

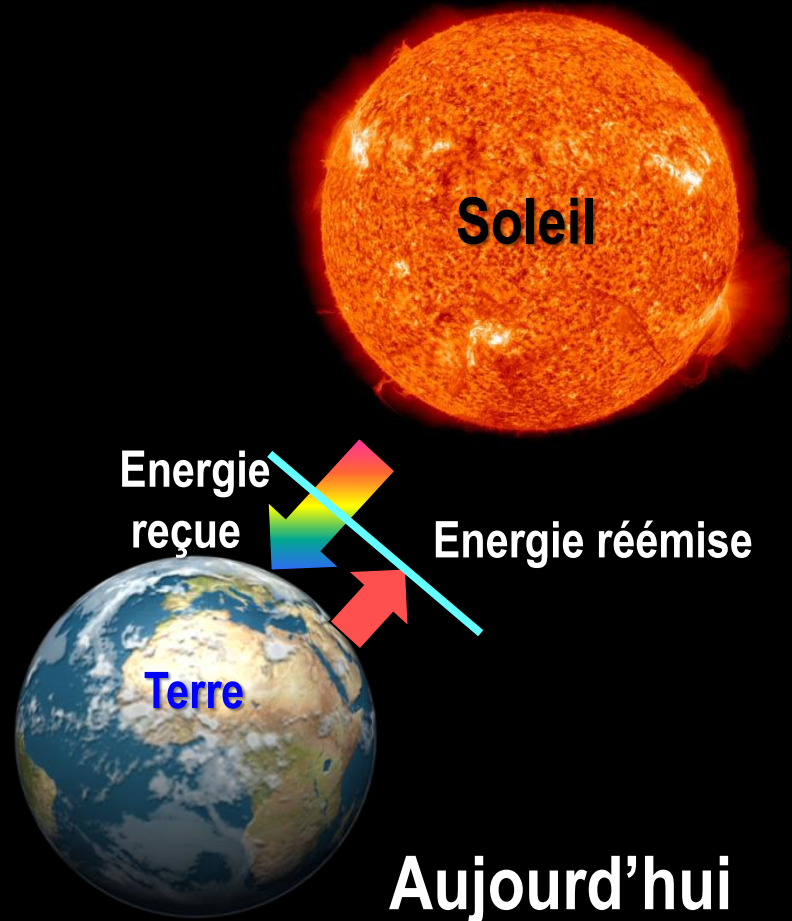
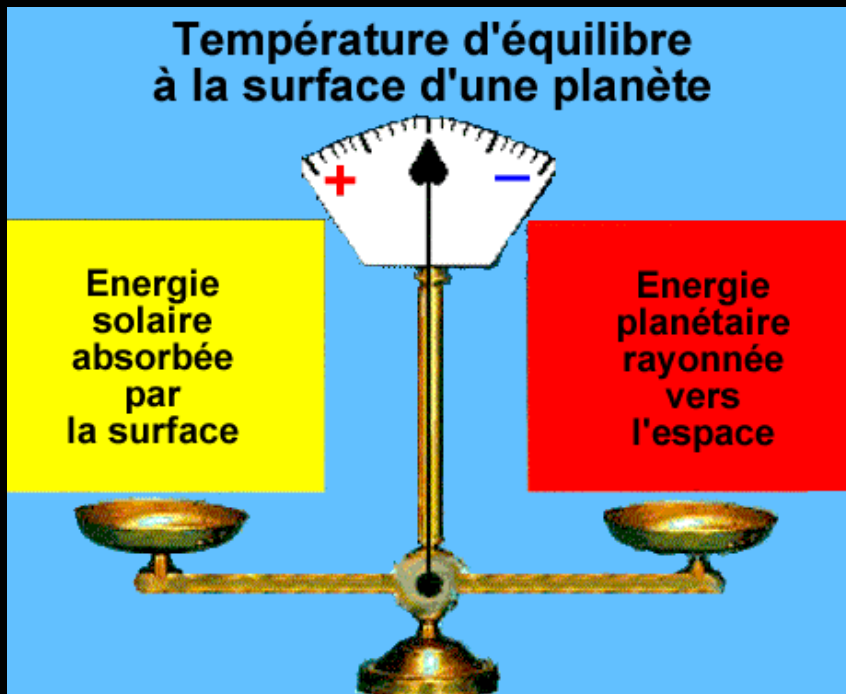


# **Réchauffement Climatique, Fonte des Glaces et Hausse du Niveau des Mers**

**Anny Cazenave**

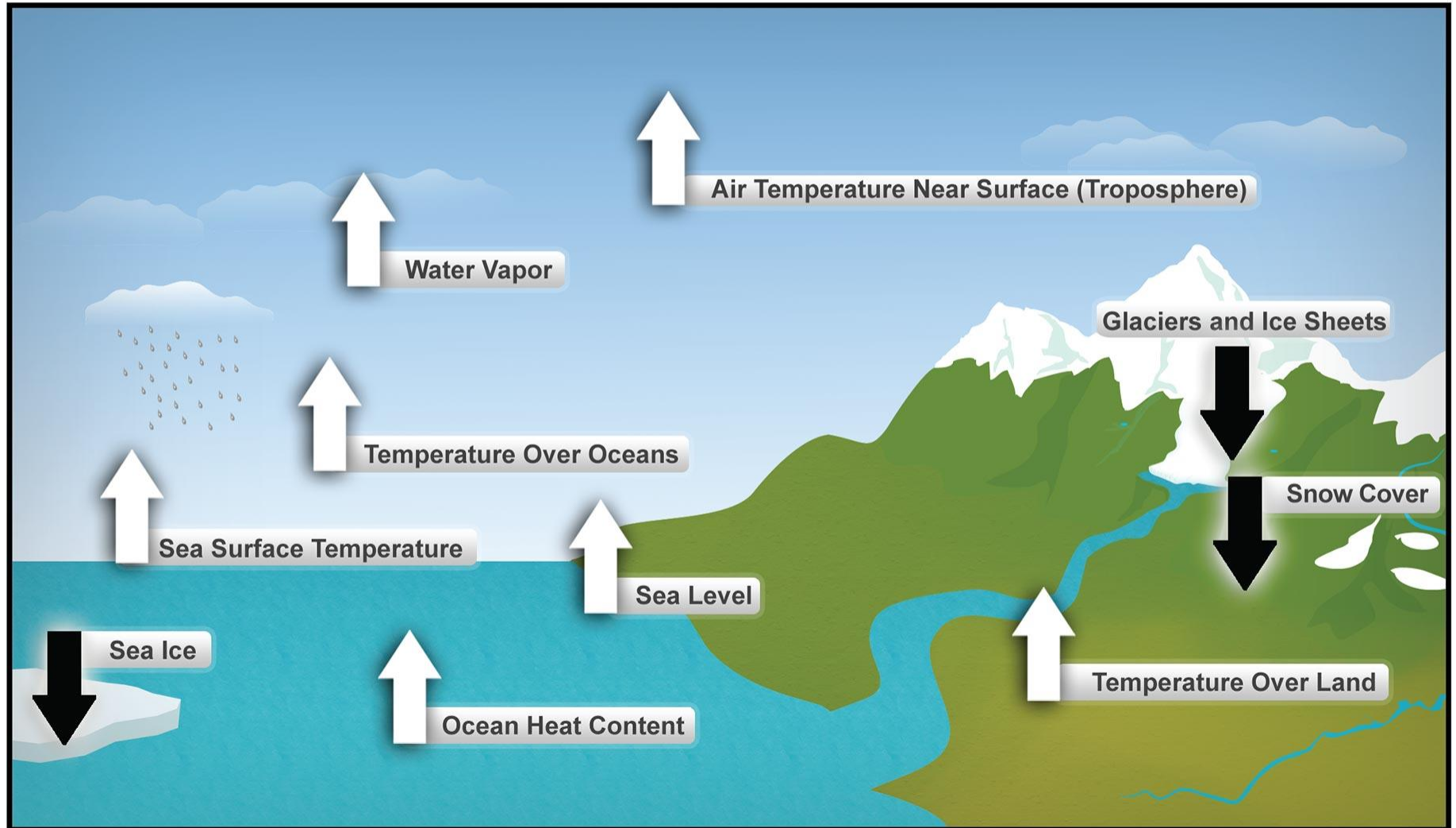
**Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS, Toulouse, France)  
& International Space Science Institute (ISSI, Berne, Suisse)**

# Bilan énergétique de la Terre



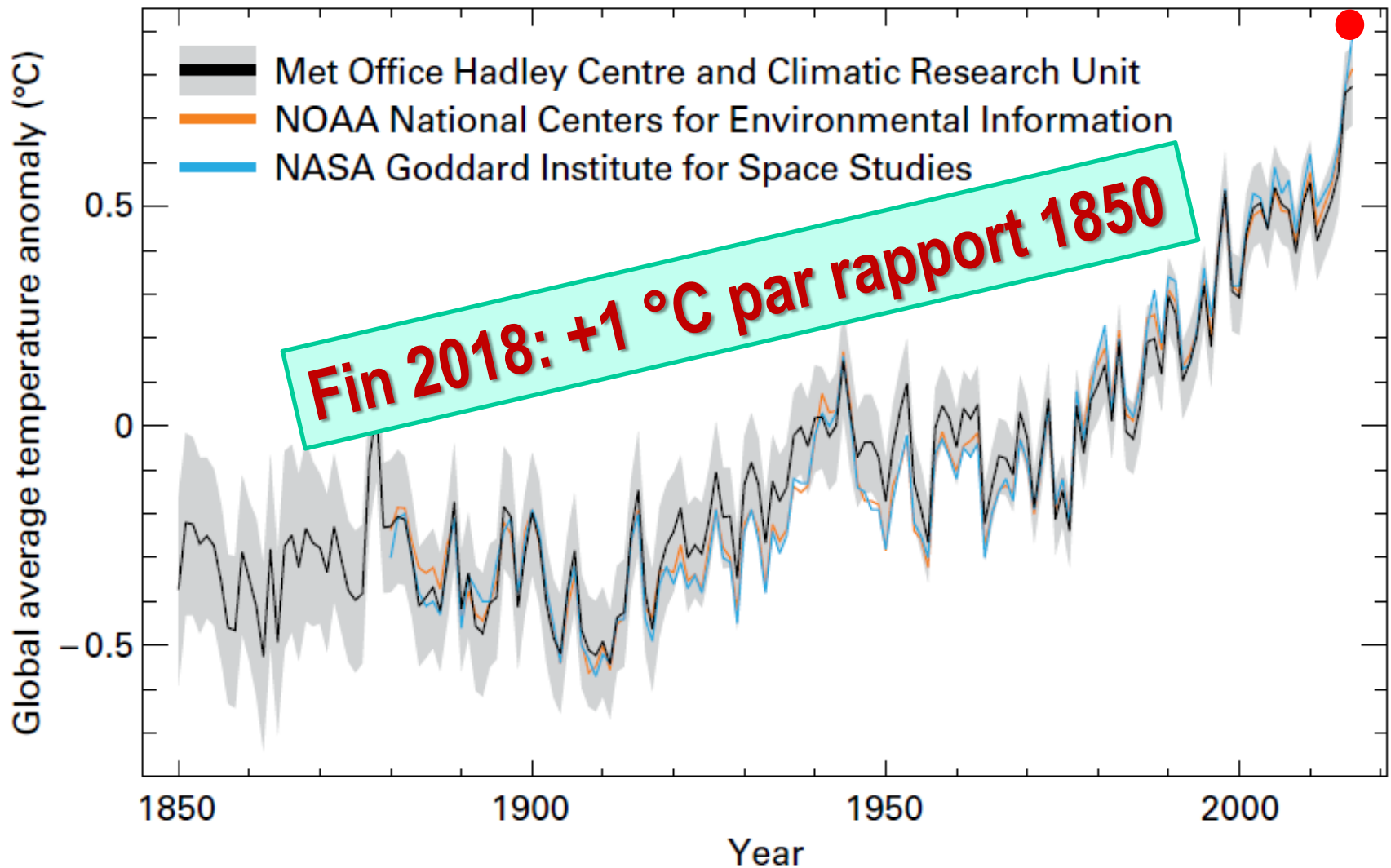
déséquilibre énergétique →  $\sim 1 \text{ W.m}^{-2}$

# Un monde plus chaud...



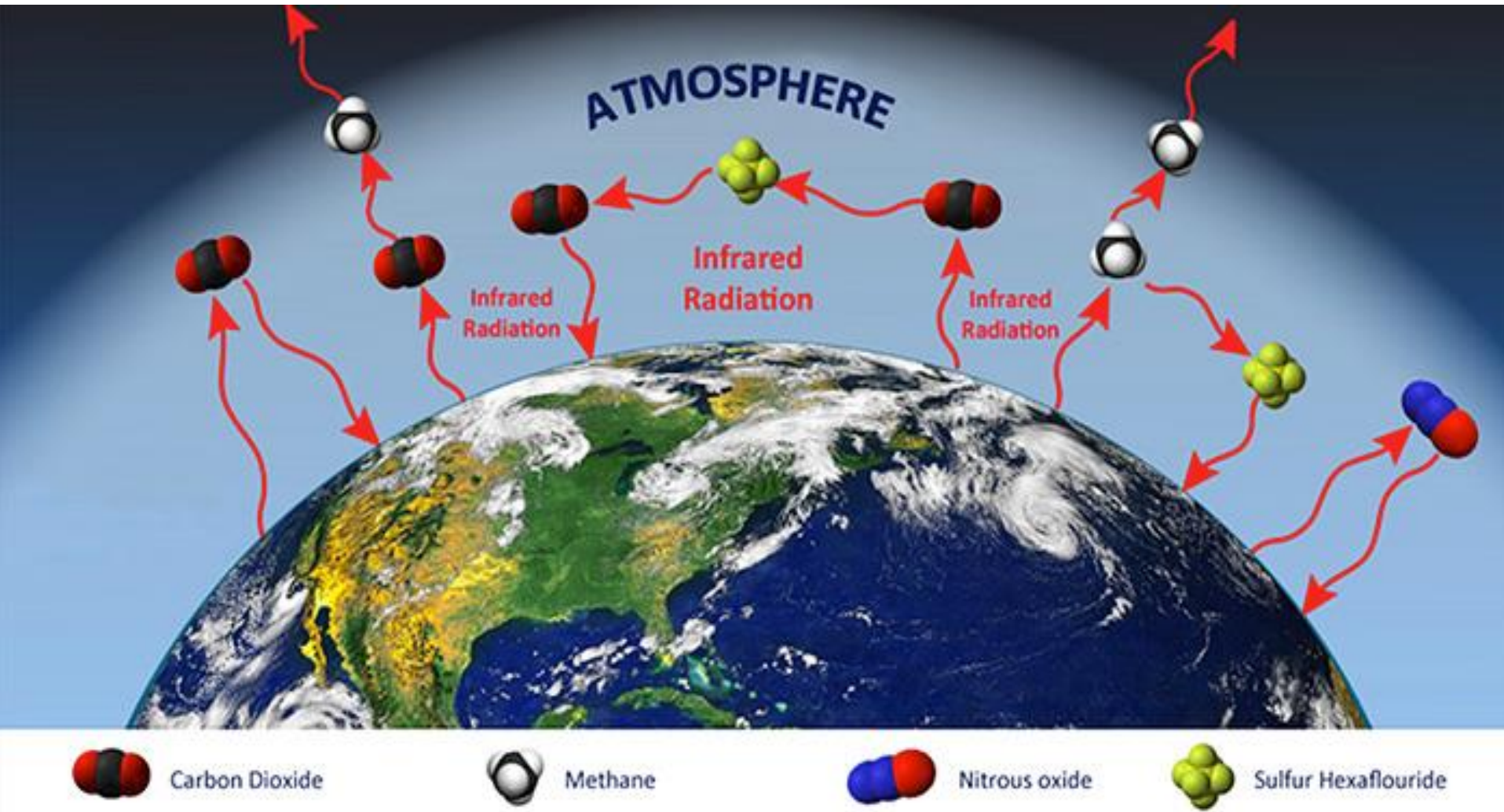


## Evolution de la Température moyenne de la Terre depuis 1850



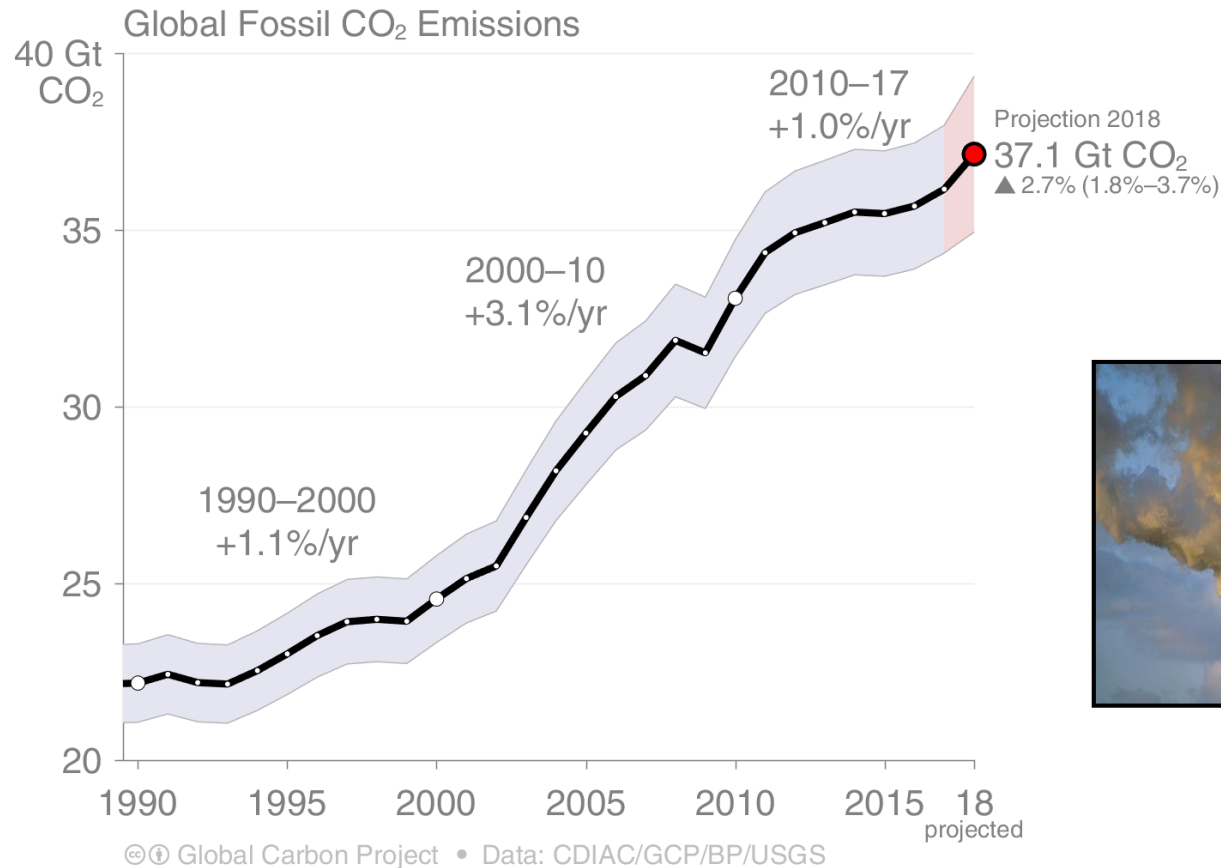


# Réchauffement de la Terre du aux gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines



# Evolution des émissions anthropiques de GES (CO<sub>2</sub>)

**Total des émissions depuis le début de l'ère industrielle: 2000 GtCO<sub>2</sub>**  
**(Combustion des ressources fossiles: 1300 GtCO<sub>2</sub> ; Déforestation: 700 GtCO<sub>2</sub>)**

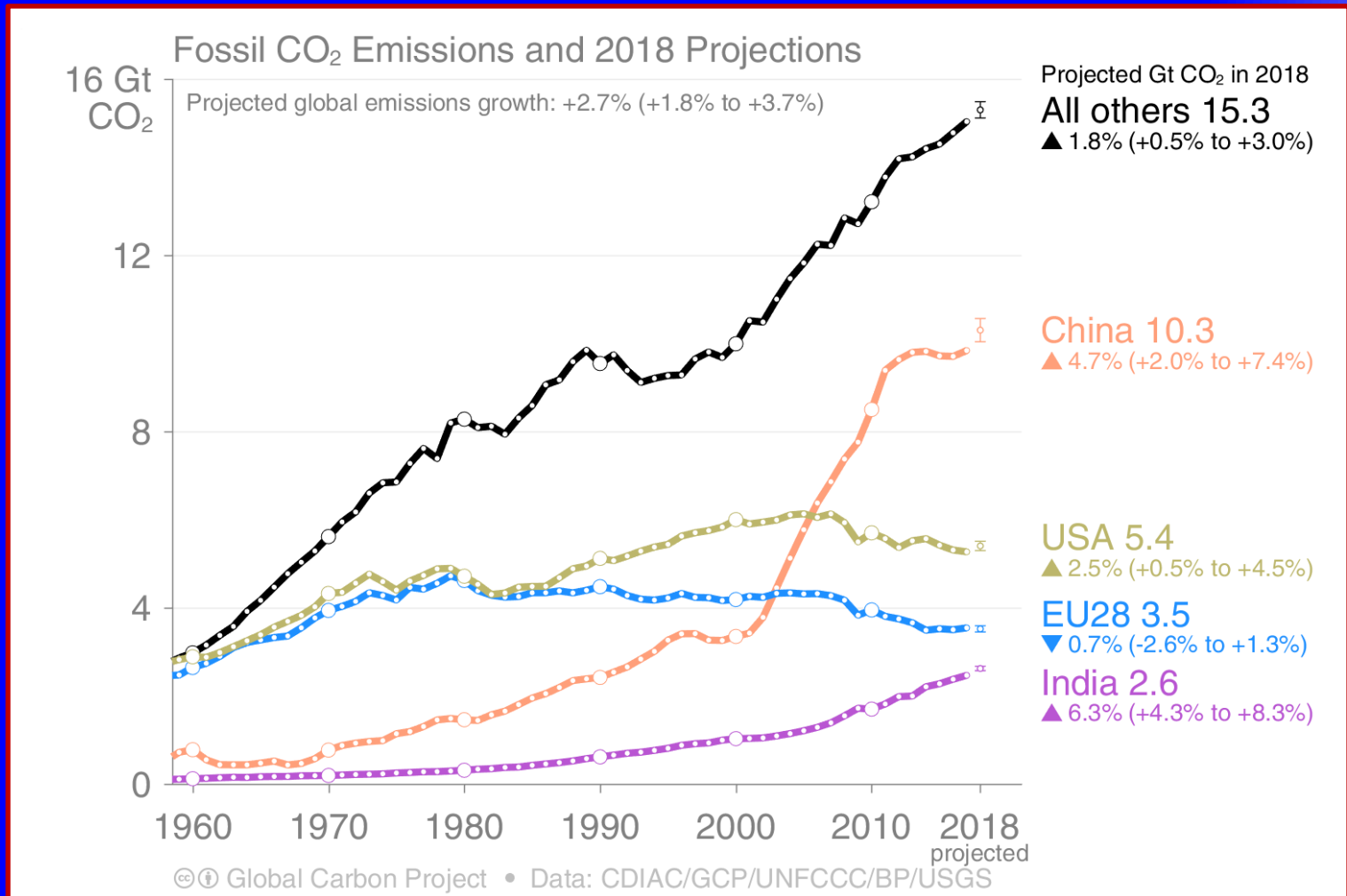


**Emissions globales en 2017 : 36.2 ± 2 GtCO<sub>2</sub>**  
**(augmentation de 63% par rapport à 1990)**

**1Gt = 1 milliard de tonnes**

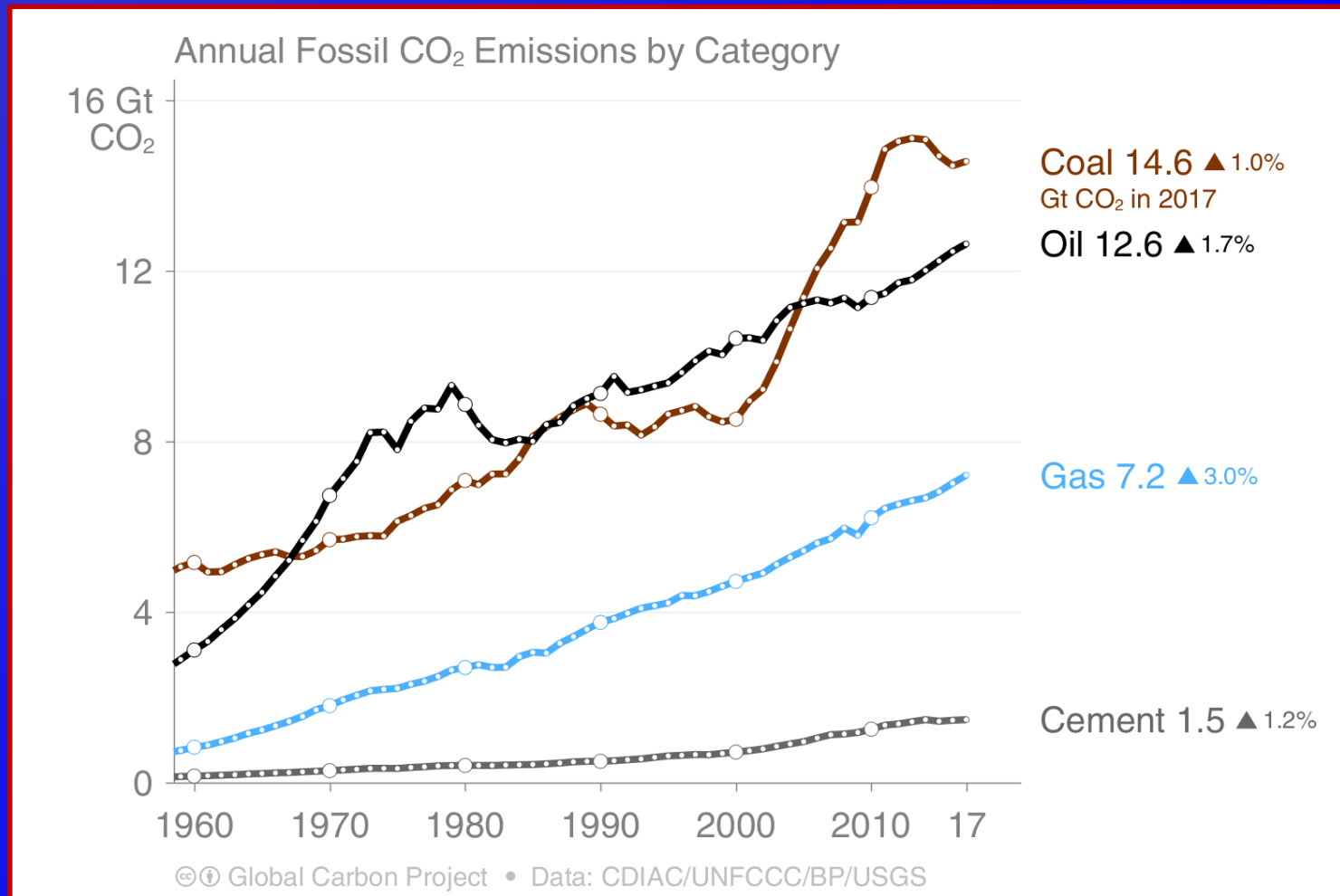
Source: Global Carbon Project 2018; Le Quéré et al., 2018

# 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%)

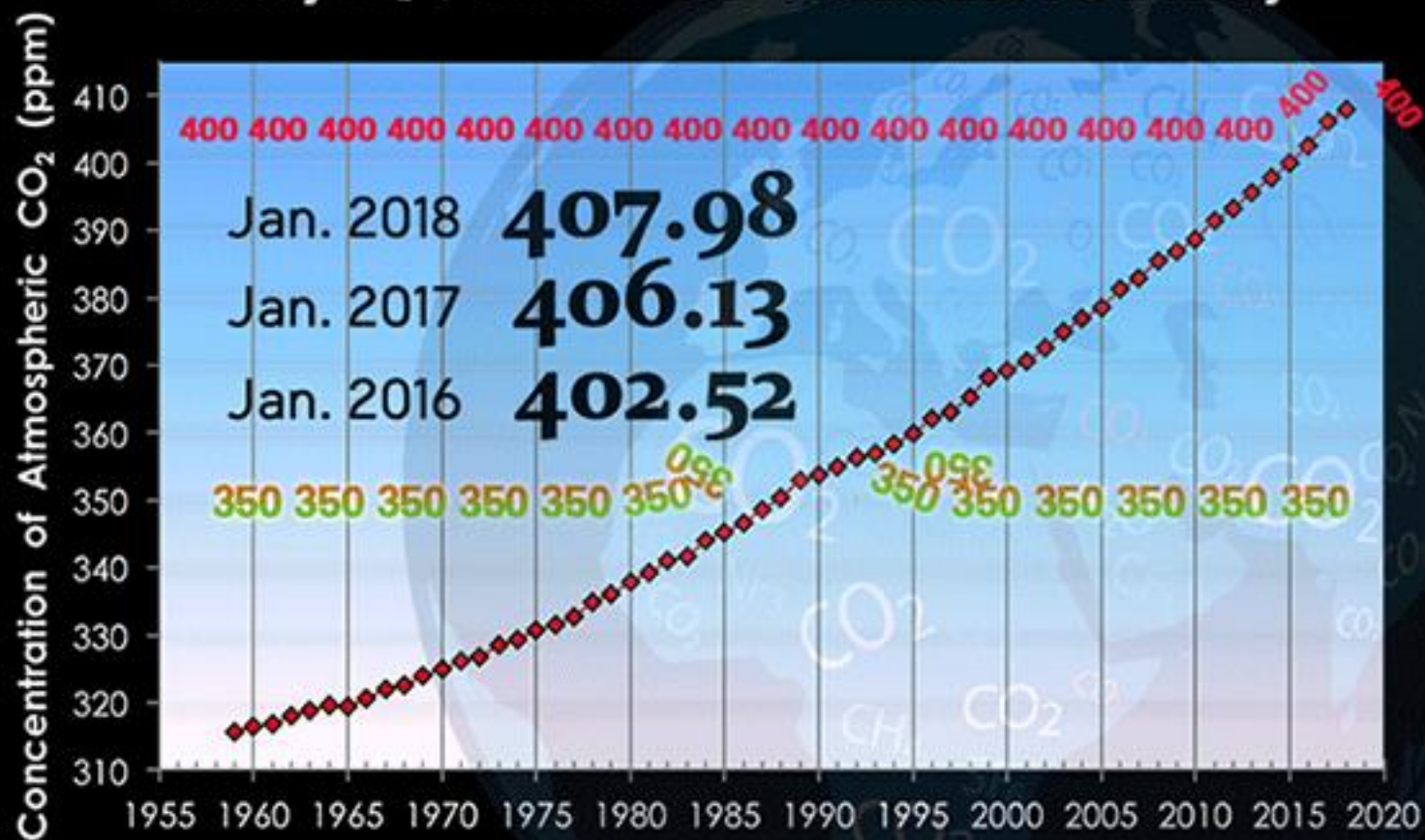


## Evolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

January 1959 - January 2018

# Atmospheric CO<sub>2</sub>

January CO<sub>2</sub> | Year Over Year | Mauna Loa Observatory



**CO<sub>2</sub>-earth**

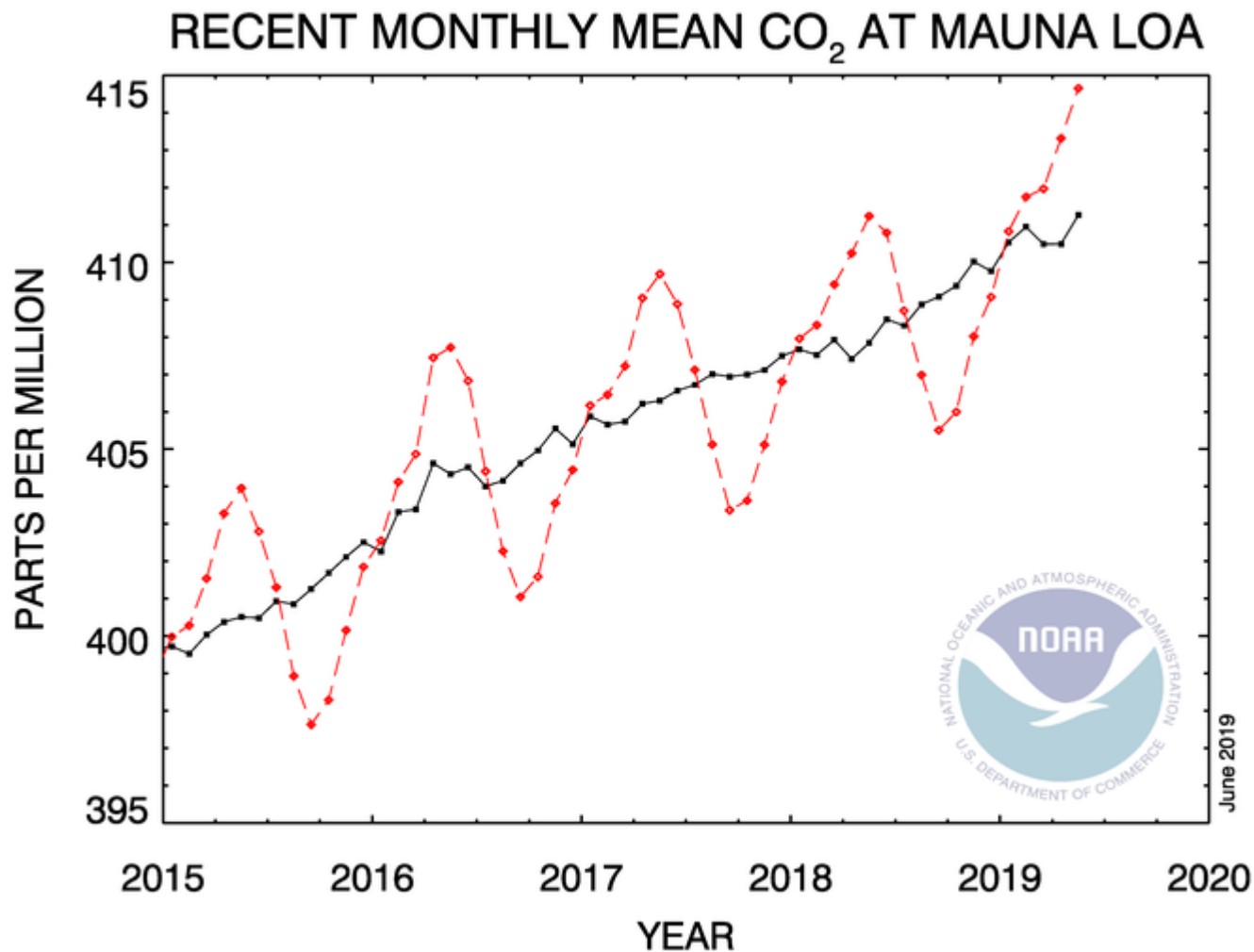
Featuring NOAA-ESRL data of February 5, 2018

# Concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère:

Mai 2019 : 415 ppm

Mai 2018: 411 ppm

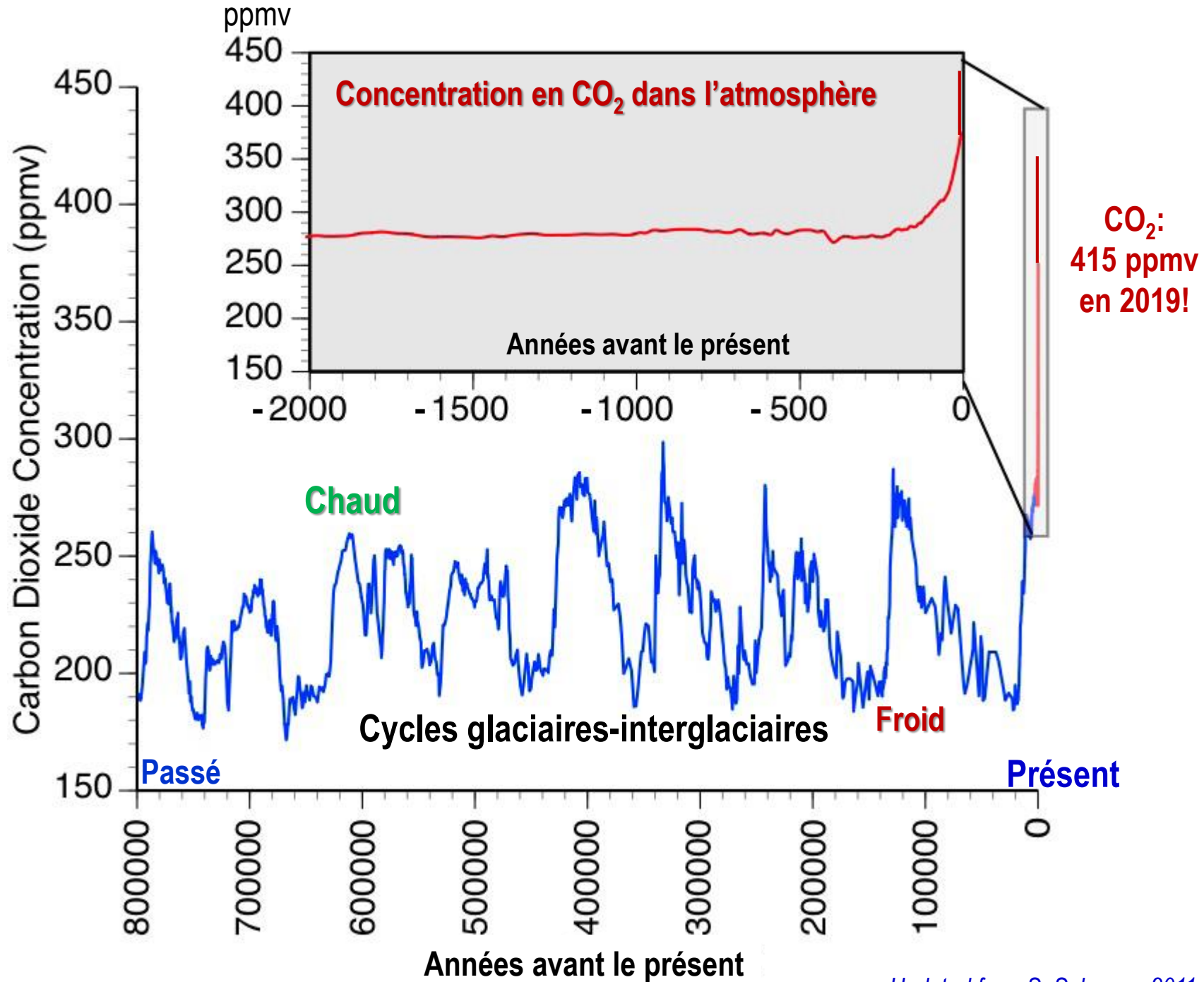
*Dernière mise à jour 5 juin 2019*



ppm=partie par million

Source: NOAA





# Bilan CO<sub>2</sub> (moyenne 2008-2017)

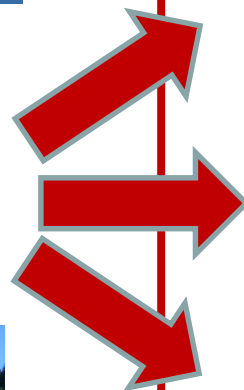


**Emissions anthropiques**  
34.4 GtCO<sub>2</sub>/an (87%)

## Sources



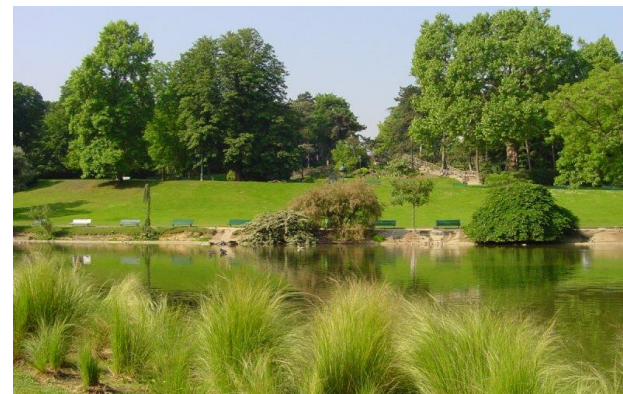
**Déforestation**  
5.3 GtCO<sub>2</sub>/an (13%)



**Atmosphère**  
17.3 GtCO<sub>2</sub>/an  
44%



**Végétation**  
11.6 GtCO<sub>2</sub>/an  
29%

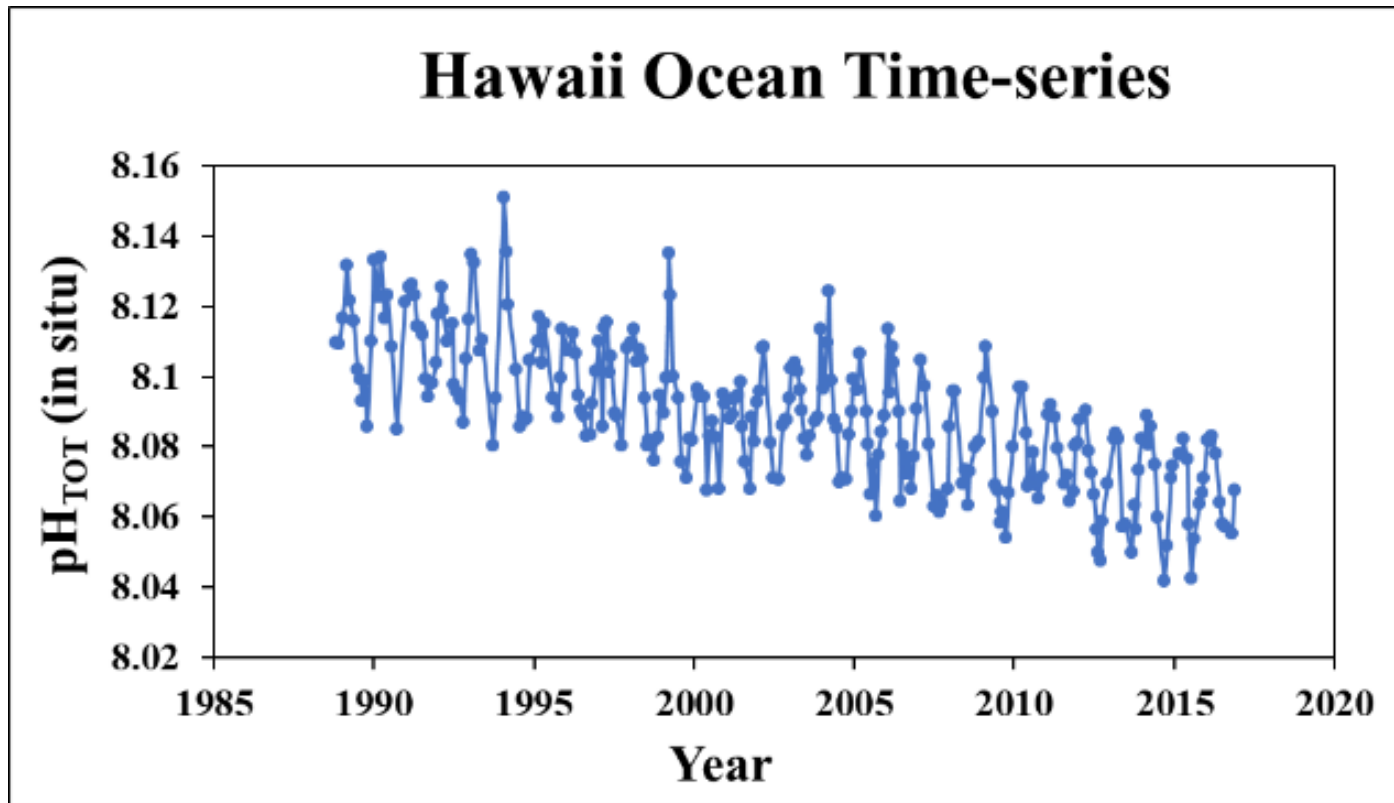


## Puits

**Océan**  
8.9 GtCO<sub>2</sub>/an  
22%



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

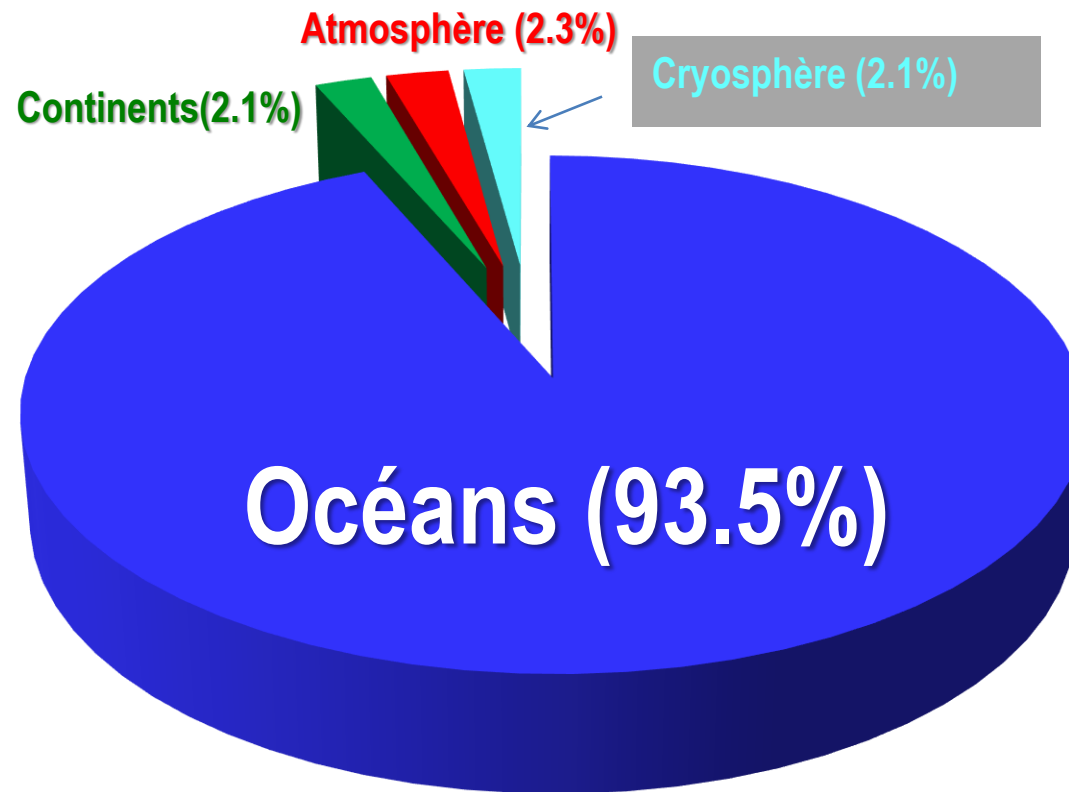


**Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2018**

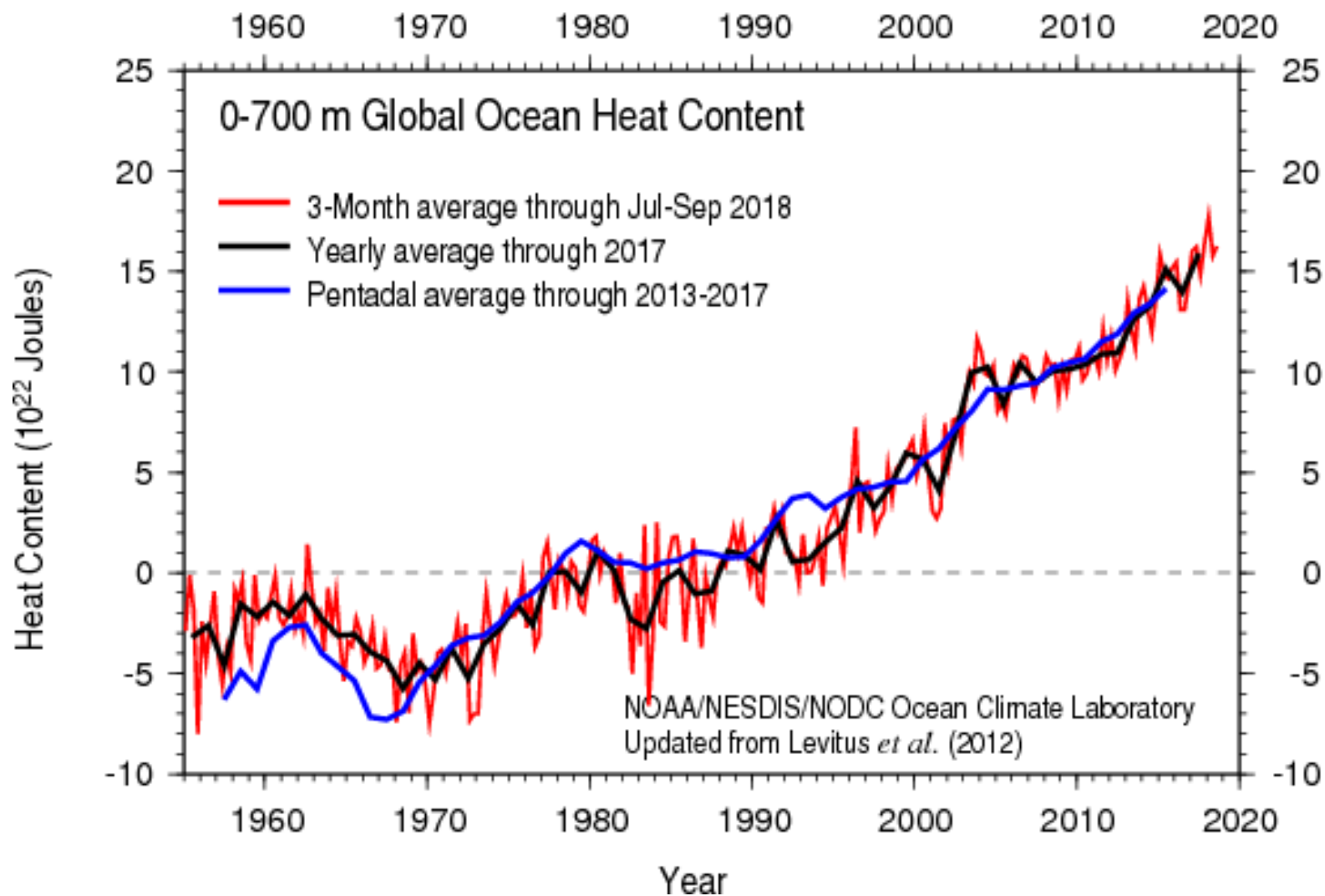


# Excès de chaleur

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



# Augmentation du contenu thermique de l'océan

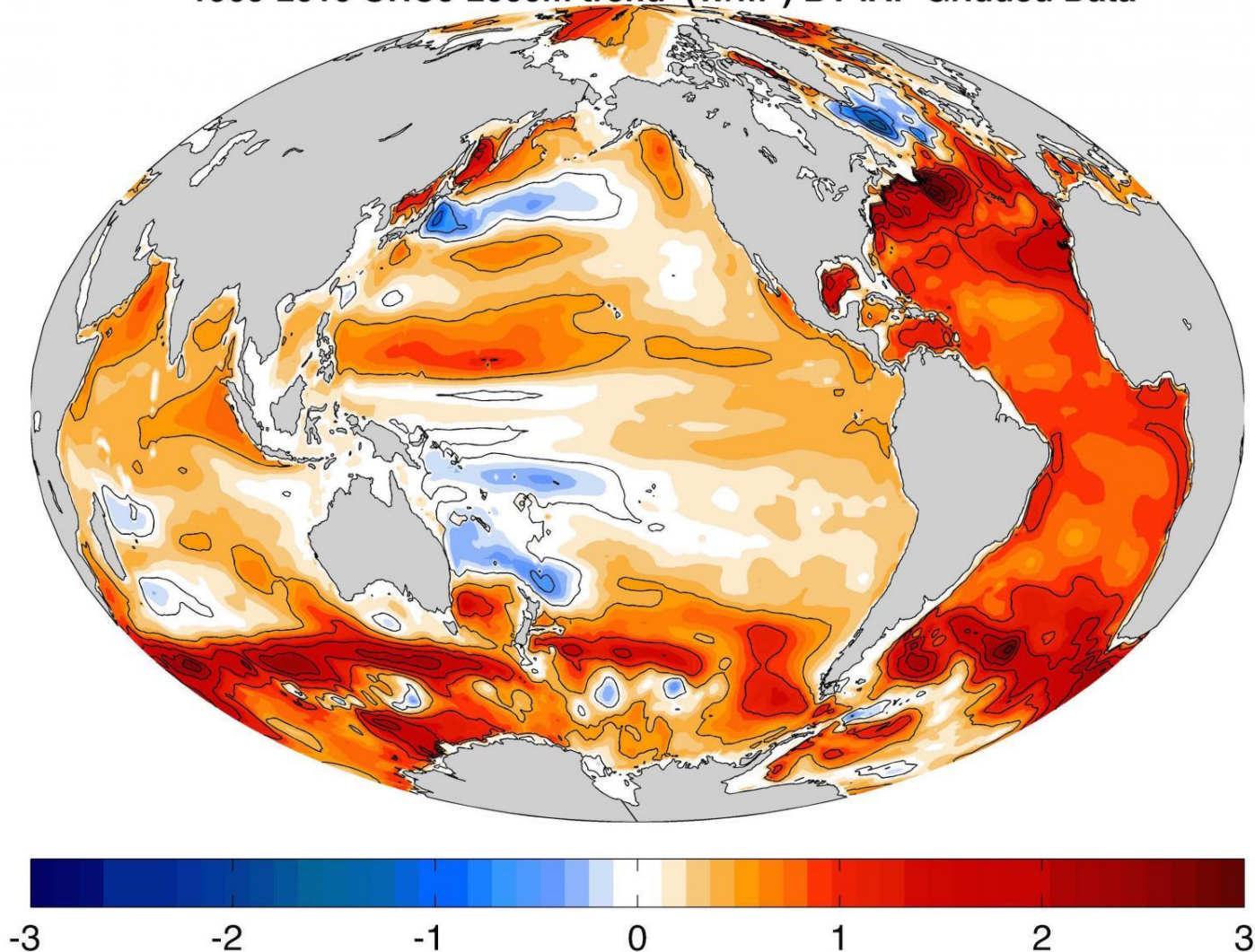


Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2019

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/m<sup>2</sup>) BY IAP Gridded Data

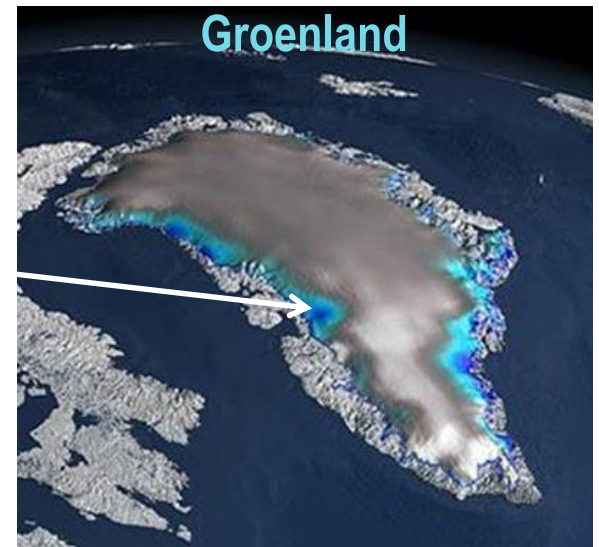




# Les glaces fondent



*Le Glacier 'Rhône' dans les Alpes suisses*

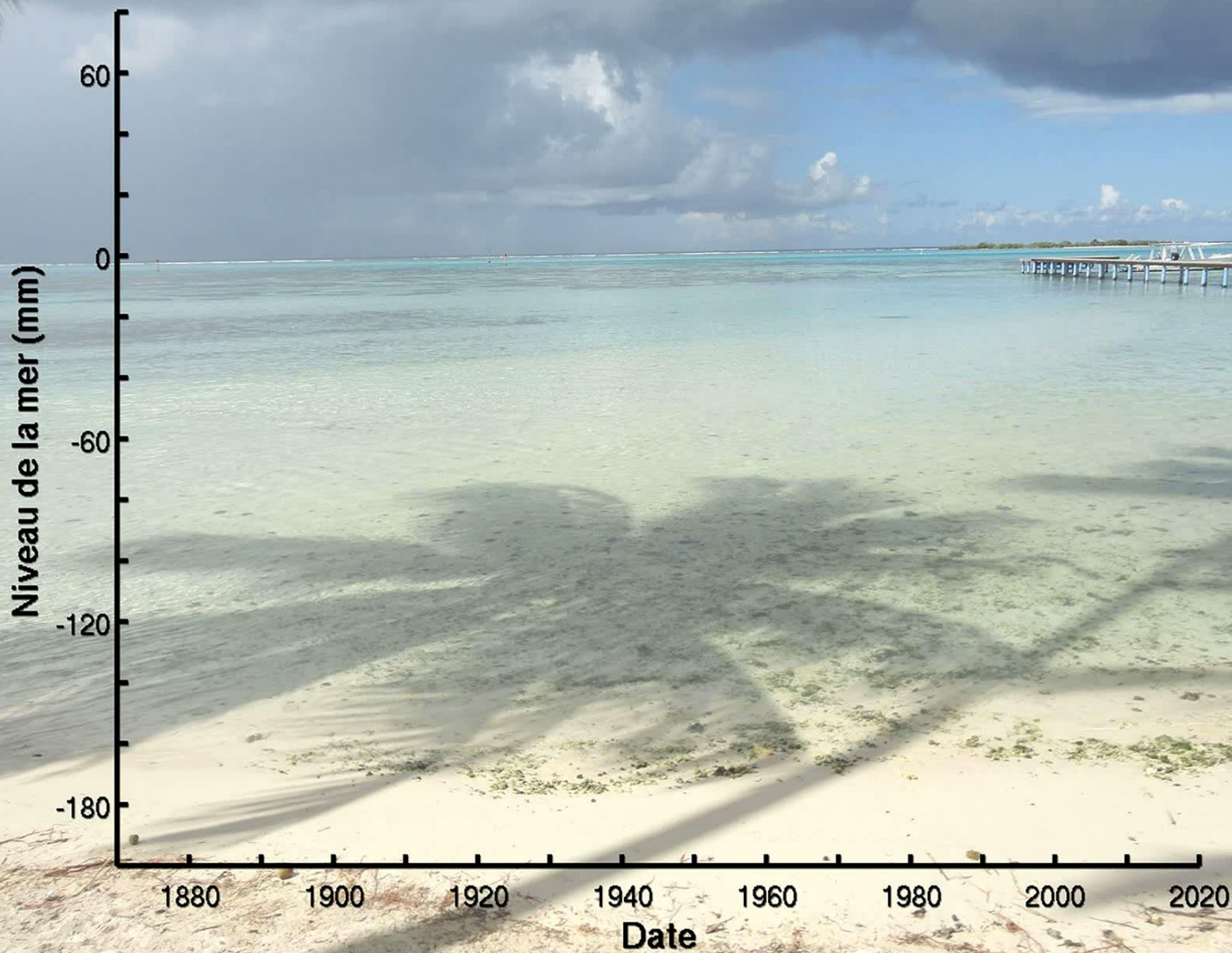




**La mer monte!**









# Hausse du niveau des mers au cours du 20<sup>ème</sup> siècle

**1900-1990 (marégraphes)**

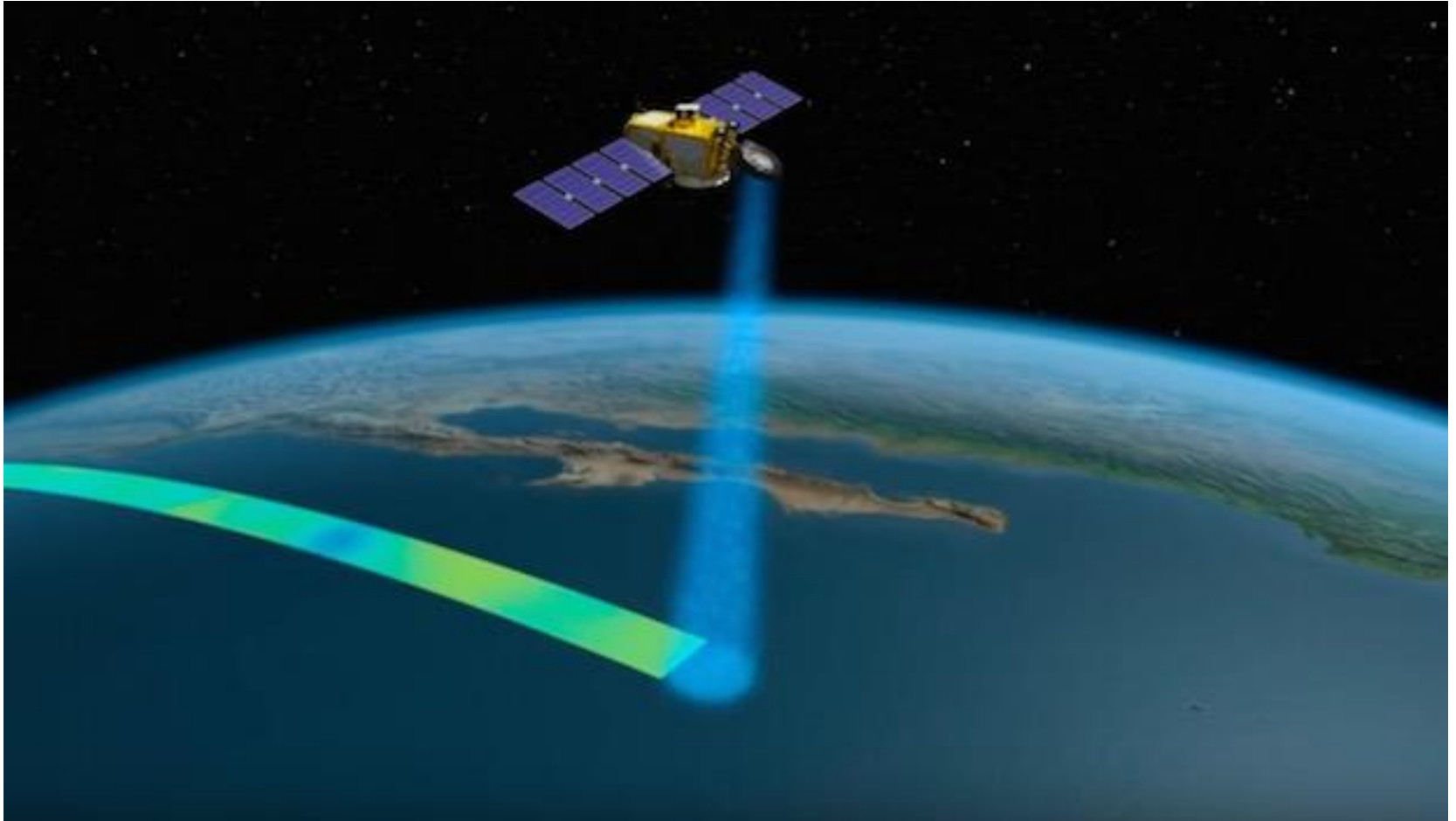


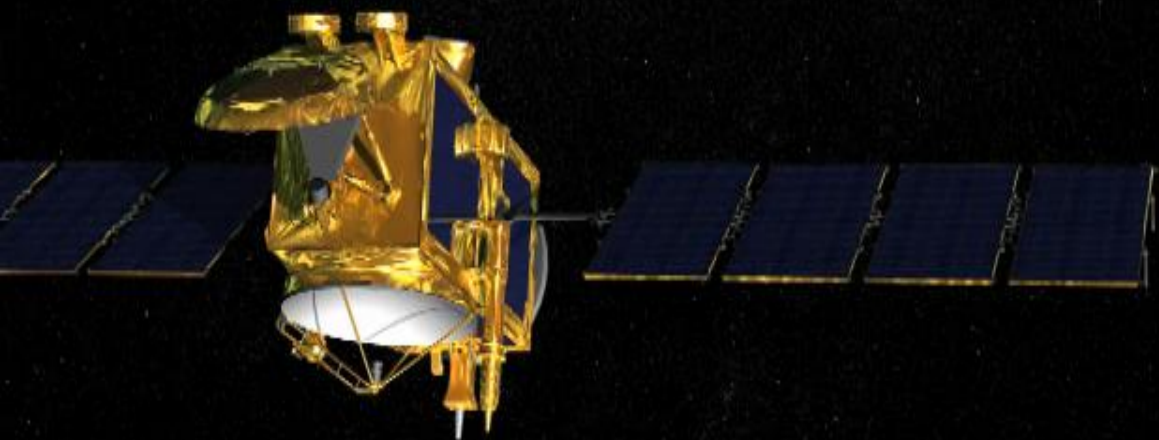
**Environ 15 cm en moyenne**



**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

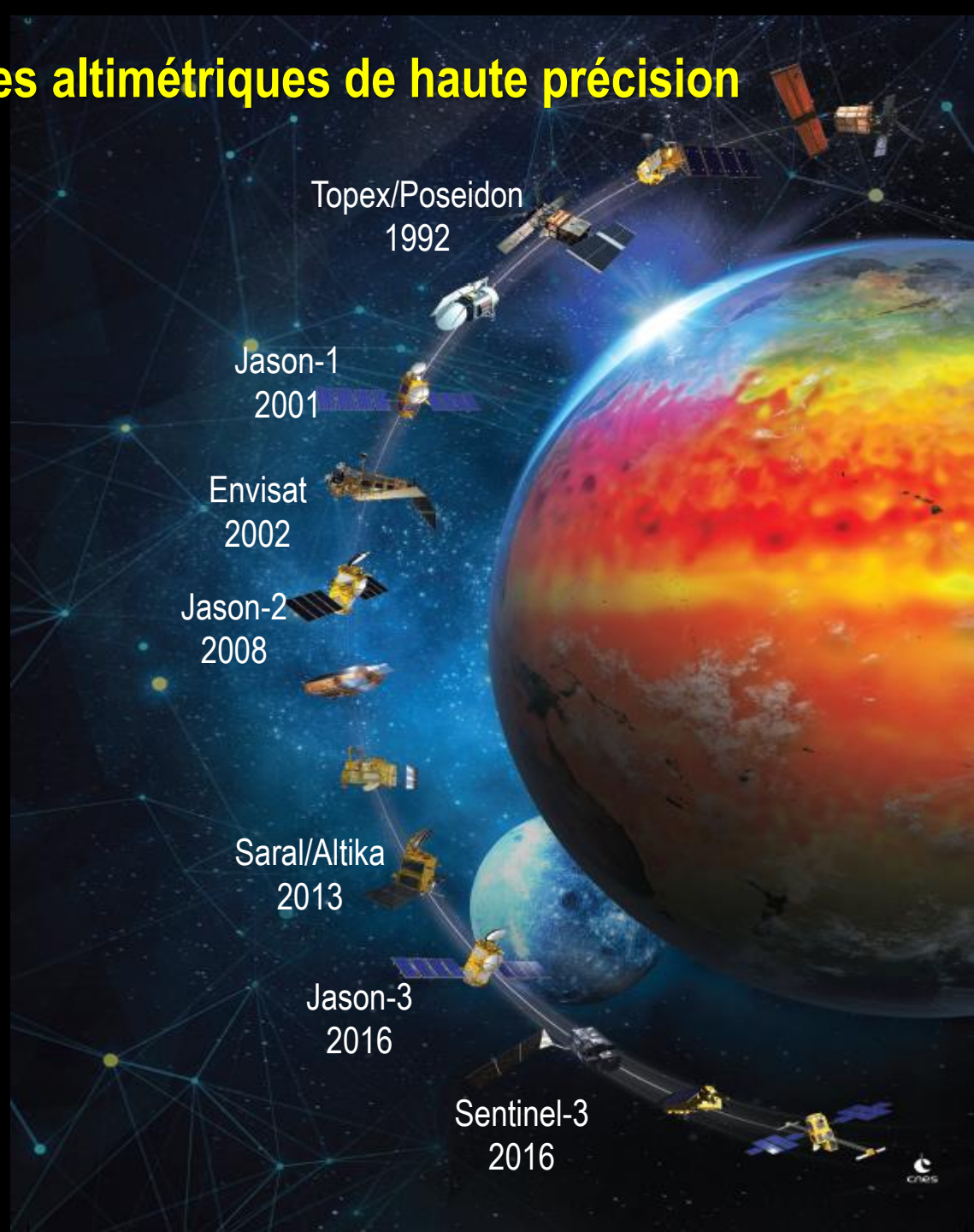


# La constellation des satellites altimétriques de haute précision

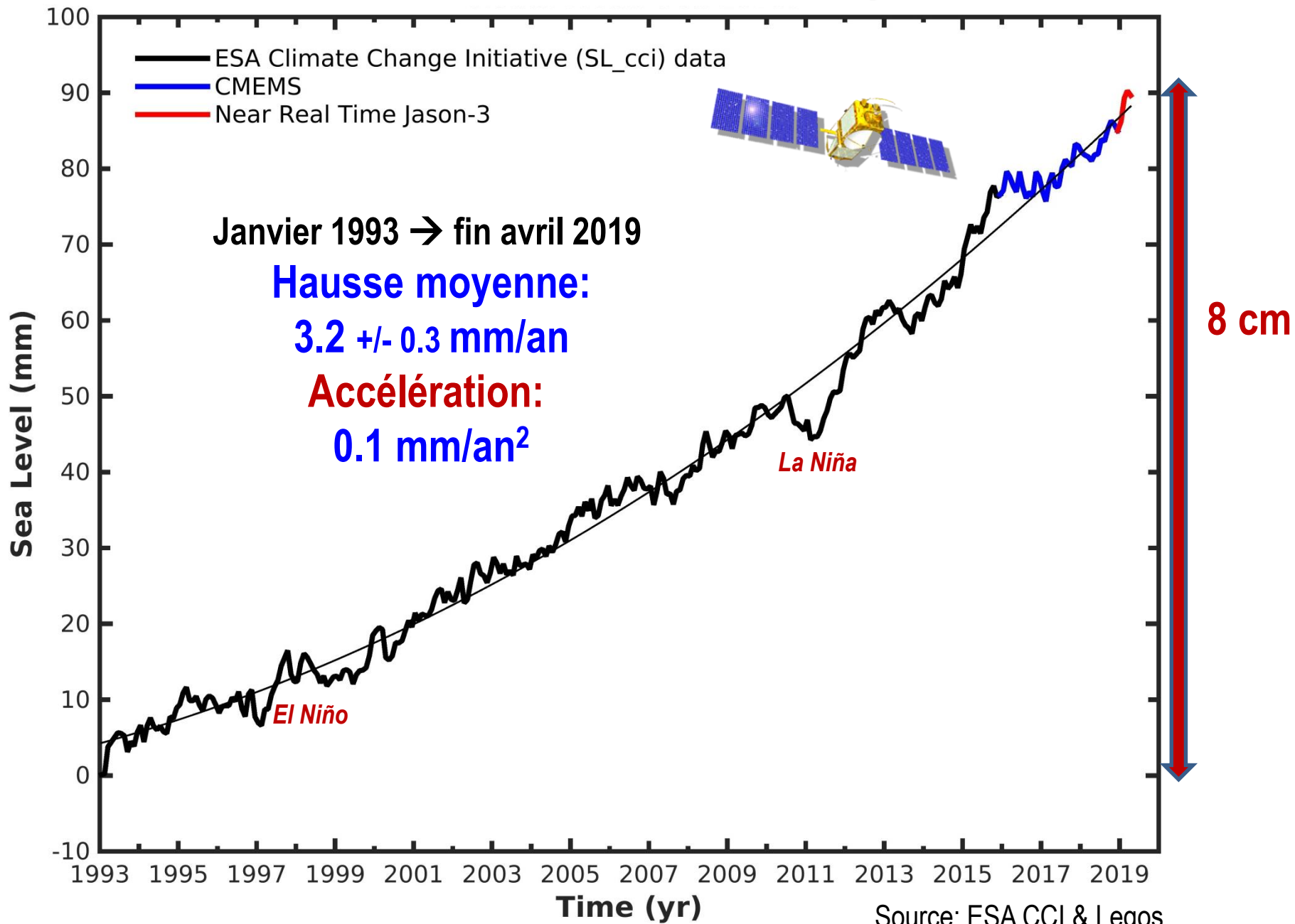
Précision de mesure de la  
hauteur instantanée de la mer  
(par rapport à une référence fixe)



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

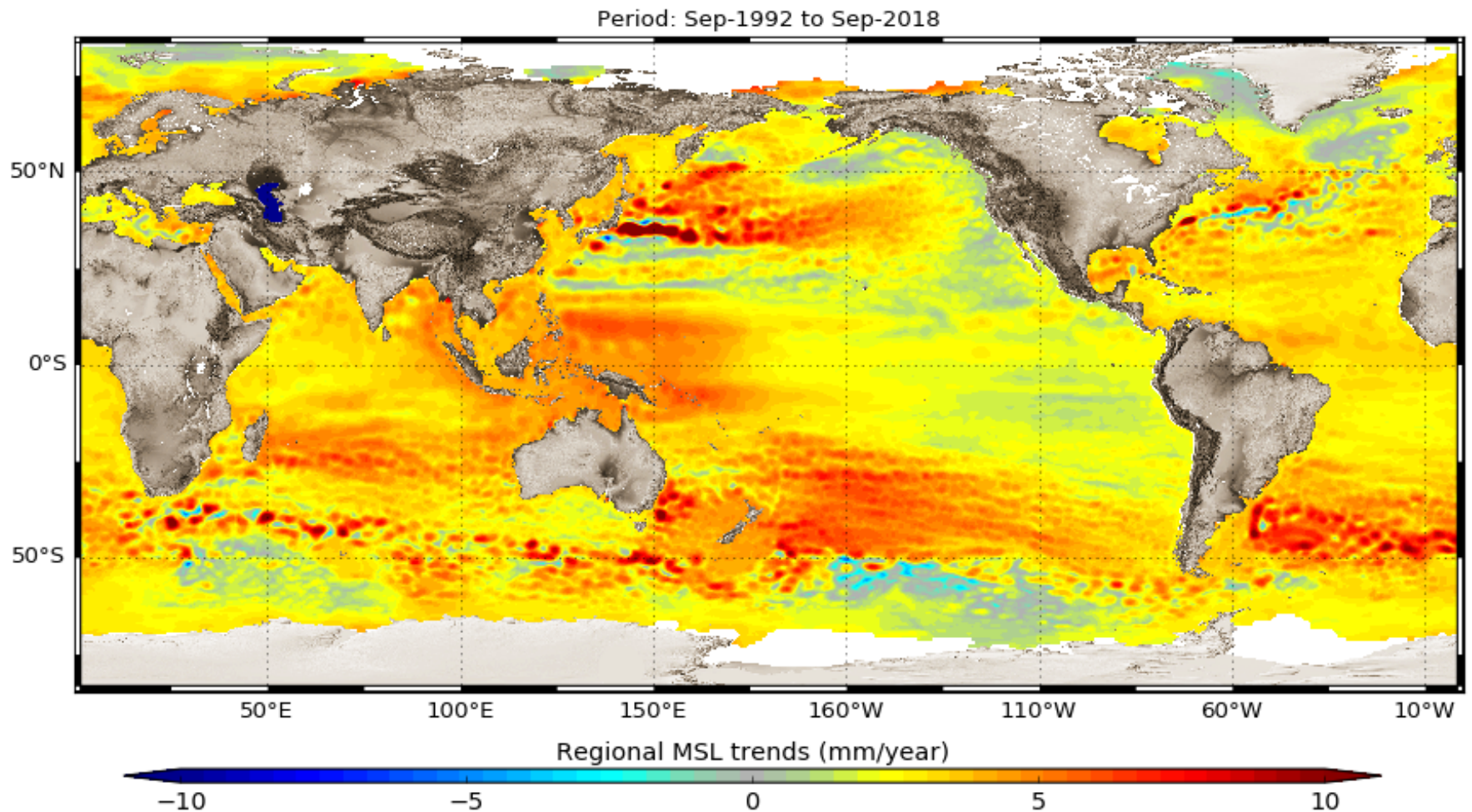


# Evolution du niveau de la mer depuis 1993



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

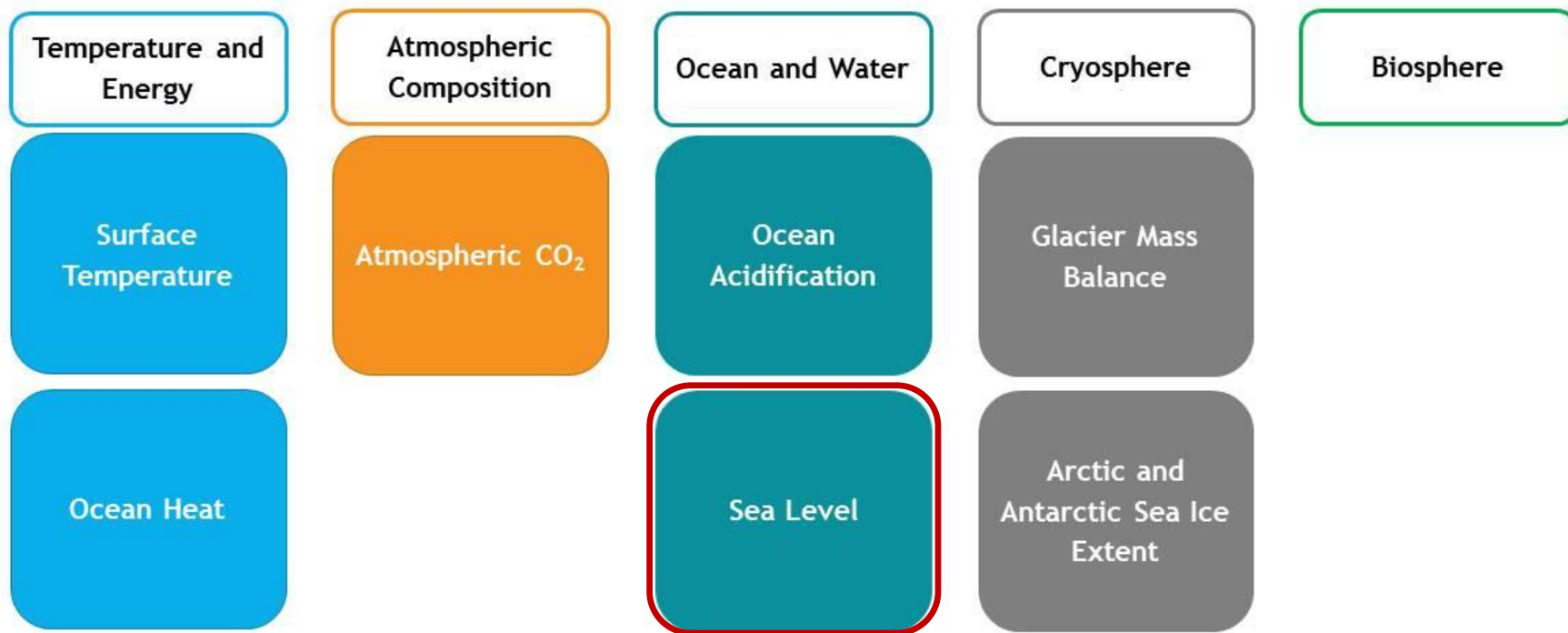
## Tendances régionales de la hausse de la mer (mm/an)





# Les 7 indicateurs majeurs du changement climatique actuel

## Global Climate Indicators



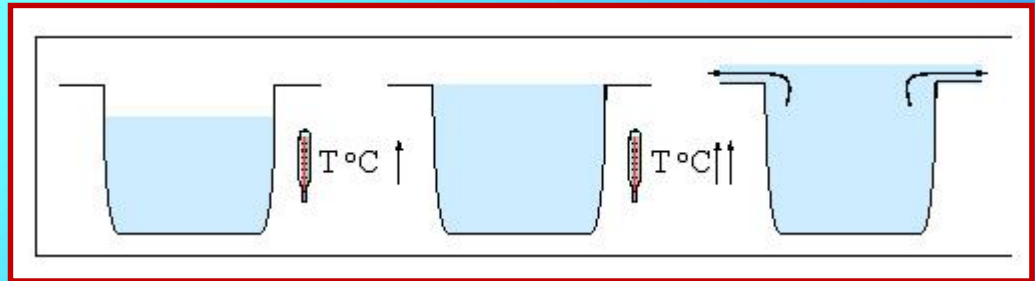
Définis par GCOS (Global Climate Observing System)  
et WMO (Organisation Météorologique Mondiale)



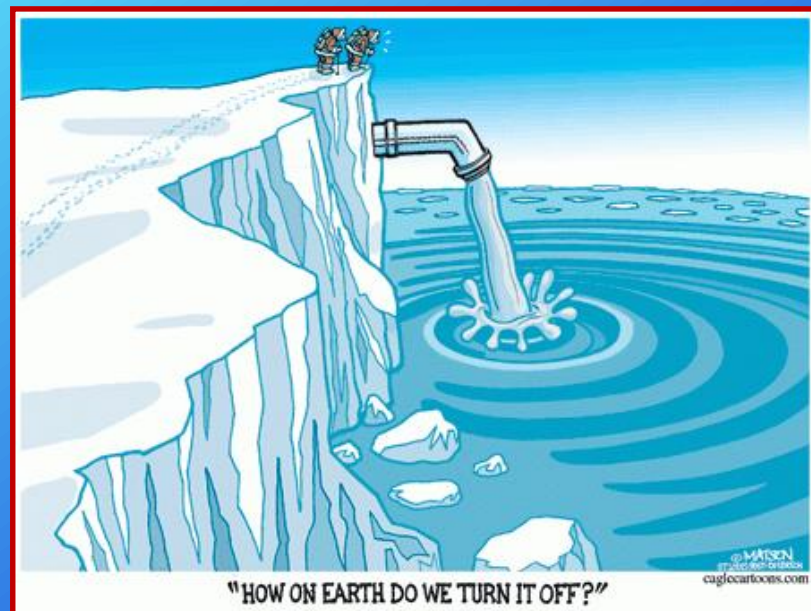
**Sait-on expliquer de façon quantitative les causes de la hausse actuelle de la mer?**

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

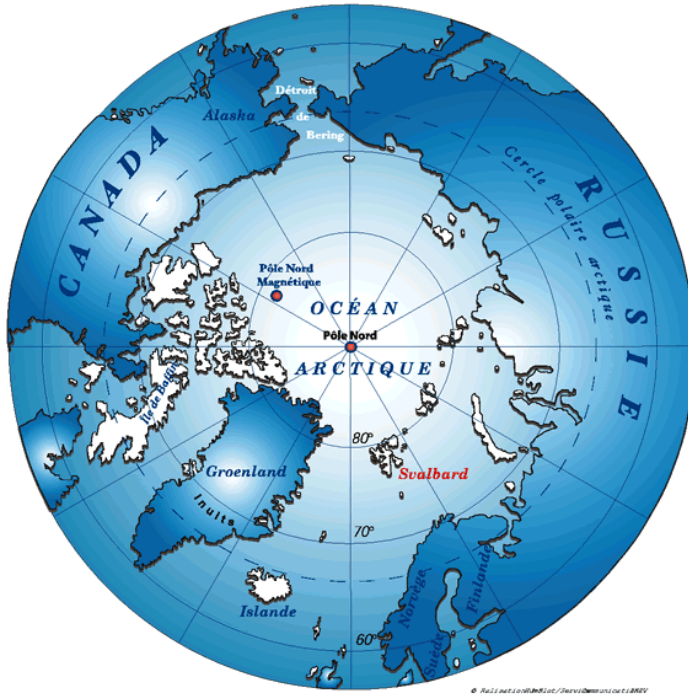
➤ Dilatation thermique de l'océan → l'océan se réchauffe, l'eau se dilate et la mer monte



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

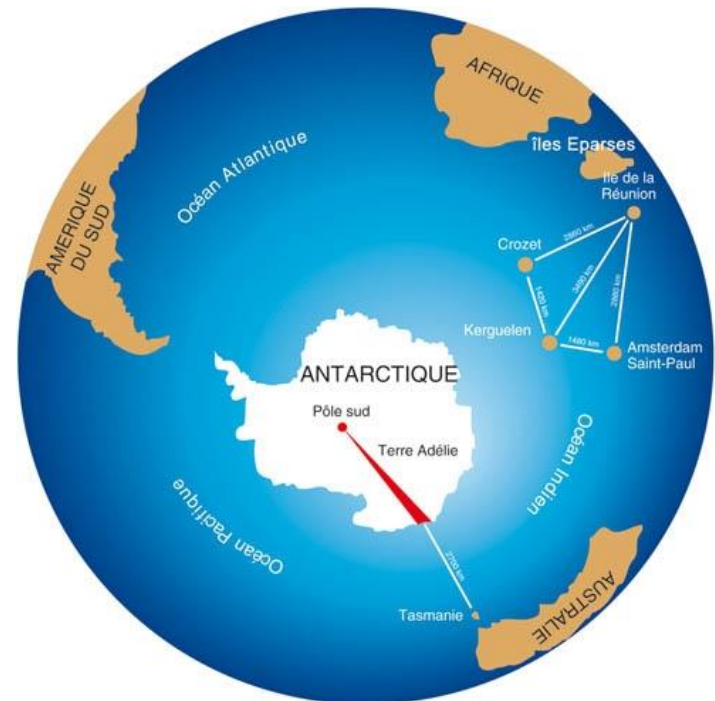


## Le Groenland



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

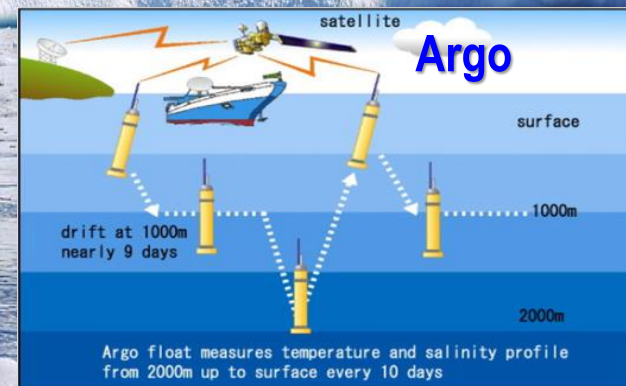
## L'Antarctique



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

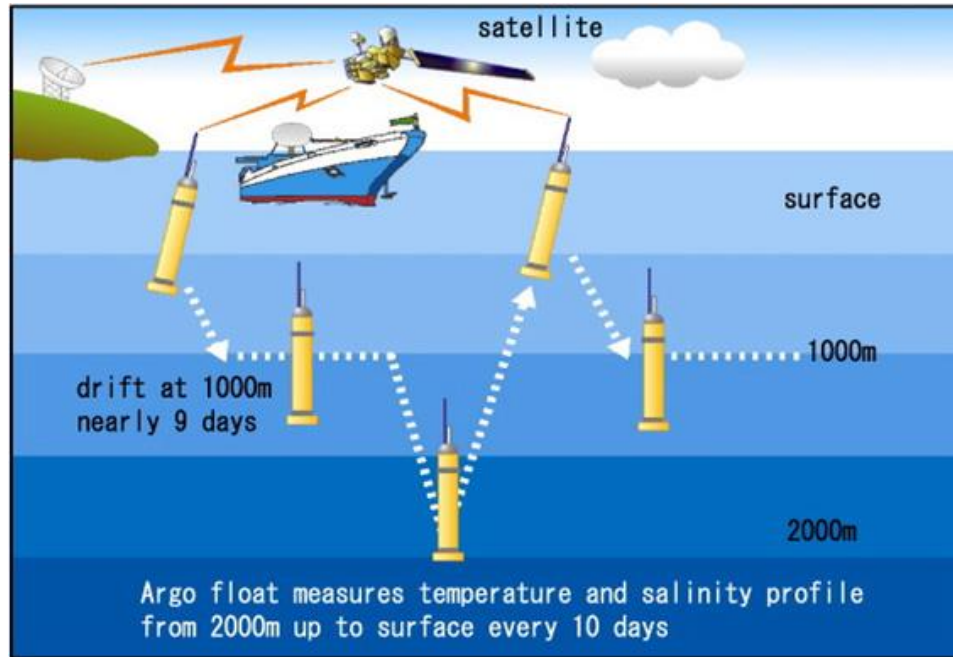


# Different systèmes d'observation

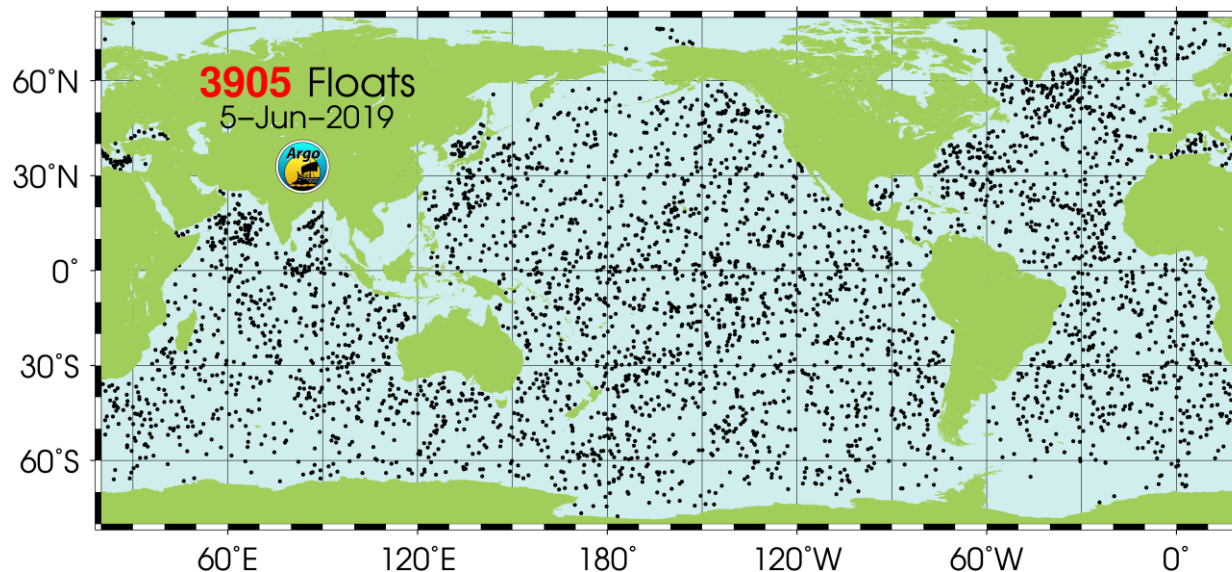




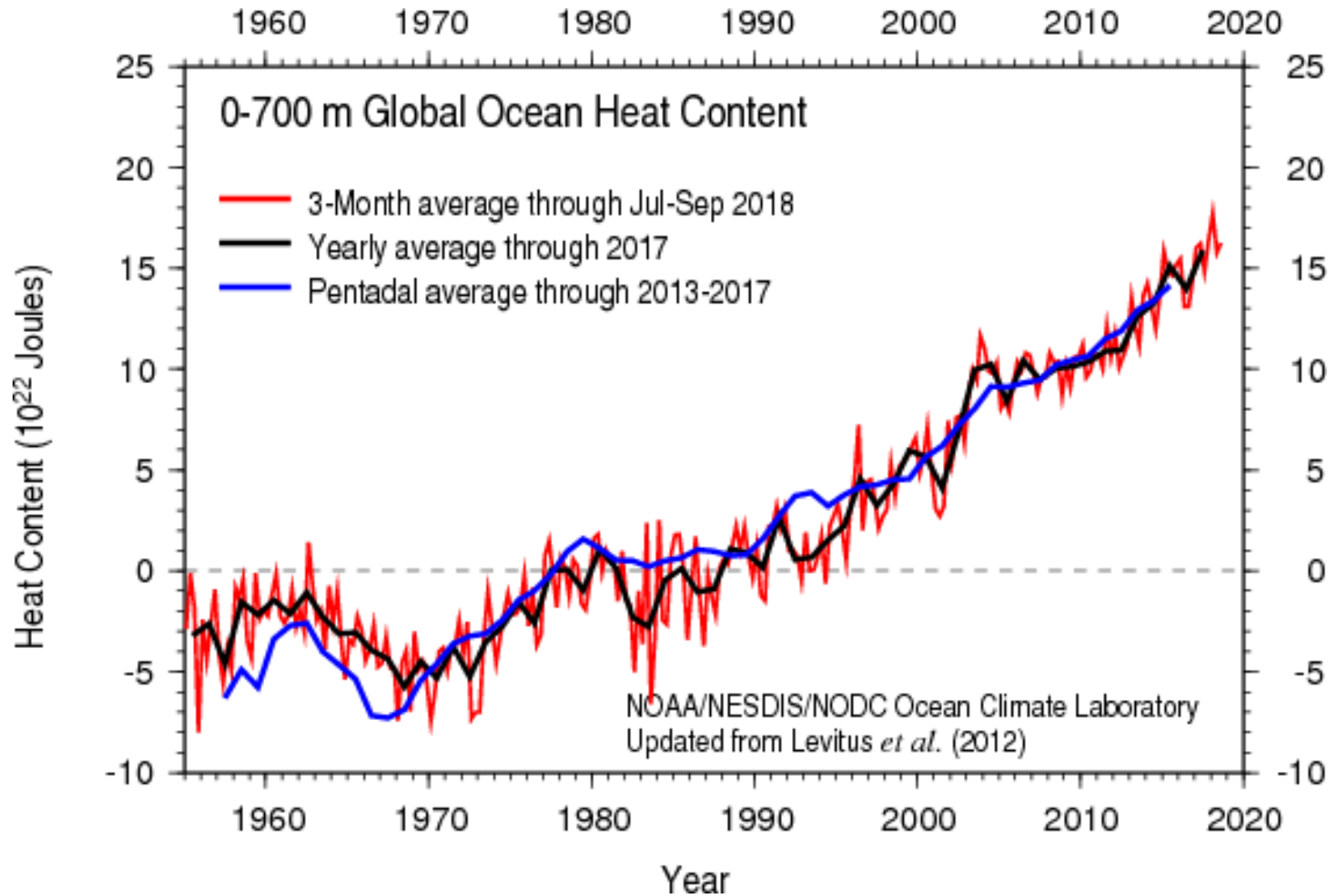
# Projet international ARGO → Expansion thermique de l'océan



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

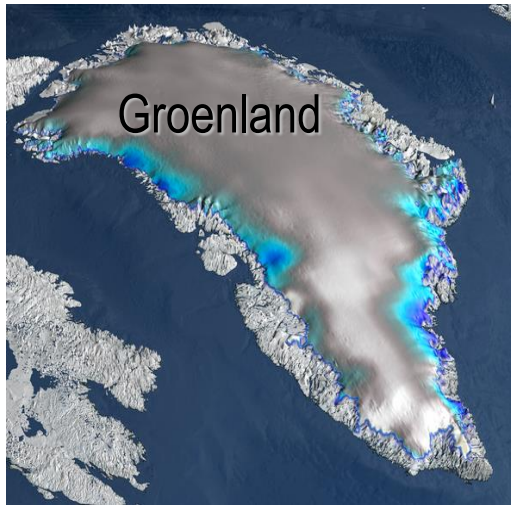


# Augmentation de l'expansion thermique de l'océan

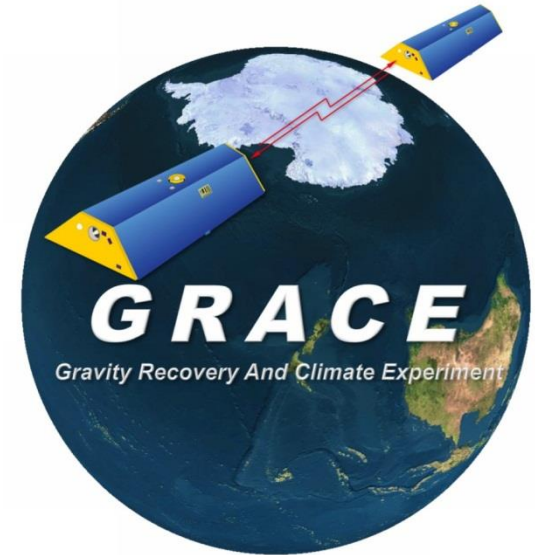


Source: Organisation Météorologique Mondiale, State of the Global Climate, 2018

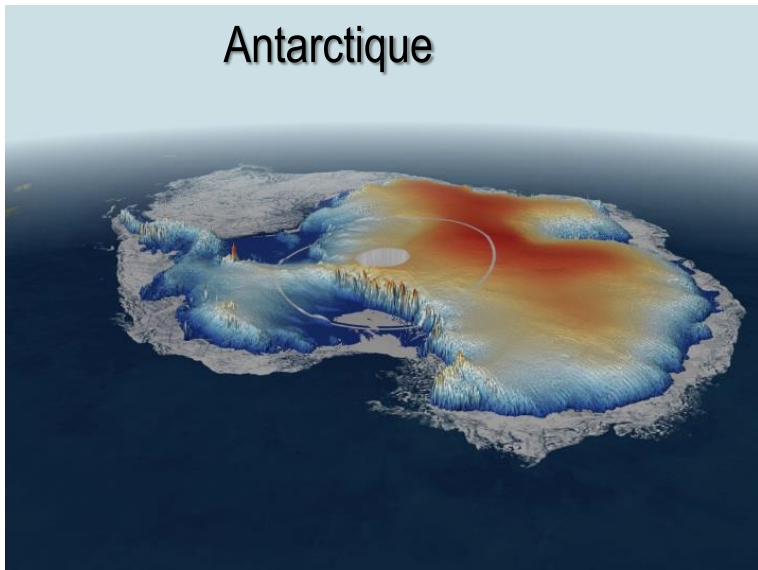
# Variations de masse des calottes polaires mesurées par satellite



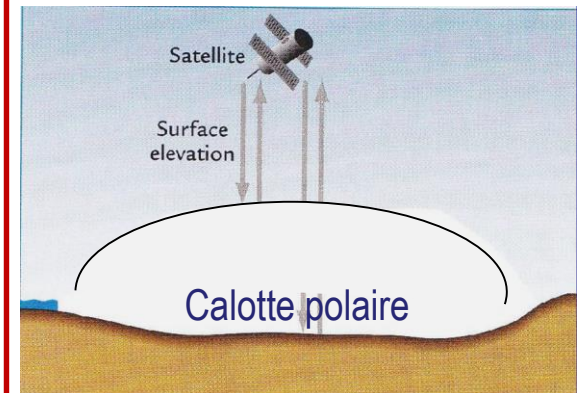
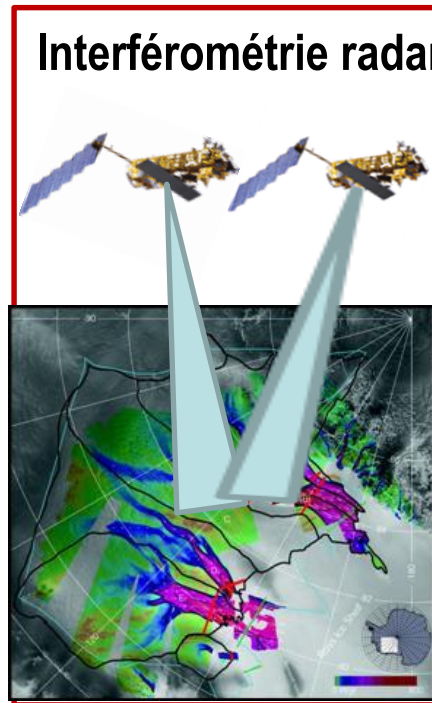
Gravimétrie  
spatiale « GRACE »



Antarctique



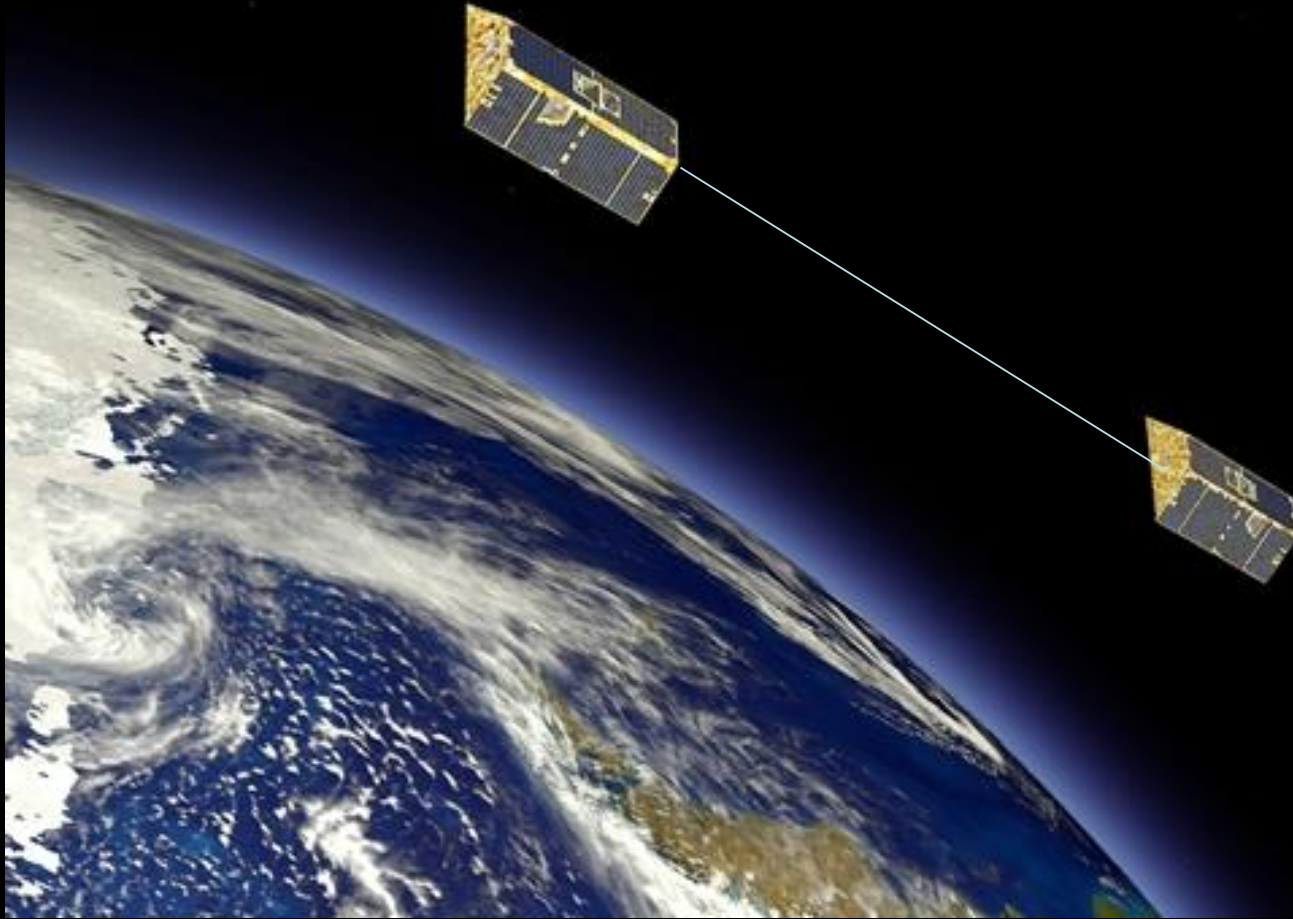
Interférométrie radar



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)**



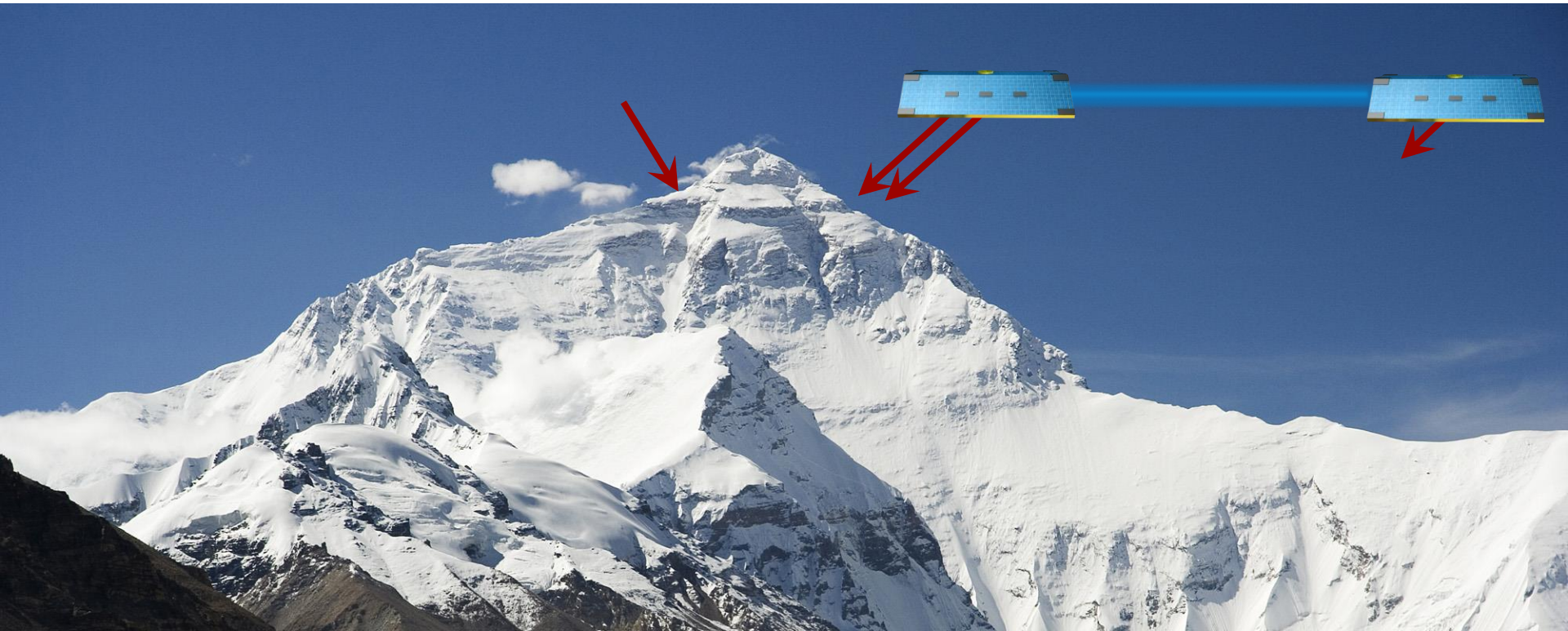
# Measurement Principle



Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)



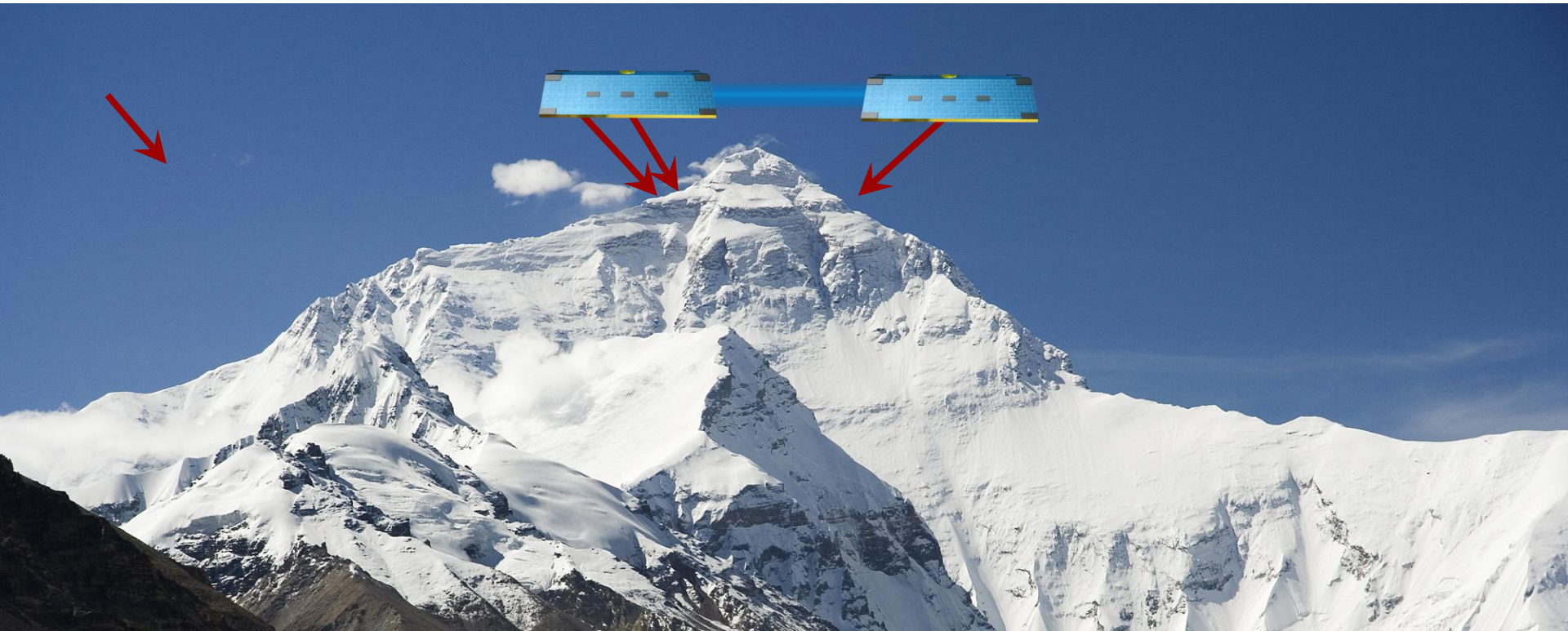
# Measurement Principle



Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)

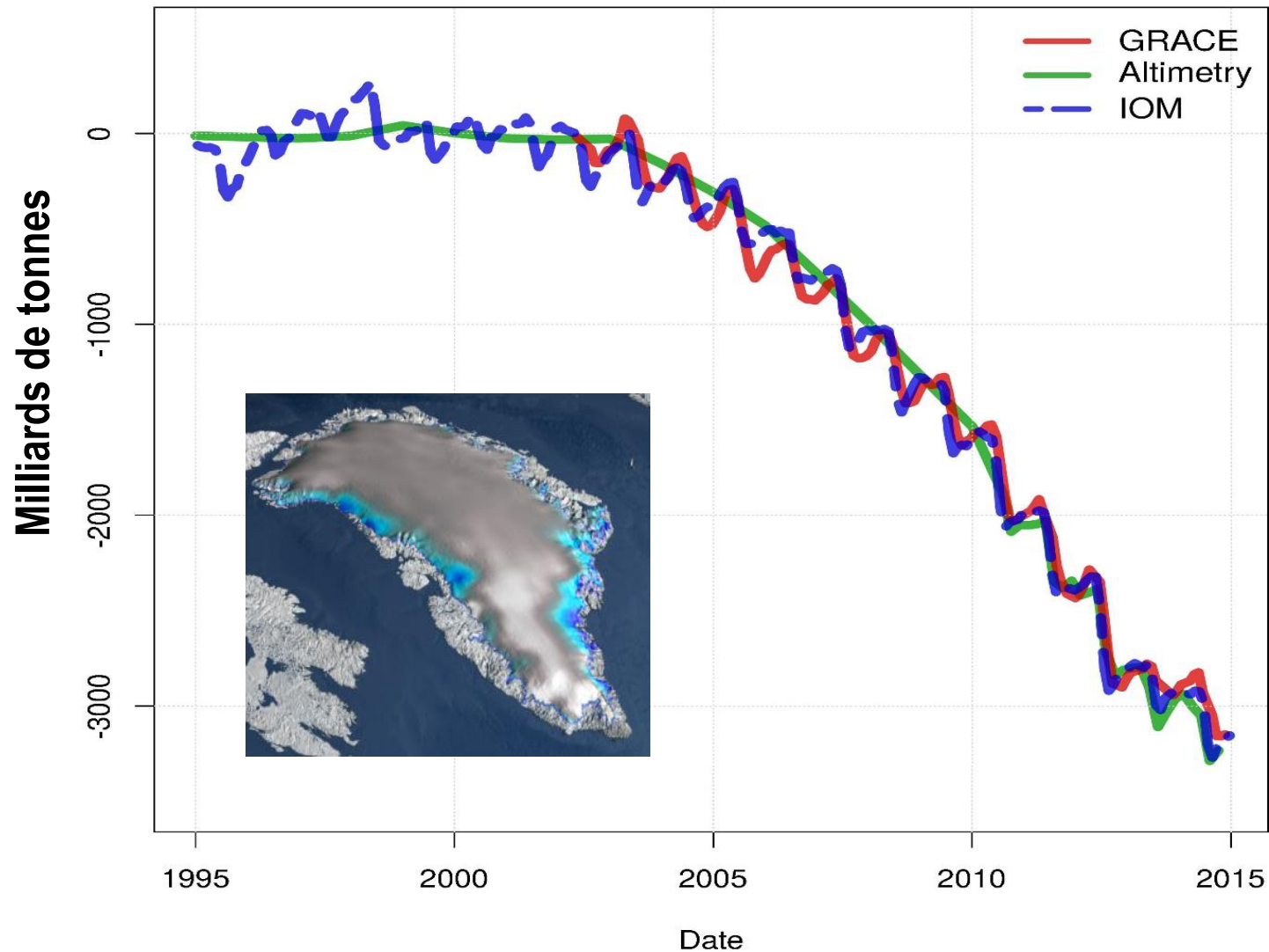


# Measurement Principle

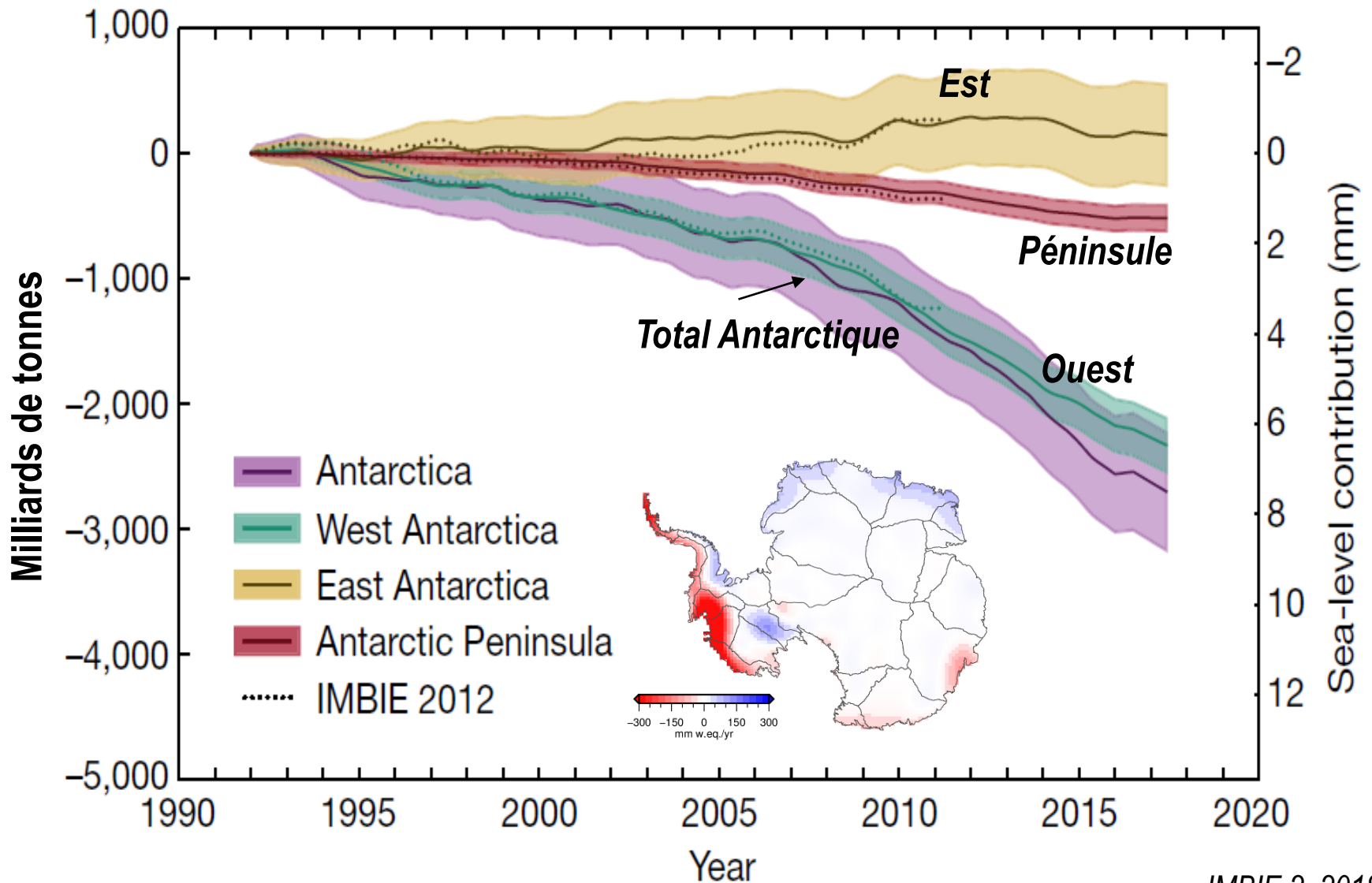


Courtesy: D. Schütze (AEI Hannover)

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

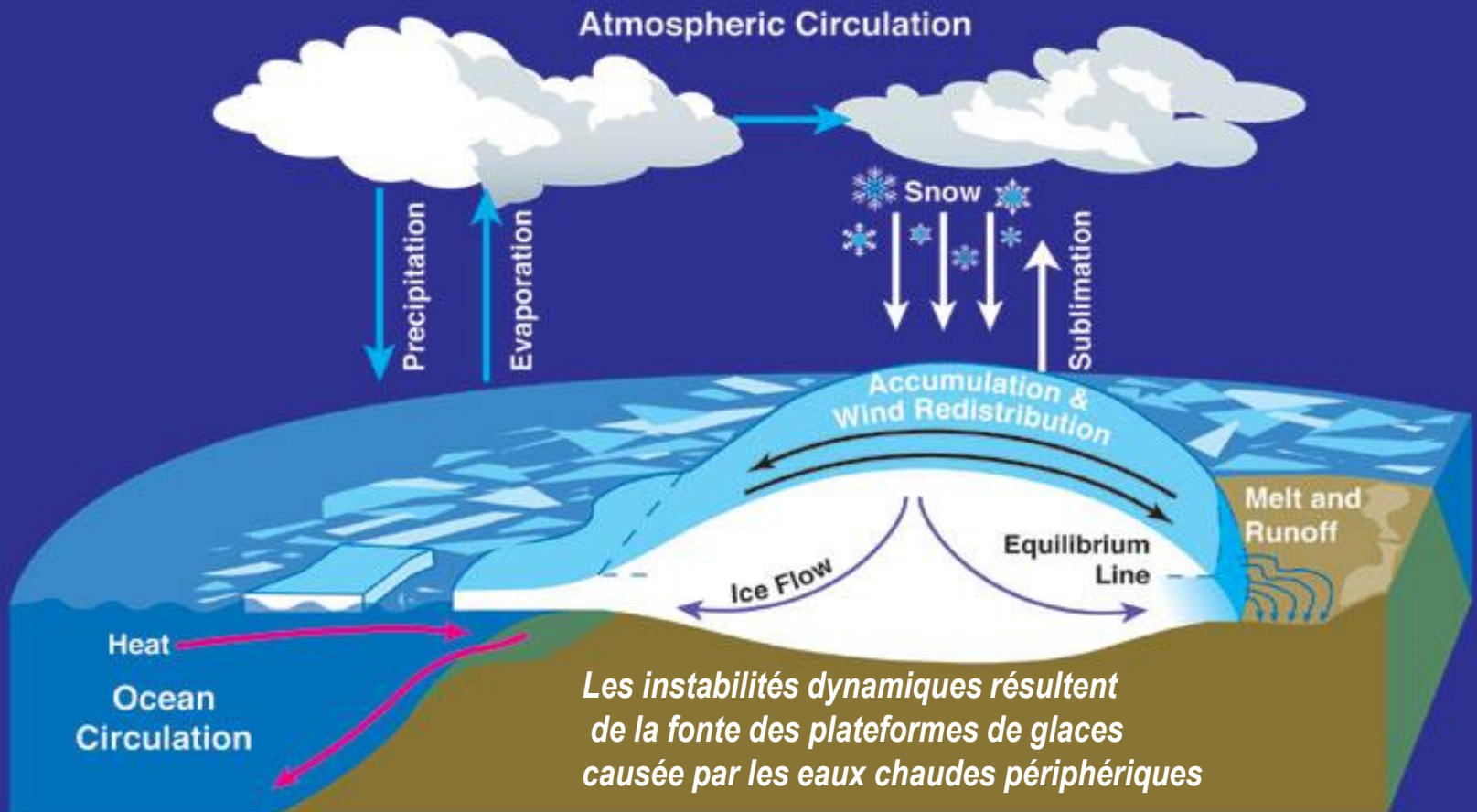


# Perte de masse de glace en Antarctique mesurée depuis l'espace (en milliards de tonnes)

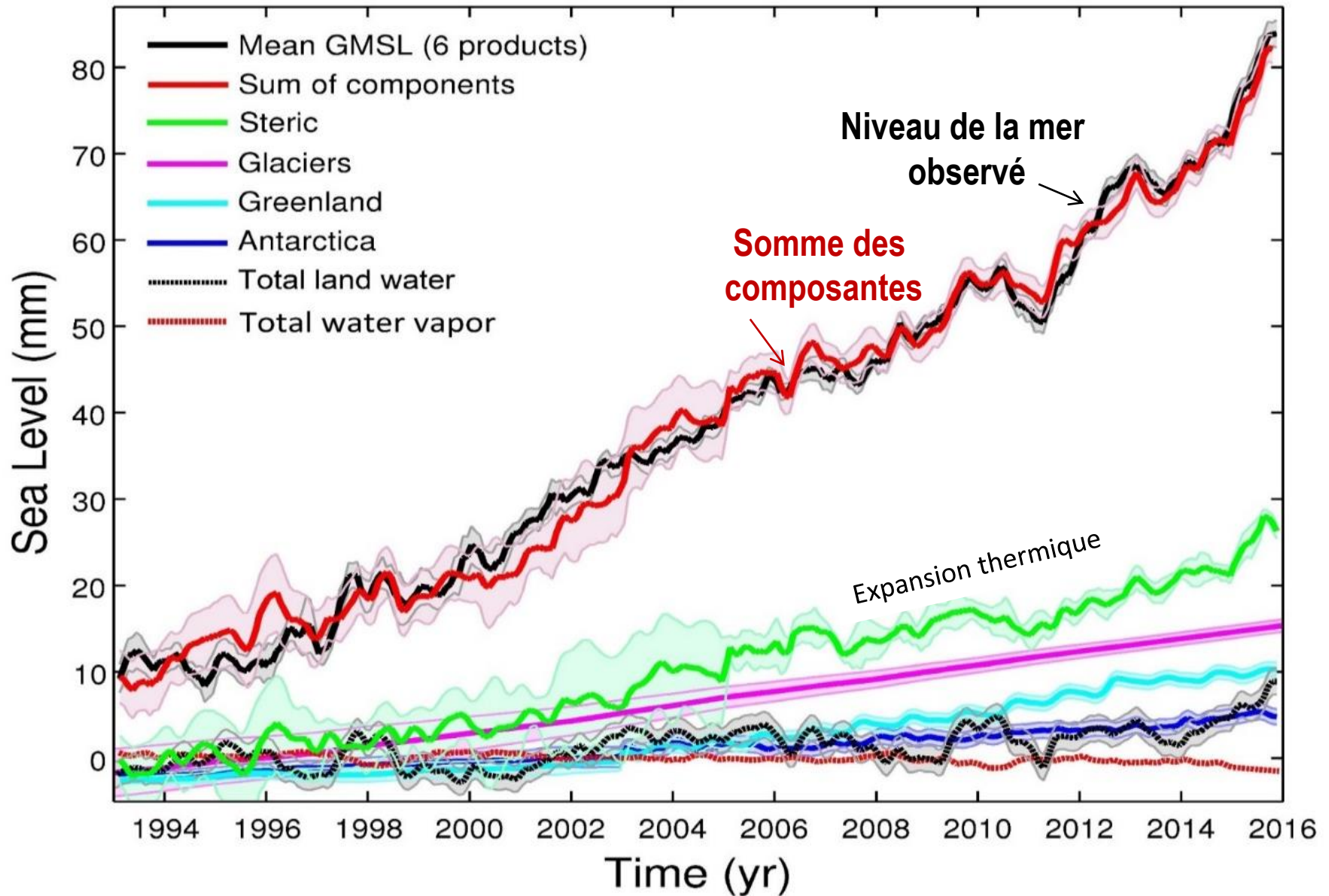




**Variation de masse des calottes polaires**  
= variation de masse en surface (**accumulation/ablation**)  
+ écoulement des glaciers côtiers dans la mer (**effet dynamique**)



# 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**

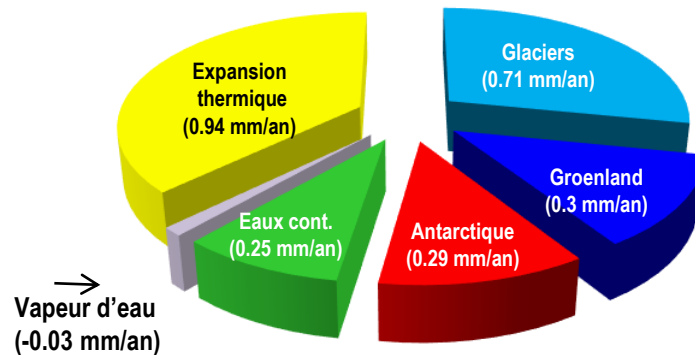


# A quoi servent ces études de bilan?

- ☐ 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

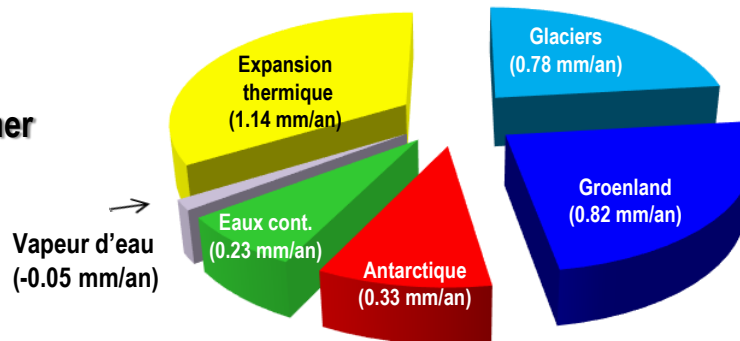
## Contributions individuelles à la hausse actuelle du niveau moyen de la mer

**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%*

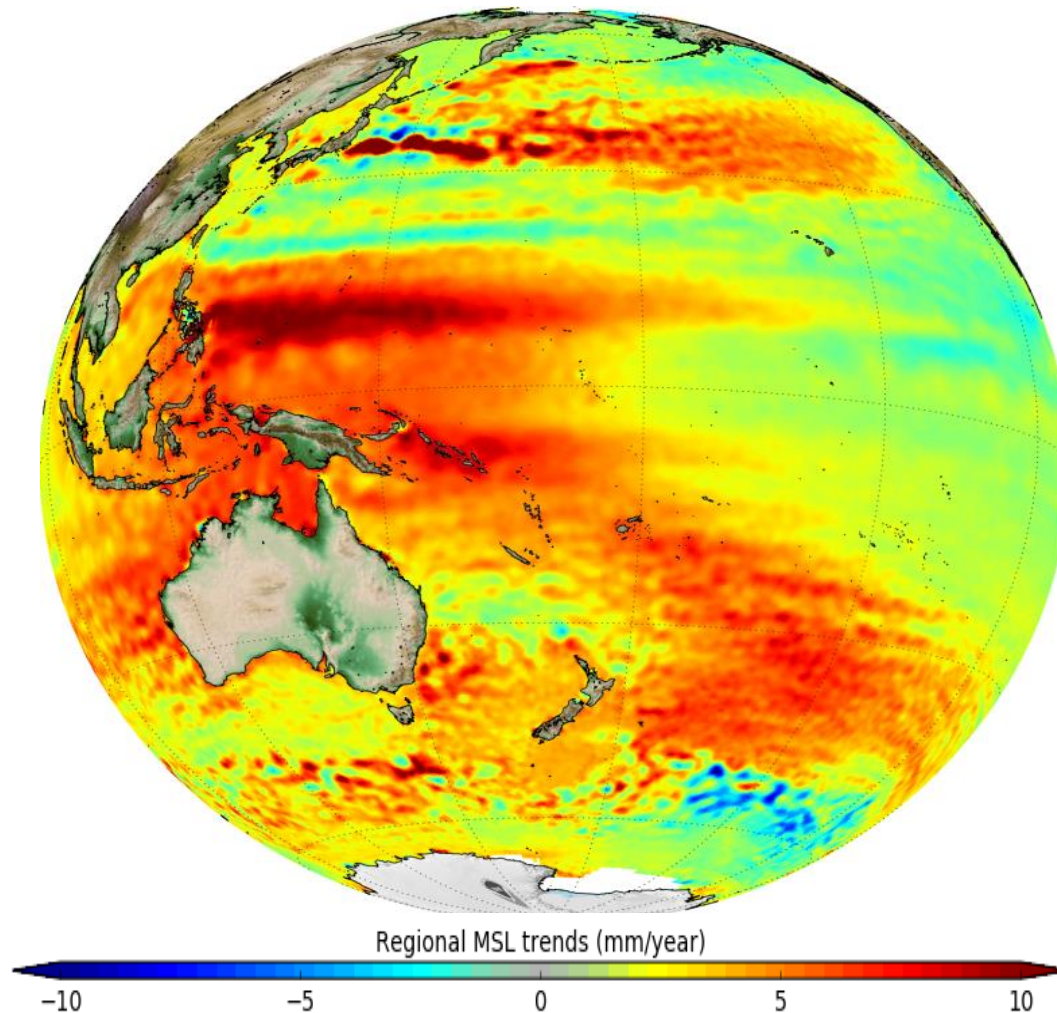
**ACCELERATION DE LA HAUSSE DE LA MER  
DUE A LA FONTE ACCELEREE DU GROENLAND**

**Sait-on expliquer la variabilité régionale de la mer?**



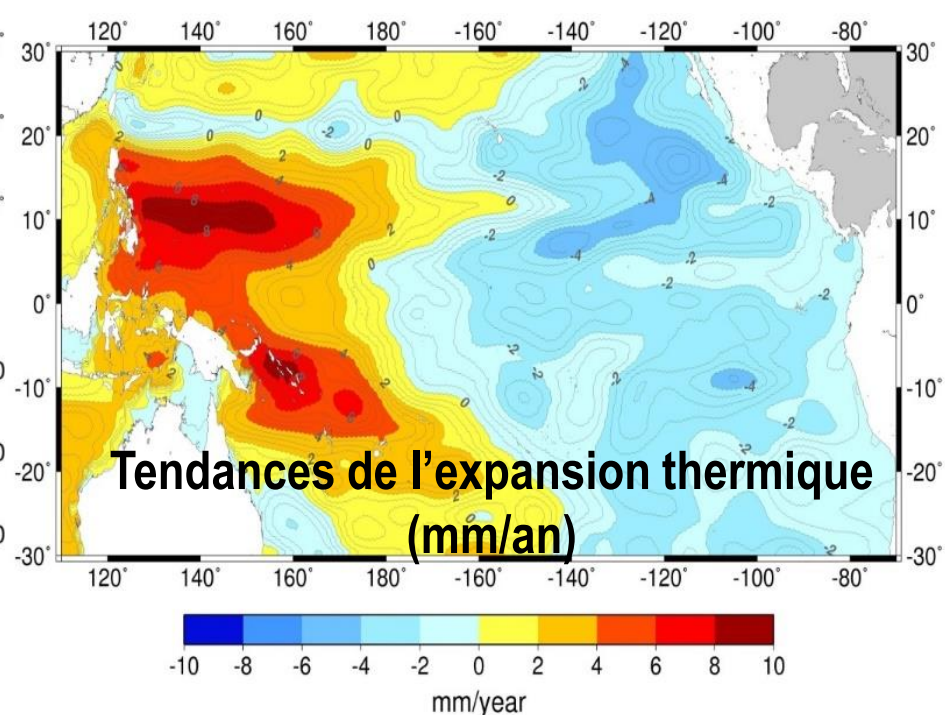
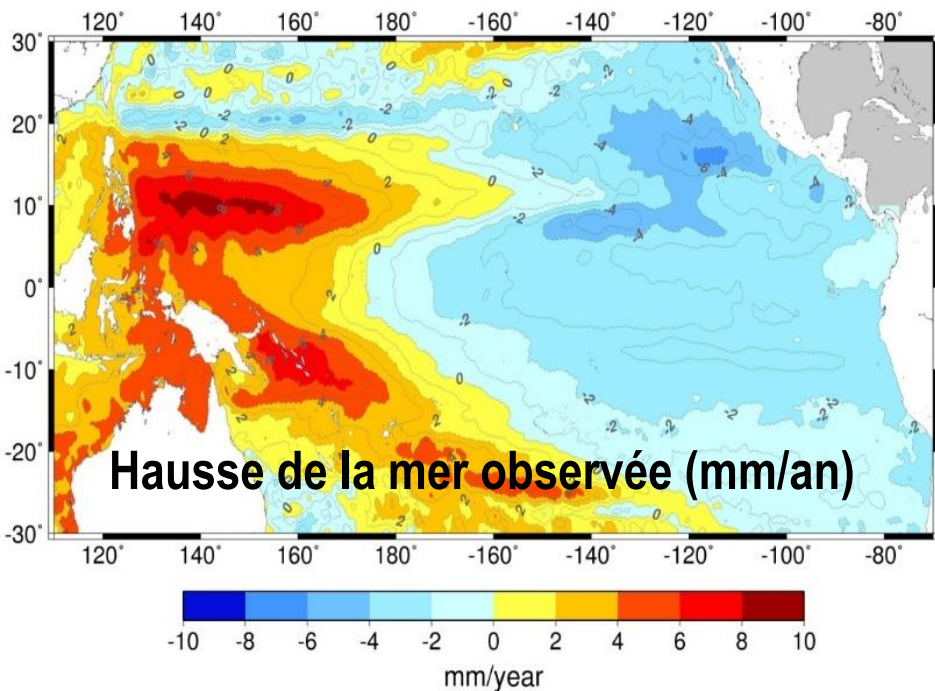
# Tendances régionales du niveau de la mer

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

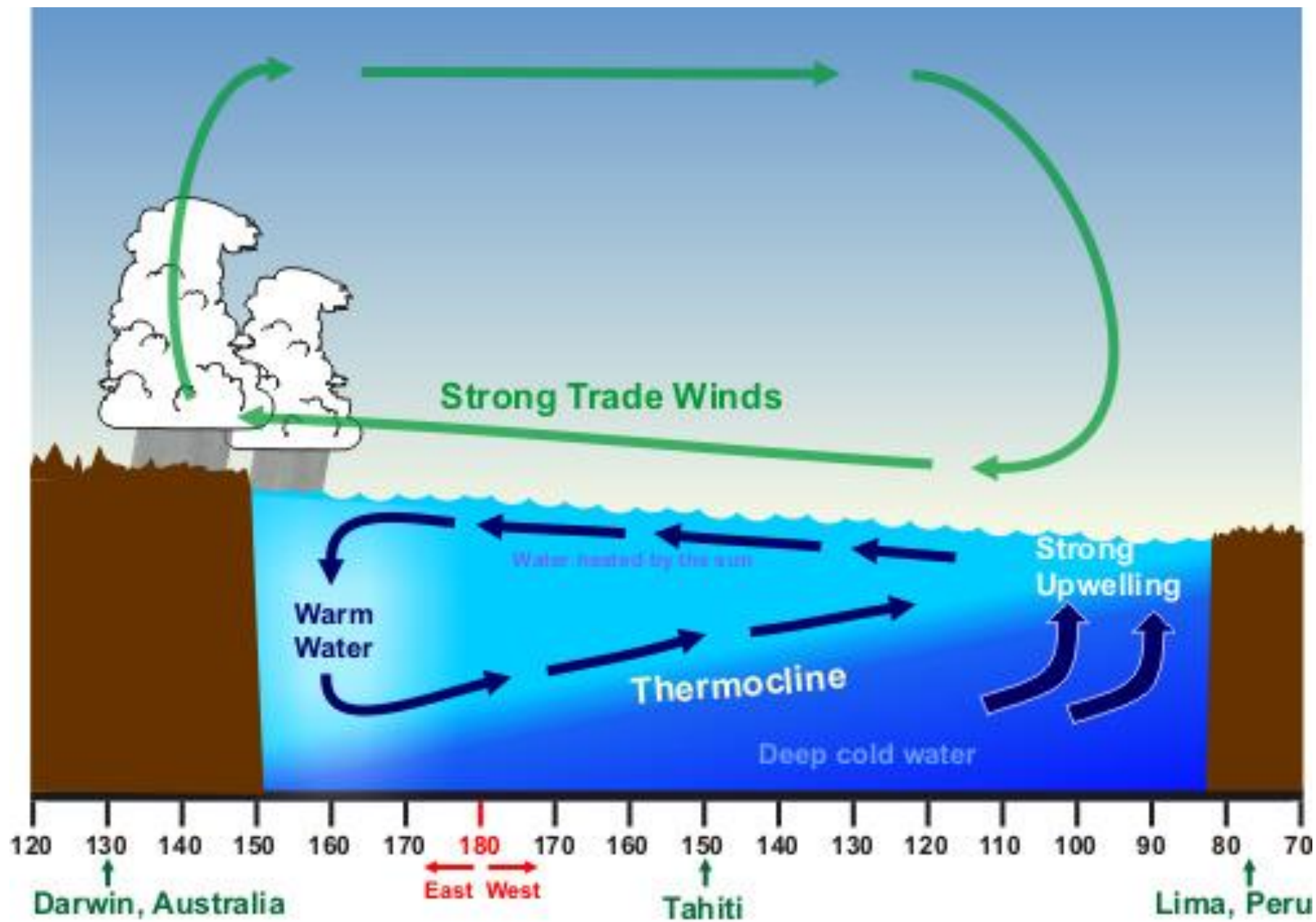


Source: ESA CCI

## 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...**

# PARIS 2015 COP21



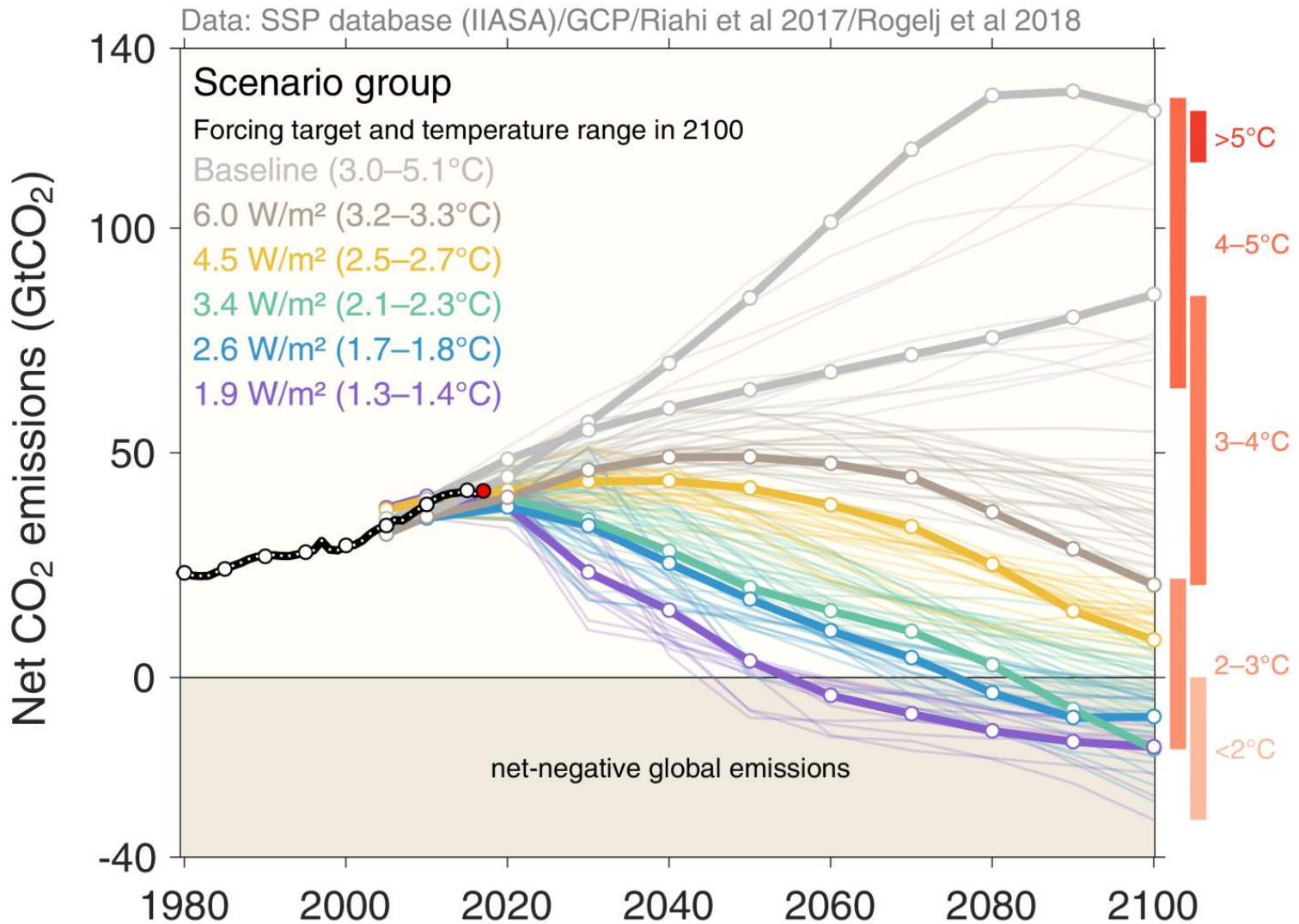


# Conférence des Nations Unies sur le climat (COP 21); Paris, 30 novembre-11 décembre 2015

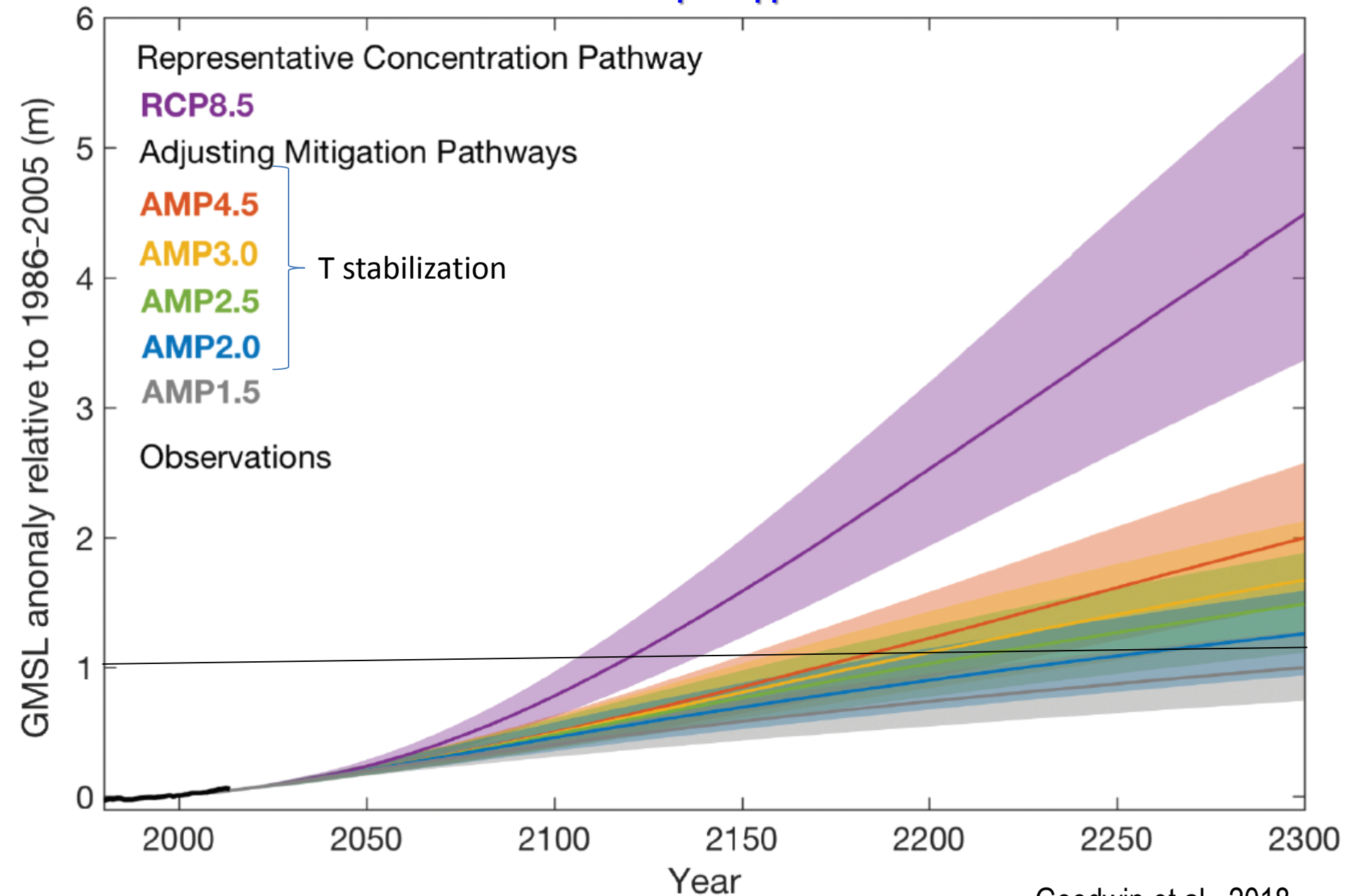
- 195 états
- Objectif : réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement en deçà de +2°C en 2100 (par rapport à 1850)
- 2°C, seuil à ne pas dépasser...



## Différents scénarios d'émissions futures de GES



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

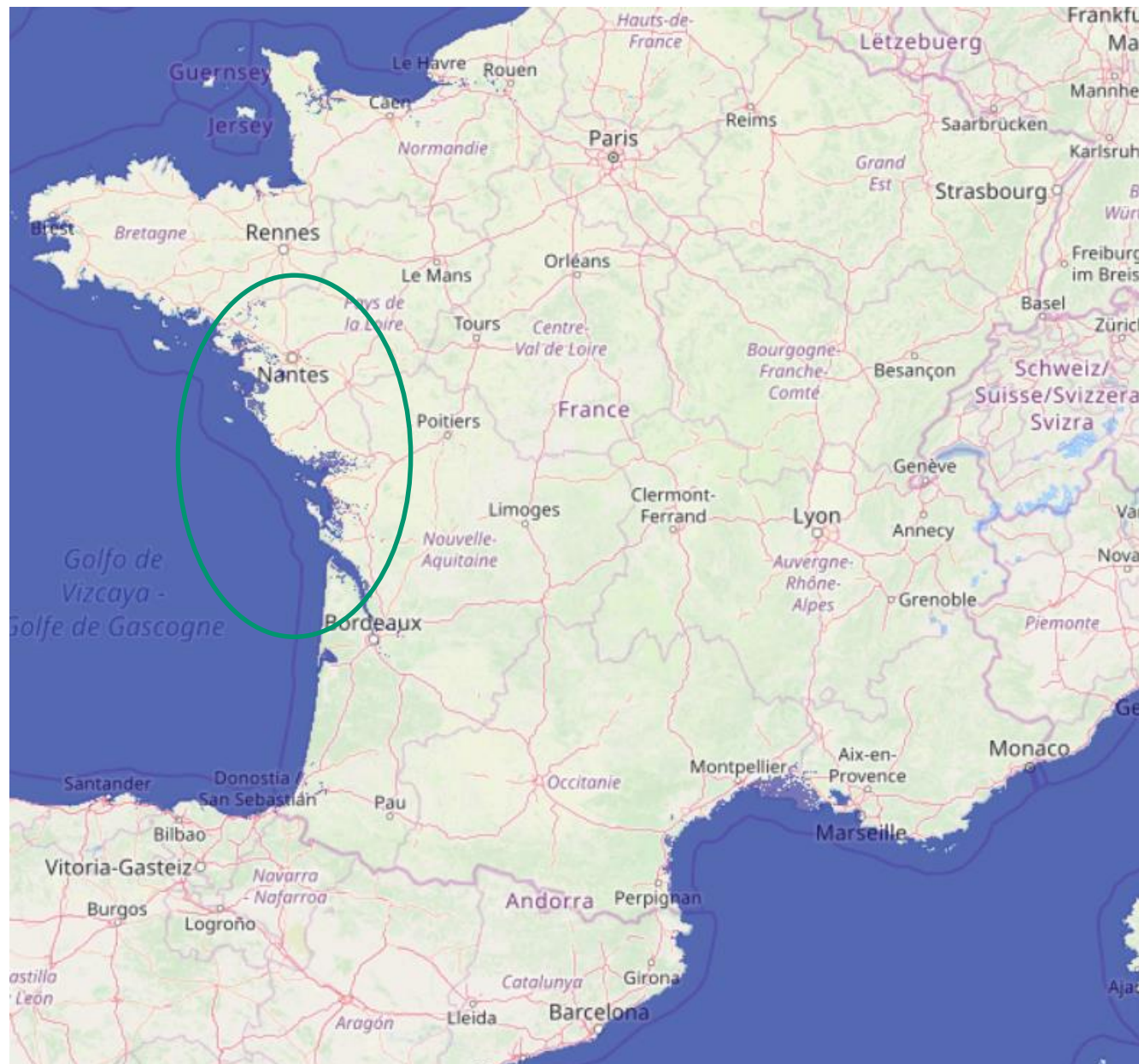




## Zones inondées si la mer monte de +1 m



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





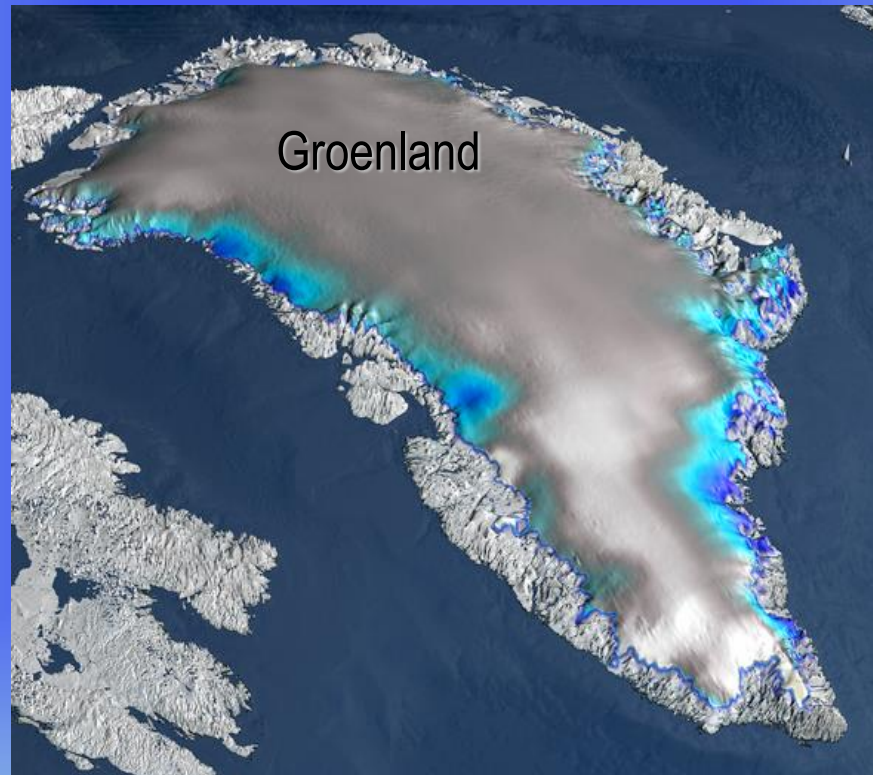
# Au-delà du 21<sup>ème</sup> siècle....

*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 CO<sub>2</sub> 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**



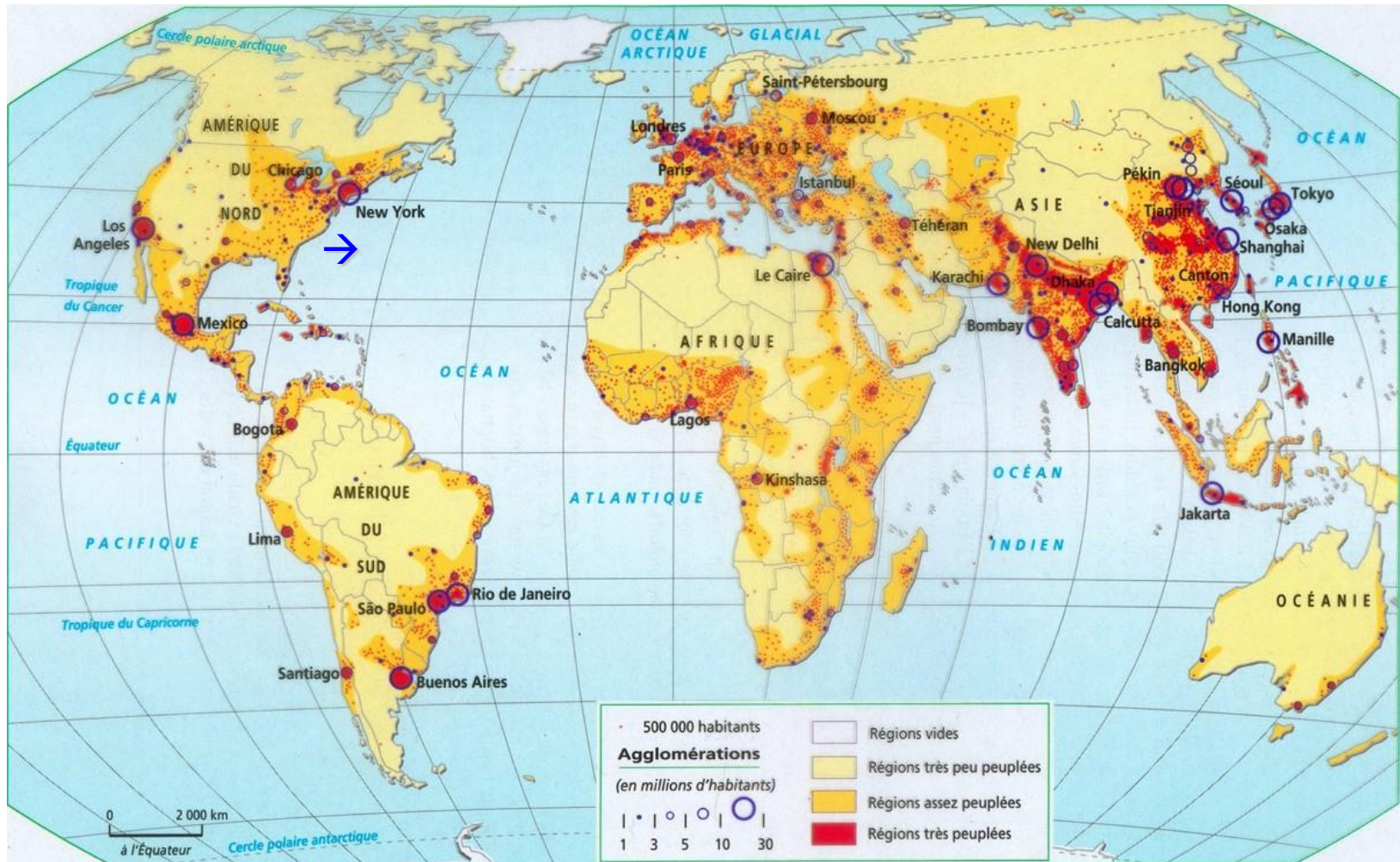
**Au dessus d'un certain seuil de réchauffement (entre 2°C et 4°C)  
La perte de glace du Groenland pourrait s'emballer:  
la calotte groenlandaise  
pourrait disparaître totalement en quelques siècles  
(→ 7 m de hausse du niveau de la mer)**



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

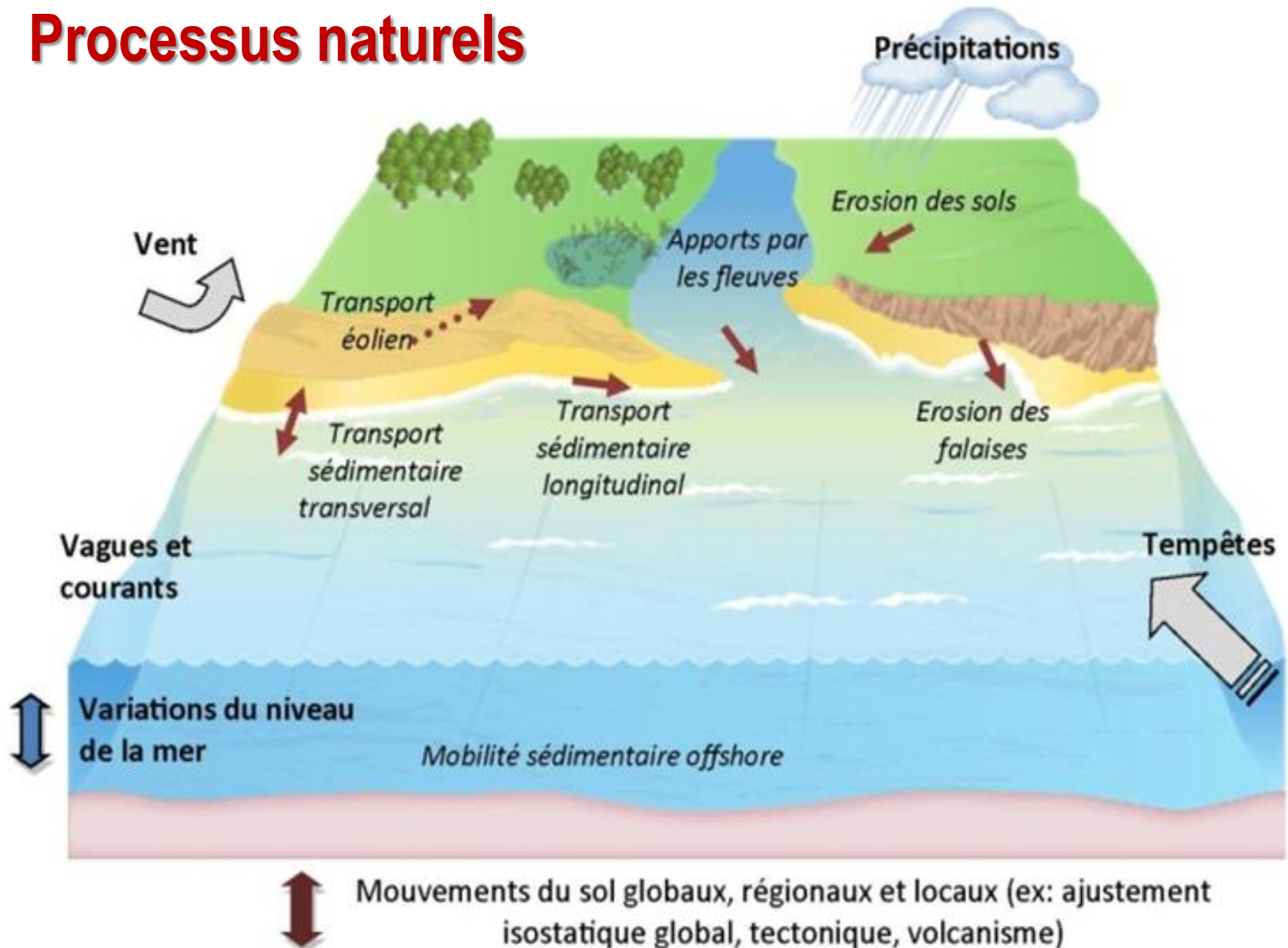
# Les zones côtières

- 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)



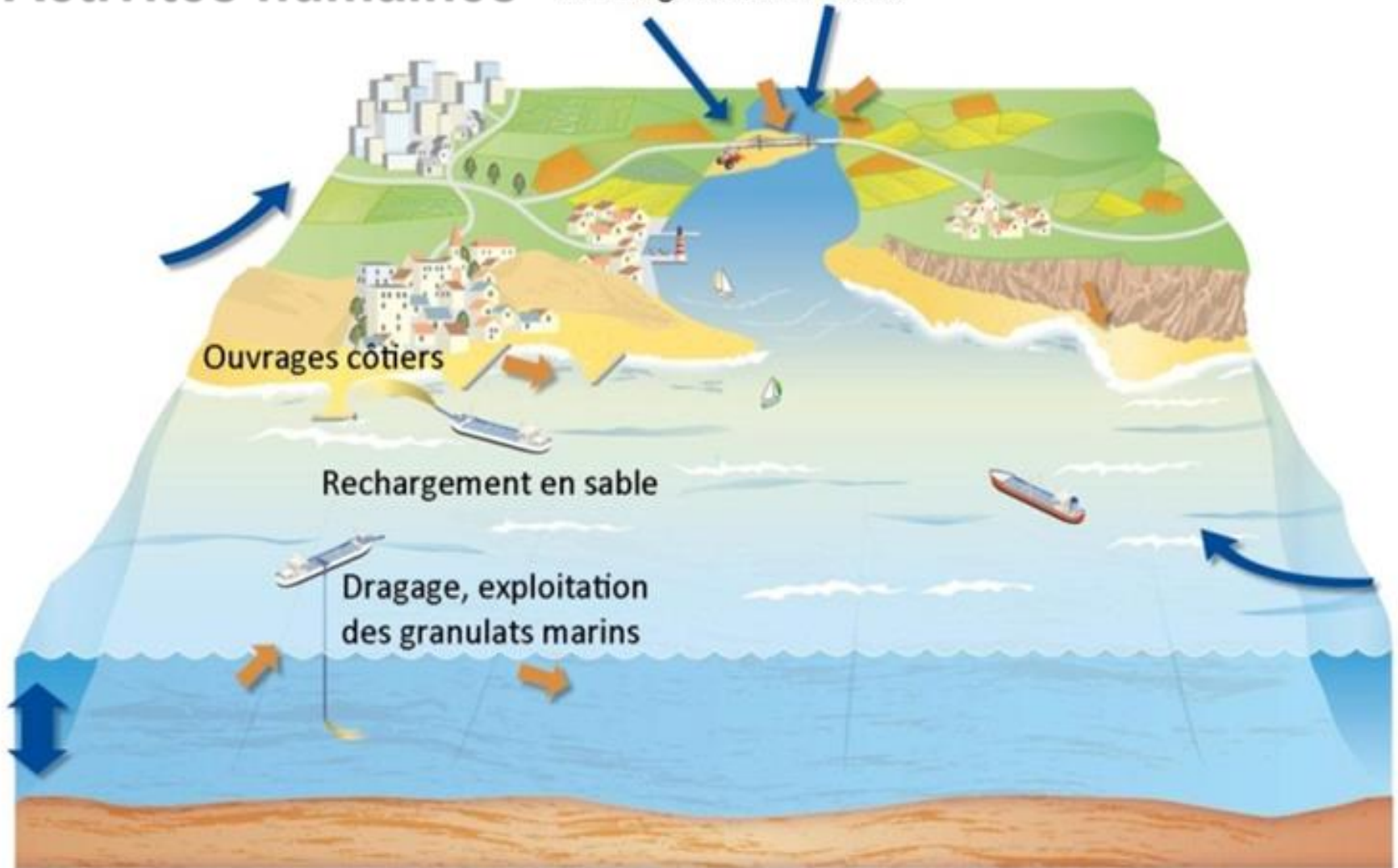


# Processus naturels



# Activités humaines

Aménagements fluviaux



Mouvements du sol régionaux et locaux d'origine anthropogénique (ex. extractions d'eau, d'hydrocarbures)

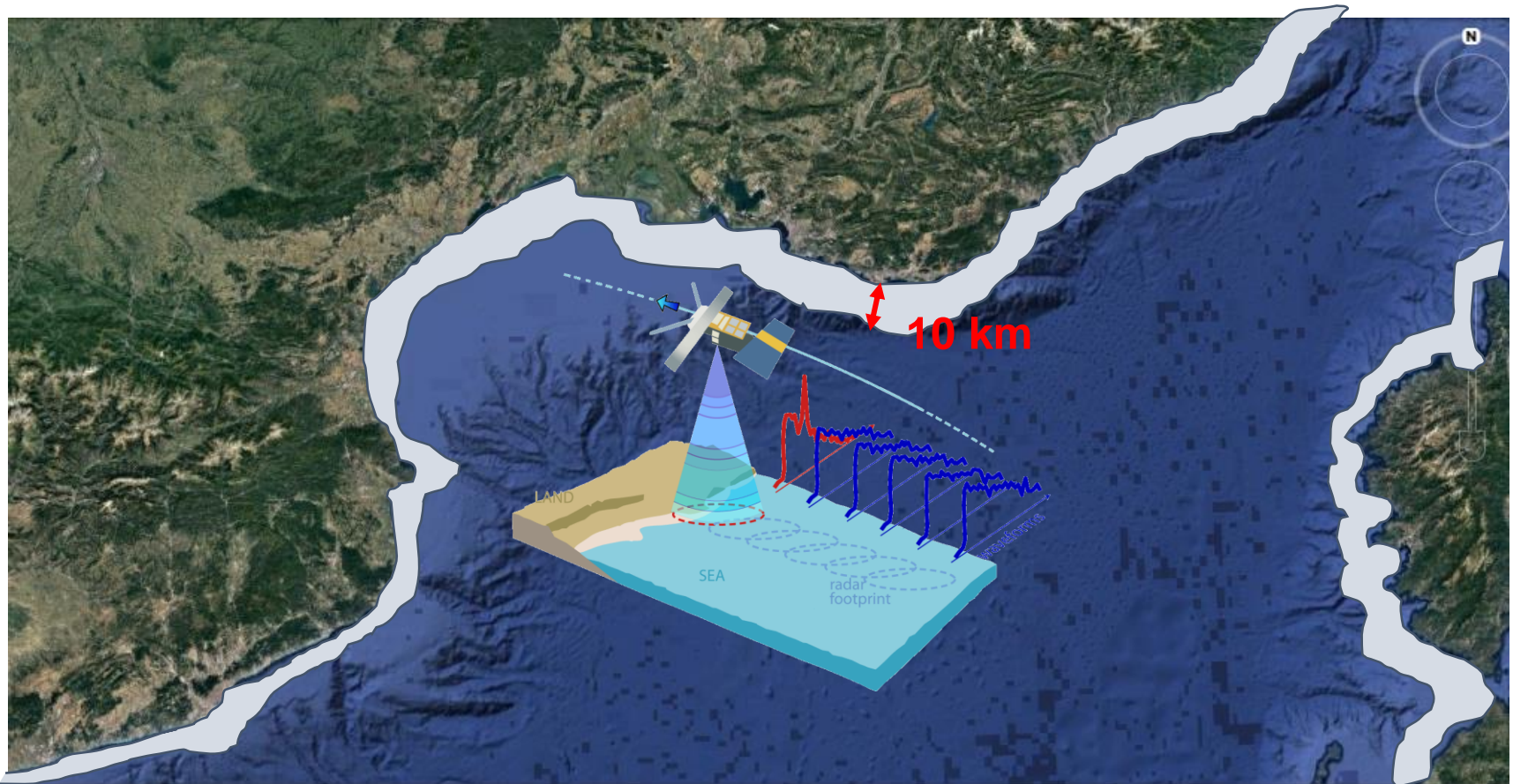


## Erosion des côtes: 25% des plages sableuses; en Europe, 75% des littoraux



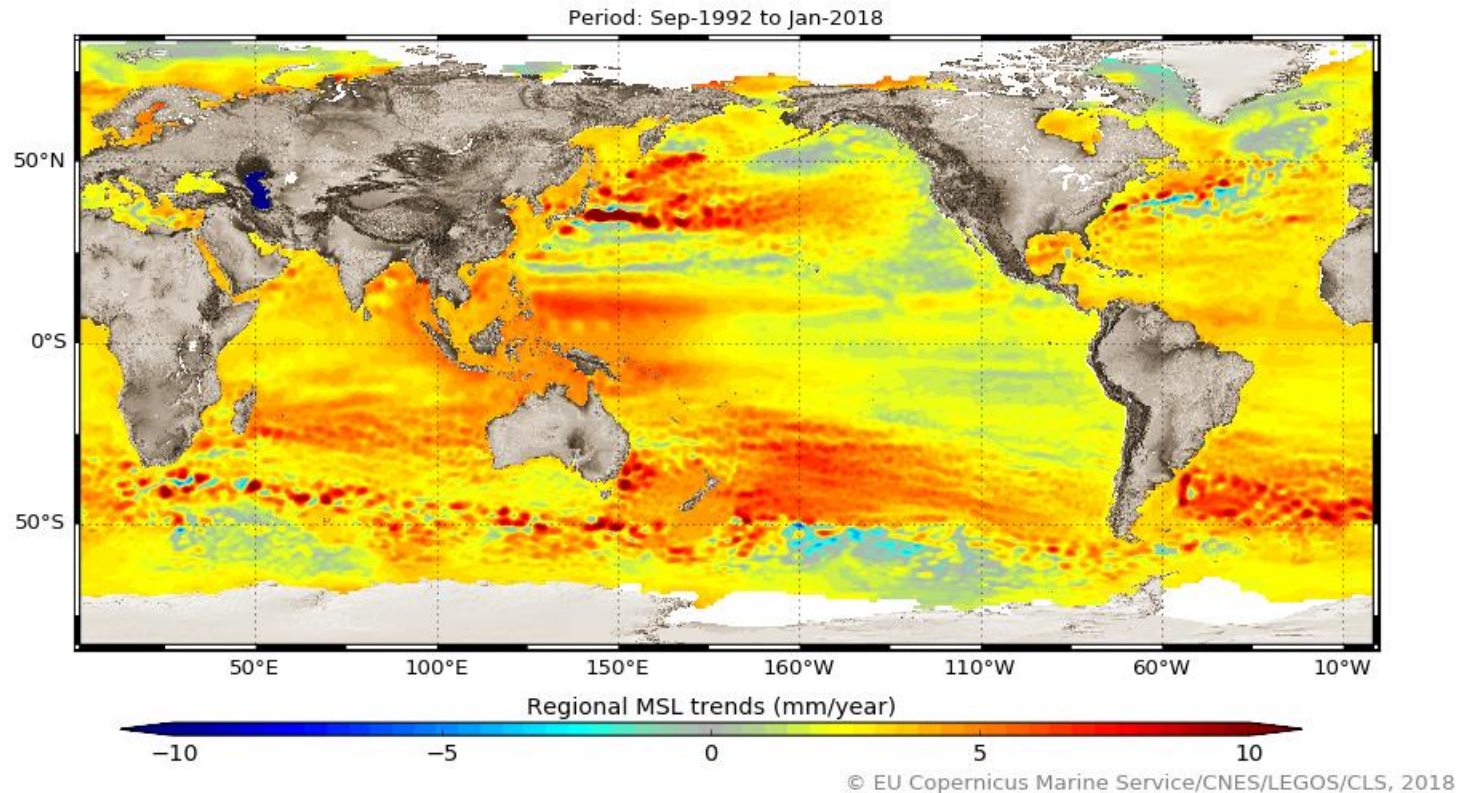


- Mais on ne sait pas quels sont les rôles respectifs des phénomènes naturels et des activités humaines dans le recul du trait de de côte et l'érosion du littoral



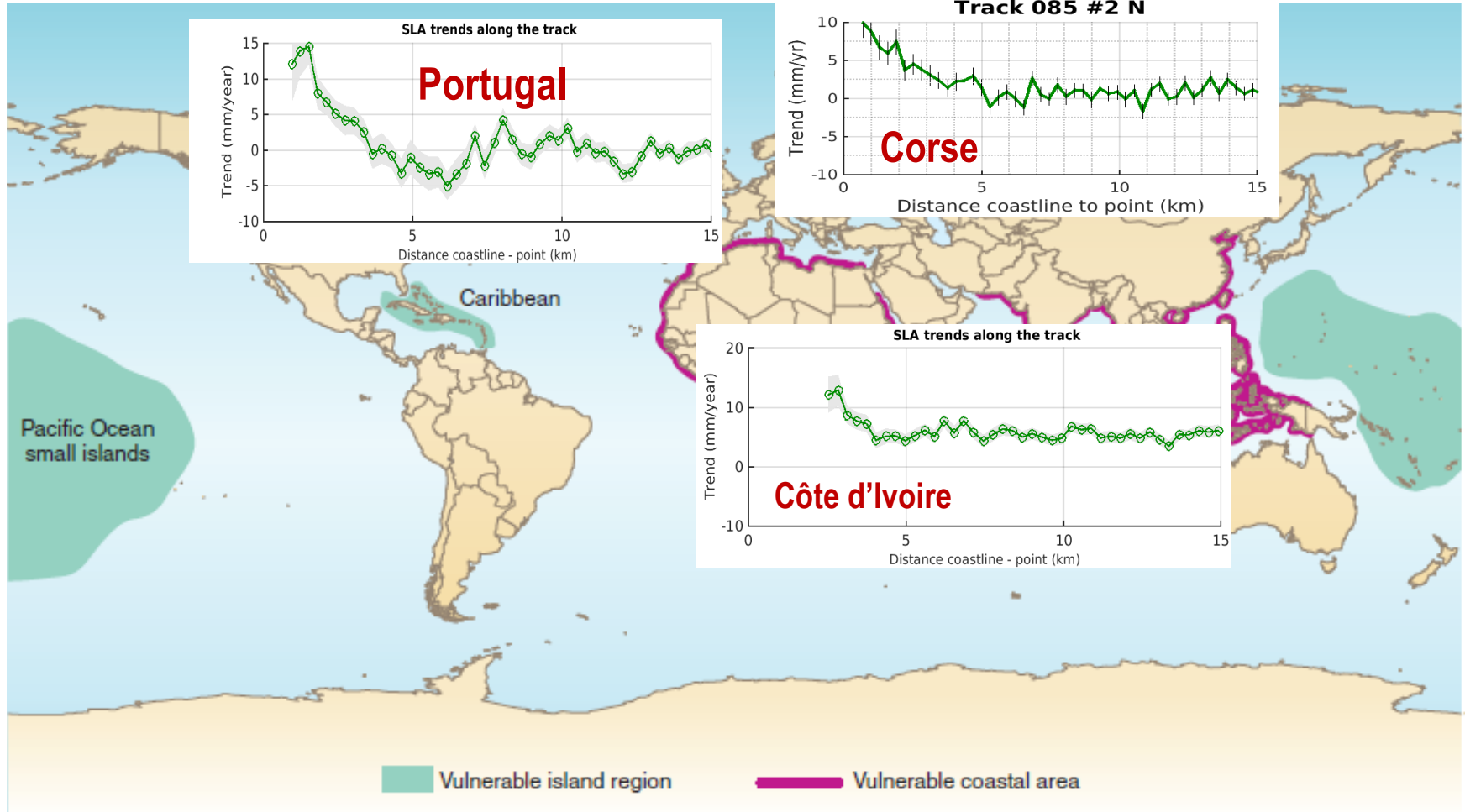
Et on ne sait toujours pas répondre à la question:  
« Le niveau de la mer à la côte monte-t-il à la même vitesse qu'au large ? »

## 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

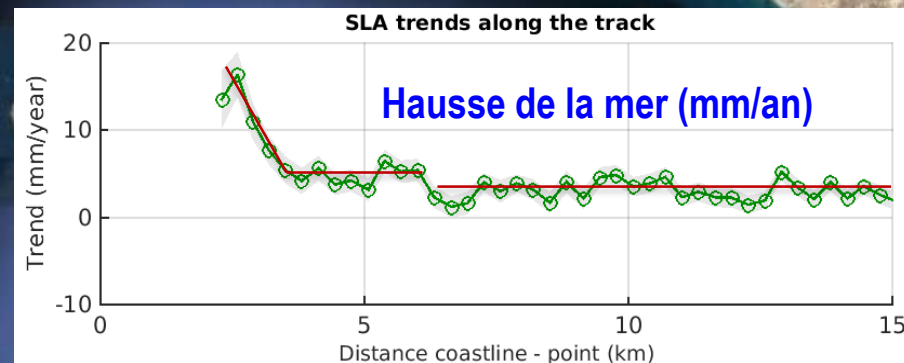
July 2002 - June 2016



mm/yr (a)

DAKAR

2 km de la côte



Google Earth

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
Image © 2018 DigitalGlobe



10 km

# Afrique de l'ouest



**Ce qui compte à la côte:**

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

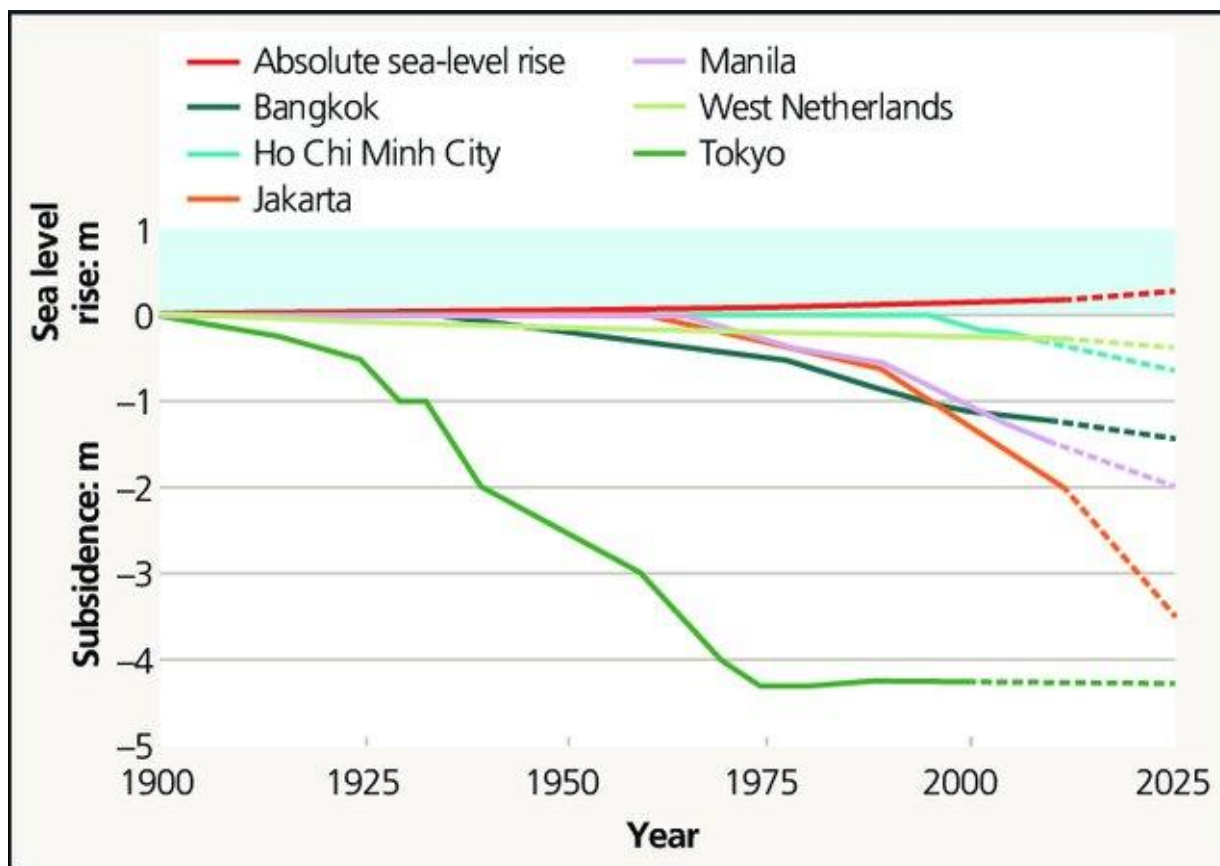
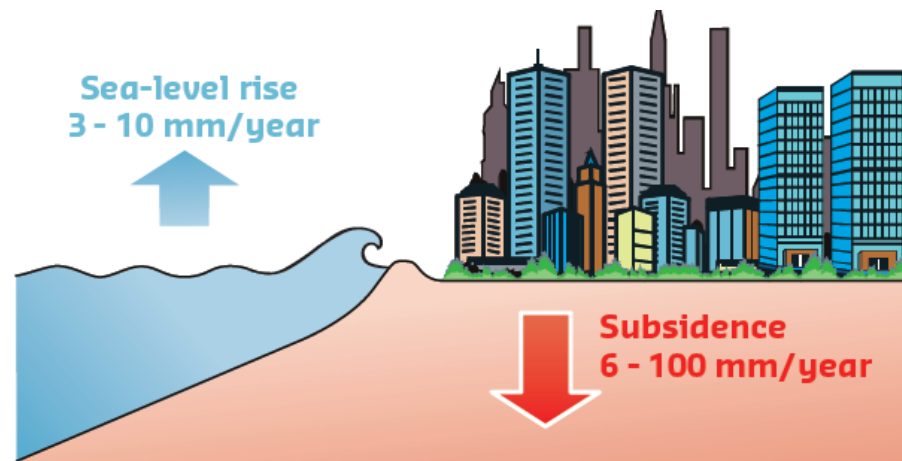


**$\Sigma$  (*hausse moyenne globale*  
*+ tendances régionales*  
*+ dynamique local océanique locale*)\*  
*+ mouvements verticaux du sol***

\* 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....**



## Les accords de Paris sur le climat en 2015....

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

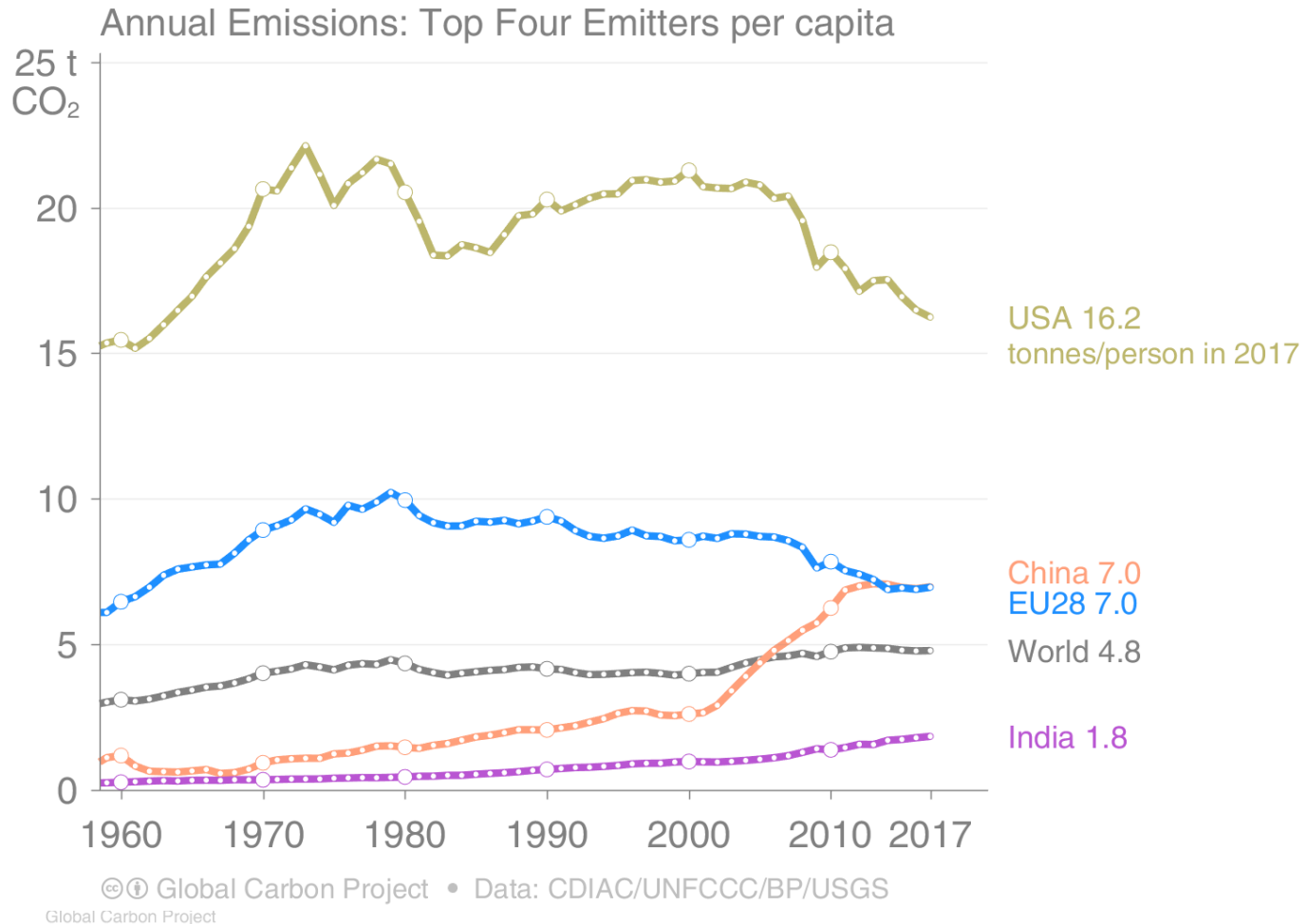


**Pour rester au dessous de 2°C, la valeur cumulée des émissions de CO<sub>2</sub> ne doit pas dépasser 3200 GtCO<sub>2</sub>**  
***Déjà émis : 2000 GtCO<sub>2</sub>; Reste 1200 GtCO<sub>2</sub>.....***



**Correspond à 1.7 tonnes CO<sub>2</sub>/habitant**

# Emissions de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>)**
- **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 CO<sub>2</sub> (équivalent émissions CO<sub>2</sub>)
- 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**





**Merci pour votre attention**

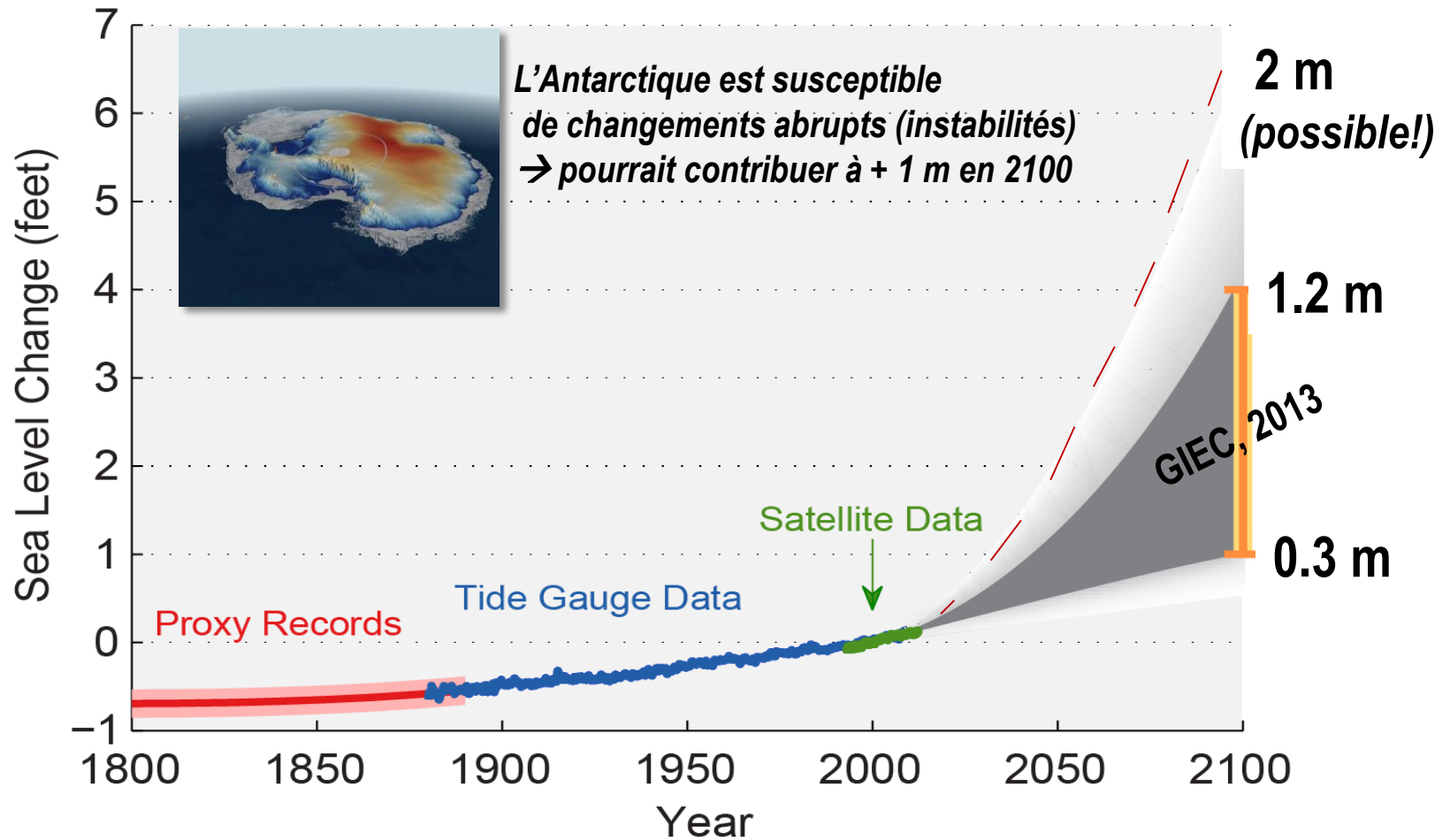


# Niveau de la mer

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

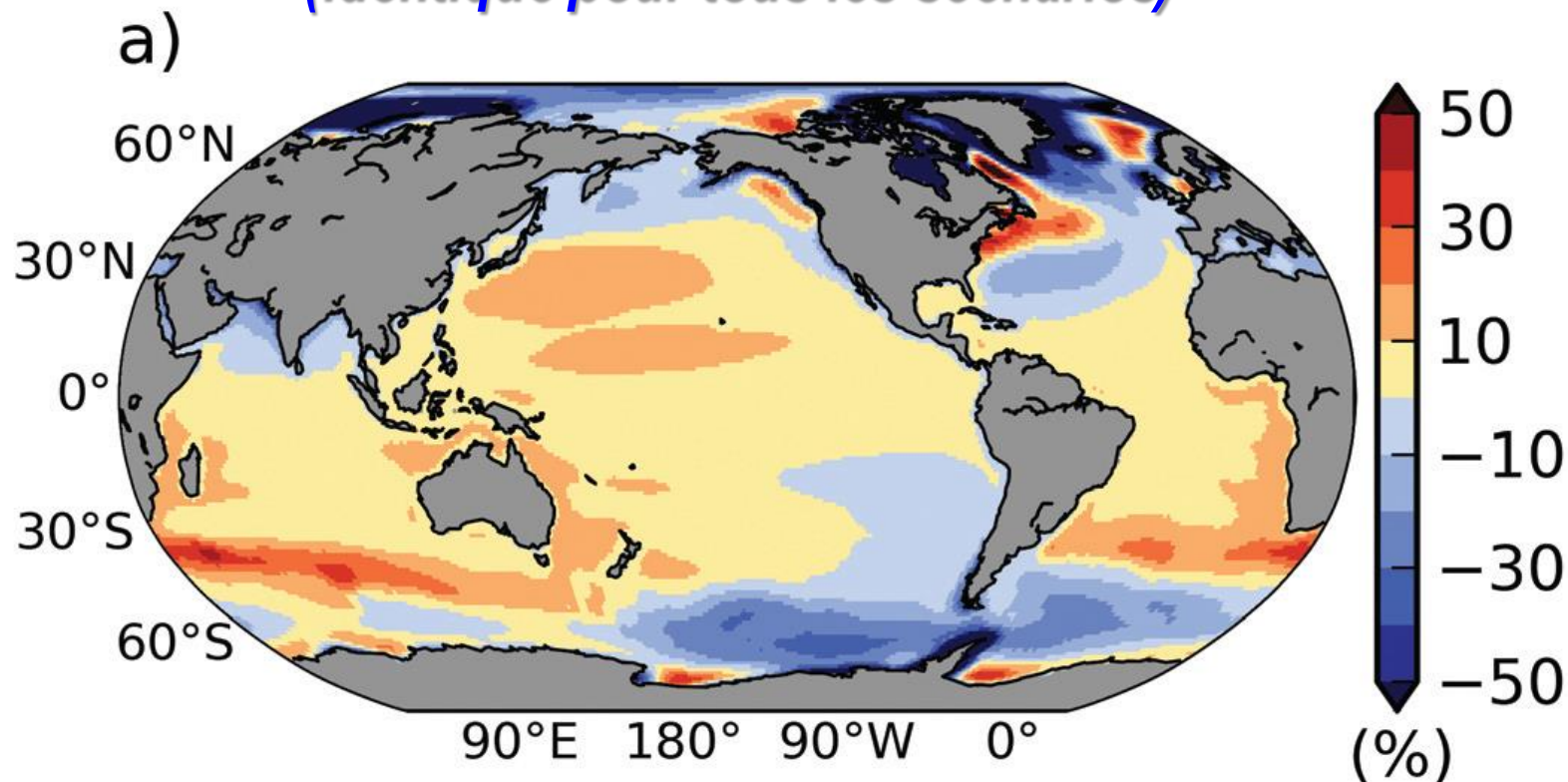
**Avec les événements extrêmes, la hausse future de la mer est une menace majeure pour les régions côtières basses et peuplées de la planète**

## La mer va continuer à monter

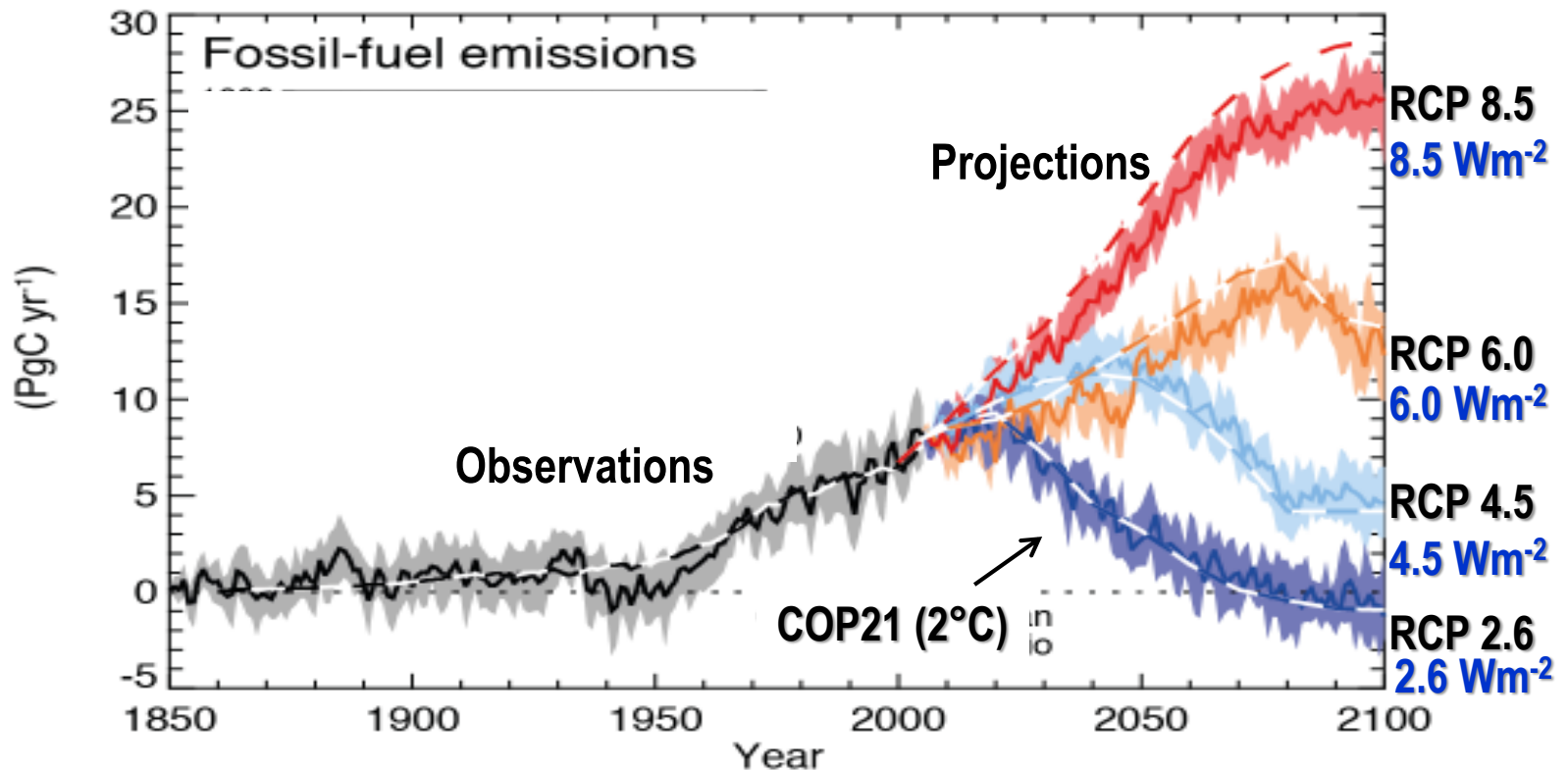




## Variabilité régionale de la mer en 2100 Ecart (%) à la hausse moyenne (identique pour tous les scénarios)



## 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  $\text{Wm}^{-2}$ )**