

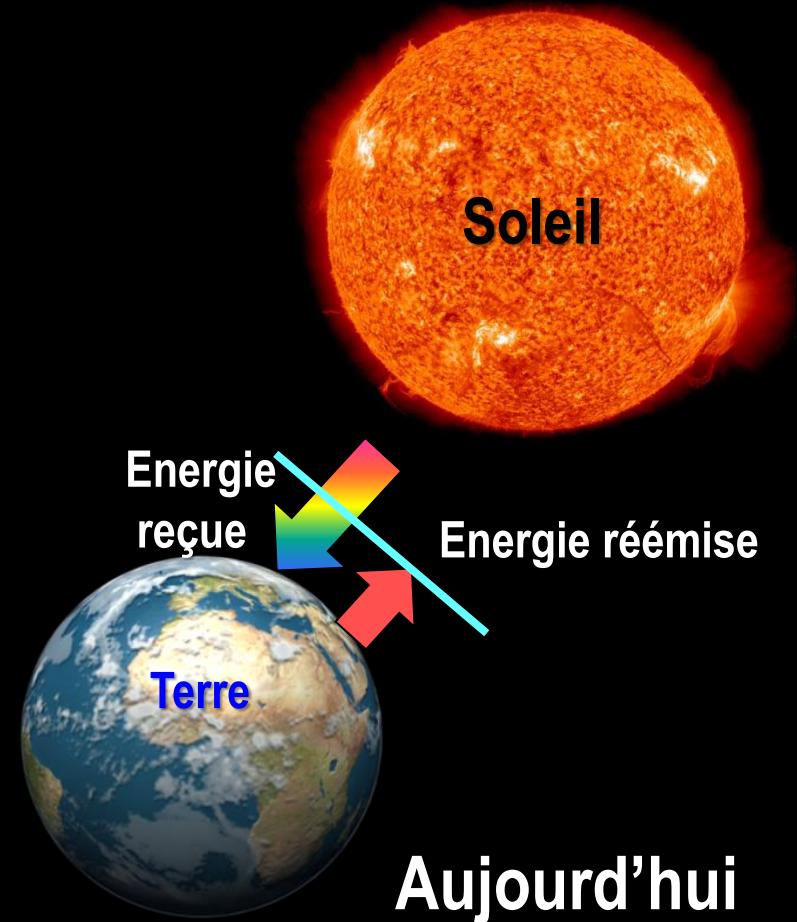
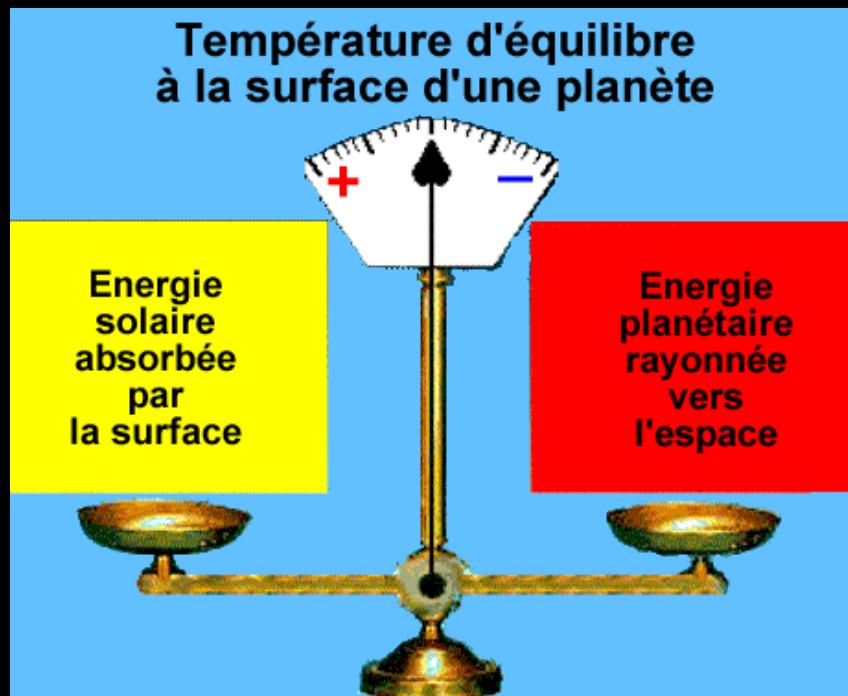


Réchauffement Climatique, Fonte des Glaces et Hausse du Niveau des Mers

Anny Cazenave

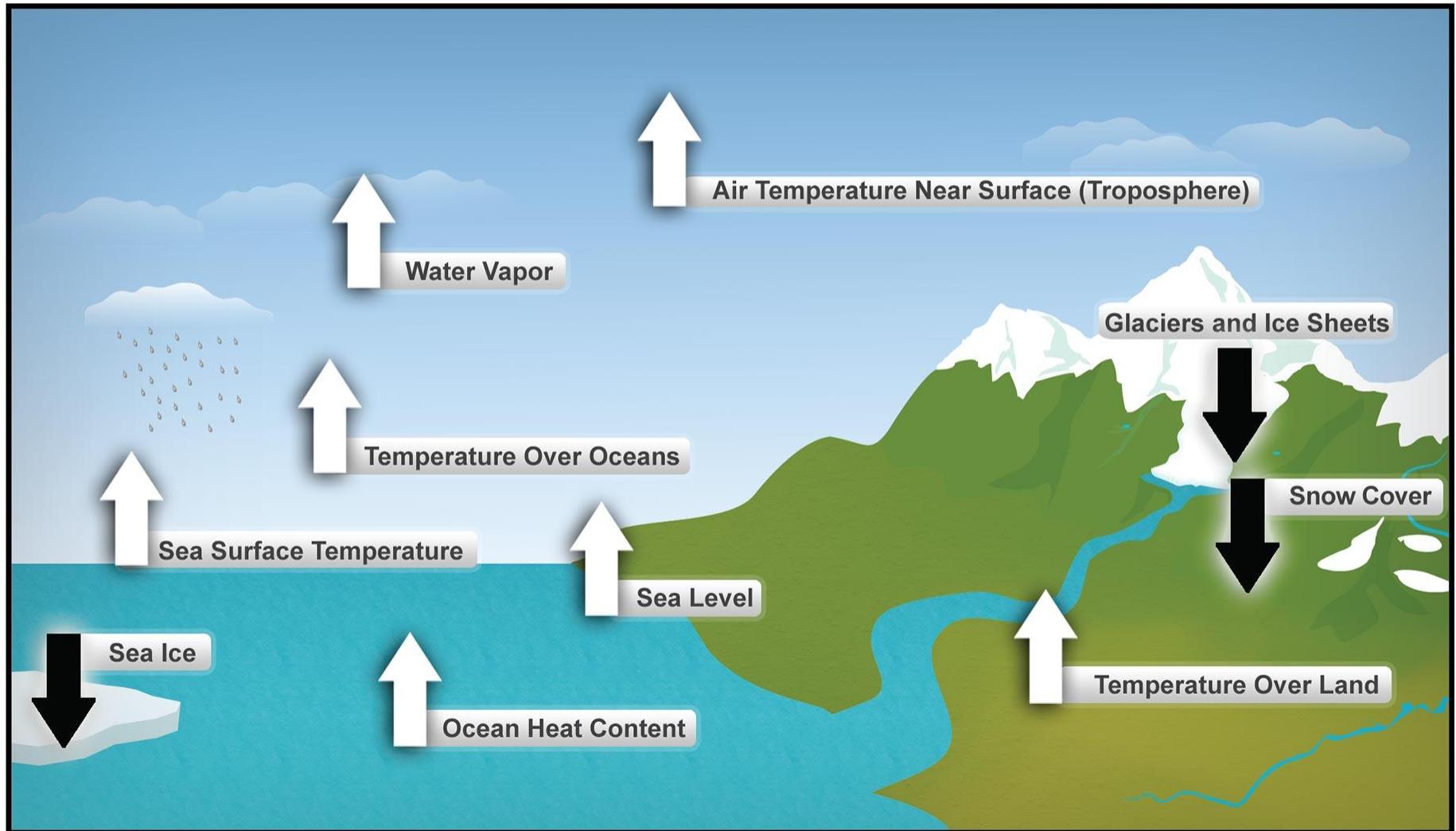
Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS, Toulouse, France)
& International Space Science Institute (ISSI, Berne, Suisse)

Bilan énergétique de la Terre

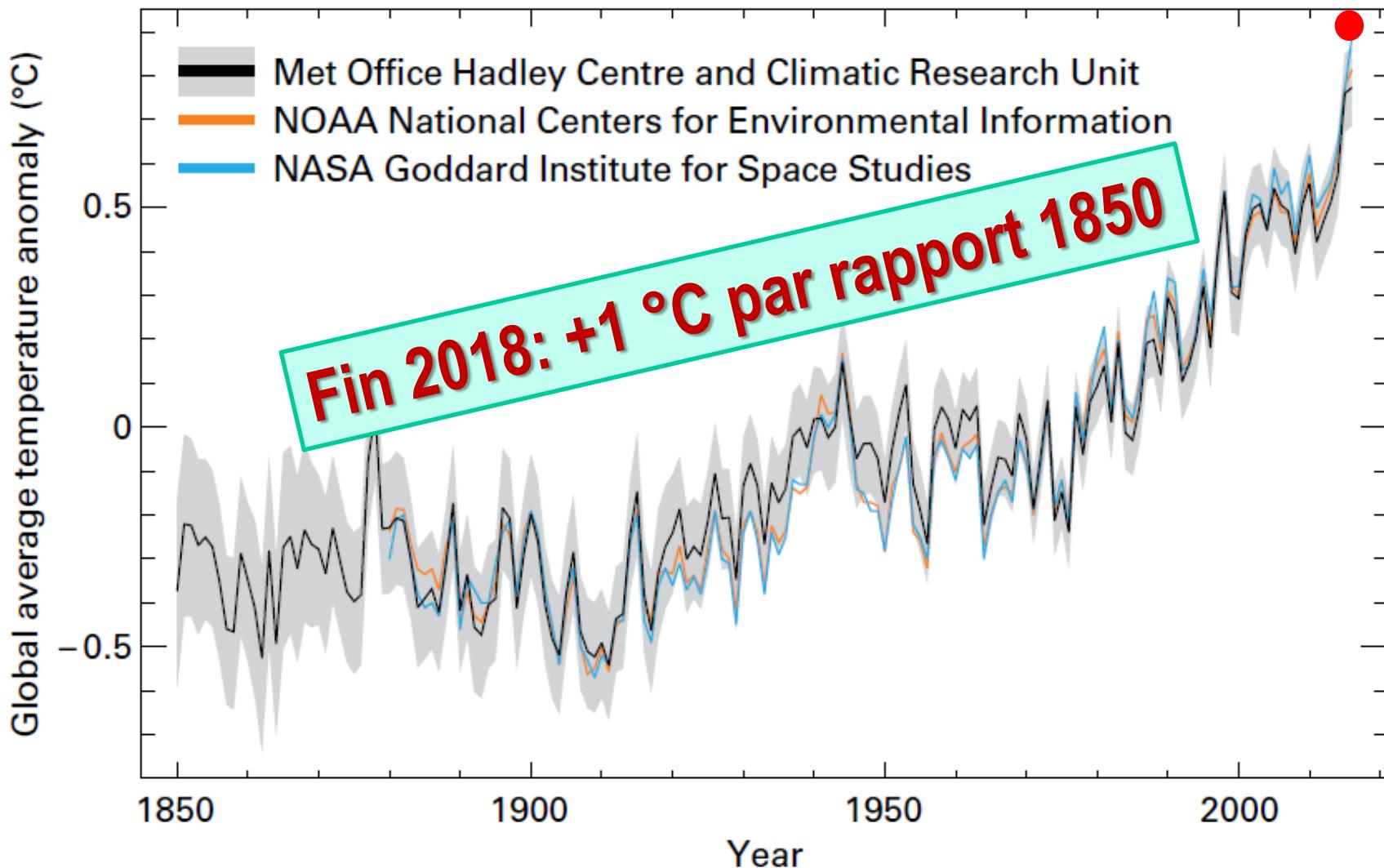


déséquilibre énergétique $\rightarrow \sim 1 \text{ W.m}^{-2}$

Un monde plus chaud...

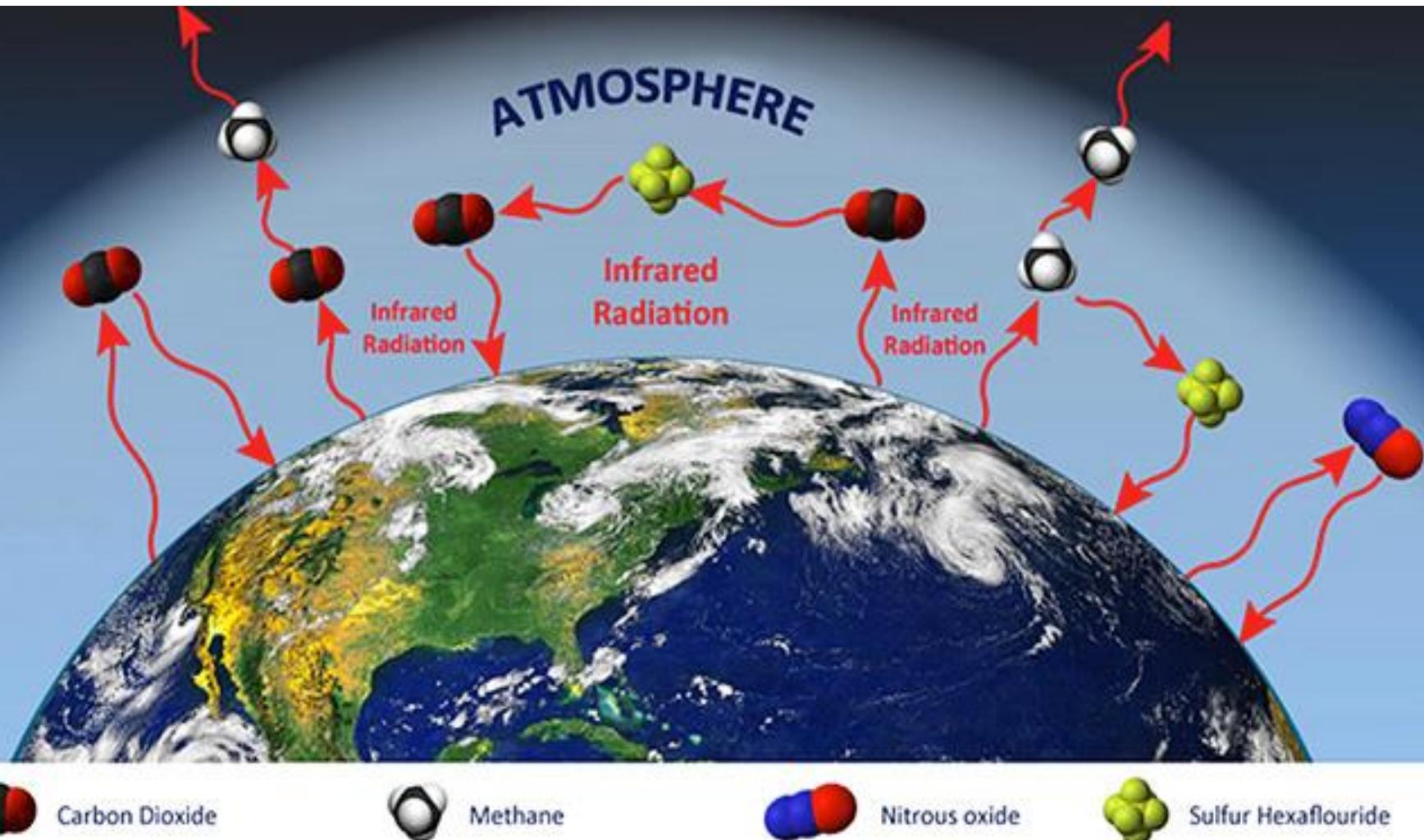


Evolution de la Température moyenne de la Terre depuis 1850



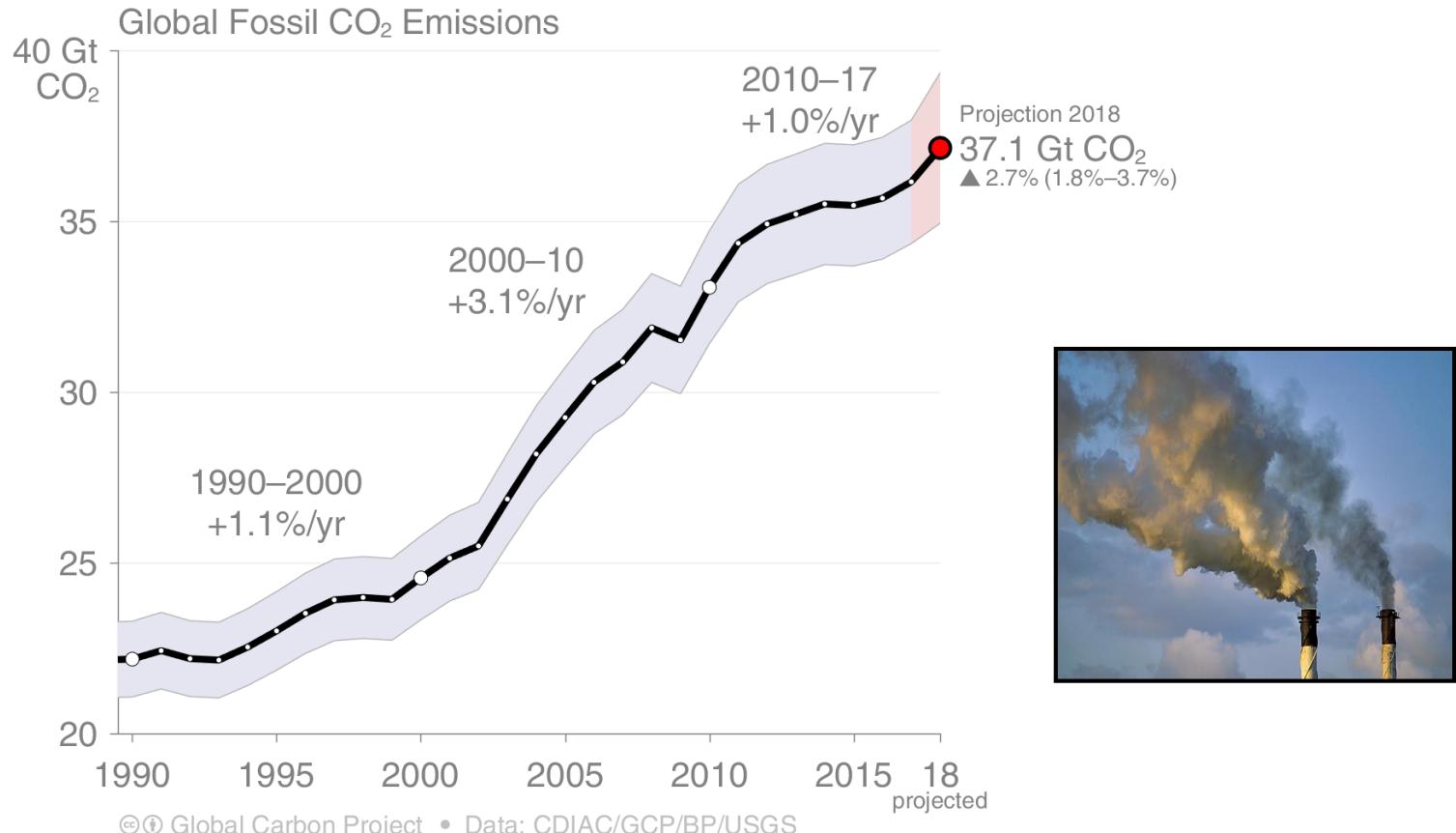
Source: WMO State of Climate 2019

Réchauffement de la Terre du aux gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines



Evolution des émissions anthropiques de GES (CO₂)

Total des émissions depuis le début de l'ère industrielle: 2000 GtCO₂
(Combustion des ressources fossiles: 1300 GtCO₂ ; Déforestation: 700 GtCO₂)

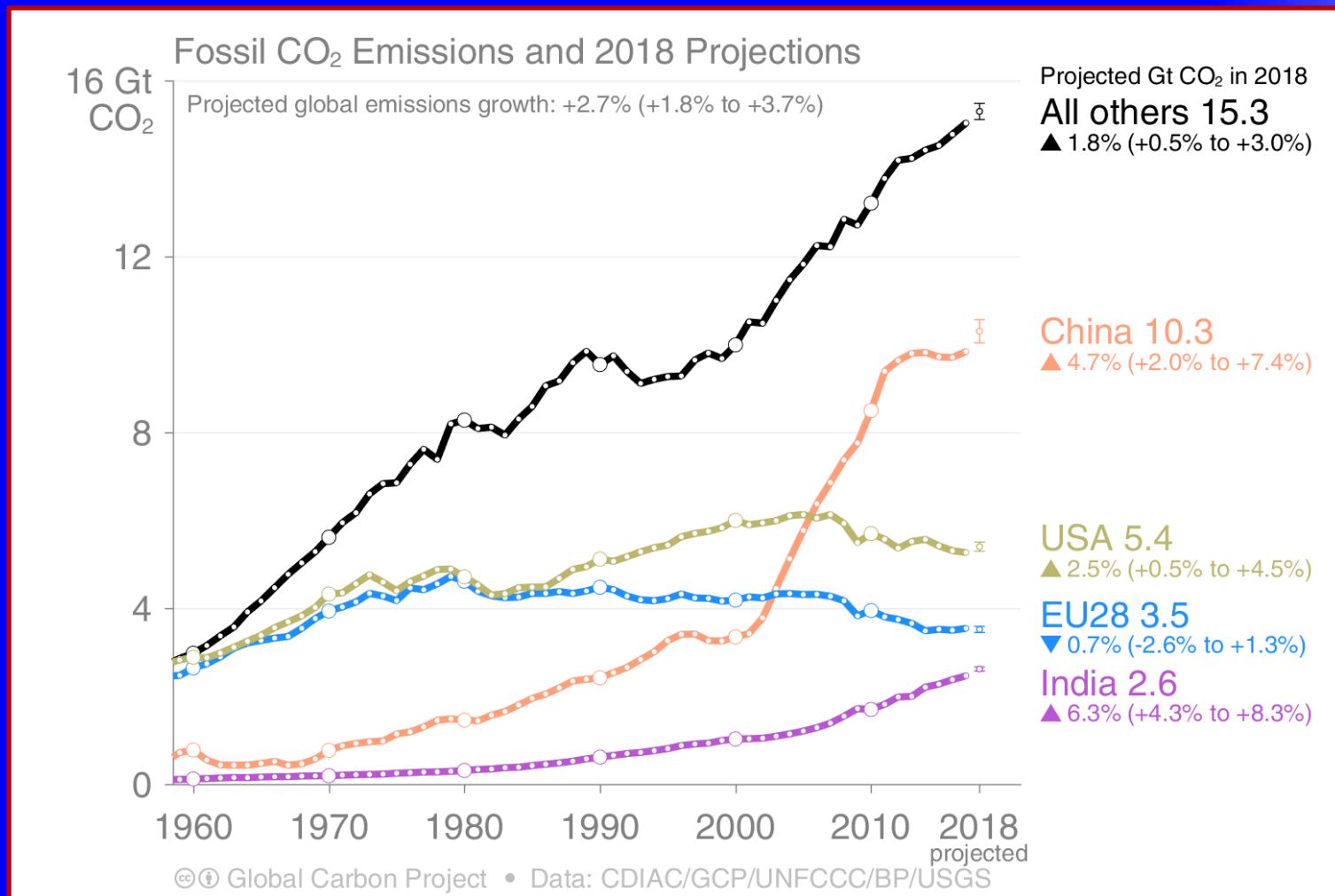


Emissions globales en 2017 : 36.2 ± 2 GtCO₂
(augmentation de 63% par rapport à 1990)

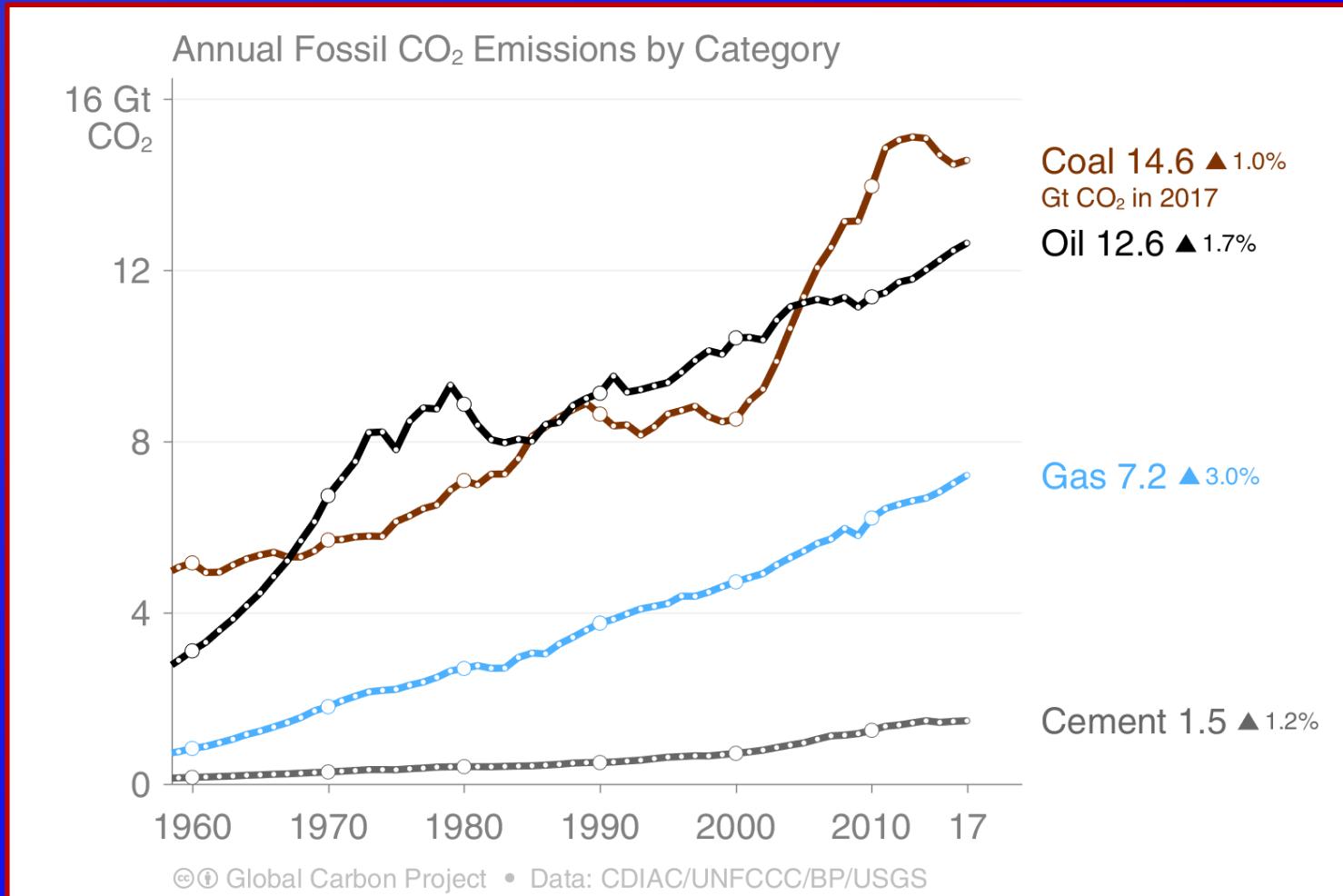
1Gt = 1 milliard de tonnes

Source: Global Carbon Project 2018; Le Quéré et al., 2018

Emissions de dioxyde de carbone par région depuis 1960



Emissions de dioxyde de carbone par type de combustible fossile (charbon:40%, pétrole:35%, gaz:20%, ciment:4%)

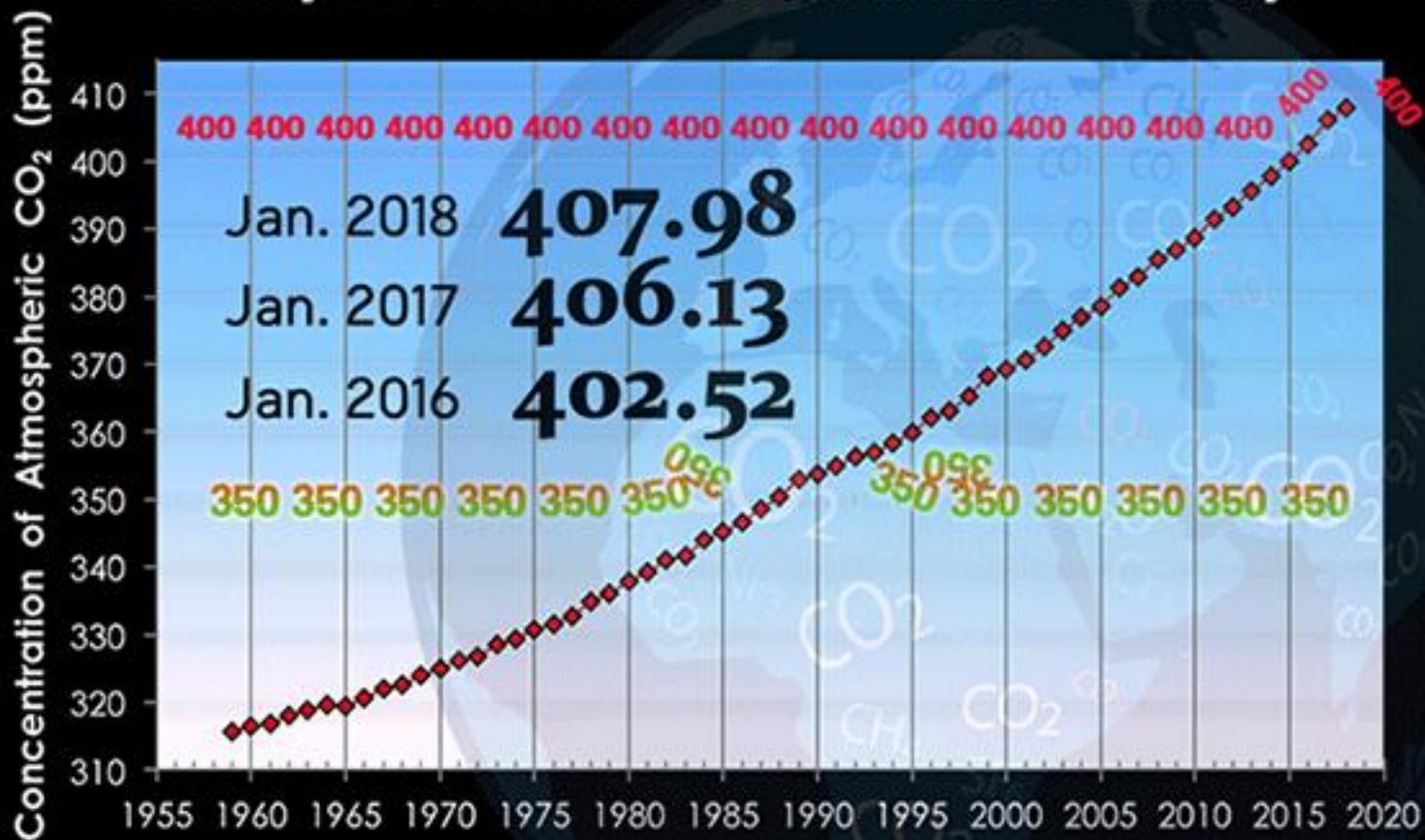


Evolution de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère

January 1959 - January 2018

Atmospheric CO₂

January CO₂ | Year Over Year | Mauna Loa Observatory



CO₂-earth

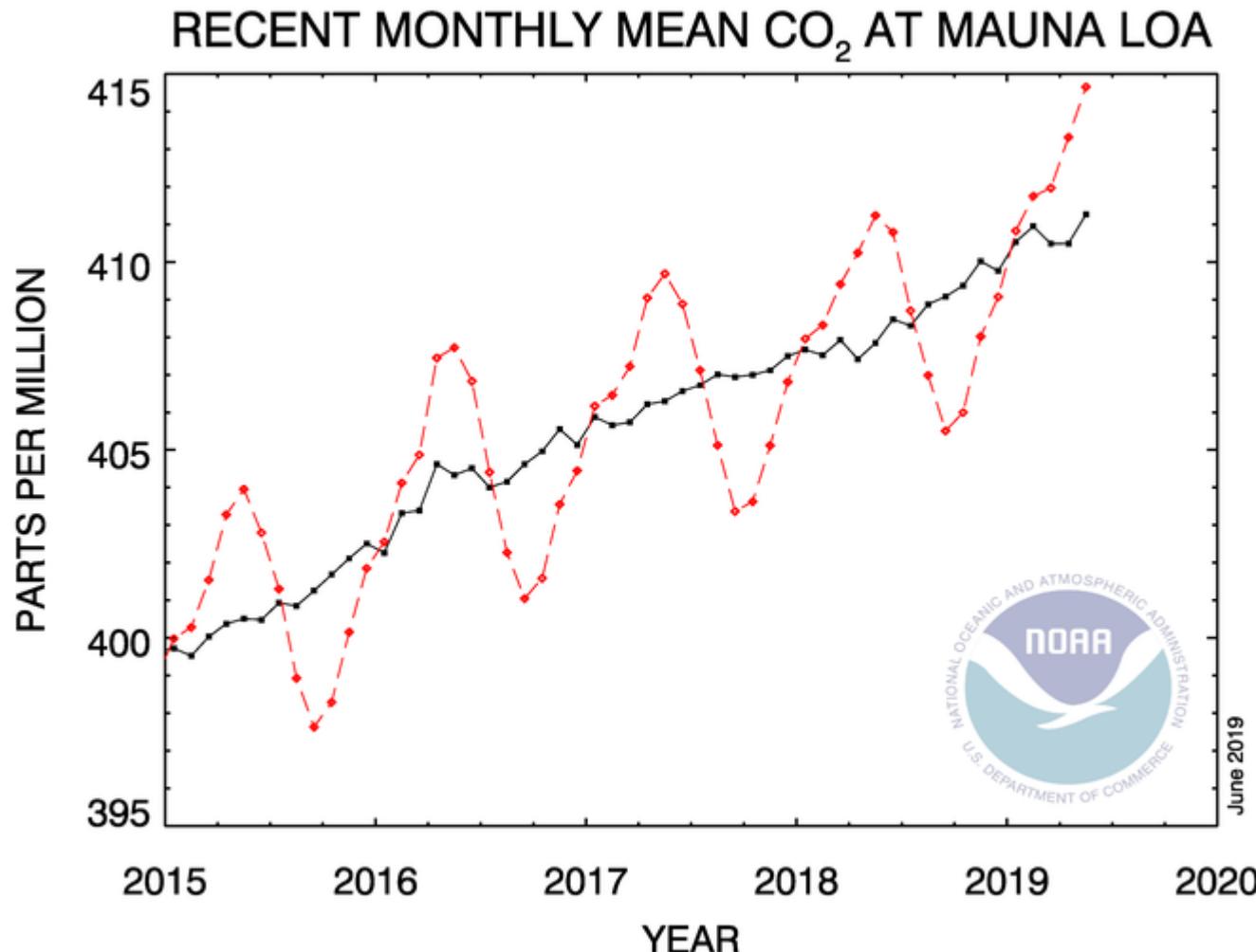
Featuring NOAA-ESRL data of February 5, 2018

Concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère:

Mai 2019 : 415 ppm

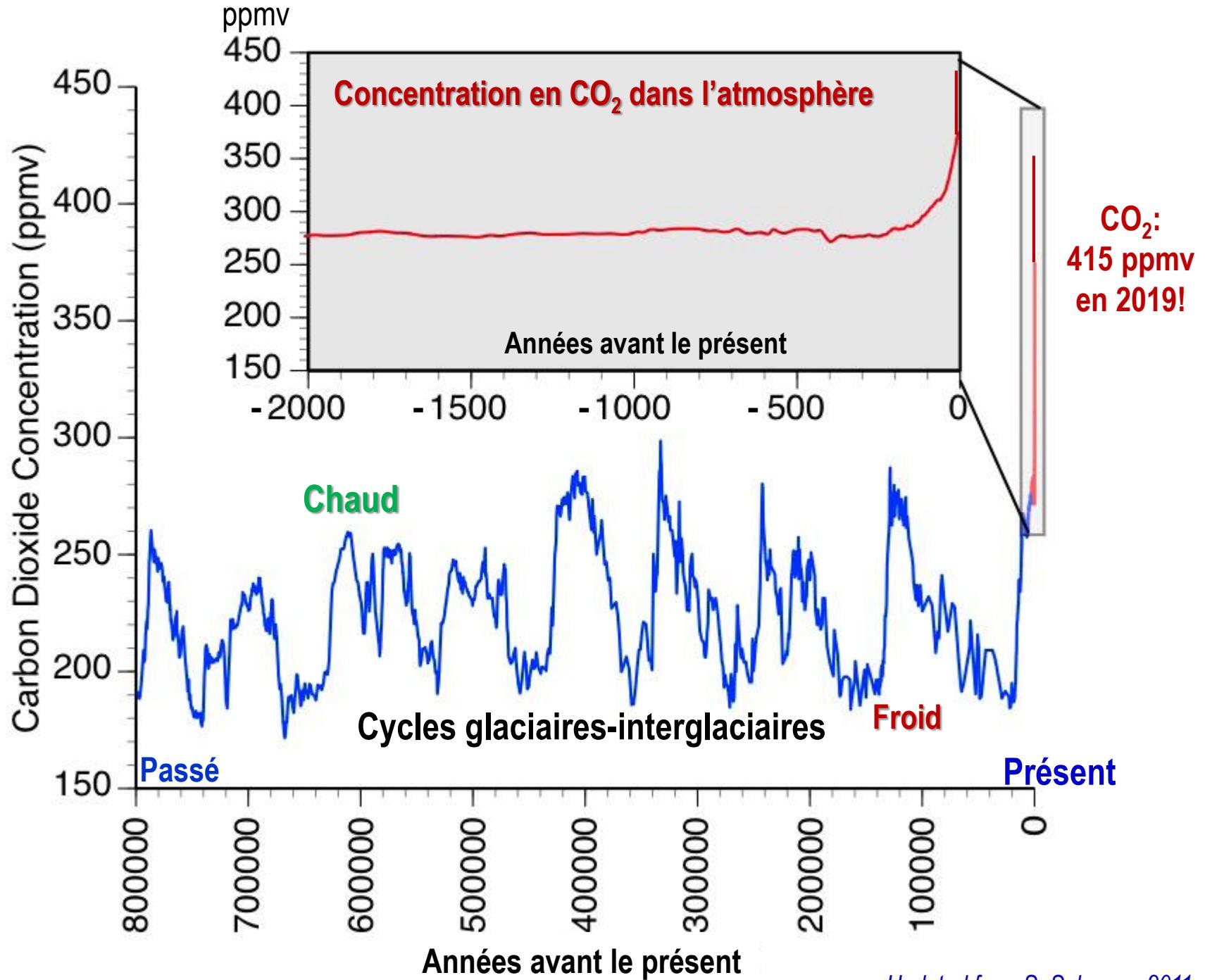
Mai 2018: 411 ppm

Dernière mise à jour 5 juin 2019



ppm=partie par million

Source: NOAA



Updated from S. Solomon, 2011

Bilan CO₂ (moyenne 2008-2017)



Emissions anthropiques
34.4 GtCO₂/an (87%)

Sources



Déforestation
5.3 GtCO₂/an (13%)

Atmosphère
17.3 GtCO₂/an
44%



Végétation
11.6 GtCO₂/an
29%

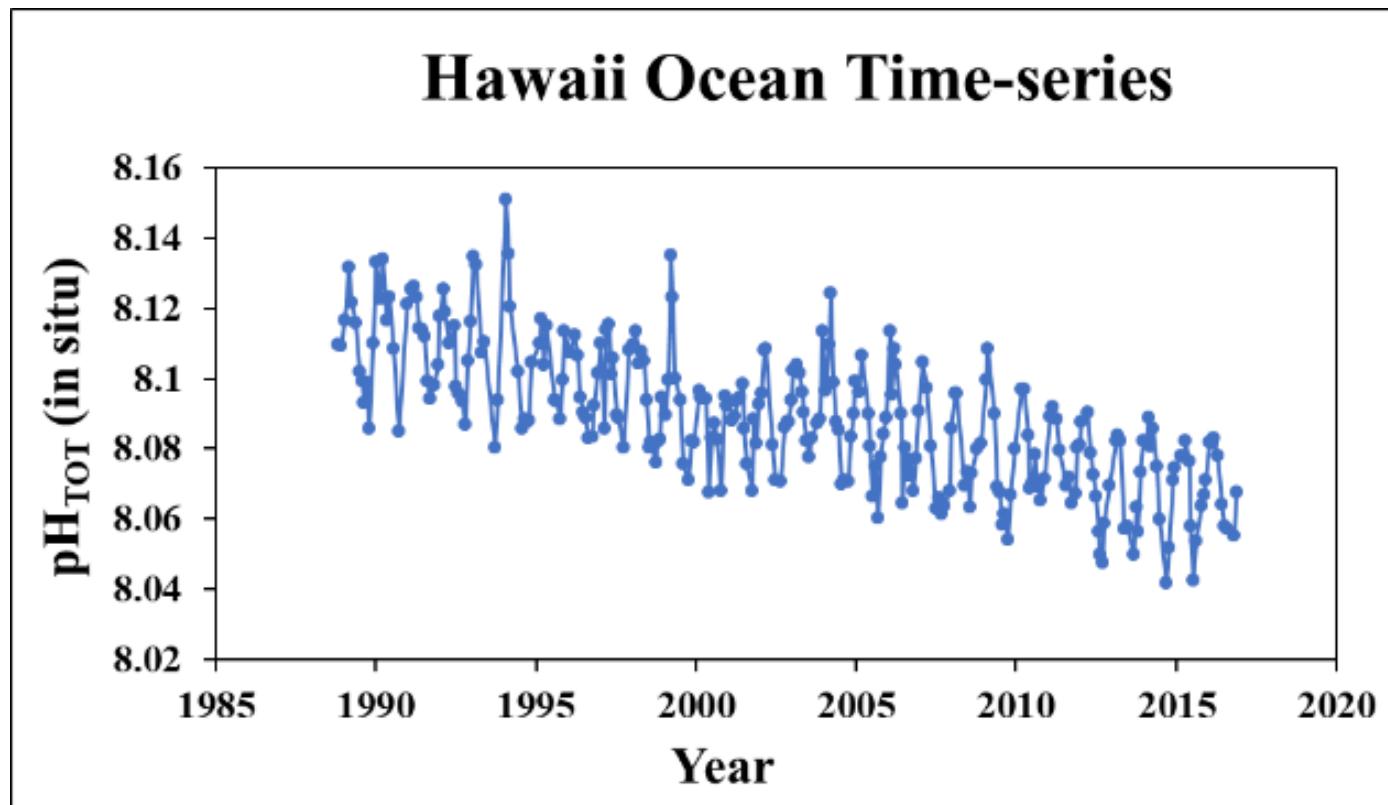


Puits

Océan
8.9 GtCO₂/an
22%



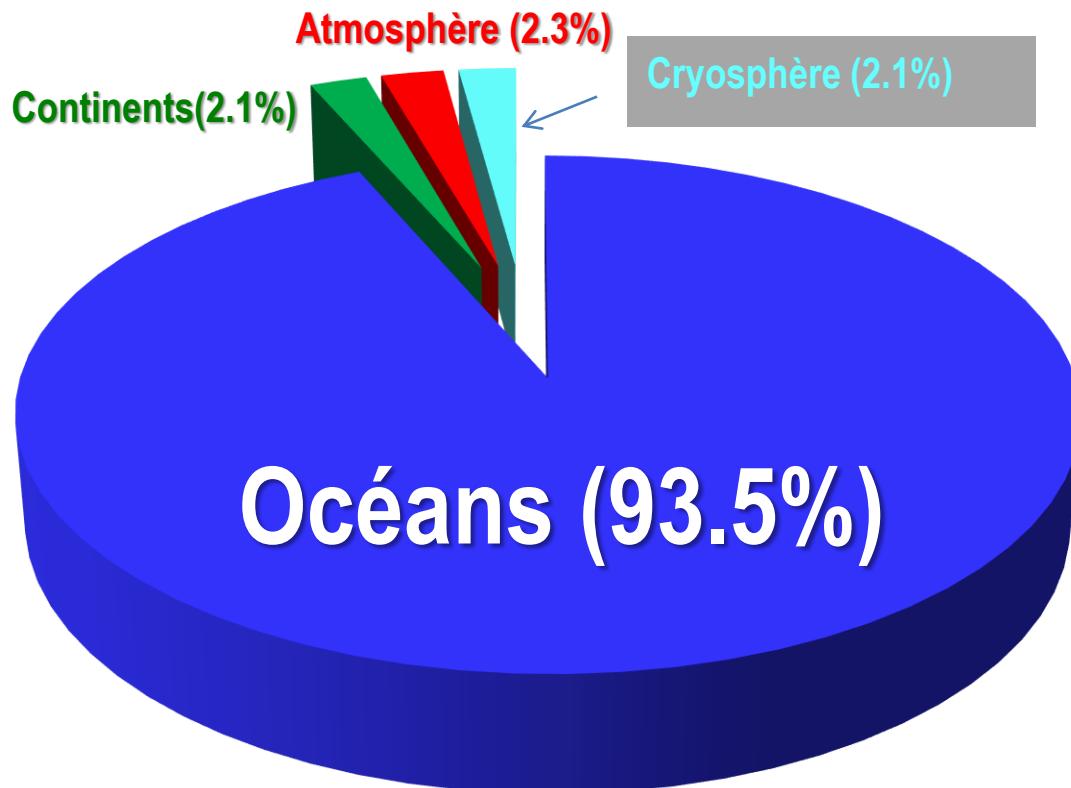
Acidification de l'océan → Diminution du pH de l'eau de mer



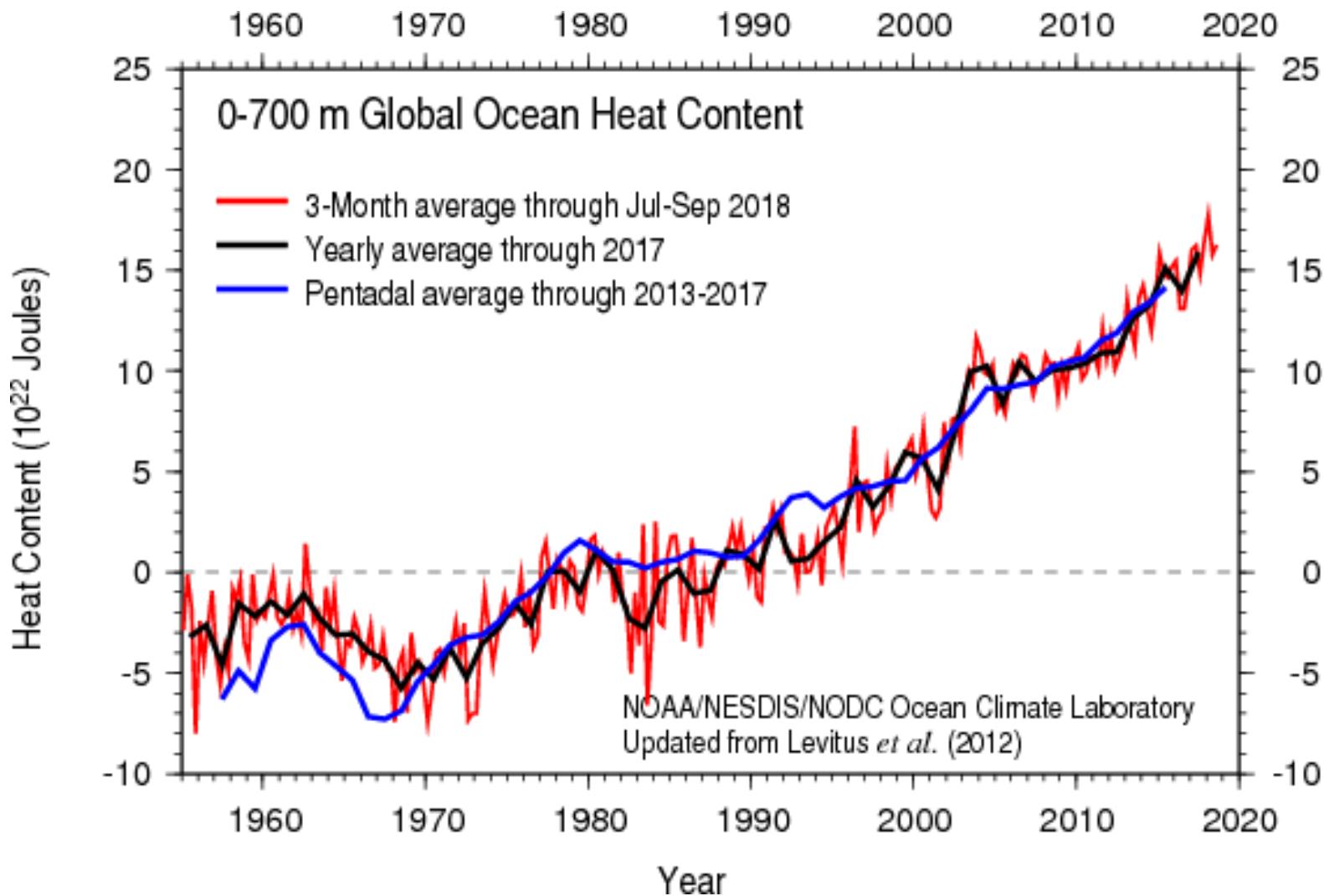
Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2018

Excès de chaleur

*Accumulée dans les différents réservoirs du système climatique
au cours des 50 dernières années*



Augmentation du contenu thermique de l'océan

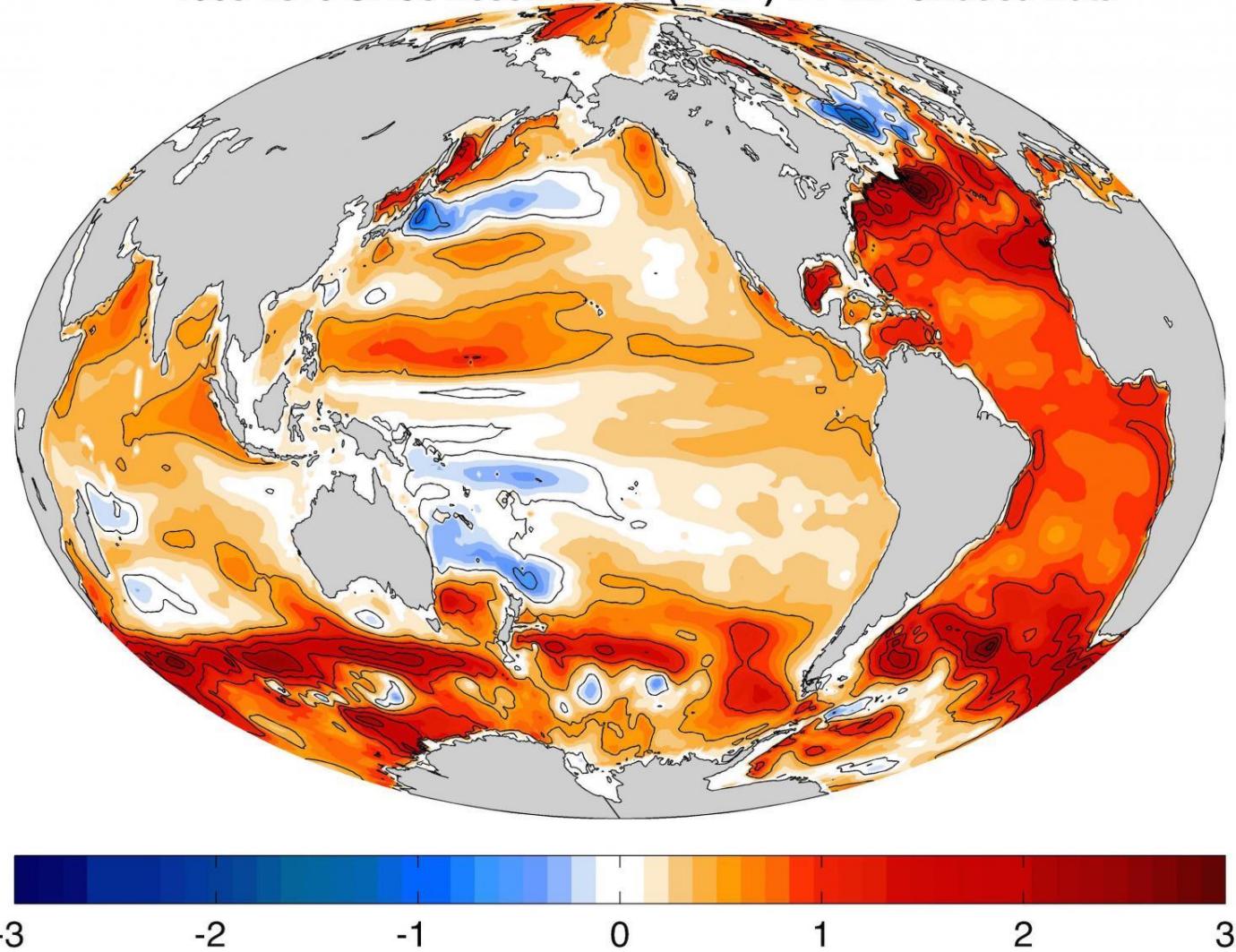


Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2019

L'océan se réchauffe...

Augmentation du contenu en chaleur de l'océan depuis 1960 (en rouge, les régions de + en + chaudes)

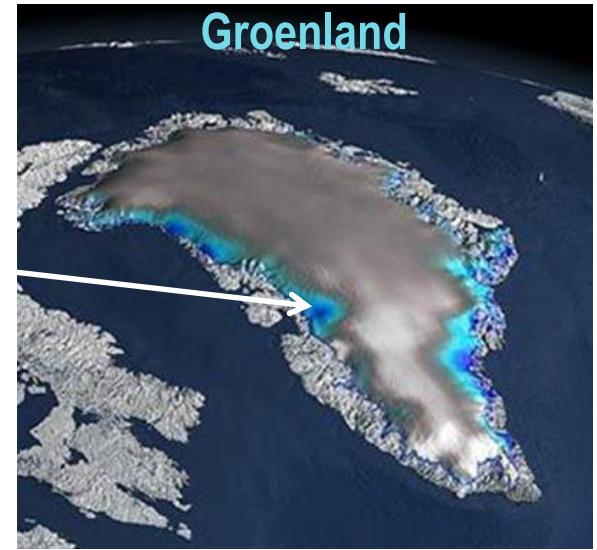
1960-2016 OHC0-2000m trend (W/m²) BY IAP Gridded Data



Les glaces fondent

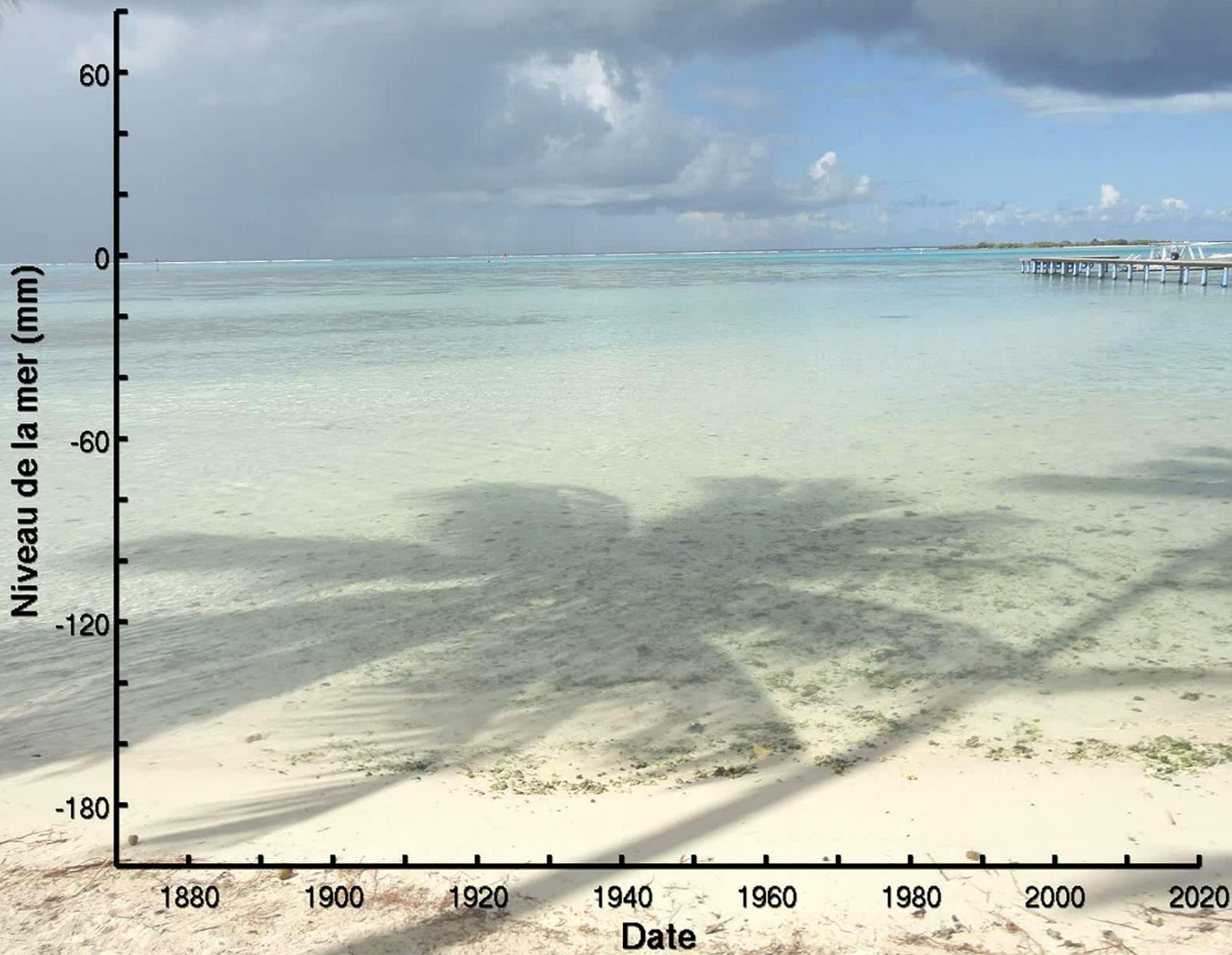


Le Glacier 'Rhone' dans les Alpes suisses



La mer monte!





Hausse du niveau des mers au cours du 20^{ème} siècle 1900-1990 (marégraphes)

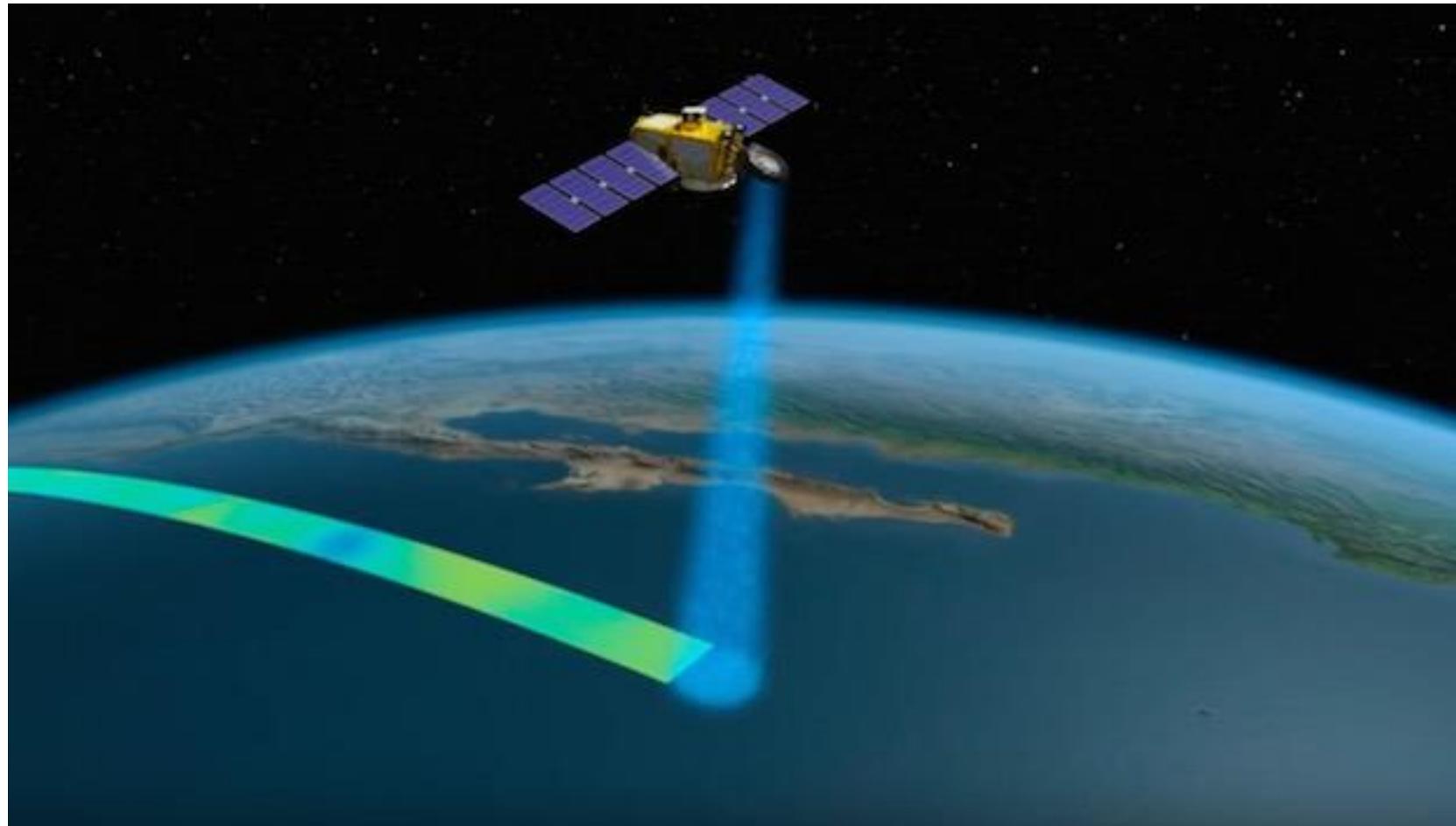


Environ 15 cm en moyenne



Le réseau marégraphique avec +40 ans de mesures

**Aujourd'hui on mesure la hausse de la mer
depuis l'espace → Altimétrie spatiale**







Altimétrie Spatiale



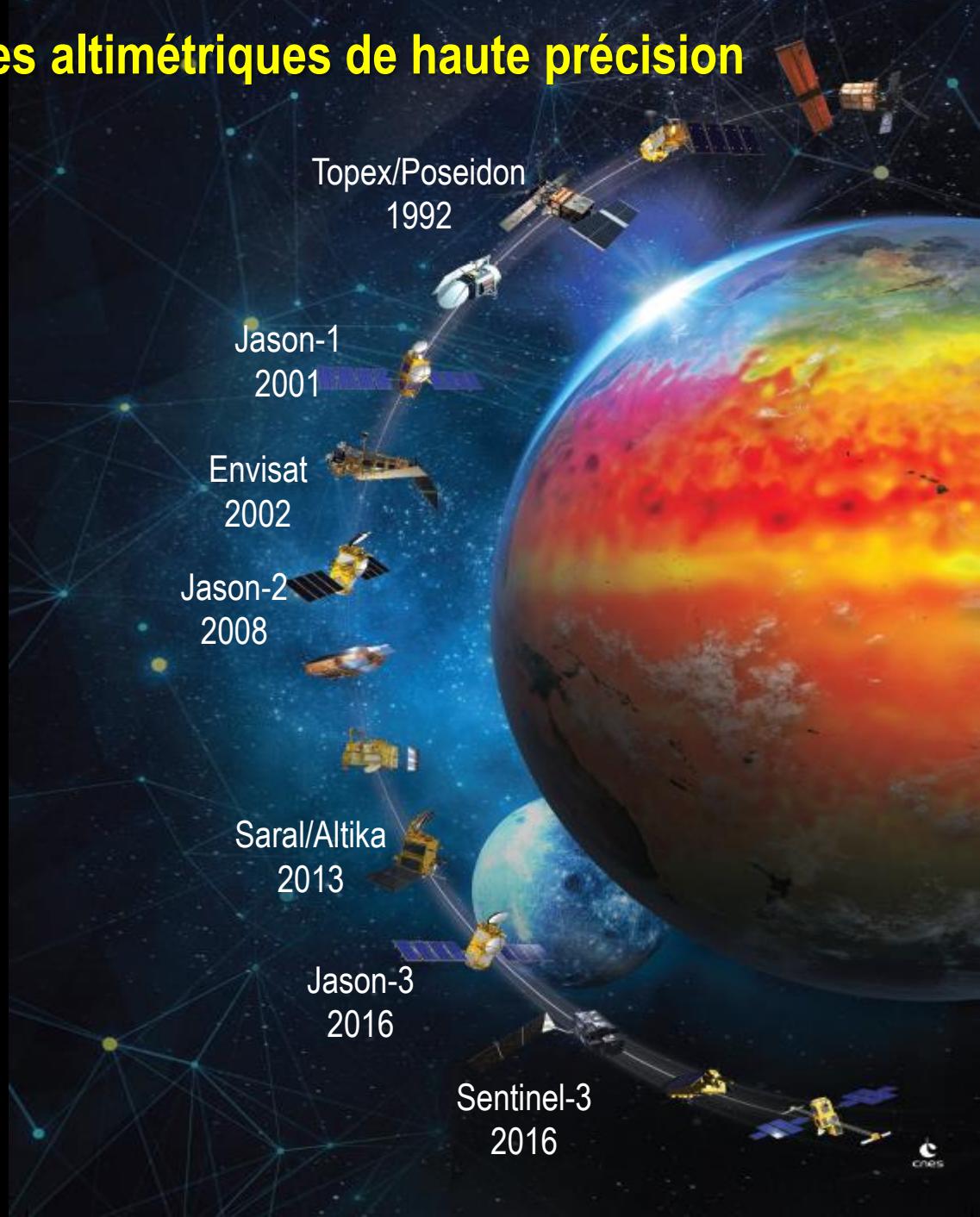
Couverture globale des océans
en quelques jours

La constellation des satellites altimétriques de haute précision

Précision de mesure de la hauteur instantanée de la mer (par rapport à une référence fixe)



- Il y a 40 ans : 1 m
- Il y a 25 ans : 10 cm
- Aujourd'hui : 1-2 cm !



Topex/Poseidon
1992

Jason-1
2001

Envisat
2002

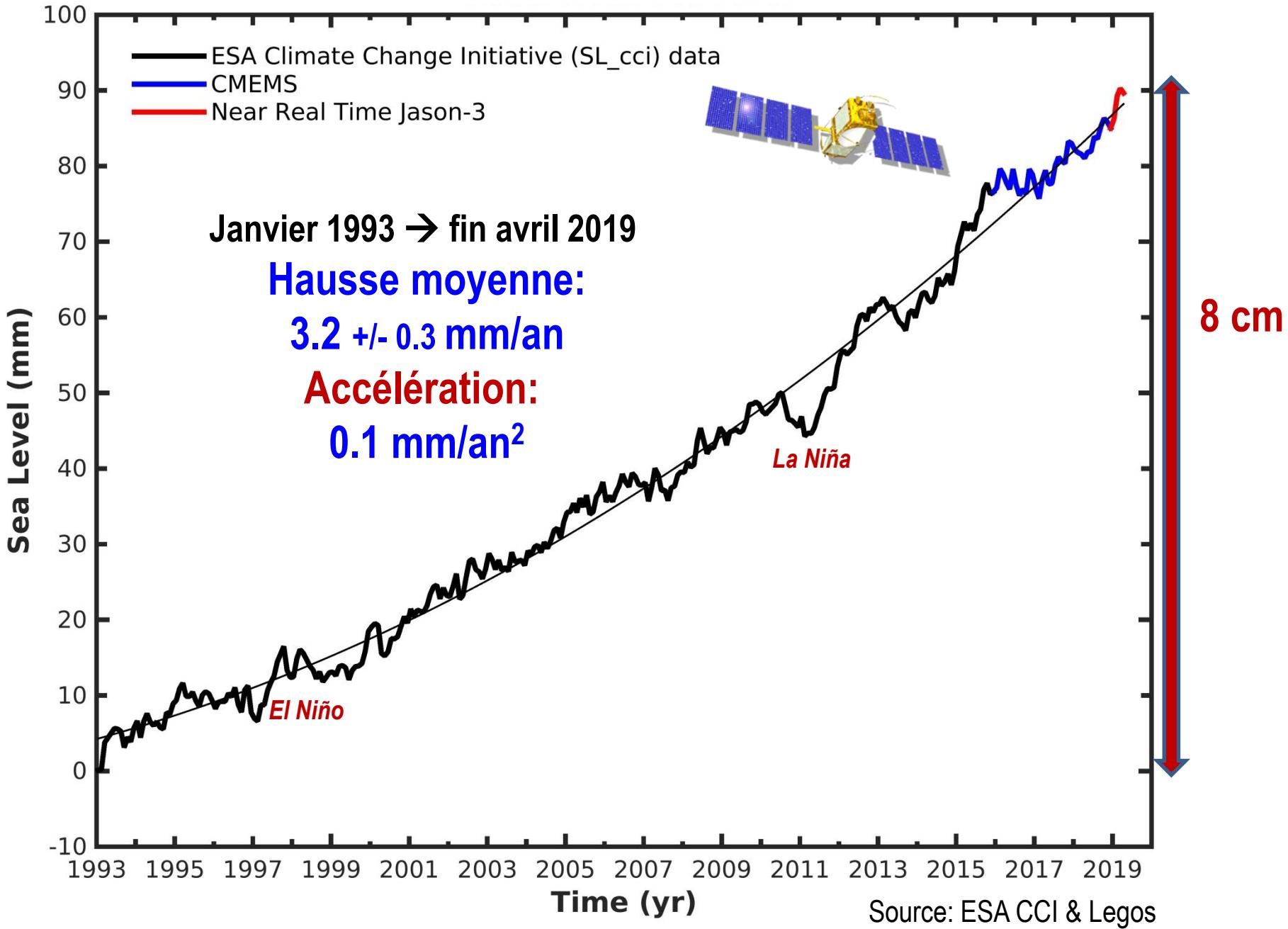
Jason-2
2008

Saral/Altika
2013

Jason-3
2016

Sentinel-3
2016

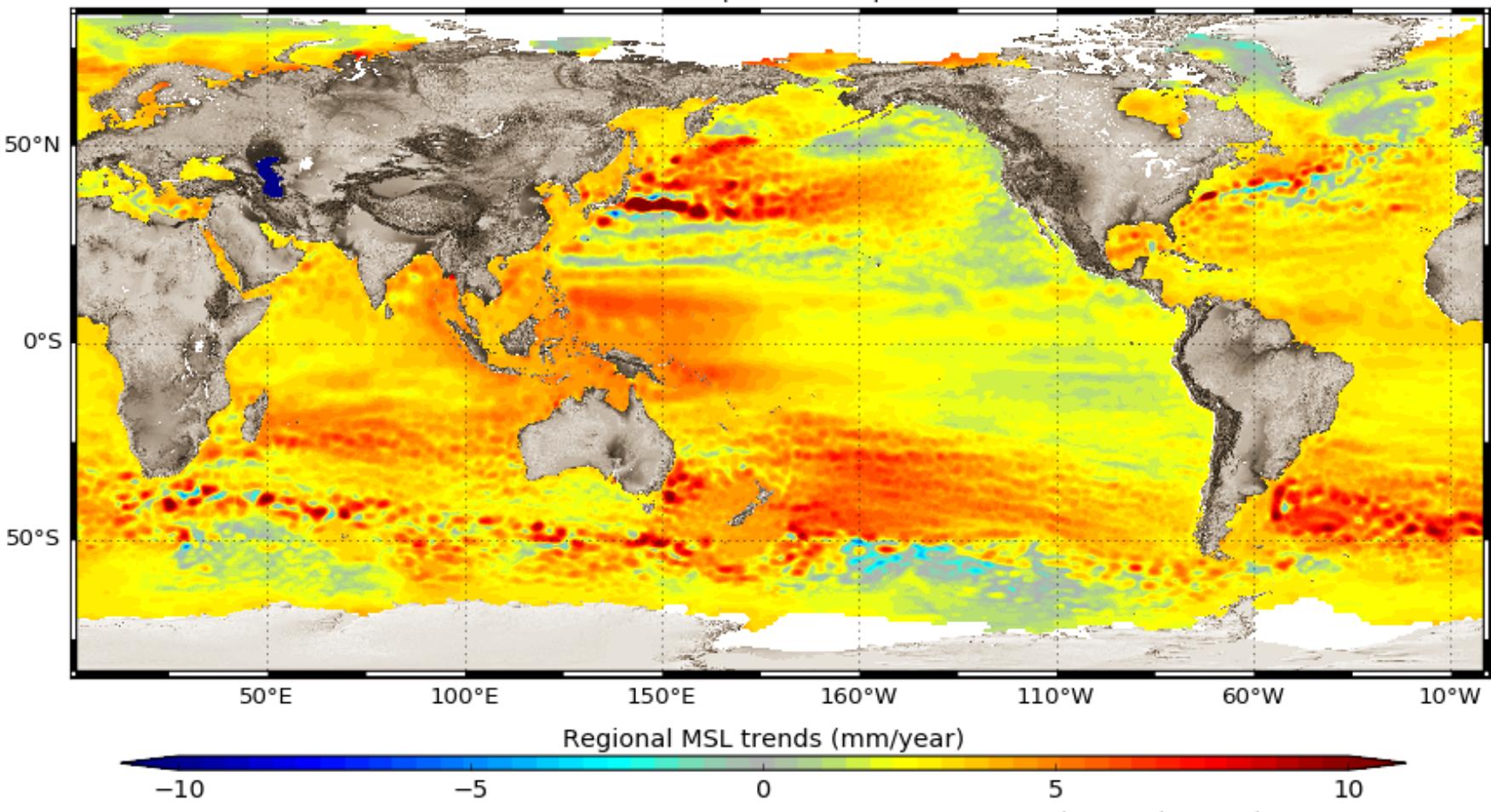
Evolution du niveau de la mer depuis 1993



La hausse de la mer n'est pas uniforme...

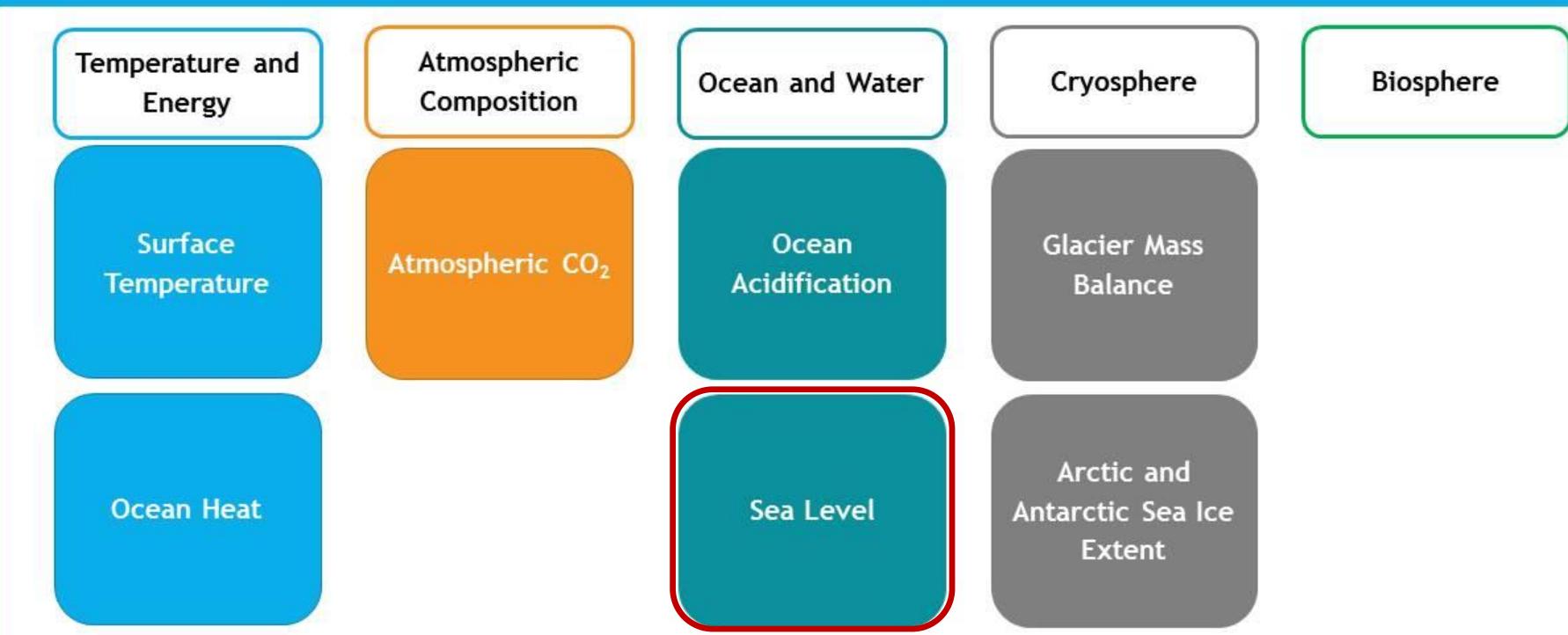
Tendances régionales de la hausse de la mer (mm/an)

Period: Sep-1992 to Sep-2018



Les 7 indicateurs majeurs du changement climatique actuel

Global Climate Indicators

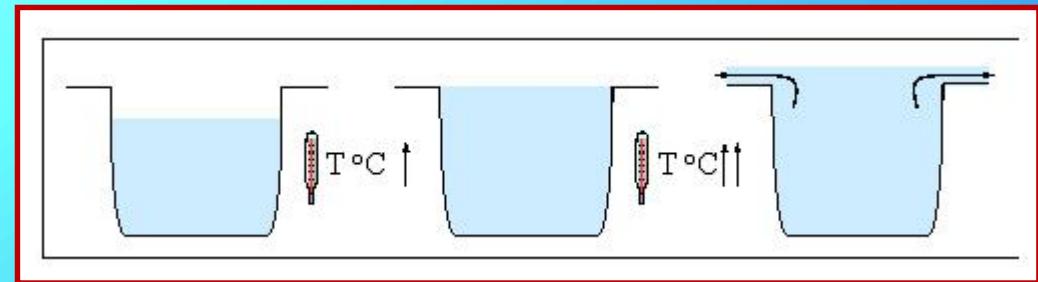


Définis par GCOS (Global Climate Observing System)
et WMO (Organisation Météorologique Mondiale)

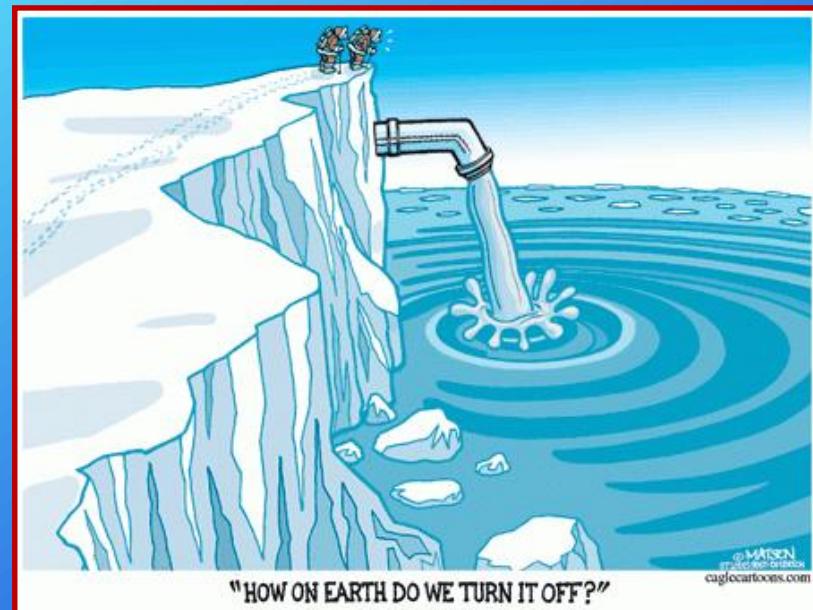
Sait-on expliquer de façon quantitative les causes de la hausse actuelle de la mer?

2 causes principales à la hausse de la mer...

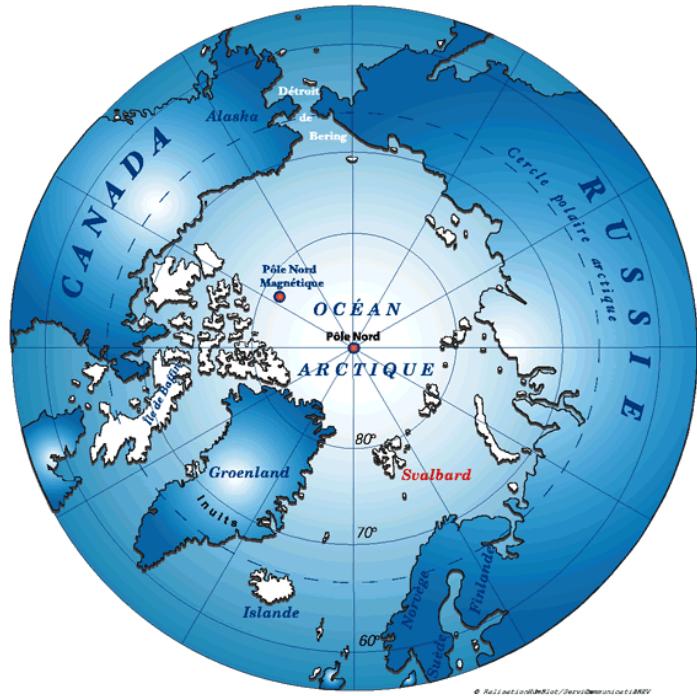
➤ Dilatation thermique de l'océan → l'océan se réchauffe, l'eau se dilate et la mer monte



➤ Apports d'eau douce → les glaces continentales fondent et la mer monte

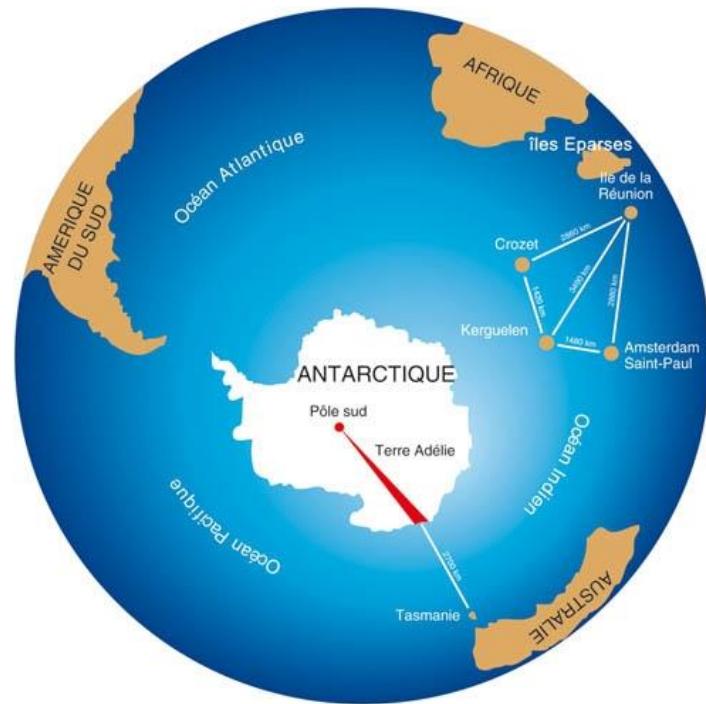


Le Groenland

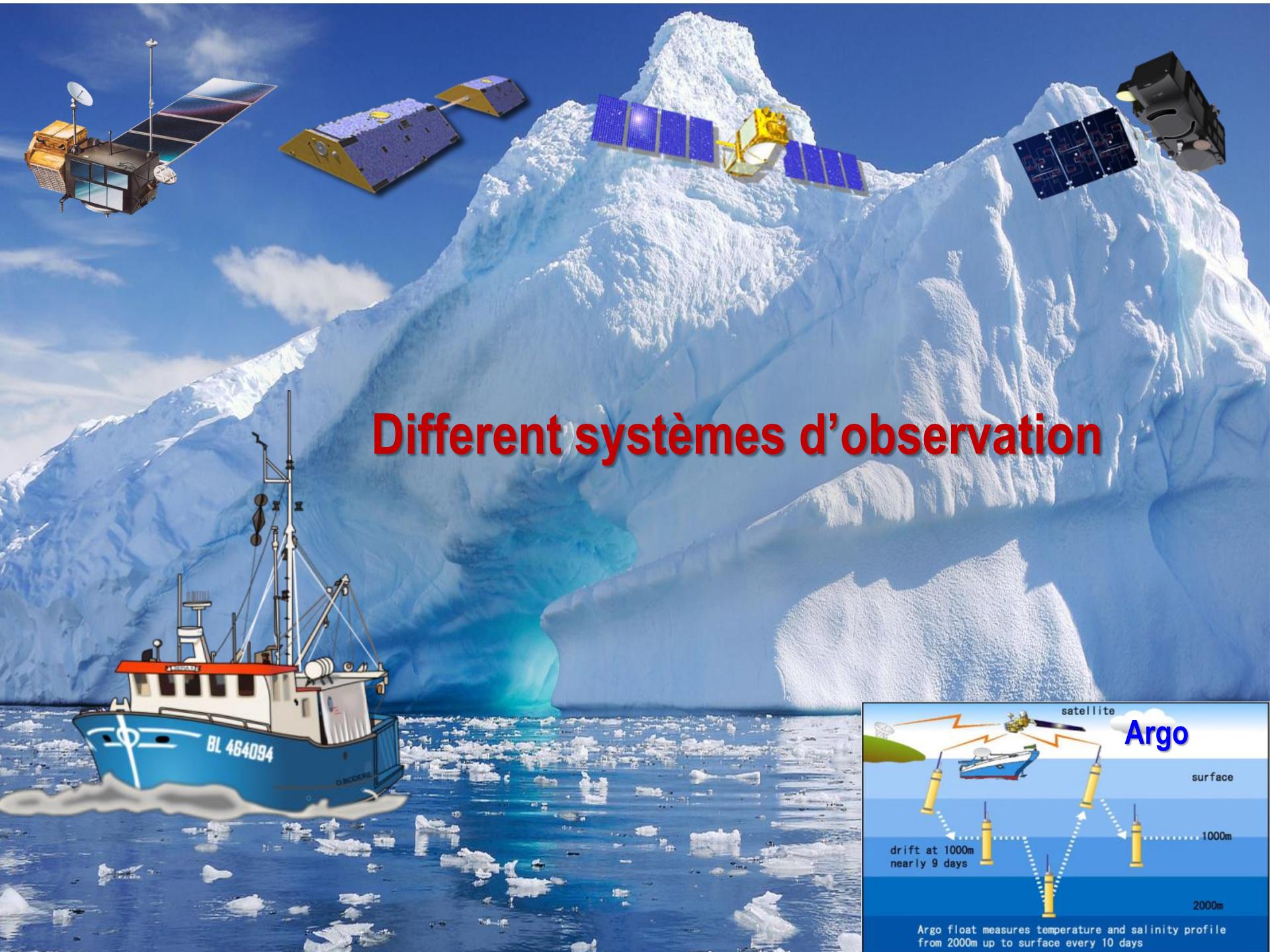


Si toute la glace du Groenland fondait, la mer s'élèverait de 7 m

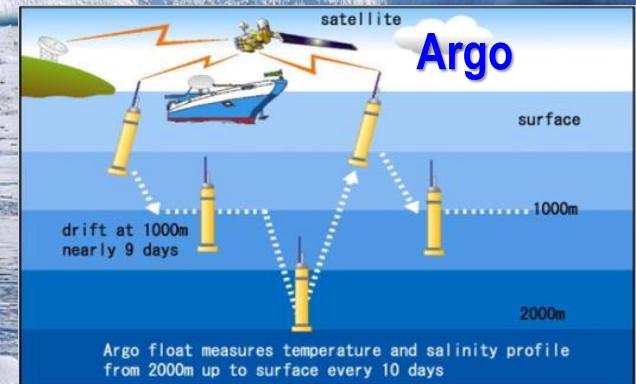
L'Antarctique



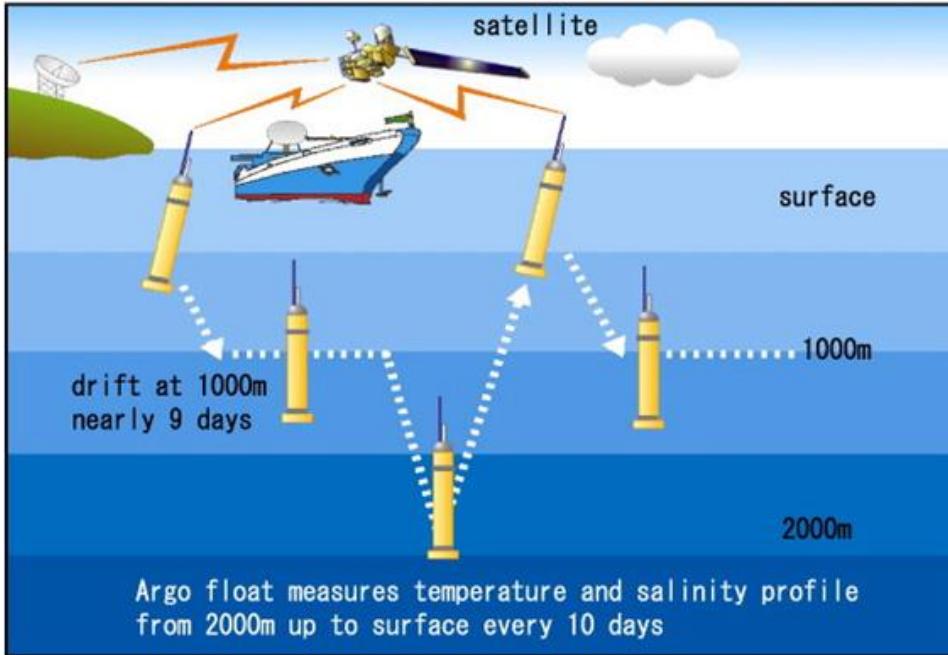
**Si toute la glace de l'Antarctique fondait, la mer s'élèverait de 55 m
(Antarctique de l'ouest → +7 m)**



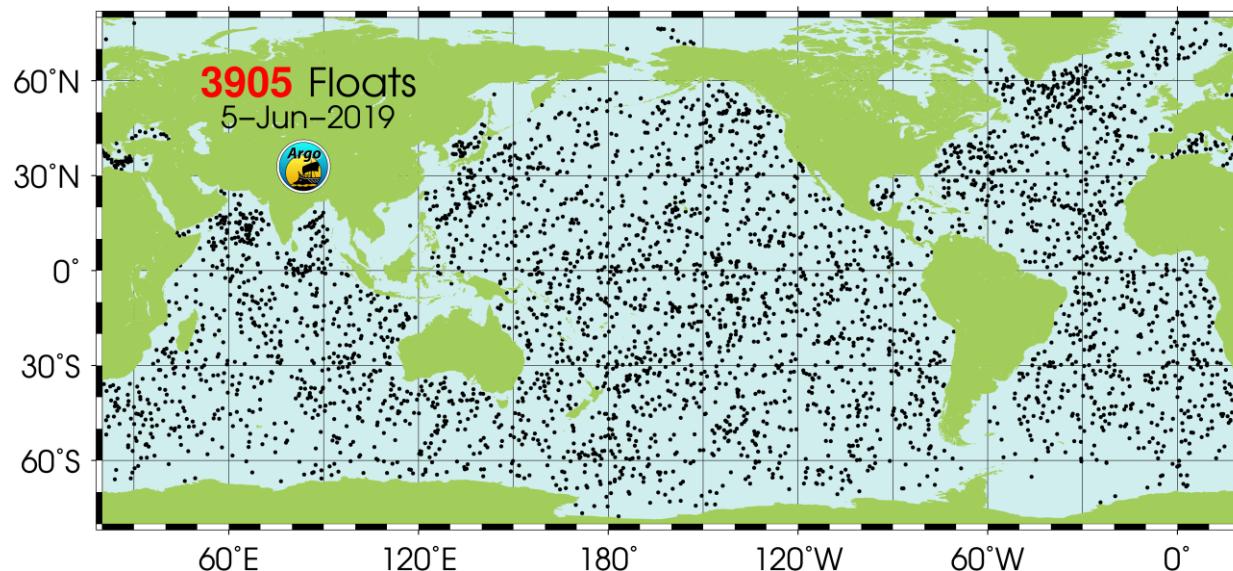
Different systèmes d'observation



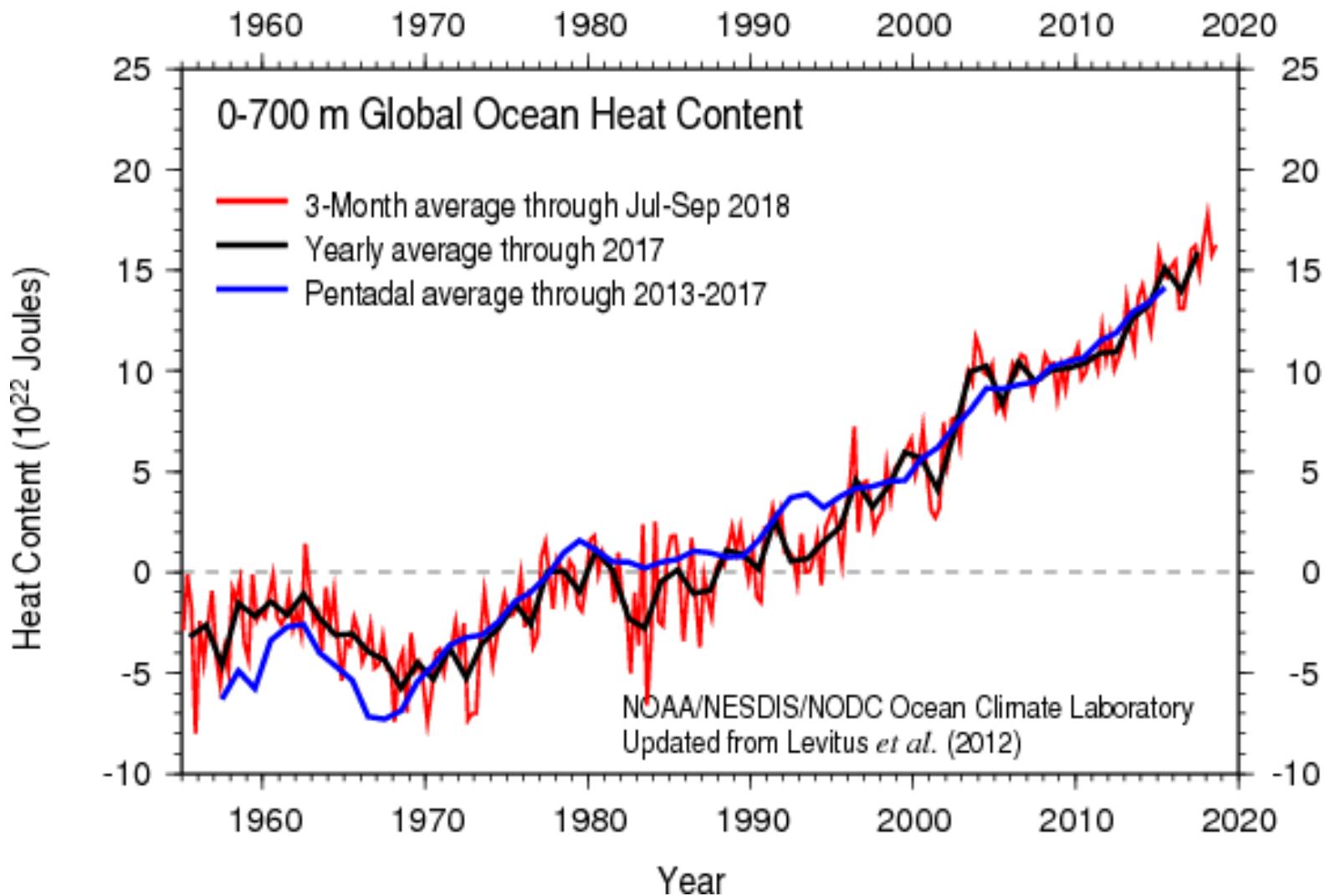
Projet international ARGO → Expansion thermique de l'océan



➤ 3900 flotteurs automatiques (température & salinité de l'océan → 2000 m)

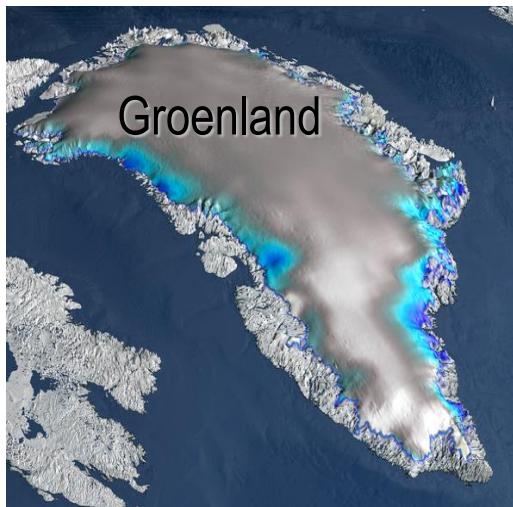


Augmentation de l'expansion thermique de l'océan

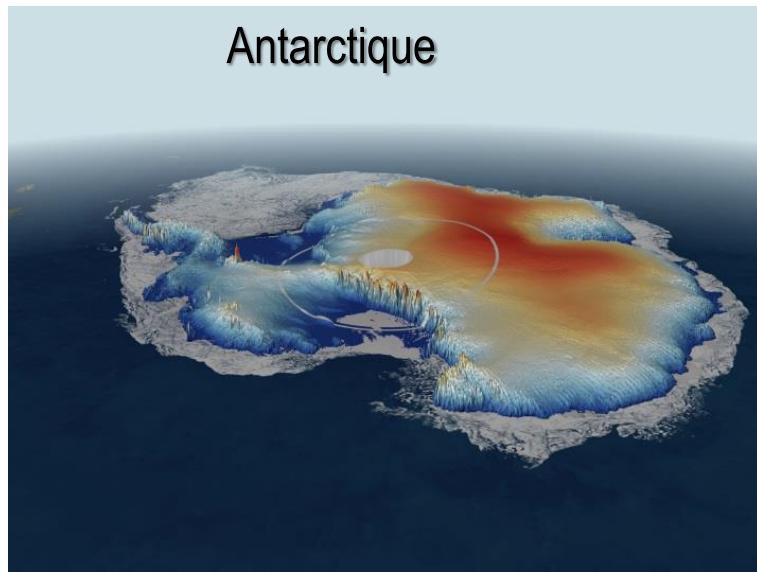
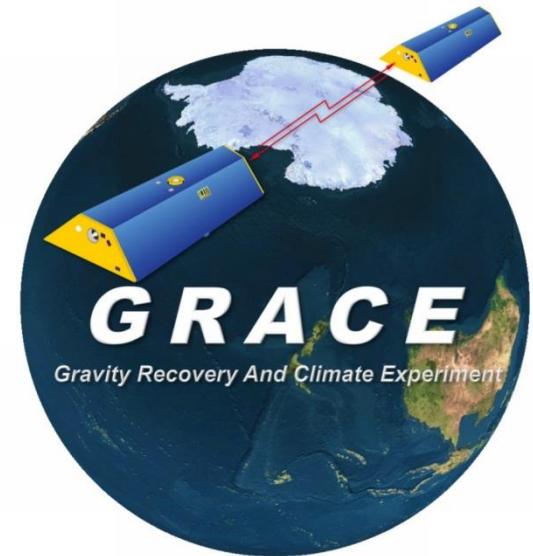


Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2018

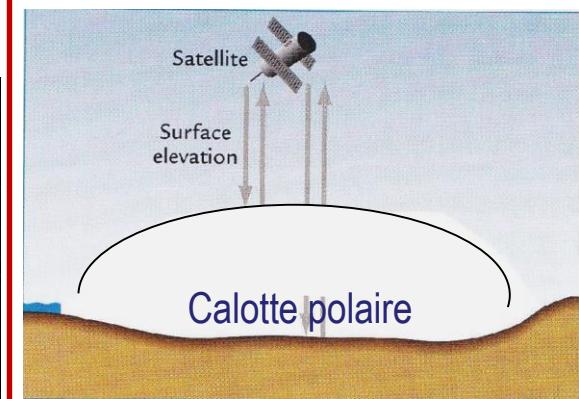
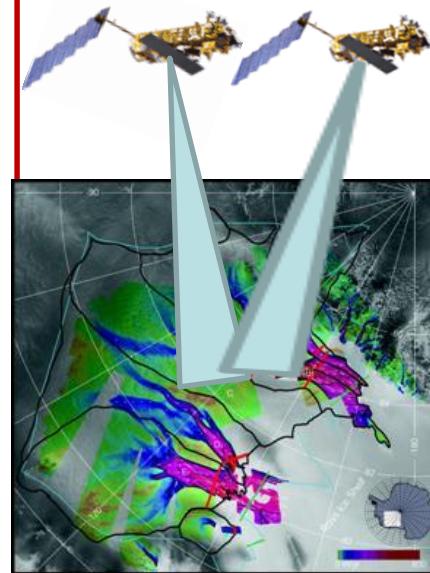
Variations de masse des calottes polaires mesurées par satellite



Gravimétrie
spatiale « GRACE »



Interférométrie radar



Altimétrie radar et laser

Depuis 2002, Gravimétrie Spatiale GRACE
→ mesure des variations spatio-temporelles des masses
à la surface de (et dans) la Terre (résolution: 1 mois, 300 km)



Meaurement Principle

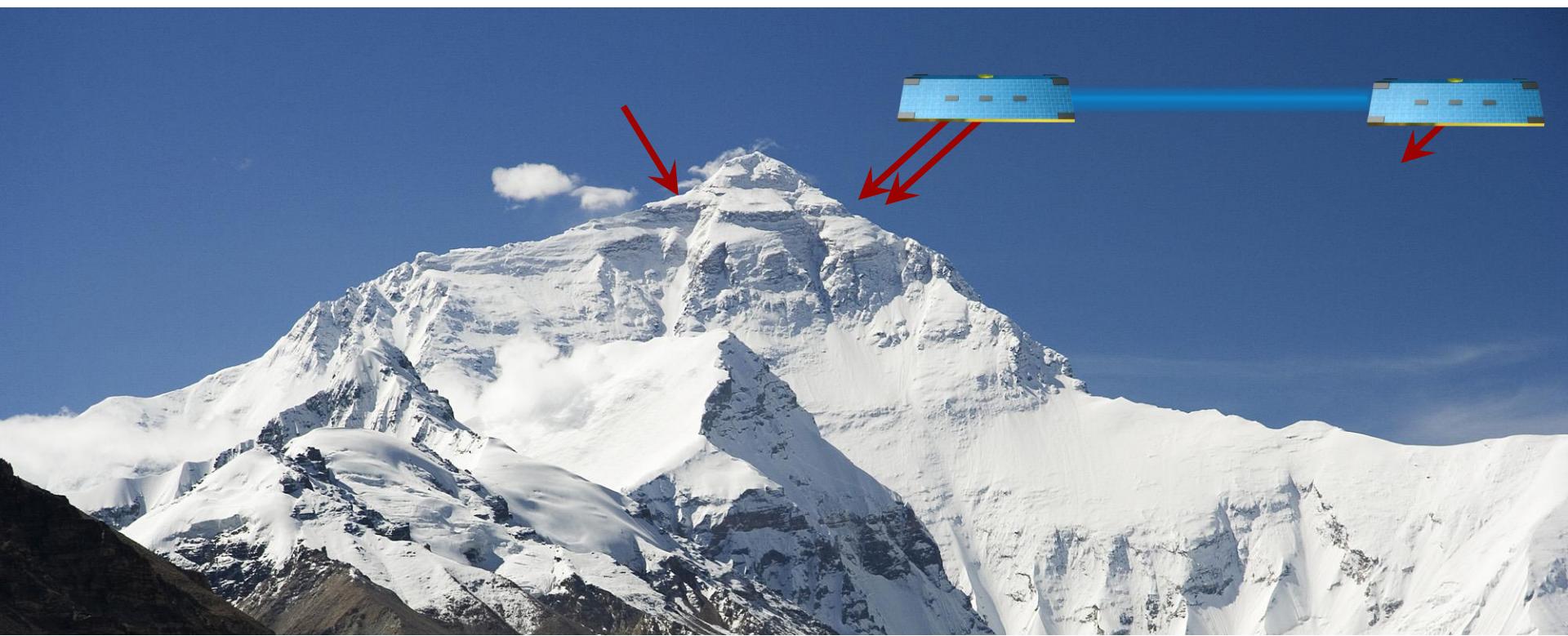


European Gravity Service for Improved Emergency Management



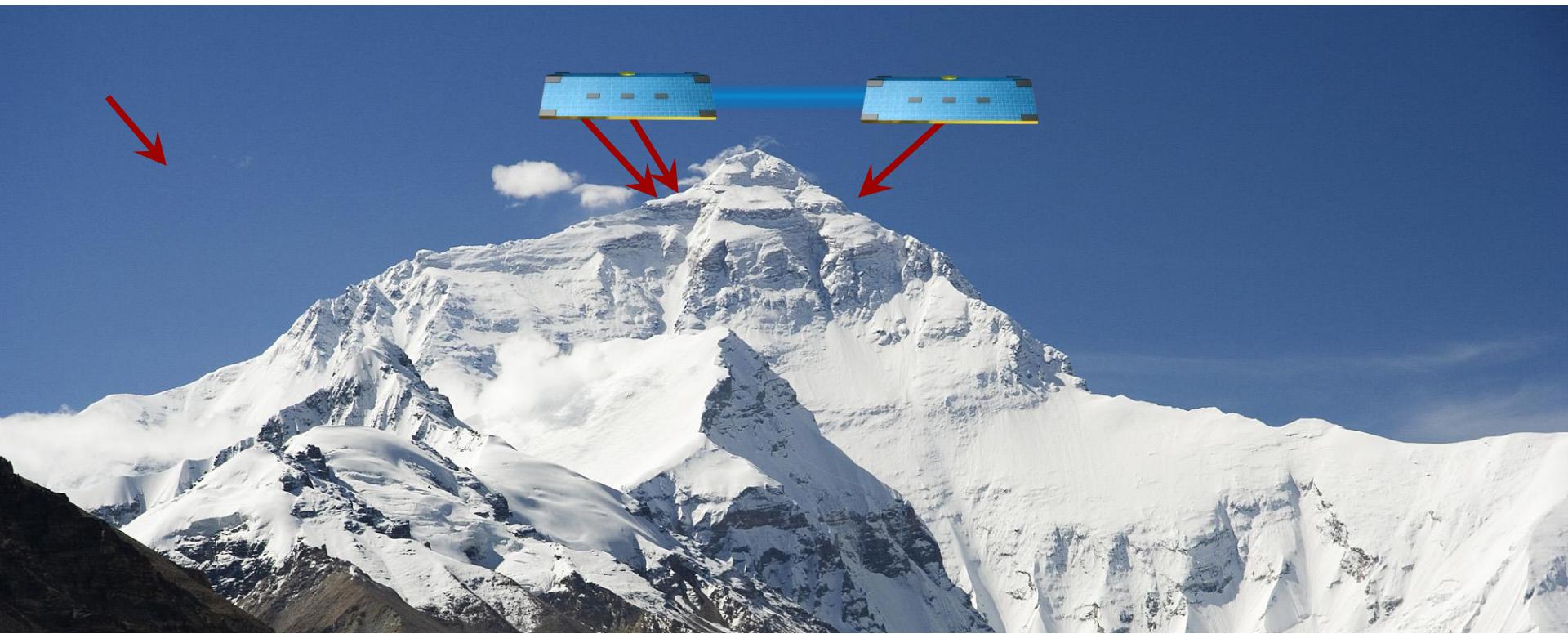
Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)

Meaurement Principle



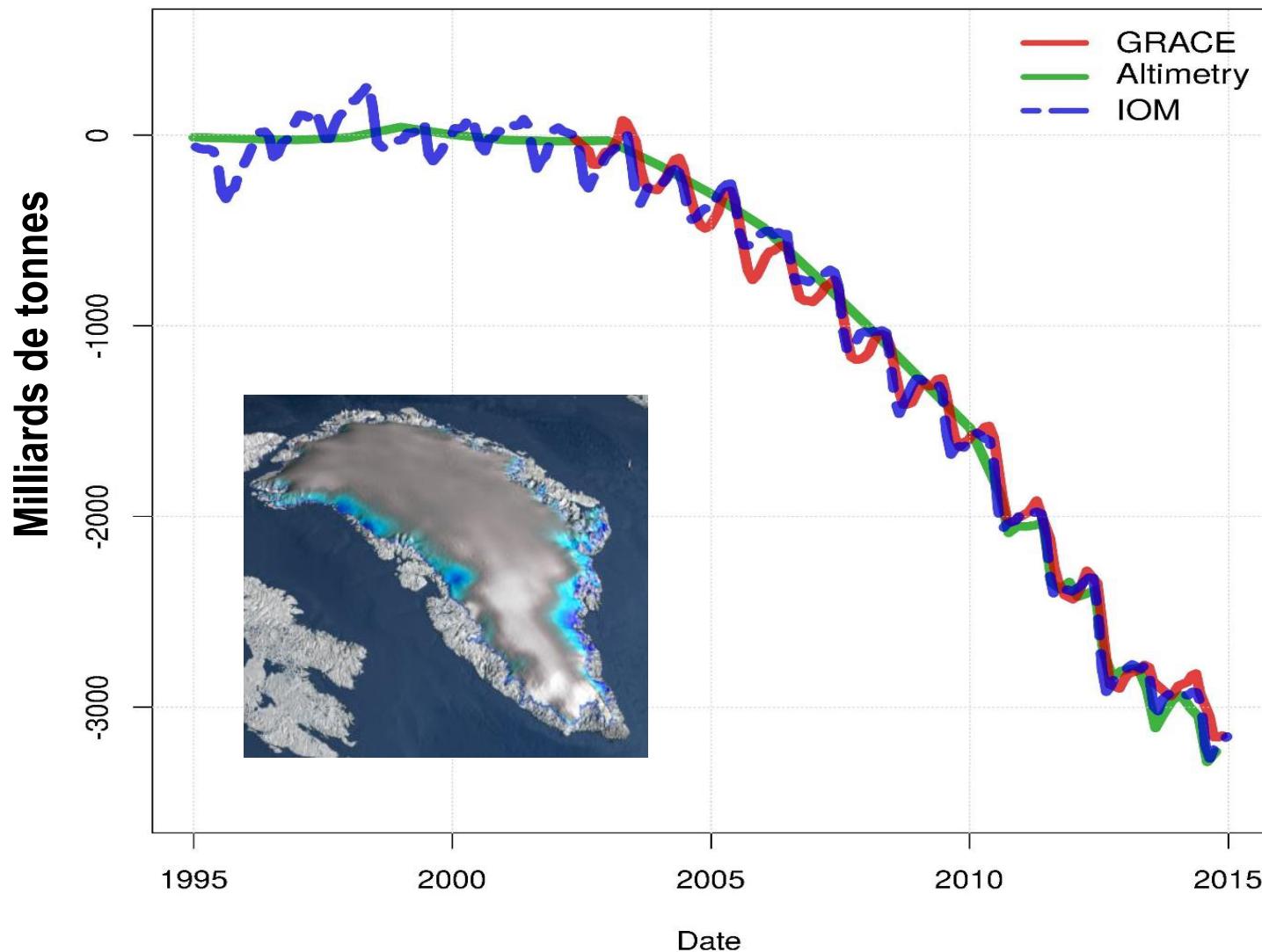
Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)

Meaurement Principle

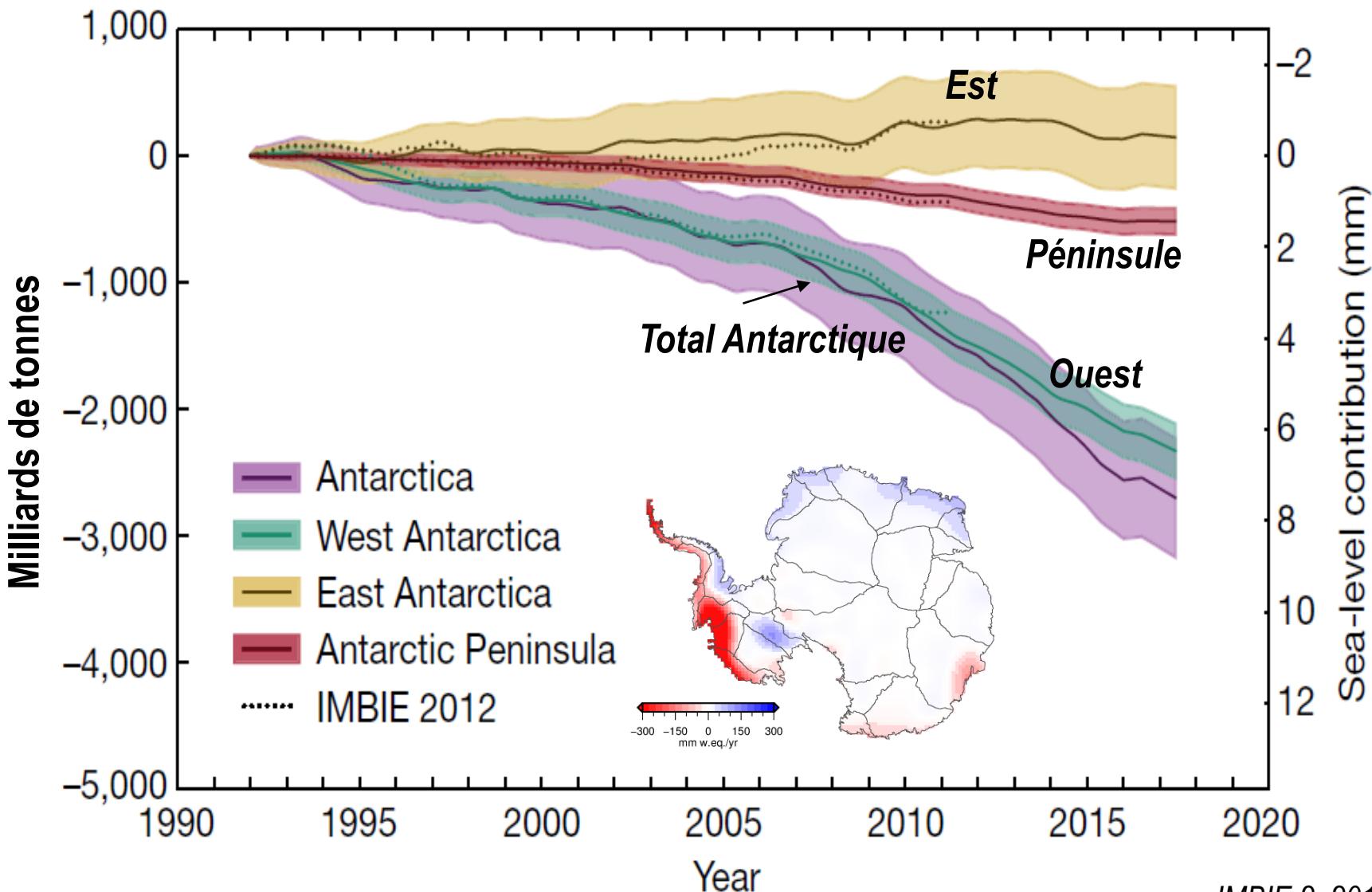


Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)

Perte de masse de glace du Groenland mesurée depuis l'espace (en milliards de tonnes)

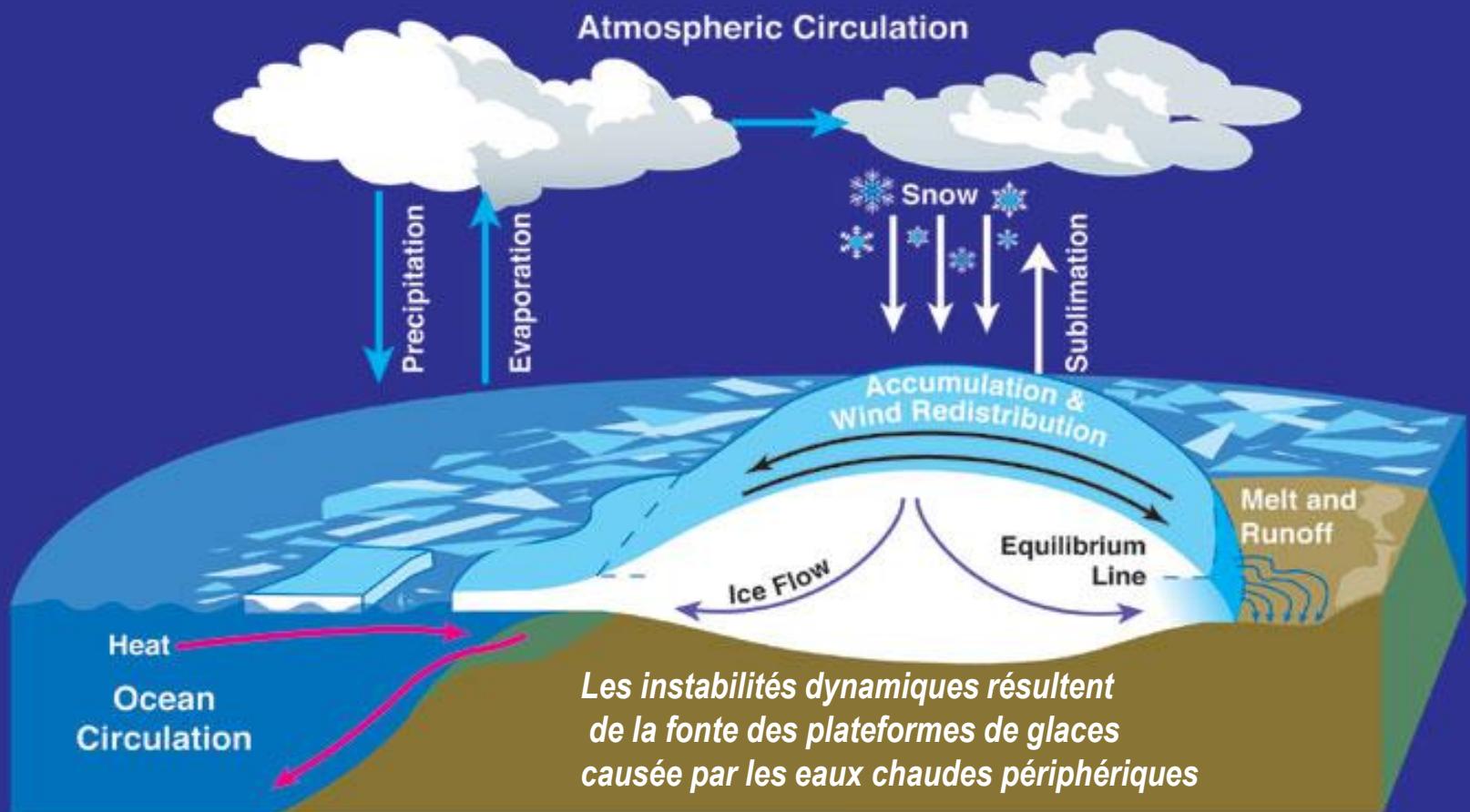


Perte de masse de glace en Antarctique mesurée depuis l'espace (en milliards de tonnes)

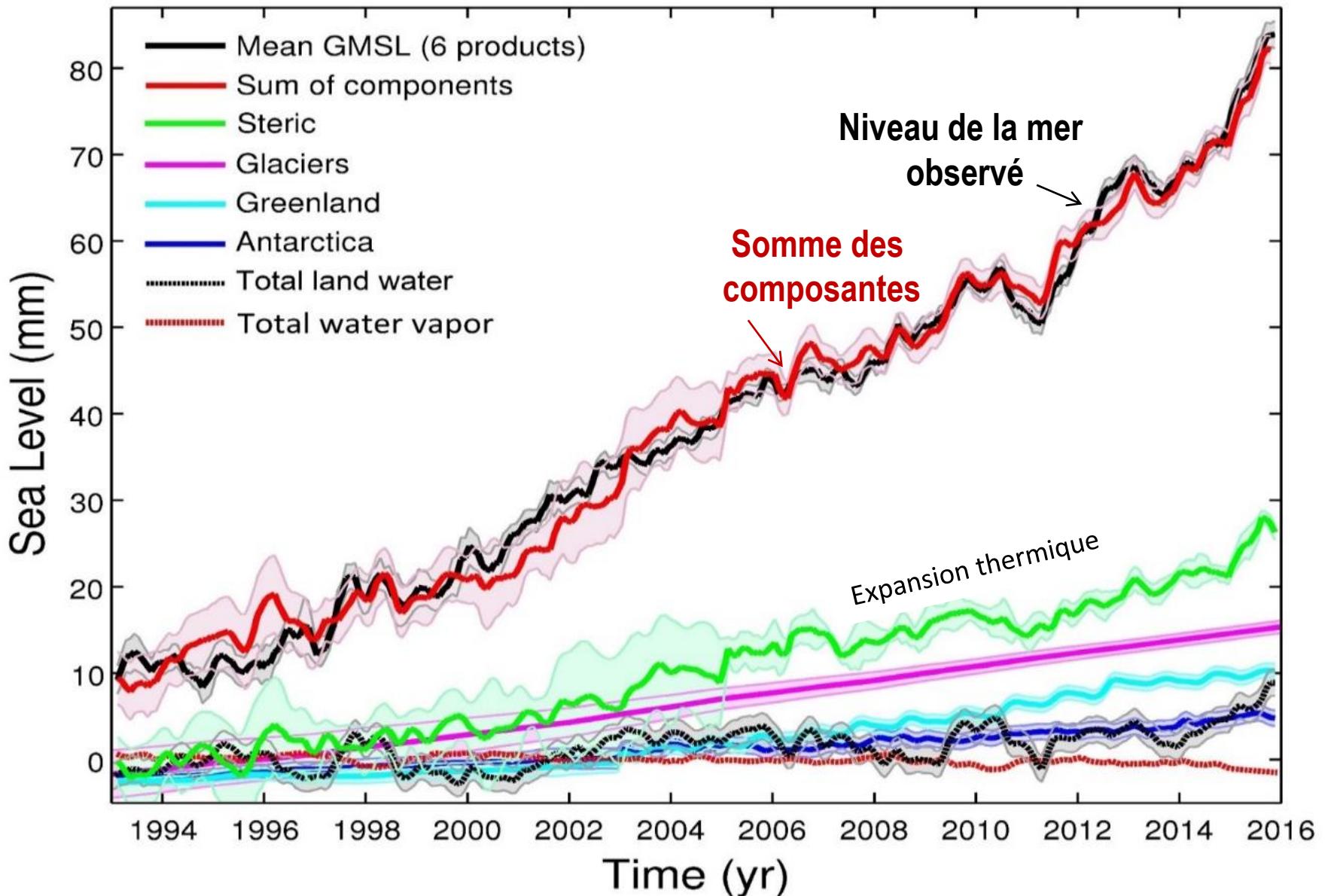


Variation de masse des calottes polaires

= variation de masse en surface (accumulation/ablation)
+ écoulement des glaciers côtiers dans la mer (effet dynamique)

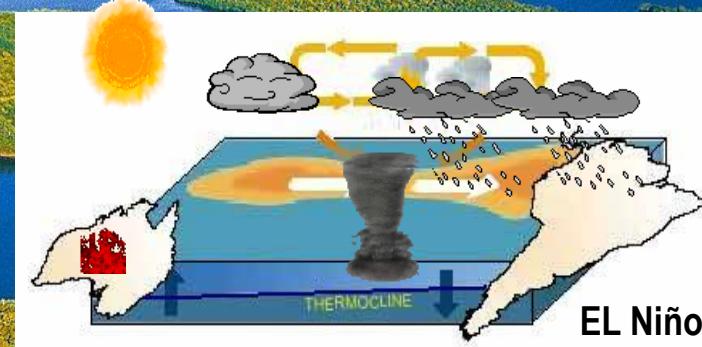


Bilan du niveau de la mer 1993- présent



Variations du stock d'eau sur les continents

- Variabilité interne
du système climatique



- Activités humaines



Barrages sur les fleuves
→ *Baisse de la mer*



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

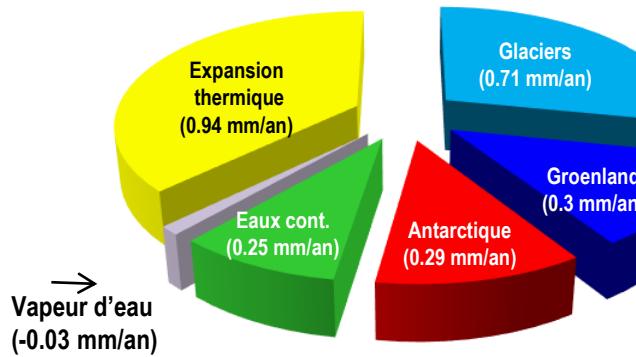
A quoi servent ces études de bilan?

- Mieux comprendre les processus en jeu et suivre l'évolution temporelle des composantes (accélération)
- Intercalibrer des systèmes d'observations indépendants (altimétrie, Argo, GRACE, ...)
- Déterminer les composantes 'manquantes' (ex océan profond >2000m)
- Apporter des contraintes sur le déséquilibre énergétique du système climatique
- Valider les modèles simulant le climat du futur

Contributions individuelles à la hausse actuelle du niveau moyen de la mer

1993-2004

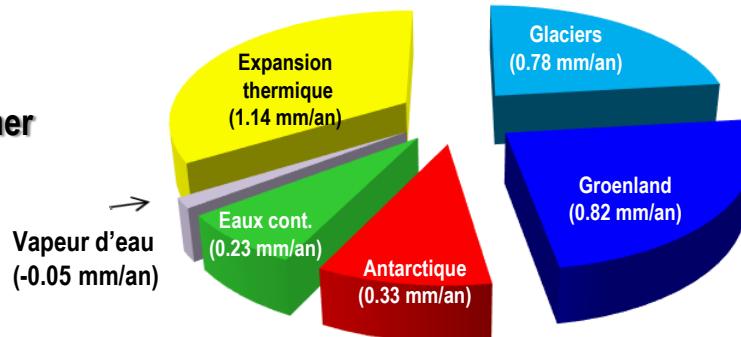
Hausse de la mer
= 2.7 mm/an



Total glaces continentales : 48%

2004-2015

Hausse de la mer
= 3.5 mm/an



Total glaces continentales: 55%

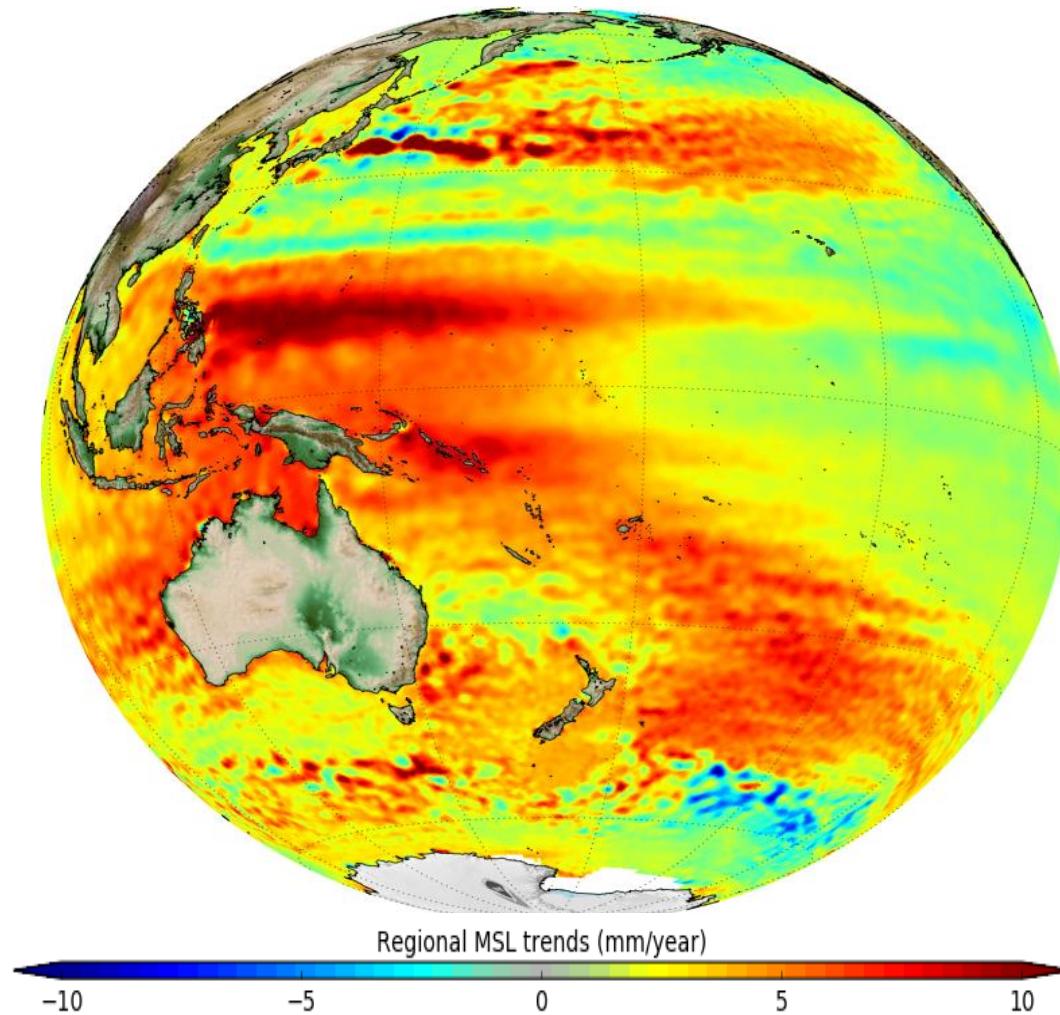
**ACCELERATION DE LA HAUSSE DE LA MER
DUE A LA FONTE ACCELEREE DU GROENLAND**

Source: LEGOS

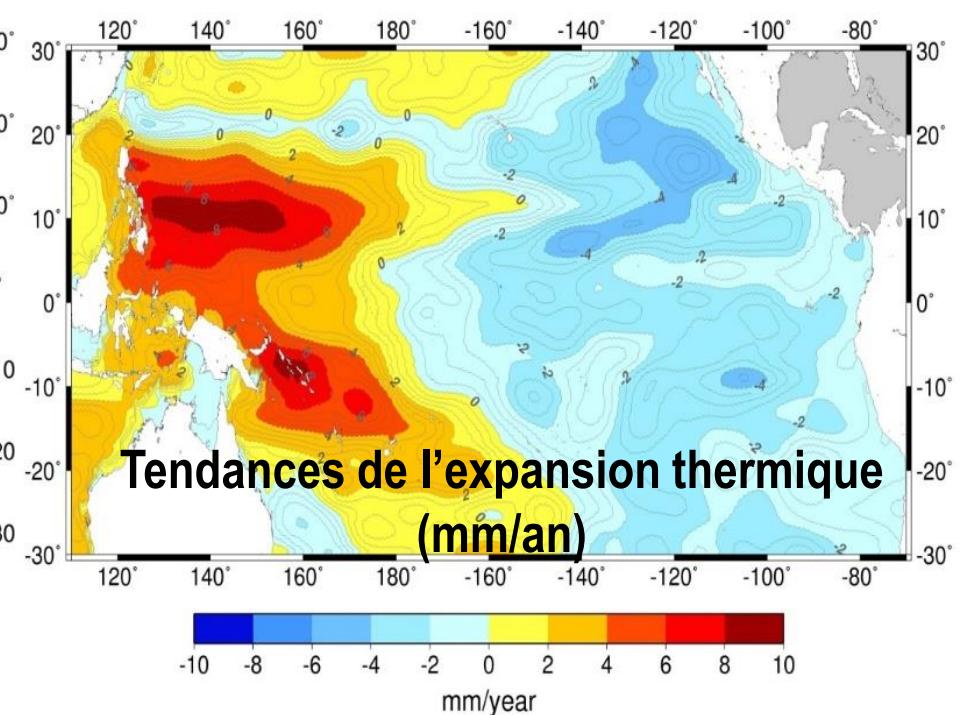
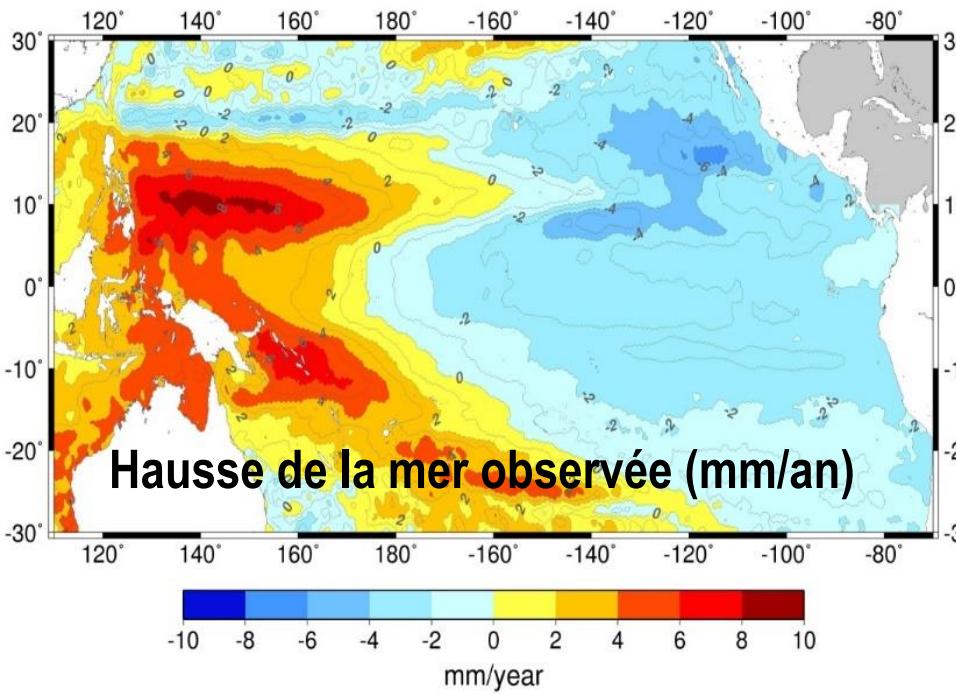
Sait-on expliquer la variabilité régionale de la mer?

Tendances régionales du niveau de la mer

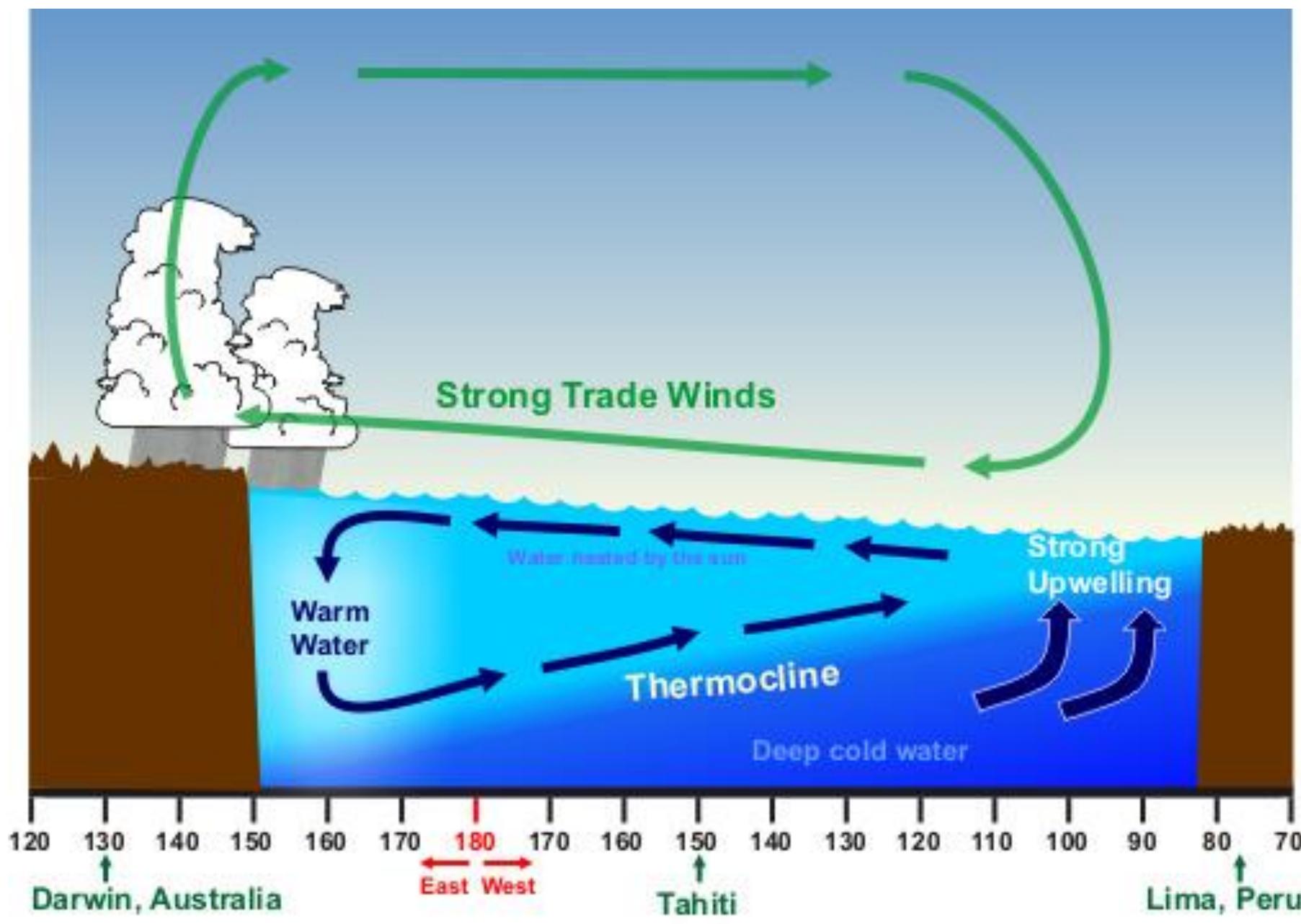
Rates of sea level rise observed by satellite altimetry over Jan. 1993- Dec.2015



Tendances du niveau de la mer et de l'expansion thermique dans le Pacifique tropical ouest (1993-2015)



Cause : intensification des alizés → approfondissement de la thermocline

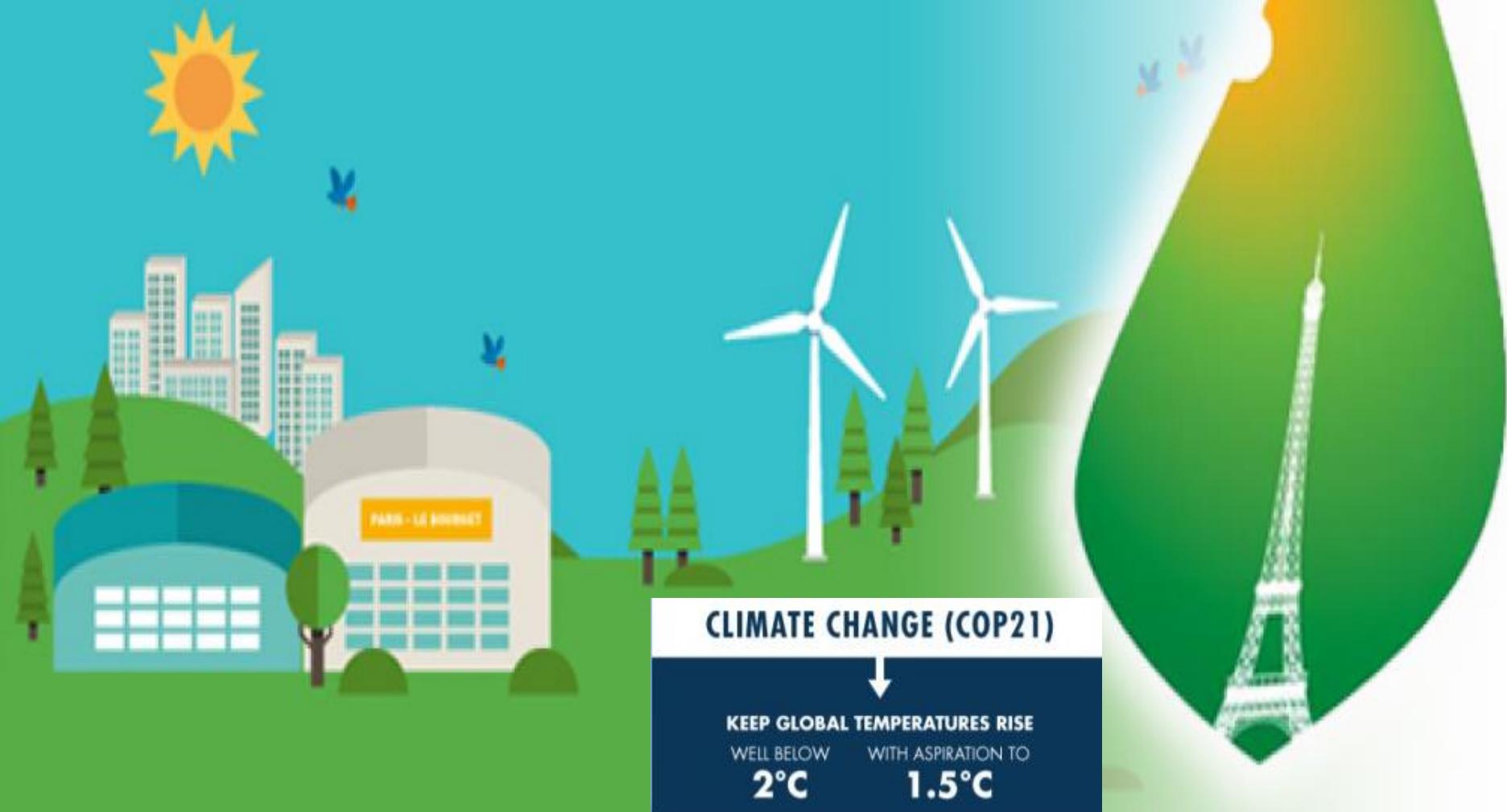


La mer va-t-elle continuer à monter?

De combien?

Cela dépend directement de nos émissions de gaz à effet de serre et de l'augmentation de la température moyenne de la Terre...

PARIS2015 COP21

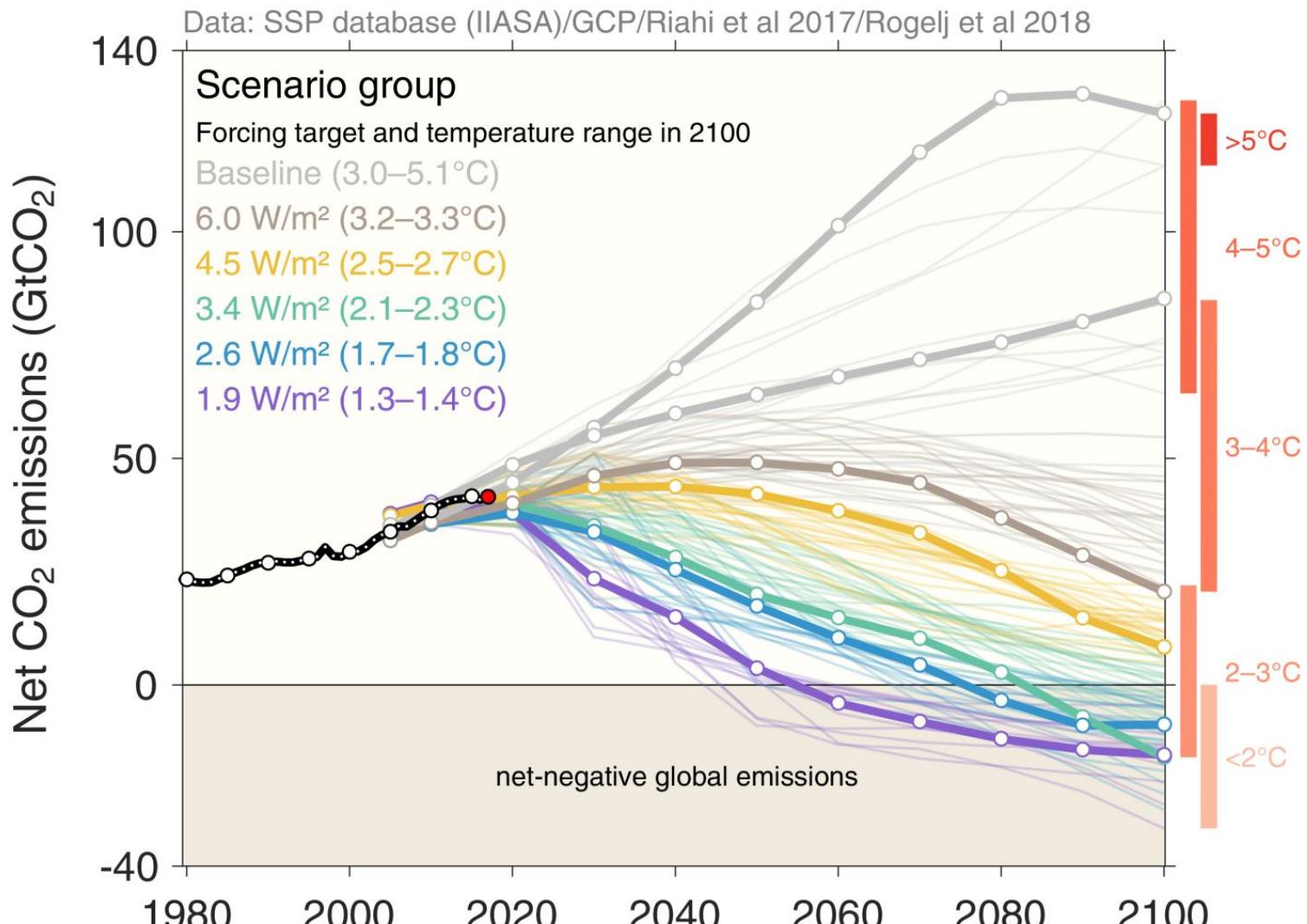


Conférence des Nations Unies sur le climat (COP 21); Paris, 30 novembre-11 décembre 2015

- 195 états
- Objectif : réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement en deçà de +2°C en 2100 (par rapport à 1850)
- 2°C, seuil à ne pas dépasser...

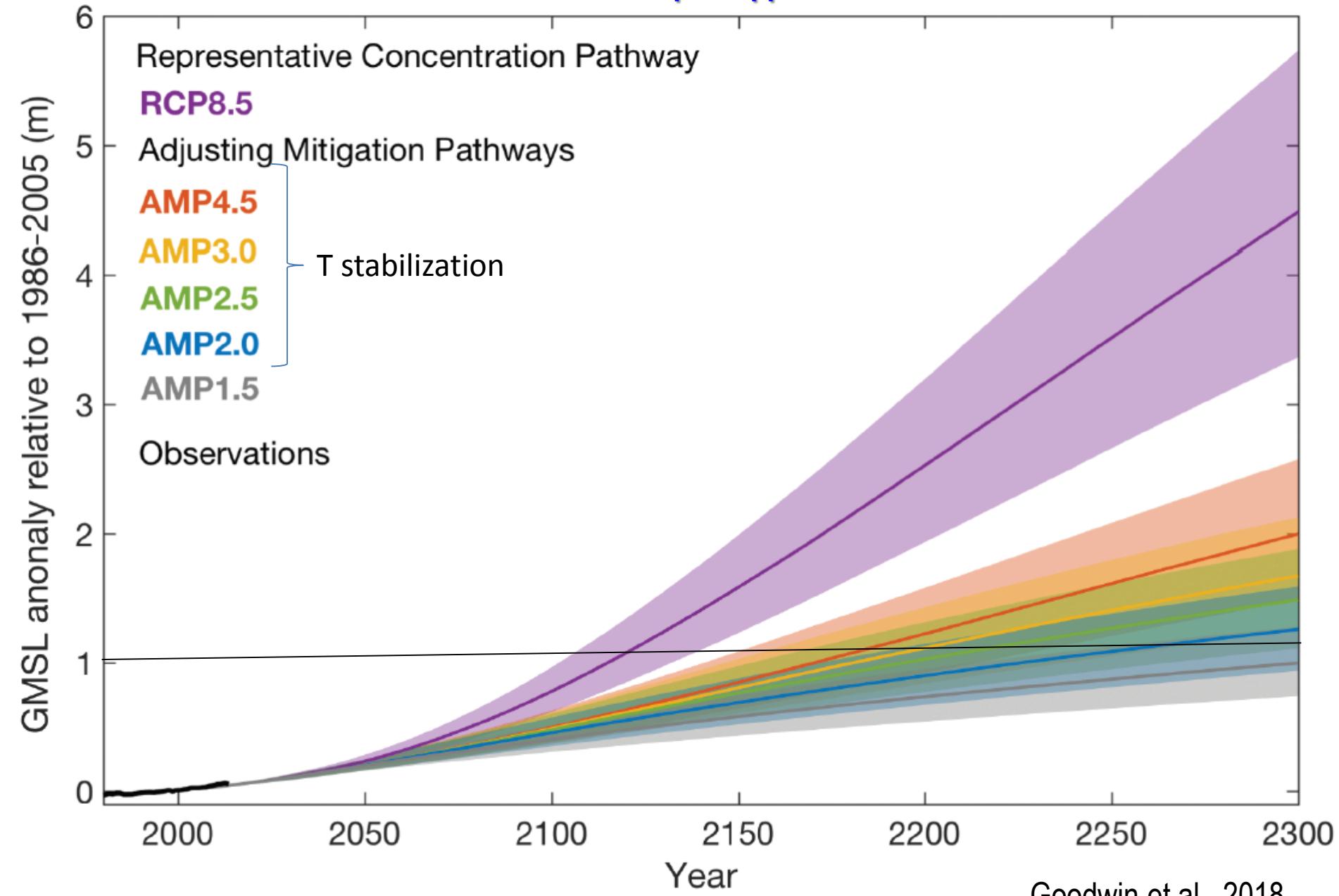


Différents scénarios d'émissions futures de GES



Global Carbon Project

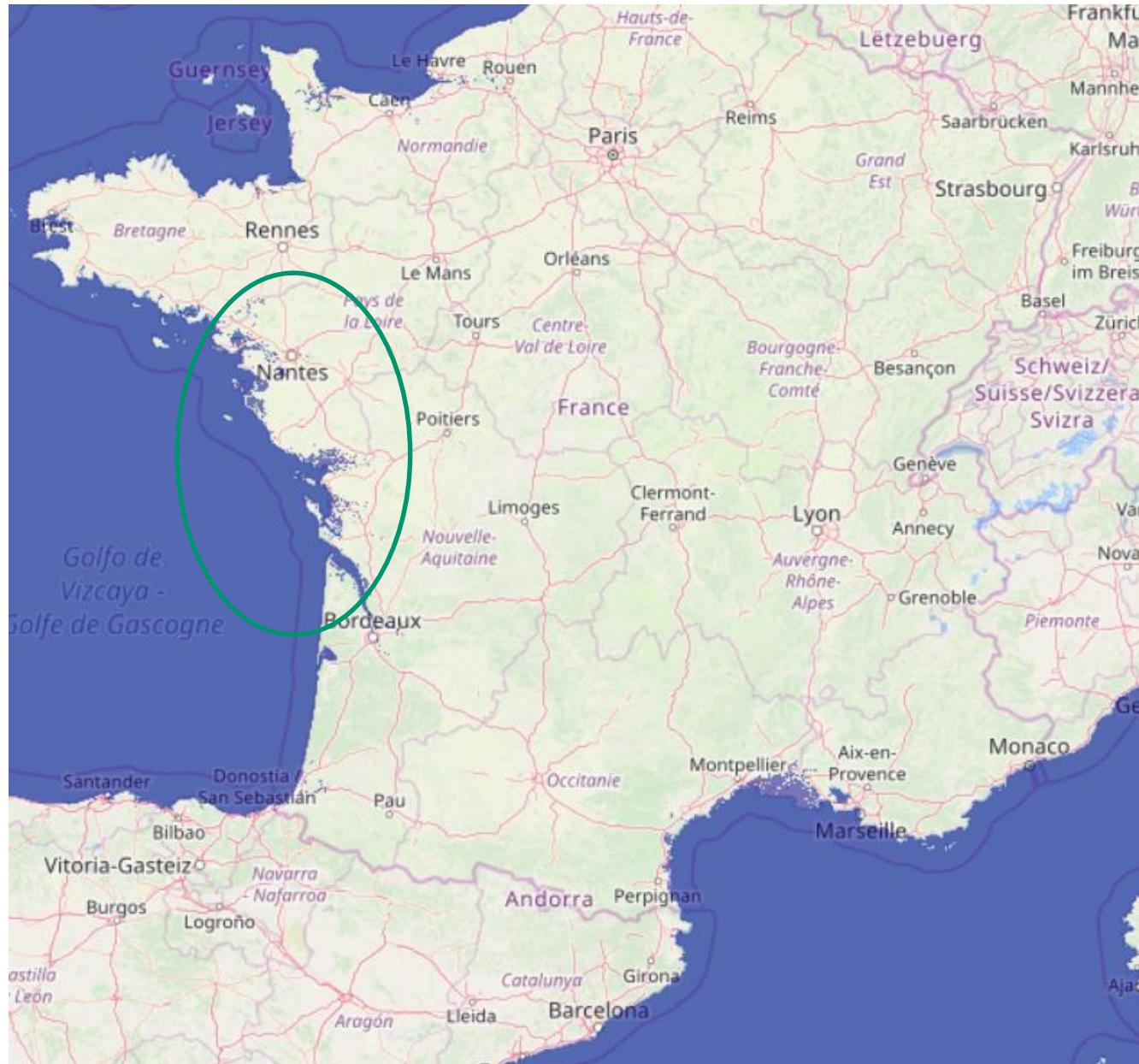
Scénarios d'élévation future de la mer par rapport au début des années 2000



Zones inondées si la mer monte de +1 m



Zones inondées si la mer monte de + 1m en 2100



Au-delà du 21^{ème} siècle....

De nombreux aspects du changement climatique persisteront pendant plusieurs siècles

même si on stoppait aujourd’hui les émissions de Gaz à Effet de Serre!

- **20% du CO₂ émis restera dans l'atmosphère pendant au moins 1000 ans**
- **Le niveau de la mer continuera à monter pendant plusieurs siècles à cause de la grande inertie thermique de l'océan et de la longue durée de vie du dioxyde de carbone**

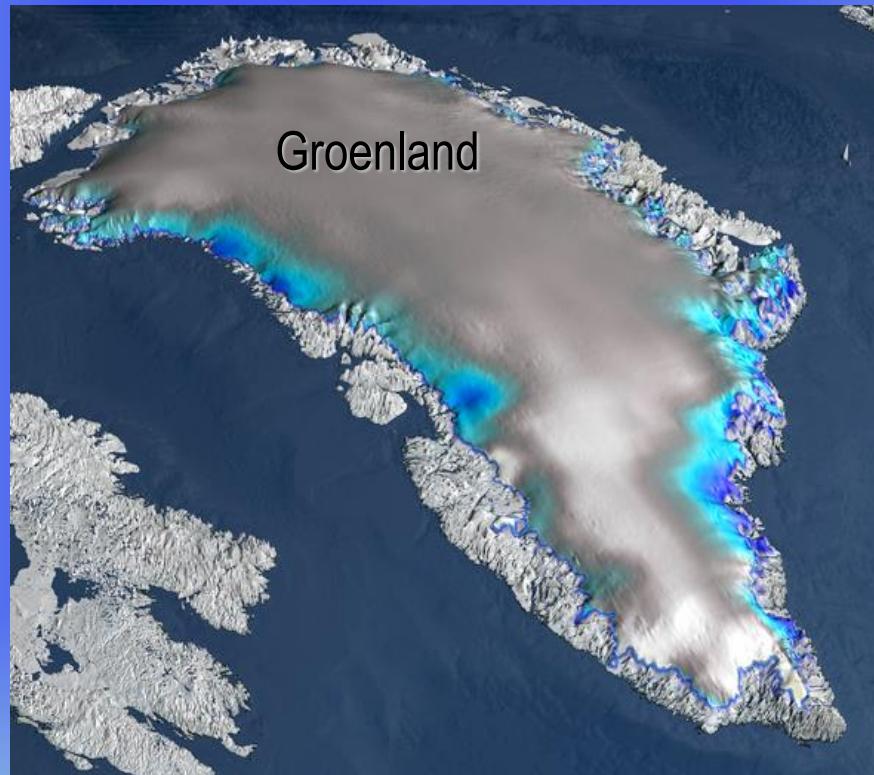
Au dessus d'un certain seuil de réchauffement (entre 2°C et 4°C)

La perte de glace du Groenland pourrait s'emballer:

la calotte groenlandaise

pourrait disparaître totalement en quelques siècles

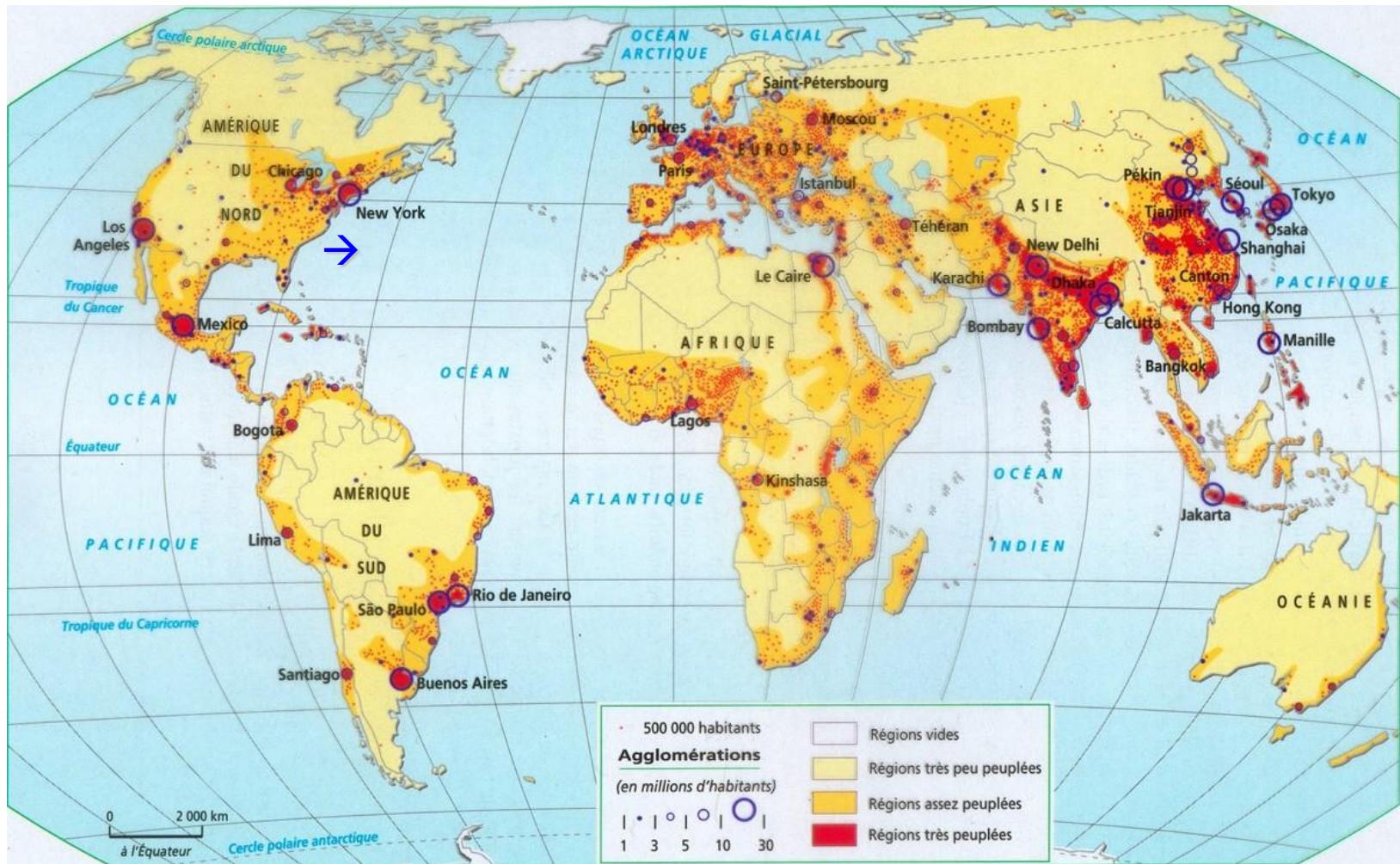
(→ 7 m de hausse du niveau de la mer)



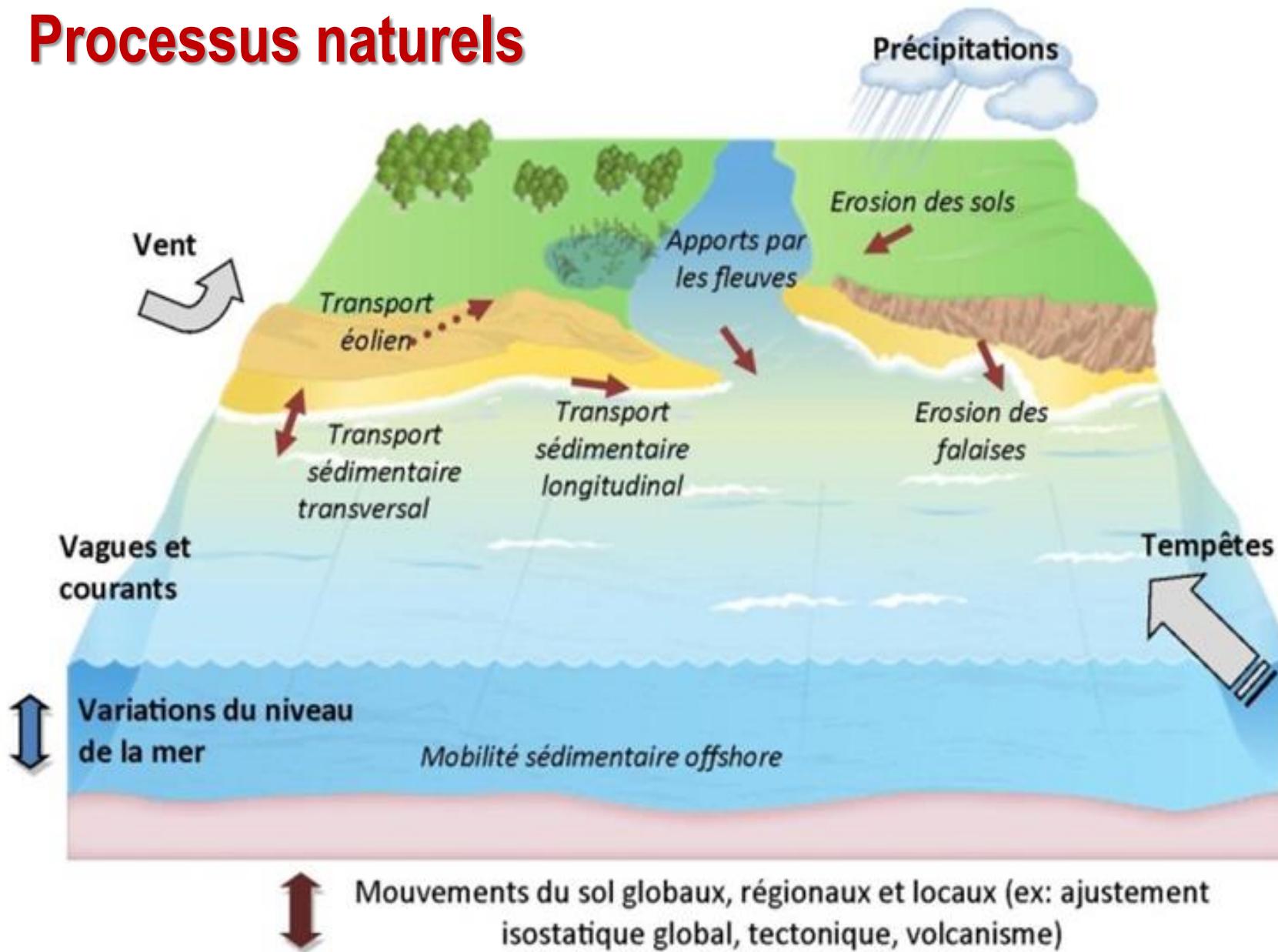
Nouvelles questions scientifiques; nouveaux défis
→ **Hausse de la mer dans les zones côtières**

Les zones côtières

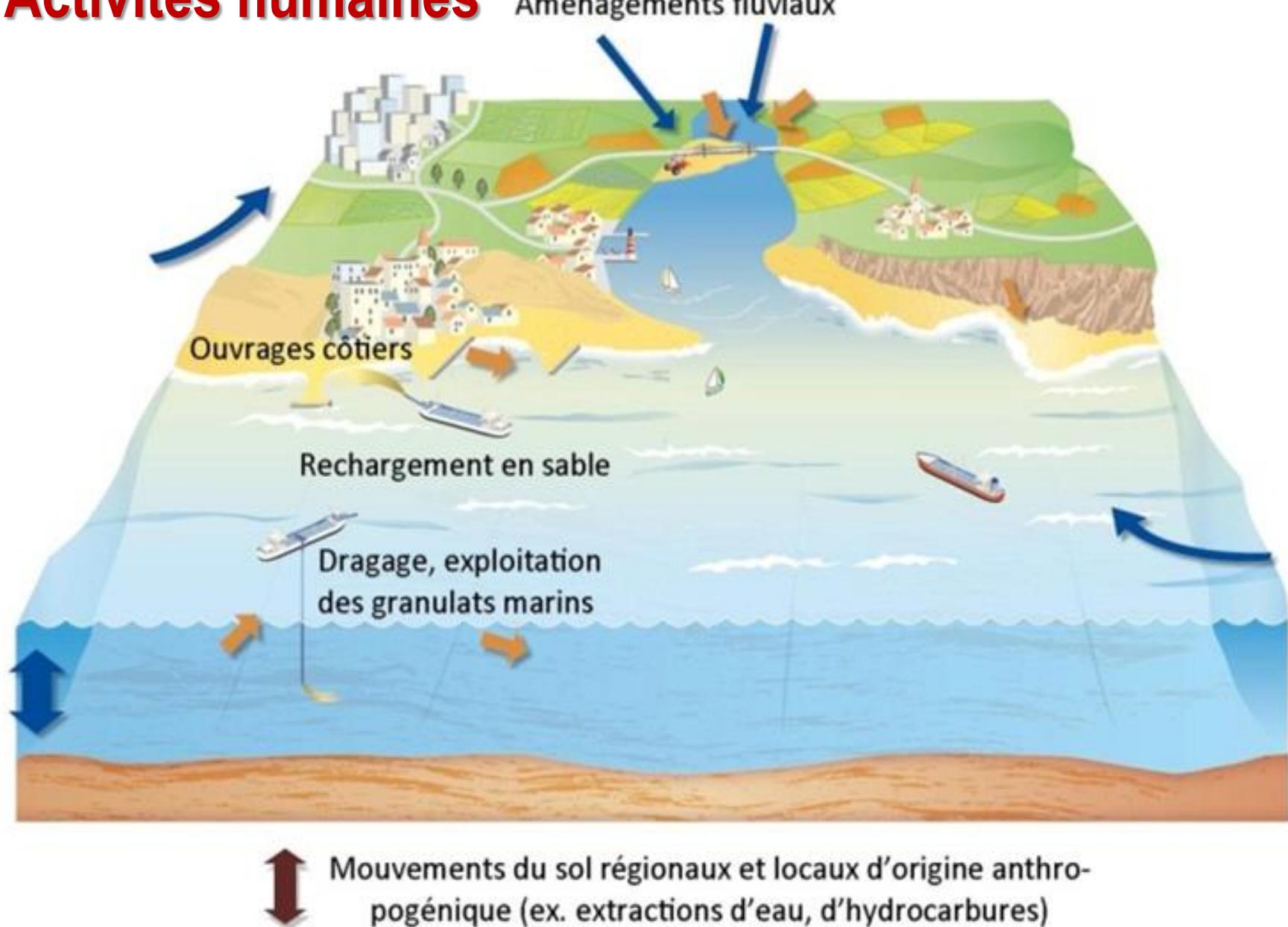
- 10% de la population mondiale (altitude <10 m au dessus du niveau de la mer) → 600 millions de personnes (1, 5 milliard en 2060)
- La moitié vit dans des zones urbaines (11 des 15 plus grandes mégapoles sont situées au bord de la mer)



Processus naturels



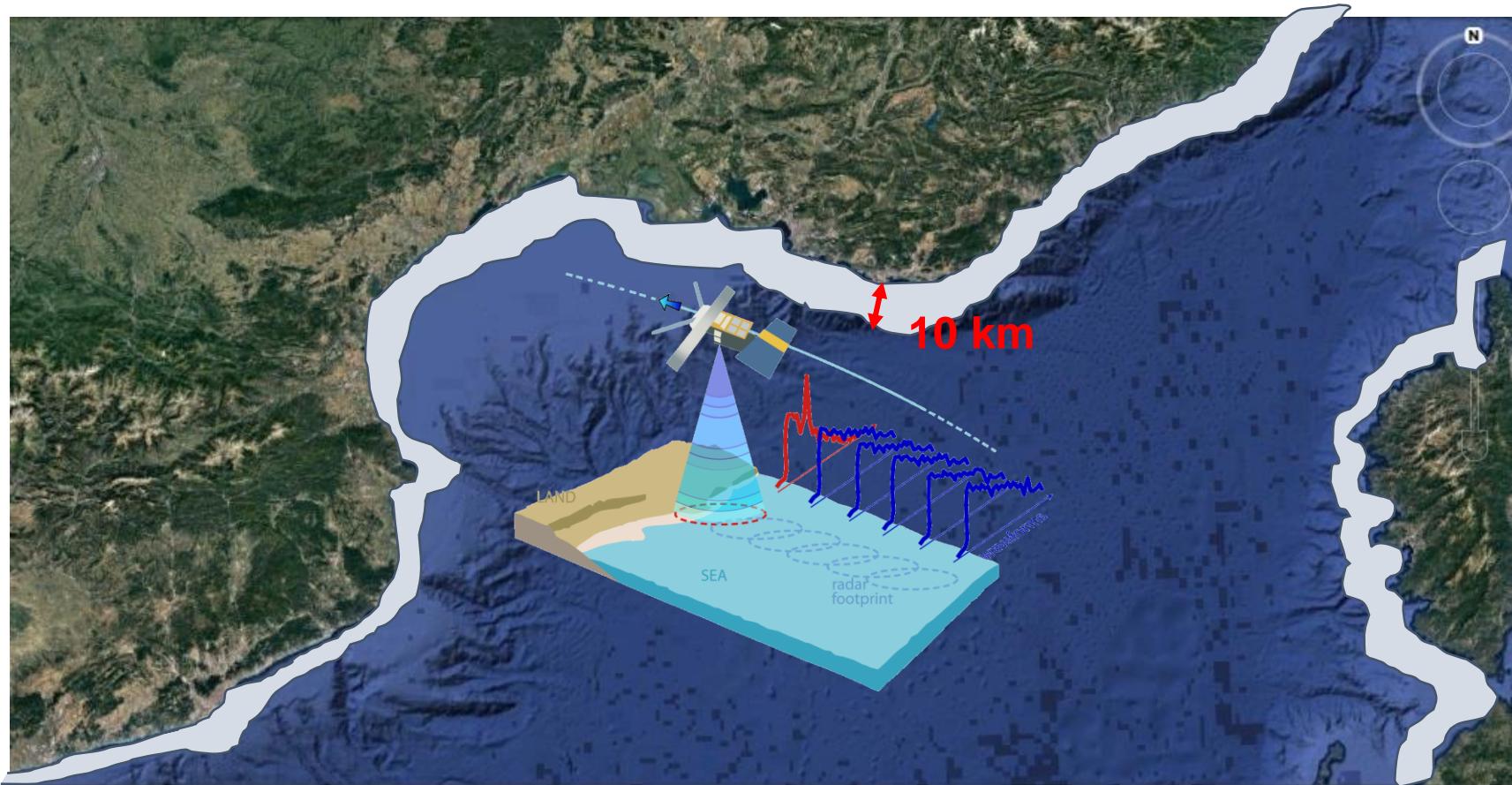
Activités humaines



Erosion des côtes: 25% des plages sableuses; en Europe, 75% des littoraux

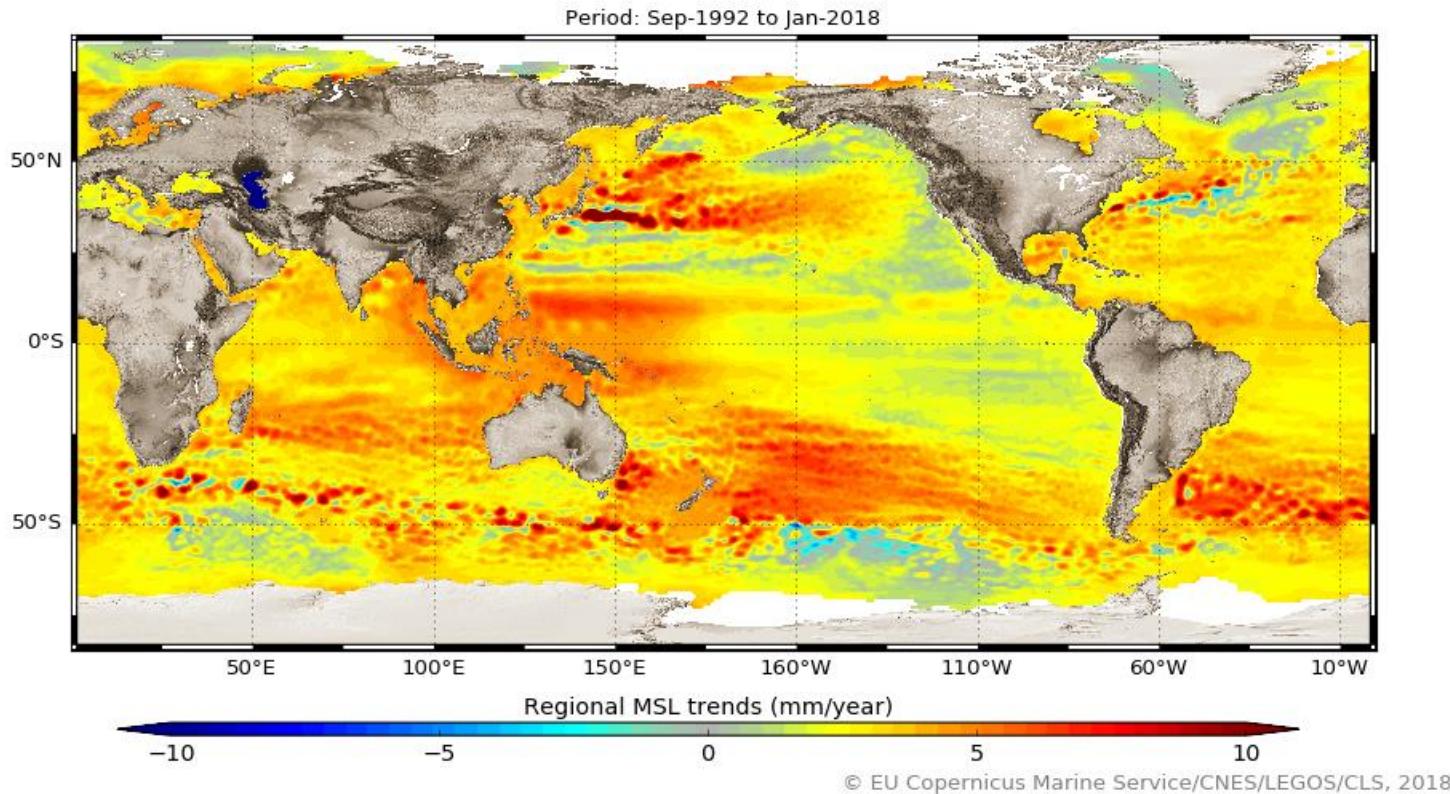


- Mais on ne sait pas quels sont les rôles respectifs des phénomènes naturels et des activités humaines dans le recul du trait de de côte et l'érosion du littoral



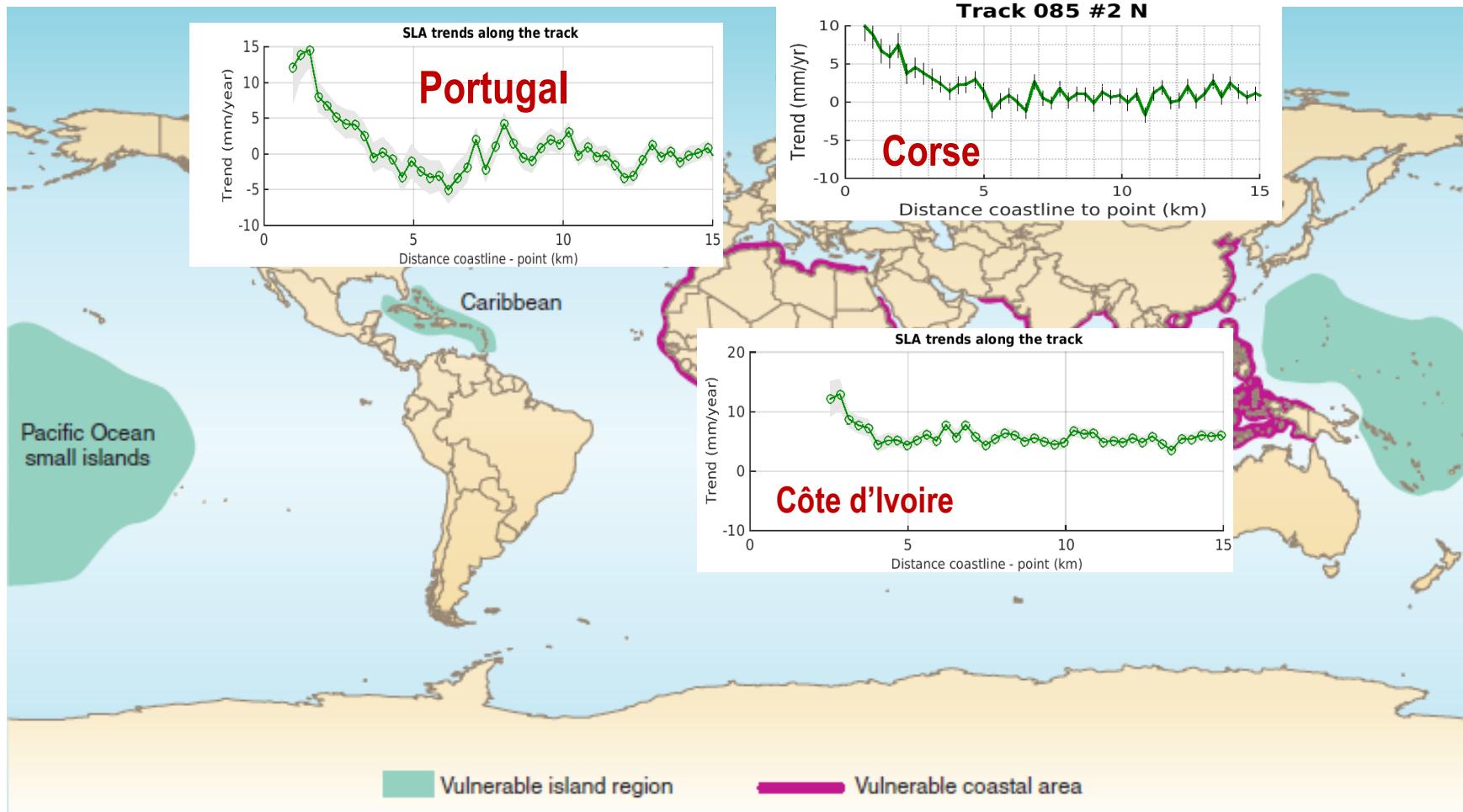
Et on ne sait toujours pas répondre à la question:
« Le niveau de la mer à la côte monte-t-il à la même vitesse qu'au large ? »

Tendances régionales de la hausse de la mer (1992-2018)



La hausse du niveau de la mer à la côte n'est pas juste une extrapolation de la hausse au large → certains phénomènes côtiers viennent se superposer à la hausse moyenne globale et sa variabilité régionale (ex. courants côtiers, tendances des vagues, apport d'eau douce par les rivières dans les estuaires, ...)

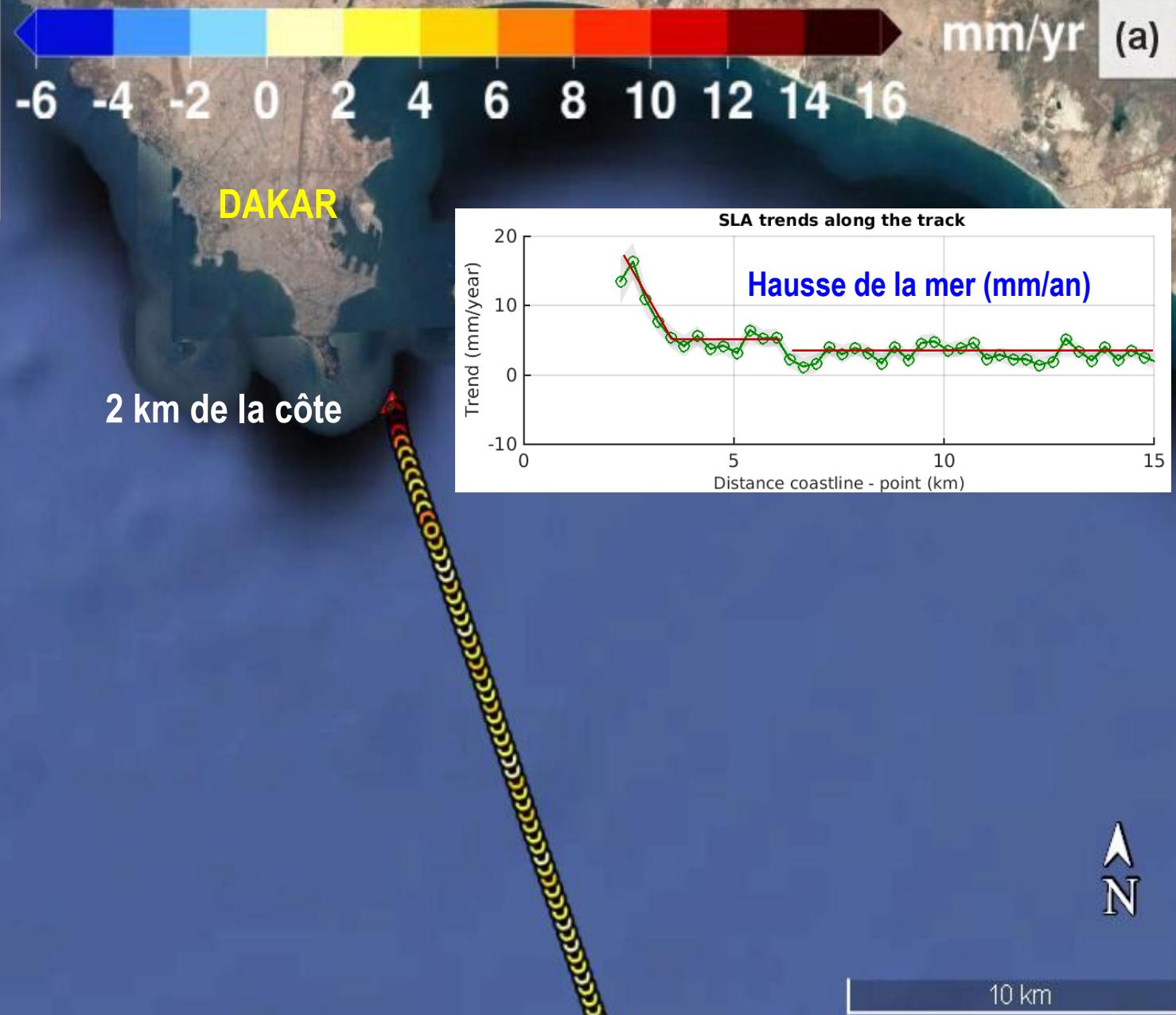
Mesure de la hausse de la mer à la côte → nouvelles études en cours



J1+J2 SLA trends

Track 174

July 2002 - June 2016



Google Earth

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Image © 2018 DigitalGlobe

Afrique de l'ouest



Ce qui compte à la côte:

→ Variation totale de la mer 'relativement' à la croûte terrestre

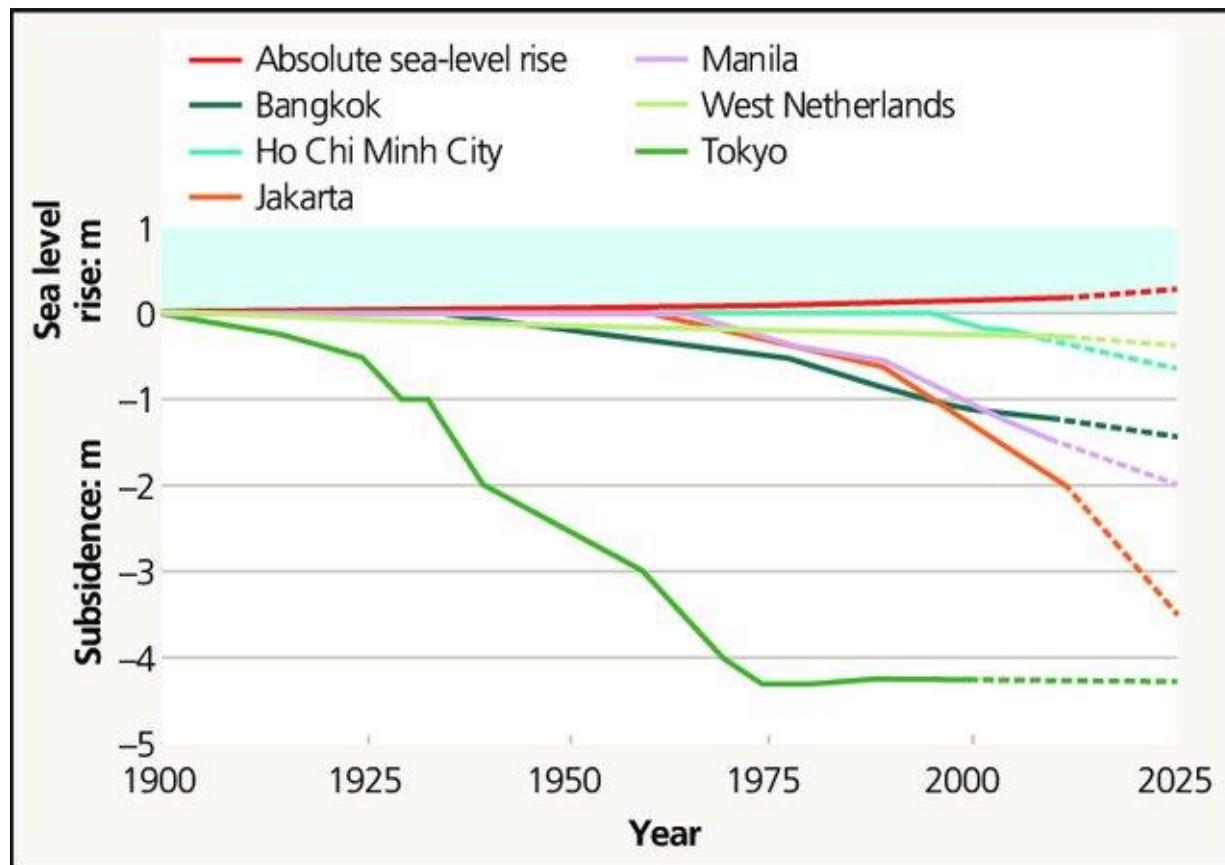
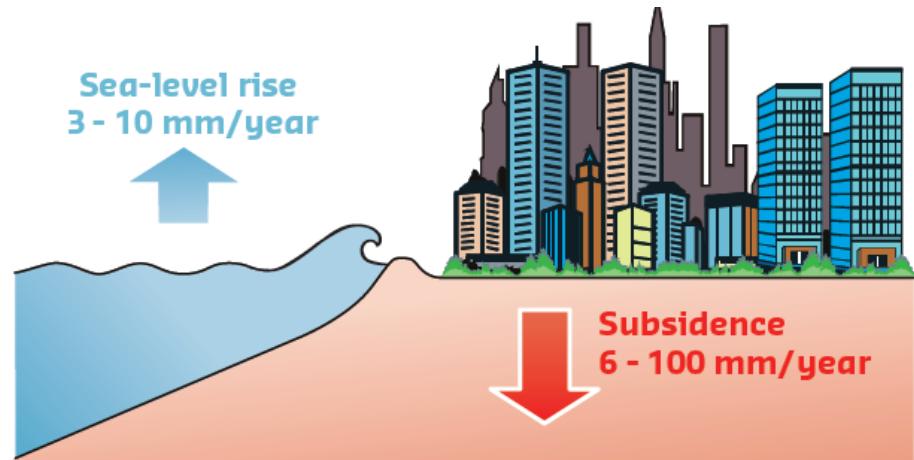


\sum (*hausse moyenne globale*
+ *tendances régionales*
+ *dynamique local océanique locale*)*
+ **mouvements verticaux du sol**

* Accessible par altimétrie côtière

Mouvements verticaux du sol

→ autre source de variation du niveau de la mer à la côte



Pour conclure, ce que l'on sait aujourd'hui:

- ❖ La mer monte (vitesse moyenne 3 mm/an depuis 1993)
- ❖ La mer ne monte pas de manière uniforme :
→ dans certaines régions, la hausse est 3 fois supérieure à la moyenne globale
- ❖ On sait bien quantifier les différentes contributions à la hausse actuelle de la mer
- ❖ La hausse de la mer s'est accélérée au cours de la dernière décennie
- ❖ La fonte accélérée du Groenland est largement responsable

Pour conclure, ce que l'on sait aujourd'hui (suite) :

- ❖ La mer va continuer à monter pendant plusieurs siècles
- ❖ De combien? Cela dépend de nos émissions de gaz à effet de serre
- ❖ Plus on attendra pour mettre en place l'accord de Paris 2015, plus la Terre se réchauffera et plus la mer montera....

- **2°C de hausse de la température moyenne de la Terre (par rapport à 1880) →**
Au rythme actuel des émissions, seuil atteint vers 2040

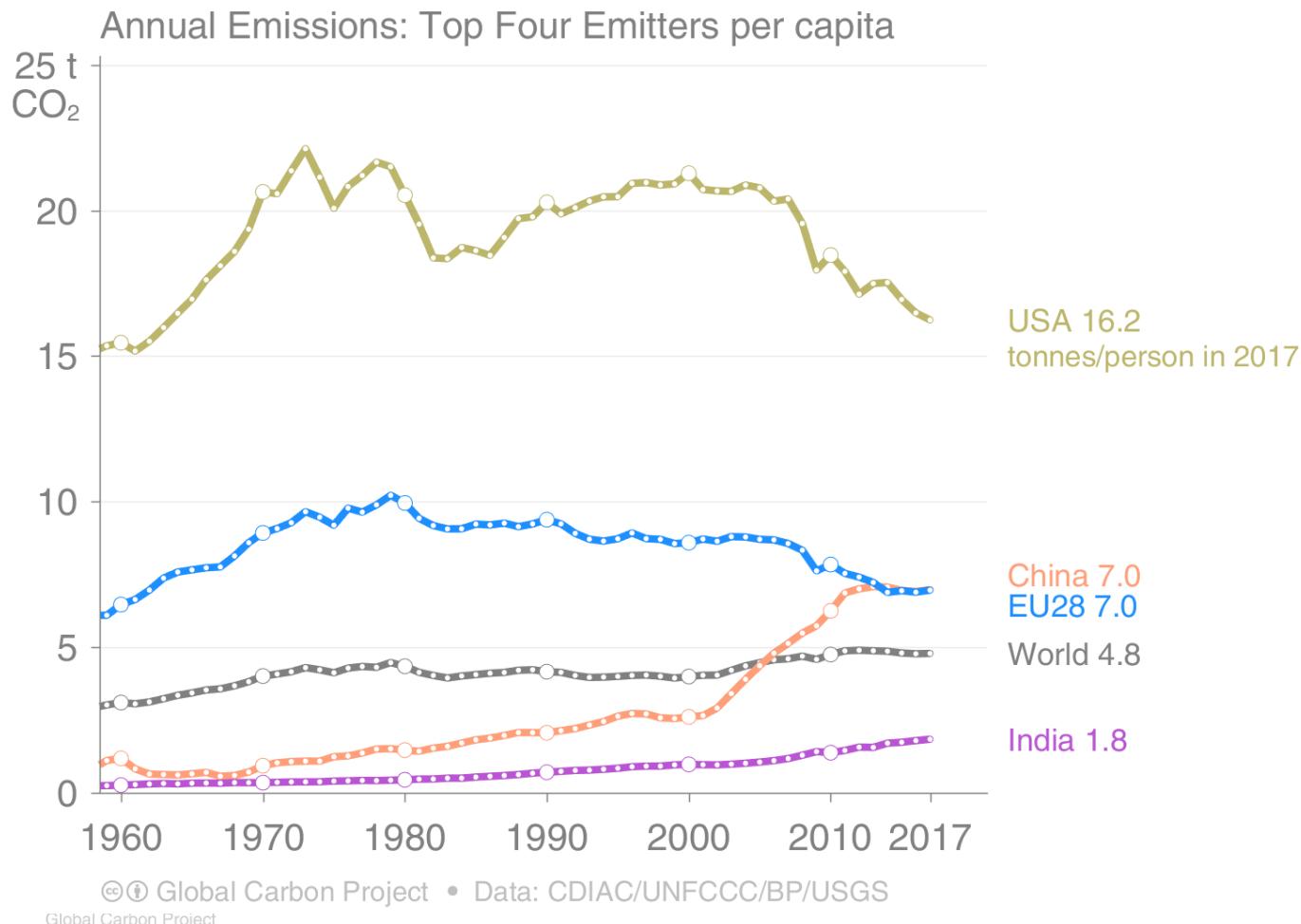


**Pour rester au dessous de 2°C, la valeur cumulée des émissions de CO₂ ne doit pas dépasser 3200 GtCO₂,
Déjà émis : 2000 GtCO₂; Reste 1200 GtCO₂.....**



Correspond à 1.7 tonnes CO₂/habitant

Emissions de CO₂ par habitant en tonnes/an



Source: Global Carbon Project 2018; Le Quéré et al. 2018

Atténuation du réchauffement climatique au niveau de 2°C

Objectifs de la COP21

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre
 - d'environ 50% en 2050
 - émissions quasi nulles vers 2070-2080

Quelles solutions pour limiter le réchauffement tout en maintenant un niveau de développement satisfaisant?

- Augmentation des énergies renouvelables
- Captage du CO₂ à la source et stockage
- Réduction des pertes d'énergie (résidentiel, industrie, ...)
- Réduction de la déforestation; reboisement , ...
- Réduction des déchets
- Transports sans carbone
- Nouveaux systèmes urbains (les villes génèrent 70% des émissions de CO₂)
- Modification des modes de vie..

Besoin d'innovation dans l'ensemble de l'économie

- De toute façon, tôt ou tard il faudra utiliser de l'énergie « décarbonée »
- Les ressources fossiles ne sont pas inépuisables
- Reste environ 50 ans de pétrole, 60 ans de gaz, 100 ans de charbon
- Autre chiffre d'experts : reste environ 2000 Gt CO₂ (équivalent émissions CO₂)
- Le changement climatique nous oblige juste à anticiper
- *Un défi parmi d'autres* : accès à l'eau, sécurité alimentaire (comment nourrir 9 milliards d'êtres humains en 2050?), réduction de la pauvreté...

**En septembre 2015, l'ONU adopte l'Agenda 2030
pour le Développement Durable**



Les 17 Objectifs du Développement Durable 2030

1 ÉRADICATION DE
LA PAUVRETÉ



2 LUTTE CONTRE
LA FAIM



3 ACCÈS À
LA SANTÉ



4 ACCÈS À UNE ÉDUCATION
DE QUALITÉ



5 ÉGALITÉ ENTRE
LES SEXES



6 ACCÈS À L'EAU SALUBRE
ET À L'ASSAINISSEMENT



7 RECOURS AUX ÉNERGIES
RENOUVELABLES



8 ACCÈS À DES
EMPLOIS DÉCENTS



9 INNOVATION ET
INFRASTRUCTURES



10 RÉDUCTION DES
INÉGALITÉS



11 VILLES ET COMMUNAUTÉS
DURABLES



12 CONSOMMATION
RESPONSABLE



13 LUTTE CONTRE LE
CHANGEMENT CLIMATIQUE



14 PROTECTION DE LA FAUNE
ET DE LA FLORE AQUATIQUES



15 PROTECTION DE LA FAUNE
ET DE LA FLORE TERRESTRES



16 JUSTICE
ET PAIX



17 PARTENARIATS POUR
LES OBJECTIFS MONDIAUX



THE GLOBAL GOALS
Objectifs mondiaux de développement durable

A massive, multi-tiered iceberg dominates the scene, its surface a mix of white and pale blue. A large, luminous blue archway is visible on the right side of the iceberg, contrasting with the white ice. The iceberg is set against a clear, bright blue sky with a few wispy clouds. The water in the foreground is a deep, clear blue, with smaller ice floes floating on its surface.

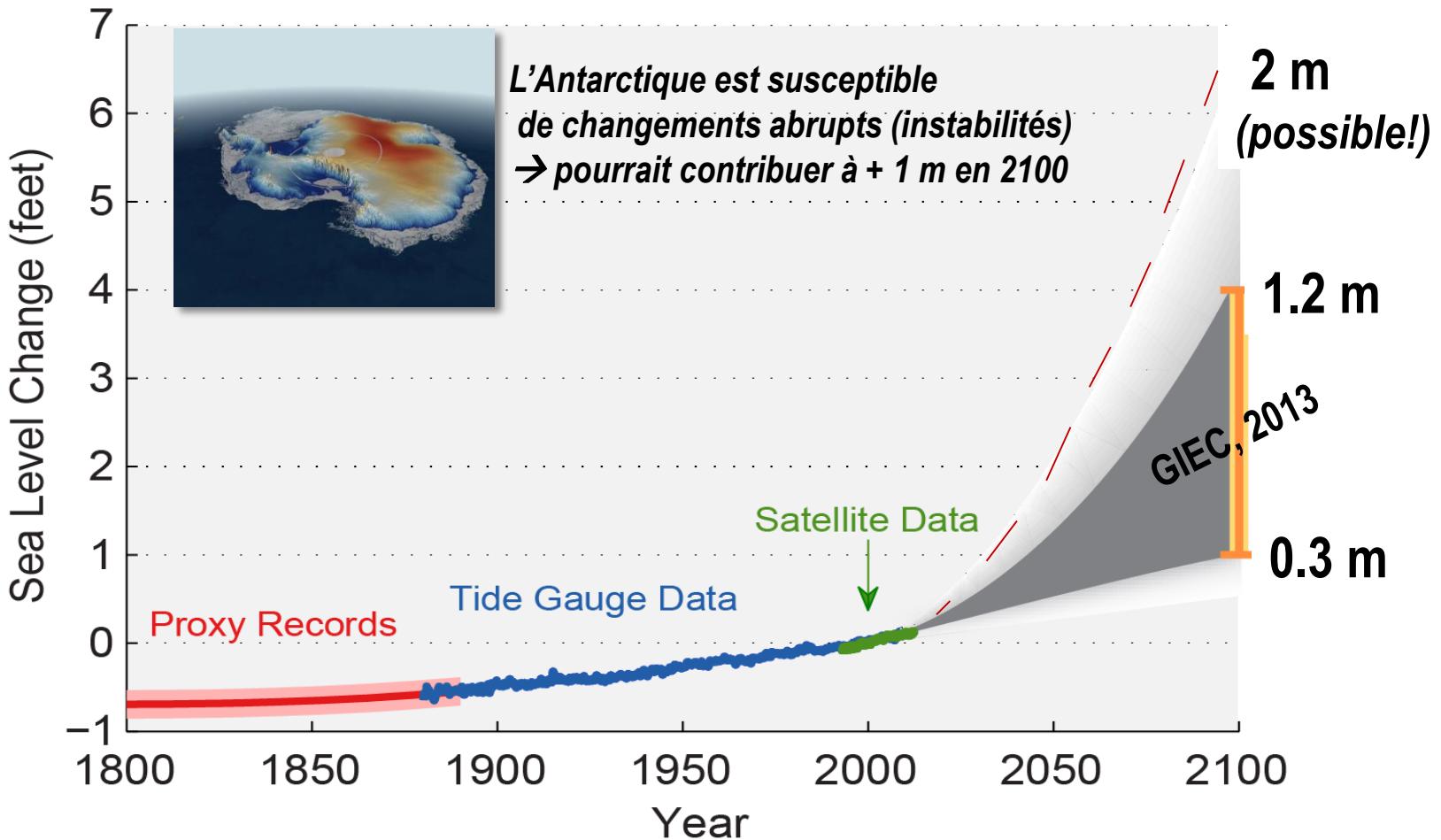
Merci pour votre attention

Niveau de la mer

Un des meilleurs indicateurs du changement climatique actuel → réponse intégrée des changements de température de l'océan, des glaces et eaux continentales au forçage anthropique et à la variabilité naturelle du climat

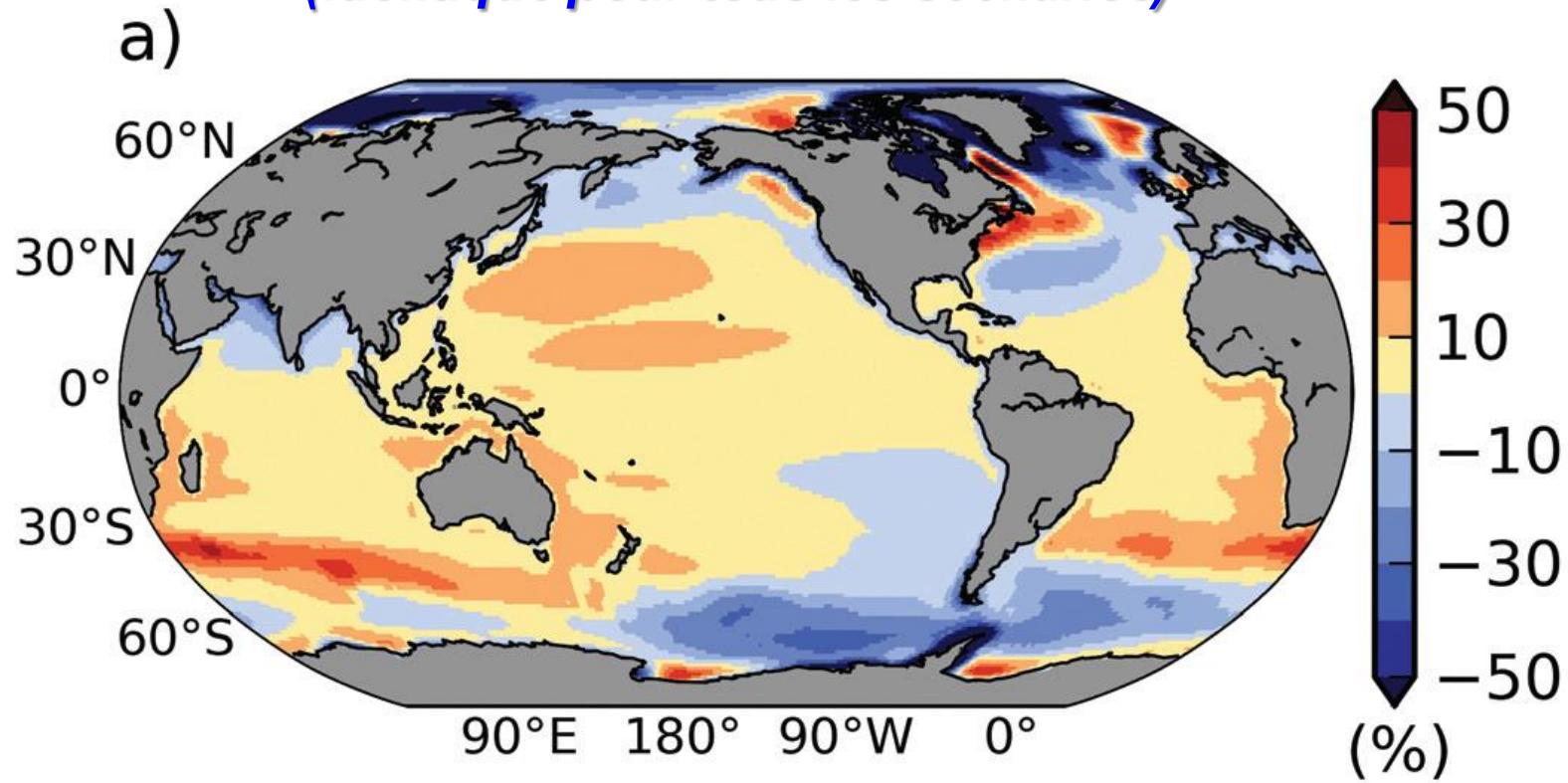
Avec les évènements extrêmes, la hausse future de la mer est une menace majeure pour les régions côtières basses et peuplées de la planète

La mer va continuer à monter

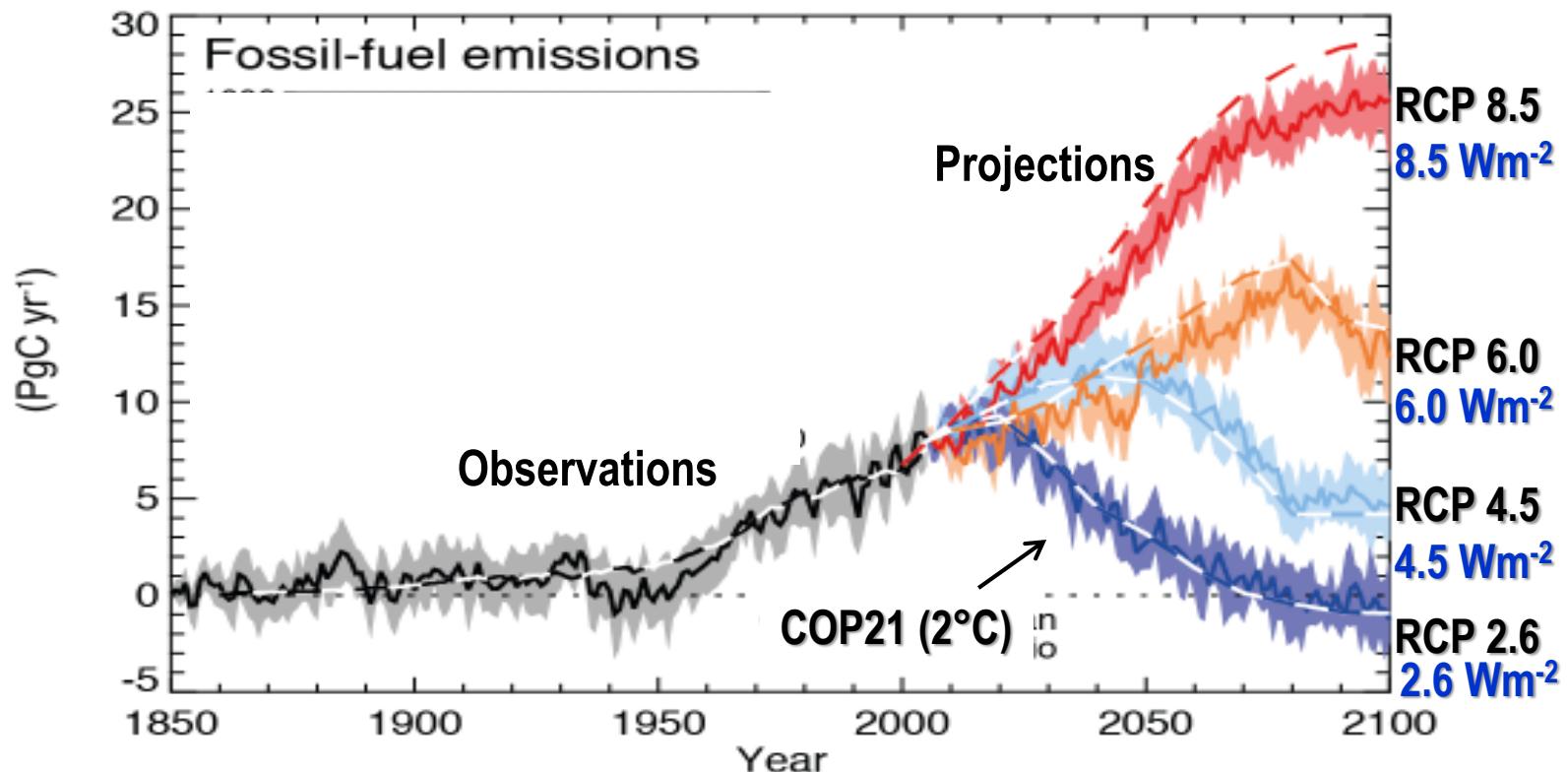


Variabilité régionale de la mer en 2100

Ecart (%) à la hausse moyenne (identique pour tous les scénarios)



4 scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre



RCP = Representative Concentration Pathway (scénarios d'émissions exprimés en termes de forçage radiatif → déséquilibre énergétique imposé au système climatique, exprimé en unités de Wm⁻²)