COMPUTATIONAL
CLIMATE & OCEAN GROUP
at UC Davis



L’IA au service des océans et des systèmes marins

Mieux comprendre et renforcer la résilience

Maike Sonnewald

École d’été Climate Change AI 2026

UCDAVIS

Plan

L’océan physique, chimique et biologique

Qu’est-ce qui change ?

Réchauffement, niveau de la mer, acidification, vagues de chaleur marines et leurs répercussions sur le plancton et la pêche

Quelles données pour comprendre et prévoir l’océan ?

Observations in situ, télédétection et modèles numériques, et les lacunes de chacun

Pourquoi l’AA ?

Brève introduction et vue d’ensemble

Études de cas

pCO_2 par satellite, plancton antarctique, attribution des vagues de chaleur et circulation de l’océan Atlantique

Faudrait-il l’appeler la planète Océan ?

L’océan couvre environ 70 % de la surface de la Terre et contient 97 % de son eau.

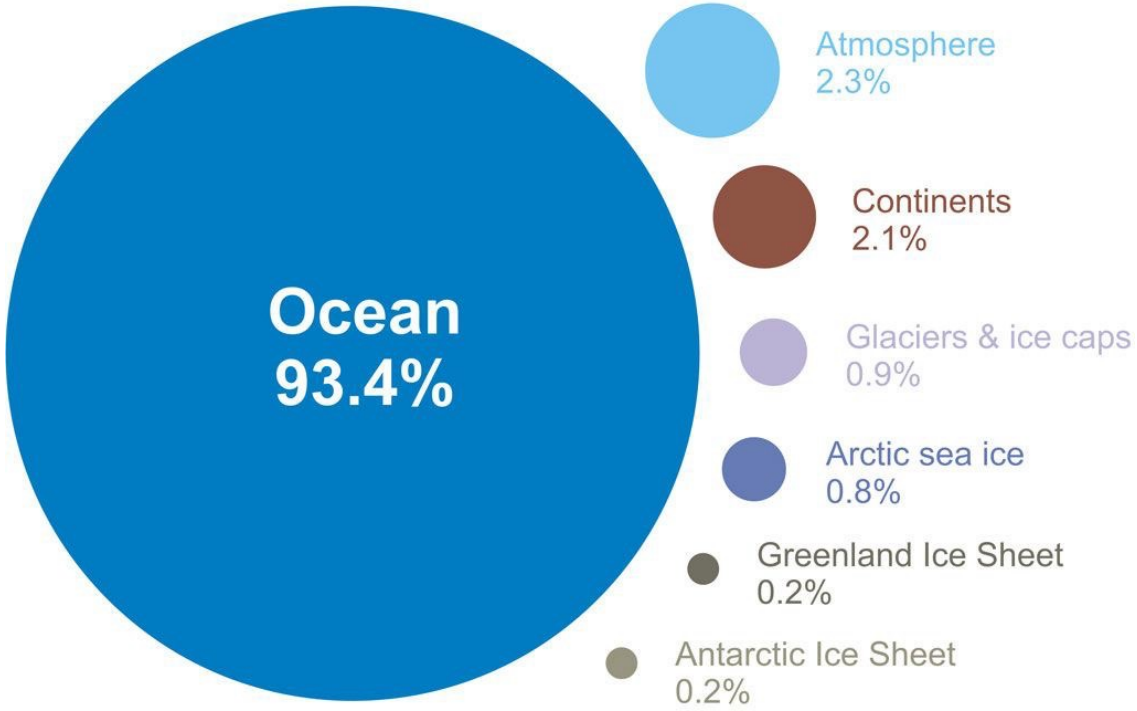


Quelle part de la chaleur ajoutée par l’homme est absorbée par l’océan ?



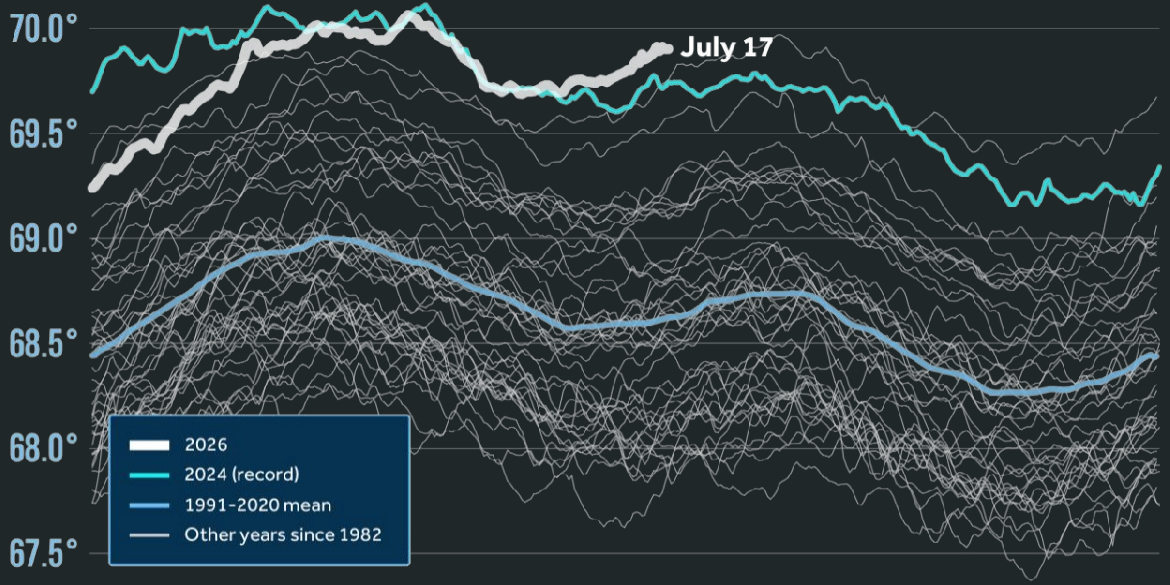
https://partici.fi/86456312

Where is global warming going?



http://skepticalscience.com/

Température moyenne quotidienne de surface de l'océan mondial (ºF)



Data for 2026 includes January 1 through July 17. Source: NOAA OISSTv2.1.

Les services rendus par l’océan



71%

of Earth’s surface is ocean



~90%

of global-warming heat is stored in the ocean



~25%

of our CO_2 emissions absorbed by the sea



50%+

of the oxygen you breathe made by ocean plankton

L’océan comprend des bassins de tailles différentes

Le plus petit : l’Arctique, 5,4 millions de miles carrés

Le plus grand : le Pacifique, > 60 millions de miles carrés

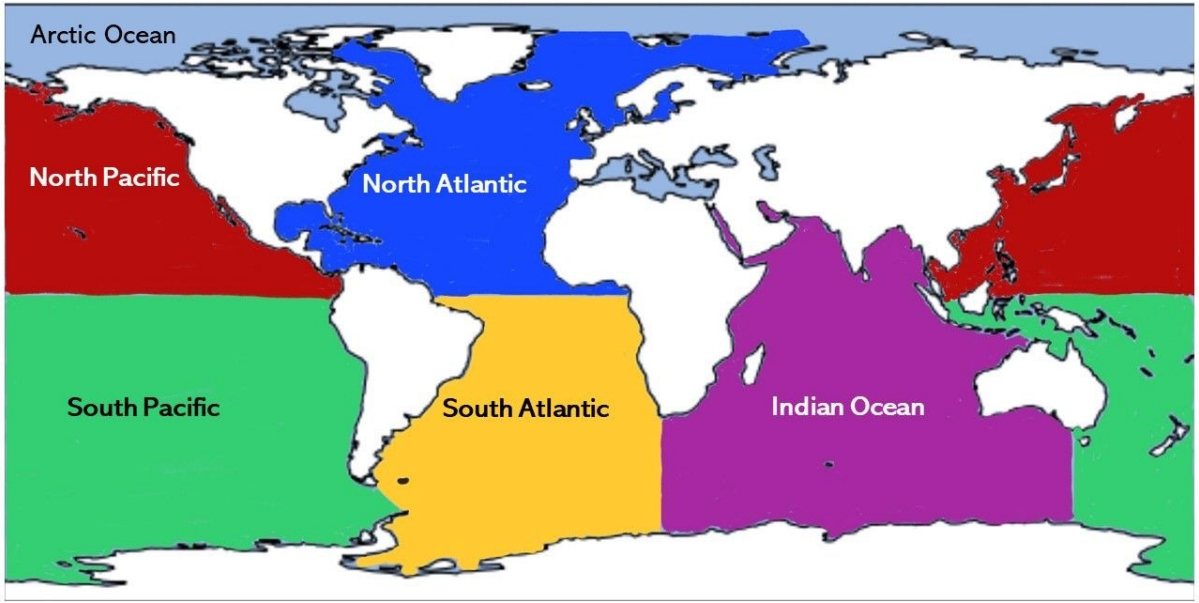
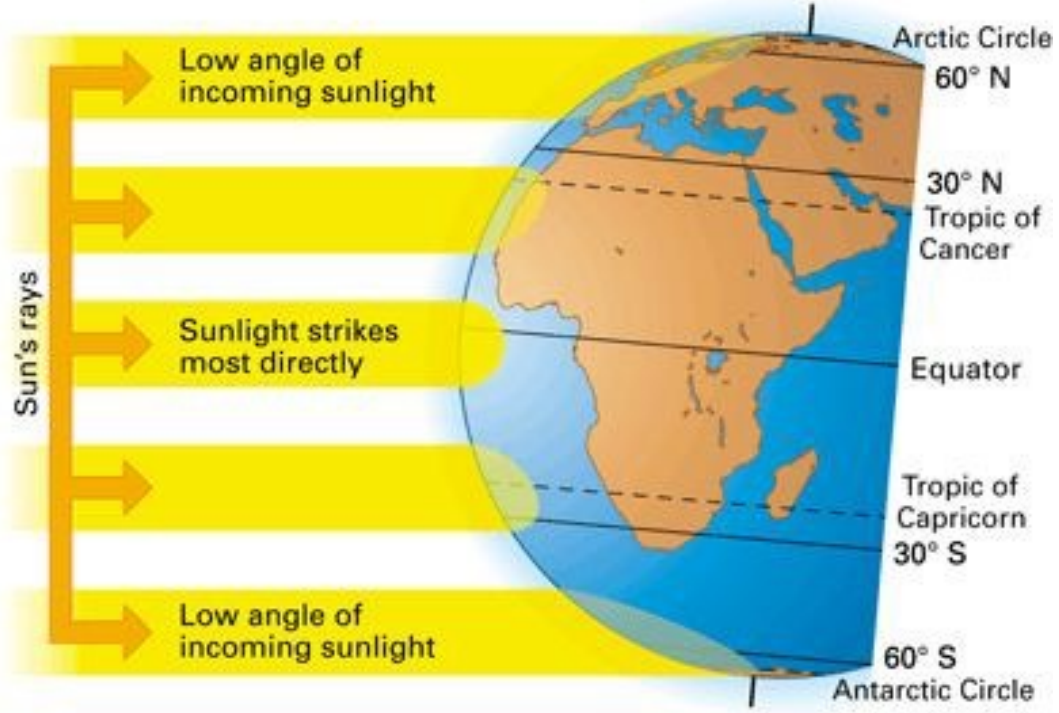


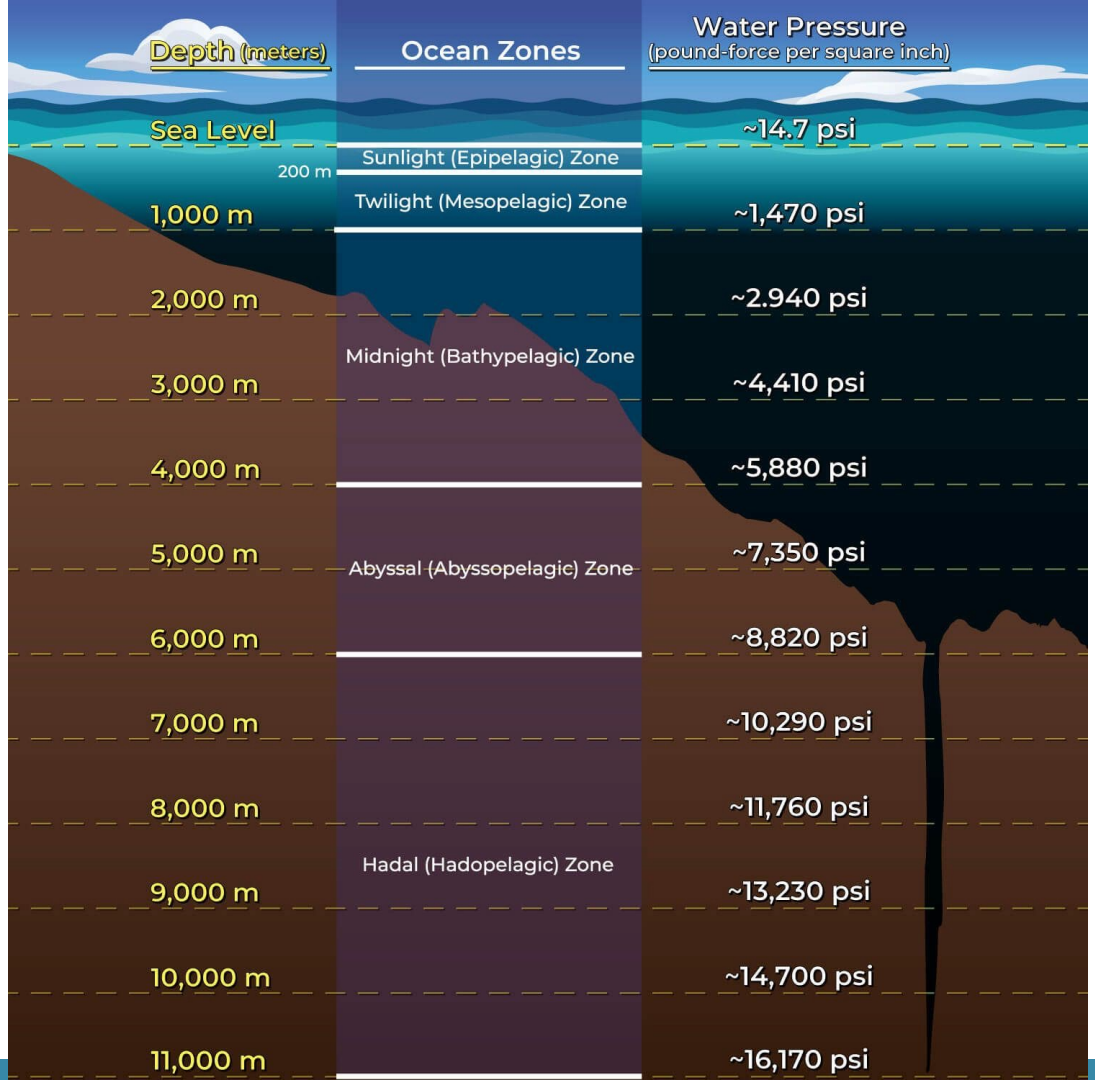
Image : wikipedia.com

Un réchauffement inégal a un fort impact



himaya.com

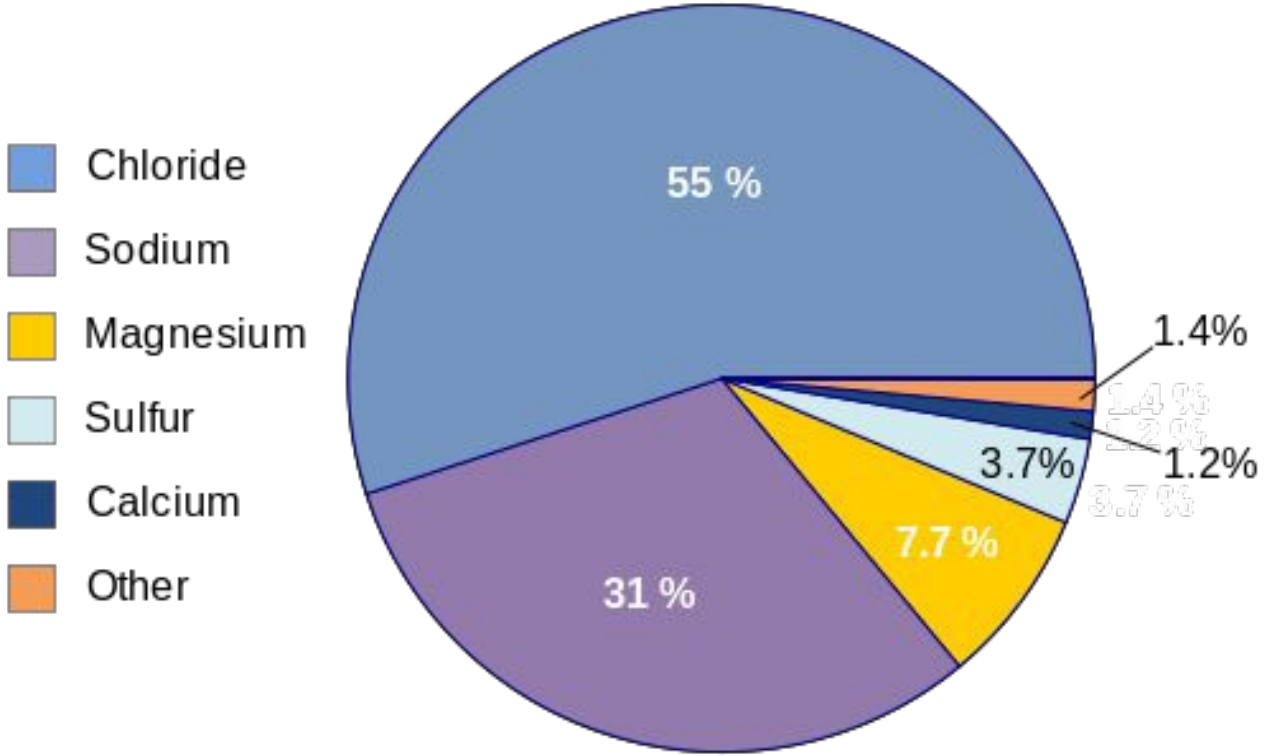
Lumière



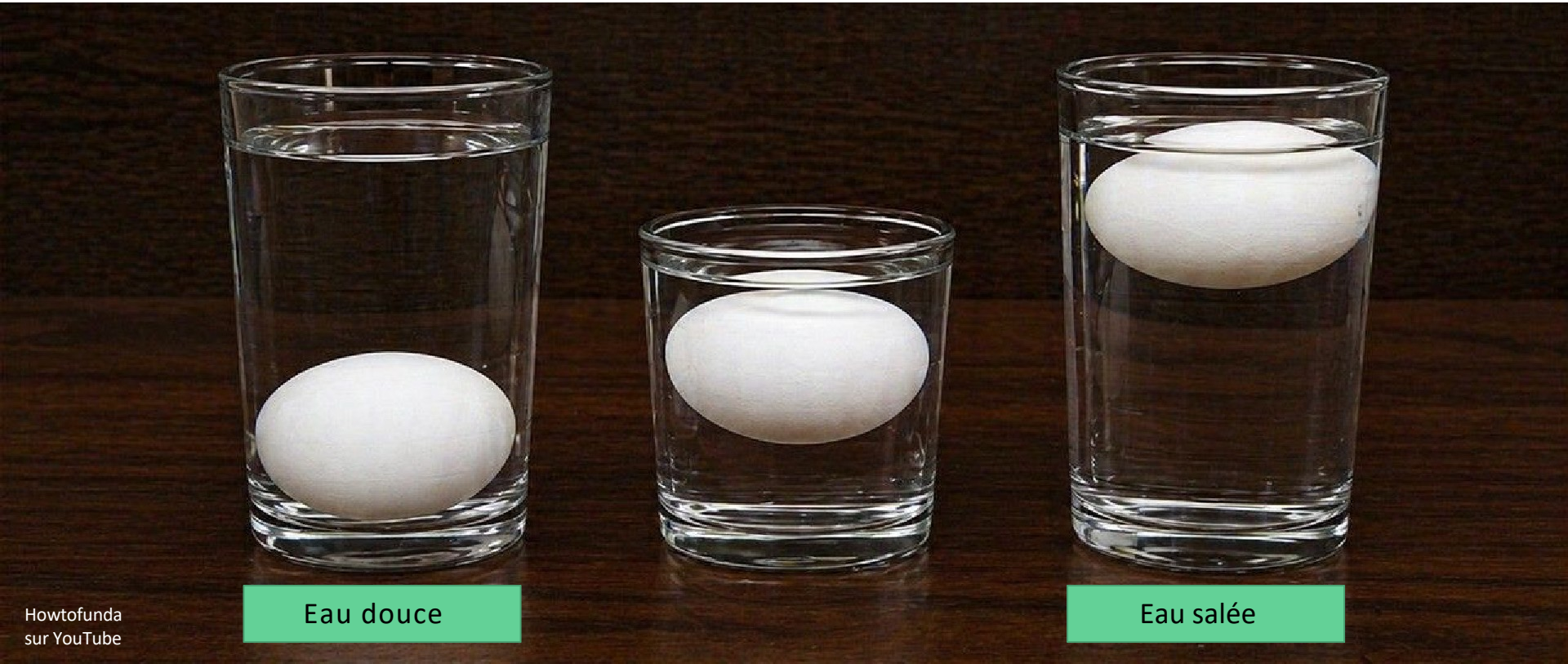
Pression

surfertoday.com

L’eau de mer se compose d’eau et d’autres composés

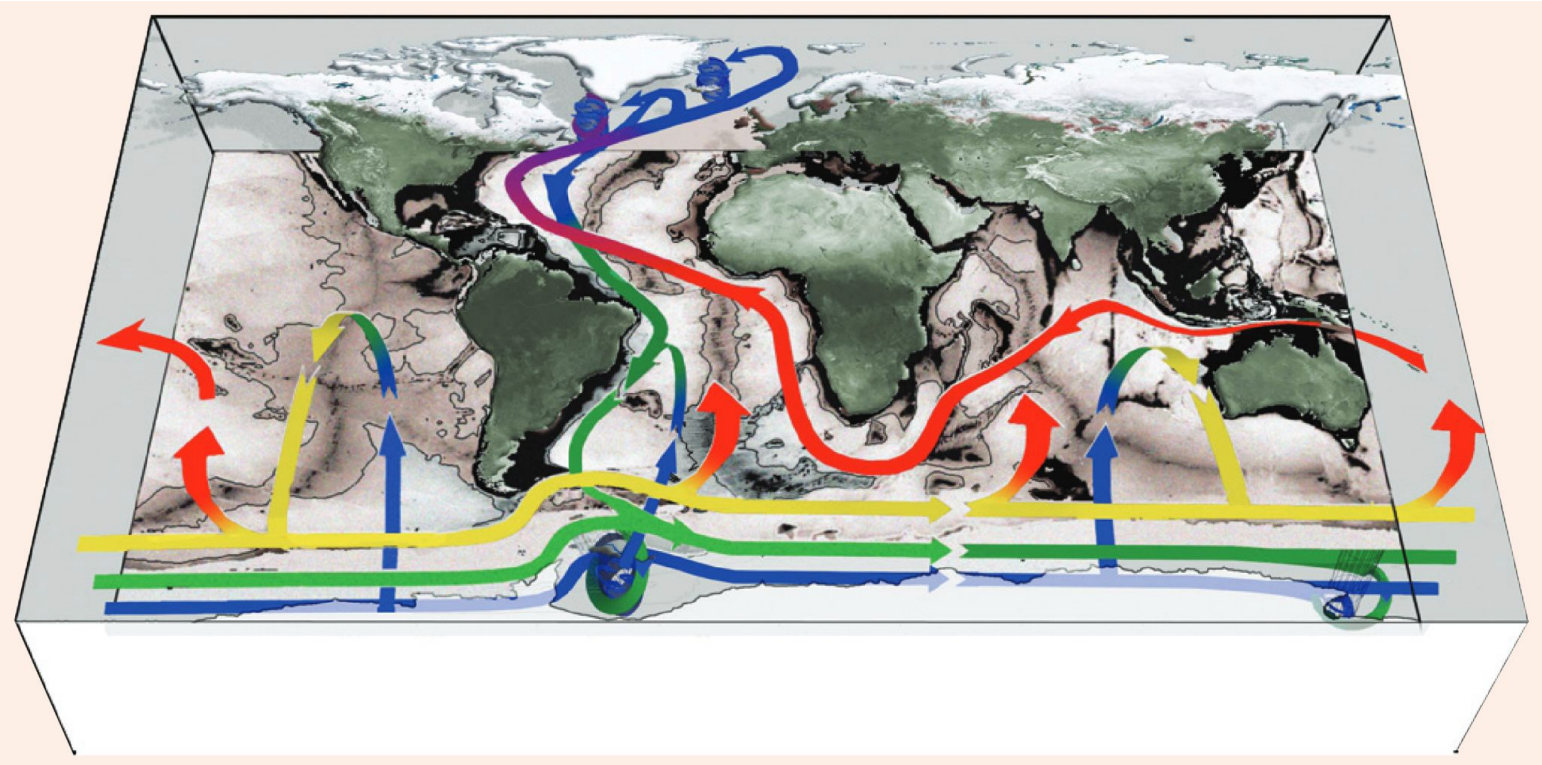


L’eau salée est plus dense que l’eau douce



Howtofunda
sur YouTube

La circulation océanique est un phénomène mondial émergent

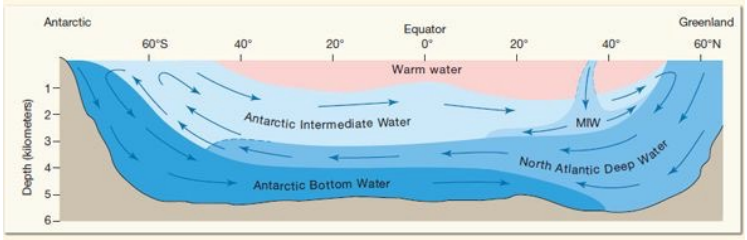


[Marshall & Speer, 2012]

Froid

Chaud

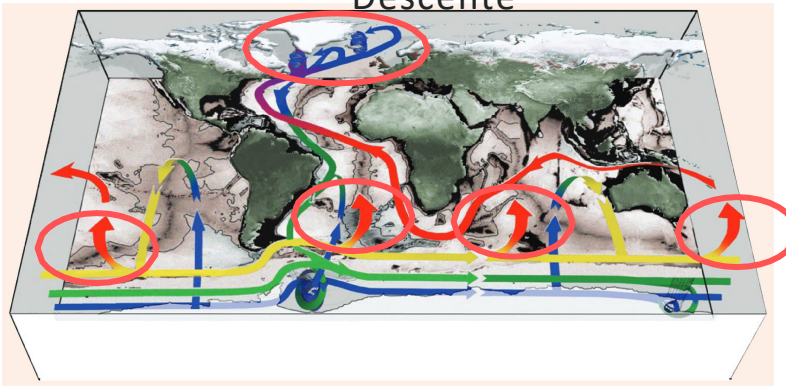
Un « tapis roulant » mondial



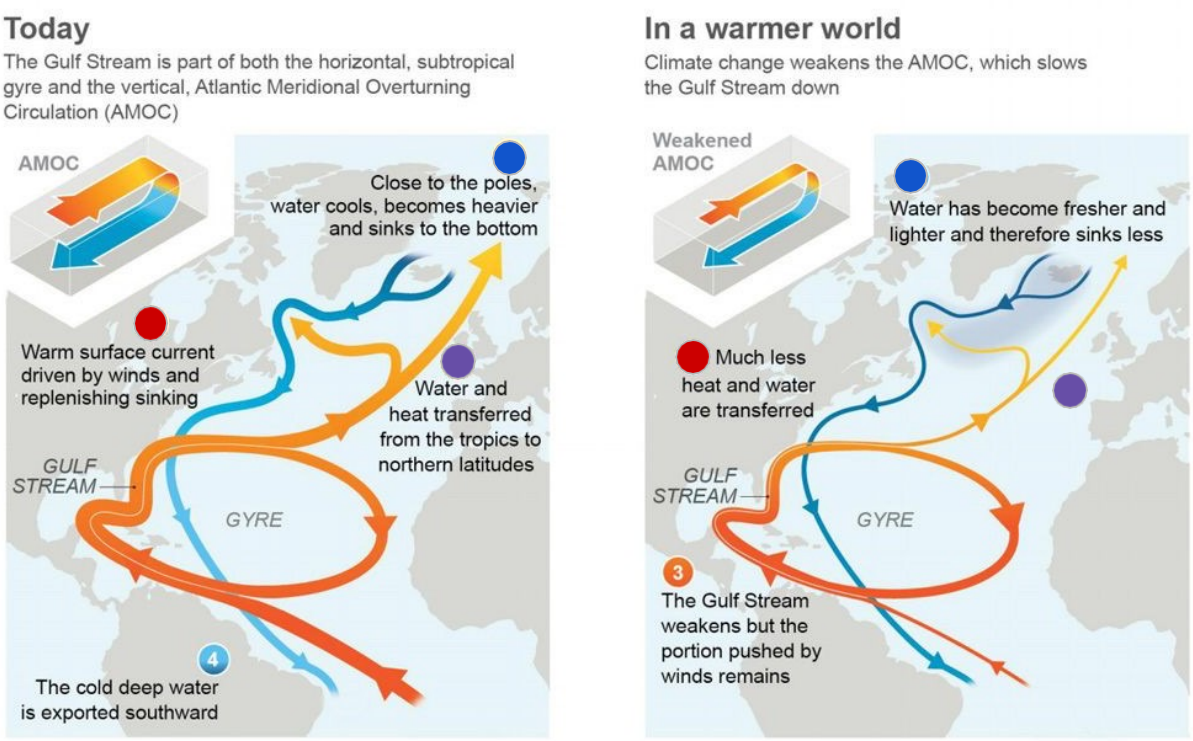
- L'océan est stratifié, l'eau la plus lourde/dense se trouvant au fond
- Le fort refroidissement et la formation de glace aux pôles créent des eaux très denses

- Un réchauffement/refroidissement asymétrique, combiné au rejet de saumure lors de la formation de la glace, crée la circulation thermohaline
- On parle de « circulation méridienne de retournement »

Les changements de la circulation de retournement ont un fort impact climatique



Les grands courants pourraient changer dans un climat plus chaud : l'exemple du Gulf Stream

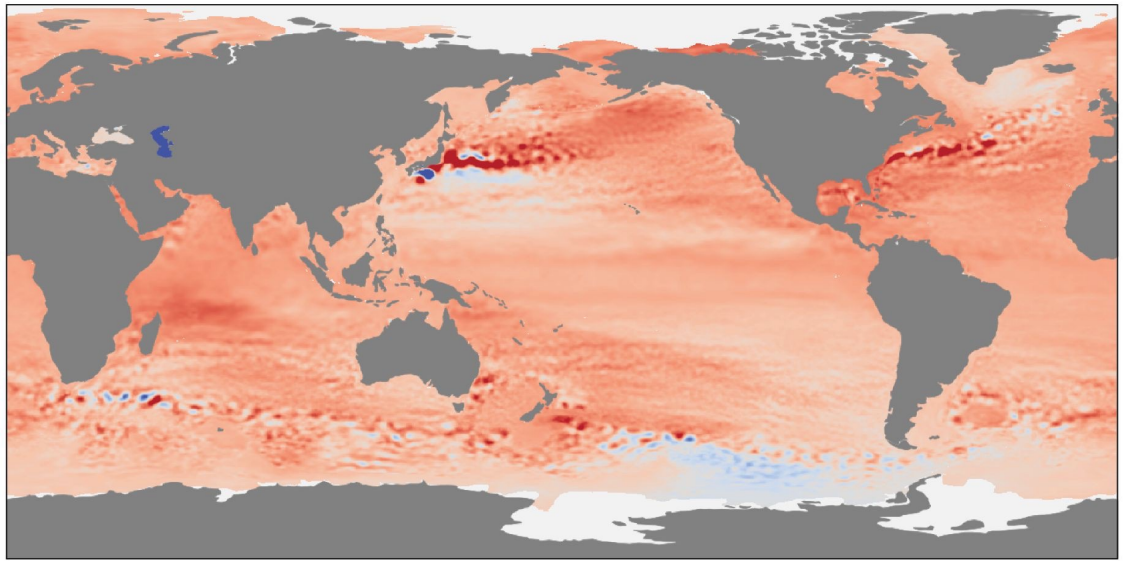


- Le Gulf Stream se déplace vers le nord
- Le trajet de l'apport de chaleur se déplace
- Eaux moins denses/lourdes

6e rapport d'évaluation du GIEC

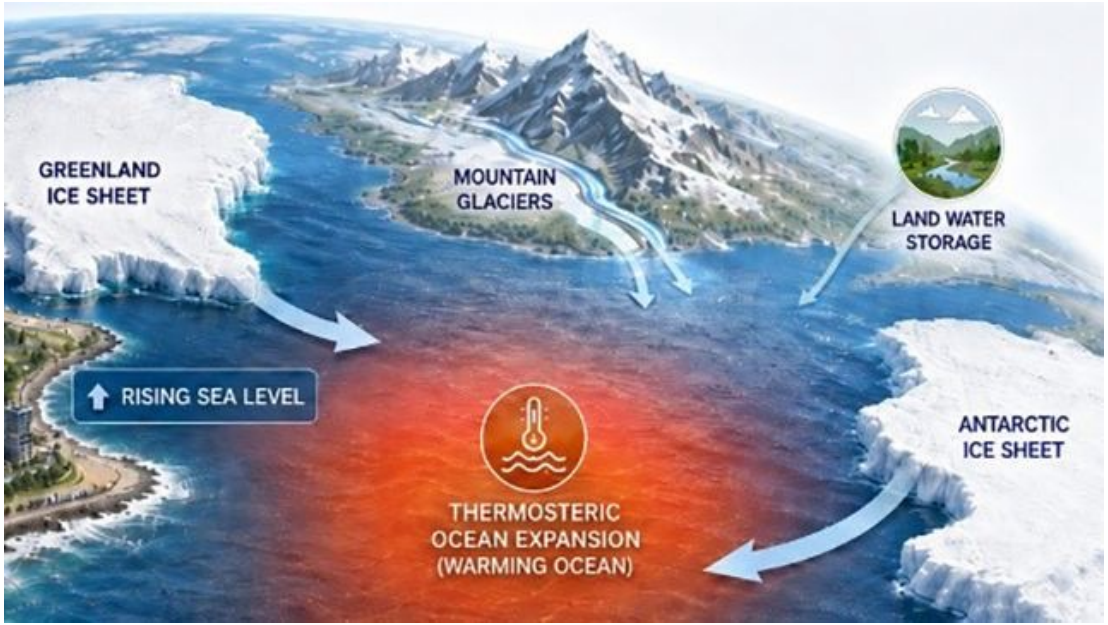
Sea level trends from February 1999 to May 2025

Data: CMEMS Ocean Monitoring Indicator based on C3S sea level product • Credit: C3S/ECMWF/CMEMS



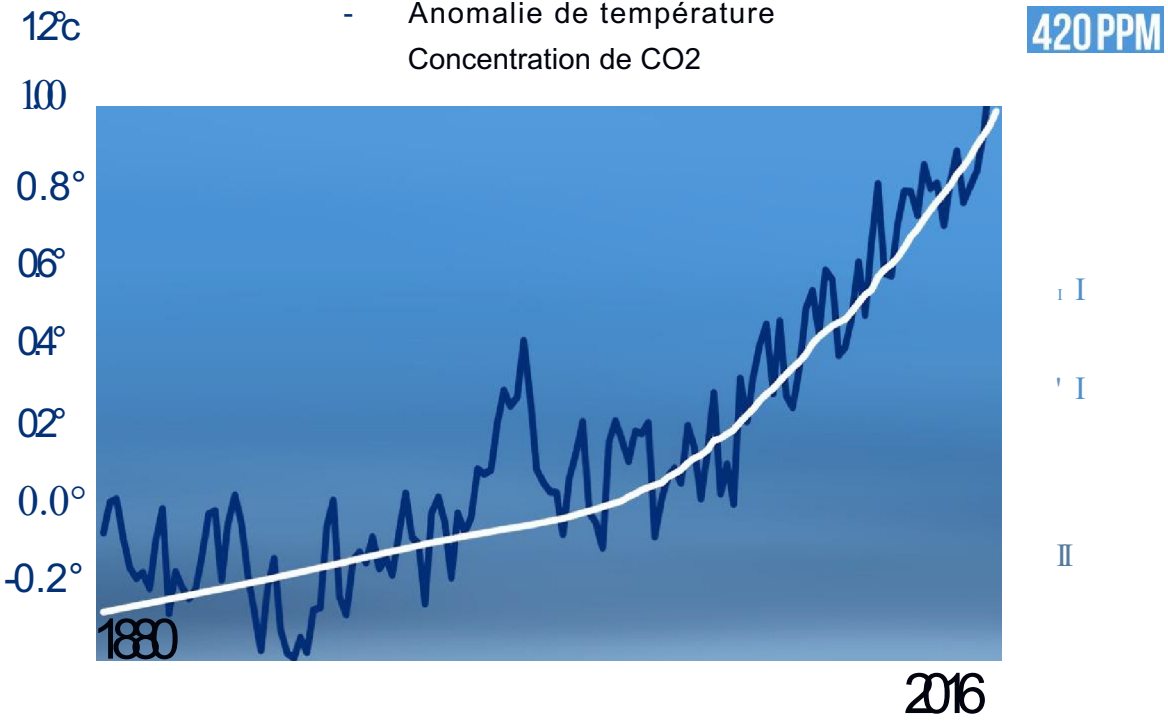
PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION
Copernicus Europe's eyes on Earth
Climate Change Service
IMPLEMENTED BY ECMWF

L’élévation du niveau de la mer a plusieurs causes



sciencealert.com

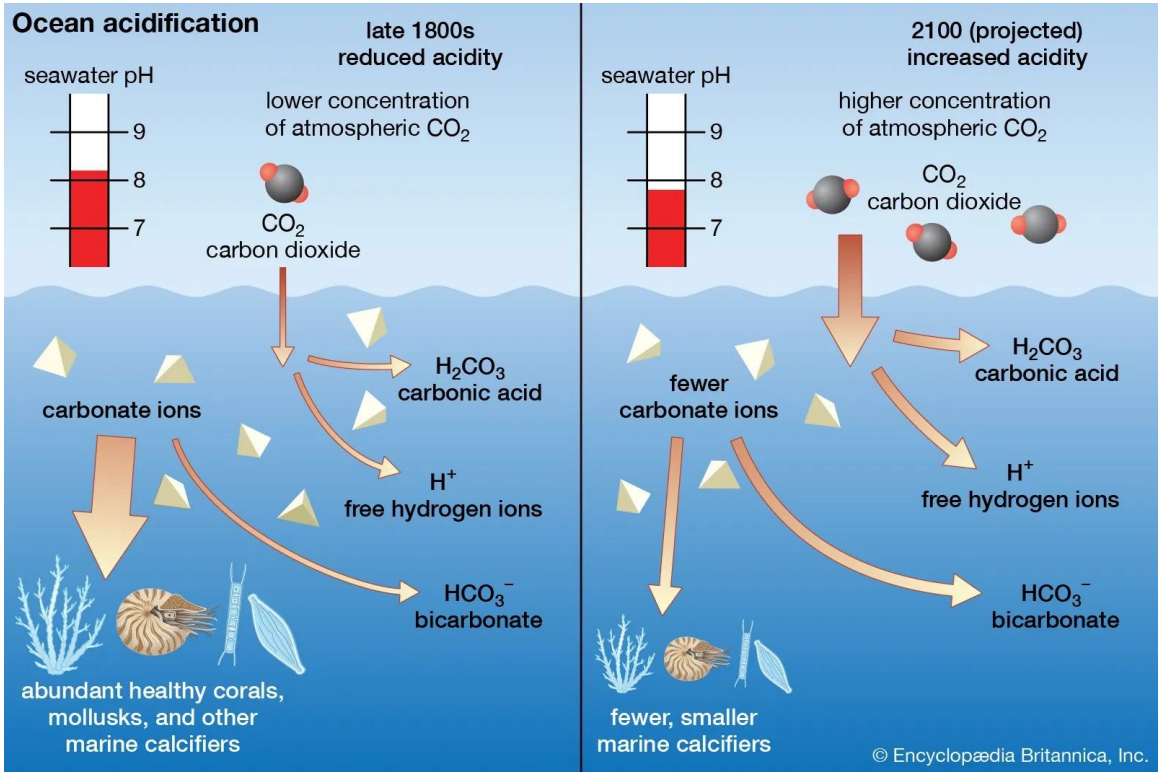
Température mondiale et dioxyde de carbone



Global temperature data averaged and adjusted to early industrial baseline (1881-1910).
Source: NASA GISS, NOAA NCEI, ESRL

CLIMATE CENTRAL

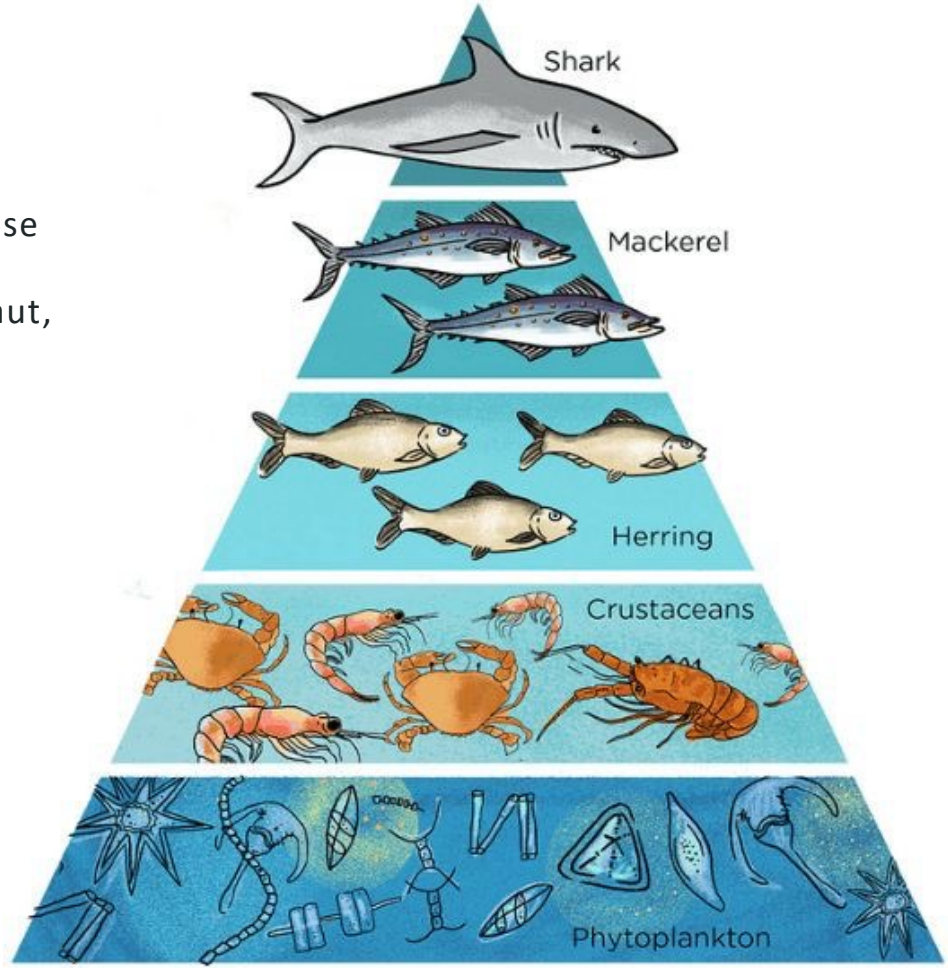
Le changement climatique rendra l'océan plus acide



britanica.com

La vie marine

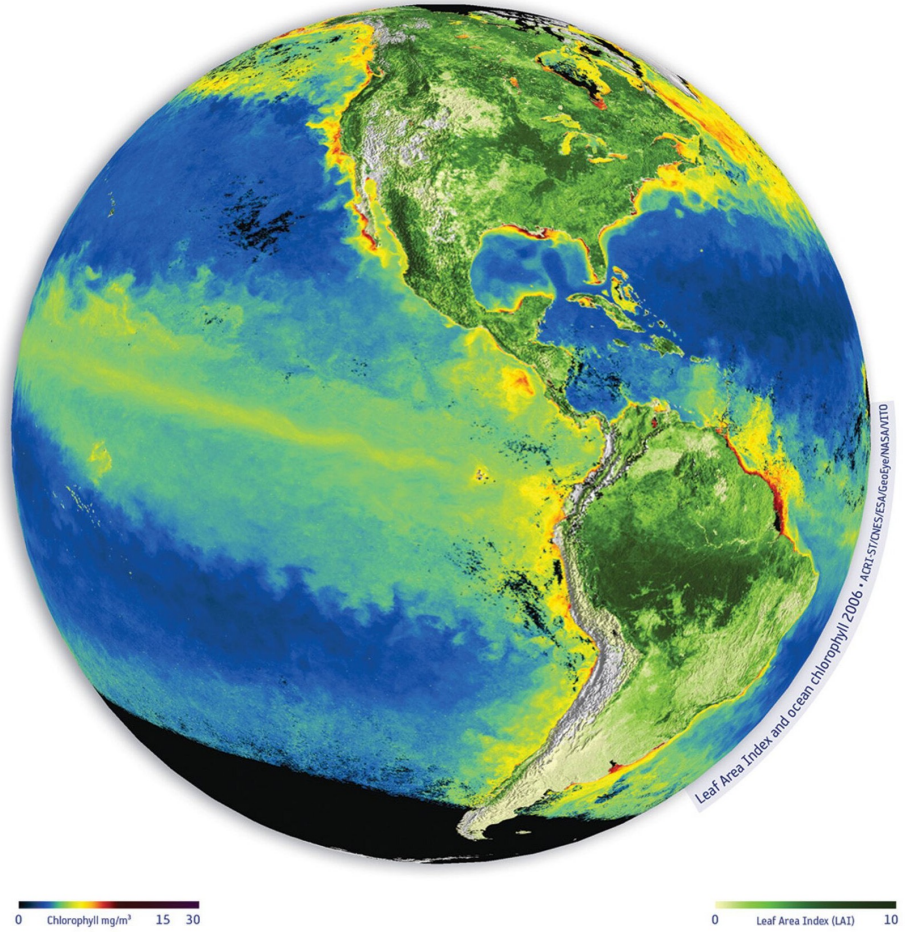
Le réseau trophique repose sur les « plantes » océaniques, avec, plus haut, des espèces très diverses



ocean.org

La base : le plancton

Comme les plantes terrestres, le plancton produit de la chlorophylle et a besoin de lumière et de nutriments pour croître ; il en existe de nombreux types



La base : le plancton

Les nombreux types couvrent plusieurs ordres de grandeur de taille et occupent des « niches » différentes, qui s'expriment par exemple dans ce dont ils ont besoin pour prospérer :

Certains construisent des coquilles, d'autres fabriquent leurs propres nutriments !

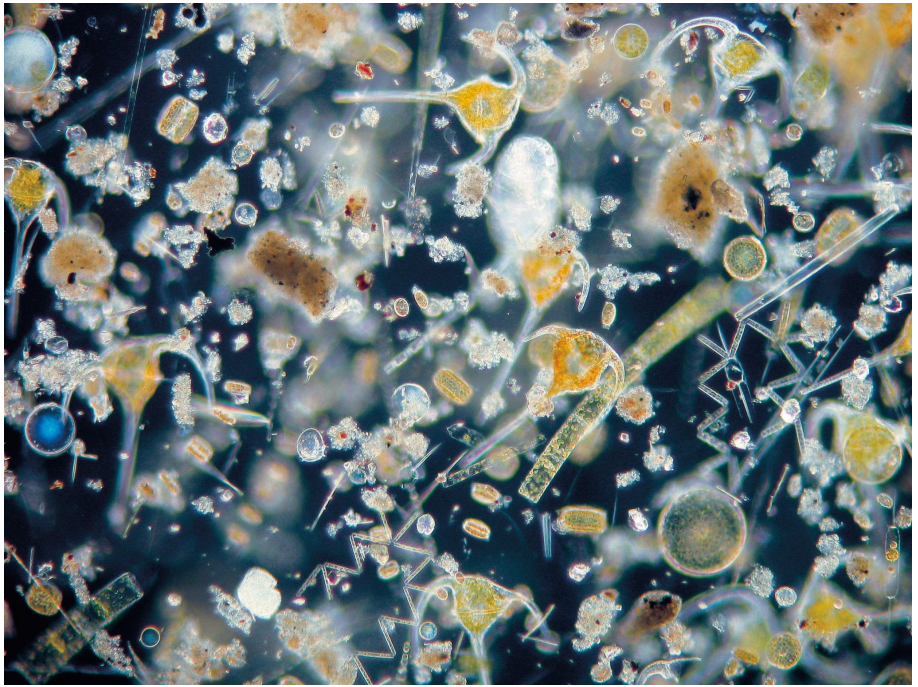
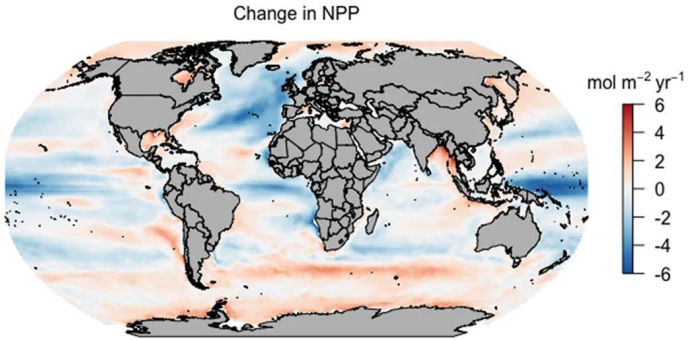


Photo : Annegret Stuhr, GEOMAR

La base : le plancton

La production primaire nette (PPN) devrait changer radicalement



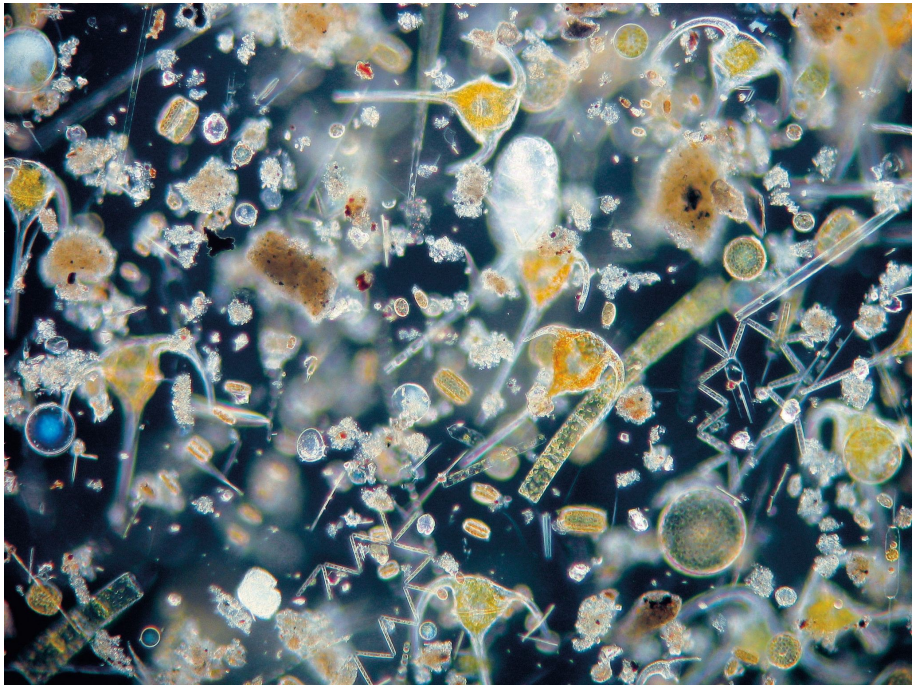


Photo : Annegret Stuhr, GEOMAR
Ratnarajah et al., 2023

La base : le zooplancton

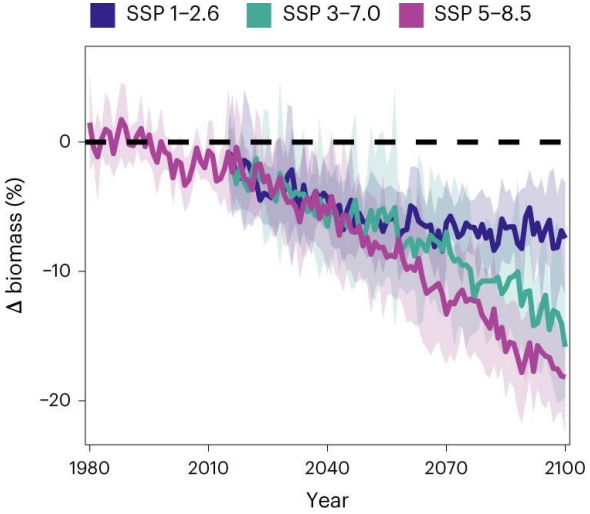
Ces organismes microscopiques qui « broutent » d'autres planctons varient aussi beaucoup en taille et en forme



Tyler Rohr http://communities.springernature.com/

Pêche et conservation

Les poissons dépendent du zooplancton pour se nourrir



Heneghan et al., 2023

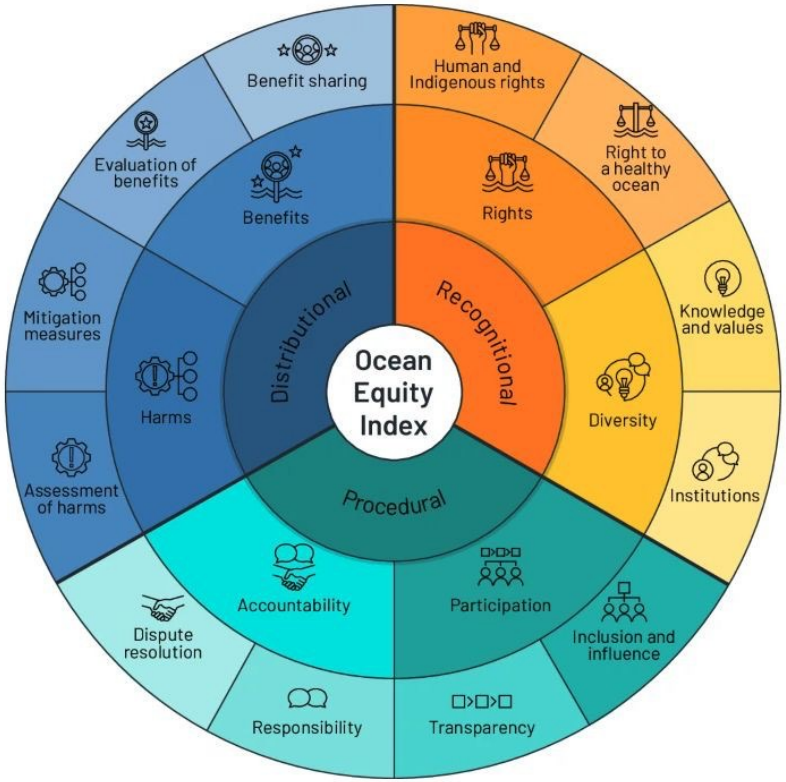


400 tonnes de chinchards capturés par un senneur chilien.
Photo via Wikimedia Commons.

Équité et parties prenantes

Qui porte le risque ? Qui en profite ?

Certaines communautés sont plus vulnérables que d’autres, par exemple celles des États côtiers de faible altitude ou celles qui vivent de la pêche, et peuvent manquer de moyens pour s’adapter



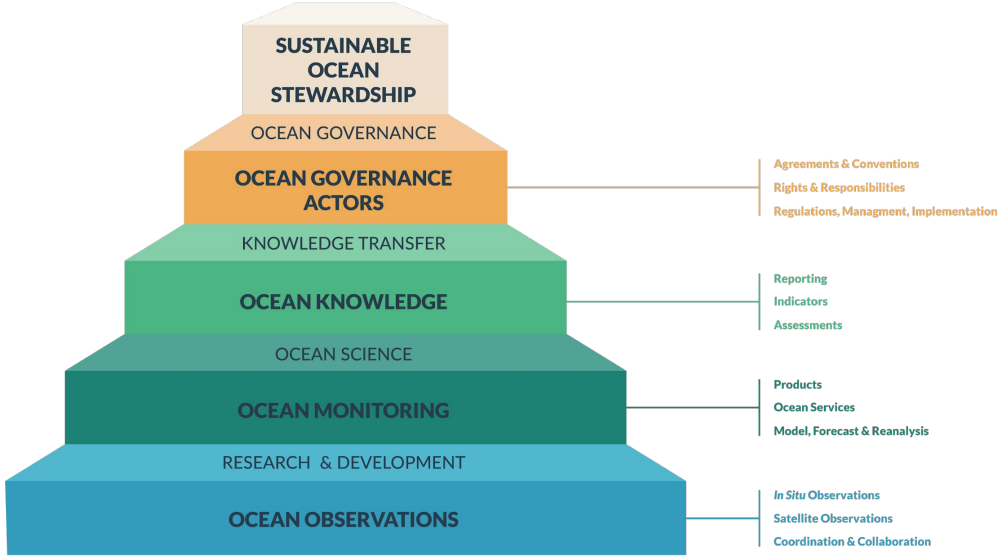
Blythe et al., 2026

Ressources et gouvernance des océans

Les ressources océaniques couvrent un large éventail d'activités : pêche, tourisme, transport maritime et protection de l'environnement

La plupart des gouvernements ont leurs propres politiques, avec quelques instances régionales et mondiales, et des lois régissant les eaux internationales

Il existe des initiatives mondiales de conservation des océans, comme l'objectif « 30 x 30 », qui vise à protéger 30 % des terres et des océans d'ici 2030

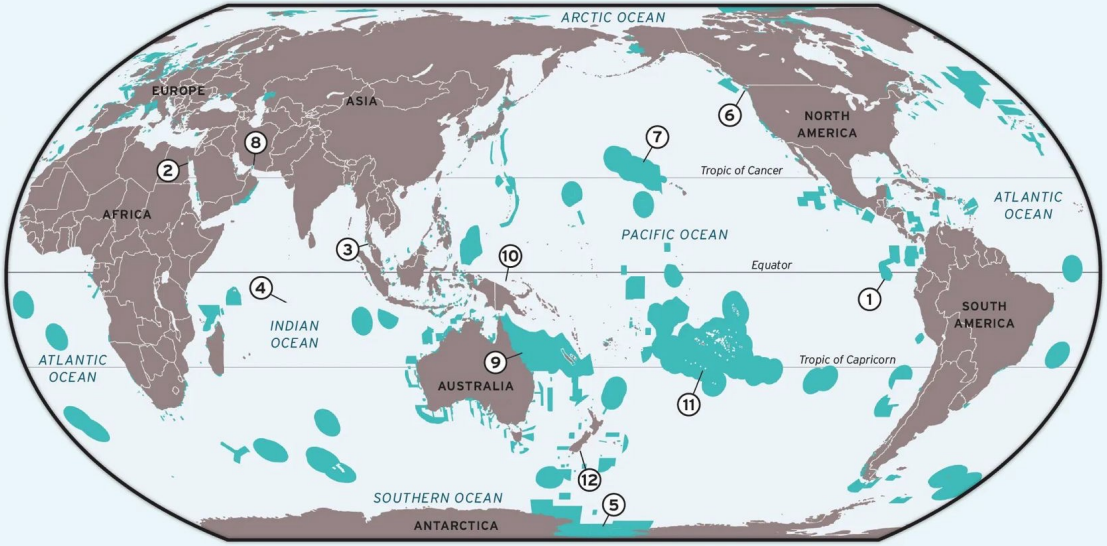


marine.copernicus.eu

2. Selon vous, quelle part de l’océan est actuellement une aire marine protégée capable de protéger la biodiversité ?

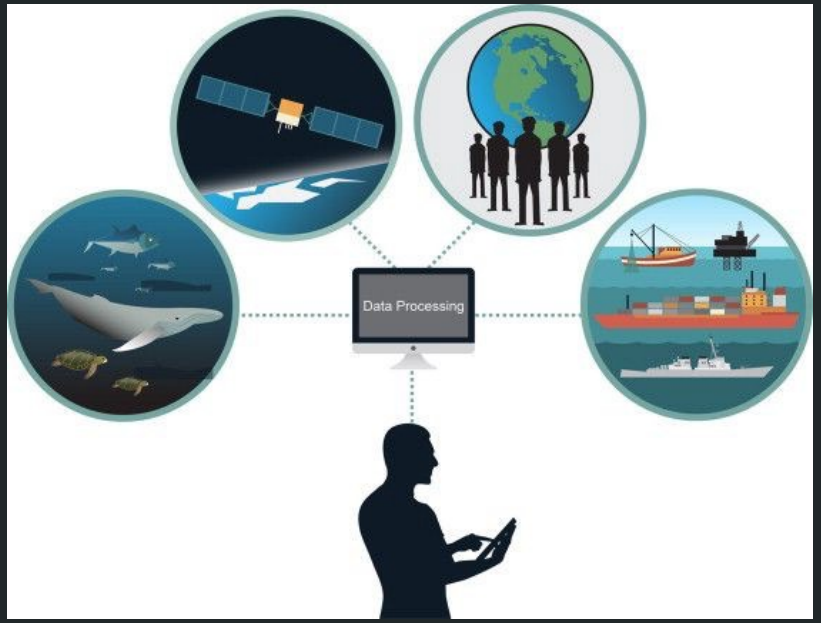
https://partici.fi/86456312

Aires marines protégées



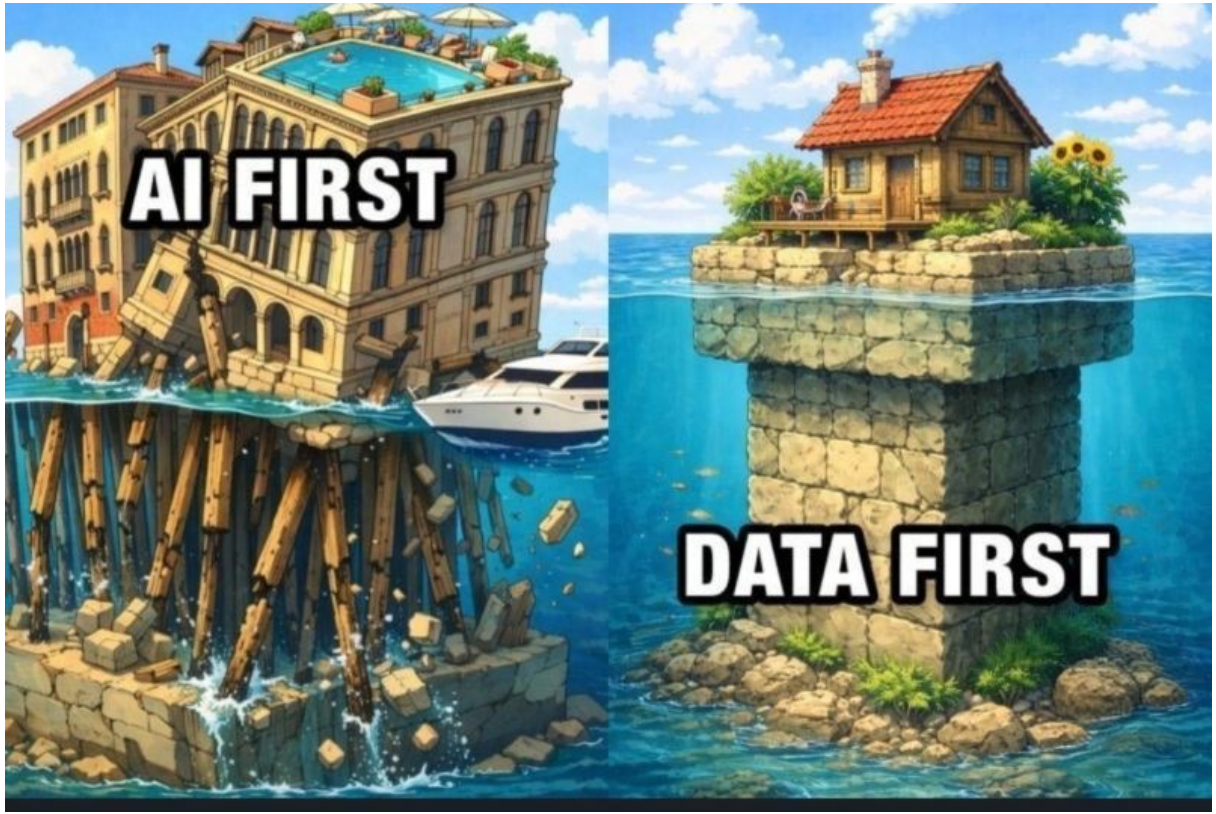
Révolution ou problème de données ?

Sommes-nous riches en données et pauvres en compréhension, ou pauvres en données et riches en compréhension ?



Maxwell et al., 2015

Notre IA ne vaut que ce que valent nos données

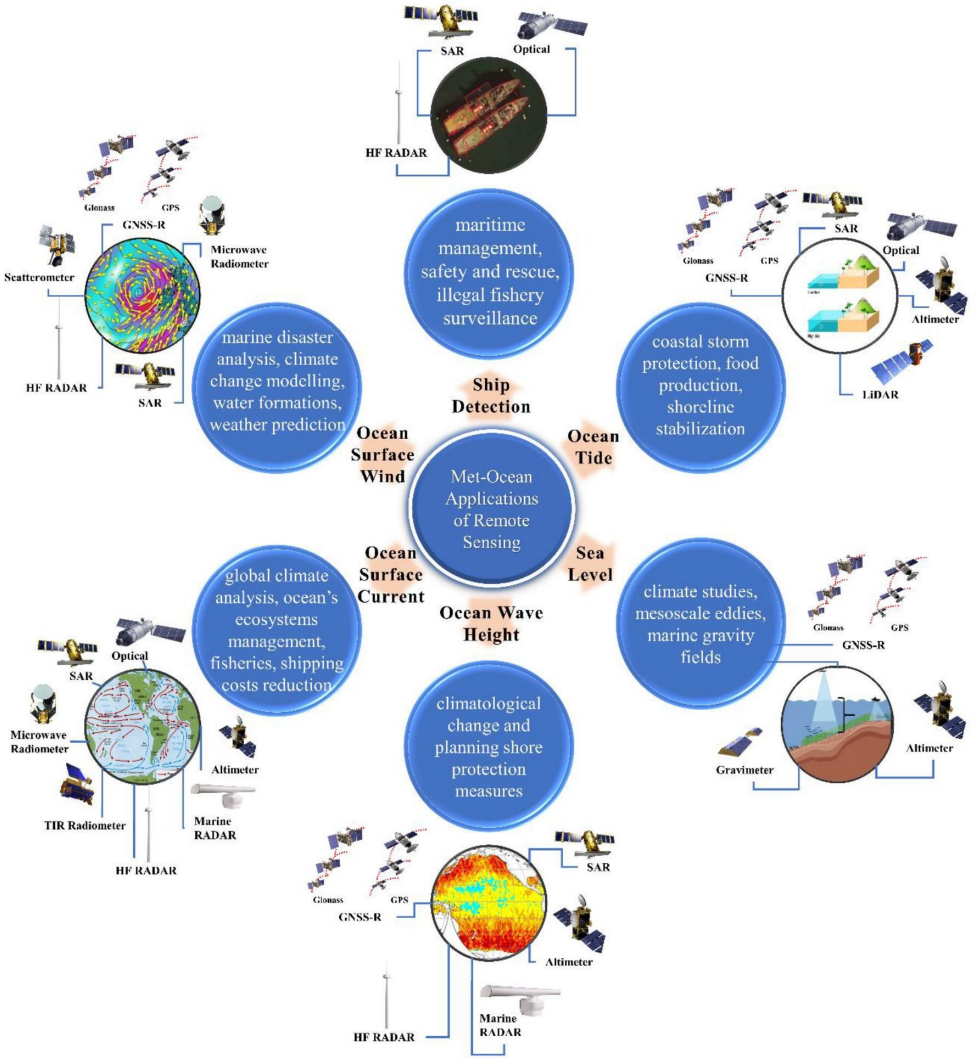


linkedin.com

Observations : collectées « in situ »

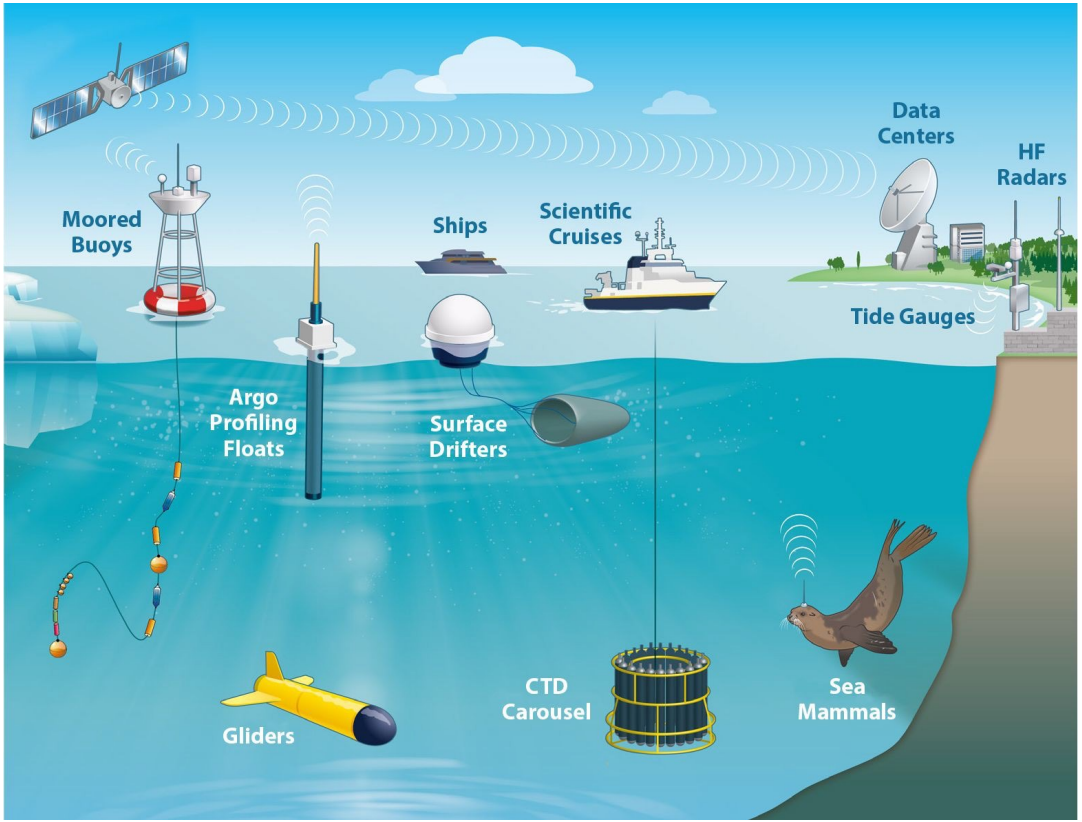


Observations : télédétection



Amani et al., 2022

Observations : un réseau mondial



Les observations peuvent bénéficier d'un petit coup de main

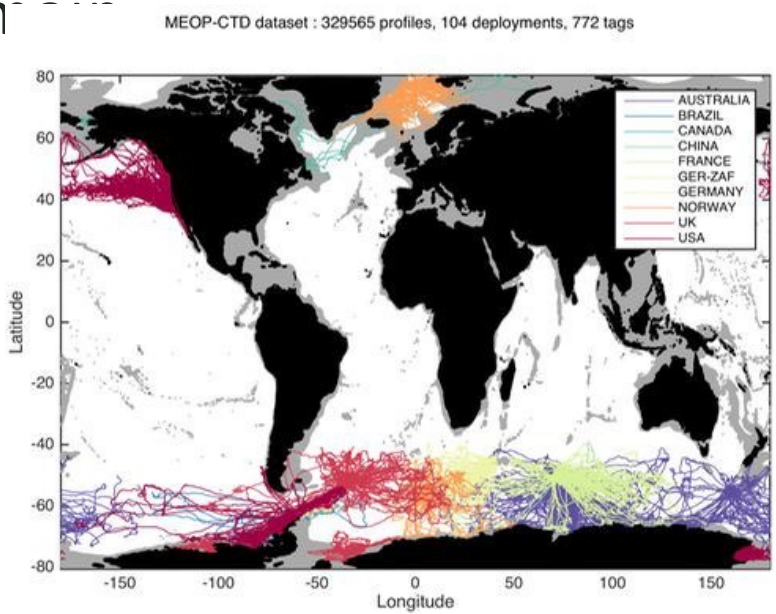
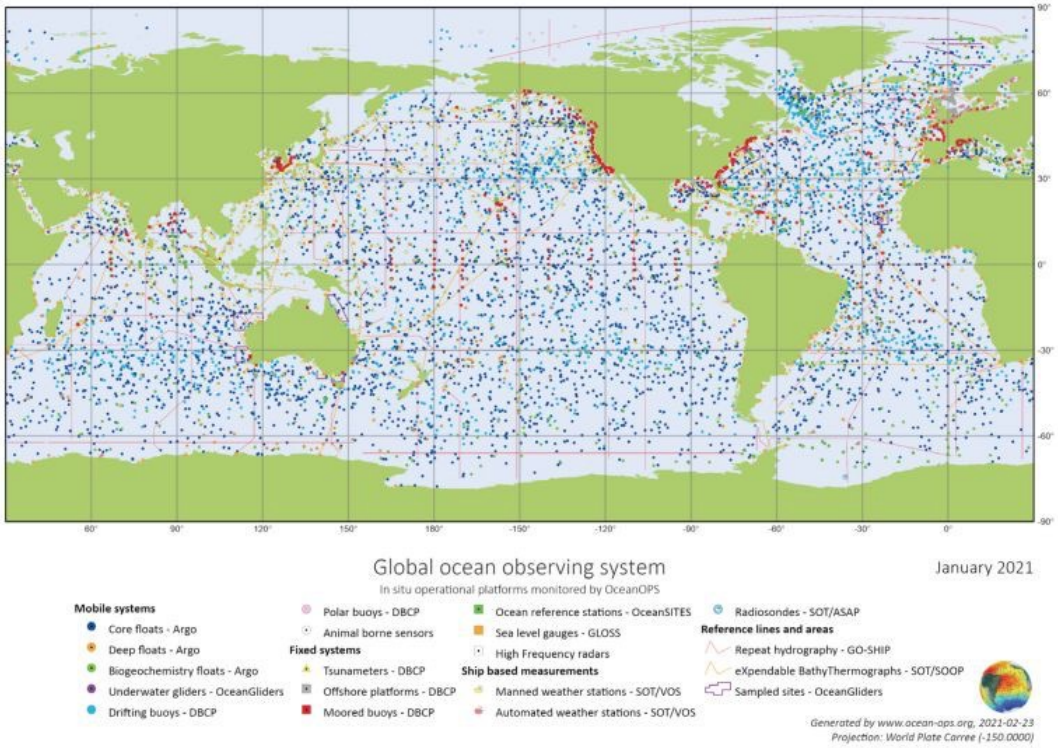


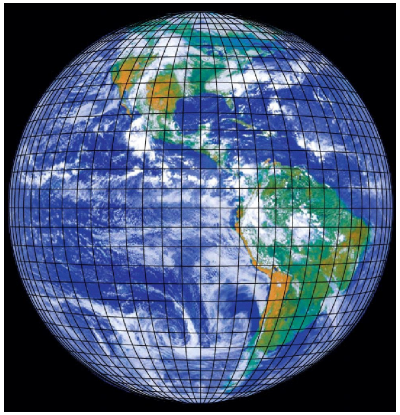


Photo : D. Costa

De l’équité dans les observations ?

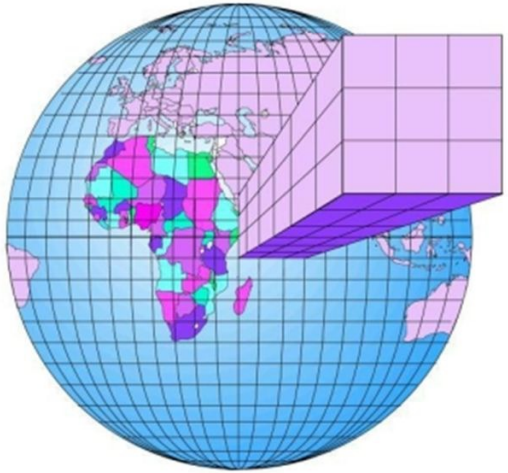


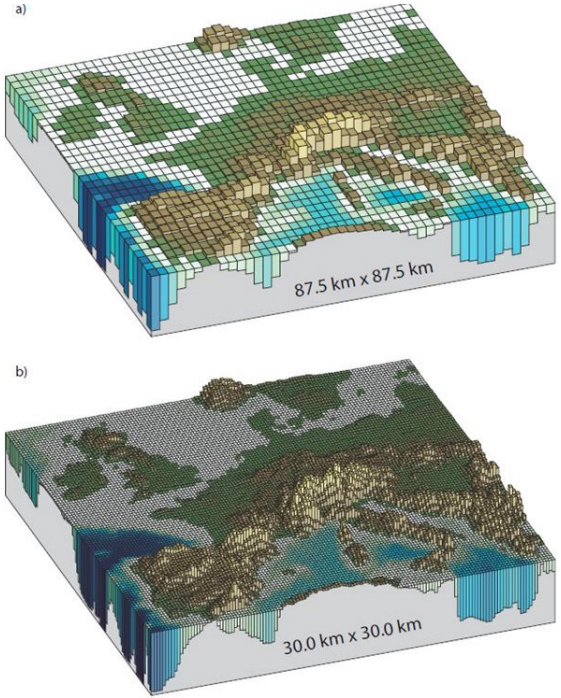
Modèles numériques



Les grilles s’étendent vers le bas, dans les sols et les océans.

Comme à la télévision, une résolution plus élevée apporte plus de réalisme





Modèles numériques : équations primitives

Navier-Stokes + équation d'état : fluide mince en rotation sur une sphère

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial z}\right) + F_u, \quad \text{Momentum (u component)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial z}\right) + F_v \quad \text{Momentum (v component)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad \text{density}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \text{continuity}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u\frac{\partial \theta}{\partial x} + v\frac{\partial \theta}{\partial y} + w\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial \theta}{\partial z}\right) + F_\theta, \quad \text{Advection of temperature}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x} + v\frac{\partial s}{\partial y} + w\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial s}{\partial z}\right) + F_s, \quad \text{Advection of salinity}$$

$$\rho = \rho(\theta, s), \quad \text{Density as a function of S and T}$$

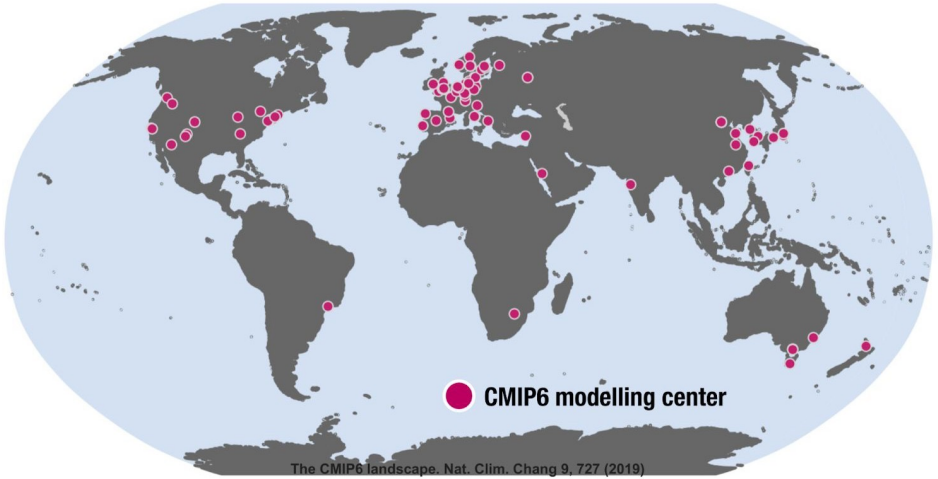
Le projet d’intercomparaison des modèles climatiques (CMIP)

WCRP CMIP6

World Climate Research Programme

Les centres de modélisation collaborent à l’échelle mondiale pour mener et partager des expériences sur la façon dont

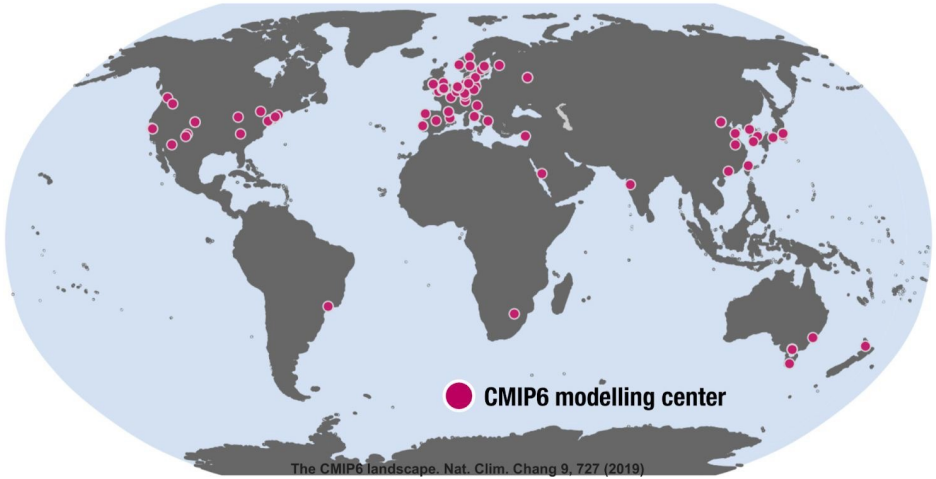
les actions des sociétés influenceront le climat



De l’équité dans le développement des modèles et le partage des données ?

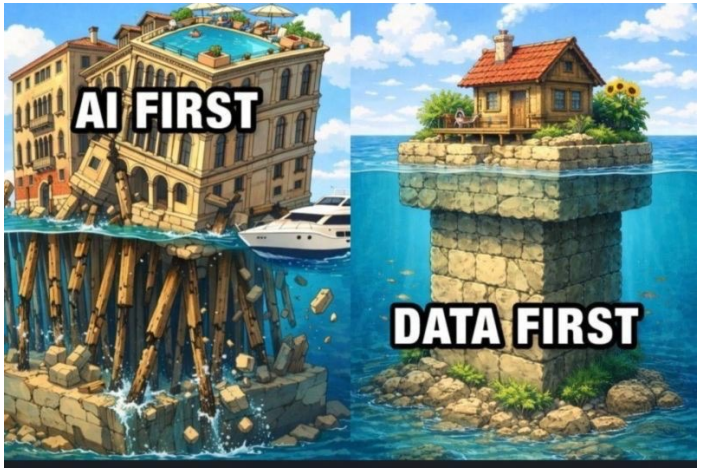
Peu de modèles sont développés dans l’hémisphère Sud : la connaissance de ces régions peut donc être moins bien prise en compte

Seule une partie des données peut effectivement être partagée : les données permettant de comprendre, par exemple, pourquoi l’océan change sont difficiles à obtenir



Soutenir la collecte de données est essentiel

Il est tentant de ne se concentrer que sur l'IA, mais il est crucial de continuer à soutenir l'amélioration des données dont dépend l'IA



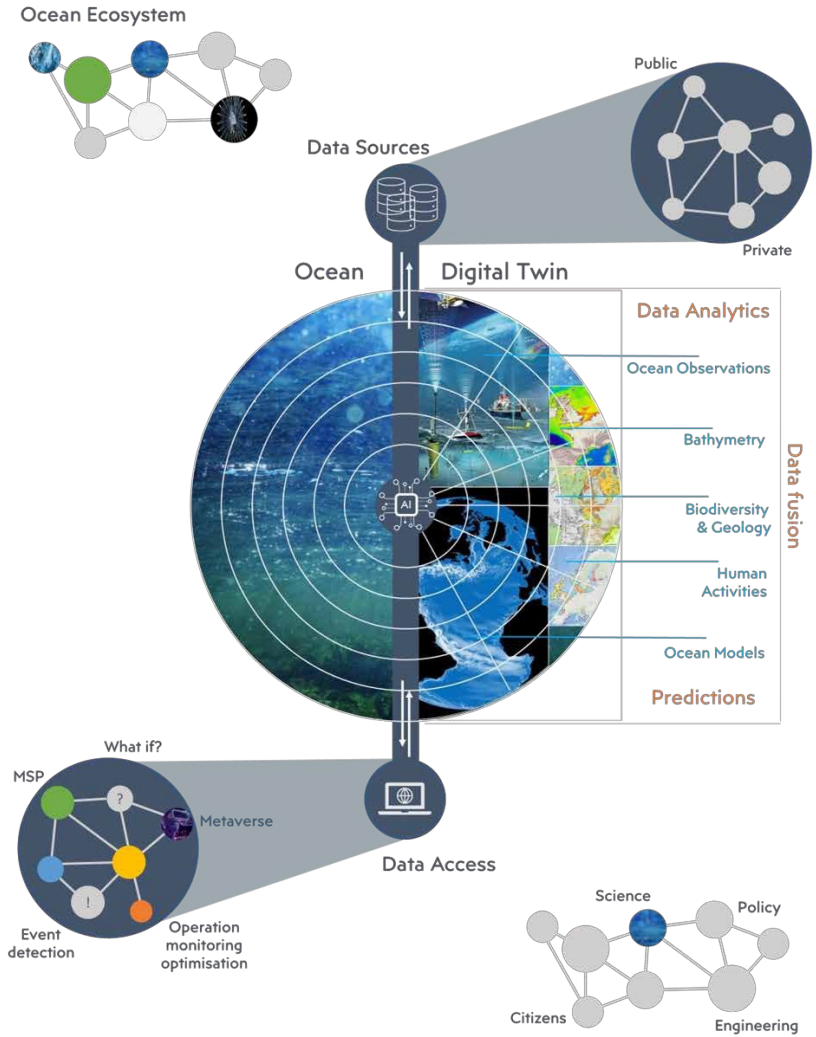
Créer des jeux de données représentant de façon équilibrée les lieux et les développeurs peut améliorer l'équité

Pause : selon vous, que faut-il protéger en priorité dans l’océan ?

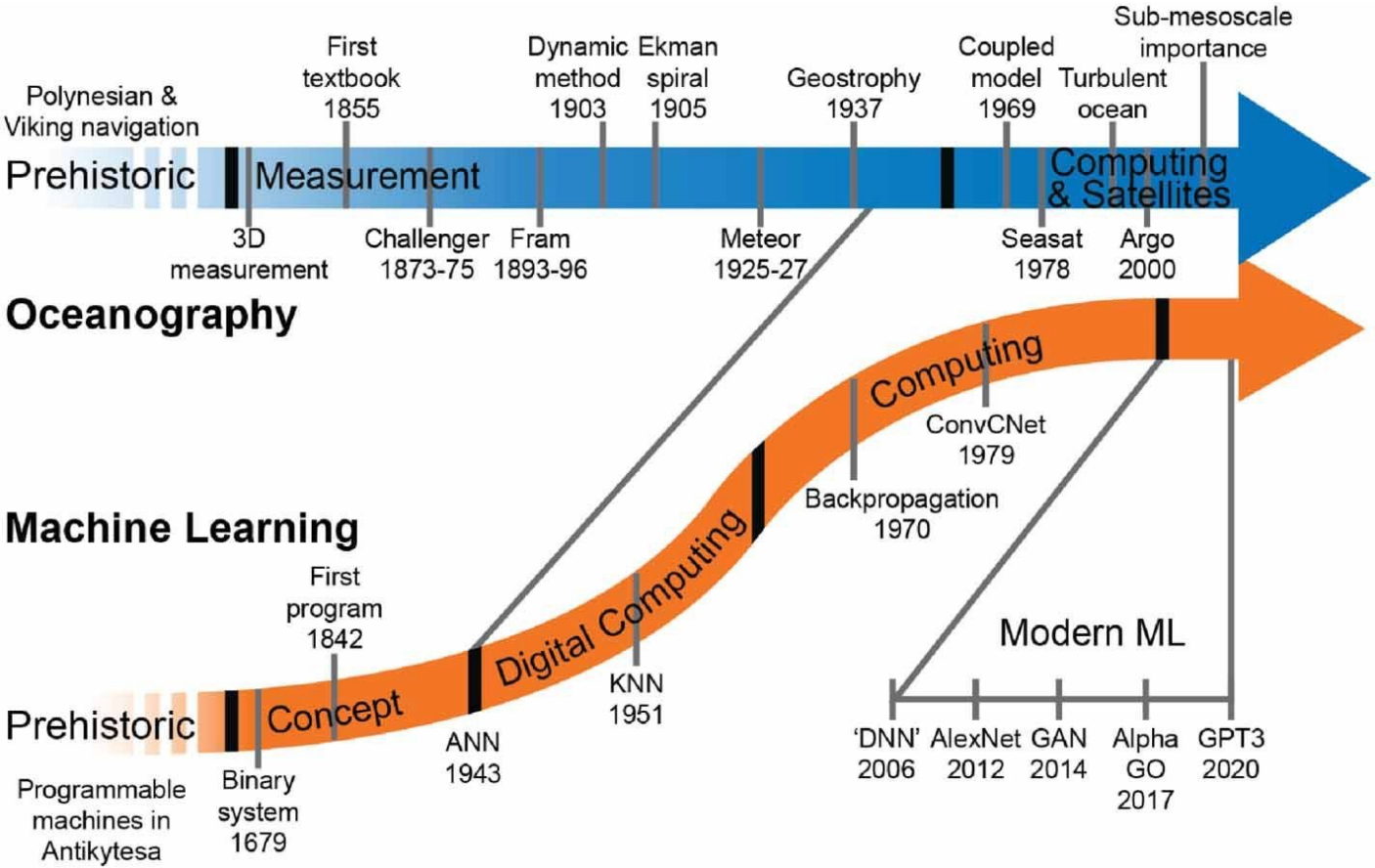
https://partici.fi/86456312

L’IA au service des océans et des sciences marines

Comment mieux comprendre et contribuer à renforcer la résilience



Bronner, Sonnewald and Visbeck, 2023



Sonnewald et al., 2021

L’AA : la pièce manquante ?

Trop simple :
Les descriptions théoriques tendent à être trop simplifiées

Trop difficile :
Déduire des principes fondamentaux à partir des seules données est extrêmement difficile

Le pont : l’AA



Sonnewald et al., 2021

L’AA en océanographie



- Observation operators
- Gap filling
- Error detection and bias correction
- Synthesis of observations
- In situ feature detection

- Learn equations and boundary conditions
- Unsupervised learning to understand dynamics and causality
- Learn process interactions
- Learn sub-grid-scale representation of models

- Learn low-order models
- In situ updates of boundary conditions
- Speed-up simulations via emulation and preconditioning
- Compare models against observations
- Uncertainty quantification

- Data assimilation
- Error correction
- Down-scaling
- Understand climate response
- Improve signal-to-noise
- In situ alarm systems

- Alarm systems
- Climate mitigation
- Route planning
- Oil spilling
- Flooding

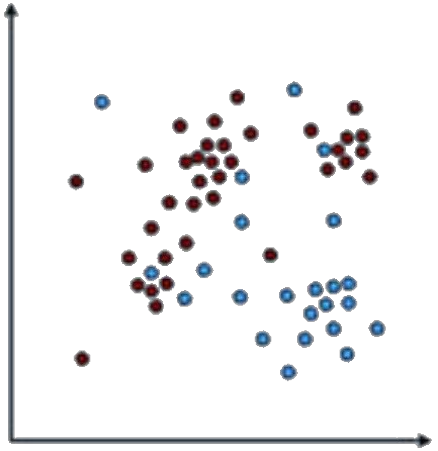
Sonnewald et al., 2021

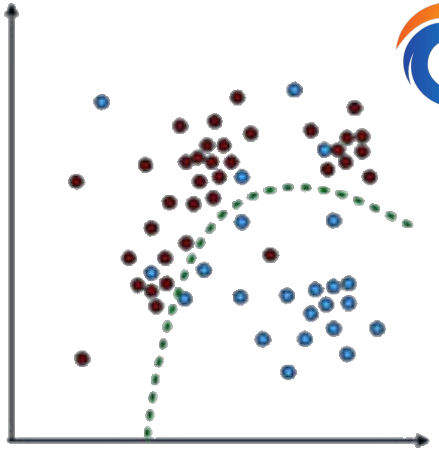
Supervised

-Labeled data

-Decision boundary

Supervisé, non supervisé

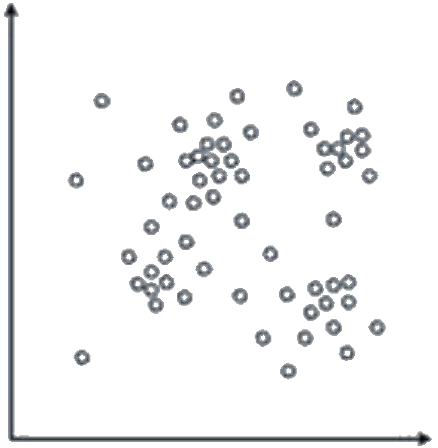


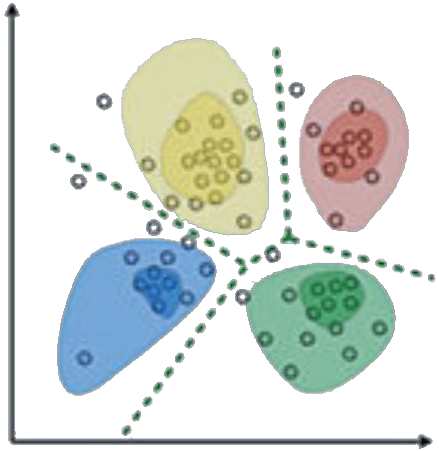


Unsupervised

-No labels

-Identify structures





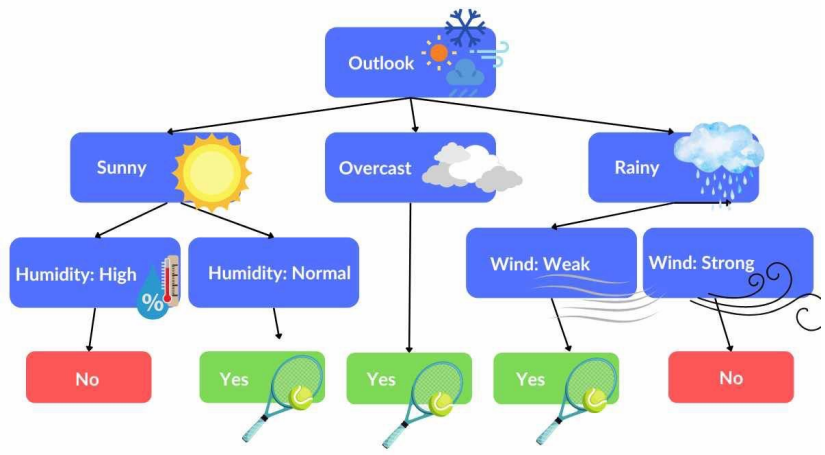
Training data

Resulting model

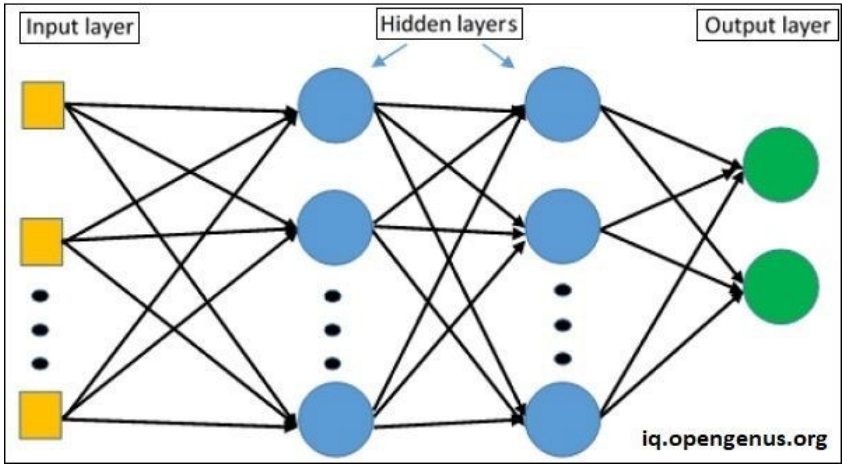
Langs et al., 2018

Deux méthodes d’AA supervisé

Forêts aléatoires



Réseaux de neurones

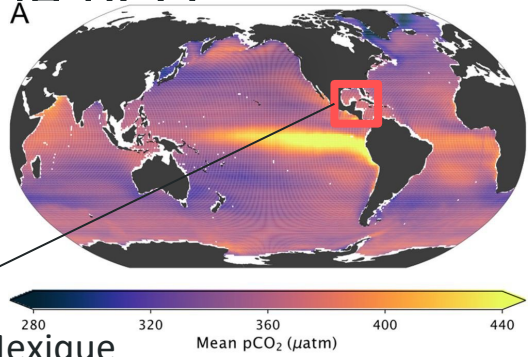


spotIntelligence.com

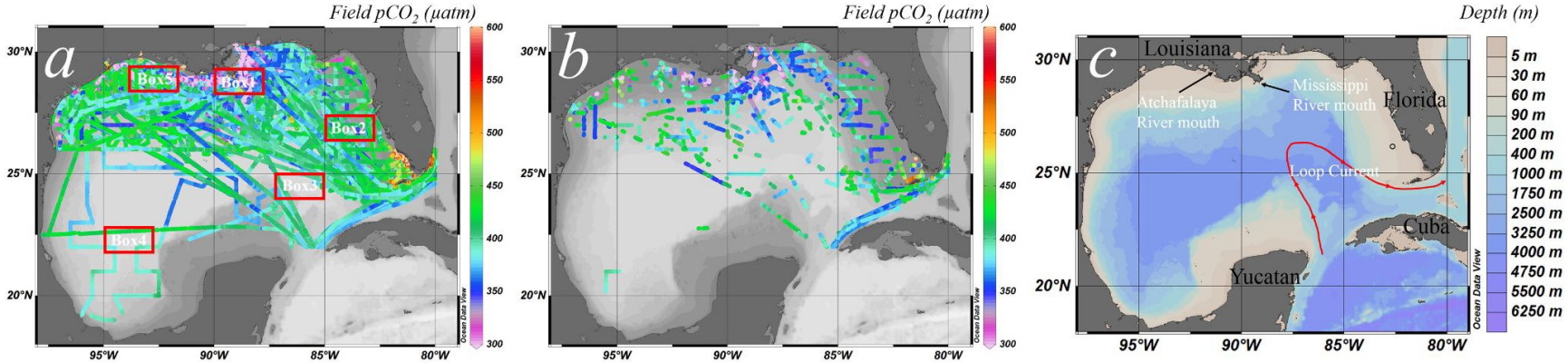
L’AA pour surveiller, en surface de l’océan, le pCO

Mesurer le CO_2 exige des efforts considérables

Il n’existe pas de fonction connue reliant une autre variable prédictive au pCO2 de surface



Golfe du Mexique



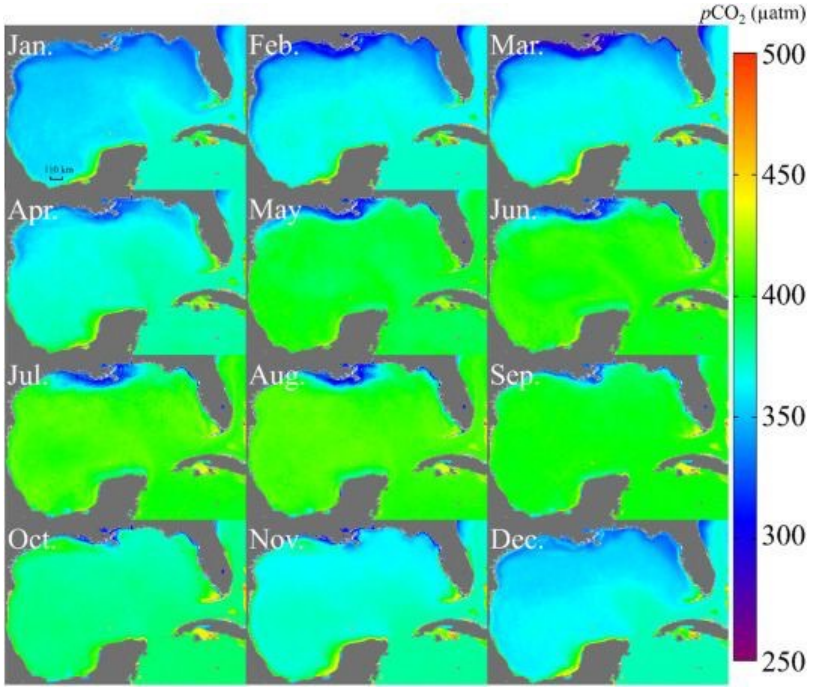
Chen et al,. 2019

L’AA pour surveiller, en surface de l’océan, le pCO_2

Mesurer le CO_2 exige des efforts considérables

Il n’existe pas de fonction connue reliant une autre variable prédictive au pCO2 de surface

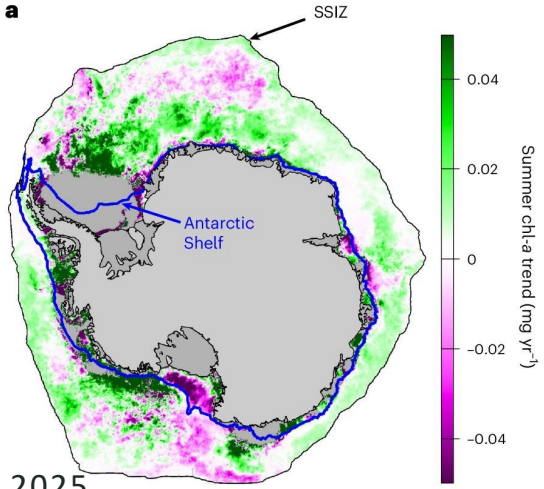
Chen et al., 2019 ont utilisé une méthode d’AA par forêt aléatoire pour que les satellites prédisent le pCO2

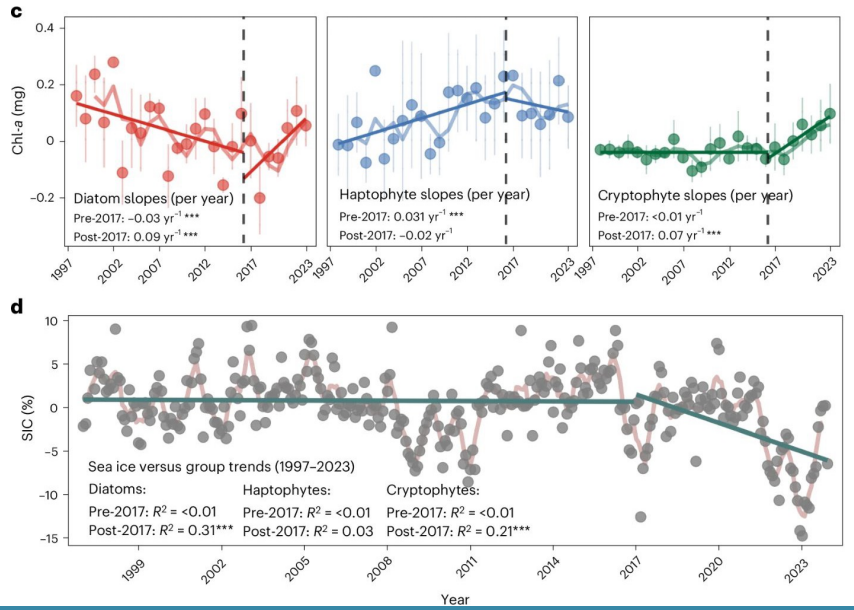


L’AA pour suivre le plancton antarctique

Le phytoplancton est essentiel au réseau trophique marin antarctique et à la séquestration du carbone, mais l’évolution à long terme de sa composition est mal comprise

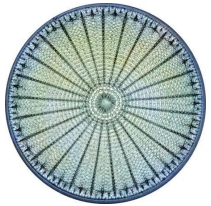
Hayward et al., 2025 ont utilisé des forêts aléatoires pour montrer comment la composition des communautés a changé avec l’évolution de la glace de mer





Hayward et al., 2025

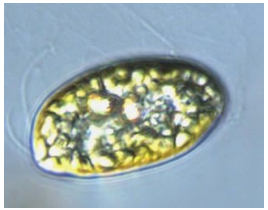
L’AA pour suivre le plancton antarctique



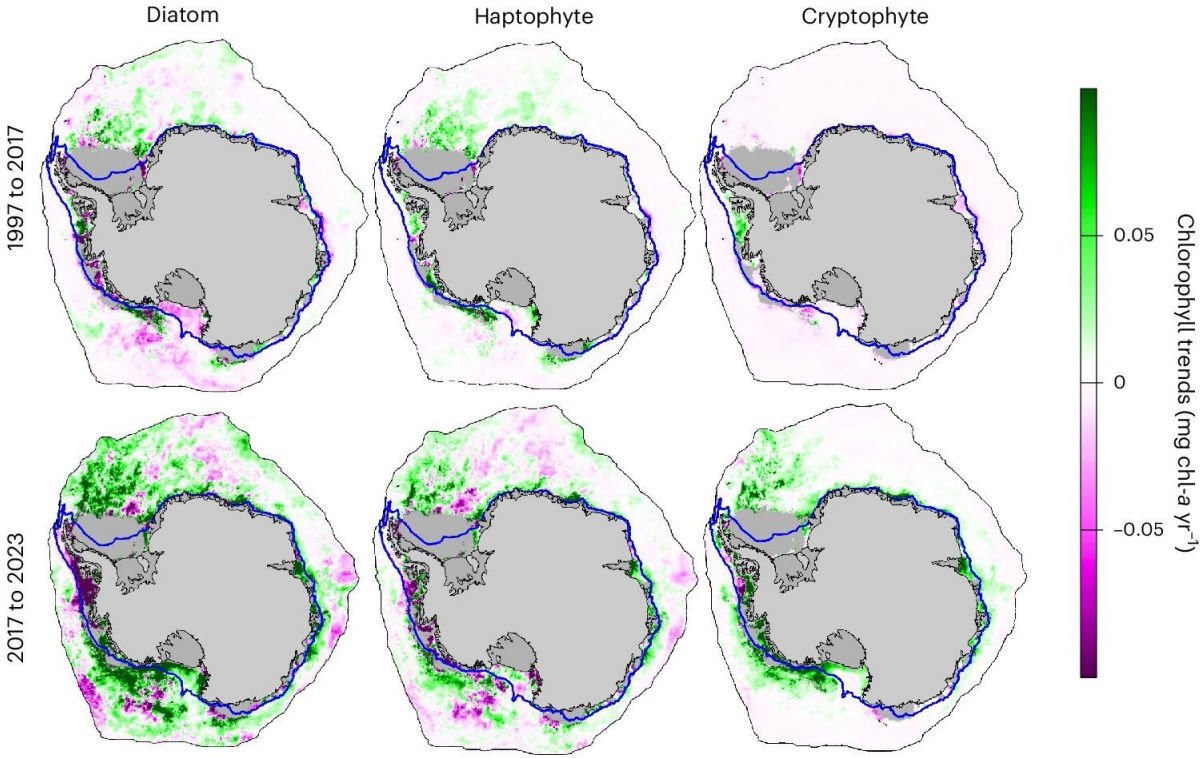
Diatomées



Haptophytes



Cryptophytes

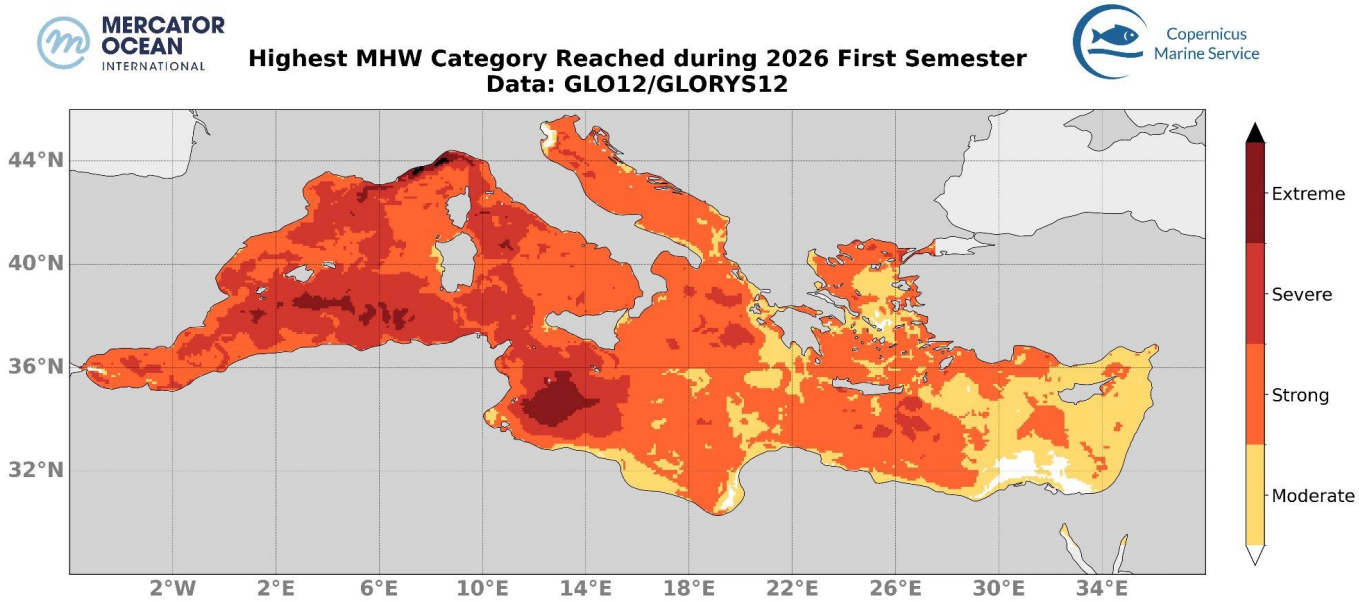


R. Graves, Wikipedia.com, J Oyandomari

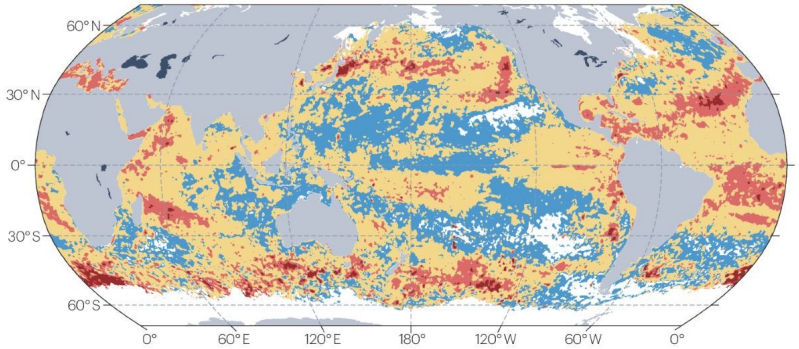
3 : Quelle part de la surface de la Méditerranée a connu une vague de chaleur au premier semestre 2026 ?

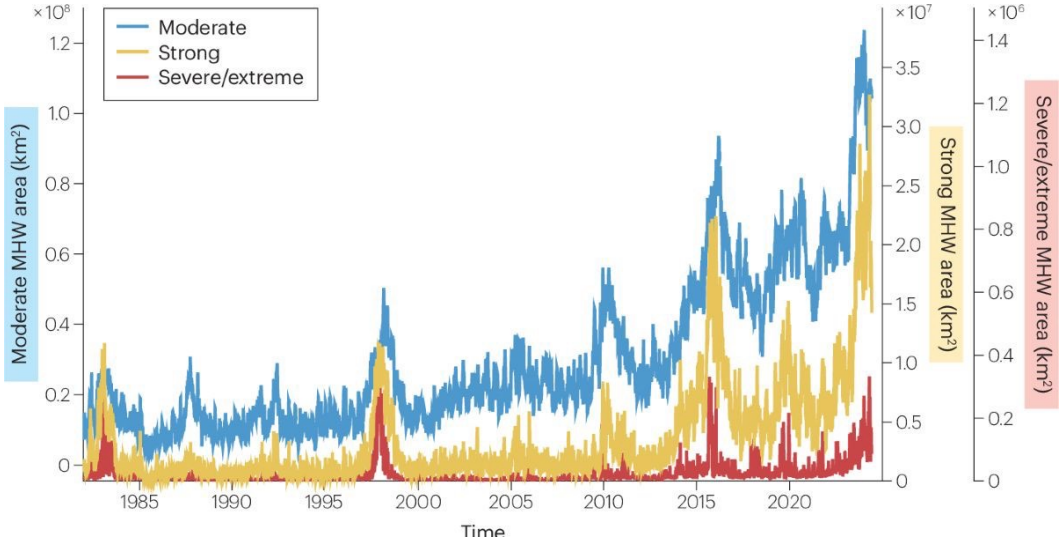
https://partici.fi/86456312

Quelle part de la surface de la Méditerranée a connu une vague de chaleur au premier semestre 2026 ?



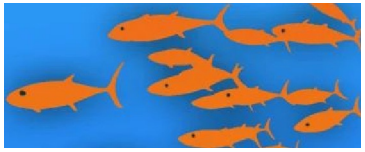
Les vagues de chaleur marines deviennent plus fréquentes et plus intenses



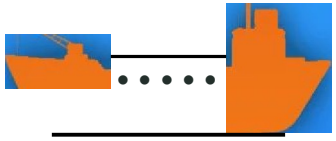


Wernberg et al., 2025

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES OCÉANS



DÉPLACENT LES AIRES DES ESPÈCES



IMPACTS ÉCONOMIQUES SUR LA PÊCHE

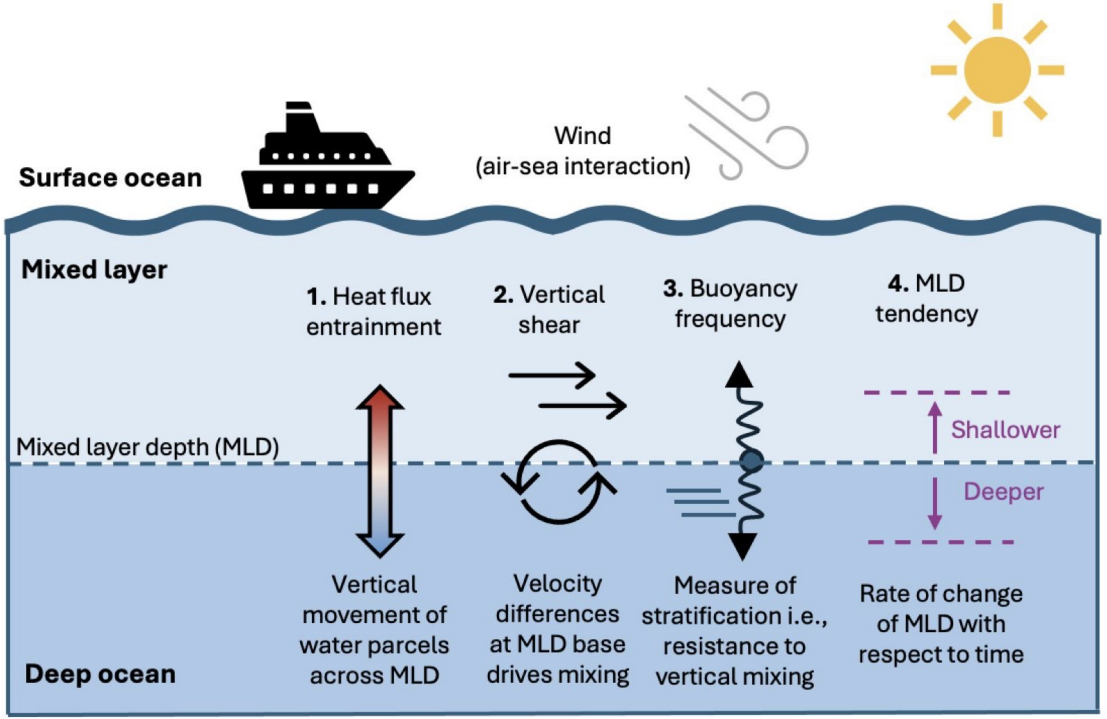
RENFORCENT LES TEMPÊTES ET OURAGANS TROPICAUX



BLEACHES CORAL

CLIMATE CENTRAL

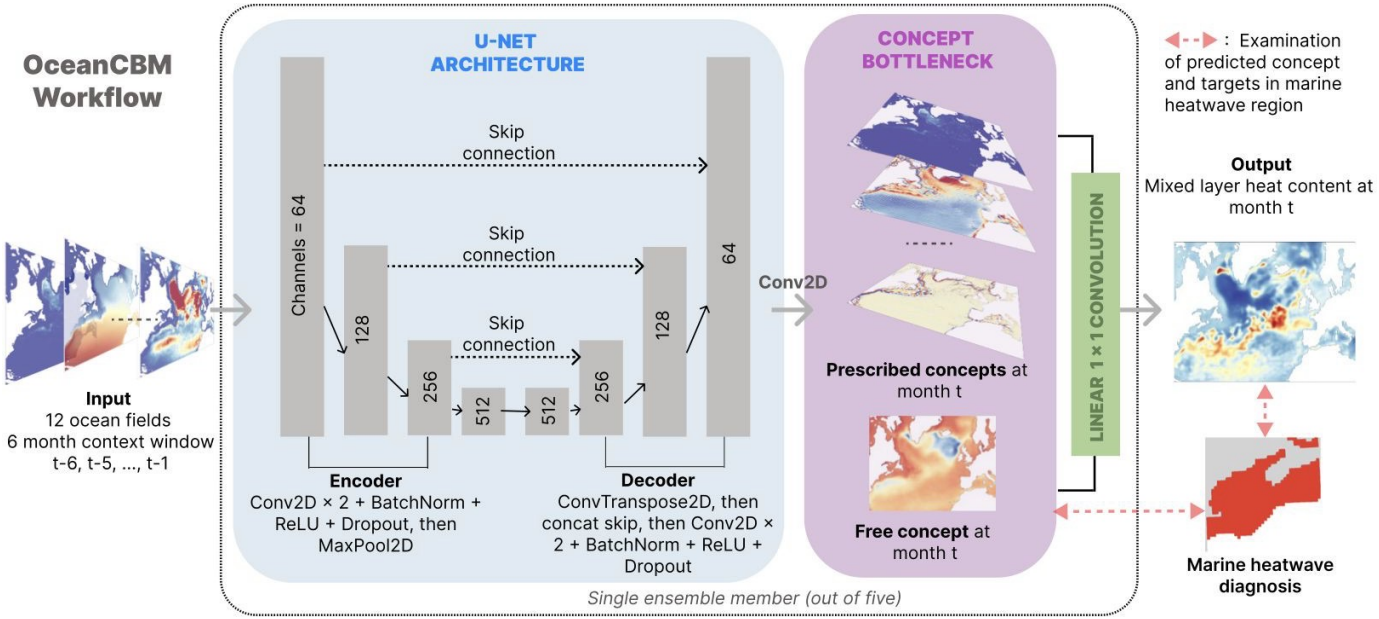
L’AA pour la prévision et l’attribution des vagues de chaleur marines



Suri et al., 2026

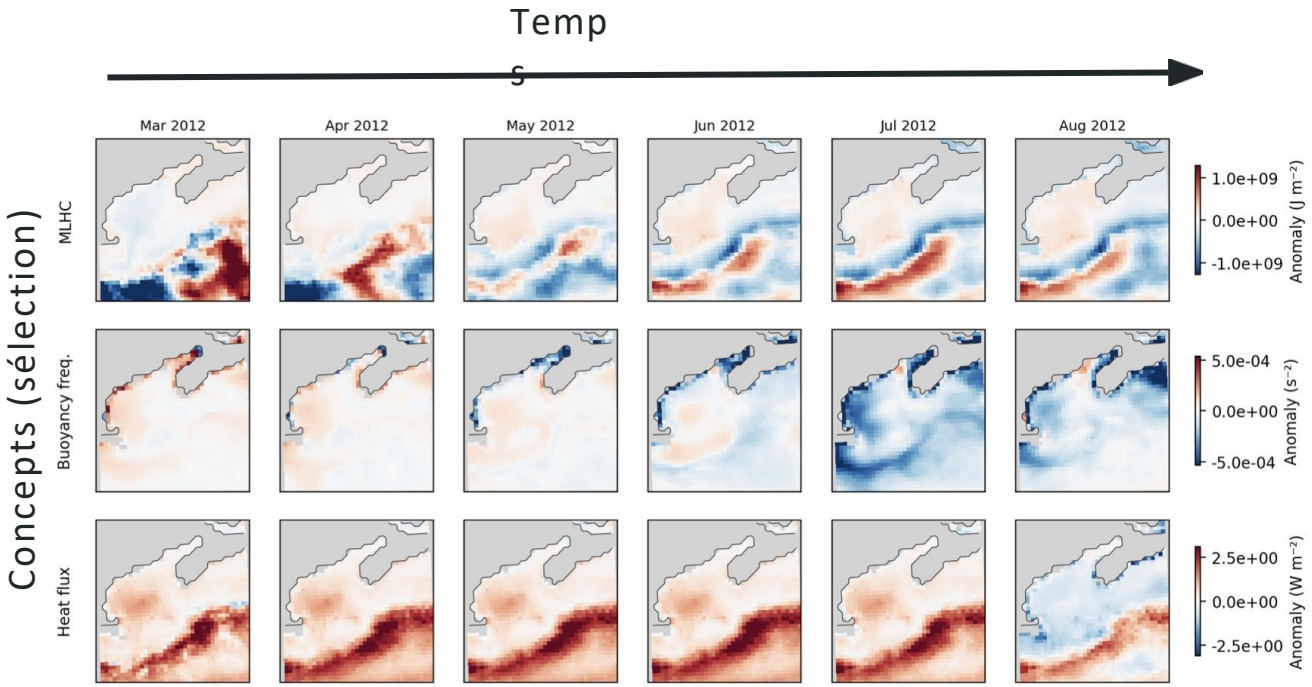
L’AA pour la prévision et l’attribution des vagues de chaleur marines

Prédire le contenu thermique de la couche de mélange en laissant le réseau choisir ce qui compte

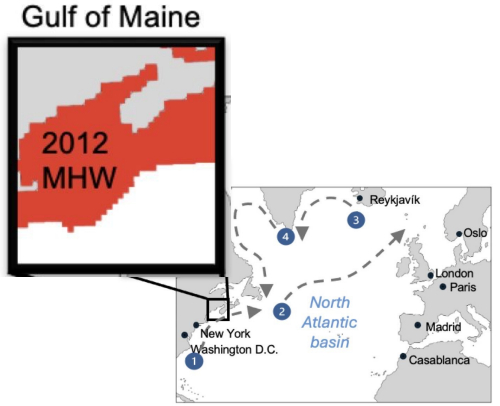


Suri et al., 2026

L’AA pour la prévision et l’attribution des vagues de chaleur marines

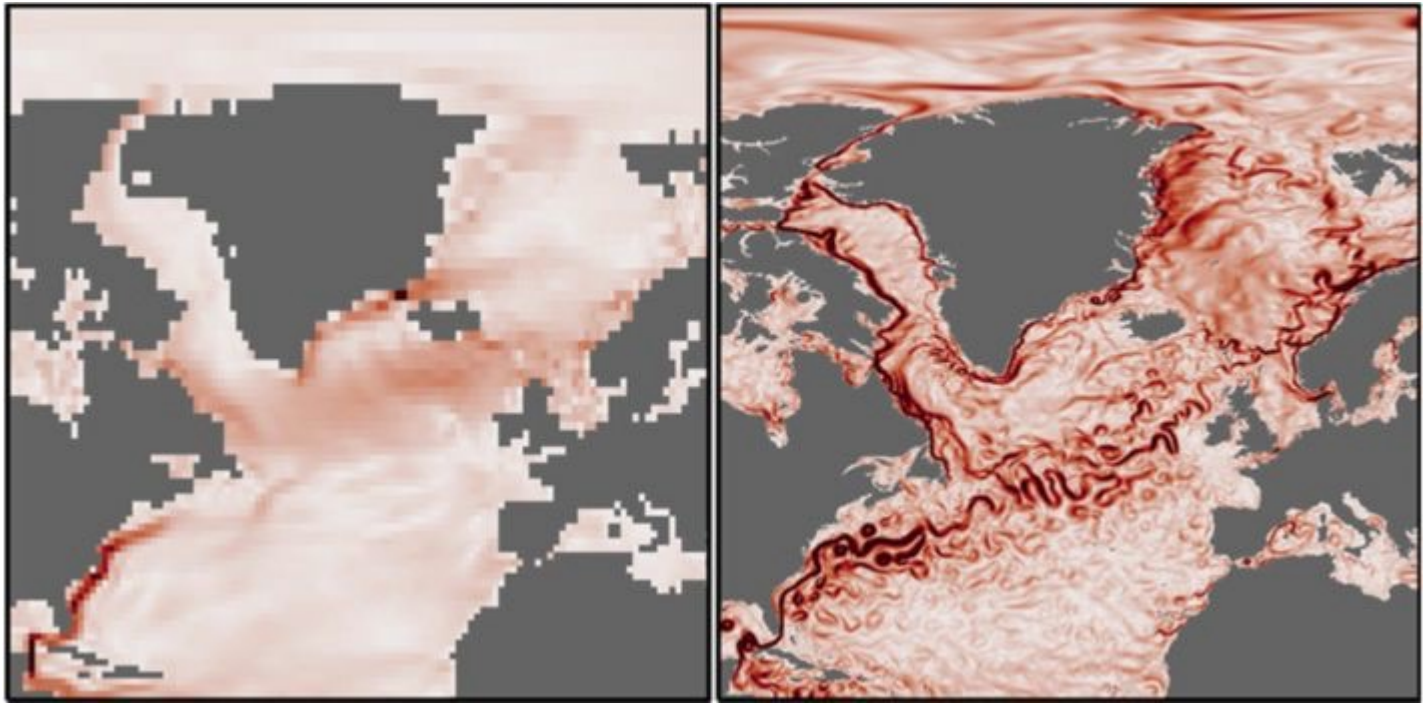


Suri et al., 2026



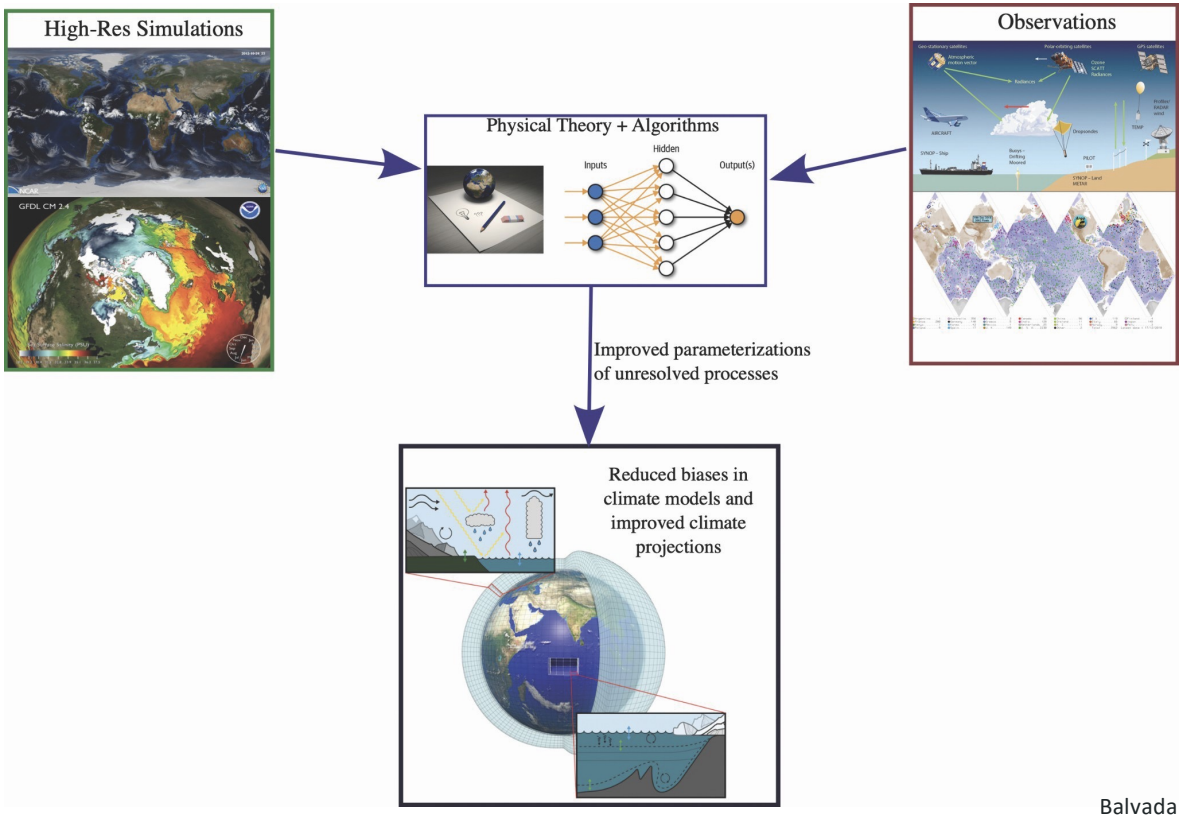
Conclusion :
L’apport de chaleur atmosphérique qui a réchauffé la couche de mélange
+
l’augmentation de la stratification a piégé la chaleur près de la surface

L’AA pour la paramétrisation des modèles océaniques



fyfluiddynamics.com

L’AA pour la paramétrisation des modèles océaniques



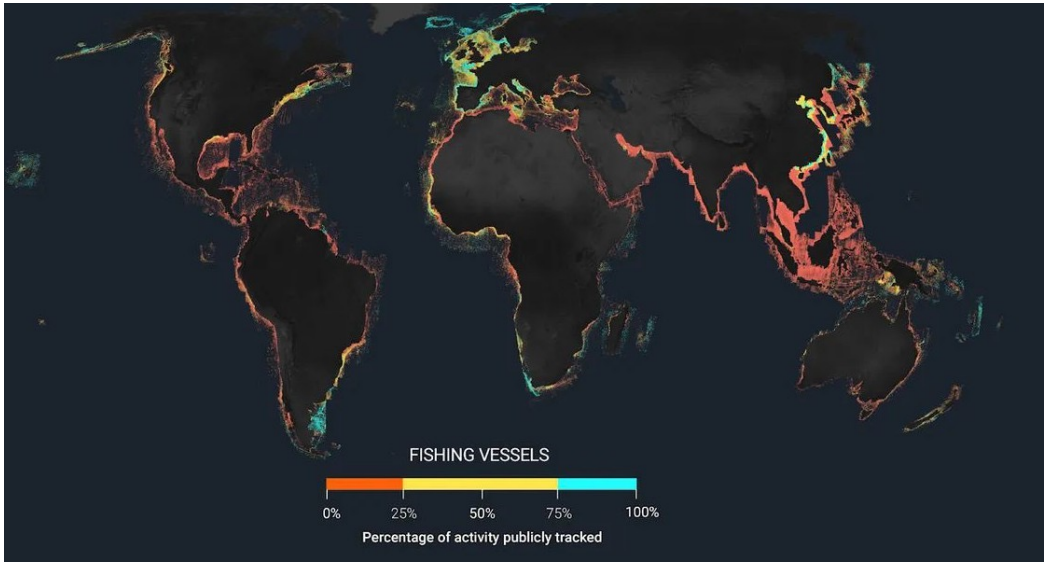
Balvada and Zanna, 2022

L’AA pour la gestion des pêches

Global Fishing Watch fournit une carte quasi en temps réel de la pêche industrielle pour lutter contre les activités illégales

Ils utilisent des données de suivi des navires et l’IA

Les données disponibles donnent par exemple la position, la vitesse et le cap, mais pas l’intention. L’IA classe le type de navire (chalutier, palangrier, senneur) puis déduit s’il est en transit ou en pêche



L’AA pour la gestion des pêches : Une remarque sur qui en profite

Global Fishing Watch met au jour les activités illégales, mais les capacités de contrôle sont inégalement réparties

Détecter sans capacité d’agir peut reporter la charge là où les capacités sont les plus faibles



La circulation océanique face au climat : zoom

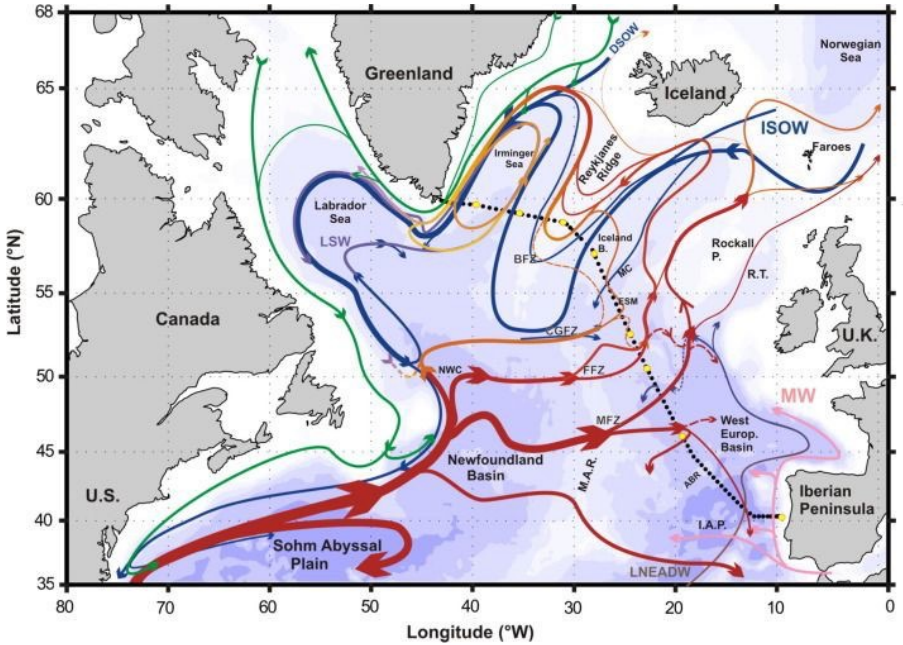
Circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC) :

- Transport de chaleur vers l'Europe
- Régimes atmosphériques
- Sécheresses
- Niveau de la mer sur la côte est des États-Unis
- Ouragans



L'Islande a désigné le risque d'un arrêt de l'AMOC comme une menace pour la sécurité nationale

L'AA pour comprendre l'évolution de l'AMOC dans le CMIP



Évaluée par une métrique simpliste : le débit à 26°N

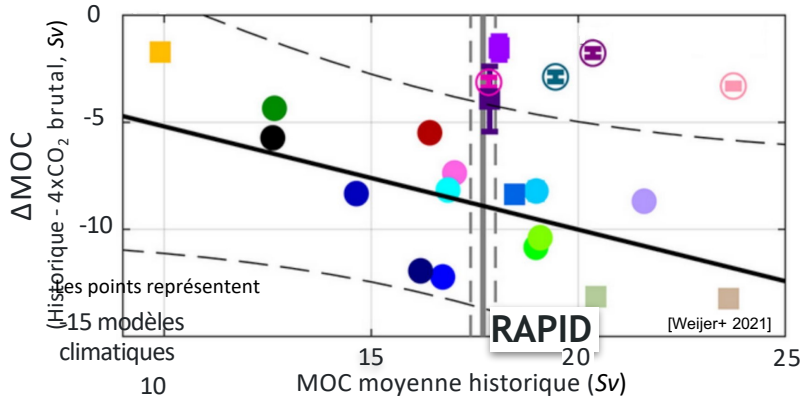
Un seul chiffre pour décrire des courants complexes ?

Daniault et al., 2016

Le CMIP manque souvent de données sur le changement

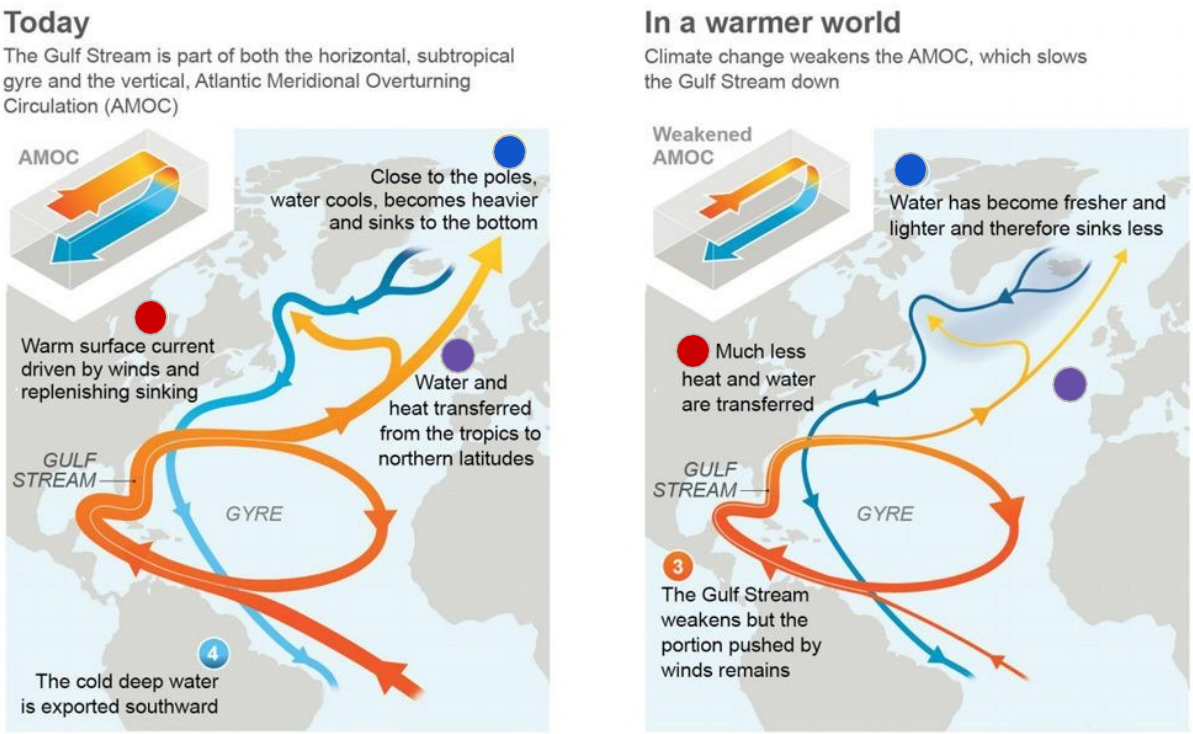
- Les métriques globales sont courantes
  - P. ex. : la métrique de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC)
- Mesure la force et le transport de volume de l'AMOC
- Suit la vitesse à laquelle l'eau chaude remonte vers le nord et l'eau froide redescend vers le sud
- Transport de volume des courants : mesuré à partir de la profondeur, de la vitesse, de la température et de la salinité de l'océan
- Emplacements des réseaux : suivis le long des latitudes 26,5°N (RAPID), 34,5°S (SAMBA) et dans les régions subpolaires.

Évolution de l'AMOC entre aujourd'hui et un futur à $4xCO_2$ brutal



1Sv = 10^6 m^3/s

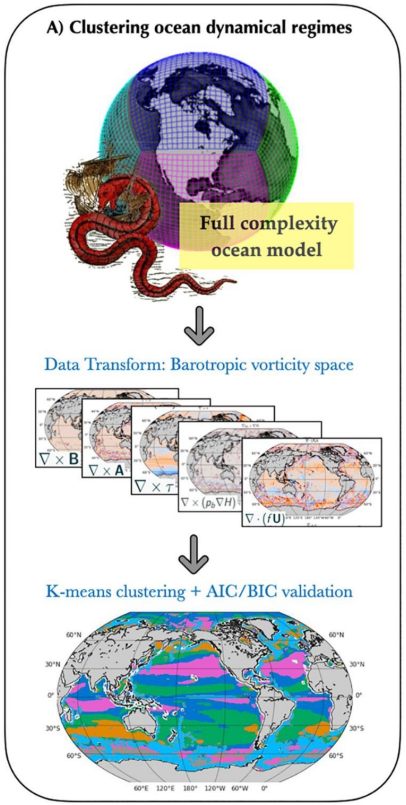
Le Gulf Stream va-t-il s'arrêter avec le changement climatique ?

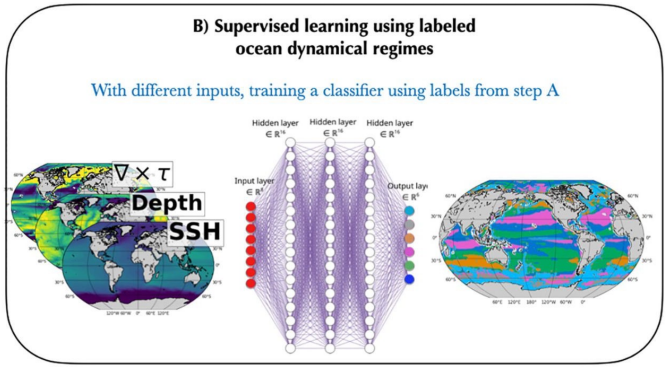


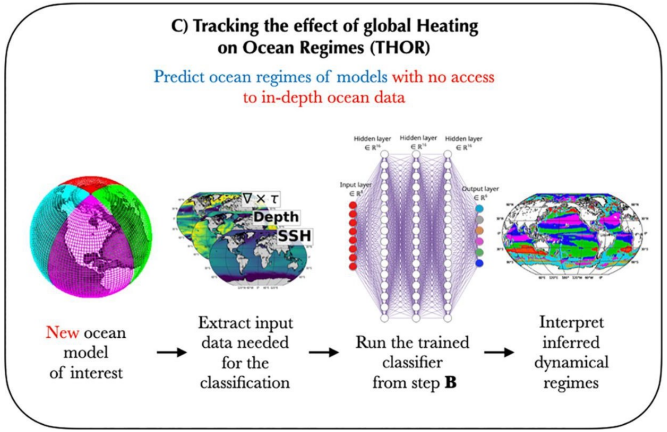
- Le Gulf Stream se déplace vers le nord
- Le trajet de l'apport de chaleur se déplace
- Eaux moins denses/lourdes

Adapté du 5e rapport du GIEC (AR5)

Méthode : suivre le réchauffement mondial grâce aux régimes océaniques (THOR)







Déduire le détail des courants à partir de données éparses

Calcul équitable : open source et HPC dans le cloud

GitHub maikejulie/DNN4Cli

FAIR

AWS

Sonnewald and Lguensat, 2021, ***JAMES***

Sonnewald, et al., 2021, ***International Conference on Machine Learning (ICML)* workshop paper spotlight**

Gille […], **Sonnewald** et al., 2018, **Open Code Policy for NASA Space Science, white paper**

Maîtriser la complexité des fluides dans les modèles climatiques

Composante océanique de complexité complète



Transformation symbolique

Cadre de l'espace des équations fondamentales

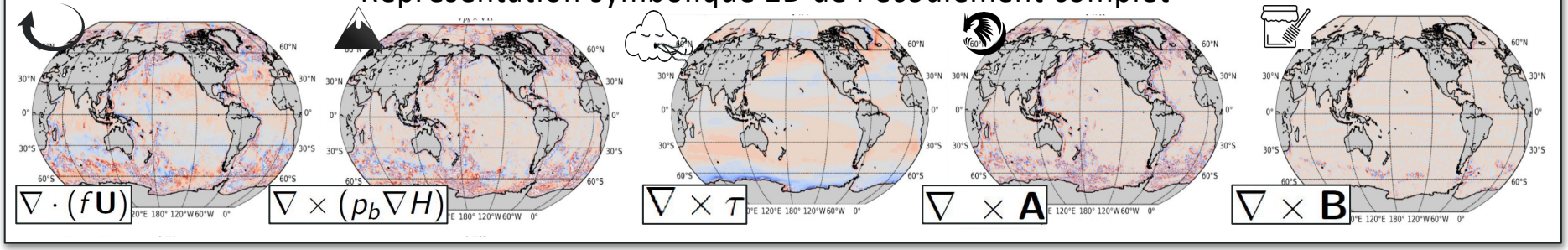
(Équation de la vorticité barotrope)

Advection — Wind and Bottom Stress — Lateral Viscosity

$$0 = \nabla \cdot (f\mathbf{U}) - \nabla \times (p_b \nabla H) + \nabla \times \tau - \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{B}$$

Bottom Pressure Torque — Non-linear Torque

Représentation symbolique 2D de l'écoulement complet



[SWH 2019 ESS]

Maîtriser la complexité des fluides dans les modèles climatiques

Composante océanique de complexité complète



Transformation symbolique

Cadre de l'espace des équations fondamentales

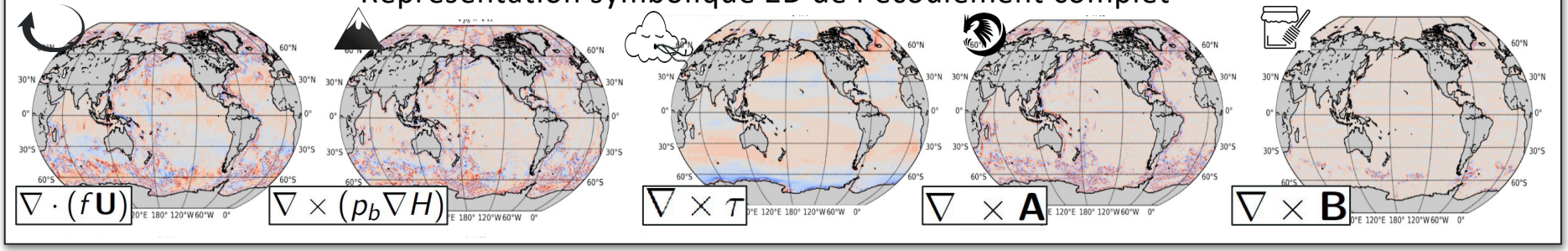
(Équation de la vorticité barotrope)

Advection — Wind and Bottom Stress — Lateral Viscosity

$$0 = \nabla \cdot (f\mathbf{U}) - \nabla \times (p_b \nabla H) + \nabla \times \tau - \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{B}$$

Bottom Pressure Torque — Non-linear Torque

Représentation symbolique 2D de l'écoulement complet



[SWH 2019 ESS]

Maîtriser la complexité des fluides dans les modèles climatiques

Composante océanique de complexité complète



Transformation symbolique

Cadre de l'espace des équations fondamentales

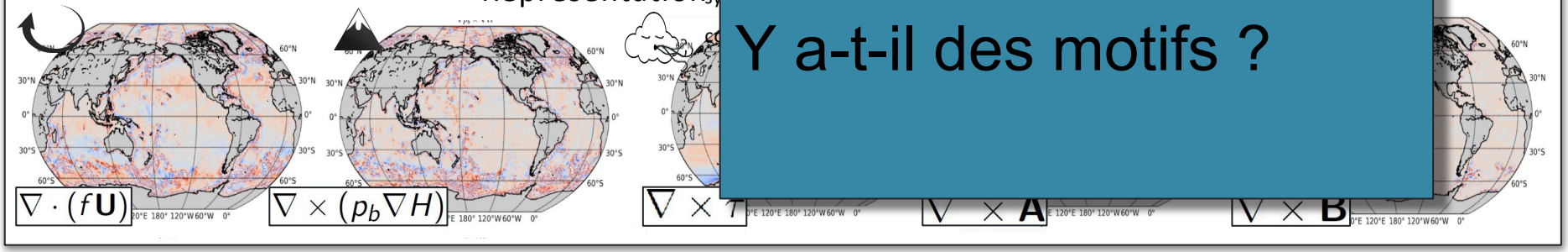
(Équation de la vorticité barotrope)

Advection — Wind and Bottom Stress — Lateral Viscosity

$$0 = \nabla \cdot (f\mathbf{U}) - \nabla \times (p_b \nabla H) + \nabla \times \tau - \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{B}$$

Bottom Pressure Torque — Non-linear Torque

Représentation sy



Y a-t-il des motifs ?

[SWH 2019 ESS]

Maîtriser la complexité des fluides dans les modèles climatiques

Composante océanique de complexité complète



Transformation symbolique

Cadre de l'espace des équations fondamentales

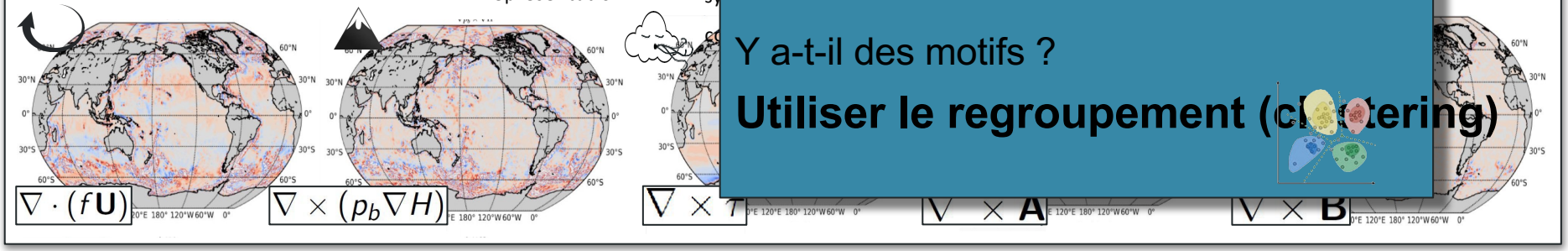
(Équation de la vorticité barotrope)

Advection — Wind and Bottom Stress — Lateral Viscosity

$$0 = \nabla \cdot (f\mathbf{U}) - \nabla \times (p_b \nabla H) + \nabla \times \tau - \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{B}$$

Bottom Pressure Torque — Non-linear Torque

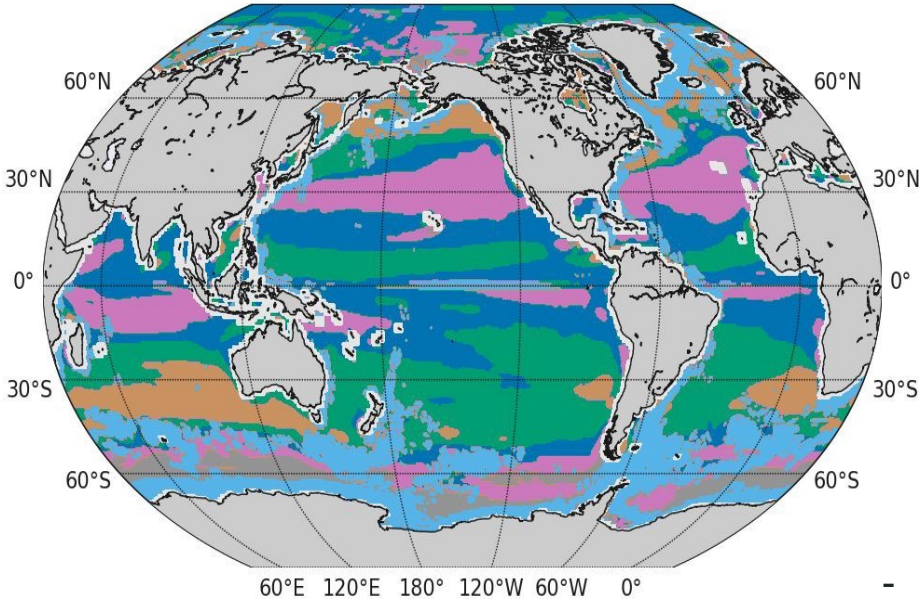
Représentation

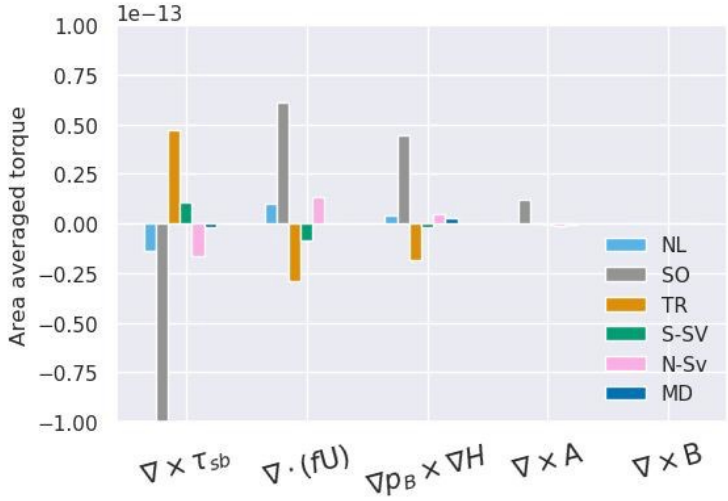


Y a-t-il des motifs ?

Utiliser le regroupement (clustering)

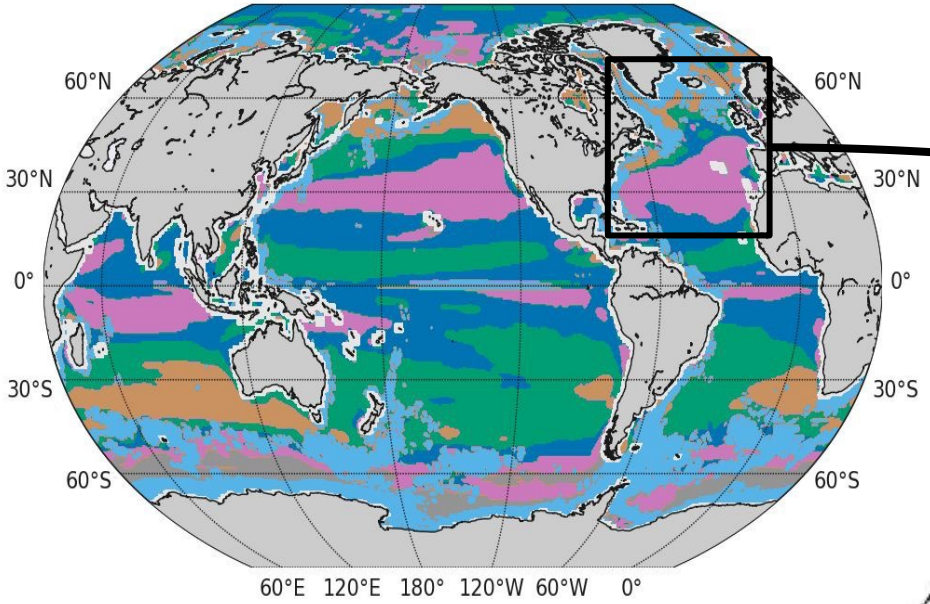
[SWH 2019 ESS]

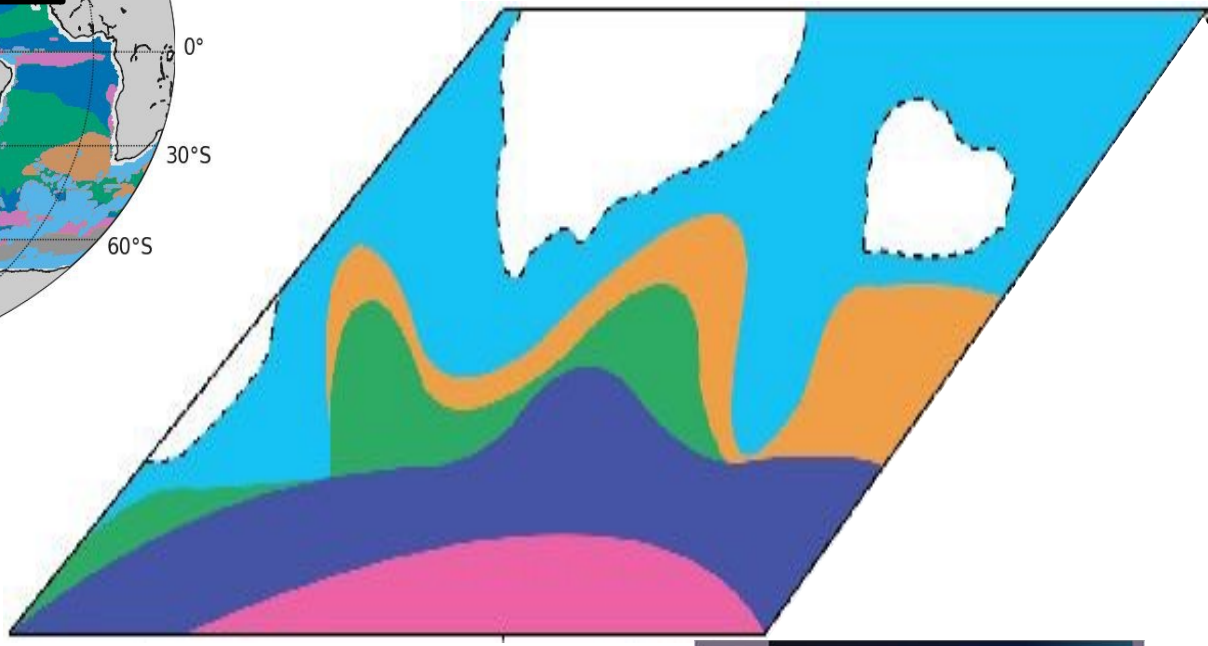




- Des régions cohérentes apparaissent
- Les régimes traduisent l'équilibre des termes de l'équation

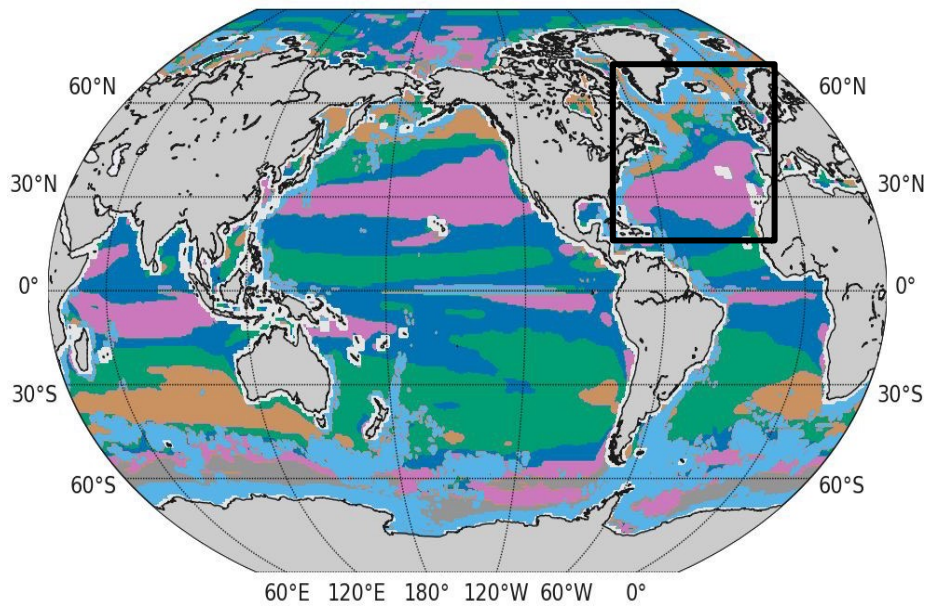
NL - Non linéaire	**SO - Océan Austral**	**TR - Transitoire**
S-SV - Sverdrupien HS	**N-SV - Sverdrupien HN**	**MD - Dominé par la quantité de mouvement**

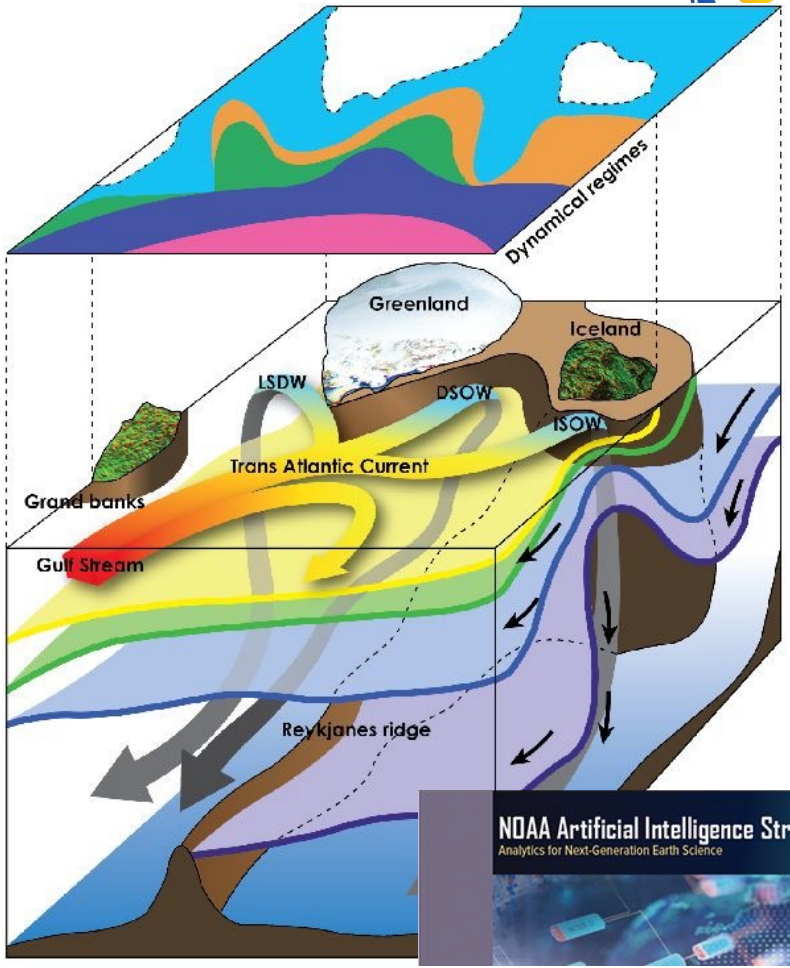






Nouvelles connaissances : Sonnewald, Reeve & Lguensat, 2023 Principal : Sonnewald, Wunsch & Heimbach, 2019,
Formalisme : Kaiser, Sanches, Sonnewald & Livrenco, 2022

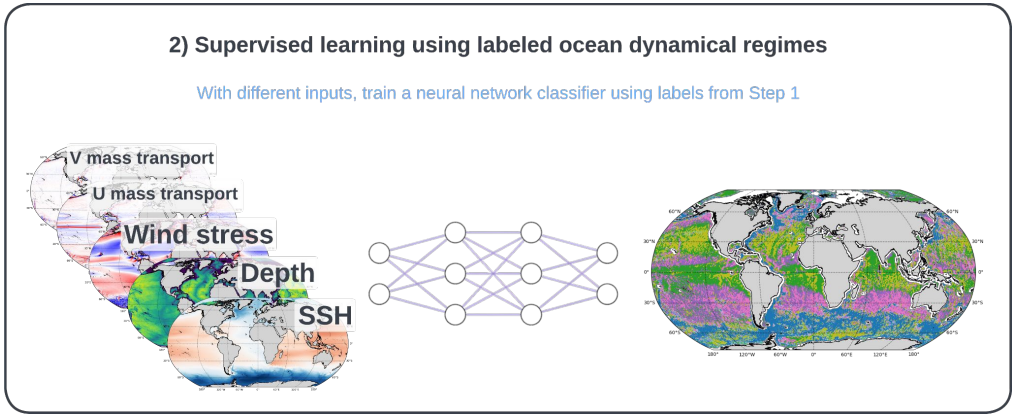




Les régimes révèlent des structures océaniques 3D liées, par exemple, au transport de chaleur

- Courants chauds remontant vers le nord (rouge)
- Refroidissement à la traversée du bassin (jaune)
- Plongée en profondeur (gris)

Apprendre les régimes à partir de champs disponibles

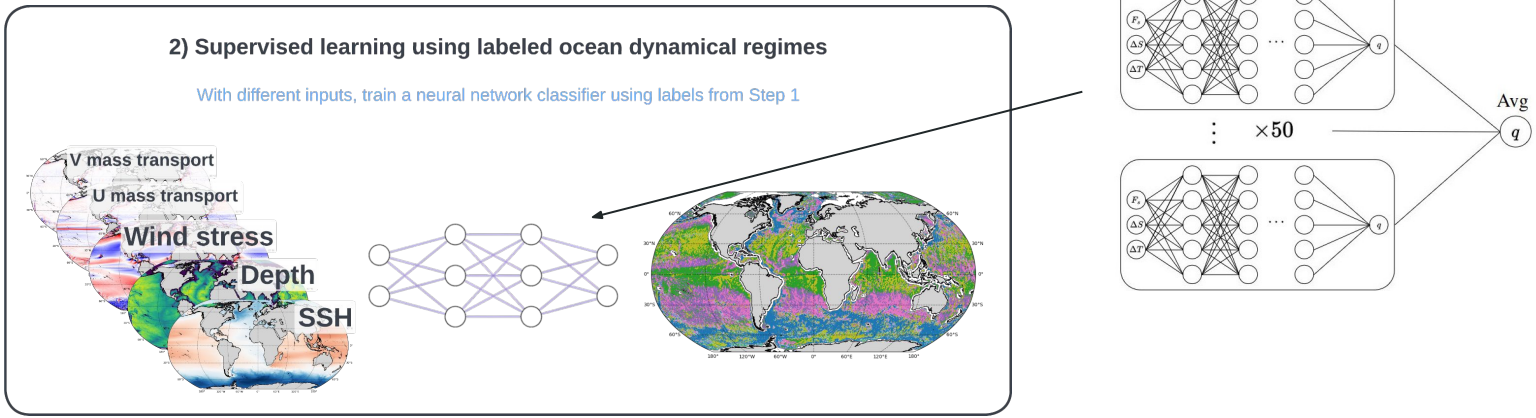


- Entrées : des « mots » approximatifs
  - Hauteur de la surface de la mer (ZOS) + gradients x/y
  - Profondeur (hauteur de colonne) + gradients x/y
  - Rotationnel de la tension du vent ($\nabla \times \tau$)
  - Transport de masse mensuel intégré sur la profondeur (umo_2d + vmo_2d)
  - Paramètre de Coriolis (f)

- Les étiquettes fournissent le « contexte » : 6 régimes dynamiques
- Ensemble profond (50 MLP) pour quantifier l'incertitude
- Application de techniques d'IA explicable

Sonnewald, Reeve & Lguensat, sous presse, Nature Comm. Earth and Env. Principal : Sonnewald, Wunsch & Heimbach, 2019, ESS.
Formalisme : Kaiser, Sanches, Sonnewald & Livrenco, 2022 Eng Appl AI

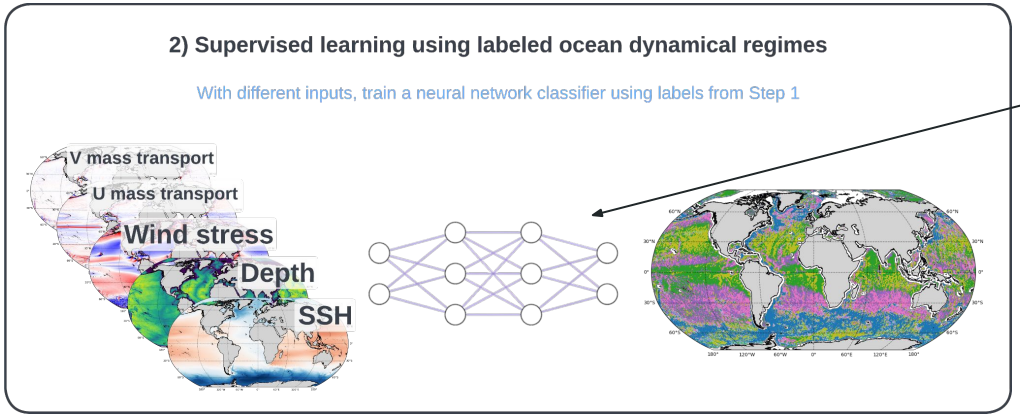
Apprendre les régimes à partir de champs disponibles

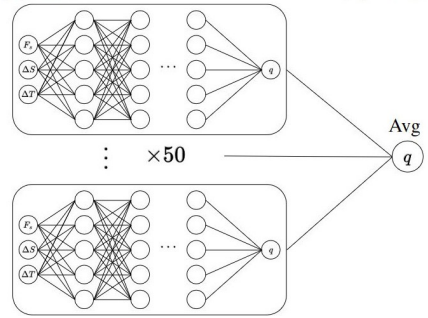


- Entrées : des « mots » approximatifs
  - Hauteur de la surface de la mer (ZOS) + gradients x/y
  - Profondeur (hauteur de colonne) + gradients x/y
  - Rotationnel de la tension du vent ($\nabla \times \tau$)
  - Transport de masse mensuel intégré sur la profondeur (umo_2d + vmo_2d)
  - Paramètre de Coriolis (f)

- Les étiquettes fournissent le « contexte » : 6 régimes dynamiques
- Ensemble profond (50 MLP) pour quantifier l'incertitude
- Application de techniques d'IA explicable

Apprendre les régimes à partir de champs disponibles





- **Entrées disponibles dans le CMIP :**
  - Hauteur de la surface de la mer (ZOS)
  - Profondeur (hauteur de colonne)
  - Rotationnel de la tension du vent ($\nabla \times \tau$)
  - Transport de masse mensuel intégré sur la profondeur
  - Paramètre de Coriolis (f)

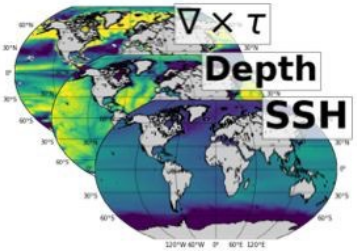
- **Modèle d'AA :**
  - Ensemble profond (50 MLP) pour quantifier l'incertitude
  - Application de techniques d'IA explicable

Appliquer à différents scénarios climatiques pour comprendre les changements

THOR : régimes dans un modèle inconnu

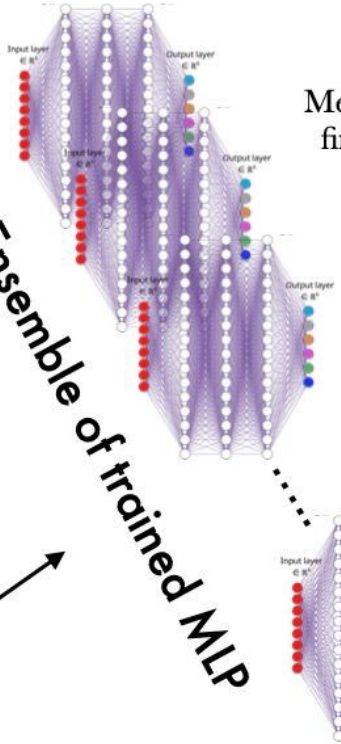


Ocean model of interest



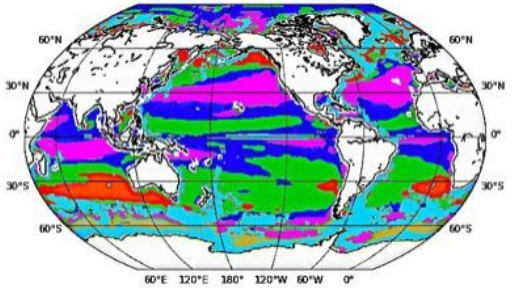
Extract input data needed by the classifier

Ensemble of trained MLP



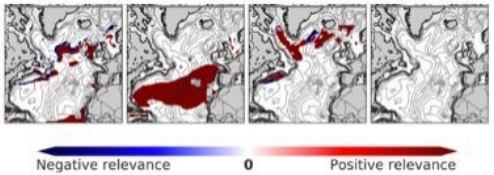
Mean of predictions is used to find the most probable class

Classification
Predict dynamical regimes in unseen data

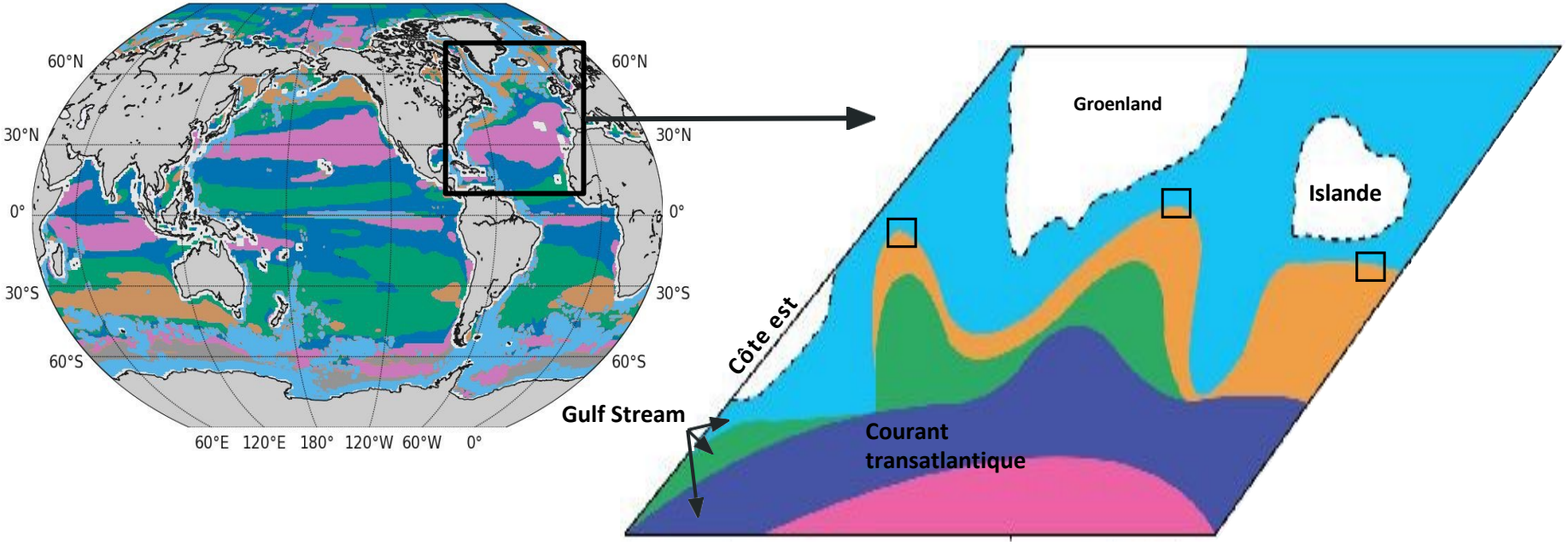


XAI method (ex: LRP) is used for each MLP to obtain the mean of relevances

Explainability
Attribute predictive skill to input features

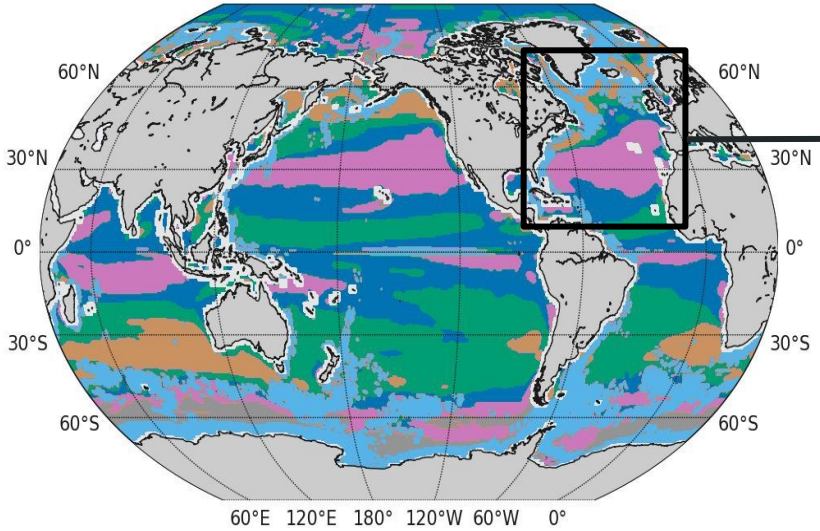


THOR : diagnostiquer les processus de l'AMOC



□ = eau dense en surface

THOR : diagnostiquer les processus de l'AMOC

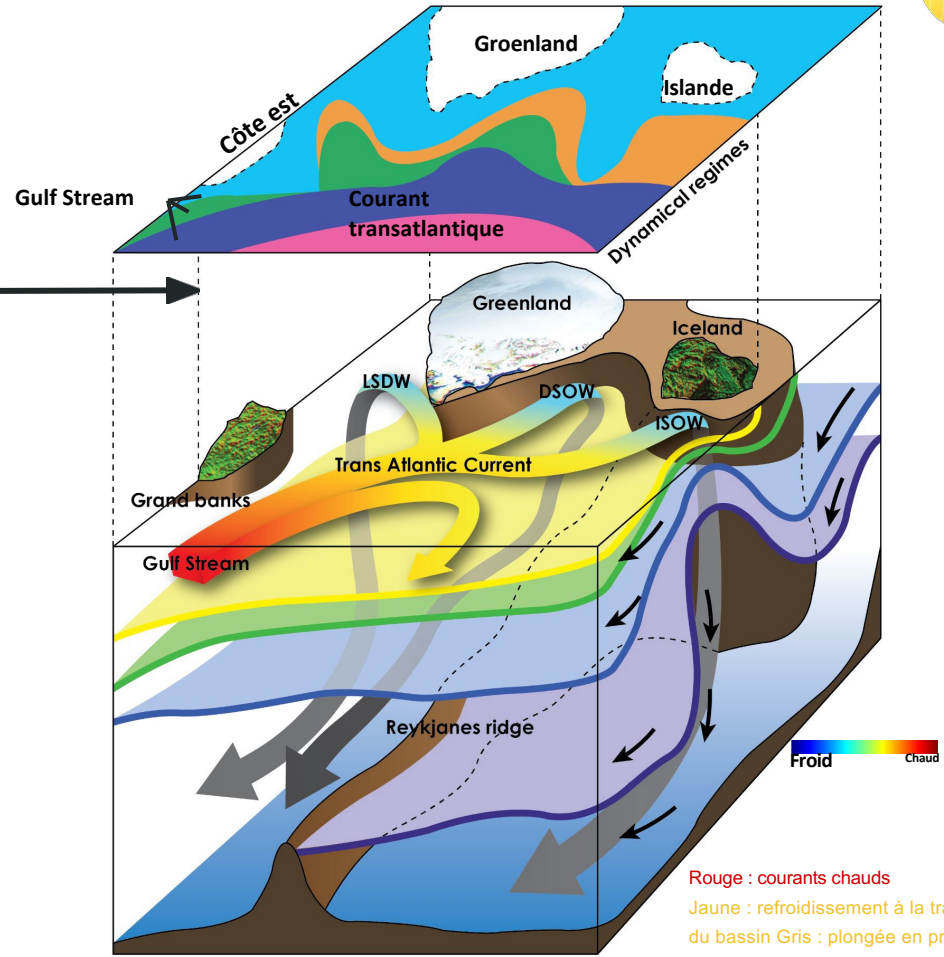


THOR appliqué aux modèles CMIP

Diagnostiquer les processus pour accélérer le réglage et la paramétrisation des modèles

GFDL et IPDL



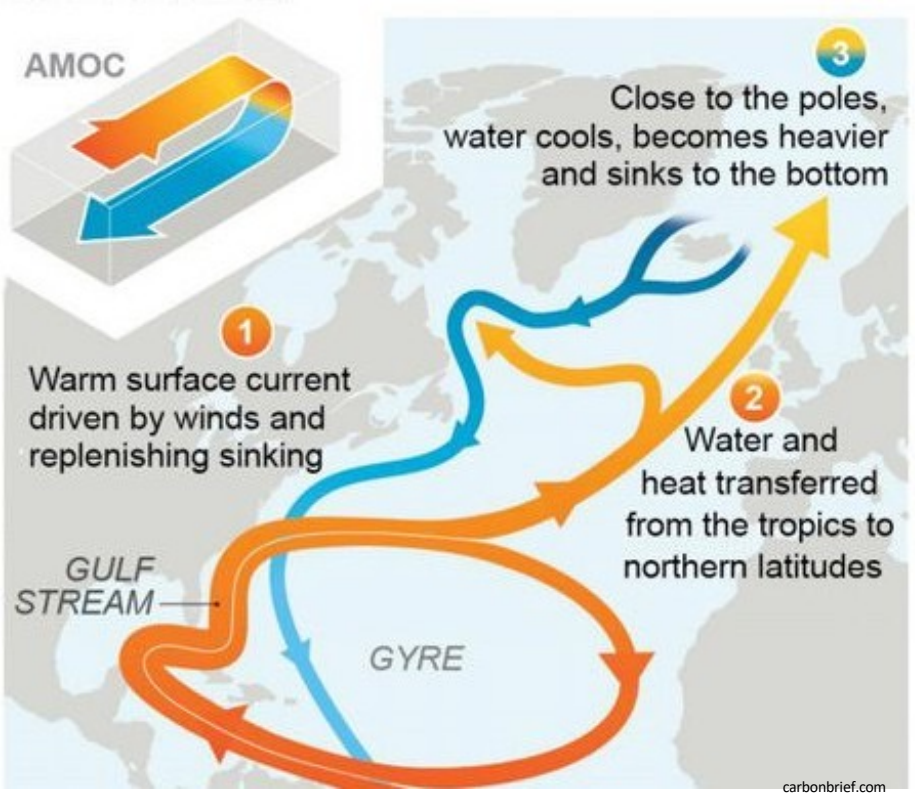


Rouge : courants chauds

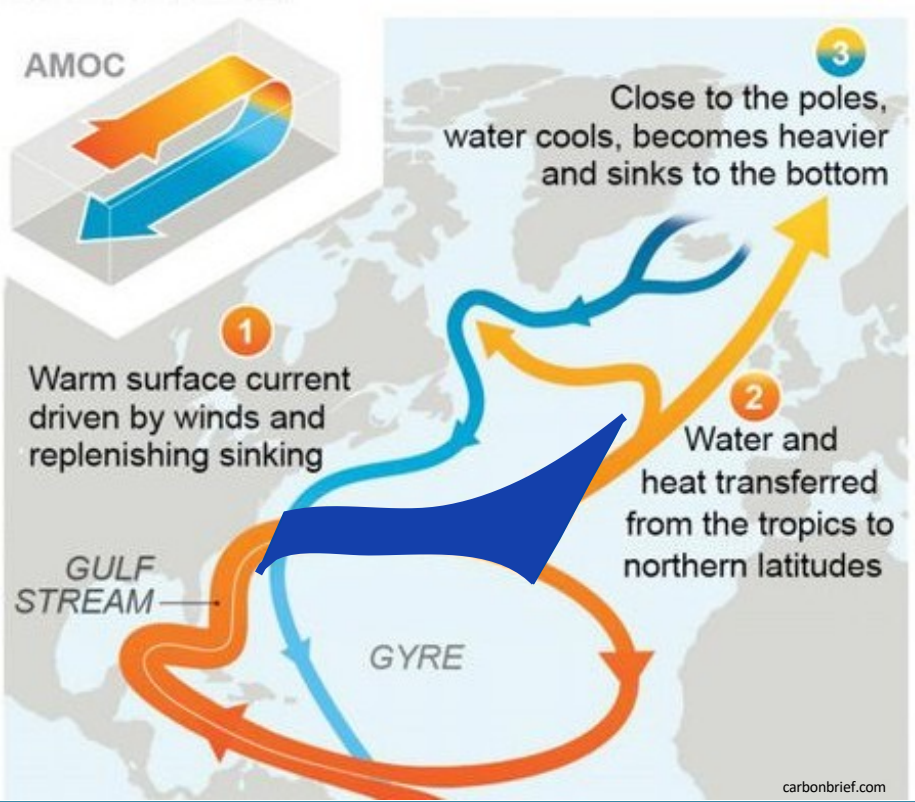
Jaune : refroidissement à la traversée

du bassin Gris : plongée en profondeur

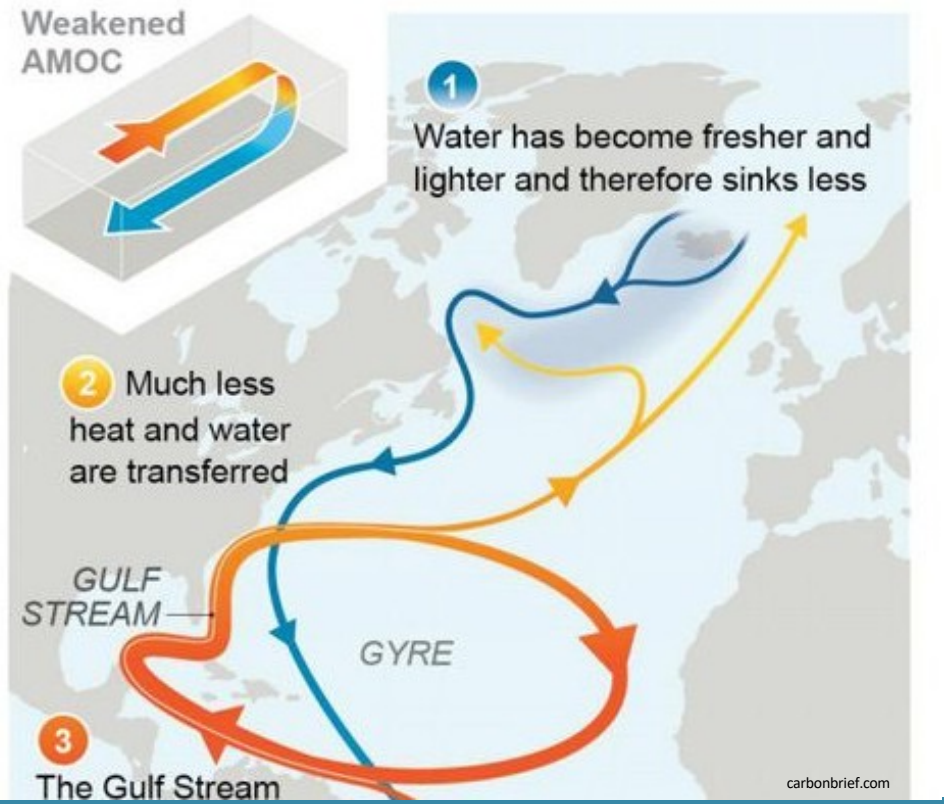
Comment le retournement va-t-il faiblir avec le climat ?



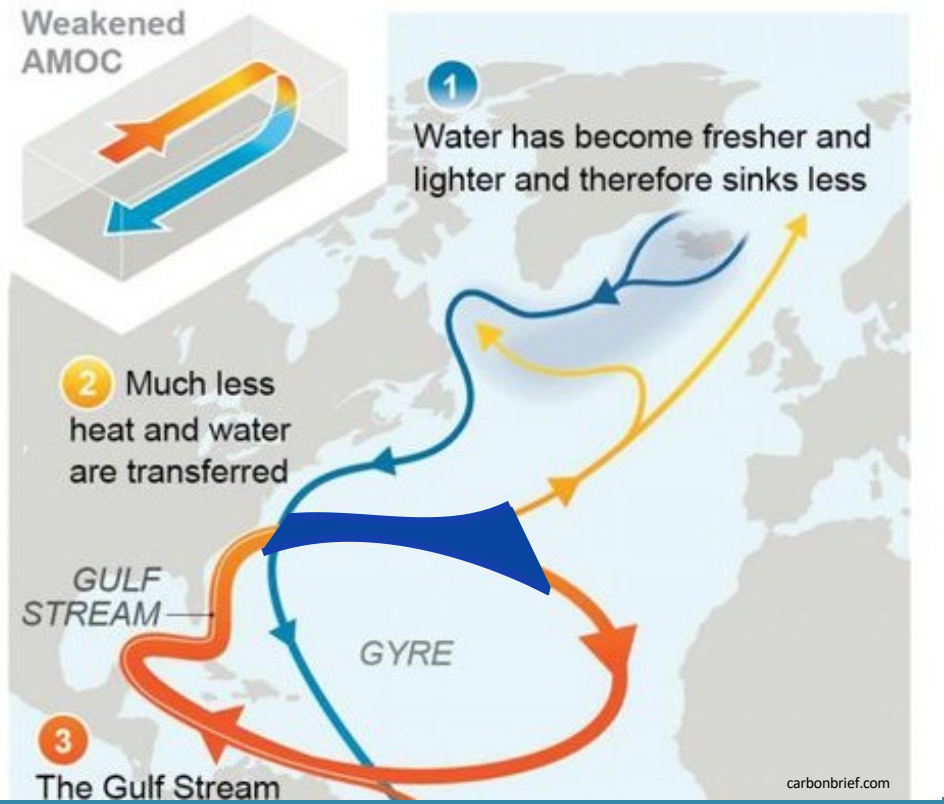
Comment le retournement va-t-il faiblir avec le climat ?



Comment le retournement va-t-il faiblir avec le climat ?



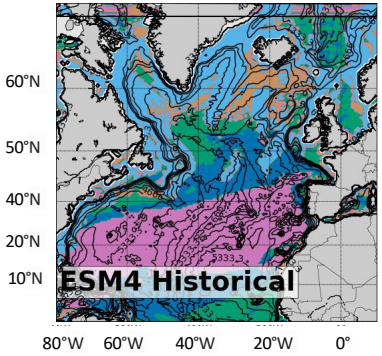
Comment le retournement va-t-il faiblir avec le climat ?



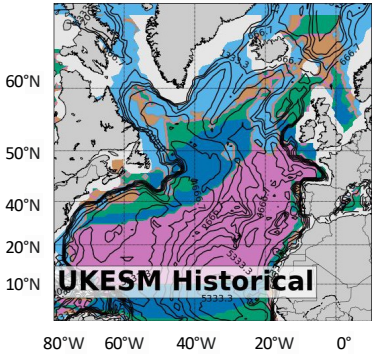
THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

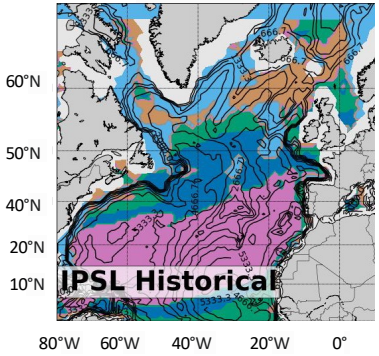
GFDL ESM4

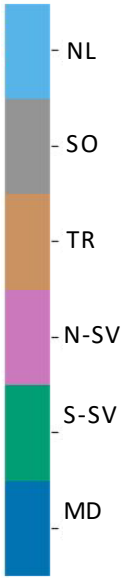


UKESM



IPSL



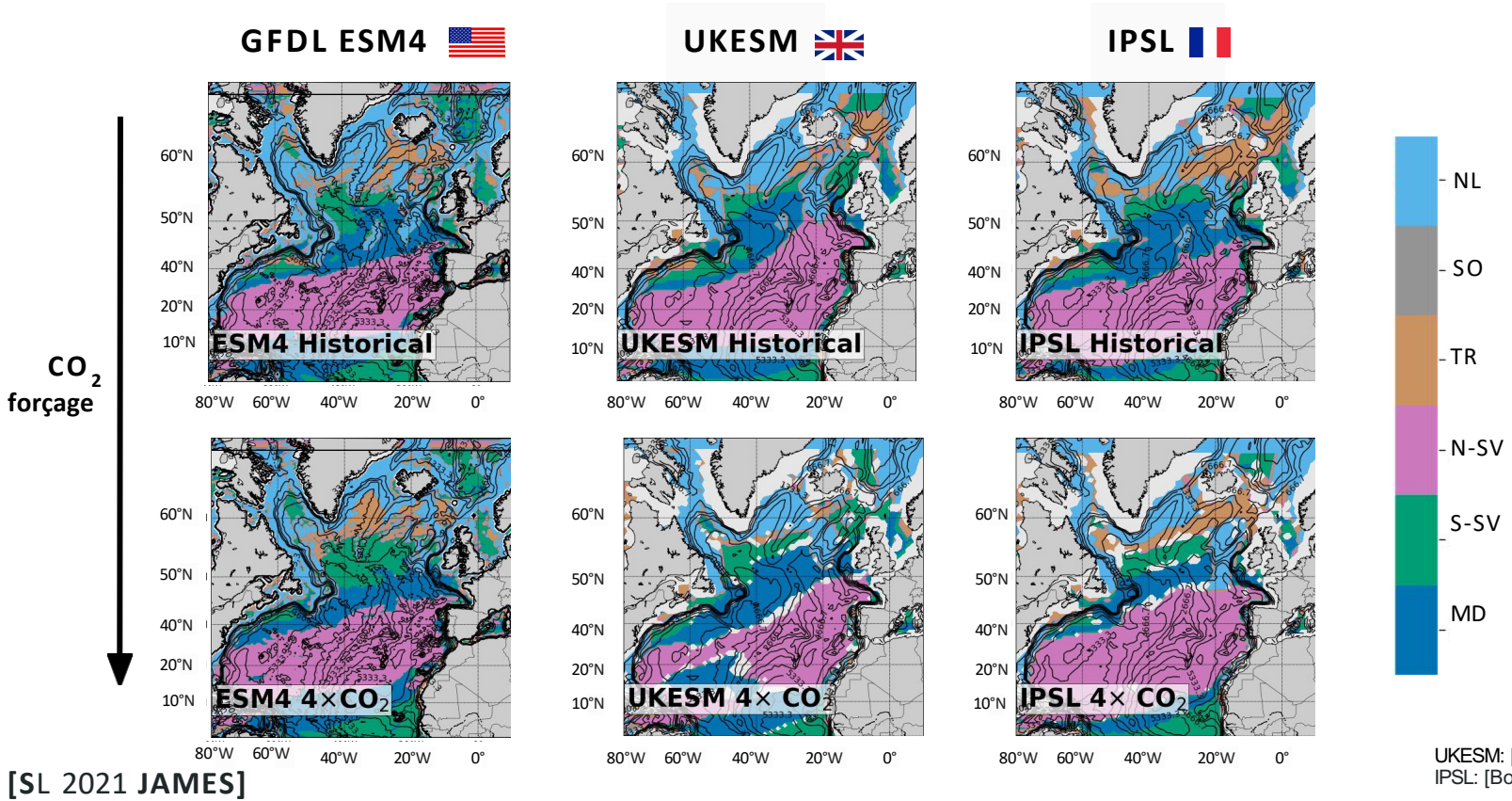


[SL 2021 **JAMES**]

UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

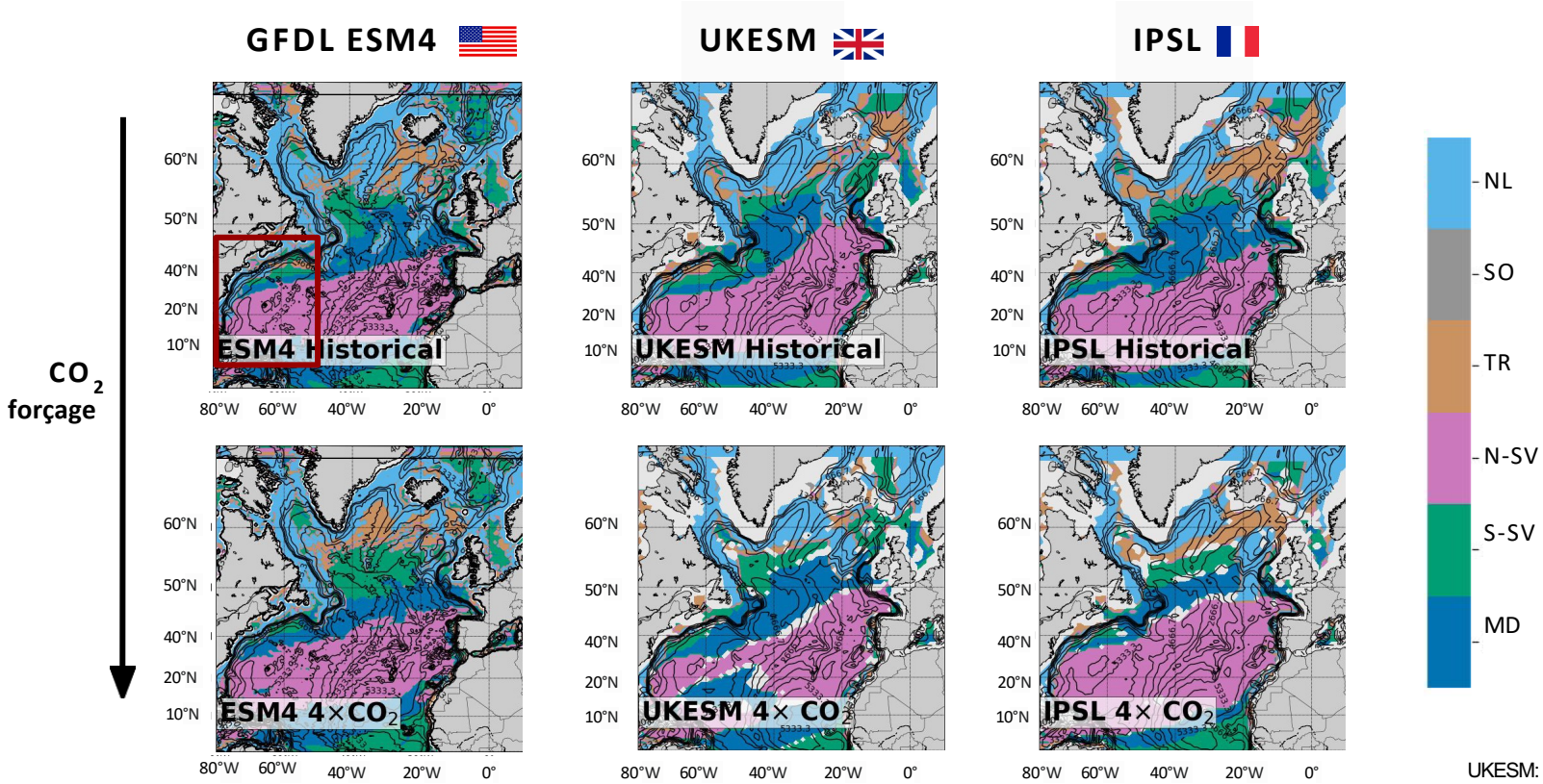


UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

[SL 2021 **JAMES**]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

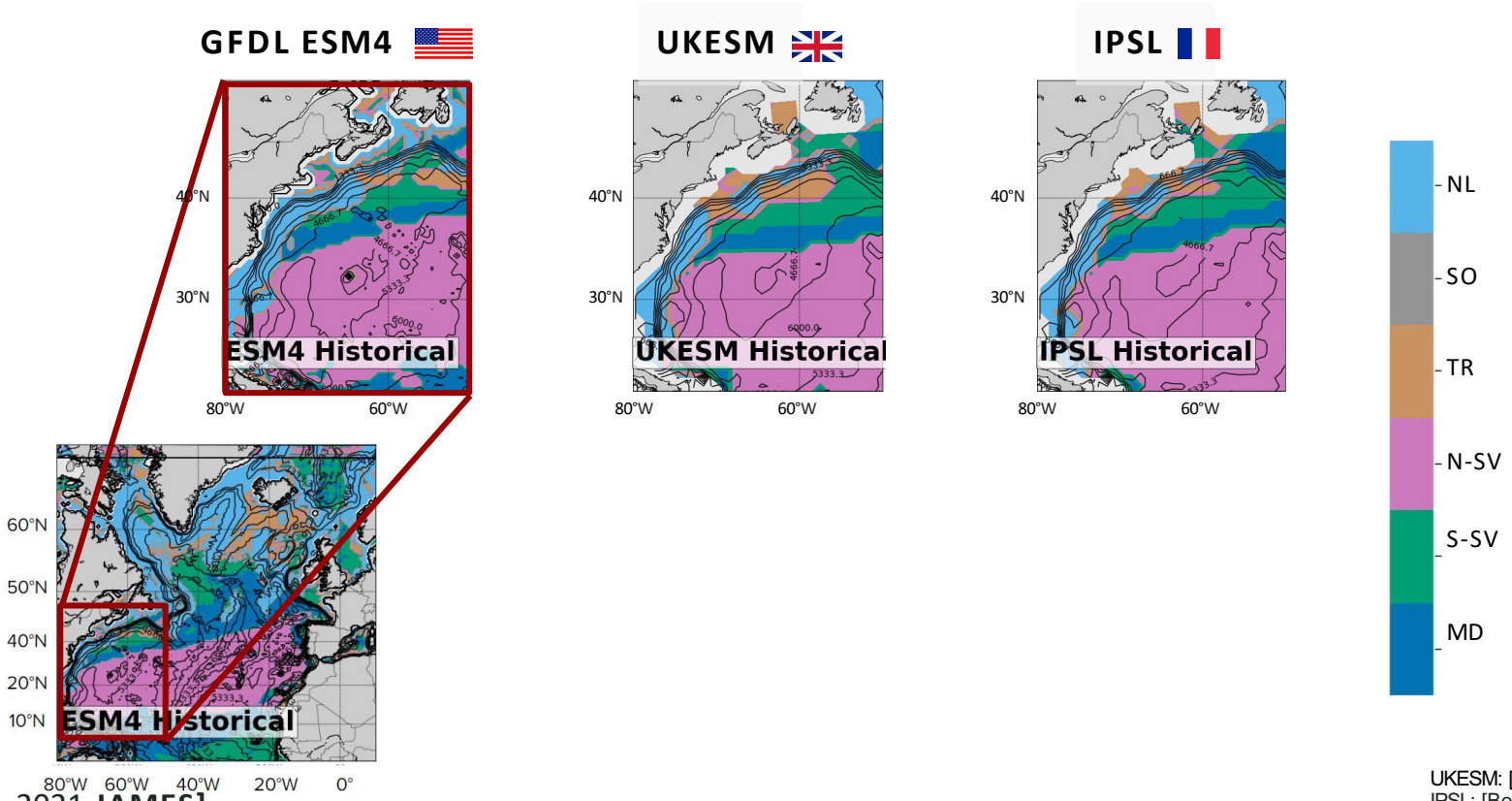


UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

[SL 2021 **JAMES**]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

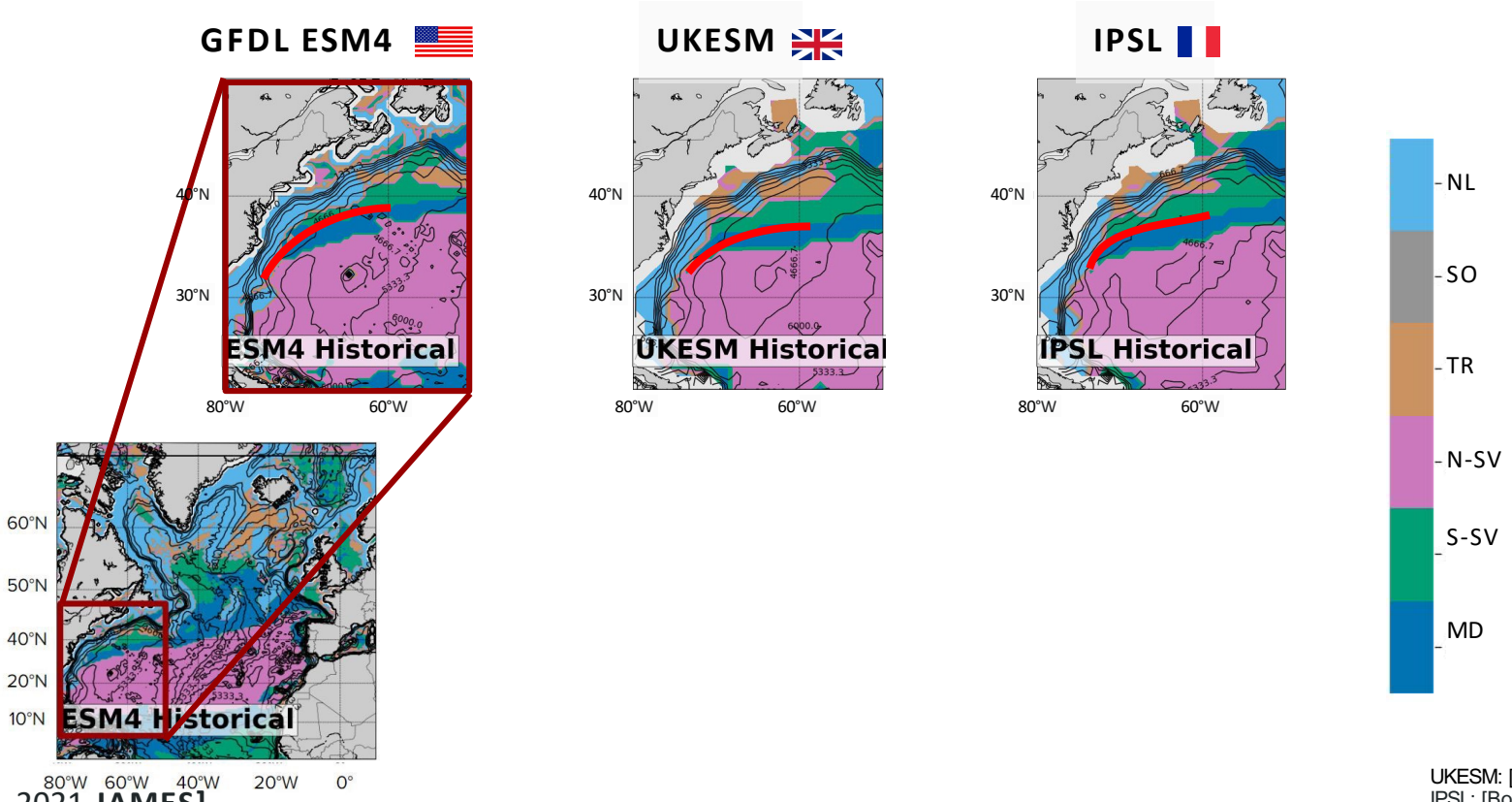


[SL 2021 JAMES]

UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

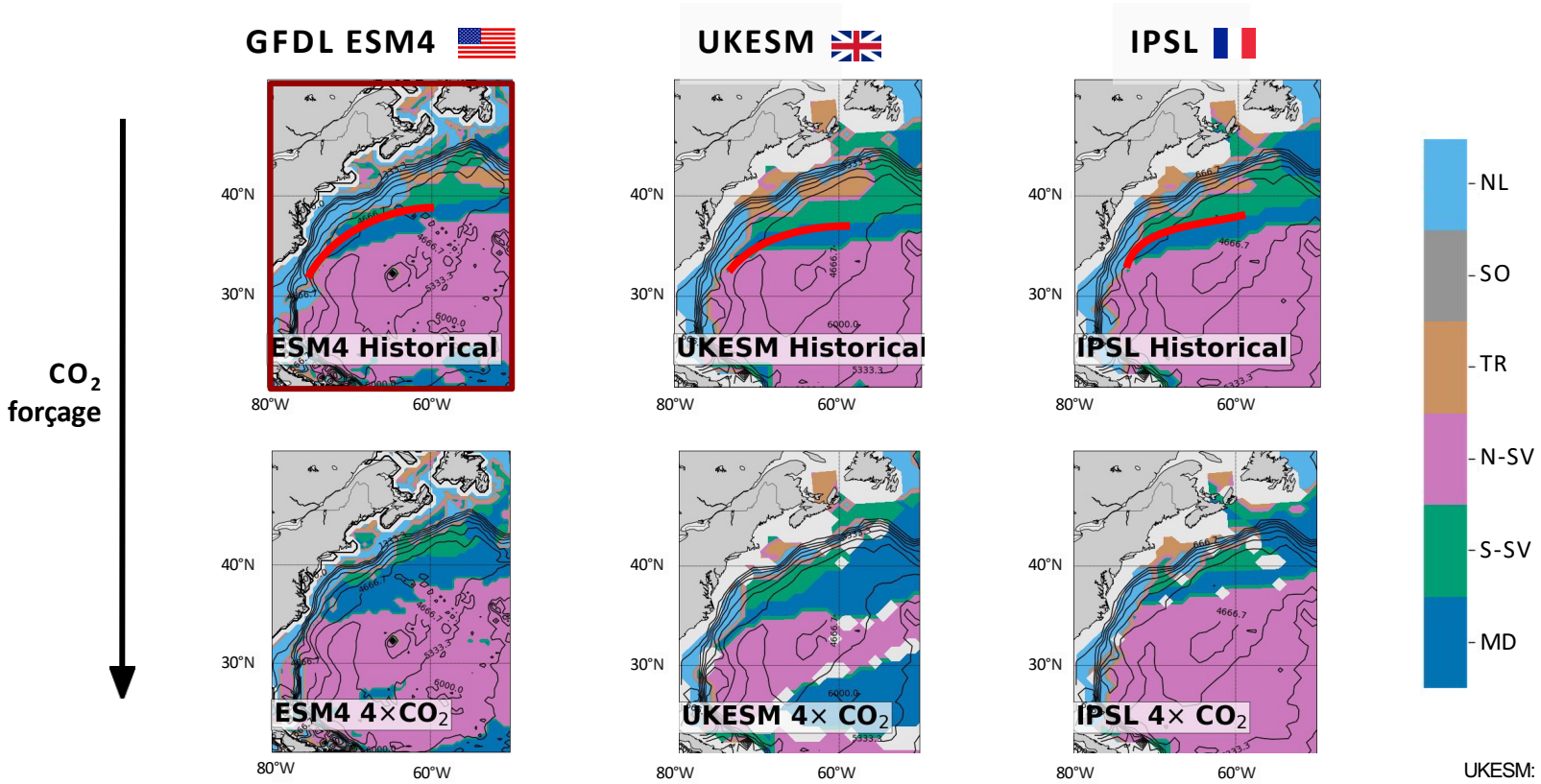


[SL 2021 JAMES]

UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts



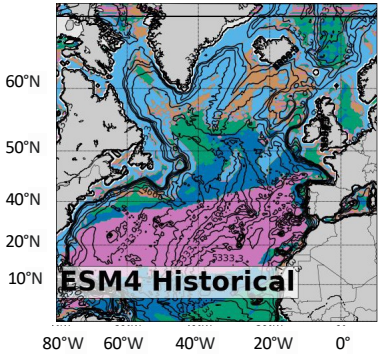
UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

[SL 2021 **JAMES**]

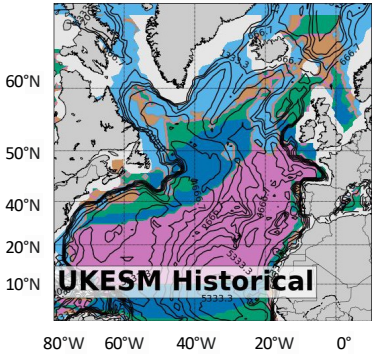
THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

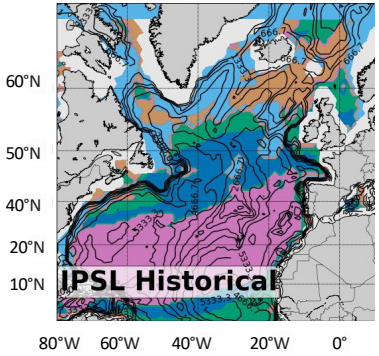
GFDL ESM4

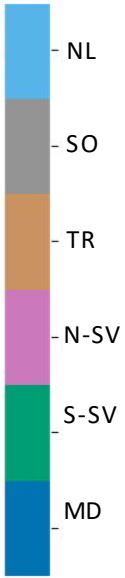


UKESM



IPSL





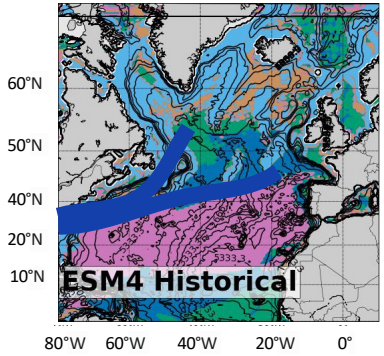
[SL 2021 **JAMES**]

UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

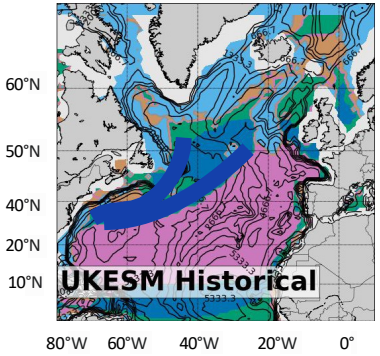
THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

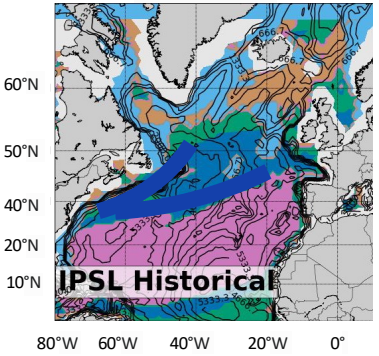
GFDL ESM4

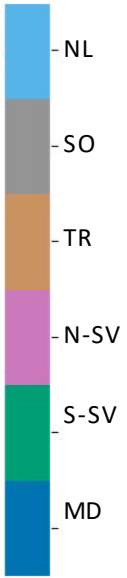


UKESM



IPSL



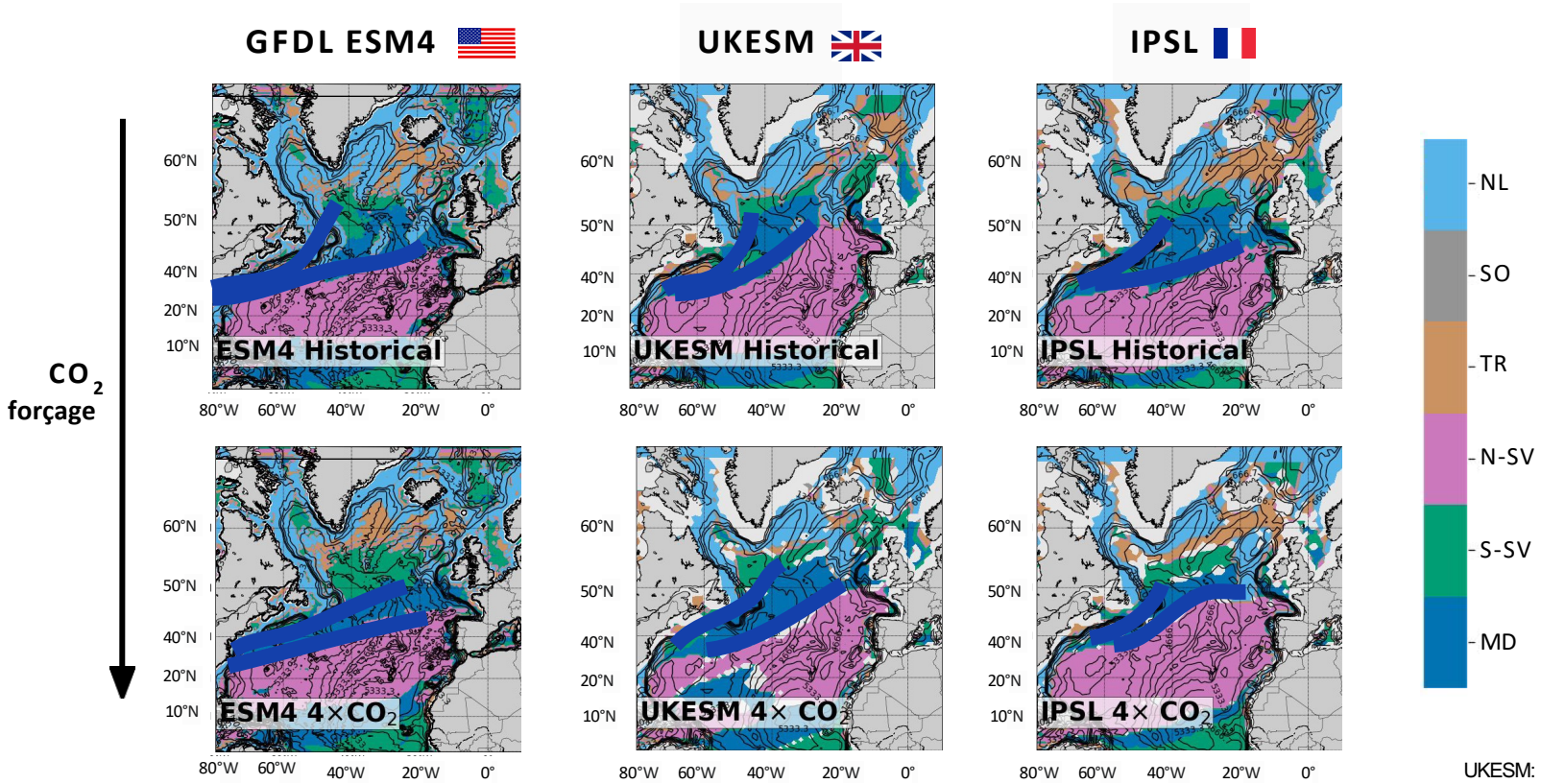


[SL 2021 **JAMES**]

UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

THOR : processus en cas de quadruplement brutal du CO_2

Les scénarios « historiques » se ressemblent, mais les scénarios futurs révèlent des écarts

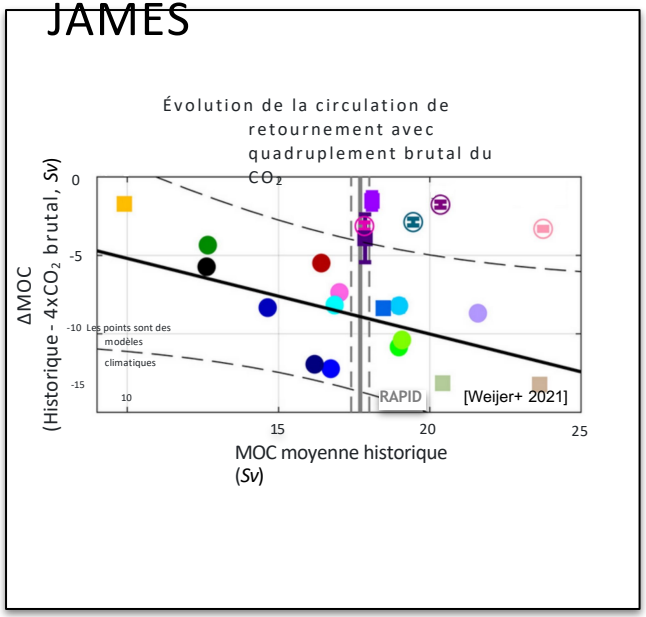


UKESM: [Senior+ 2020]
IPSL: [Boucher+ 2020]

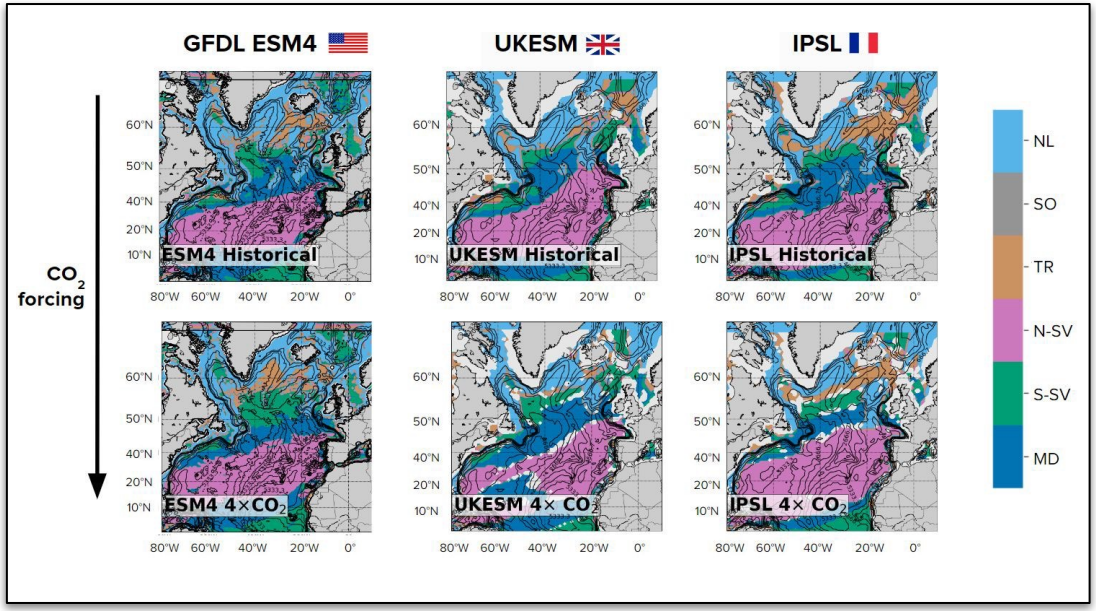
[SL 2021 **JAMES**]

Une méthode nettement meilleure

Précédente JAMES



Nouvelle méthode de SL 2021



Jeux de données

Océan physique :
Global Ocean Observing Systems (GOOS) : https://www.ocean-ops.org/goosreport/
Copernicus Marine (CMEMS) pour les réanalyses, les données satellitaires et les prévisions : https://marine.copernicus.eu/ Données des modèles climatiques CMIP6 : https://esgf.github.io/

Biogéochimie et écosystèmes océaniques :
Surface Ocean CO2 Atlas (SOCAT) : https://socat.info/
NASA OceanColor et PACE : https://pace.gsfc.nasa.gov/
Données sur la biodiversité marine : Ocean Biodiversity Information System (OBIS) : https://obis.org/ Occurrences d'espèces : Global Biodiversity Information Facility (GBIF) : https://www.gbif.org/

Pressions humaines :
Global Fishing Watch (API ouverte) : https://globalfishingwatch.org/ Allen Coral Atlas : https://www.allencoralatlas.org/

Régions polaires : MEOP : http://www.meop.net/ (les phoques !)

Outils

Modèle d’IA océanique Samudra :
https://m2lines.github.io/Samudra/docs/

Pour utiliser les données, la boîte à outils Python Pangeo :
https://pangeo.io/

Ressources de calcul :

Google Colab :

https://colab.research.google.com/ Copernicus

WEkEO : https://wekeo.copernicus.eu/

De passionnants (et vastes !) problèmes ouverts

Les mers côtières et de plateau, où modèles et satellites sont les moins bons :
La bathymétrie complexe, les apports fluviaux et les marées compliquent la tâche.
Descente d'échelle et émulation pour les risques côtiers.

Extrapolation vers les états climatiques futurs :
Un modèle entraîné sur l'océan historique et interrogé sur un monde à $4\times CO_2$ extrapole par construction. THOR et OceanCBM travaillent sur ce point.

Paramétrisations sous-maille dans les modèles :
Des schémas d'AA qui semblent bons hors ligne, puis dérivent ou divergent en ligne. Domaine très actif.

Une interprétabilité mécaniquement valide :
OceanCBM est une tentative ; le problème général reste très ouvert.

Pêche artisanale :
Une détection qui ne dépende pas de la diffusion volontaire de données par les navires.

Fusion multimodale :
Couleur de l'océan + in situ + acoustique + ADNe pour la composition des communautés.

Comment s’impliquer !

Chercheurs et étudiants :
Participez aux conférences : Ocean Sciences Meeting, EGU/AGU, Climate Informatics et les ateliers CCAI de NeurIPS/ICML/ICLR
Contribuez aux codes, p. ex. THOR (l’approche par régimes se transpose à d’autres bassins et variables) ou Samudra. Il y en a beaucoup !

ONG et gouvernements :
La labellisation de la Décennie des Nations unies pour l’océan, le GOOS et ses alliances régionales (IOGOOS, GOOS Africa), l’ODIS de la COI-UNESCO et le programme de partenariat de Global Fishing Watch

Bailleurs de fonds :
Les financements consacrés à l’océan et au climat sont réduits là où ils étaient traditionnellement accordés. Toute recherche compte, mais il faut surtout soutenir les séries temporelles de long terme, les infrastructures d’observation dans les pays du Sud et le renforcement des capacités

L’IA au service des océans et des systèmes marins

L’océan dans le système climatique

97 % de l’eau, 90 % de l’excès de chaleur, ~25 % de notre CO_2, > 50 % de l’oxygène

Une physique simple, avec des motifs complexes émergents

Les contrastes de densité entraînent une circulation de retournement de portée mondiale

Les conséquences d’un climat qui change

Réchauffement, acidification et vagues de chaleur touchent la production primaire, le zooplancton et la pêche

Riches en données et pauvres en compréhension, ou l’inverse ?

Observations, satellites et modèles ne couvrent chacun qu’une partie du problème

L’AA est le pont, pas la destination !

GORDON AND BETTY MOORE FOUNDATION

NSF

NOAA NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE