

A satellite view of Earth from space, showing a vast expanse of blue oceans and white clouds. In the upper left corner, a portion of a satellite is visible, featuring a large, dark, cylindrical component and a rectangular solar panel array extending outwards. The text is overlaid on the image in white.

7 octobre 2025 Brest Sauvons Le Climat

L'océan est-il le maître du climat?

Paul Tréguer

Institut Universitaire Européen de la Mer-UBO

European Academy of Sciences EurASc

www.reperes-evolutiondumonde.fr

Credit: NASA



Introduction

1-L'océan régule le changement climatique

2-L'océan subit le changement climatique

3-L'océan peut nous aider à changer de cap

Conclusions

Credit: NASA



Introduction

1-L'océan régule le changement climatique

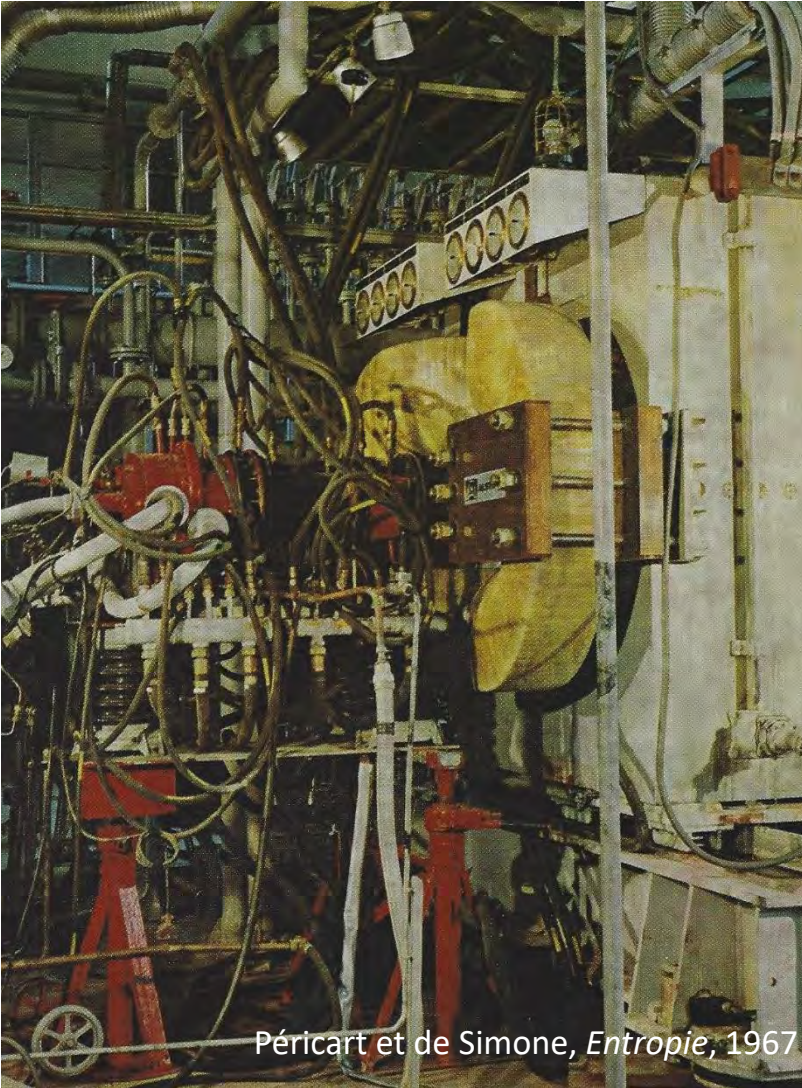
2-L'océan subit le changement climatique

3-L'océan peut nous aider à changer de cap

Conclusions

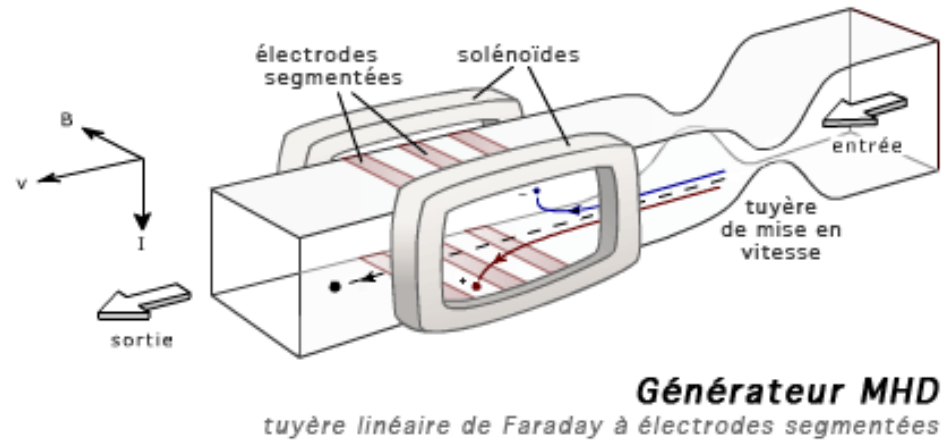
Credit: NASA

Qui suis-je?



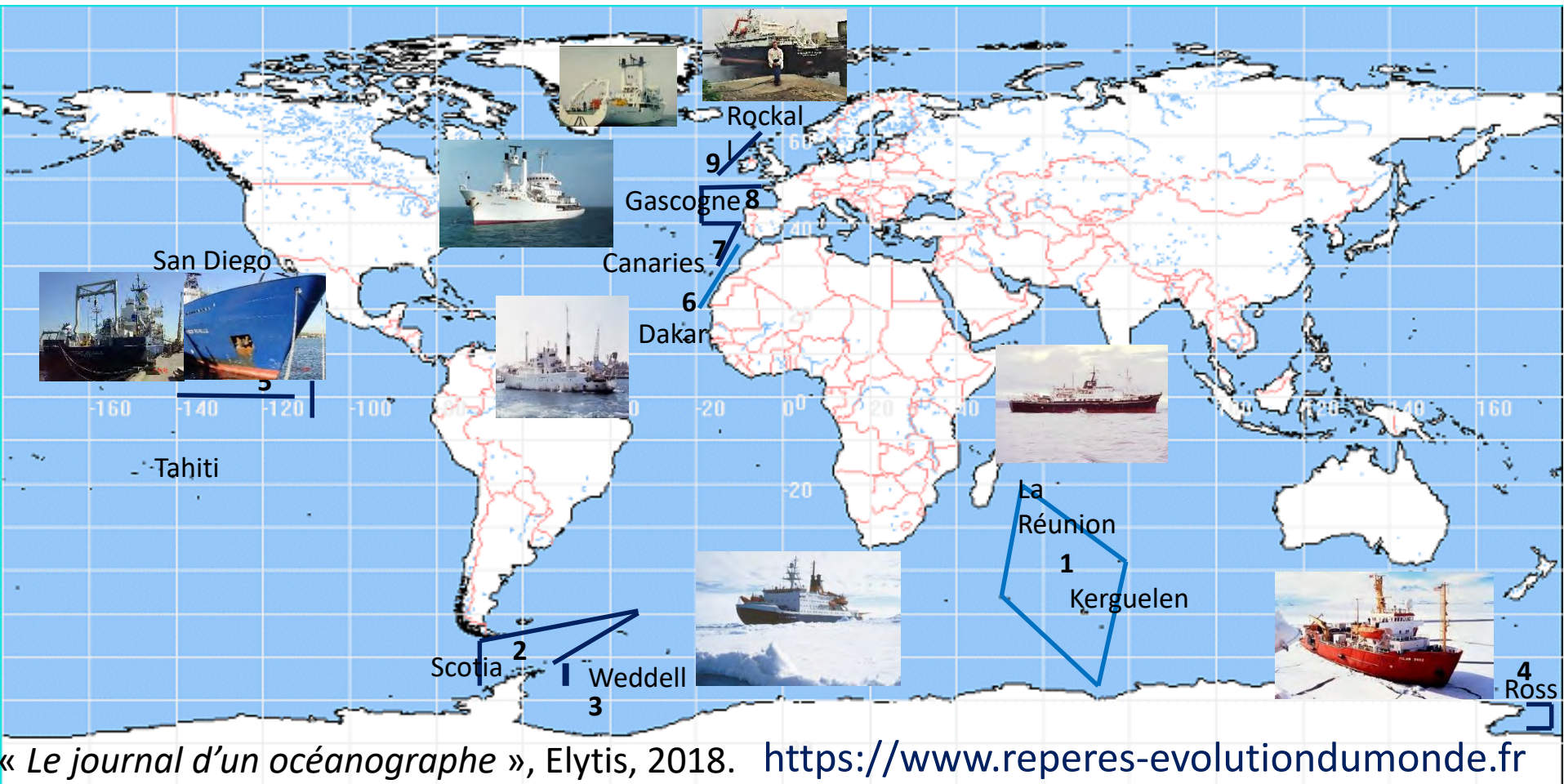
Péricart et de Simone, *Entropie*, 1967

1966-1967: Ingénieur à **Electricité de France** (EDF), Direction des Etudes et Recherches, au centre d'essais et de recherches des Renardières (près de Fontainebleau)



Banc d'essai de 8 MW thermiques pour la **production d'électricité par MHD** (MagnétoHydroDynamique).

Qui suis-je? Un océanographe: 18 campagnes océanographiques hauturières de 1970-2003, dans tous les océans



1-Antiprod 1,2,3, Antares 1; 2-Apasara 3; 3-EPOS; 4-Ross Sea 90; 5-Biocomplexity-1 6-Cineca 1, 2, 4; 7-Bord-Est; 8-Phygas 32, 44, Polygas, Zephir; 9-UF 2001

Institut Universitaire Européen de la Mer IUEM



© Jérôme Ammann - CNRS

Observatoire des Sciences de l'Univers, UBO, CNRS, IRD

Créé en 1997

IUEM - Institut, Ecole interne et OSU

Institut universitaire de référence pour la structuration des sciences marines en Bretagne, en France et dans le monde.

3 missions

FORMATION



640

Personnels

RECHERCHE



290

Masters

OBSERVATION



200

Doctorants



Sept unités de recherche pluridisciplinaires

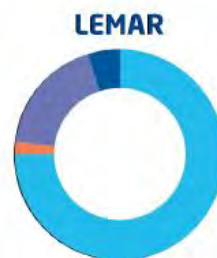


Sept Unités de Recherche fédérées
pour étudier l'océan
et le littoral sous tous leurs aspects.

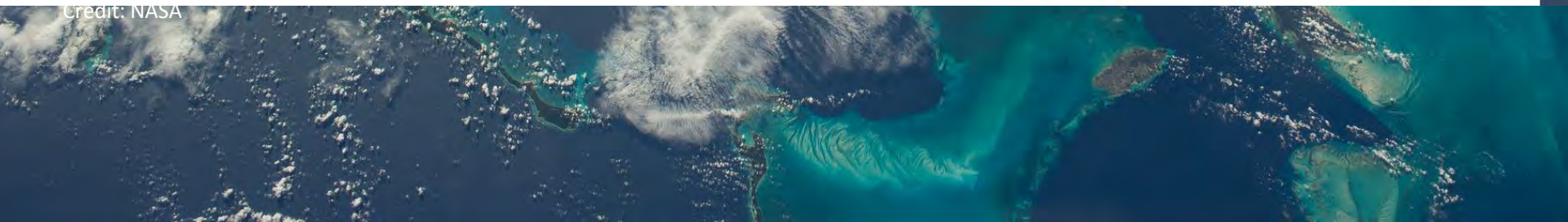
UBO
IRD
CNRS (INSU INEE)
UBS

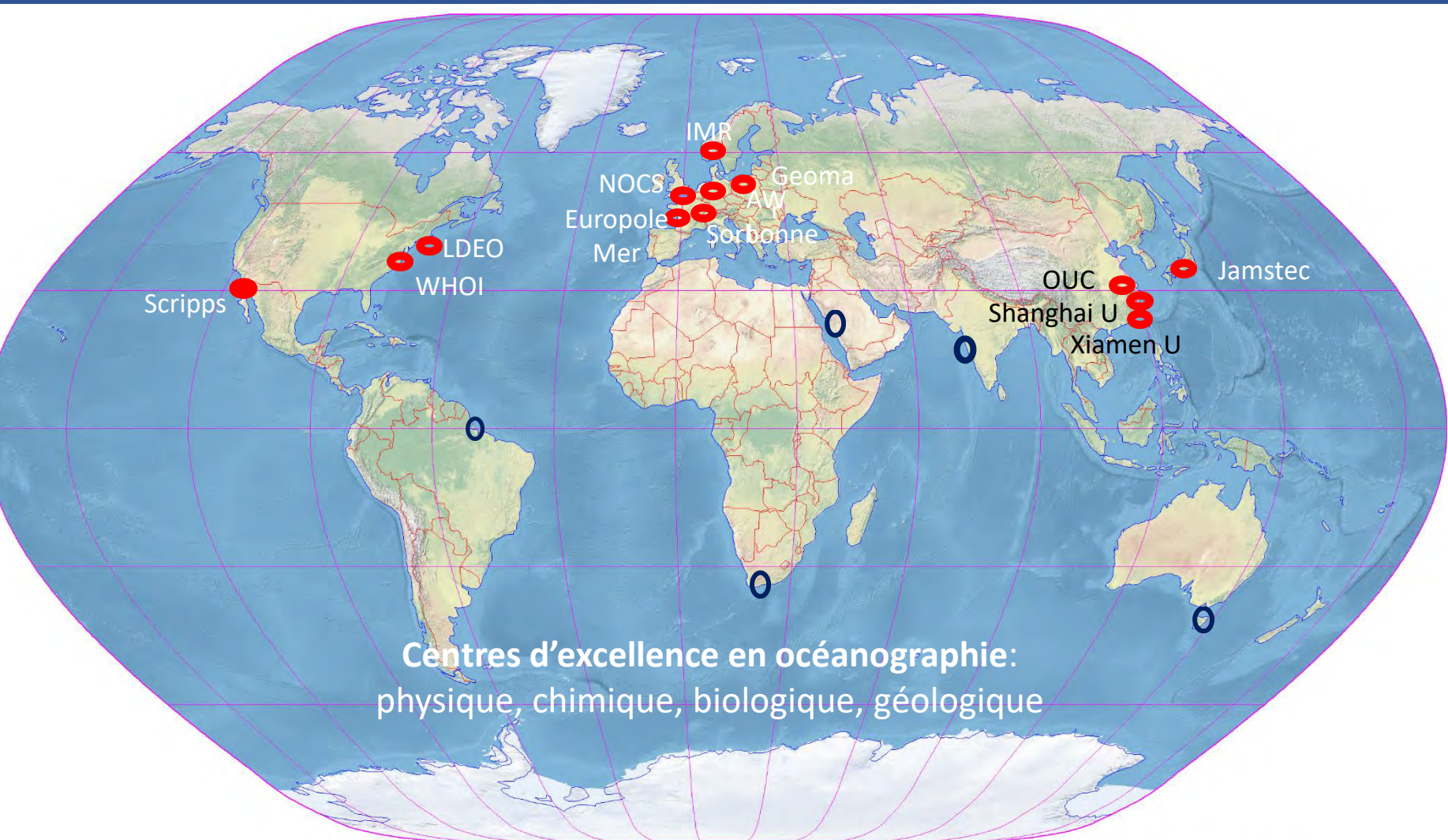
Partenariats Ifremer structurants :

AMURE
LEMAR
LOPS
BEEP
Geo-Ocean



Credit: NASA





Centres d'excellence en océanographie:
physique, chimique, biologique, géologique

Äquatorialmaßstab





Shanghai ranking Oceanography 2024

- 1-University of San Diego (SCRIPPS)
- 2-University of Washington
- 3-University of Washington (Quingdao)
- 4-Oregon State University (OSU)
- 5-Massachusetts Institute of Technology (MIT)
- 6-Shanghai Jiao Tong University
- 7-University of Hawaii at Manoa
- 8-Sorbonne University**
- 9-University of Southampton
- 10-University of Southampton
- 11-Columbia University
- 12-Columbia University
- 13-University of Western Brittany (UBO)(IUEM)**

Credit: NASA

**Message: la recherche au niveau international est une compétition...
qui peut se transformer en “coo-pétition”.**



Introduction:

1-L'océan régule le changement climatique

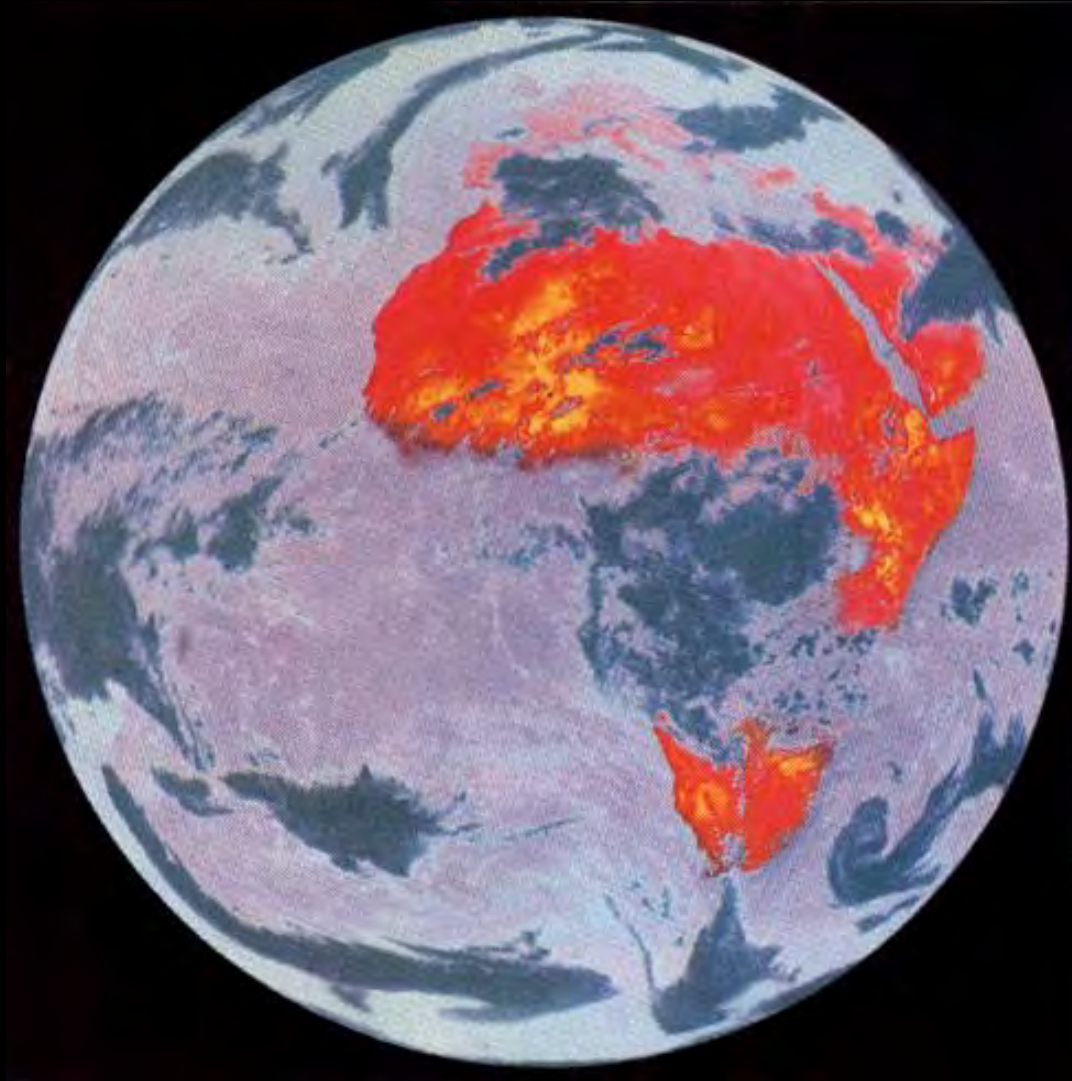
2-L'océan subit le changement climatique

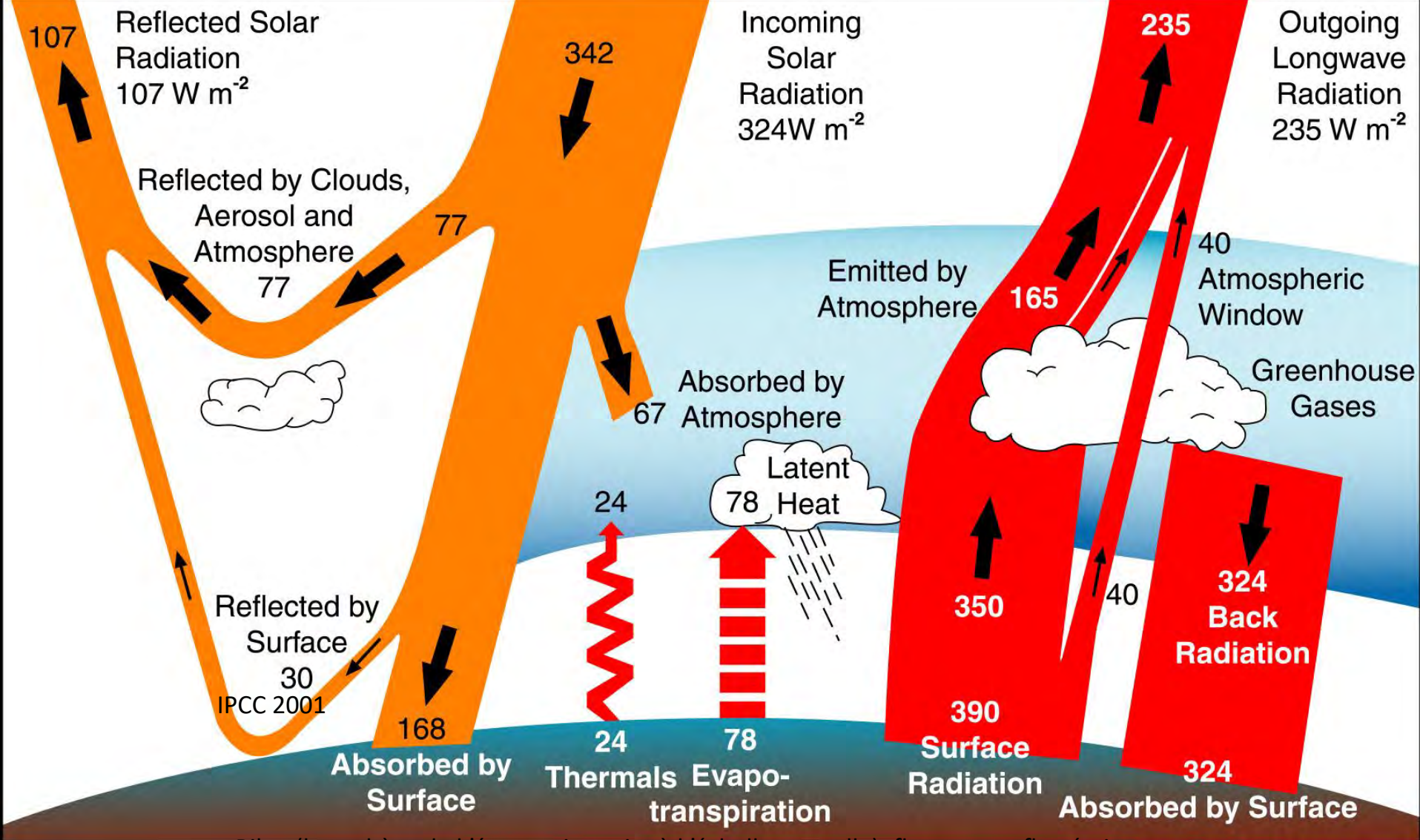
3-L'océan peut nous aider à changer de cap

Conclusions

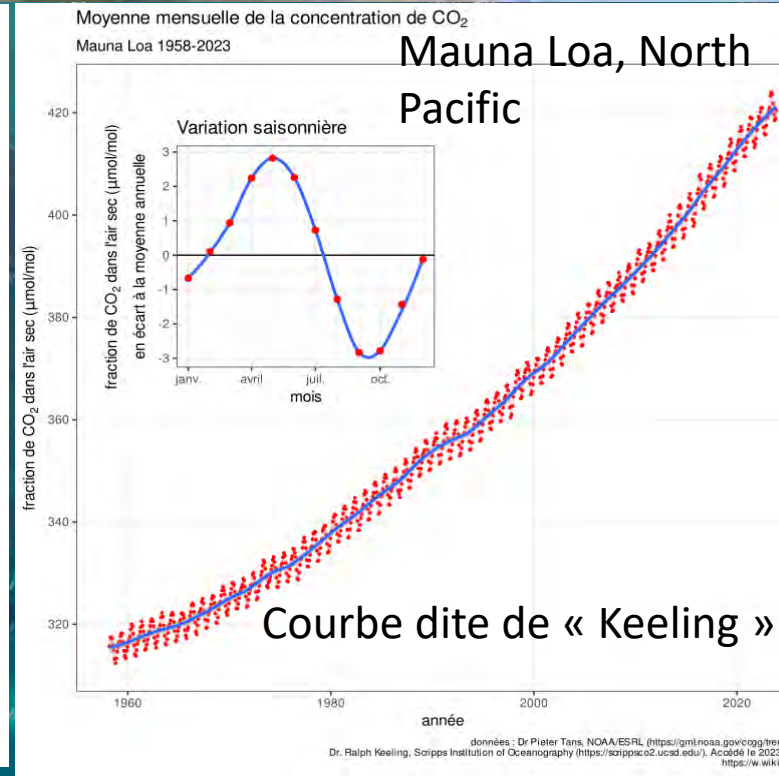
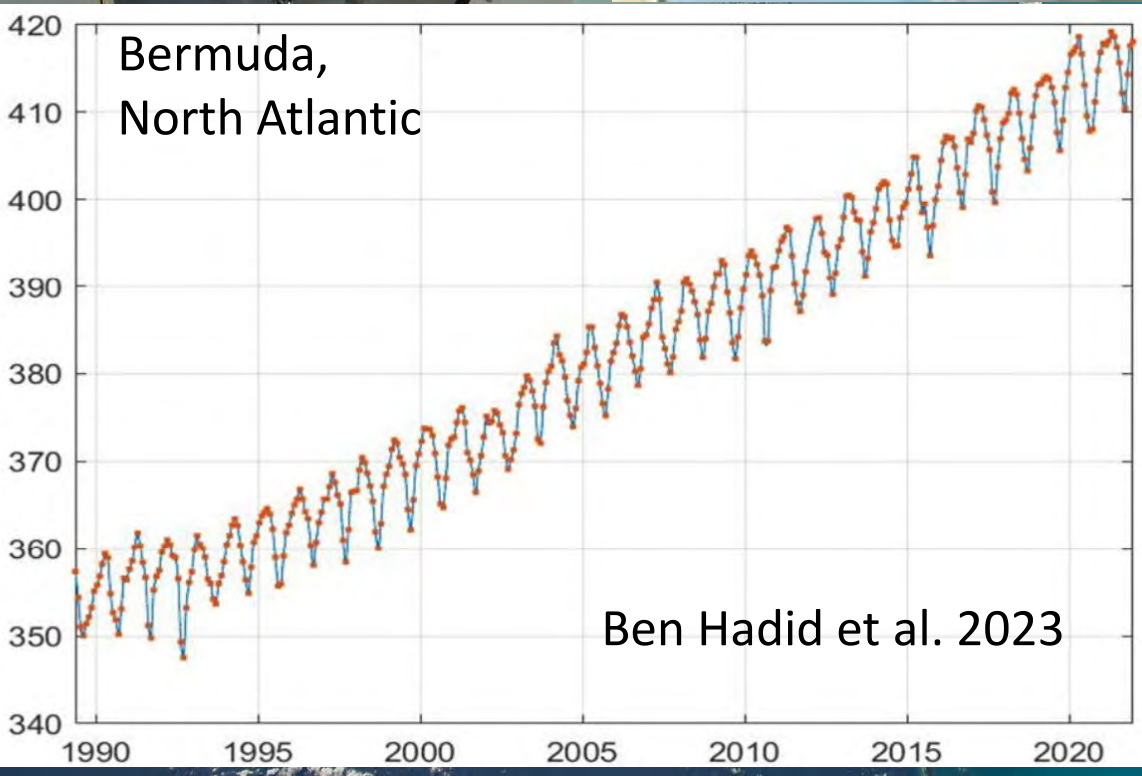
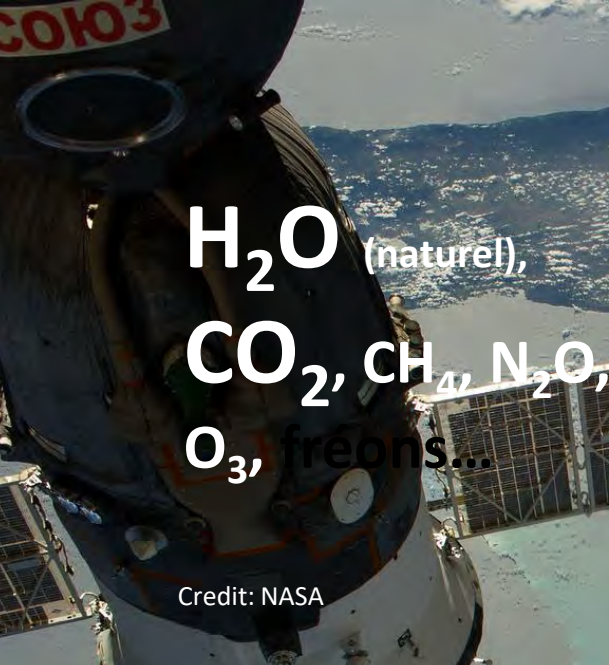
Credit: NASA



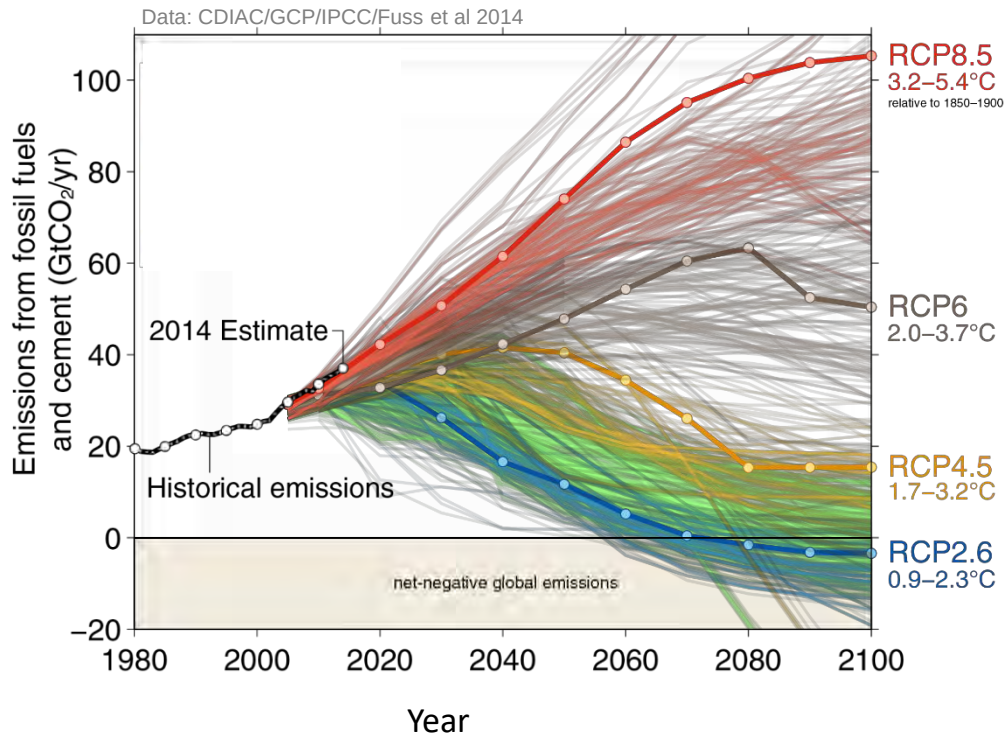




Bilan thermique à la surface de la Terre
 (flux en watt par mètre carré): effet de serre
 Équilibre: $168 + 324 = 24 + 78 + 390 = 492 \text{ W m}^{-2}$



RCP = Representative Concentration Pathway =
trajectoire du forçage radiatif



**Trajectoire actuelle:
+3.1°C à la fin du
siècle sauf si
drastiques
changements dans les
contributions
déterminées au
niveau national (CDN)**

Source: Fuss et al 2014; CDIAC; Global Carbon Budget 2014; IPCC WGI & WGIII scenario database; VOSTOK+EPICA; Hansen et al. 2013

DÉSÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE DE LA TERRE

 <  0.47 ± 0.1 (0.87 ± 0.12) W m^{-2}

 $\approx$  Réduction requise de la teneur en CO_2 : -57 ± 8 ppm

Radiation
solaire
incidente



Radiation
sortante

ATMOSPHERE
1% (2%)

GAIN THERMIQUE TOTAL
 $358 \pm 37 \text{ ZJ}$

CRYOSPHERE
4% (3%)

CONTINENT
6% (5%)

OCEAN

89% (90%)

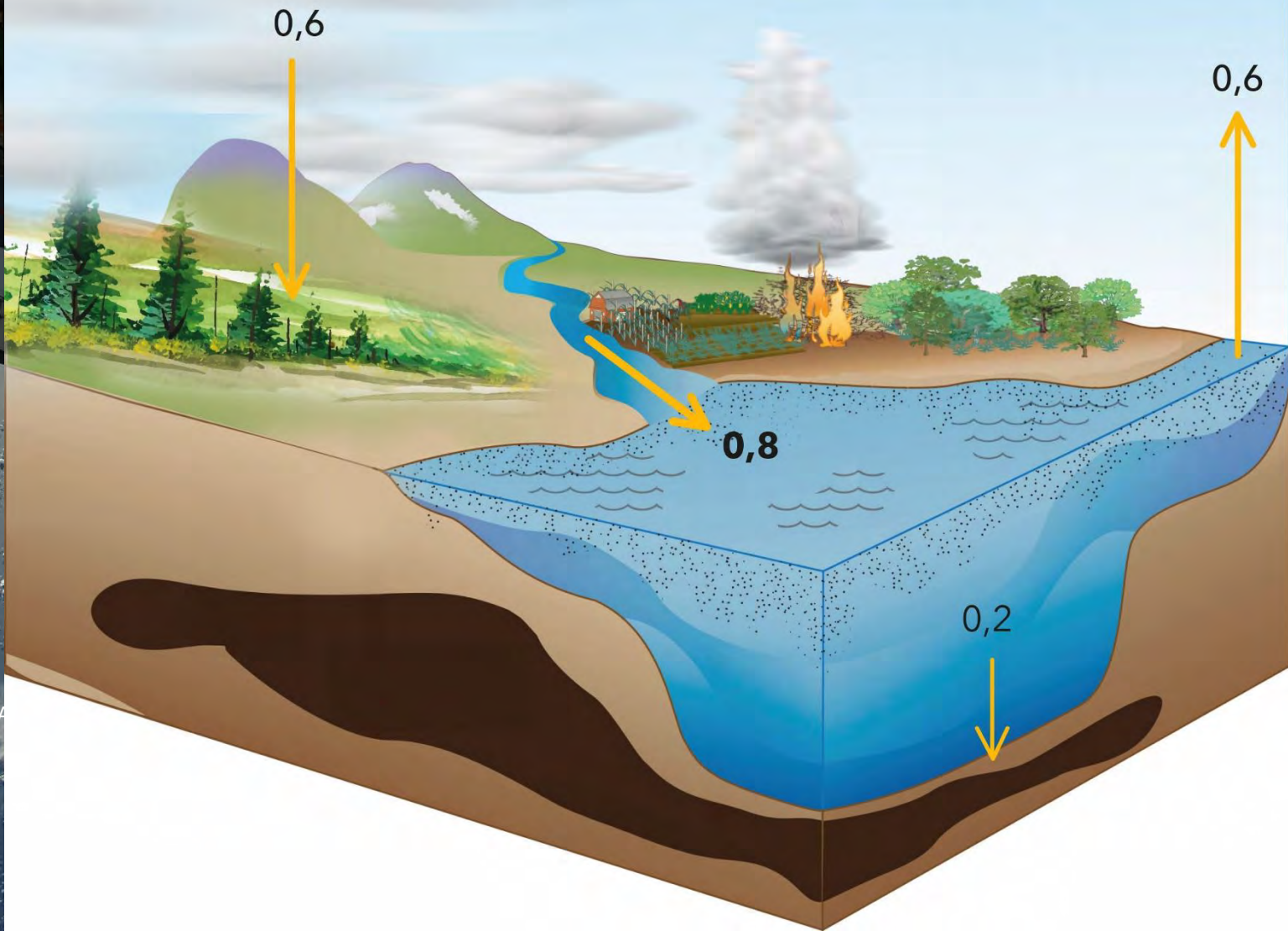
0–700 m: 52% (52%);
700–2000m: 28% (30%);
> 2000m: 9% (8%);

Karina von Schuckmann, <https://essd.copernicus.org/articles/12/2013/2020/>

1971–2018 (2010–2018)

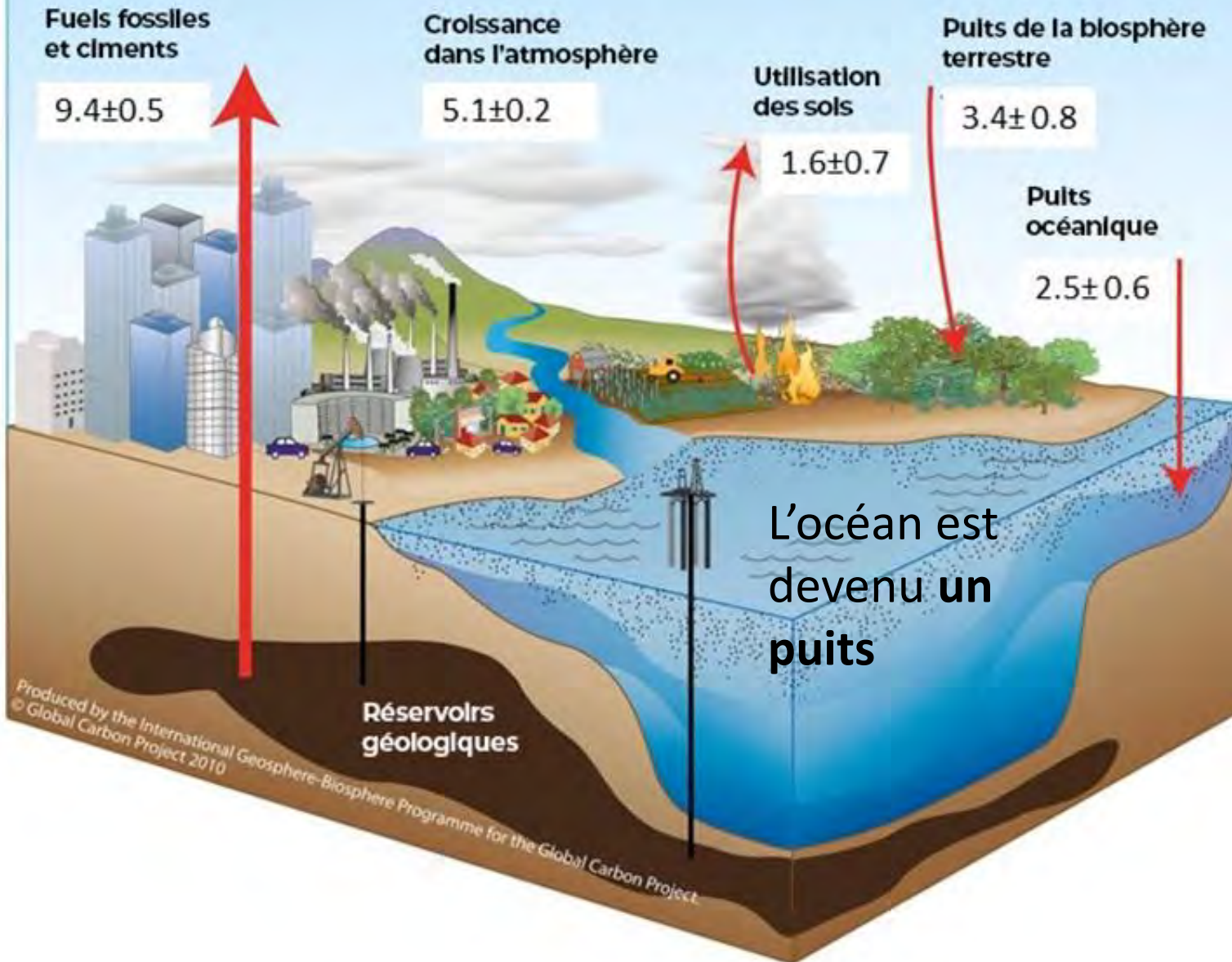


Avant l'ère préindustrielle, l'océan est une **source de CO₂** pour l'atmosphère (flux en milliards de tonnes de carbone par an)



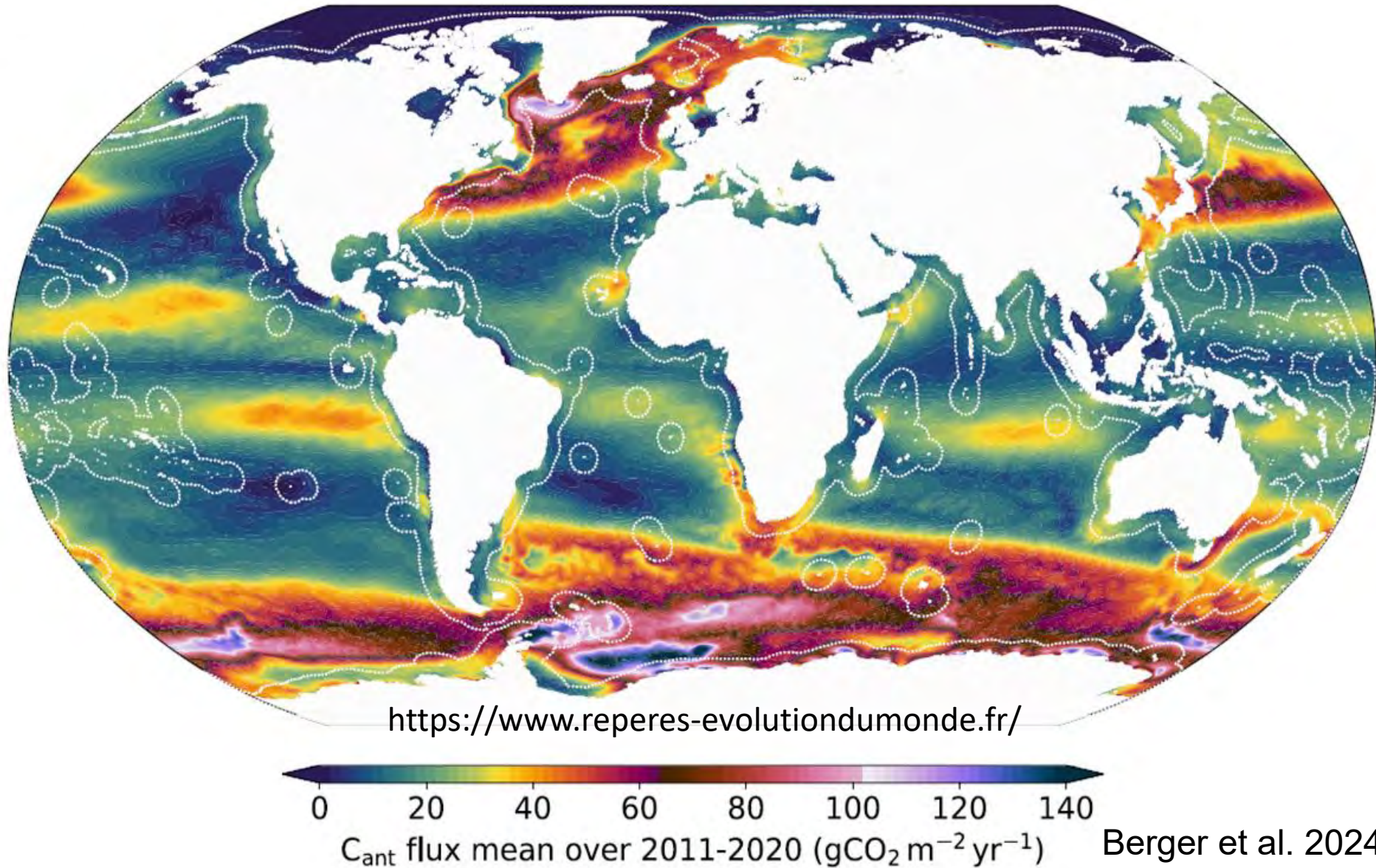
Budget global du dioxyde de carbone

Gigatonnes de carbone par an
2010-2019



Credit: NA

Le puits de carbone océanique et les zones économiques exclusives





Conclusion de la première partie:

L'océan régule le changement climatique, en absorbant:

- 90% de la chaleur générée par l'excès d'effet de serre,
- plus du quart des émissions des gaz à effet de serre libérées par les activités humaines.

Sans l'océan l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre serait bien plus intense.

Credit: NASA

A satellite view of Earth from space, showing a vast expanse of blue oceans and white clouds. In the foreground, a portion of a satellite is visible, including a large, dark, cylindrical component and a rectangular solar panel array. The satellite is positioned in the upper left corner, looking down at the Earth. The text is overlaid on the image in a white, sans-serif font.

Introduction:

1-L'océan régule le changement climatique

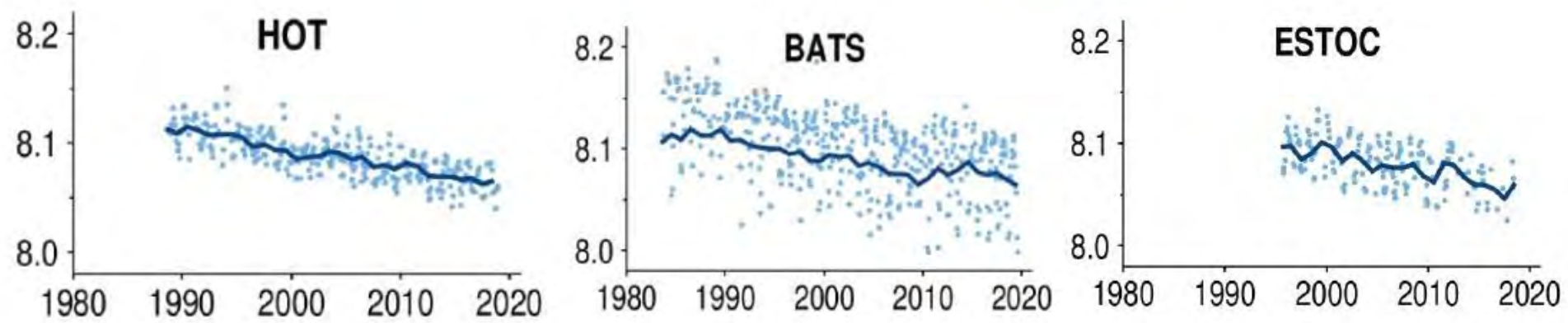
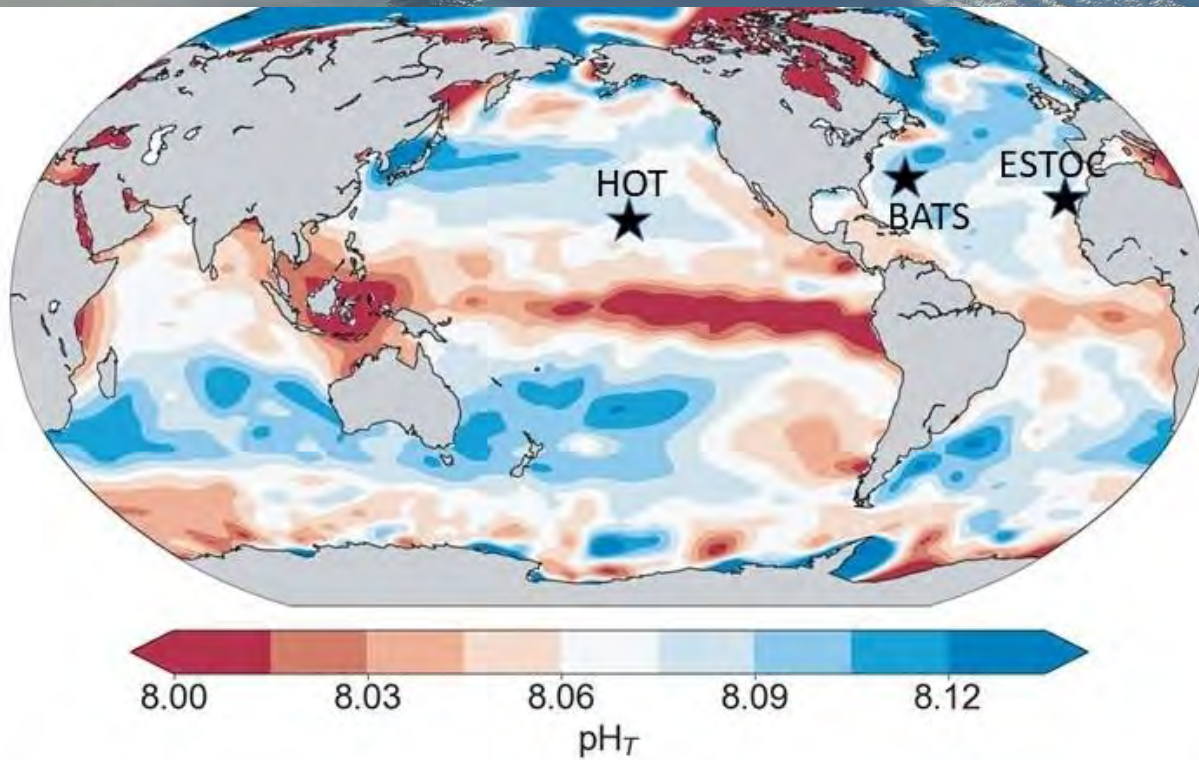
2-L'océan subit le changement climatique

3-L'océan peut nous aider à changer de cap

Conclusions

Credit: NASA

En absorbant du CO_2 l'océan s'acidifie...



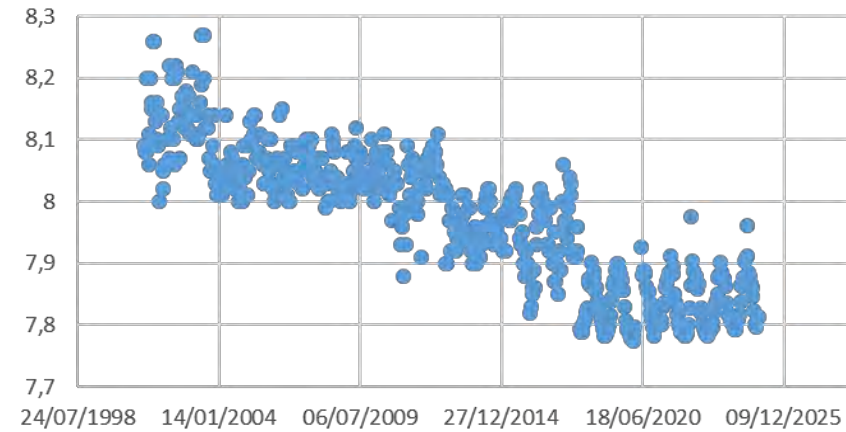
pH

SOMLIT



Crédit: OSU IUEM et SBR

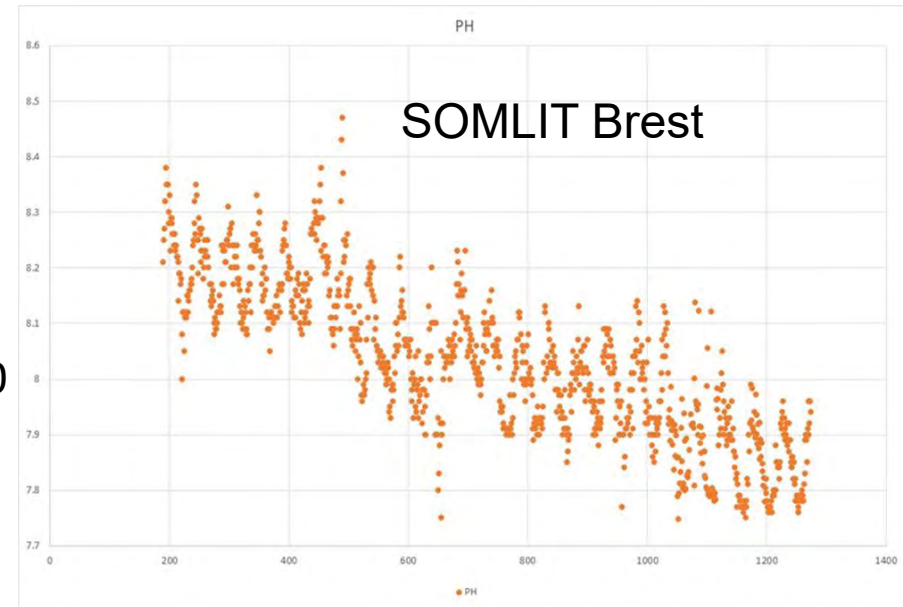
SOMLIT Astan



8.5

SOMLIT Brest

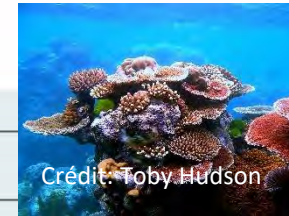
8.0



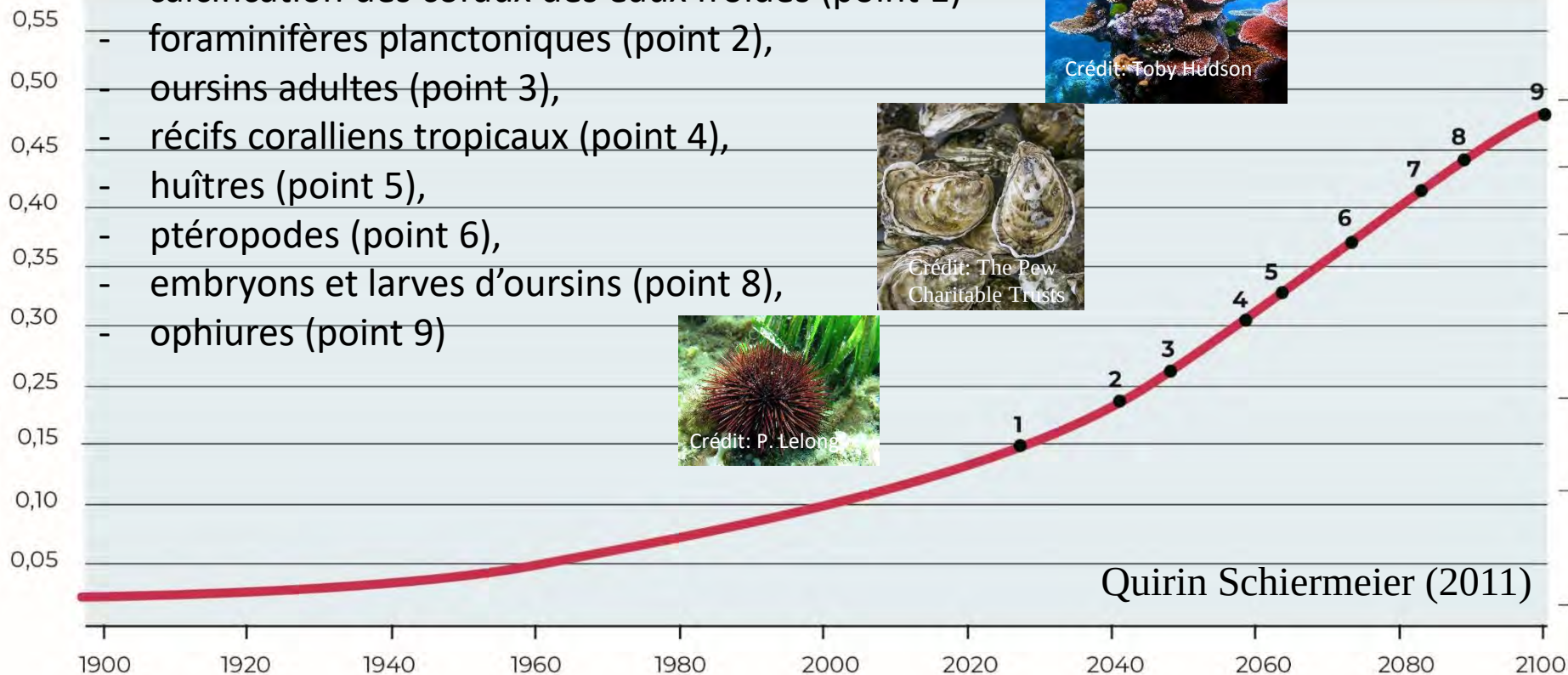
Si, pour les stations situées en plein océan Atlantique et Pacifique, le pH a décru d'environ 0.03 unités depuis les années 1990, dans les eaux côtières de Bretagne occidentale, il a décru de 0.3 unités en 20 ans.

IMPACTS DE LA VARIATION DU pH SUR LES ORGANISMES MARINS:

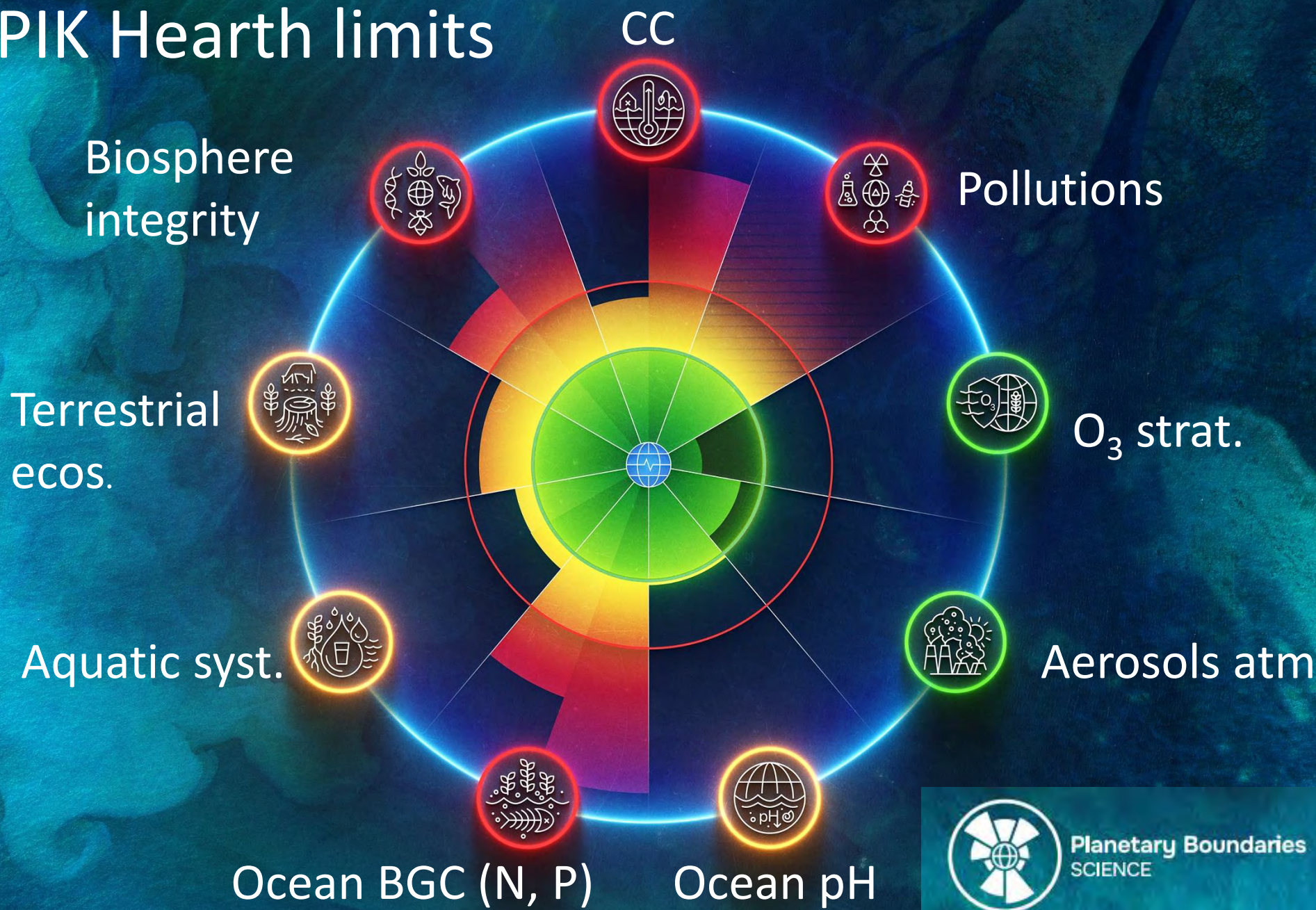
- calcification des coraux des eaux froides (point 1)
- foraminifères planctoniques (point 2),
- oursins adultes (point 3),
- récifs coralliens tropicaux (point 4),
- huîtres (point 5),
- ptéropodes (point 6),
- embryons et larves d'oursins (point 8),
- ophiures (point 9)



Modification du pH par rapport à l'ère préindustrielle



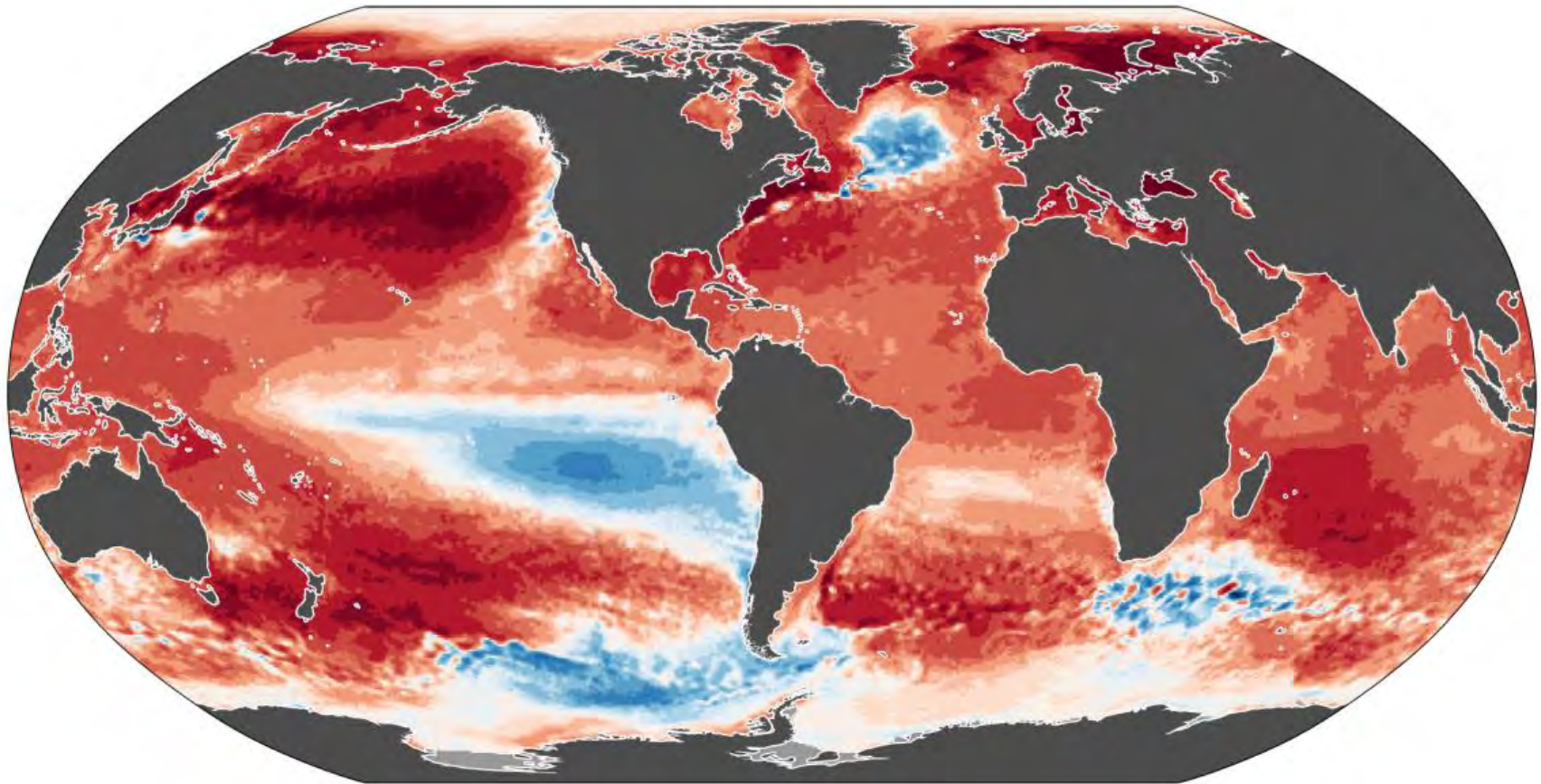
PIK Hearth limits



Planetary Boundaries
SCIENCE

Trend in sea surface temperature for 1993–2023

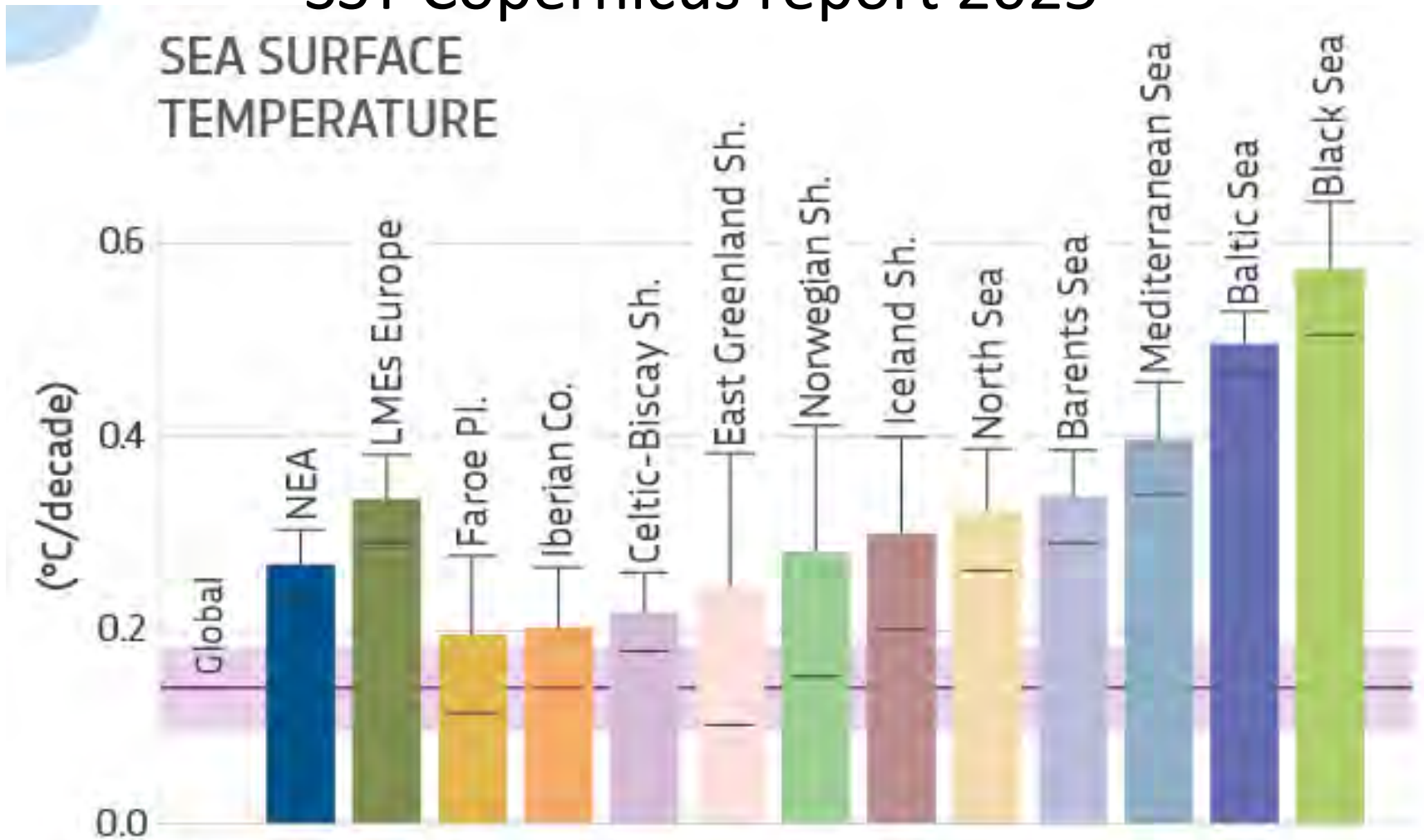
Data: ESA CCI SST v3.0 • Reference period: 1991–2020 • Credit: C3S/ECMWF



Trend (°C per decade)



SST Copernicus report 2025



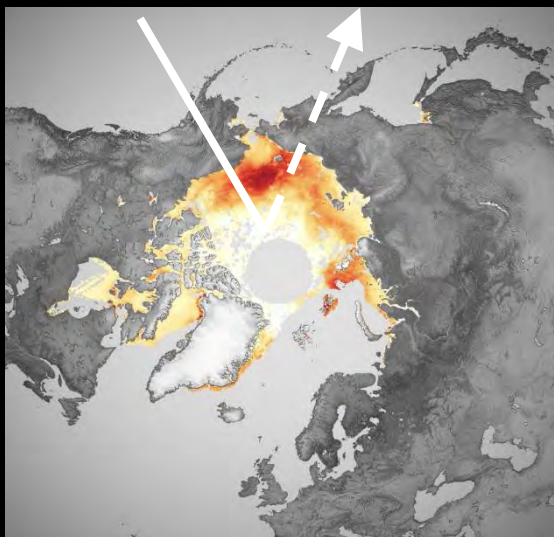
ABOVE: Ocean change is not uniform. Semi-enclosed basins such as the Black, Baltic and Mediterranean Seas are warming far more rapidly due to limited exchange with the open ocean. Adapted from: von Schuckmann et al., 2025. Copernicus Ocean State Report 9

LMEs are natural regions of ocean space encompassing coastal waters from river basins and estuaries to the seaward boundary of continental shelves and the outer margins of coastal currents

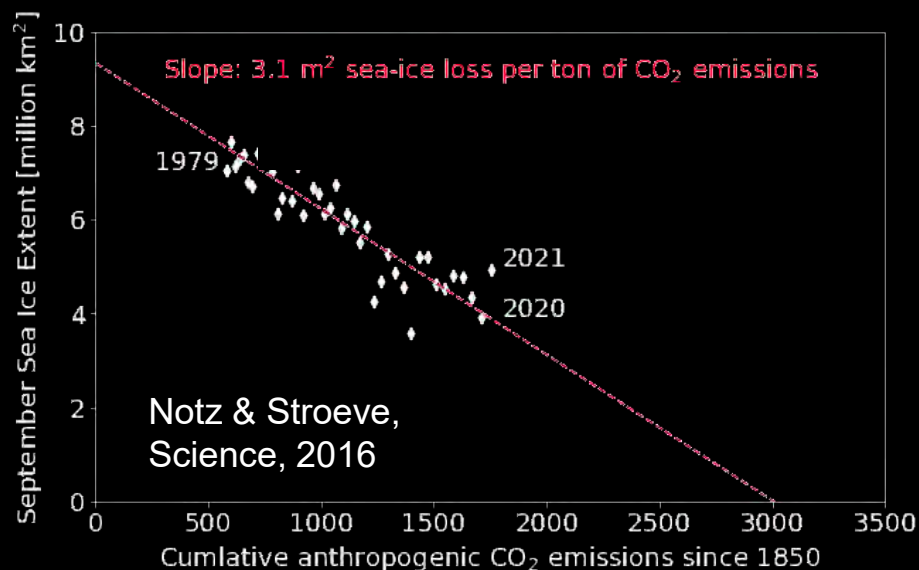
Pourquoi l'Arctique se réchauffe rapidement?

Glace de mer arctique

Energy increase -> fast warming



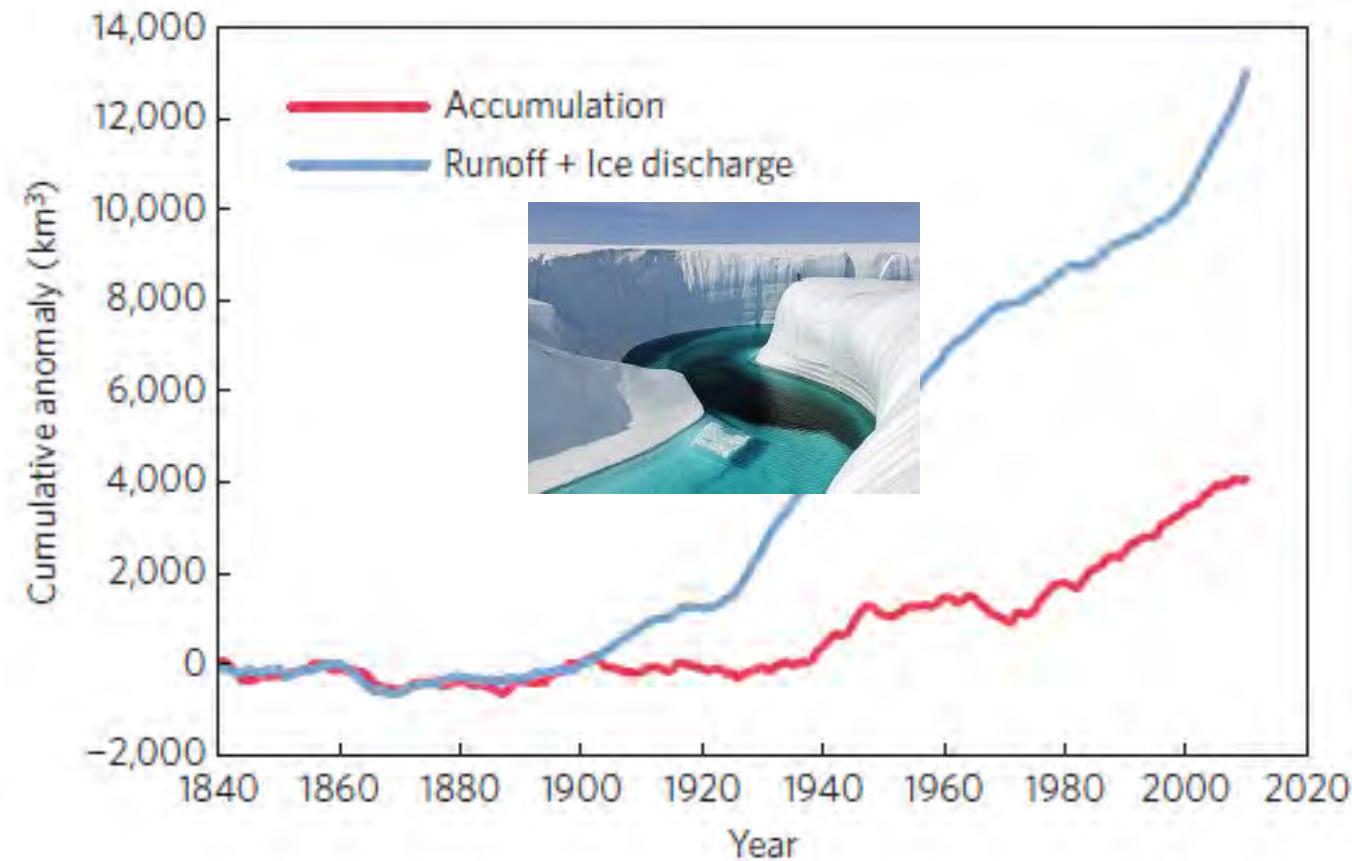
Every ton of CO₂ emissions = 3.1 m² of Arctic sea-ice



**Quels que soient les scénarios climatiques,
prévision d'au moins un été sans glace de mer d'ici à 2050**

L'Arctique est actuellement la région de notre planète qui répond le plus fortement au changement climatique en cours. **Réduction de la banquise, dégel du pergélisol (« rétroaction ») et perturbations de la chaîne alimentaire** sont quelques-uns des grands effets déjà constatés.

Calottes glaciaire du Groenland: est-elle affectée par le réchauffement global?



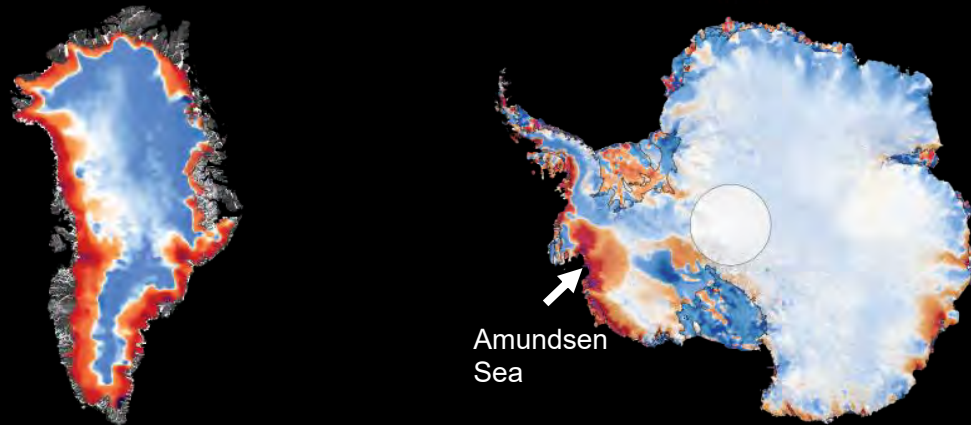
La calotte glaciaire du Groenland, en équilibre de masse pendant la période préindustrielle, perd de la masse depuis le début du 20^{ème} siècle...

(from Mankoff et al. 2021)

Impact de la fusion des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique:

élévation du niveau de la mer:

- la dilatation de l'océan sous l'effet du réchauffement,
- la fonte des glaces des calottes polaires,
- la fonte des glaciers terrestres,...

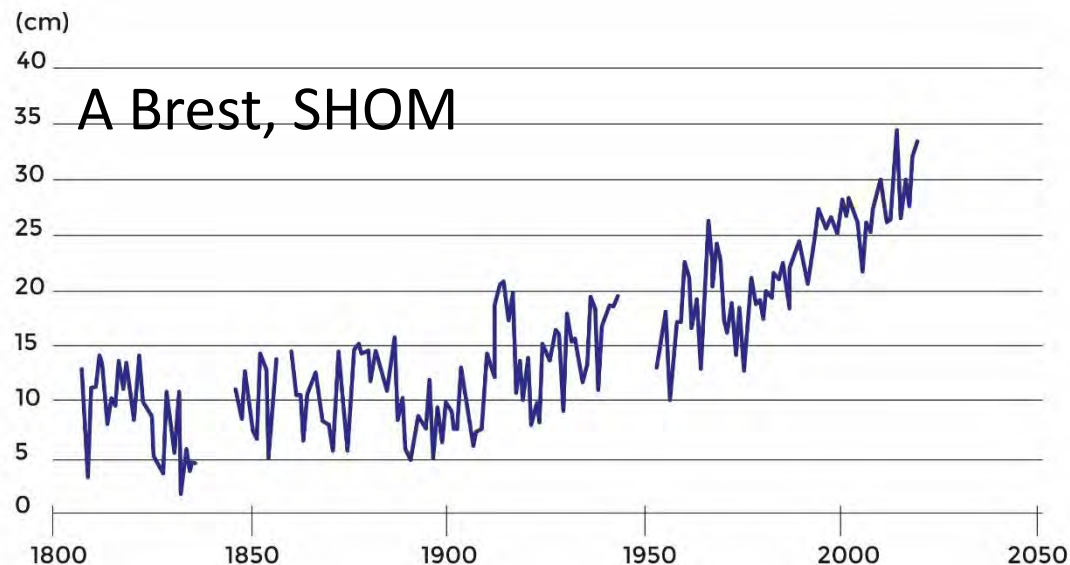
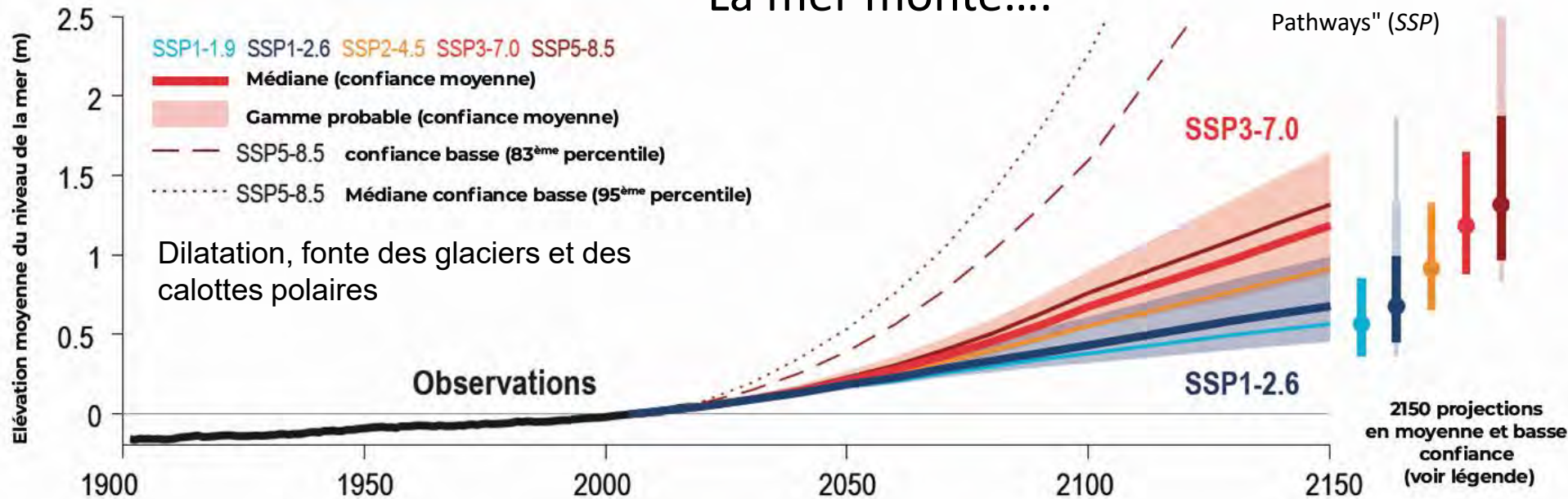


Change in ice thickness 2003-2019 (m)

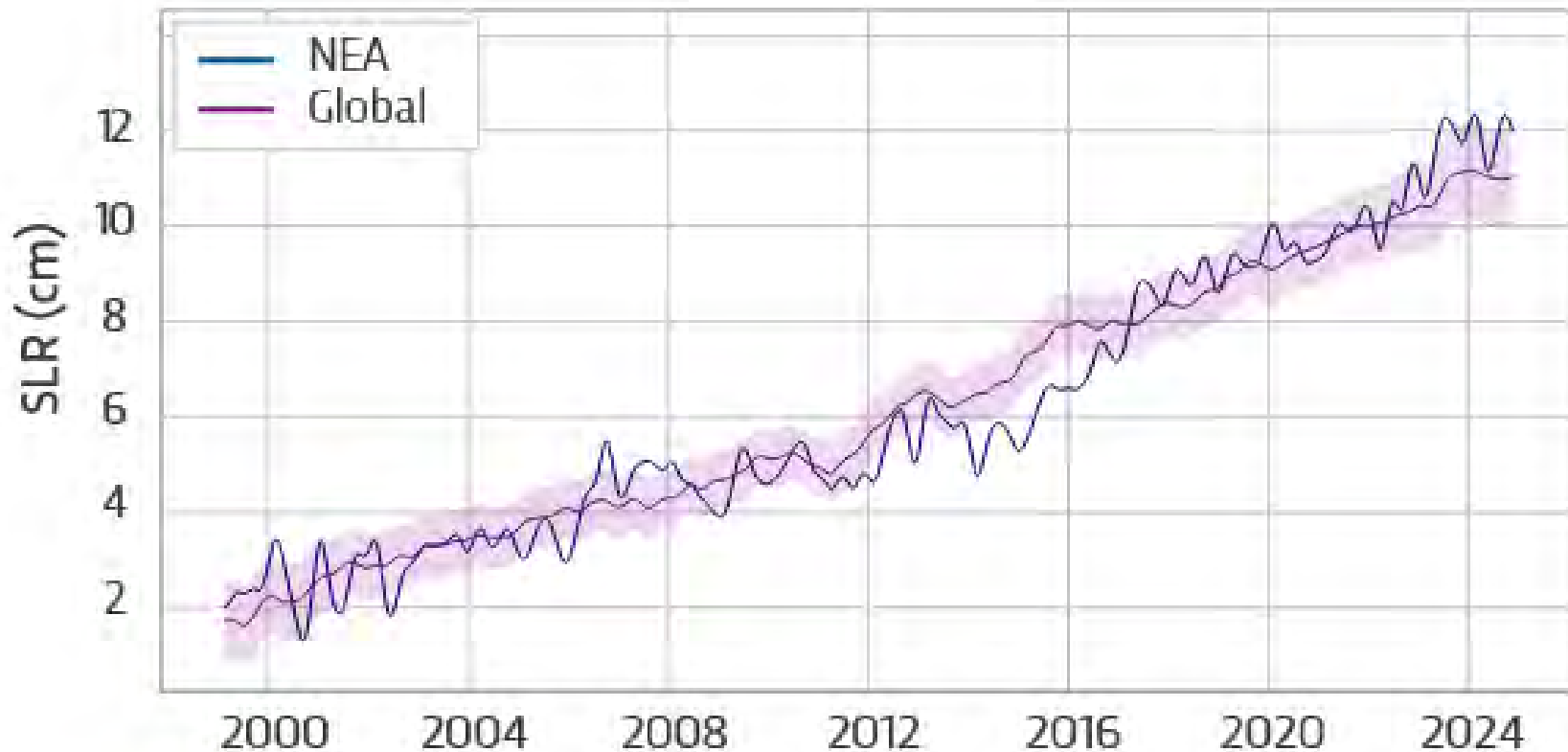
-10 -6 -3 -1 0 +0.5

La mer monte....

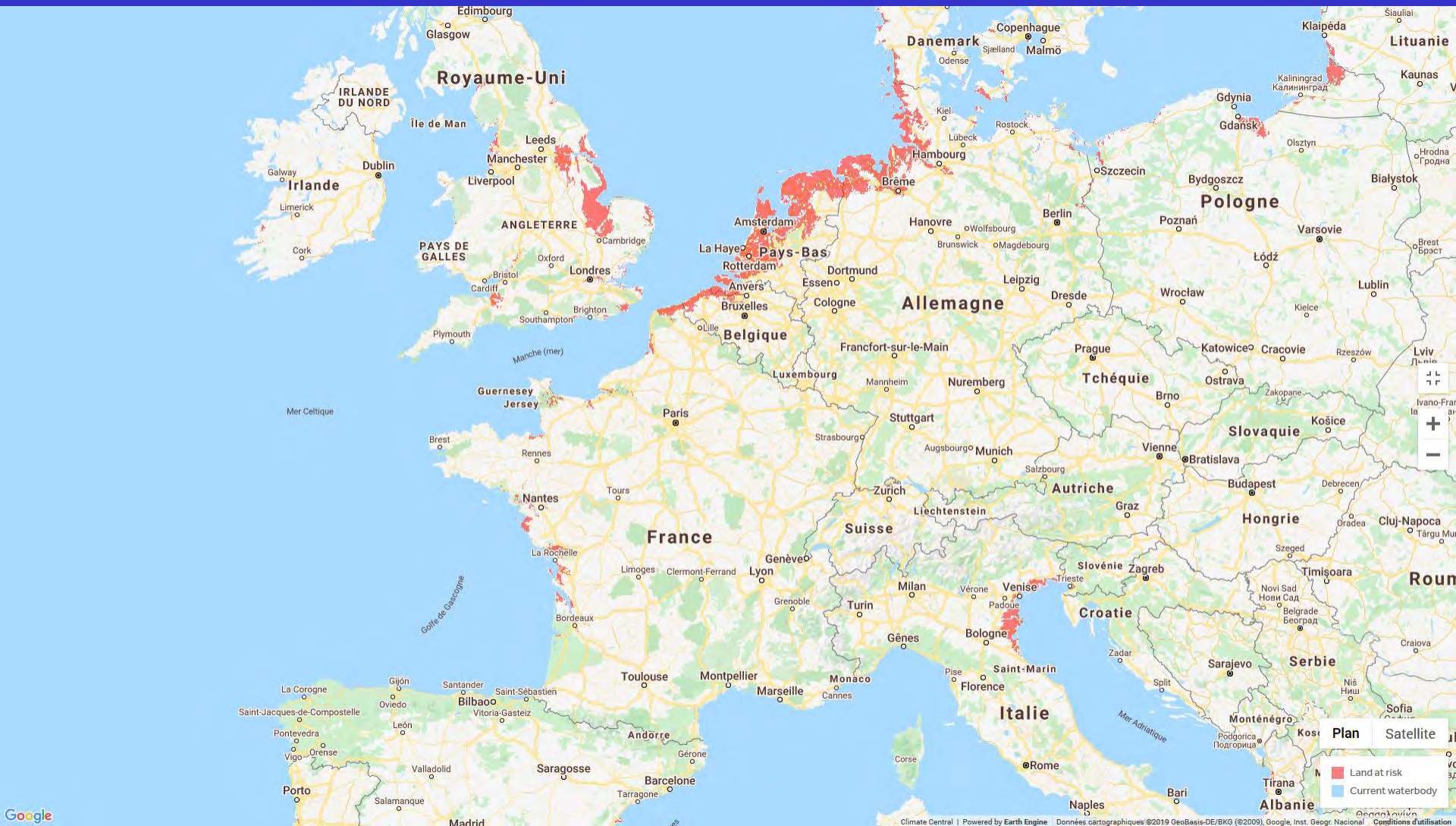
Shared Socioeconomic Pathways" (SSP)



Copernicus Ocean State report 2025

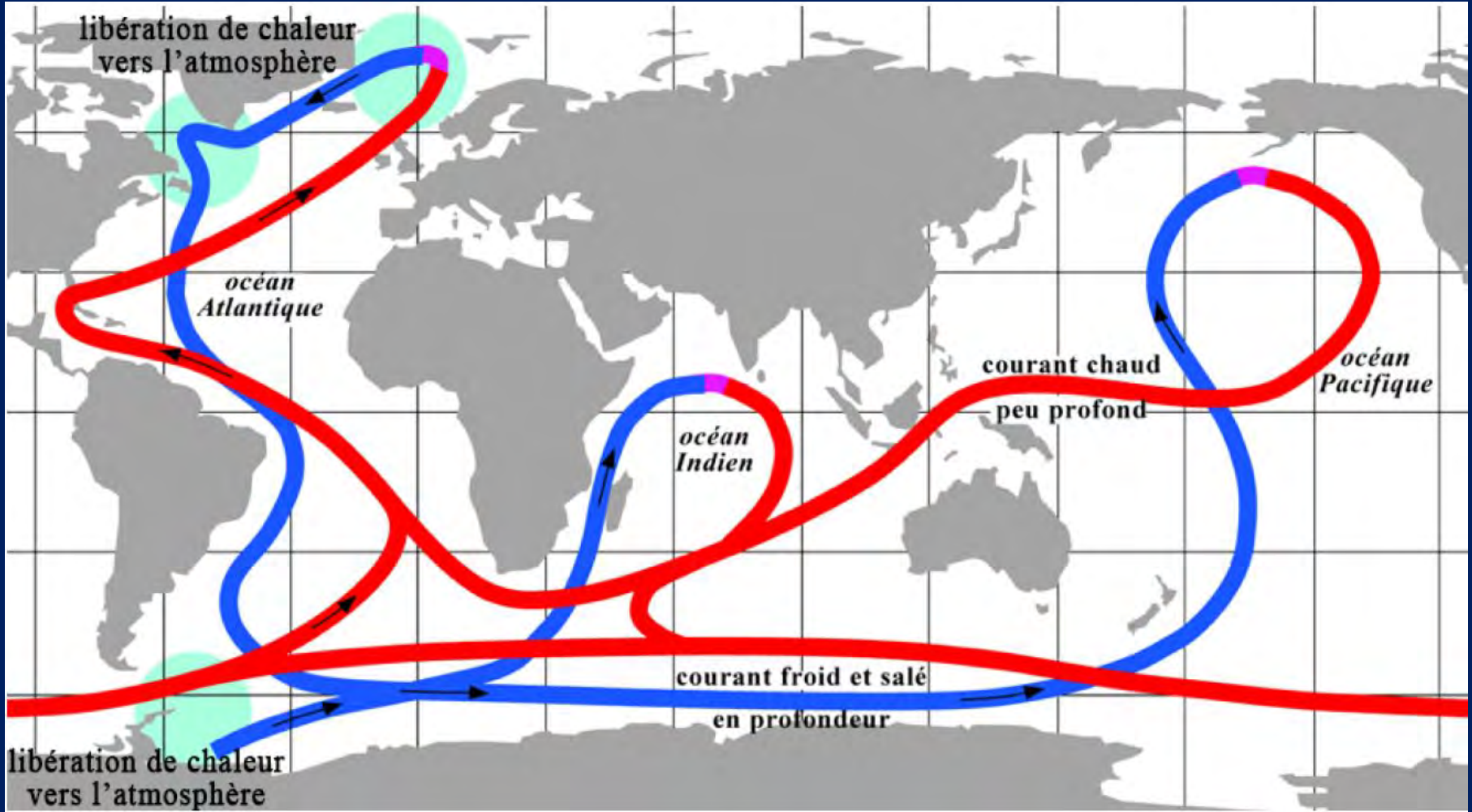


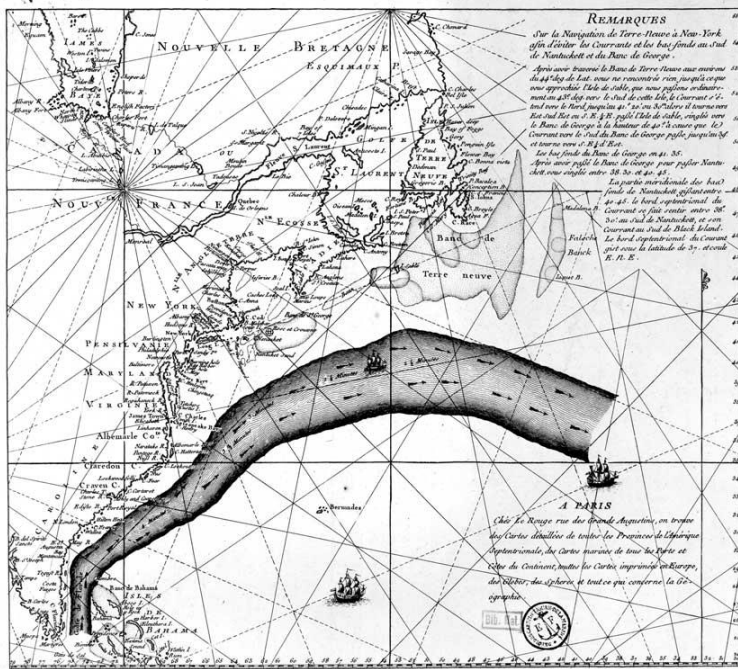
ABOVE: Sea level rise in the northeastern Atlantic and adjacent seas (blue) and globally (purple) between 1999-2024. Purple shading represents uncertainty values. Adapted from: von Schuckmann et al., 2025. Copernicus Ocean State Report 9



Impacts du changement climatique sur la circulation océanique.

-2000: le concept de « **conveyor belt** » (« tapis roulant ») dû à Wallace L. Broecker



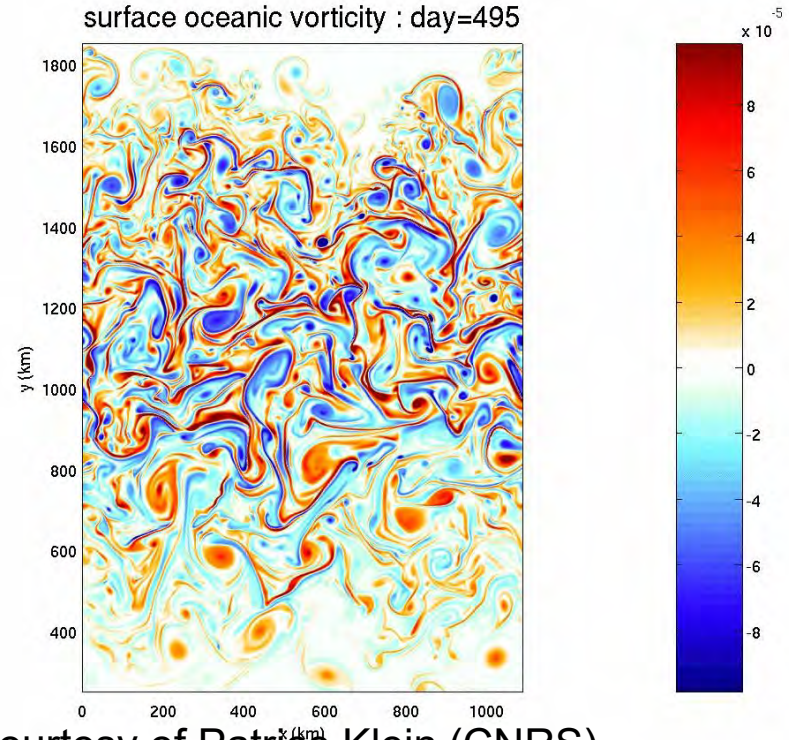


Le Gulf Stream

Un long fleuve tranquille au 17^{ème} siècle (Benjamin Franklin)...

...en fait un écoulement très turbulent comme nous l'avons mis en évidence au 20^{ème} siècle...

surface oceanic vorticity : day=495



Courtesy of Patrice Klein (CNRS)

Impacts du changement climatique sur la circulation océanique:

Exemple du Gulf Stream

AMOC: Atlantic meridional overturning circulation, Circulation atlantique de retournement

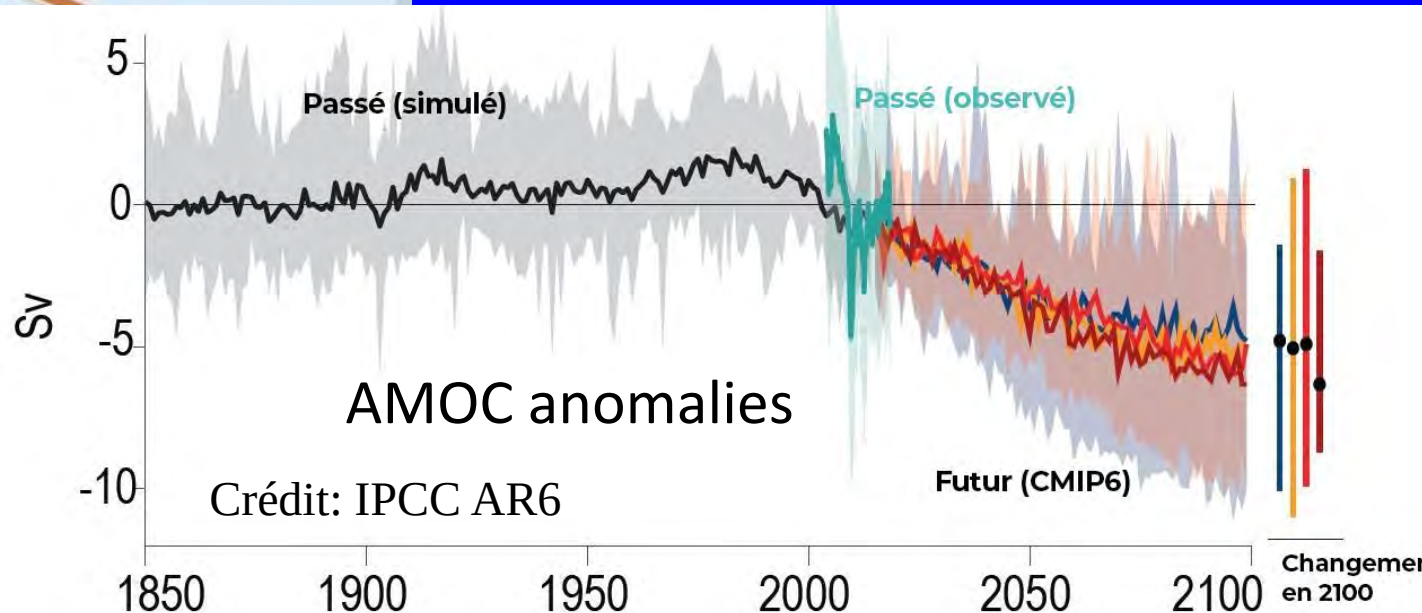
Eau Profonde Atlantique

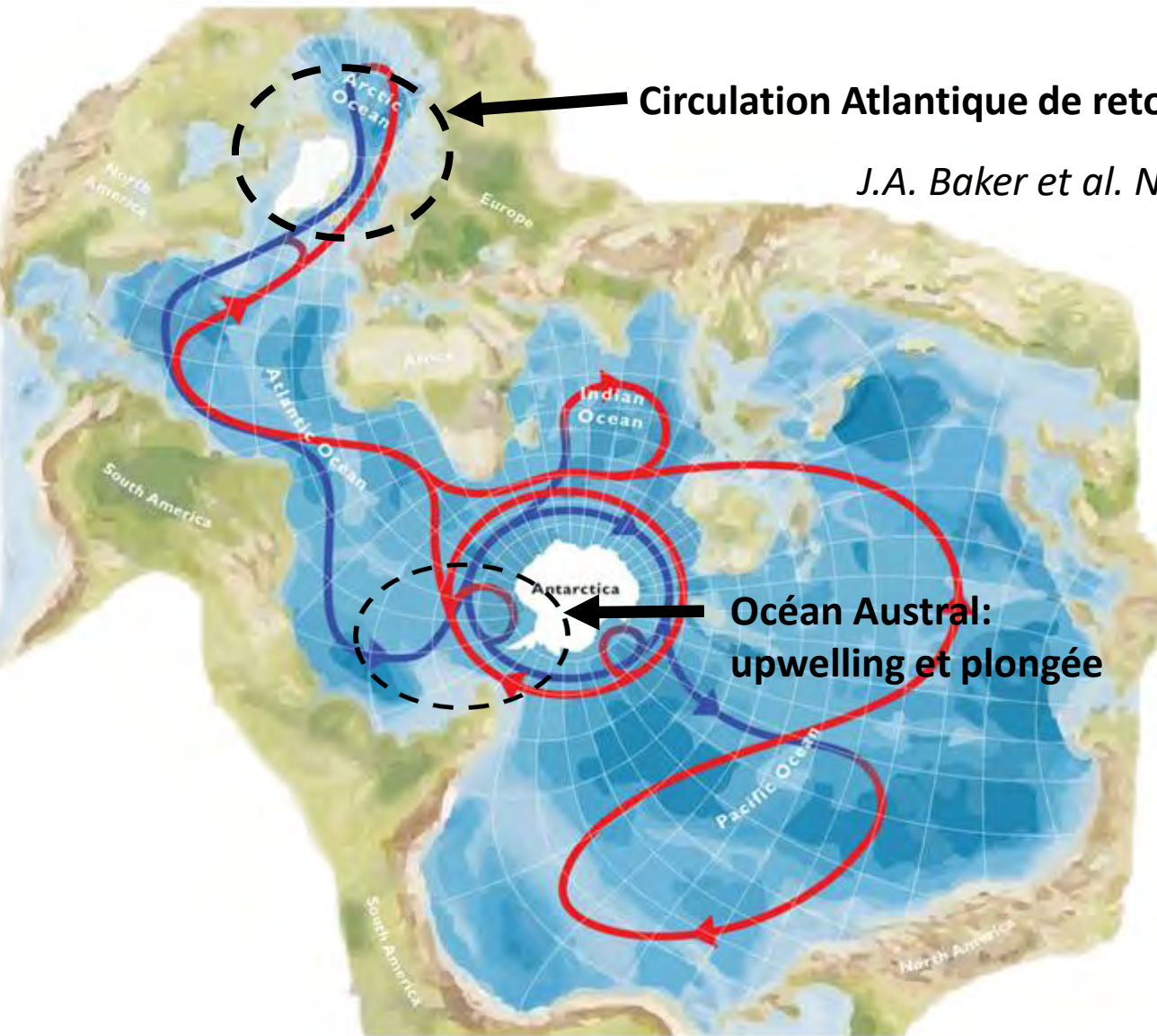
AMOC

Dérive Nord Atlantique

Gulf Stream

85 millions de m^3 par seconde





Circulation Atlantique de retournement AMOC

J.A. Baker et al. Nature 27 Feb. 2025

**Océan Austral:
upwelling et plongée**

**Scénario climatique
extrême:**

-CO₂ x 4

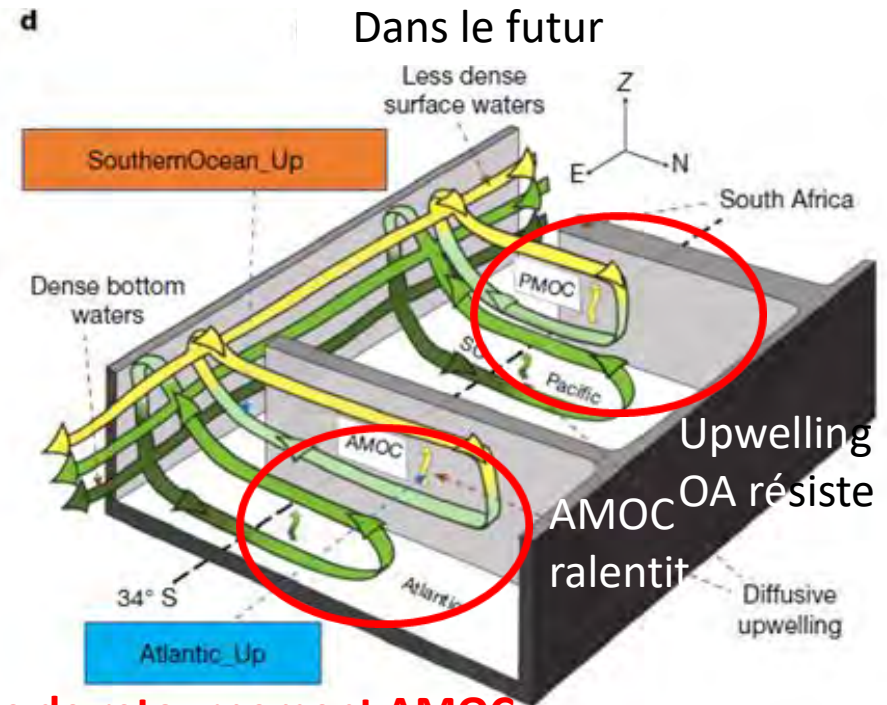
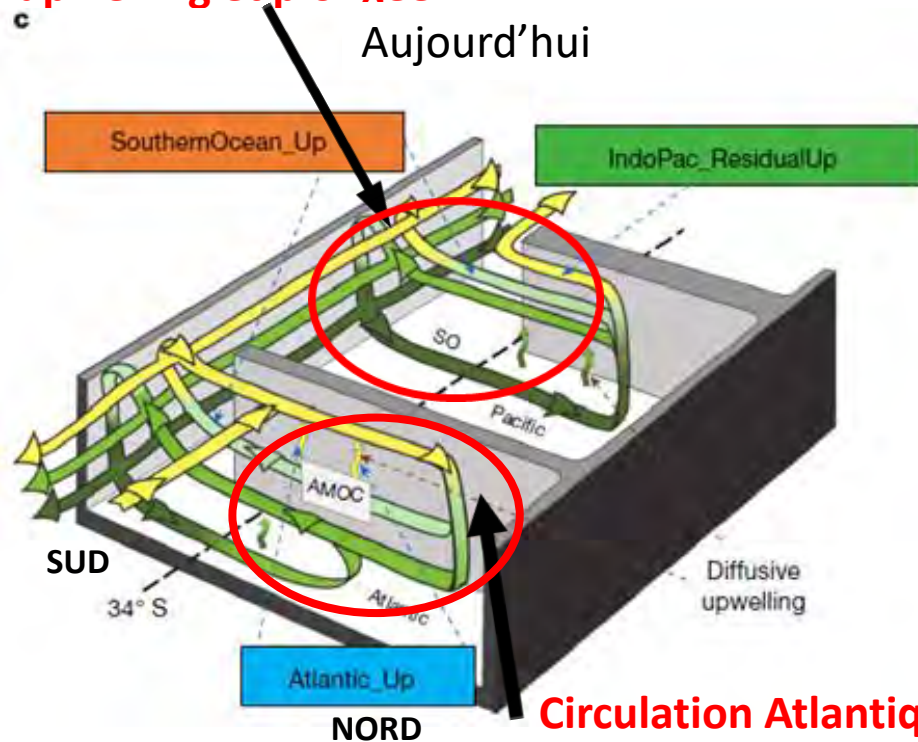
**-fonte partielle du
Groenland: davantage d'eau
douce dans l'Atlantique.**

**Quels impacts sur le Gulf
Stream et l'AMOC?**

J.A. Baker et al. Nature 27 Feb. 2015

Dans ces scénarios climatiques extrêmes, l'AMOC ralentit. Toutefois, les vents d'ouest se maintiennent dans l'océan Austral ainsi que l'upwelling. De ce fait l'AMOC subsiste.

Océan Austral:
upwelling et plongée



Circulation Atlantique de retournement AMOC



Conclusion de la deuxième partie:

L'océan est directement impacté par le changement climatique:

1-L'océan s'acidifie, avec un impact potentiel sur les organismes à carapaces calcaires.

2-Le niveau de la mer monte (dilatation, fusions des glaciers et des calottes polaires): plus d'un mètre à la fin de ce siècle, impacts sociétaux majeurs.

3-Le changement climatique impacte la circulation générale océanique.

4-Le changement climatique impacte également le fonctionnement des écosystèmes marins (sujet non traité ici).



Introduction:

1-L'océan régule le changement climatique

2-L'océan subit le changement climatique

3-L'océan peut nous aider à changer de cap

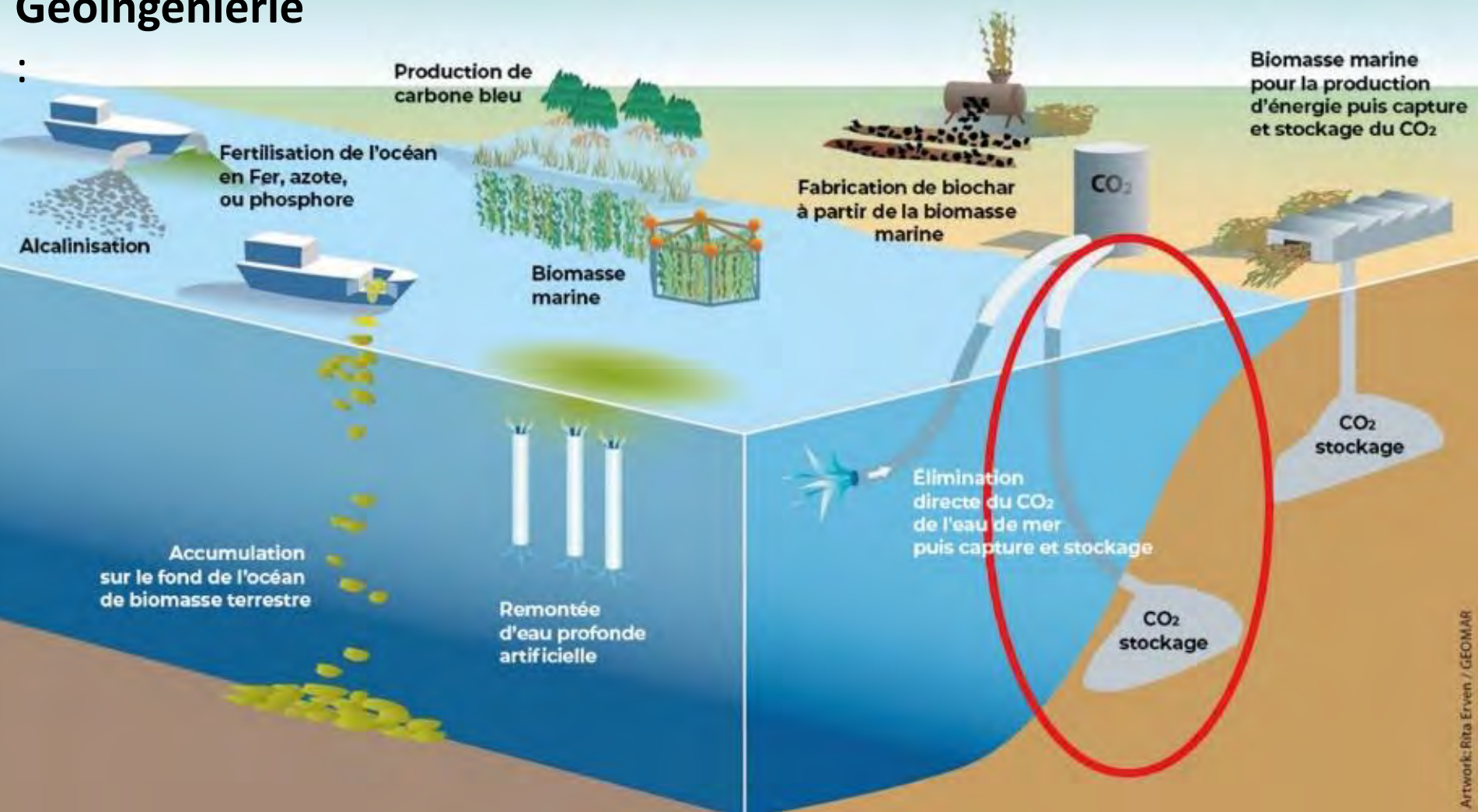
Conclusions

Credit: NASA

Capter et stocker le CO₂ dans les sédiments marins?

Géoingénierie

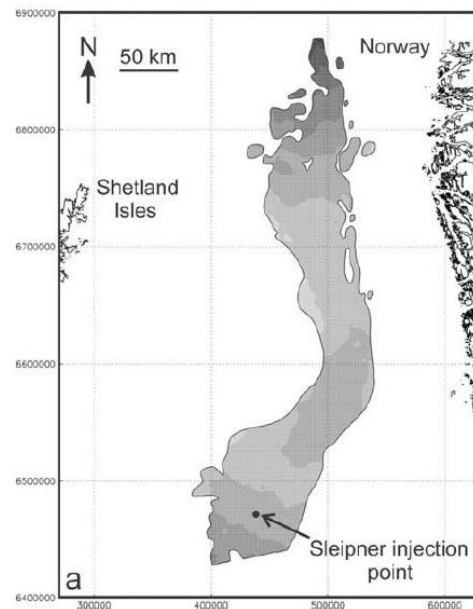
:



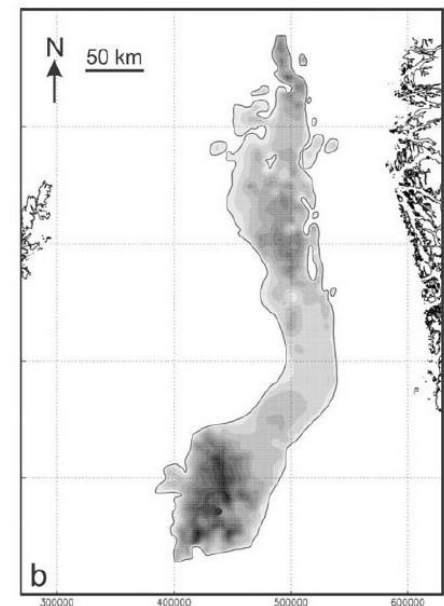


Stockage de CO₂ au site Sleipner au large de la Norvège depuis 40 ans (Société Equinor)

Contrôle par des experts indépendants



Profondeur des sédiments



Épaisseur des sédiments

Les Pays-Bas s'engagent également dans la voie ouverte par la Norvège et le Danemark.



Pays-Bas: enfouir 37 millions de tonnes CO_2 dans un ancien champ gazier de la mer du Nord, à 3 km de profondeur (cf. émissions usines Shell, ExxonMobil, Air liquide ou Air Products du port de Rotterdam)



-Monde: **200 initiatives de captage et de stockage terrestre et marin du gaz carbonique** (30 en service, 164 en développement).

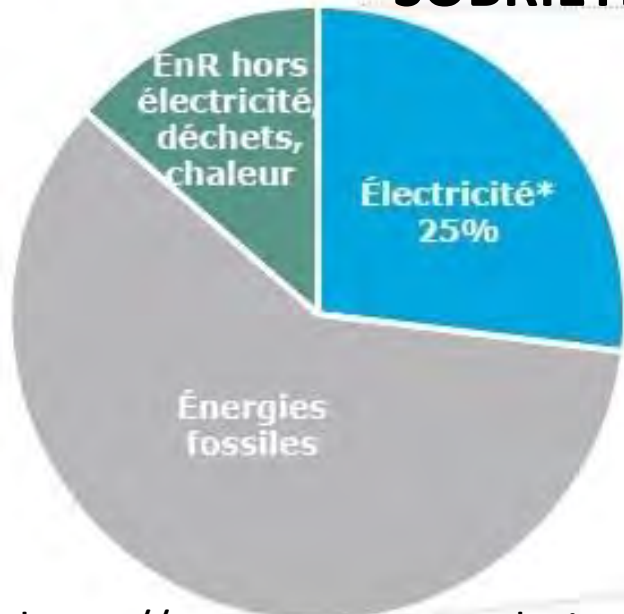
-Agence Internationale de l'énergie: en projet captage et stockage de **0,244 milliards de tonnes de CO_2 par an**, soit 20% de l'objectif 2030 (1,2 milliard de tonnes de CO_2).

Rappel: émissions de gaz à effet de serre de l'Union Européenne en 2020: **3,7 milliards de tonnes/an.**

Aujourd'hui

1 600 TWh
d'énergie consommée

SOBRIETE



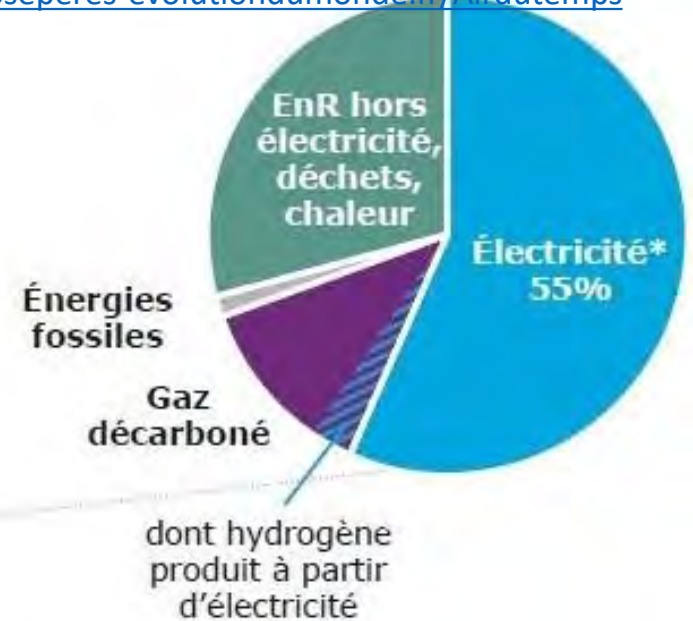
-40 %



2050

930 TWh
d'énergie consommée

www.reperes-evolutiondumonde.fr/air-du-temps



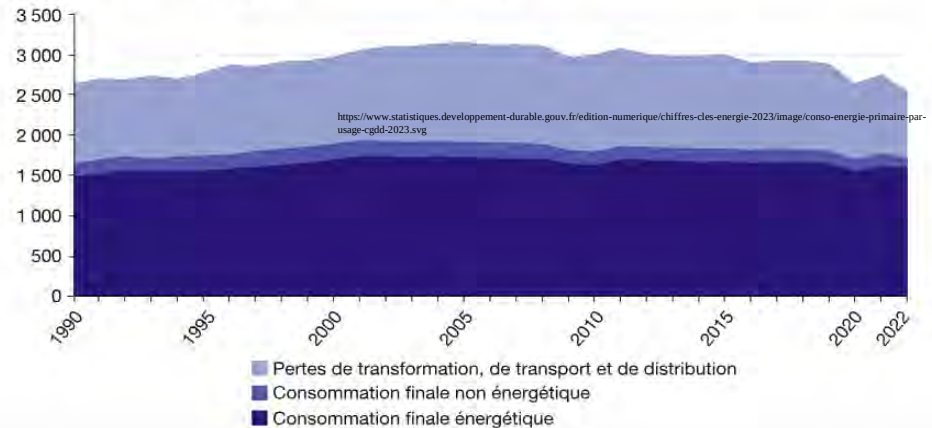
dont hydrogène
produit à partir
d'électricité

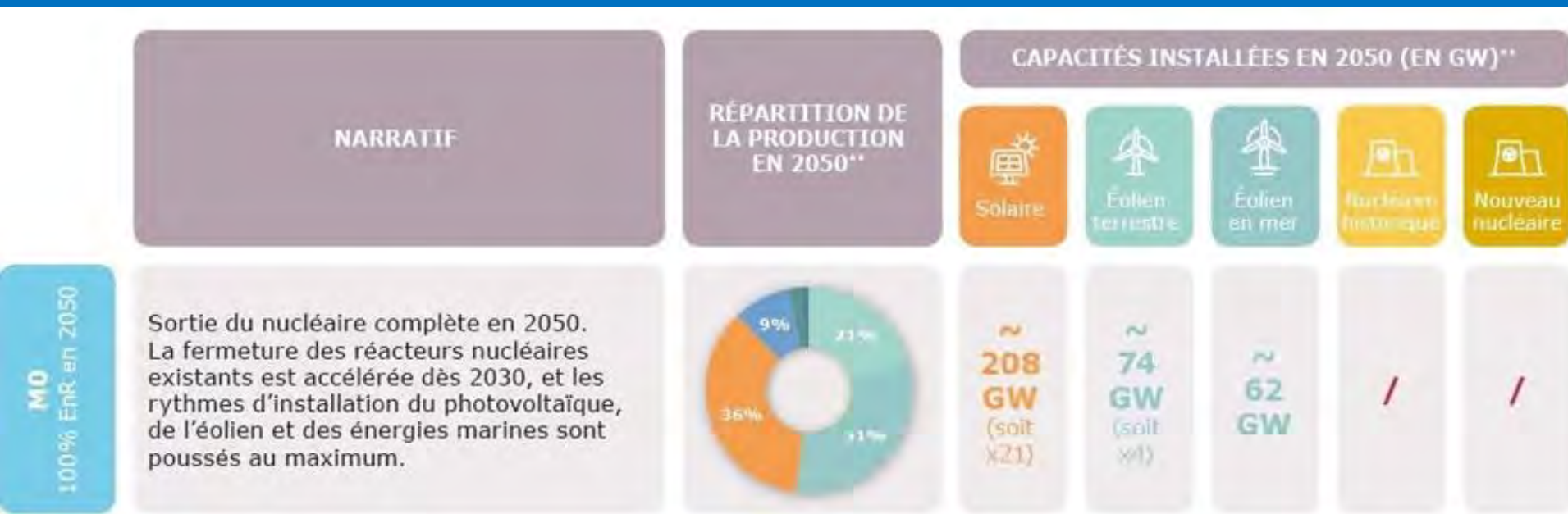
<https://www.reperes-evolutiondumonde.fr/air-du-temps>

RTE, *Futurs énergétiques 2050*,
2021.

NB: Perspectives bousculées par la
demande énergétique des data
centers (IA) (cf. Shift project 2025)

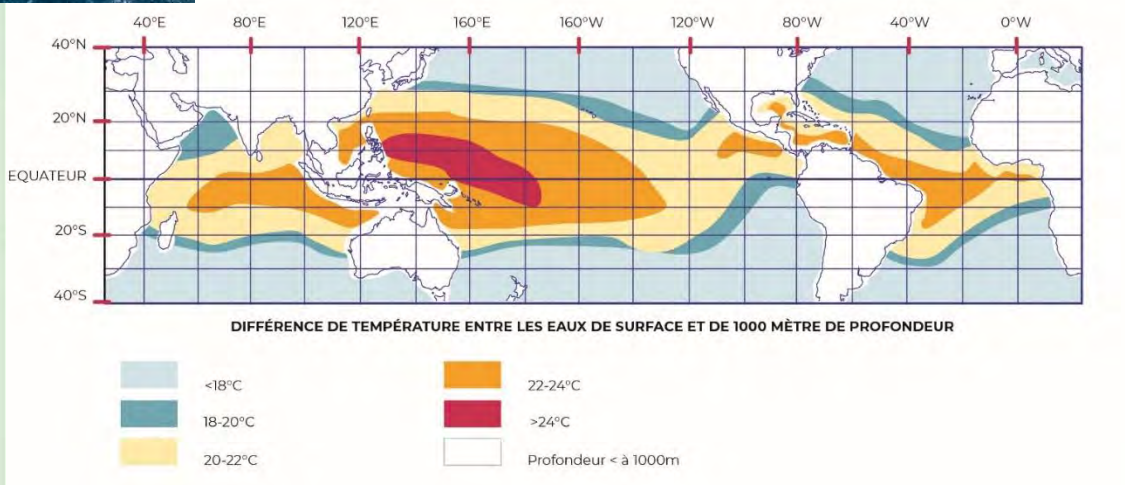
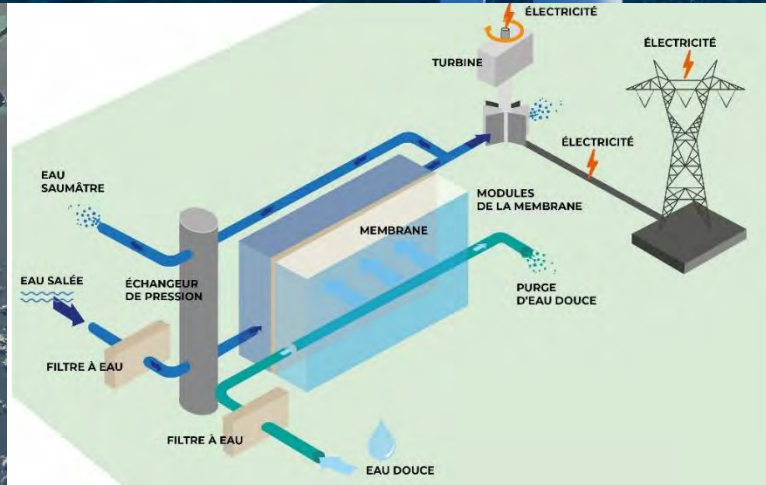
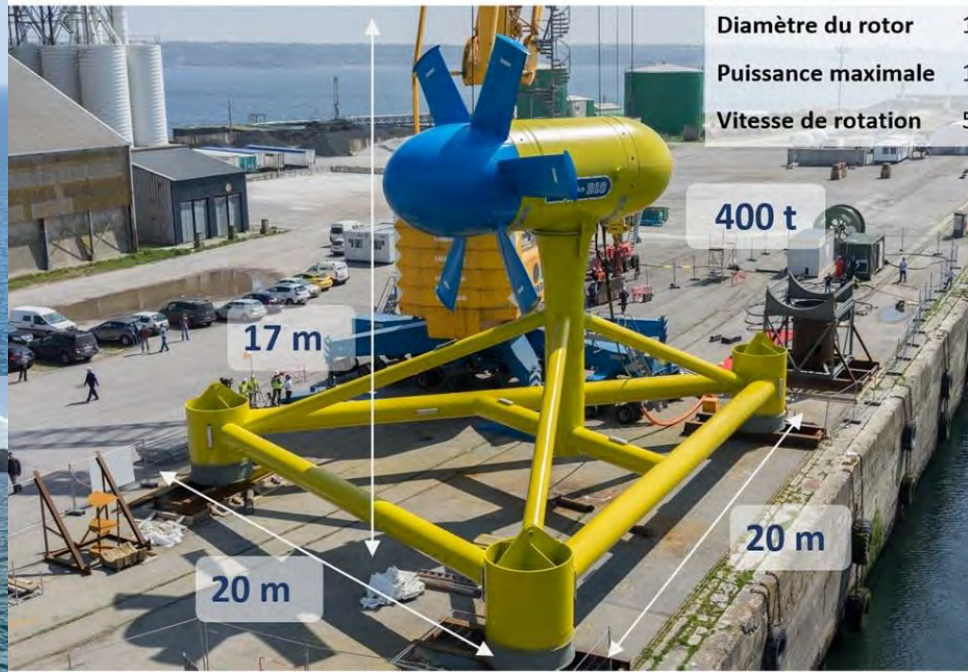
En TWh (données corrigées des variations climatiques)





<https://www.reperes-evolutiondumonde.fr/air-du-temps>

RTE, *Futurs énergétiques 2050*,
2021.



Credit: NASA

Energies marines renouvelables: marémotrice, houlomotrice, hydrolienne, osmotique, thermique

Energies marines renouvelables

LA MANCHE

L'usine marémotrice du barrage de la Rance: une première mondiale.

-mise en service en 1966,

-ouvrage de 390 m de long,

24 turbines, réversibles et en forme de bulbe, ont une puissance totale nominale de **240 MW** (million de watt).

LA RANCE

L'énergie produite, *500 GWh par an*, couvre la consommation de **220 000 habitants en Bretagne** soit de la ville de Rennes. Mais cela ne représente que **0,5 %** de la consommation énergétique de la Bretagne.



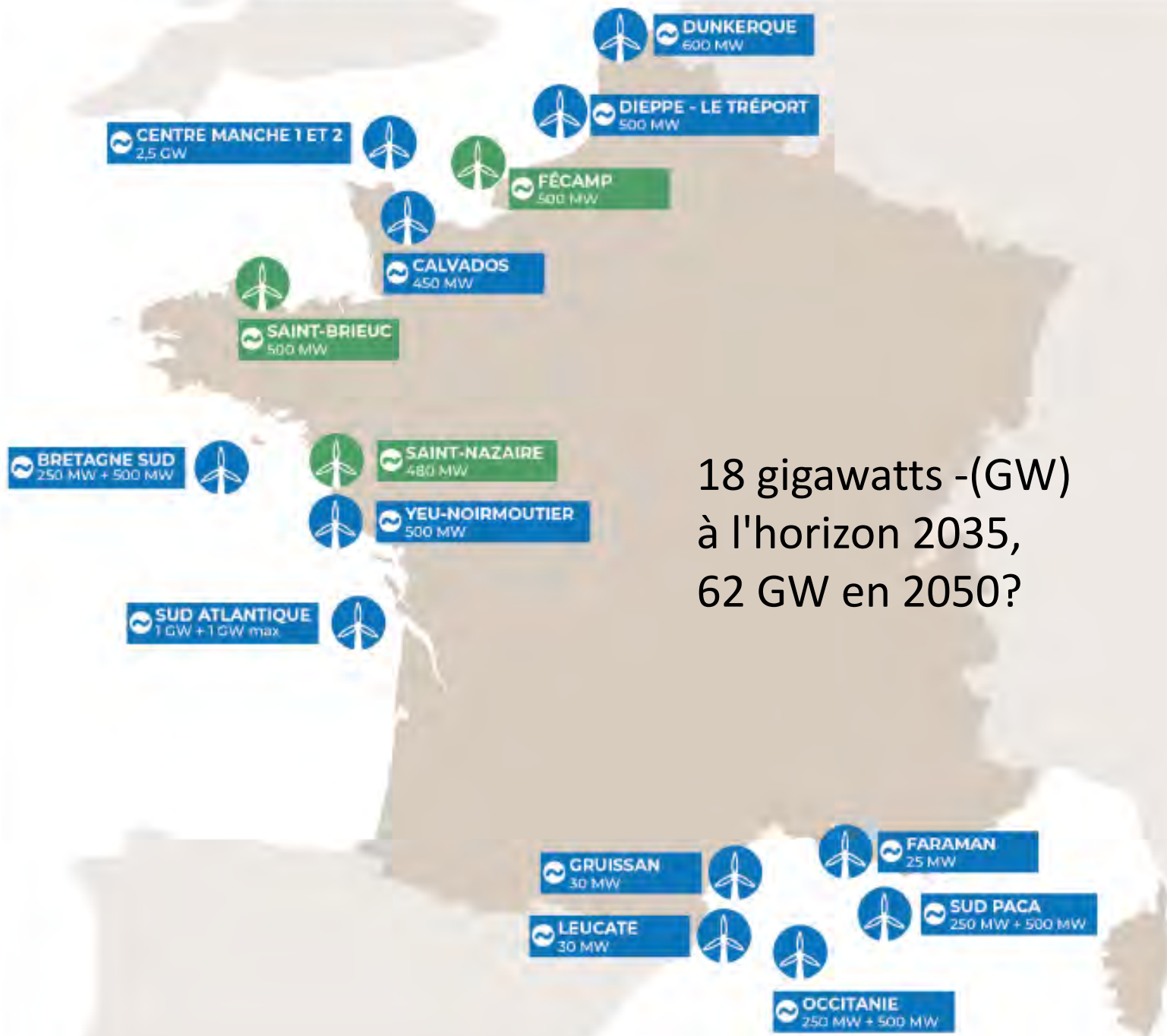
En 2024: parc éolien marin de la **baie de Saint-Brieuc** (62 éoliennes de 8 mégawatts): puissance totale de **496 mégawatts**.

- turbines réparties sur 75 km²,
- éolienne la plus proche: 16 km.

Production d'énergie :
1 820 GWh/an, équivalent de la **consommation électrique de 800 000 habitants**, chauffage compris, soit bien plus que la population des Côtes d'Armor.

crédit : Iberdrola France-C. Beyssier

Voir Air du temps 1^{er} décembre 2024:
<https://www.reperes-evolutiondumonde.fr/>



18 gigawatts -(GW)
à l'horizon 2035,
62 GW en 2050?

Zone prioritaire

...d'ici à 2050

Parc éolien en mer en service ou en développement

Principaux ports



Projets annoncés
par le
gouvernement (18
octobre 2024):

... d'ici à 2035

- Zone prioritaire retenue pour la procédure de mise en concurrence
- Autre zone prioritaire
- Zone indicative de poursuite de la concertation

Éolien en mer : la carte des futurs parcs

Source : Journal officiel



-  Zones de projets éolien en mer en service ou en développement
-  Zones prioritaires pour le développement de l'éolien en mer à l'horizon 10 ans
-  Zones indicatives de poursuite de la concertation, qui pourront intégrer des zones complémentaires limitrophes
-  Zones nécessitant des études complémentaires et/ou des échanges avec les îles anglo-normandes
-  Zones prioritaires pour le développement de l'éolien en mer à l'horizon 2050



Méditerranée



Manche



Crédit : Le Télégramme



- L'hydrolienne D10 de Sabella (1 MW):** depuis avril 2022 elle fournit 15 % des besoins en électricité des habitants de l'île d'Ouessant.
- Faillite de Sabella en 2023,
- Rachat en 2024 par la société britannique Inyanga Marine Energy Group (Falmouth).



Conclusion de la troisième partie:

L'océan nous rend des services majeurs dans la transition énergétique vers une société plus sobre:

1- **Géoingénierie**: les sédiments peuvent stocker du gaz carbonique; attention aux solutions d'apprentis sorciers.

2- L'océan présente un **fort potentiel en matière d'énergies renouvelables**, compatible avec les autres usages de la mer, dans le cadre d'un développement durable.

Credit: NASA

A satellite view of Earth from space, showing a vast expanse of blue oceans and white clouds. In the foreground, a portion of a satellite is visible, including a large, dark, cylindrical component and a rectangular solar panel array. The satellite is positioned in the upper left corner, pointing towards the center of the frame. The Earth's surface is covered in a dense layer of white clouds, with some darker patches of land visible. The overall scene is a high-contrast, high-resolution image of the planet from space.

Introduction:

1-L'océan régule le changement climatique

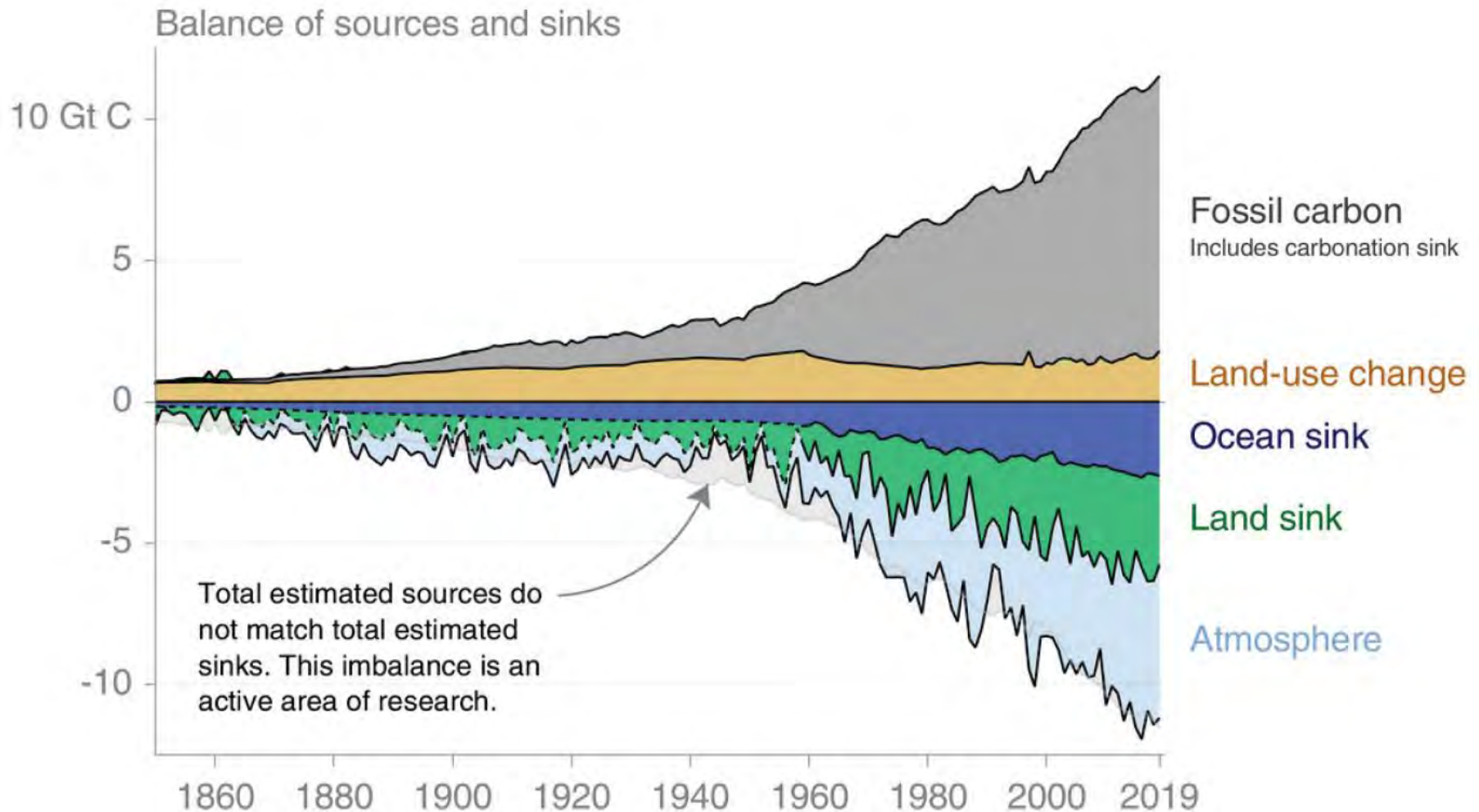
2-L'océan subit le changement climatique

3-L'océan peut nous aider à changer de cap

Conclusions

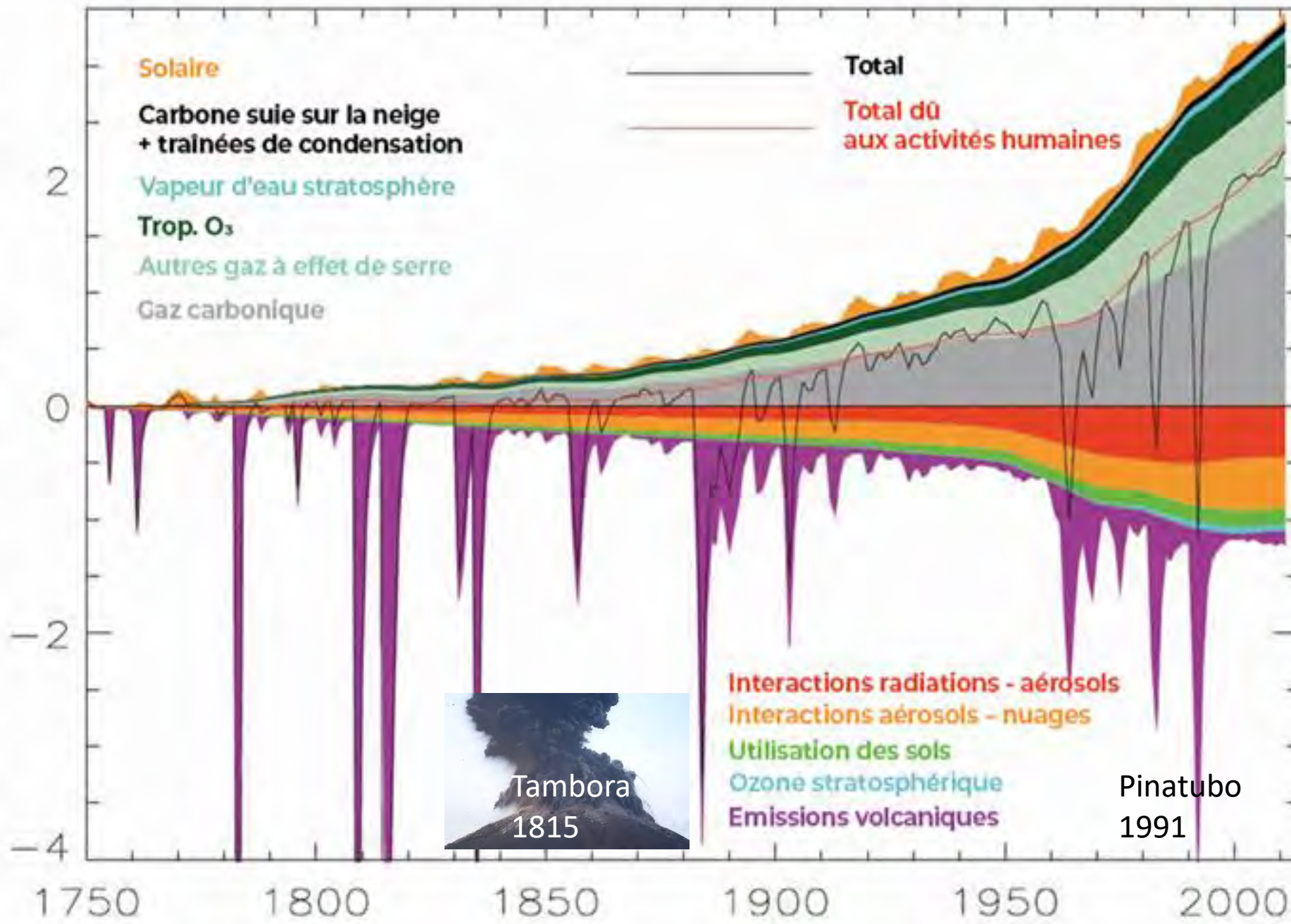
Credit: NASA

Reconstruction over time of the industrial period of human carbon emission (positive fluxes), ocean and land sinks (negative fluxes)



Evolution du forçage radiatif effectif au cours de l'Anthropocène (IPPC AR6)

Forçage radiatif effectif (watt par mètre carré)





Conclusion générale:

L'océan est-il le maître du climat? Oui, mais il n'est pas le seul.

*« Quoi qu'il en soit, l'importance de l'océan, tant en matière de climat qu'en matière de ressources biologiques et de biodiversité, fait qu'il est devenu impératif **d'arrêter de perturber** la régulation des équilibres qu'il assure pour continuer à **bénéficier des services qu'il offre à l'humanité.** »*

Credit: NASA

*



ESPACE DES SCIENCES

Paul Tréguer

L'océan est-il le maître du climat ?

Préface de Jean Jouzel



Éditions
Apogée

Paul
Tréguer

Jules Verne

Planète Océan

Préface de l'amiral Alain Coldefy
Avant-propos de Dominique Le Brun



Crédit: Yann Carmès

 Espaces
Littéraires

 L'Harmattan