



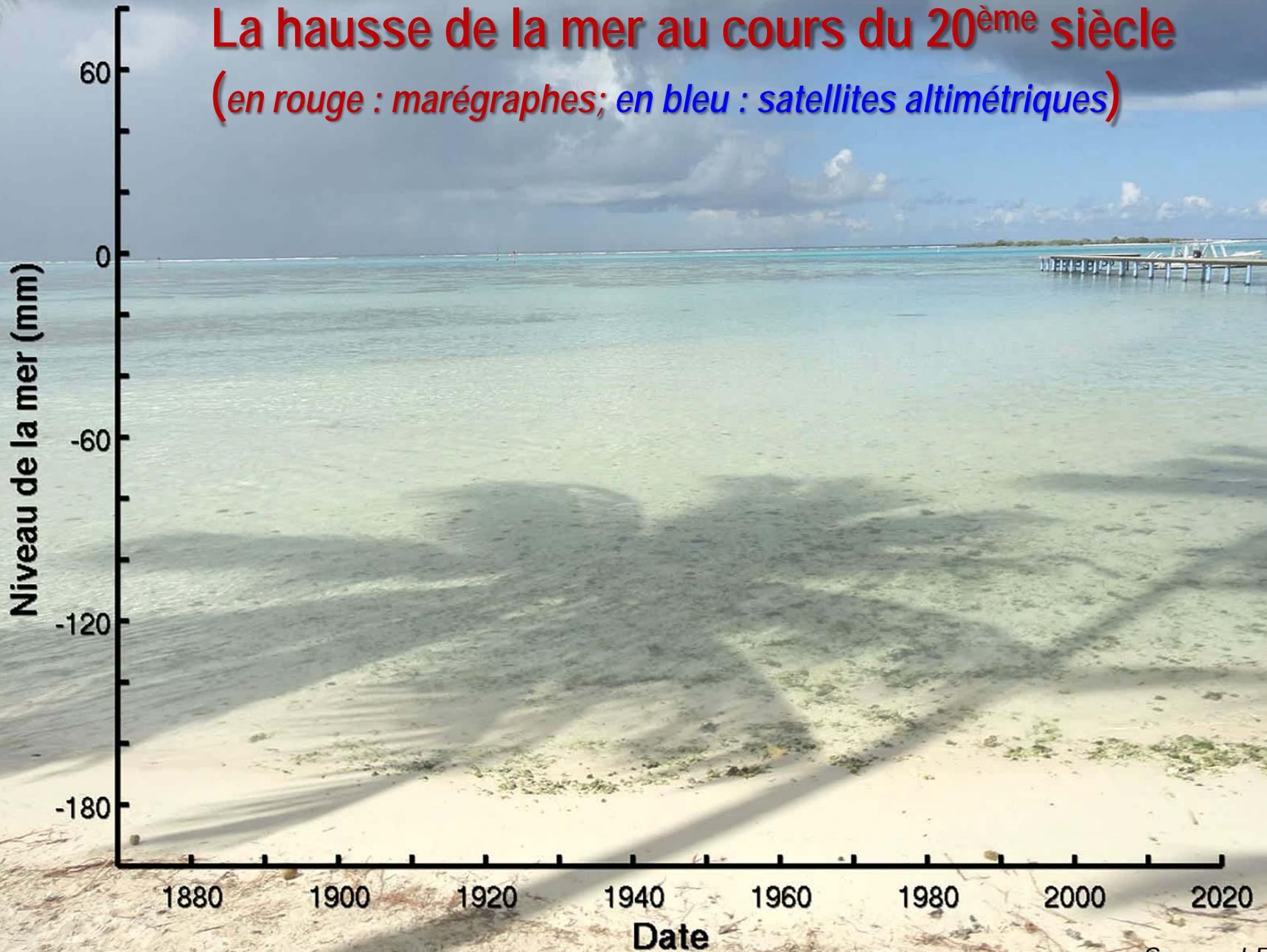
La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace

Leçon n°4

« Océan, glaces, niveau de la mer et climat »

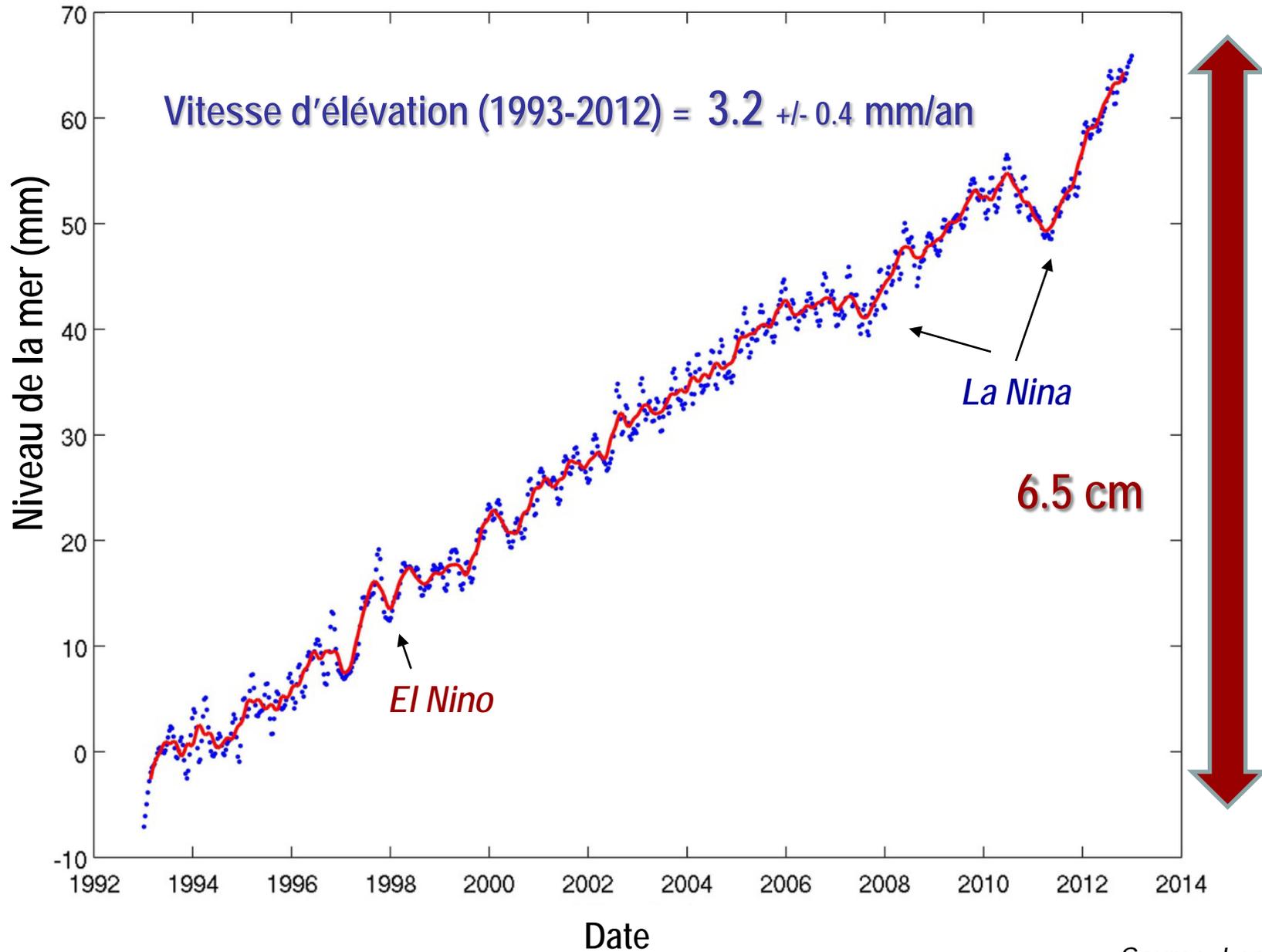
Anny Cazenave
Collège de France

La hausse de la mer au cours du 20^{ème} siècle (en rouge : marégraphes; en bleu : satellites altimétriques)

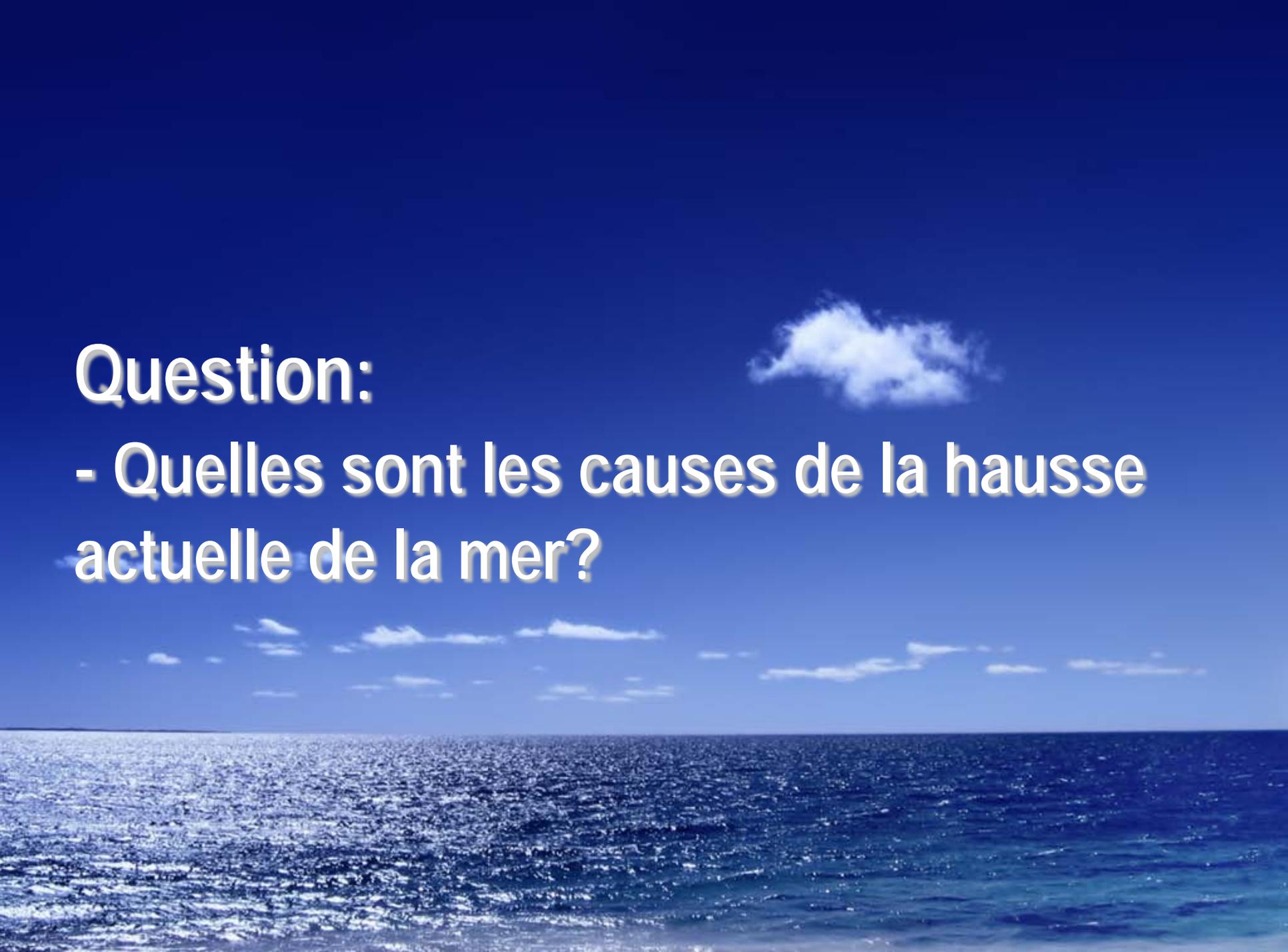


Updated: 19/04/2013

Niveau moyen global de la mer par altimétrie spatiale



Source: Legos-CLS

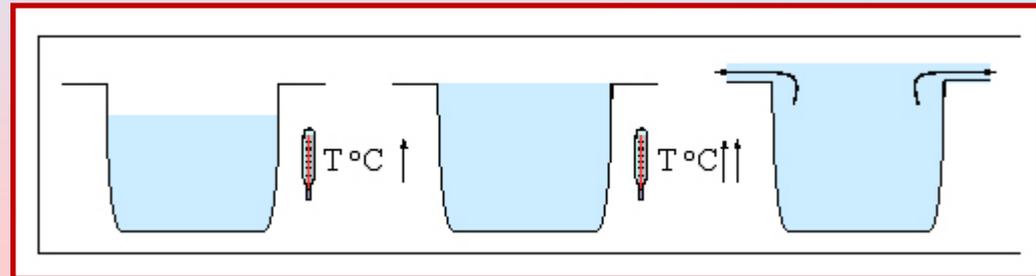


Question:

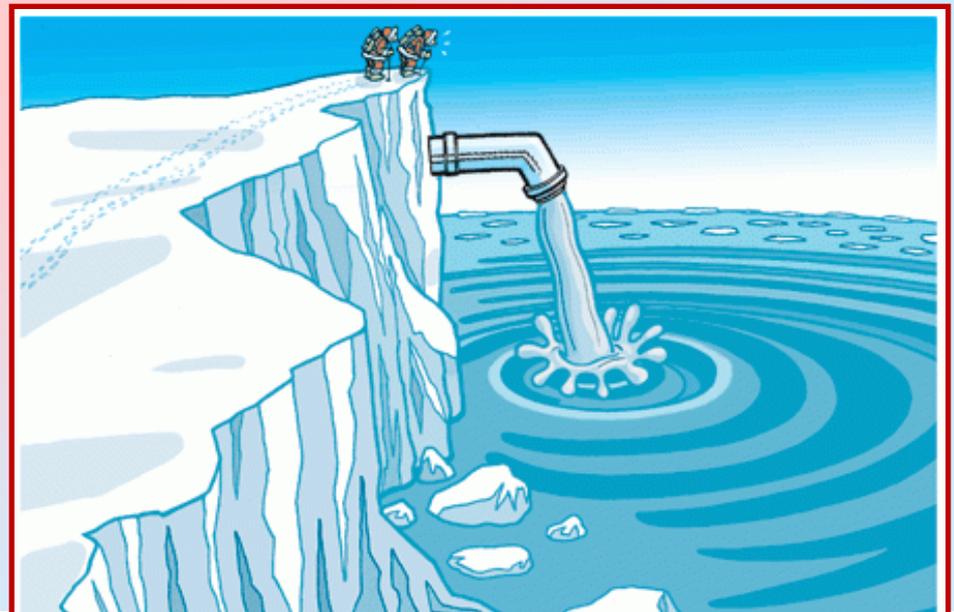
- Quelles sont les causes de la hausse actuelle de la mer?

2 causes principales...

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



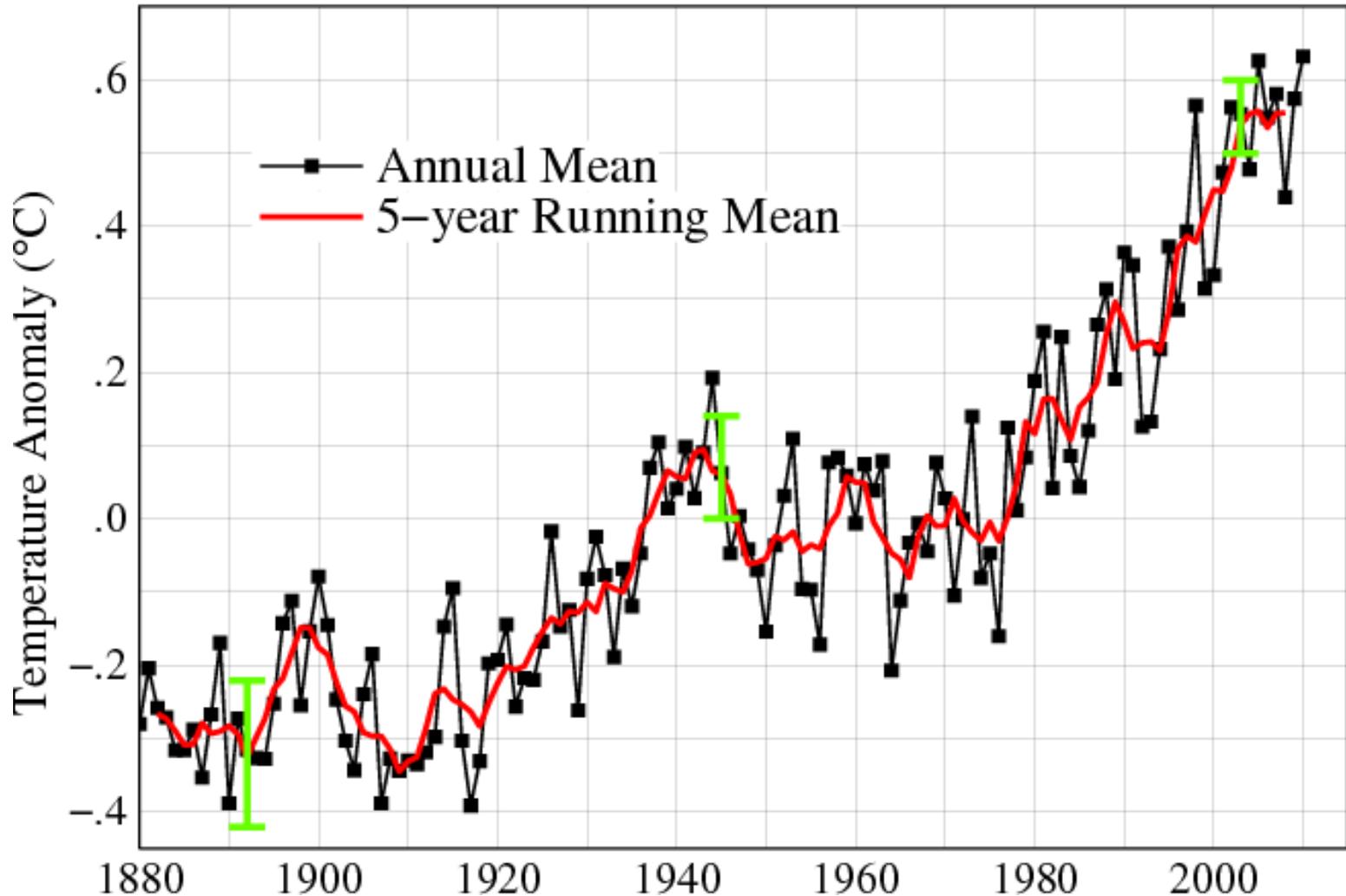
-Apports d'eau douce
(fonte des glaces
+ eaux continentales)



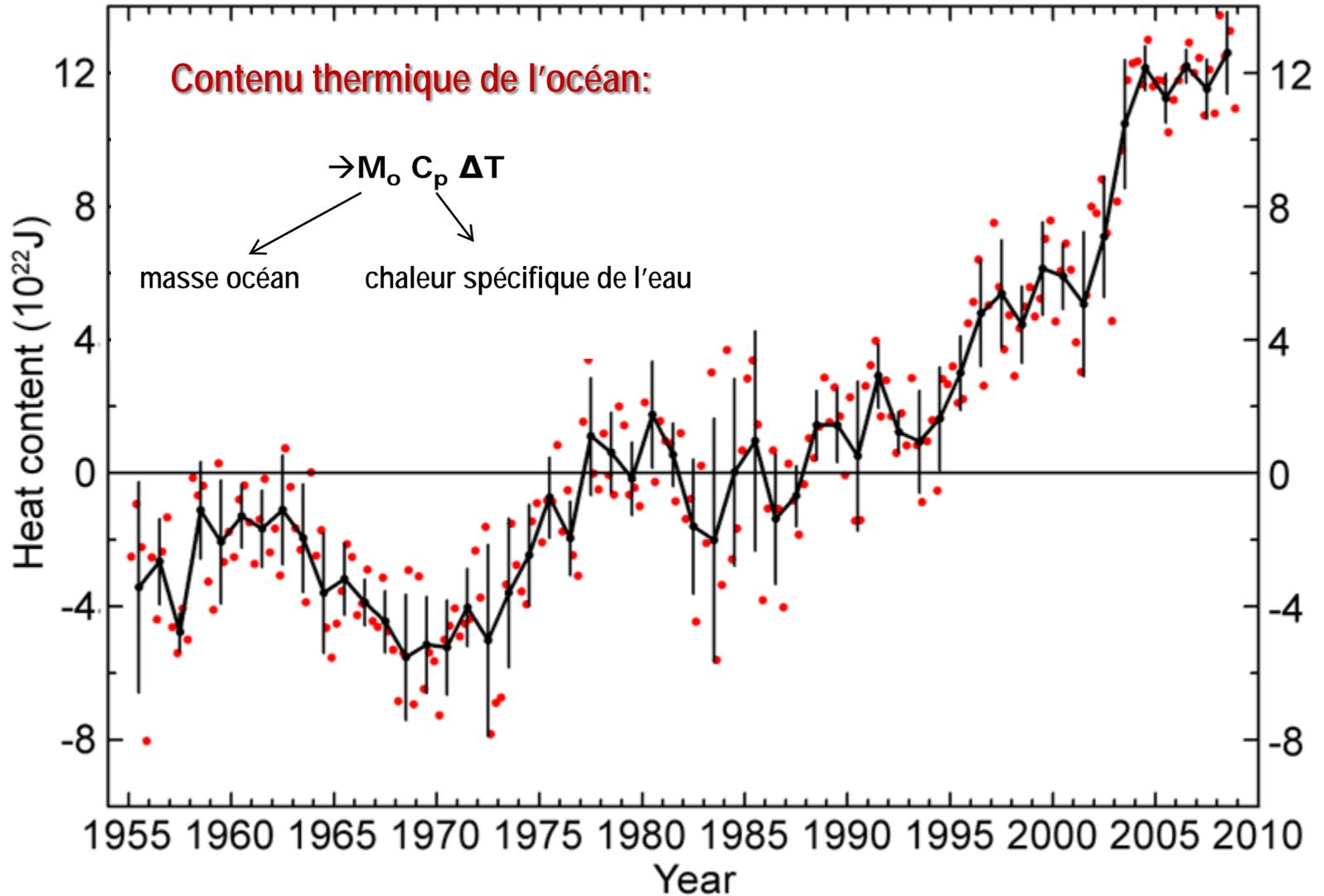
Depuis quelques décennies,
la Terre se réchauffe



Variation de la température moyenne globale de la Terre (1880-2008)
d'après les observations météorologiques (océans + surfaces continentales)



Réchauffement de l'océan = augmentation du contenu thermique



Les glaces fondent....



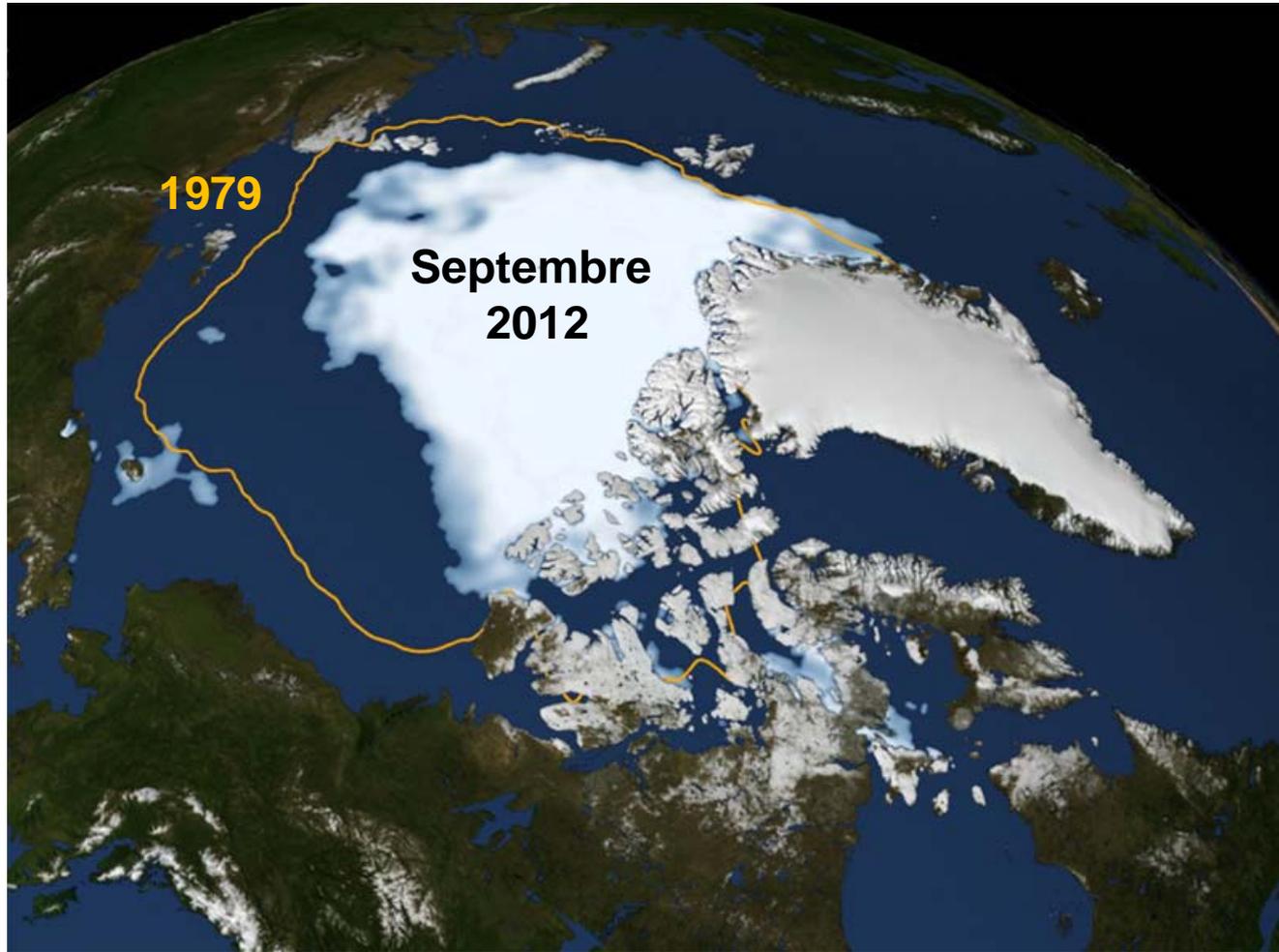
La mer monte!





**Effet de la fonte des glaces
sur le niveau de la mer**

Fonte de la banquise arctique



Fonte des glaciers de montagne



Glacier Rhone (Alpes suisses)

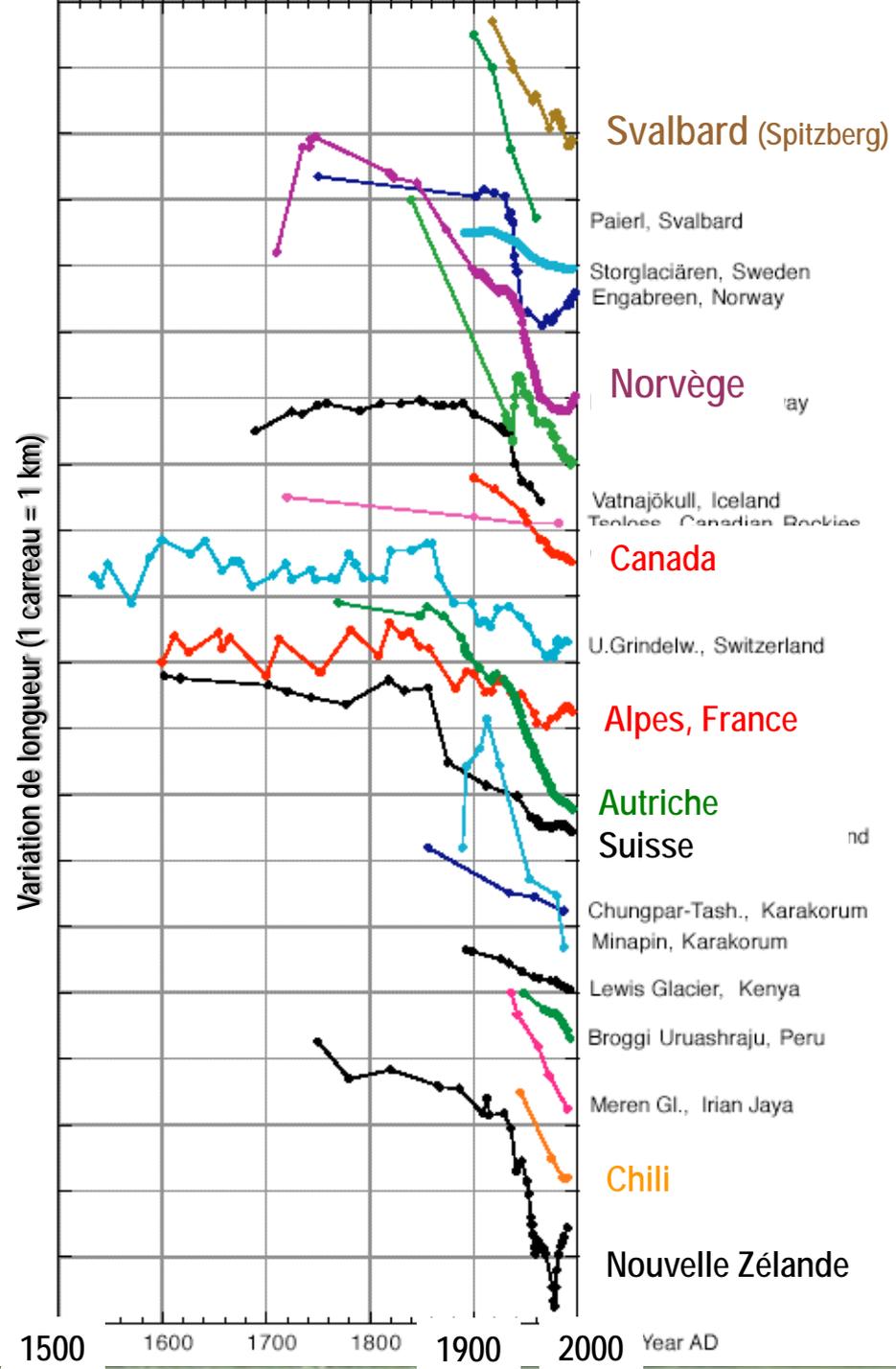
1900

2008

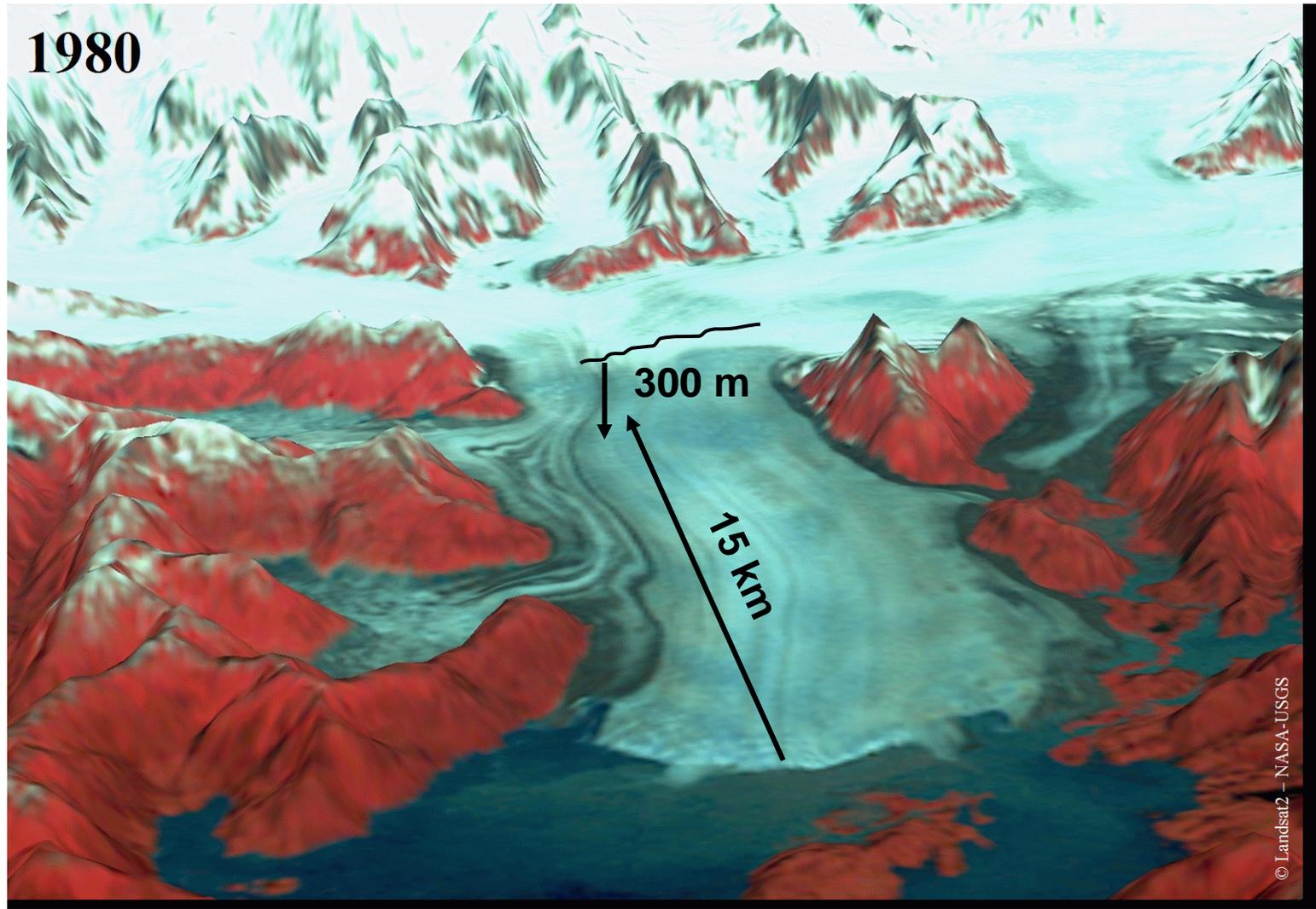
Recul des glaciers de montagne



Leclerc et al., 2011



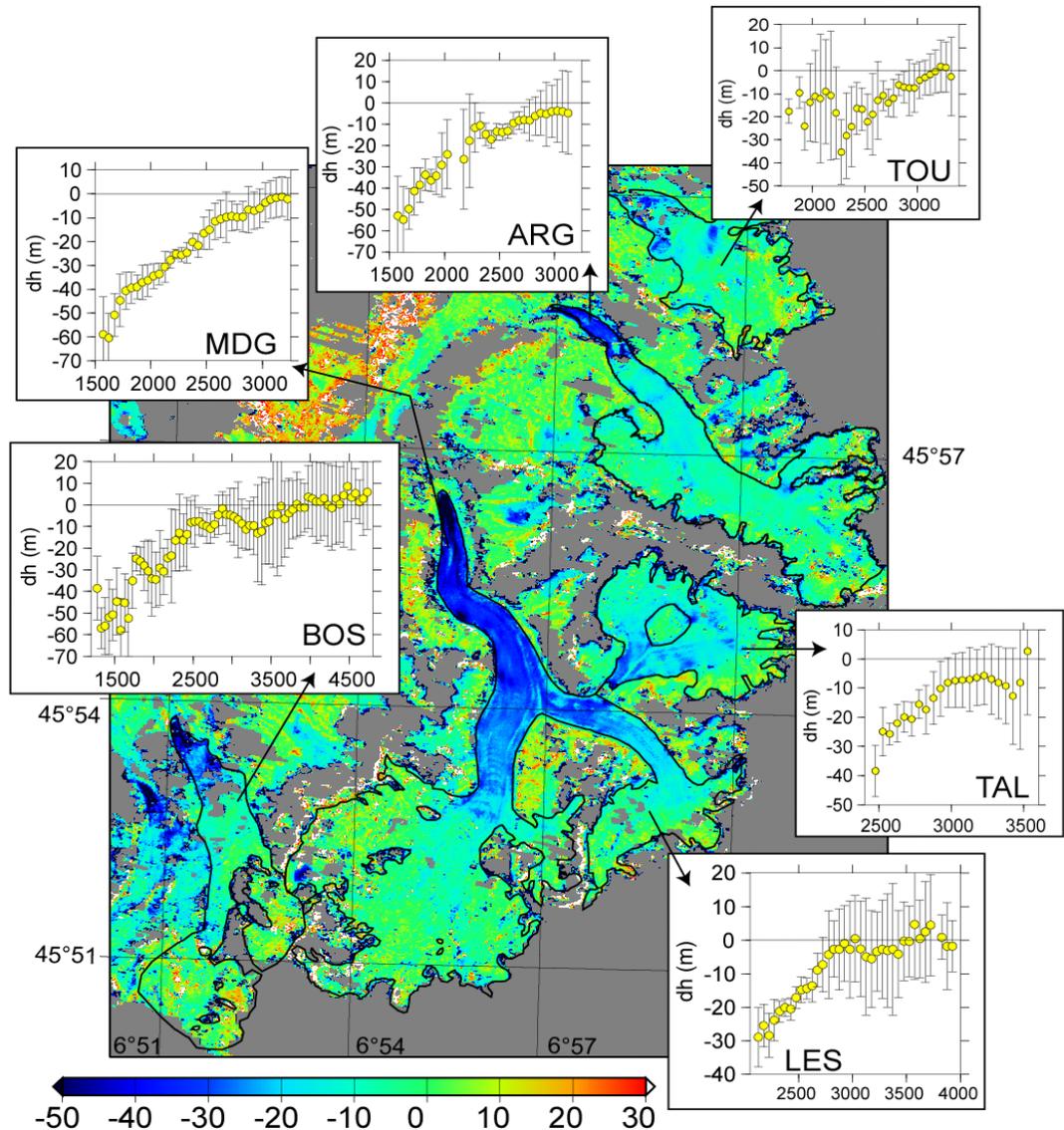
Recul et amincissement des glaciers mesurés par imagerie « satellite »



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

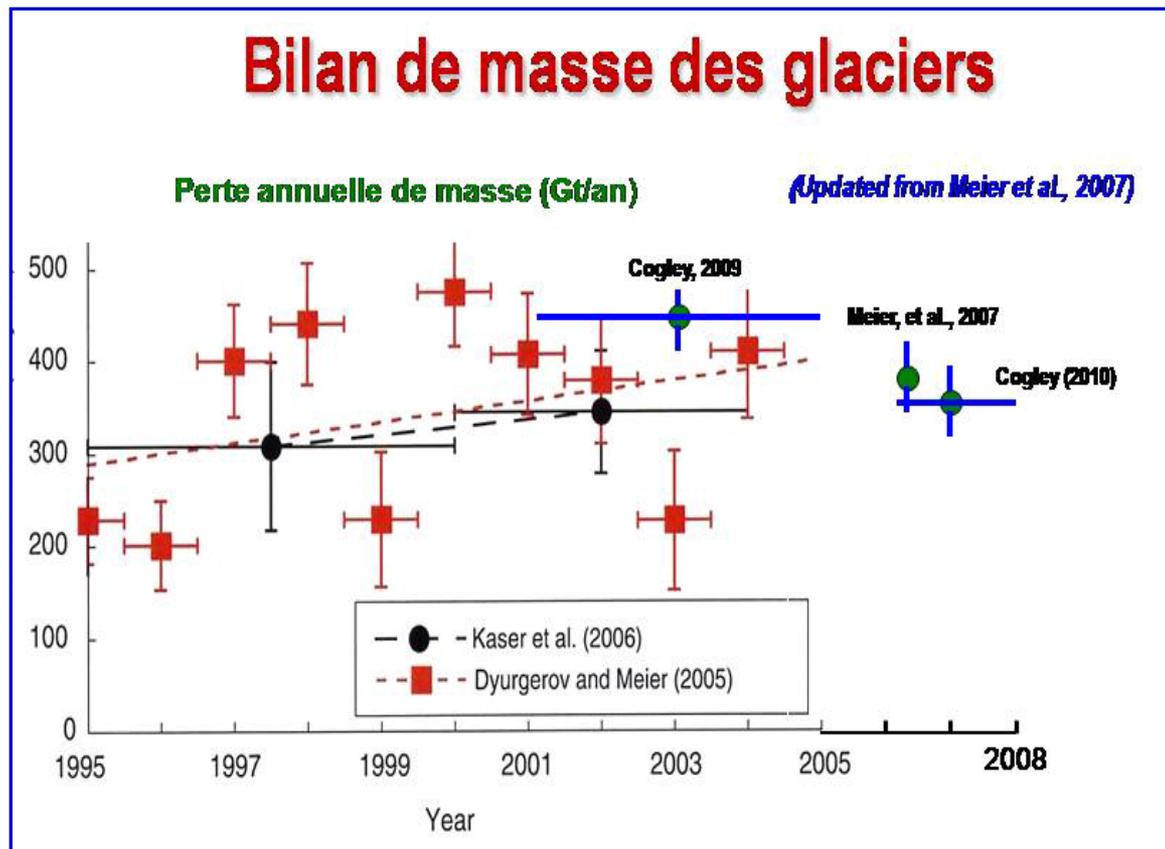
Fonte des glaciers alpins entre 1979 et 2003

Image SPOT 5
du massif
du Mont Blanc



1 Gt= 1 milliard de tonnes

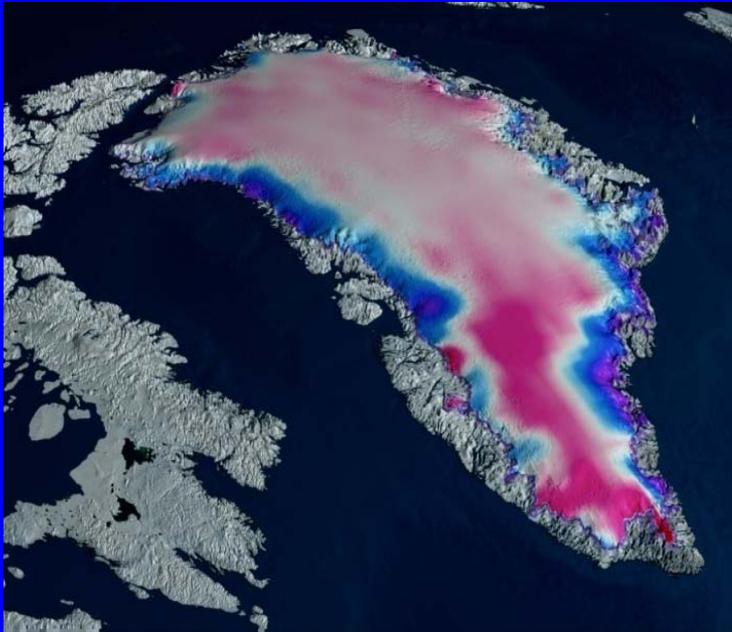
Contribution de la fonte des glaciers de montagne à la hausse du niveau de la mer **360 Gt/an = 1mm/an**



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

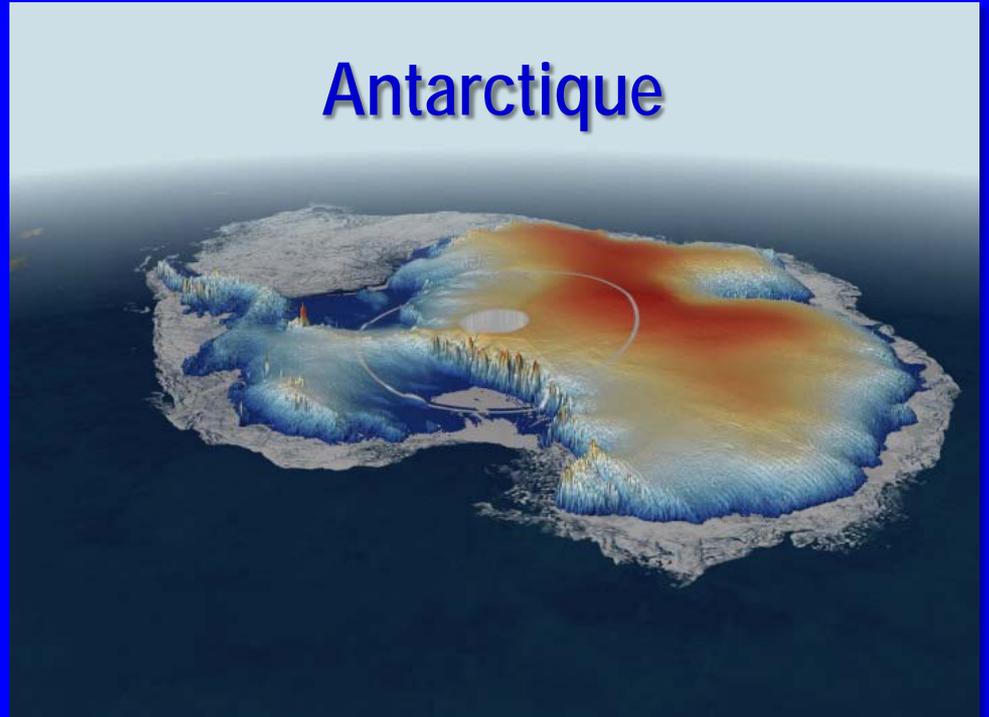
Les calottes polaires

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

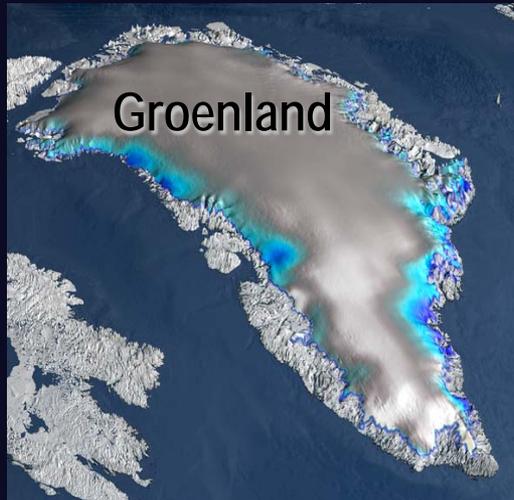


Groenland

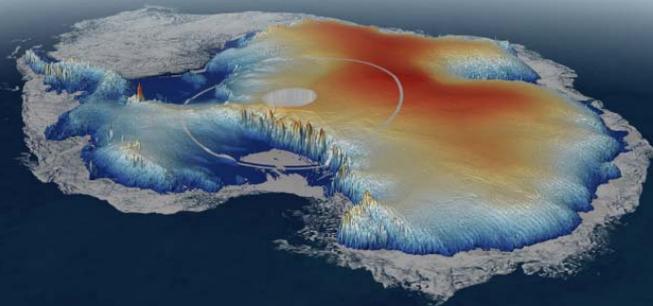
Antarctique



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

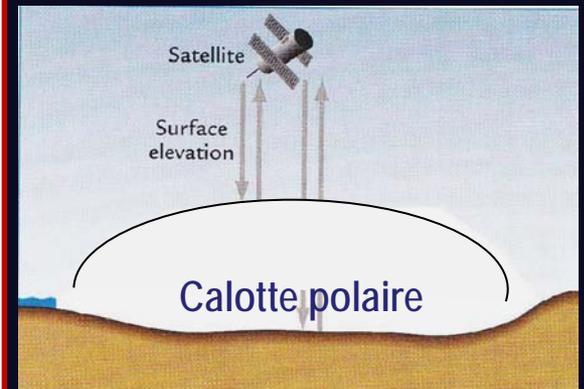
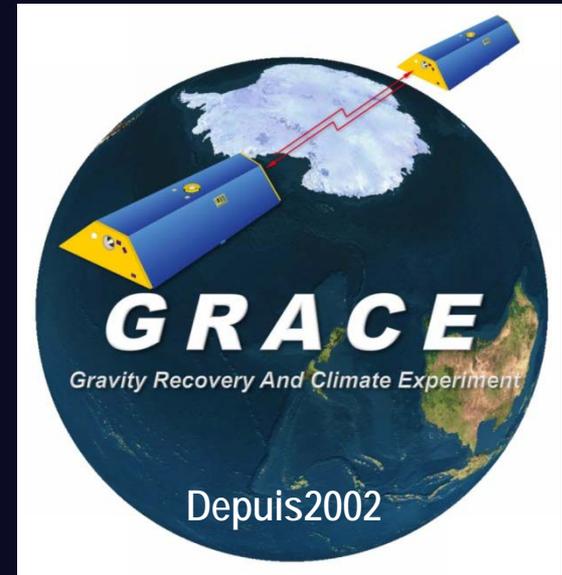
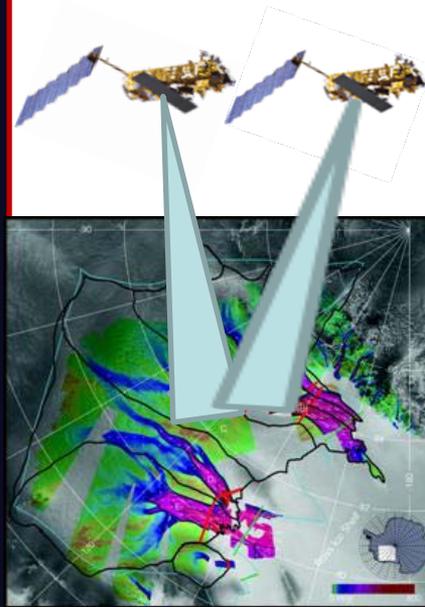


Antarctique



Gravimétrie spatiale « GRACE »

Interférométrie radar

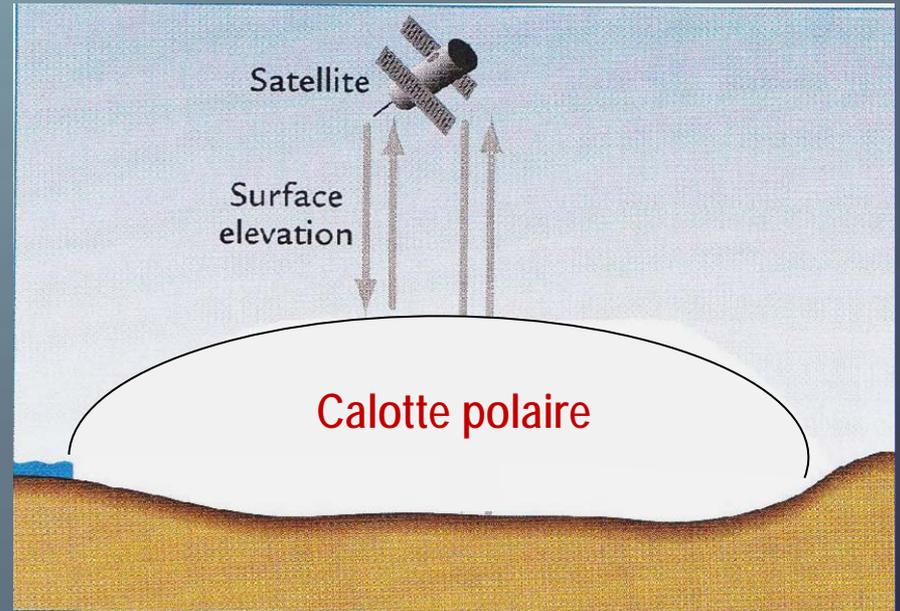
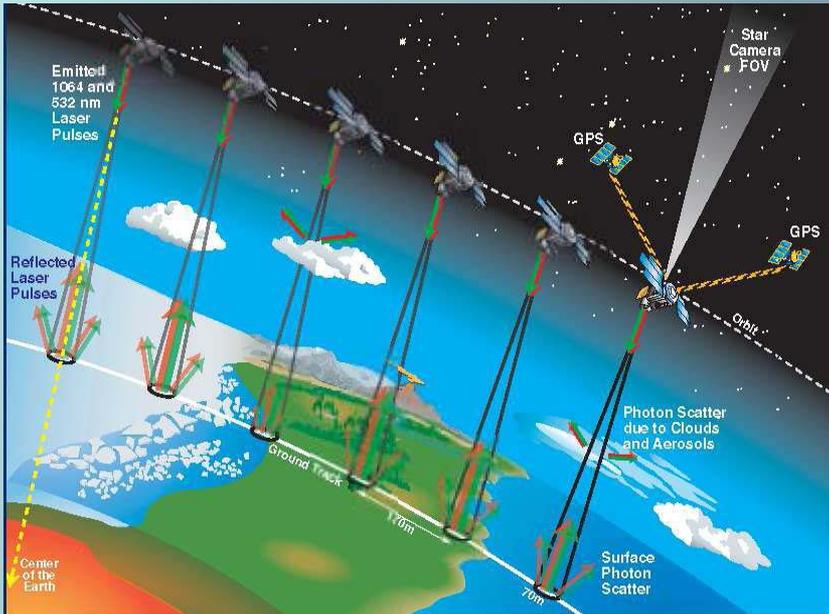


Altimétrie radar et laser

IceSat

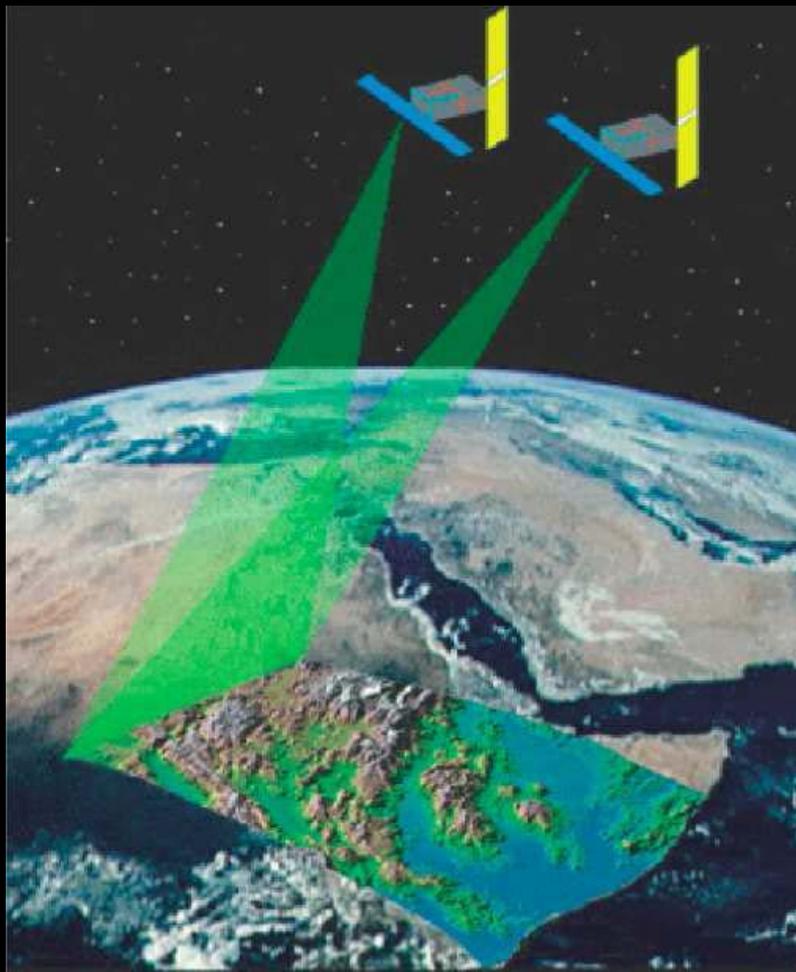


Altimétrie Radar et Laser



Variation de l'altitude de la calotte

Interférométrie Radar



Groenland



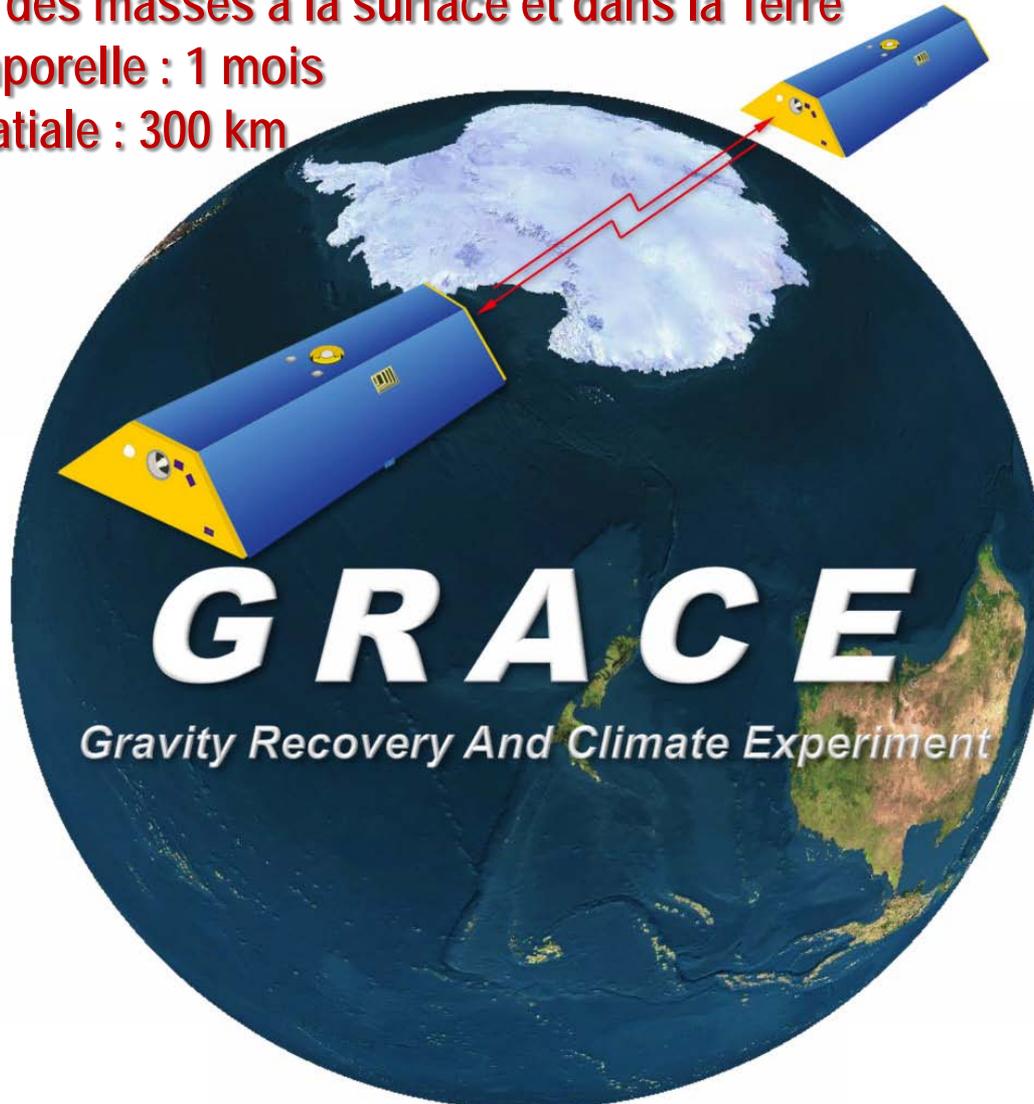
Mission GRACE

Lancée en 2002

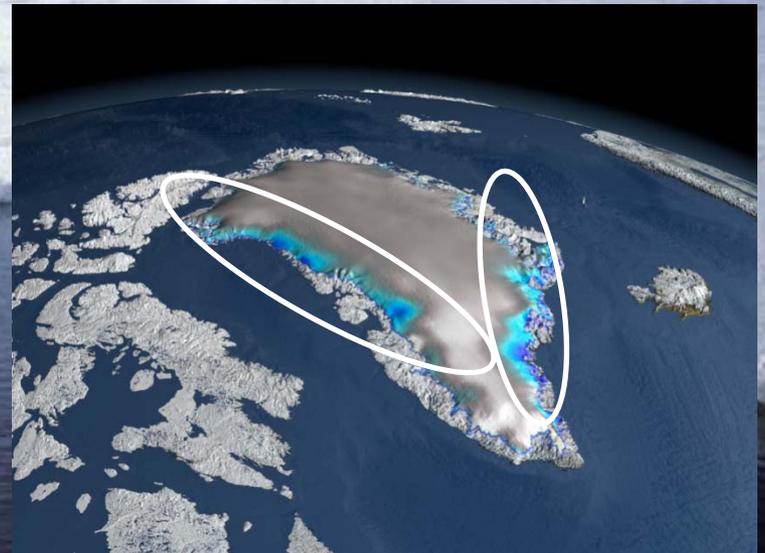
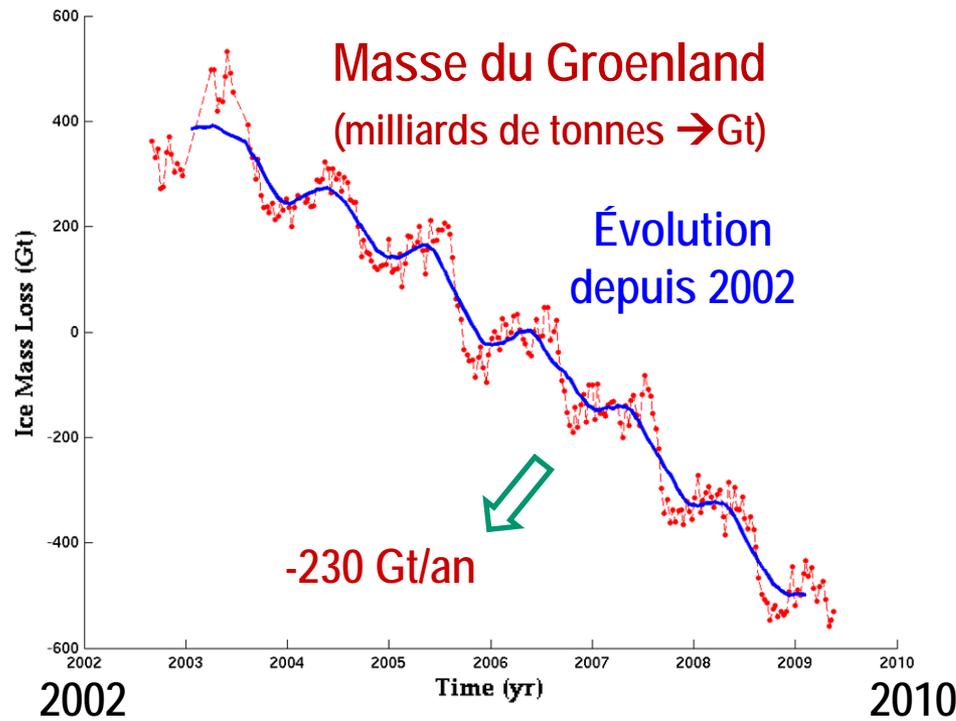
Mesur les variations spatio-temporelles du champ de gravité de la Terre

→ redistribution des masses à la surface et dans la Terre

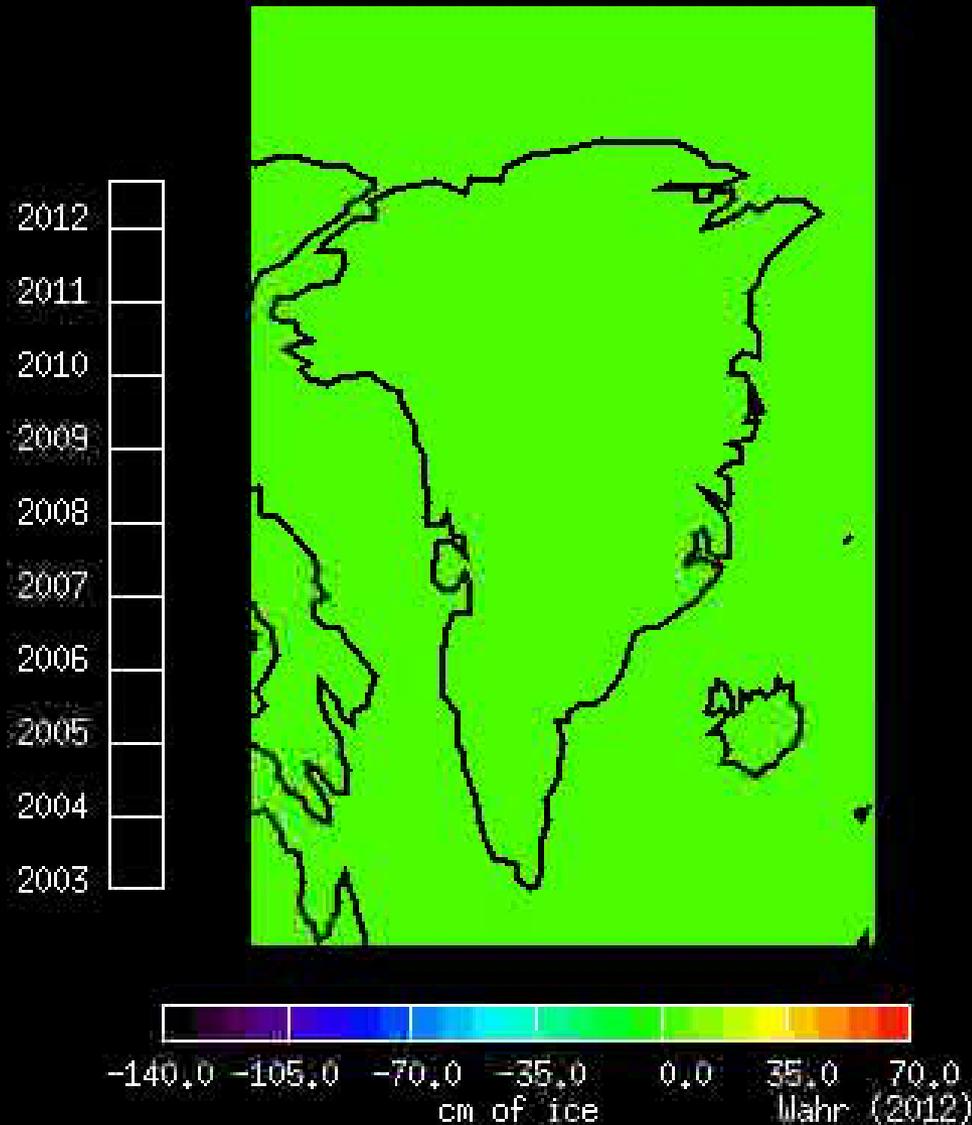
- Résolution temporelle : 1 mois
- Résolution spatiale : 300 km



Evolution de la masse du Groenland observée par les satellites GRACE



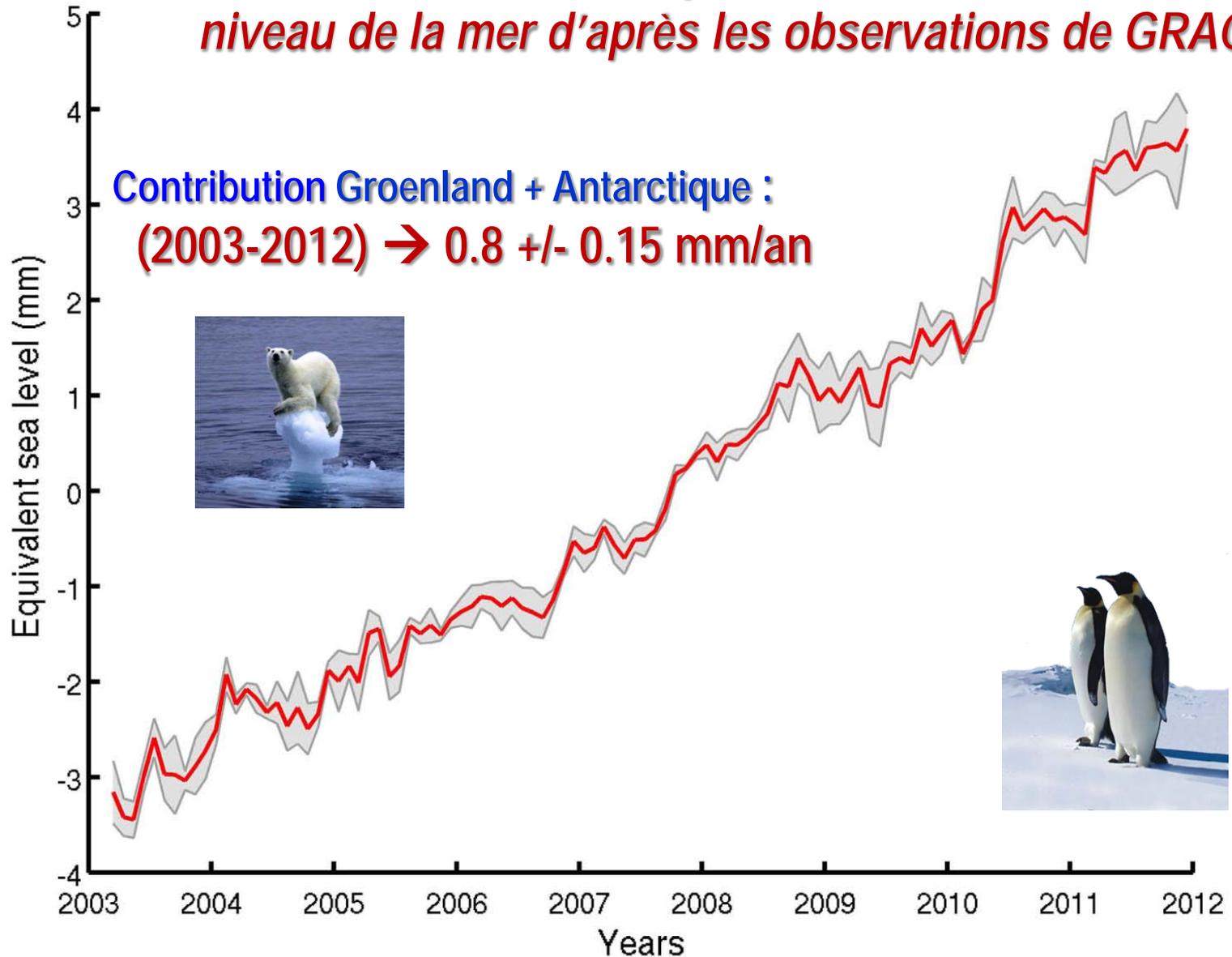
Perte de masse de glace (couleurs bleu-violet-noir) au Groenland entre 2003 et 2012 observée par les satellites GRACE



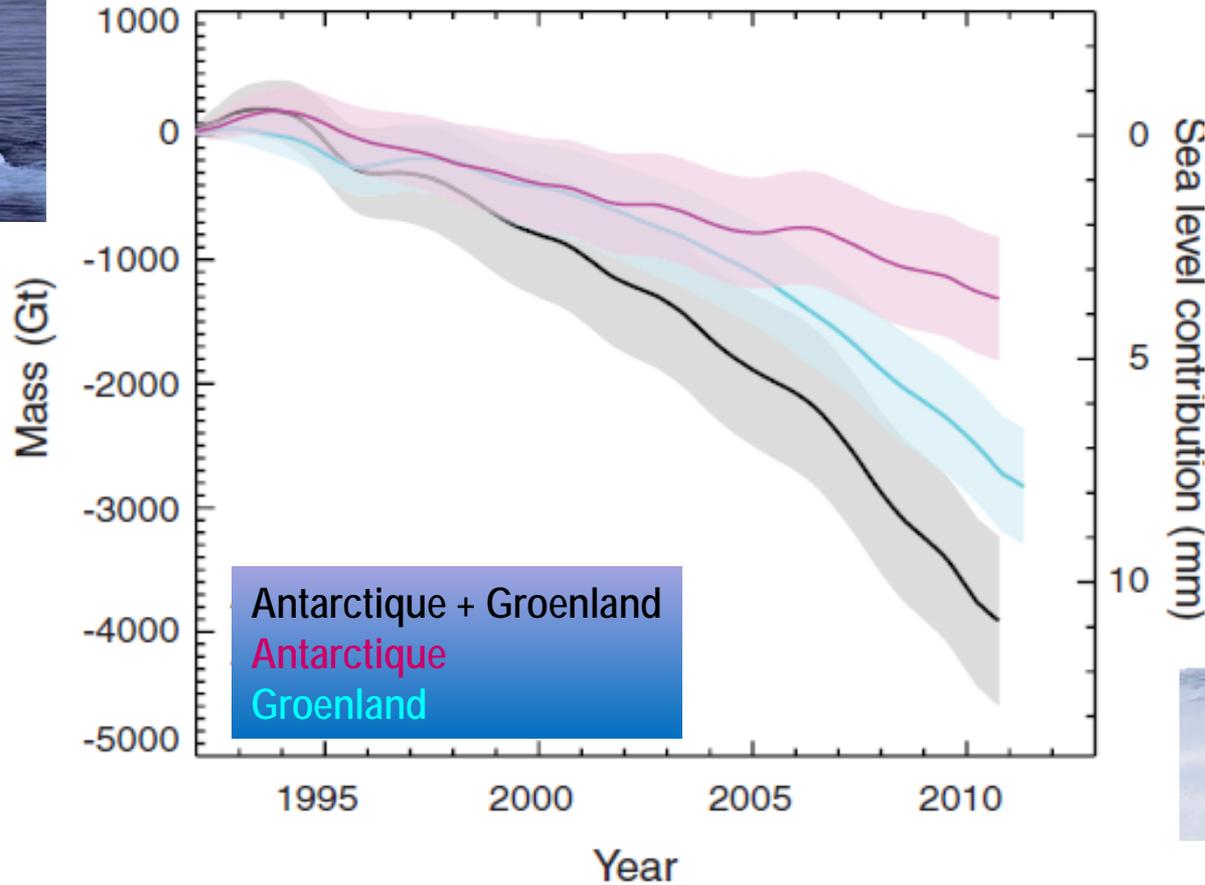
Source: J. Wahr

Contribution des calottes polaires à la hausse récente du niveau de la mer d'après les observations de GRACE

Contribution Groenland + Antarctique :
(2003-2012) → 0.8 +/- 0.15 mm/an



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 :

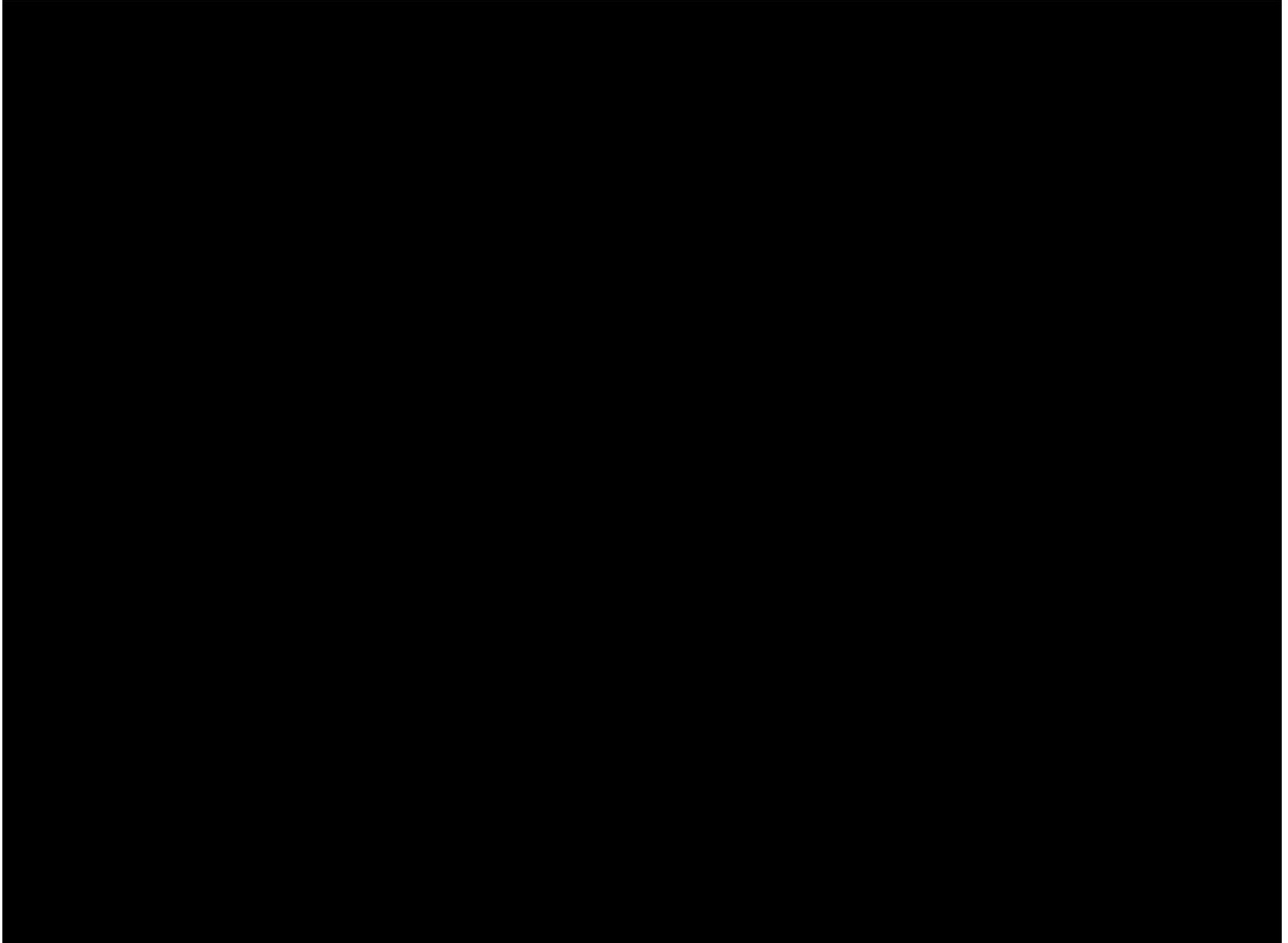
(1993-2010) → 0.7 +/- 0.2 mm/an

(2003-2012) → 0.8 +/- 0.15 mm/an

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



Le glacier Jakobshavn Isbrae (côte ouest du Groenland)



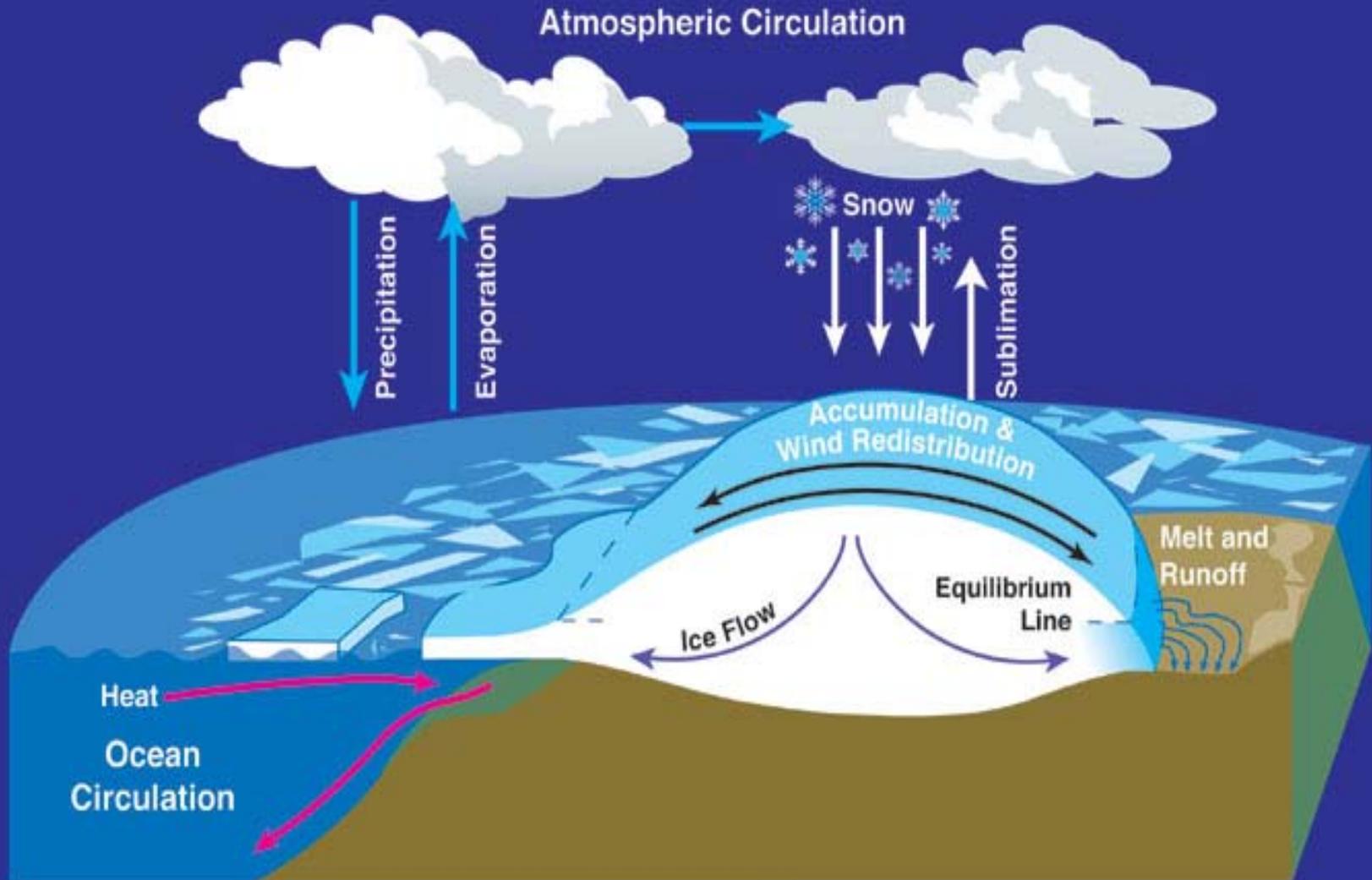
ARND BRONKHORST

04/17/2003



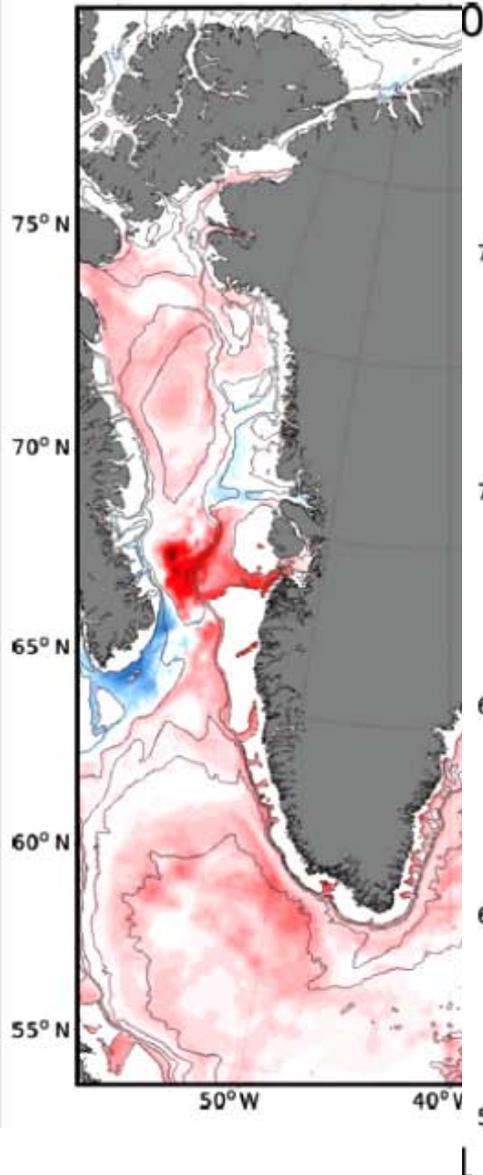
Variation de masse des calottes polaires

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

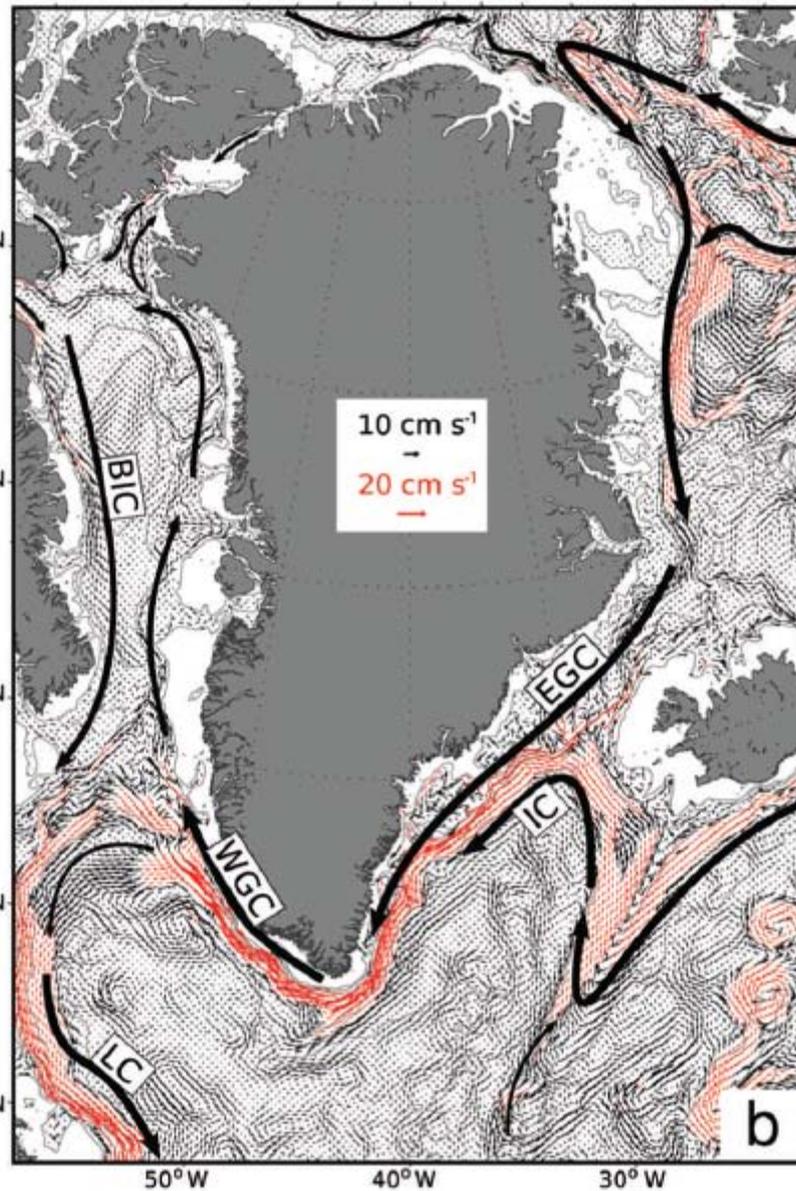
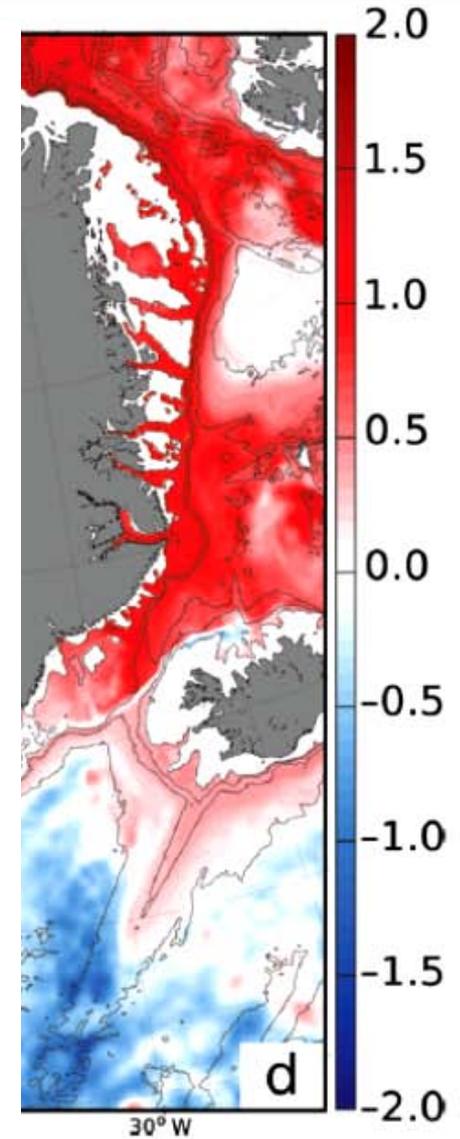


Anomalies de température de sub-surface (°C)
(par rapport à la moyenne 1992-2009)

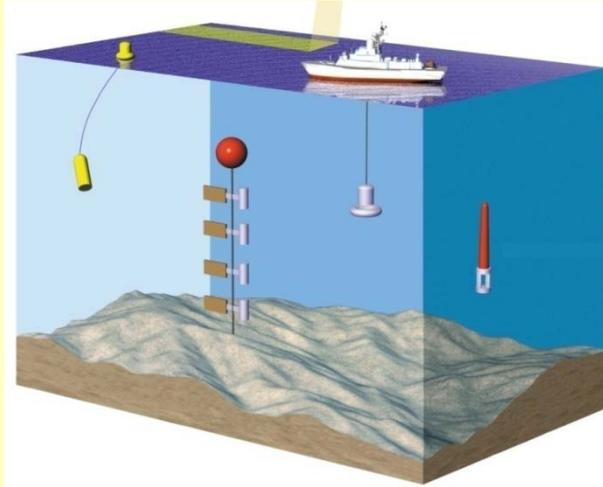
2001



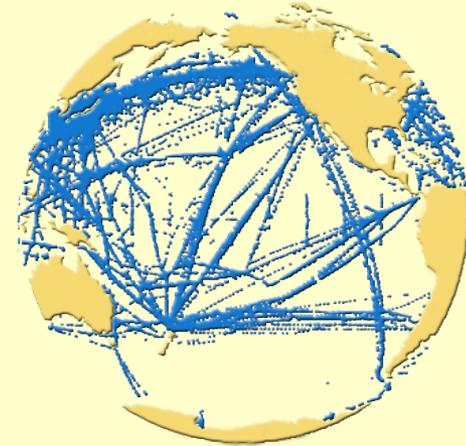
2009



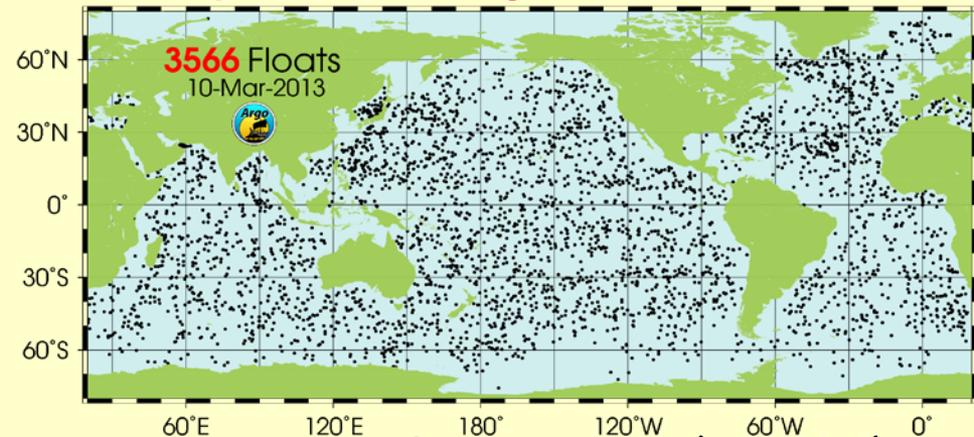
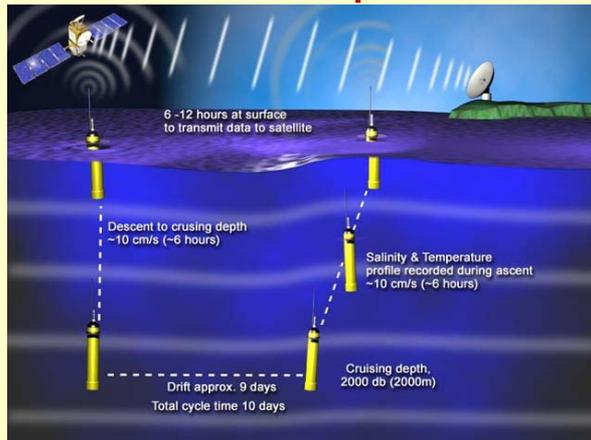
Mesures de température de l'océan jusqu'à 1000-2000m de profondeur (bateaux depuis 1950; Argo depuis 2003)



Principales routes maritimes

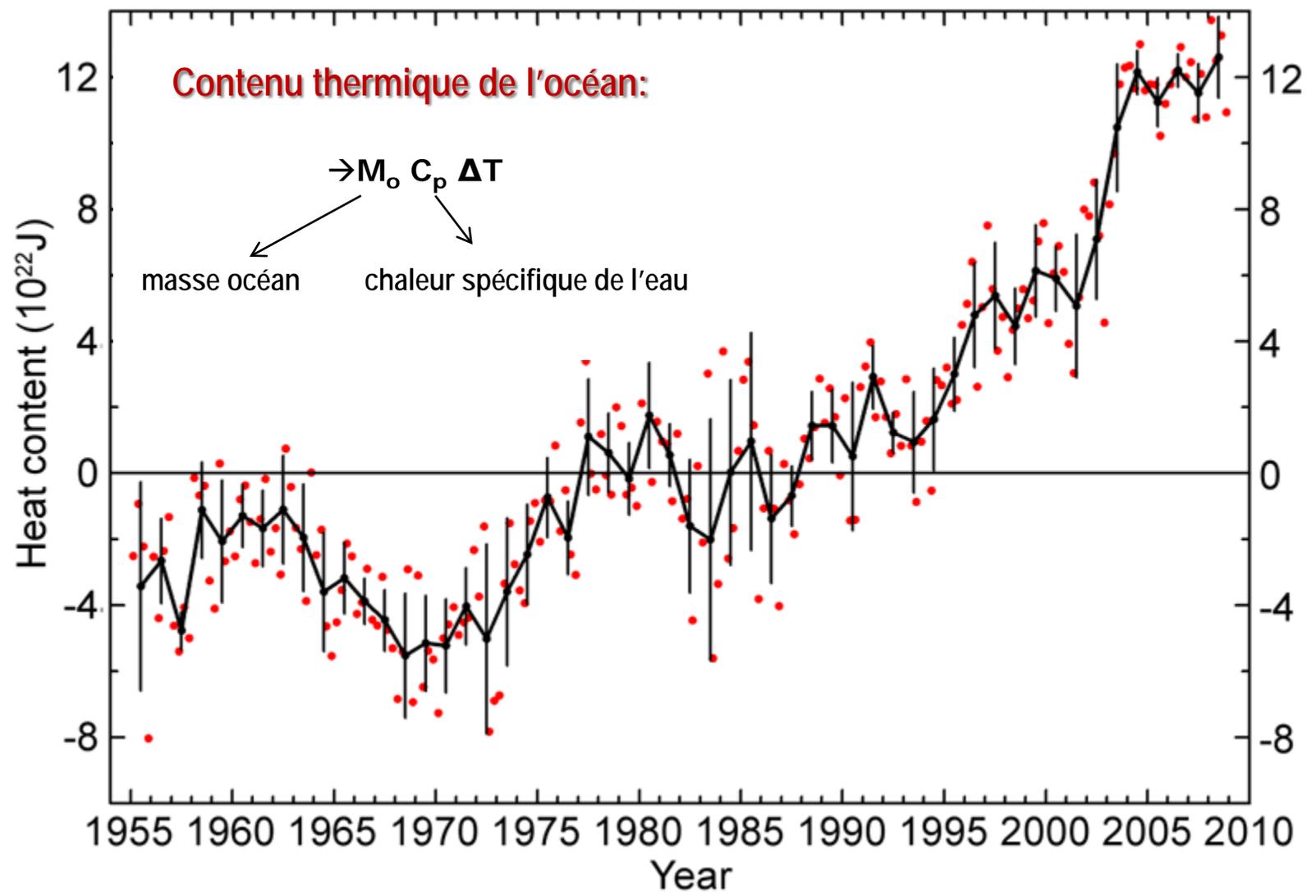


Depuis 2003 → Flotteurs profilants 'Argo'

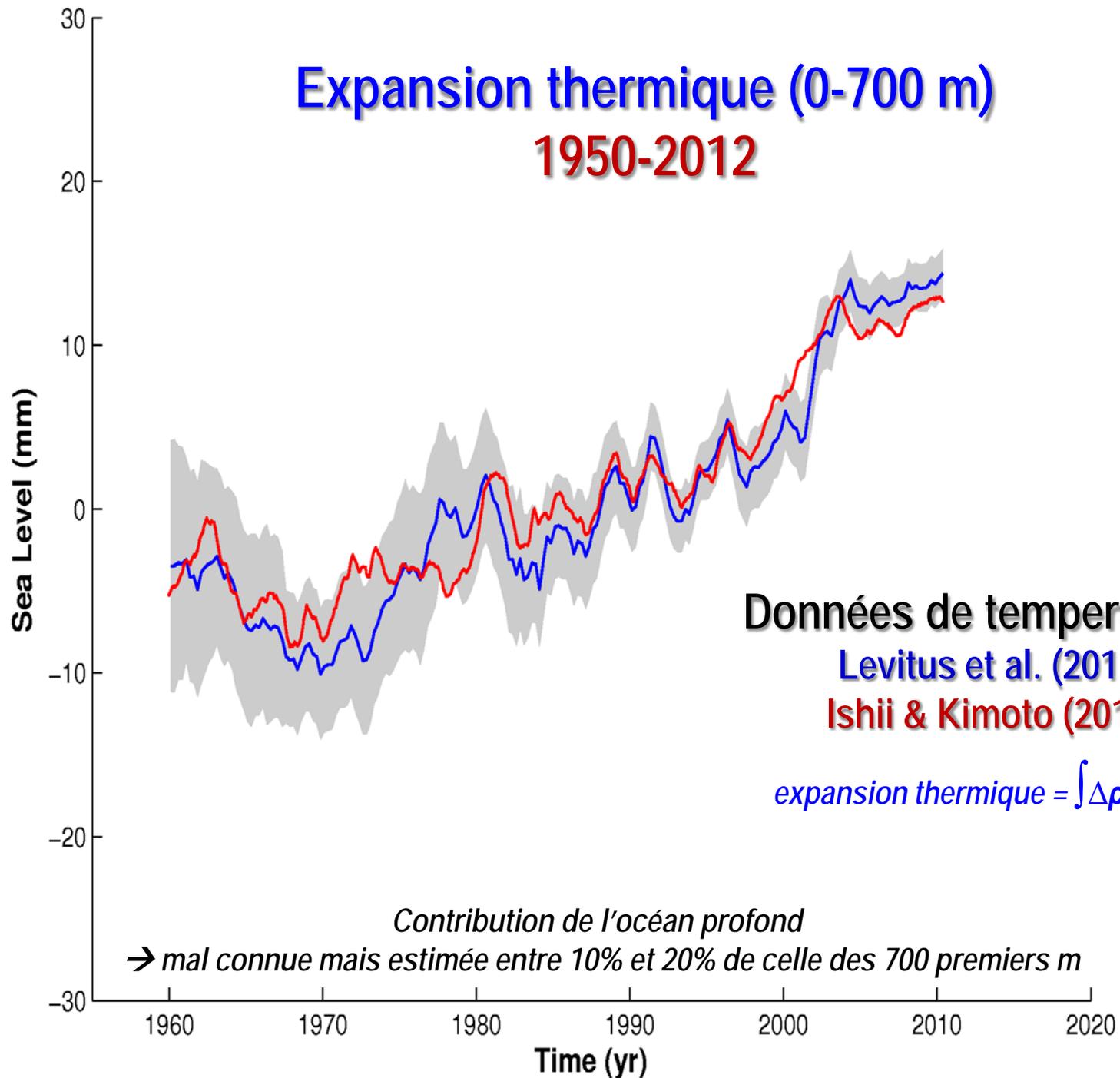


Couverture Argo (mars 2013)

Réchauffement de l'océan = Augmentation du contenu thermique



Expansion thermique (0-700 m) 1950-2012

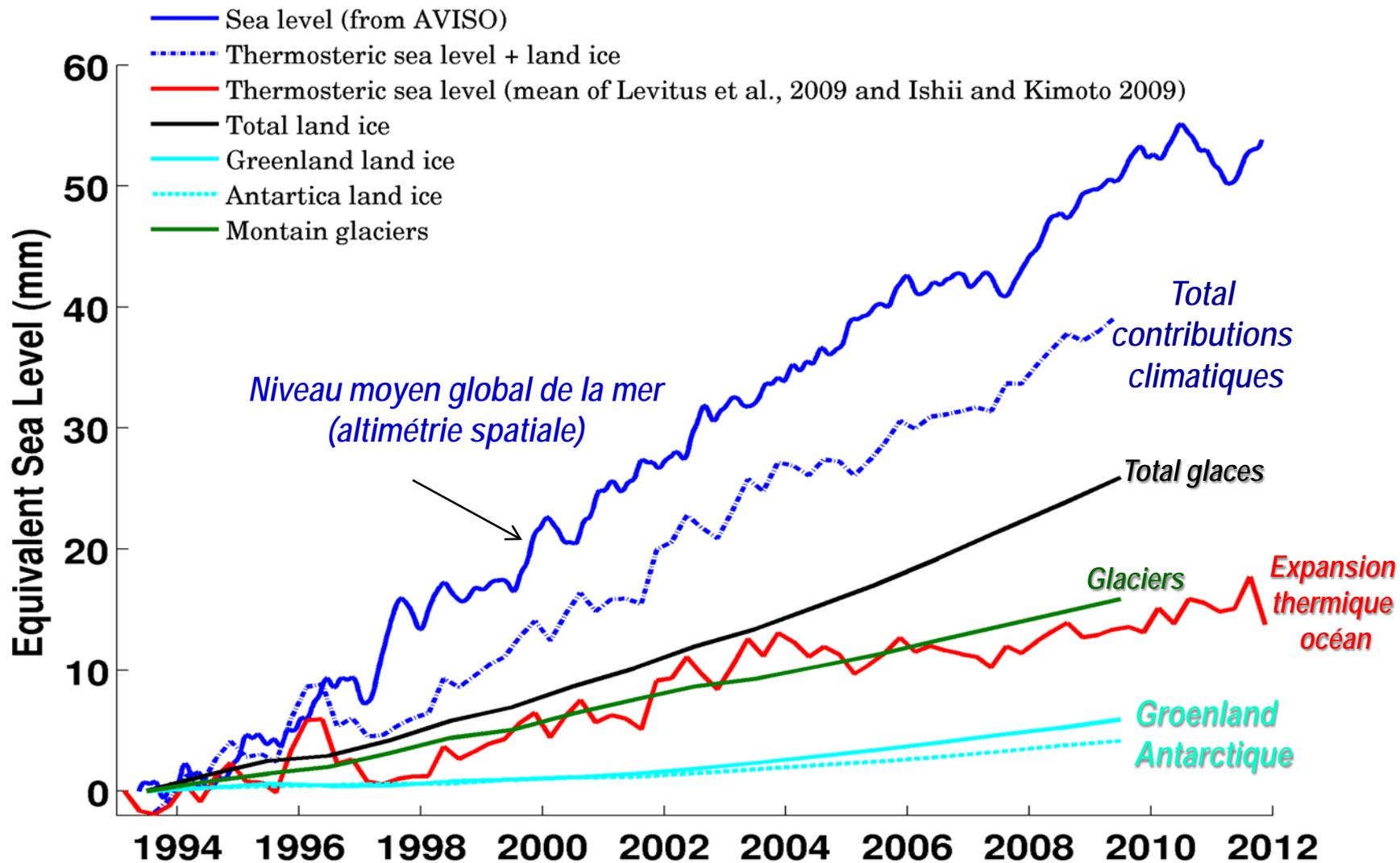


Données de temperature :
Levitus et al. (2012)
Ishii & Kimoto (2012)

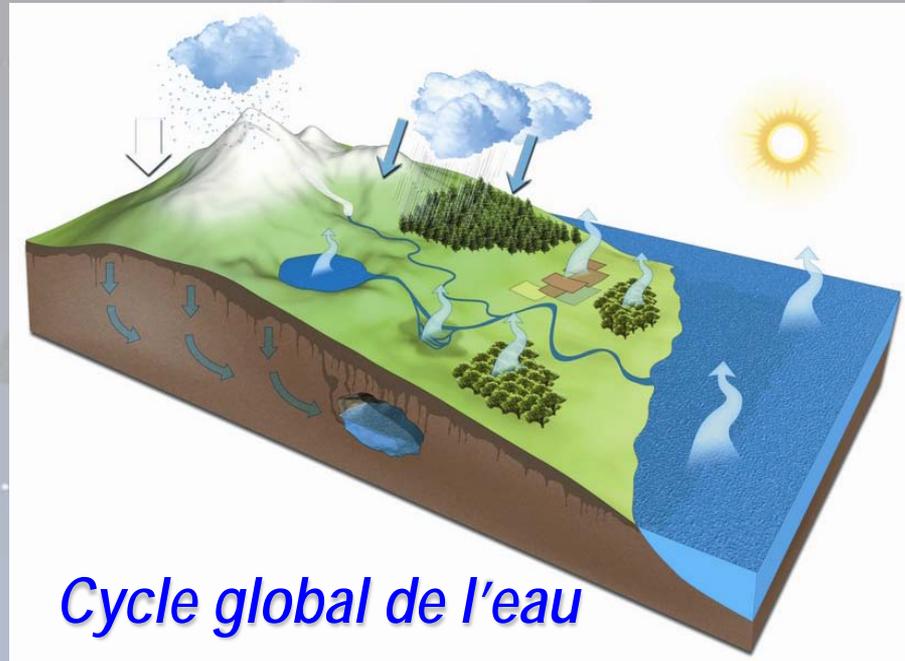
$$\text{expansion thermique} = \int \Delta \rho (T, S, z) / \rho_{ref}$$

Contribution de l'océan profond

→ mal connue mais estimée entre 10% et 20% de celle des 700 premiers m

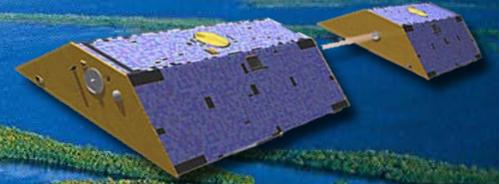
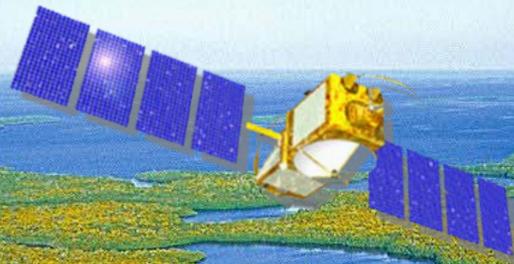
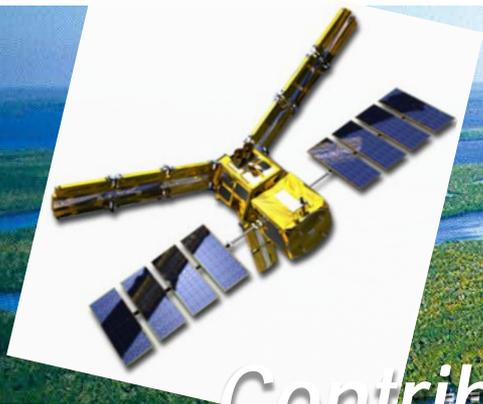


Effet des eaux continentales sur le niveau de la mer



Conservation de la masse d'eau dans le système climatique

$$\Delta M_{\text{océans}} + \Delta M_{\text{continents}} = 0$$

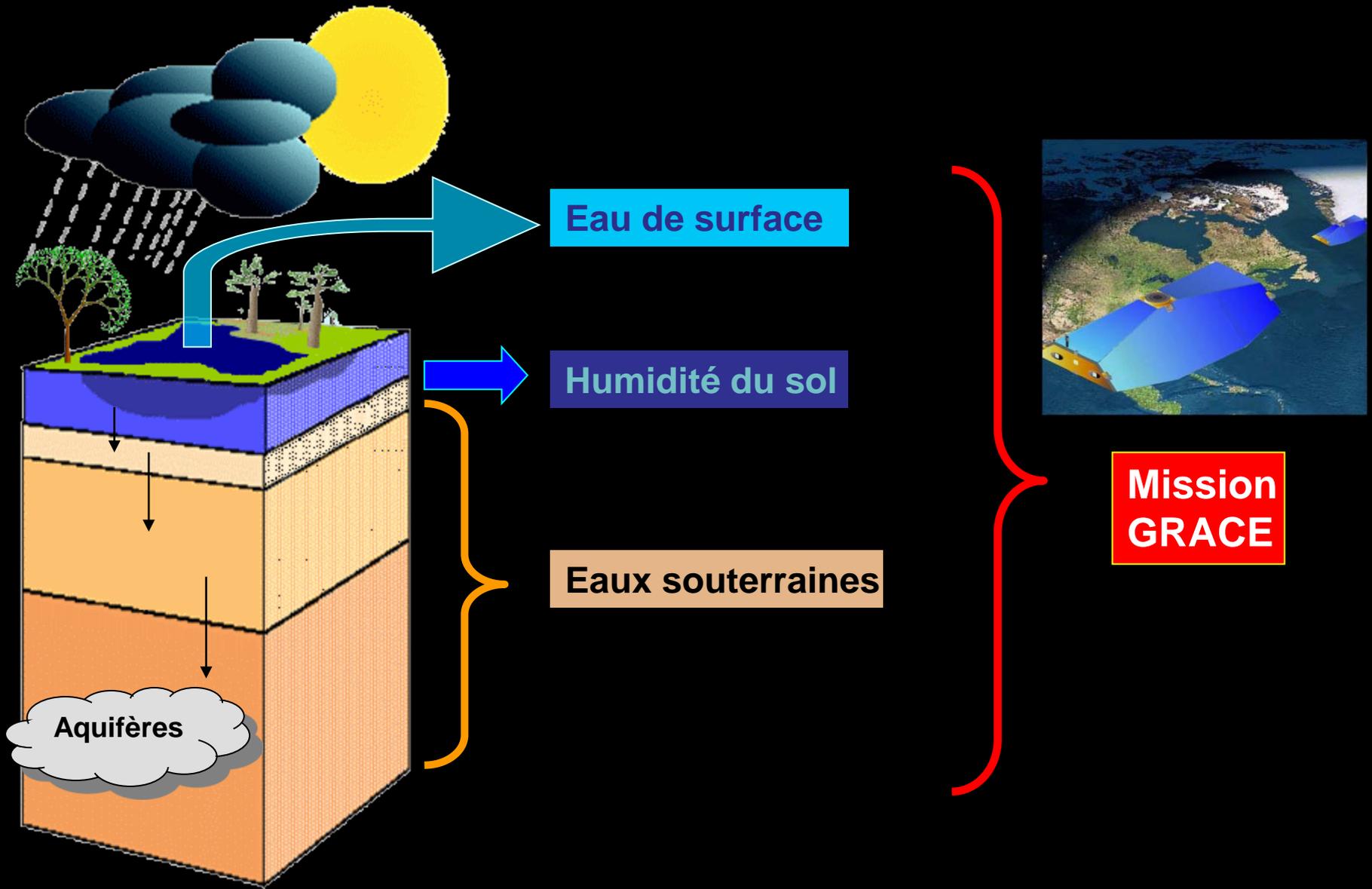


Contribution des aux continentales

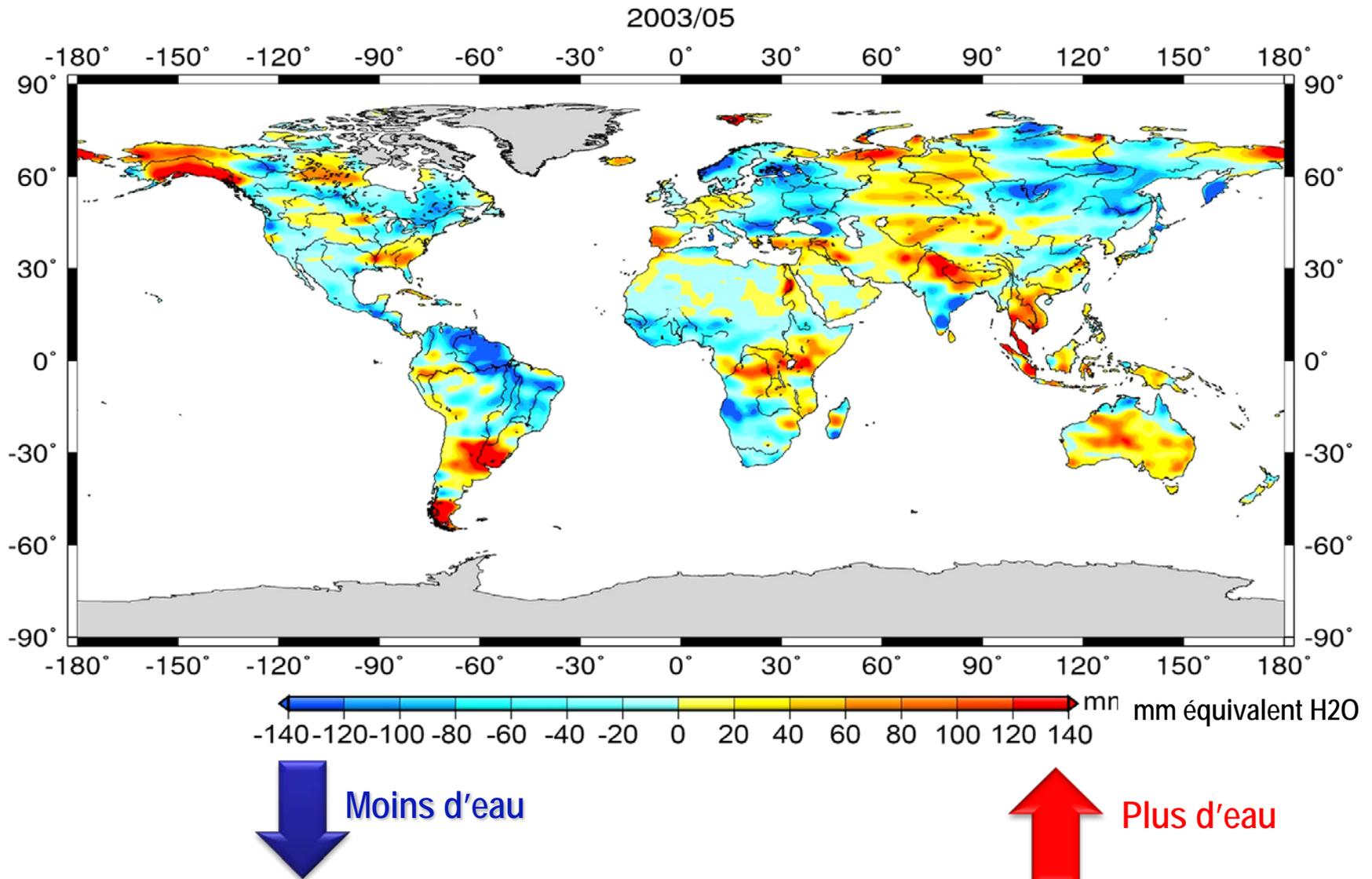
- Variabilité climatique
- Pompage dans les nappes
- Construction de barrages
- Déforestation
- Urbanisation
-

Activités
humaines

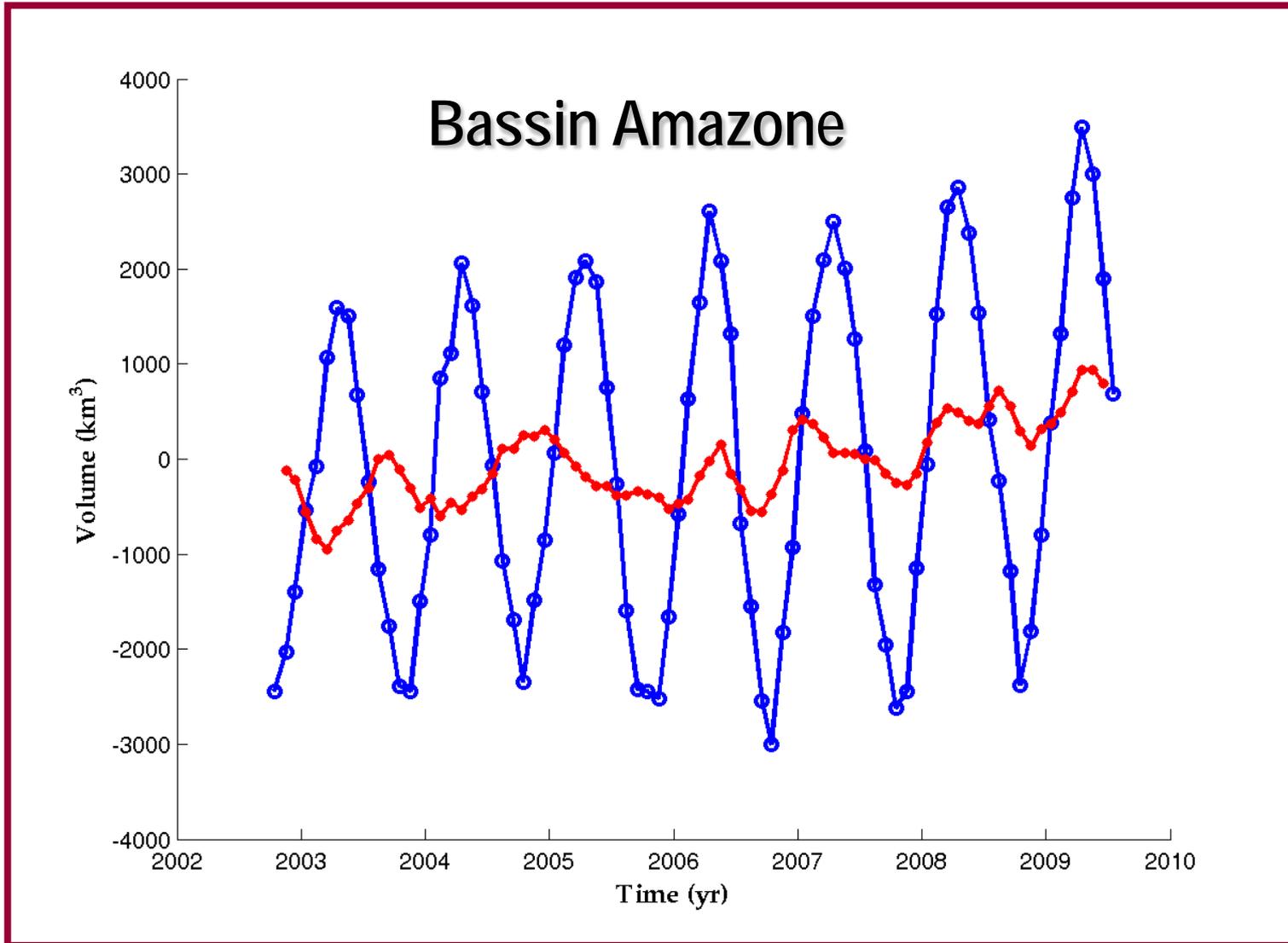
GRACE mesure les variations temporelles du stock d'eau total



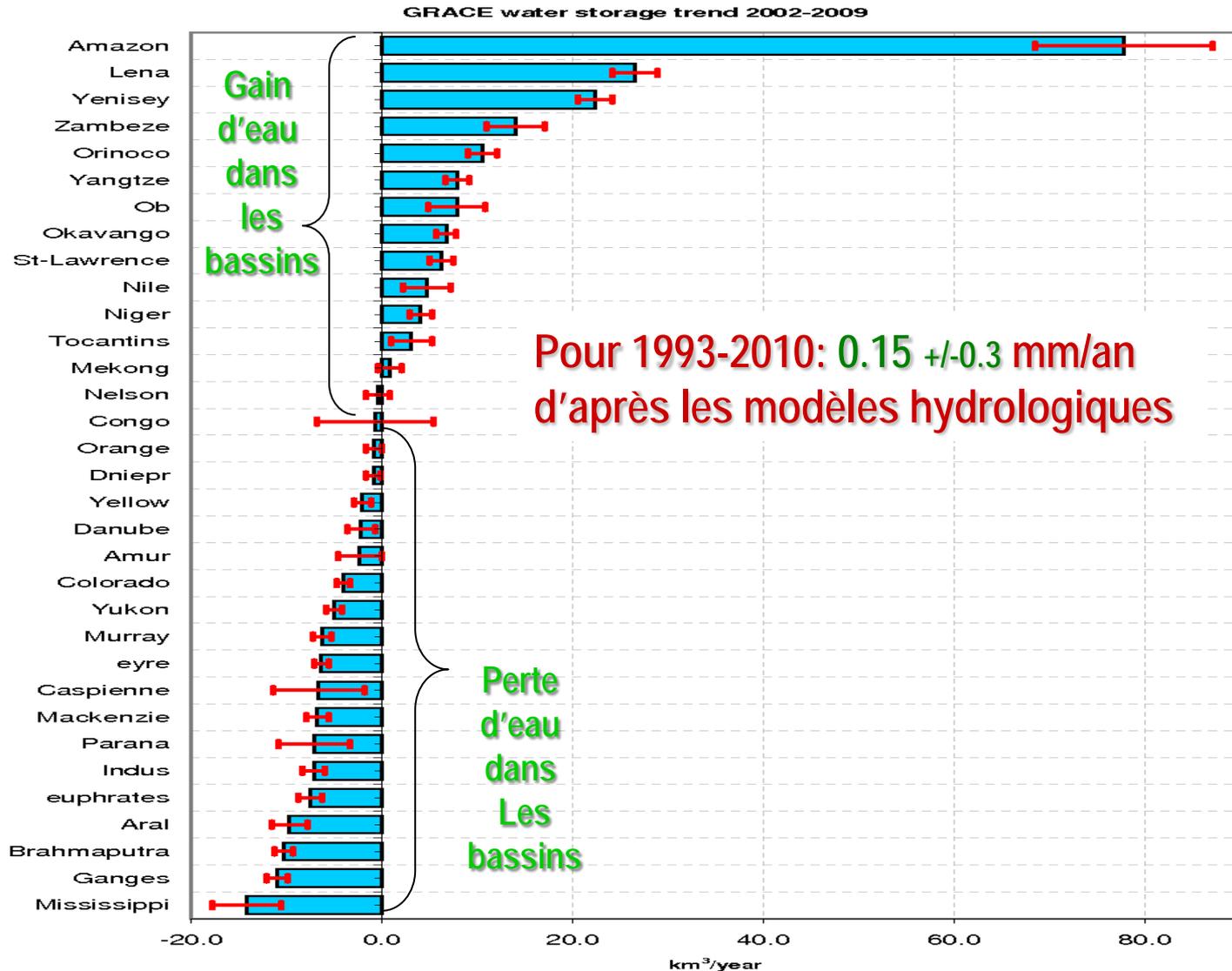
GRACE : Evolution spatio temporelle du stock d'eau total dans les bassins fluviaux (2003-2012) *sans cycle saisonnier*



Variation du volume total d'eau dans le bassin de l'Amazonie (2003-2009) d'après GRACE

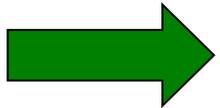


Variation (tendance) du volume d'eau dans les grands bassins fluviaux d'après GRACE (km³/an) 2002-2009



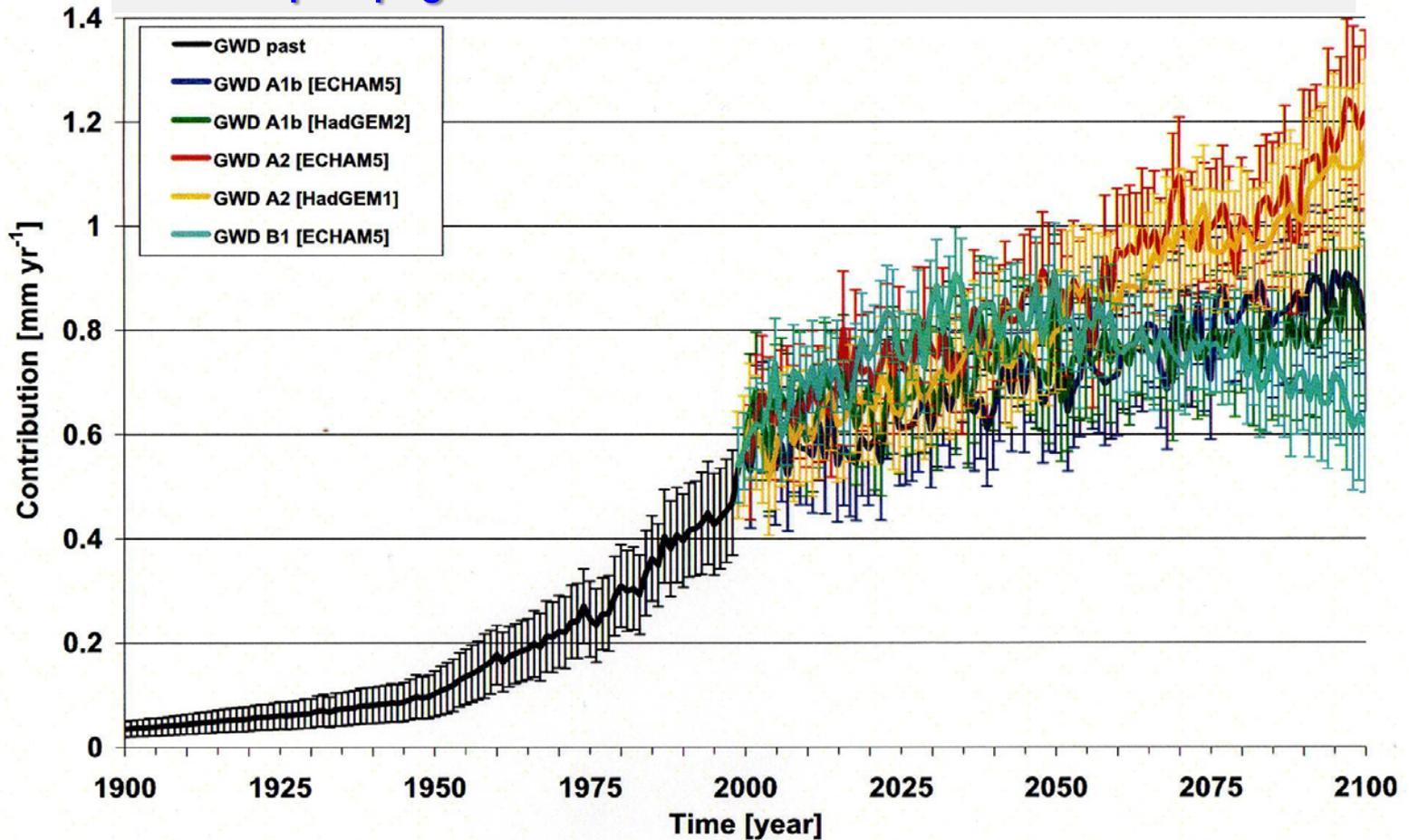
Effets directs des activités humaines sur l'hydrologie continentale

- Pompage des eaux souterraines
- Construction de barrages sur les fleuves
- Déforestation
- Urbanisation
-



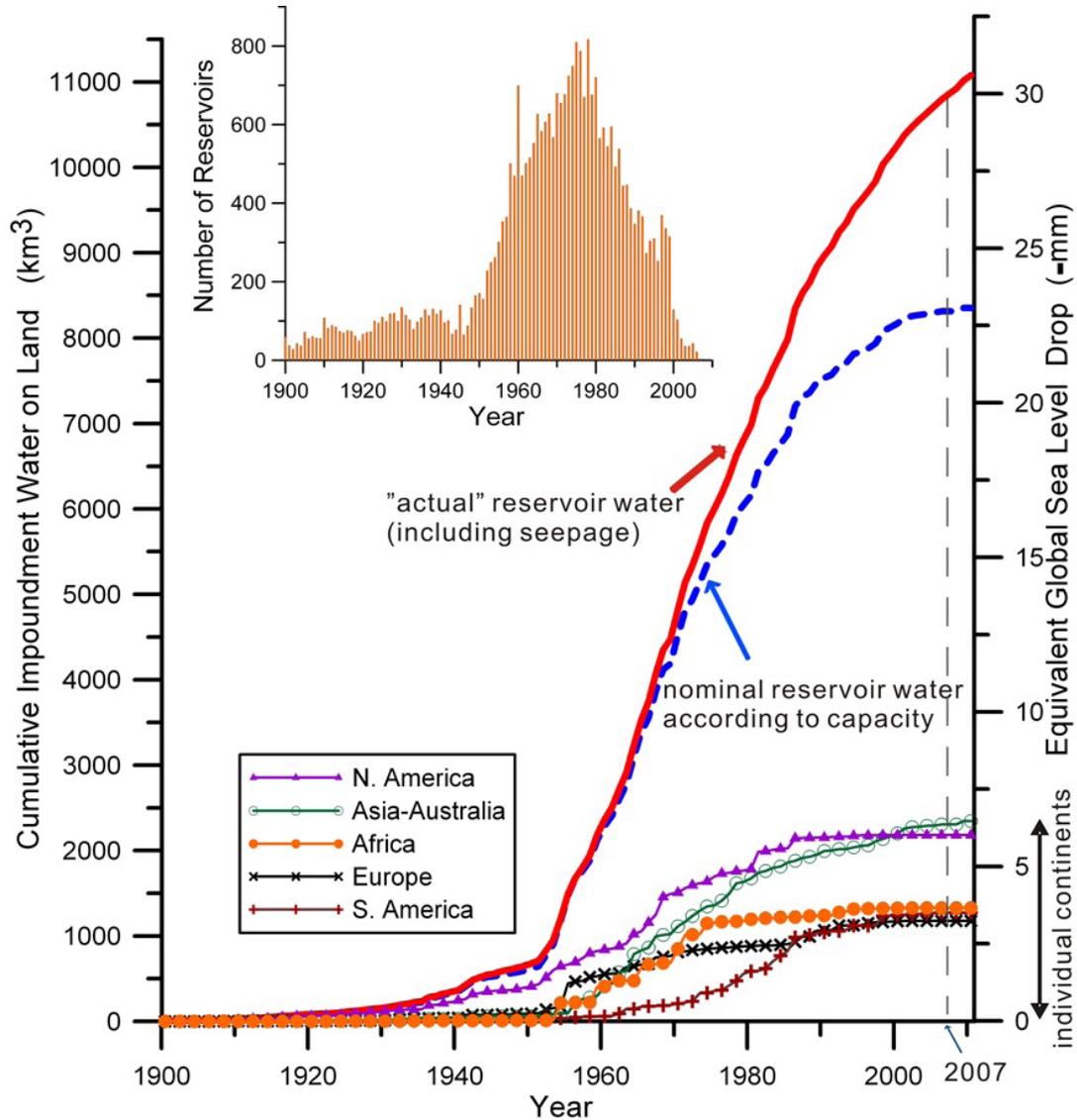
Effets sur le stock total d'eau, donc le niveau de la mer

Effet du pompage des eaux souterraines sur le niveau de la mer



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

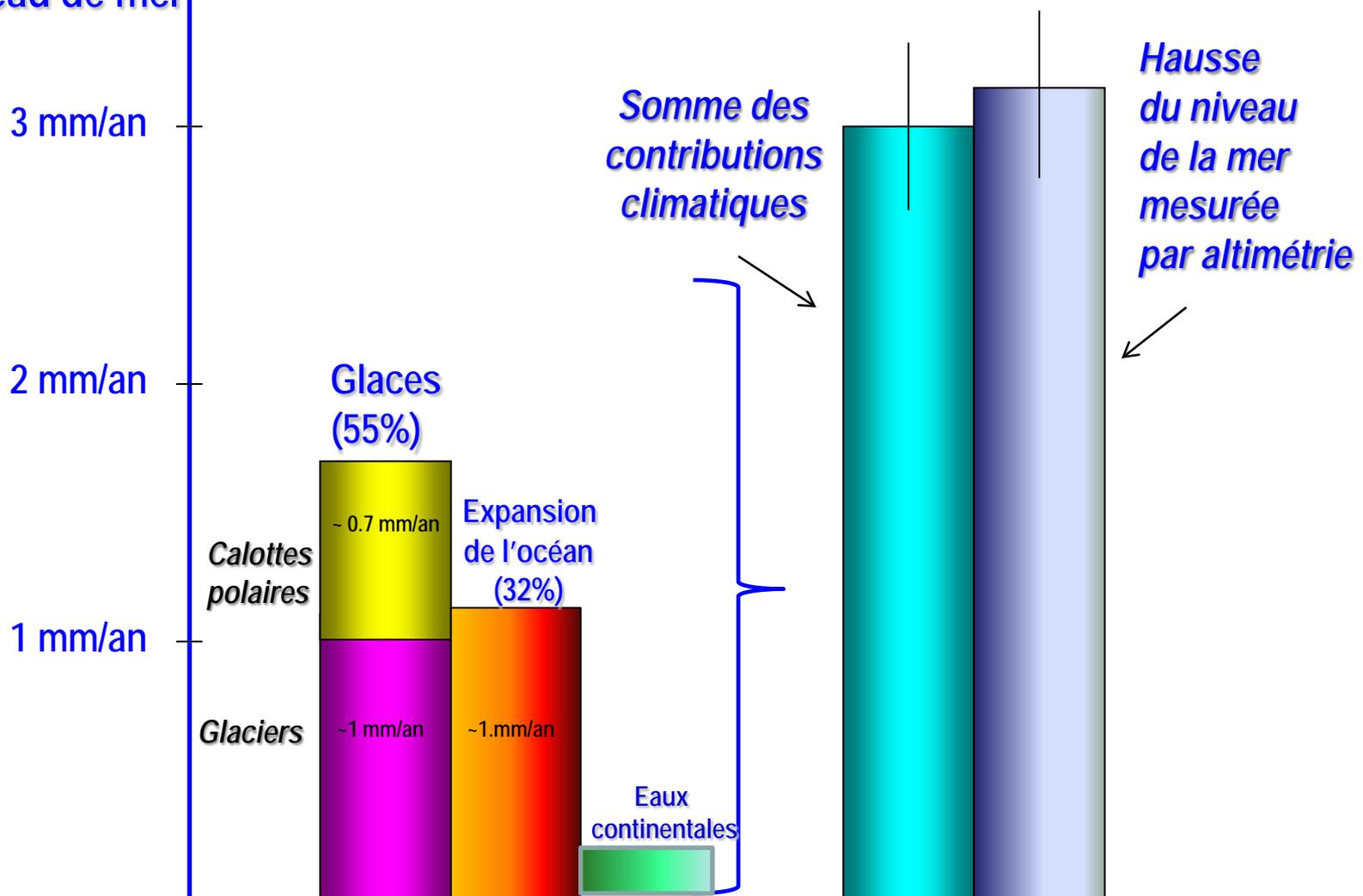
Barrages et réservoirs artificiels



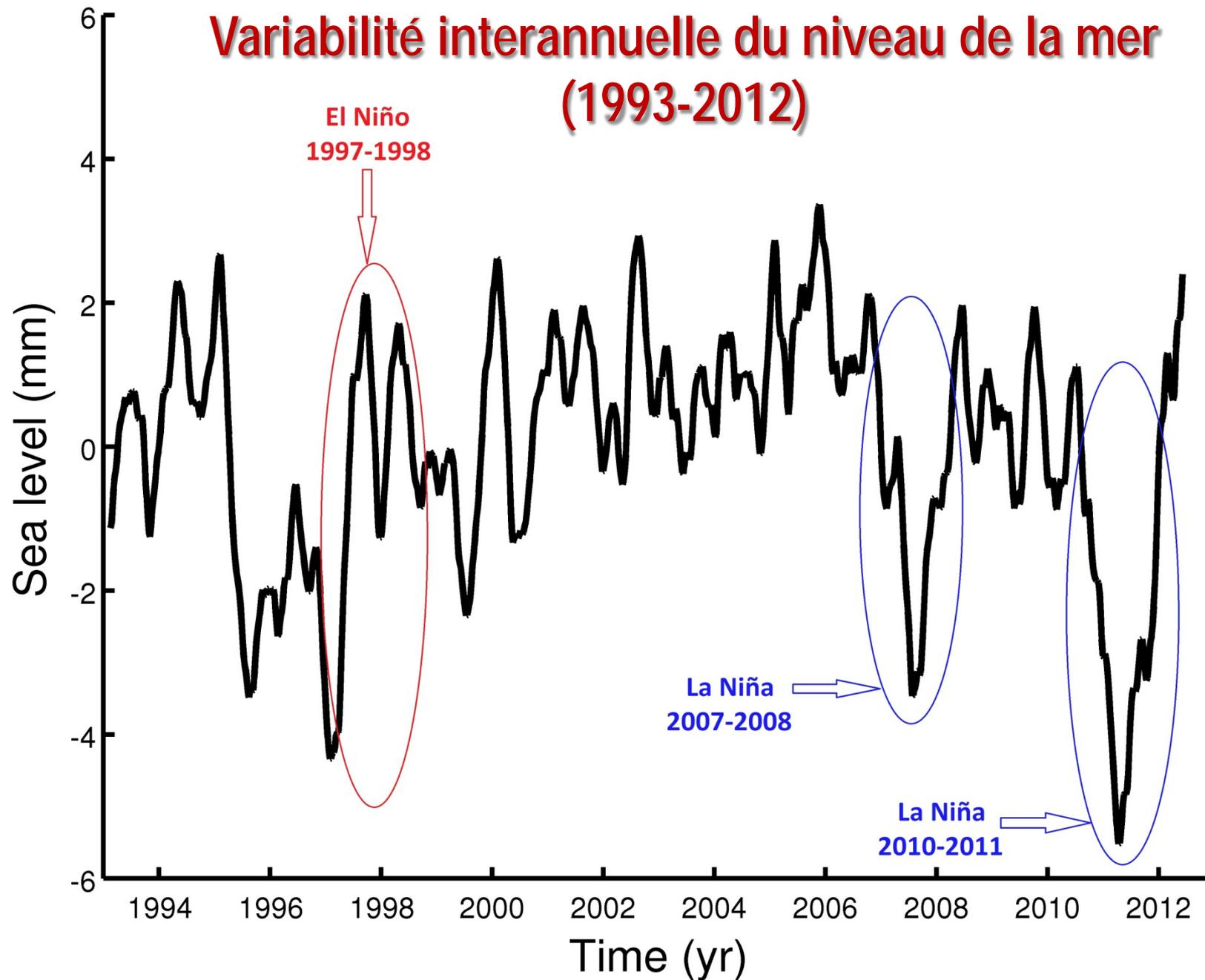
1993-2008
~ - 0.55 mm/an
→ Baisse
du niveau de la mer

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

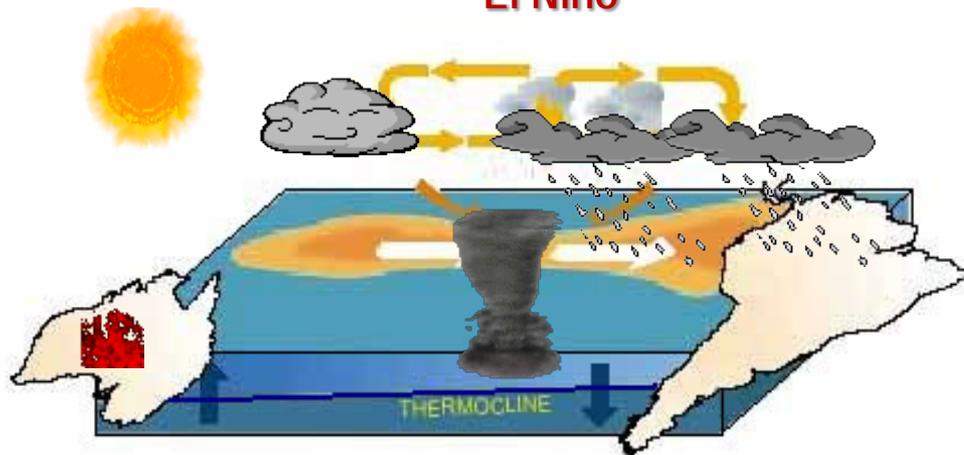
Hausse du niveau de mer



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



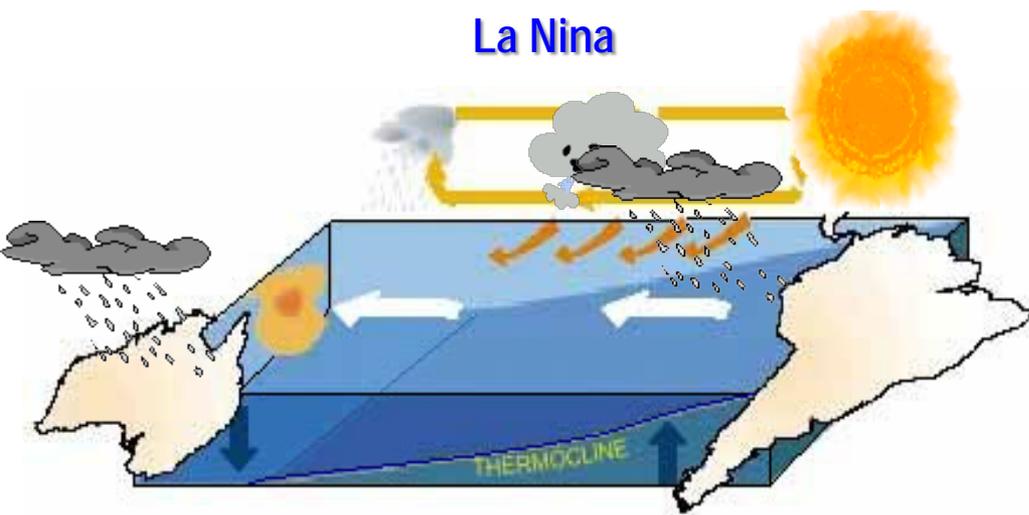
El Nino



El Niño

Plus de pluie sur le Pacifique tropical
Moins de pluie sur l'Amazone

La Nina



La Niña

Moins de pluie sur le Pacifique tropical
Plus de pluie sur l'Amazone

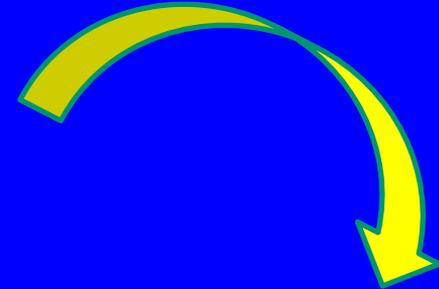
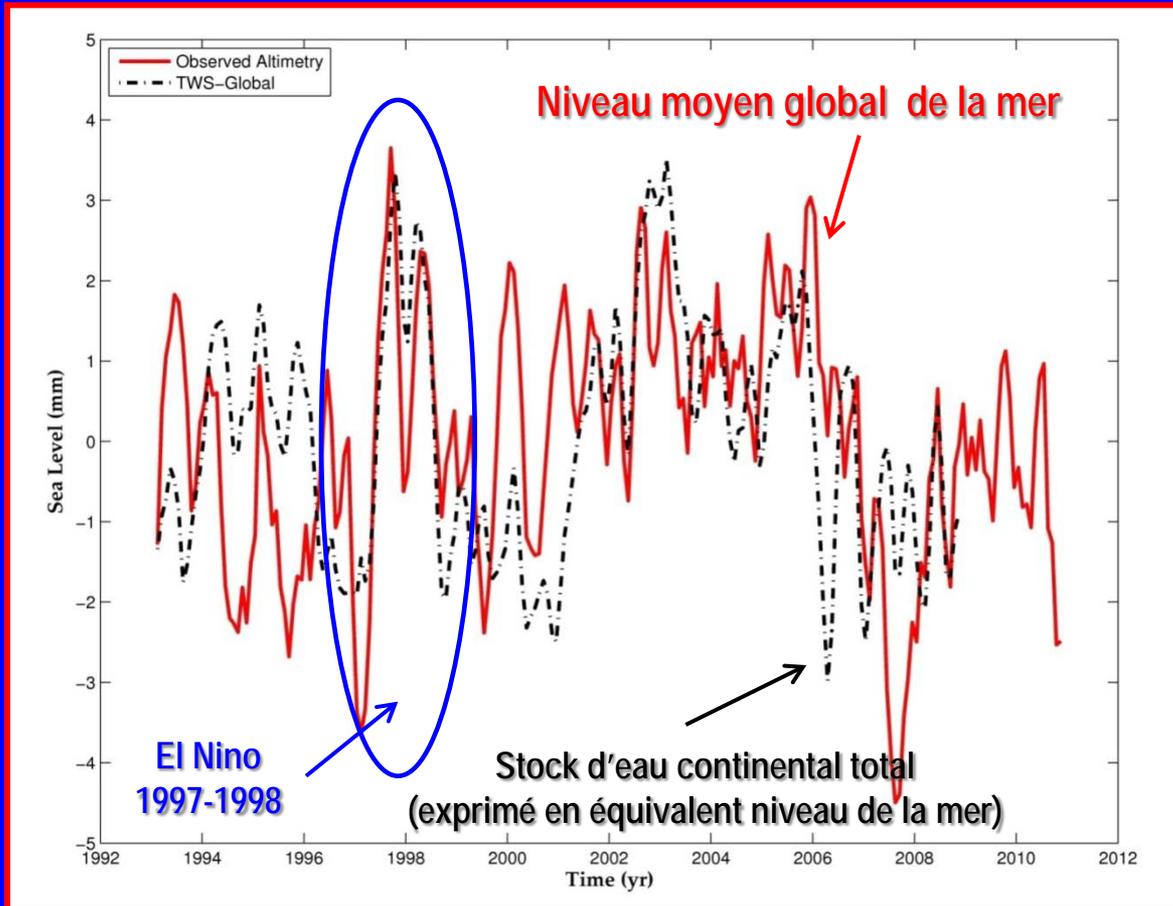


Cycle global de l'eau

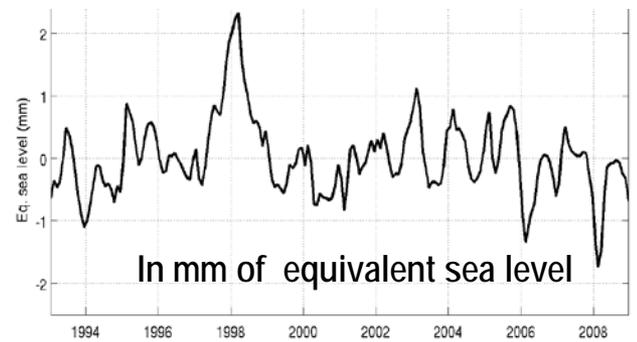
Conservation de la masse d'eau dans le système climatique

$$\Delta M_{\text{océans}} + \Delta M_{\text{continents}} = 0$$

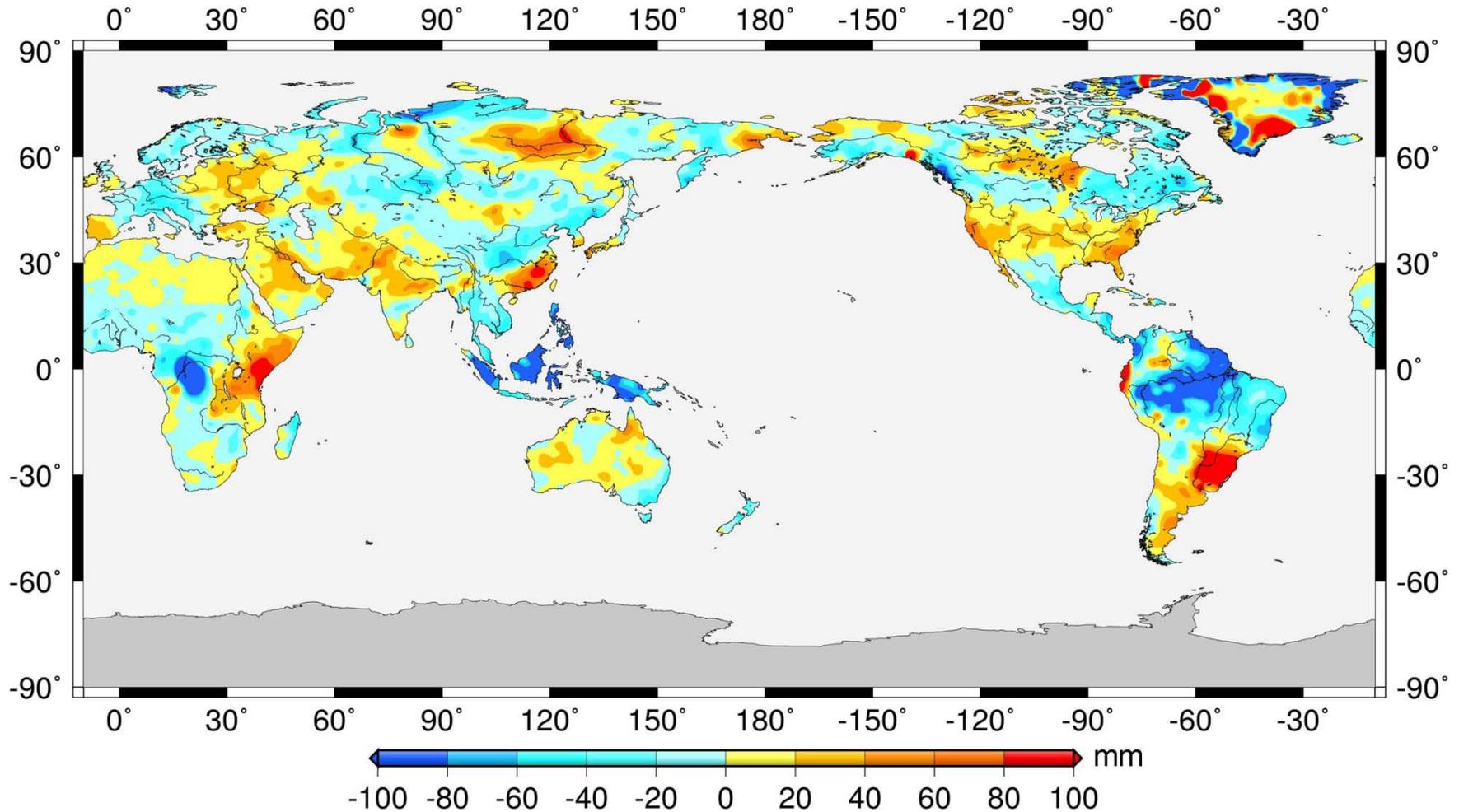
Variations interannuelles du niveau moyen global de la mer et variations du stock total d'eau sur les continents (modèle hydrologique ISBA-TRIP de MeteoFrance)



Contribution du bassin amazonien



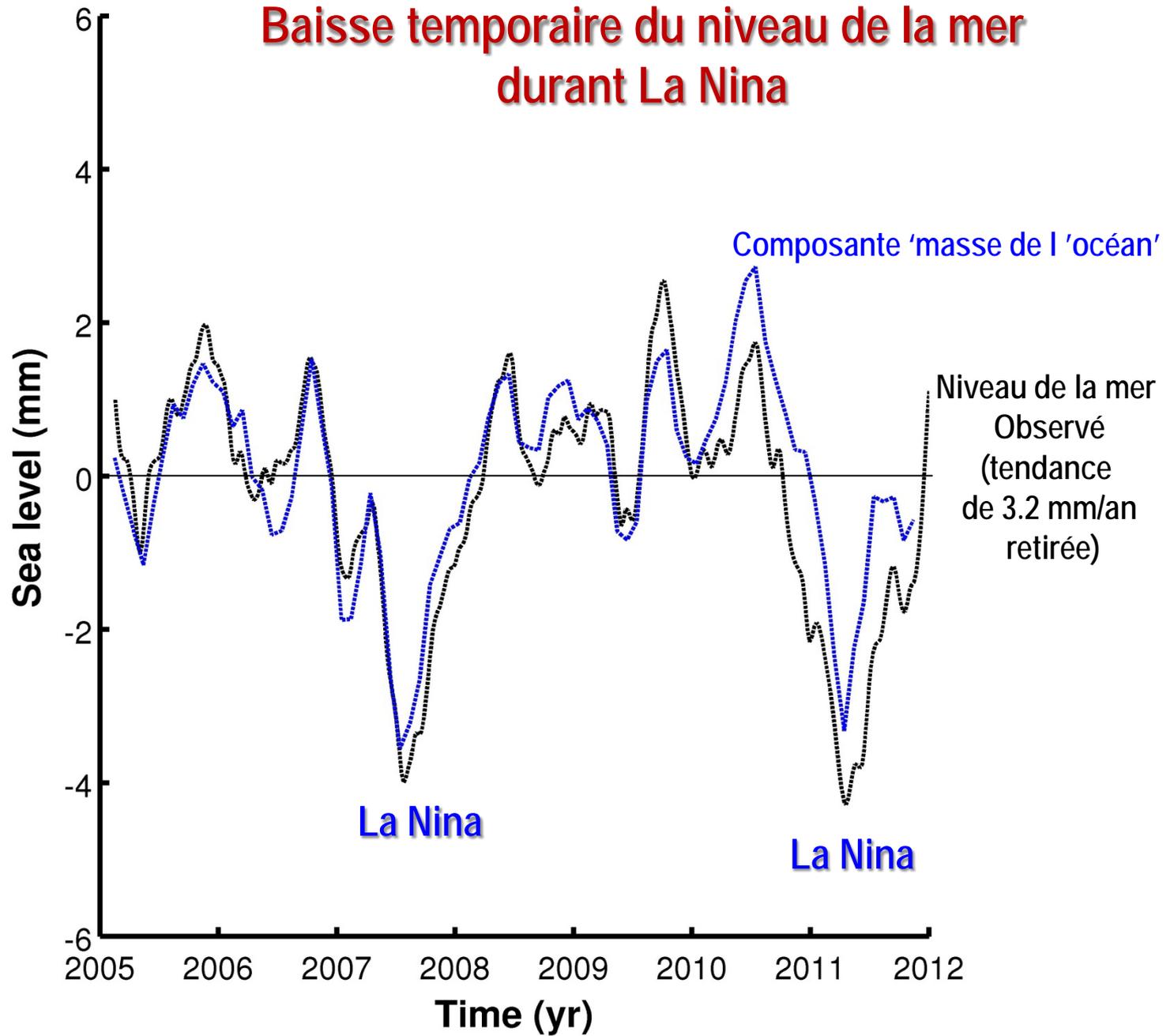
Stock d'eau entre juillet 1997 et juillet 1998 (El Nino) d'après le modèle hydrologique de Météo-France



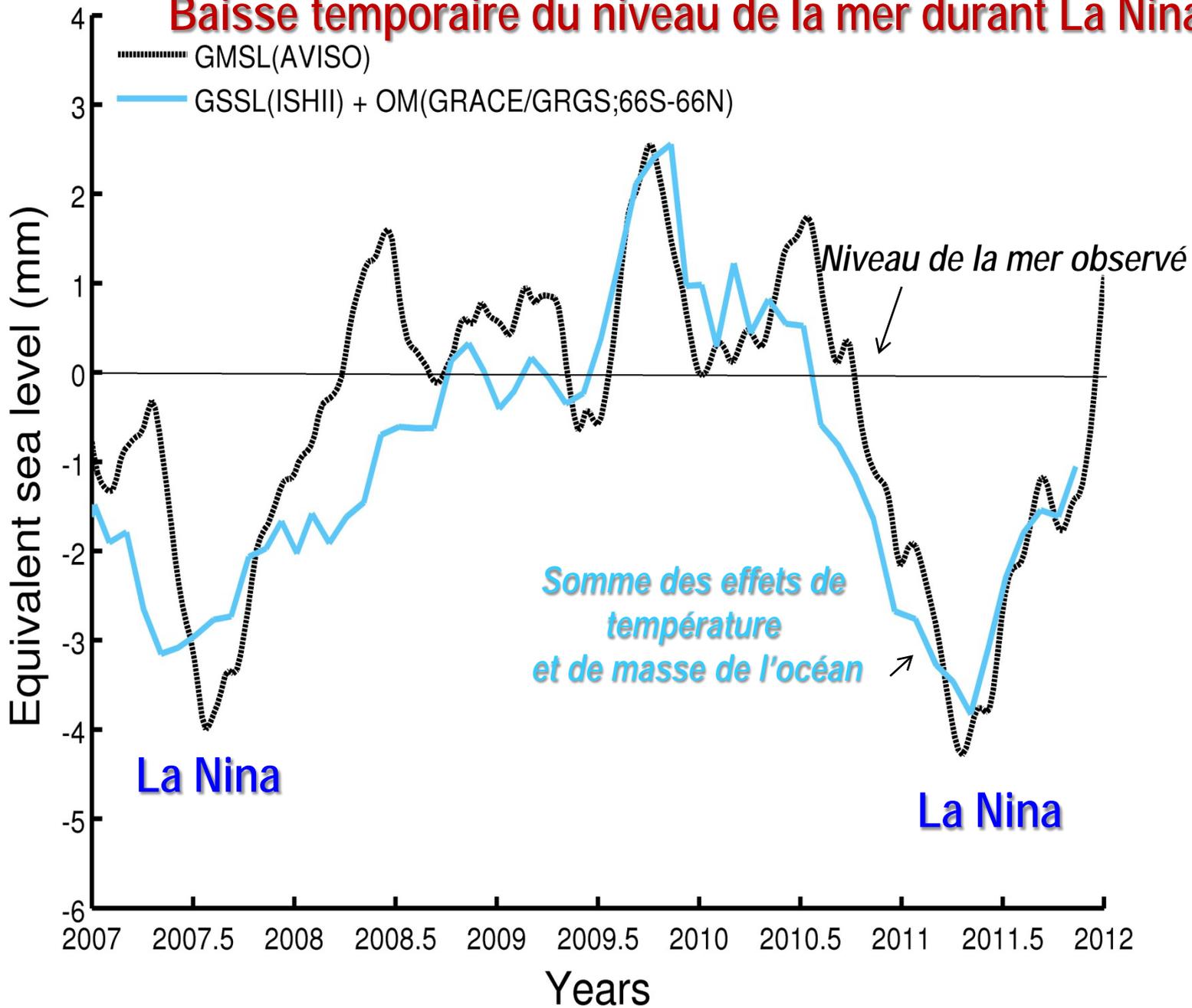
Bleu = moins d'eau

Rouge = plus d'eau

Baisse temporaire du niveau de la mer durant La Nina

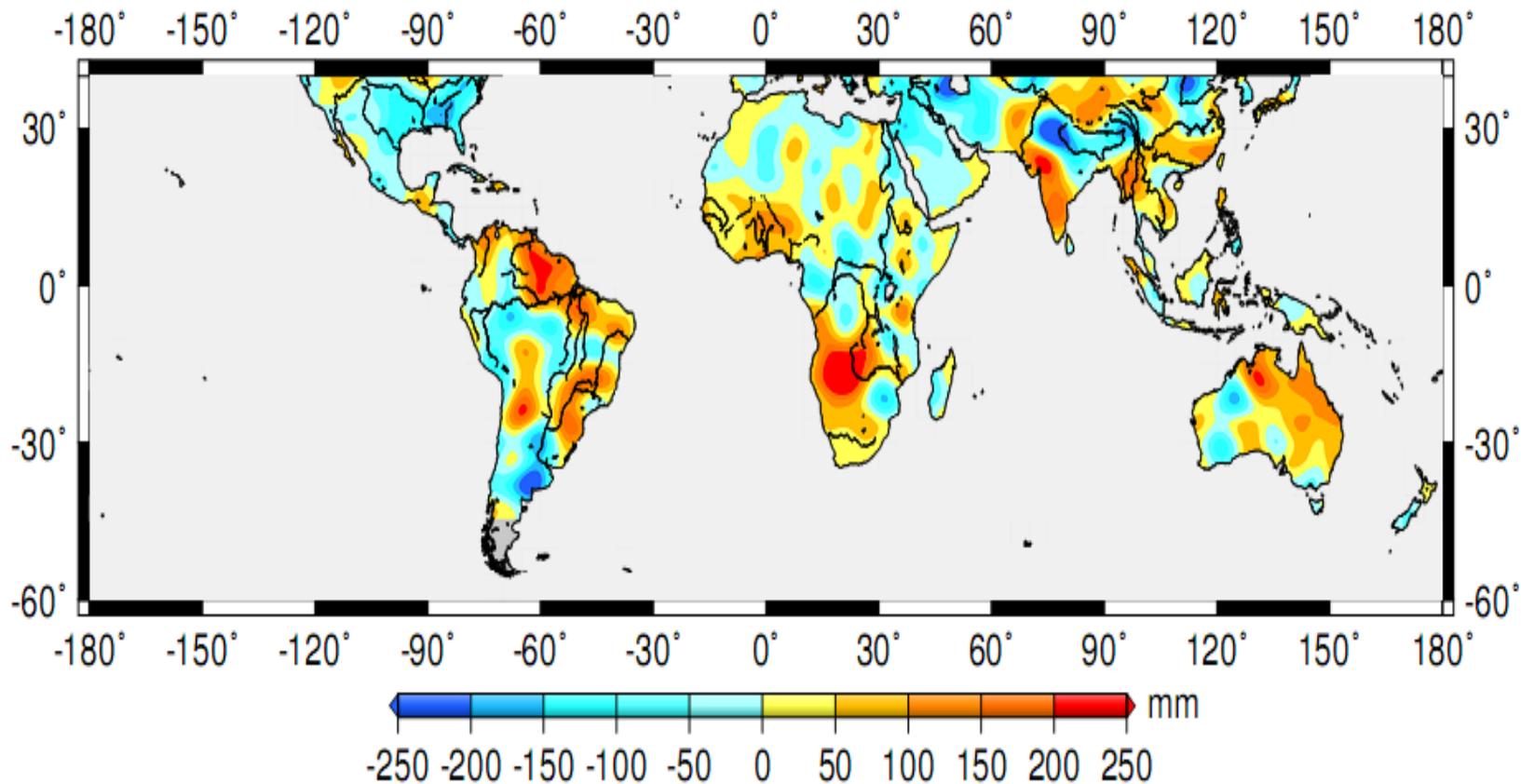


Baisse temporaire du niveau de la mer durant La Nina



Stock d'eau sur les continents (moyenne sur 1 an) mesuré par GRACE

Mean_Land_Water GRACE / GRGS (La Nina October 2010 - October 2011)

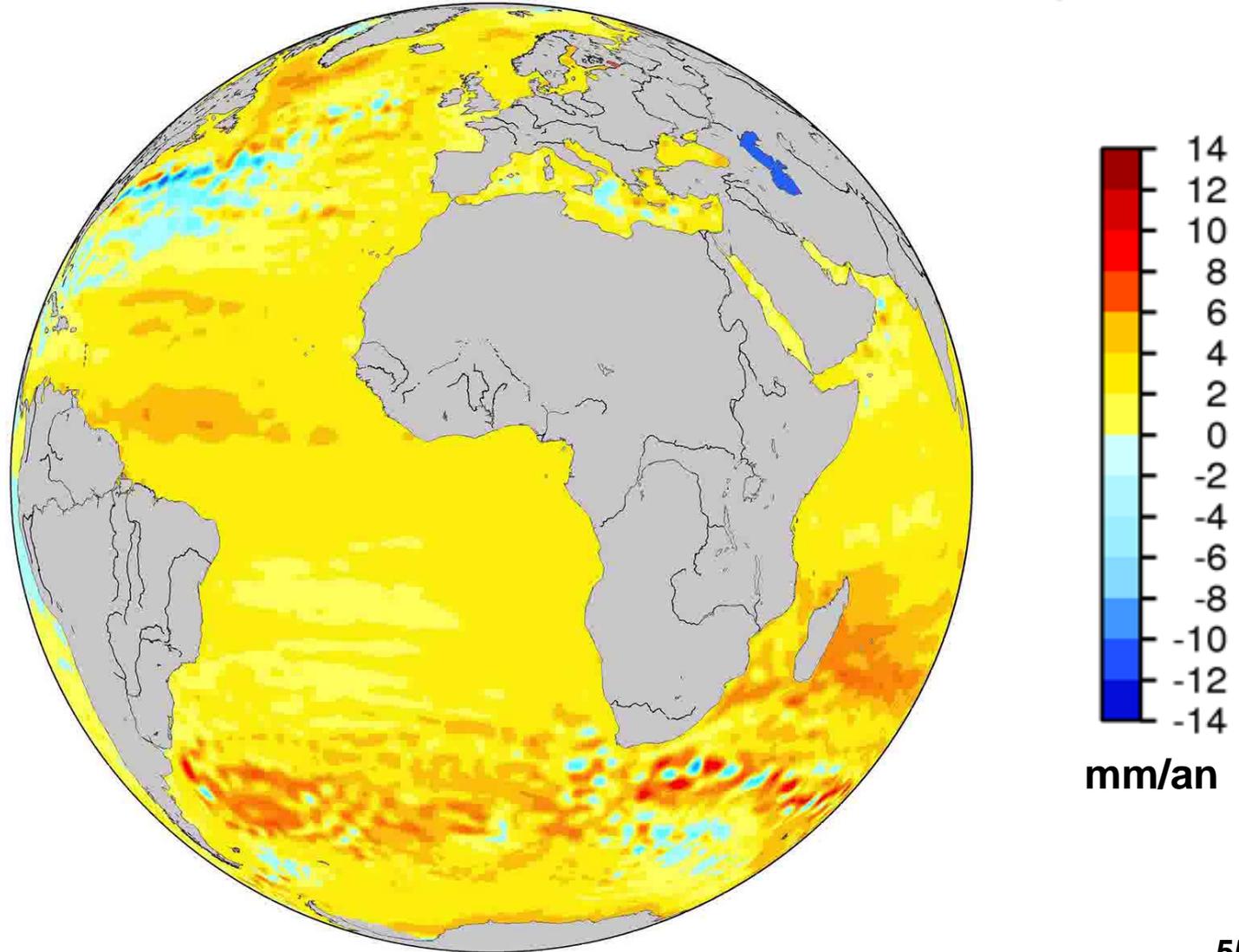


Rouge = plus d'eau
Bleu = moins d'eau

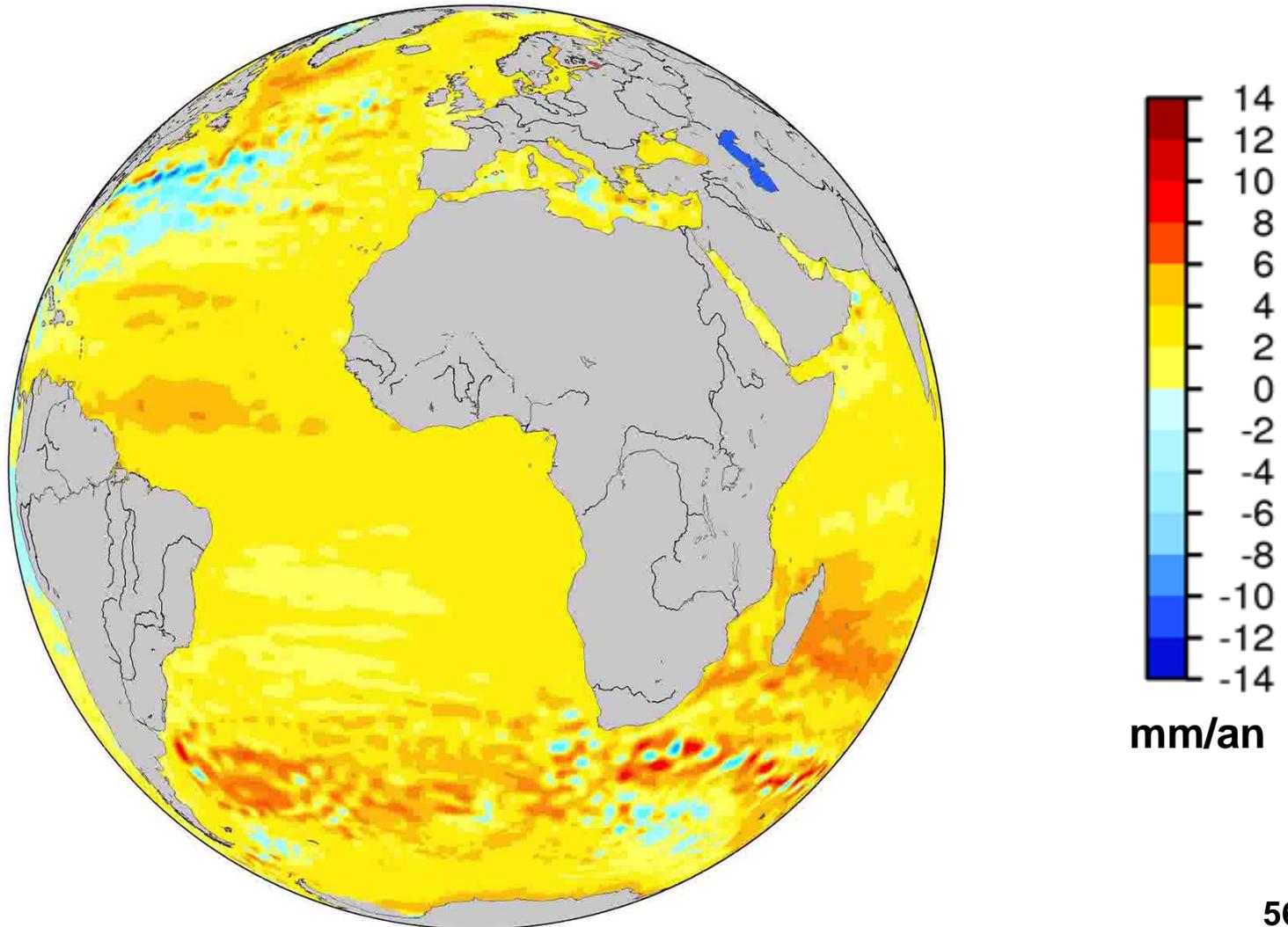


La mer ne monte pas de manière uniforme!

Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observées par les satellites altimétriques (1993-2012)

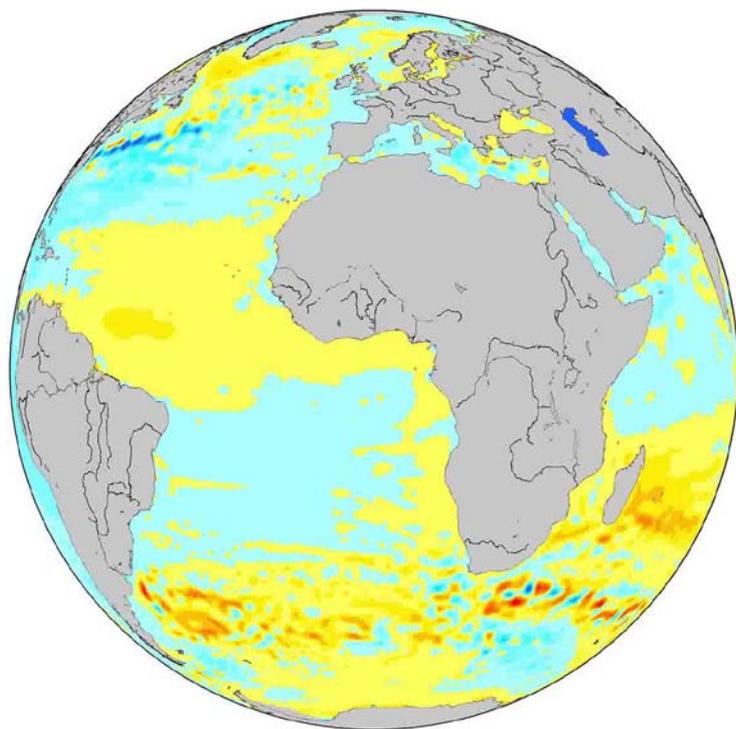


Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observées par les satellites altimétriques (1993-2012)

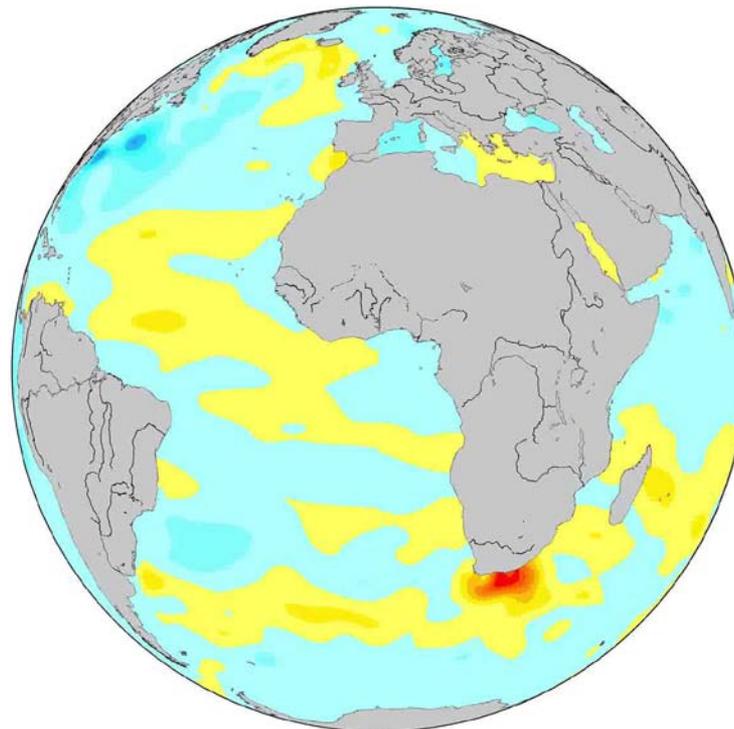


La mer ne monte pas de manière uniforme!

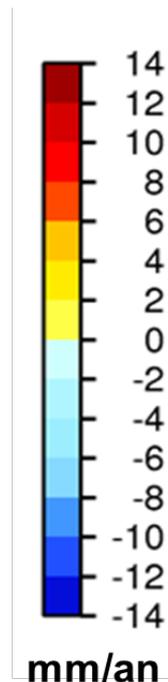
*Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2012)
(hausse moyenne globale retirée)*



*Tendances régionales
des variations du niveau de la mer
mesurées par altimétrie spatiale*



*Tendances régionales
de l'expansion thermique
des océans*



Hausse 'climatique' totale de la mer

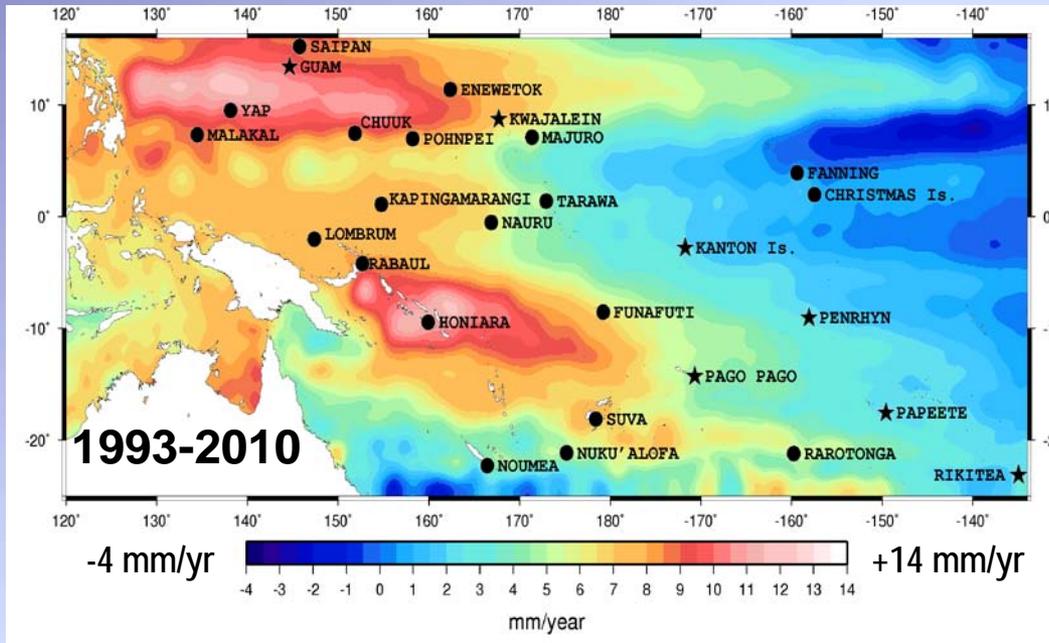
=

• *Hausse moyenne globale*

+

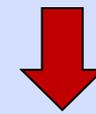
• *Variabilité régionale*

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

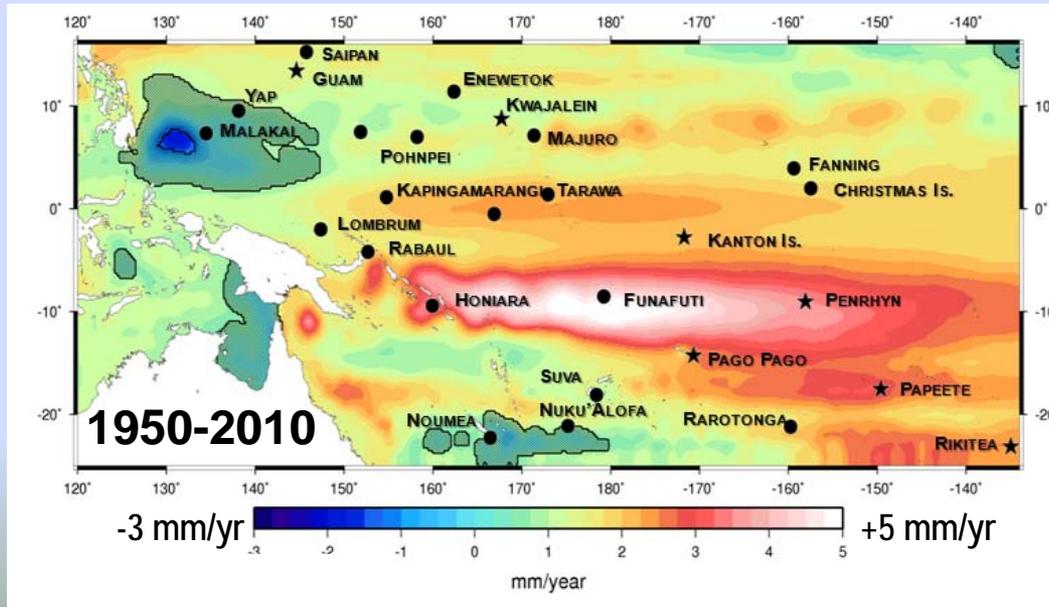


1993-2010

Variabilité régionale des tendances du niveau de la mer



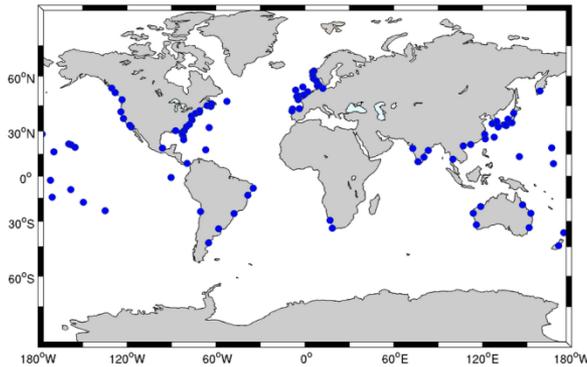
dépend de la période considérée



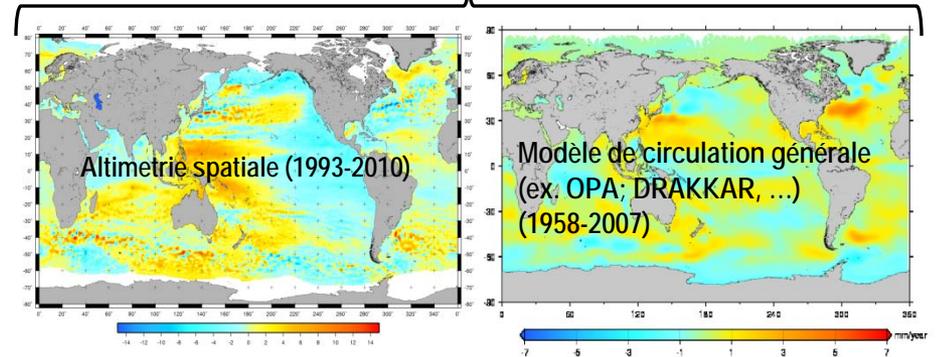
1950-2010

Reconstruction 2-D du niveau de la mer dans le passé (1950 – 2010)

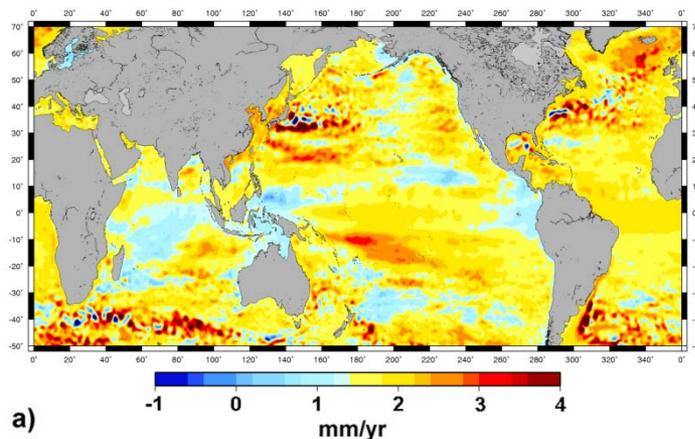
Marégraphes (1950-2010)



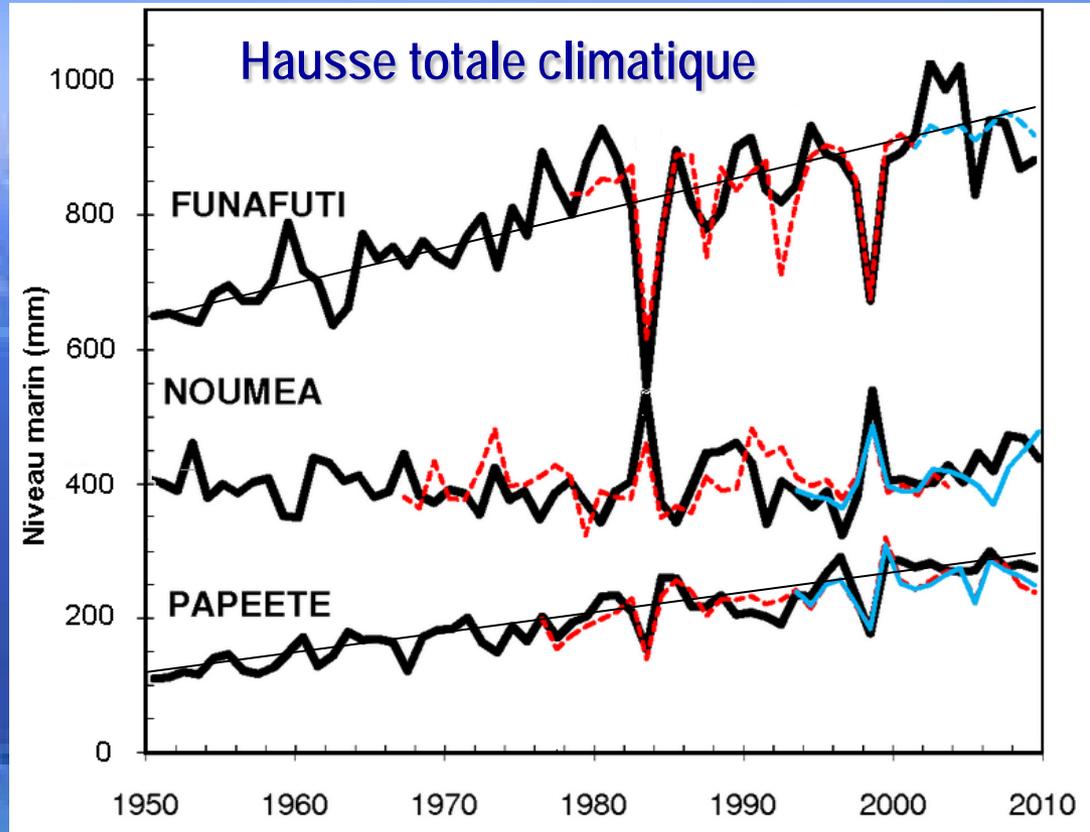
Séries temporelles de grilles de niveau de mer



Reconstruction: séries temporelles de grilles du niveau de la mer (1950-2010)



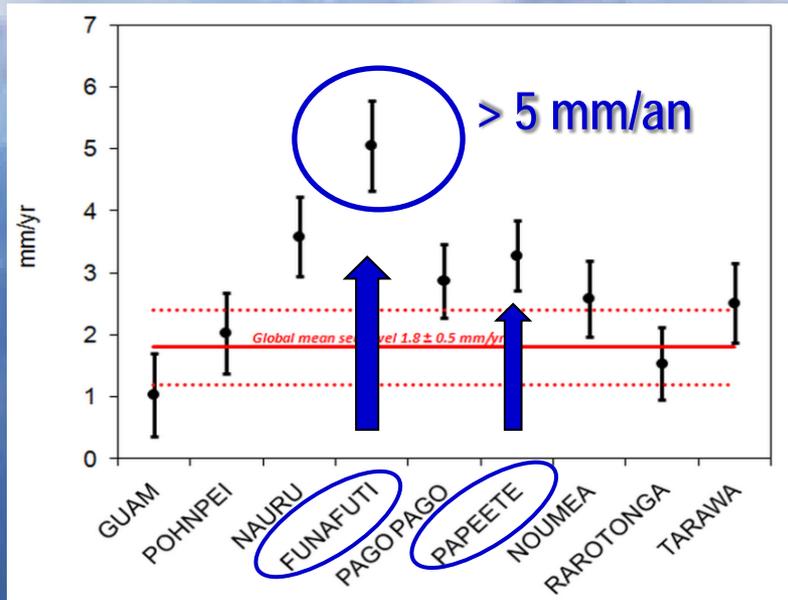
Meyssignac et al., Surveys in Geophys., 2012
Meyssignac et al., Glob. Planet. Change, 2011



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)



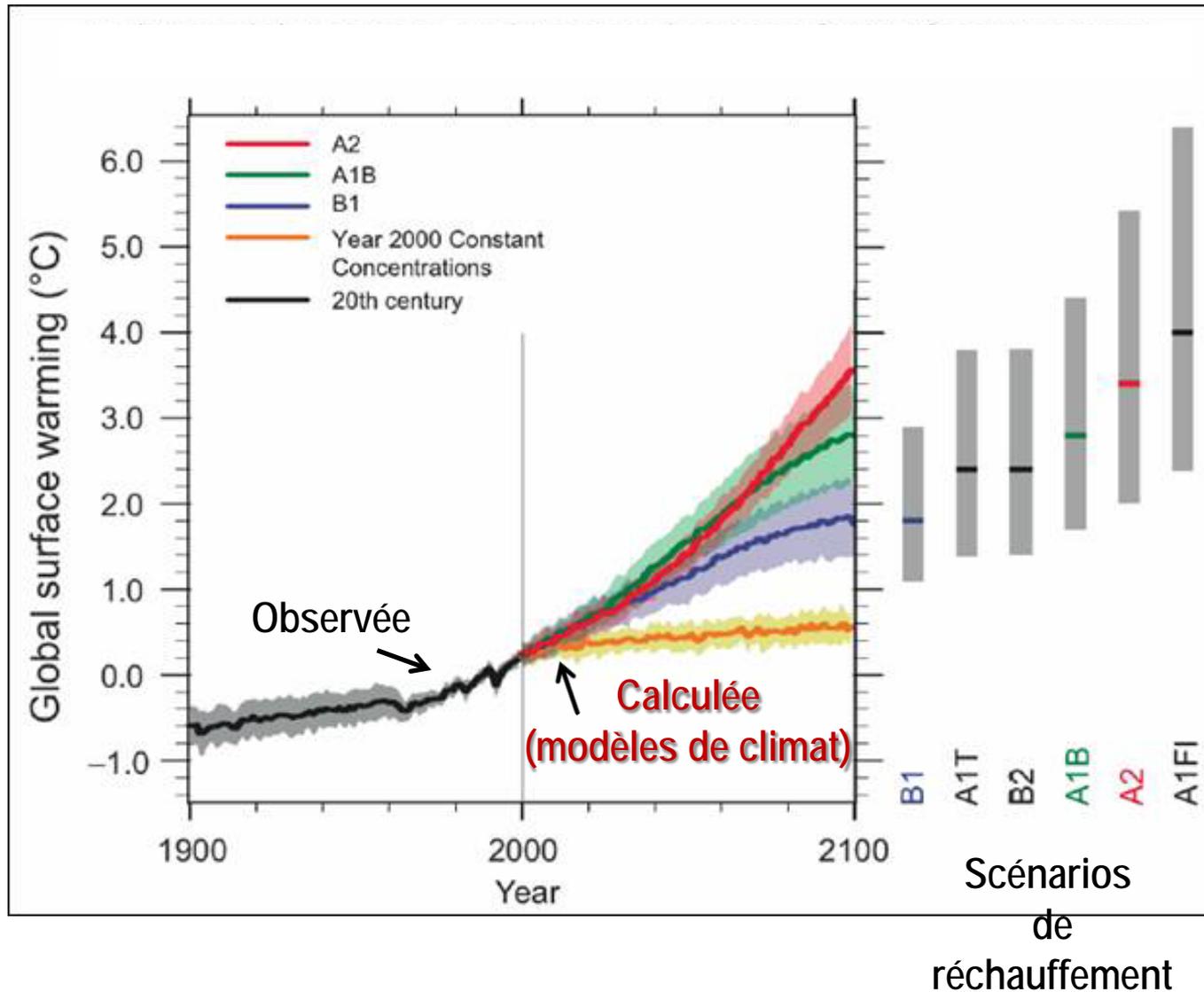
+ 30 cm d'élévation du niveau de la mer depuis 1950!

La mer va-t-elle continuer à monter?

Oui!

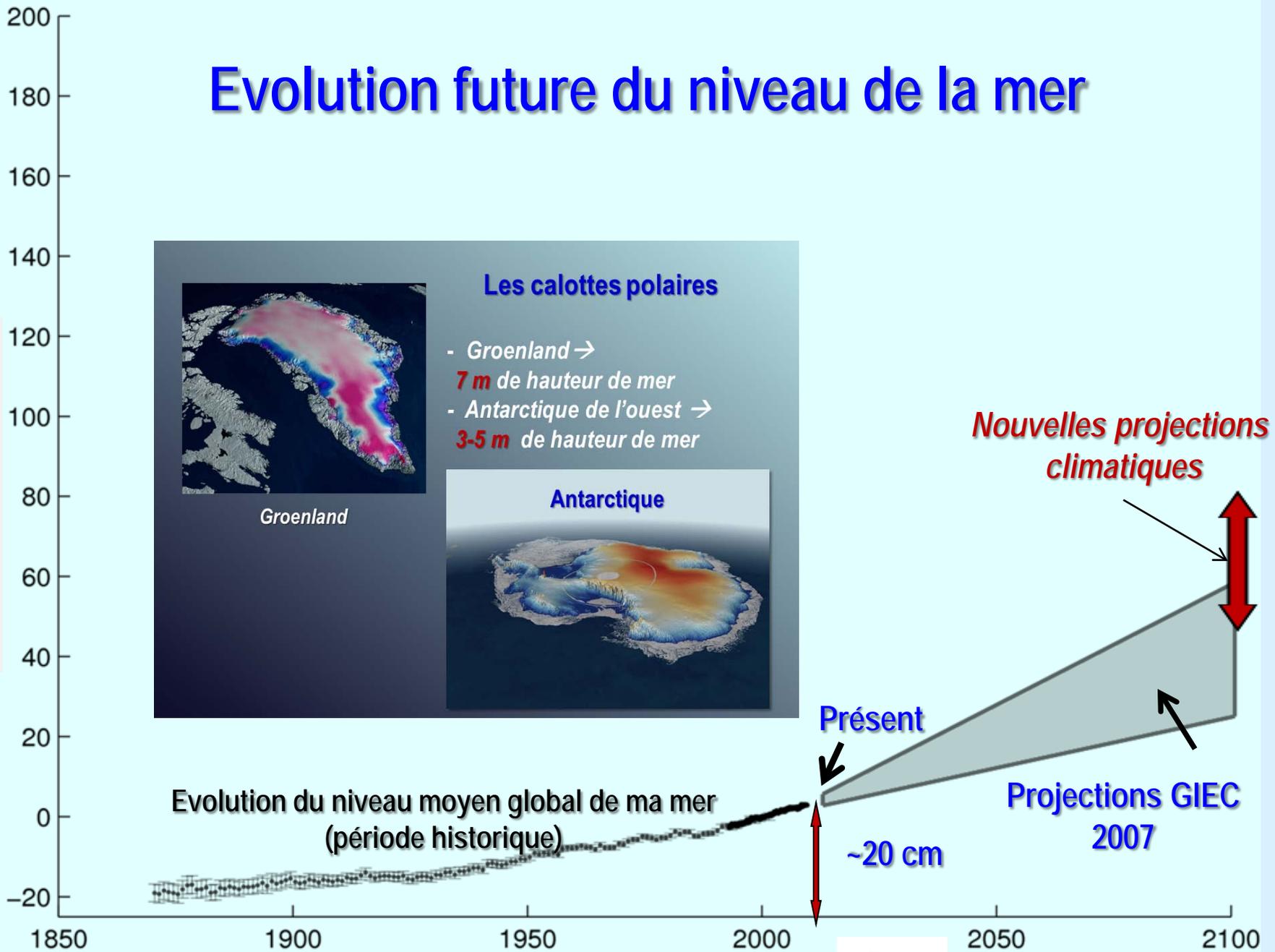


Evolution de la température moyenne de la Terre



Evolution future du niveau de la mer

Niveau de la mer (cm)



Les calottes polaires

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

Groenland

Antarctique

Nouvelles projections climatiques

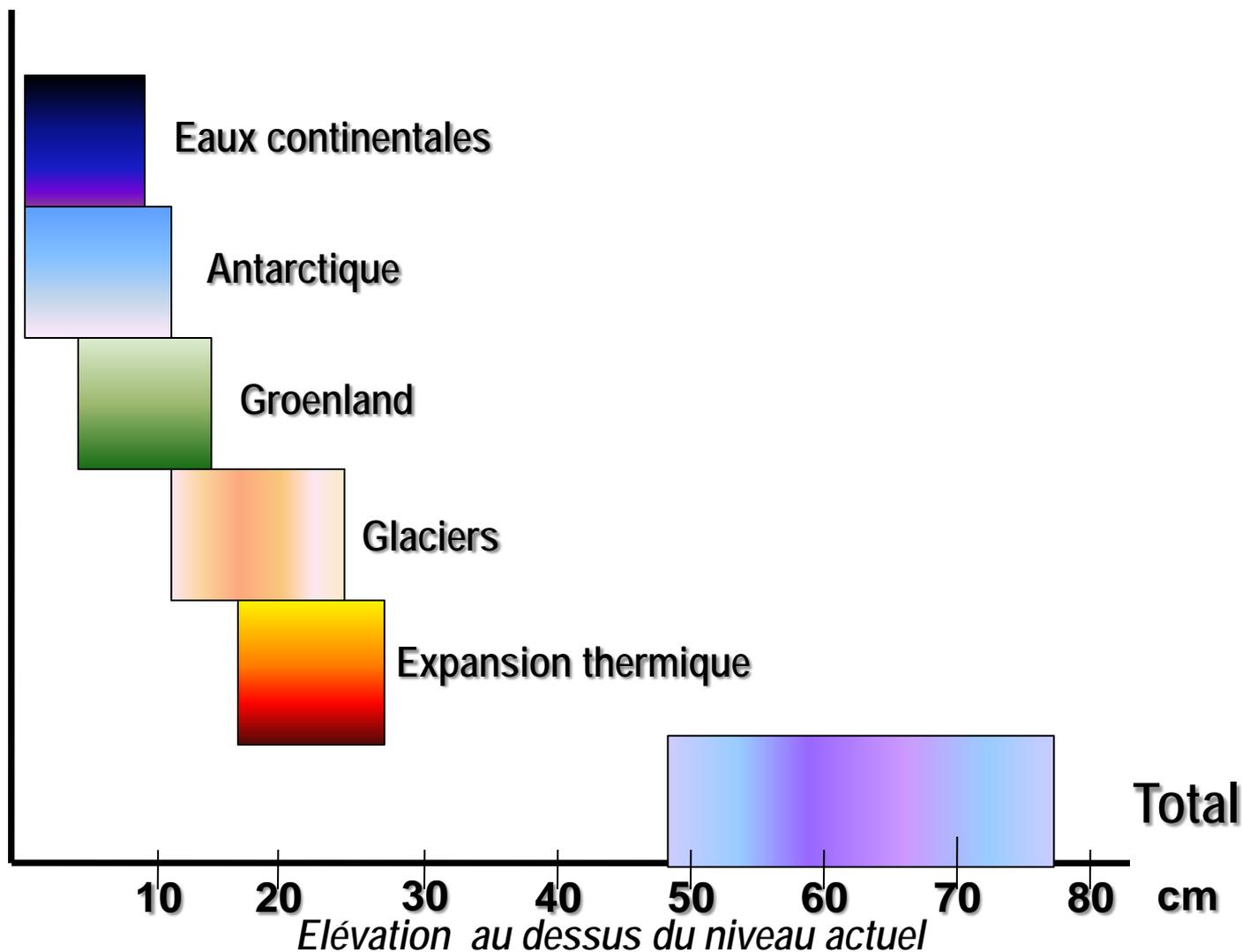
Présent

Projections GIEC 2007

~20 cm

Date

Projections de hausse moyenne globale du niveau de la mer en 2100 (Modèles de climat CMIP5: contributions individuelles et total pour scénario RCP 6.0) (synthèse d'études publiées depuis rapport GIEC 2007)





Peut-on prévoir localement la hausse future TOTALE de la mer?

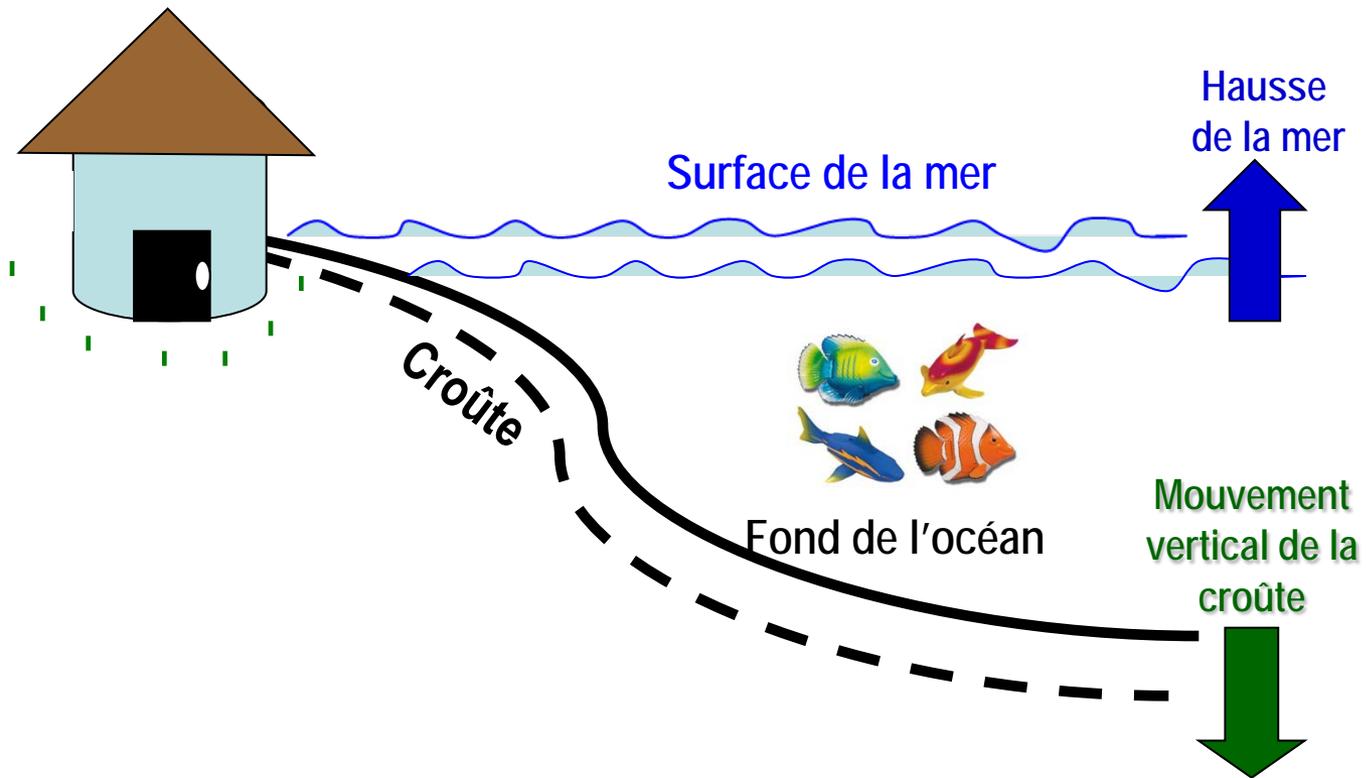


- « la hausse moyenne globale »
- + « la variabilité régionale »
- + « les mouvements de la croûte terrestre »

???????

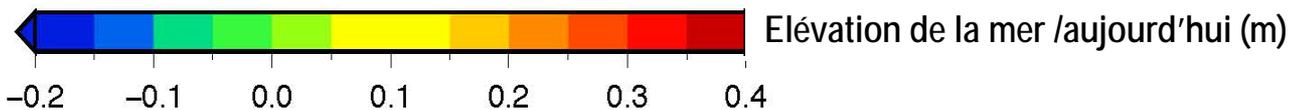
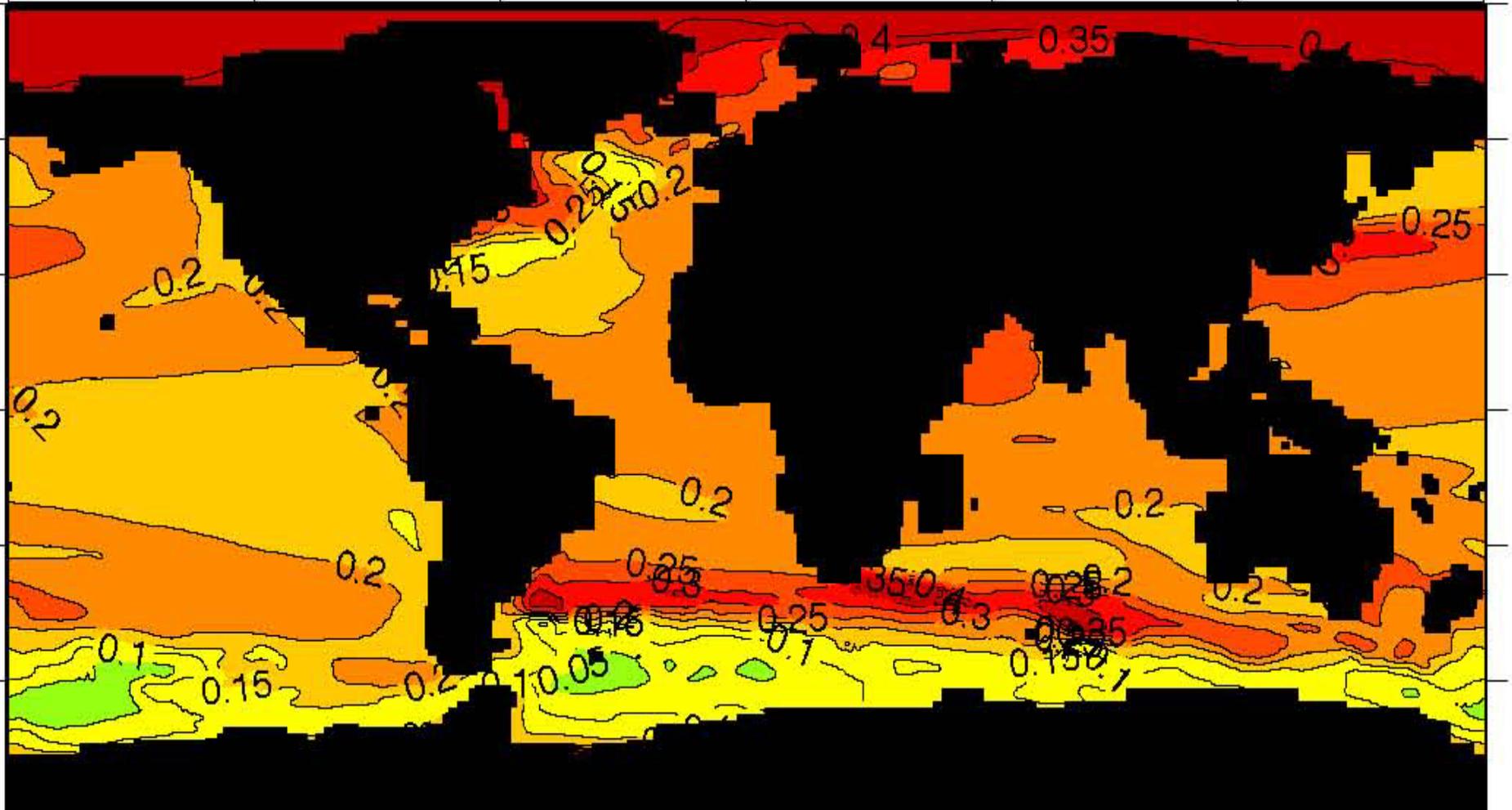
Car ce qui compte localement, c'est la variation **TOTALE** du niveau de la mer relativement à la côte →

Somme de la **hausse moyenne globale + variabilité régionale**
+ mouvements verticaux de la croûte terrestre !!!



La variabilité régionale et la subsidence du sol amplifient la hausse 'climatique' du niveau de la mer

Variabilité régionale de la hausse de la mer en 2100 due à l'expansion thermique et à la salinité de l'océan

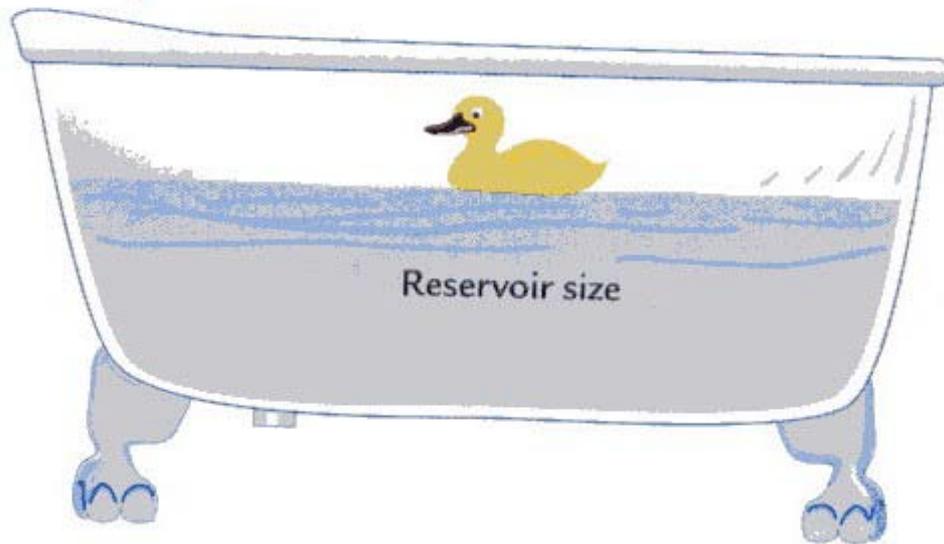


Elévation par rapport à la hausse moyenne globale de 50 cm (scénario de réchauffement 'moyen') Slangen et al., 2011

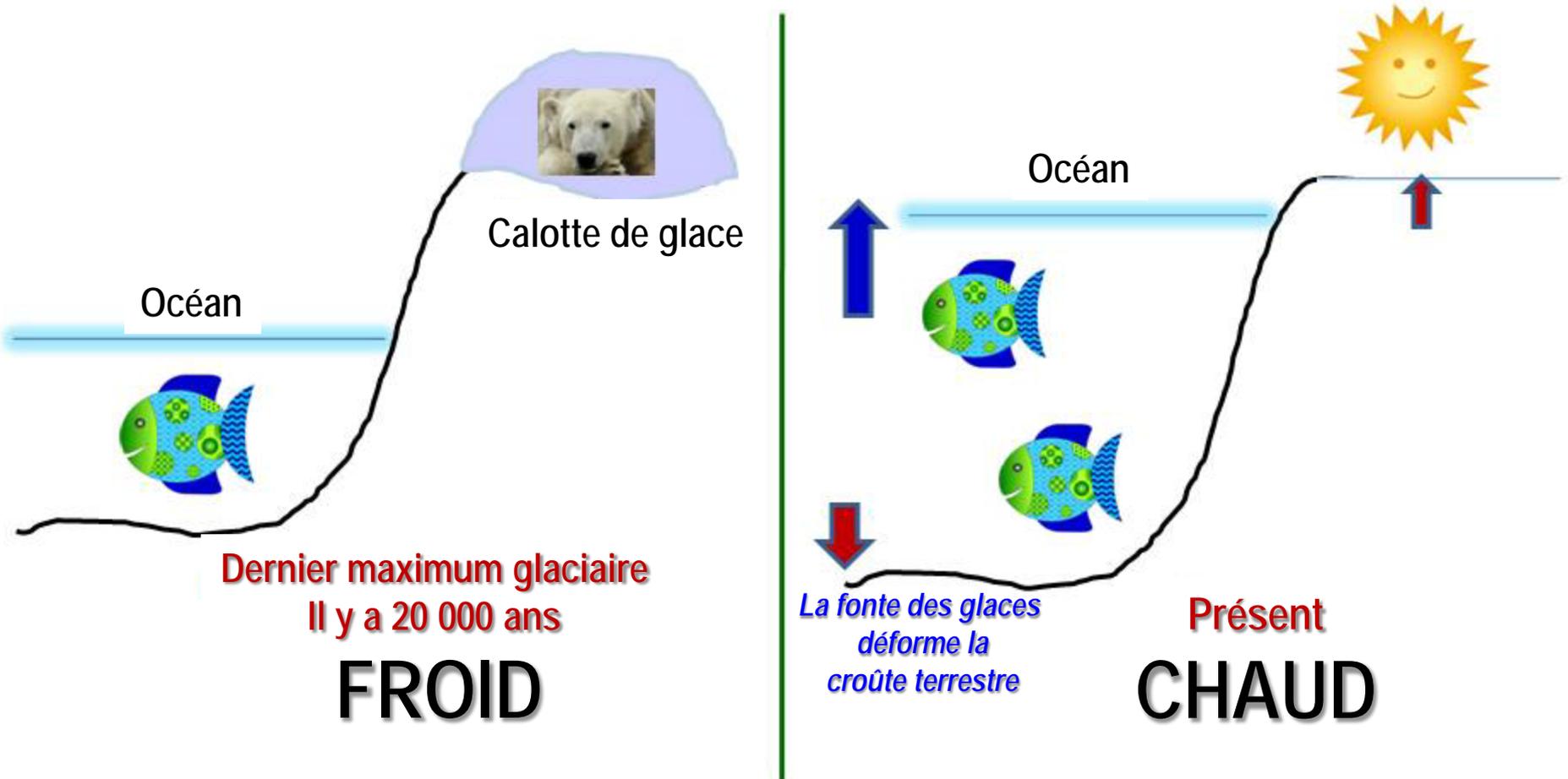
Autre source de variabilité régionale du niveau de la mer:
→ La redistribution des masses d'eau liée à la fonte des glaces déforme les bassins océaniques et modifie l'attraction mutuelle des masses d'eau/glace



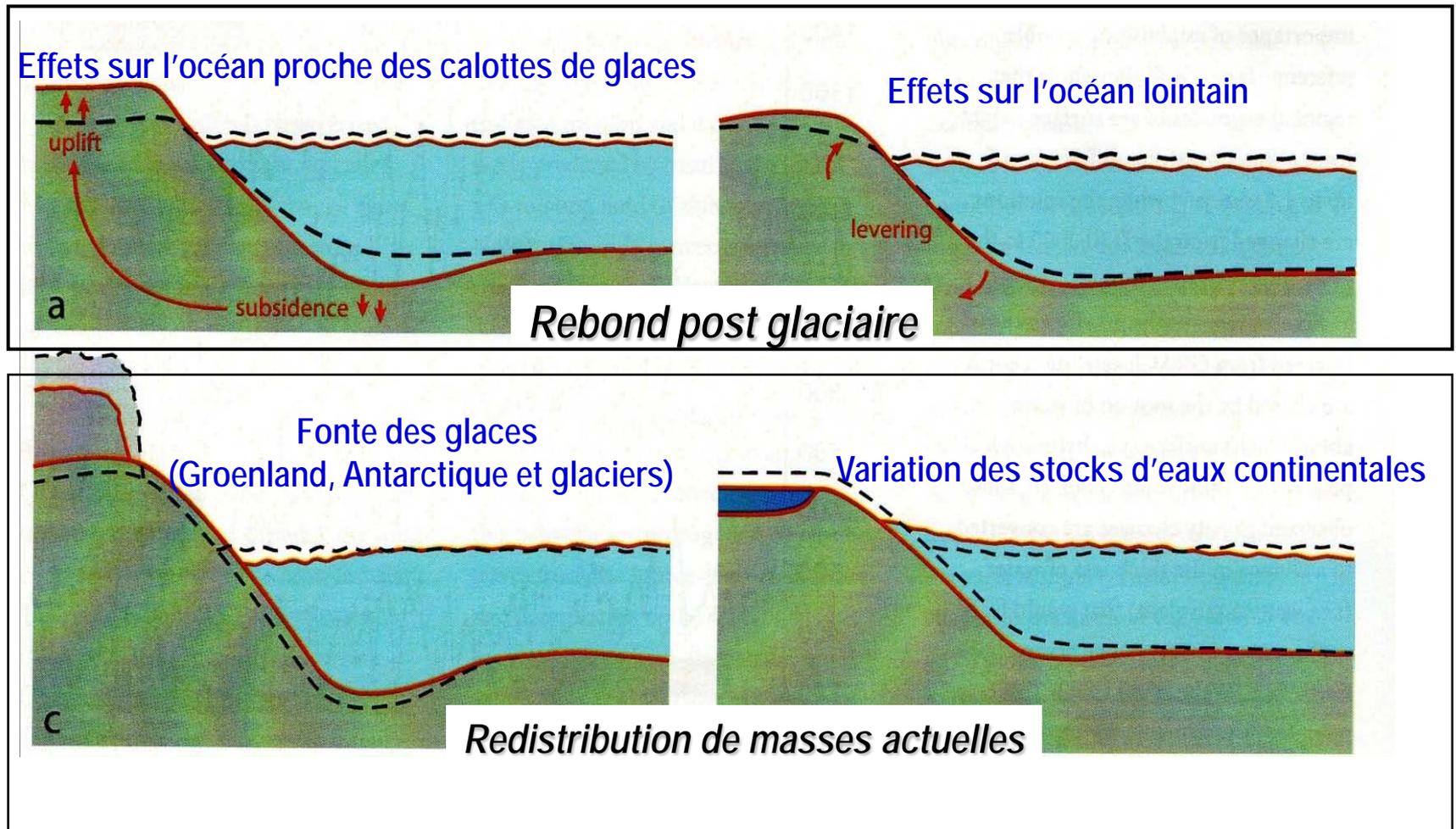
Le changement de forme des bassins océaniques se traduit par une variation du niveau de la mer



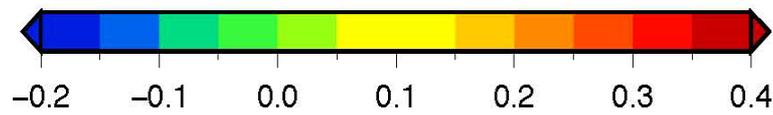
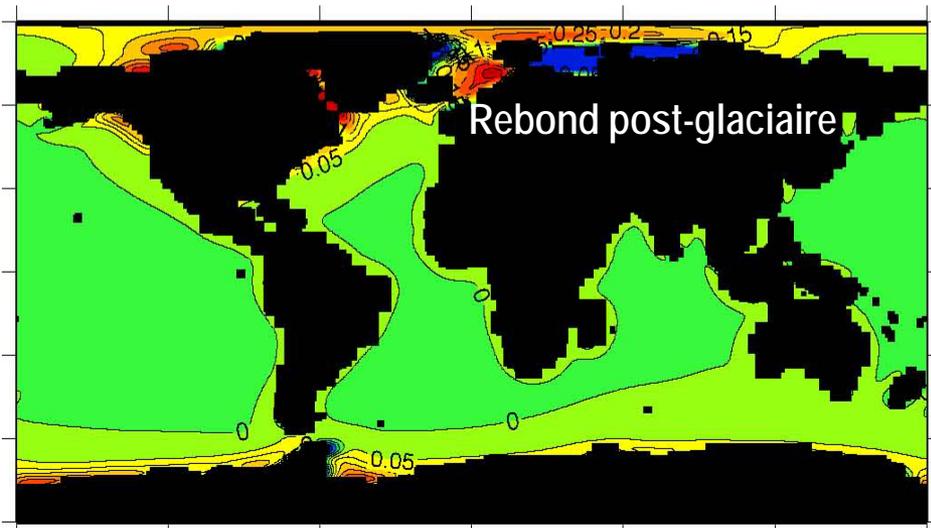
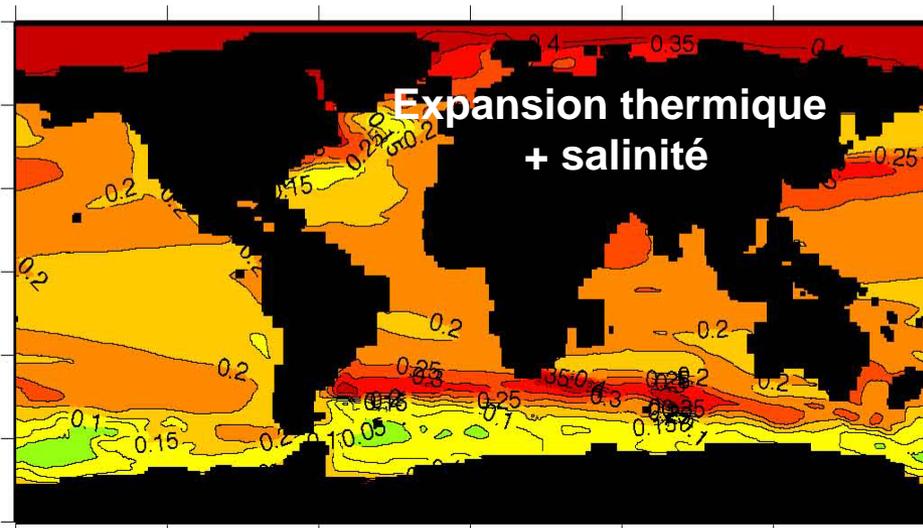
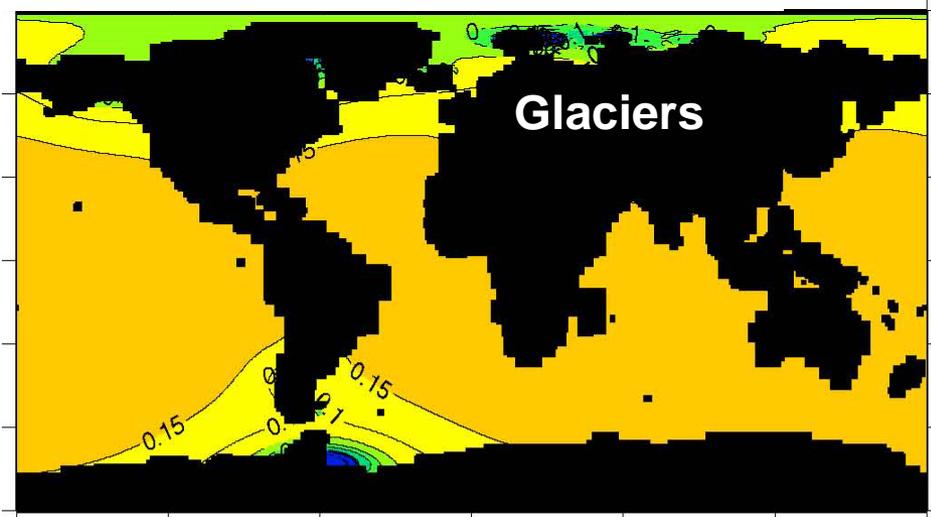
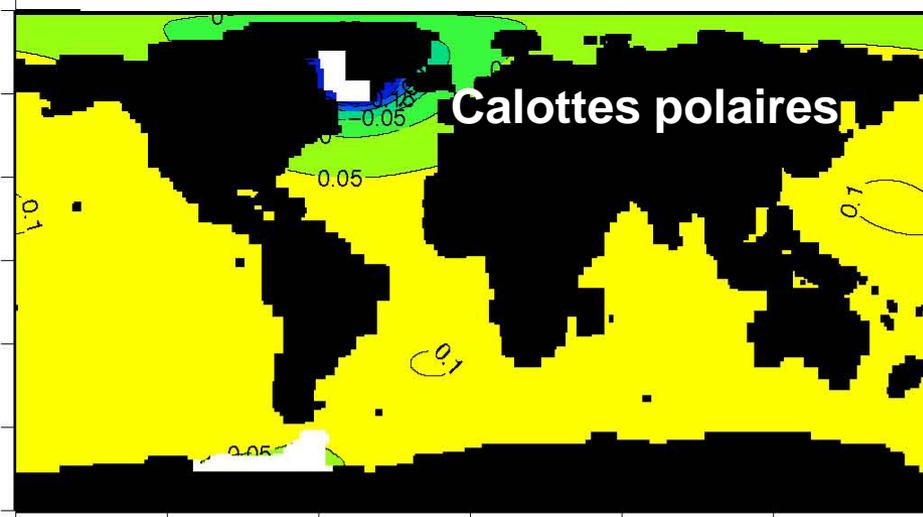
Effet de la fonte des glaces polaires sur le niveau de la mer



Variabilité régionale du niveau de la mer due aux redistributions de masses passées et actuelles



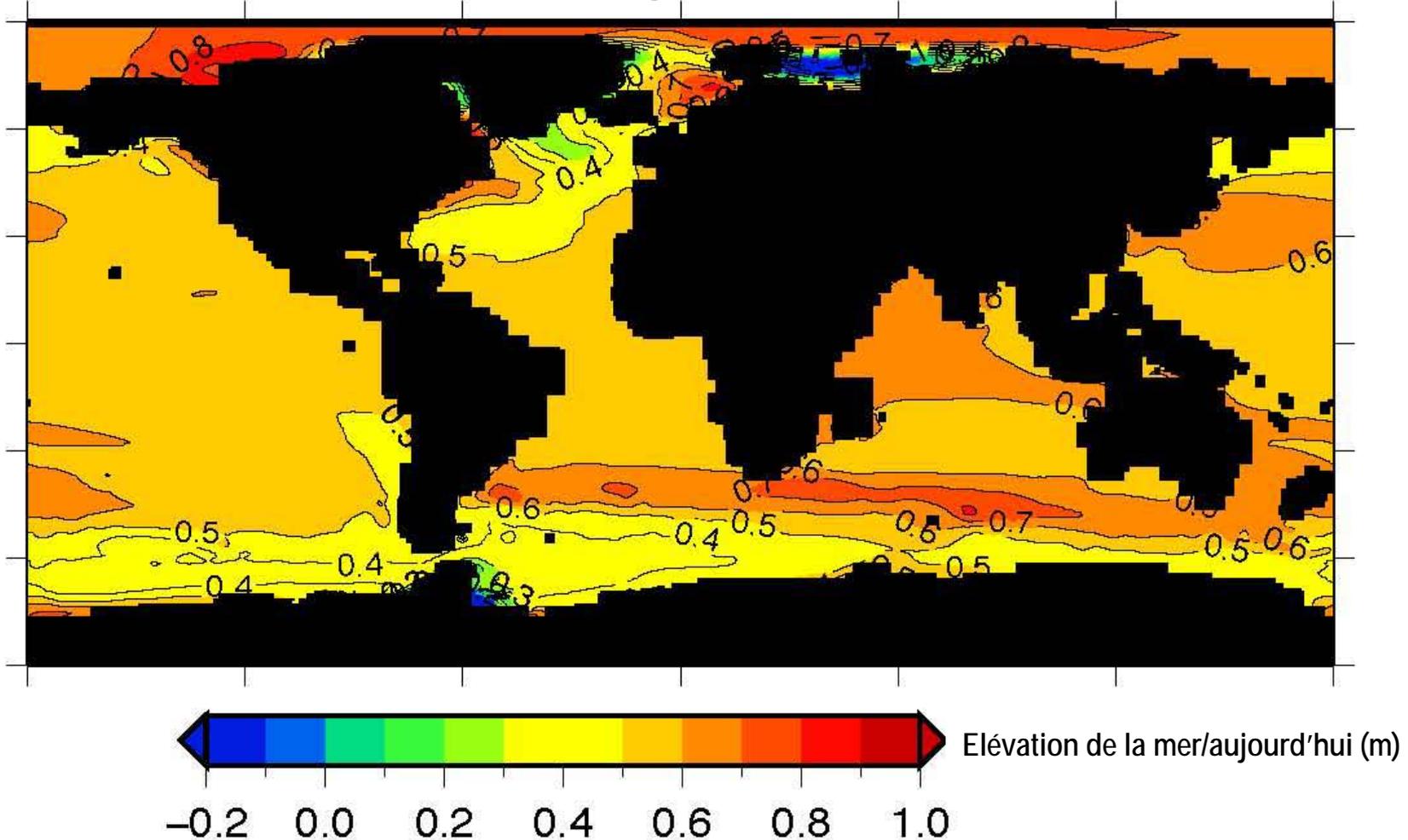
Hausse (relative) de la mer (en 2100) due aux différents facteurs



Élévation de la mer/aujourd'hui (m)

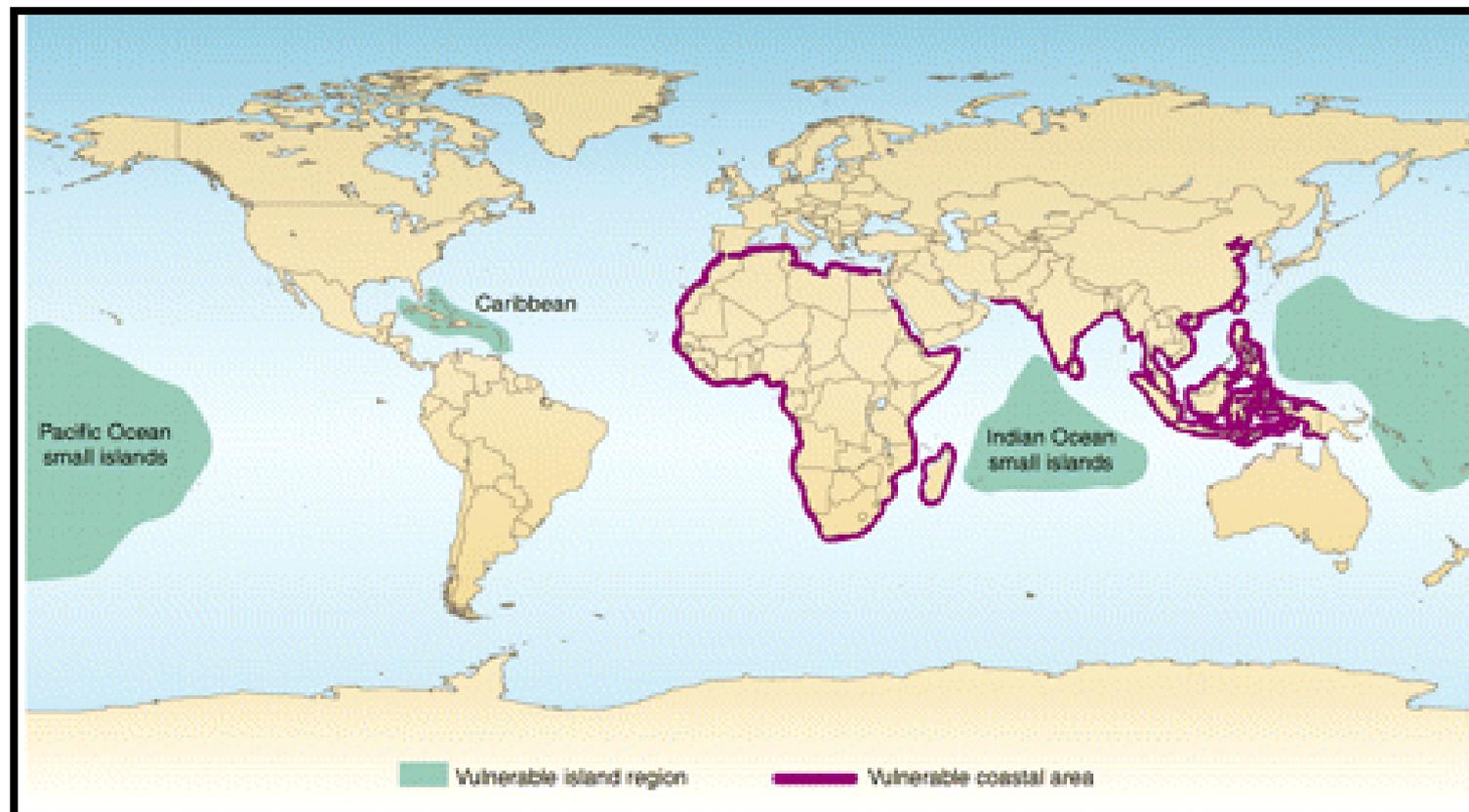
Hausse totale (relative) de la mer (en 2100)

→ effets stériques + fonte des glaces + déformation de la terre solide



Elévation totale
(hausse moyenne globale incluse, de 50 cm par rapport à aujourd'hui)

Les zones côtières les plus vulnérables





Et pour tout savoir plus sur la
modélisation du climat ...

→ Conférence de Hervé Le Treut

A serene ocean scene with a clear blue sky and a single white cloud. The text "Merci de votre attention" is centered in the middle of the image.

Merci de votre attention