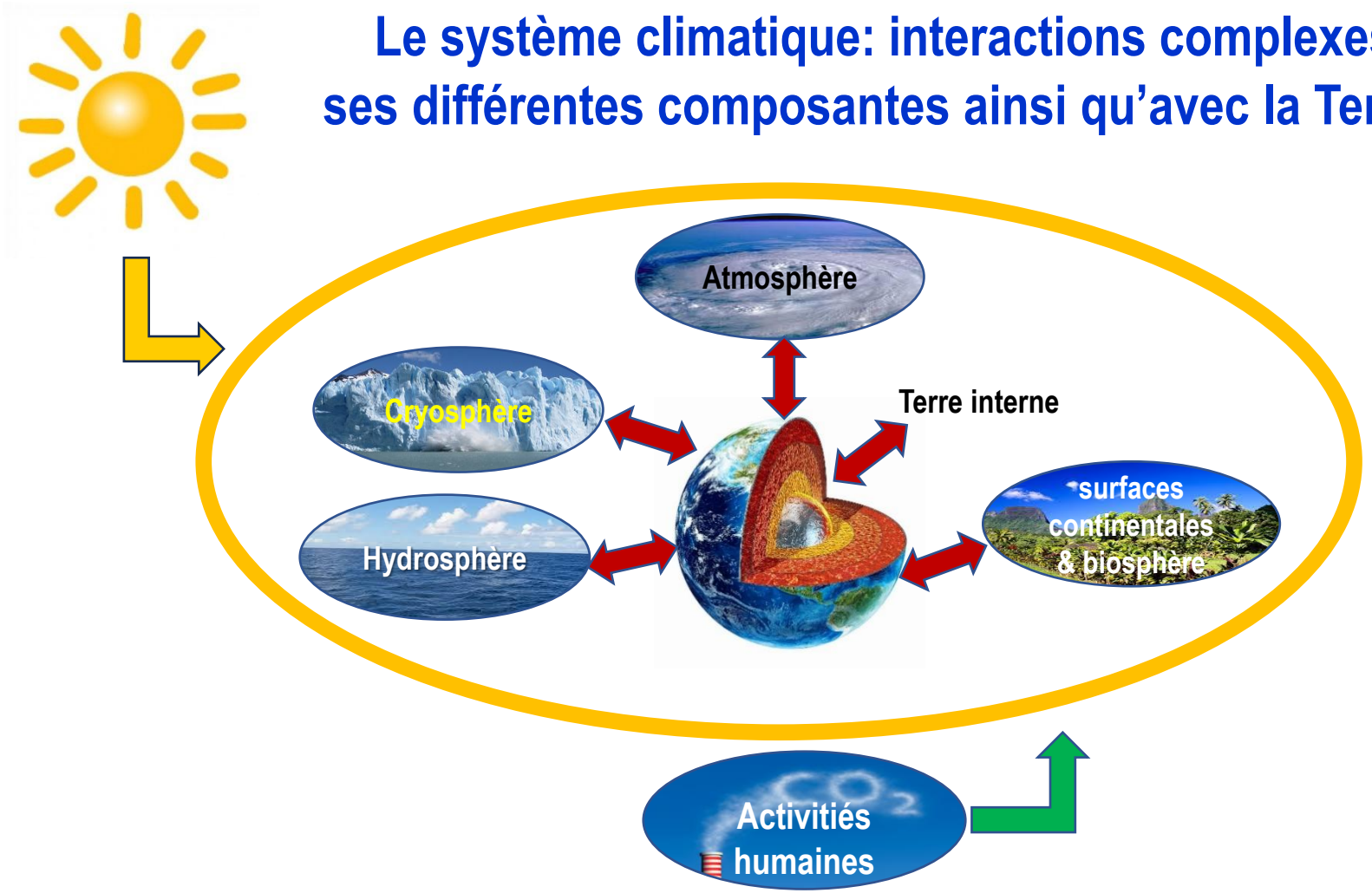


Changement climatique et hausse de la mer

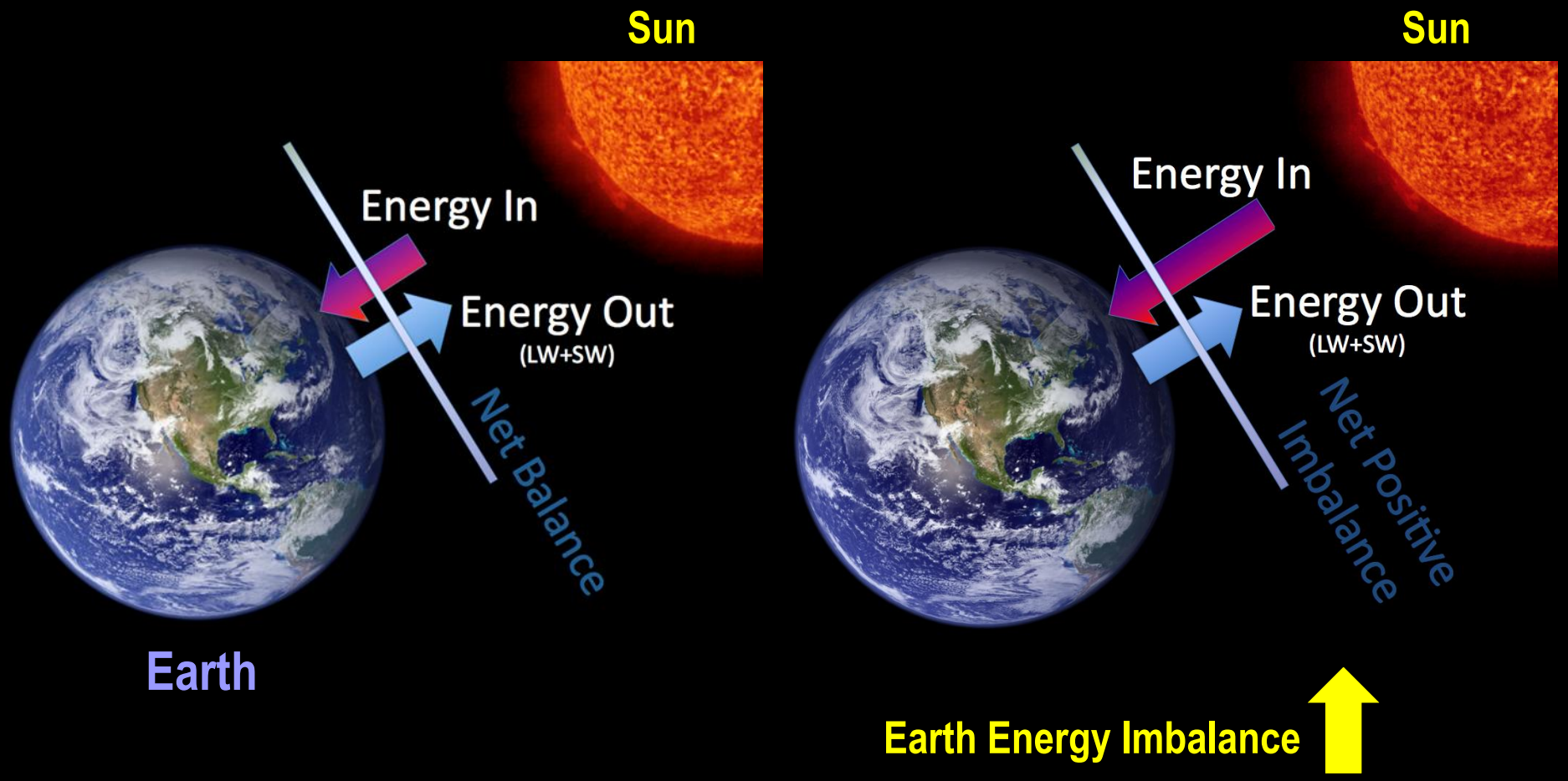
Anny Cazenave
Laboratoire d'Etudes en Géophysique
et Océanographie Spatiales, Toulouse

JOURNEES REFMAR, septembre 2026

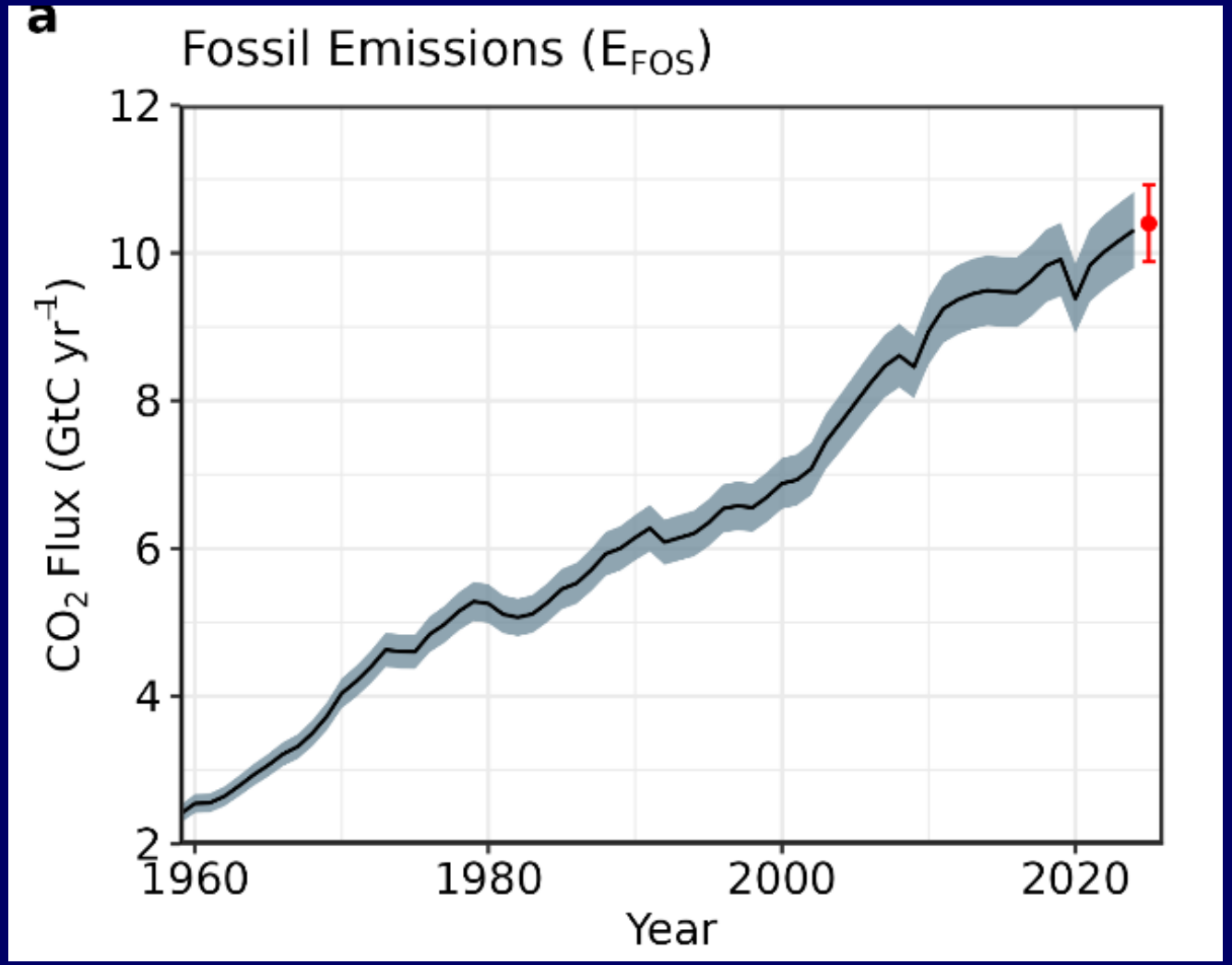
Le système climatique: interactions complexes entre ses différentes composantes ainsi qu'avec la Terre solide



Déséquilibre énergétique de la Terre



Evolution des émissions de GES (équivalent CO_2) depuis 1960



2025

Source:
Global Carbon Budget Project 2026

Bilan carbone
(moyenne 2015-2024)



Emissions GES
9.8 GtC/an (88%)

Sources



Déforestation
1.4 GtC/an (12%)

Atmosphère
5.6 GtC/an
50%



Végétation
2.4 GtC/an
21.5%



Puits

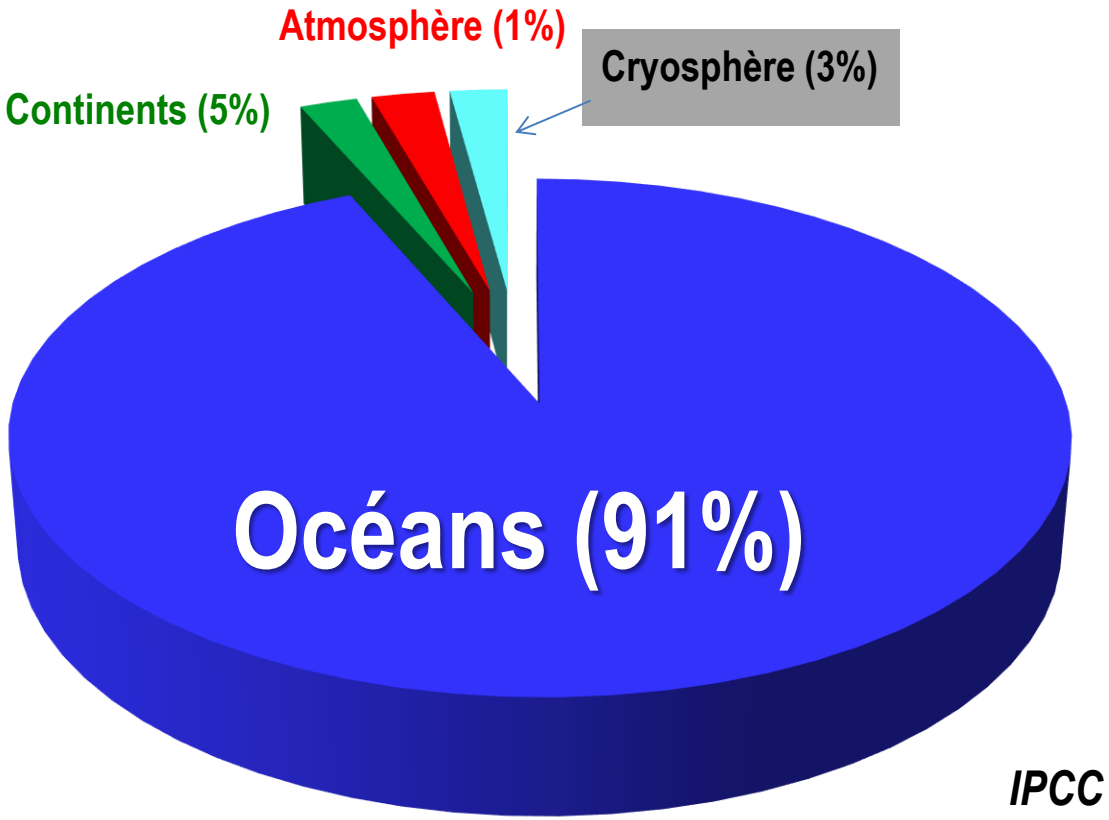
Océan
3.2 GtC/an
28.5%



1 GtC= 1 milliard de tonnes de carbone

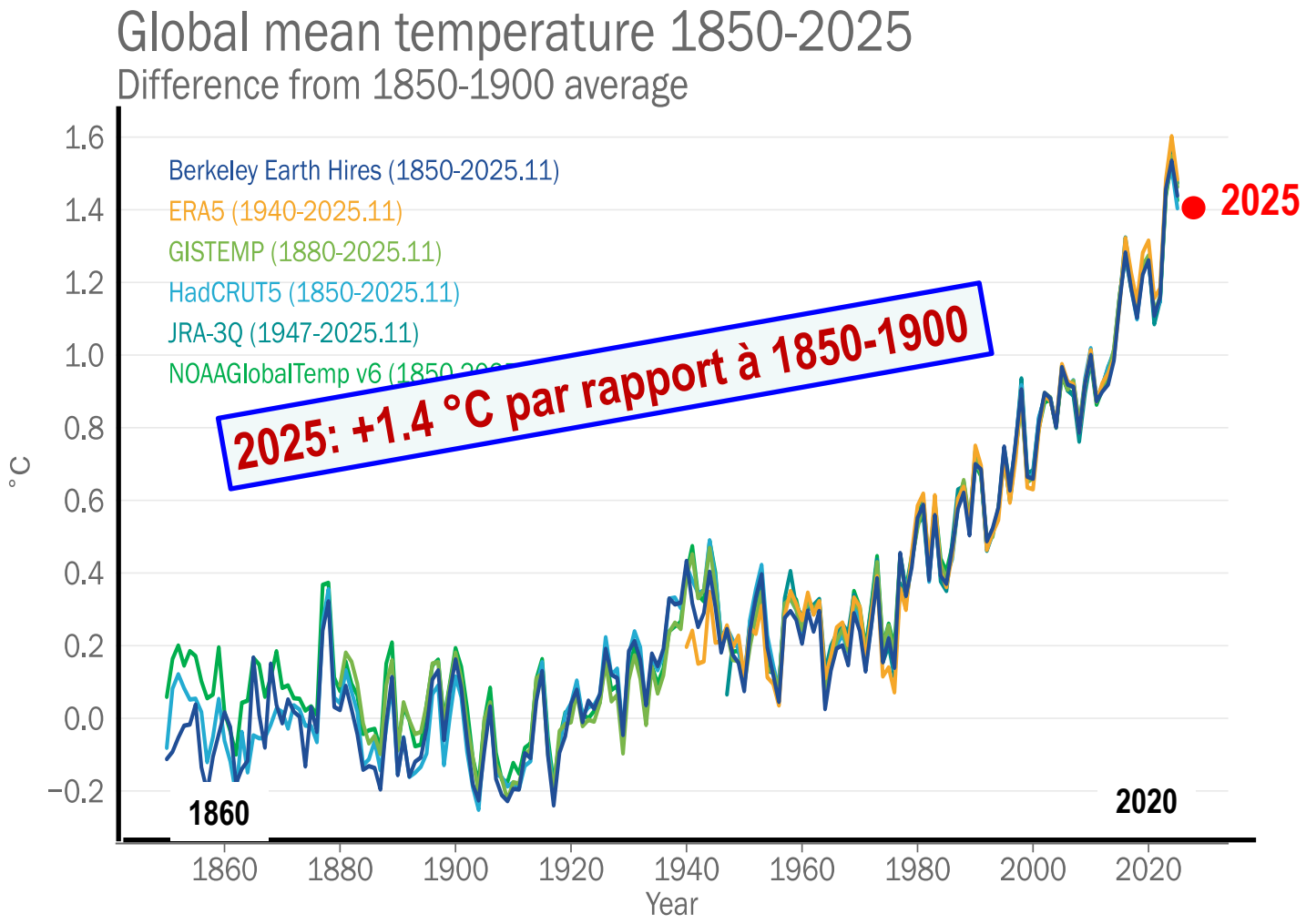
Global Carbon Budget Project, 2026

Excès de chaleur
accumulé dans les différents réservoirs du système climatique
depuis 50 ans



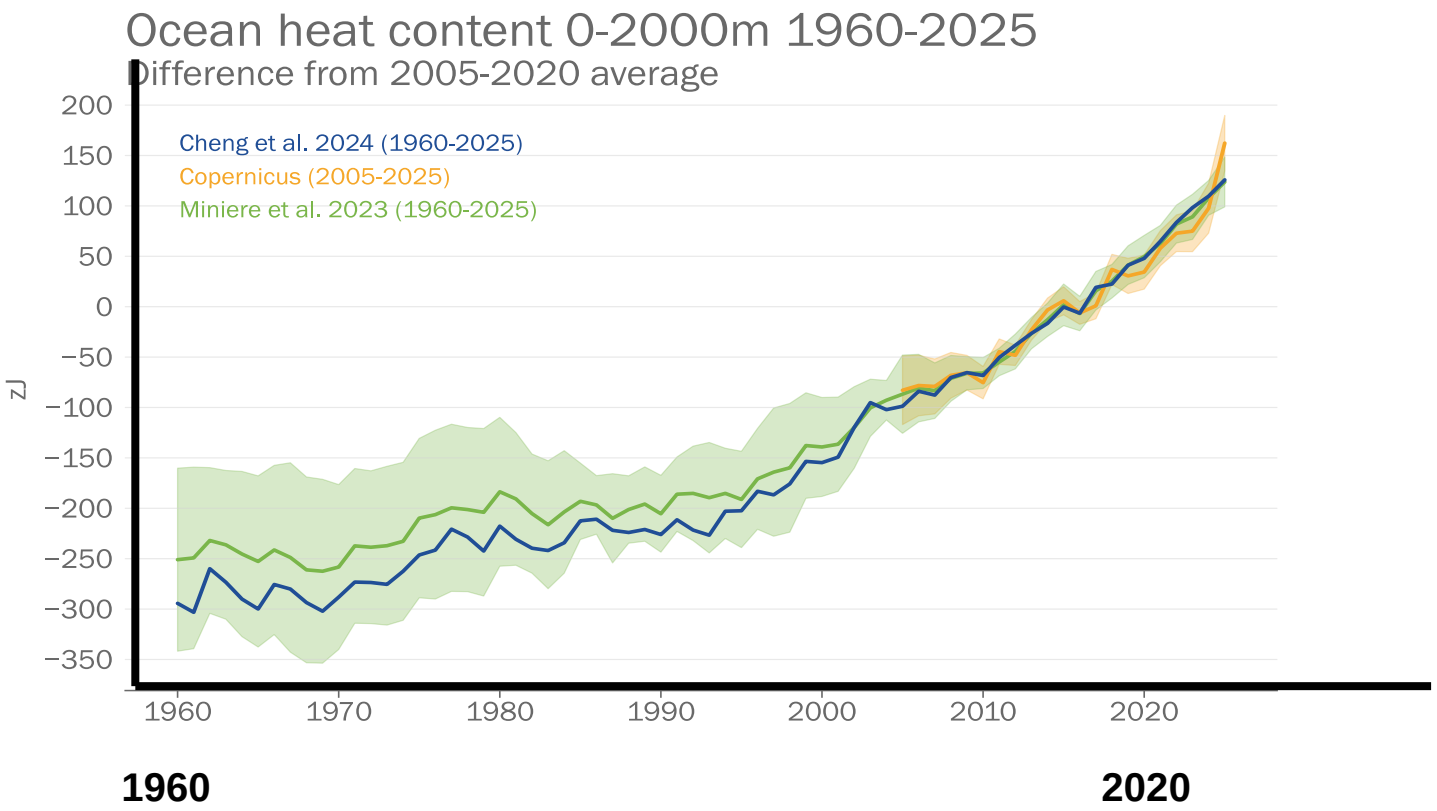
IPCC AR6 2021

Température moyenne de l'air en surface depuis 1850



World Meteorological Organization, 2026

Contenu en chaleur de l'océan (0-2000m), 1960-2025



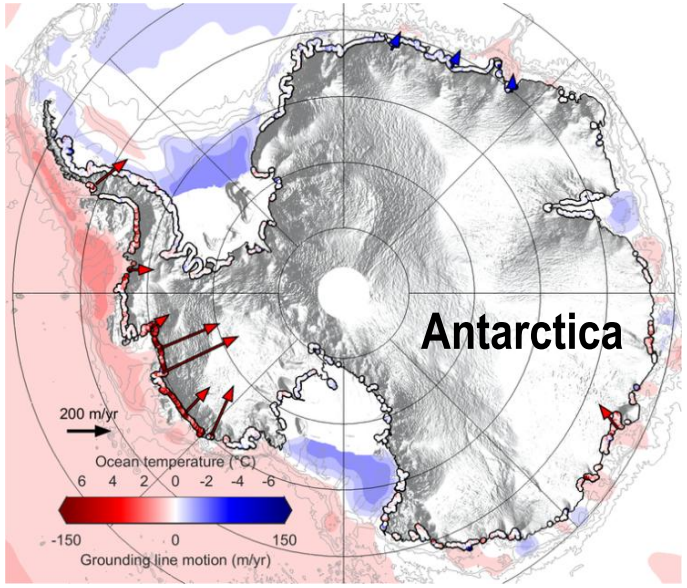
1960 **2020**

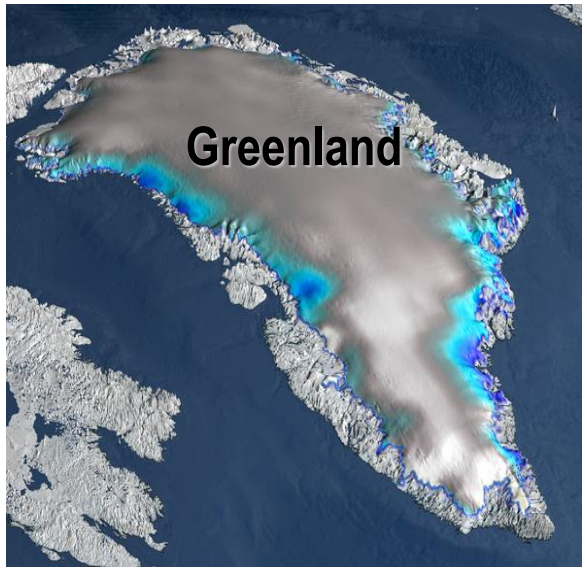
World Meteorological Organization, 2026

Les glacent fondent



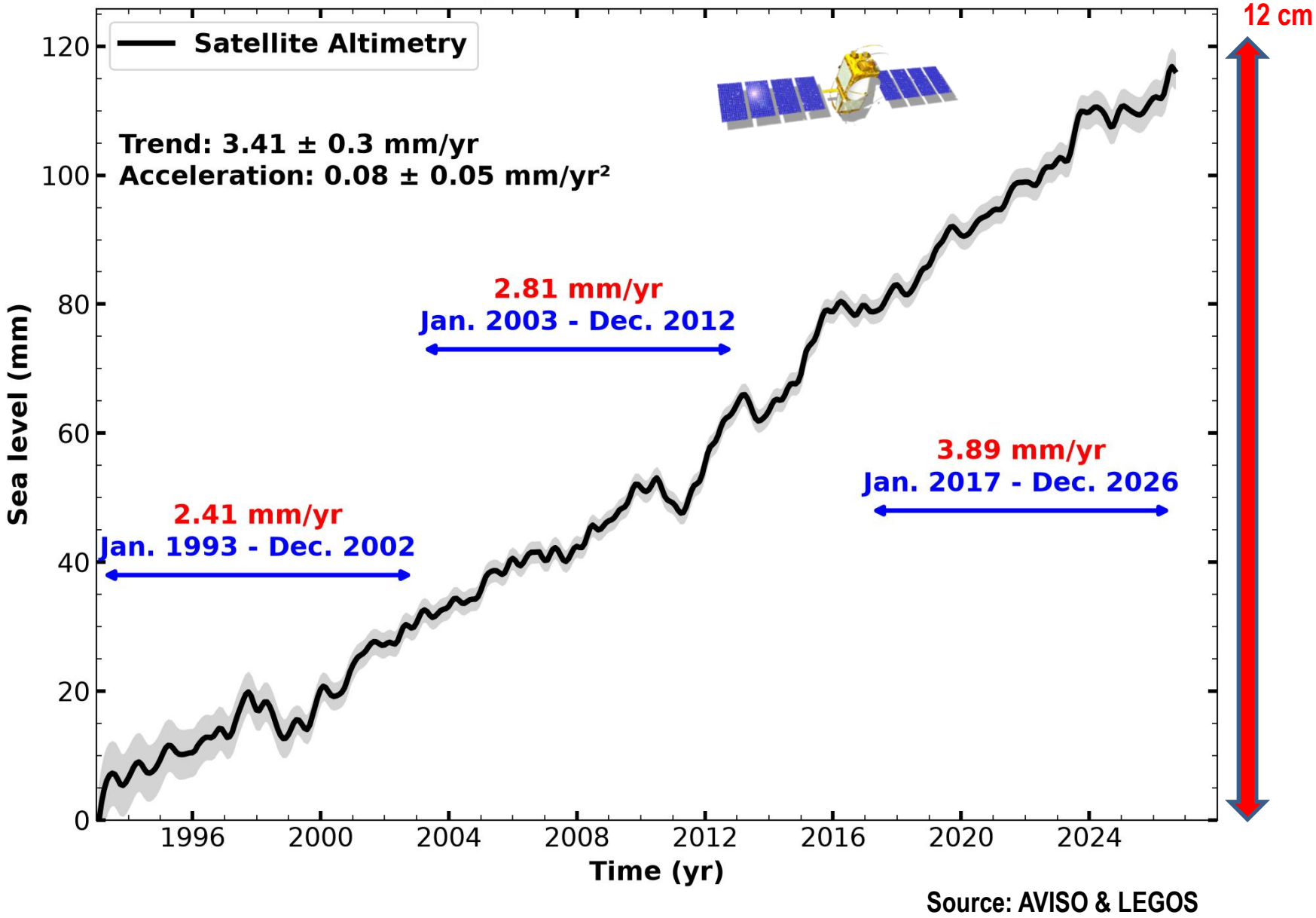
Trient glacier (Swiss Alps)






La mer monte…

Hausse du niveau moyen global de la mer (1 janvier 1993 - 25 août 2026)



Source: AVISO & LEGOS

Mesure des variations du niveau de la mer

- **Altimetrie spatiale: mesures 'absolues' dans un repère géocentrique;**
  informe sur les variations 'climatiques' –échelles interannuelles à multi-décennales-

- **Marégraphie: mesures 'relatives' ;**
  informe sur l'effet combiné des variations 'climatiques' de la mer
  et des mouvements verticaux de la croûte terrestre;

→ ***C'est l'information utile pour les études d'impact et pour l'adaptation***

Hausse de la mer au 20ème siècle

Environ 15 cm entre 1900 et 1990

d'après les données marégraphiques

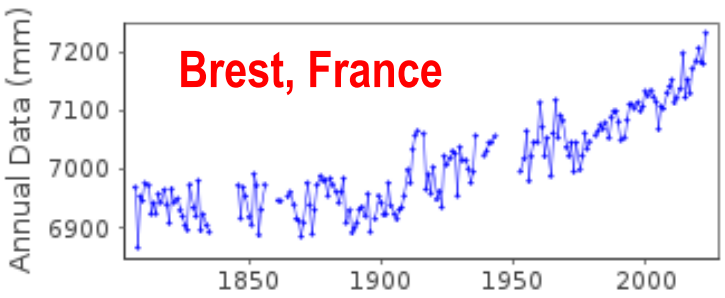
Hausse moyenne : 1.1 - 1.9 mm/an

Church et al. (2013) : 1.7 +/- 0.3 mm/an

Jevrejeva et al. (2014): 1.9 +/- 0.3 mm/an

Hay et al. (2015): 1.2 +/- 0.2 mm/an

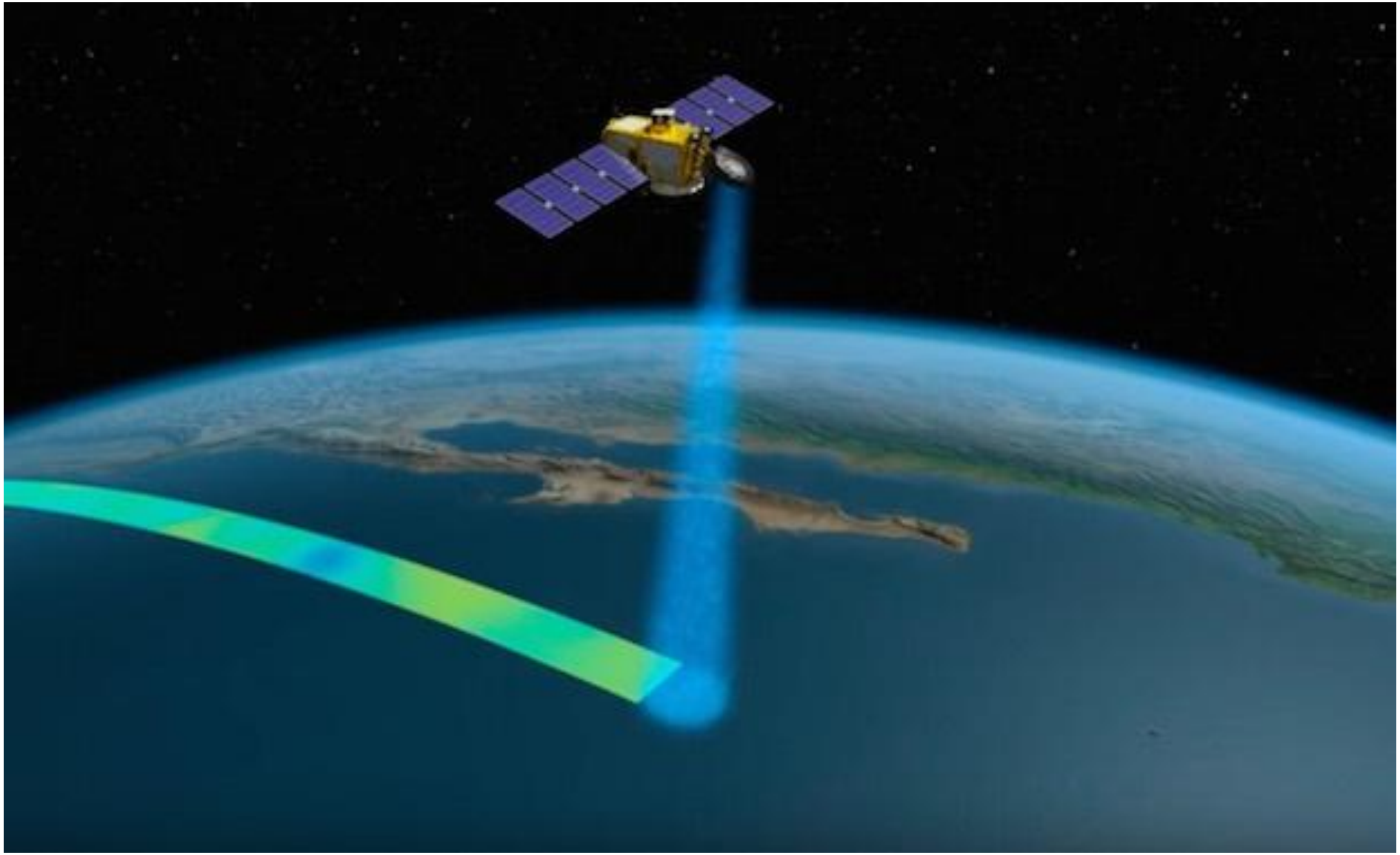
Dangendorf et al. (2017) : 1.1 +/- 0.2 mm/an





Réseau marégraphique GLOSS

Depuis plus de 30 ans, on mesure en routine les variations du niveau de la mer depuis l'espace par altimétrie spatiale





Altimétrie Spatiale

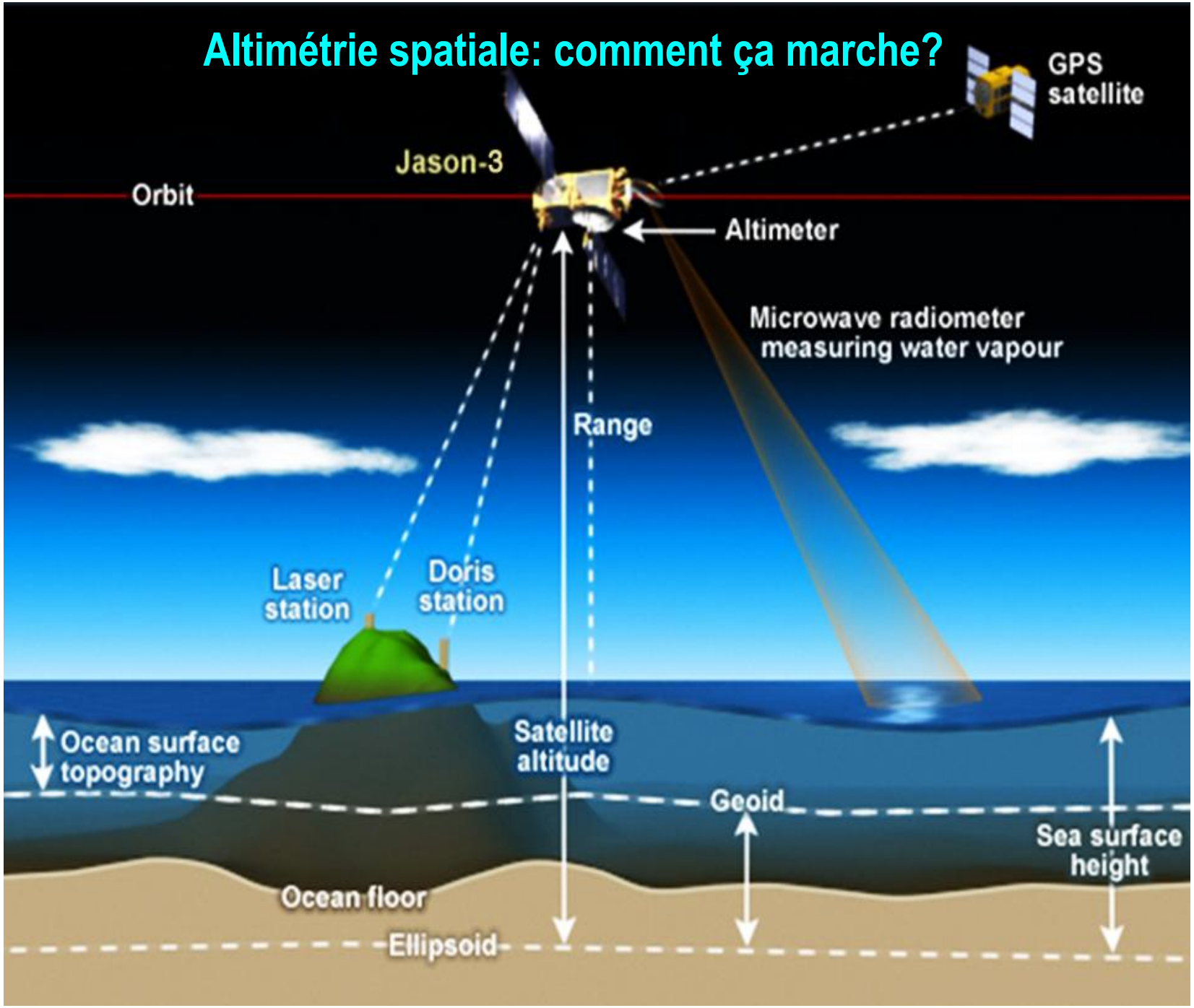
Mesure de la topographie de surface des océans et de son évolution spatio-temporelle par rapport au centre de la Terre

→ mesure 'absolue' dans un repère géocentriqe



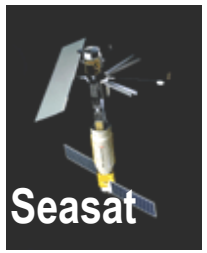
Couverture globale des océans
en quelques jours (→ cycle orbital)

Altimétrie spatiale: comment ça marche?



GEOS-3 (1975)

De nombreux satellites altimétriques ont été lancés depuis le milieu des années 1970



1978



1985



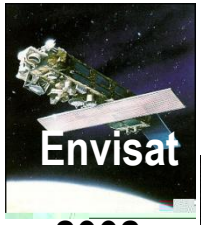
1991; 1995



1992



2001



2002



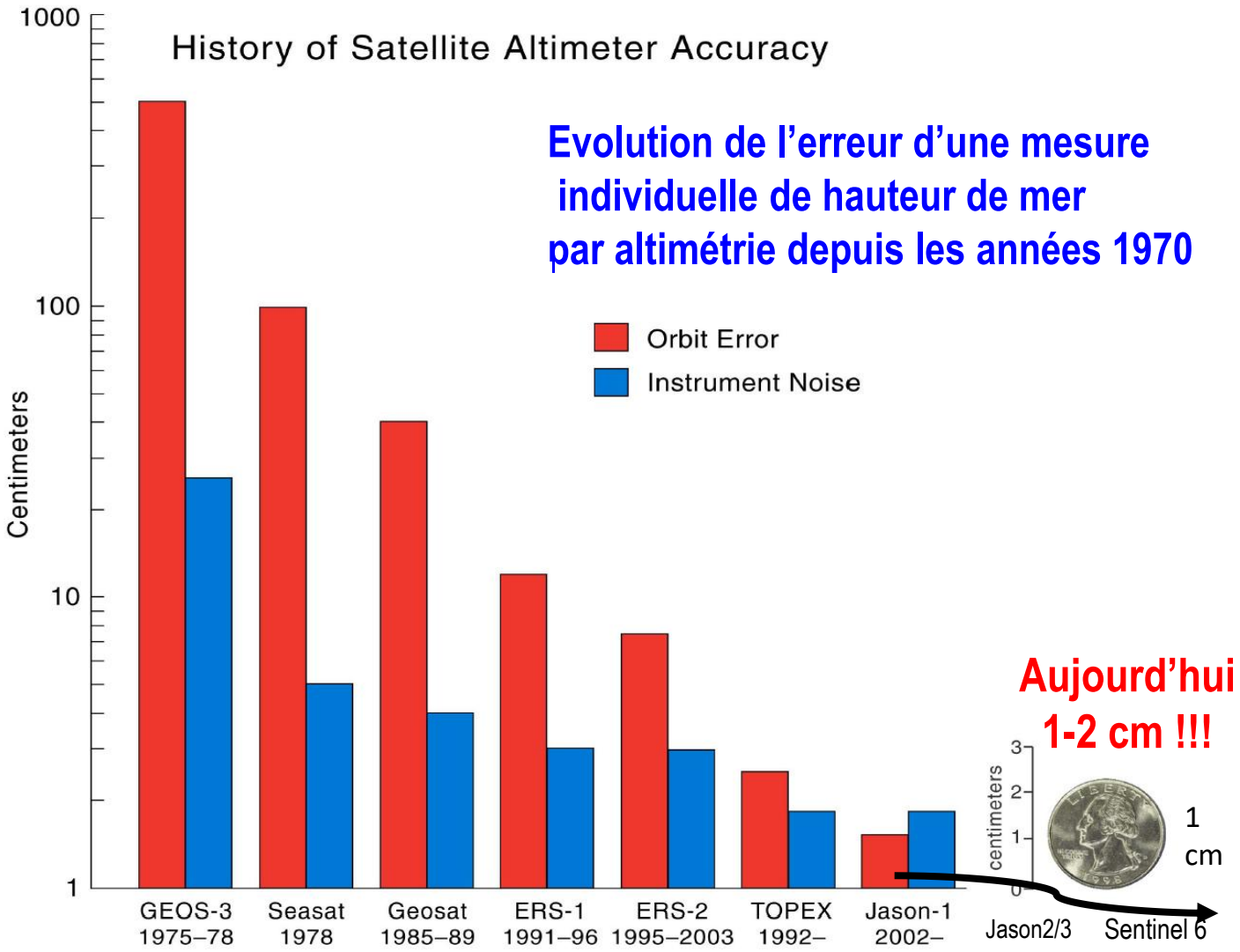
2008



2013

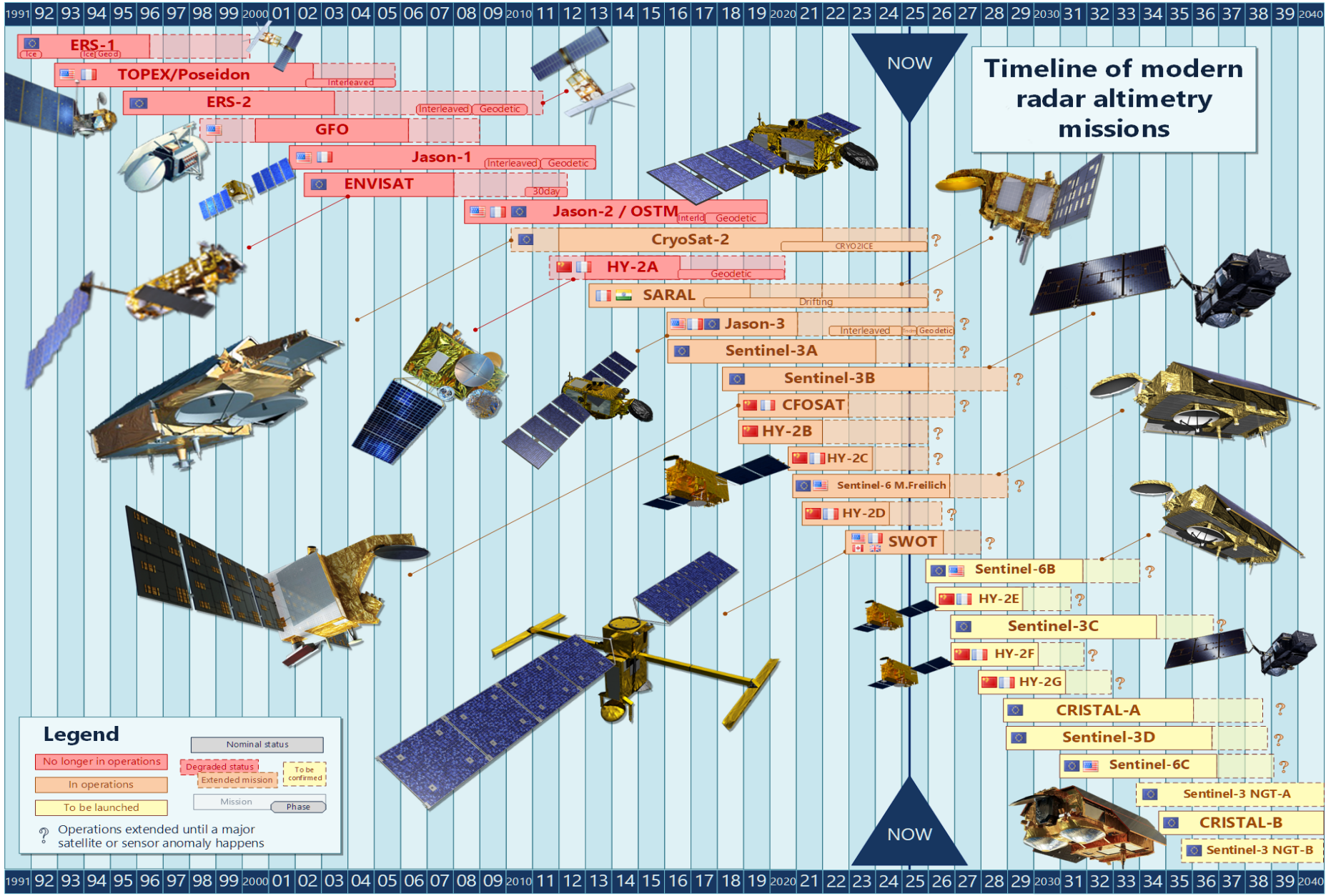
+ plein d'autres

Depuis le début des années 1990 : altimétrie de haute précision



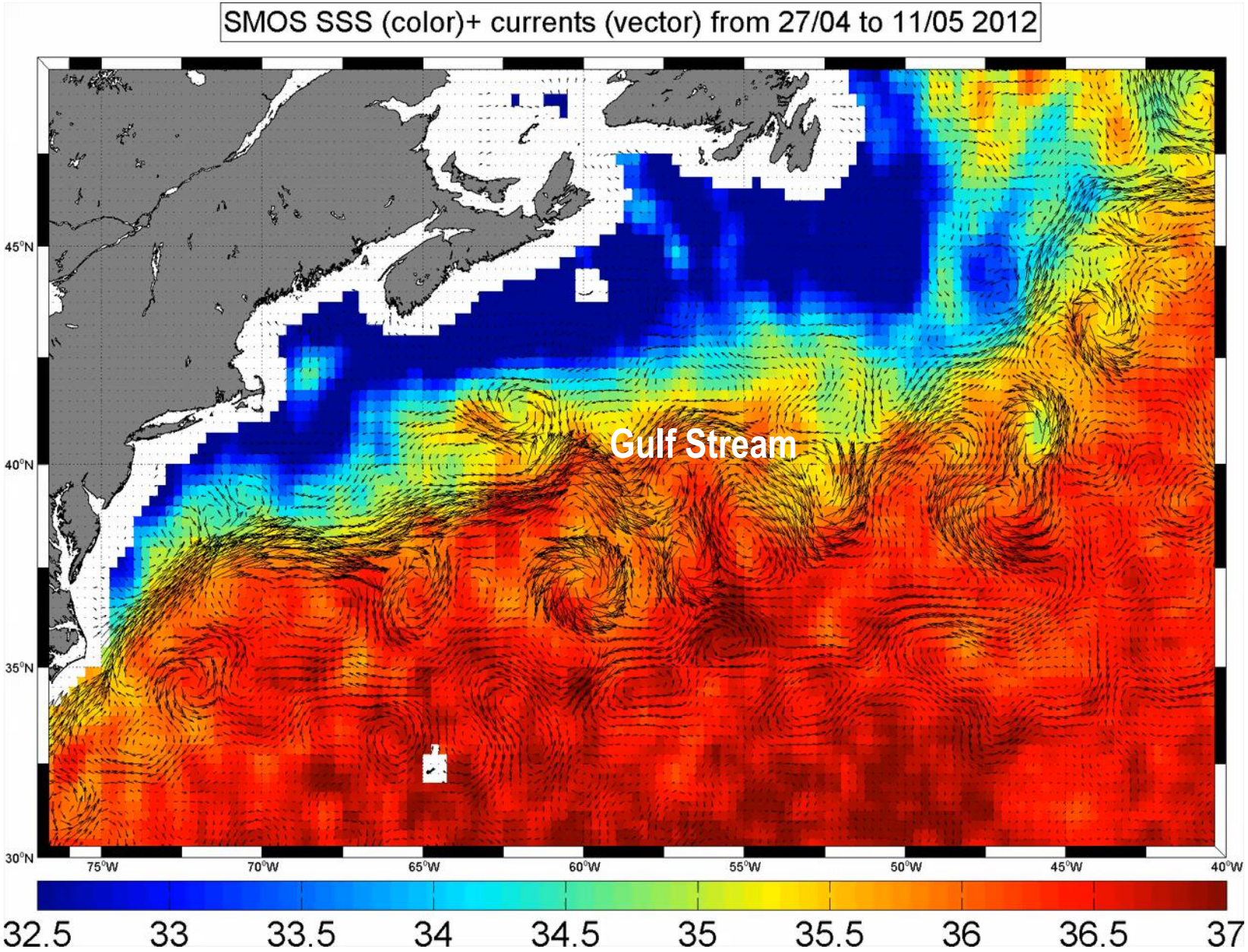
L.L.Fu & A. Cazenave, IAC, 2022

Constellation des satellites altimétriques de haute précision depuis 1990





- ✓ Première mission altimétrique de haute précision:
  TOPEX/Poseidon
- ✓ Lancement: août 1992
- ✓ Précision nominale de mesure de hauteur de la mer: 13 cm
- ✓ Objectif : mesurer les courants marins


SMOS SSS (color)+ currents (vector) from 27/04 to 11/05 2012
Gulf Stream
45°N
40°N
35°N
30°N
75°W
70°W
65°W
60°W
55°W
50°W
45°W
40°W
32.5
33
33.5
34
34.5
35
35.5
36
36.5
37

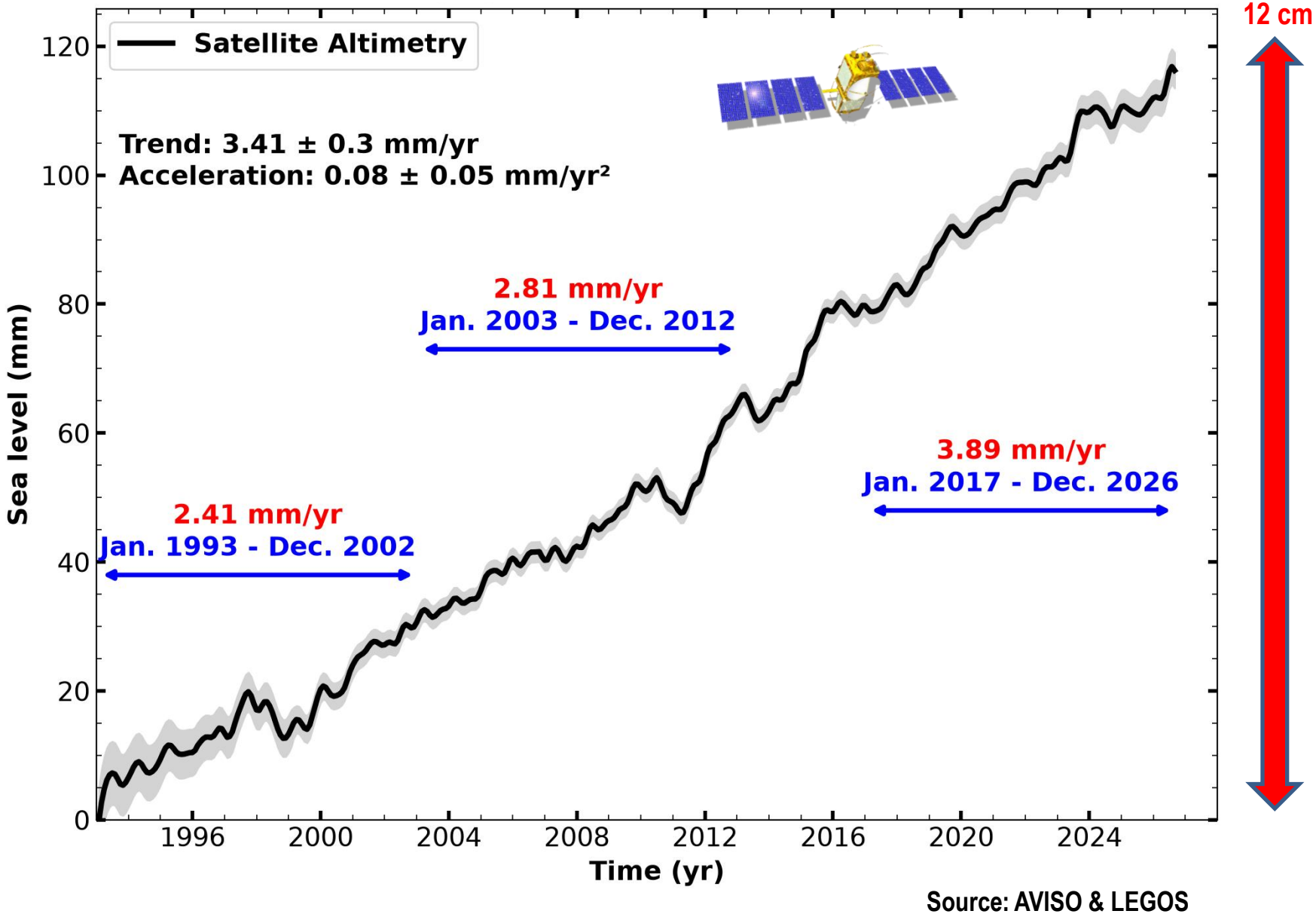


Mesure de la hausse de la mer par altimétrie

Couverture de l'océan pendant un cycle orbital (10 à 35 jours selon les missions)

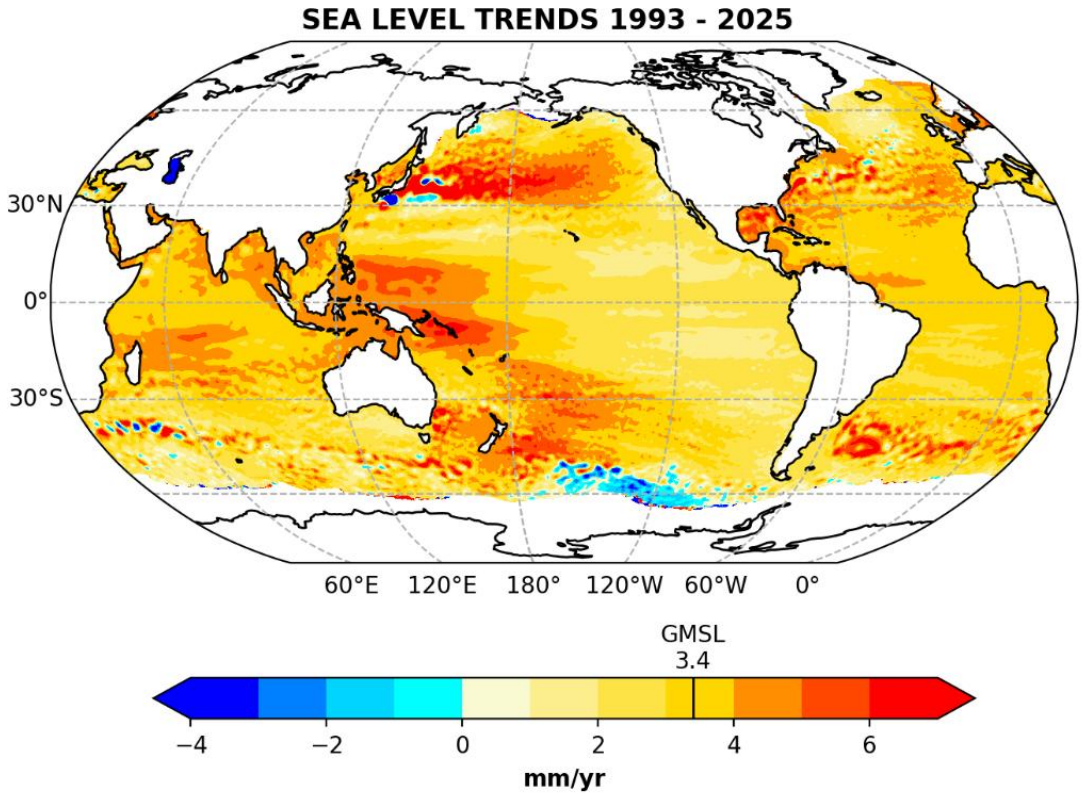


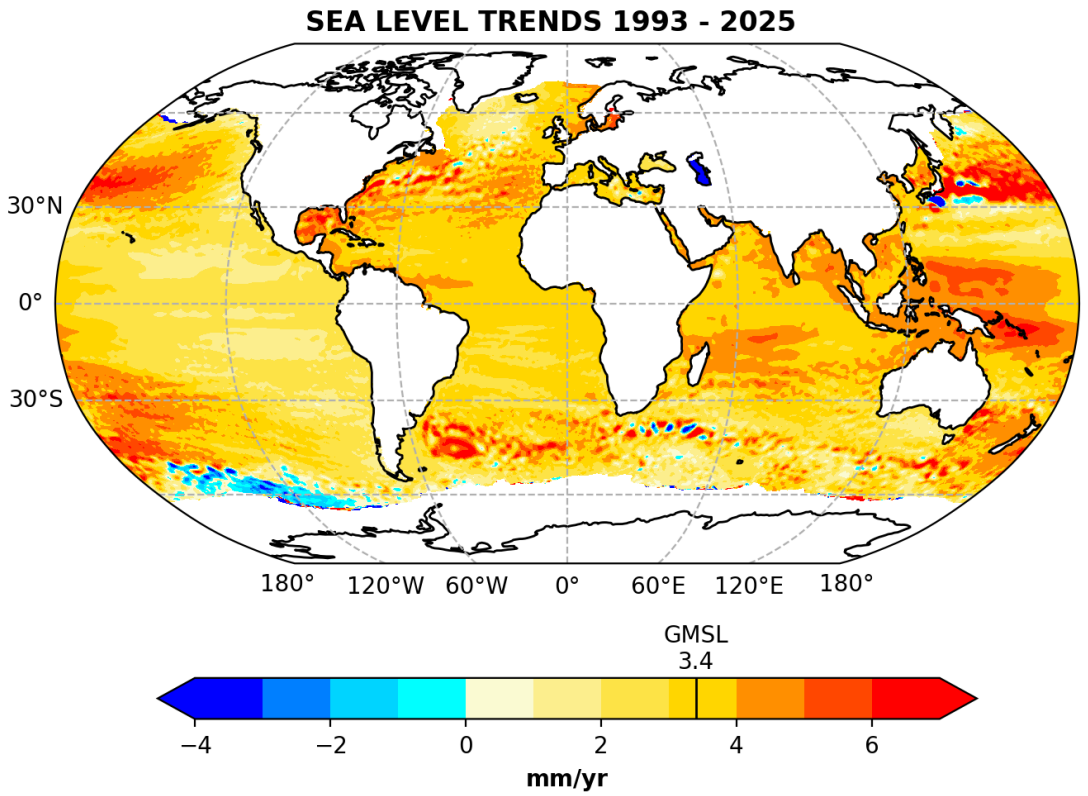
Hausse du niveau moyen global de la mer (1 janvier 1993-25 août 2026)



Source: AVISO & LEGOS

Hausse régionale de la mer entre 1993 et 2025



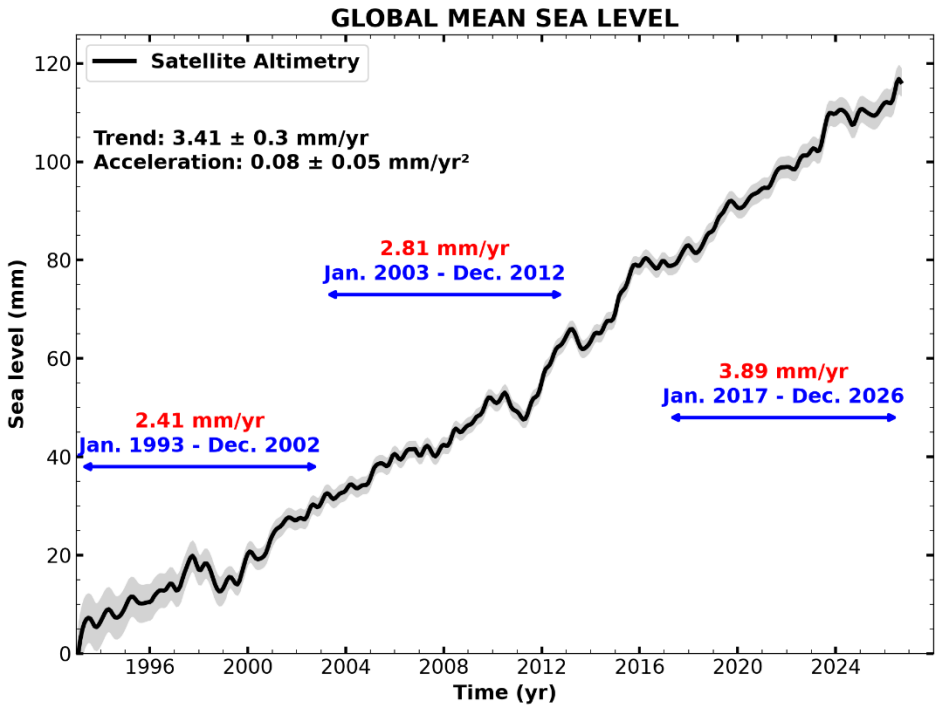


Source Copernicus and LEGOS



Les causes de la hausse de la mer

Niveau moyen global de la mer (1993-2026)



Contributions

Expansion Thermique de l'océan

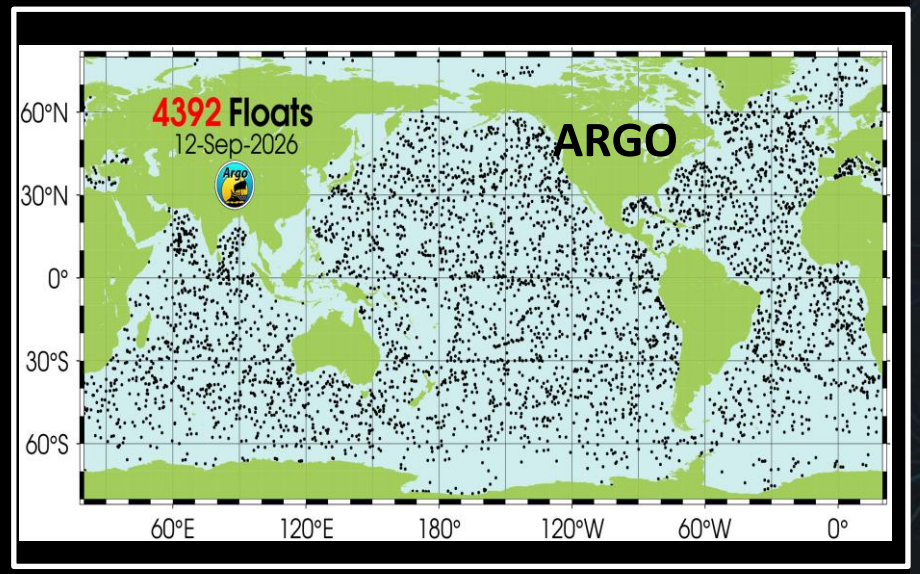
\+

Fonte des glaces
- Glaciers
- Groenland
- Antarctique

\+

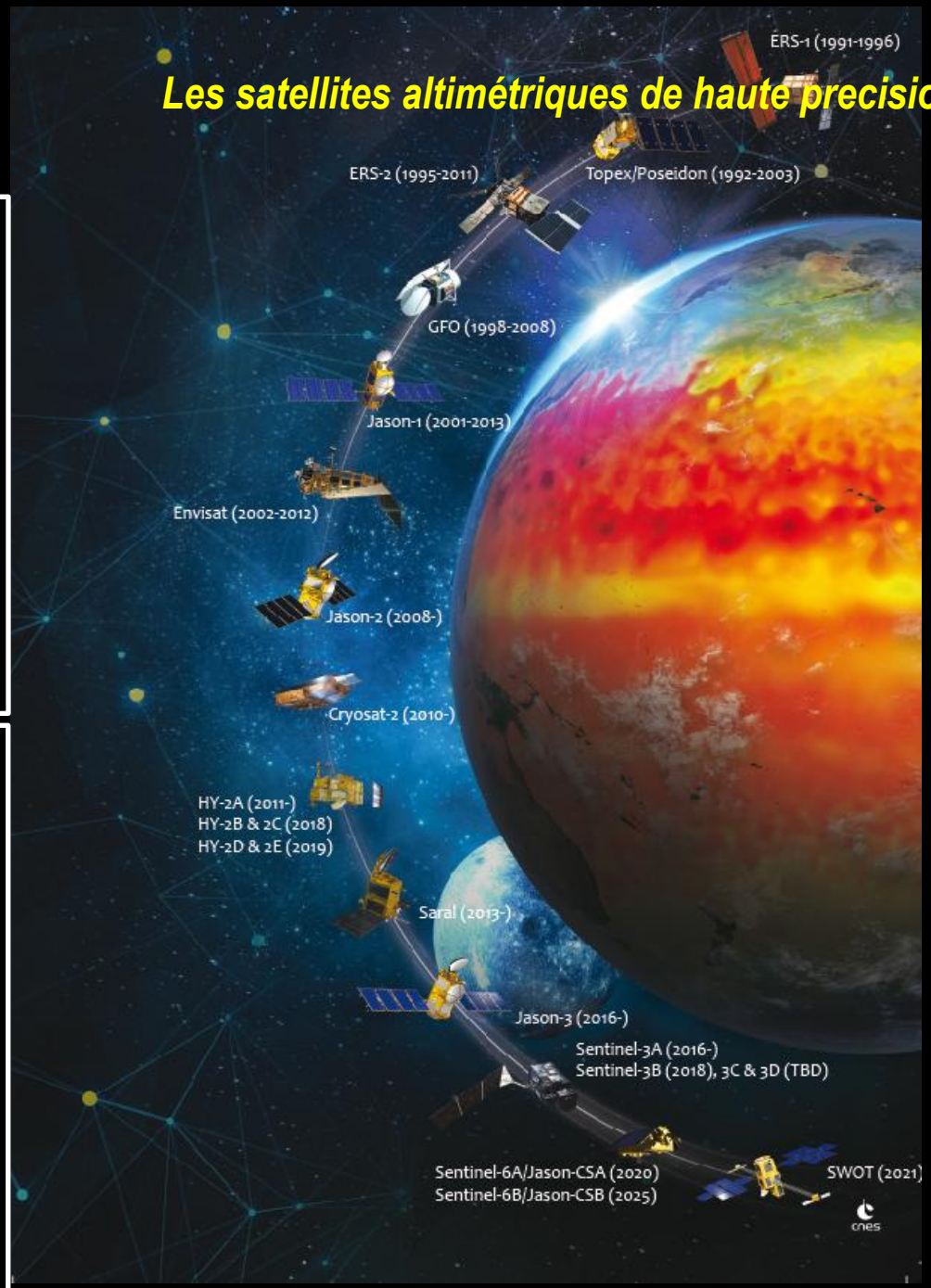
Eaux terrestres

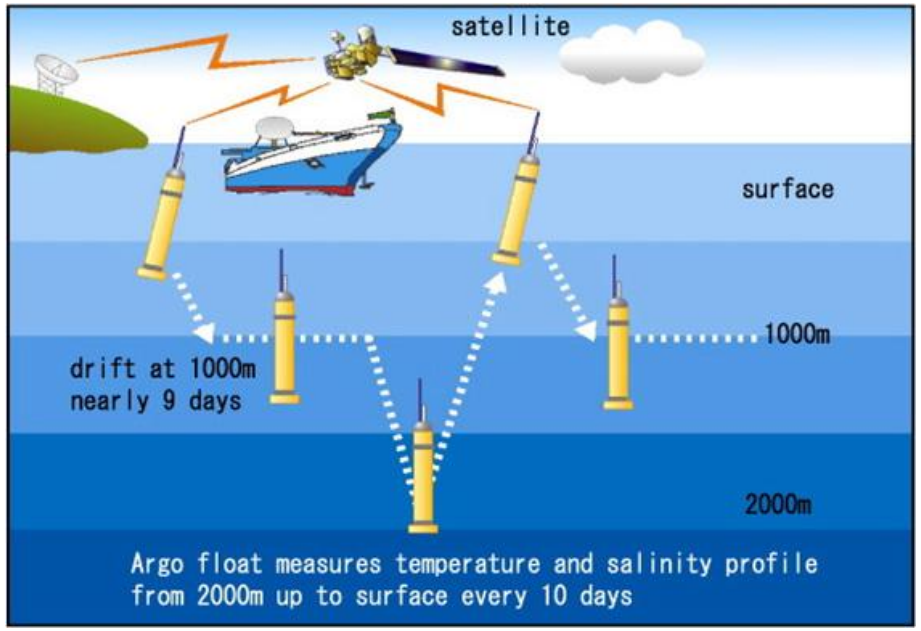
Different systèmes d'observations permettent de mesurer les contributions à la hausse de la mer





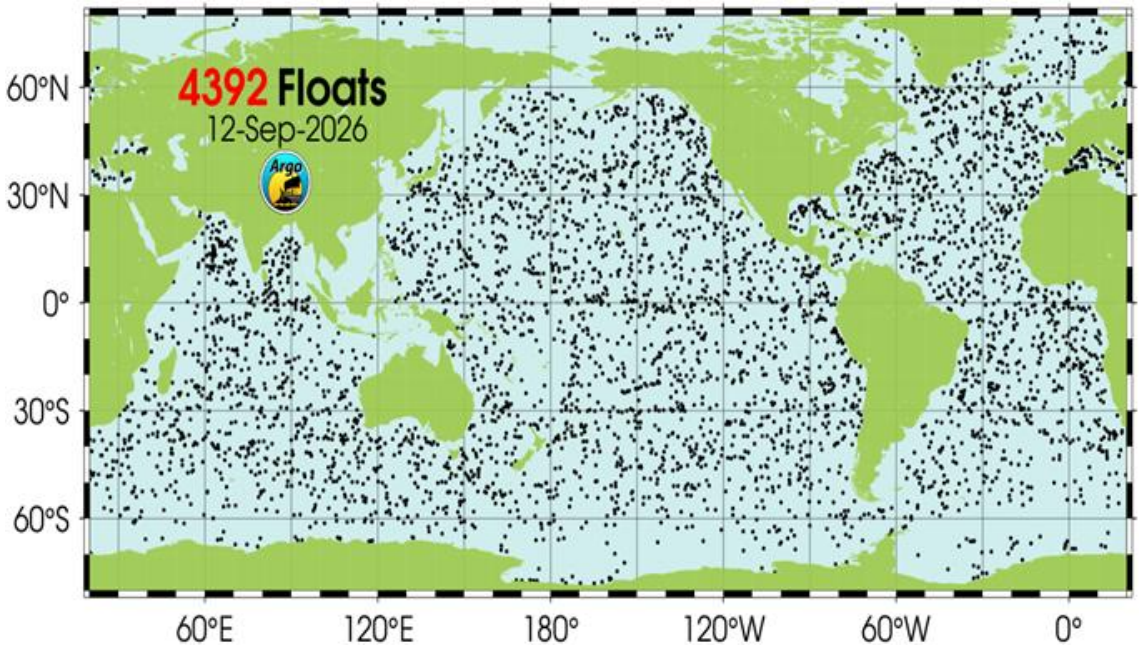
Les satellites altimétriques de haute precision



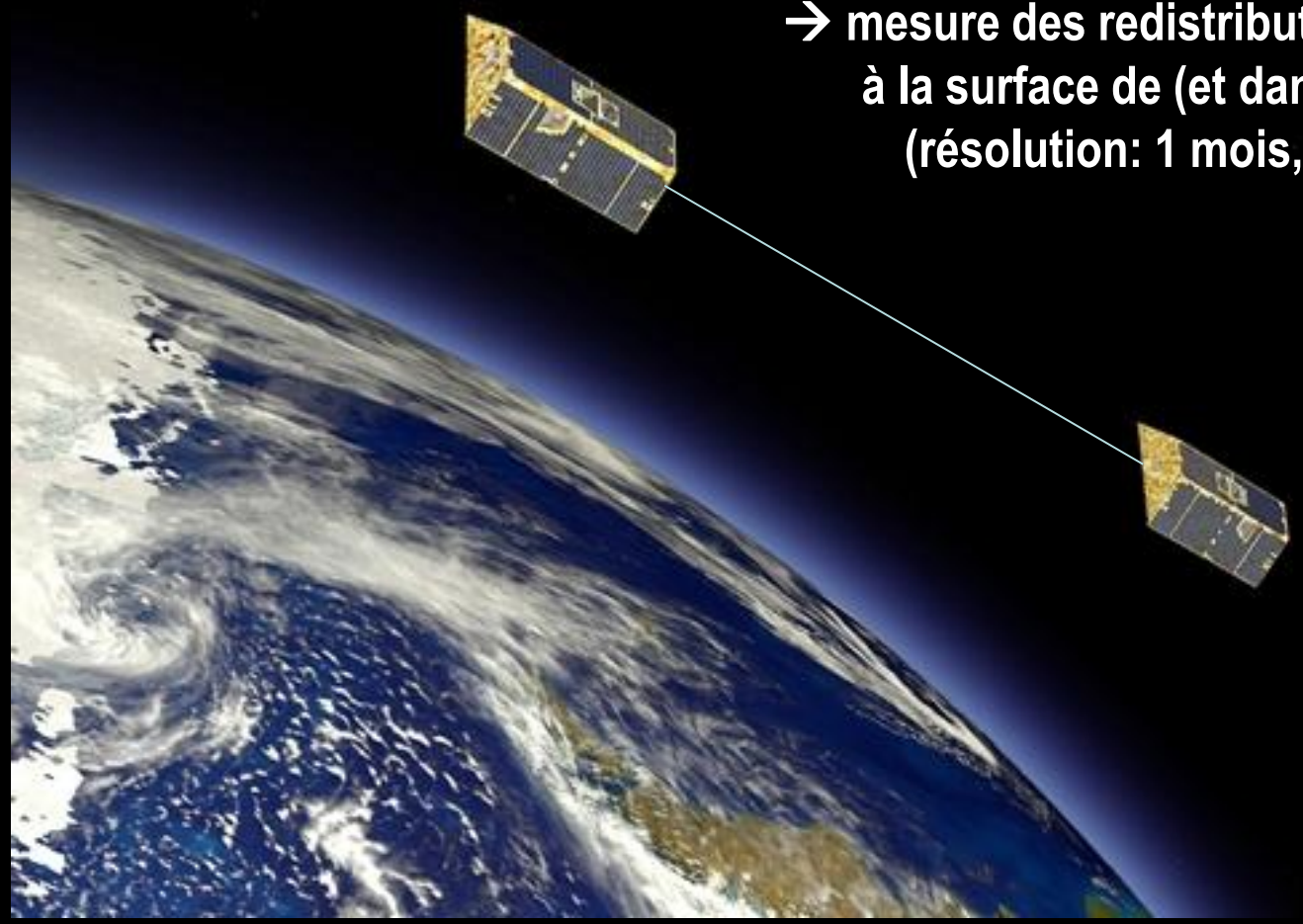


Projet international ARGO

~4400 flotteurs automatiques (température & salinité de l'océan → 2000 m de profondeur)

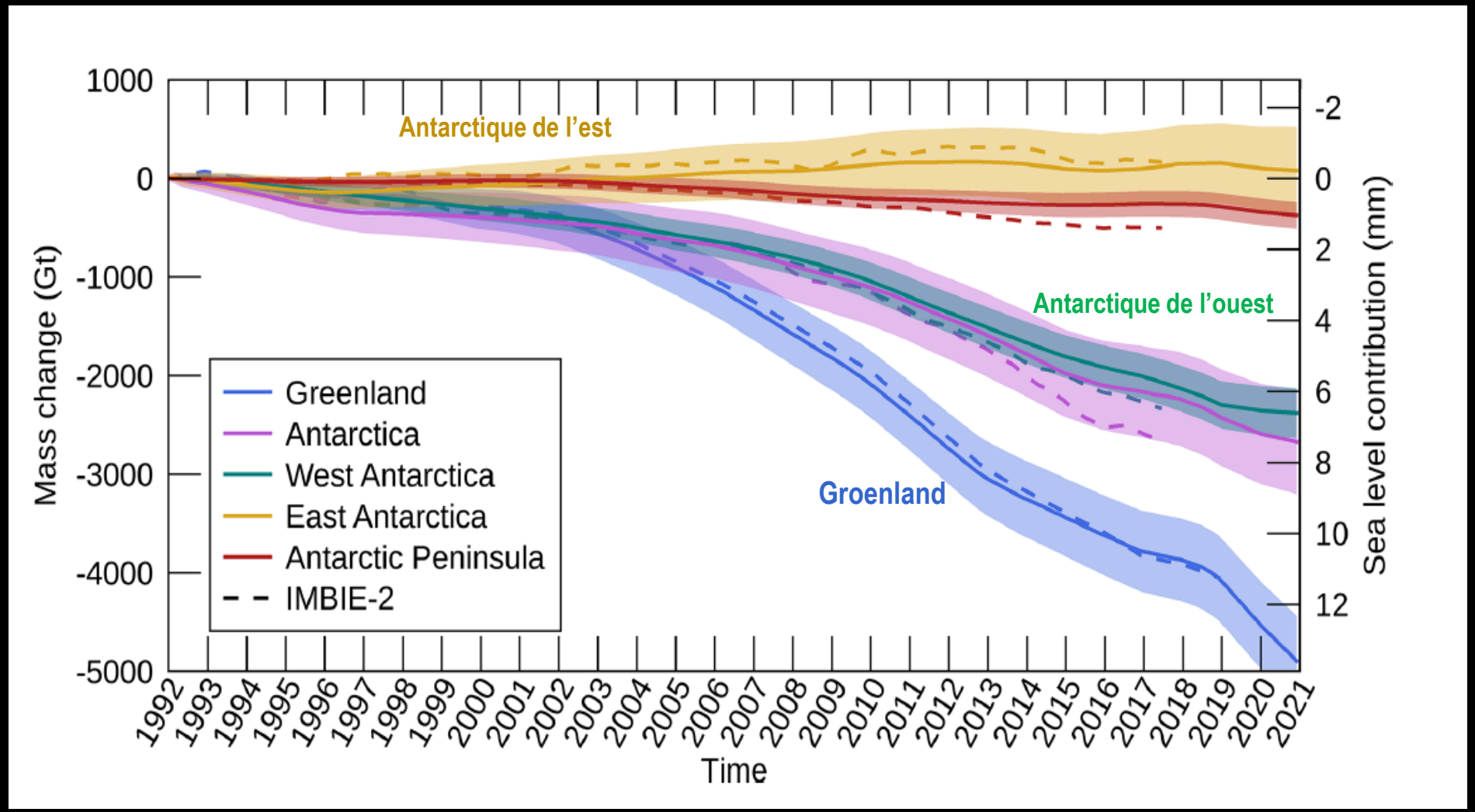


Depuis 2002, Gravimétrie Spatiale GRACE (2002-2017) et GRACE Follow on (2018-)



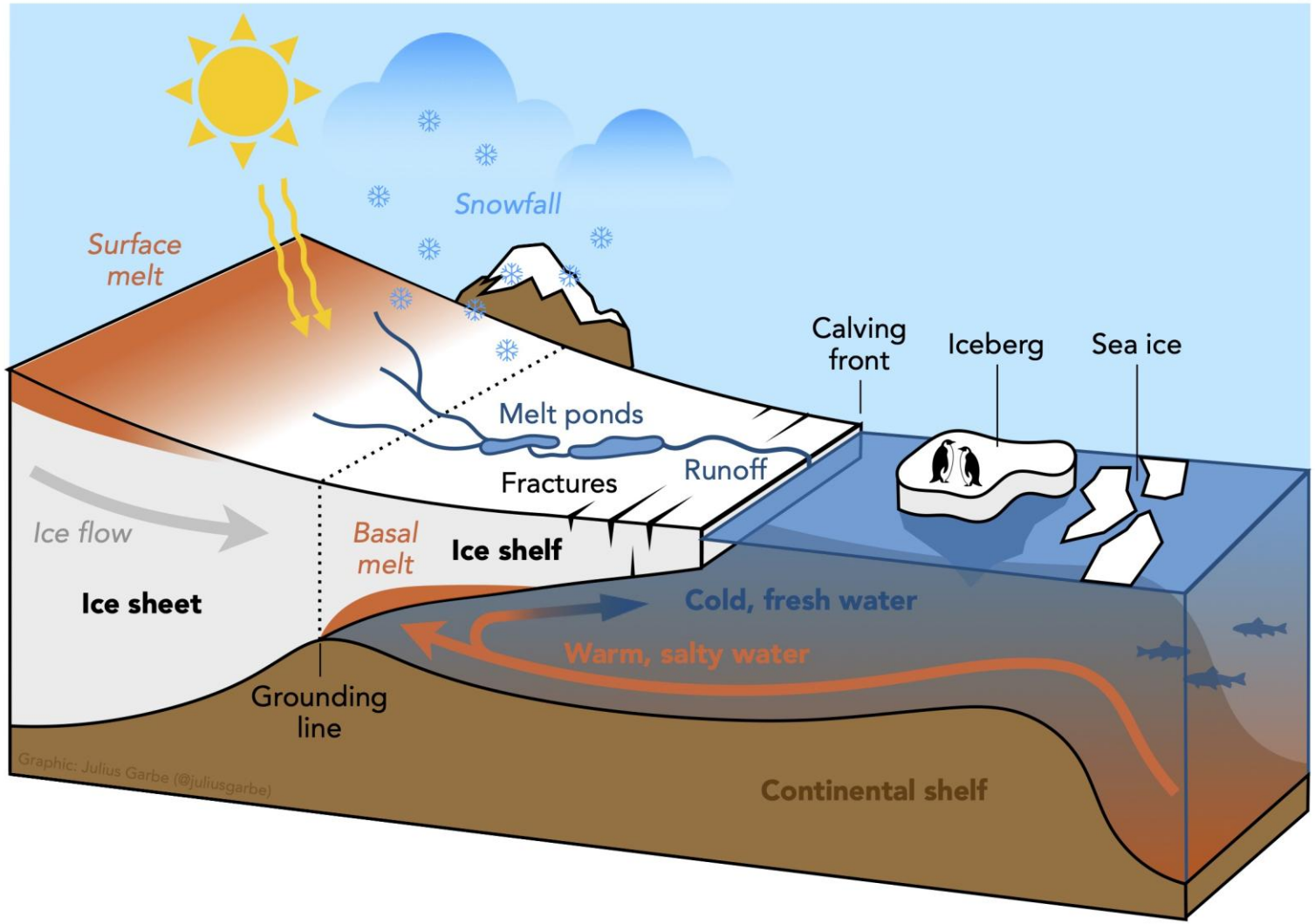
→ mesure des redistributions de masse à la surface de (et dans) la Terre (résolution: 1 mois, 300 km)

Diminution de la masse de glace du Groenland et de l'Antarctique



Otosaka et al., 2023

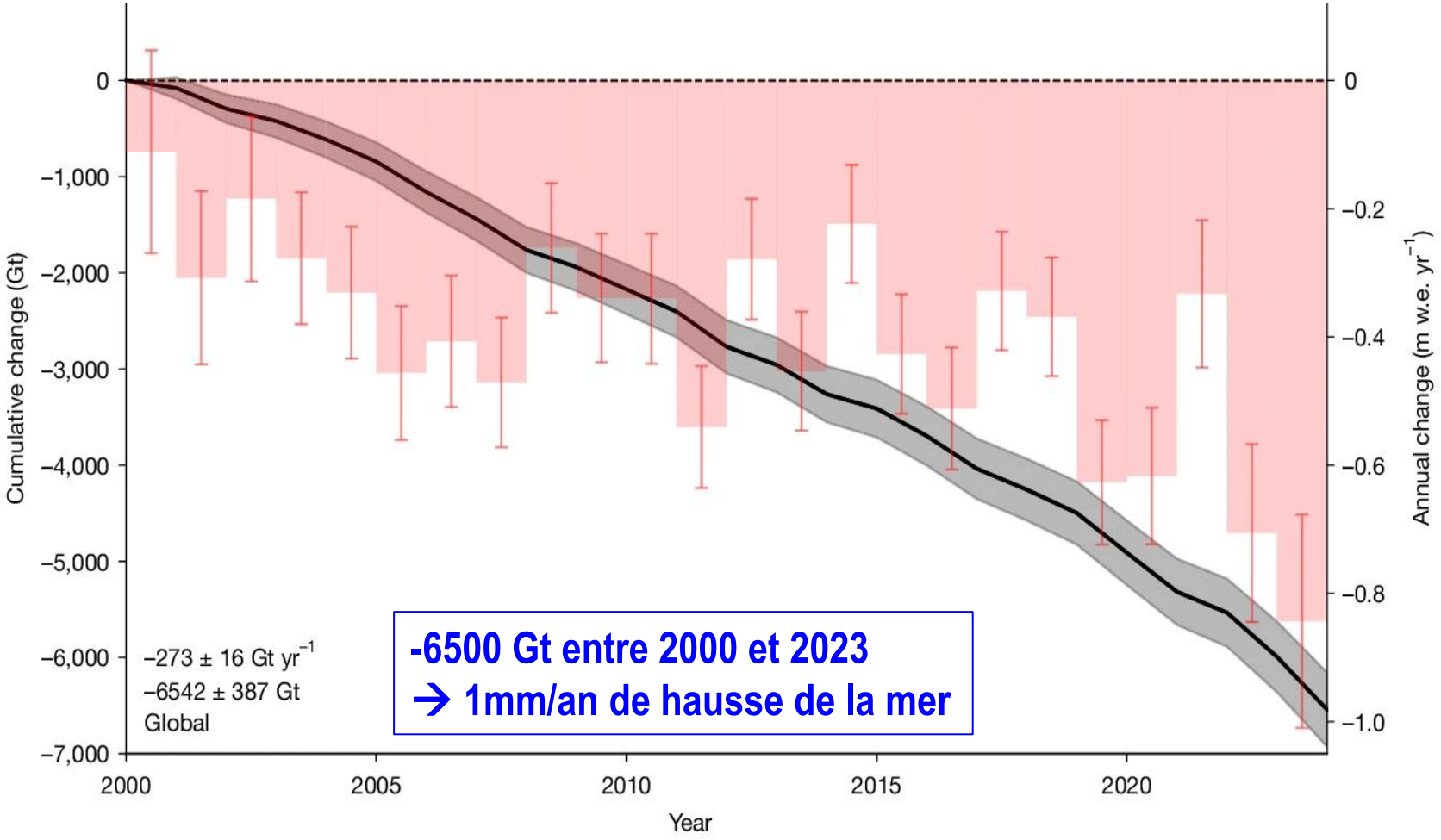
Instabilités dynamiques des calottes polaires



Les eaux océaniques chaudes en périphérie de la calotte glaciaire font fondre par dessous les plateformes de glace flottantes qui soutiennent les glaciers côtièrs.
Ces plateformes finissent pas se briser et se désolidariser de la calotte
→ les glaciers côtiers deviennent instables et s'écoulent de façon accélérée dans l'océan

Illustration from PIK

Fonte des glaciers de montagne



The GlaMBIE team, Zemp et al., 2025

Variations du stock d'eau sur les continents

- **Variabilité naturelle du climat (ENSO…)**
- **Activités humaines**

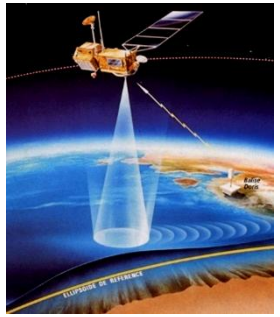


Barrages sur les fleuves
→ Baisse de la mer

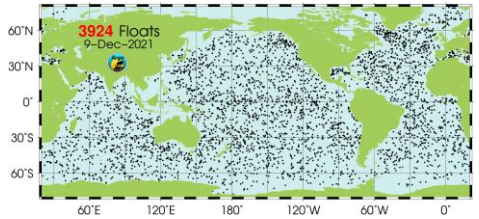


Pompage de l'eau dans les aquifères
→ Hausse de la mer

Bilan du niveau de la mer 1993-2016



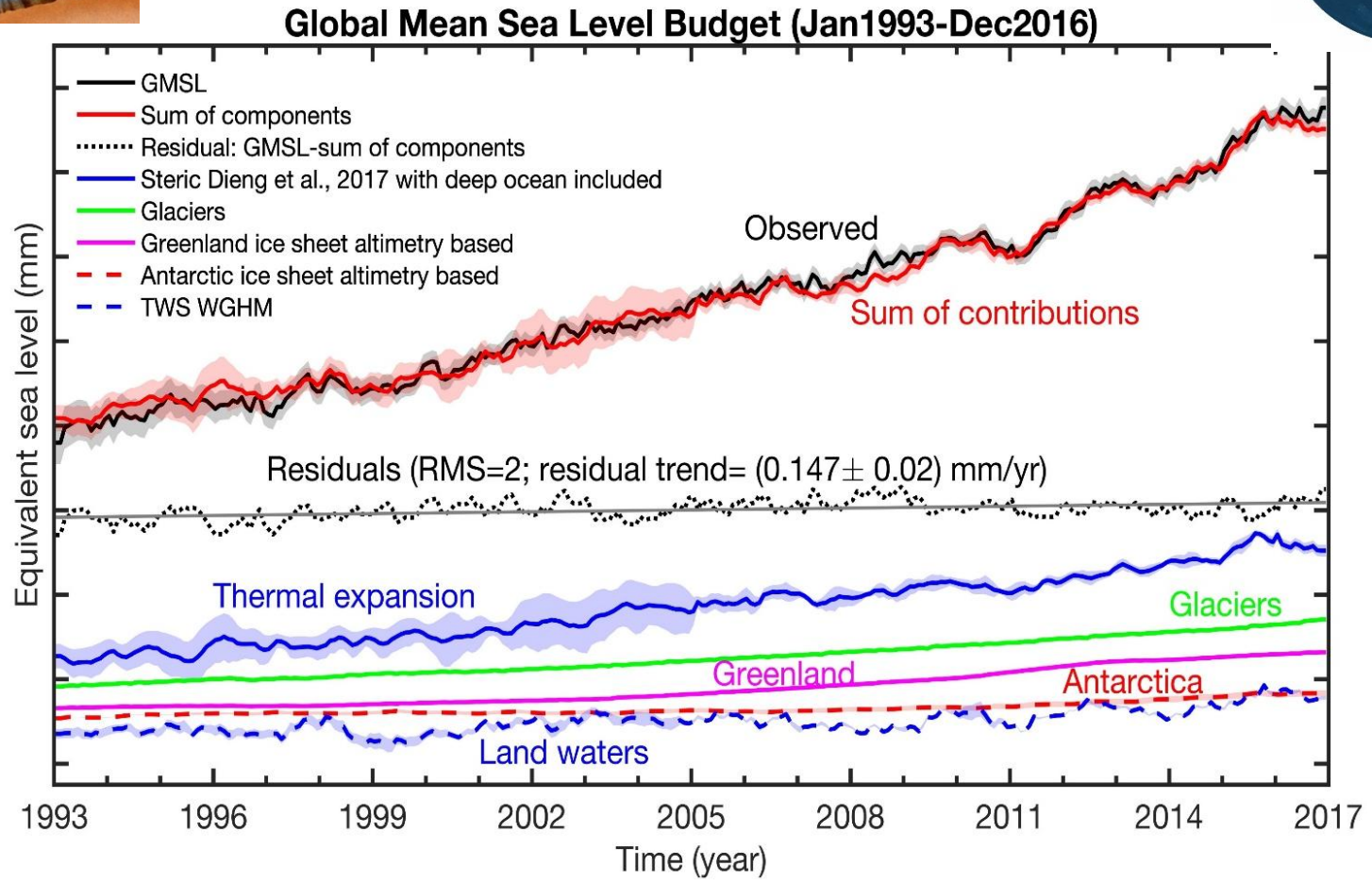
ALTIMETRY



ARGO FLOATS

GRACE SPACE GRAVIMETRY





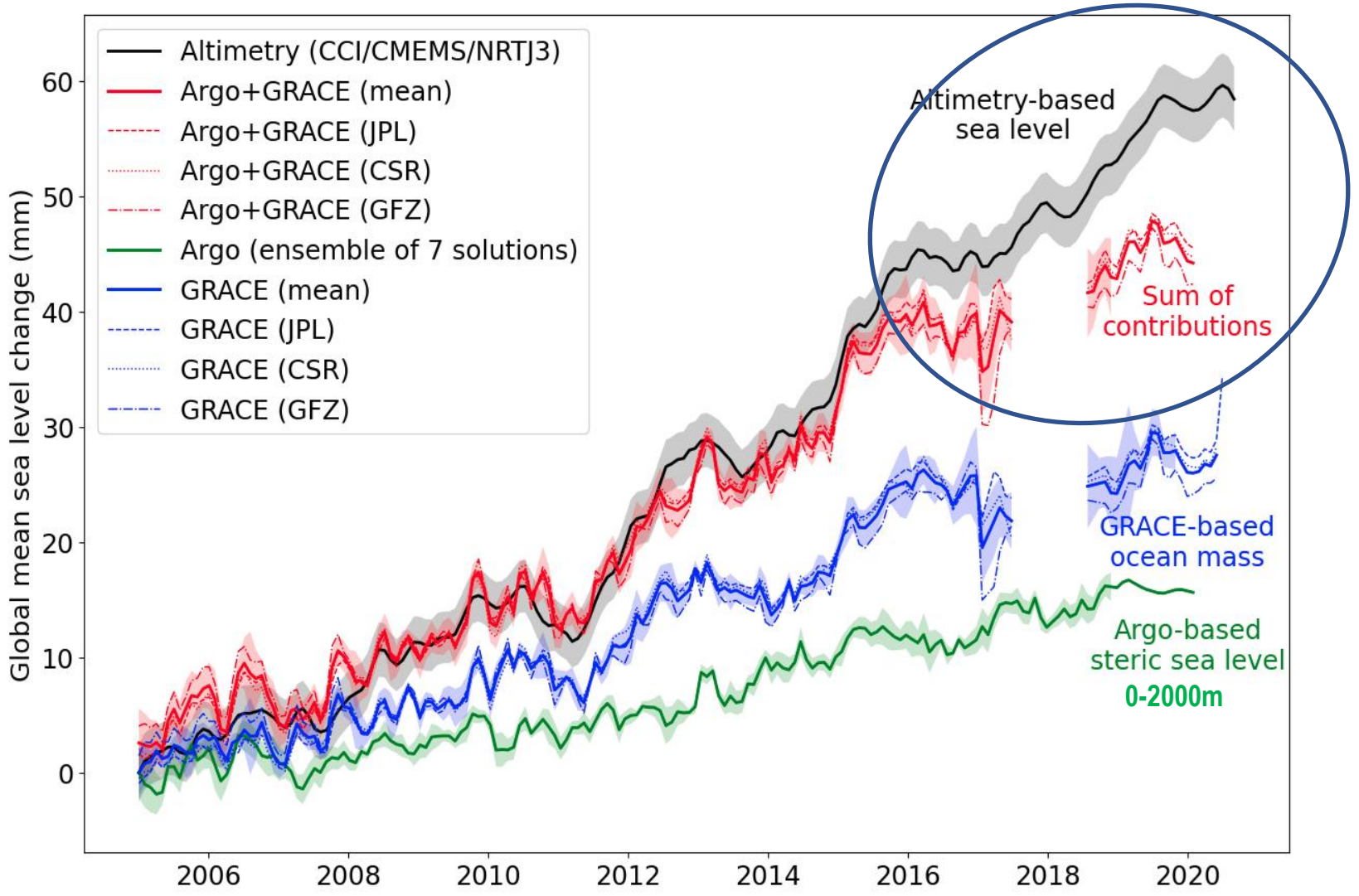
Dieng et al., 2017

Bilan du niveau de la mer: pourquoi c'est important?

→ Permet de:

- Détecter des dérives instrumentales d'un ou plusieurs systèmes d'observation (altimétrie, GRACE, Argo)
- Suivre l'évolution temporelle de chaque contribution (accélération? emballement?...)
- Détecter des contributions manquantes (océan profond sous 2000m non observé par Argo)
- Valider les modèles climatiques utilisés pour les projections futures

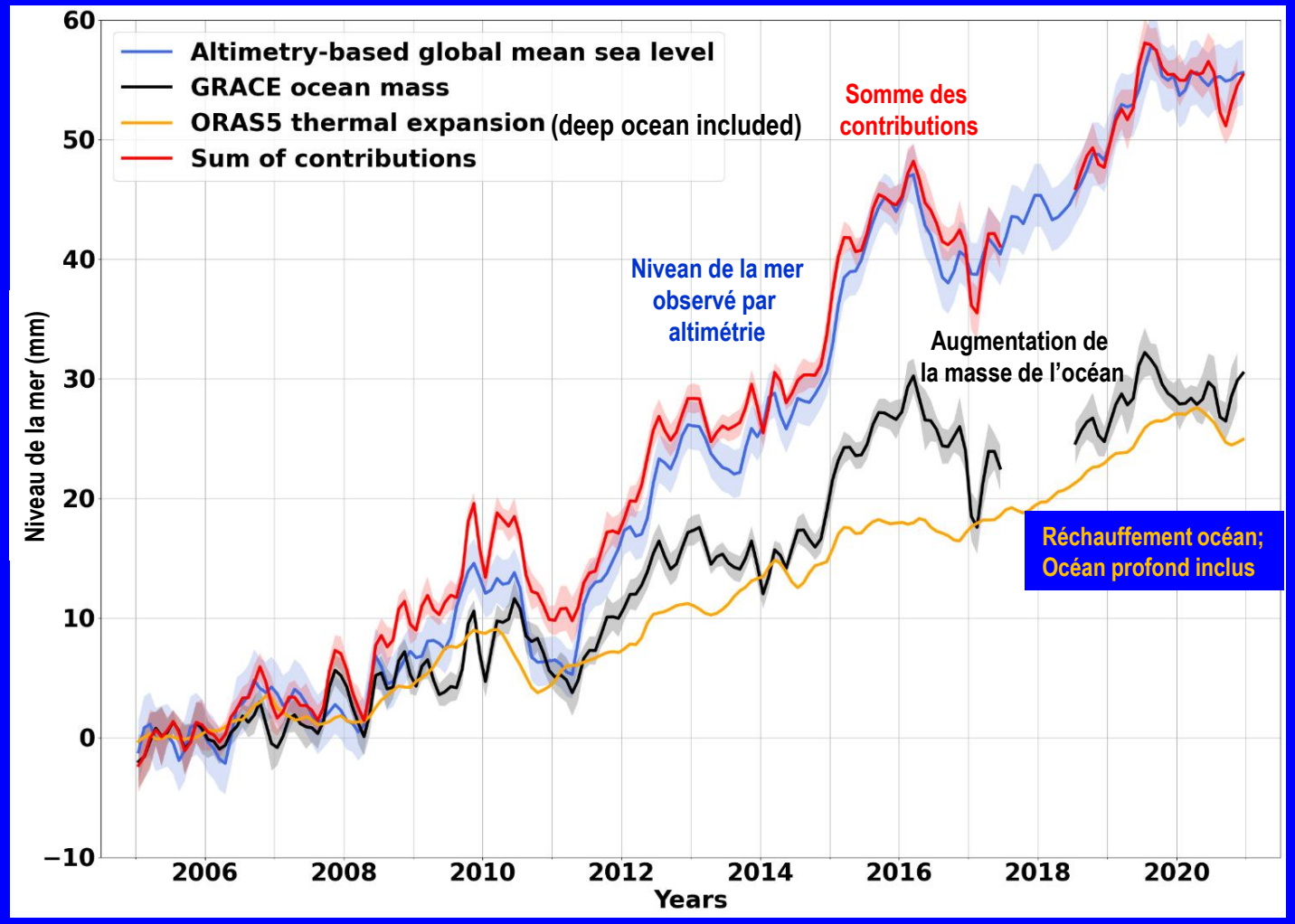
Depuis 2017, le bilan du niveau de la mer n'est plus fermé…



Est-ce du au réchauffement de l'océan profond (sous 2000m) non mesuré par Argo?

Chen et al., 2020,
Barnoud et al., 2021, 2023

Hausse du niveau de la mer et contributions



CONTRIBUTIONS (depuis 2005)

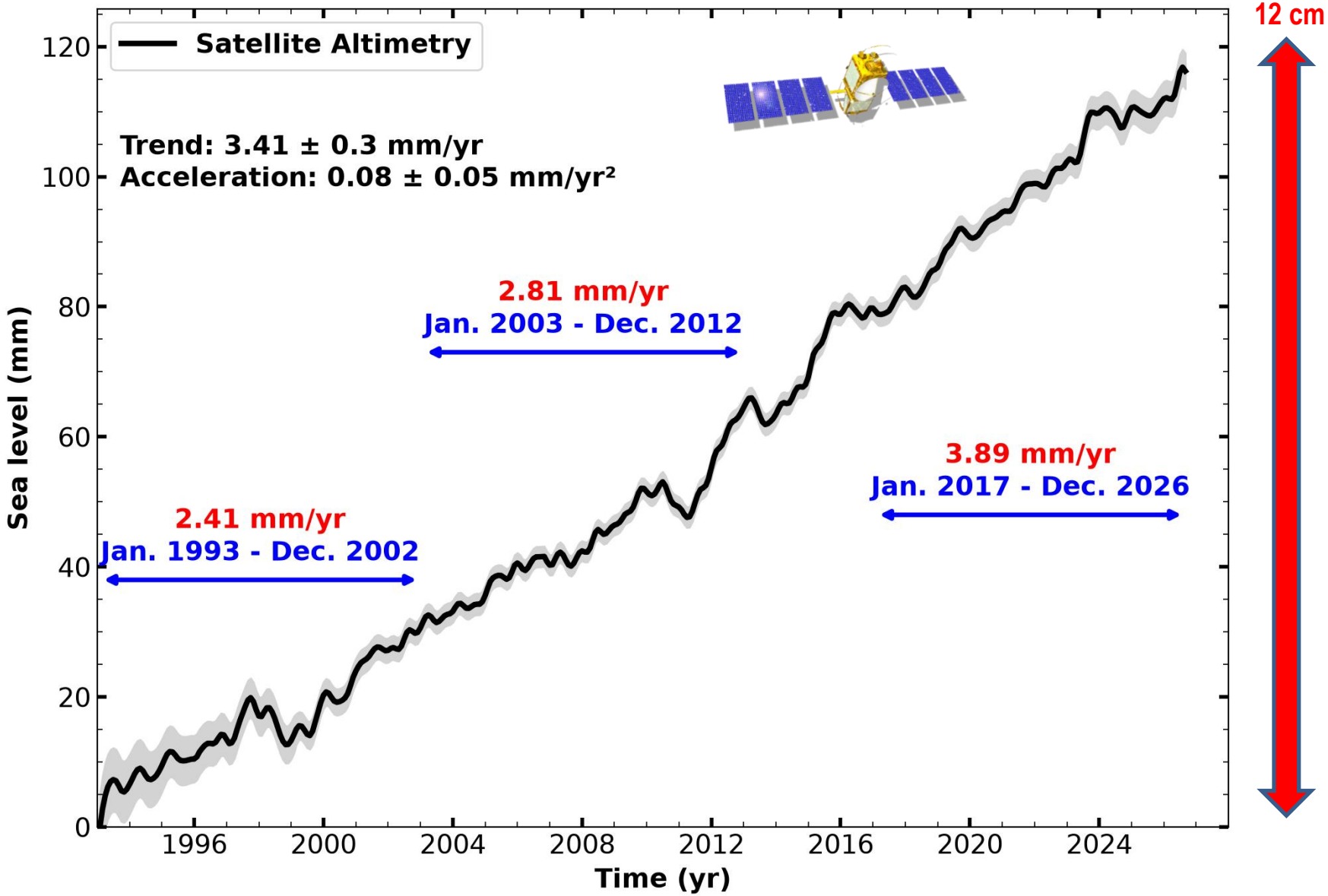
- **Expansion thermique de l'océan : ~40%**
- **Glaces continentales (Glaciers+Groenland +Antarctique): ~60%**

Barnoud et al., 2023
Cazenave et al., 2026



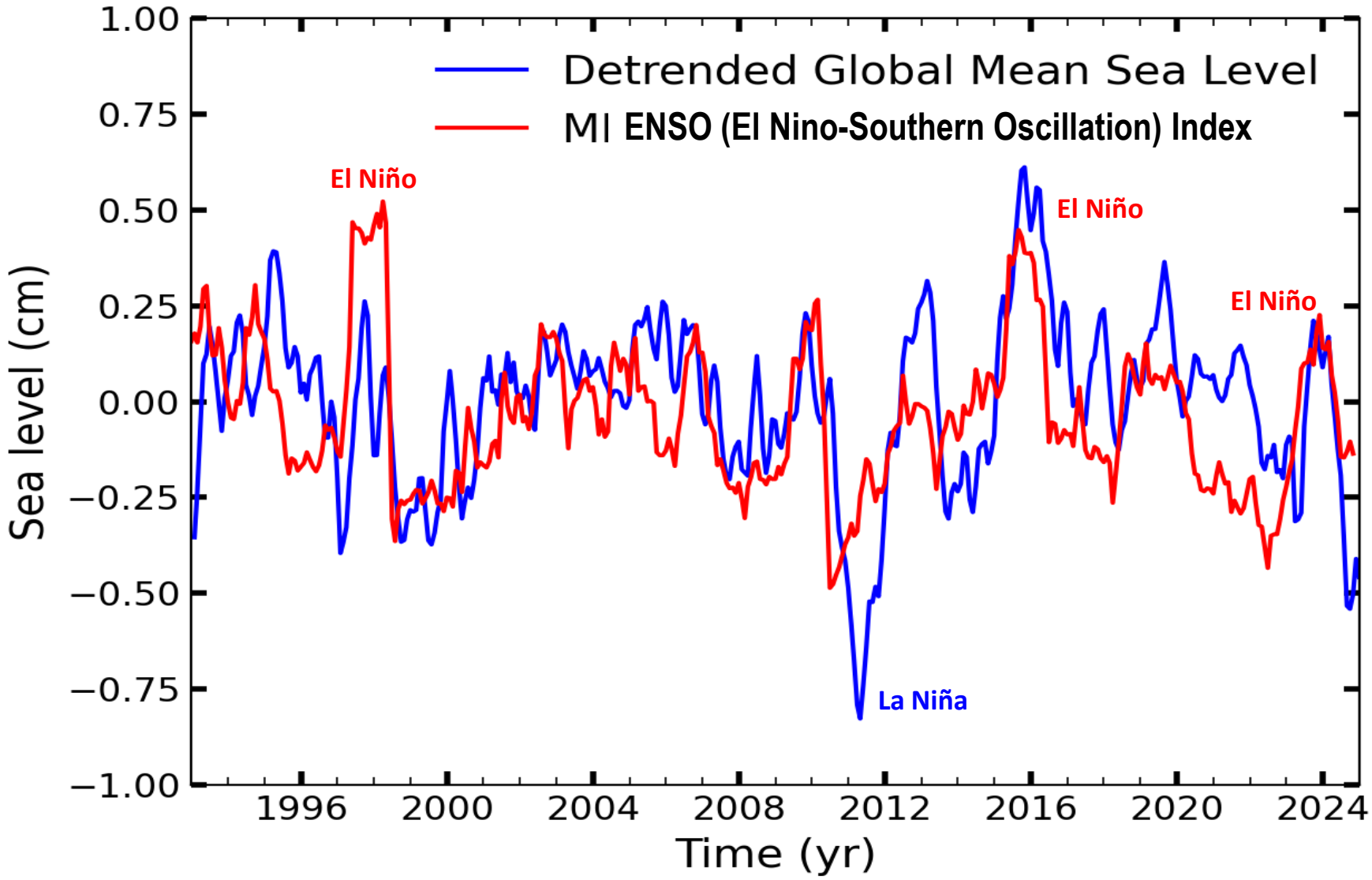
Variabilité interannuelle du niveau moyen global de la mer

Hausse du niveau moyen global de la mer (1 janvier 1993- 25 août 2026)

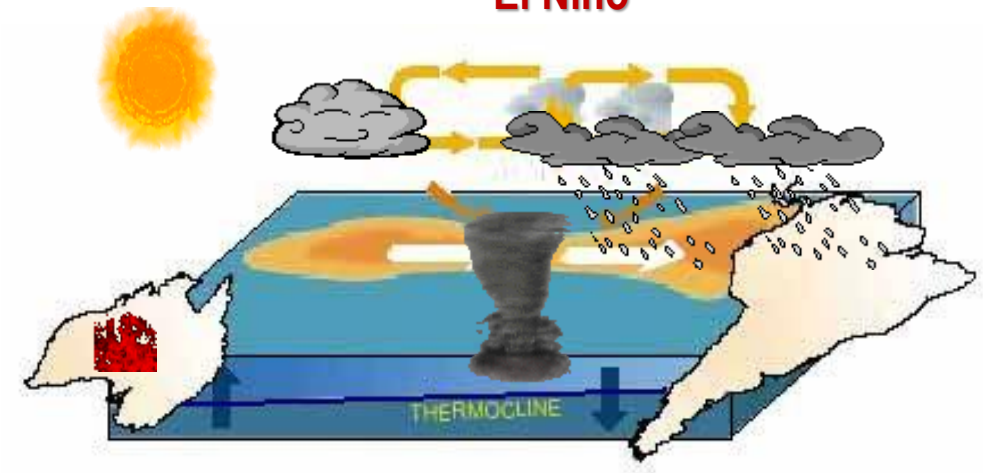


Source: AVISO & LEGOS

Variabilité interannuelle du niveau moyen global de la mer



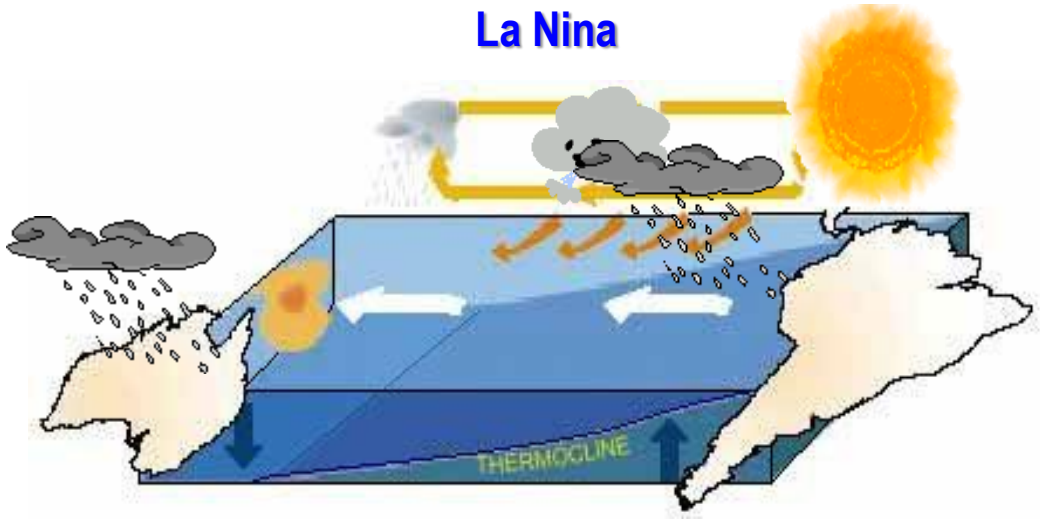
El Nino



El Niño

→ Précipitations intenses sur le Pacifique tropical
→ Déficit de précipitation sur les bassins tropicaux continentaux
→ Hausse de la mer

La Nina



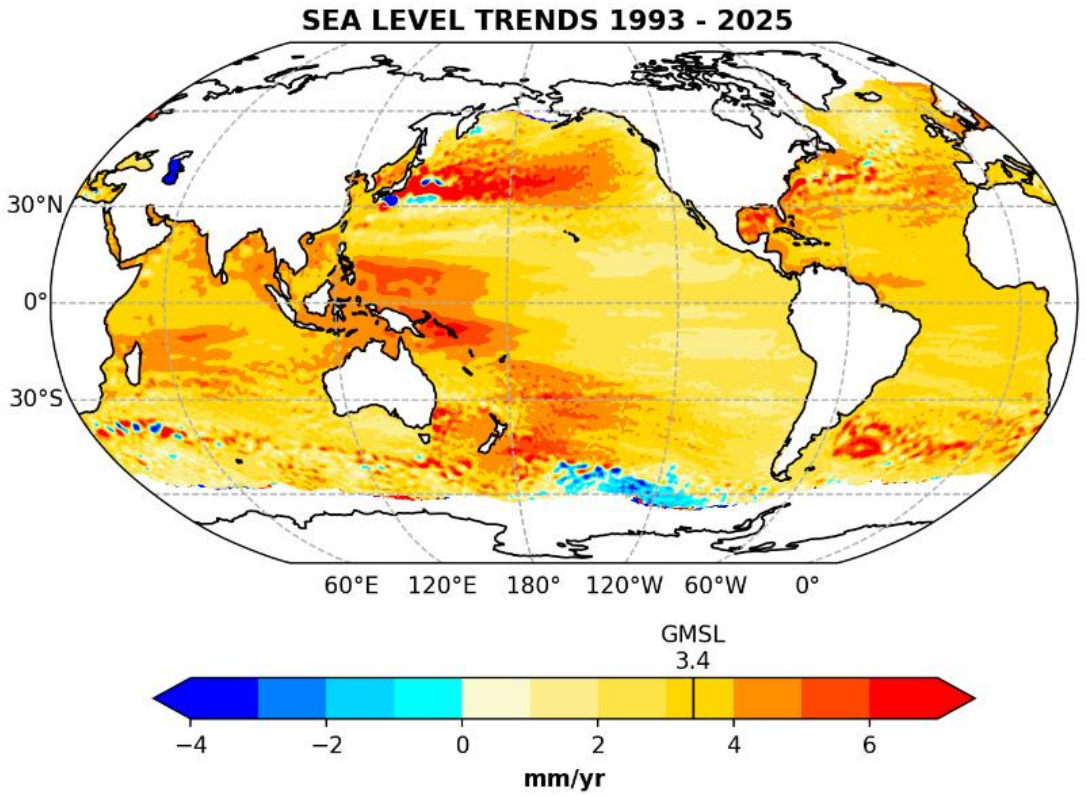
La Niña

→ Déficit de précipitations sur le Pacifique tropical
→ Précipitations intenses sur les bassins tropicaux continentaux
→ Baisse de la mer



Tendances régionales

Composantes des tendances régionales du niveau de la mer



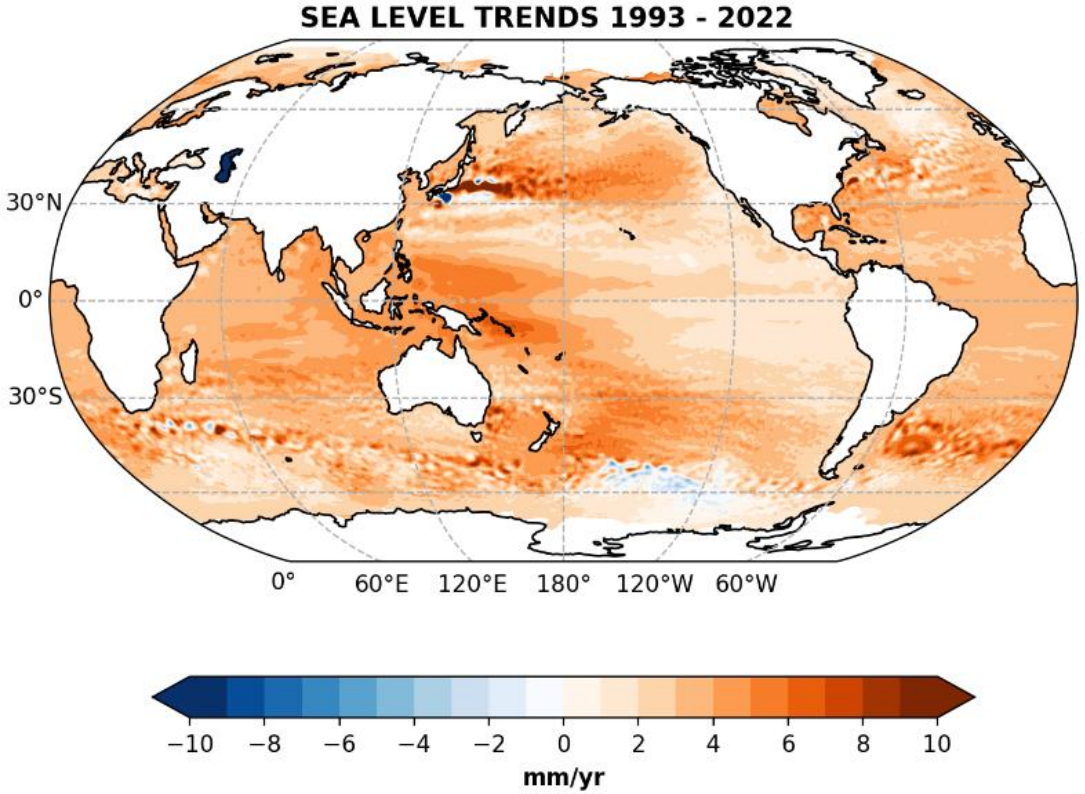
Variations régionales de l'expansion thermique

+

Variations régionales de la salinité

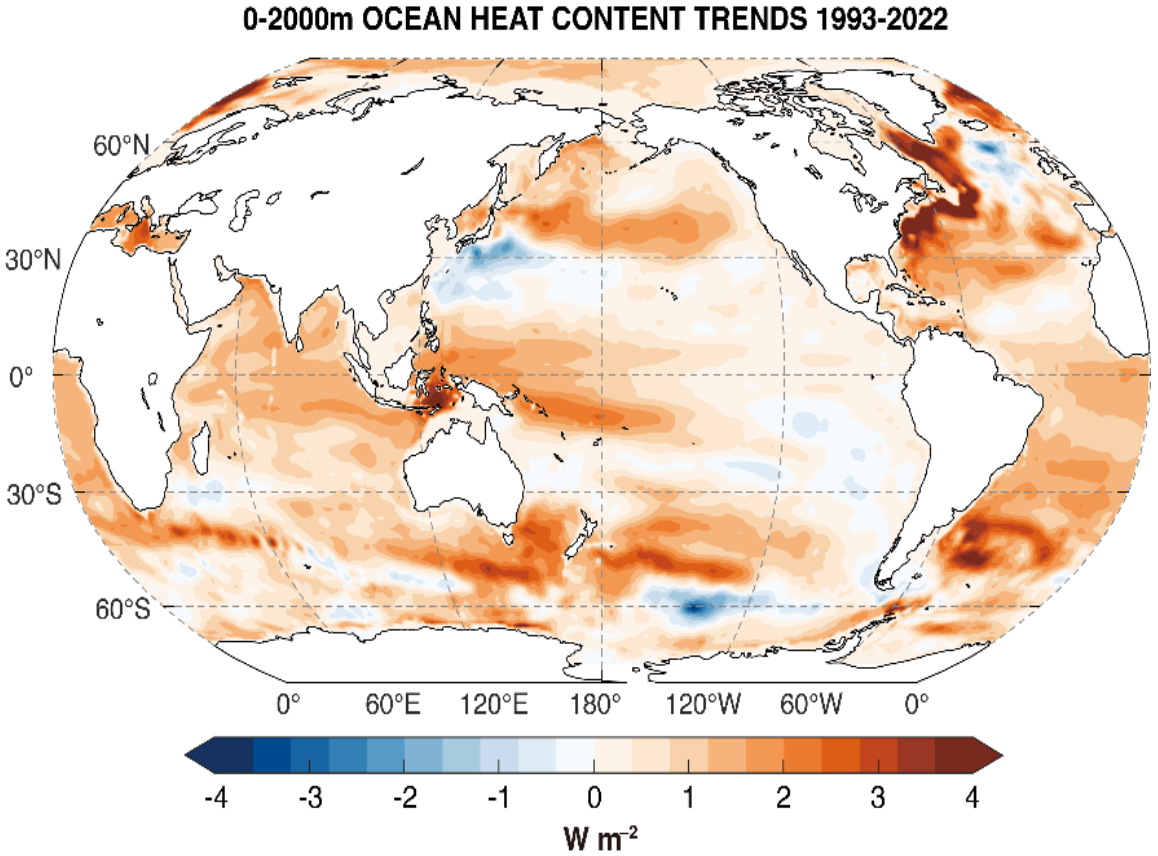
+

Redistribution des masses d'eau dans l'océan



Tendances régionales observées par altimétrie (1993-2022)

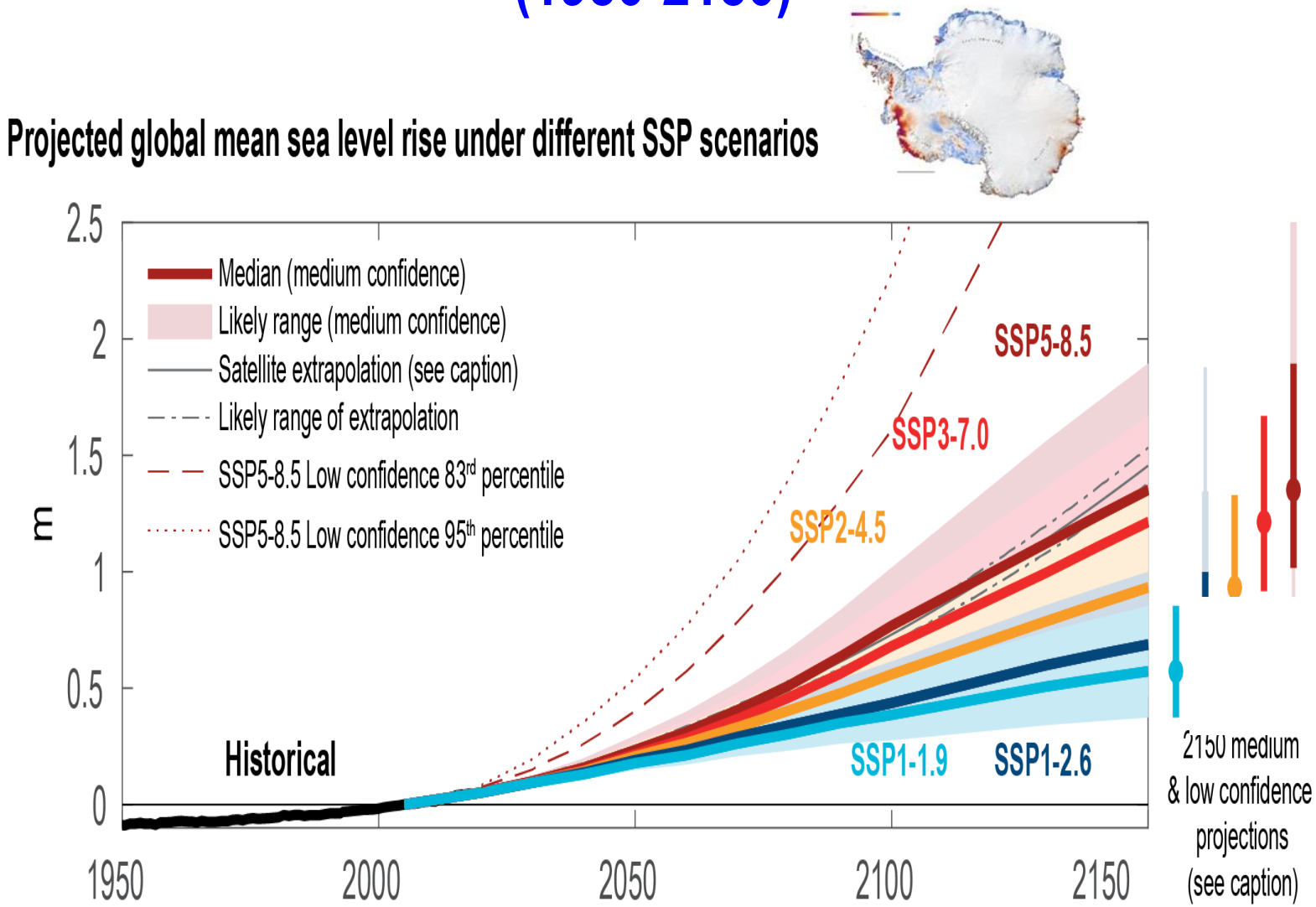
Tendances du contenu en chaleur dans l'océan (0-2000m) (1993-2022)





Projections de la hausse future de la mer

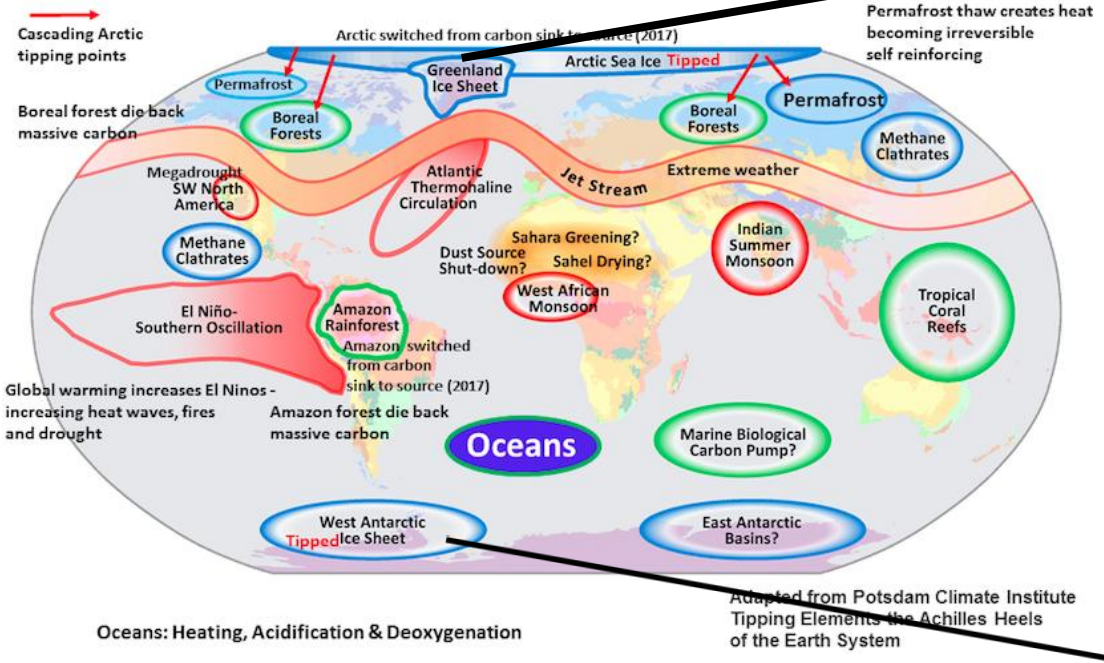
Observations et projections de la hausse de la mer (1950-2150)

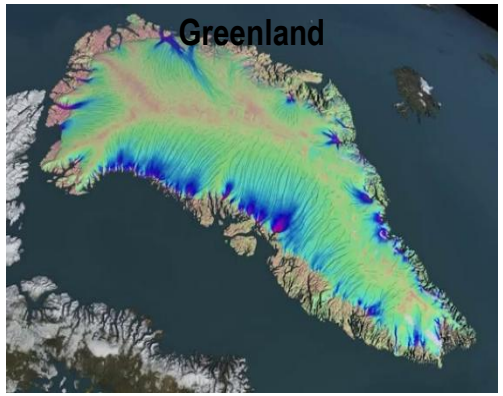


IPCC AR6, 2021

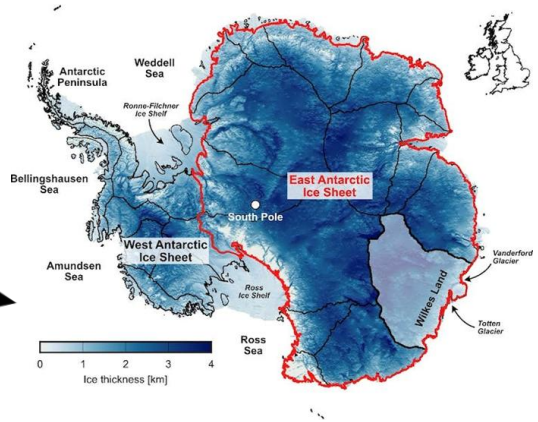
Eléments de bascule (*Tipping Points*) du système climatique

Deux éléments de bascule importants…





Groenland:
7 m d'équivalent niveau de la mer



Antarctique de l'ouest: 3-5 m d'équivalent niveau de la mer


La hausse de la mer à la côte

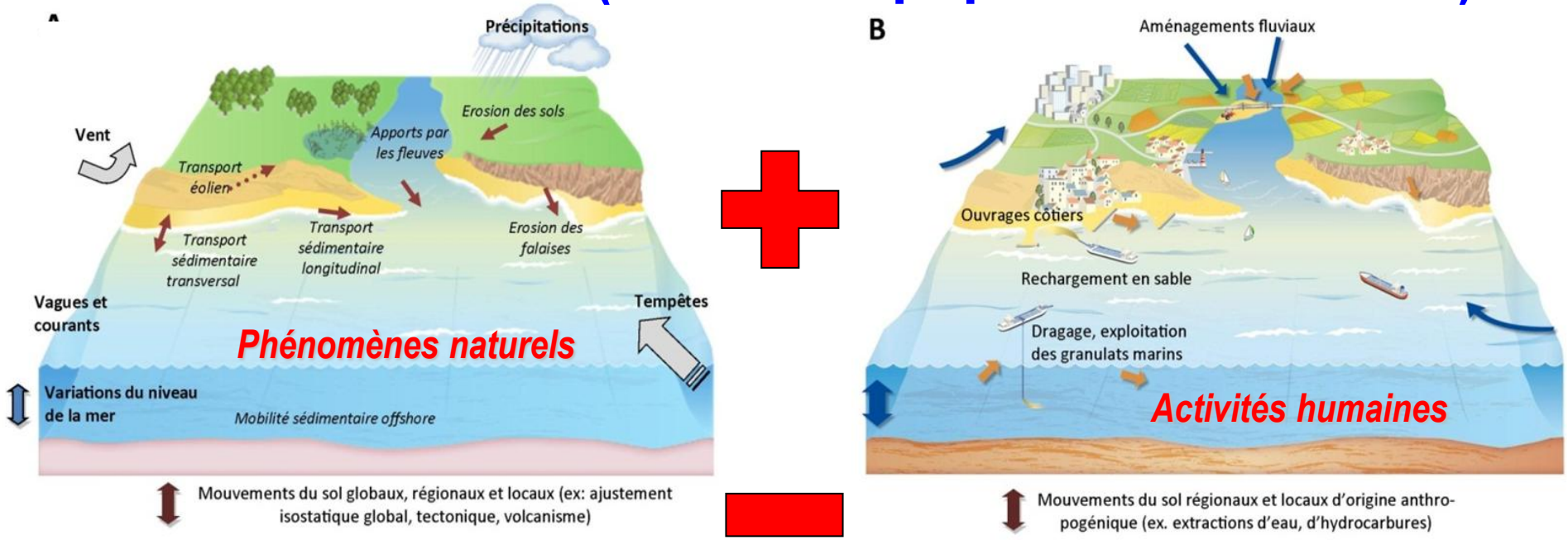
La hausse du niveau de la mer à la côte:

résulte de la superposition de la hausse moyenne globale + les tendances régionales + des phénomènes côtiers de petite échelle



Phénomènes locaux:
Courants côtiers, vagues, apport d'eau douce dans les estuaires, changement morphologie de la côte, ….

Zones Côtières (10% de la population mondiale)



Impacts multiples

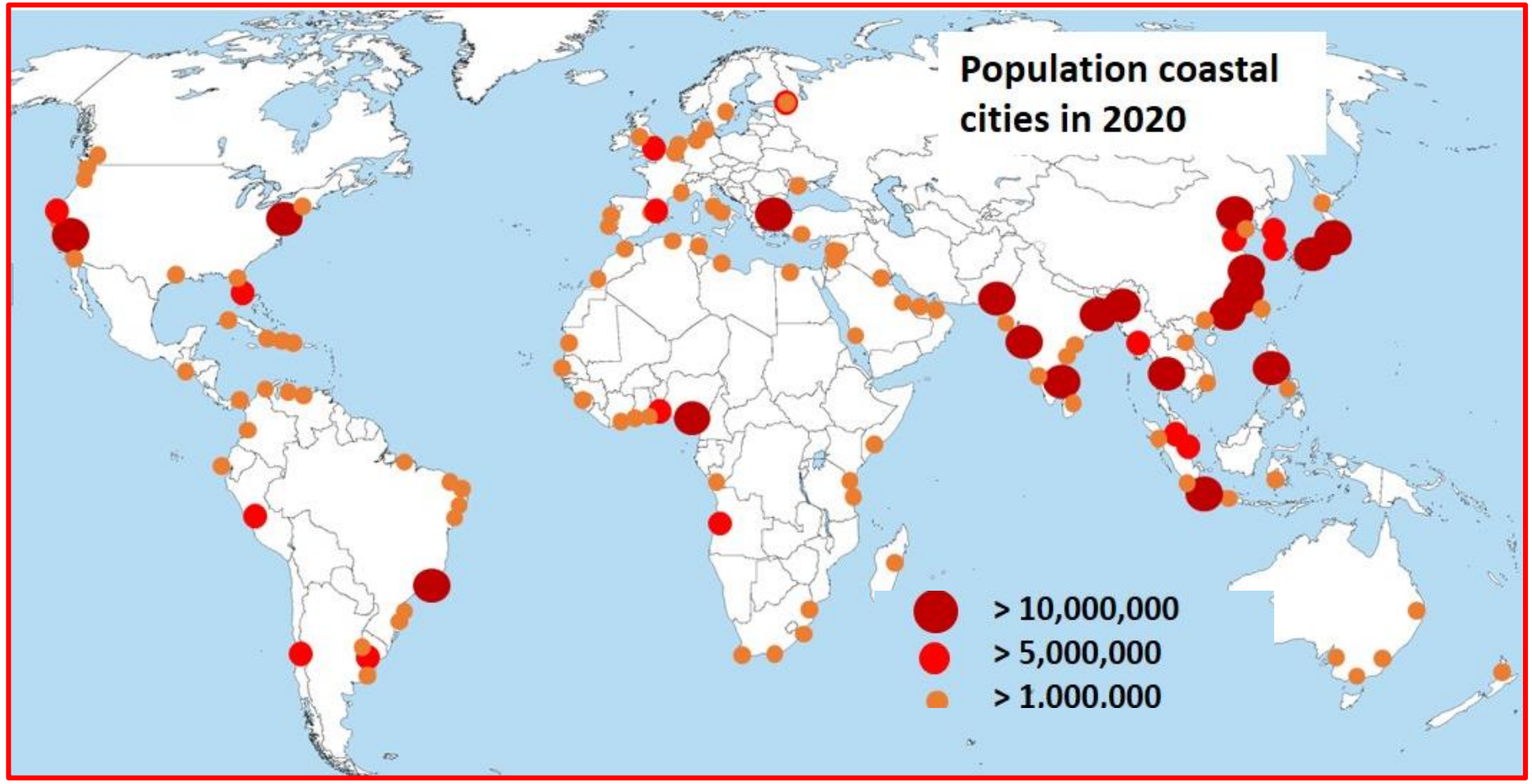
Phénomènes affectant les zones côtières

- Hausse de la mer
- Tempêtes, cyclones
- Aménagements côtiers
- Dragage de sable
- Diminution des apports en sédiments par les fleuves
- Enfoncement du sol

Impacts côtiers

- Inondations temporaires et permanentes
- Erosion du littoral et recul
- Modification des stocks de sédiments
- Changements de la morphologie des estuaires
- Destruction des écosystèmes côtiers
- Salinisation des terres agricoles et des aquifères côtiers, etc……..

Population des mégapoles côtières en 2020



Barragan & de Andres, 2015

Mesure des variations du niveau de la mer à la côte

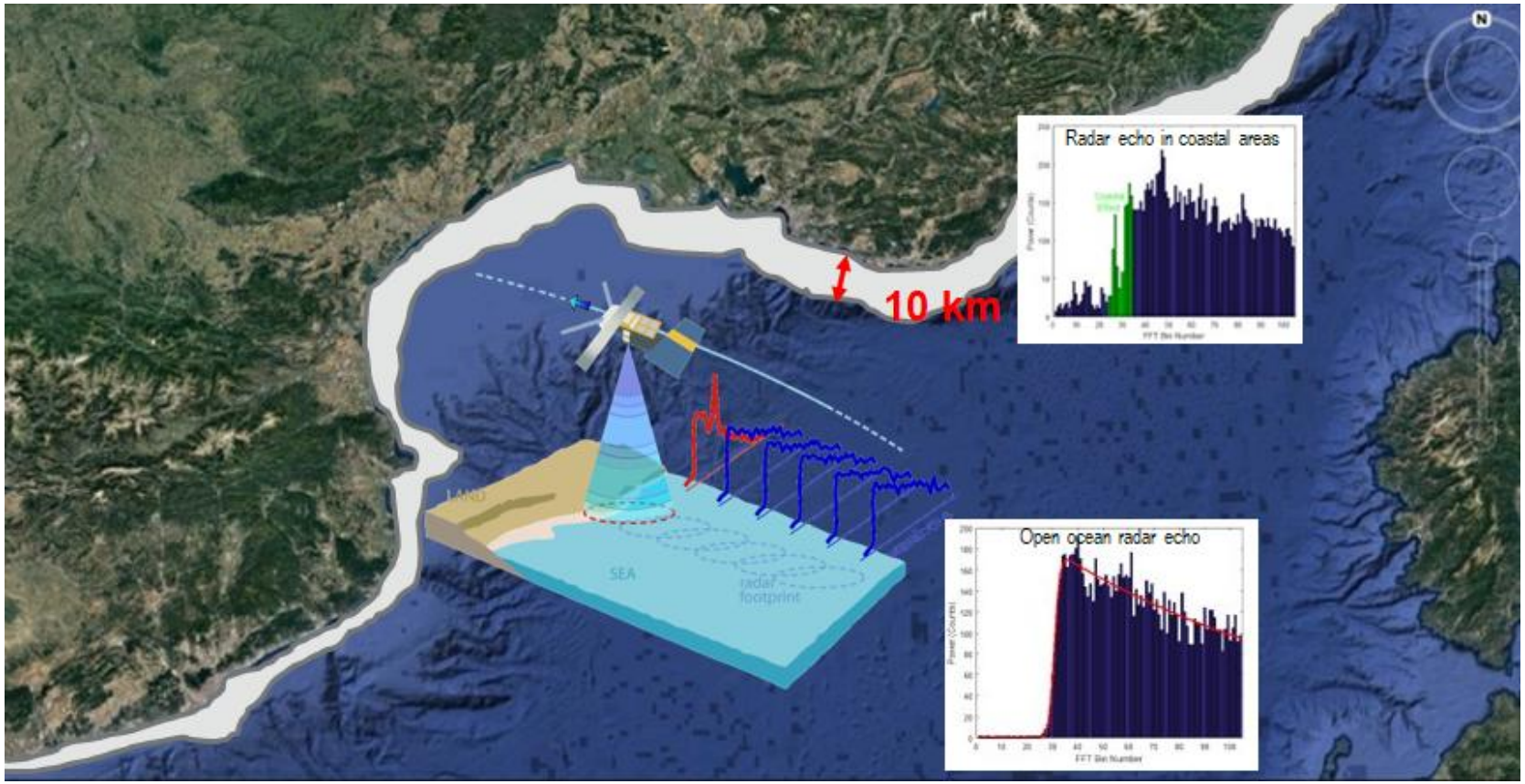
- **Altimetrie spatiale: mesures 'absolues' dans un repère géocentrique; informe sur les variations 'climatiques' –échelles interannuelles à multi-décennales-**

- **Marégraphie: mesures 'relatives' ; informe sur l'effet combiné des variations 'climatiques' de la mer et des mouvements verticaux de la croûte terrestre;**

C'est l'information utile pour les études d'impact et pour l'adaptation

→ ***Avantages et inconvénients de chaque technique***

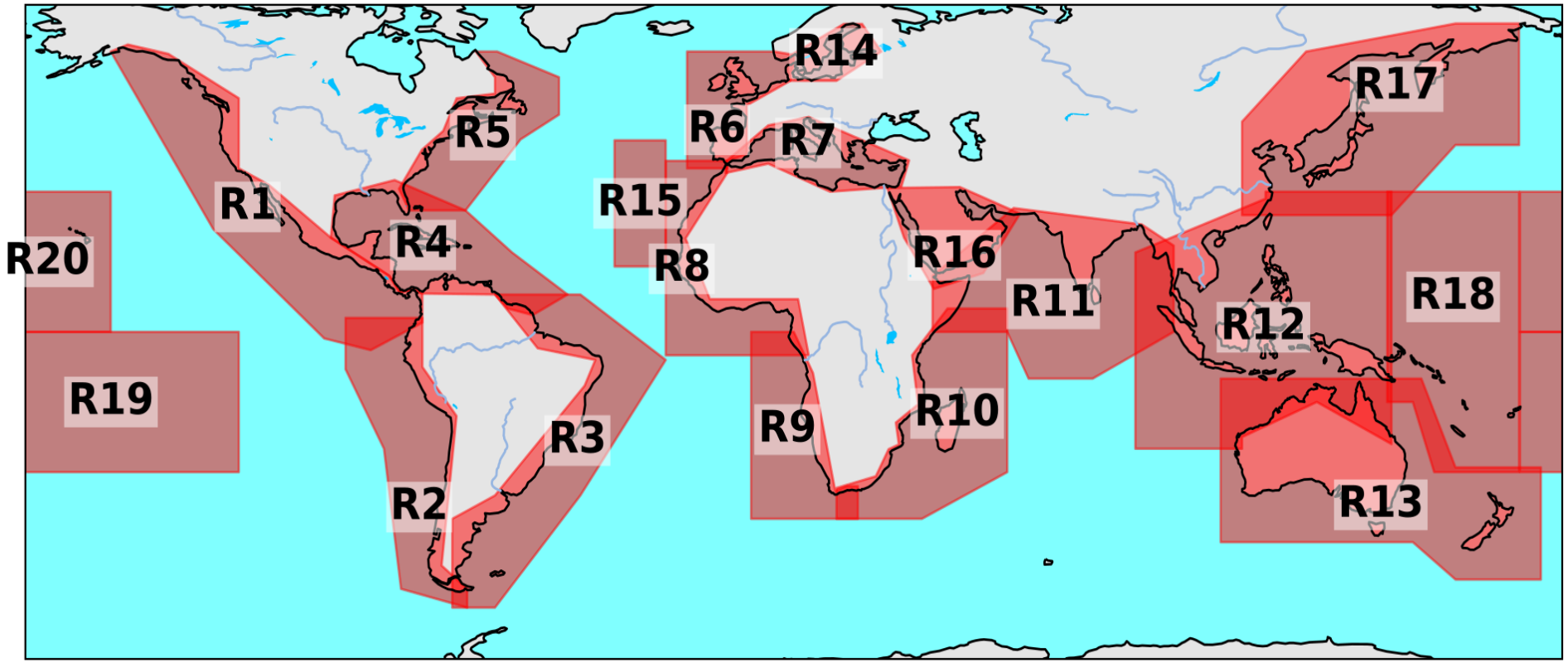
L'altimétrie spatiale a été optimisée pour étudier l'océan du large
Autour des côtes, les mesures sont de mauvaise qualité



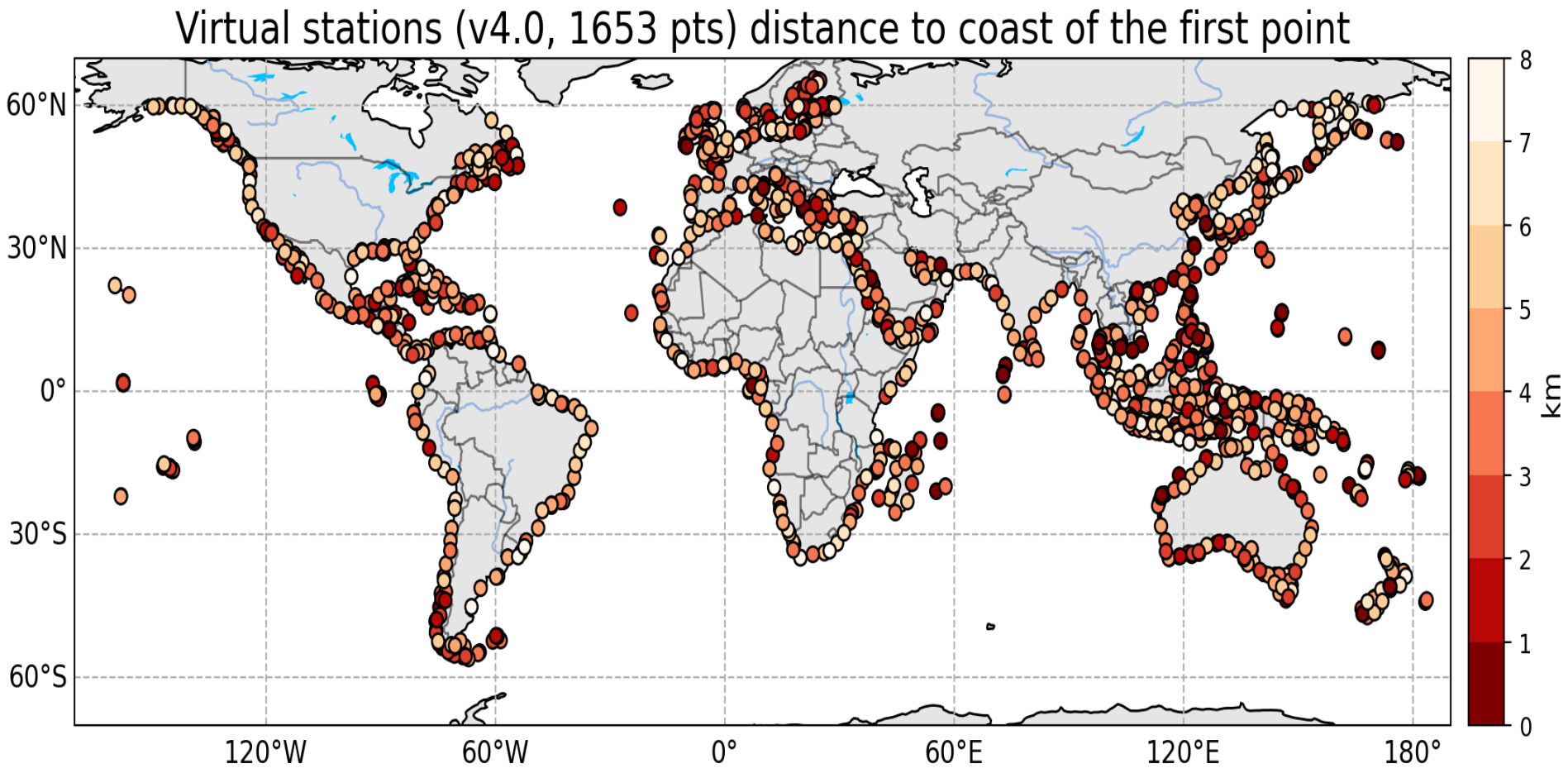
Mais des retraitements adaptés permettent à présent de mesurer les variations du niveau de la mer près de la côte

ESA Climate Change Initiative coastal sea level project (en cours)

Reprocessing of along-track data from the Jason altimetry missions (retracking of radar waveforms with the ALES retracker, Passaro et al., 2014 + improvement of the geophysical corrections at the coast); Missions reprocessed: Jason 1, 2, 3, Sentinel 6; Resolution : 20 Hz along track (350 m); Temporal coverage: January 2002 to June 2025: 24 years



Réseau de stations ‘virtuelles’ d’altimétrie côtière (1653 stations)

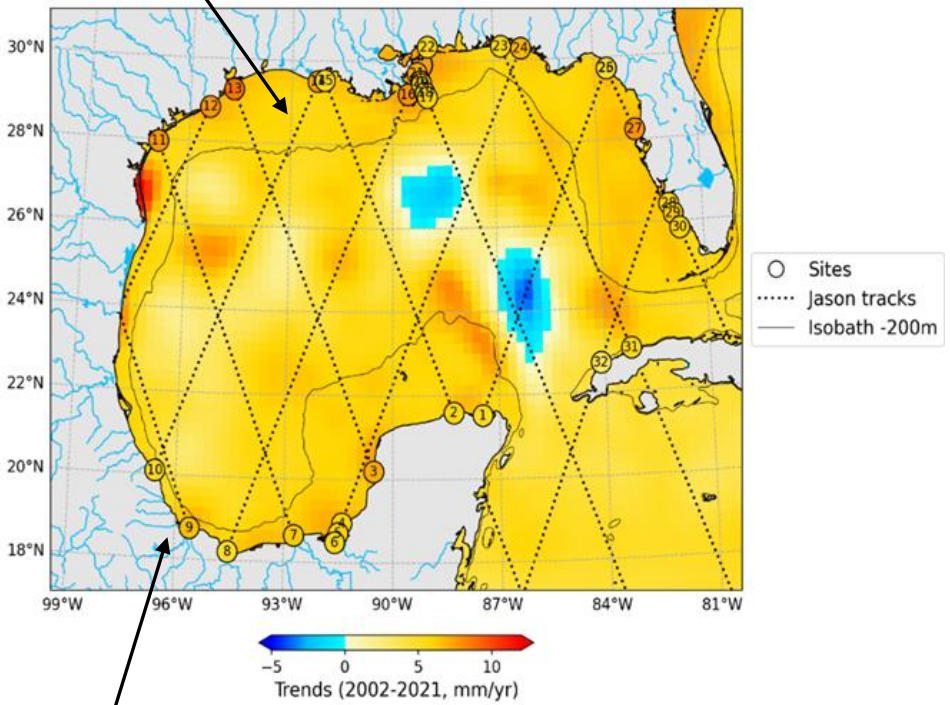


ESA CCI Coastal Sea Level Project

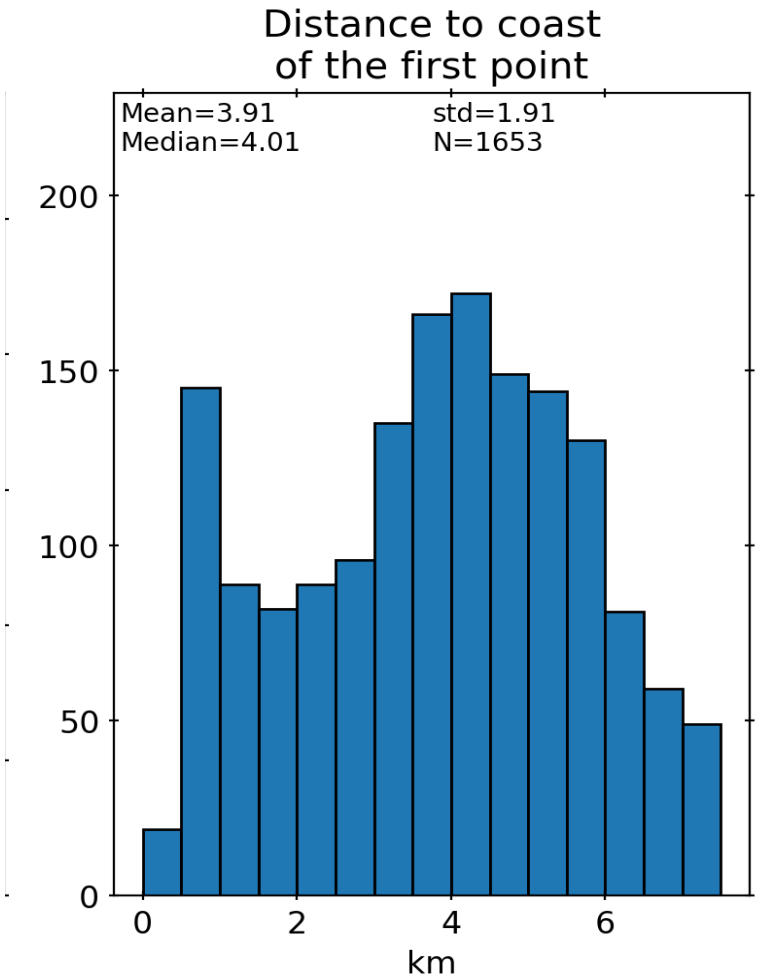
Source: LEGOS

Altimétrie côtière

Trace ‘satellite’



station ‘virtuelle’



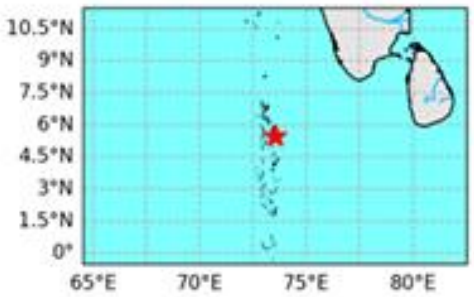
Histogramme des distances à la côte des stations virtuelles

Dernière version, septembre 2026

LEGOS

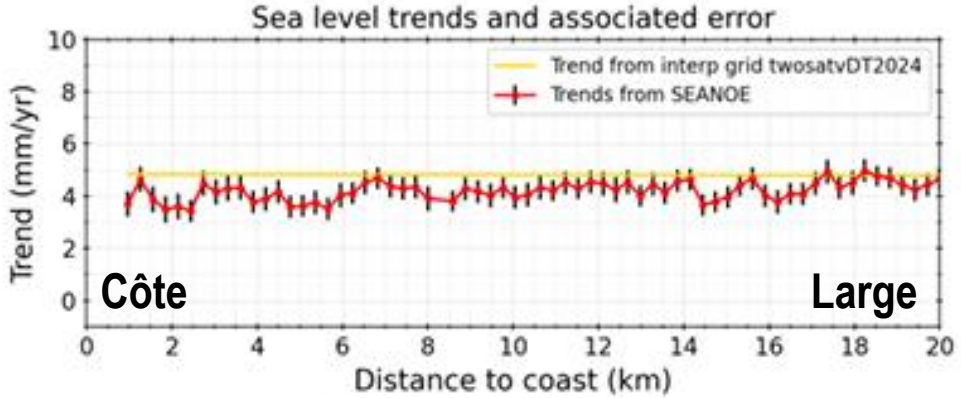
Altimétrie côtière: exemple de produit

Îles Maldives

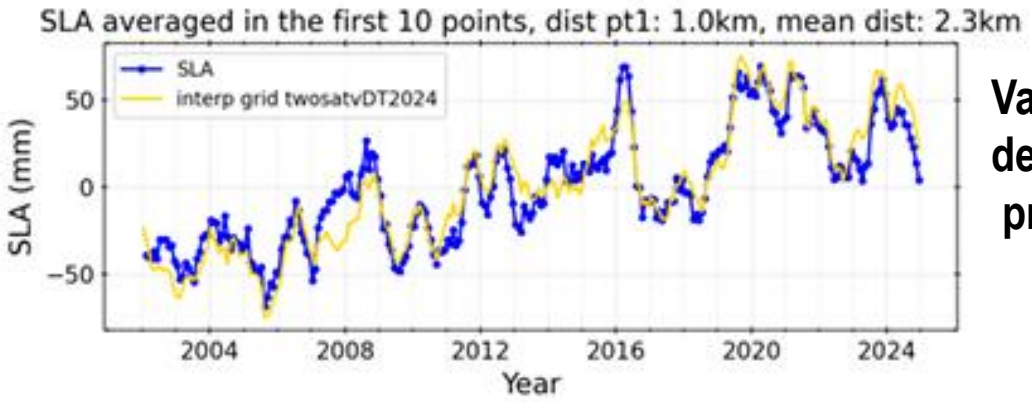




Malé



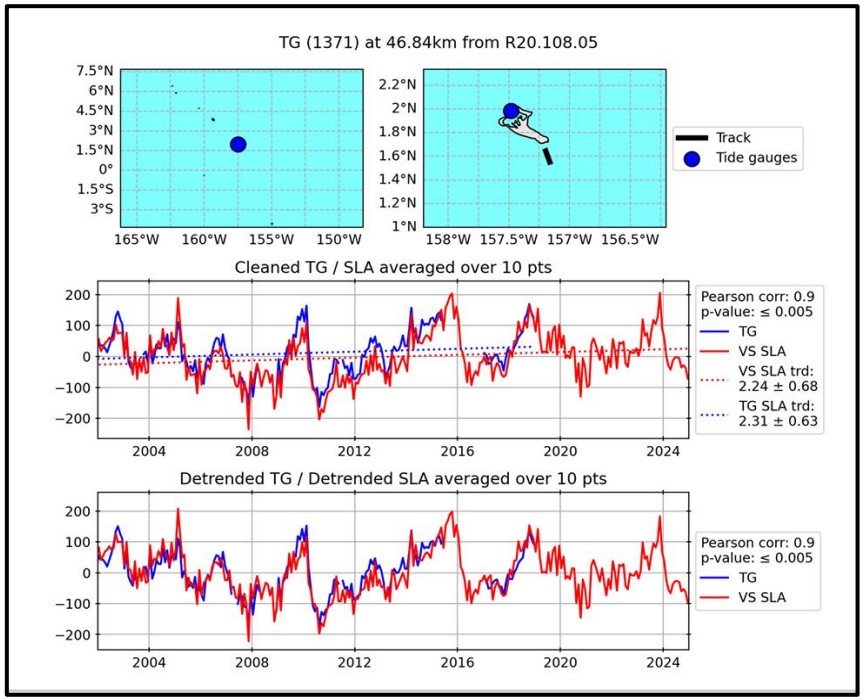
Tendance (mm/an)
(2001-2025)



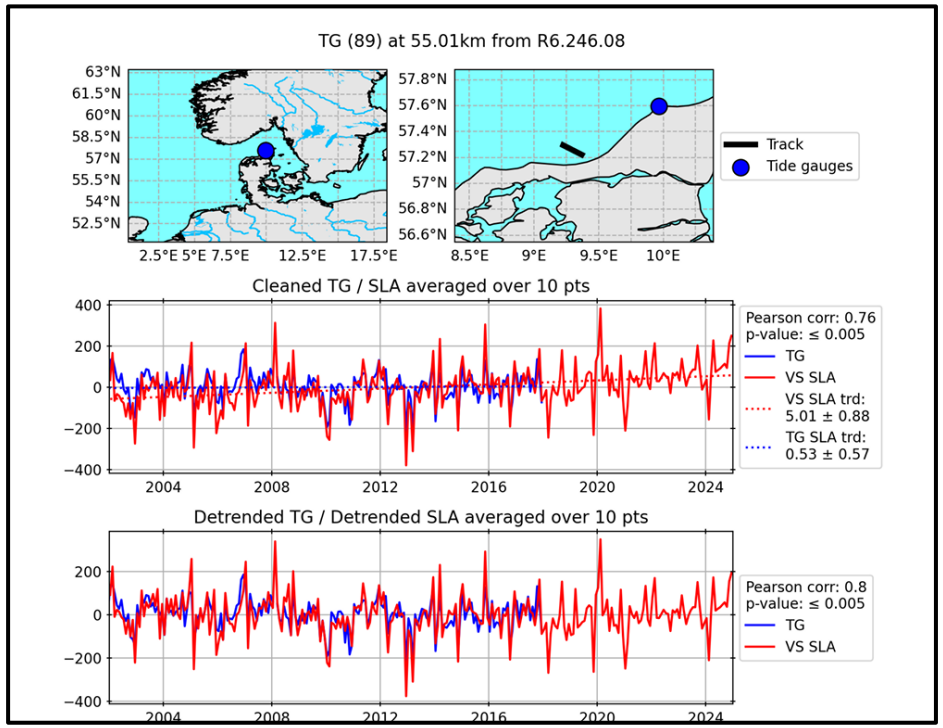
Variation du niveau de la mer au plus près de la côte
(2001-2025)

Comparaison avec les données marégraphiques

Iles Kiribati
Pacifique tropical ouest

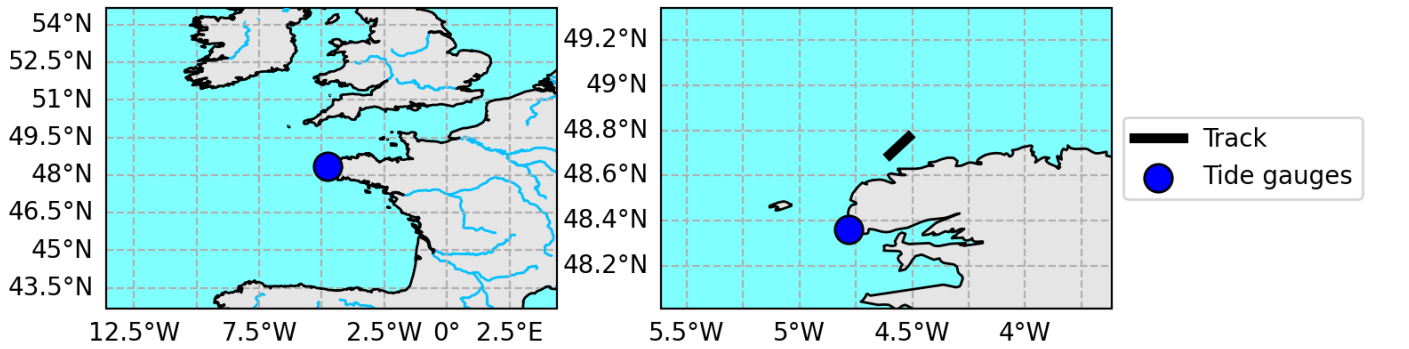


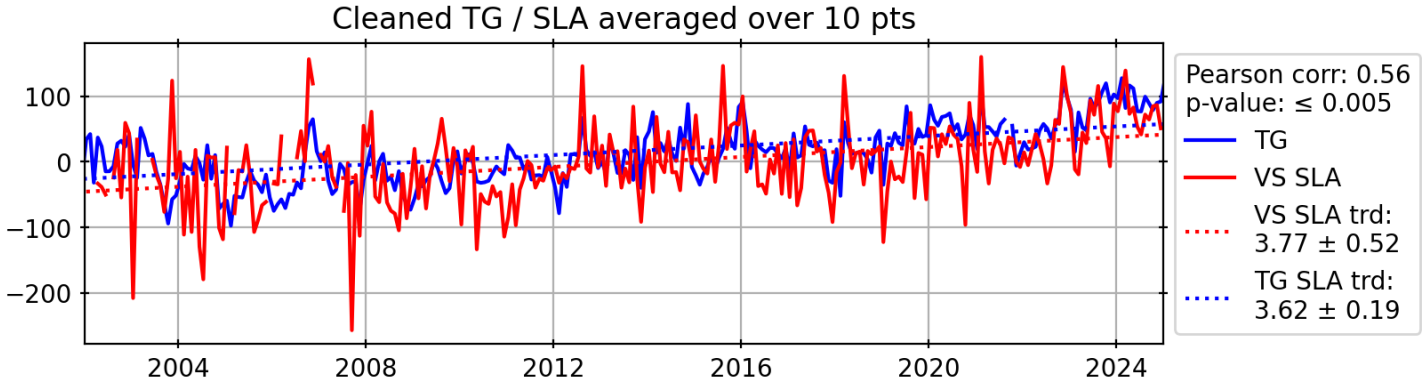
Danemark
Mer du Nord

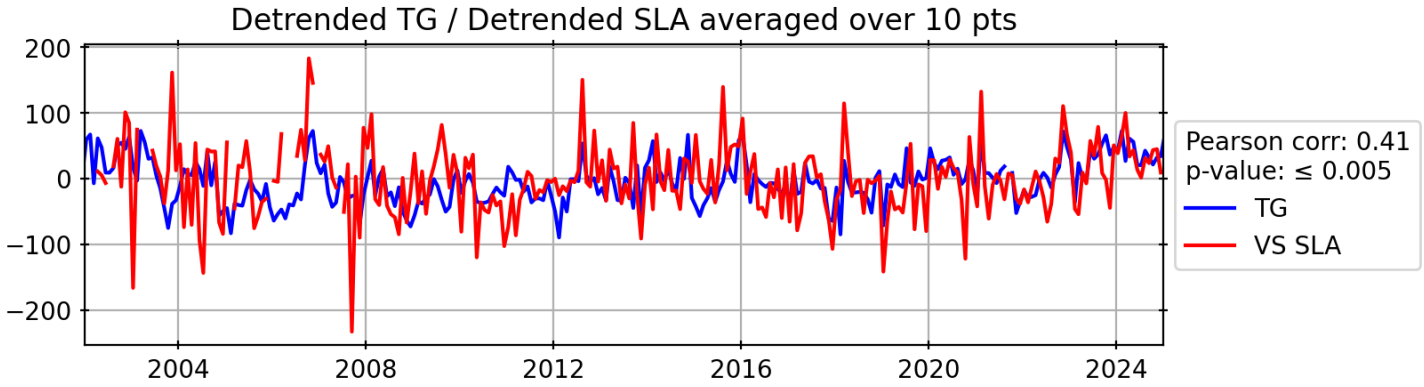


Le Conquet, Bretagne

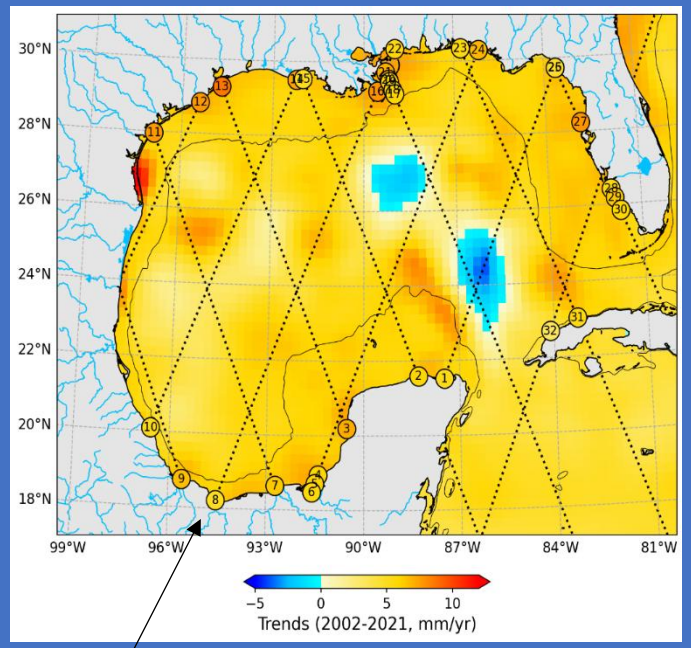
TG (1294) at 37.32km from R6.061.06





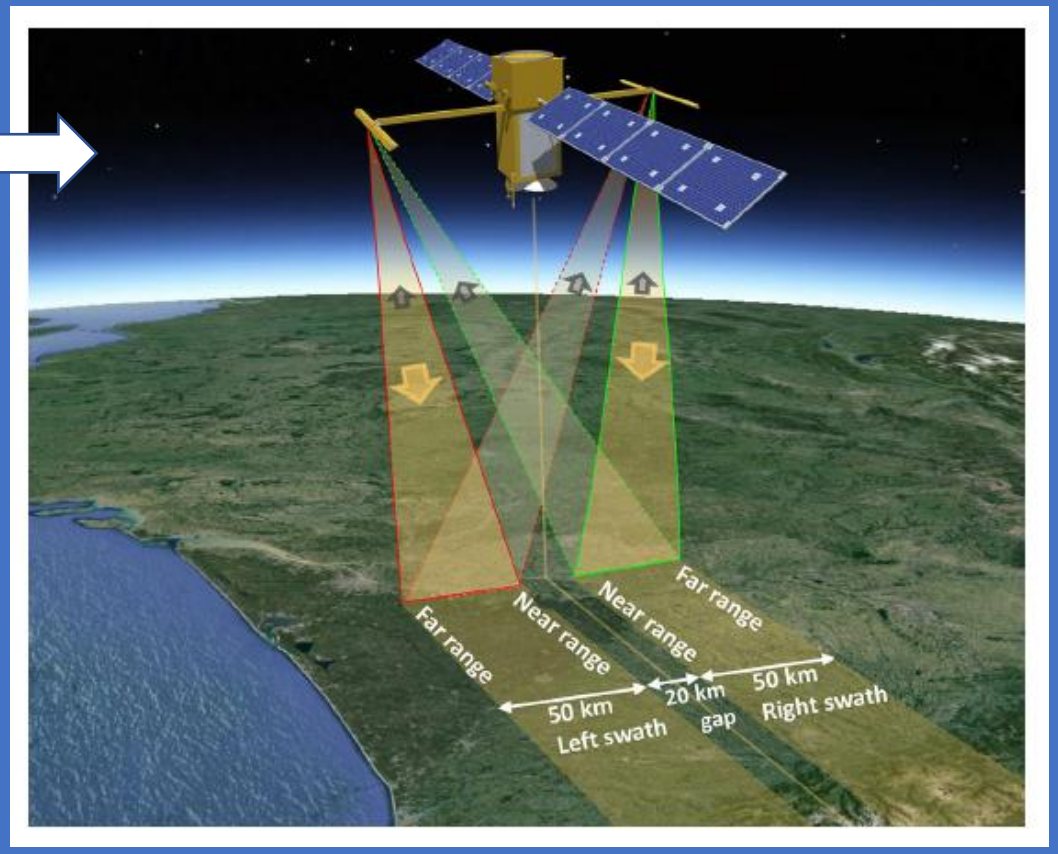


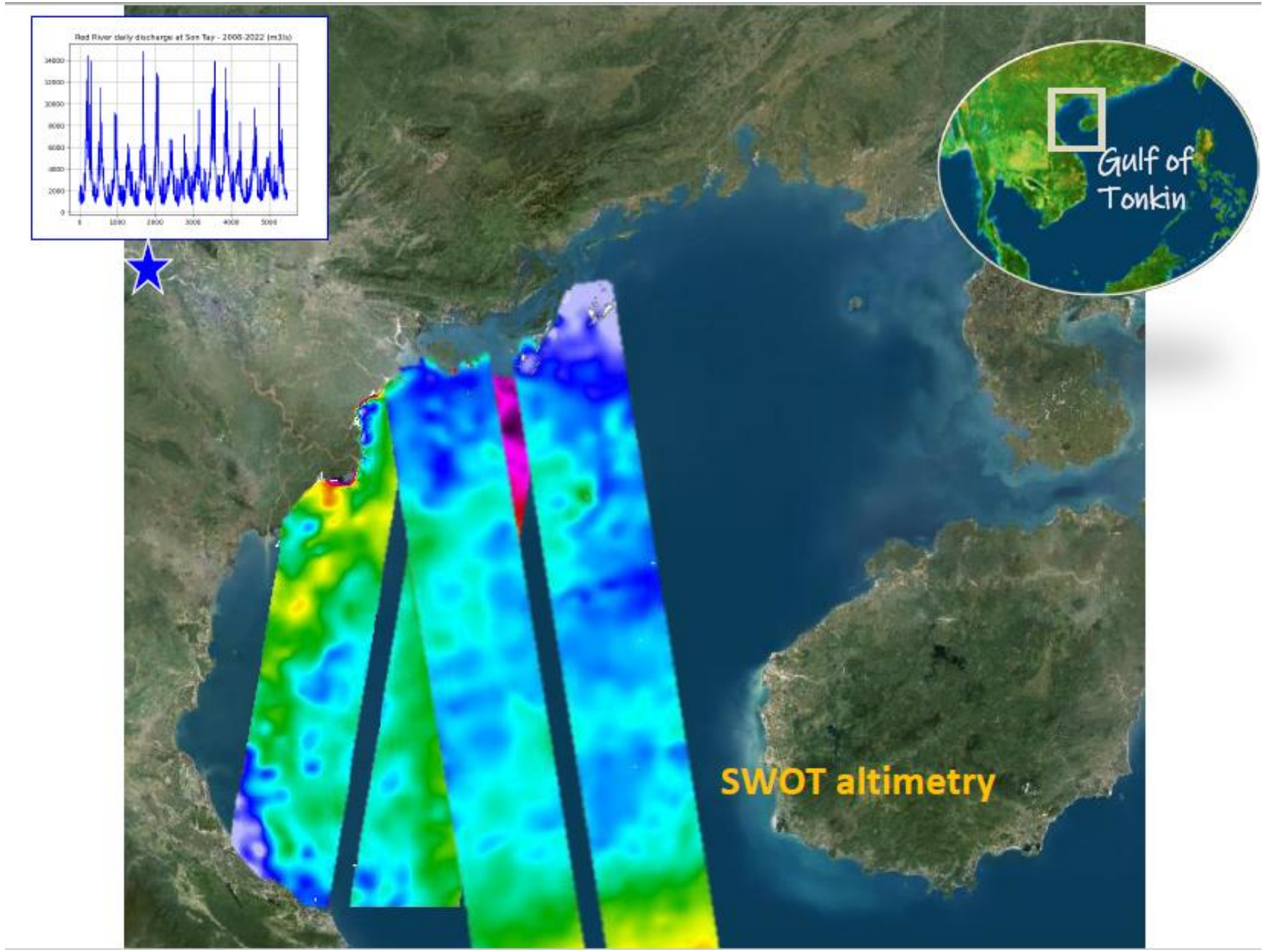
Altimétrie ‘nadir’



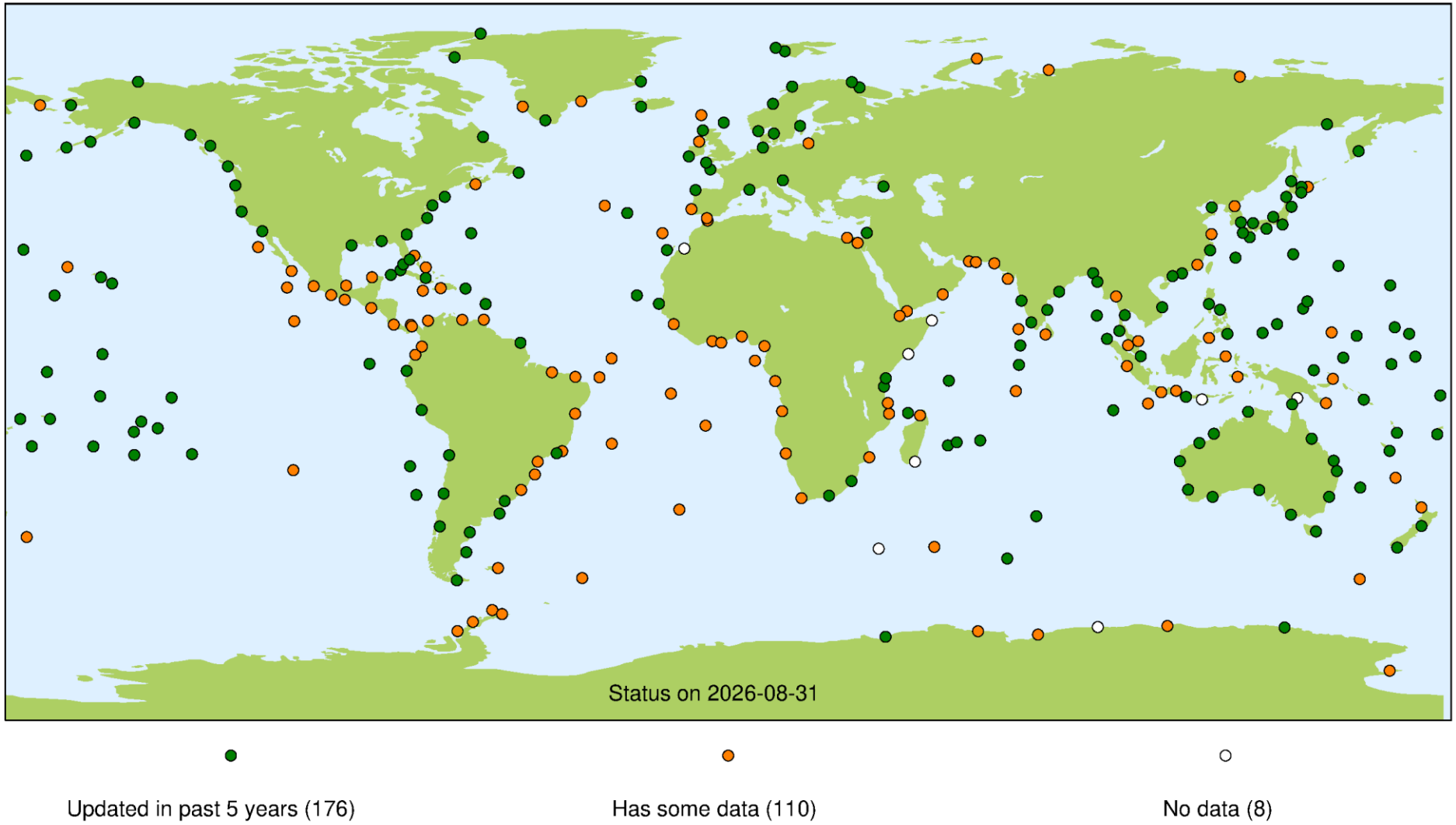
Trace satellite
et station virtuelle

Mission SWOT
« Surface Waters-Ocean Topography »
NASA-CNES (lancée le 16 décembre 2022)




Red River daily discharge at Son Tay - 2008-2022 (m3/s)
Gulf of Tonkin
SWOT altimetry

Les données marégraphiques



Réseau marégraphique PSMSL (Etat au 31 août 2026)

Avantage de la marégraphie: mesure non seulement les variations 'climatiques' de la mer mais aussi les mouvements verticaux du sol

C'est l'information utile pour étudier les impacts et s'adapter

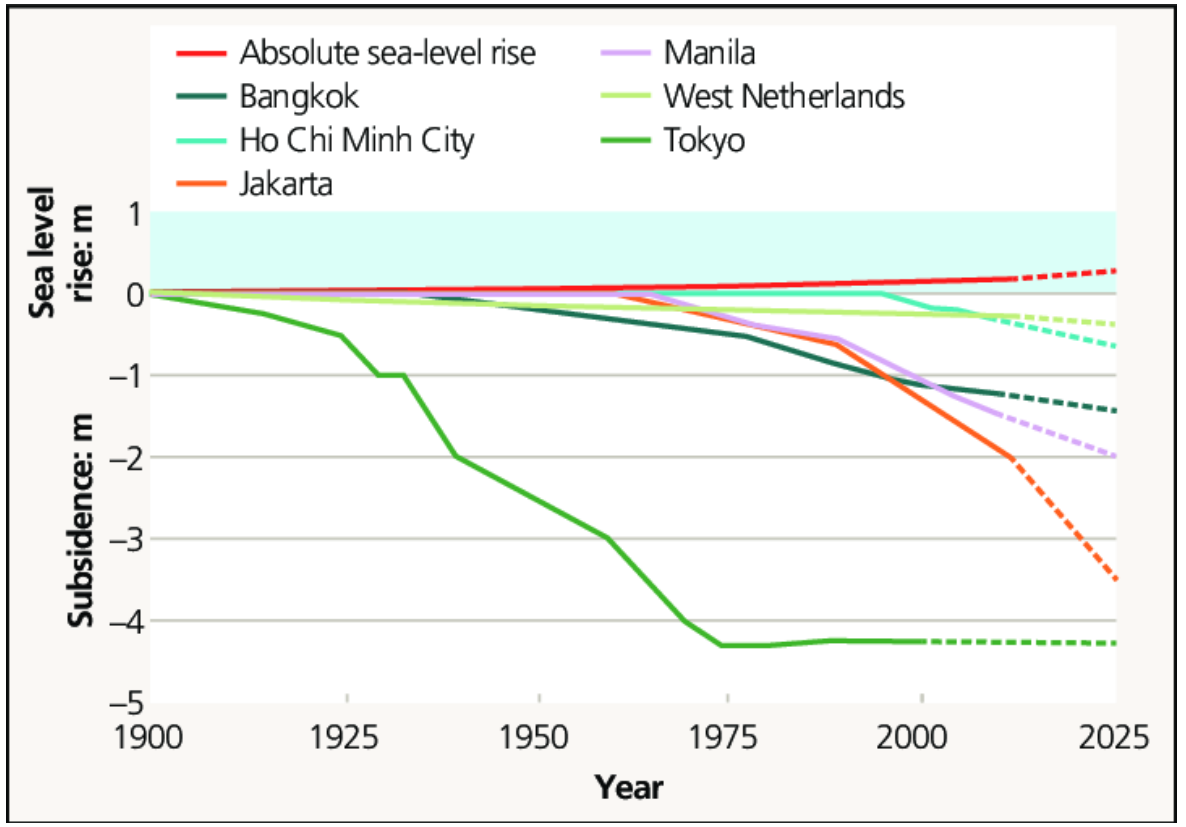
Subsidence du sol en région côtière

→ Amplifie la hausse de la mer 'climatique'

Subsidence du sol due aux activités humaines

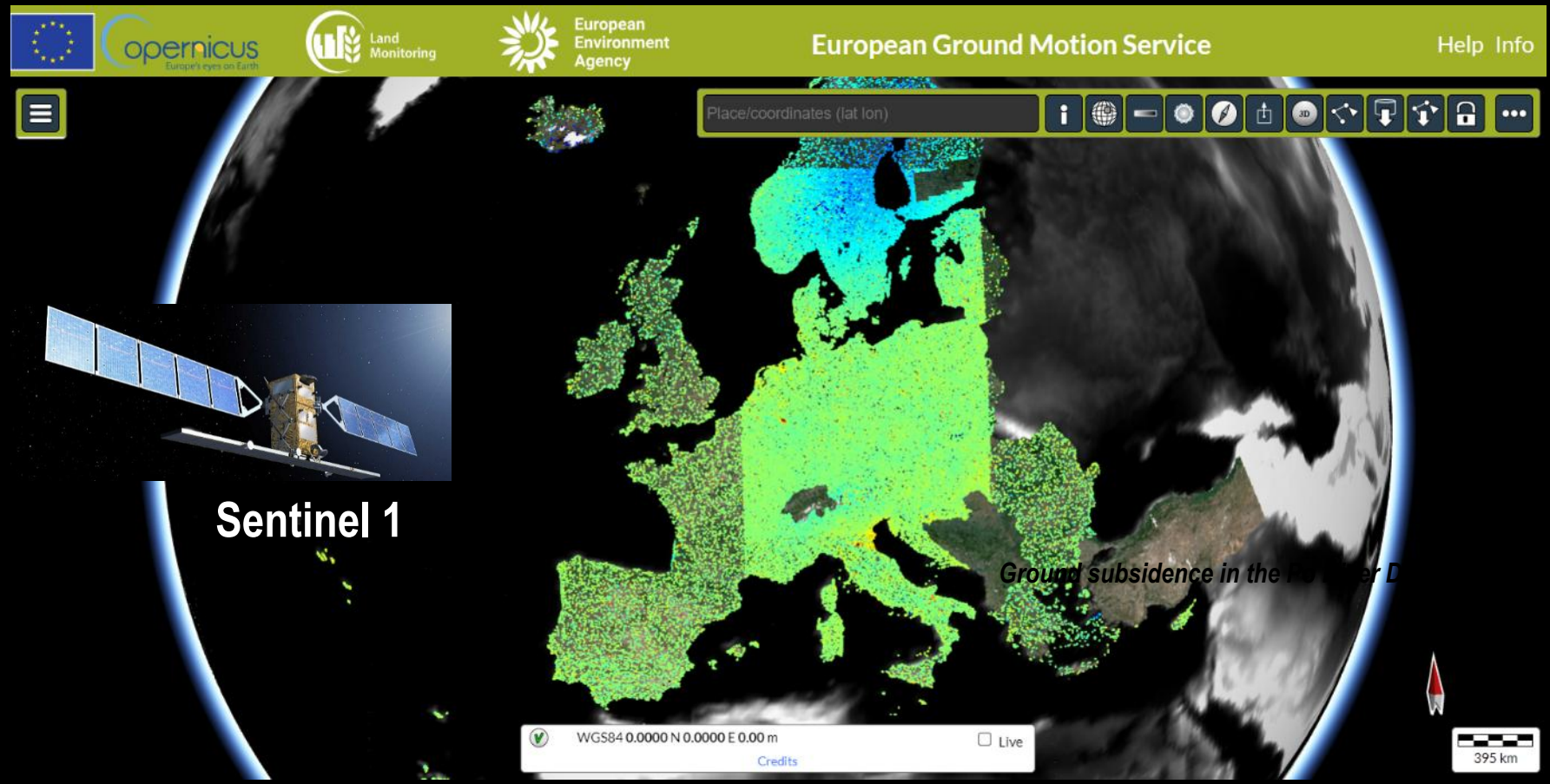


Jakarta (Indonésie) : subsidence → 20 cm/an au cours des dernières décennies due au pompage de l'eau dans les aquifères



Source: Deltares

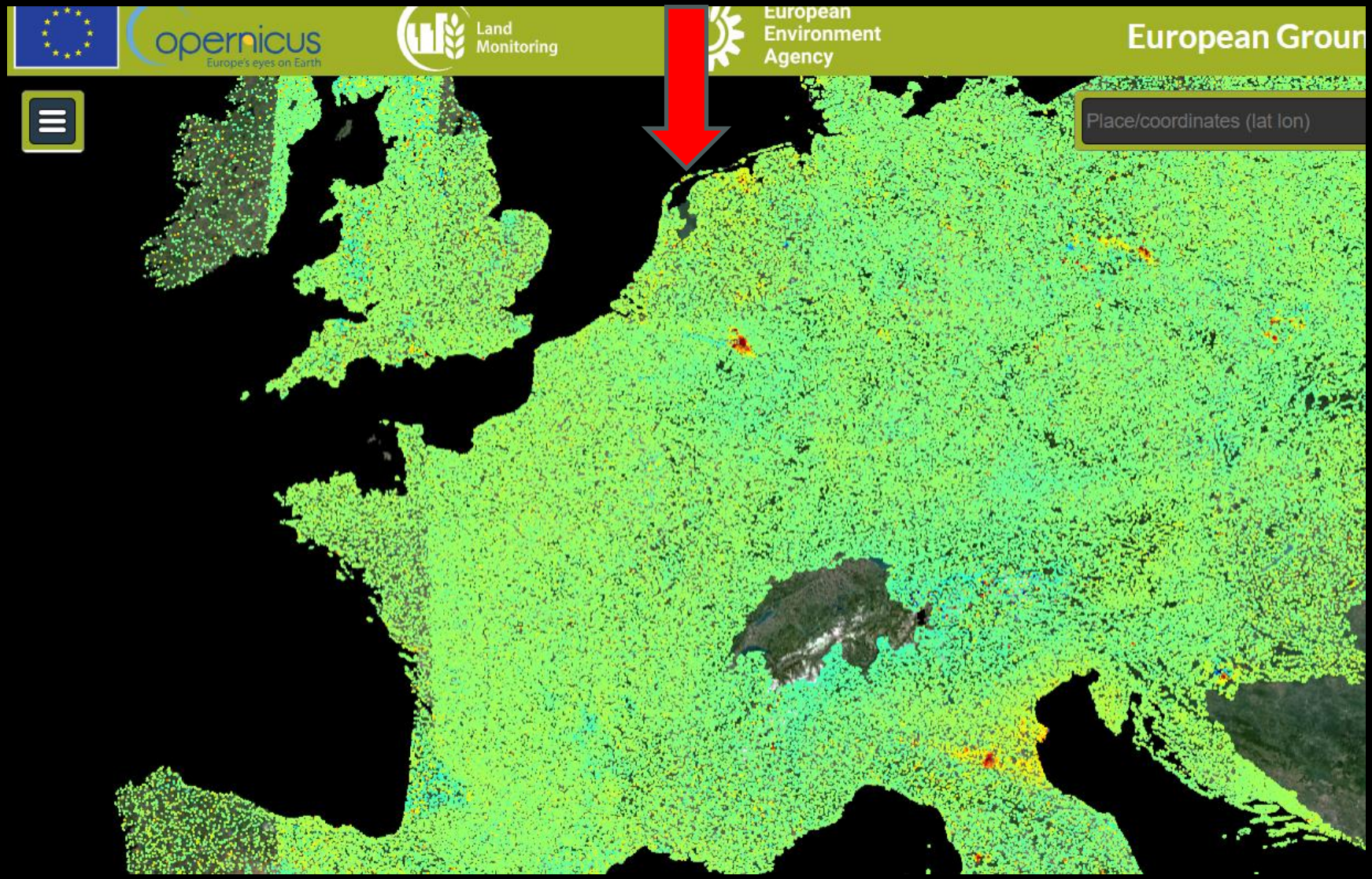
Mesure des mouvements verticaux par interférométrie radar sur Sentinel 1



European Ground Motion Service from COPERNICUS
→Vertical ground motions since 2015 over the whole European region based on InSAR on Sentinel-1, with 100 m resolution
Thieblemont et al., 2024

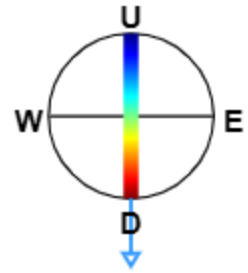
https://land.copernicus.eu

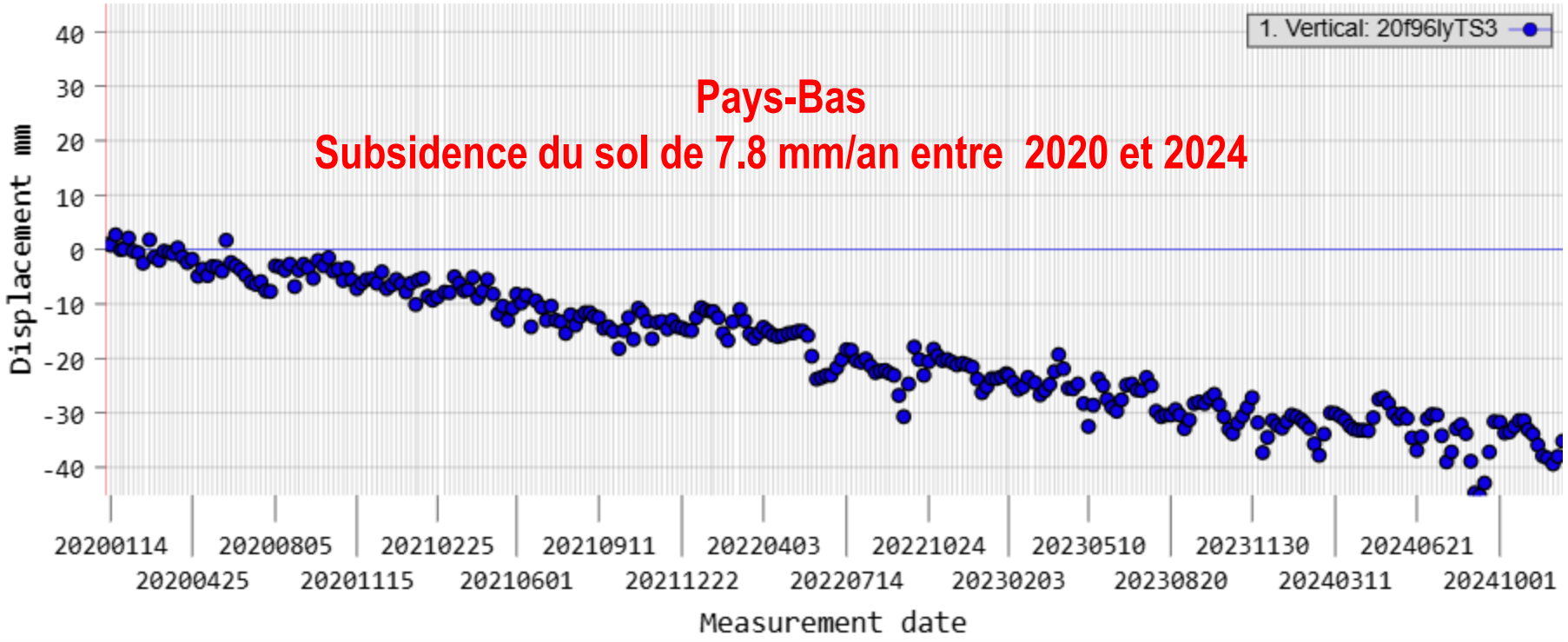
Mesure des mouvements verticaux par interférométrie radar sur Sentinel 1



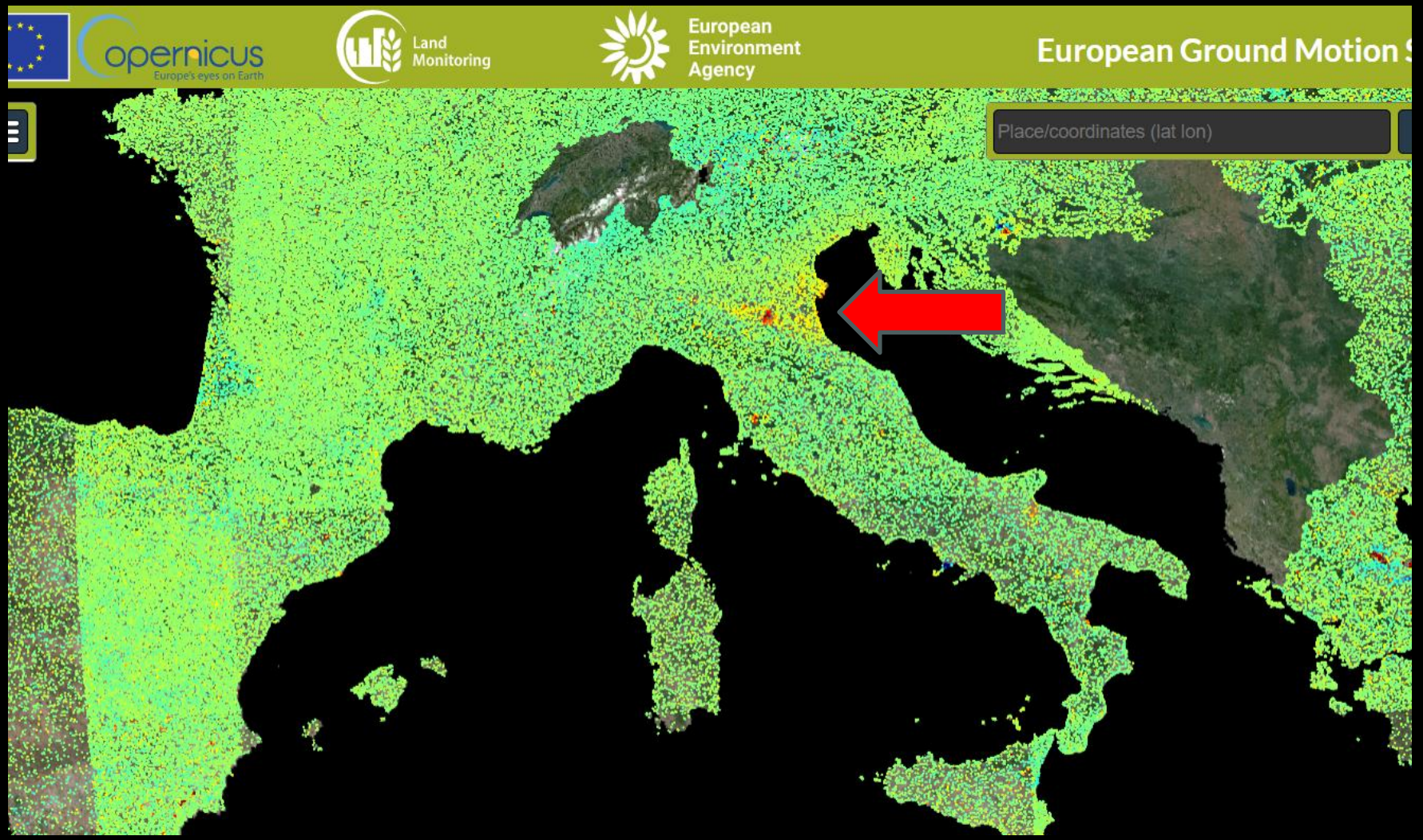
Dataset: Vertical
Point ID: 20f96lyTS3
Position: 3373850.00 N 4001550.00 E -1.00 m
Mean velocity: -7.80 mm/year
RMSE: 2.50 mm

Incidence angle: 0.00°



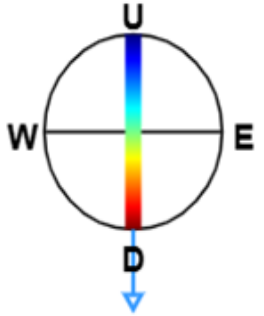


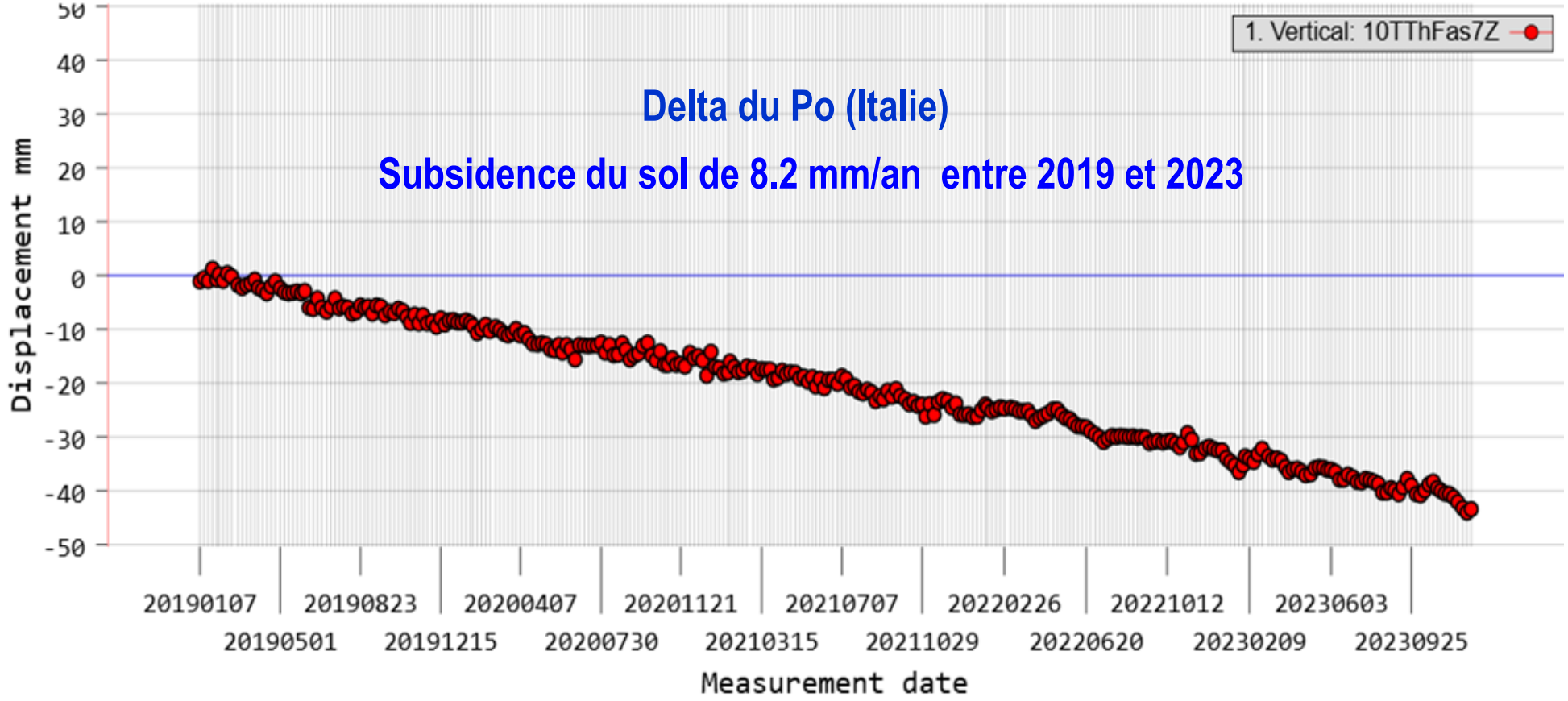
Mesure des mouvements verticaux par interférométrie radar sur Sentinel 1



Dataset: Vertical
Point ID: 10TThFas7Z
Position: 2417150.00 N 4502150.00 E -43.10 m
Mean velocity: -8.20 mm/year
RMSE: 1.00 mm

Incidence angle: 0.00°





To conclude (1)

➢ **Continue the multi-decade-long monitoring of absolute sea level changes at all spatial scales (global, regional, coastal) using multimission altimeter satellites**

- **Contraints on the observing systems**
- **Contraints on the GMSL behavior (acceleration? runaway change?...)**
- **Contraints on deep ocean warming**
- **Contraints on the Earth Energy Imbalance**
- **Contraints on other missing contributions (eg, permafrost…)**

GMSL = global mean sea level

To conclude (2)

- Improve the precision and coverage of altimetry-based sea level measurements at the coast (SWOT-type measurements…) and improve understanding of the local and remote drivers

- Improve the spatial and temporal coverage of tide gauge-based sea level measurements → tide gauge records are invaluable as they provide accurate 'relative' sea level measurements at all temporal scales (including extreme sea levels, not measured by altimetry); extremely useful for adaptation; they provide a reference for the validation of altimetry-based sea level in coastal regions…

- Improve the spatial and temporal coverage of vertical land motion measurements at the coast (GNSS & InSAR→ allows to separate climate-related sea level rise and crustal motions; allows detection of non-linear crustal motions (important in the context of projections of future relative sea level at the coast)

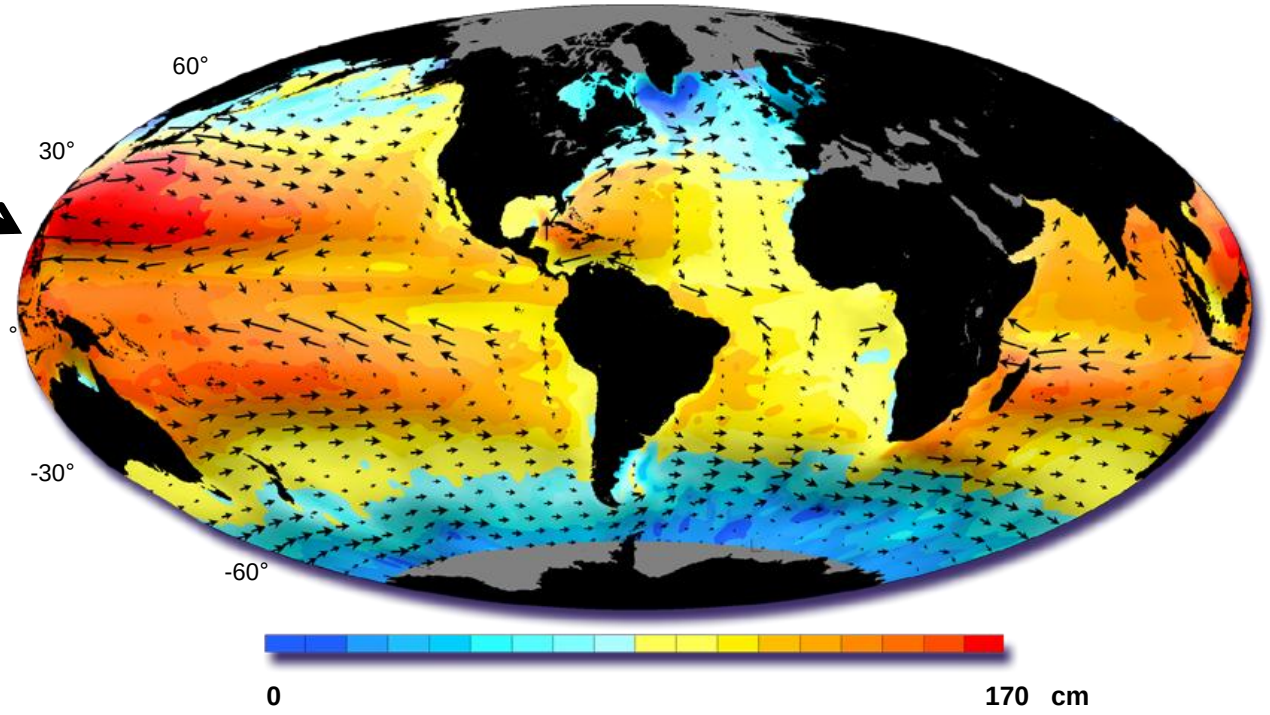
- Provide long-term time series of relative coastal sea level by measuring vertical land motions (GNSS & InSAR) and combine with altimetry-based 'climate-related' sea level change at the coast → « virtual » tide gauge network


Merci de votre attention

Ocean Circulation

« Dynamic Topography » *-above the geoid-* → *signature of ocean currents*

Dynamic Topography = Height of the sea surface above the geoid



***Because of the geostrophic equilibrium,* the ocean current velocity is proportional to the sea surface slope**

Source: CLS/AVISO