



# La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace

## Leçon n°4

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

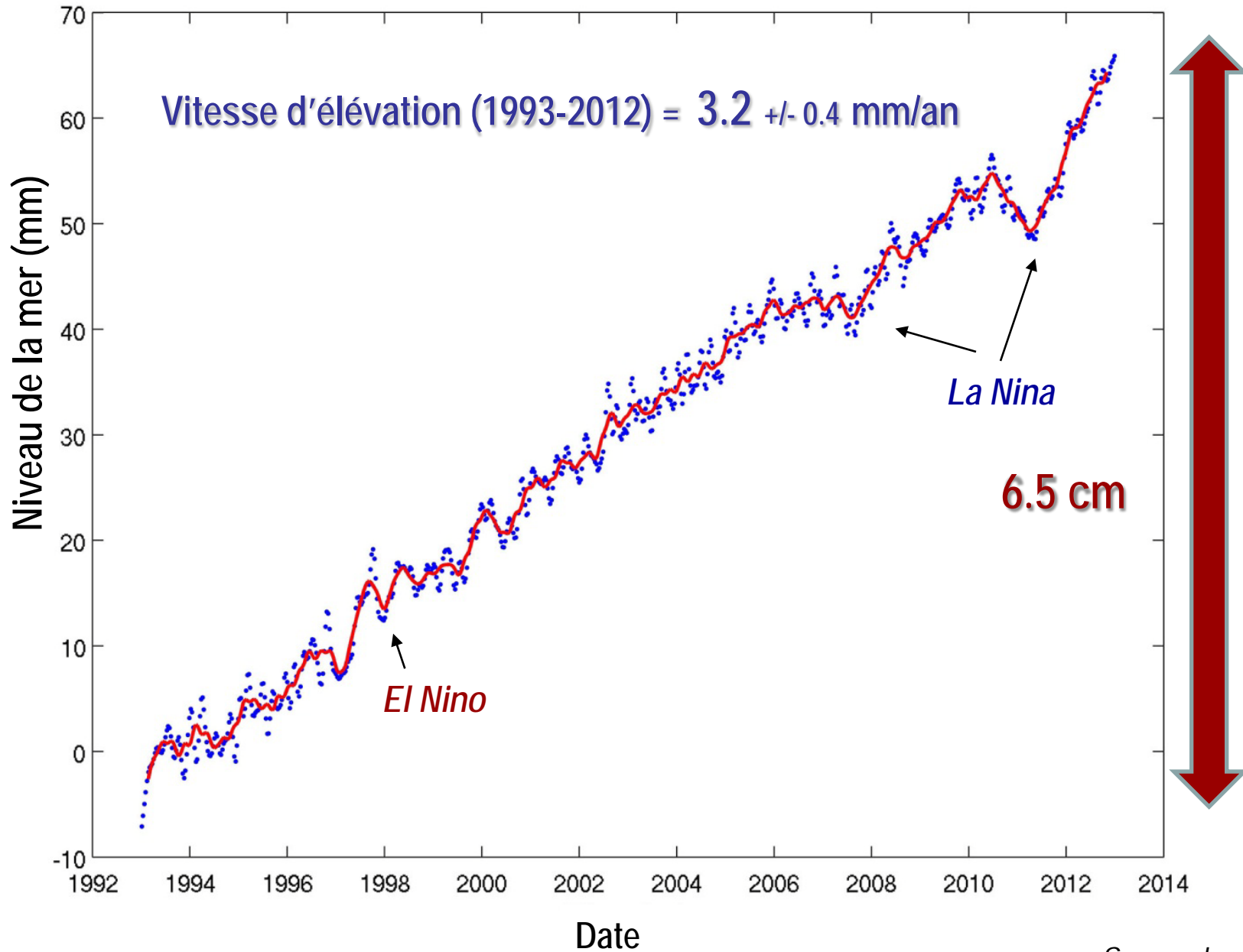
Anny Cazenave  
Collège de France

# La hausse de la mer au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (en rouge : marégraphes; en bleu : satellites altimétriques)



Updated: 19/04/2013

## Niveau moyen global de la mer par altimétrie spatiale



Source: Legos-CLS

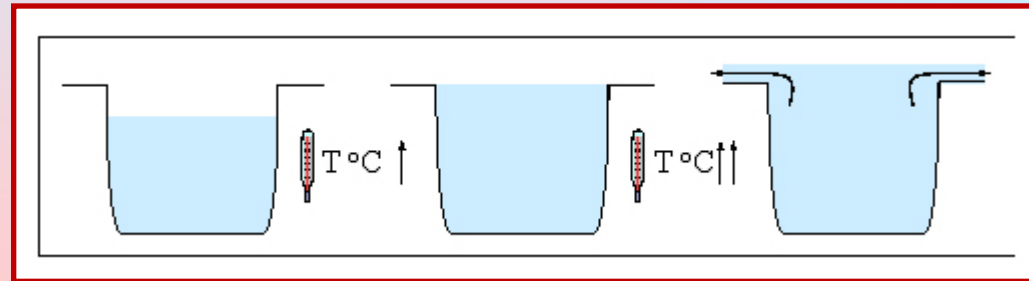


**Question:**

**- 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



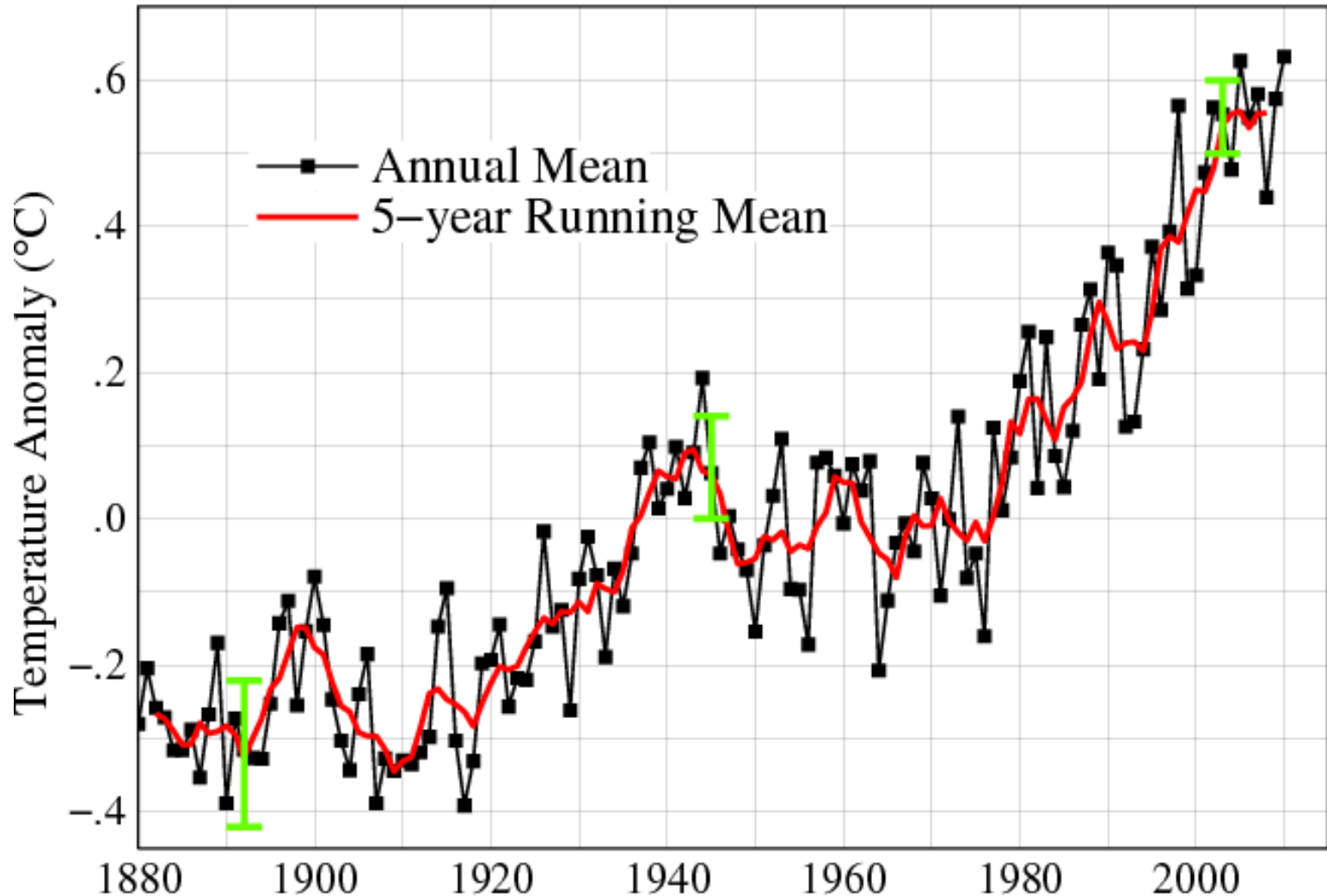
**-Apports d'eau douce**  
(fonte des glaces  
+ eaux continentales)



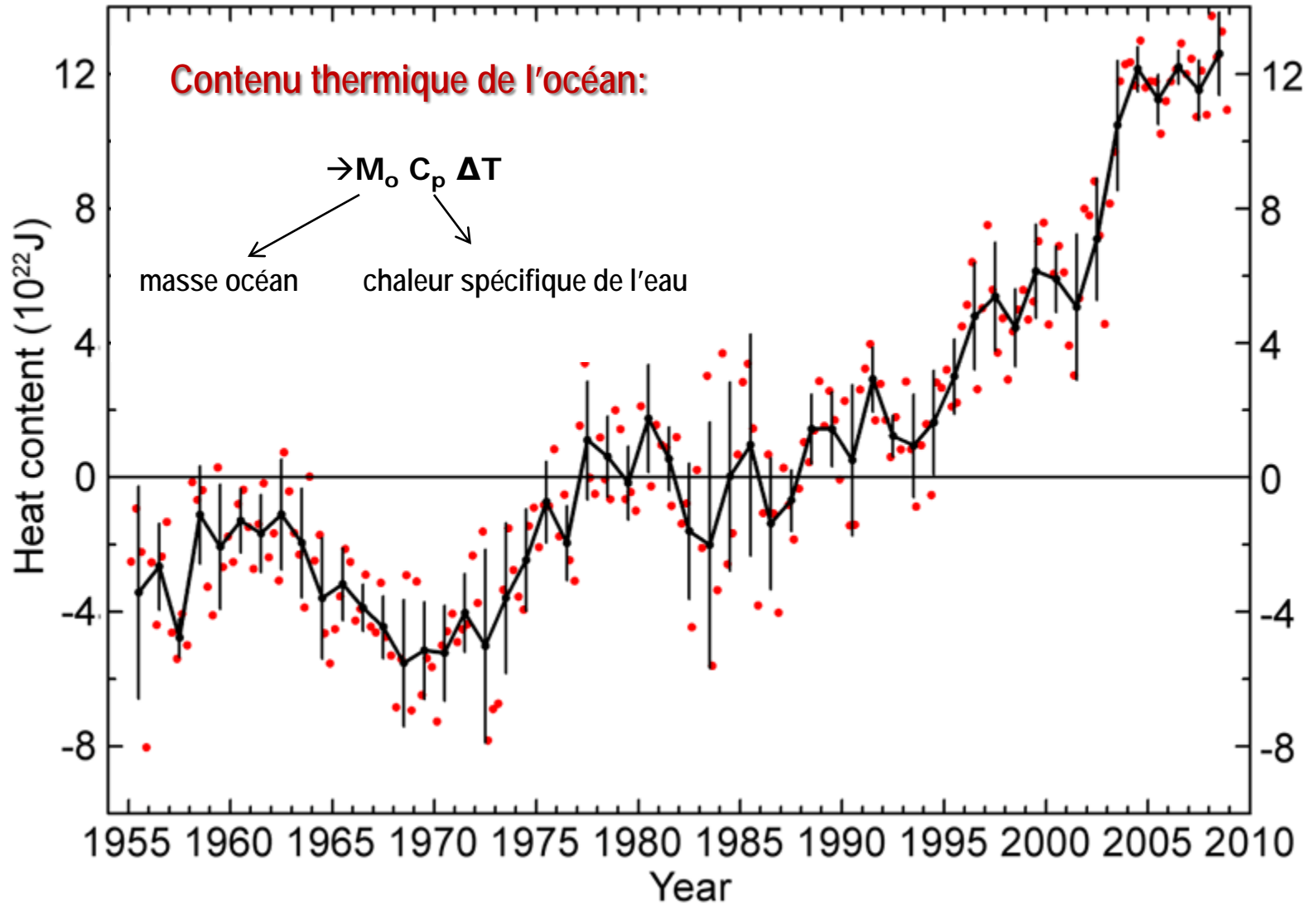
Depuis quelques décennies,  
la Terre se réchauffe



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....



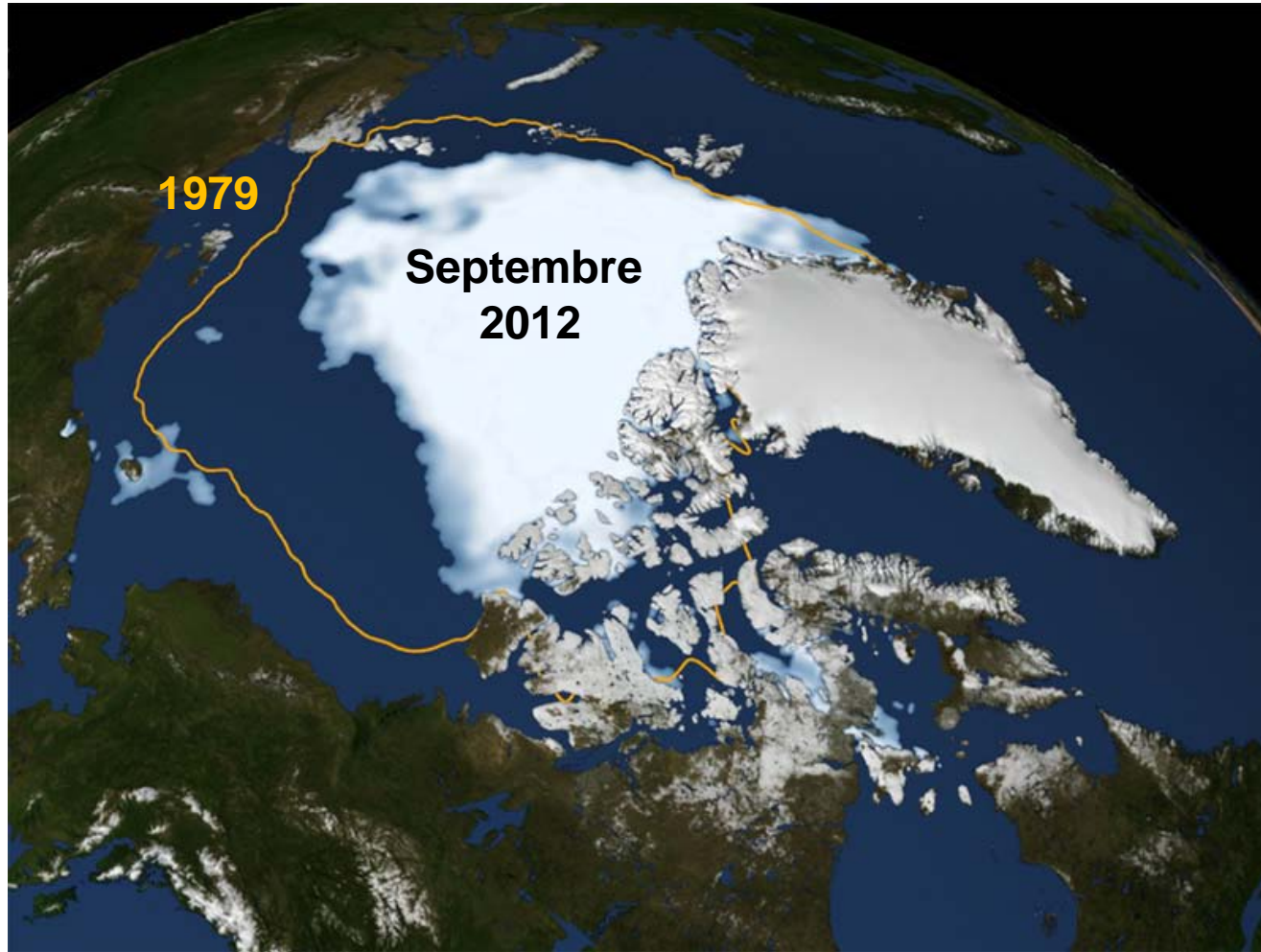
La mer monte!





**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)*

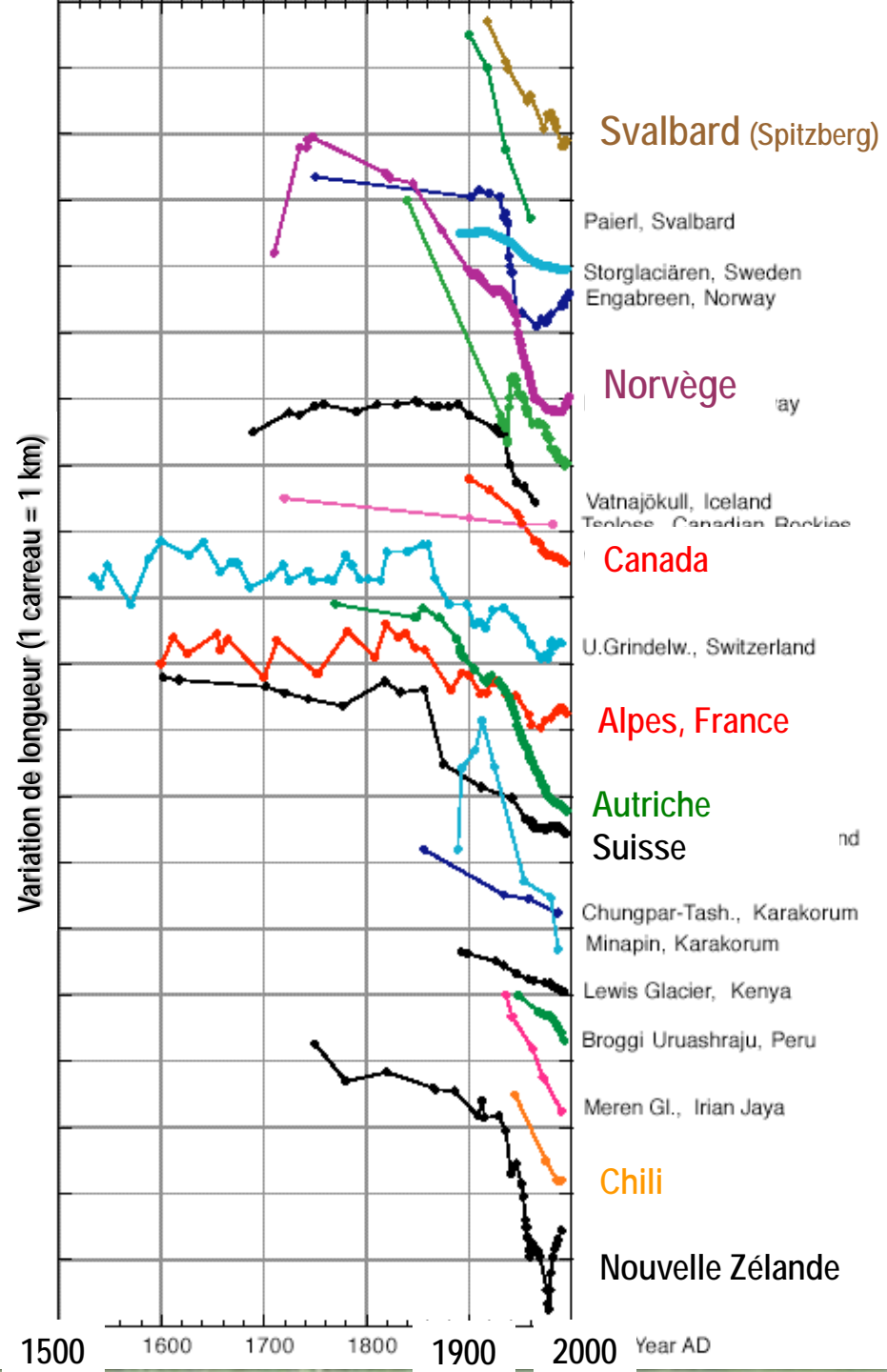
**1900**

**2008**

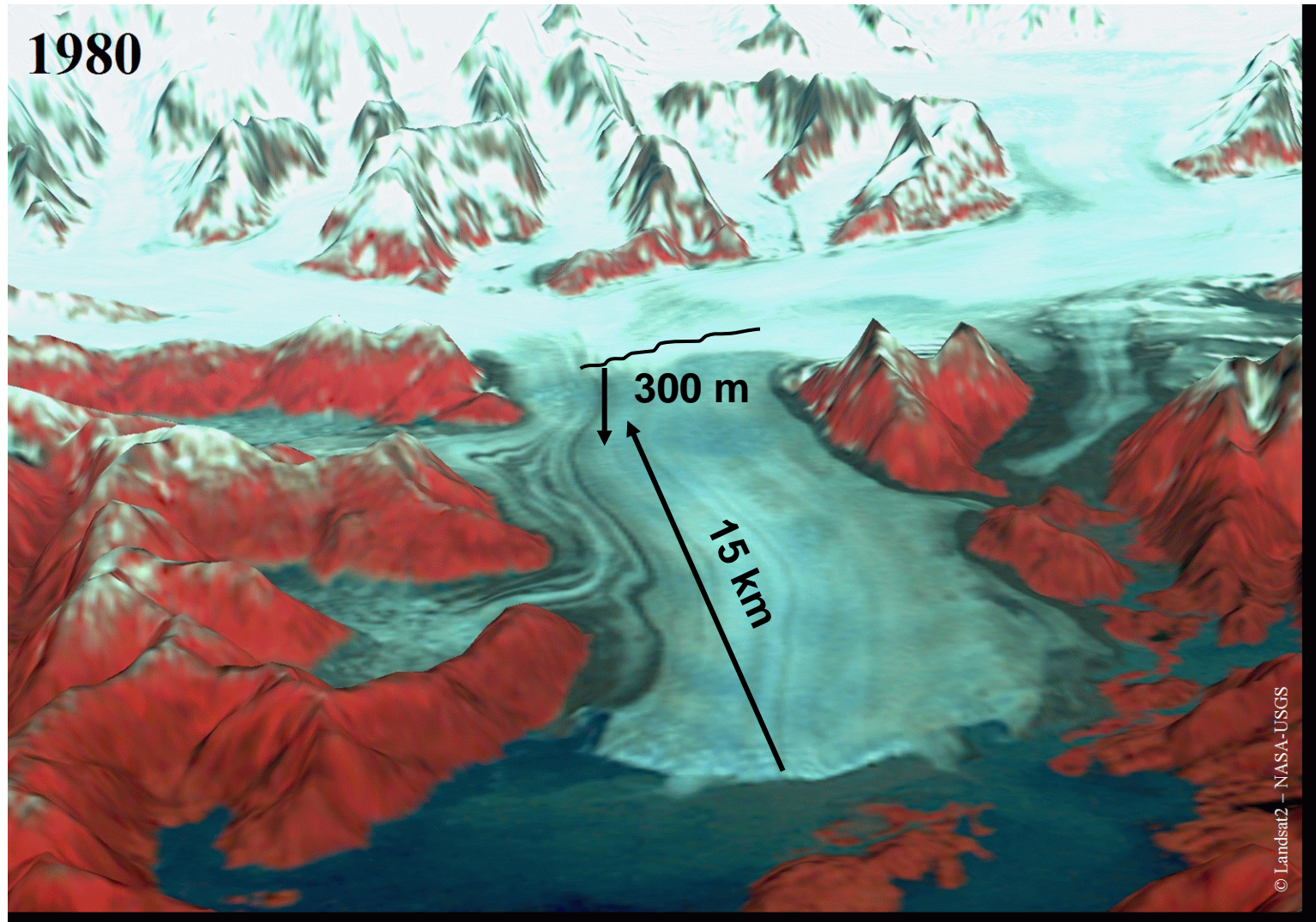
# Recul des glaciers de montagne



Leclerc et al., 2011



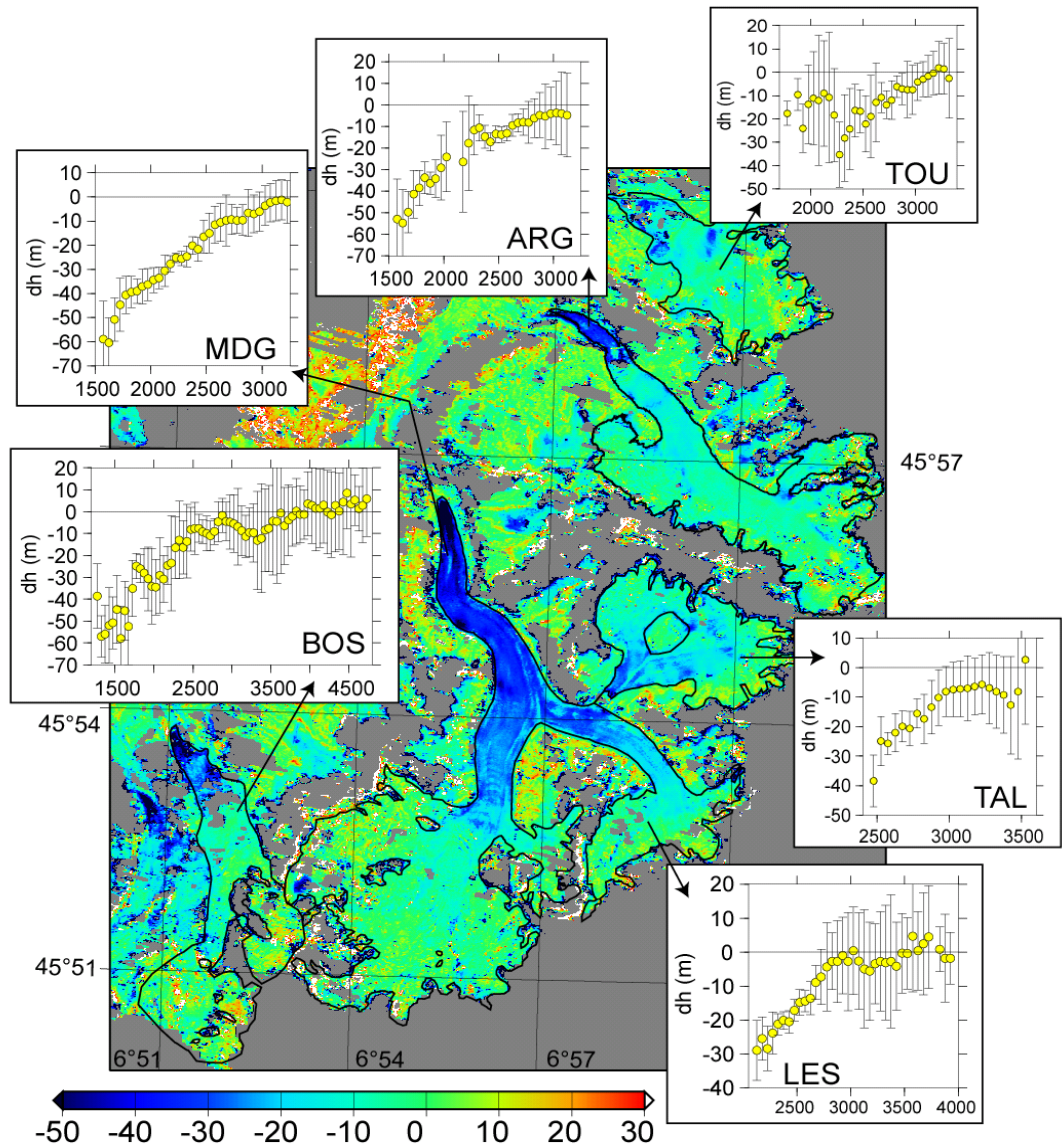
# Recul et amincissement des glaciers mesurés par imagerie « satellite »



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

# Fonte des glaciers alpins entre 1979 et 2003

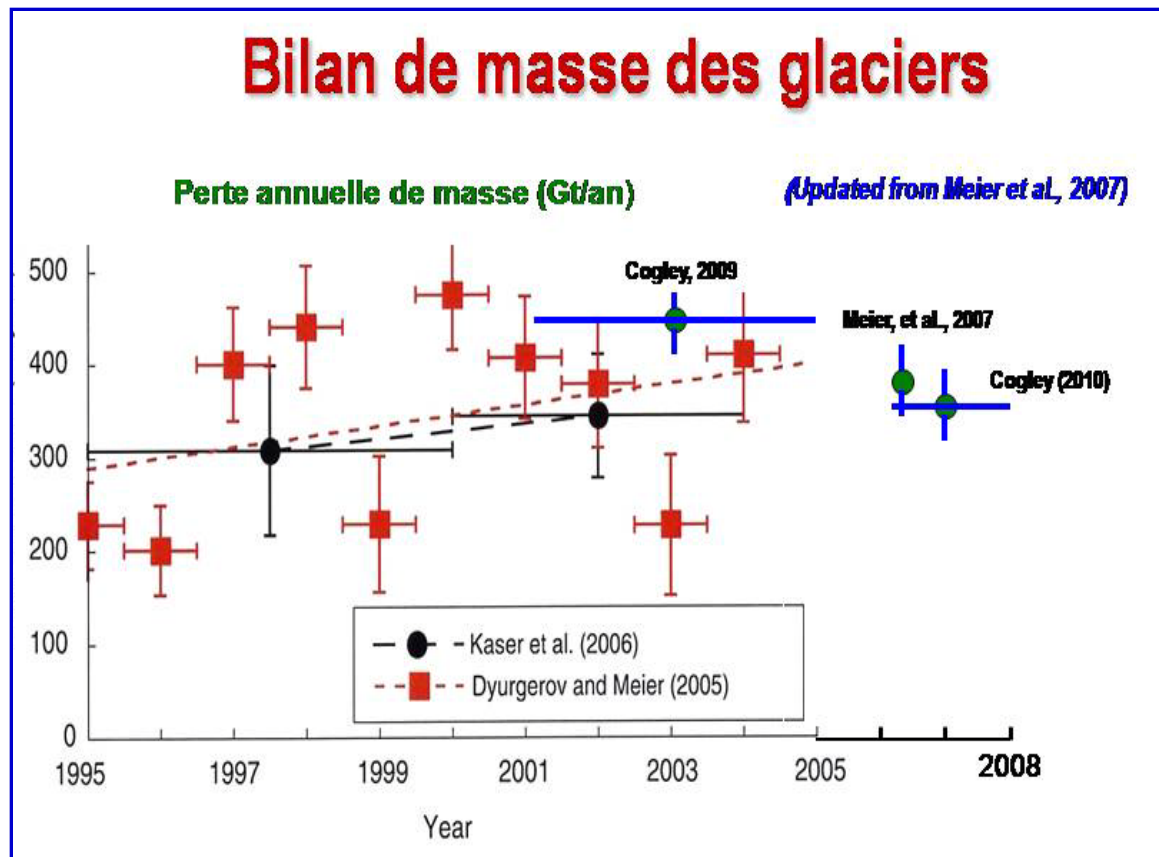
Image SPOT 5  
du massif  
du Mont Blanc





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

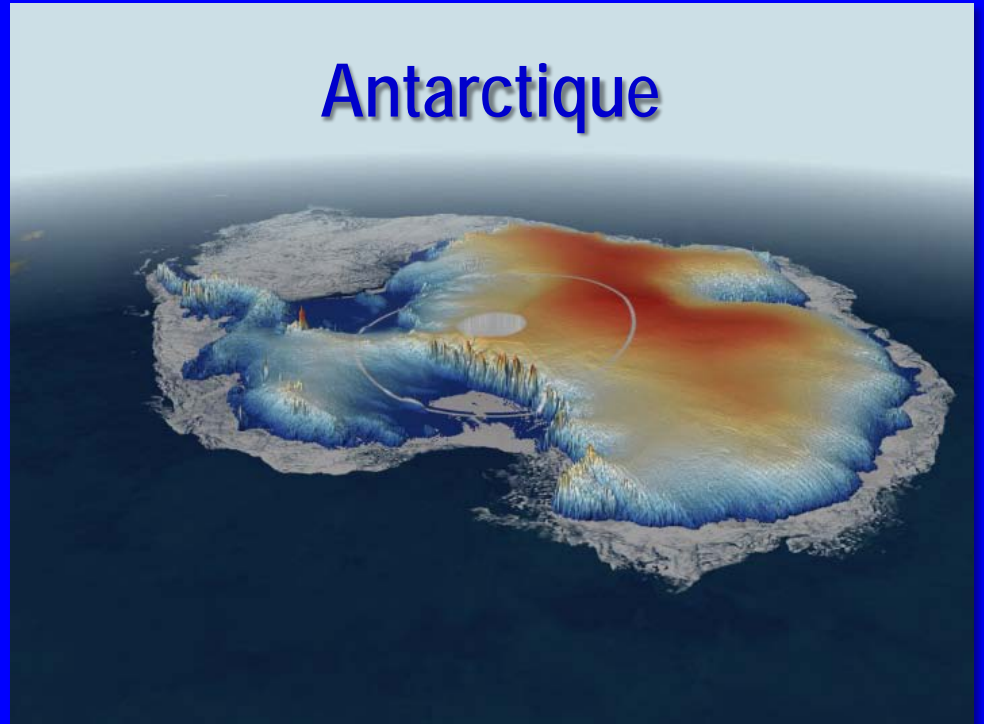
# Les calottes polaires

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

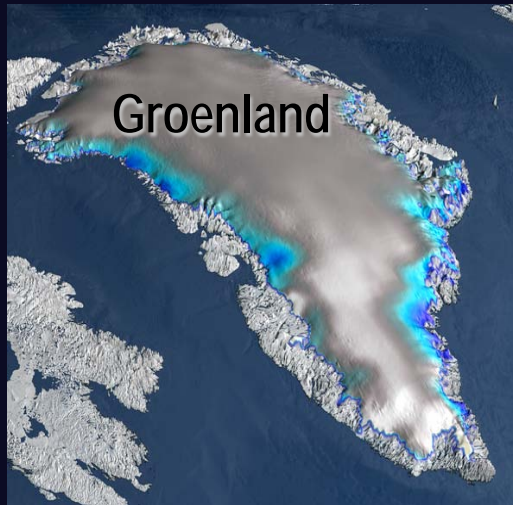


*Groenland*

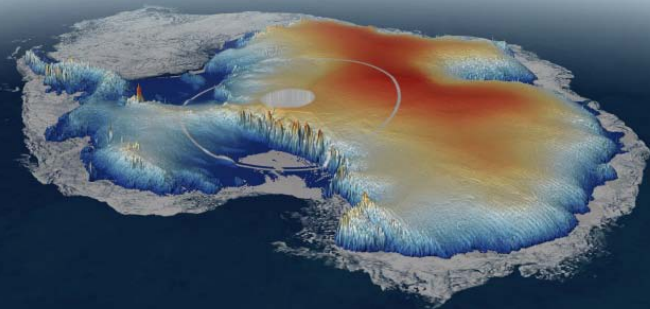
## Antarctique



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



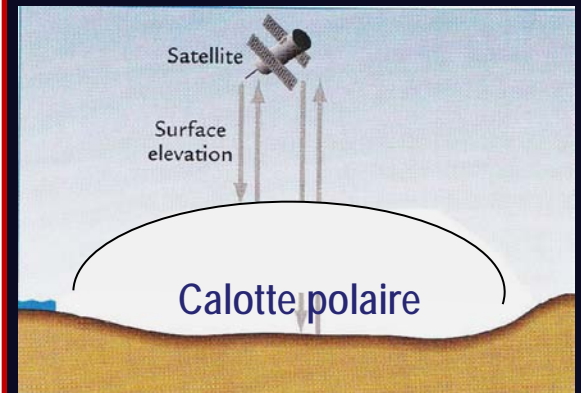
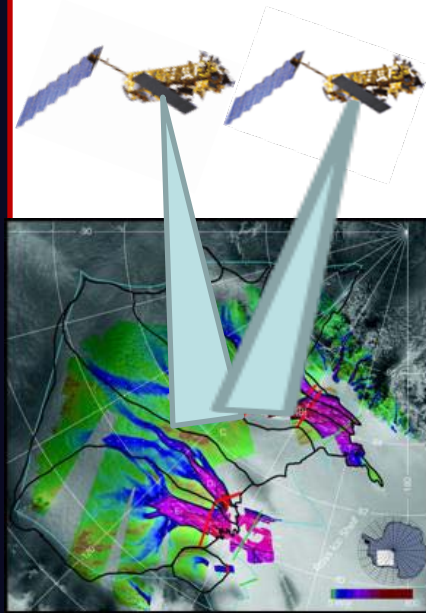
## Antarctique



## Gravimétrie spatiale « GRACE »



## Interférométrie radar

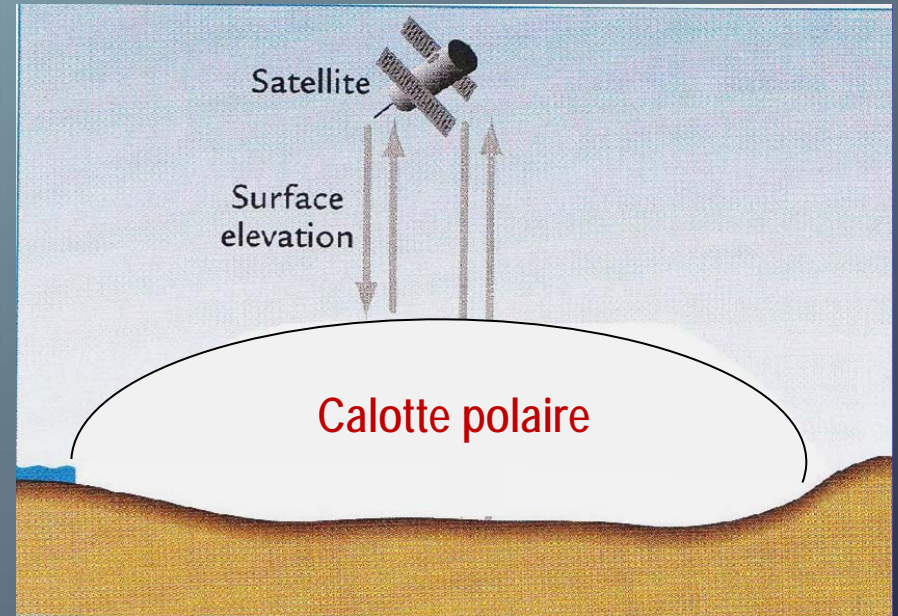
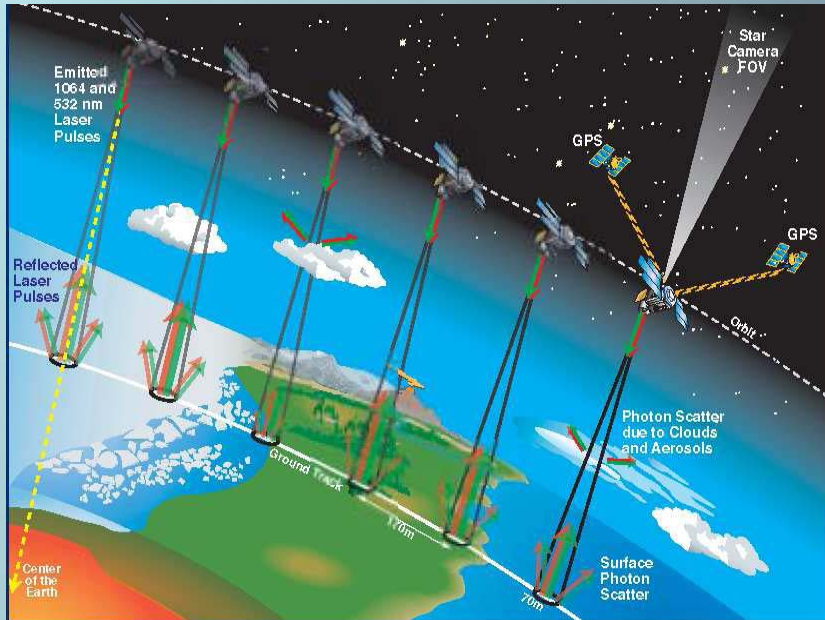


## Altimétrie radar et laser

**IceSat**

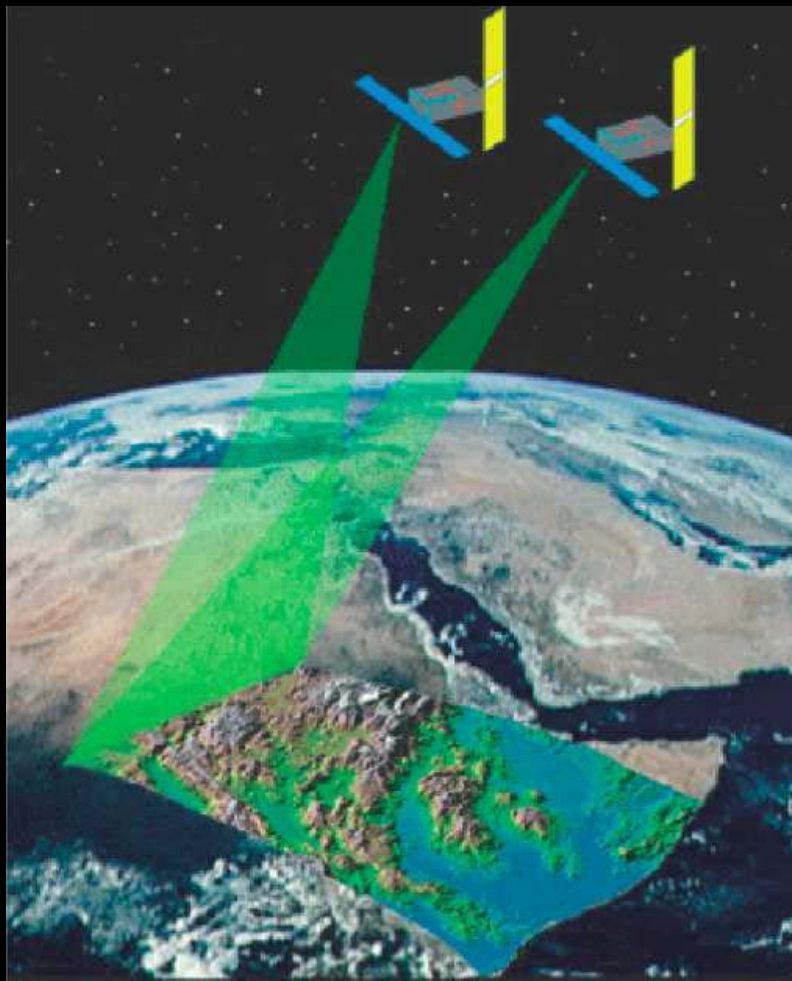


# Altimétrie Radar et Laser



Variation de l'altitude de la calotte

# Interférométrie Radar



Groenland



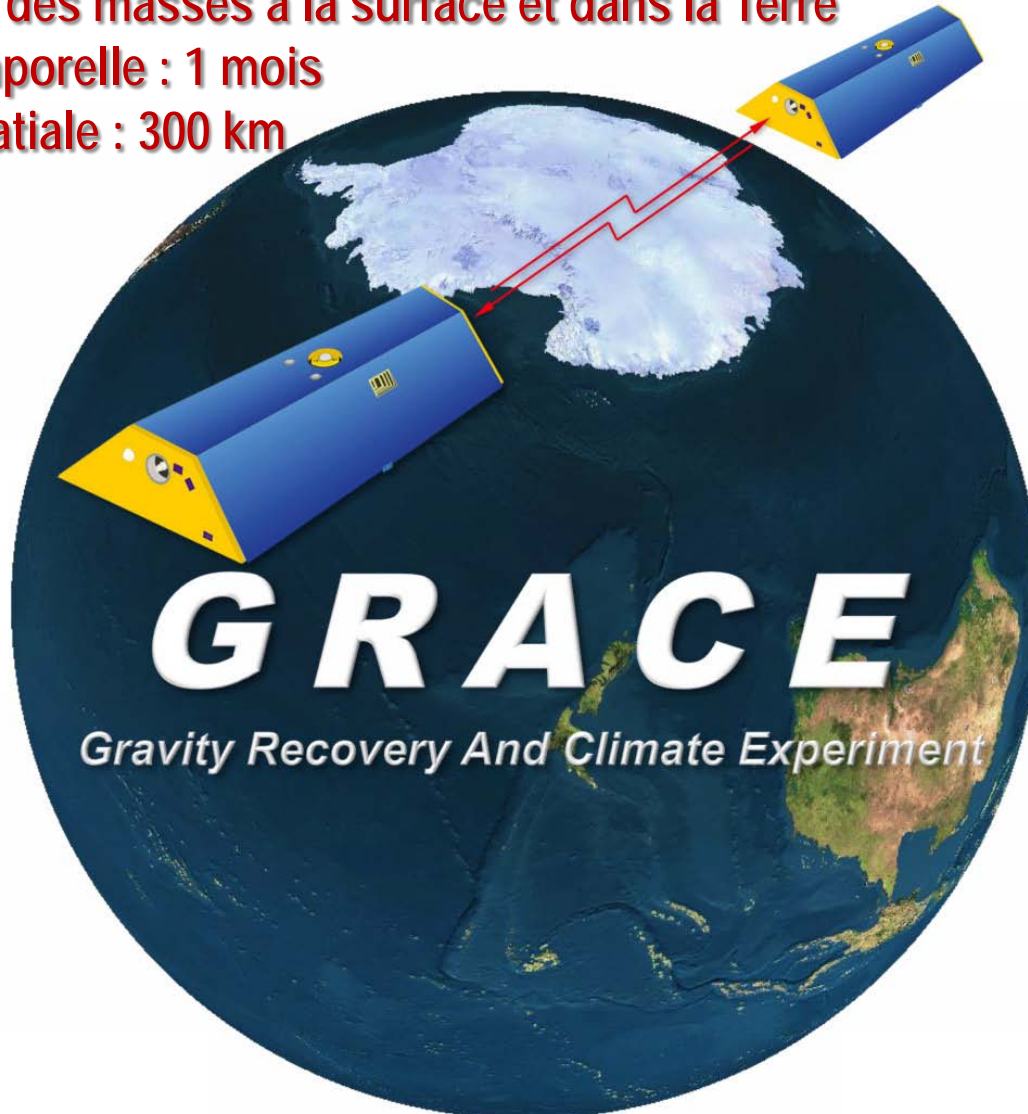
## Mission GRACE

Lancée en 2002

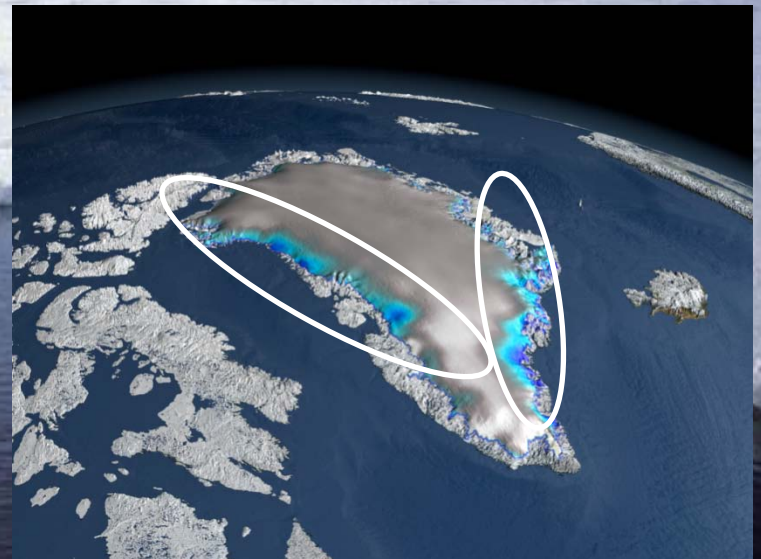
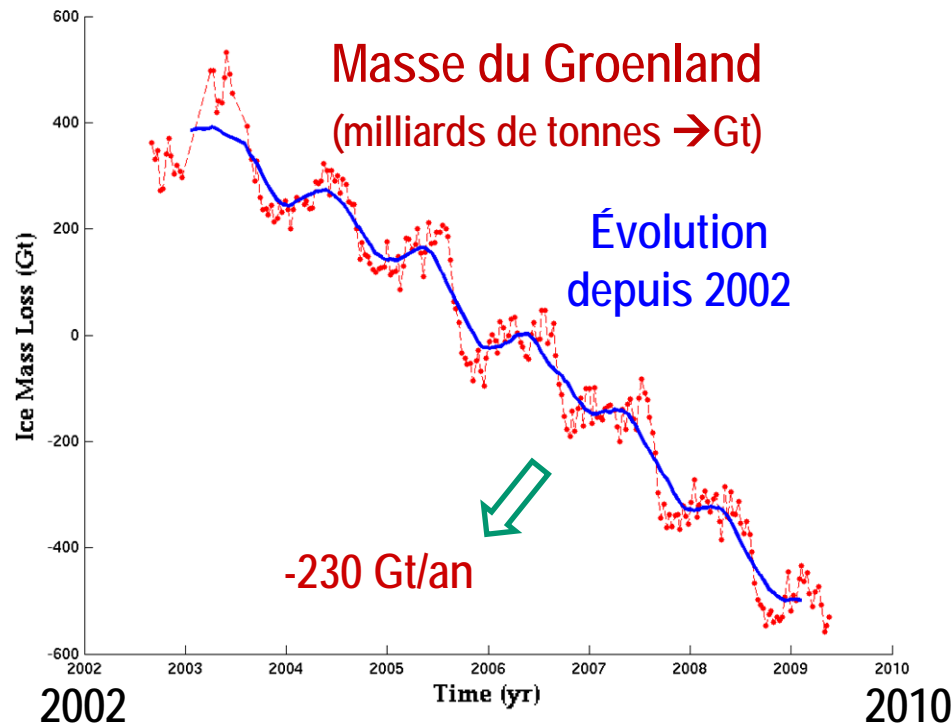
Mesur les variations spatio-temporelles du champ de gravité de la Terre

→ redistribution des masses à la surface et dans la Terre

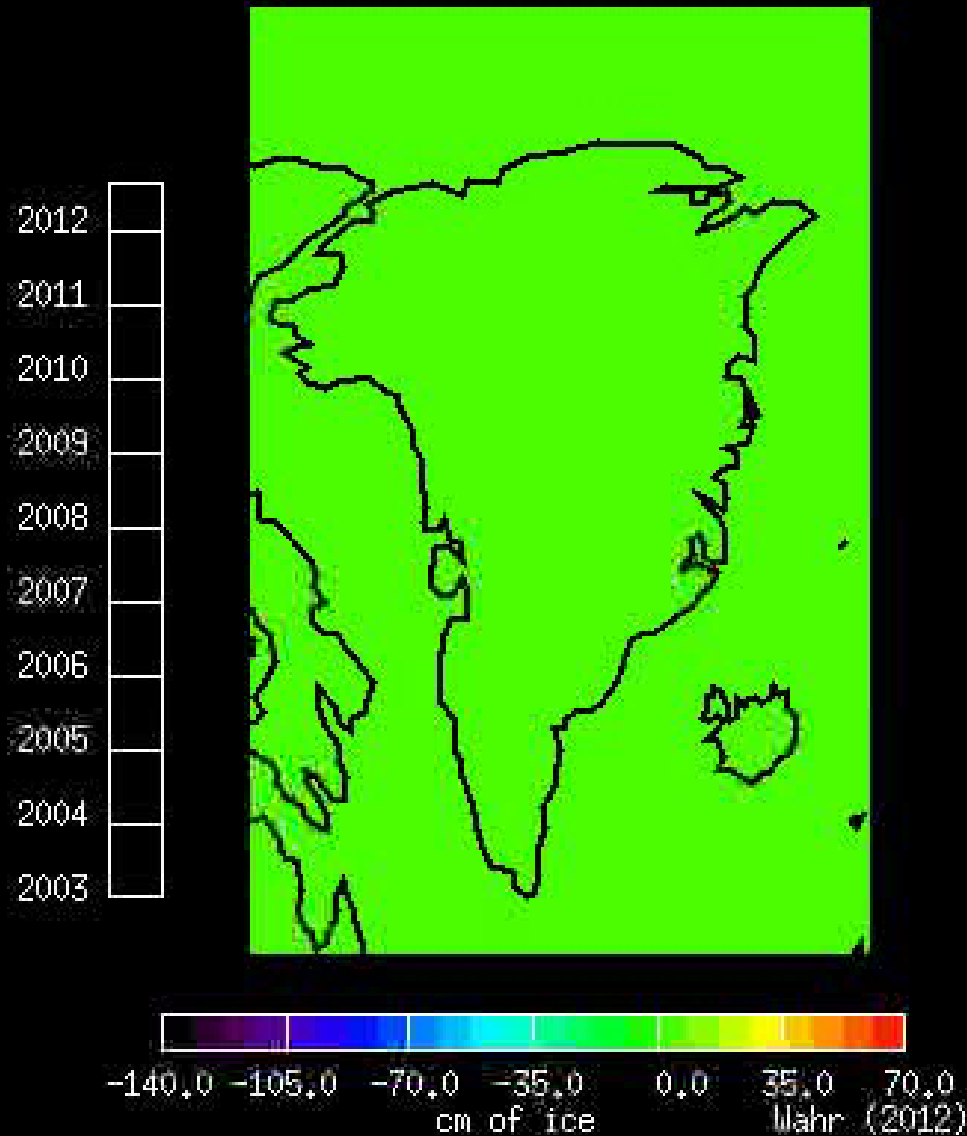
- Résolution temporelle : 1 mois
- Résolution spatiale : 300 km



# 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

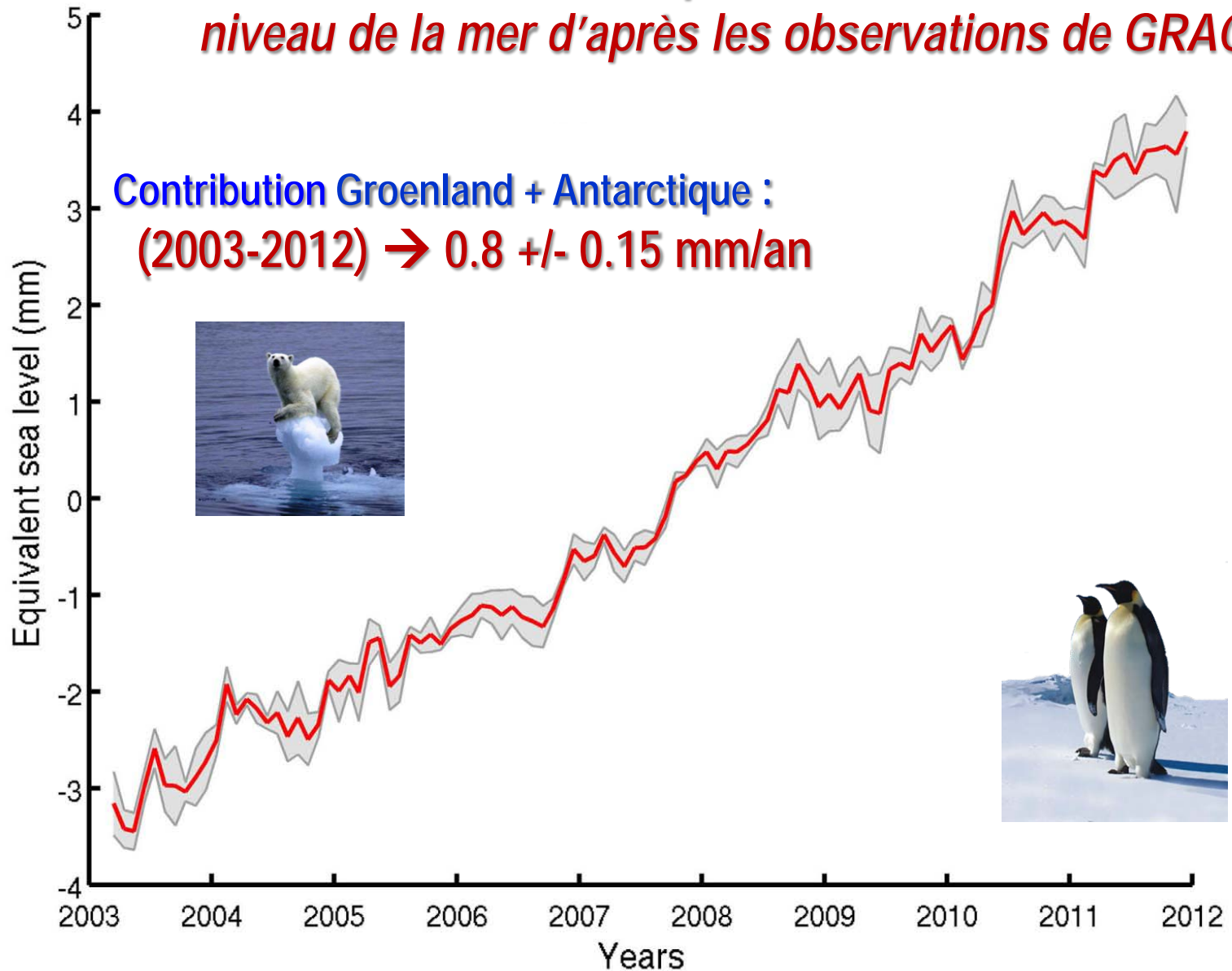


Source: J. Wahr

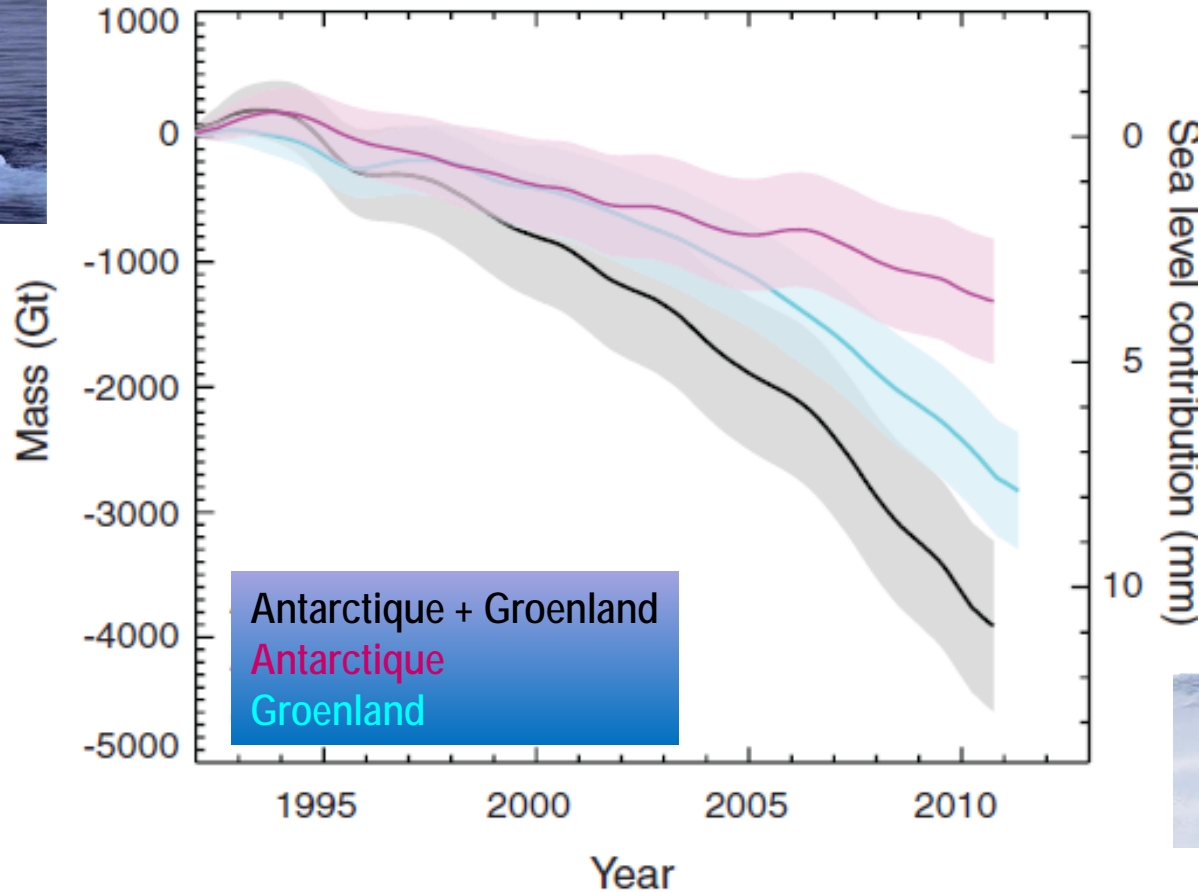


# *Contribution des calottes polaires à la hausse récente du niveau de la mer d'après les observations de GRACE*

**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 :

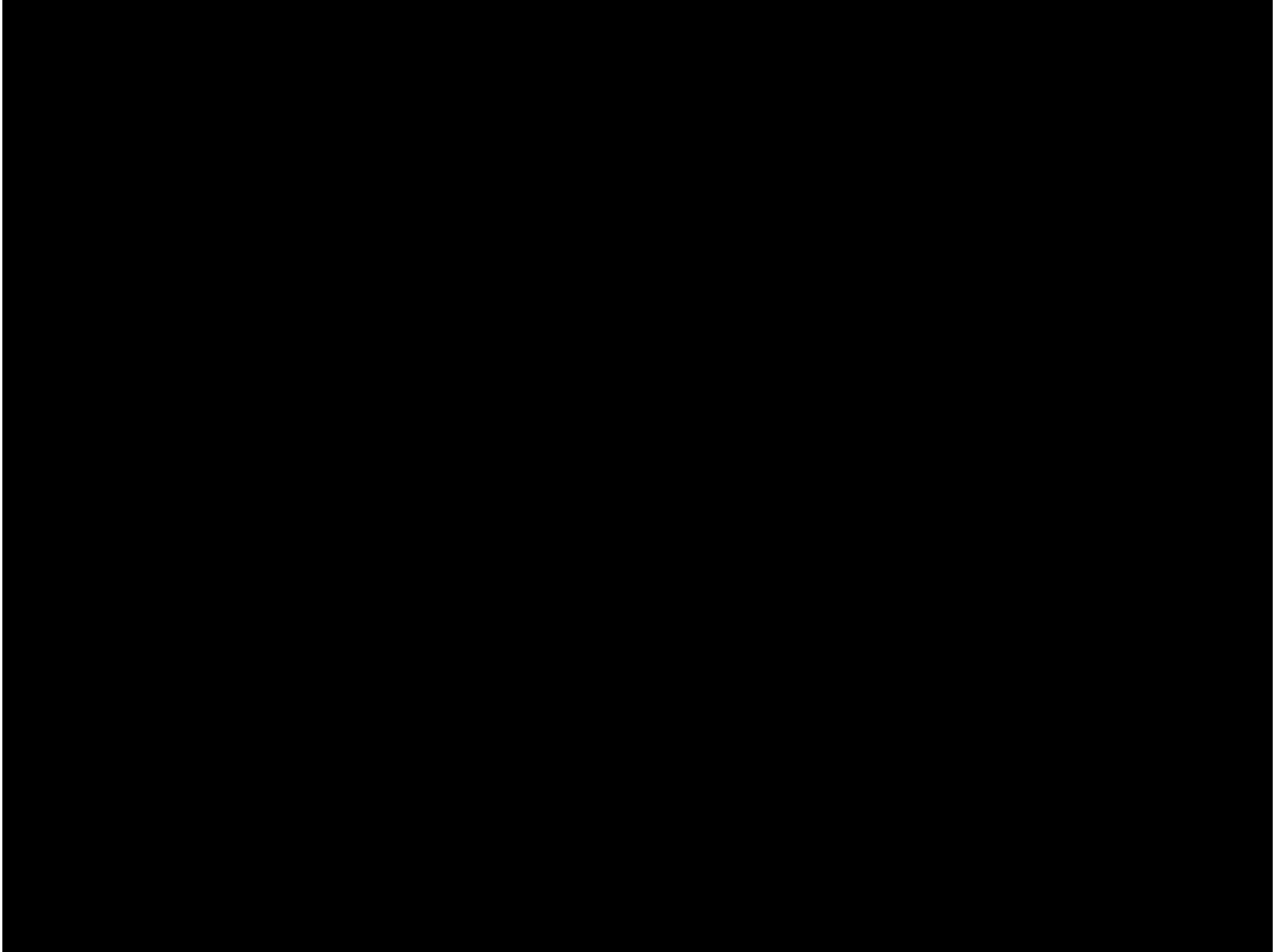
(1993-2010) → 0.7 +/- 0.2 mm/an

(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)



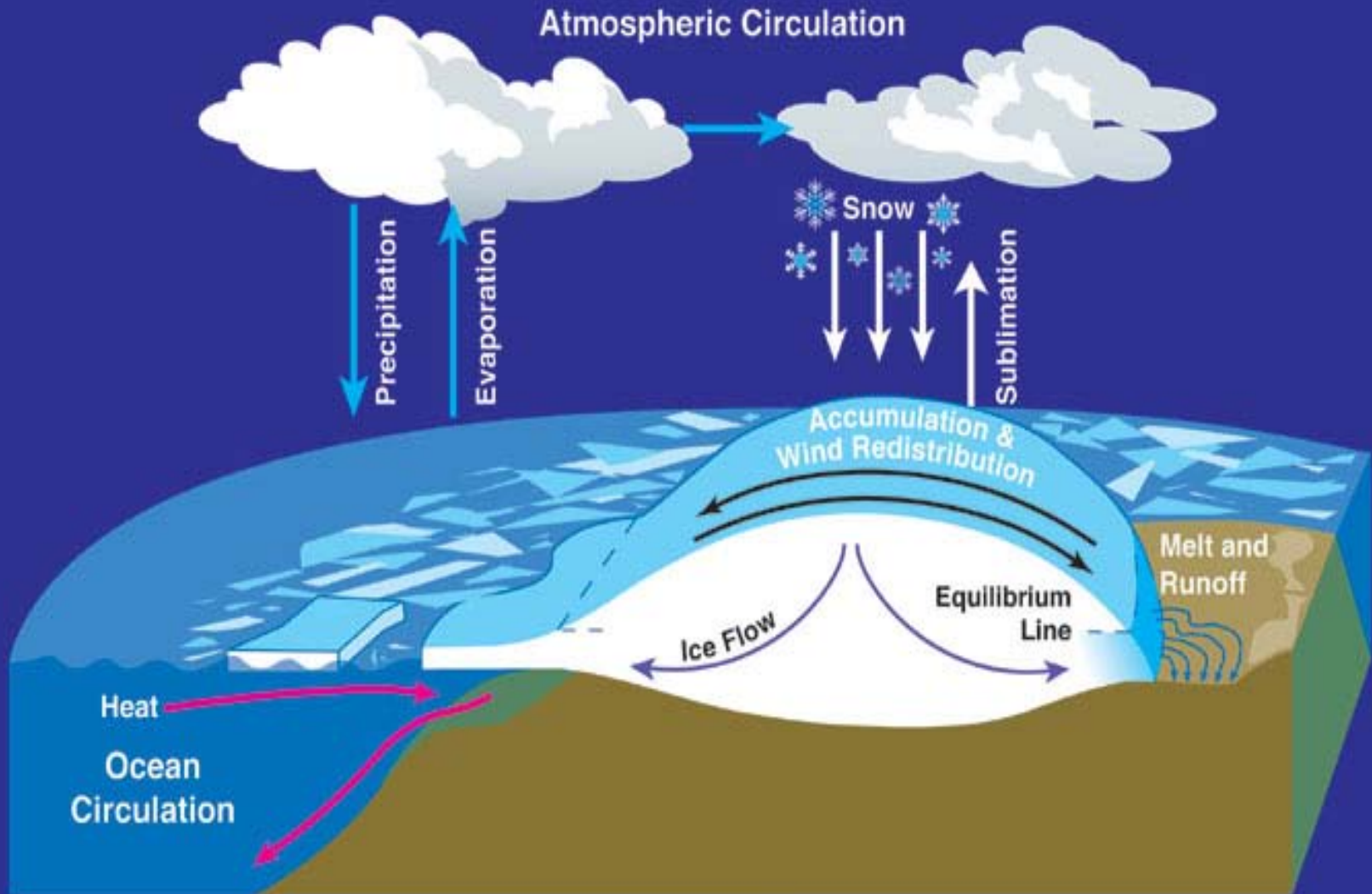
ARND BRONKHORST

04/17/2003



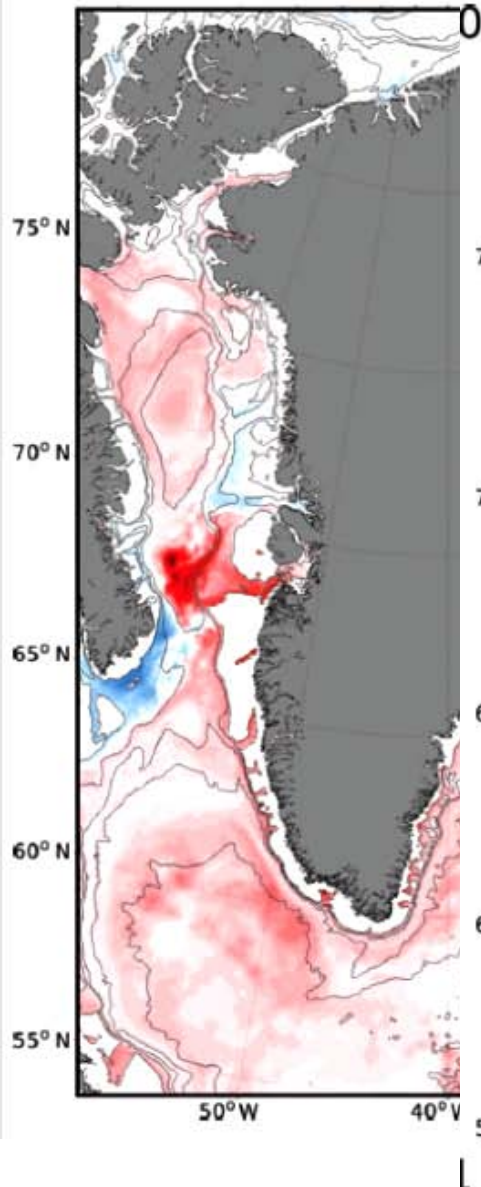
# Variation de masse des calottes polaires

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

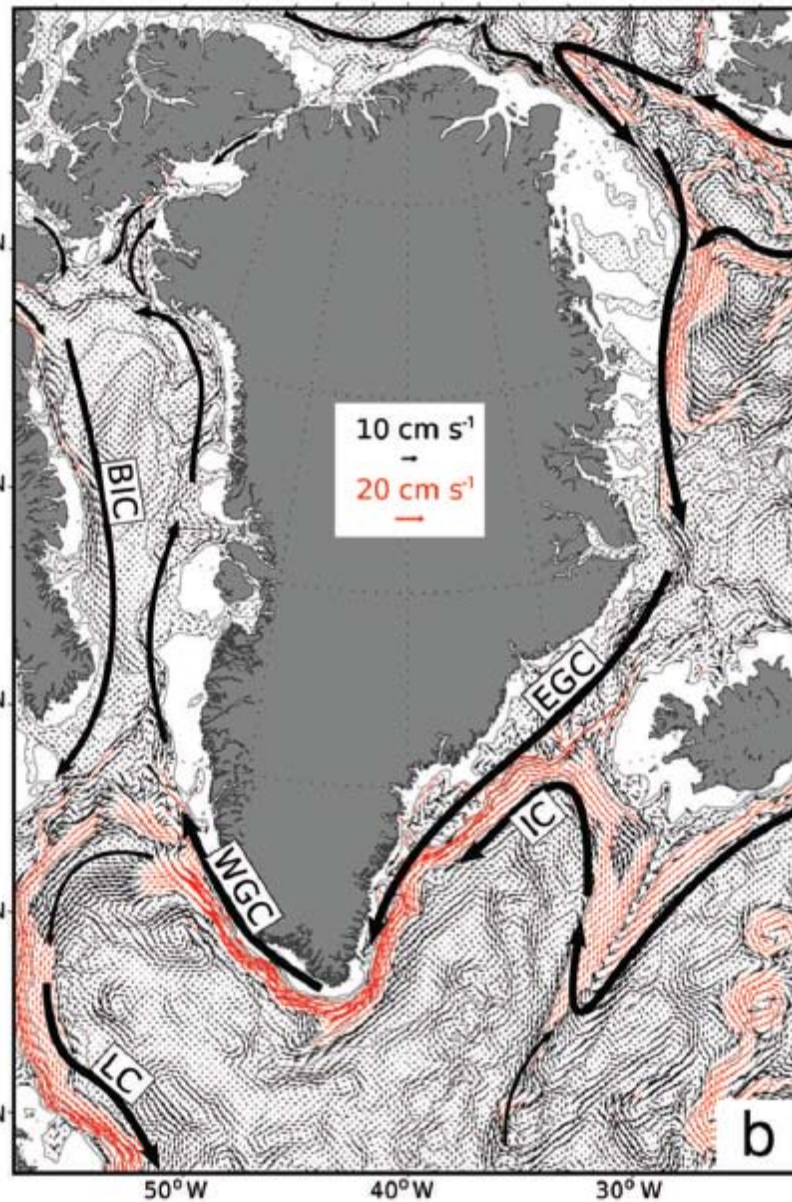
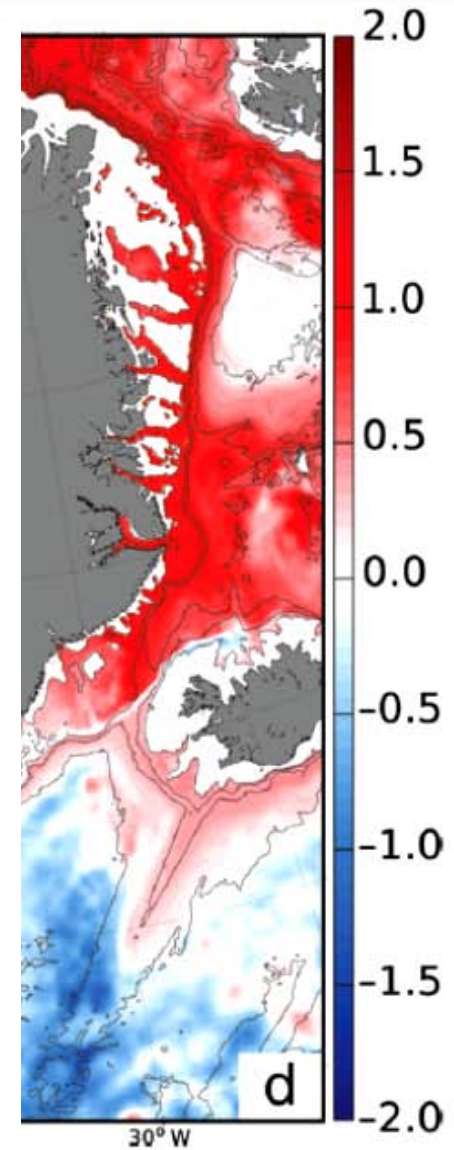


Anomalies de température de sub-surface (°C)  
(par rapport à la moyenne 1992-2009)

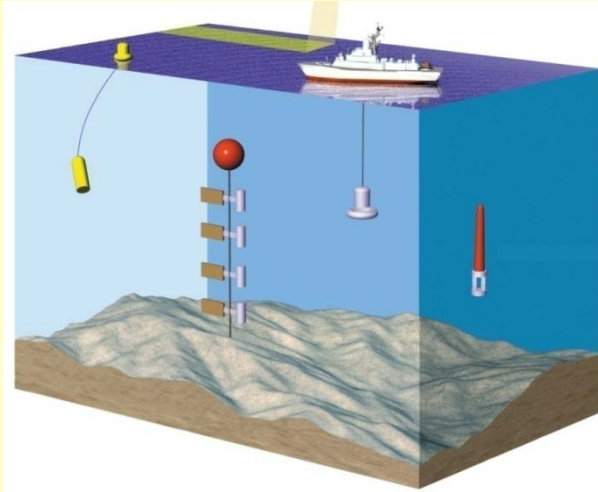
2001



2009



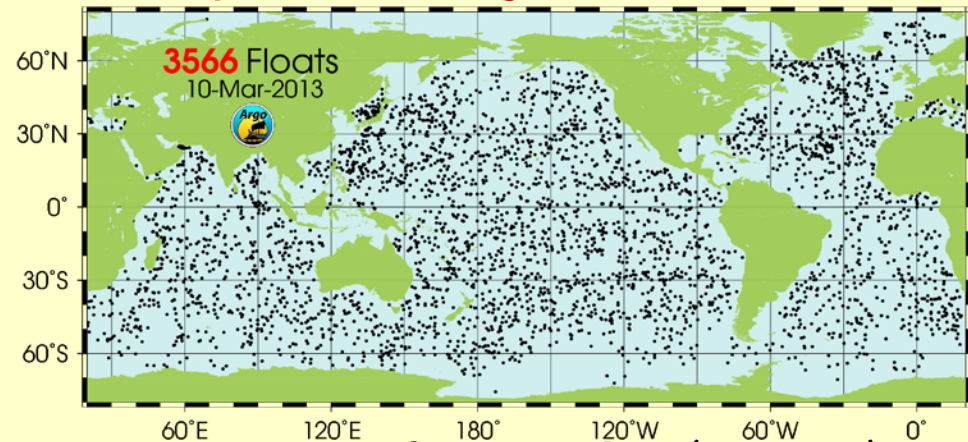
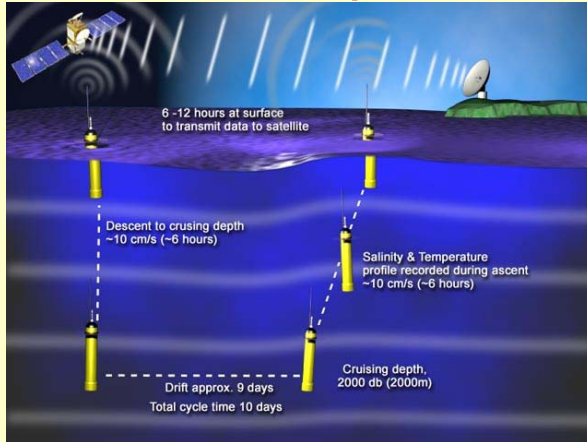
# Mesures de température de l'océan jusqu'à 1000-2000m de profondeur (bateaux depuis 1950; Argo depuis 2003)



Principales routes maritimes



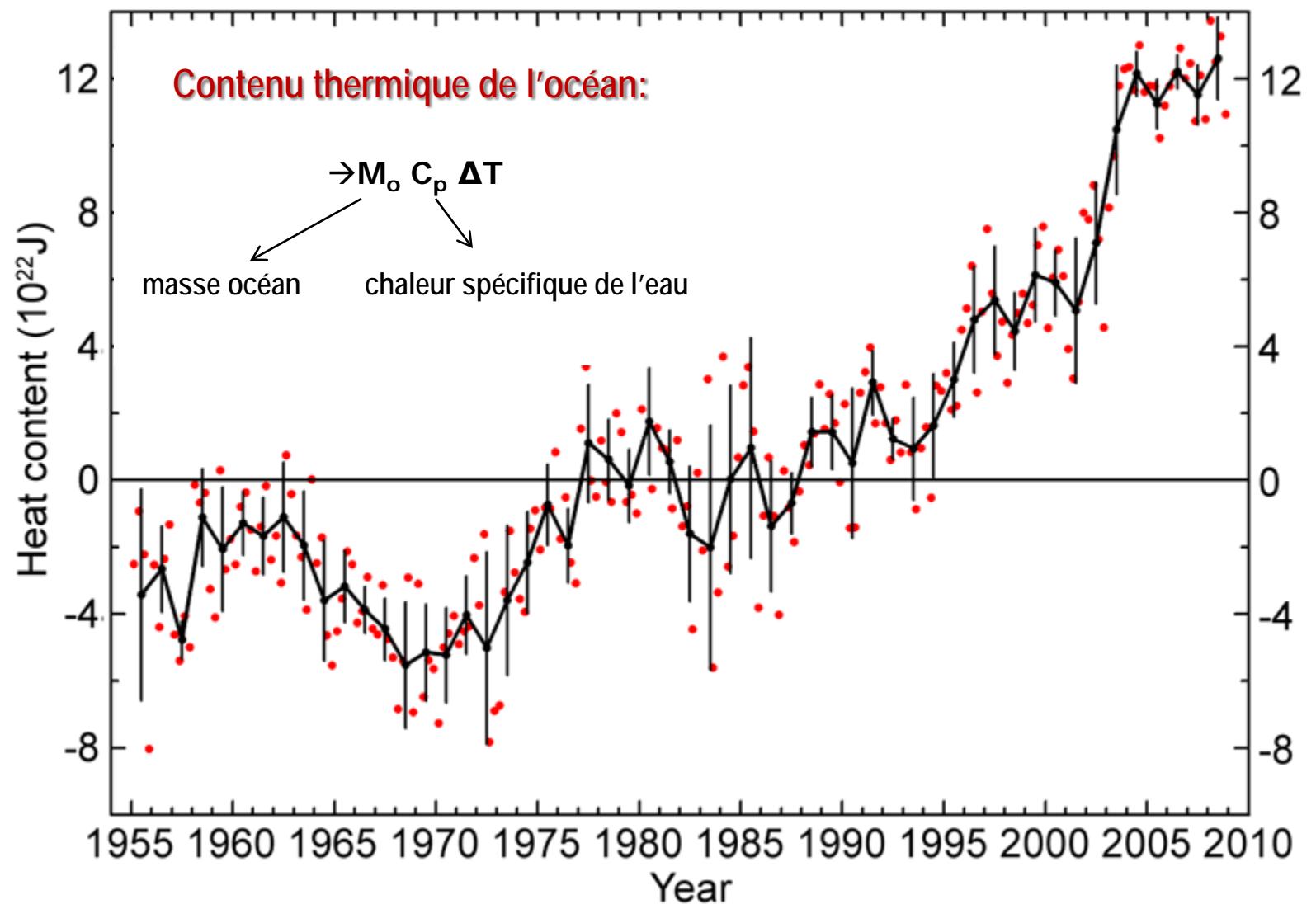
Depuis 2003 → Flotteurs profilants 'Argo'



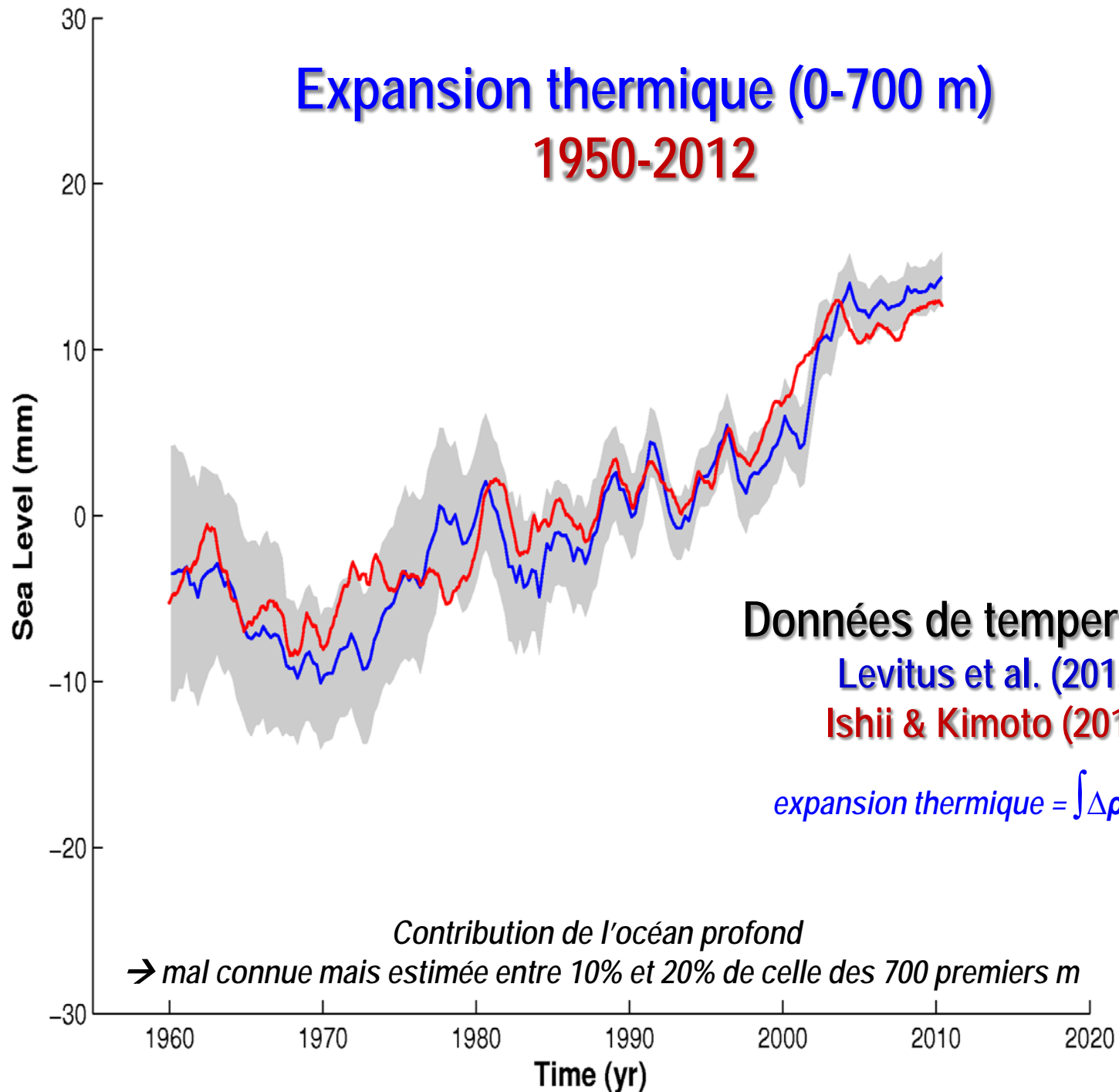
Couverture Argo (mars 2013)

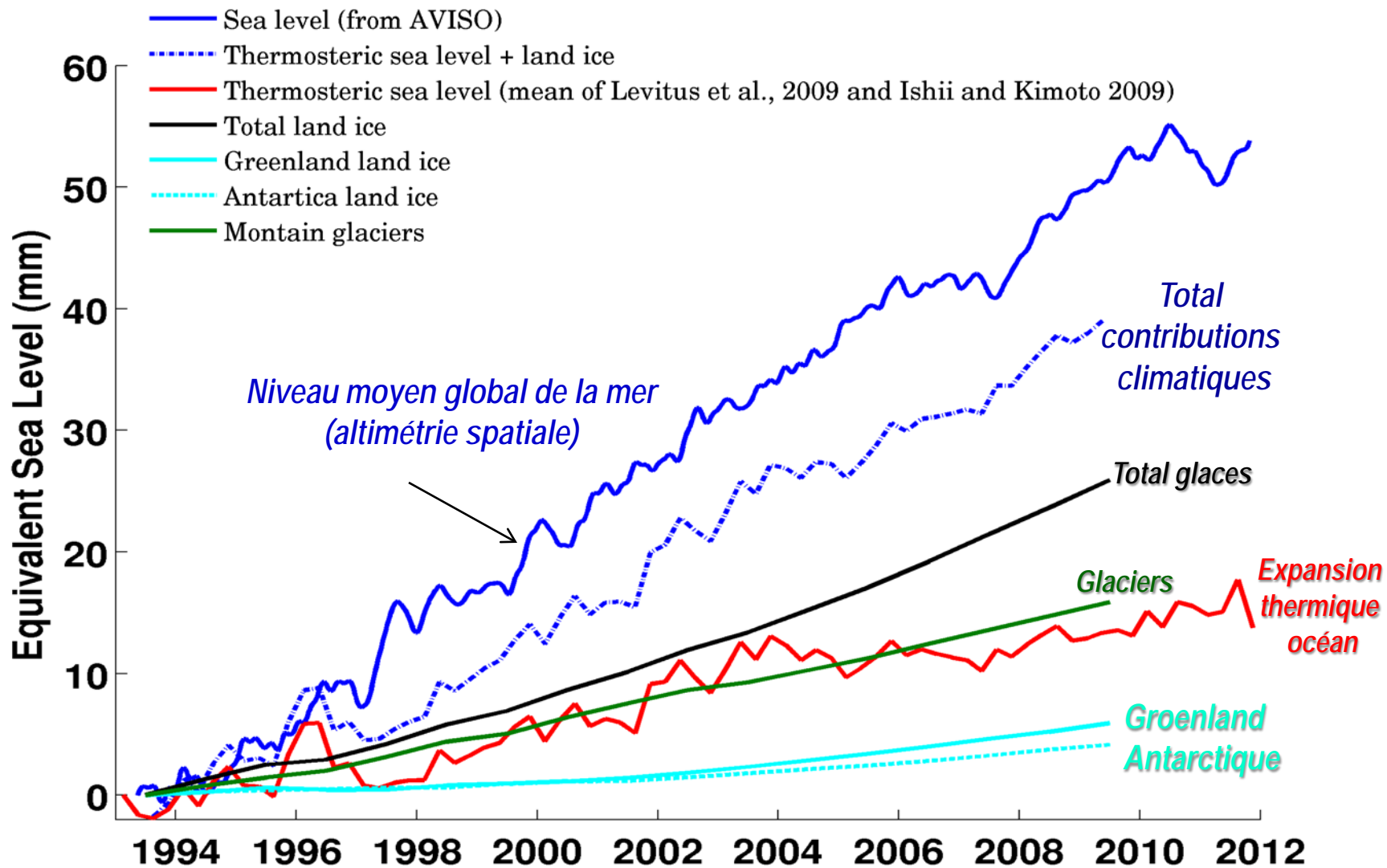


# Réchauffement de l'océan = Augmentation du contenu thermique

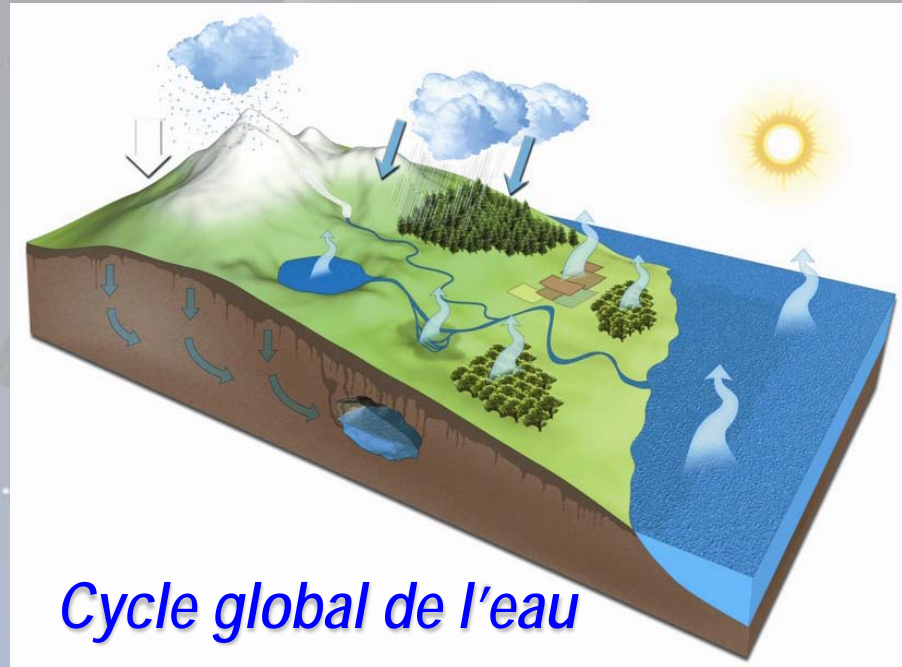


# Expansion thermique (0-700 m) 1950-2012



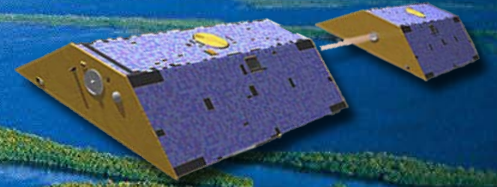
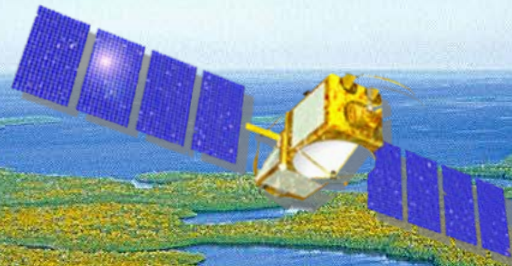
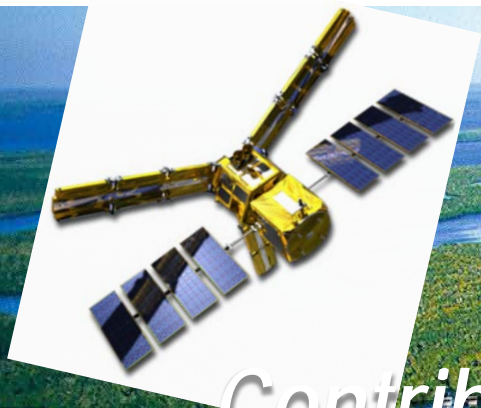


# Effet des eaux continentales sur le niveau de la mer



Conservation de la masse d'eau dans le système climatique

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

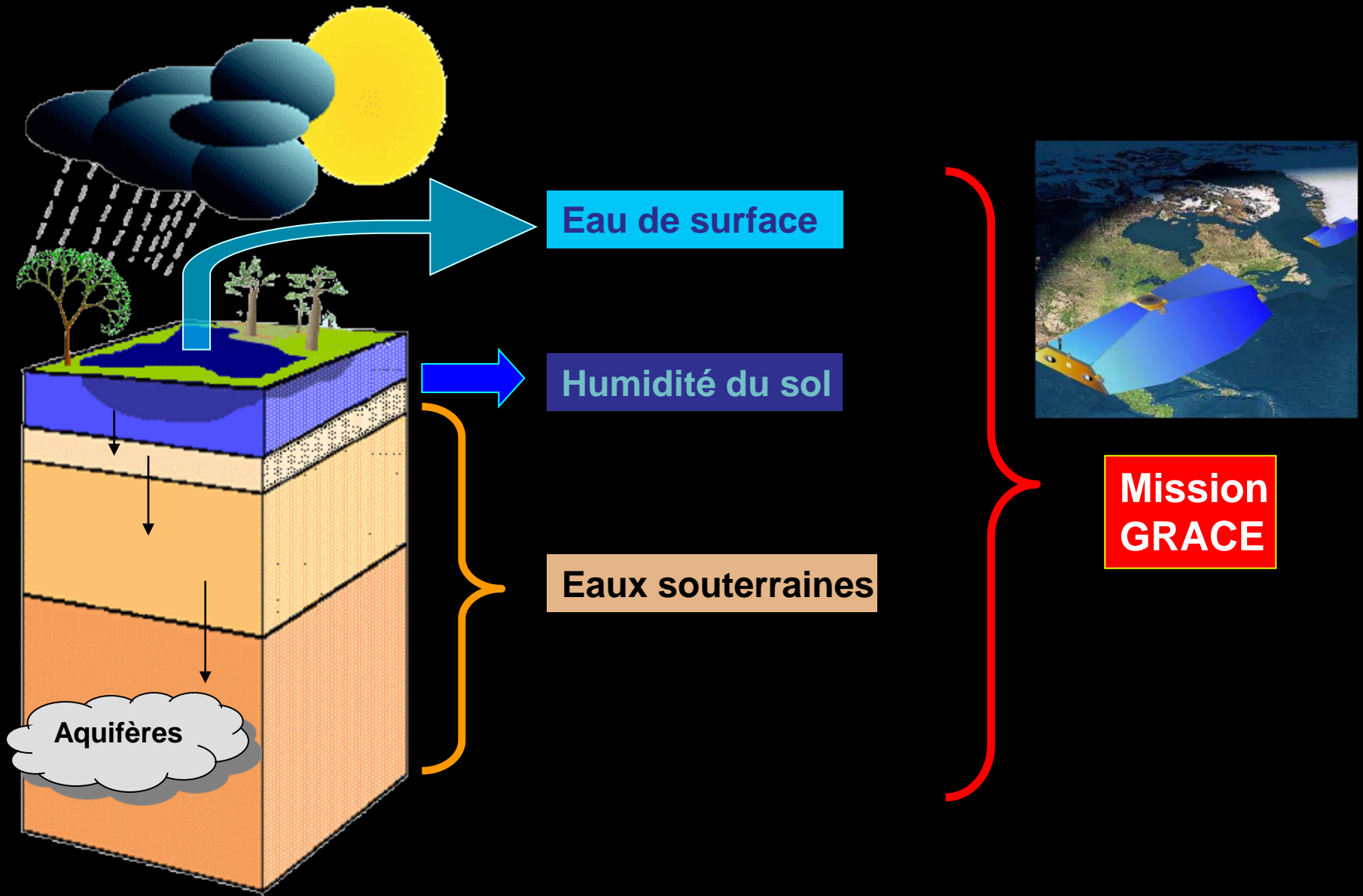


## *Contribution des aux continentales*

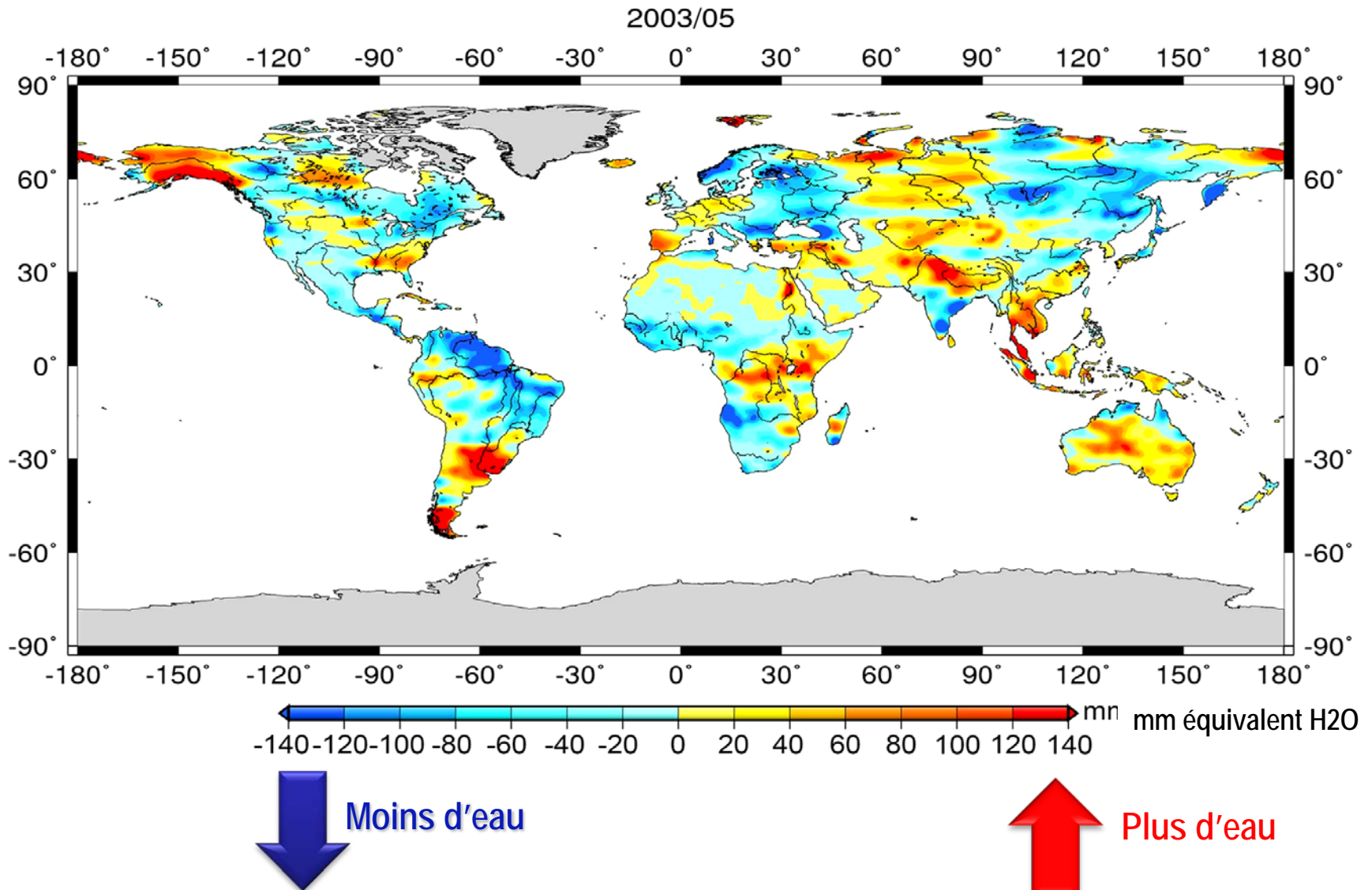
- Variabilité climatique
- Pompage dans les nappes
- Construction de barrages
- Déforestation
- Urbanisation
- .....

Activités  
humaines

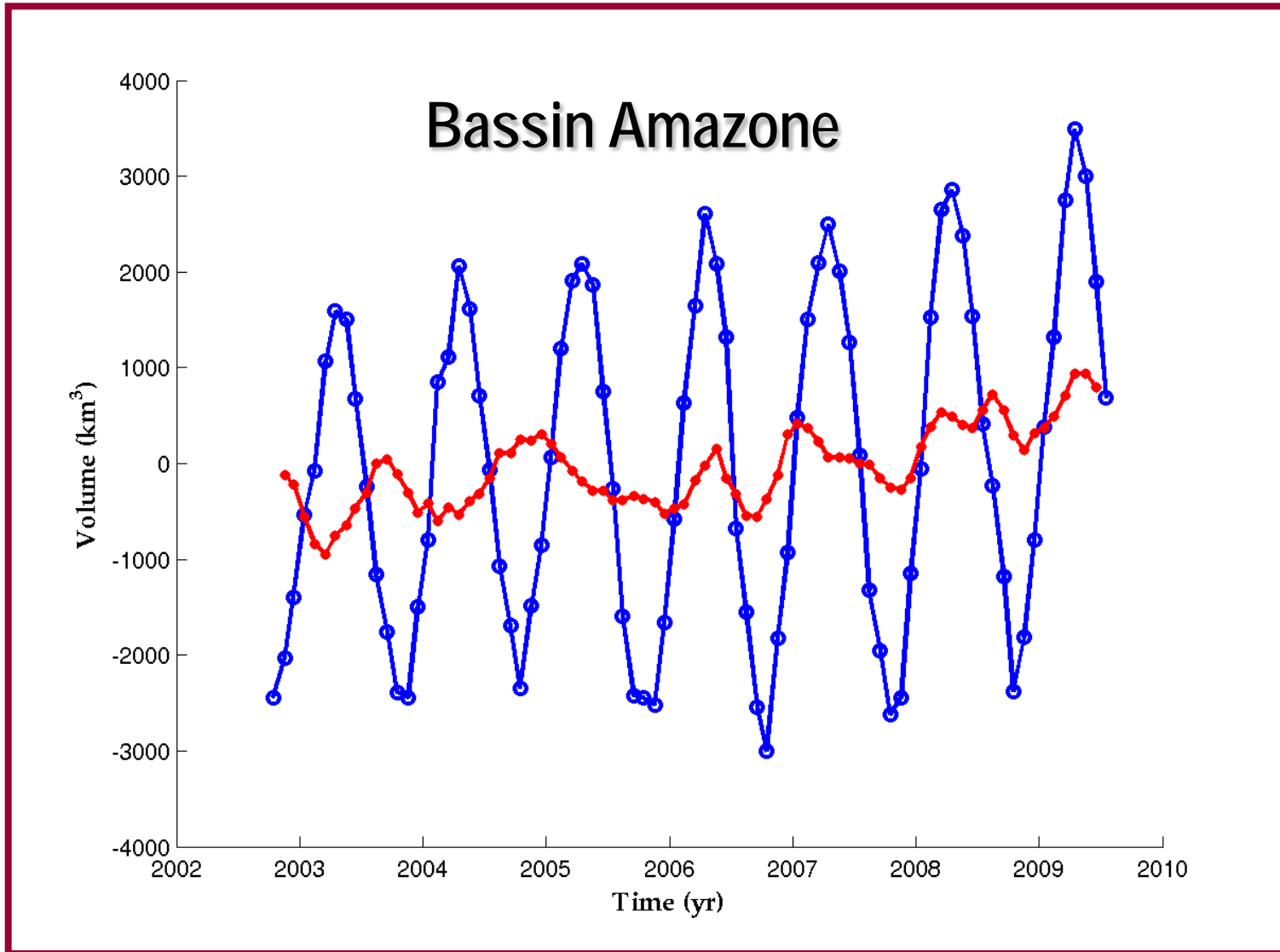
# GRACE mesure les variations temporelles du stock d'eau total



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

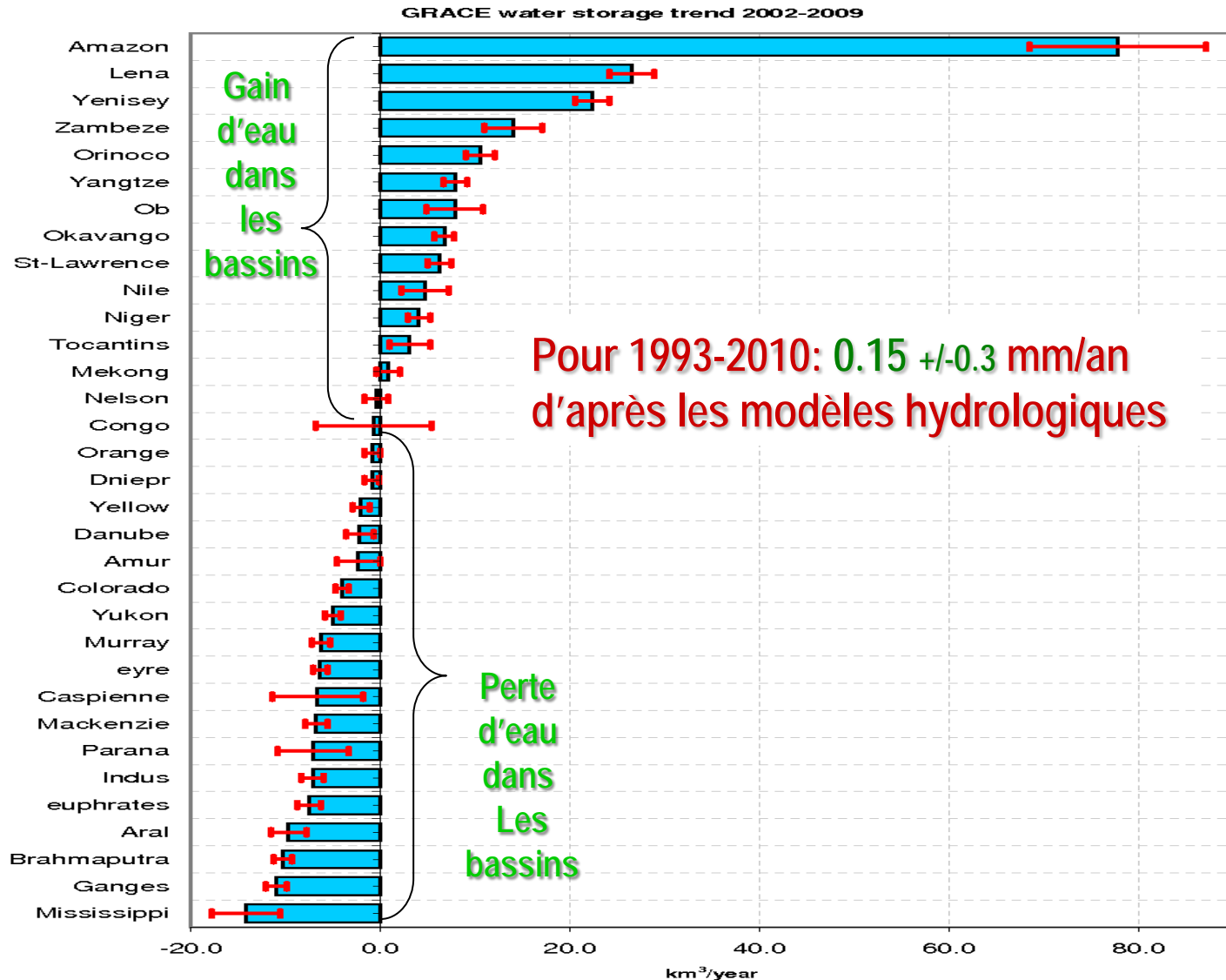


# Variation du volume total d'eau dans le bassin de l'Amazonie (2003-2009) d'après GRACE



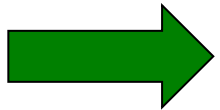


# Variation (tendance) du volume d'eau dans les grands bassins fluviaux d'après GRACE (km<sup>3</sup>/an) 2002-2009



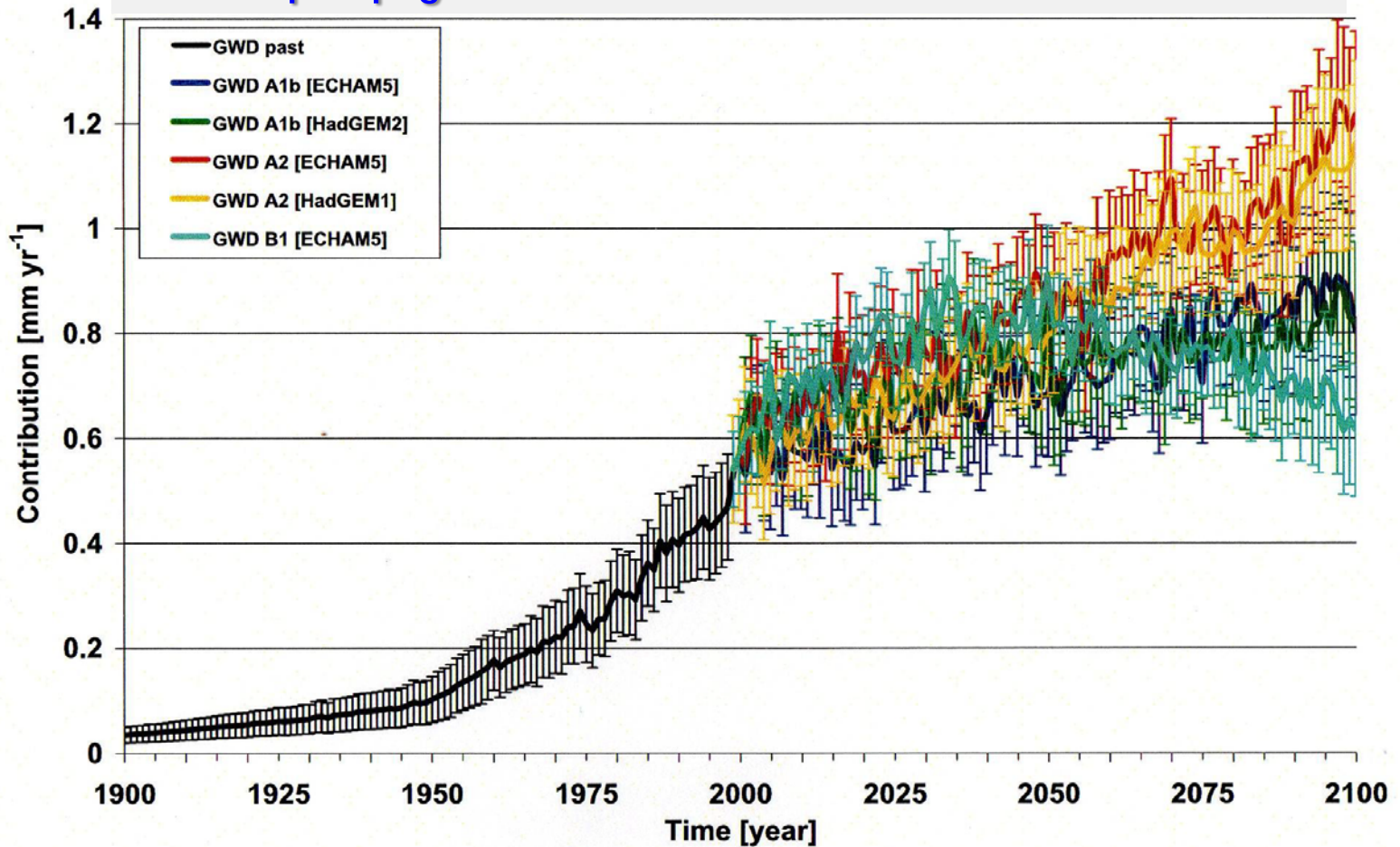
## Effets directs des activités humaines sur l'hydrologie continentale

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



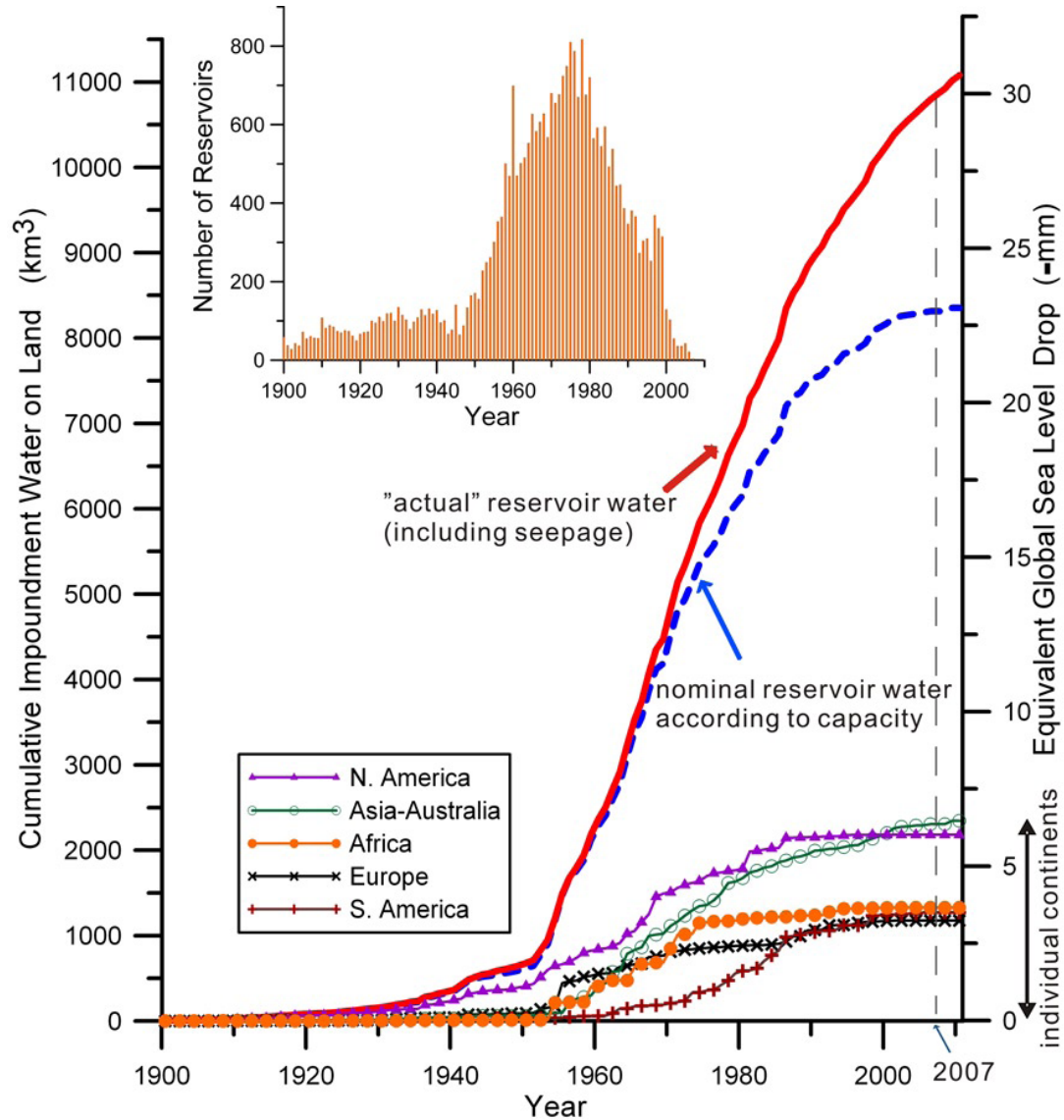
Effets sur le stock total d'eau, donc le niveau de la mer

## 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

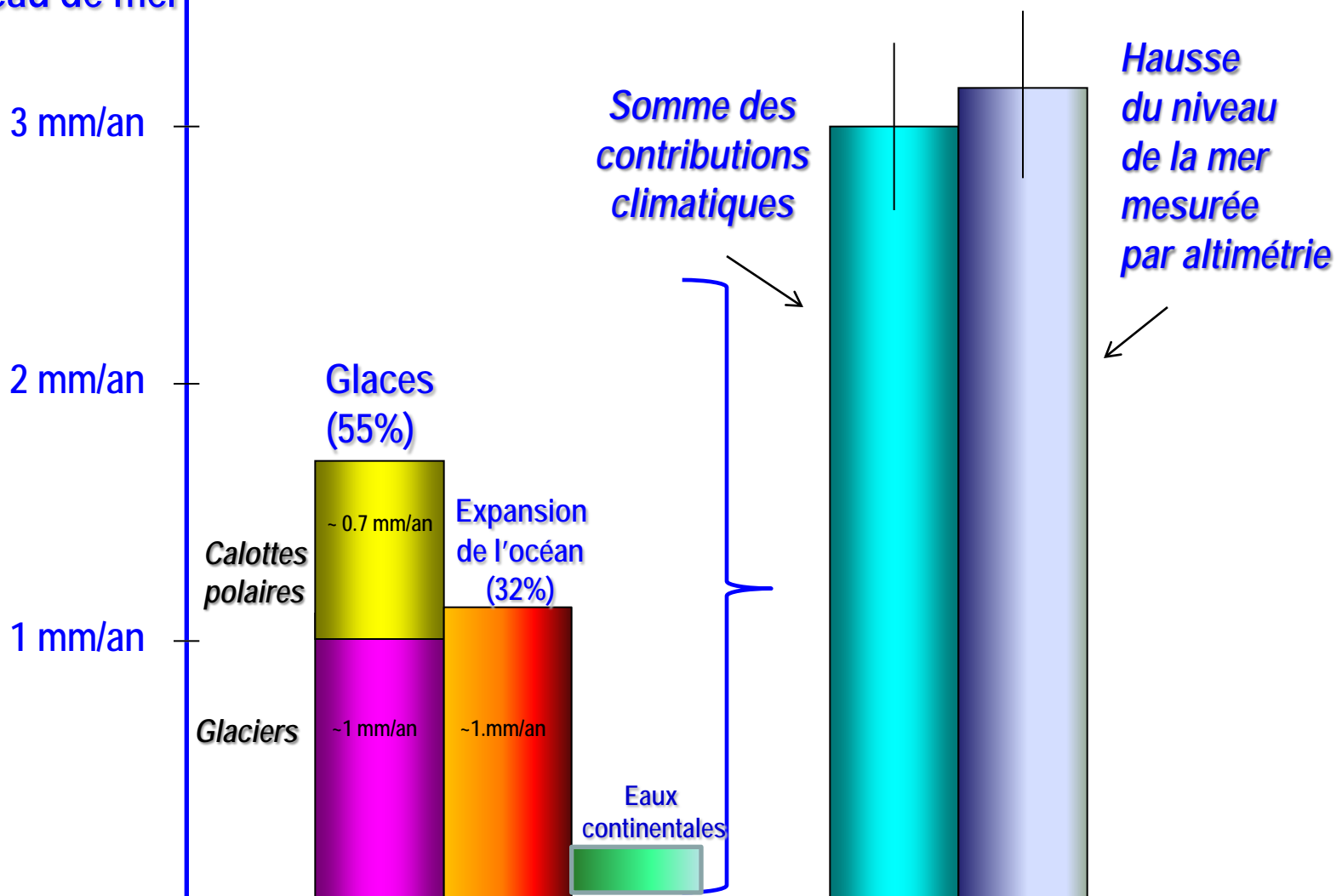
# Barrages et réservoirs artificiels



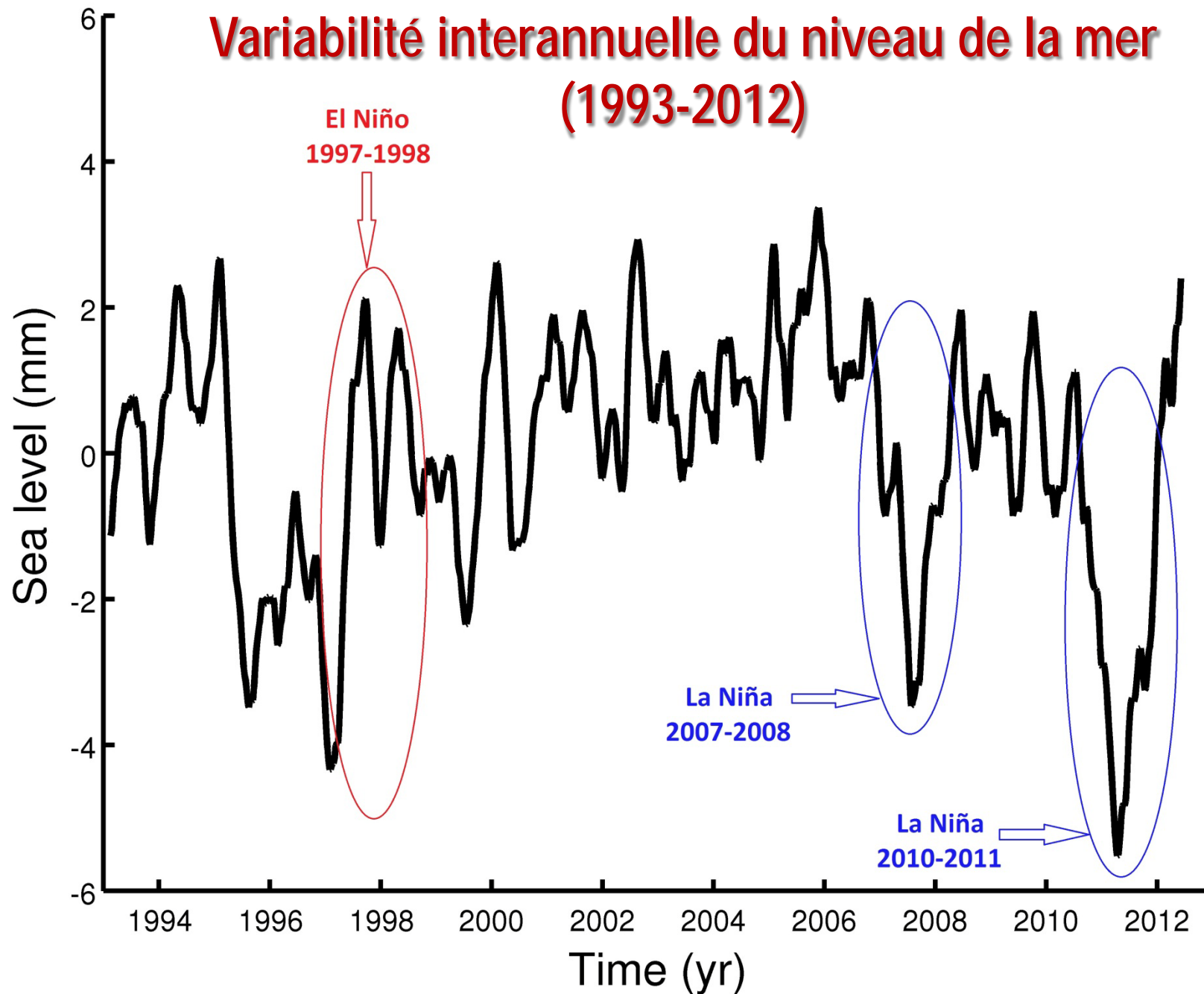
1993-2008  
 ~ - 0.55 mm/an  
 → Baisse  
 du niveau de la mer

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

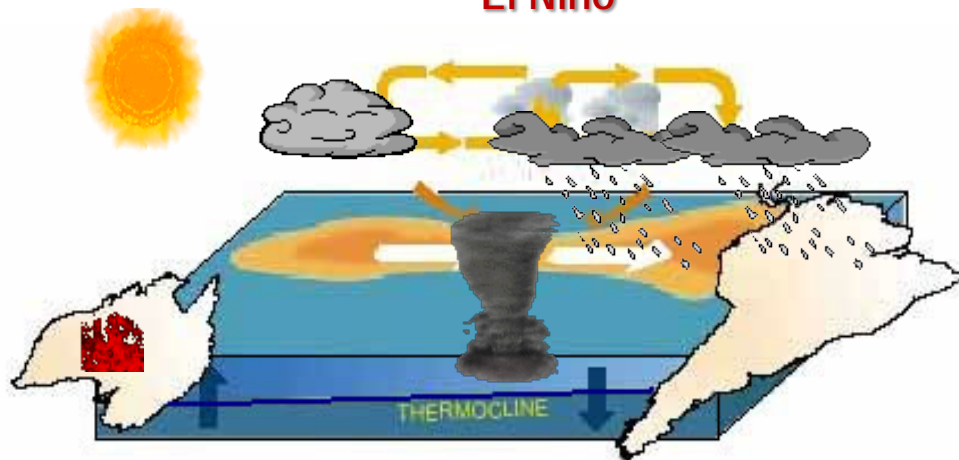
Hausse du niveau de mer



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



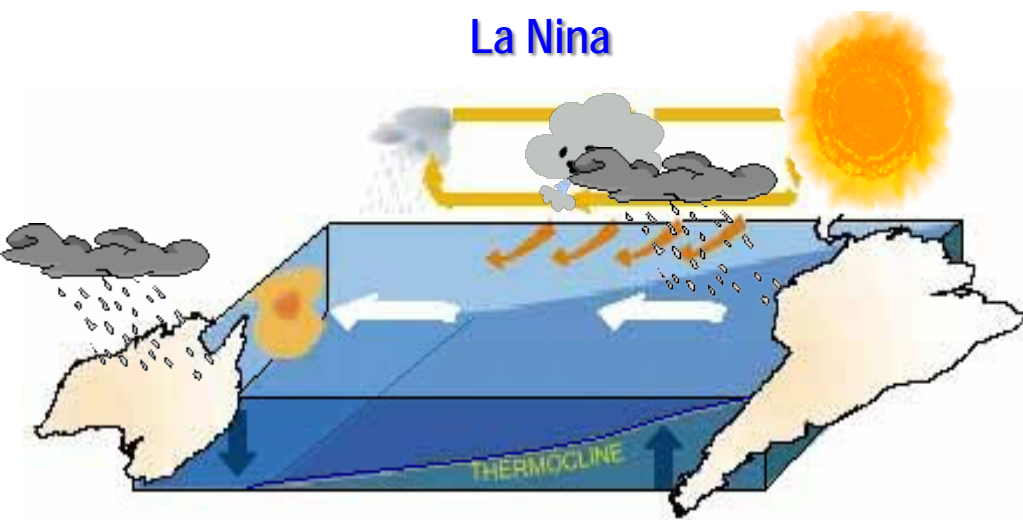
## El Nino



## El Niño

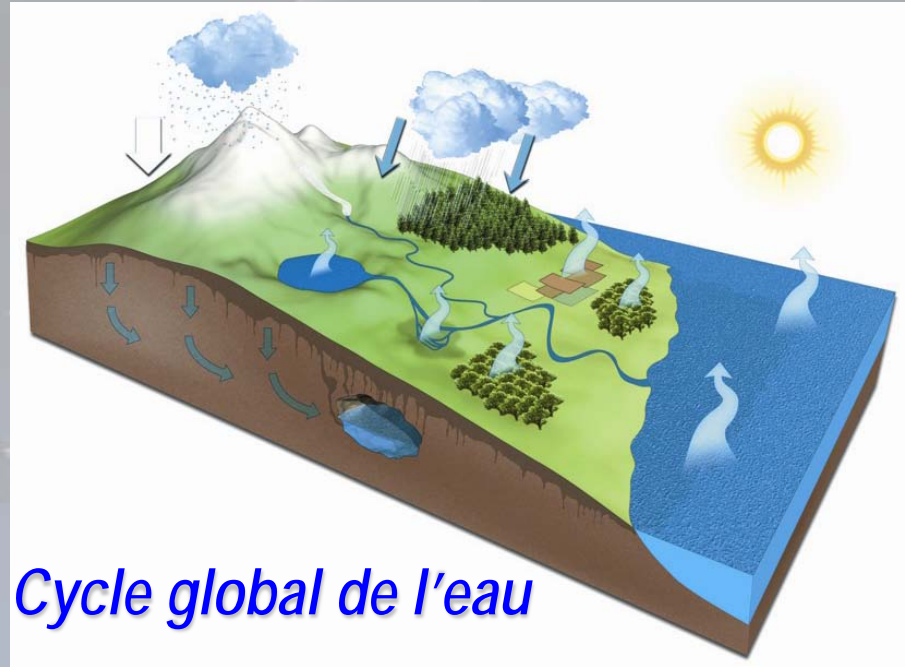
**Plus de pluie sur le Pacifique tropical  
Moins de pluie sur l'Amazone**

## La Nina



## La Niña

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



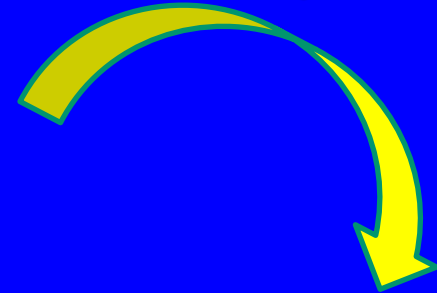
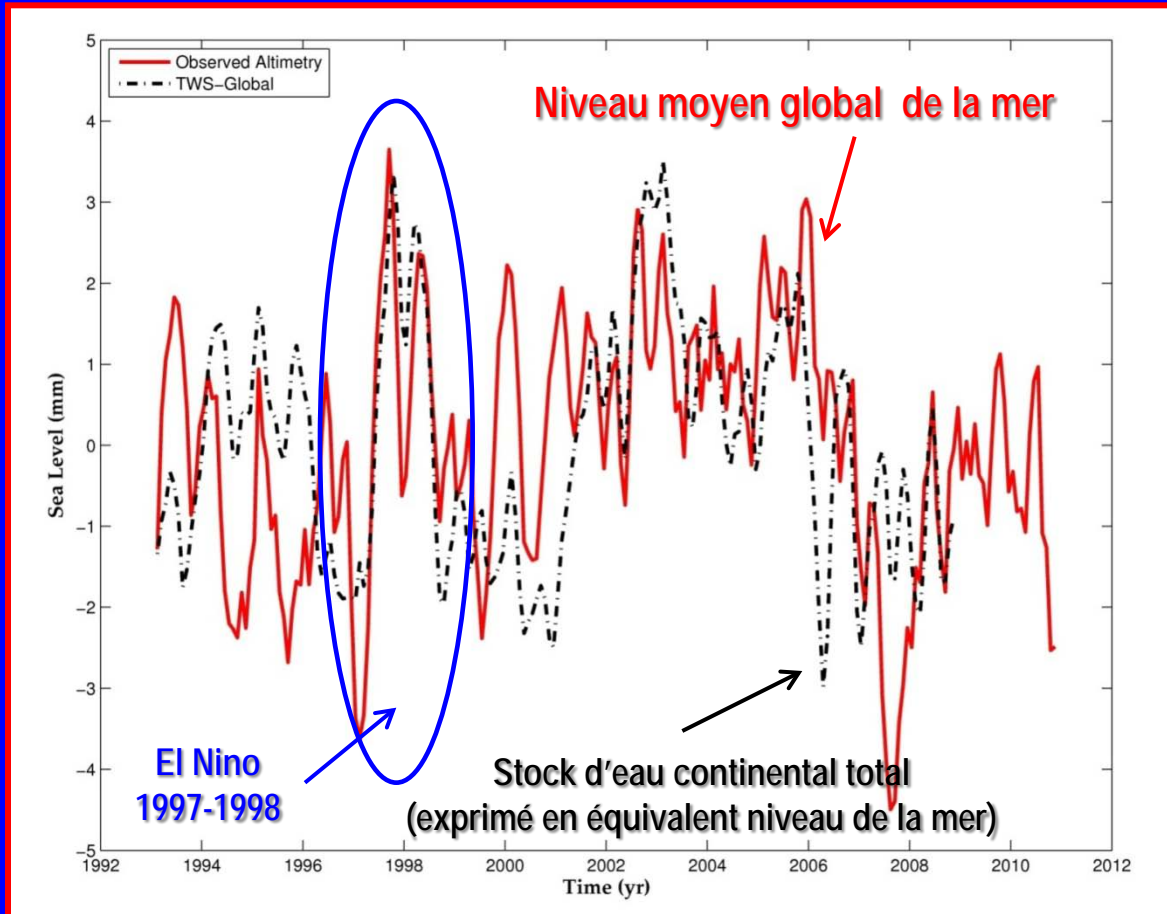
*Cycle global de l'eau*

Conservation de la masse d'eau dans le système climatique

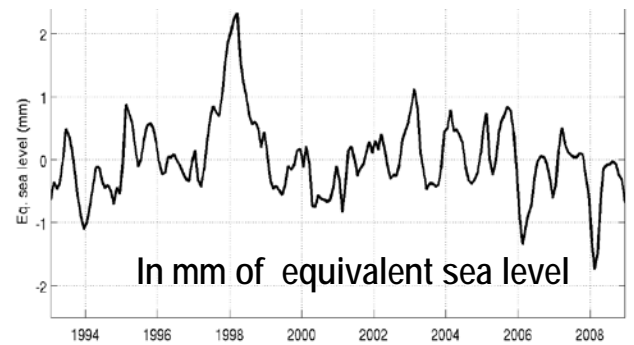
$$\Delta M_{\text{océans}} + \Delta M_{\text{continents}} = 0$$



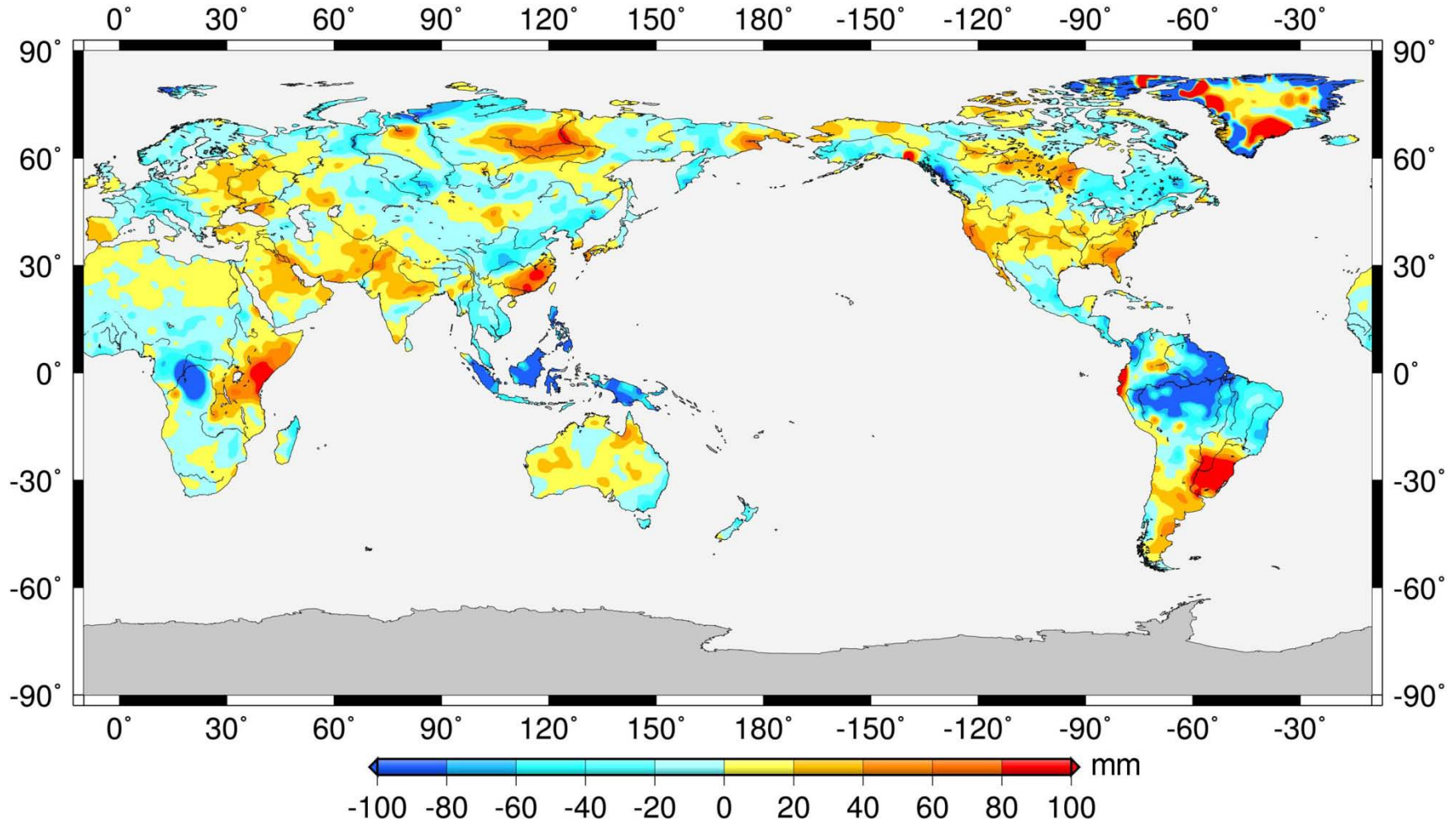
# Variations interannuelles du niveau moyen global de la mer et variations du stock total d'eau sur les continents (modèle hydrologique ISBA-TRIP de MeteoFrance)



## Contribution du bassin amazonien



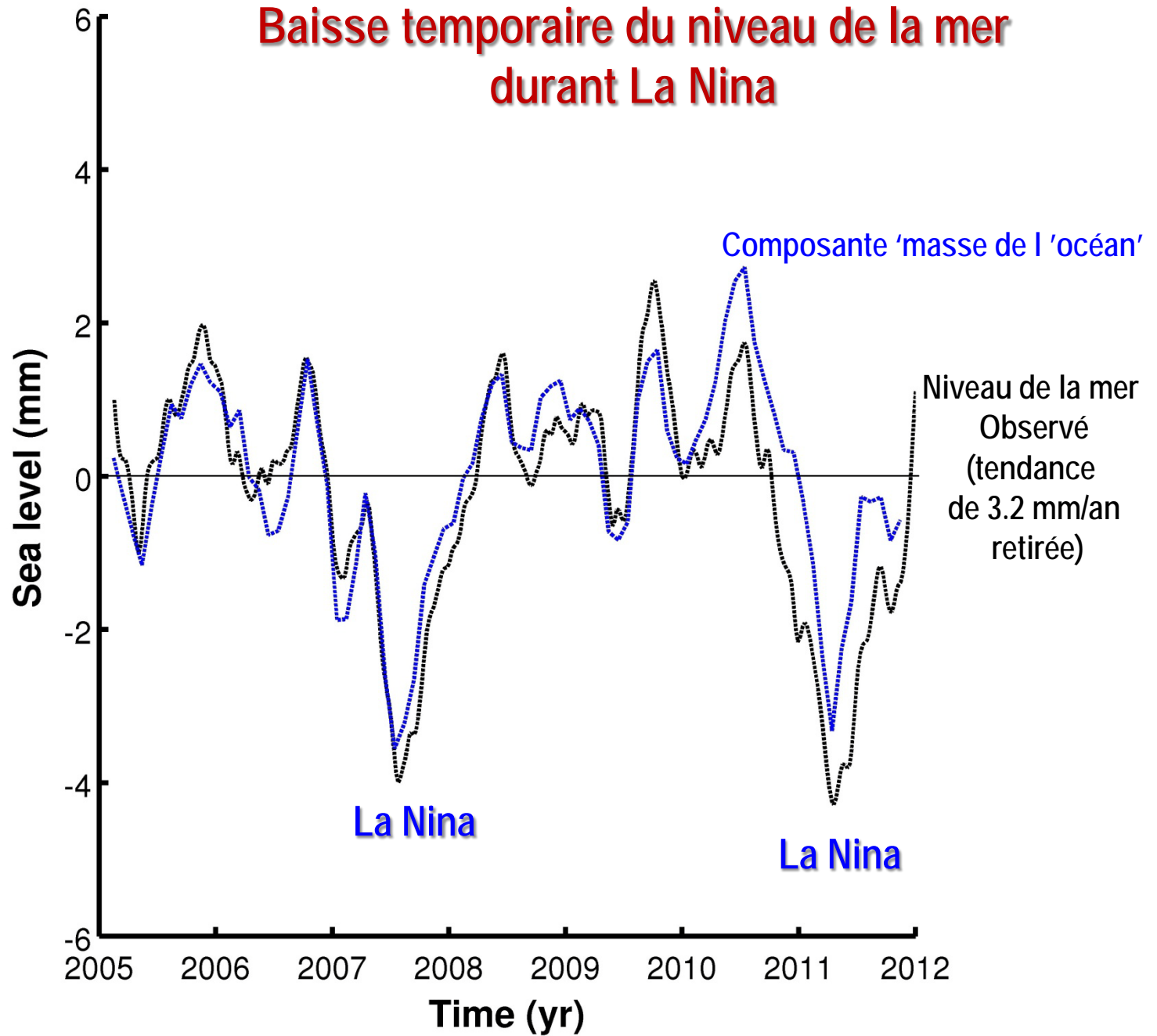
# Stock d'eau entre juillet 1997 et juillet 1998 (El Nino) d'après le modèle hydrologique de Météo-France



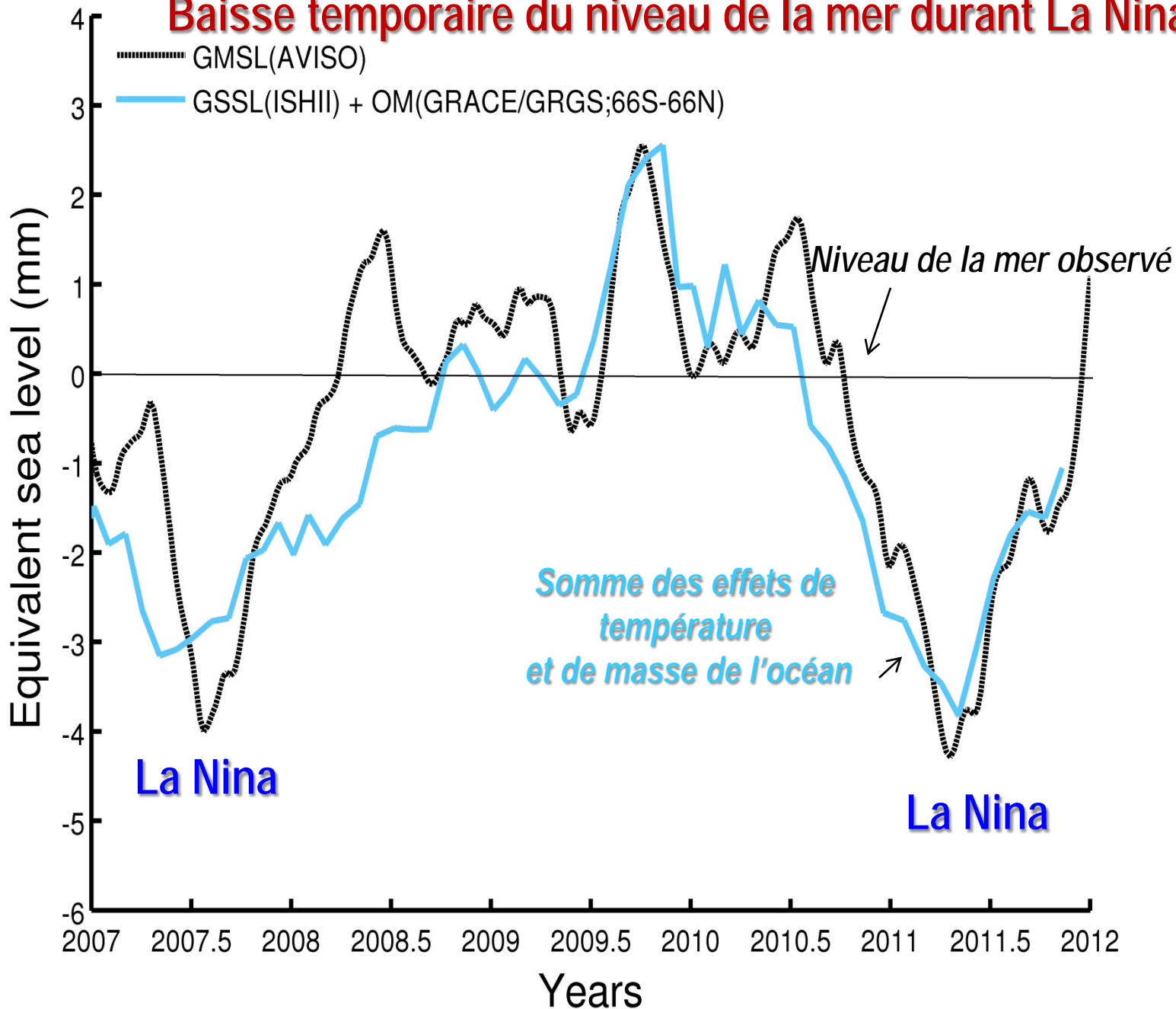
**Bleu = moins d'eau**

**Rouge = plus d'eau**

# Baisse temporaire du niveau de la mer durant La Nina

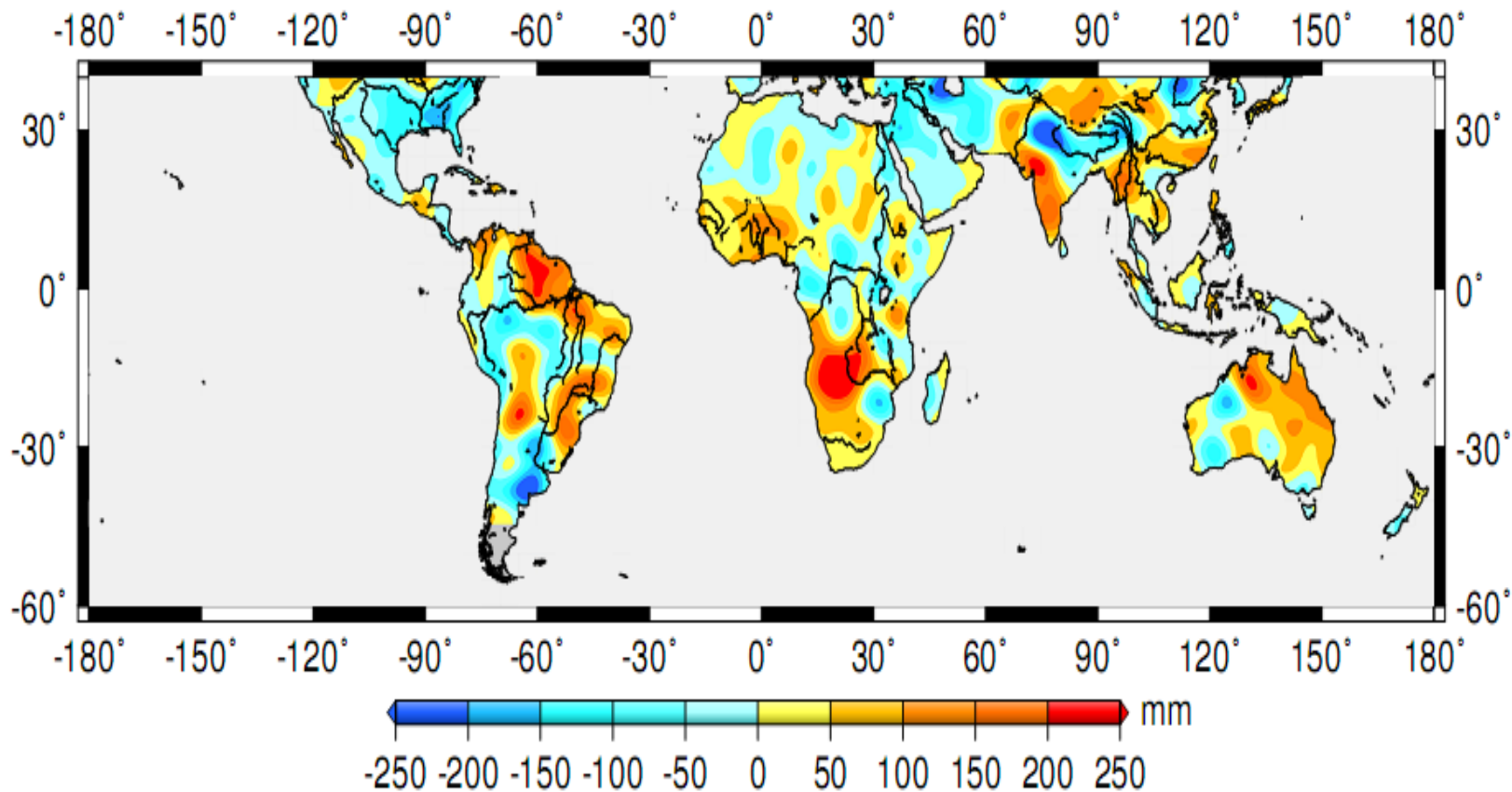


# Baisse temporaire du niveau de la mer durant La Nina



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

Mean\_Land\_Water GRACE / GRGS (La Nina October 2010 - October 2011)



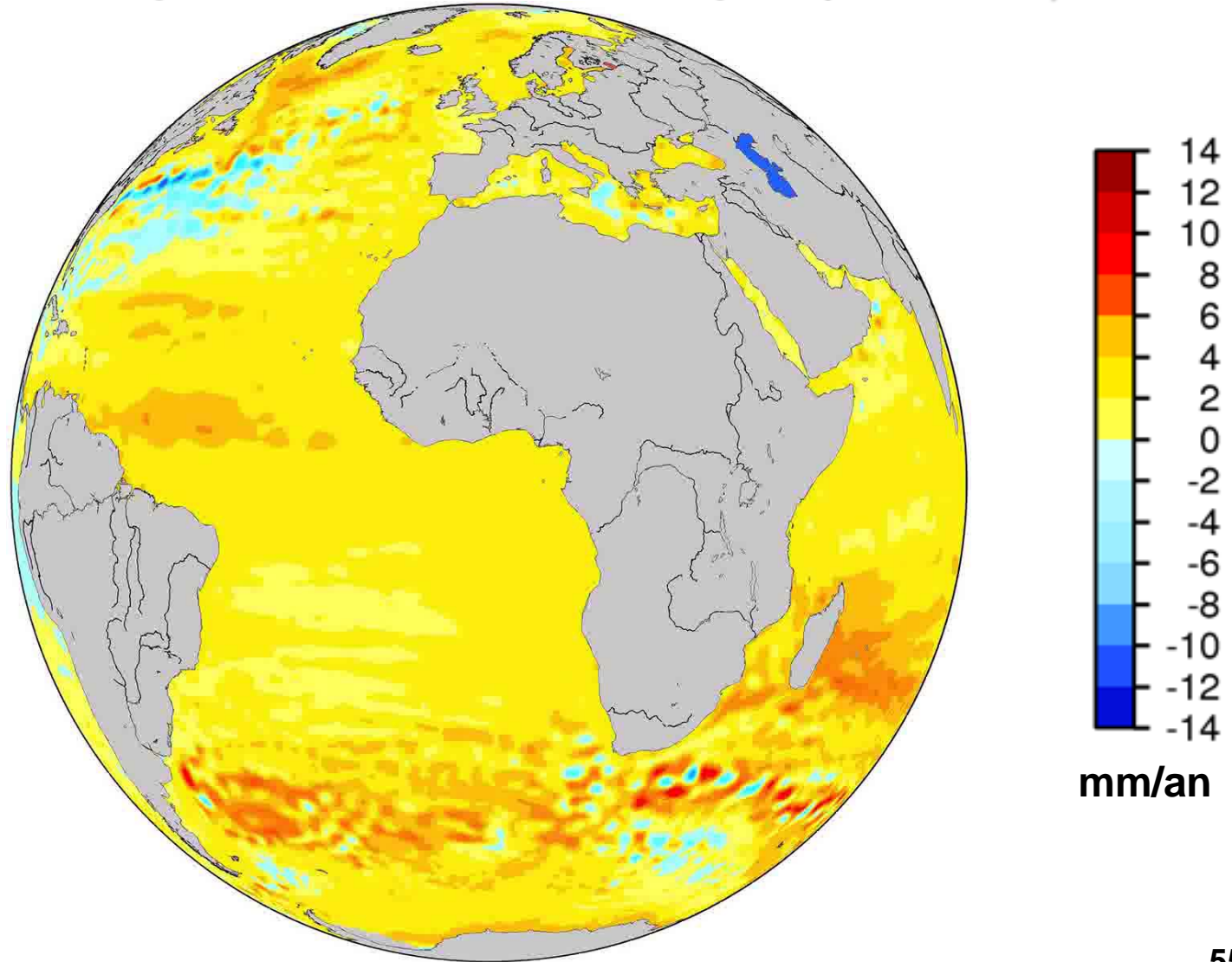
**Rouge = plus d'eau**

**Bleu = moins d'eau**

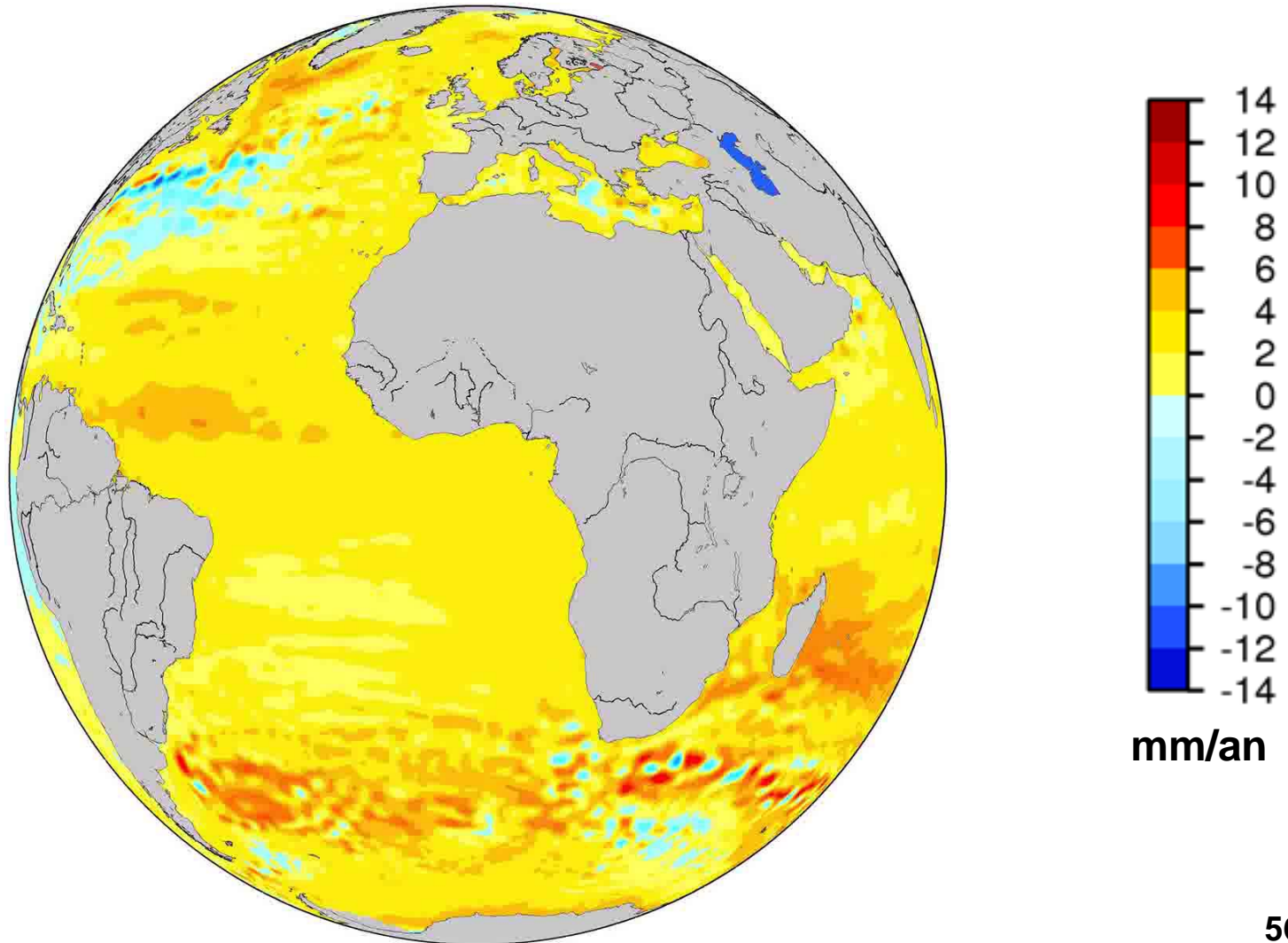


**La mer ne monte pas de manière uniforme!**

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



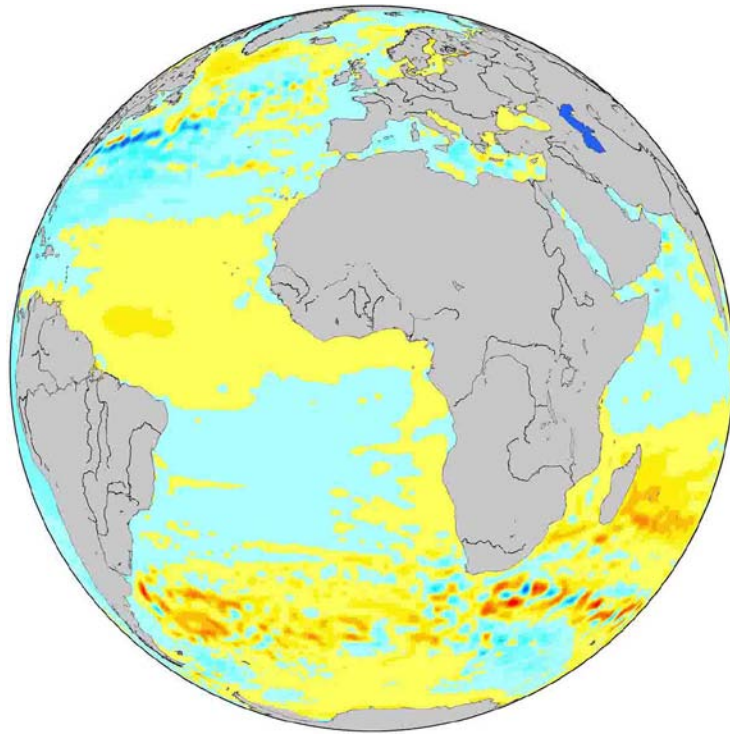
# Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observées par les satellites altimétriques (1993-2012)



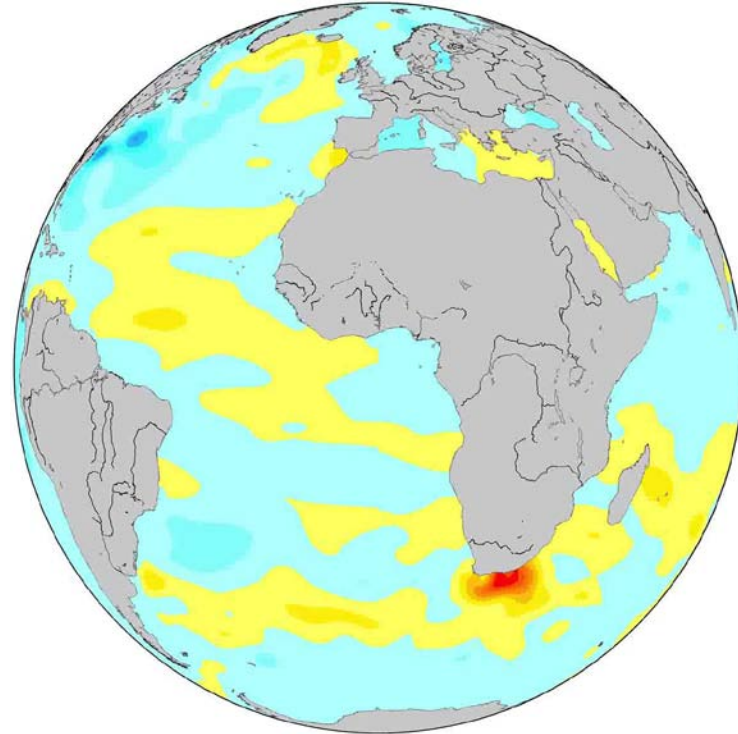


# La mer ne monte pas de manière uniforme!

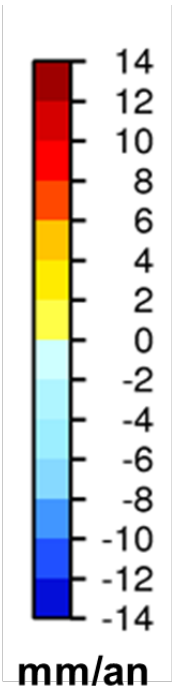
*Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2012)  
(hausse moyenne globale retirée)*



*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*

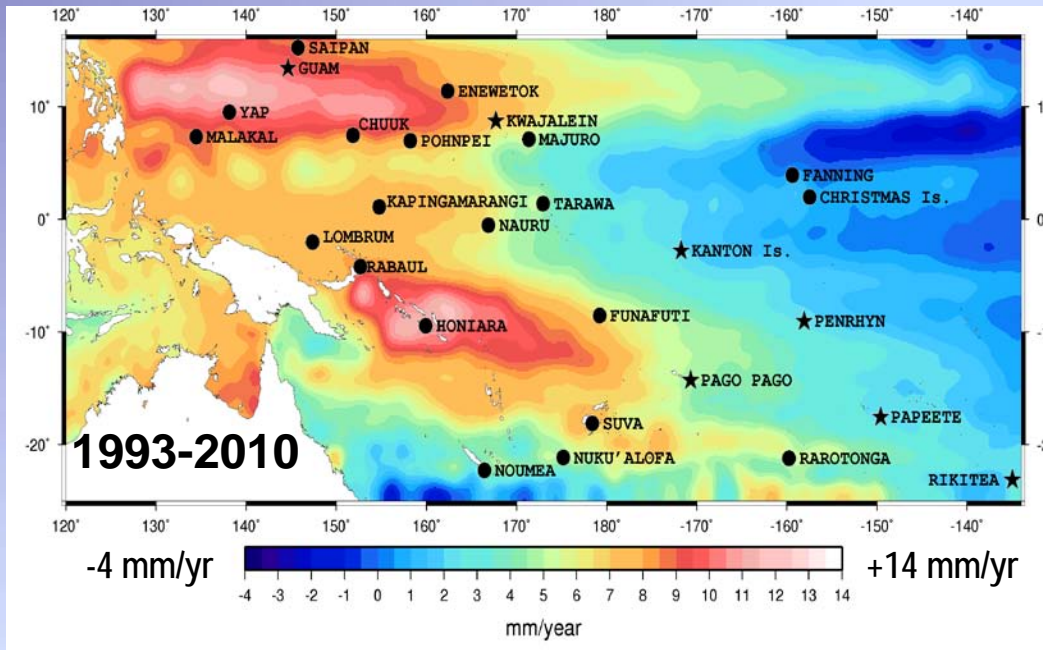
=

- *Hausse moyenne globale*

+

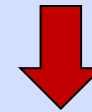
- *Variabilité régionale*

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

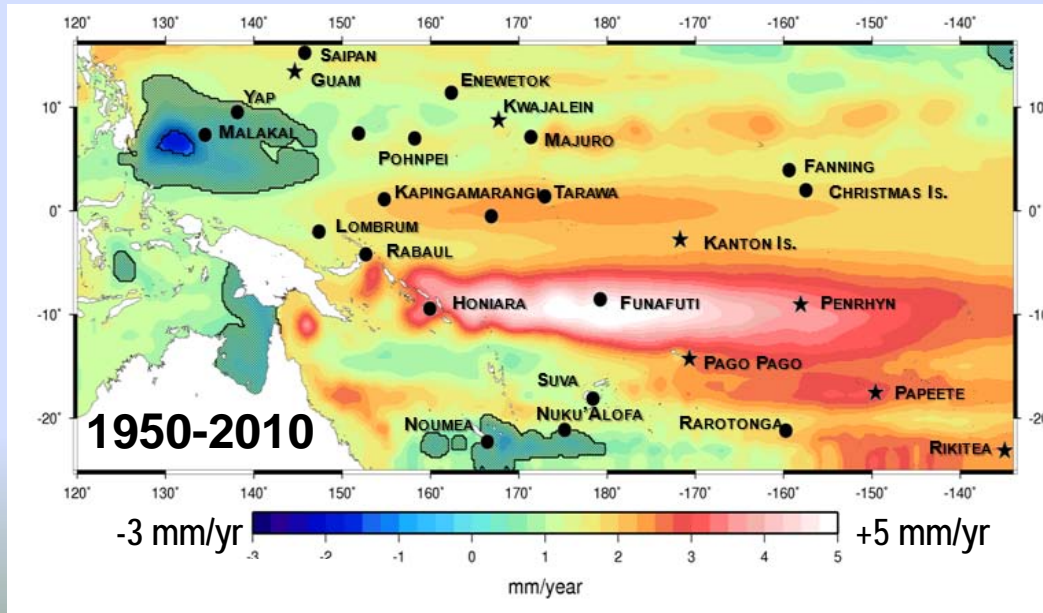


1993-2010

Variabilité régionale des tendances  
du niveau de la mer



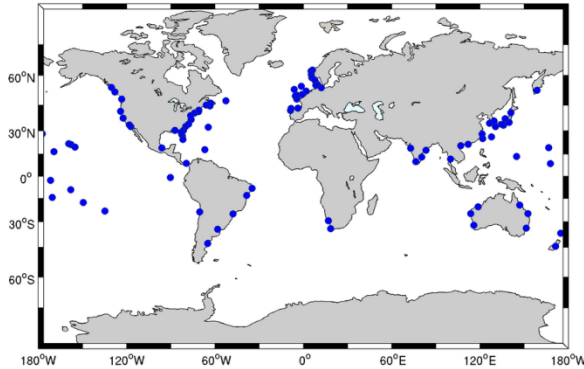
dépend de la période considérée



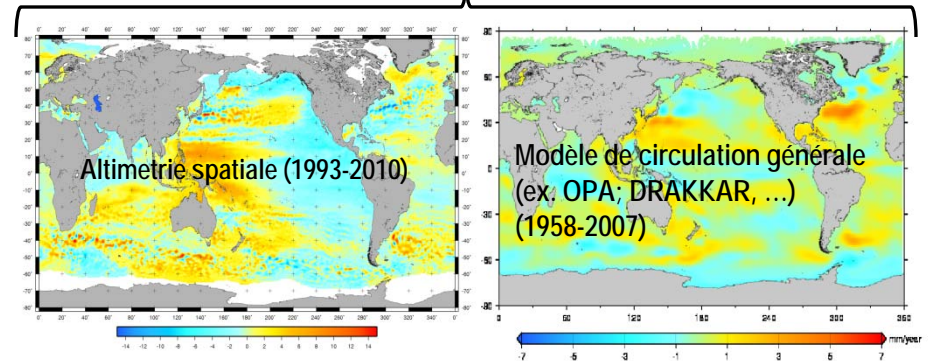
1950-2010

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

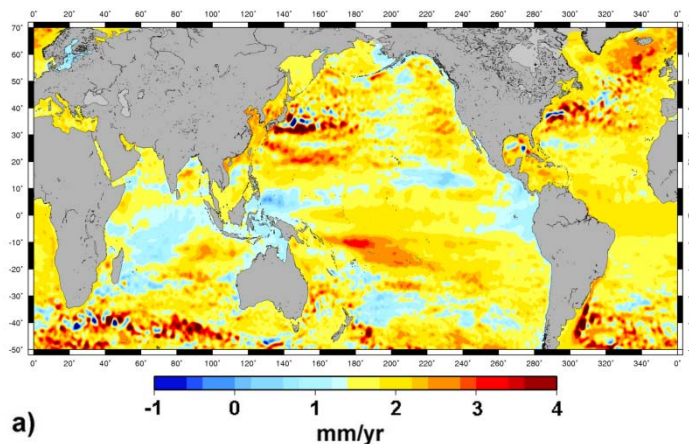
Marégraphes (1950-2010)



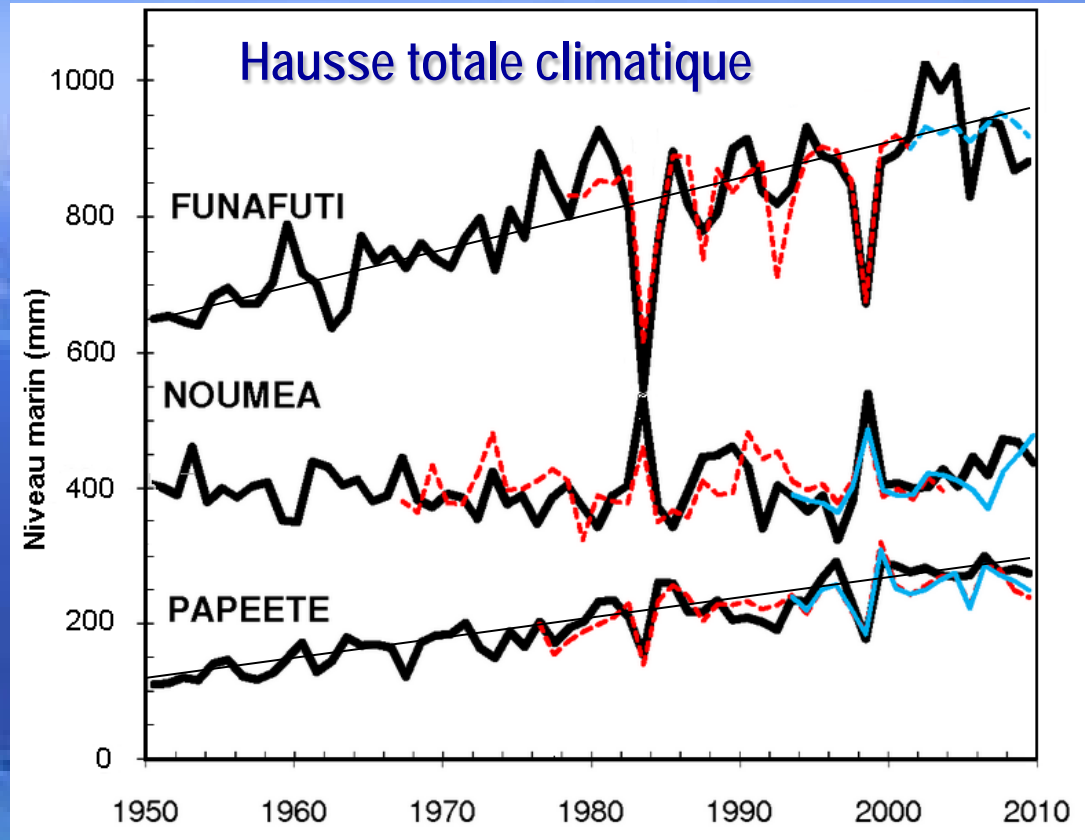
Séries temporelles de grilles de niveau de mer



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



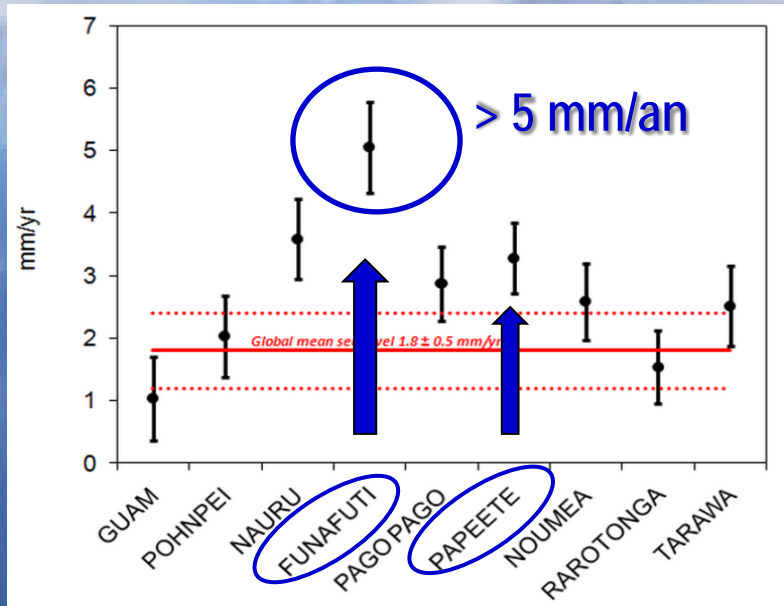
*Meyssignac et al., Surveys in Geophys., 2012*  
*Meyssignac et al., Glob. Planet. Change, 2011*



*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)*



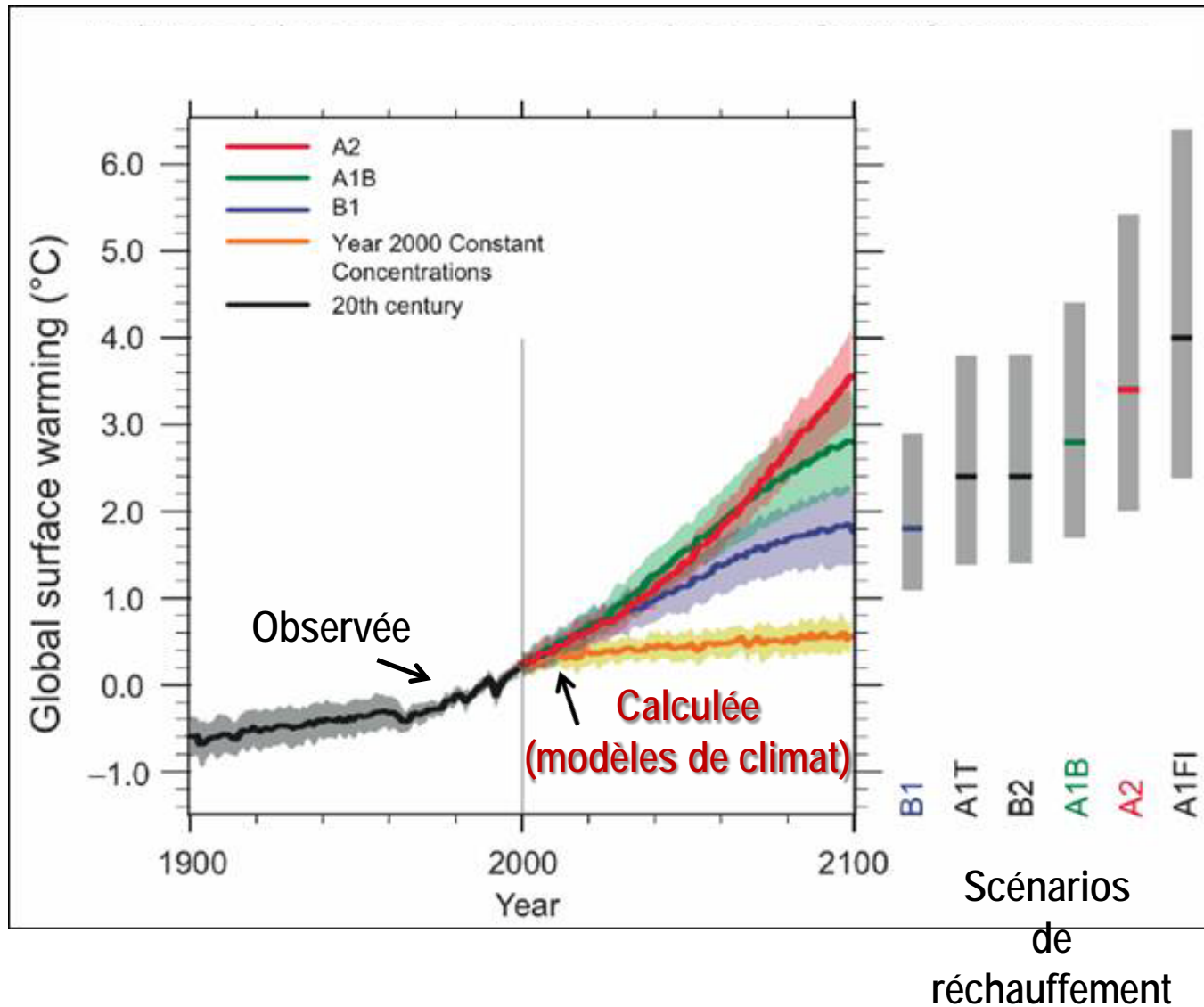
*+ 30 cm d'élévation du niveau de la mer depuis 1950!*

La mer va-t-elle continuer à monter?

Oui!



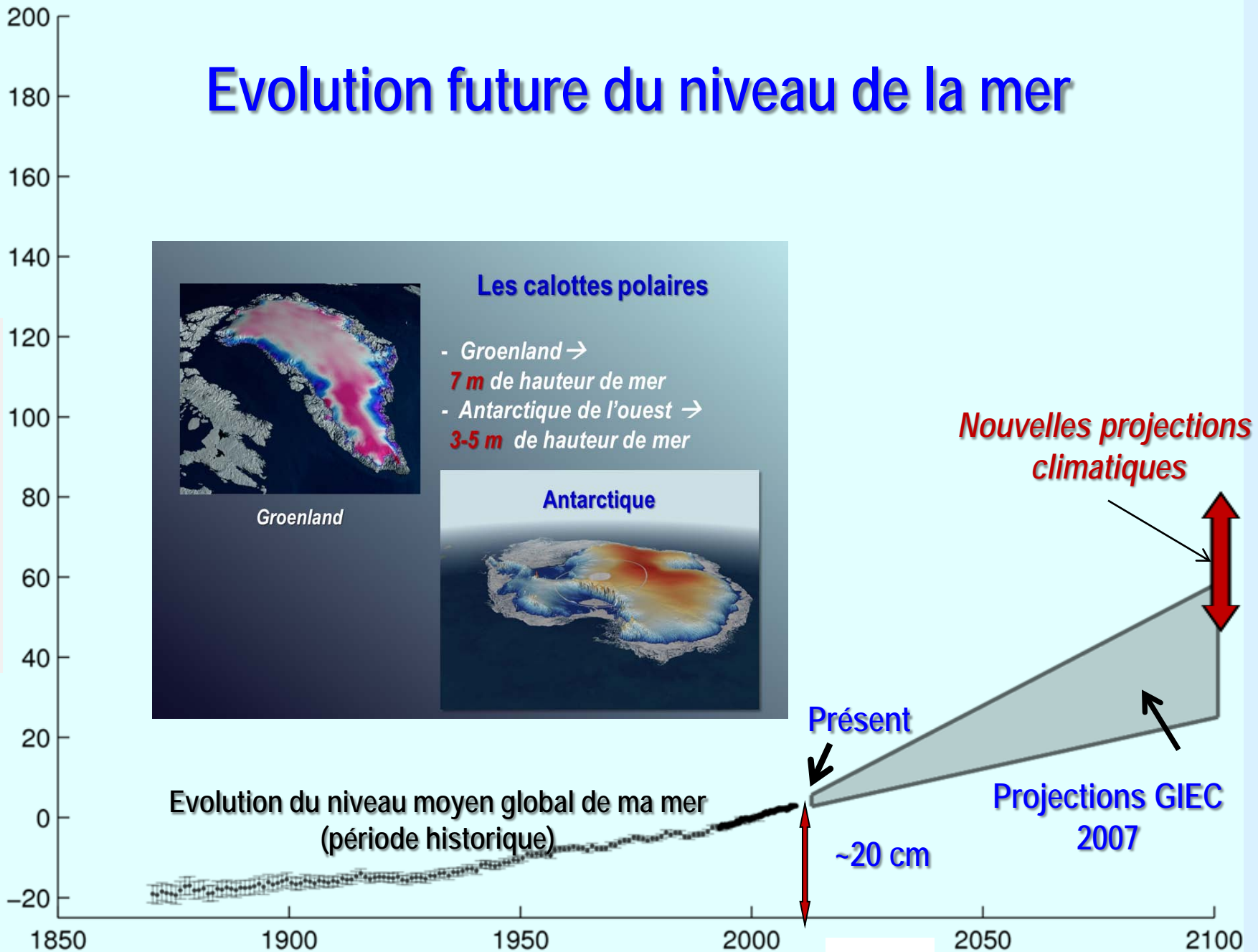
# Evolution de la température moyenne de la Terre





# Evolution future du niveau de la mer

Niveau de la mer (cm)

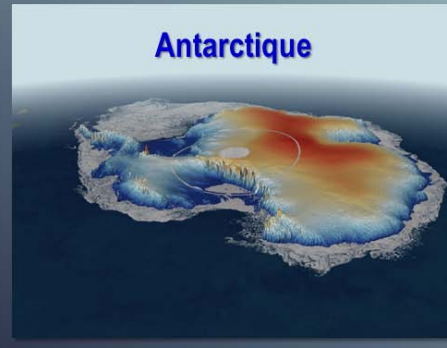


## Les calottes polaires

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



Groenland



Antarctique

Evolution du niveau moyen global de ma mer  
(période historique)

Présent

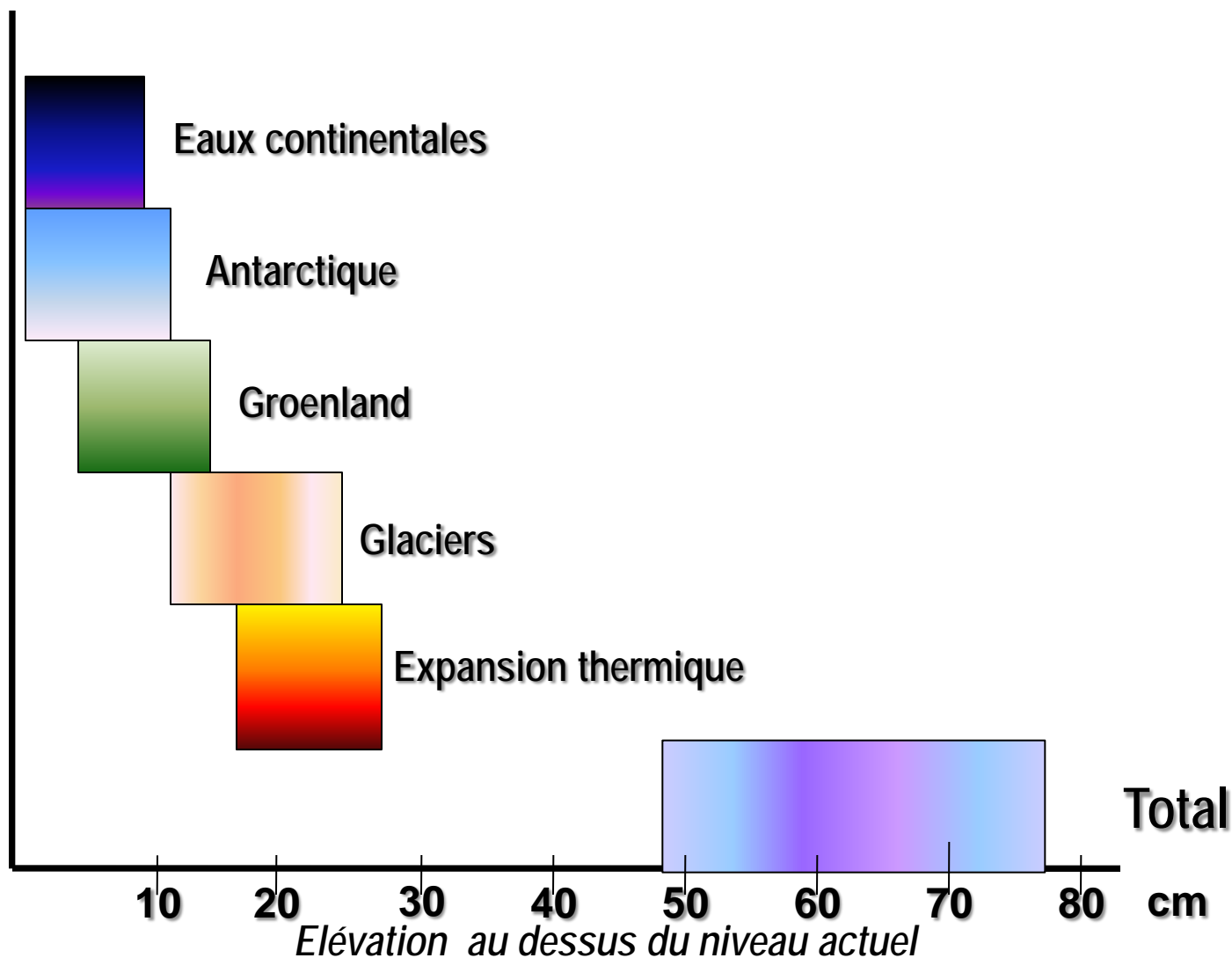
~20 cm

Projections GIEC  
2007

Nouvelles projections  
climatiques

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?

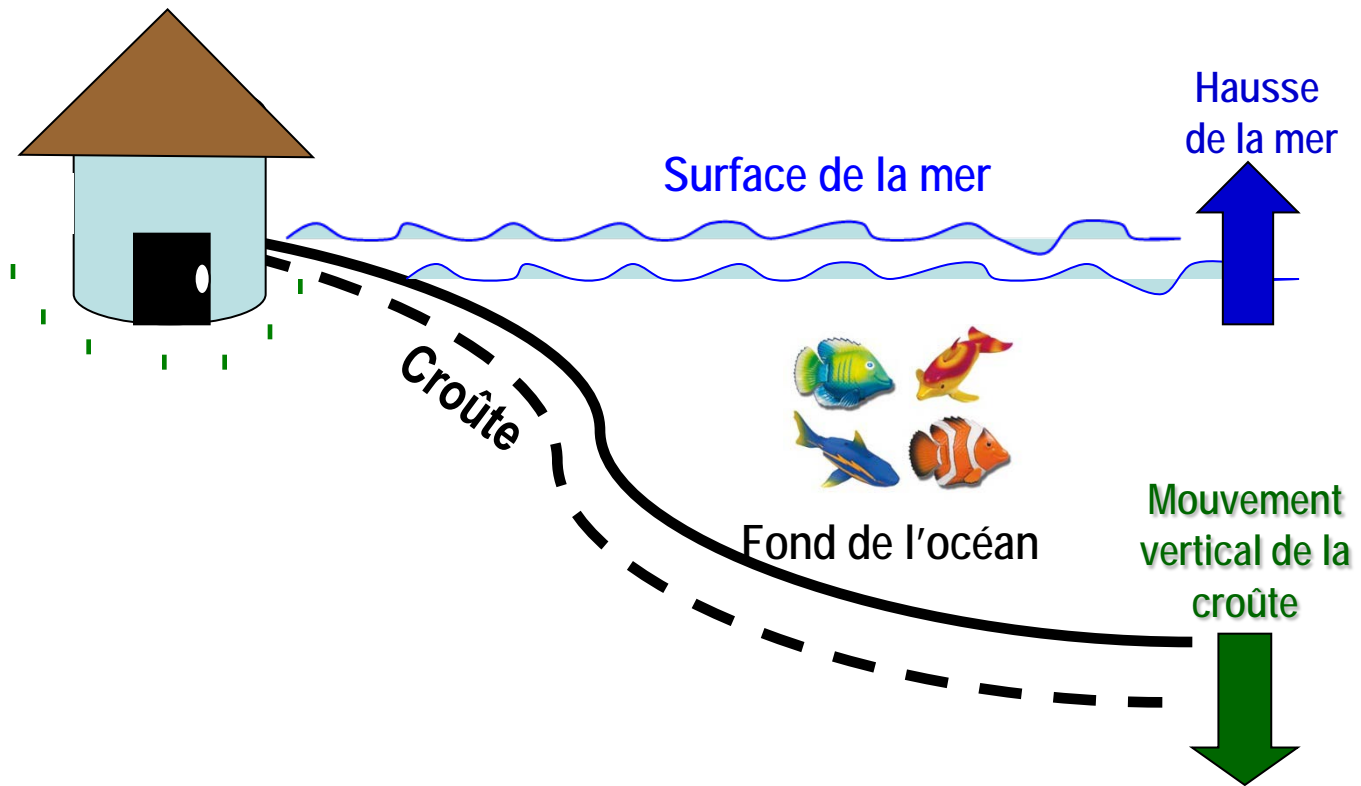


- « la hausse moyenne globale »
- + « la variabilité régionale »
- + « les mouvements de la croûte terrestre »

???????

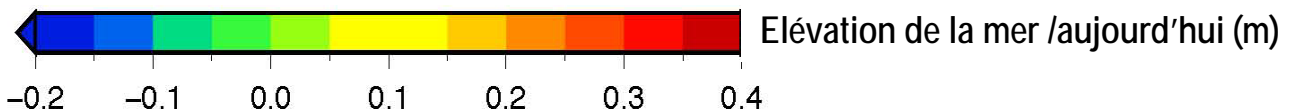
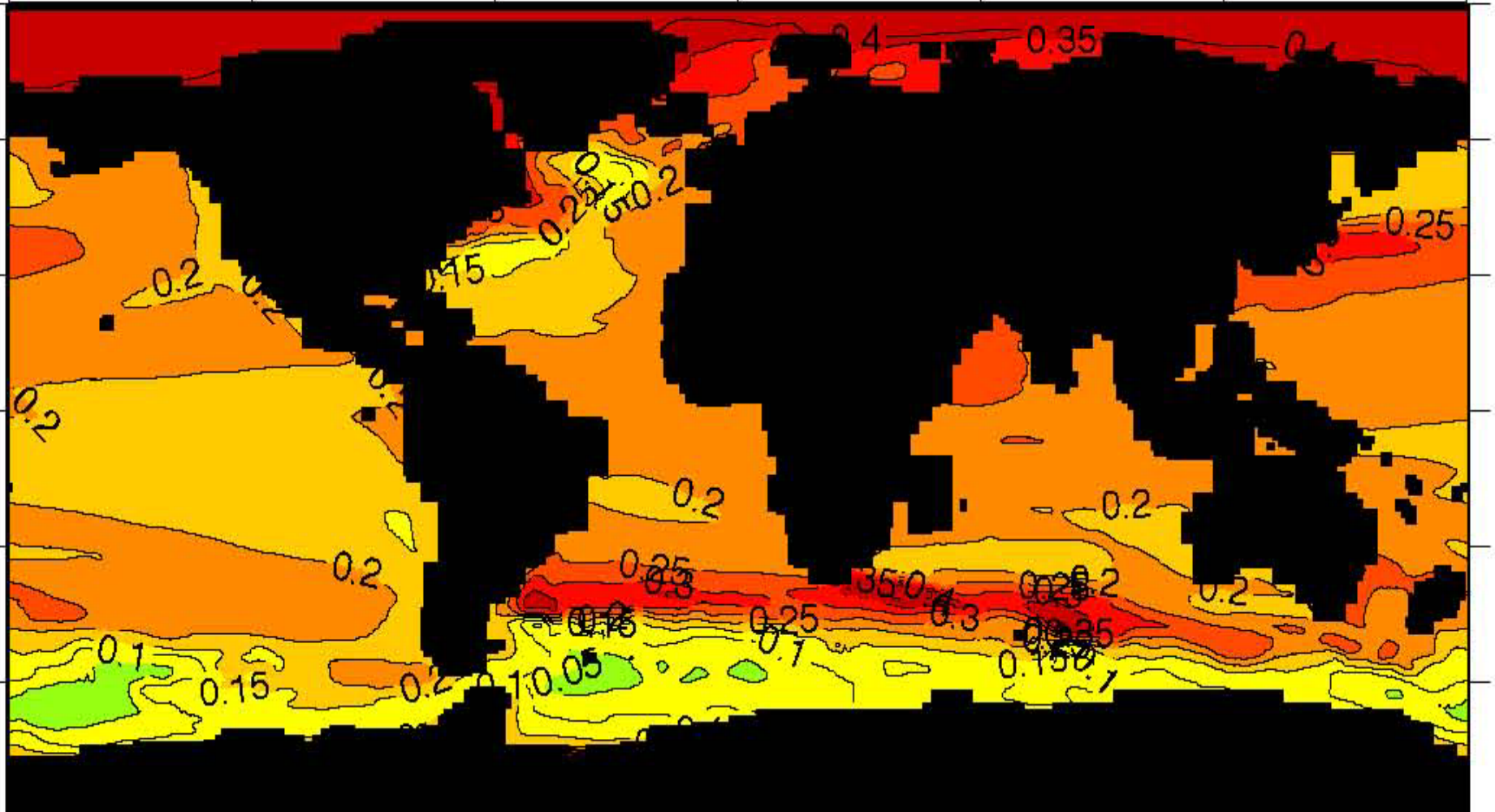
Car ce qui compte localement, c'est la variation **TOTALE** du niveau de la mer relativement à la côte →

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

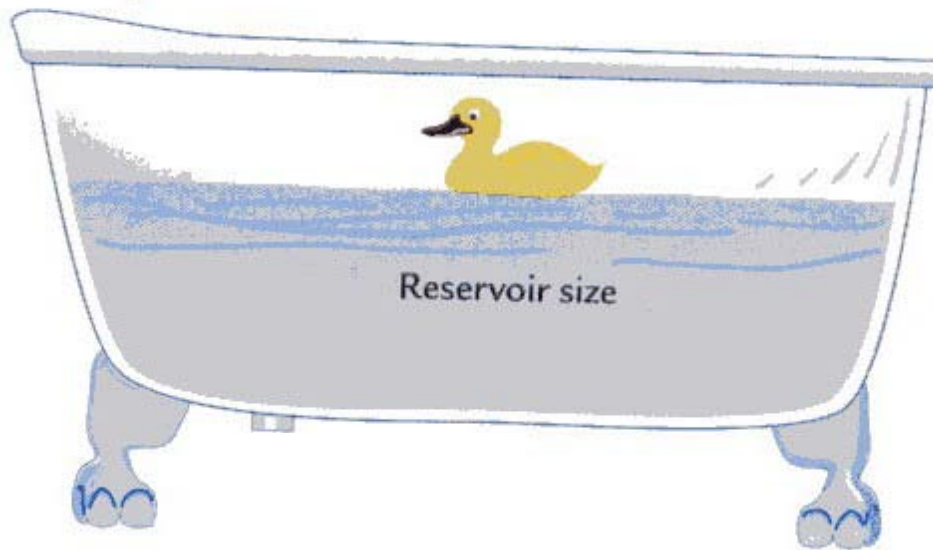


Élévation par rapport à la hausse moyenne globale de 50 cm (scénario de réchauffement 'moyen') Slangen et al., 2011

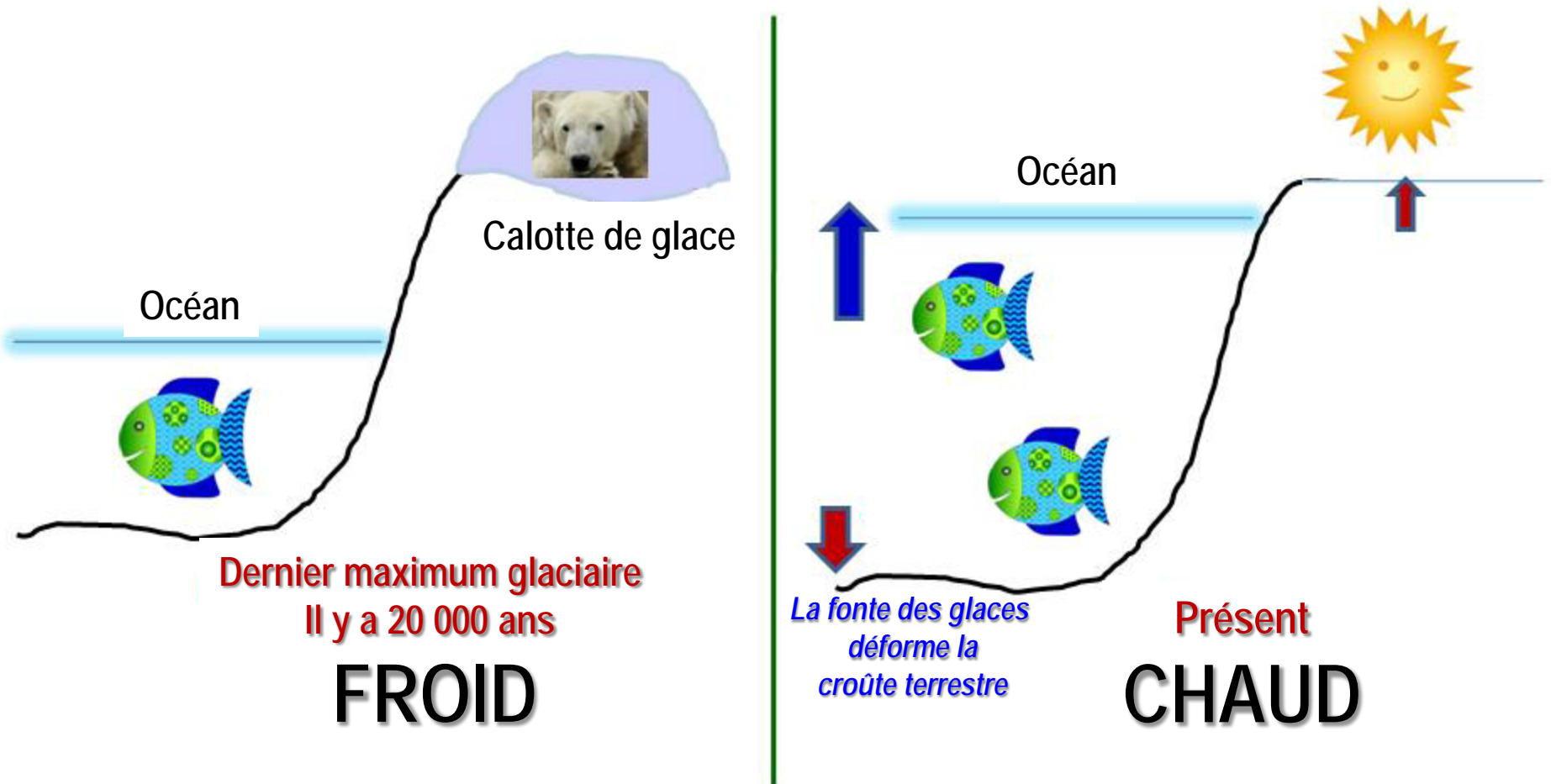
Autre source de variabilité régionale du niveau de la mer:  
→ La redistribution des masses d'eau liée à la fonte des glaces déforme les bassins océaniques et modifie l'attraction mutuelle des masses d'eau/glace



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

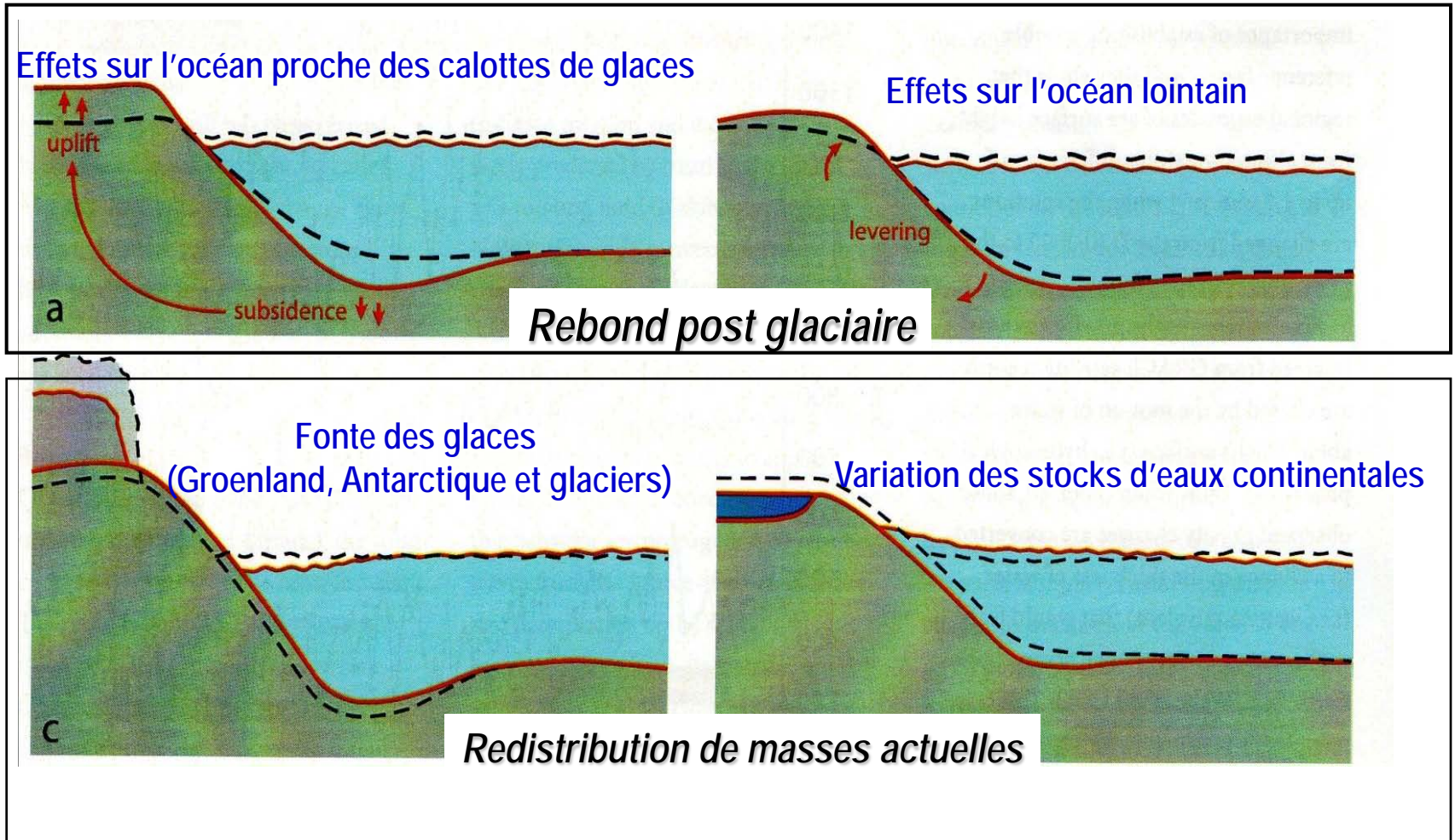


# Effet de la fonte des glaces polaires sur le niveau de la mer

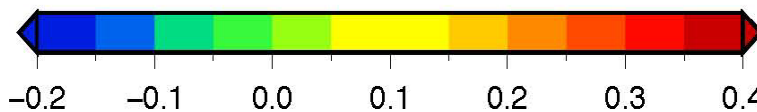
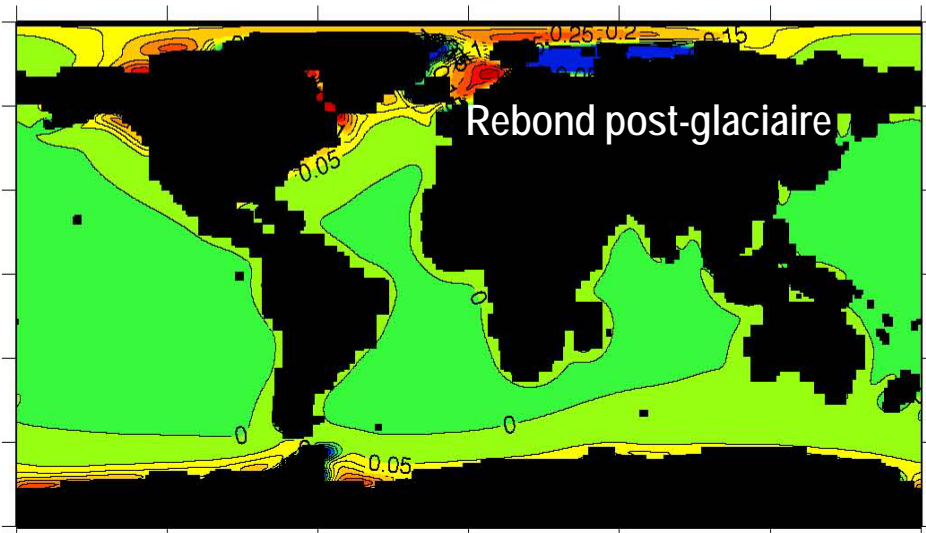
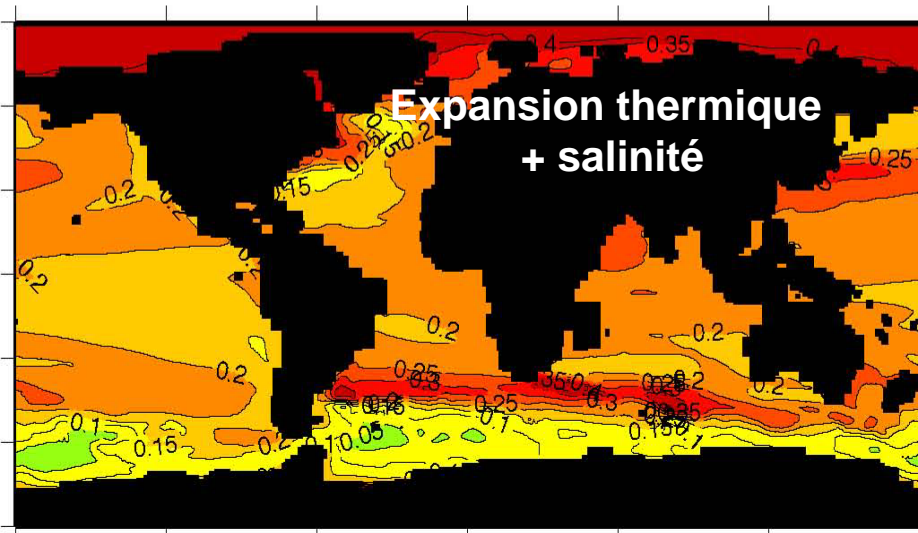
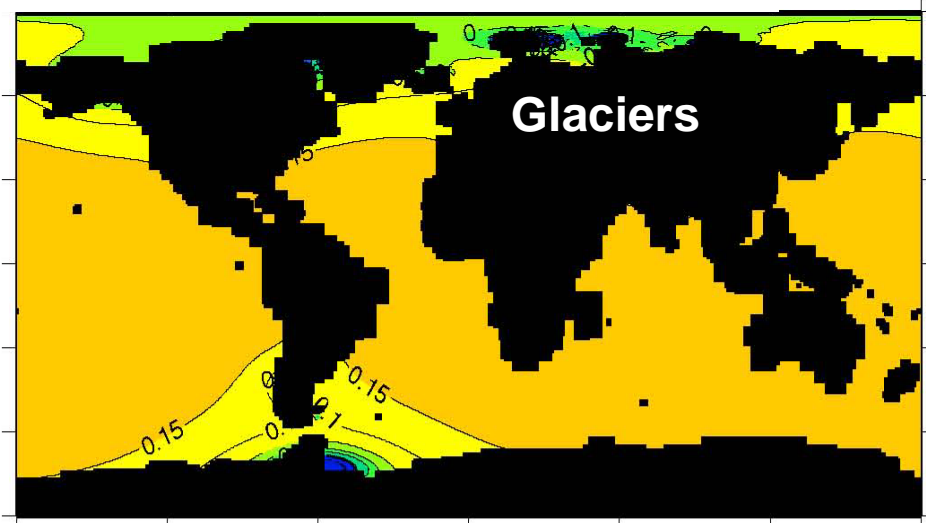
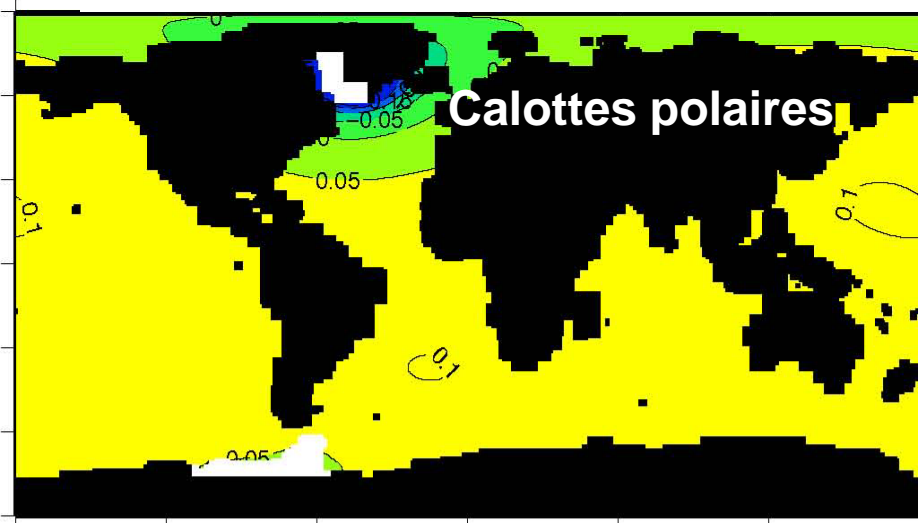




# Variabilité régionale du niveau de la mer due aux redistributions de masses passées et actuelles



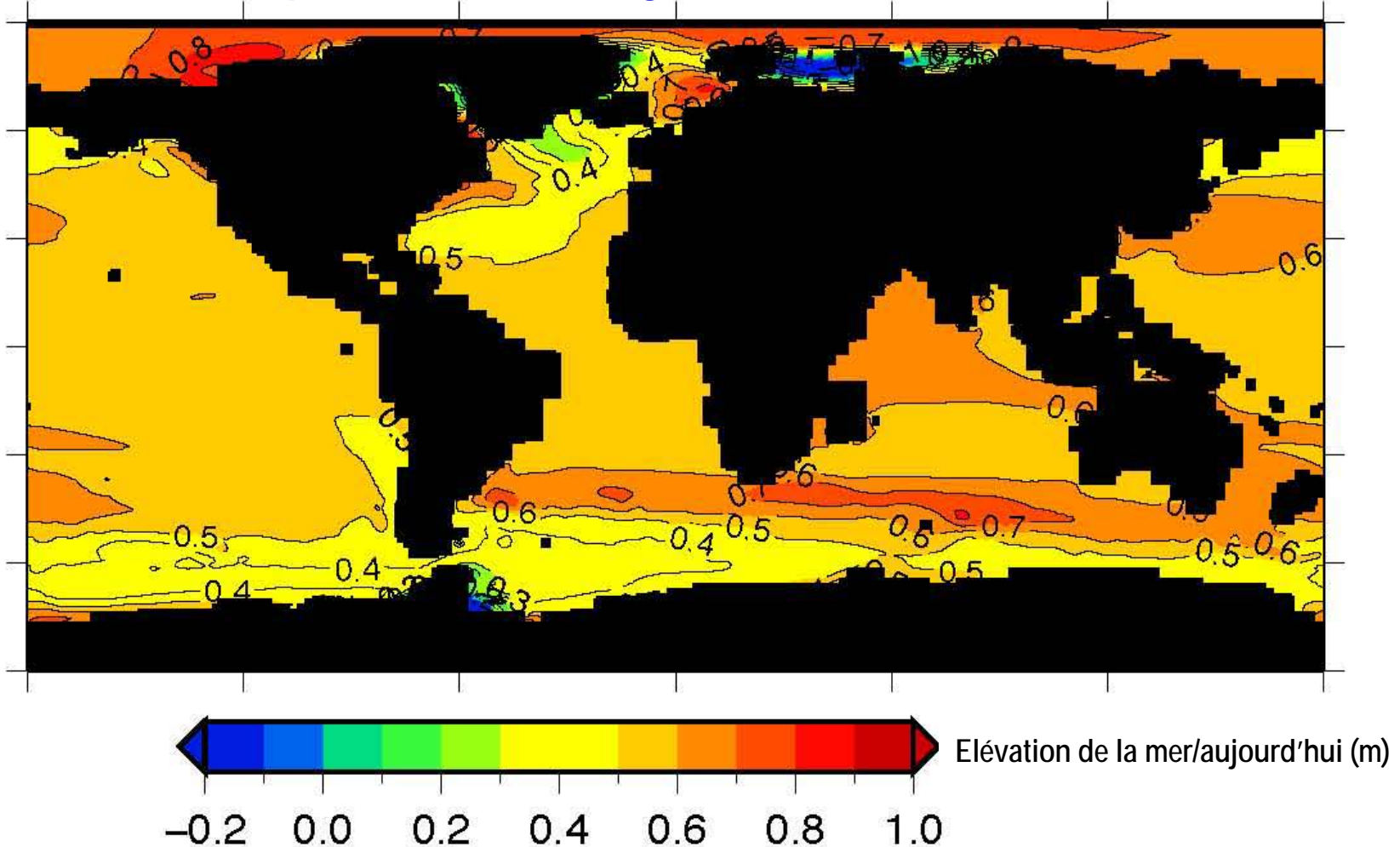
# Hausse (relative) de la mer (en 2100) due aux différents facteurs



Élévation de la mer/aujourd'hui (m)

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

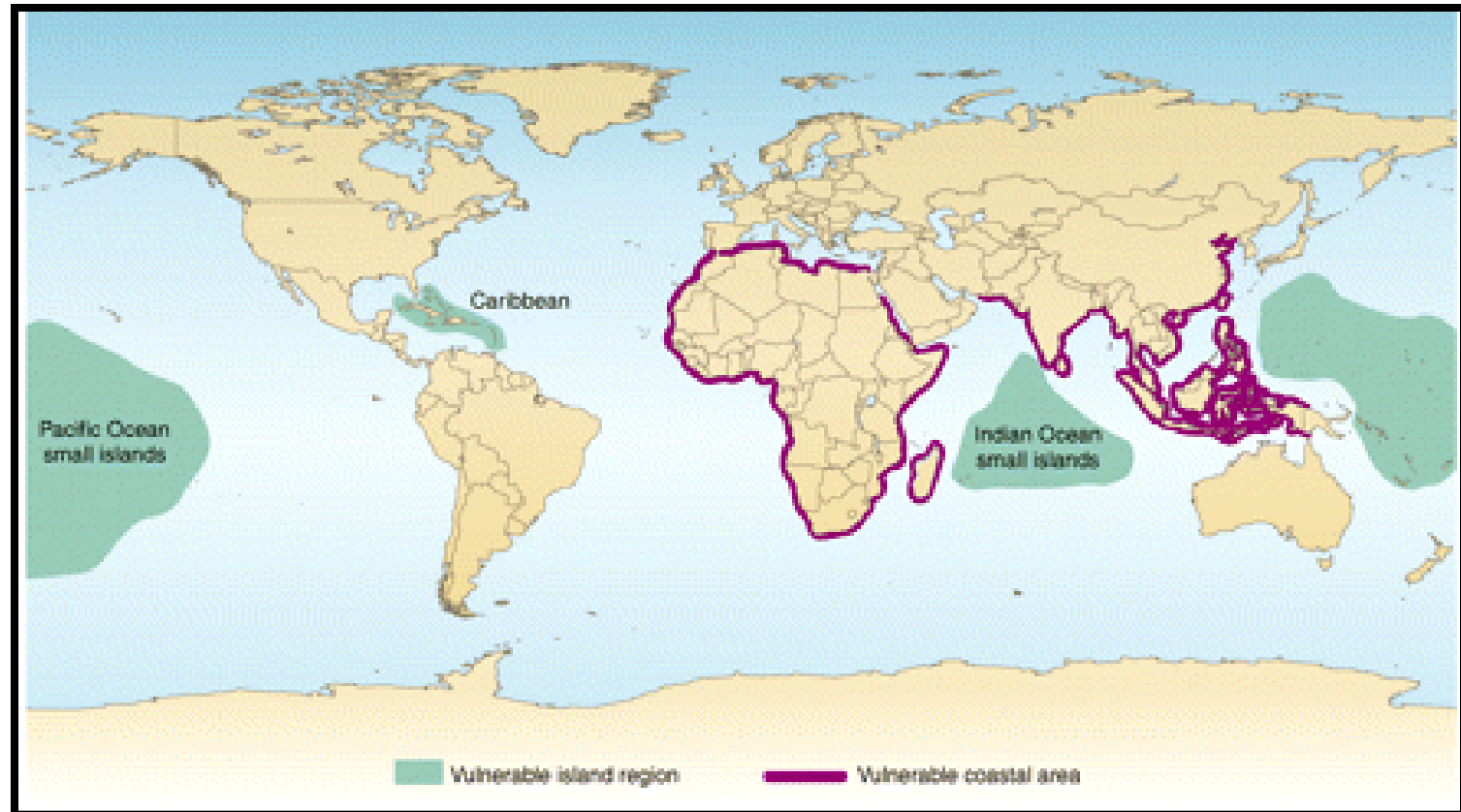
→ effets stériques + fonte des glaces + déformation de la terre solide



**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 water is a deep blue with white foam from waves in the foreground. The sky is a vibrant blue with a few wispy white clouds. The text "Merci de votre attention" is centered in the middle of the image.

**Merci de votre attention**