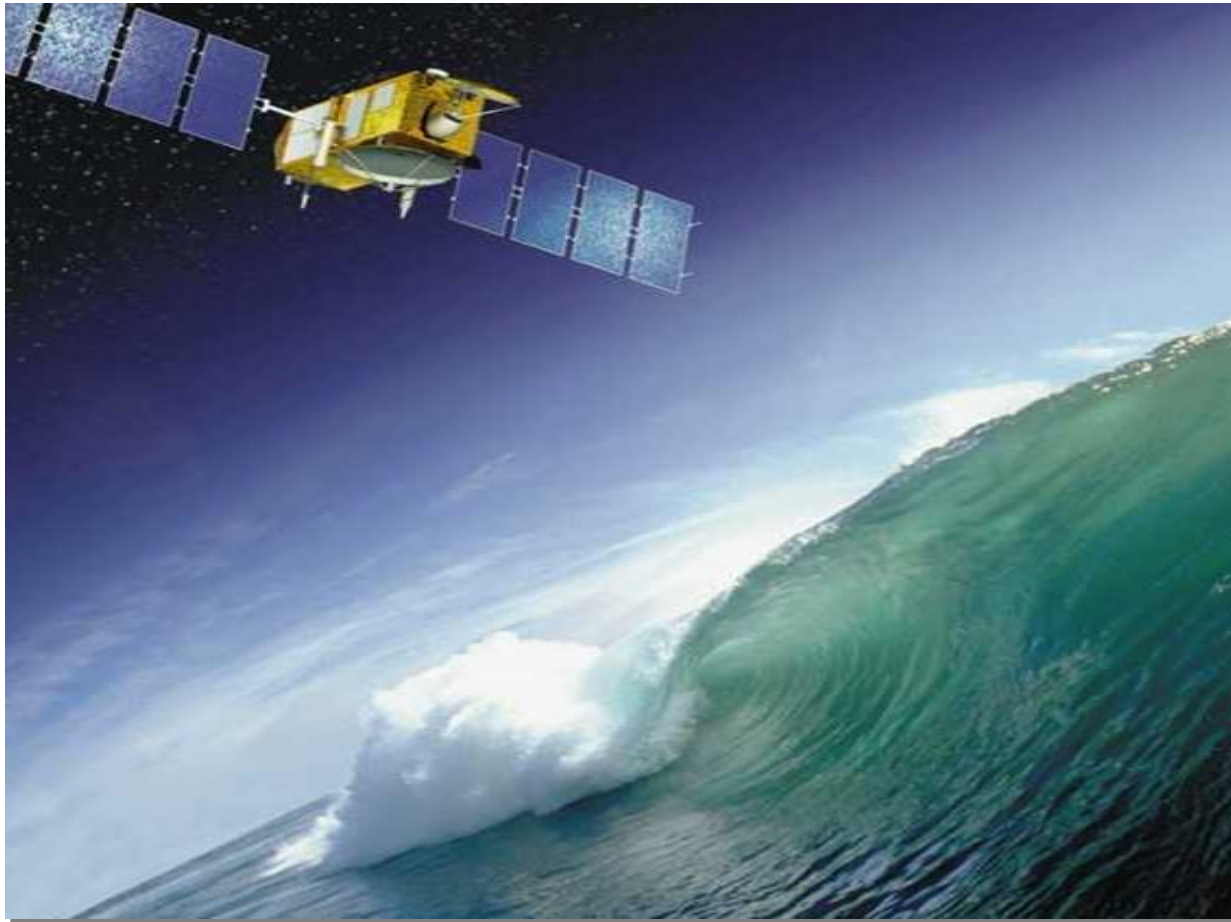


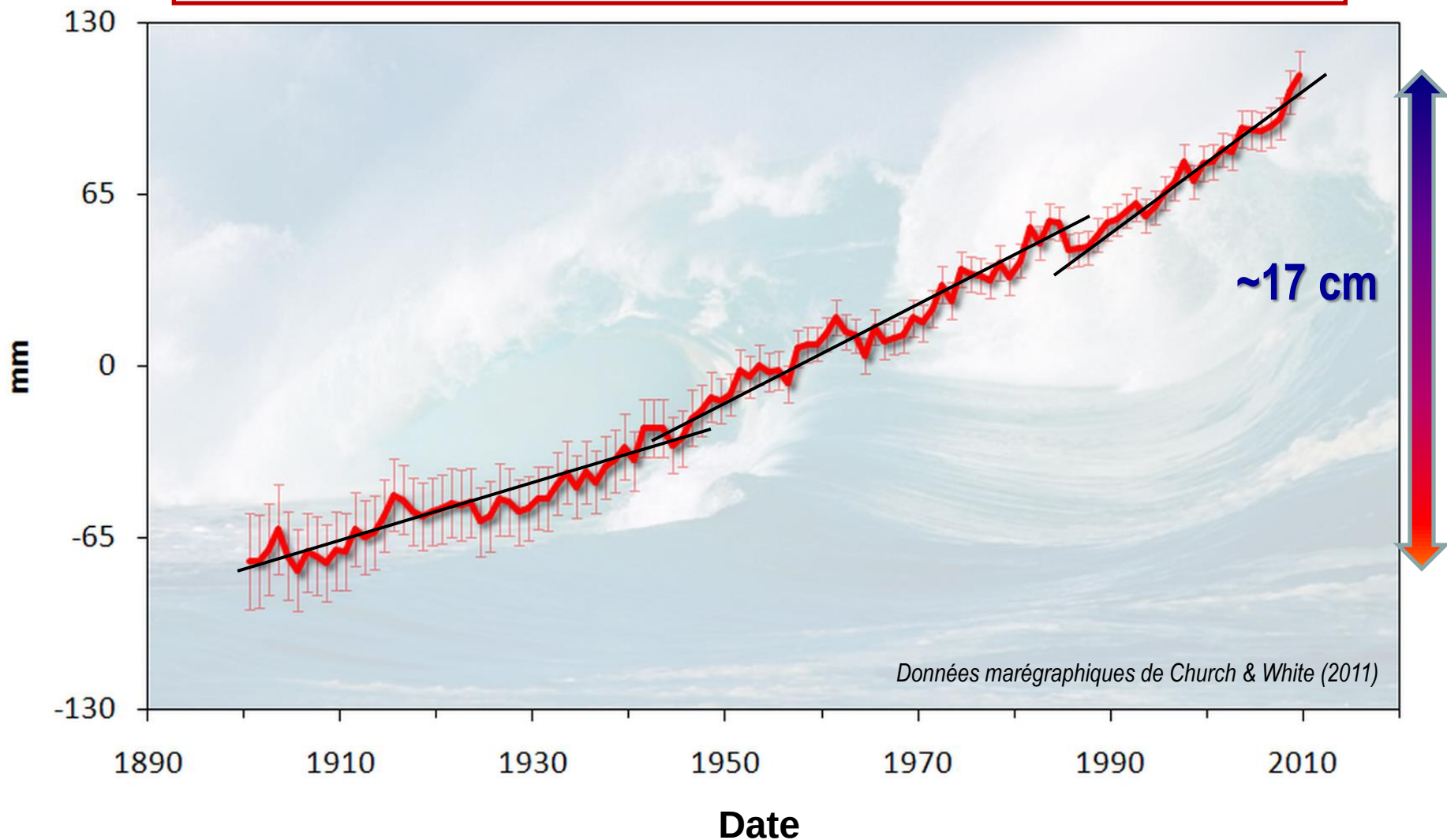
La montée du niveau des océans (apport des satellites)



**Philippe Maisongrande,
Anny Cazenave, Benoit Meyssignac**

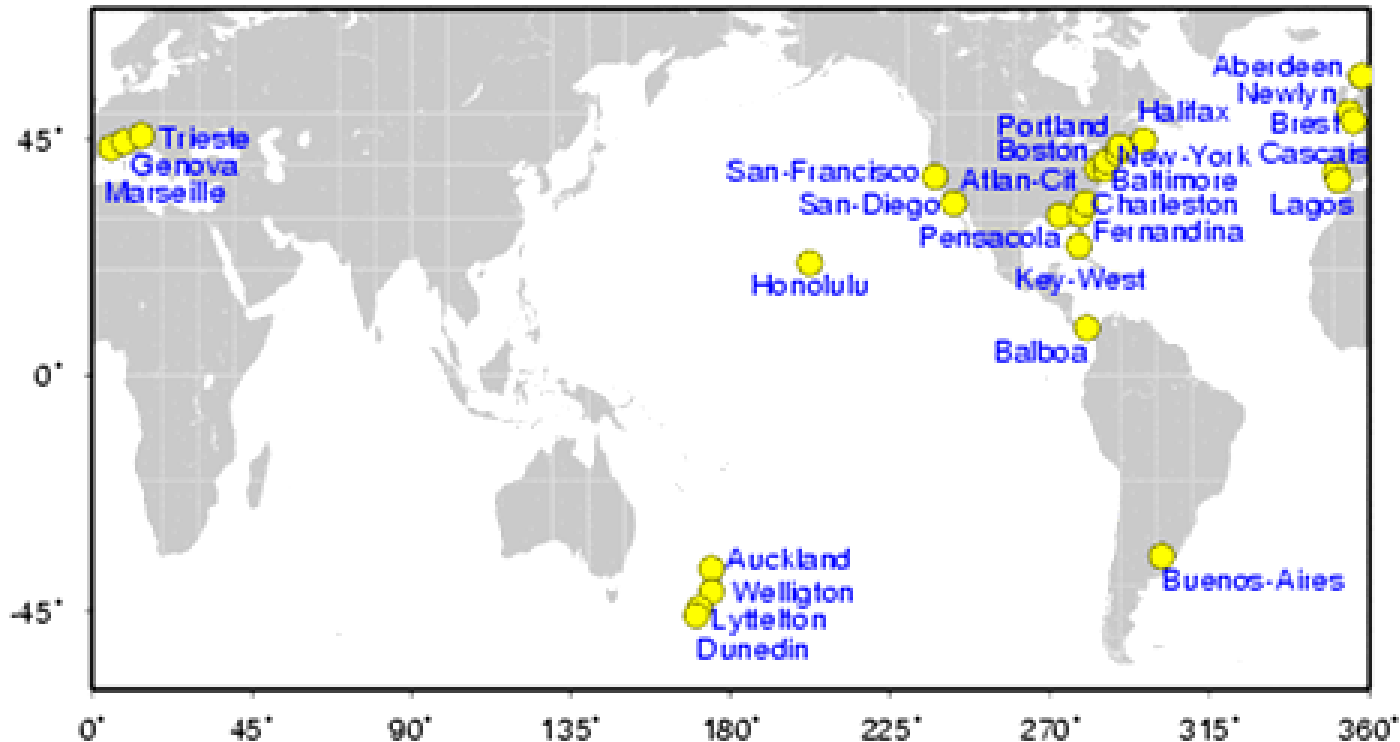


Hausse du niveau moyen global de la mer depuis 1900 observée par les marégraphes

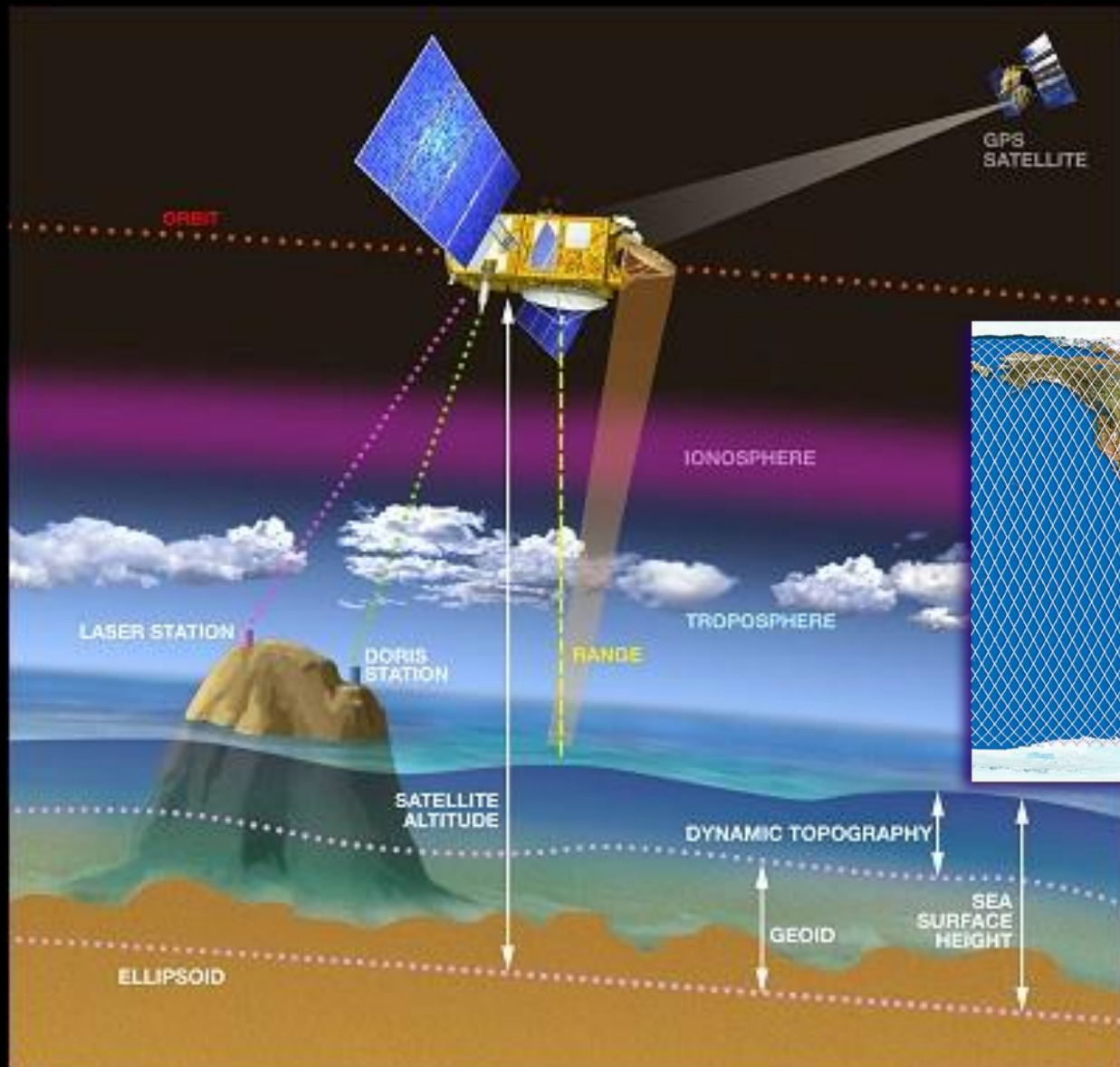


Réseau de marégraphes 'historiques'

→ Enregistrements des variations du niveau de la mer au 20^{ème} siècle



L'ALTIMETRIE RADAR



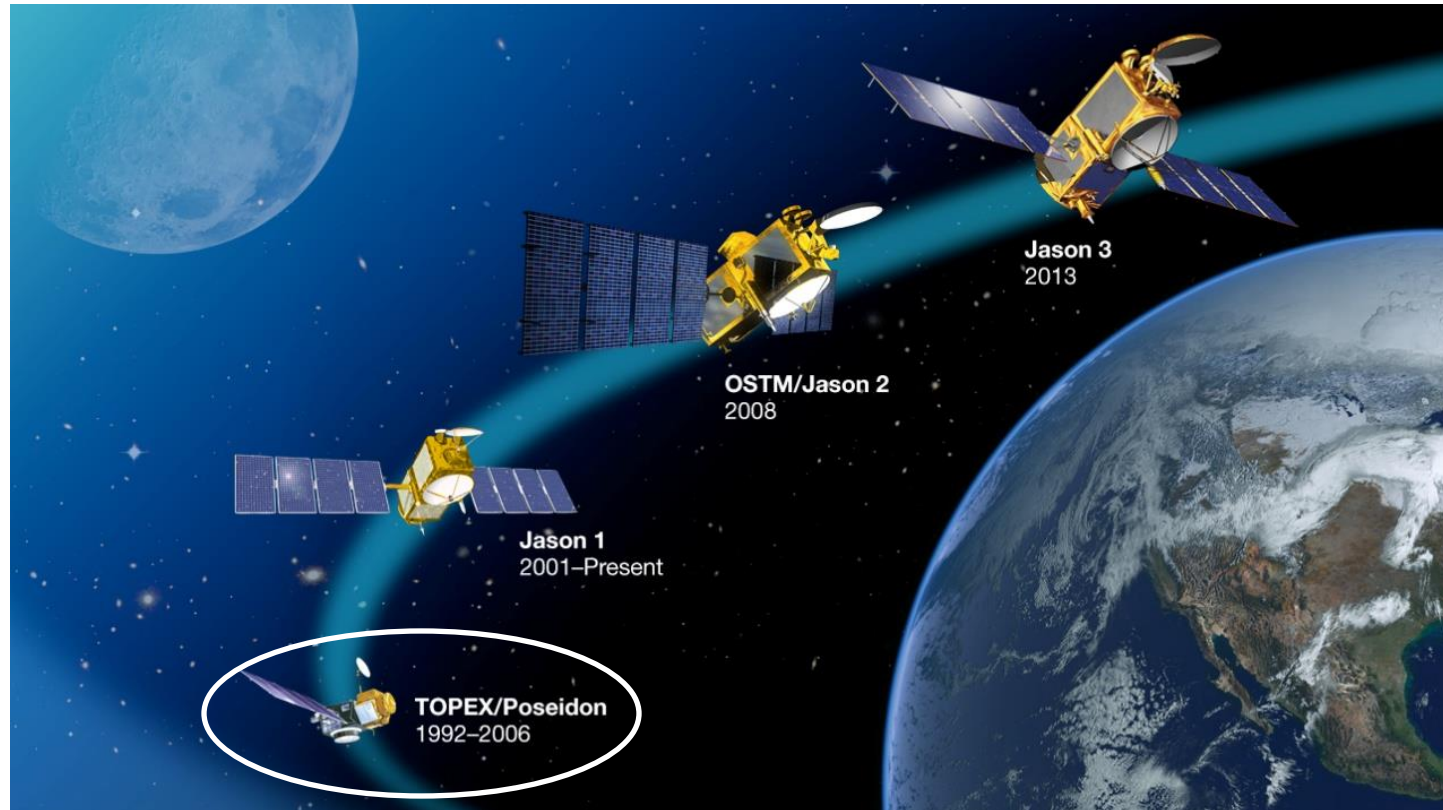
**Couverture TOPEX
en 10 jours**

Une filière de satellites altimétriques de haute précision...

Jason-3

(Europe-USA):
Décidé, lancement 2015

- *Monitoring du climat et du niveau de la mer*
- *Océanographie opérationnelle*



Et aussi:

SARAL/AltiKa

Lancement 25 février 2013

Mission franco-indienne

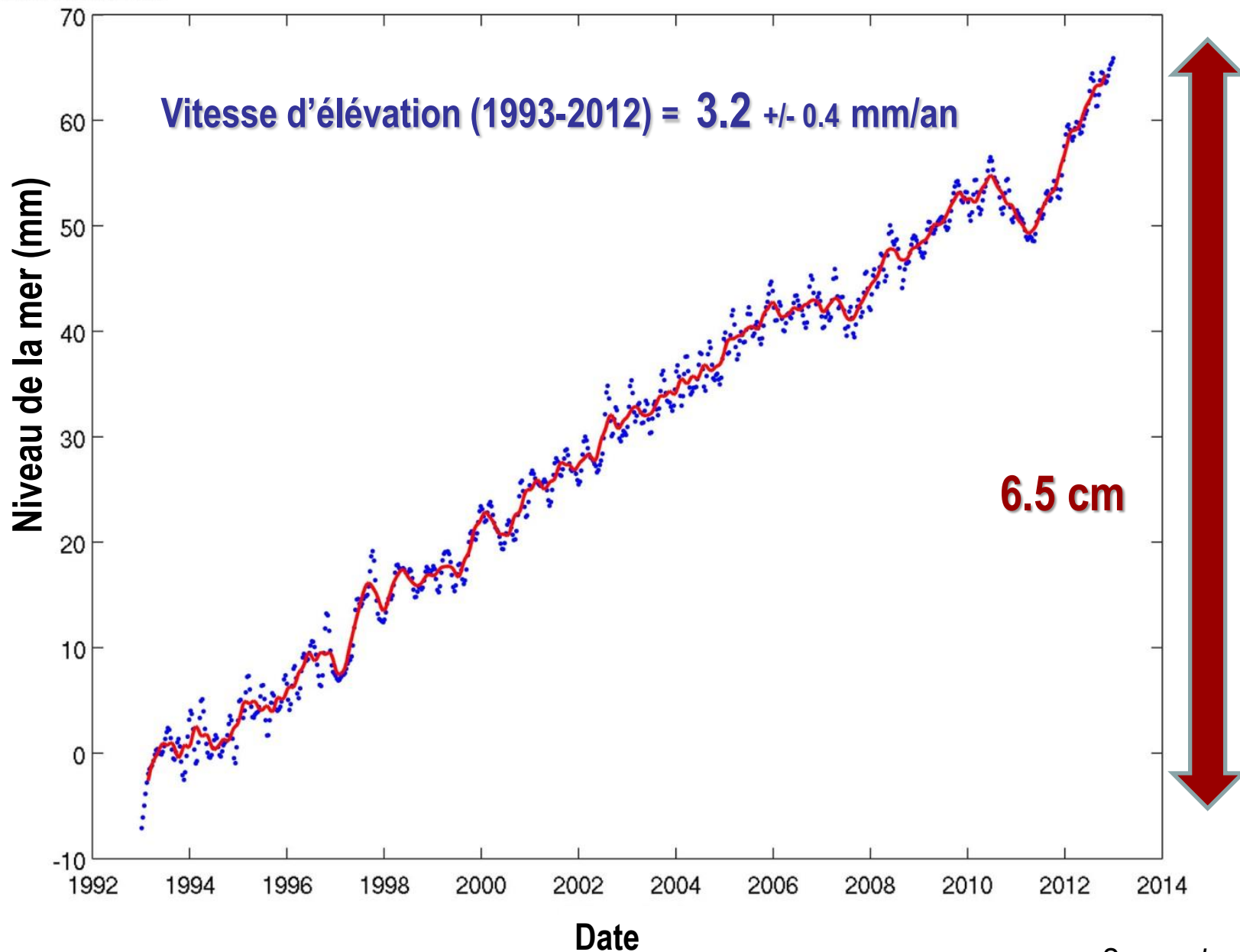
Altimètre en bande Ka

Couverture géographique : $\pm 89^\circ$



Updated: 19/04/2013

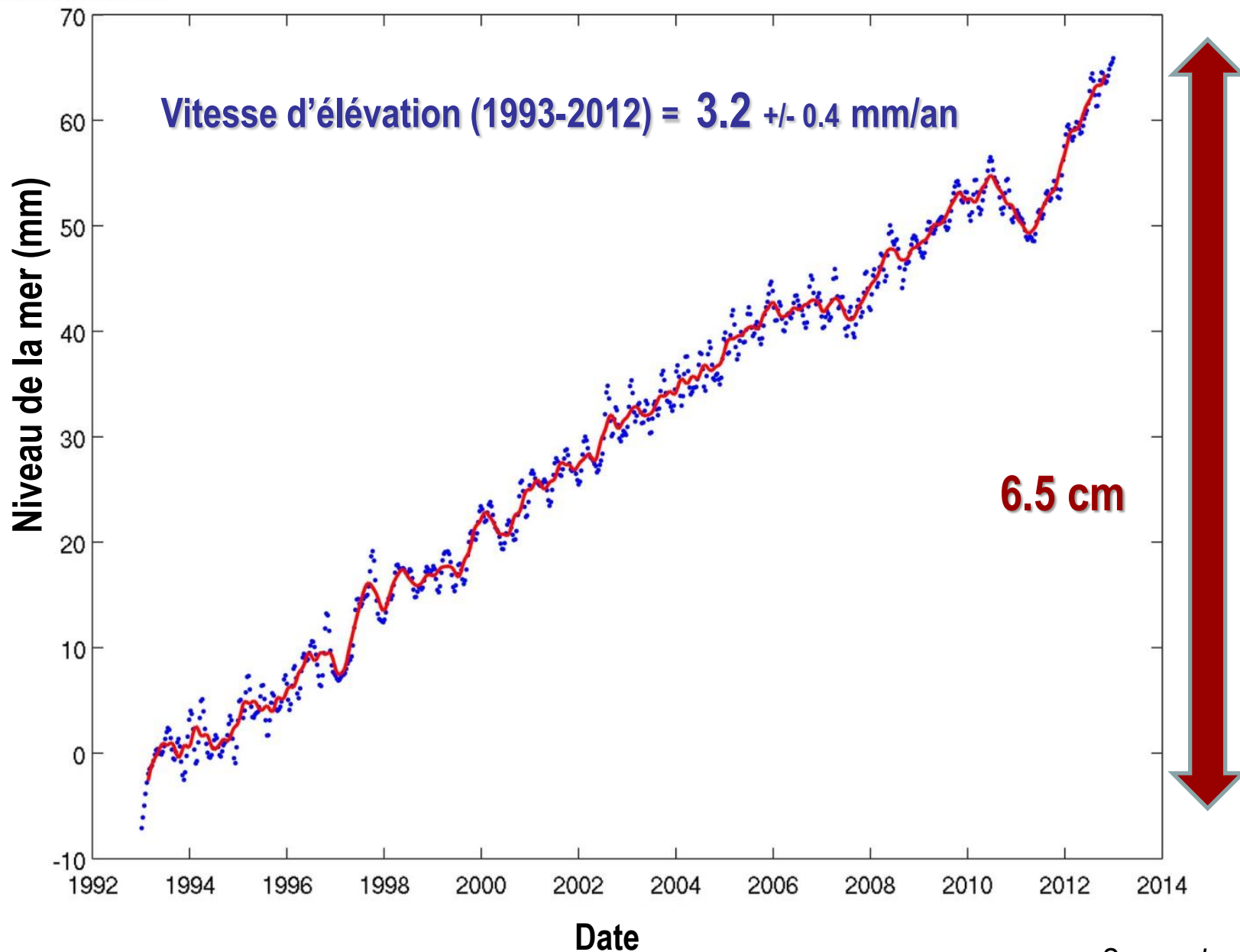
Niveau moyen global de la mer par altimétrie spatiale



Source: Legos-CLS

Updated: 19/04/2013

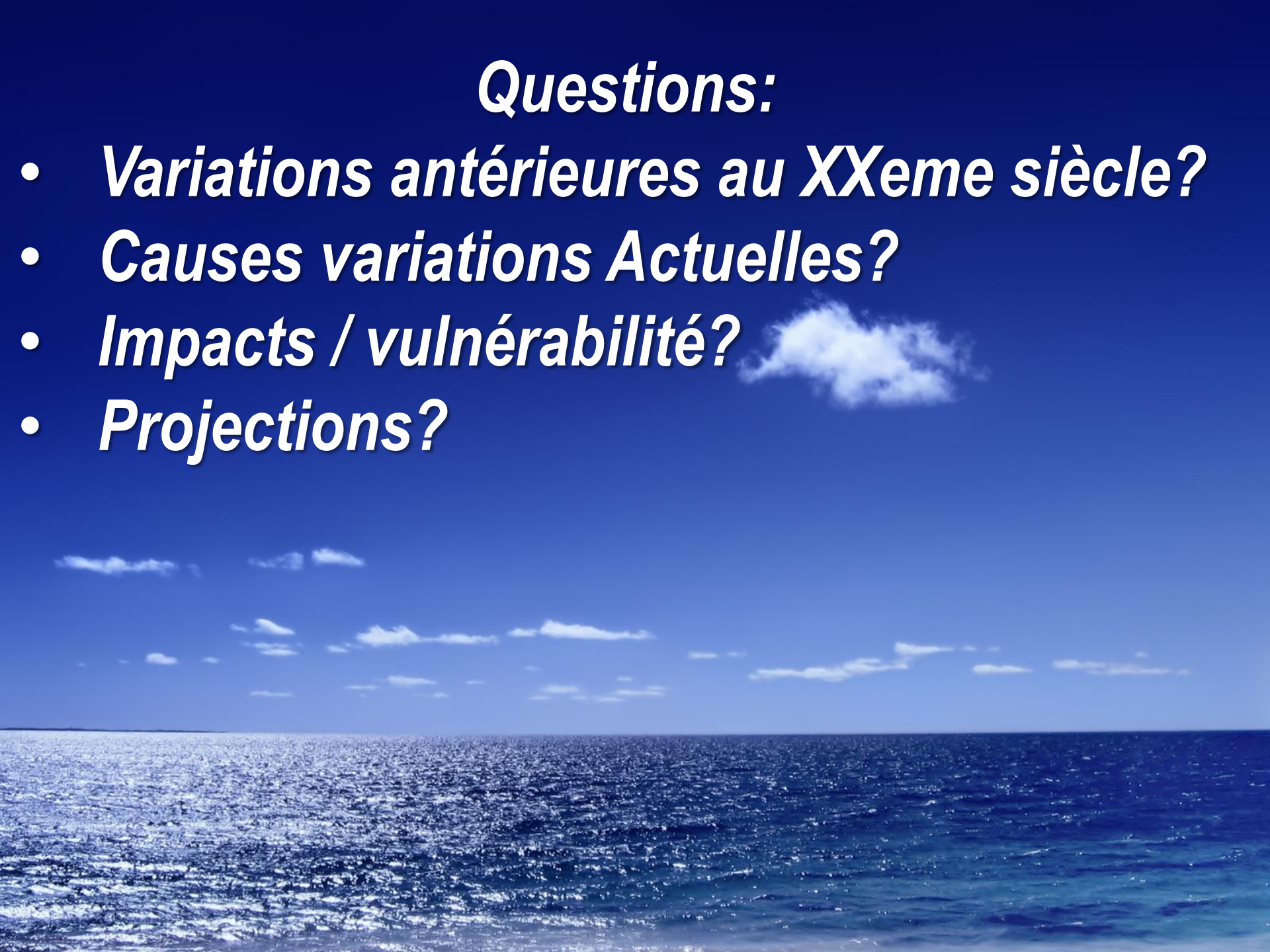
Niveau moyen global de la mer par altimétrie spatiale



Source: Legos-CLS

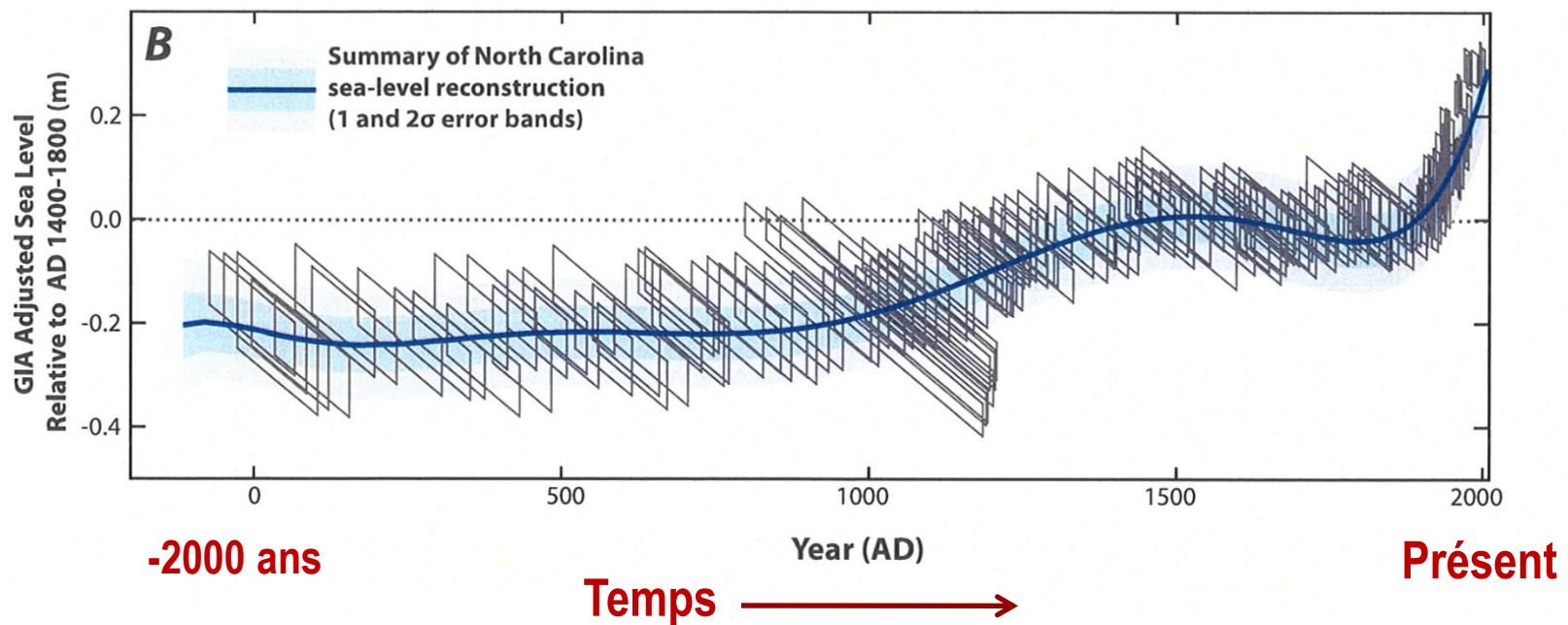
Questions:

- ***Variations antérieures au XXeme siècle?***
- ***Causes variations Actuelles?***
- ***Impacts / vulnérabilité?***
- ***Projections?***

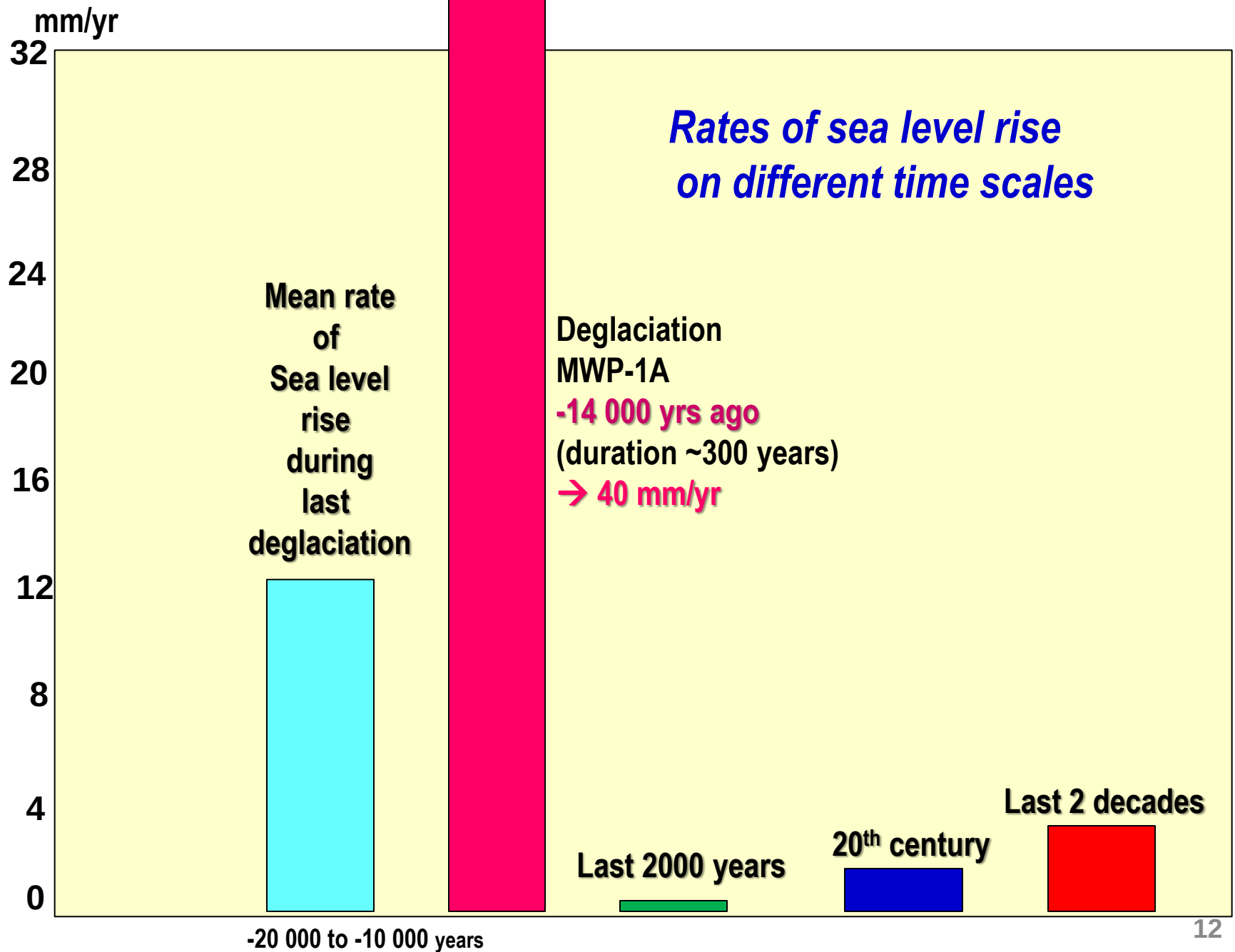


***Niveau des océans :
Variations antérieures au XXeme siècle?***

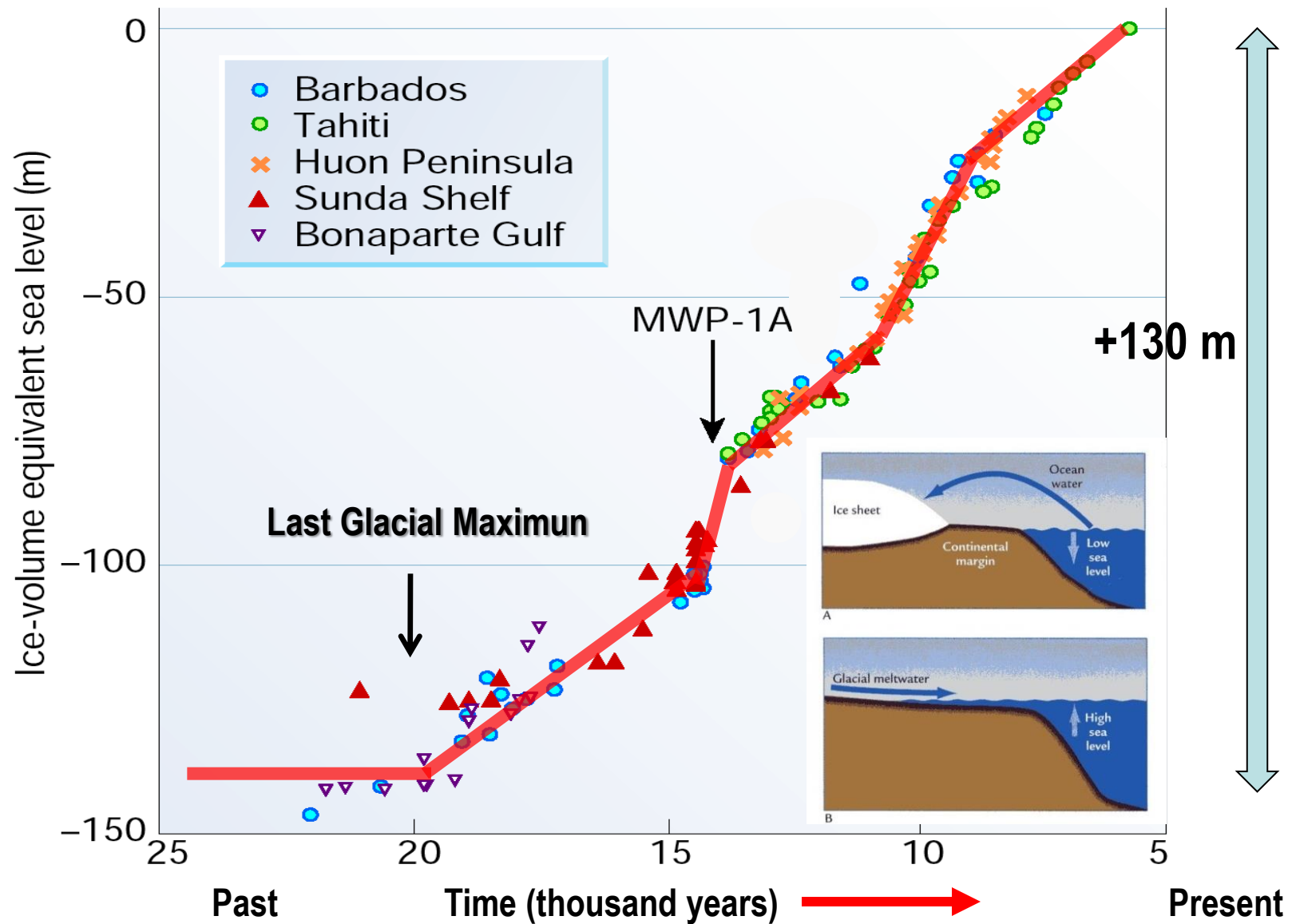
Niveau moyen de la mer depuis 2000 ans

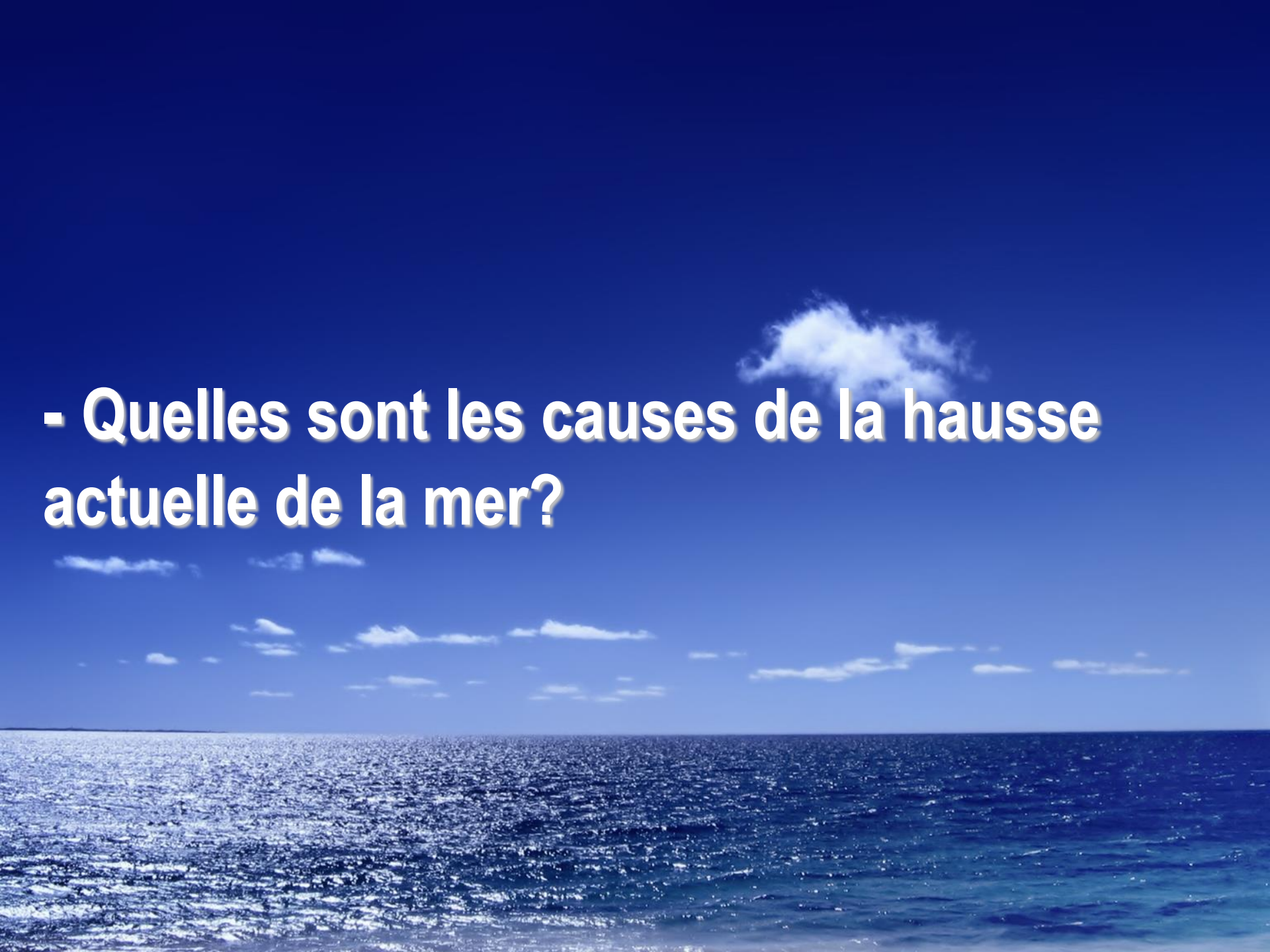


Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la hausse n'a pas dépassé 0.5 mm/an !



Niveau moyen de la mer depuis le dernier maximum glaci (- 20 000 ans)

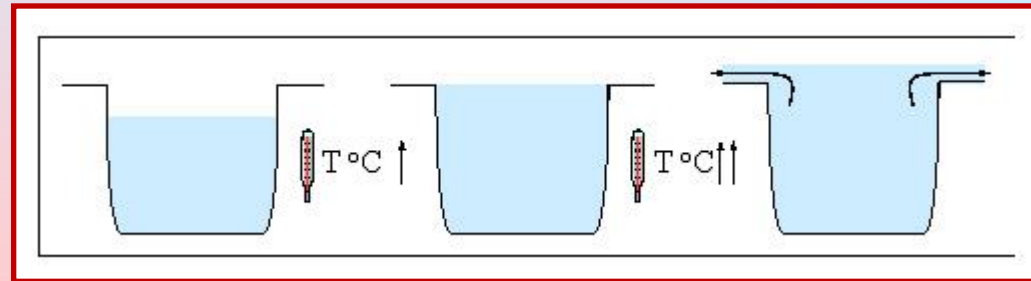




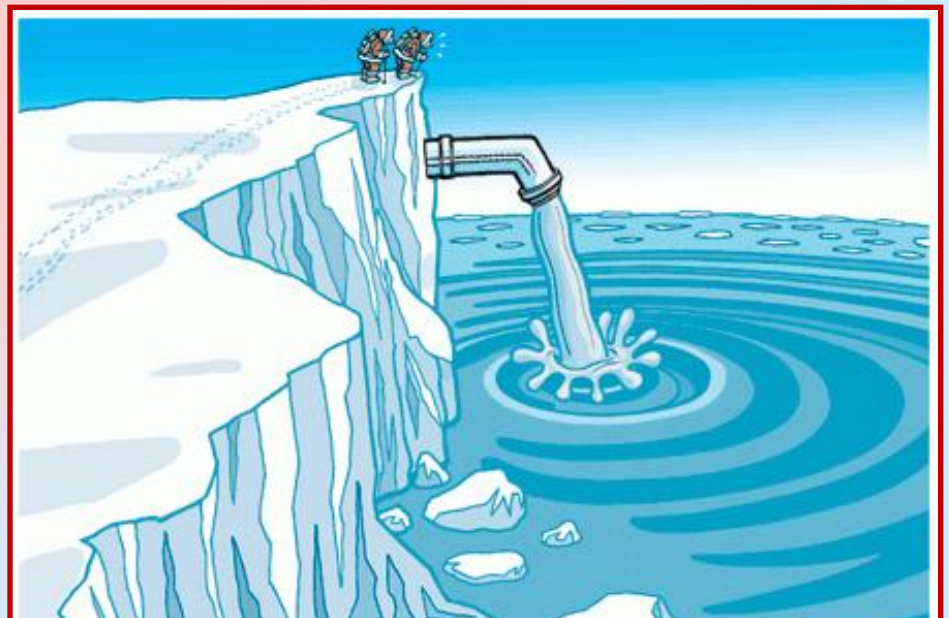
**- Quelles sont les causes de la hausse
actuelle de la mer?**

2 causes principales...

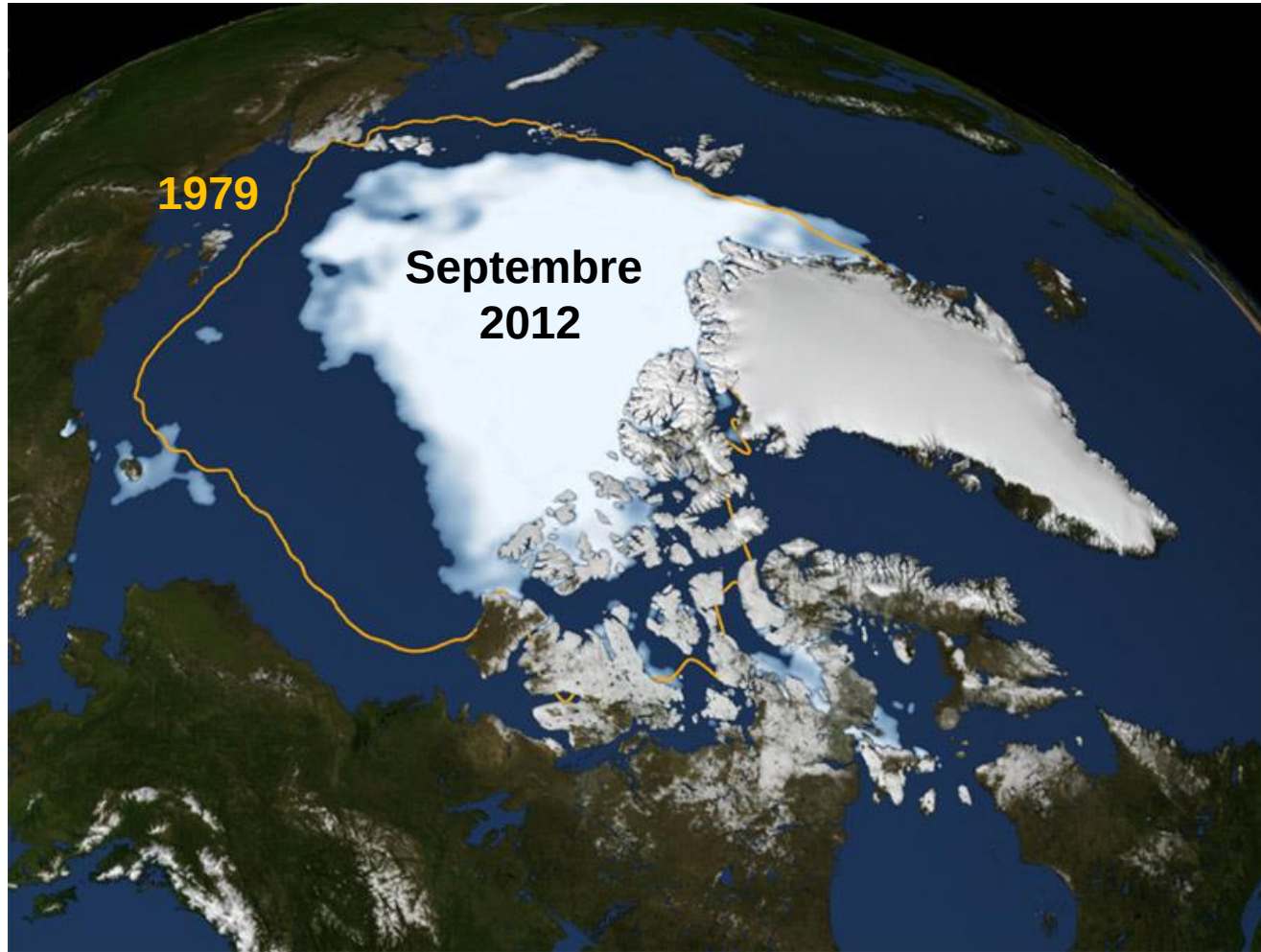
**-Dilatation
thermique de l'océan**
l'océan se réchauffe,
l'eau se dilate et la mer monte



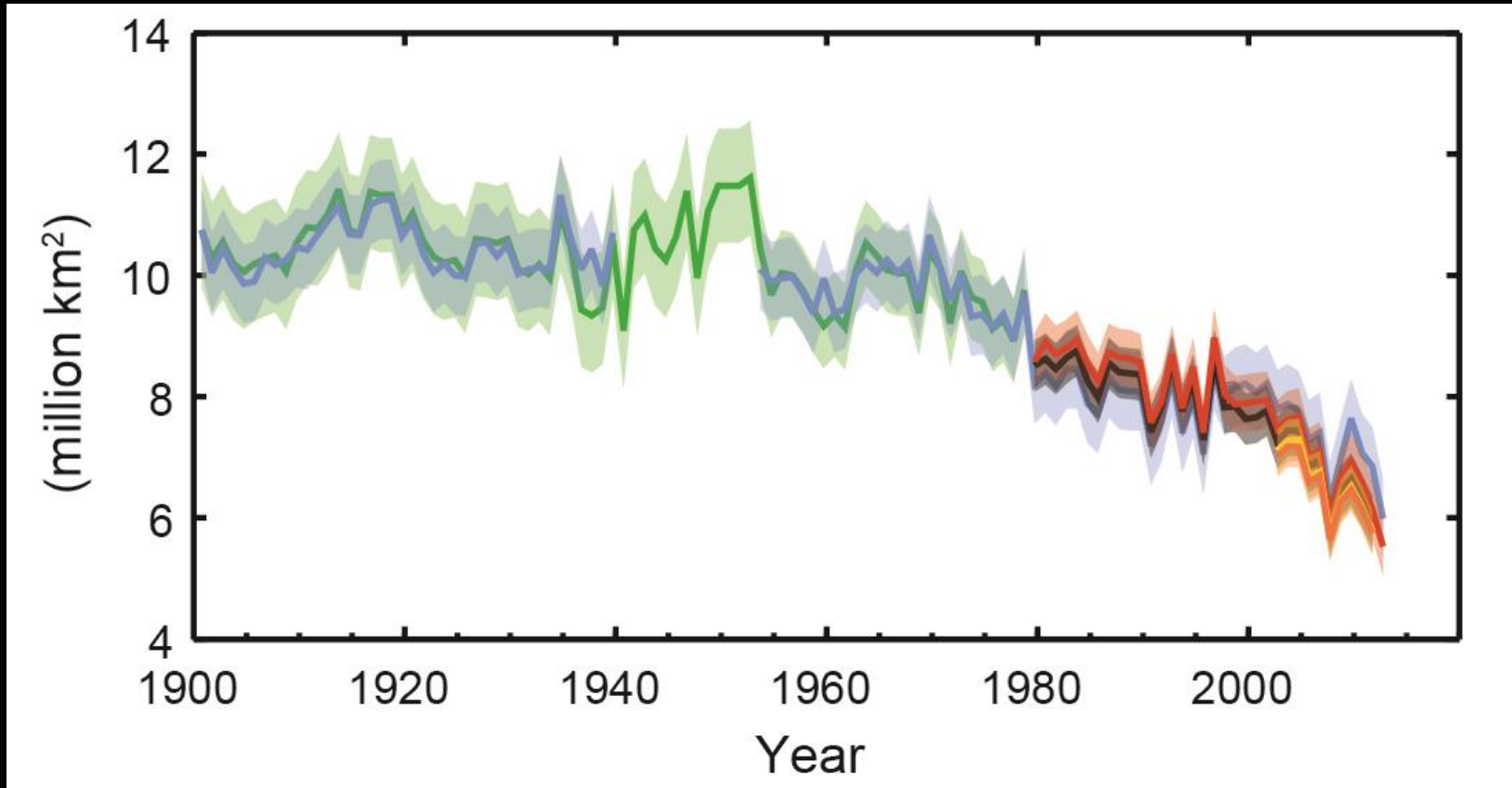
-Apports d'eau douce
(fonte des glaces
+ eaux continentales)



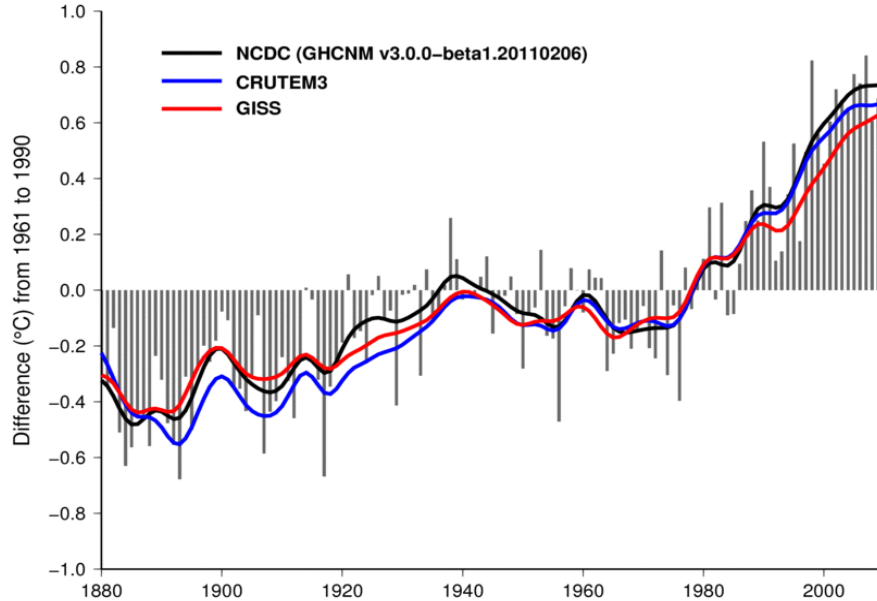
Fonte de la banquise arctique



Evolution de l'étendue de la banquise arctique en été



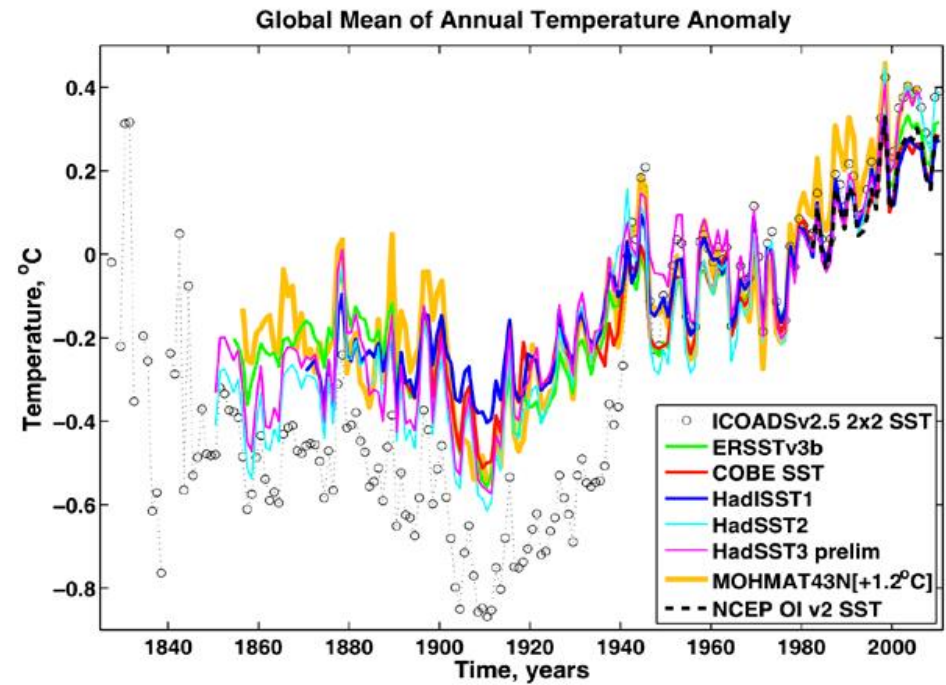
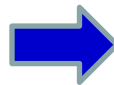
La terre se réchauffe



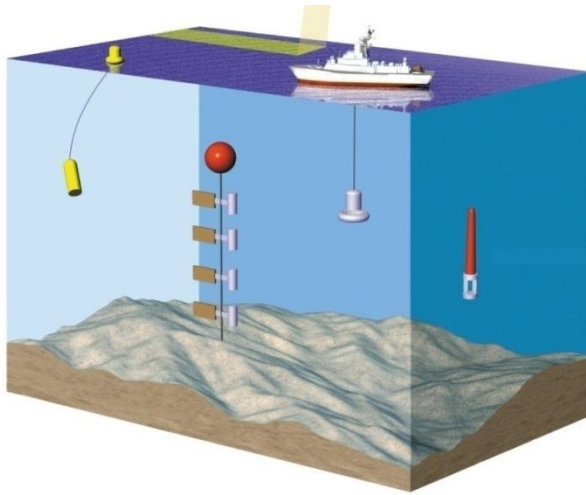
**Evolution de la température moyenne
de l'air en surface au 20^{ème} siècle**



**Evolution de la température moyenne
de la surface de l'océan au 20^{ème} siècle**



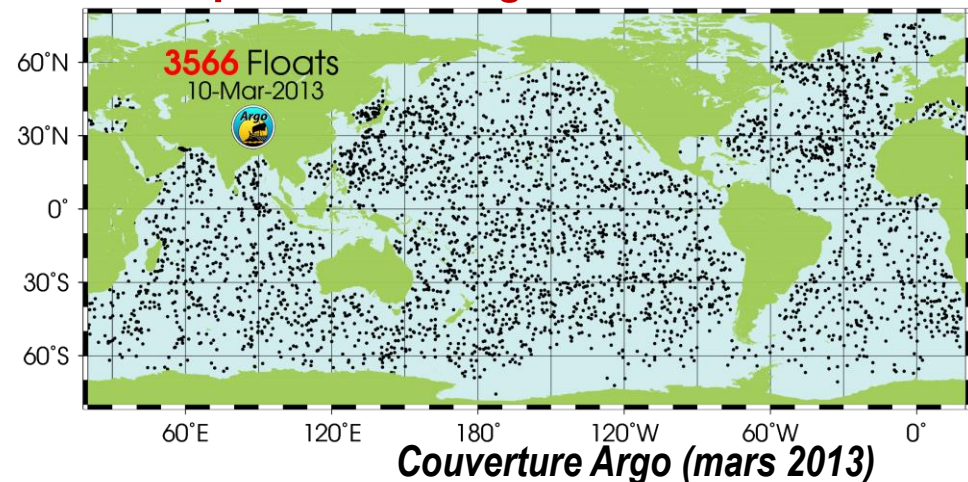
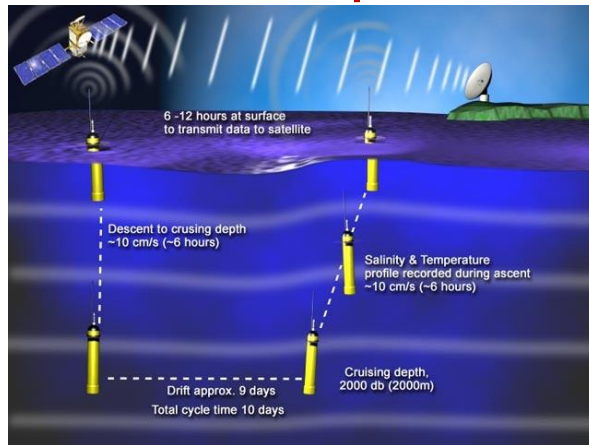
Mesures de température de l'océan jusqu'à 1000-2000m de profondeur (bateaux depuis 1950; Argo depuis 2003)



Principales
routes
maritimes

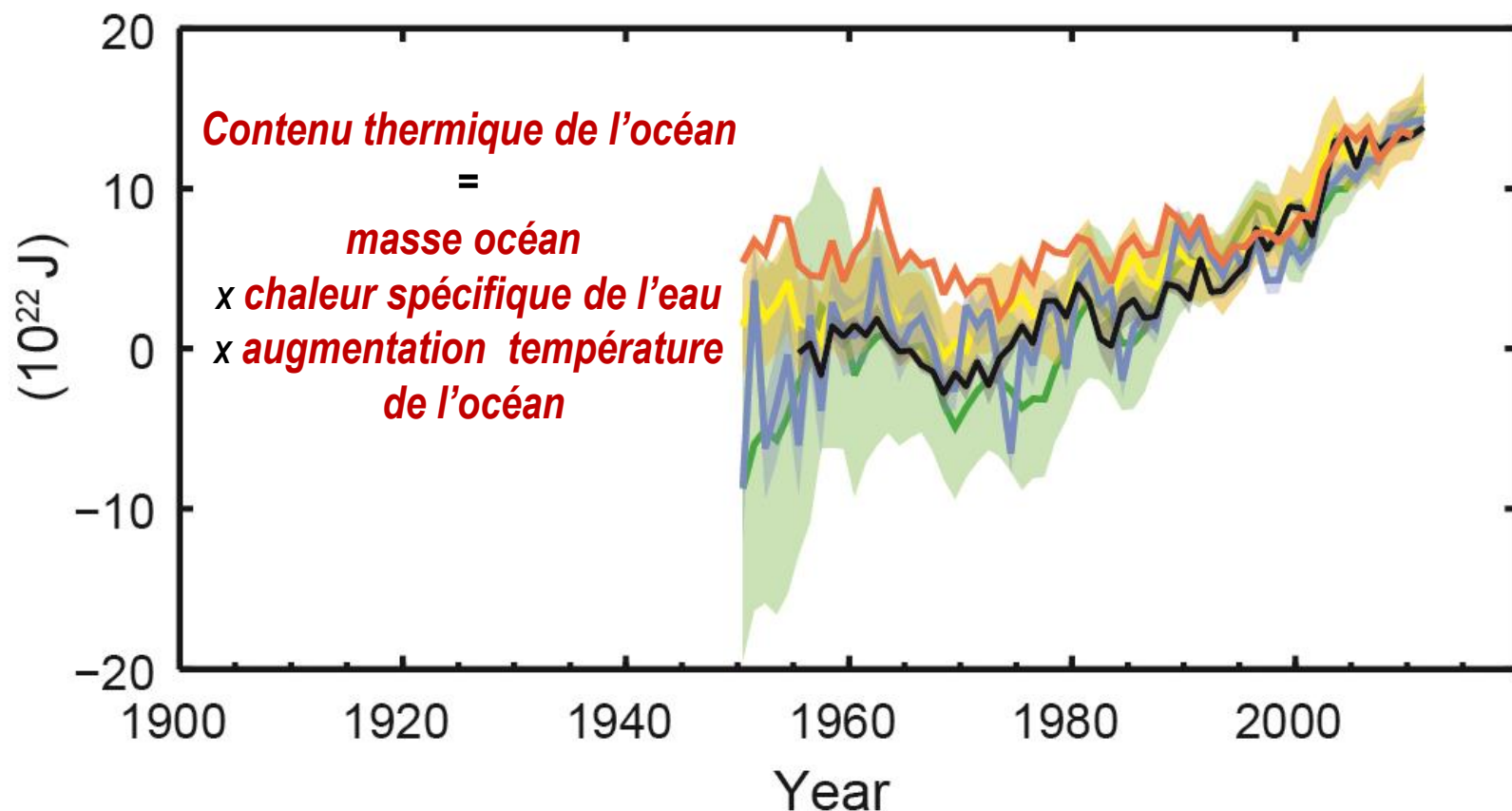


Depuis 2003 → Flotteurs profilants 'Argo'



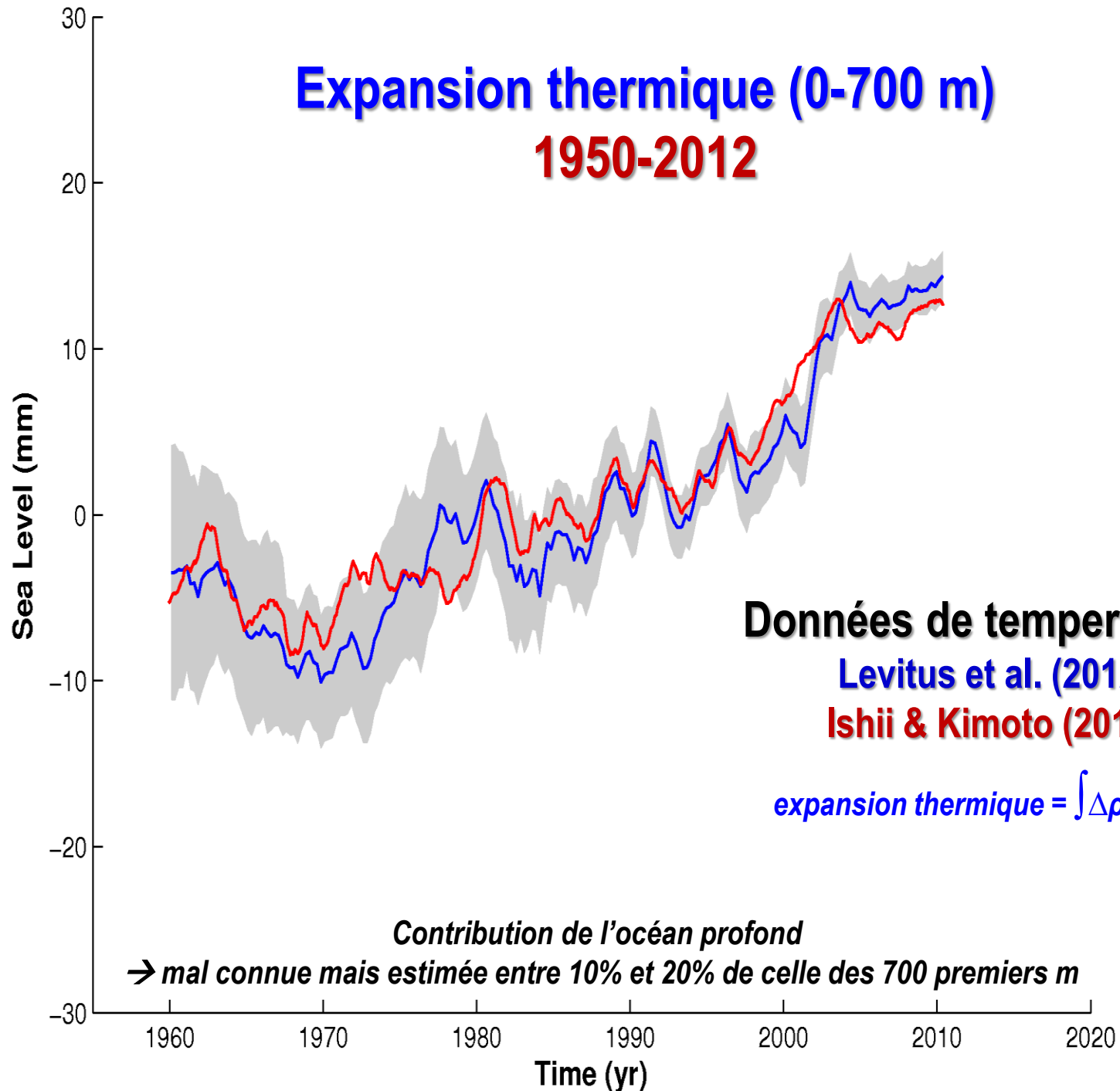
Couverture Argo (mars 2013)

La quantité de chaleur stockée dans l'océan augmente (le contenu thermique de l'océan croît)

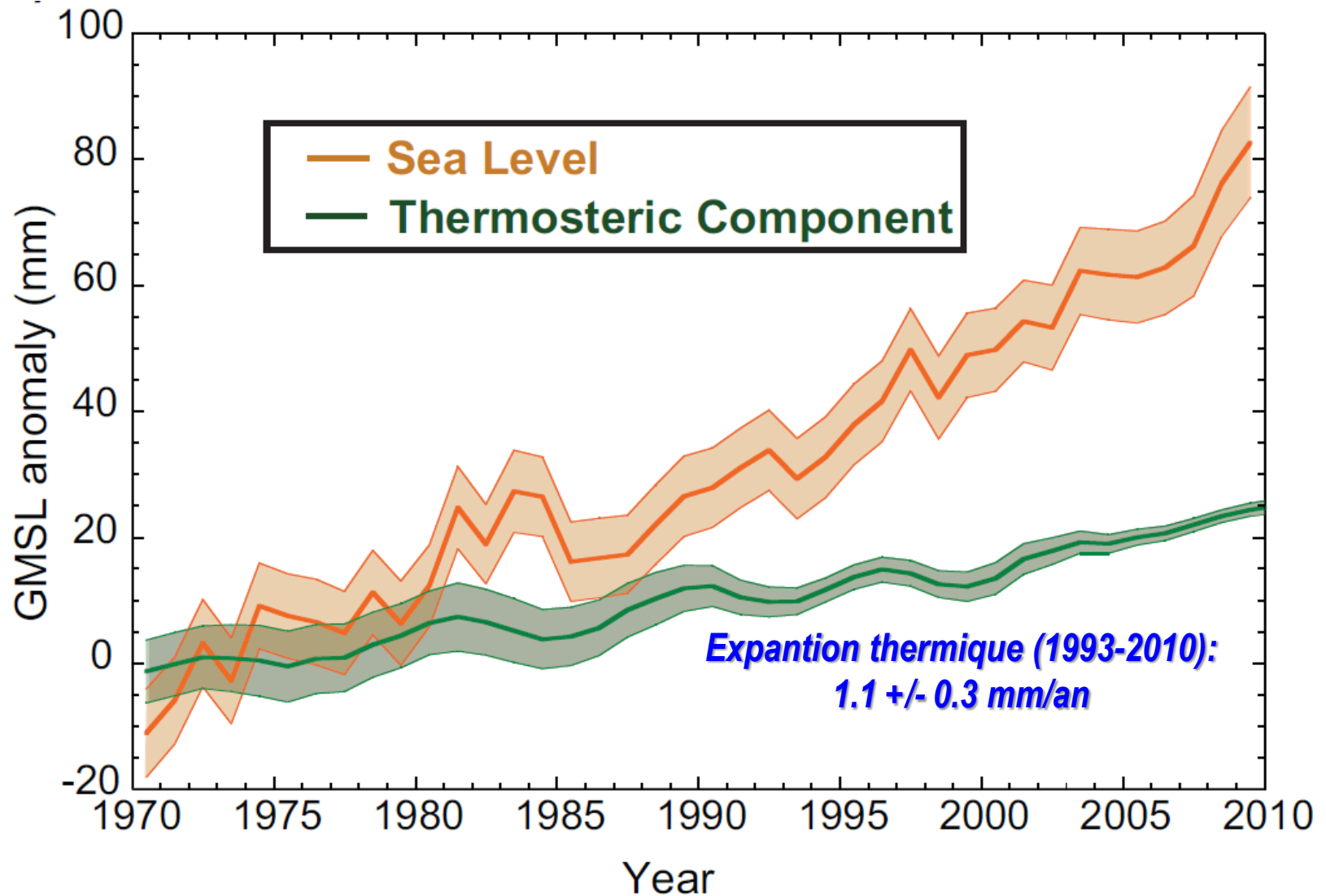


**Autant de chaleur stockée dans les premiers mètres de l'océan
que dans toute l'atmosphère!**

Expansion thermique (0-700 m) 1950-2012



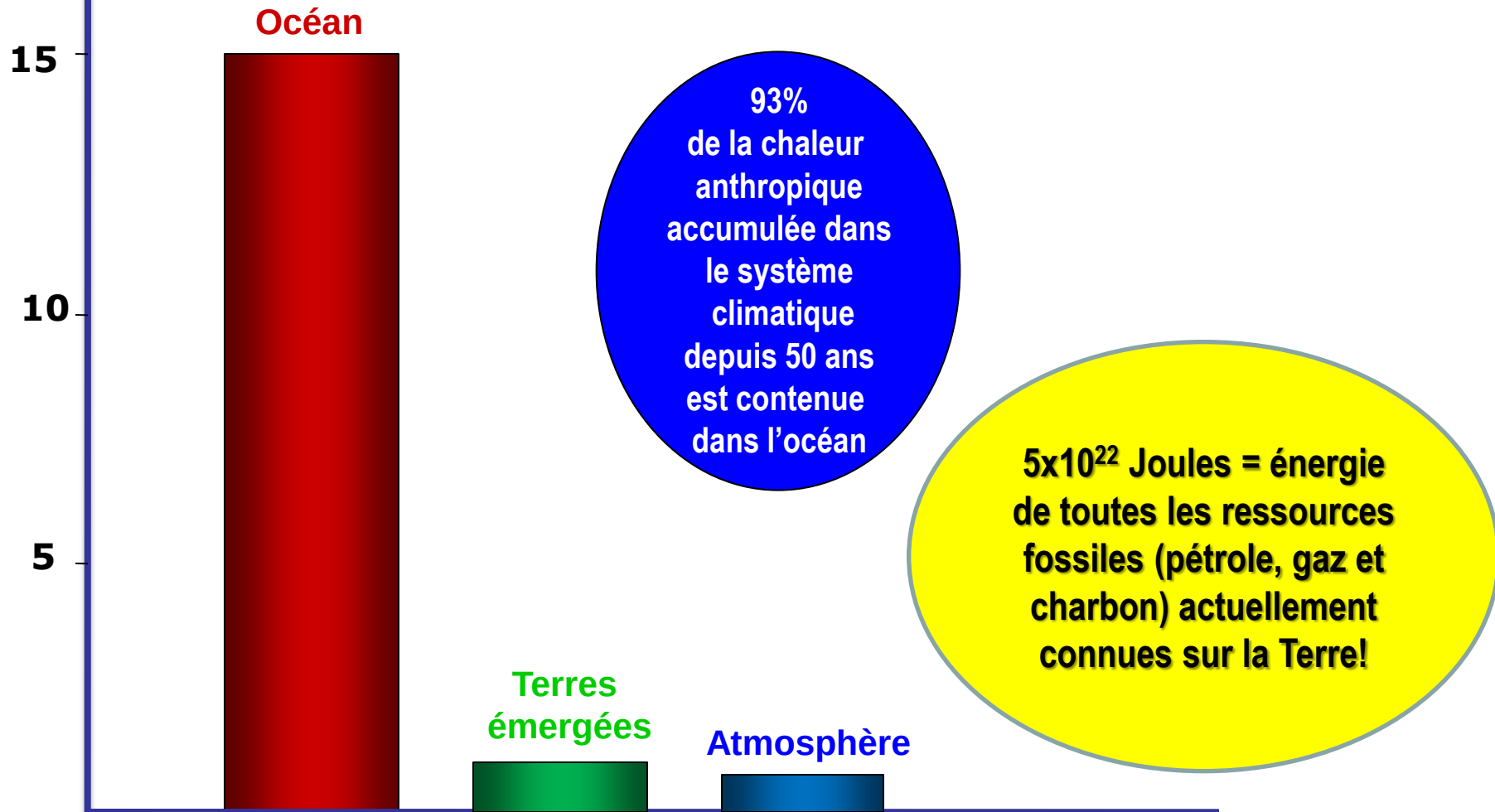
Contribution de l'expansion thermique au niveau moyen global de la mer



Chaleur stockée dans les différents réservoirs du système climatique

(50 dernières années)

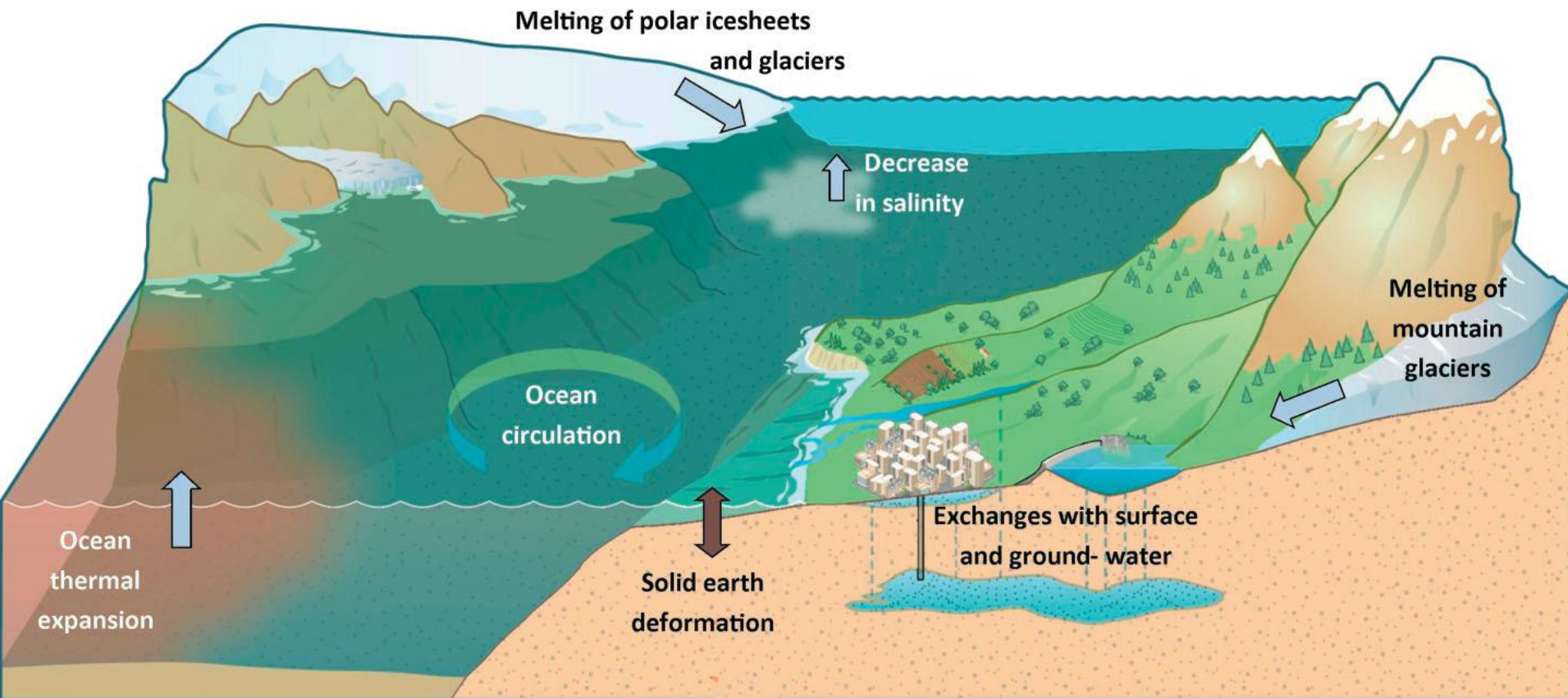
Contenu thermique
(10^{22} Joules)



Le niveau moyen global de la mer: une variable 'intégratrice'

Hausse due à:

- Réchauffement de l'océan (expansion thermique)
- Fonte des glaces continentales
- Diminution du stock d'eau sur les continents



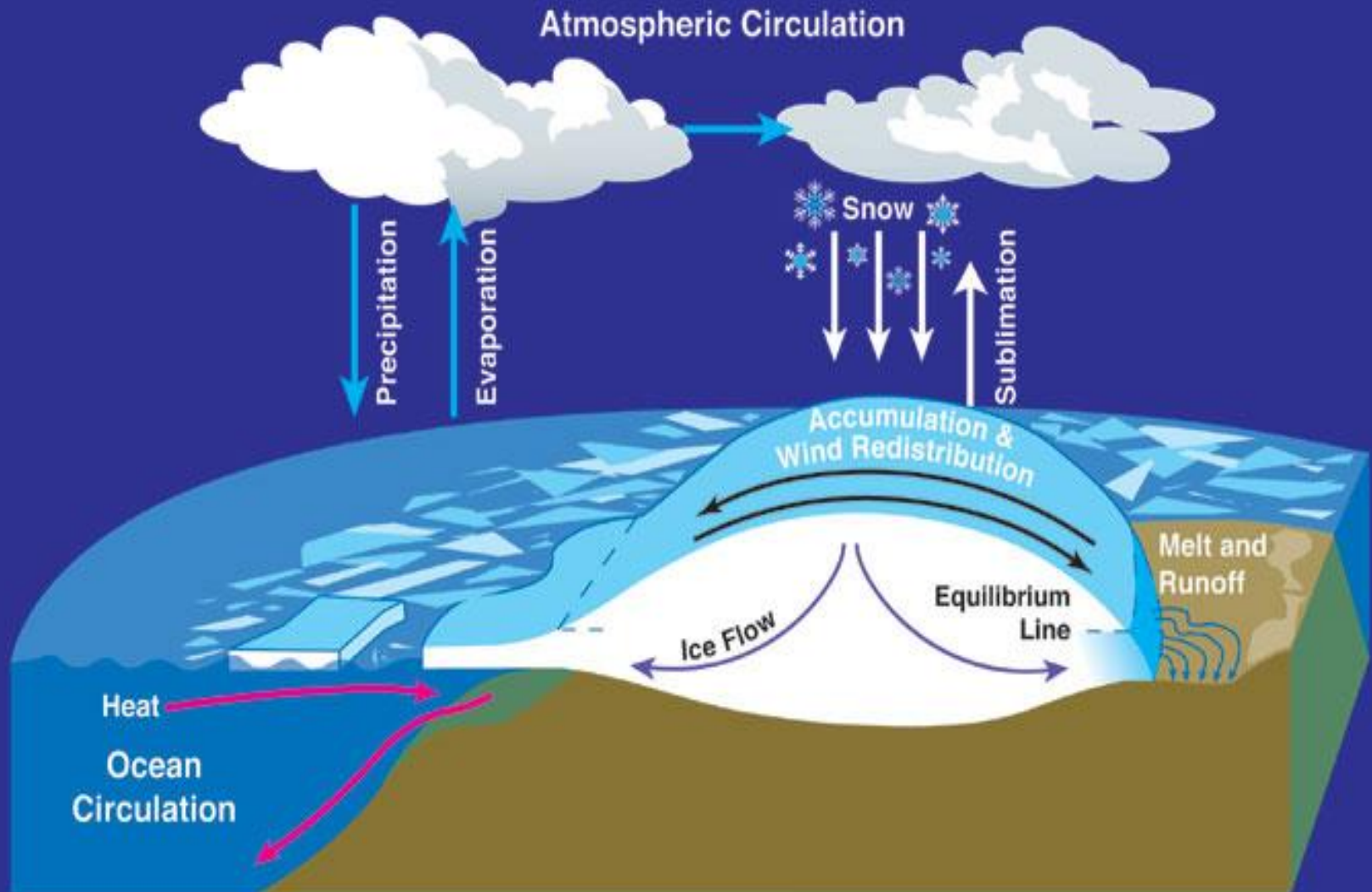
Par quel mécanisme les calottes polaires perdent-elles de la glace?



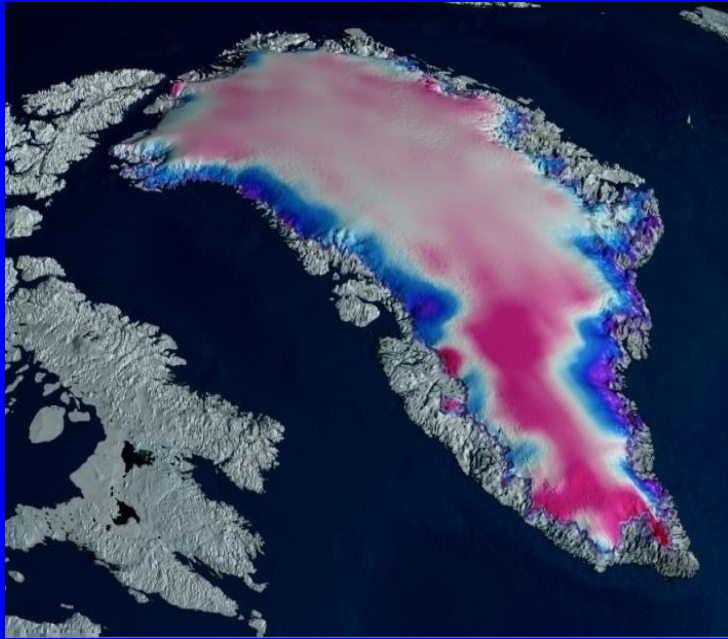
Variation de masse des calottes polaires

= variation de masse en surface (**accumulation/ablation**)

+ écoulement des glaciers côtiers dans la mer (**effet dynamique**)

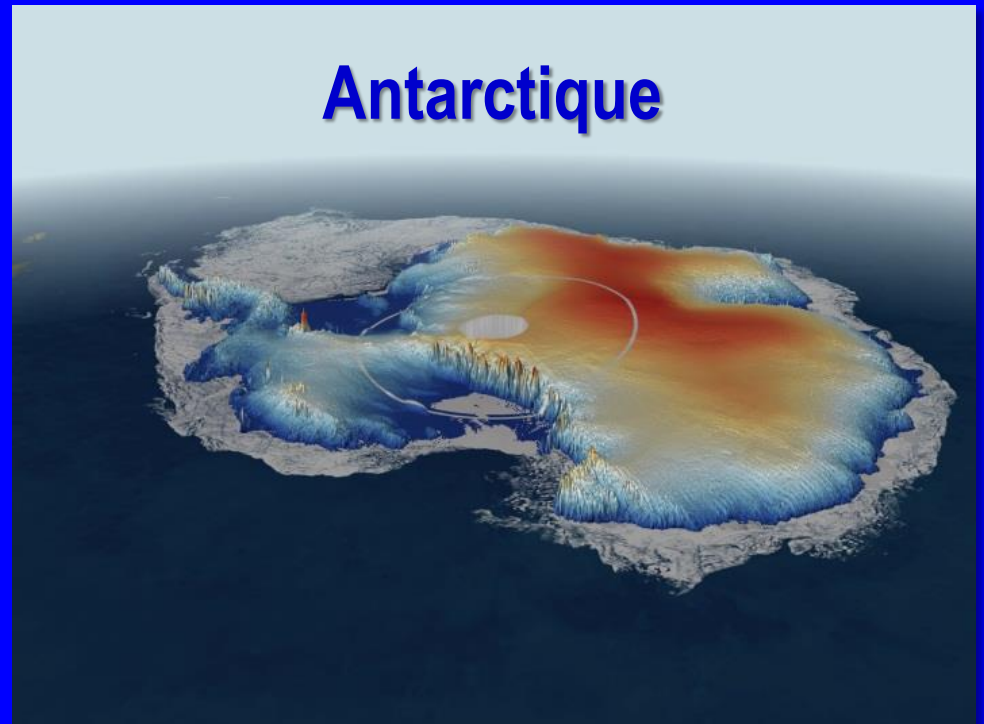


Les calottes polaires

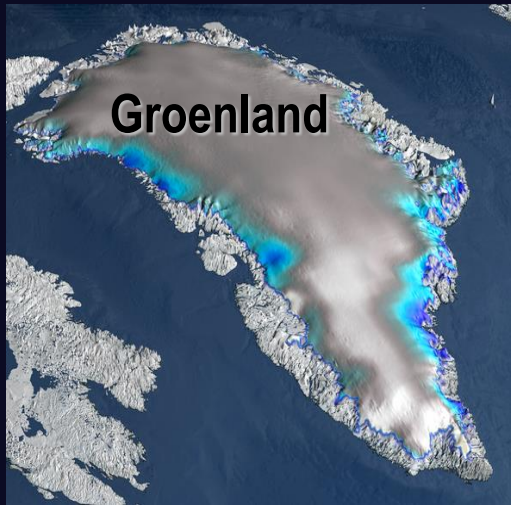


Greenland

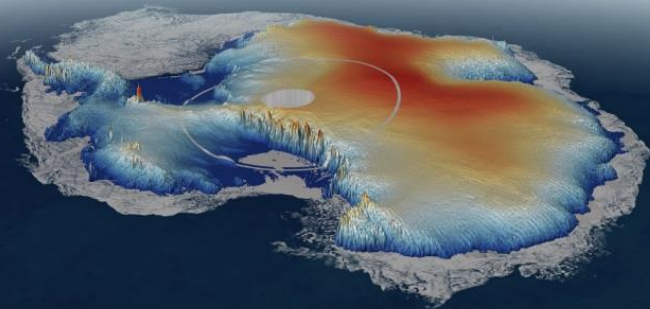
- *Greenland →
7 m de hauteur de mer*
- *Antarctique de l'ouest →
3-5 m de hauteur de mer*



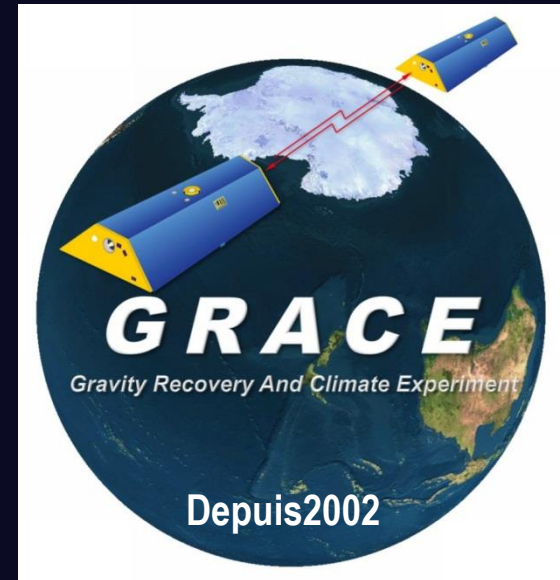
Variations de masse des calottes polaires mesurées par satellite depuis 20 ans



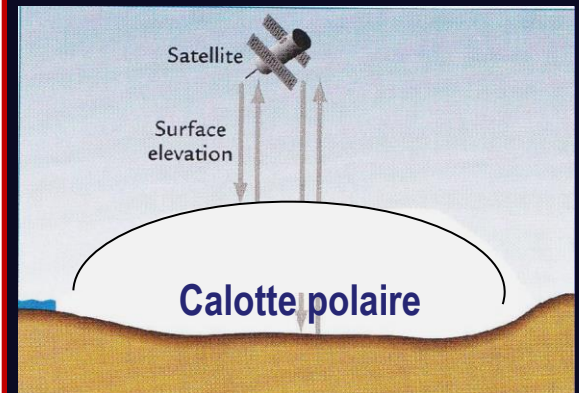
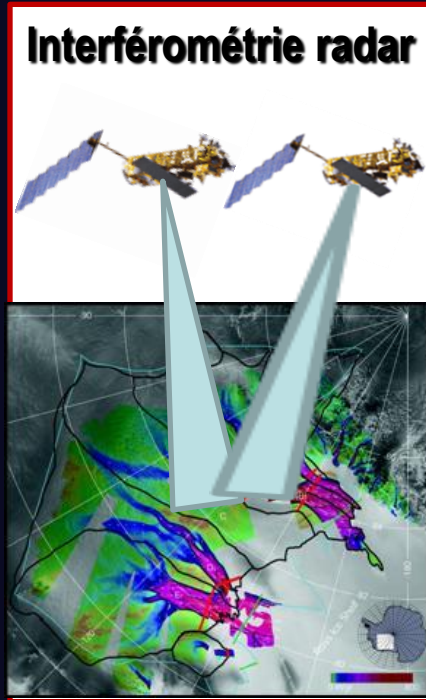
Antarctique



**Gravimétrie
spatiale « GRACE »**



Interférométrie radar



Altimétrie radar et laser

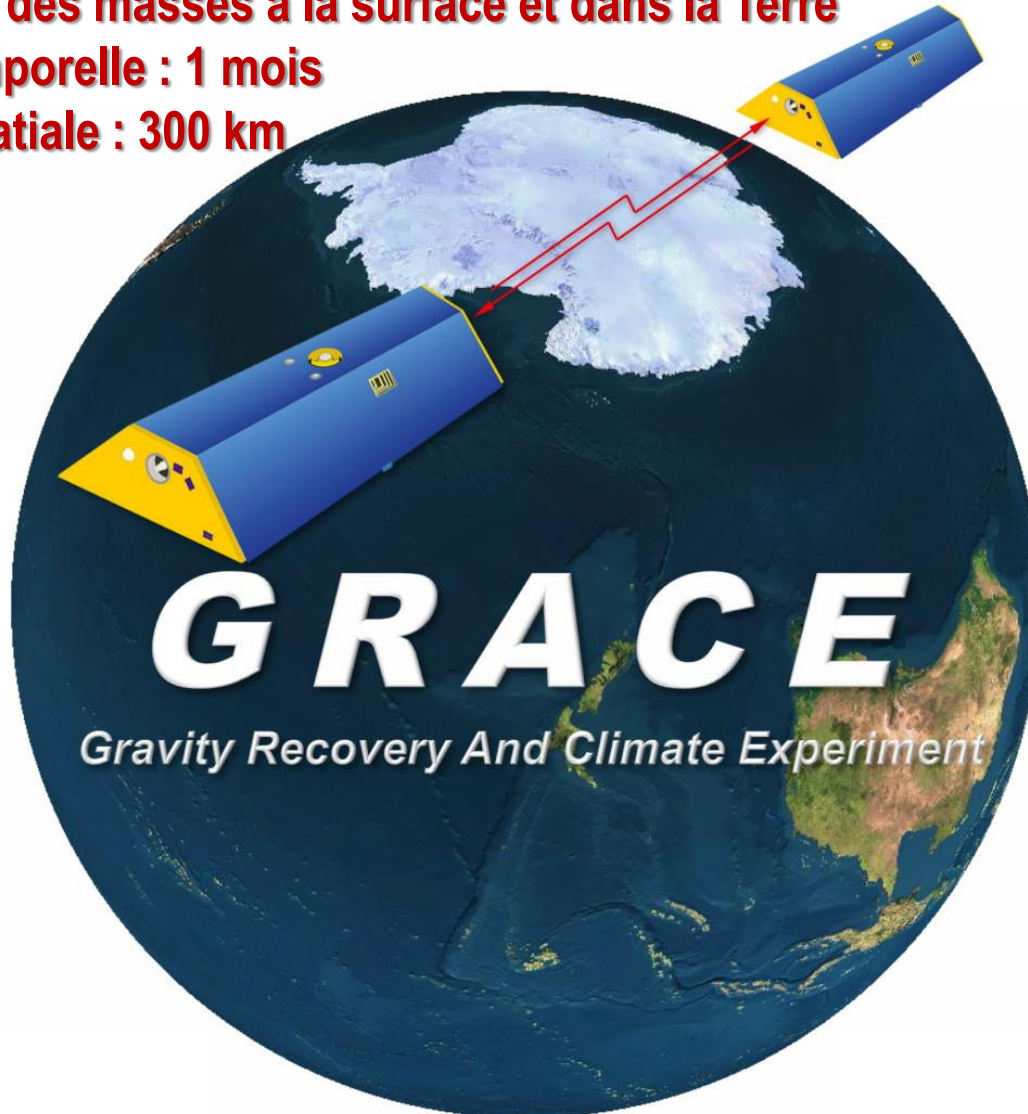
Mission GRACE

Lancée en 2002

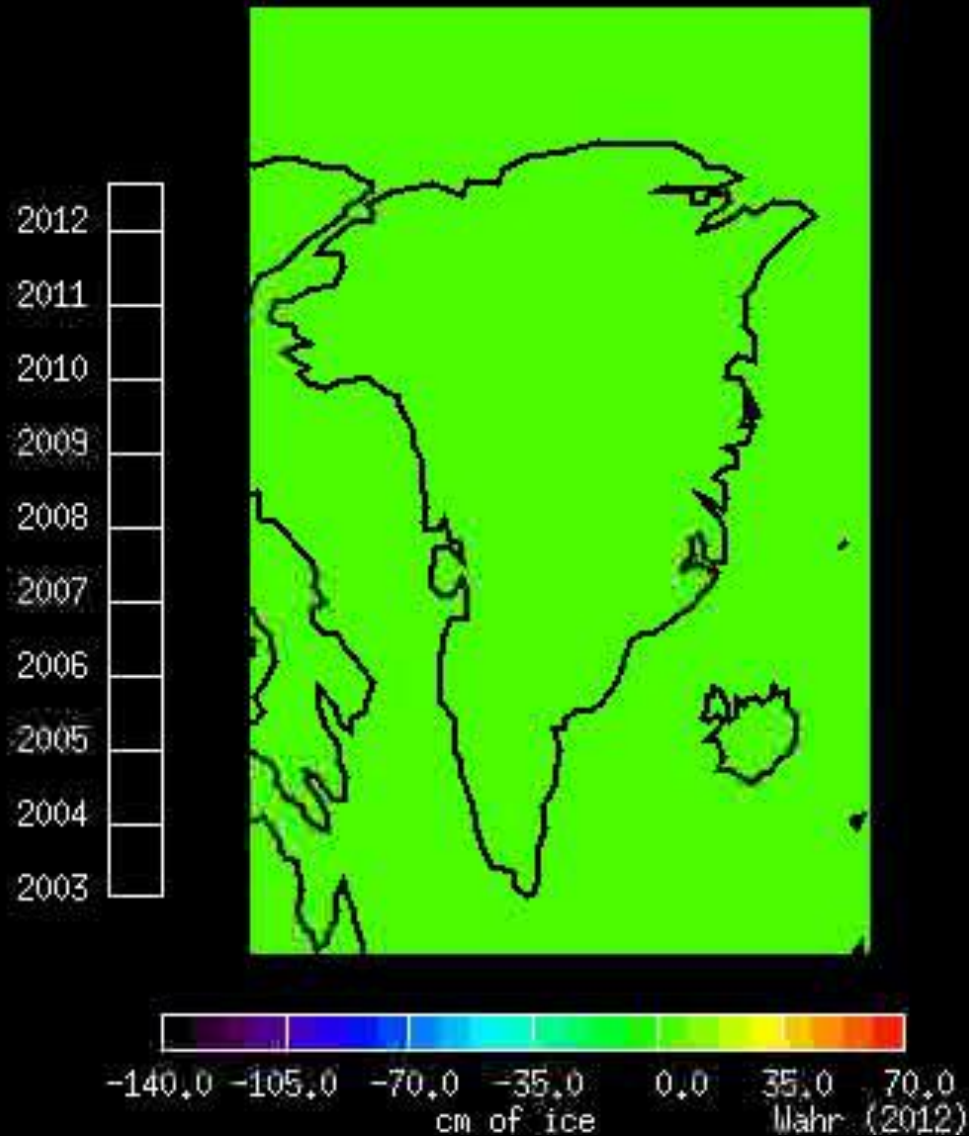
Mesur les variations spatio-temporelles du champ de gravité de la Terre

→ redistribution des masses à la surface et dans la Terre

- Résolution temporelle : 1 mois
- Résolution spatiale : 300 km

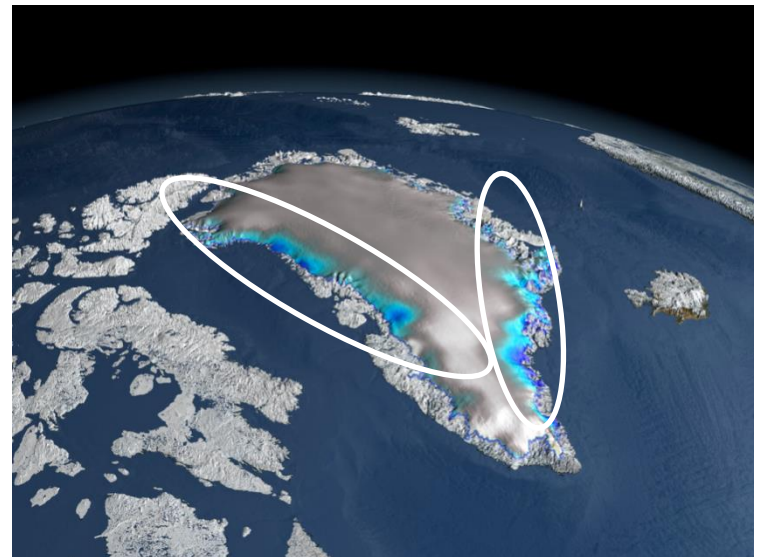
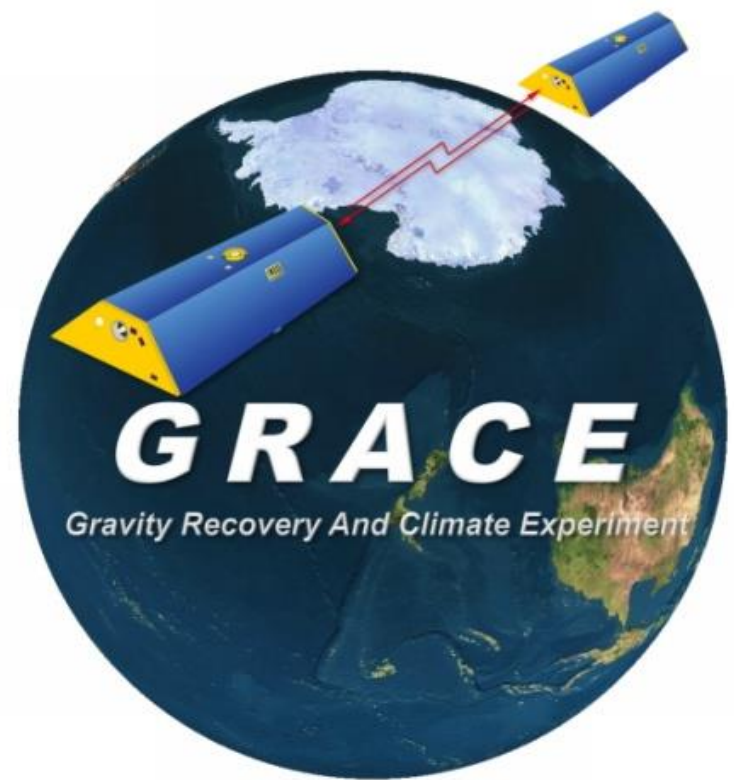
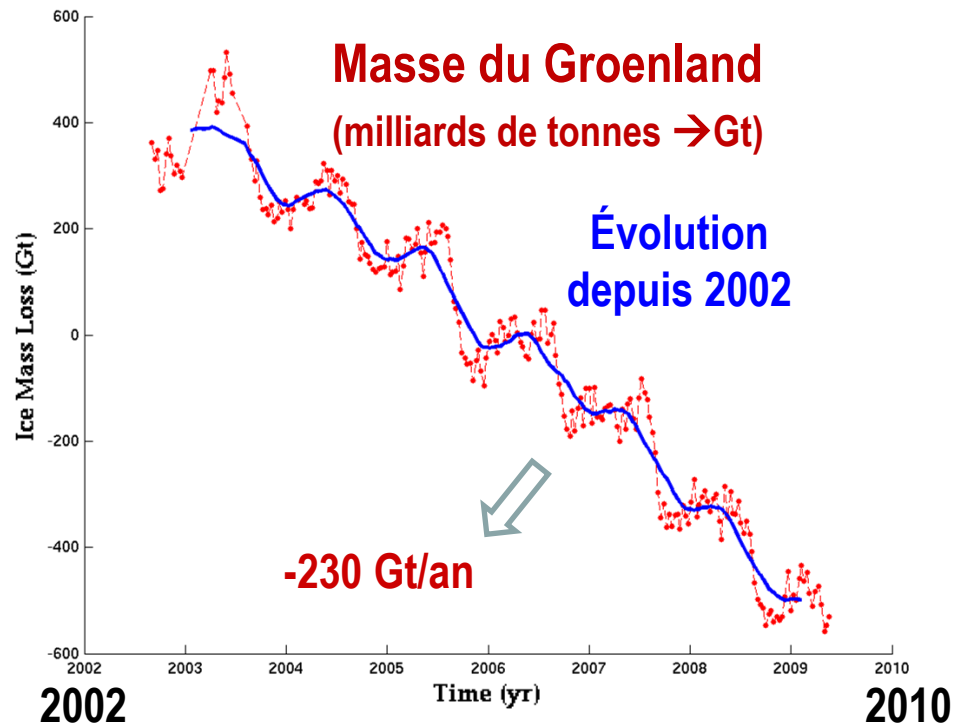


Perte de masse de glace (couleurs bleu-violet-noir) au Groenland entre 2003 et 2012 observée par les satellites GRACE

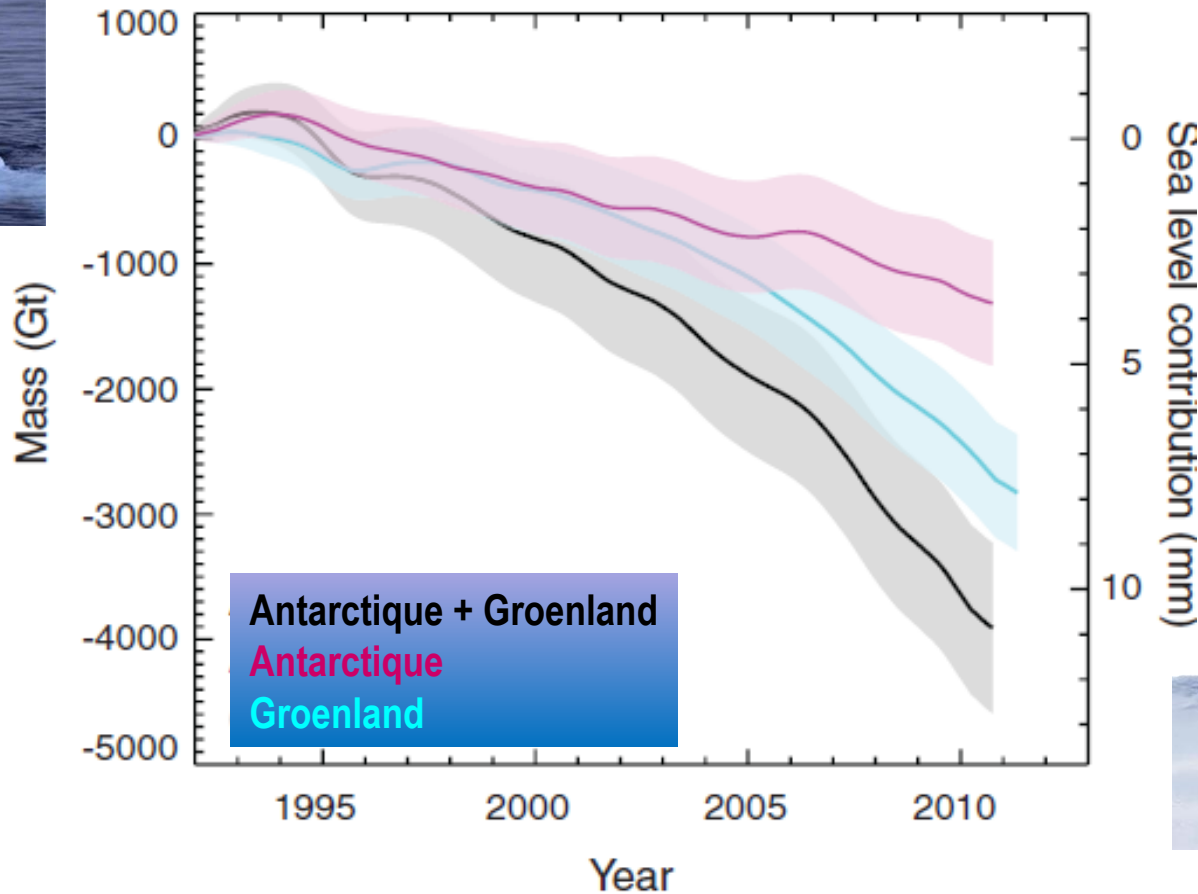


Source: J. Wahr

Evolution de la masse du Groenland observée par les satellites GRACE



Variations de la masse de glace des calottes polaires mesurées par les différentes techniques spatiales depuis le début des années 1990 (en milliards de tonnes)



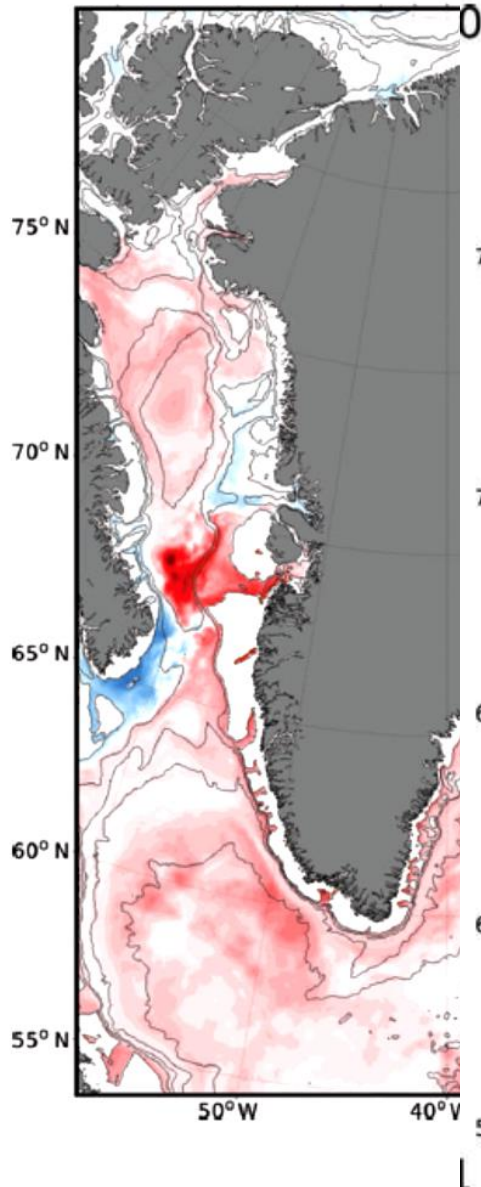
Contributions Groenland + Antarctique :

(1993-2010) → 0.7 +/- 0.2 mm/an
(2003-2012) → 0.8 +/- 0.15 mm/an

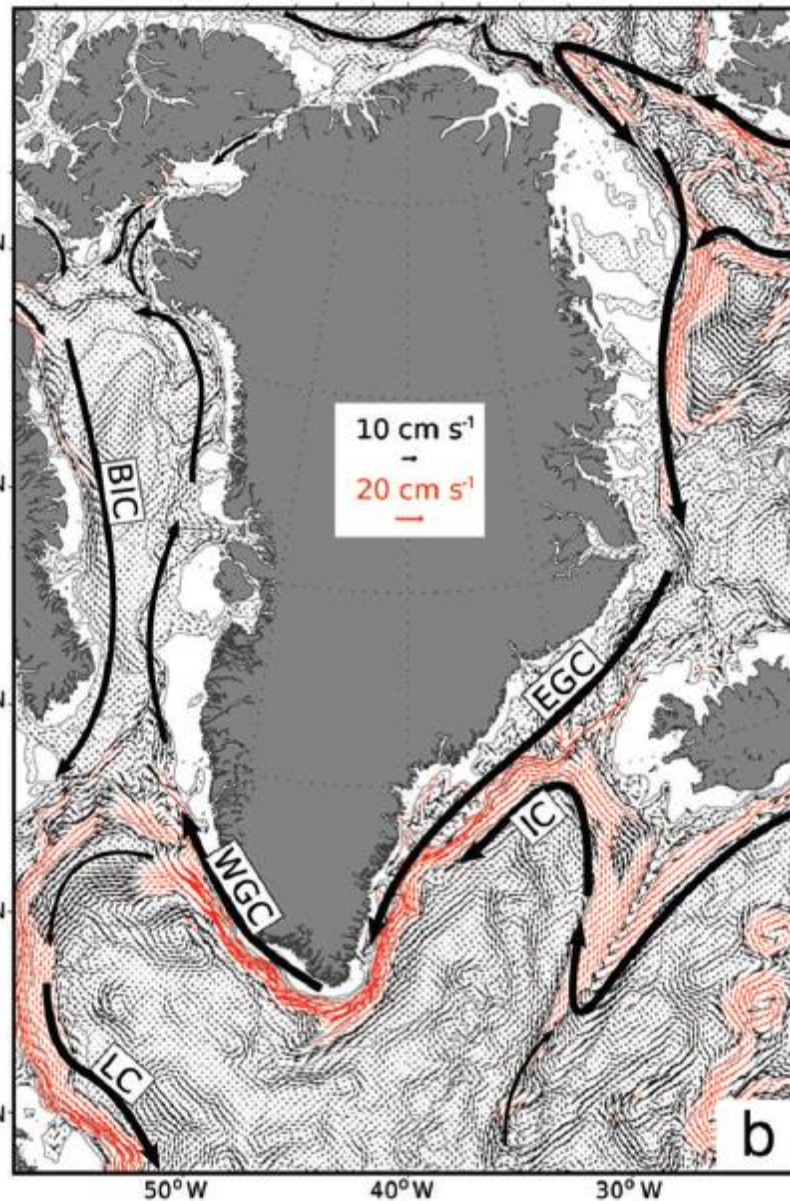
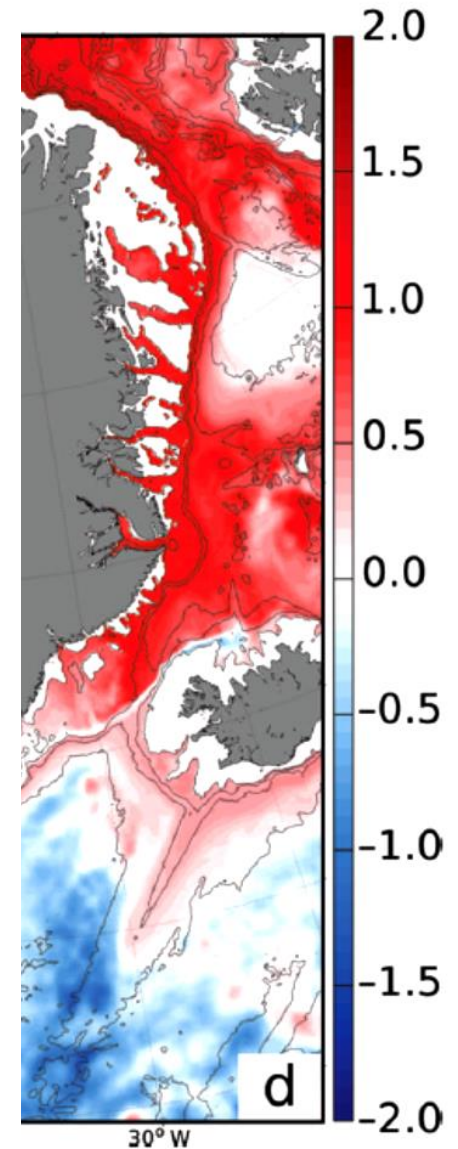
Shepherd et al., 2012

Anomalies de température de sub-surface (°C)
(par rapport à la moyenne 1992-2009)

2001



2009



Fonte des glaciers de montagne



1900



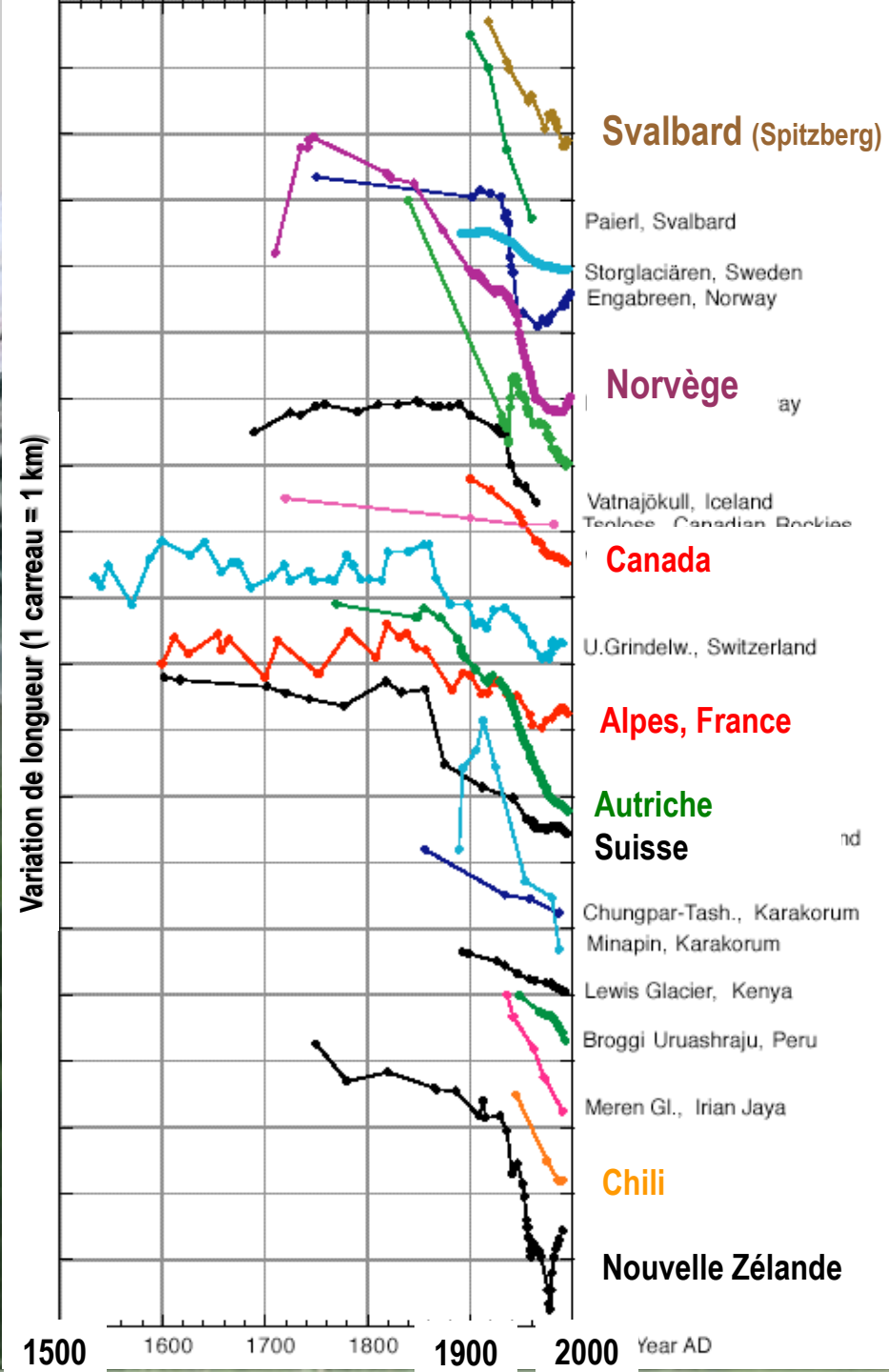
2008

Glacier Rhone (Alpes suisses)

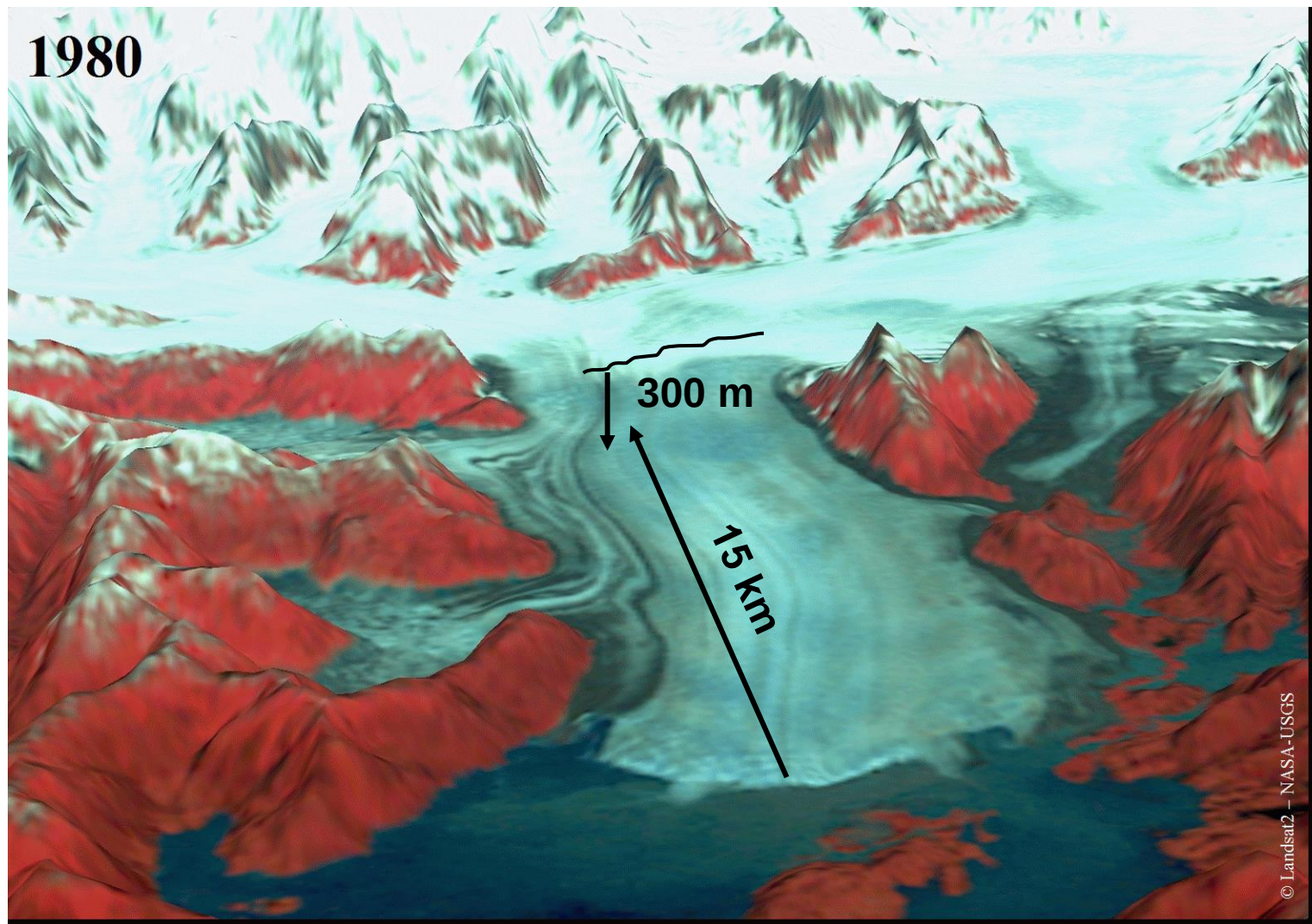
Recul des glaciers de montagne



Leclerc et al., 2011



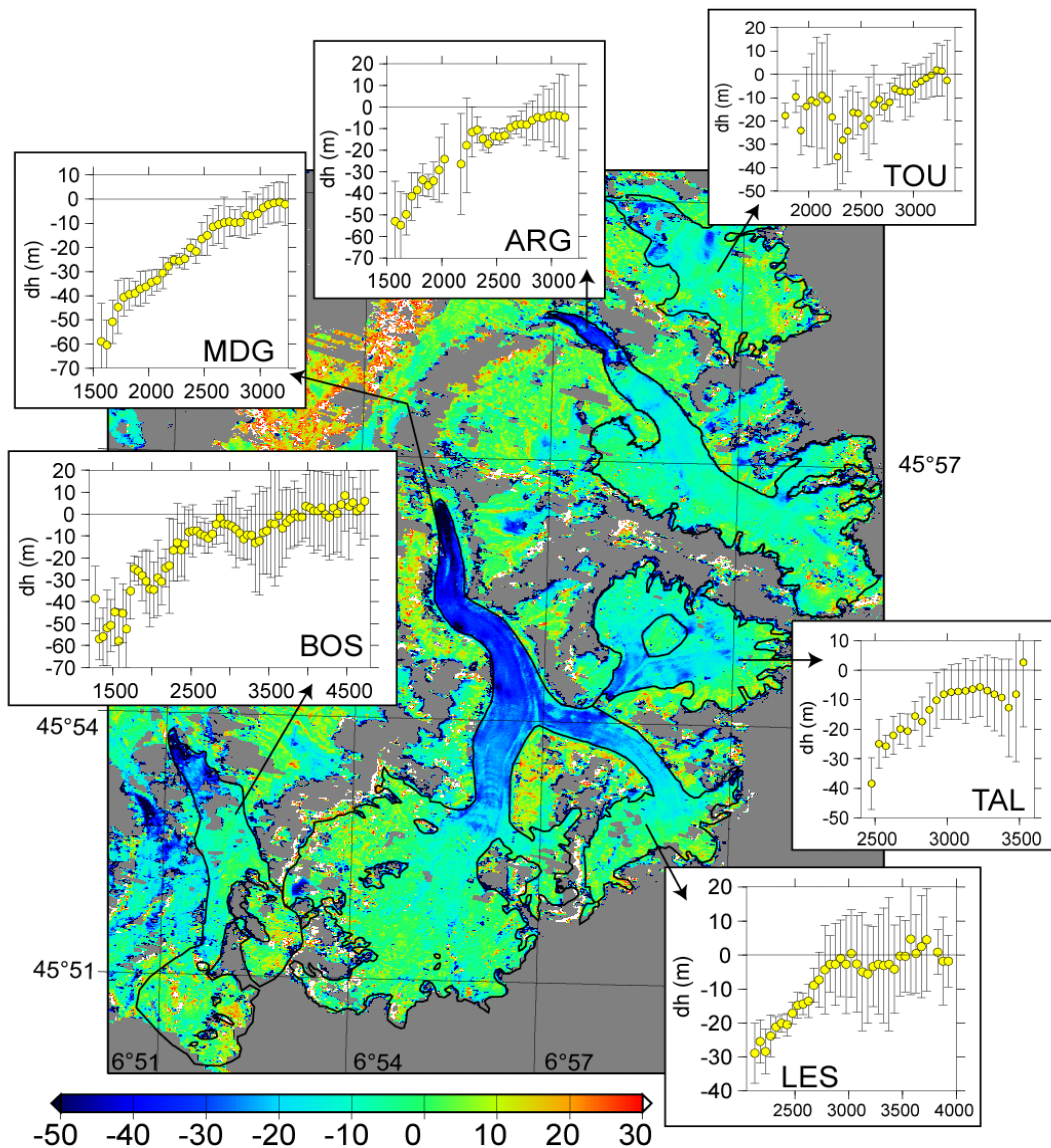
Recul et amincissement des glaciers mesurés par imagerie « satellite »



Recul et amincissement du glacier Columbia (Alaska) entre 1980 et 2007

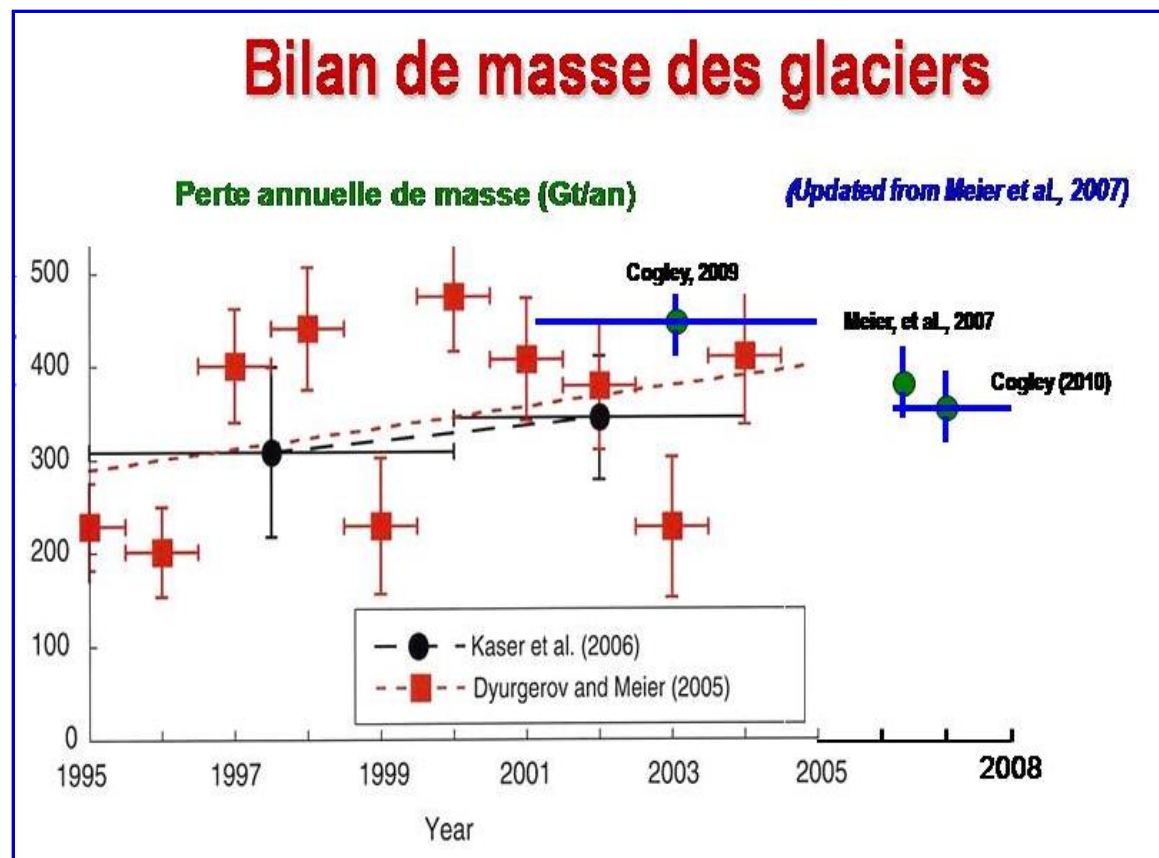
Fonte des glaciers alpins entre 1979 et 2003

Image SPOT 5
du massif
du Mont Blanc



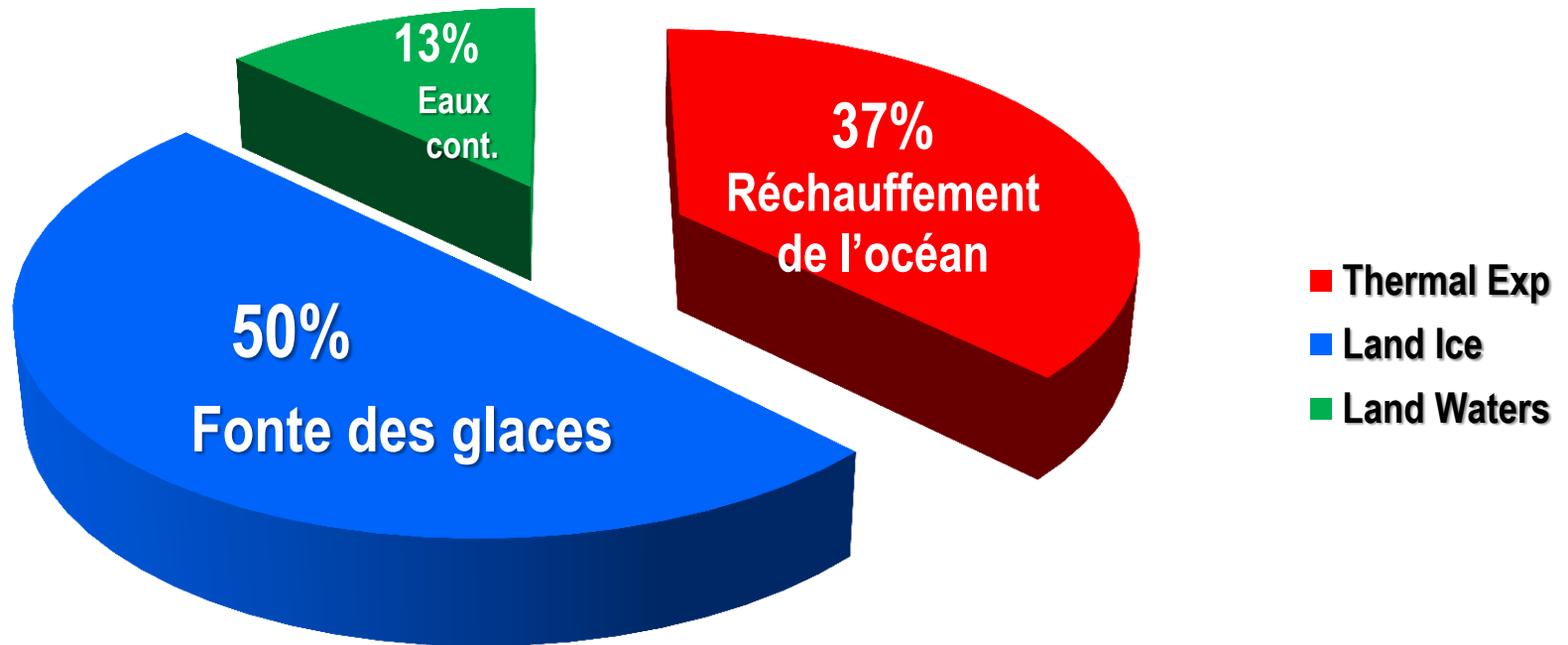
1 Gt= 1 milliard de tonnes

Contribution de la fonte des glaciers de montagne à la hausse du niveau de la mer **360 Gt/an = 1mm/an**



Fonte des glaciers de montagne: ~ 300-400 milliards de tonnes par an entre 1993-2010
→ Hausse du niveau de la mer de ~ 1 mm par an
Depuis 2003 → accélération de la fonte

***Contributions des différentes sources sur les 2 dernières décennies
(% de la hausse observée)***

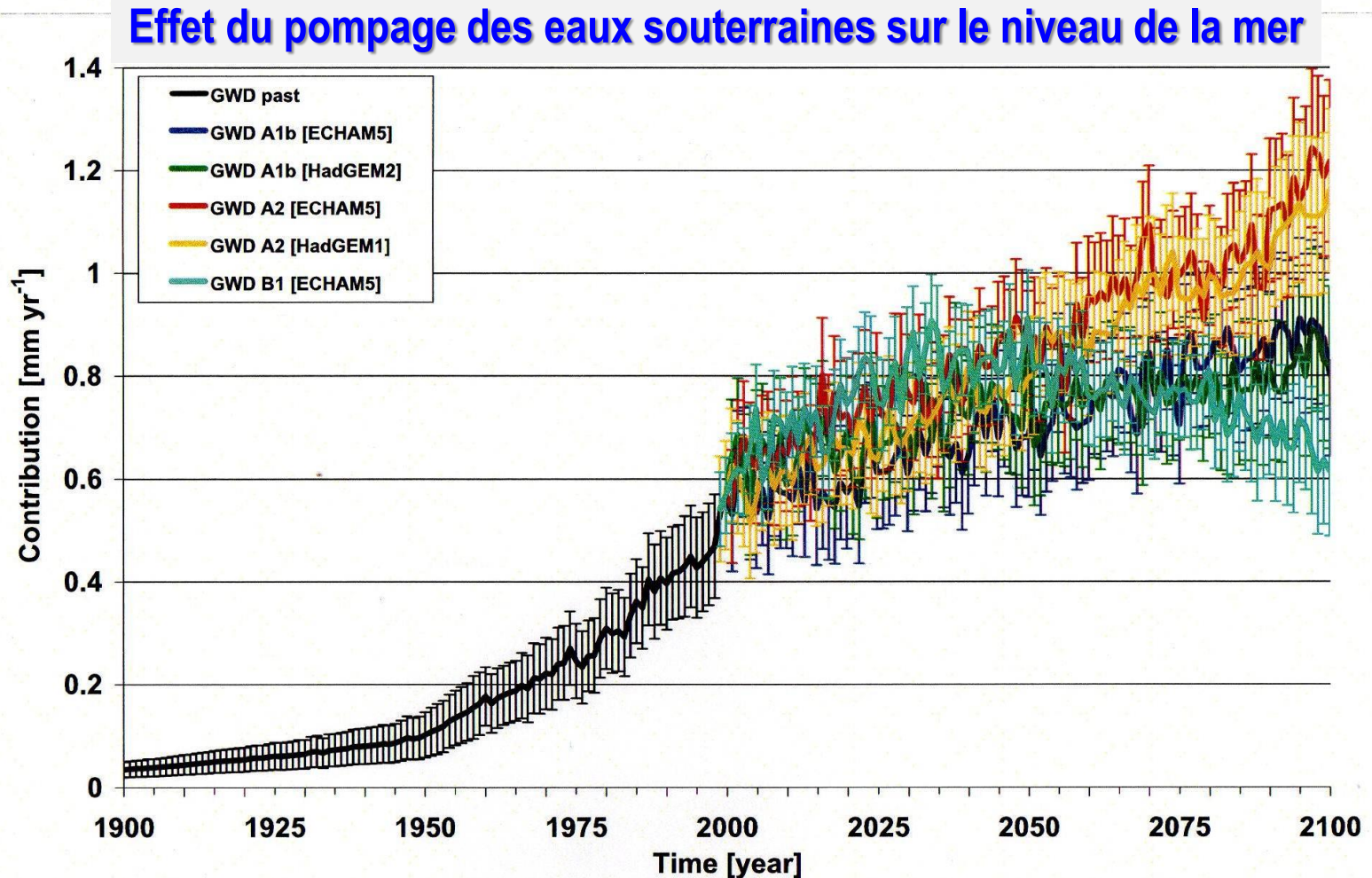


An aerial photograph of a vast river delta, likely the Amazon, showing a complex network of blue water channels and green forested islands. Three satellites are superimposed in the sky: one on the left with large solar panels, one in the center with a yellow body, and one on the right with a purple body. The text is overlaid on the right side of the image.

Contribution des eaux continentales au niveau de la mer

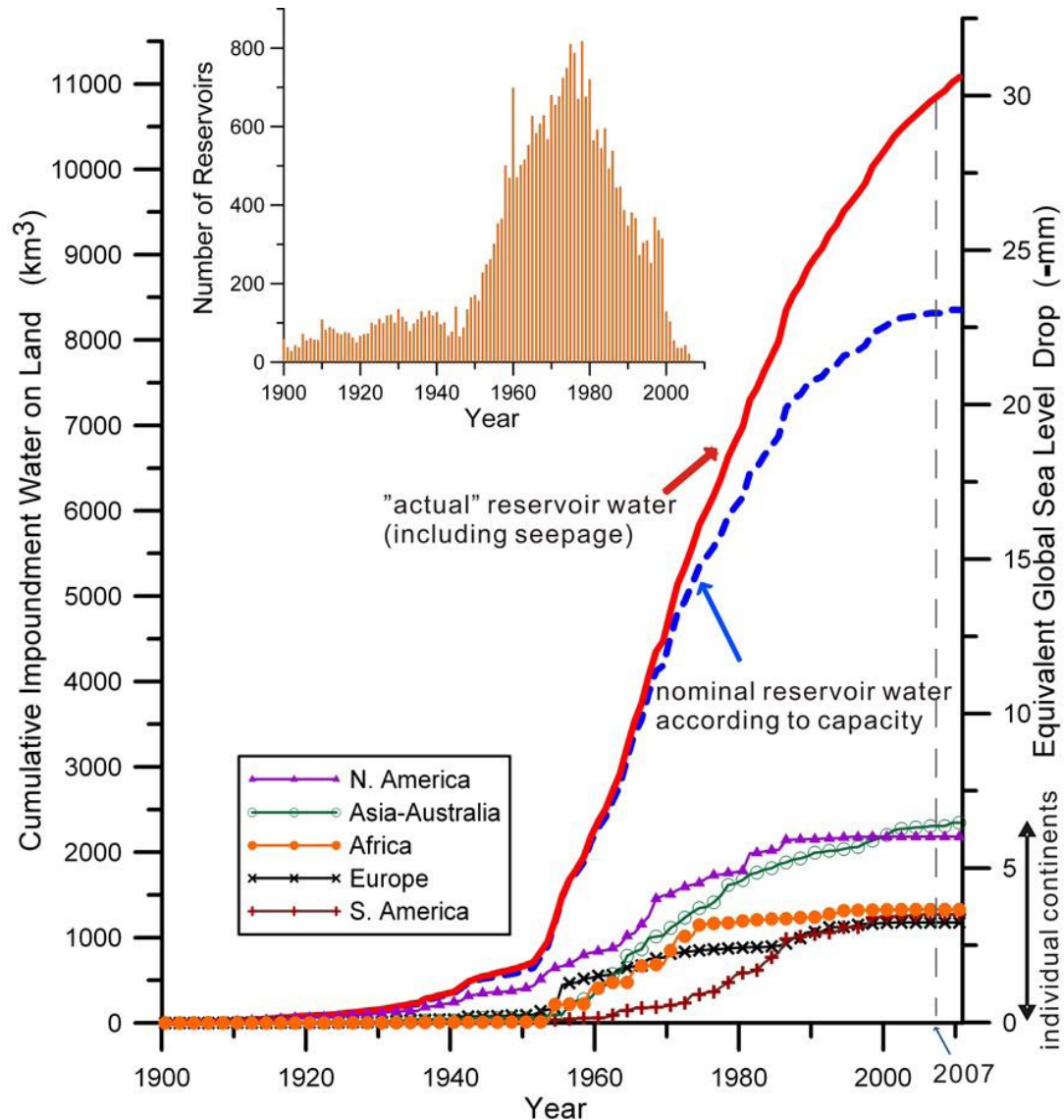
2 sources:

- Variabilité naturelle du climat
- Activités humaines →
 - *barrages sur les fleuves,*
 - *pompage de l'eau dans les nappes souterraines*

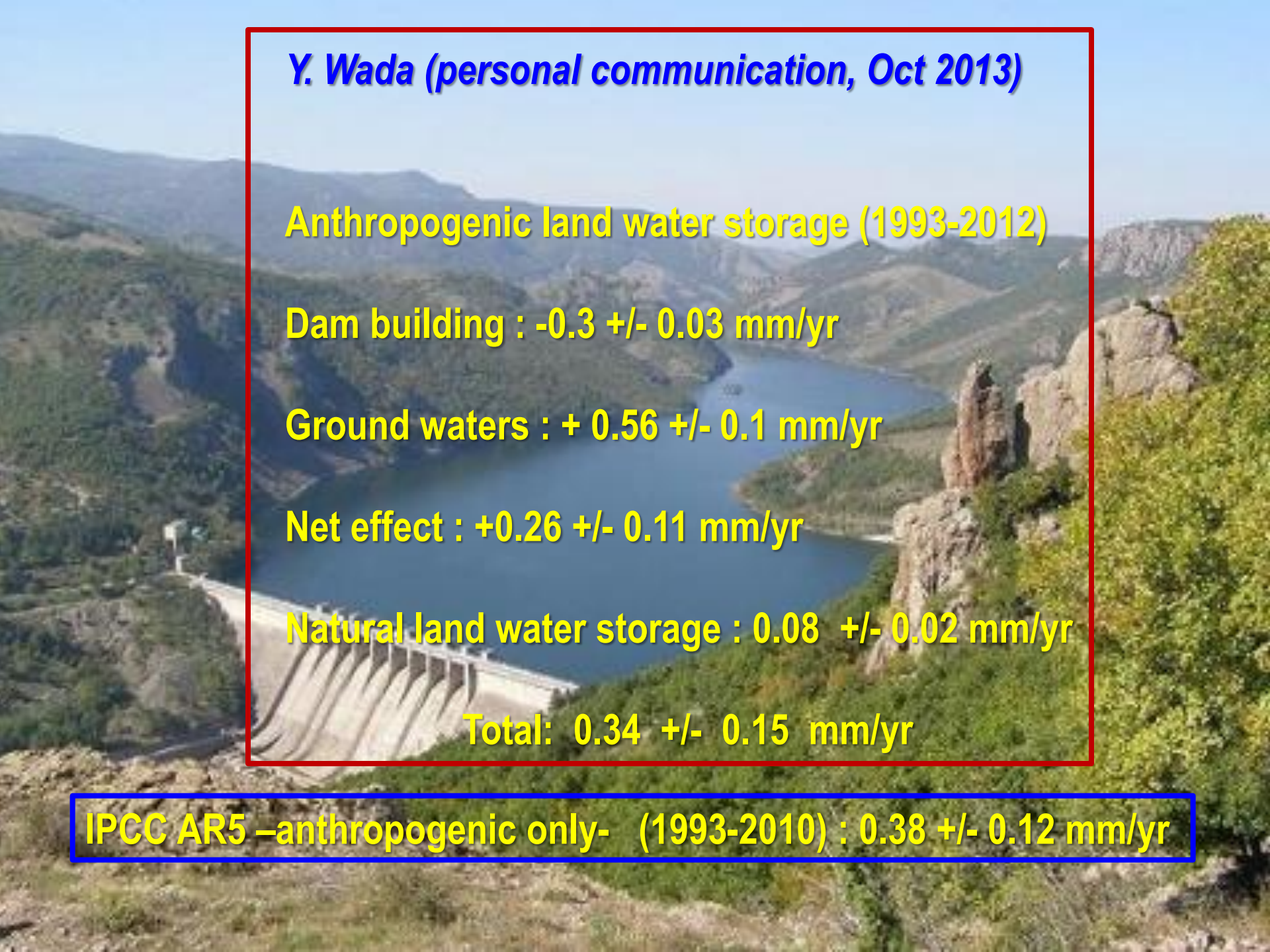


1993-2008 → ~ +0.54 +/- 0.1 mm/an → hausse du niveau de la mer

Barrages et réservoirs artificiels



1993-2008
 ~ - 0.55 mm/an
 → Baisse
 du niveau de la mer



Y. Wada (personal communication, Oct 2013)

Anthropogenic land water storage (1993-2012)

Dam building : -0.3 +/- 0.03 mm/yr

Ground waters : + 0.56 +/- 0.1 mm/yr

Net effect : +0.26 +/- 0.11 mm/yr

Natural land water storage : 0.08 +/- 0.02 mm/yr

Total: 0.34 +/- 0.15 mm/yr

IPCC AR5 –anthropogenic only- (1993-2010) : 0.38 +/- 0.12 mm/yr

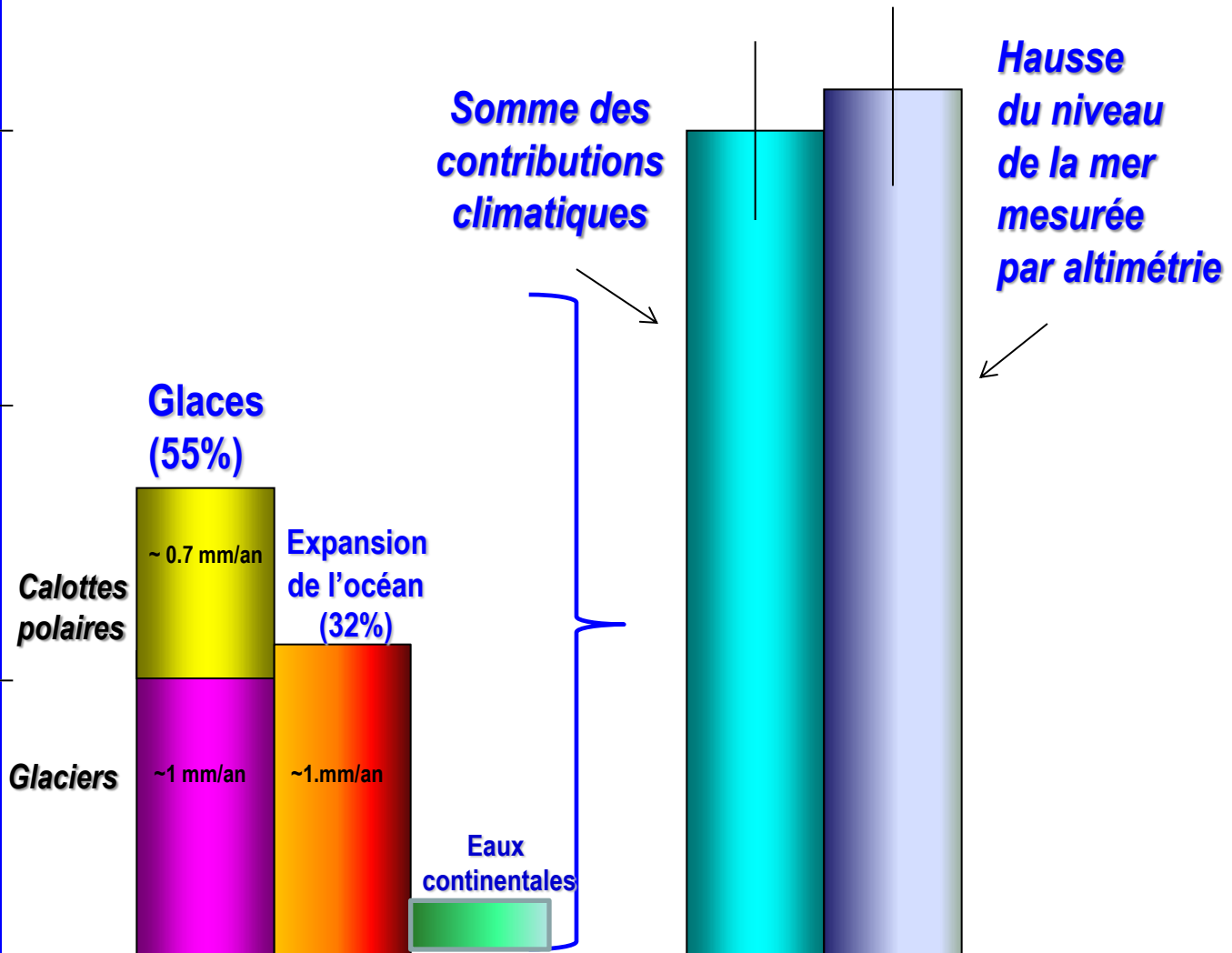
Comparaison entre hausse de la mer observée et somme des composantes climatiques (1993-2012)

Hausse du
niveau de mer

3 mm/an

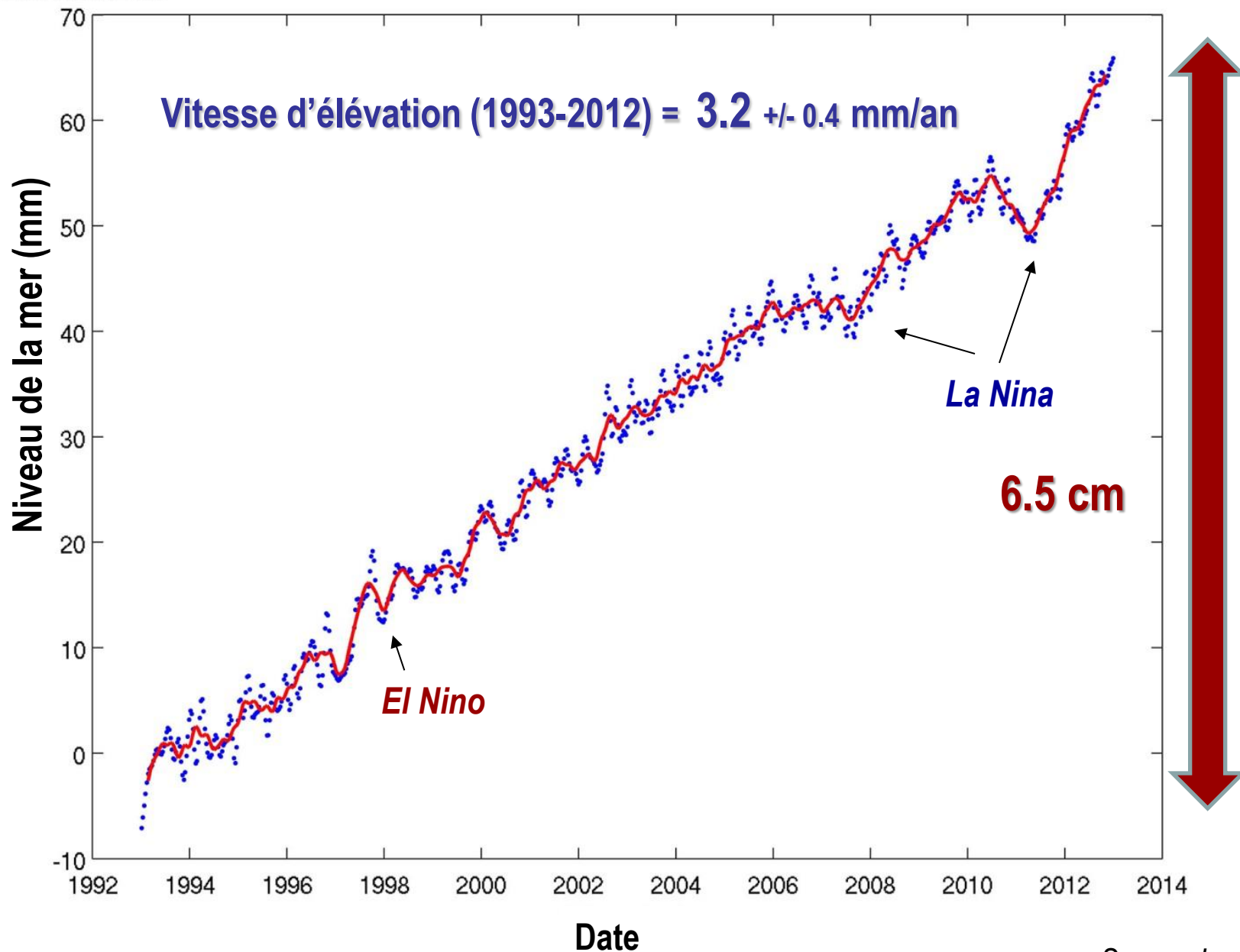
2 mm/an

1 mm/an



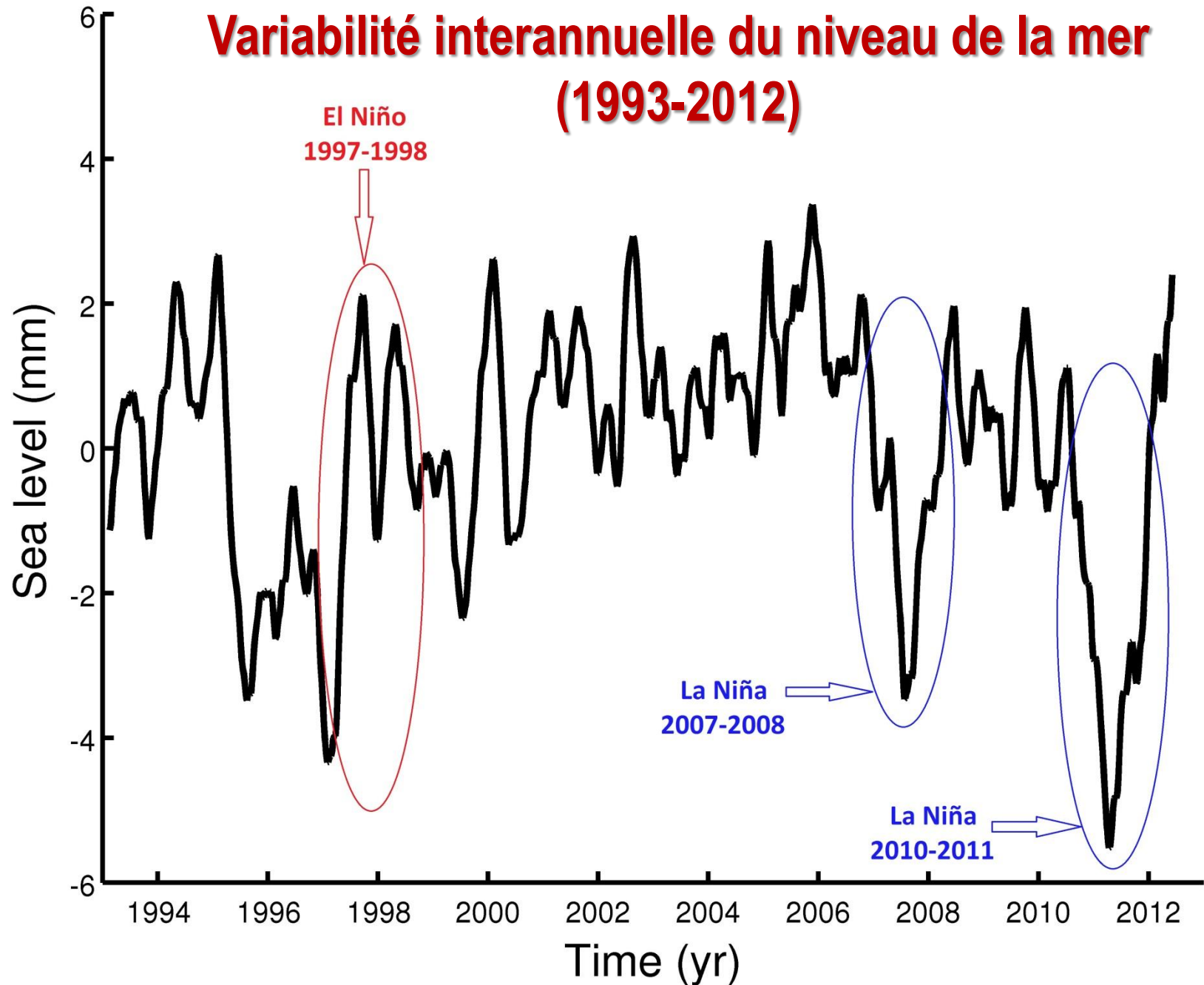
Updated: 19/04/2013

Niveau moyen global de la mer par altimétrie spatiale

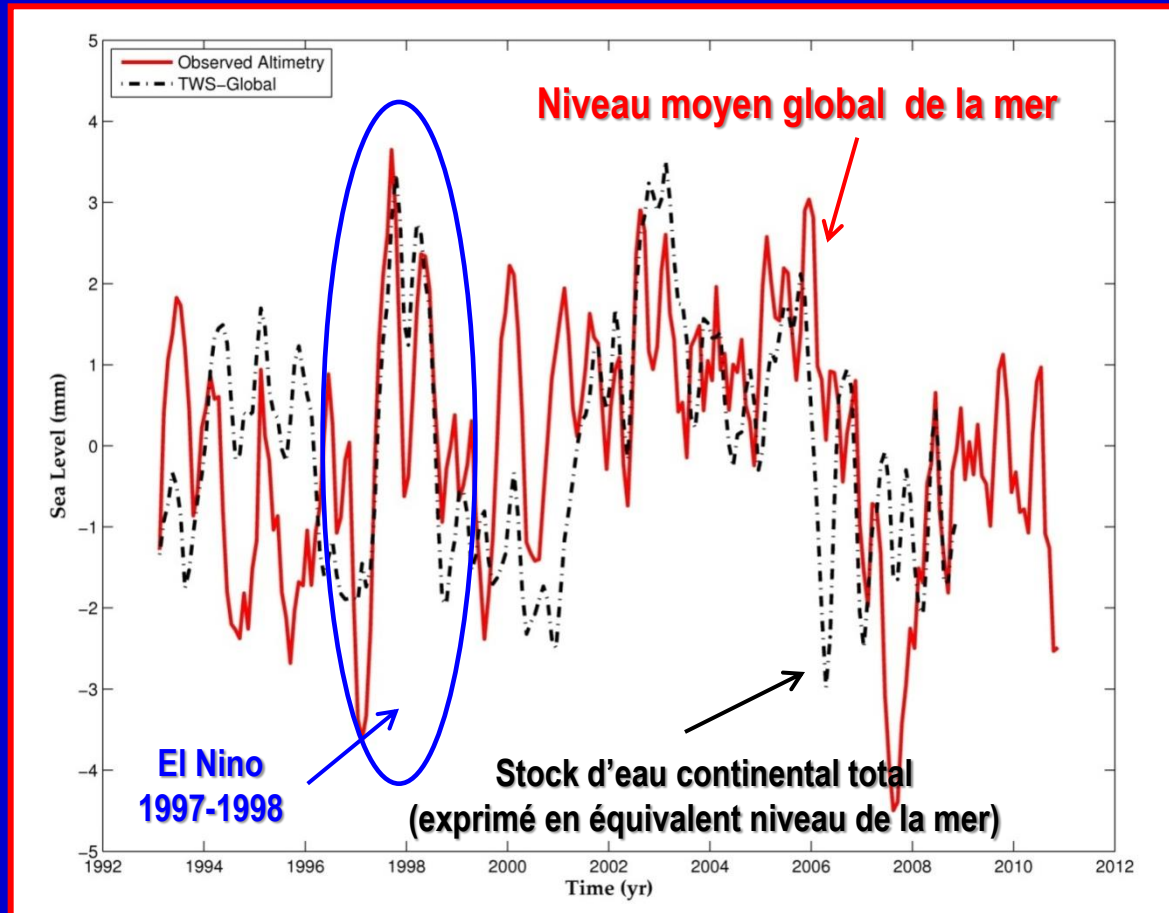


Source: Legos-CLS

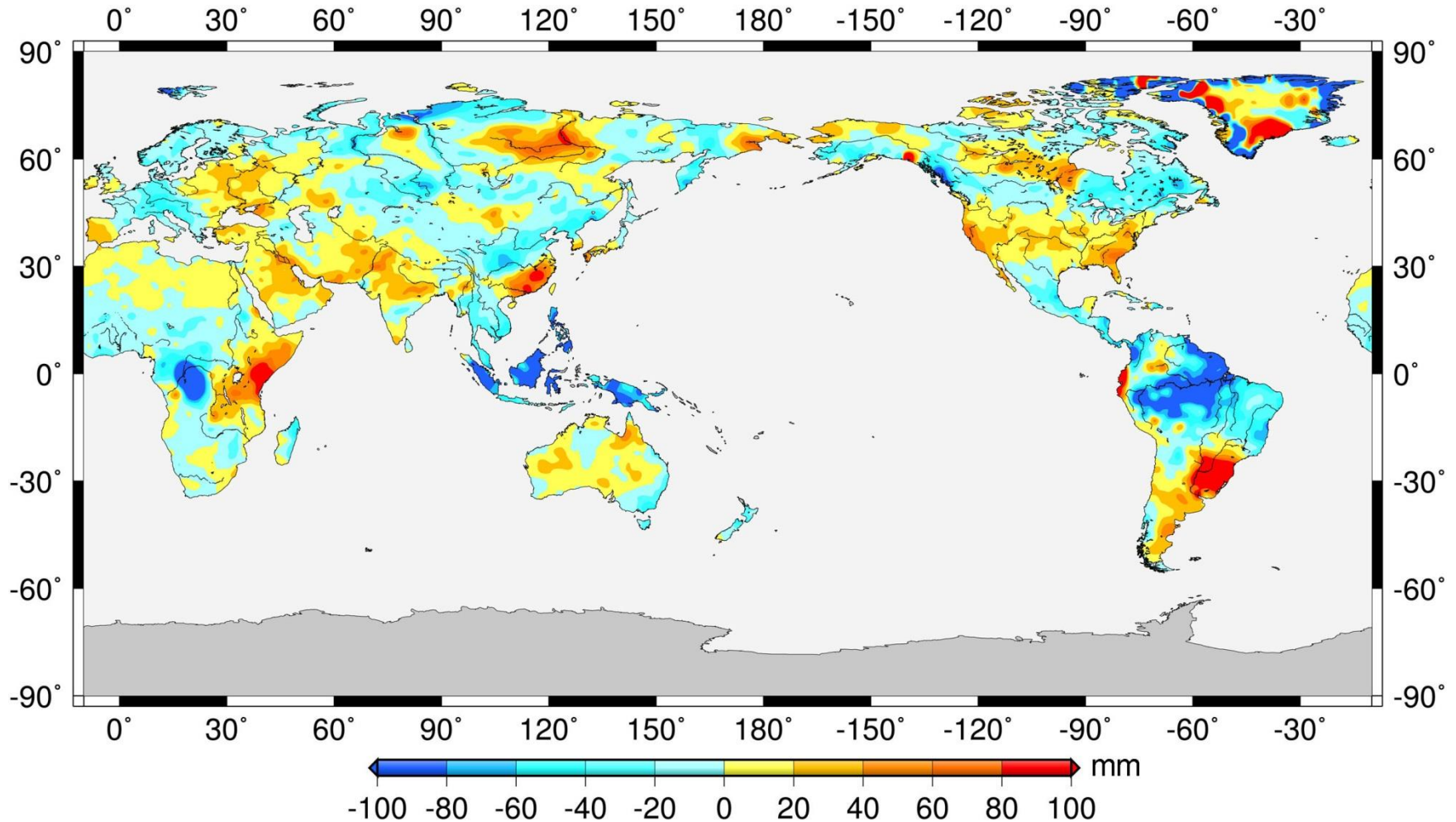
Variabilité interannuelle du niveau de la mer (1993-2012)



Variations interannuelles du niveau moyen global de la mer et variations du stock total d'eau sur les continents (modèle hydrologique ISBA-TRIP de MétéoFrance)



Stock d'eau entre juillet 1997 et juillet 1998 (El Nino) d'après le modèle hydrologique de Météo-France



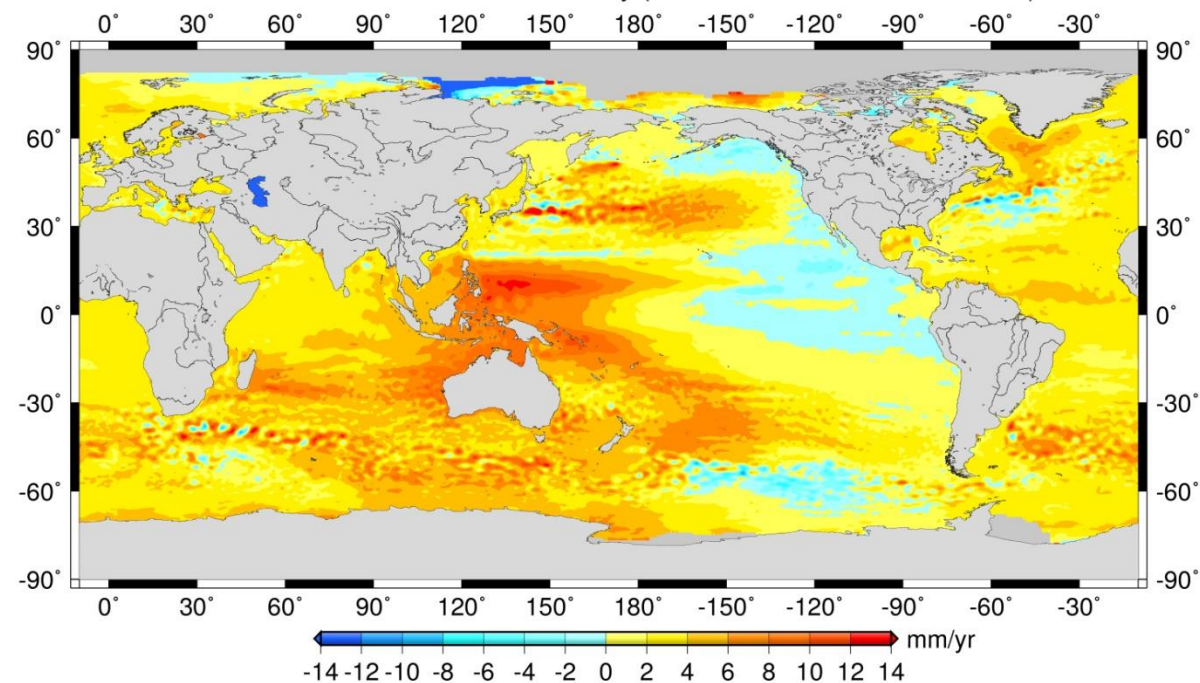
Bleu = moins d'eau

Rouge = plus d'eau



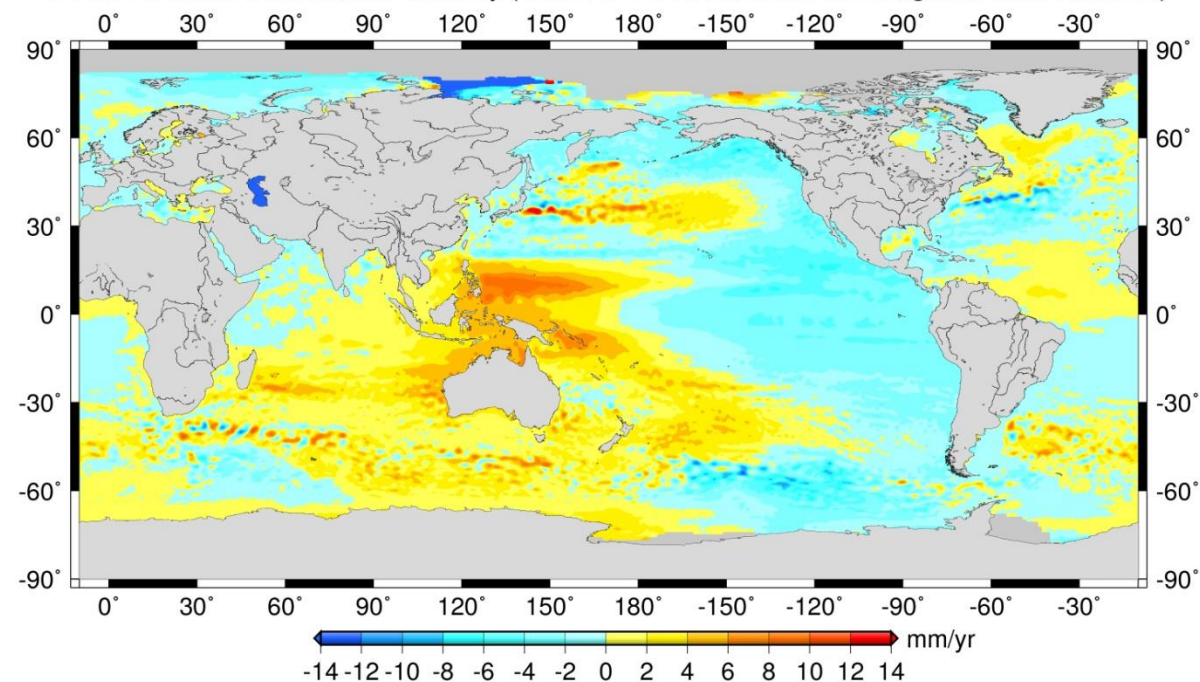
La mer ne monte pas de manière uniforme

Sea level trends from satellite altimetry (1992/10 - 2013/08, LEGOS/CLS)



***Variabilité régionale des vitesses
de variation du niveau de la mer
(octobre 1992-août 2013)***

Sea level trends from satellite altimetry (1992/10 - 2013/08, LEGOS/CLS, global trend removed)

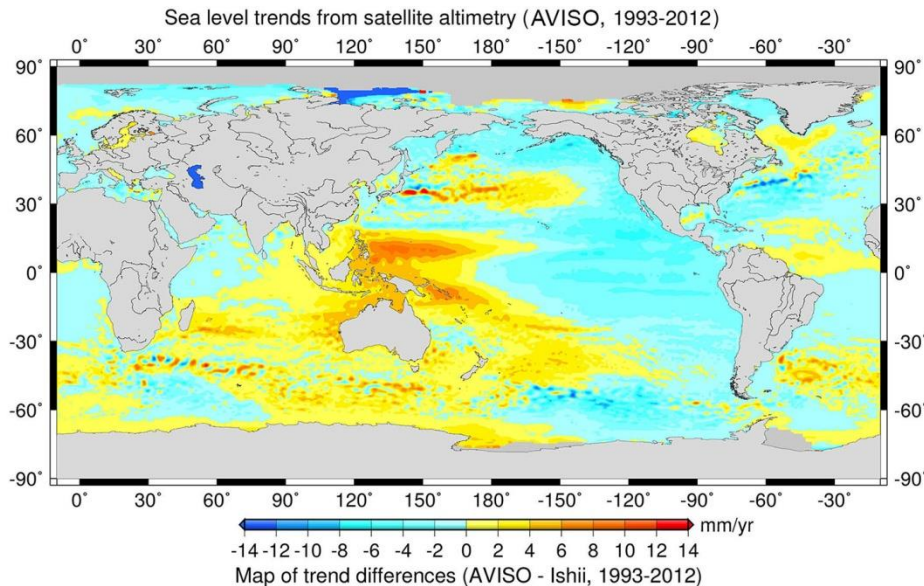


**La mer ne monte pas
de façon uniforme !**

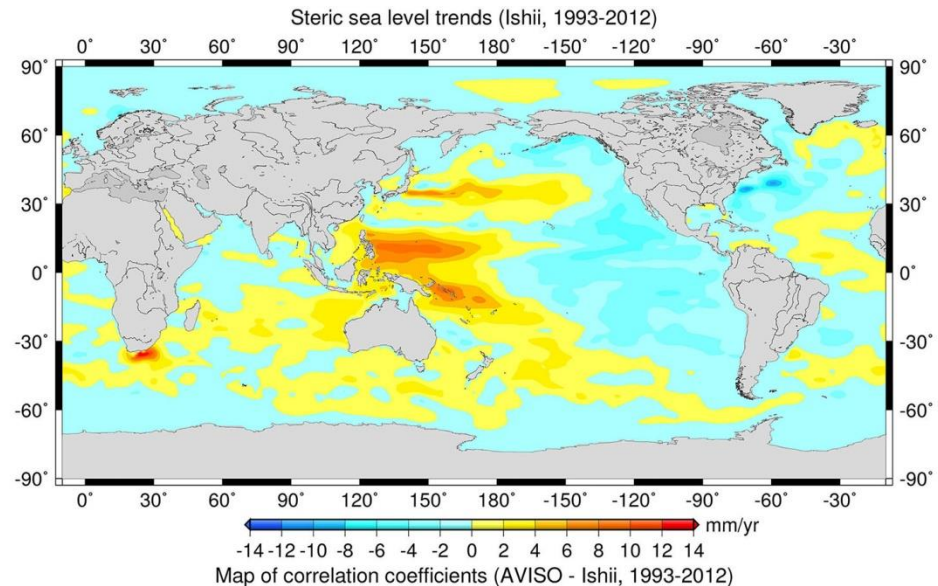
← **sans hausse moyenne globale**

Variabilité régionale: aujourd'hui principalement due à l'expansion thermique non uniforme de l'océan

Altimétrie



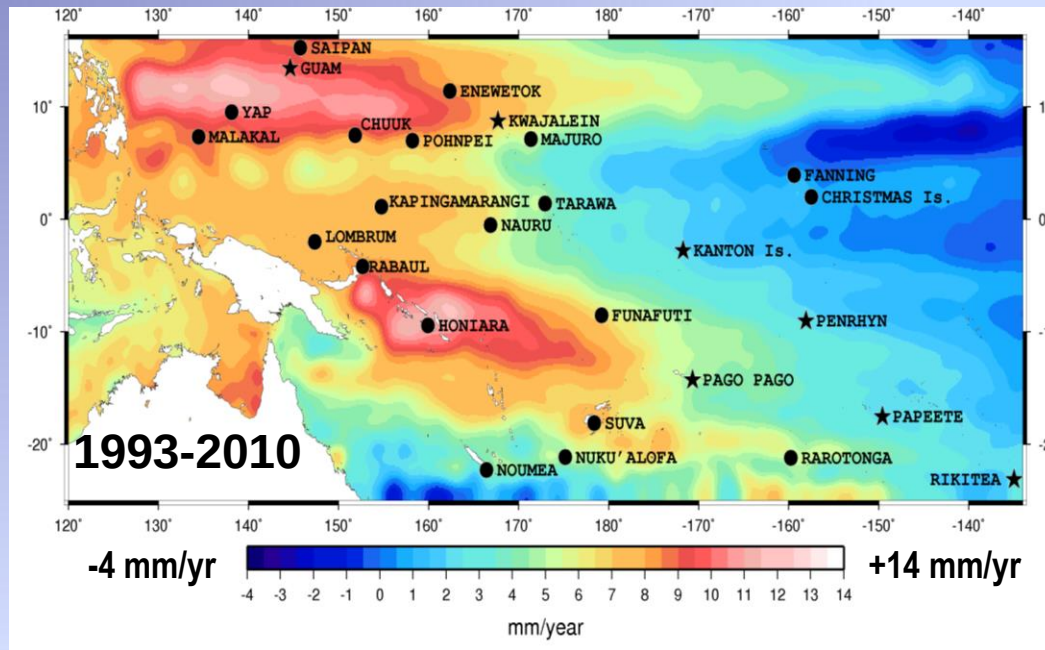
Effets de l'expansion thermique et de la salinité



**Tendances spatiales
(1993-2012)**

Source: LEGOS

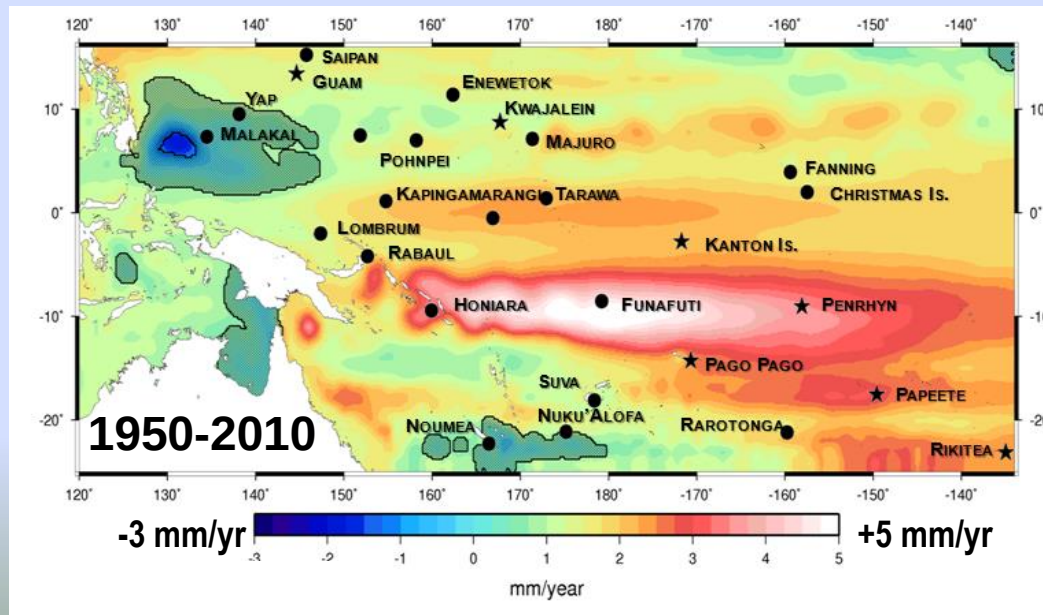
Variabilité régionale des tendances du niveau de la mer (Pacifique tropical ouest)



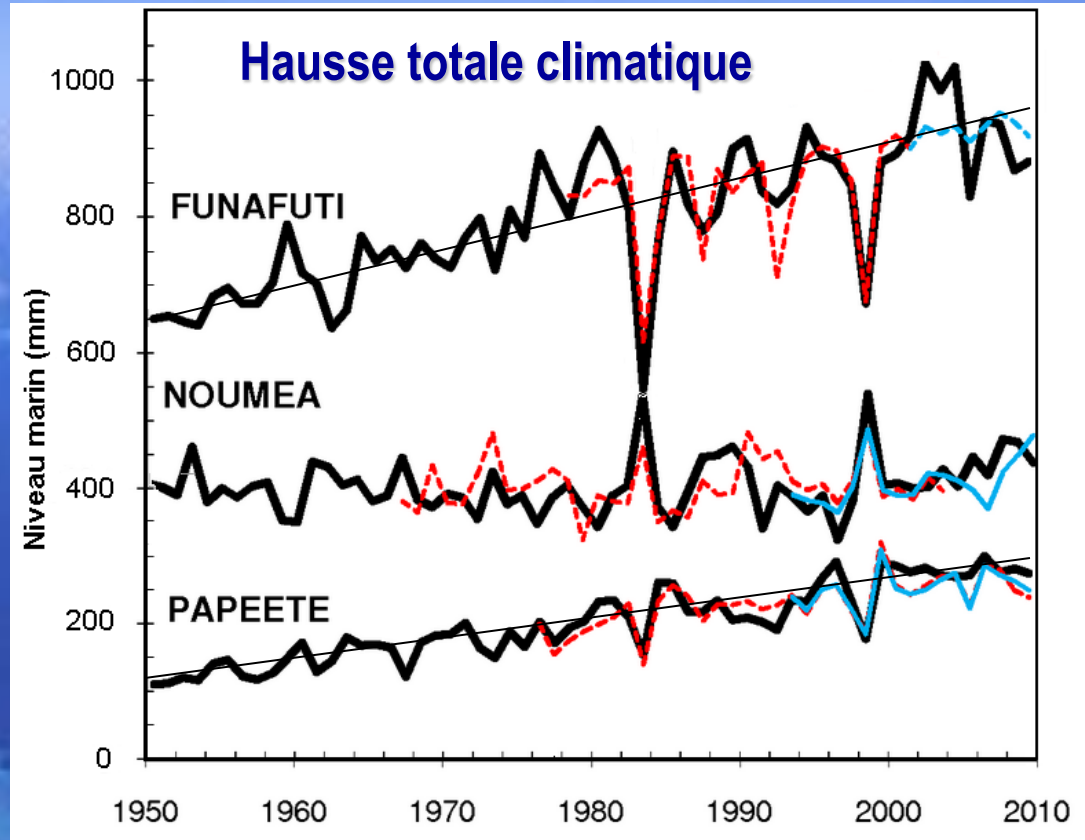
1993-2010

Variabilité régionale des tendances
du niveau de la mer

dépend de la période considérée



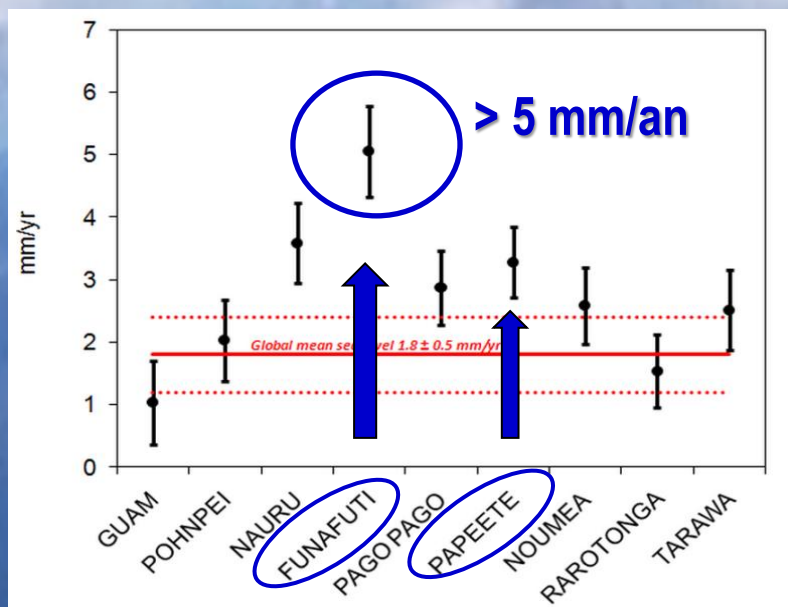
1950-2010



Funafuti (Tuvalu)

Hausse climatique totale = hausse moyenne globale + variabilité régionale

Hausse climatique totale (1950-2010) (moyenne globale + variabilité régionale)



← Hausse moyenne globale = 1.8 mm/an

Funafuti (Tuvalu)

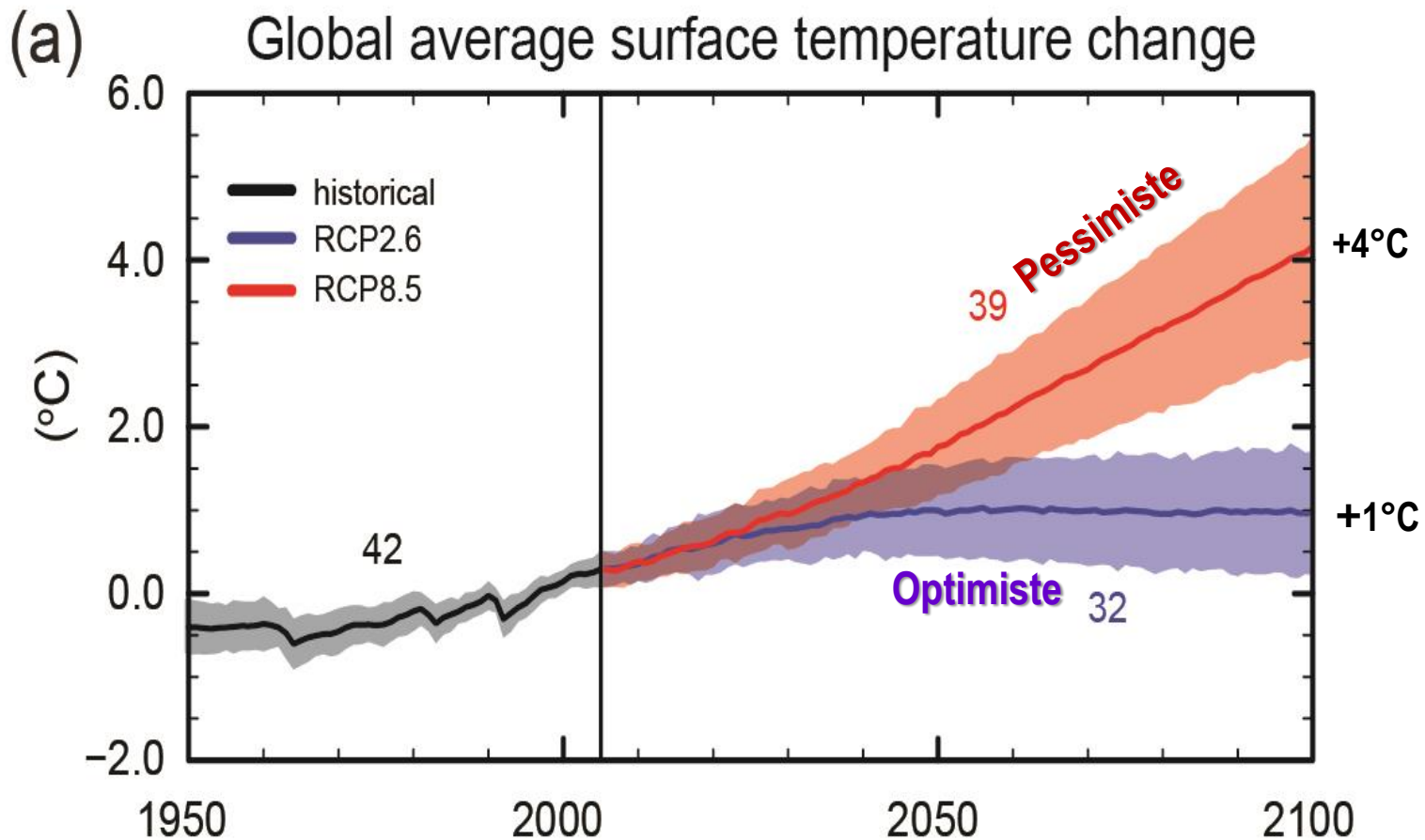
+ 30 cm d'élévation du niveau de la mer depuis 1950!

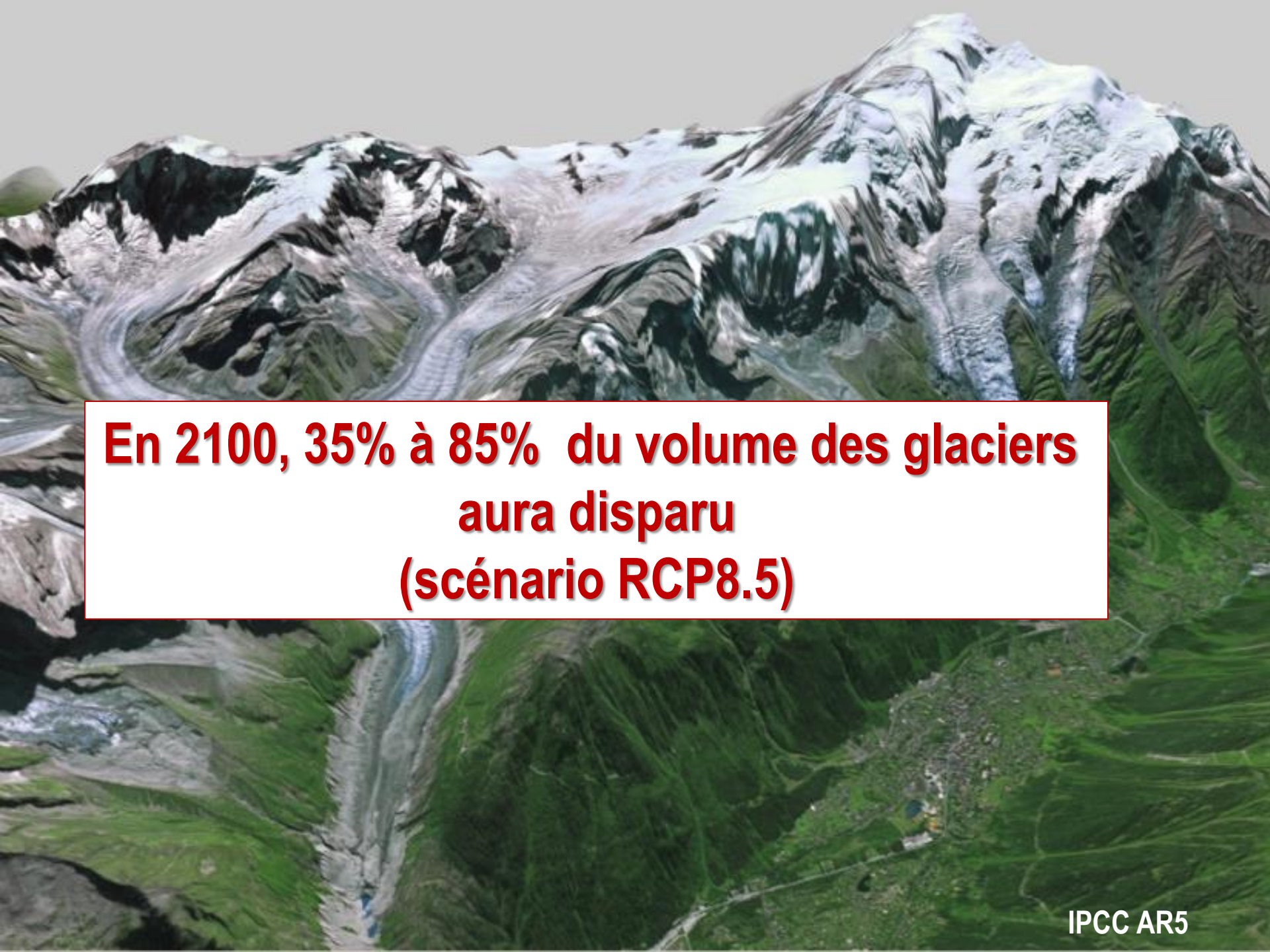
La mer va-t-elle continuer à monter?

Oui



Evolution de la température moyenne de la Terre

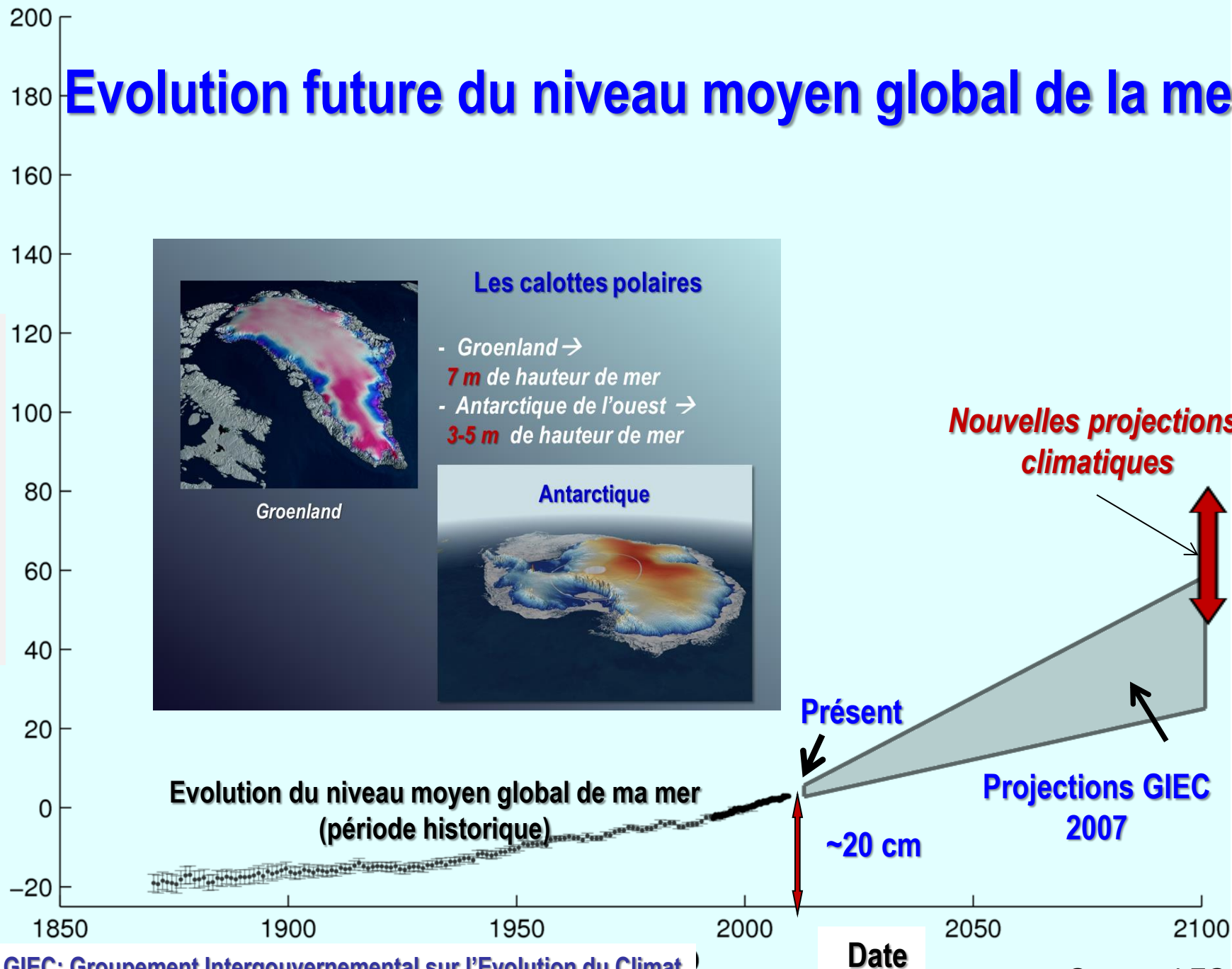


An aerial photograph of a mountainous region. The upper portion shows rugged, snow-covered peaks and ridges. Below the mountains, a winding road or path is visible, leading down into a valley. The valley floor is covered in green vegetation, likely grass or low-lying shrubs. A river or stream is visible in the lower left, flowing through the valley. The overall scene depicts a high-altitude environment with significant snow cover.

**En 2100, 35% à 85% du volume des glaciers
aura disparu
(scénario RCP8.5)**

Evolution future du niveau moyen global de la mer

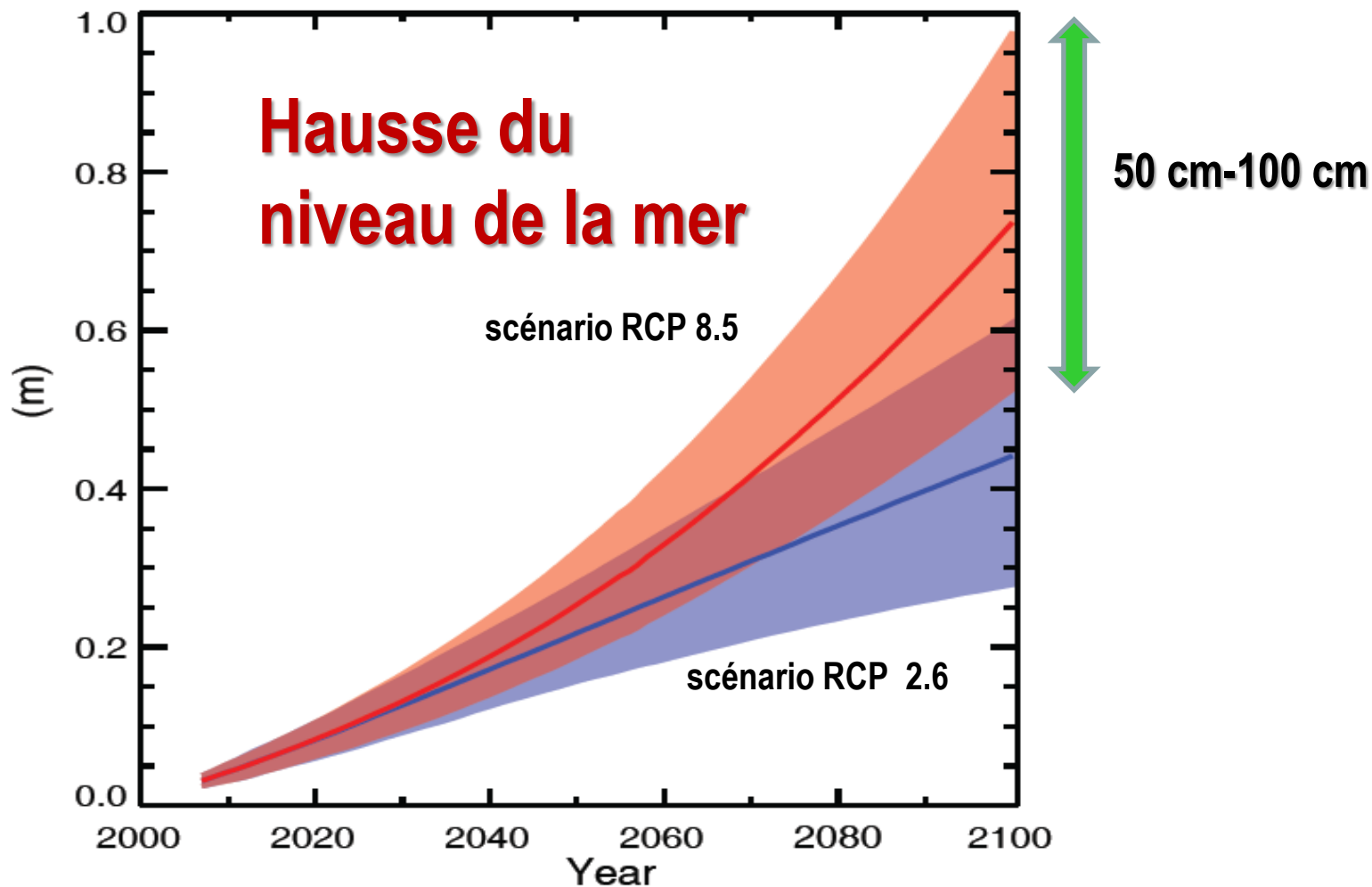
Niveau de la mer (cm)



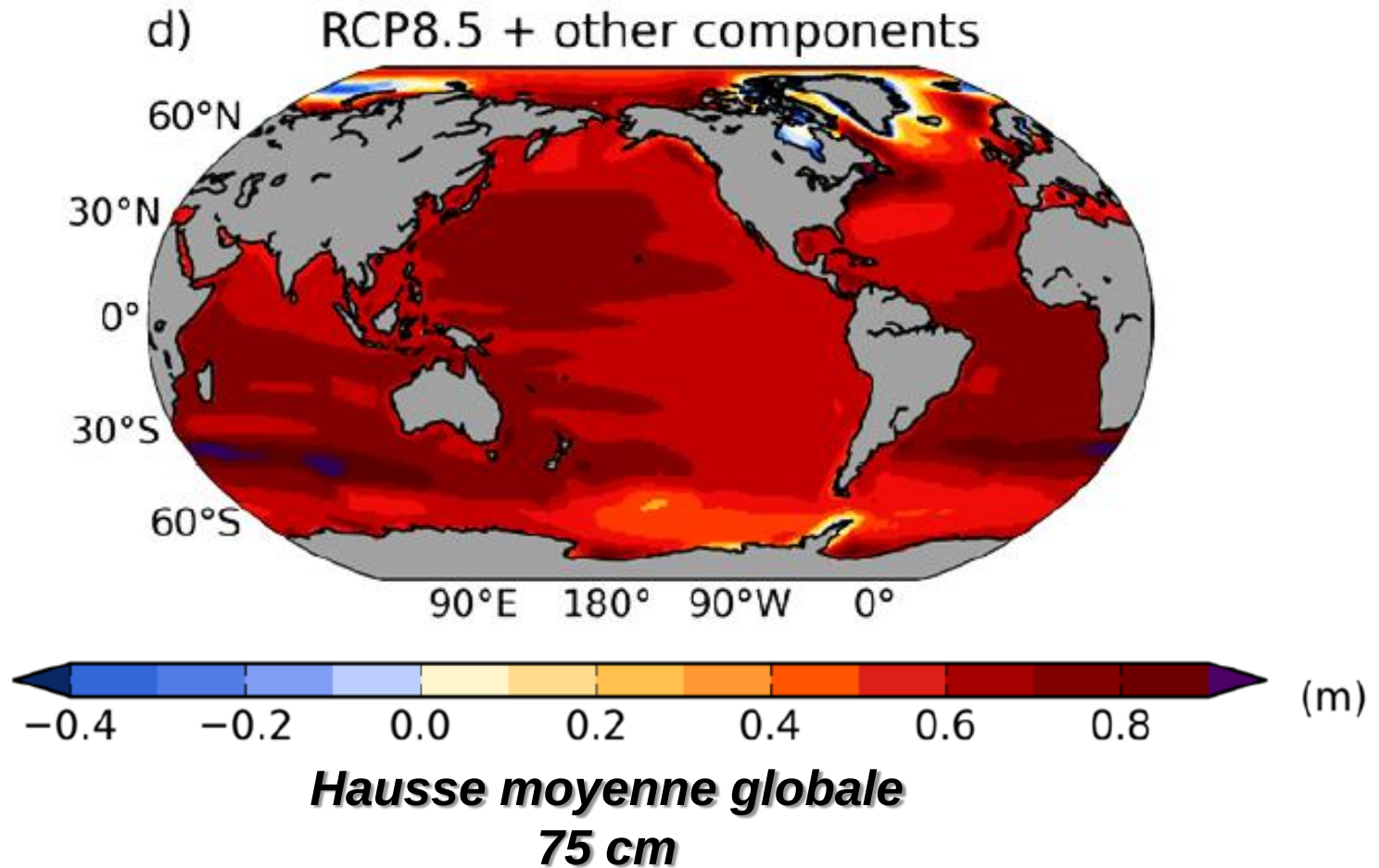
GIEC: Groupement Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

Source : LEGOS

Evolution du niveau moyen global de la mer

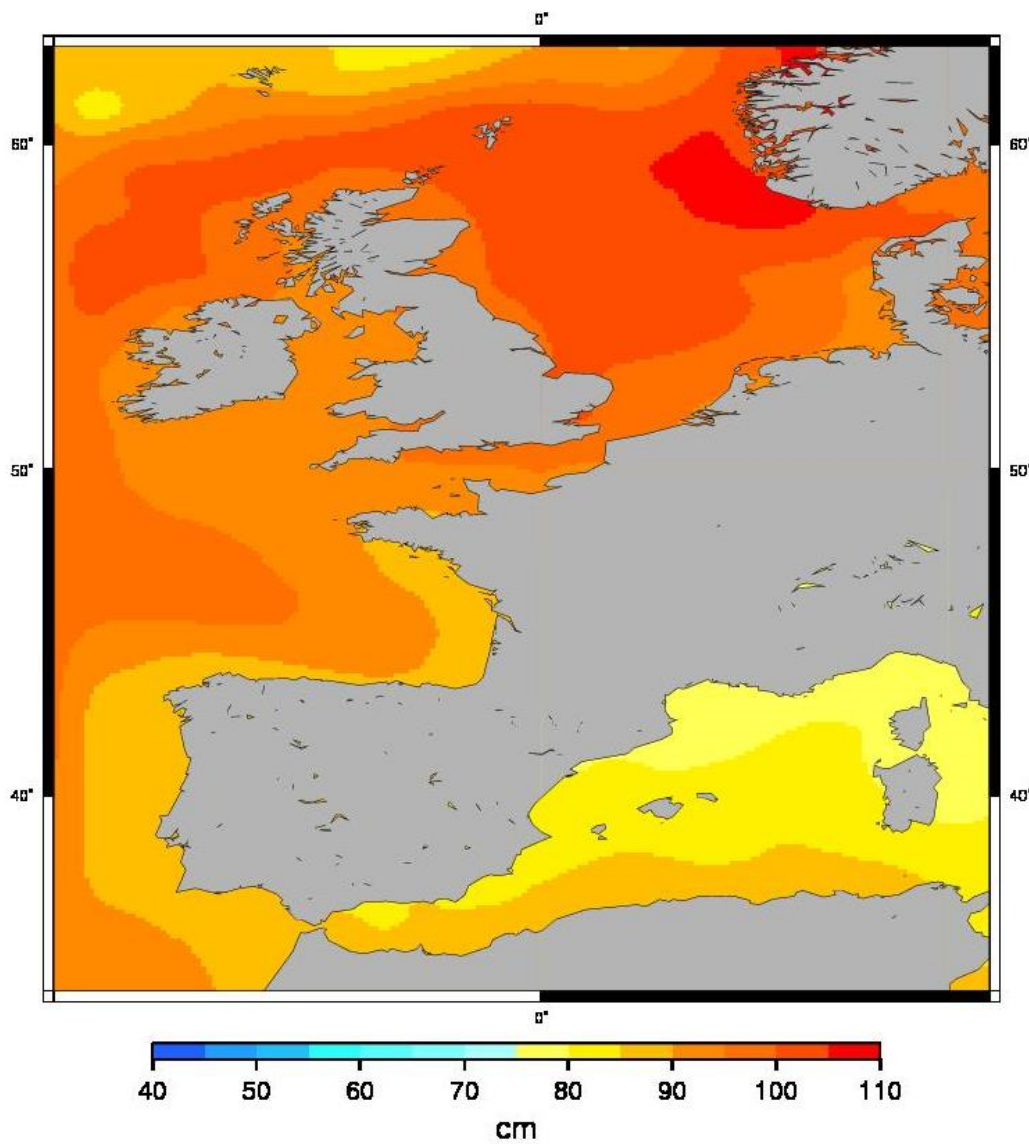


Variabilité régionale de la mer due aux effets d'expansion thermique et de salinité de l'océan (+ des effets de déformation des bassins océaniques sous la charge des redistributions de masse de glace et d'eau)



Hausse du niveau de la mer en Europe occidentale en 2100

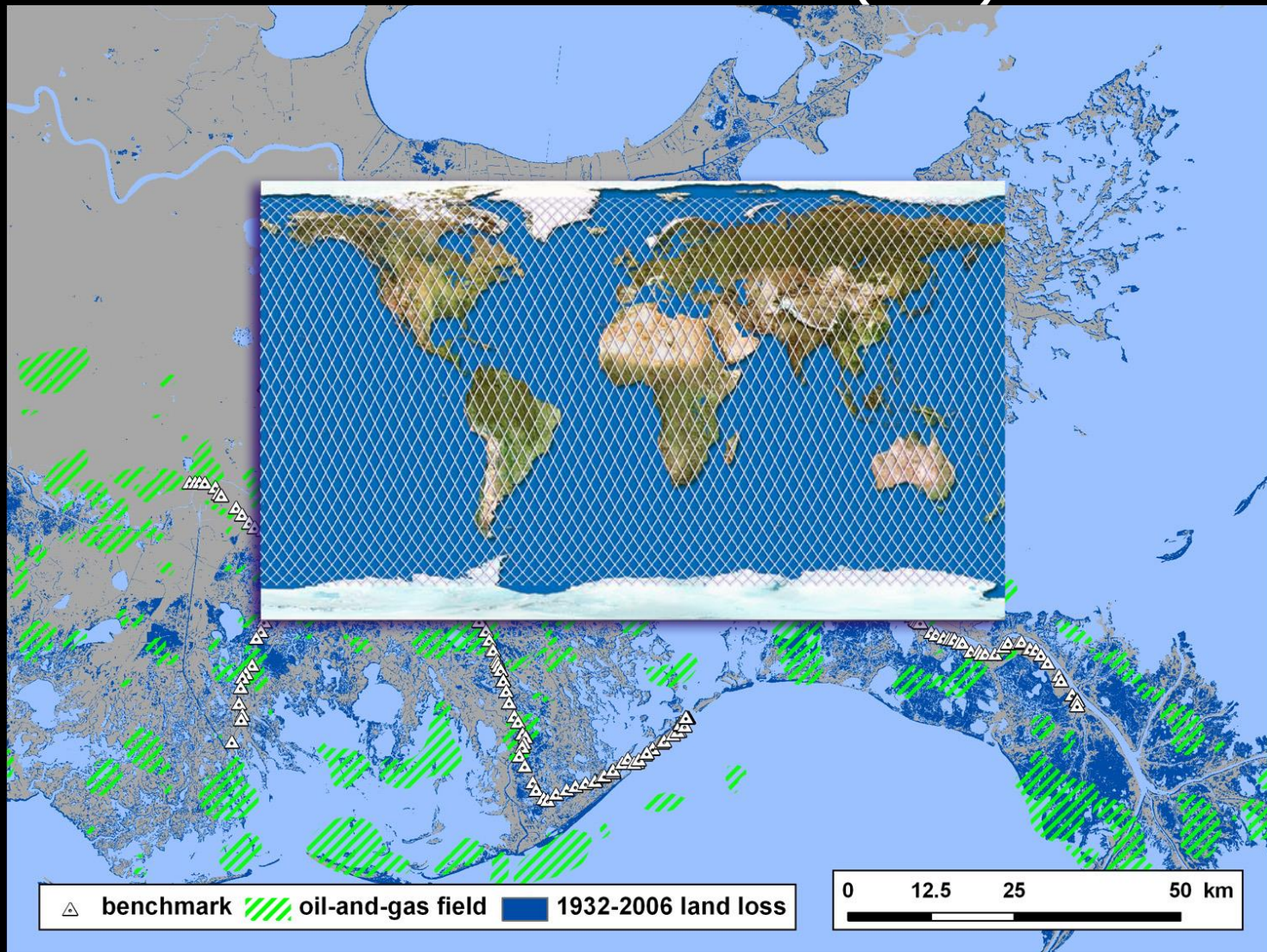
Projections d'après le modèle de climat de MétéoFrance



*Effet des variations
de température
et salinité*

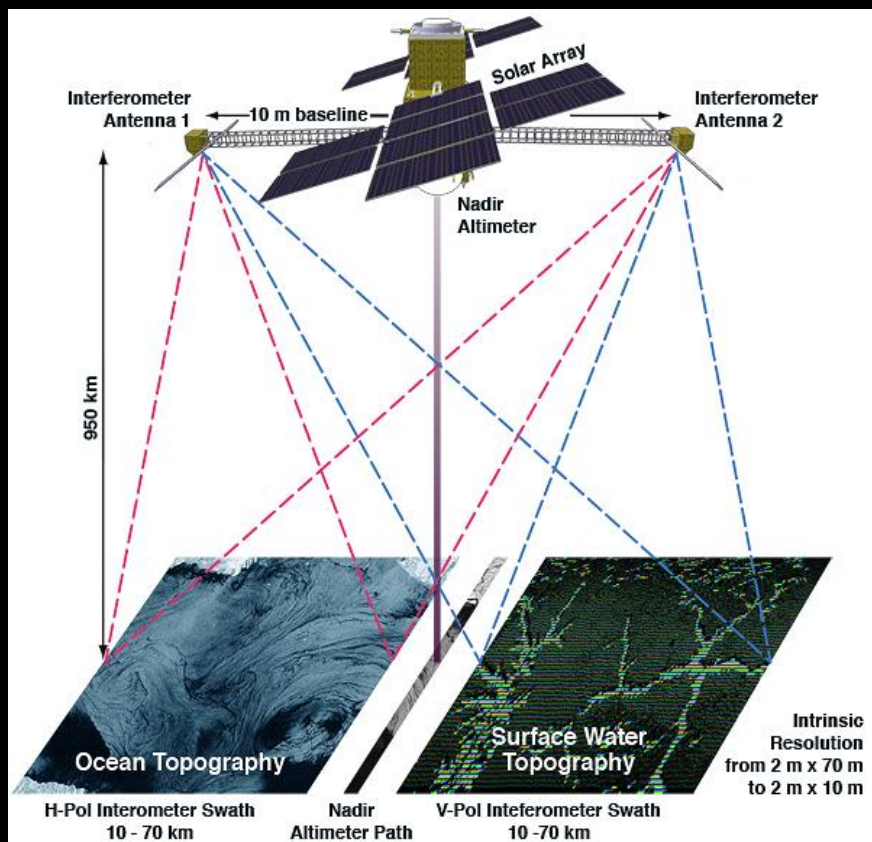
Mississippi Delta

Source: Bernier & Morton (2008)



2019- > SWOT (CNES/NASA)

Surface Water Ocean Topography



- Interferomètre à large fauchée en bande Ka.
- 2 fauchées de 60km
- Mesure: hauteur (h), pente (dh/dx) variation temporelle (dh/dt).
- Estimation de la variation du stock d'eau (lacs) et des débits (fleuves, rivières).
- Hydrodynamique littoral
- Vers de plus petits bassins versant

Au-delà du 21^{ème} siècle....

*De nombreux aspects du changement climatique persisteront
pendant plusieurs siècles
même si on arrêta aujourd'hui les émissions de GES!*

- **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**
- **La perte de glace du Groenland peut s'emballer
→ au dessus d'un certain seuil de réchauffement (entre 1°C et 4°C)
le phénomène peut devenir irréversible: la calotte groenlandaise pourrait totalement disparaître en quelques siècles
(→ 7 m de hausse du niveau de la mer)**

A large, jagged iceberg floats in the middle of a dark blue ocean. The iceberg has a prominent, sharp peak and a smaller, rounded section to its left. In the background, a range of snow-capped mountains stretches across the horizon under a cloudy sky. The water in the foreground shows a bright, turquoise wake, suggesting a boat has just passed.

Merci de votre attention