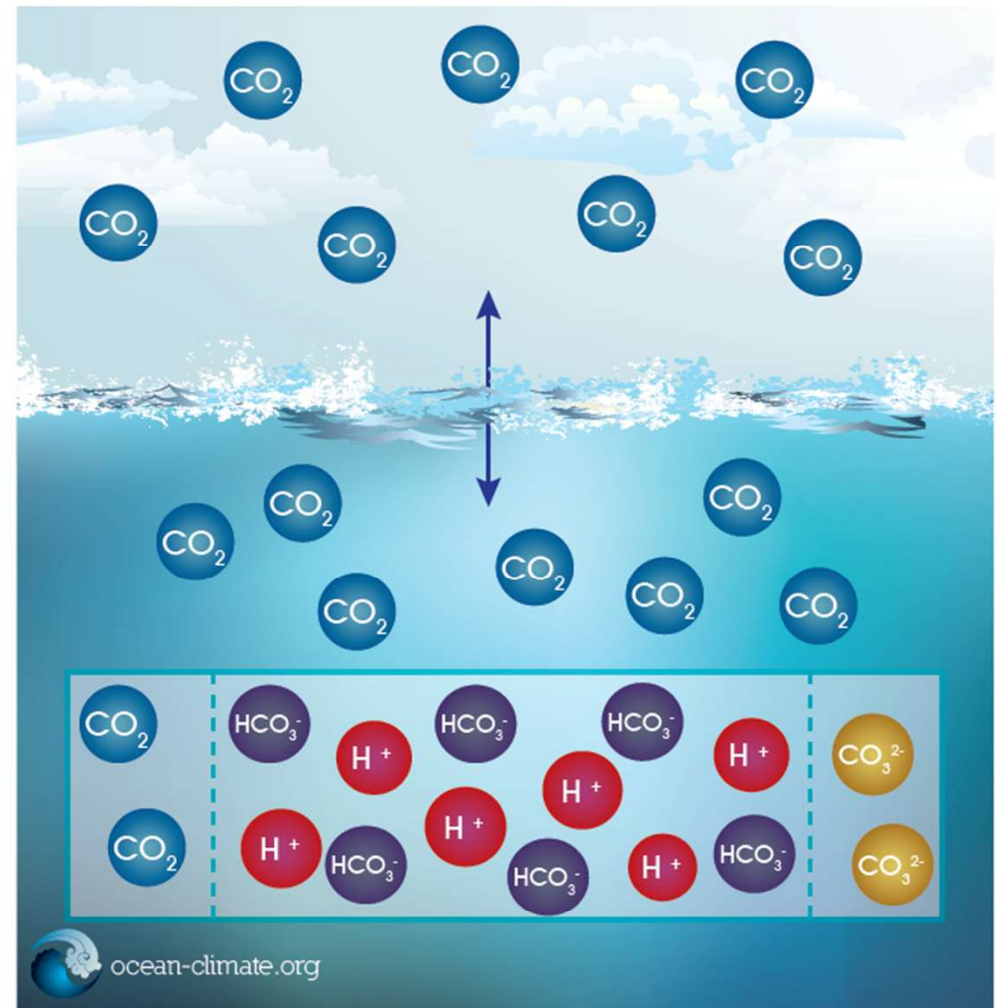
Avant l'ère industrielle (1800)



$\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  sont en proportion stable



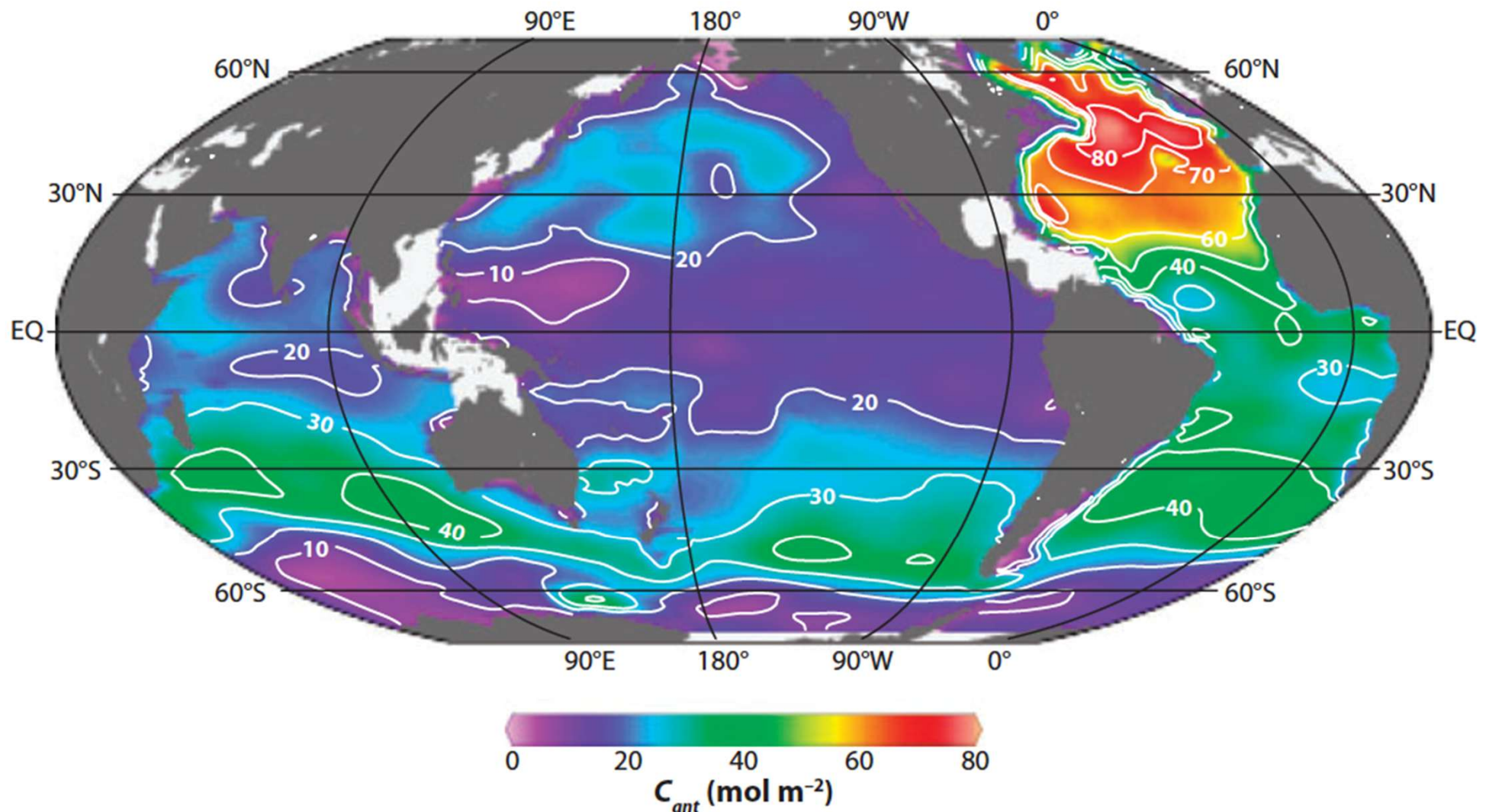
Aujourd'hui



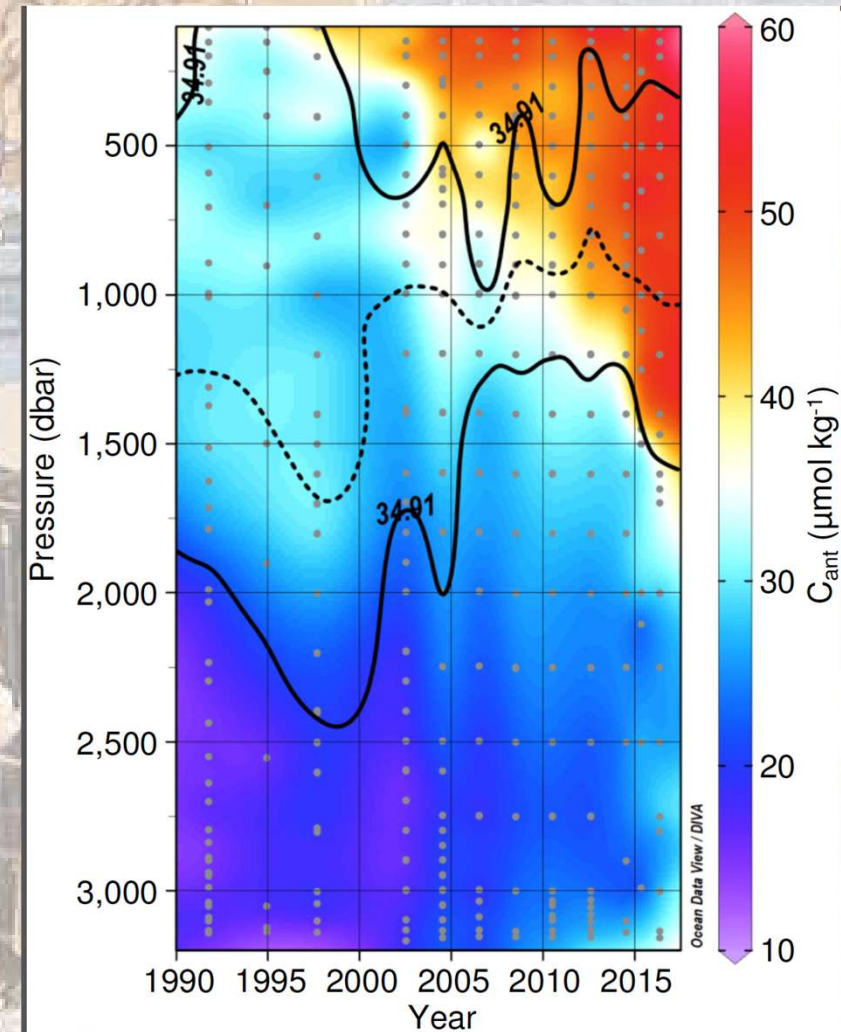
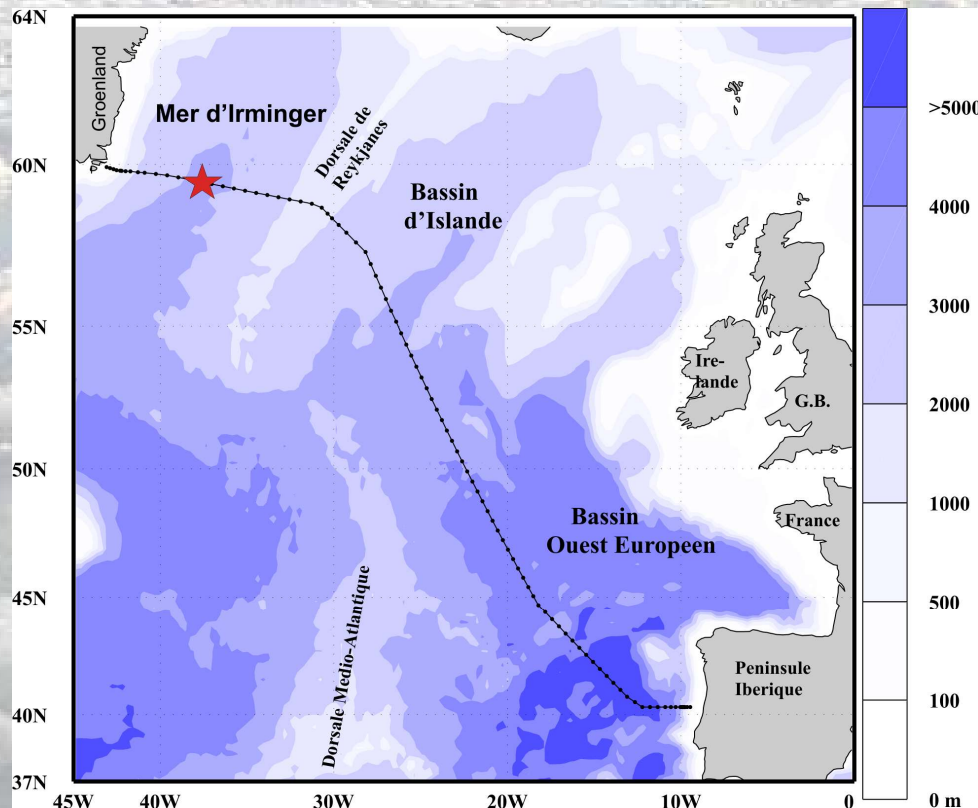
L'équilibre est déplacé :

$\text{CO}_2$  et  $\text{HCO}_3^-$  augmentent  $\text{CO}_3^{2-}$  diminue  
augmentation d'  $\text{H}^+$  = augmentation de l'acidité

# Distribution spatiale du « stockage » de CO<sub>2</sub> anthropogénique (C<sub>ant</sub>)



# Distribution verticale du $C_{ant}$ au large du Groenland



# Quelques conséquences des changements dans l'océan

- Fonte de la banquise et des glaciers côtiers
- Montée du niveau de la mer (par dilatation thermique et fonte des glaces terrestres)
- Changement du cycle de l'eau (précipitations, sécheresse)
- Intensification des cyclones
- Migration des espèces marines
- Adaptation (ou pas) des espèces utilisant les carbonates (coraux, bivalves, phytoplancton...)
- Biodiversité marine

A photograph showing a scientific instrument, likely a CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) rosette, being lowered by a crane into a body of water covered with numerous small ice floes. The instrument is a cylindrical metal frame with various sensors and a white satellite dish on top. The background shows a vast expanse of ice under a hazy sky.

# **L'OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE: UNE SCIENCE JEUNE**

# Les premiers navires de recherche

1960

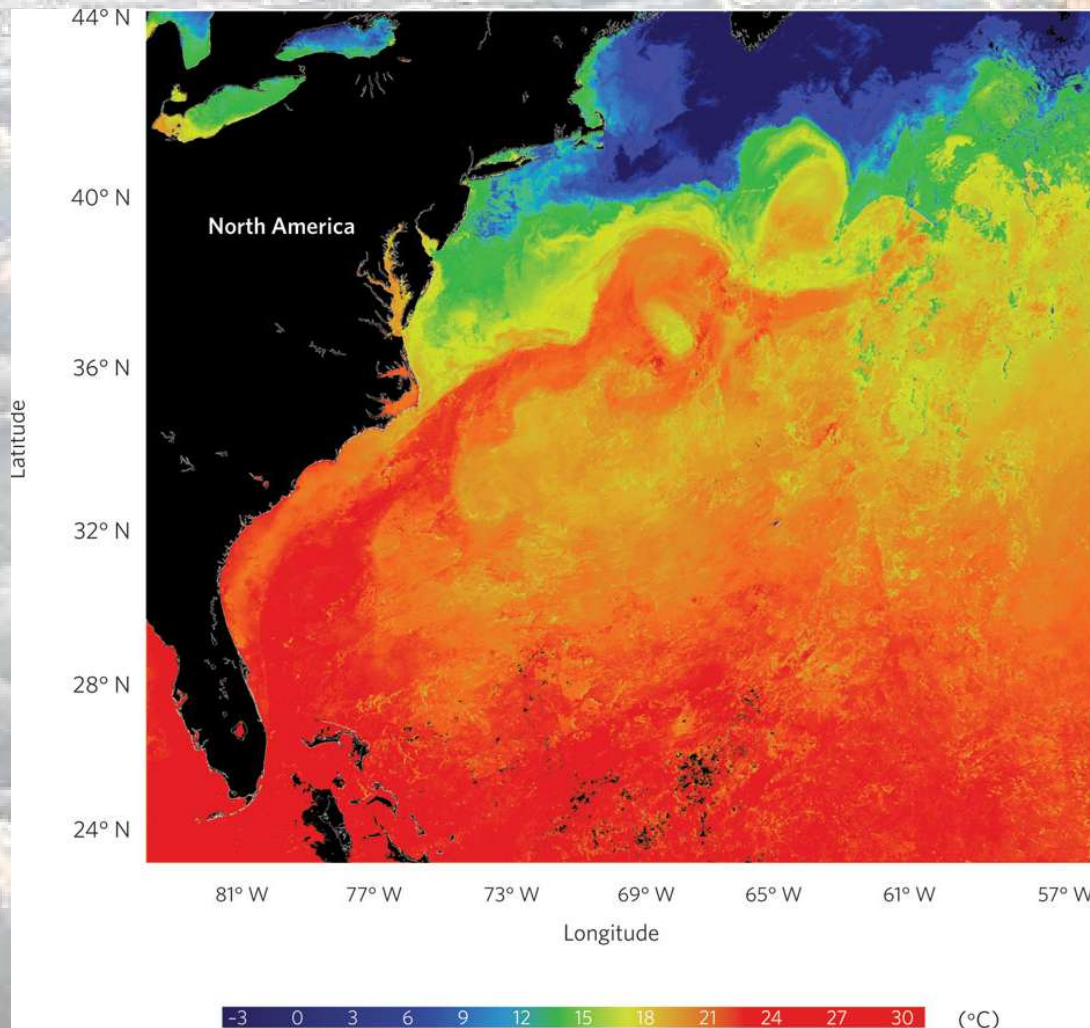


# 1980: la révolution satellitaire

## Le Gulf Stream

Température de surface  
NASA-MODIS  
Image composite 13-21/05/2006  
Richard G. Williams,  
Nature 2012

Aujourd'hui, nous avons accès à plusieurs propriétés de la surface de l'océan depuis l'espace: la température, la salinité, la couleur de la mer (chlorophylle, sédiments), les courants, l'étendue de la banquise, mais aussi, par la hauteur de la surface de la mer, on estime la profondeur de l'océan !



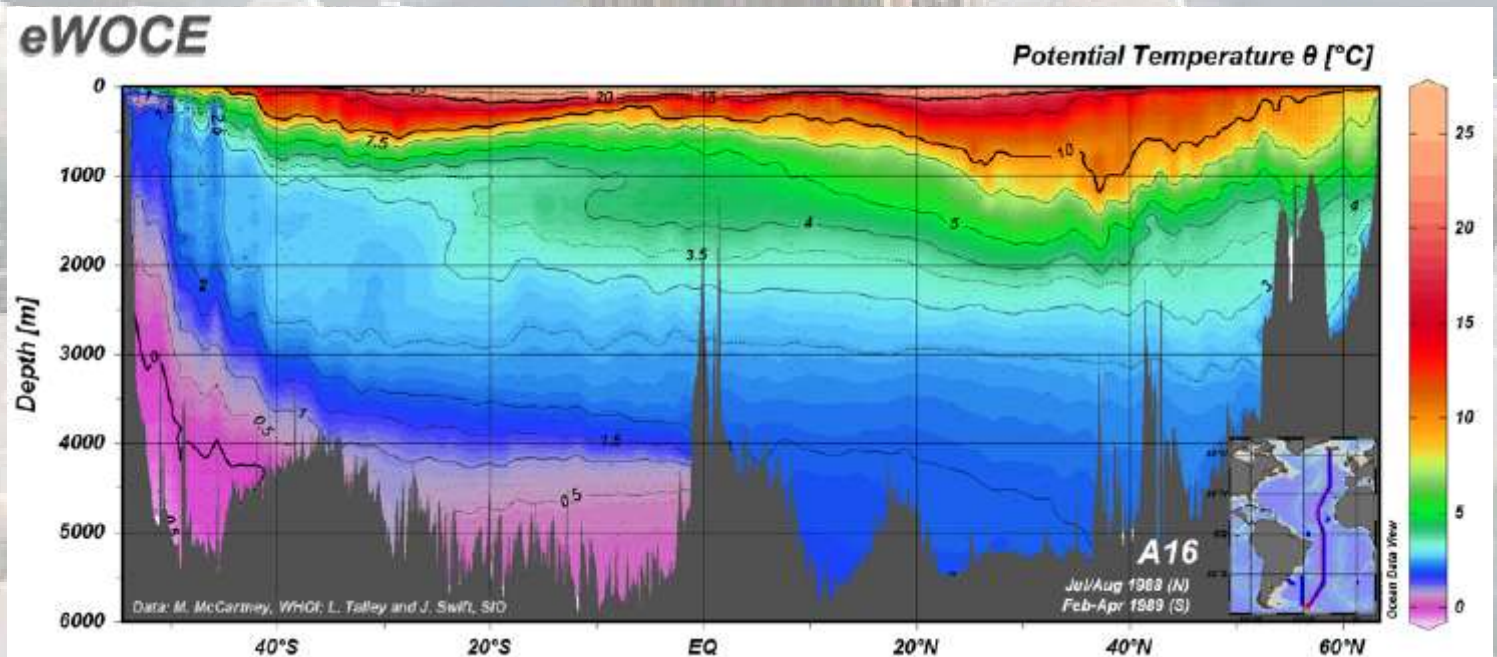
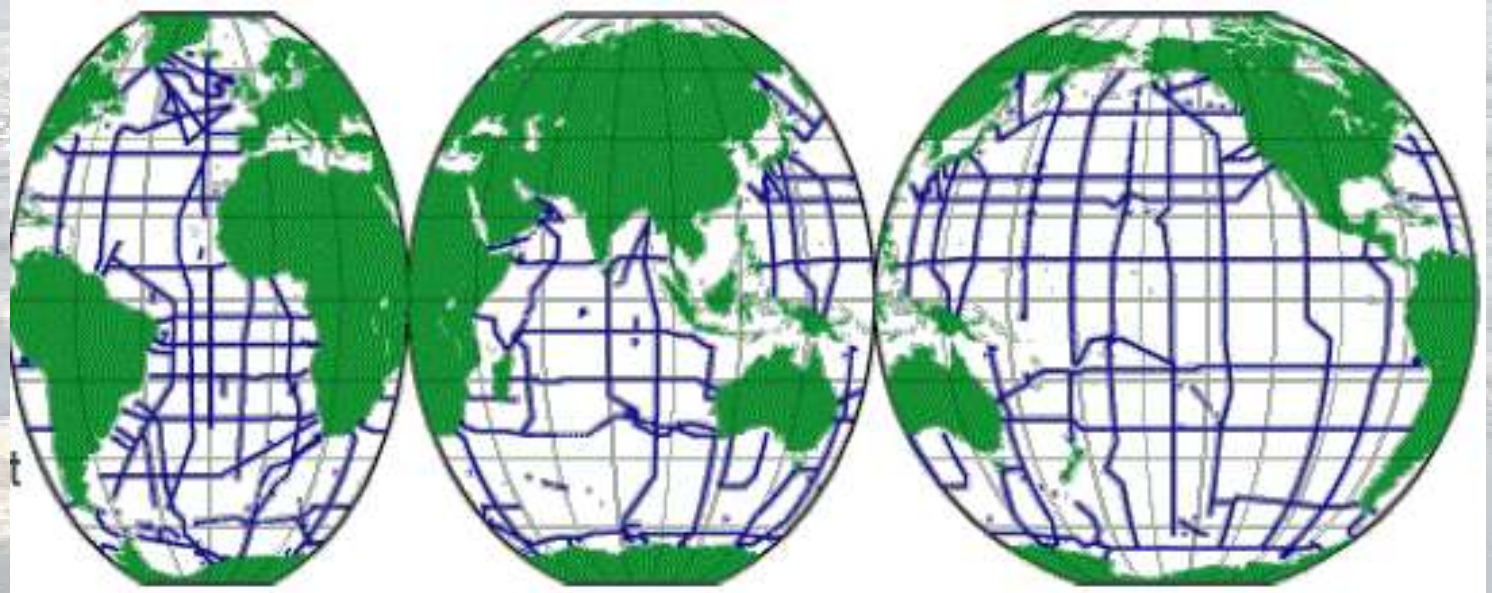
# Coordination à l'échelle internationale

World Ocean  
Circulation  
Experiment  
(1990-1998)

suivi de  
CLIVAR  
(2000-)

puis de  
Go-SHIP  
(2010-20..)

Emergence des  
1<sup>ères</sup> bases de  
données  
internationales



# Développements technologiques

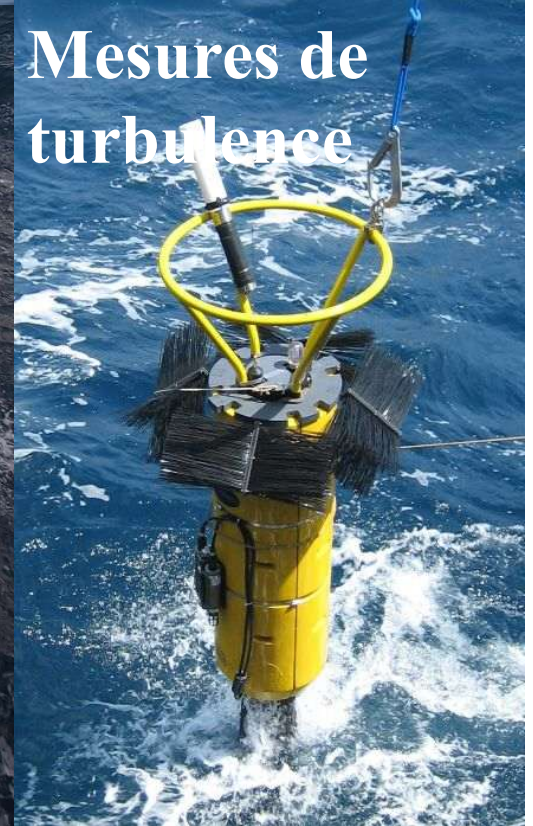
Des données de courant en continu jusqu'à 1200m



Profileur  
ARGO



Mesures de  
turbulence



Mouillage



Rosette avec CTDO<sub>2</sub>,  
LADCP et bouteilles de  
prélèvement



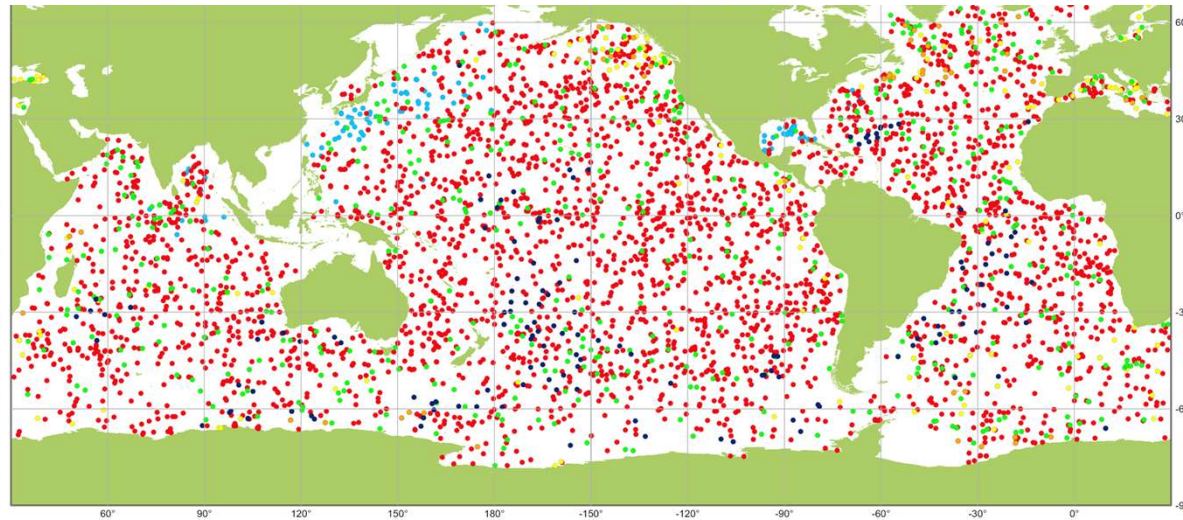
Glider

# Profileurs Argo: un grand pas en avant

Essor depuis 2002: mesure de T, S et O<sub>2</sub> de 0 à 2000m

2020: One-Argo (Core: 0-2000m; Deep: 0-4000m & 0-6000m; BGC)

Objectifs: mesurer + profond et + de variables



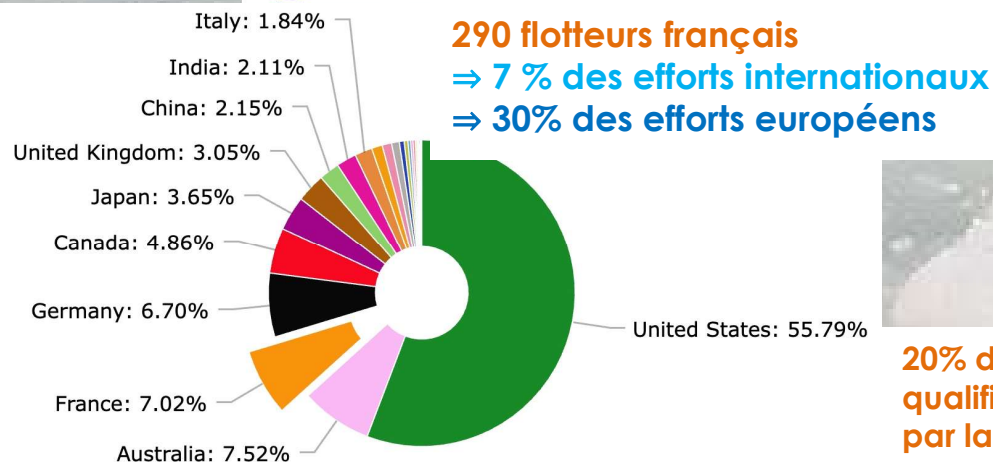
Argo

Networks  
4126 operational units

March 2025



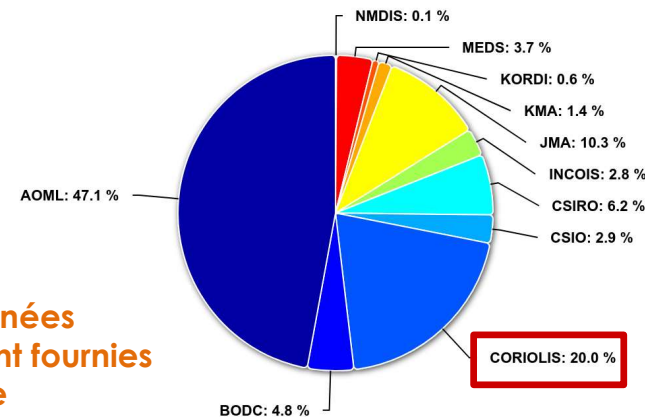
- Deep (TSO only) (57)
- Deep (198)
- BioGeoChemical (without TSO only) (532)
- Core + O<sub>2</sub> (TSO) (151)
- Core (3119)
- Equivalent (147)



**20% des données  
qualifiées sont fournies  
par la France**

18648 floats on Argo GDAC

(C) Coriolis data center - 10/09/2024





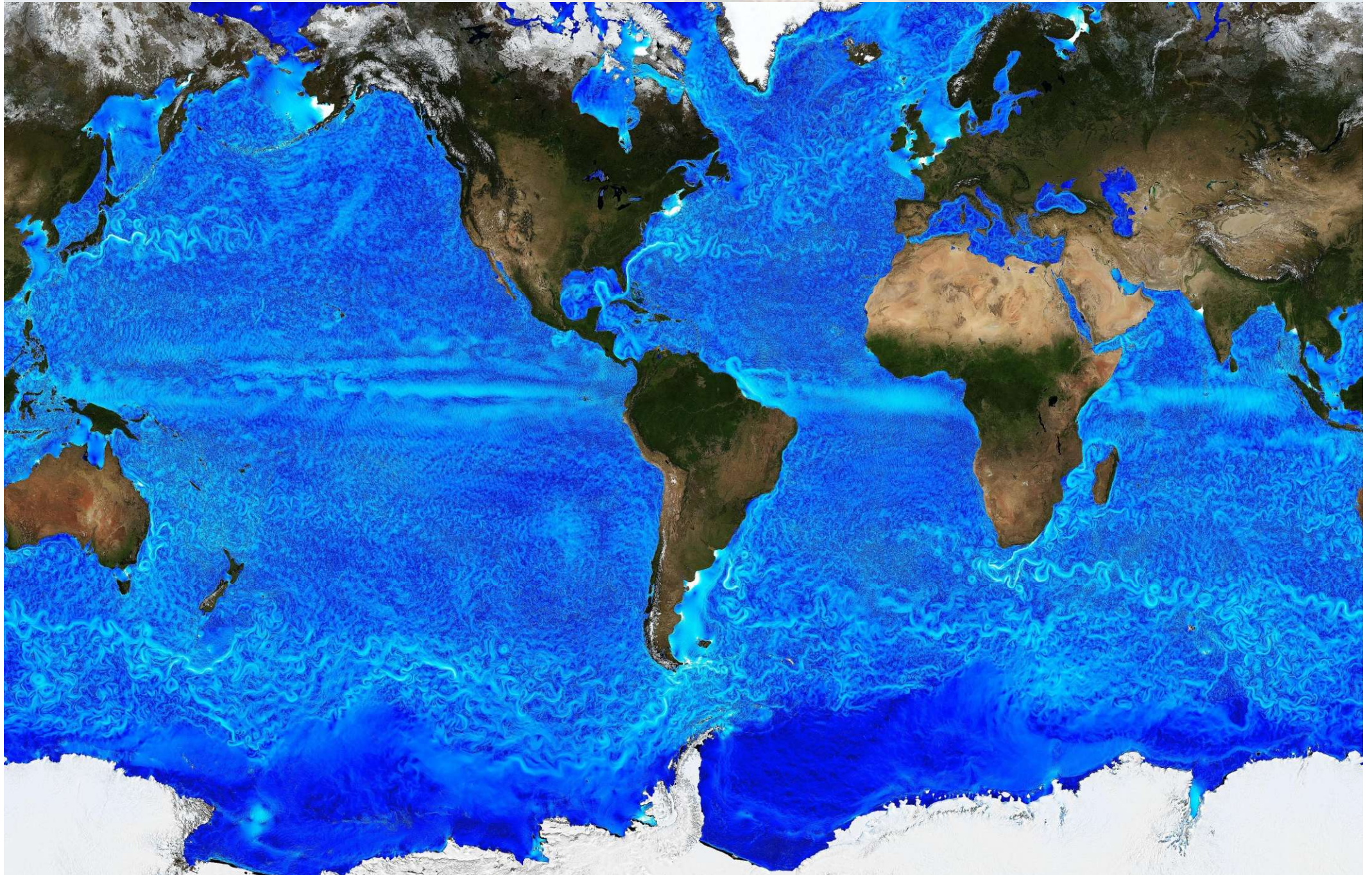
# Trois raisons de continuer les mesures par les navires océanographiques

- Précision ( $\Rightarrow$  qualification Argo)
- Profondeur
- Diversité des mesures



La coordination des réseaux d'observations et des bases de données se fait en France et en Europe par les infrastructures de recherche sur l'océan

# Des modèles numériques haute résolution



A photograph showing a scientific instrument, possibly a CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) rosette, being lowered by a crane into a body of water covered with numerous small, irregular ice floes. The instrument is a cylindrical metal frame with various sensors and a white satellite dish on top. The background shows a vast expanse of ice under a clear sky.

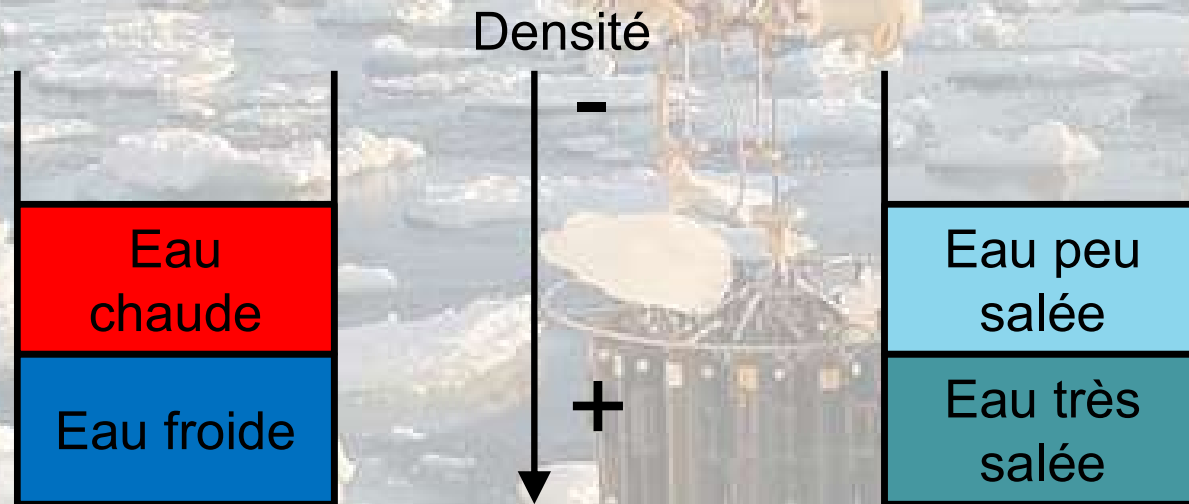
# **LA CIRCULATION OCEANIQUE**

# Mais que mesure t'on dans l'océan?

- Les variables physiques:
  - Pression (profondeur)
  - Température
  - Salinité
  - Courants
- Les variables biogéochimiques:
  - Oxygène dissous
  - Macro-nutritifs
  - pH, alcalinité, carbone organique et inorganique
  - Traceurs transitoires (fréons, ...)
- Les variables biologiques (Chlor-a, TEI...)

Densité

# La densité de l'eau de mer

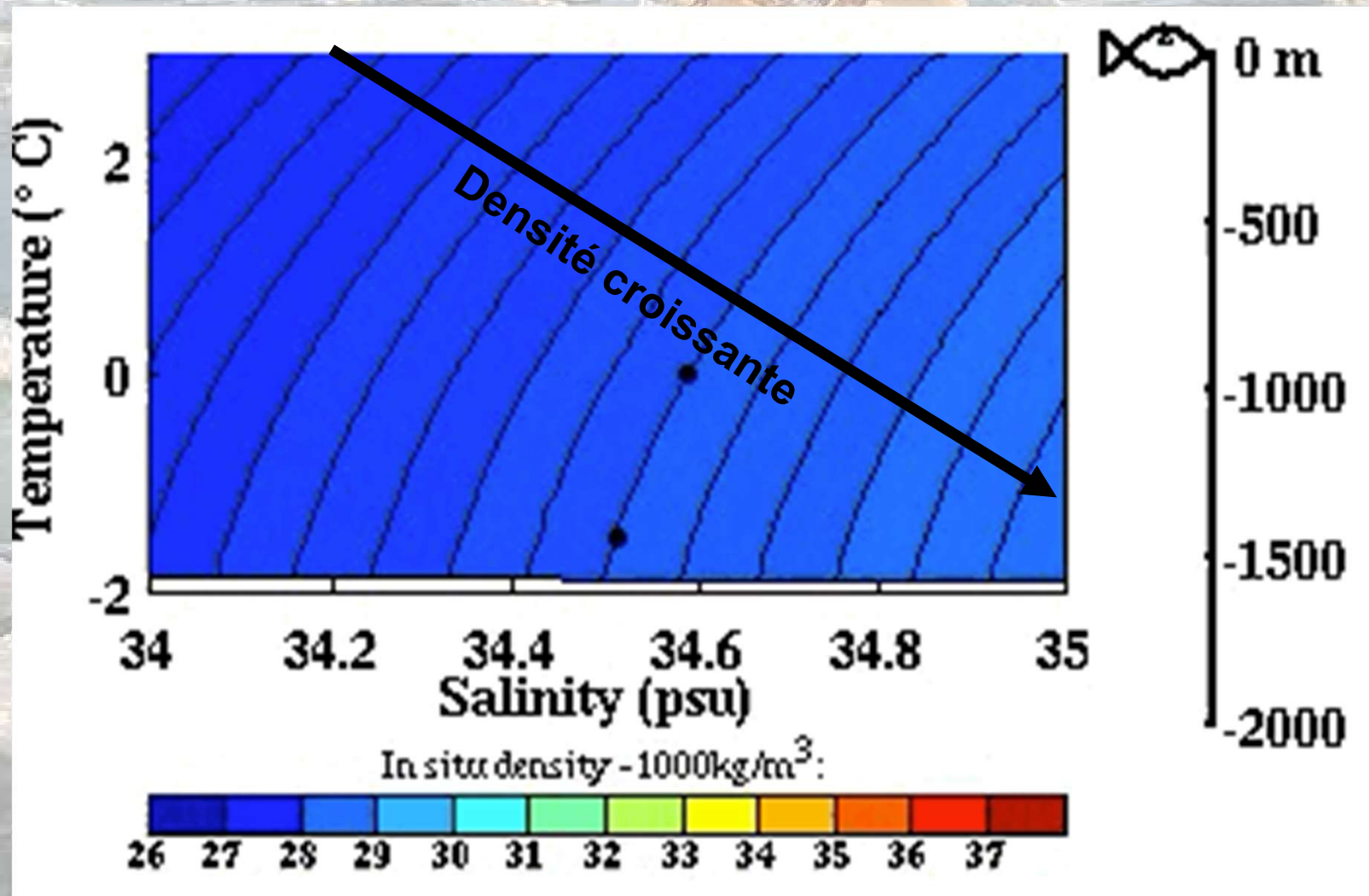


Dans l'océan, la densité de l'eau dépend de sa température et de sa salinité de façon non-linéaire.

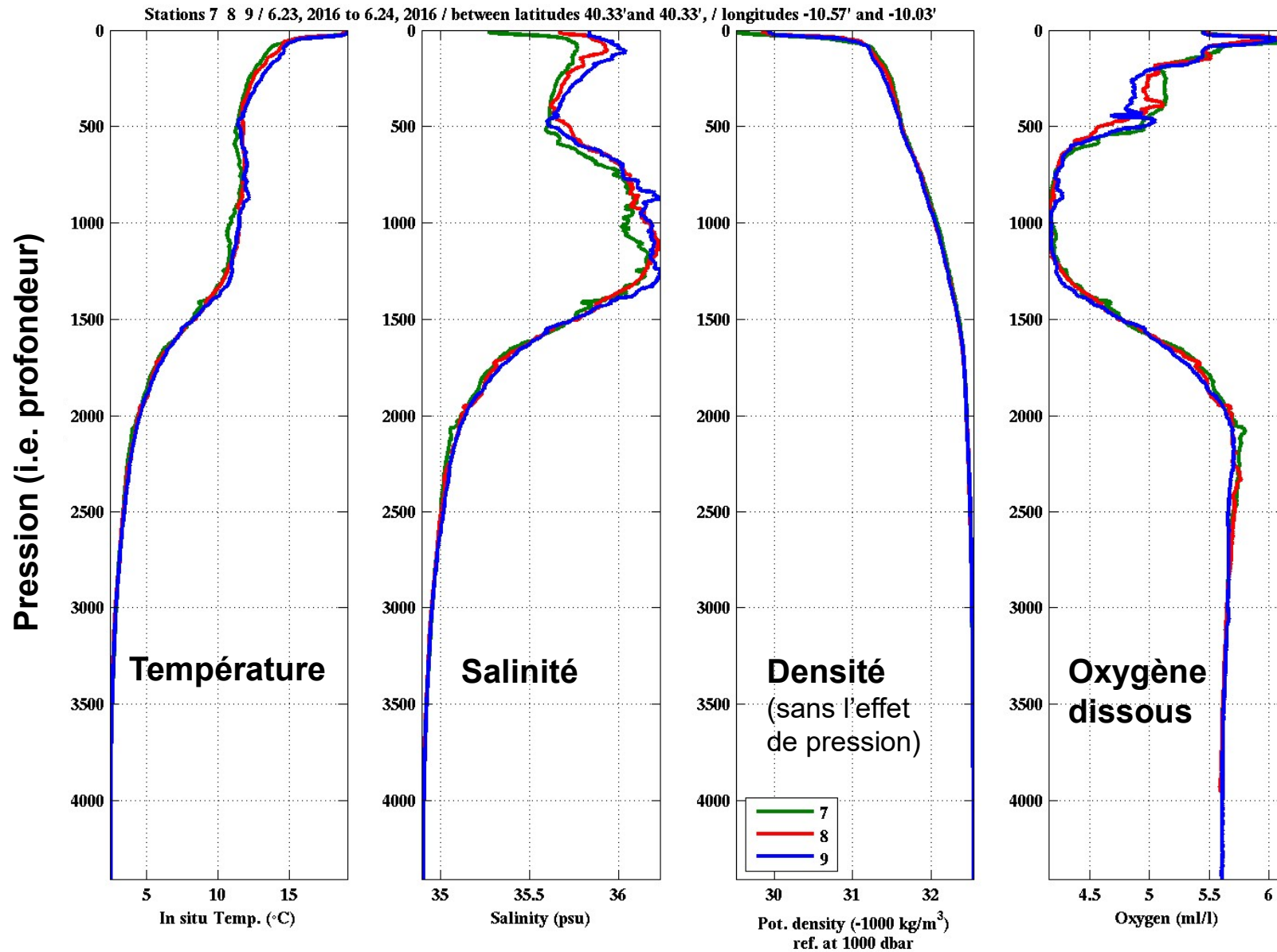
De plus, l'eau n'est pas complètement incompressible

# La masse volumique (ou densité)

Elle se déduit de la pression, la température et la salinité via une équation non linéaire:  $\rho = \rho(P, T, S)$



# Profils en 3 points de la plaine abyssale ibérique

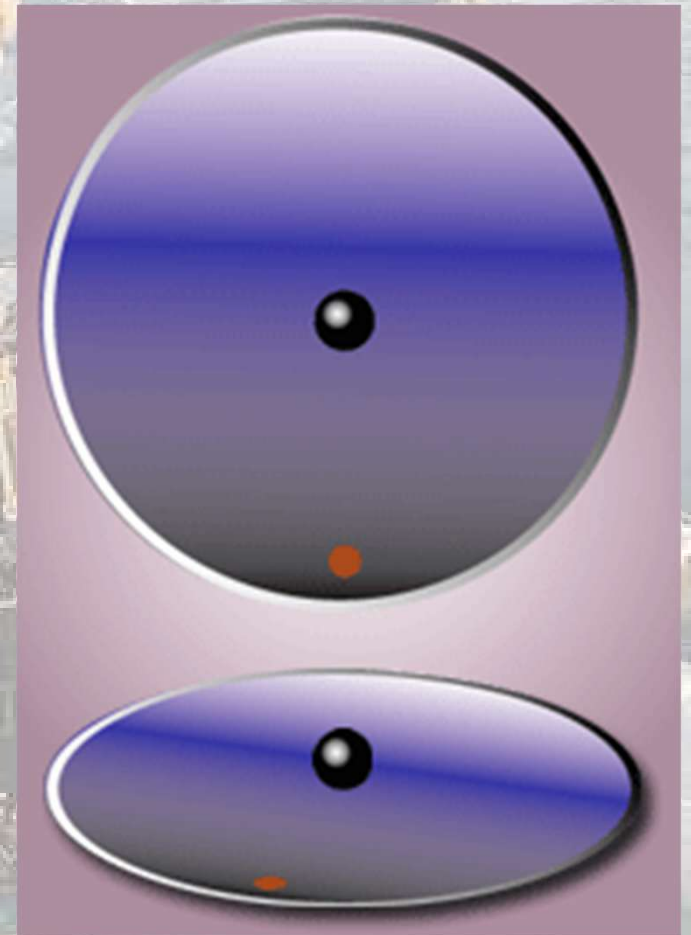


# Les bases de l'hydrodynamique

- 5 inconnues:
  - $u$ ,  $v$  et  $w$ , les composantes de la vitesse  $\vec{V}$
  - $P$  la pression
  - $\rho$  la masse volumique
- La loi de Newton:  $\vec{F} = m\vec{a}$  ou par unité de volume:
$$\vec{F} = \rho\vec{a}$$
- L'équation de continuité:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \vec{\nabla}(\rho\vec{V})$  qui se simplifie dans le cas d'un fluide localement incompressible par
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

# Les forces

- Les différences de pression:  $-\vec{\nabla}P$
- La gravité  $\overline{\rho}\vec{g}$
- Force de Coriolis:  $-2\rho\vec{\Omega} \times \vec{V}$  où  $\vec{\Omega}$  est le vecteur de rotation de la Terre
- Frottement du vent et frottement au fond (travaux d'Ekman)
- Frottements liés à la viscosité  $\nu$
- Les forces de marée



# Les équations de l'hydrodynamique

- Dans l'hypothèse d'un fluide dit newtonien et (localement) incompressible, on obtient:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \vec{g} - 2\rho\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nu\vec{\nabla}^2\vec{V} \text{ soit les équations:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + f v + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - f u + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{array} \right.$$

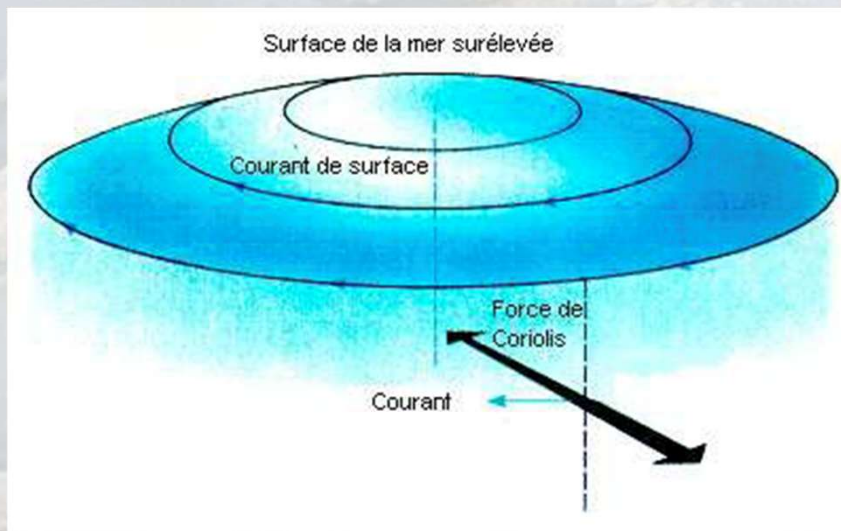
(f est le facteur de Coriolis:  $f = 2\omega \sin \Phi$ ,  $\Phi$  la latitude)

- auxquelles on ajoute l'équation de continuité qui combinée à l'incompressibilité donne  $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$  soit:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

# La circulation océanique à grande échelle

A grande échelle, pour regarder les grands équilibres stationnaires loin des couches limites, on peut simplifier les équations. C'est ce qu'on appelle l'équilibre géostrophique:



$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = f v \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = -f u \\ \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \end{cases}$$

L'équilibre est atteint quand les courants sont perpendiculaires aux gradients de pression, donc le long des isobares.

# Les grands courants géostrophiques

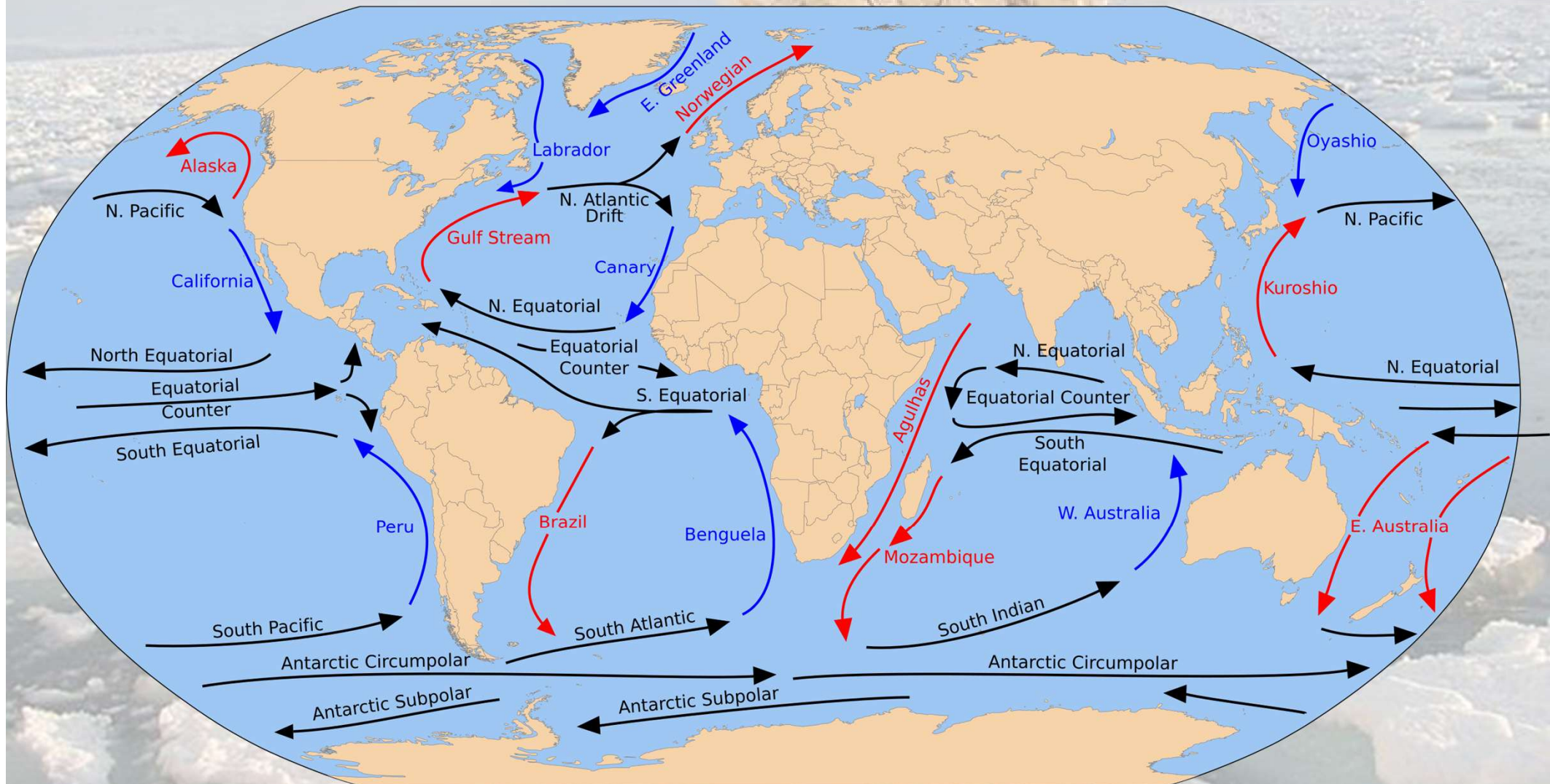
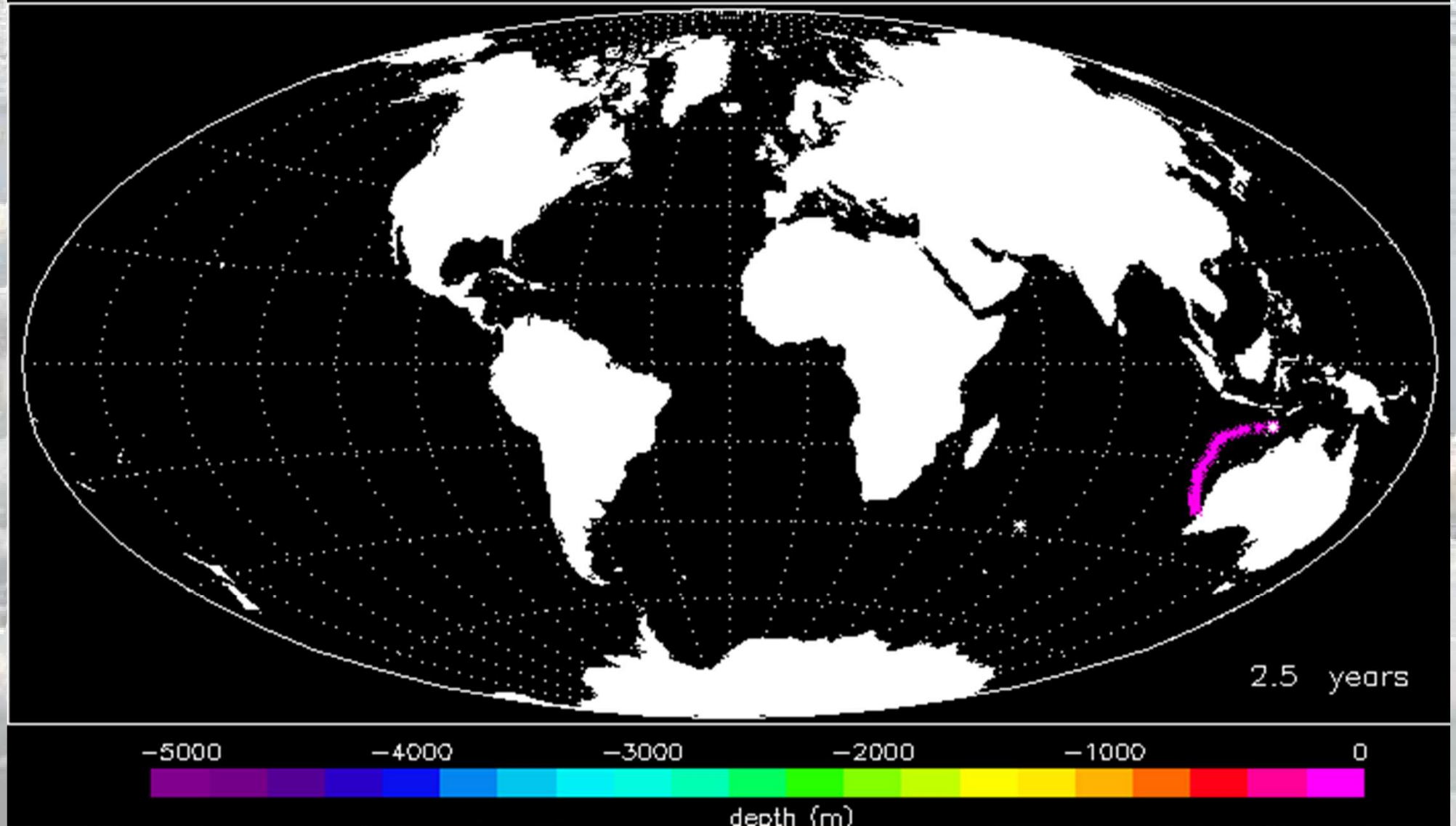


Figure tirée de [https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant\\_marin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_marin)

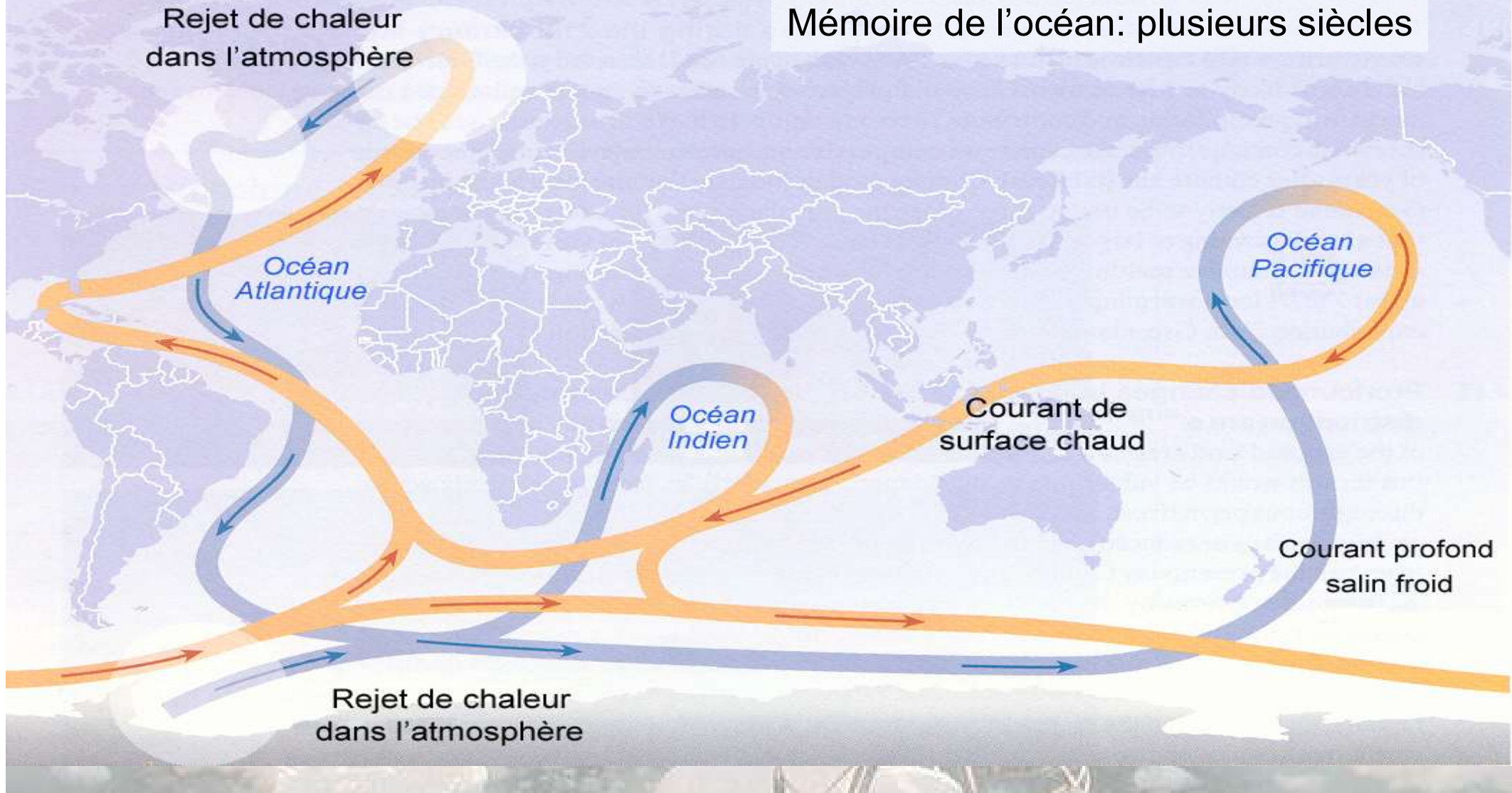
# Tous les océans sont connectés

"Global" trajectory in the OPA model  
<http://www.univ-brest.fr/lpo/ariane>



# La circulation océanique mondiale

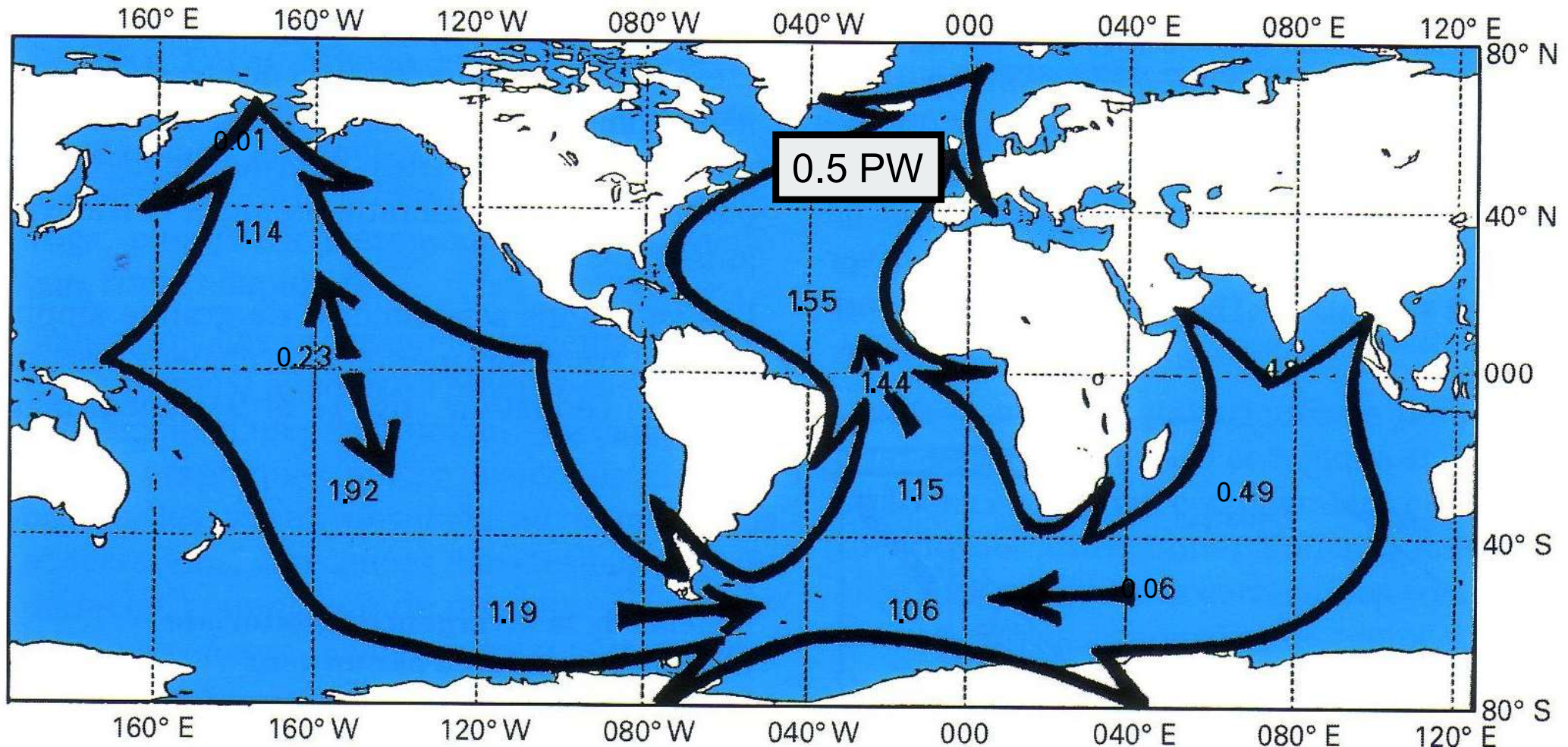
Mémoire de l'atmosphère: 15 jours  
Mémoire de l'océan: plusieurs siècles



**Le courant Nord Atlantique est un moteur de la grande boucle verticale de courants, appelée Meridional Overturning Circulation (MOC, parfois « tapis roulant » dans les médias).**

# L'océan assure la répartition de la chaleur sur la Terre

Le transport de chaleur par l'océan est responsable d'une élévation de 2°C de la température en Europe du Nord, ainsi que de la limite très septentrionale des glaces de mer.



Transport de chaleur océanique en PW ( $10^{15}$  W = 1 million de GigaW).

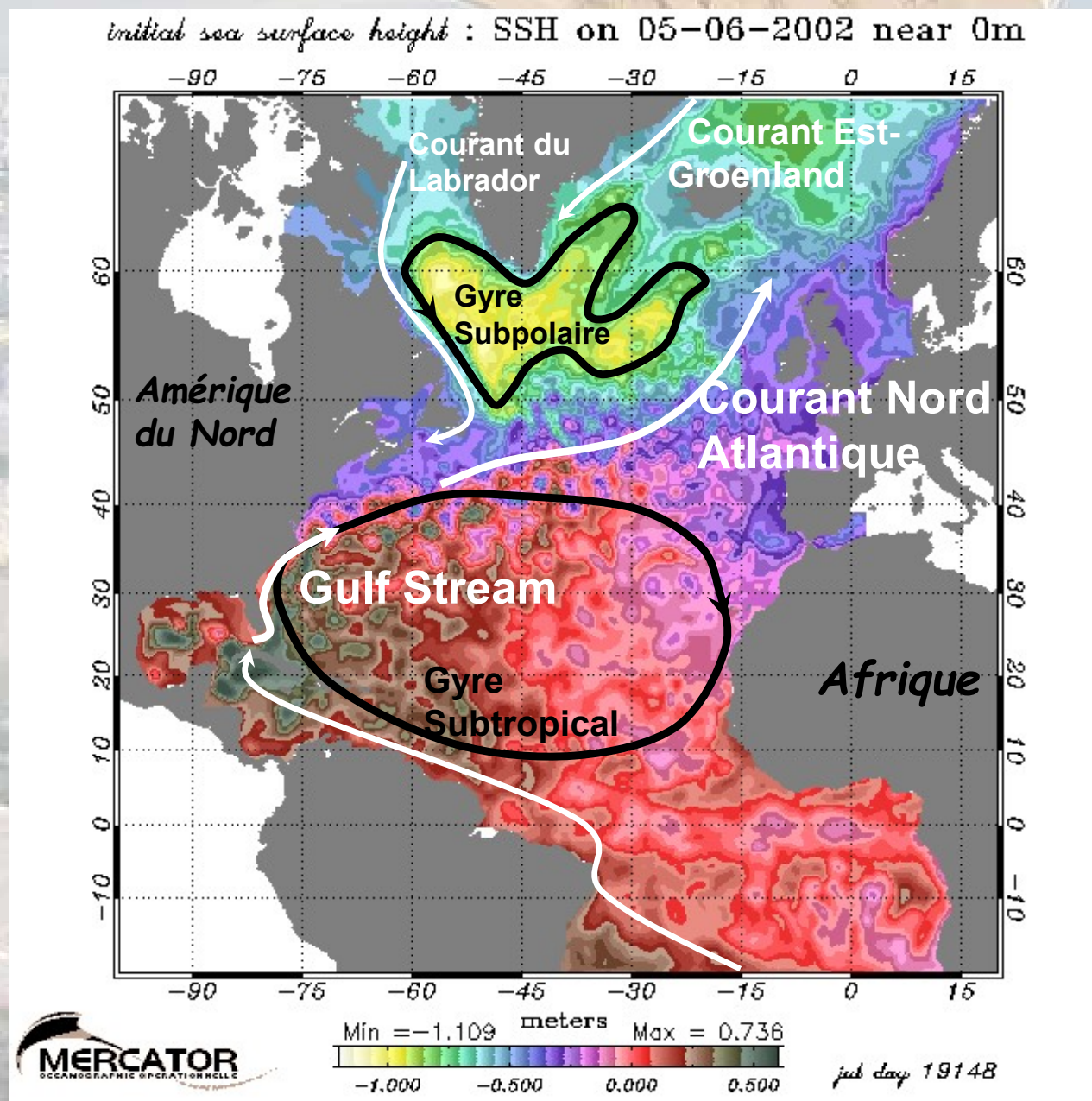
1 PW ~ 200 000 centrales nucléaires et 200 fois la consommation mondiale d'électricité

Données de Stommel (1982) ; Courtoisie de J. Merle

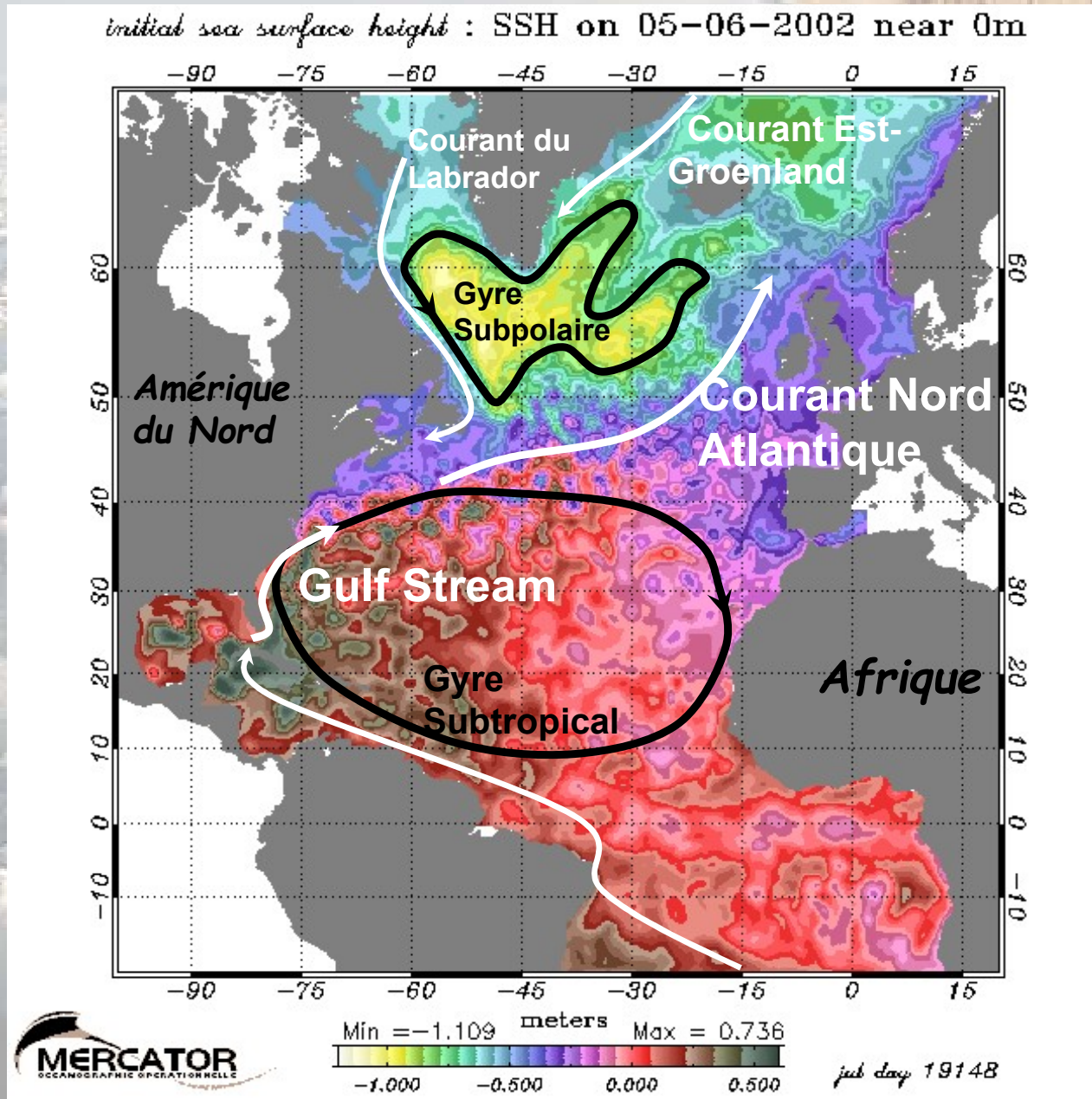


# **L'ATLANTIQUE NORD**

# Circulation de surface de l'Atlantique nord



# Circulation de surface de l'Atlantique nord



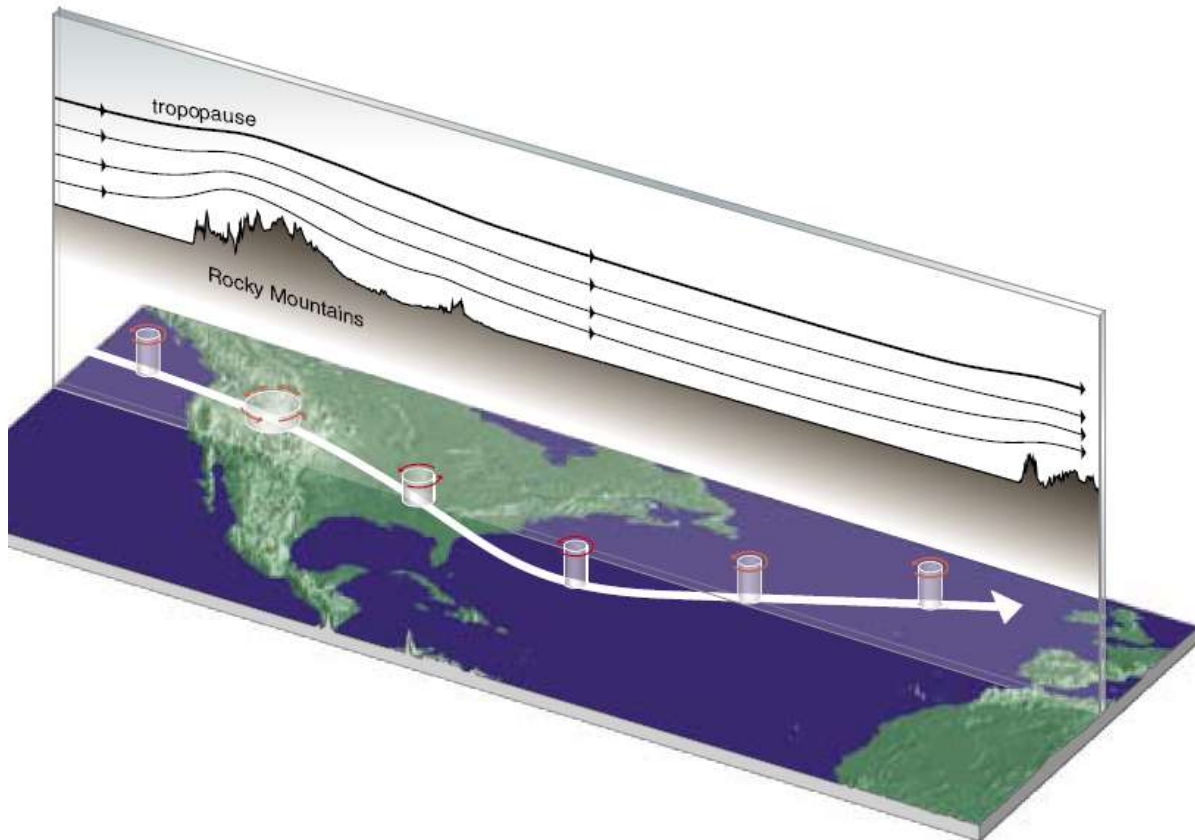
**Le Gulf Stream est stable car c'est une réponse de l'océan aux grands régime de vents (alizées et vents d'ouest)**

**Alors que le Gulf Stream n'est pas susceptible de varier, sa répartition entre les 2 branches l'est.**

**- Quand on parle d'arrêt du Gulf Stream, on se réfère en fait à l'arrêt du Courant Nord Atlantique.**

# Le mythe du Gulf Stream

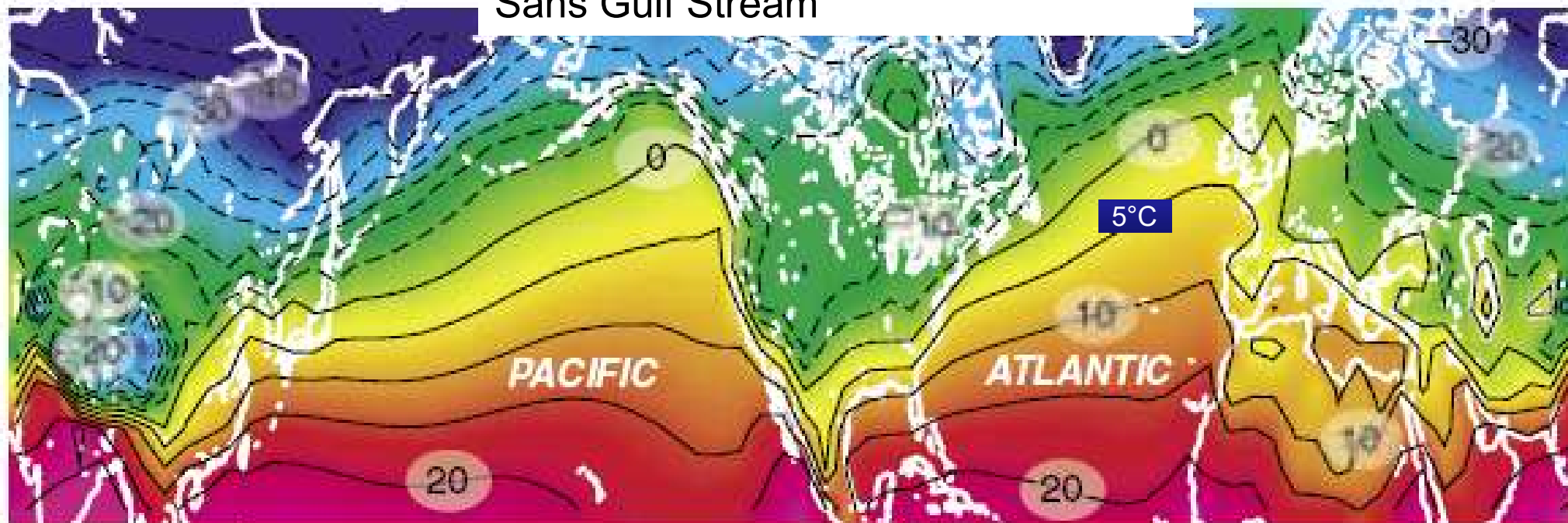
*From Richard Seager (La Recherche, 2003; American Scientist, 2006)*



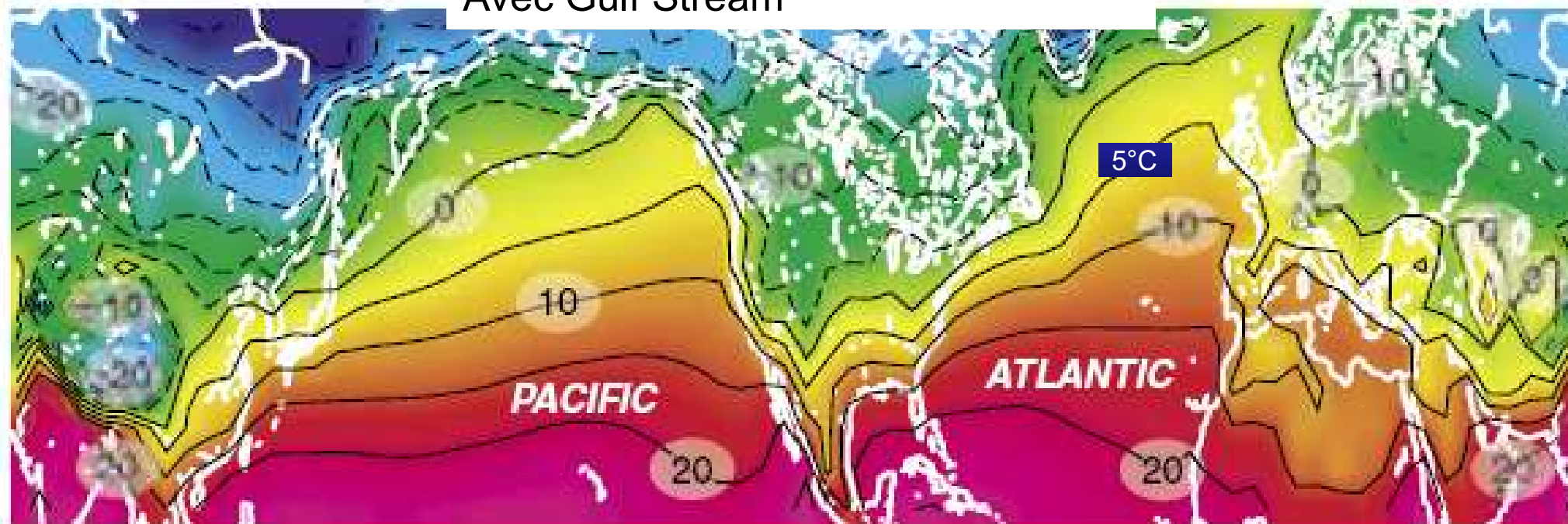
80% de la chaleur excédentaire en Europe en hiver, comparée aux côtes est des Etats-Unis, provient des vents d'ouest-sud-ouest qui apportent la chaleur que l'océan a stocké l'été précédent, indépendamment de tout courant.

# Température moyenne de l'air en janvier

## Sans Gulf Stream



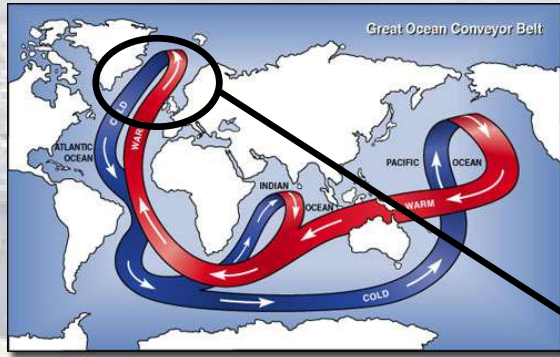
## Avec Gulf Stream



# **Mais le Courant Nord Atlantique ...**

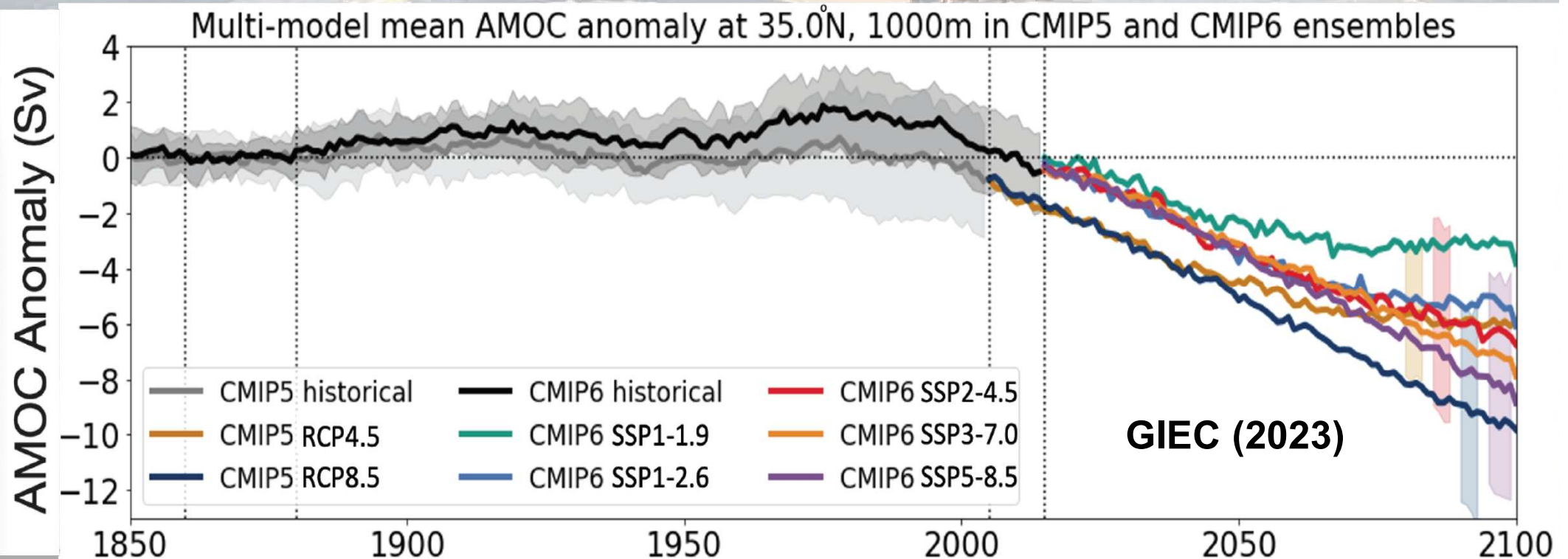
- **est la branche du Gulf Stream qui va vers l'Arctique**
- **est critique dans l'équilibre climatique de la Terre**
- **a une contribution non négligeable sur le climat au nord de l'Ecosse,**
- **contribue à limiter l'étendue des glaces de mer,**
- **est une composante importante de la pompe de carbone océanique**

# Modification du « tapis roulant »



Le Courant Nord-Atlantique constitue la branche haute de la MOC

Le débit des courants et de la MOC se mesurent en “Sverdrup”: 1 Sv = 1 million de  $\text{m}^3/\text{s}$



# Ralentissement de la circulation thermohaline en Atlantique Nord ?

- Les modèles de climat (GIEC) prévoient un ralentissement de la circulation en Atlantique Nord, mais l'incertitude est grande.
- Ce phénomène a-t-il déjà commencé ? Les avis des scientifiques divergent.



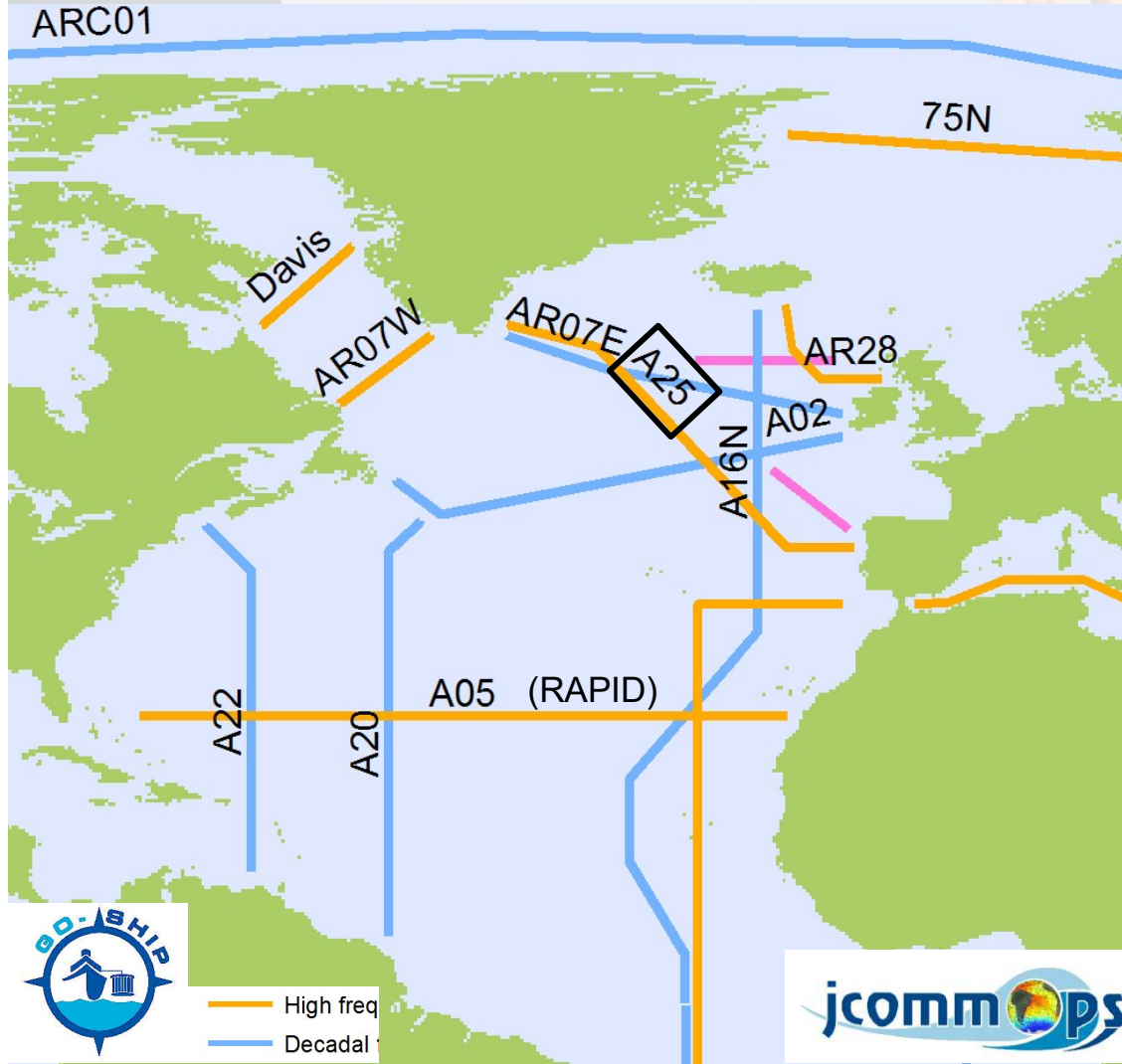


ARC01

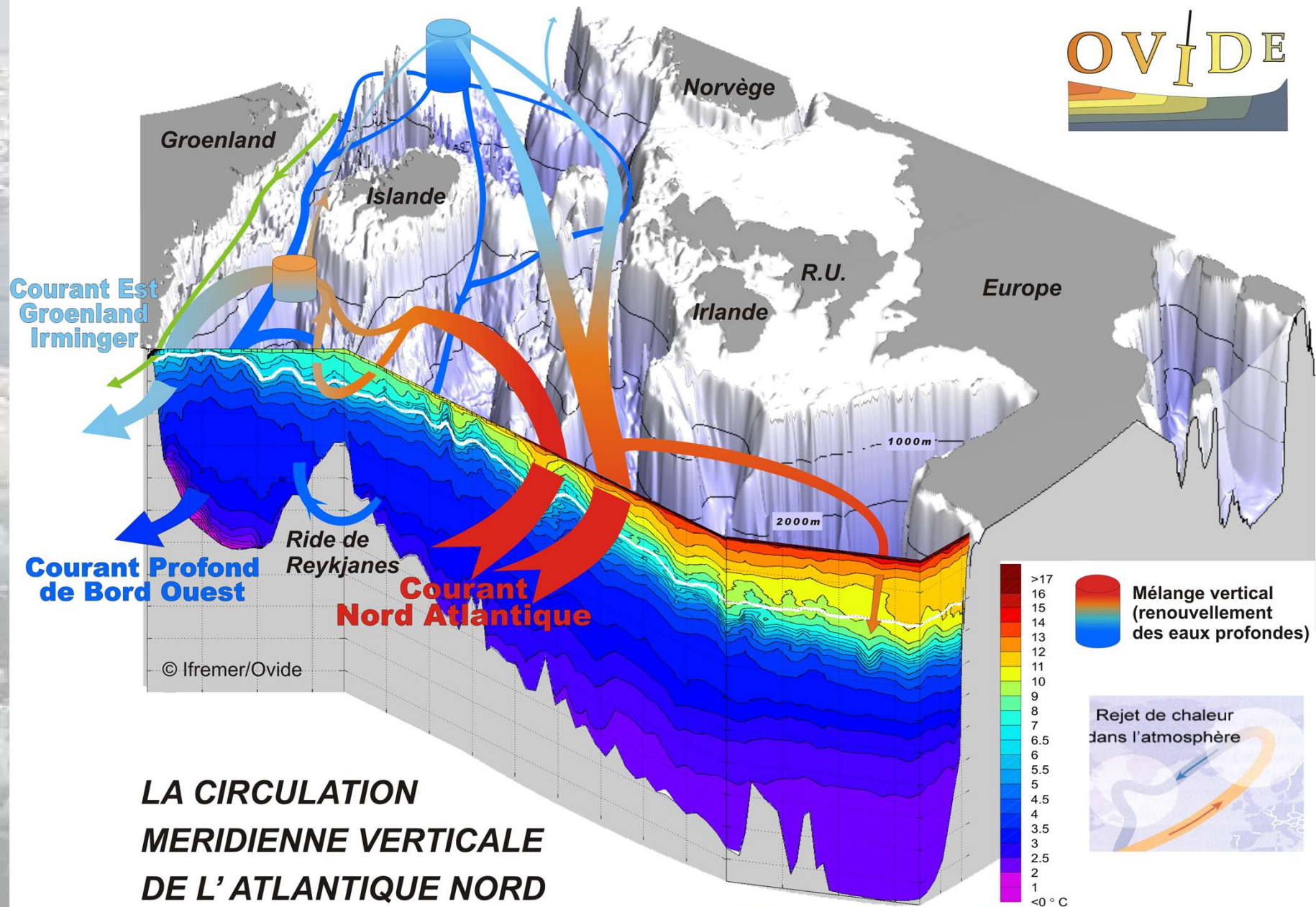
# Une contribution française: le programme OVIDE

OVIDE = la section A25,  
tous les 2 ans depuis 2002,  
et portée par la France et  
l'Espagne

Mesures hydrologie (T,S)  
Mesures de courant  
Mesures du mélange  
Mesures biogéochimiques  
Déploiements Argo  
Éléments traces et isotopes  
en 2014



# Circulation méridienne verticale (MOC) vue par OVIDE



# **Les objectifs d'OVIDE**

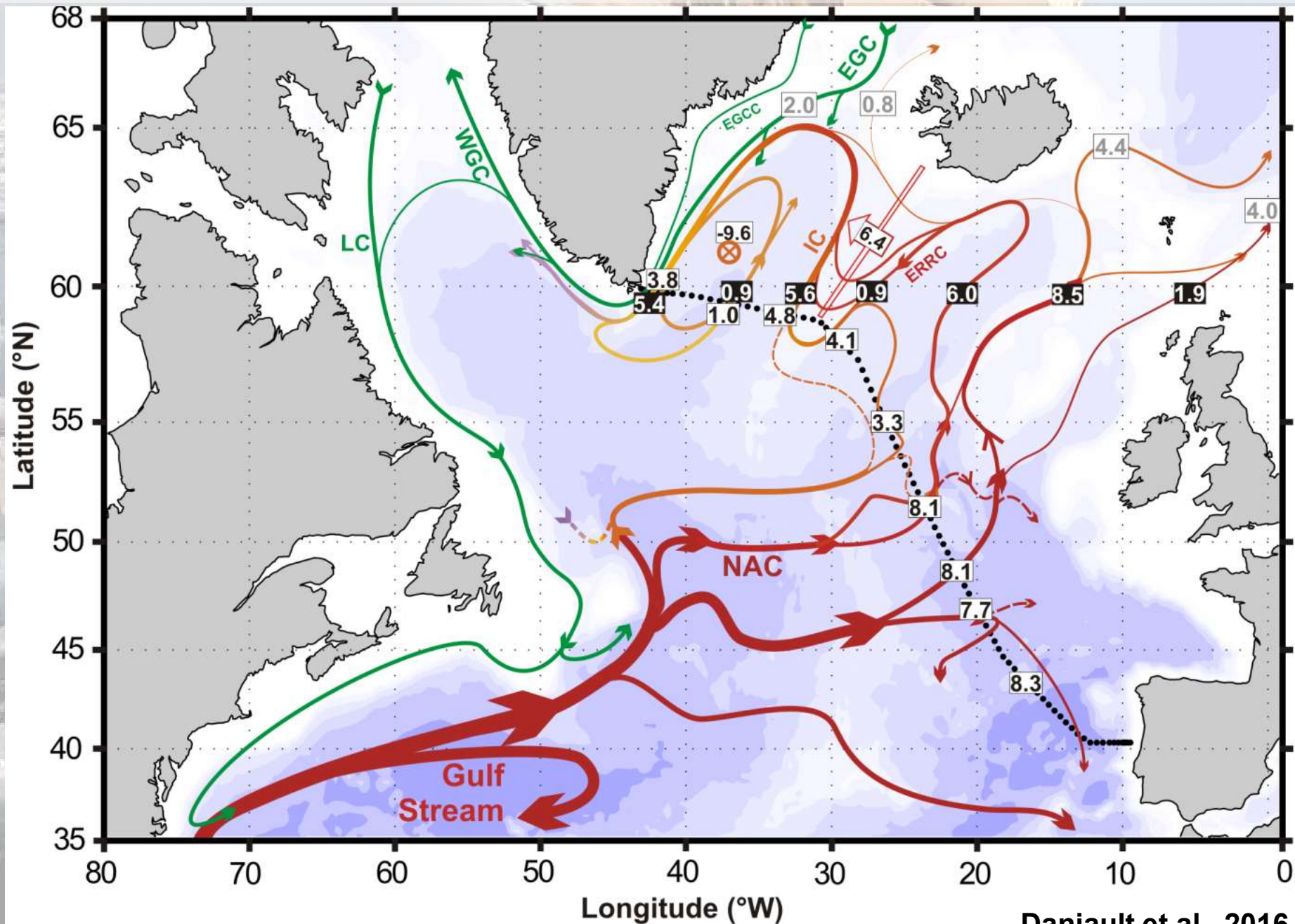
- **Une étude de la variabilité des principaux courants de l'Atlantique Nord et de la MOC**
- **Une meilleure connaissance de la variabilité des propriétés des masses d'eau**
- **Des sections de référence pour les modèles, complémentaires de 2 autres sections répétées en Atlantique Nord**
- **Des études spécifiques (mouillages près du Groenland, flotteurs ARGO, altimétrie)**
- **Participe à l'élaboration d'indicateurs de la variabilité du climat**

A photograph showing a robotic arm, likely from a research vessel, holding a sample container over a vast expanse of sea ice. The ice consists of numerous small, irregular floes floating in dark water. The background shows a hazy horizon under a pale sky. A semi-transparent grey rectangle is overlaid on the lower half of the image, containing the text.

# **QUELQUES RÉSULTATS**

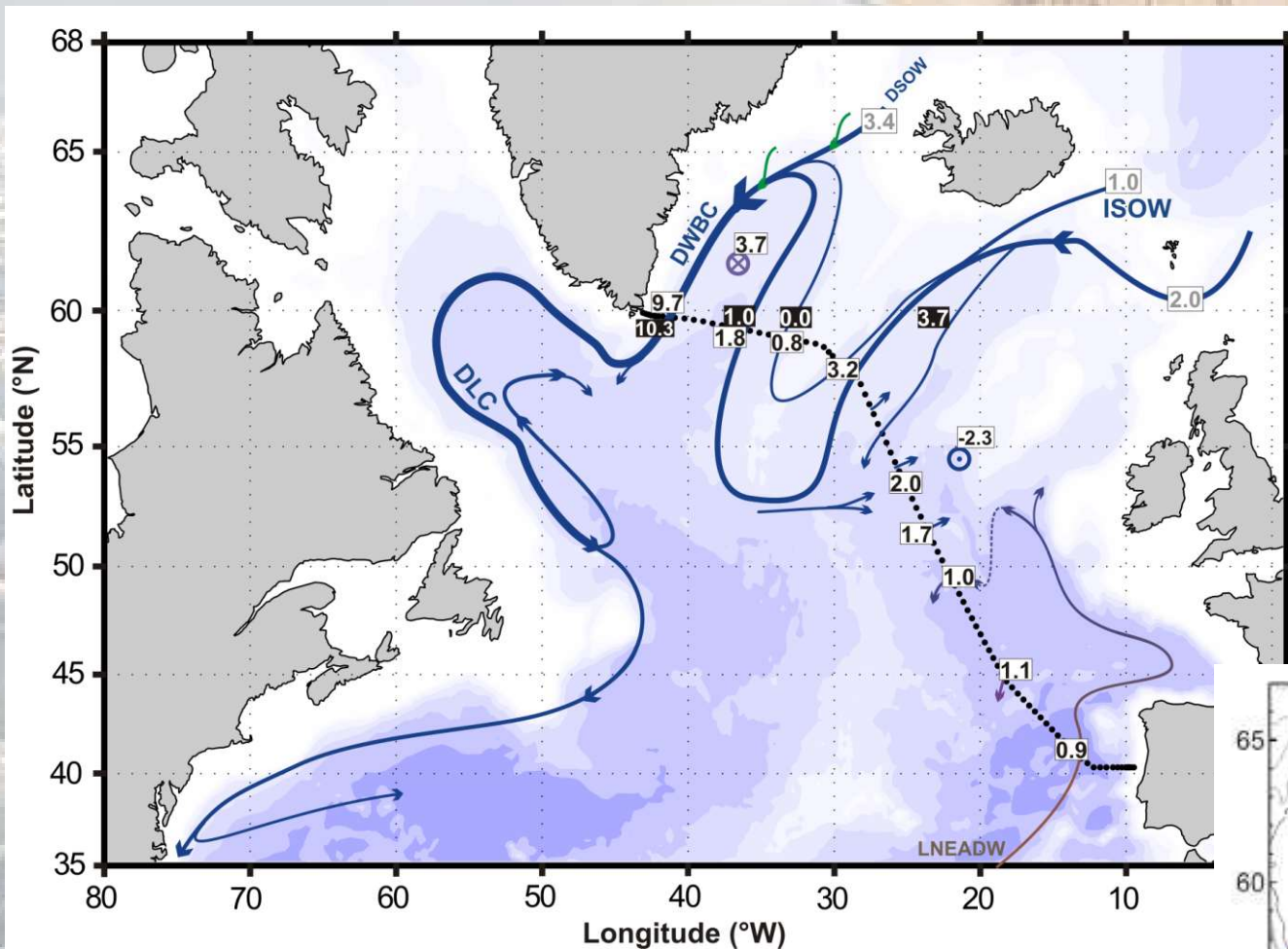
# Circulation moyenne des années 2000

## Couche supérieure



# Circulation moyenne des années 2000

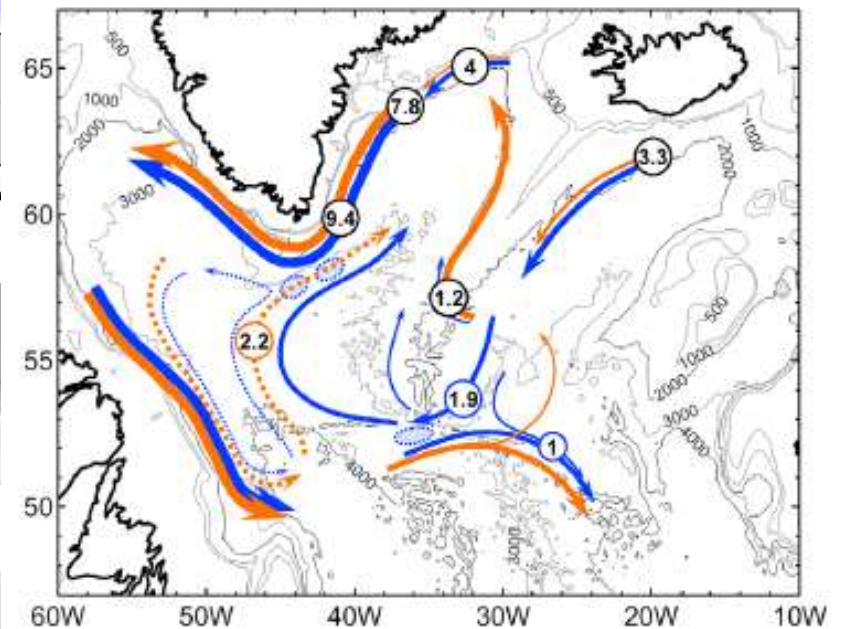
## Couche profonde



Danialt et al., 2016

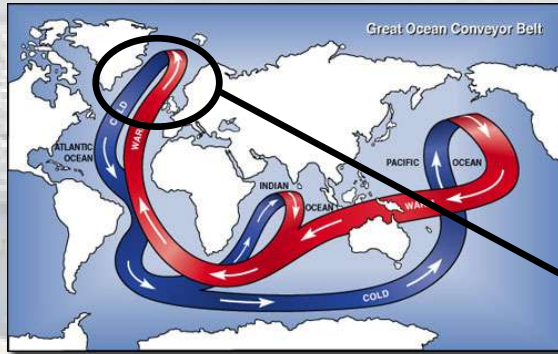


Xu et al., 2010  
(modèle HYCOM)



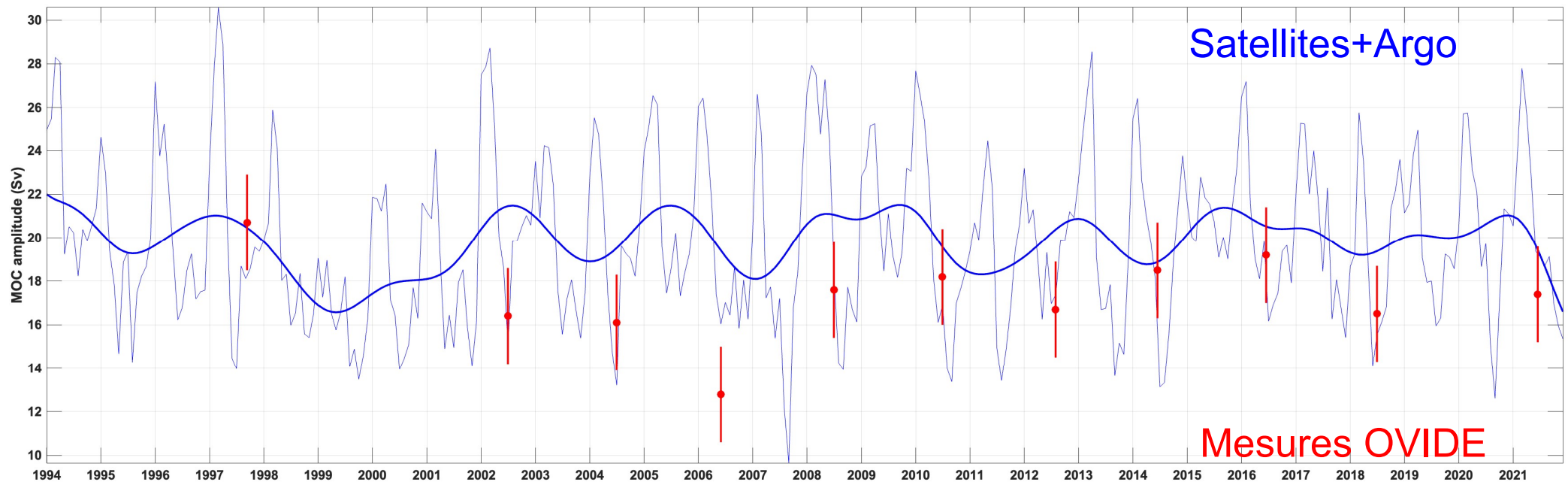
La circulation profonde reste relativement méconnue

# Construction d'un index de la MOC (circulation méridienne verticale)



1 Sv = 1 million de  $\text{m}^3/\text{s}$   
~ débit cumulé de toutes les rivières du monde

**Amplitude moyenne de la MOC: 19 Sv**



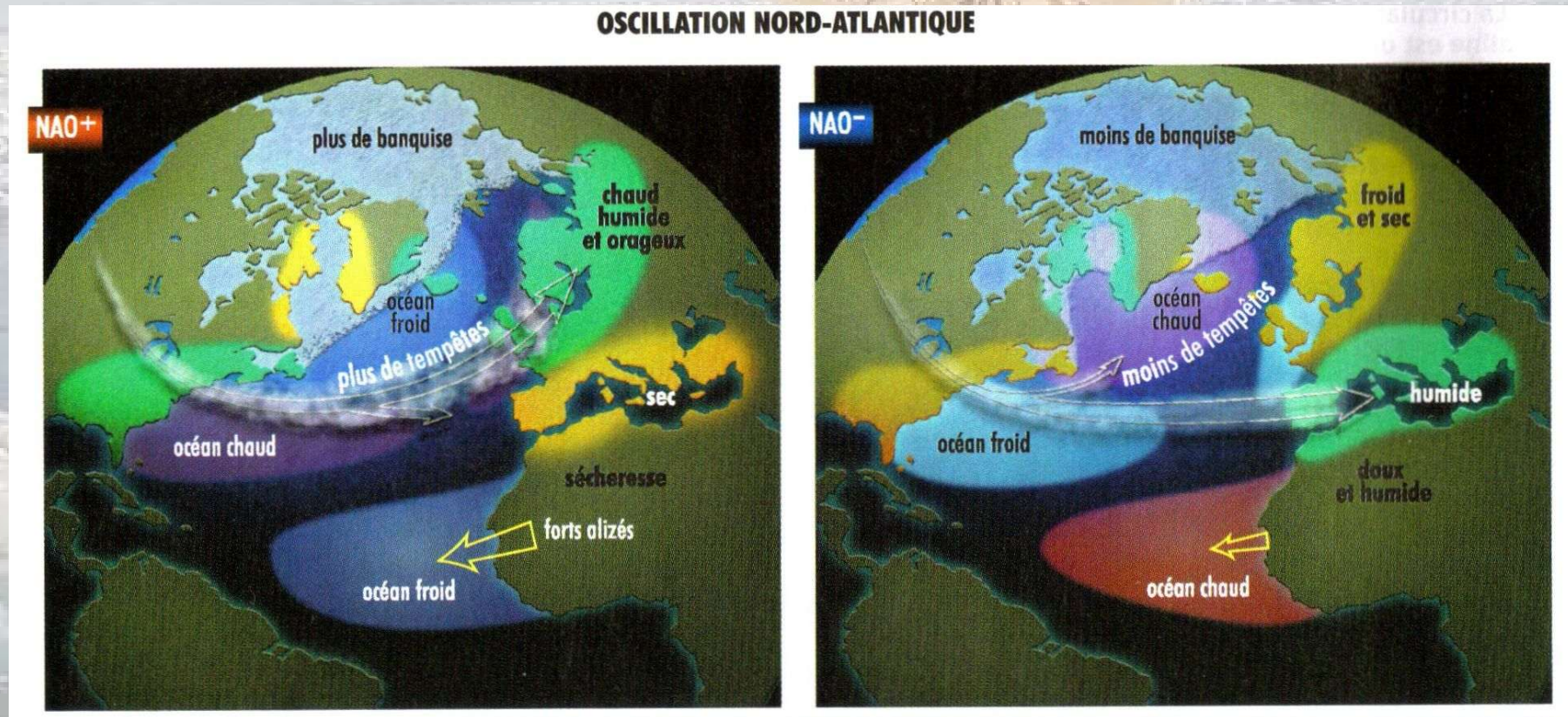
1994

Mercier et al., 2024

2022

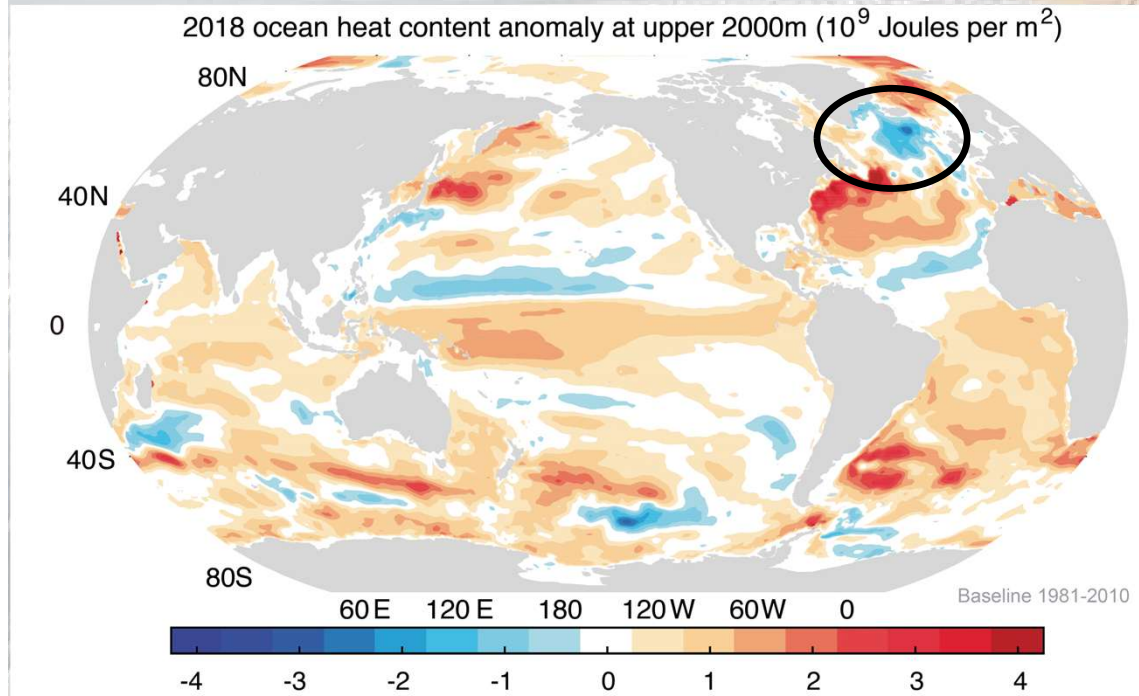
# L'oscillation Nord Atlantique

Ce mode de variabilité atmosphérique, prédominant, a une forte influence sur la circulation océanique en Atlantique nord (et sur notre climat !).



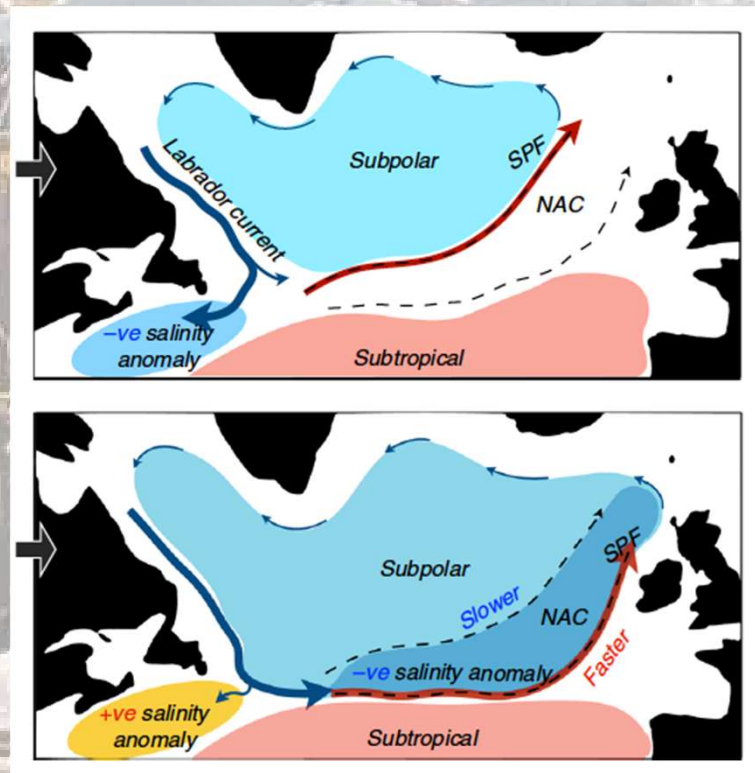
L'œuf et la poule : l'atmosphère agit sur la circulation océanique et sur la température de l'eau de surface, qui en retour agissent sur l'atmosphère  
⇒ cycles

# Exemple de l'influence des courants sur la distribution spatiale du réchauffement



La bulle froide en Atlantique nord de 2014 à 2018 serait due à une modification de la route du courant du Labrador

<https://global-climat.com/2019/03/01/record-de-chaueur-pour-les-oceans-en-2018/>



Holliday et al., 2020

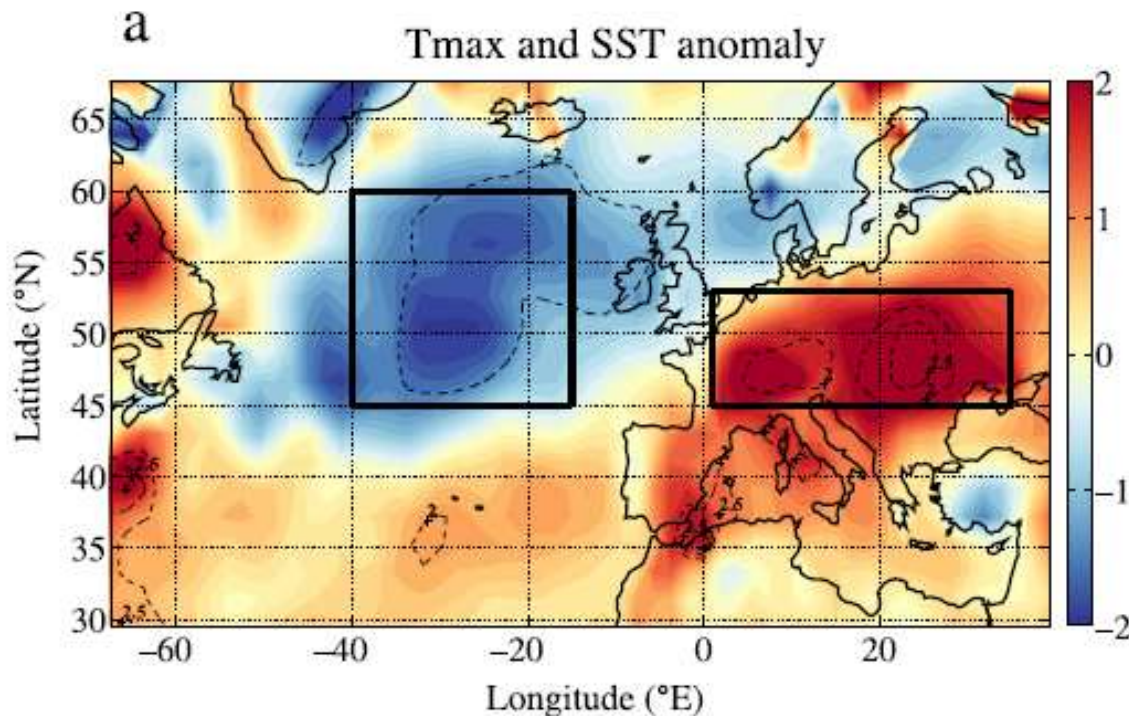
# Quelles conséquences?

LETTER

*Environ. Res. Lett.* 11 (2016) 074004

## Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave

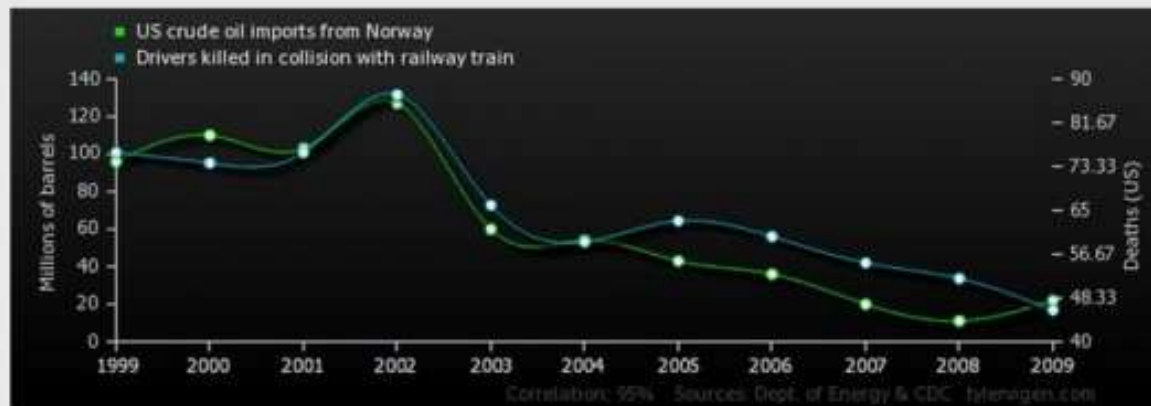
Aurélie Duchez<sup>1,3</sup>, Eleanor Frajka-Williams<sup>2</sup>, Simon A Josey<sup>1</sup>, Dafydd G Evans<sup>2</sup>, Jeremy P Grist<sup>1</sup>, Robert Marsh<sup>2</sup>, Gerard D McCarthy<sup>1</sup>, Bablu Sinha<sup>1</sup>, David I Berry<sup>1</sup> and Joël J-M Hirschi<sup>1</sup>



- Corrélation observée pour les 5 plus fortes canicules depuis 1992
- Le Jet Stream est déplacé vers le sud pendant ces périodes
- Faisceau de présomptions, mais mécanismes non élucidés

# Se méfier des corrélations ...

US crude oil imports from Norway  
correlates with  
Drivers killed in collision with railway train



|                                                                           | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|---------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| US crude oil imports from Norway<br>Millions of barrels (Dept. of Energy) | 96   | 110  | 103  | 127  | 60   | 54   | 43   | 36   | 20   | 11   | 22   |
| Drivers killed in collision with railway train<br>Deaths (US) (CDC)       | 76   | 74   | 76   | 87   | 66   | 59   | 63   | 60   | 55   | 52   | 46   |

Correlation: 0.954509

Magnifique corrélation sur 10 ans entre les importations de pétrole brut en Norvège et le nombre de conducteurs de voitures tués par collision avec un train aux US 🤖

# Conclusion

- L'océanographie est une science jeune, en pleine expansion (1 article tous les 2 jours !)
- Le réseau d'observation est maintenant suffisamment mûr pour détecter des anomalies majeures
- Aujourd'hui, la maintenance et l'optimisation de ce réseau d'observation, la coordination internationale et la gestion des bases de données sont des priorités
- Nous avons encore une longue route pour comprendre les processus qui dominent dans la dynamique de l'océan et sa réponse au changement climatique

**Merci à tous**



# « Perpetual Ocean » ©NASA

