



# Impact du repère terrestre sur les mesures de niveau des mers

Alvaro Santamaría-Gómez

Géosciences Environnement Toulouse

Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier



GÉOSCIENCES  
ENVIRONNEMENT  
TOULOUSE



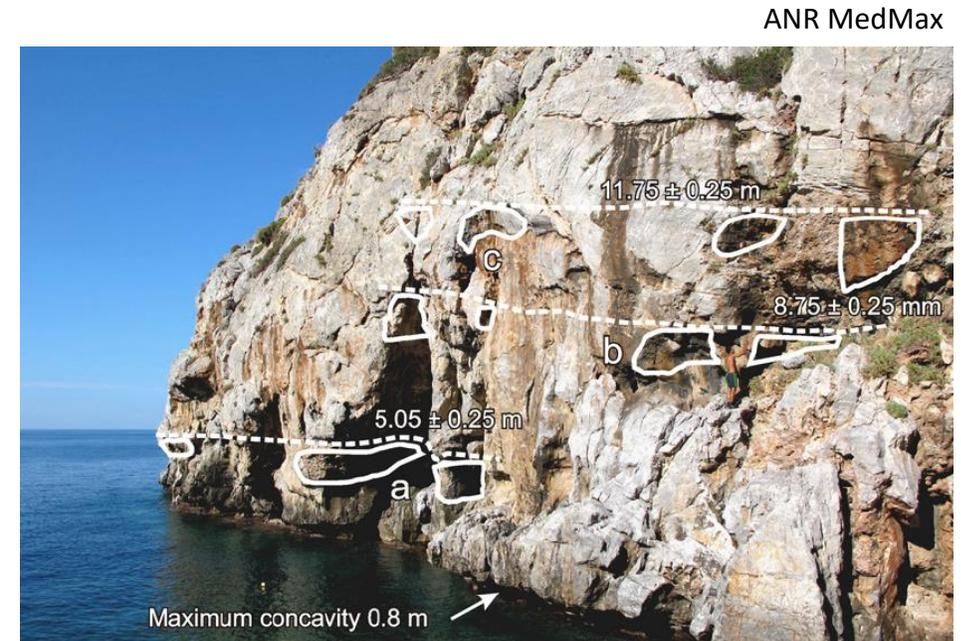
Atelier VLBI du GRGS, Bordeaux, 15 mars 2017

- Pourquoi (et comment) mesurer le niveau de la mer ?
- Combien a déjà monté le niveau de la mer ?
- L'impact du repère terrestre sur la mesure du niveau de la mer.
- La contribution du VLBI.

# Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

- Pendant la dernière période interglaciaire (il y a ~125.000 ans), avec températures supérieures de 2 °C aux températures du XIX<sup>e</sup> siècle, le niveau moyen des mers a été supérieur au niveau actuel d'entre 5 et 10 m [*Rapport GIEC 2013*].

<https://www.marum.de>



# Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

- Pendant la dernière période interglaciaire (il y a ~125.000 ans), avec températures supérieures de 2 °C aux températures du XIX<sup>e</sup> siècle, le niveau moyen des mers a été supérieur au niveau actuel d'entre 5 et 10 m [*Rapport GIEC 2013*].
- En 2010, 10% de la population mondiale (~ 740 M) à moins de 10 m du niveau moyen de la mer. En 2050, plus de 950 M. Dans l'UE, 41% de la population habite dans une région « côtière » [*Eurostat*].
- La montée du niveau de la mer représente un risque pour la population.

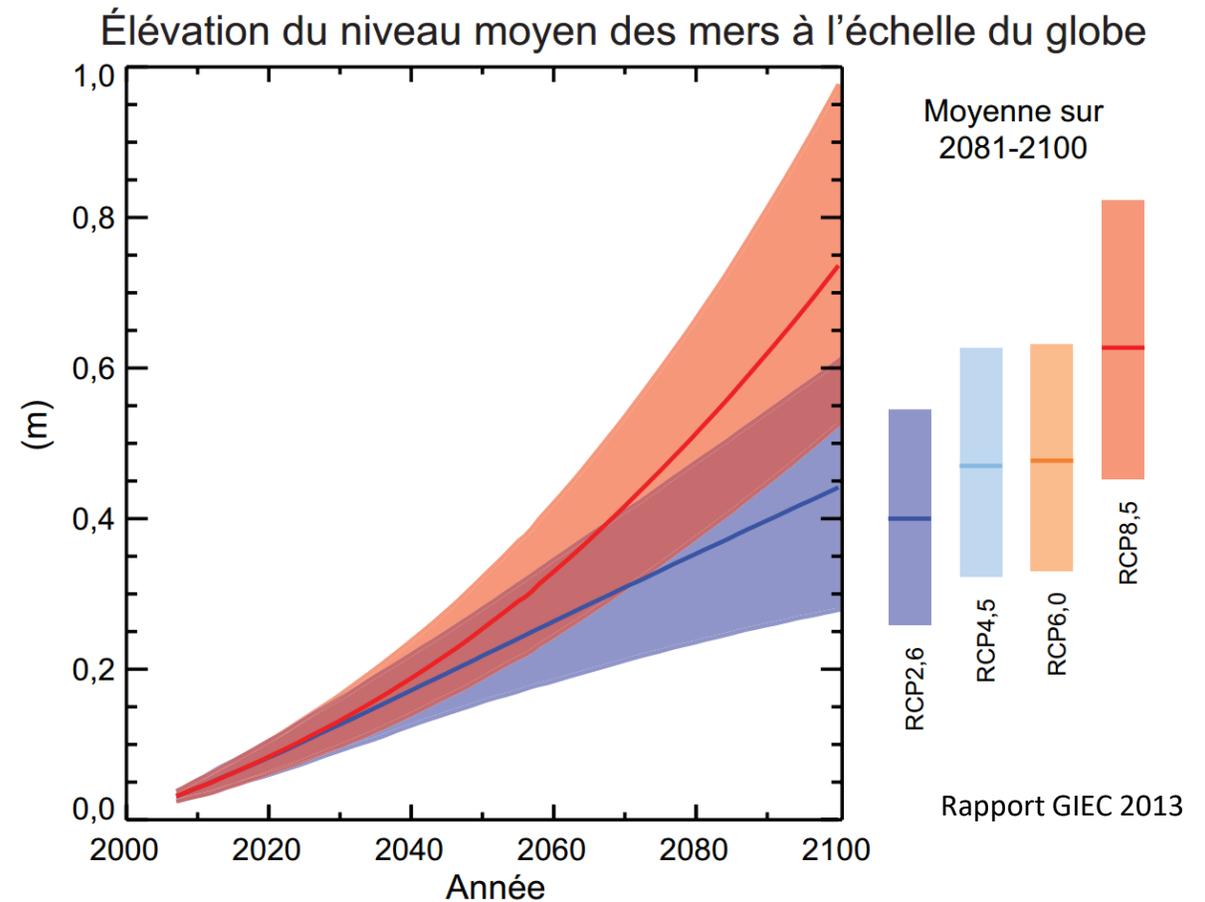
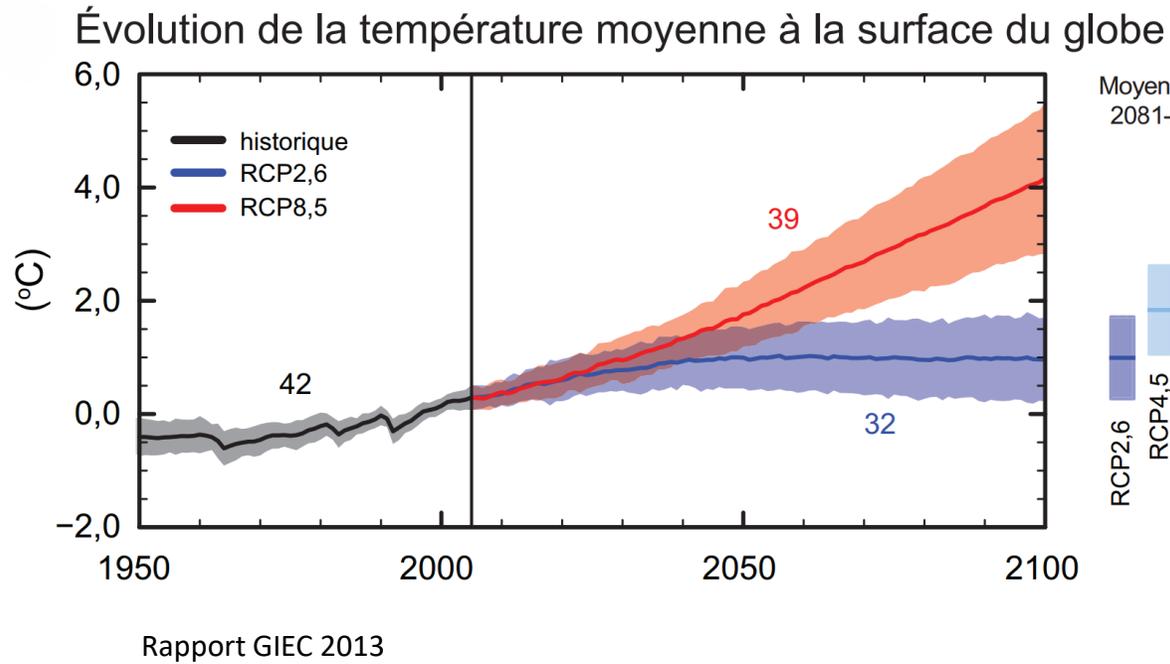
# Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

- Pendant la dernière période interglaciaire (il y a ~125.000 ans), avec températures supérieures de 2 °C aux températures du XIX<sup>e</sup> siècle, le niveau moyen des mers a été supérieur au niveau actuel d'entre 5 et 10 m [*Rapport GIEC 2013*].
- En 2010, 10% de la population mondiale (~ 740 M) à moins de 10 m du niveau moyen de la mer. En 2050, plus de 950 M. Dans l'UE, 41% de la population habite dans une région « côtière » [*Eurostat*].
- La montée du niveau de la mer représente un risque pour la population.

<http://www.floodmap.net>



# Combien va monter la mer prochainement ?



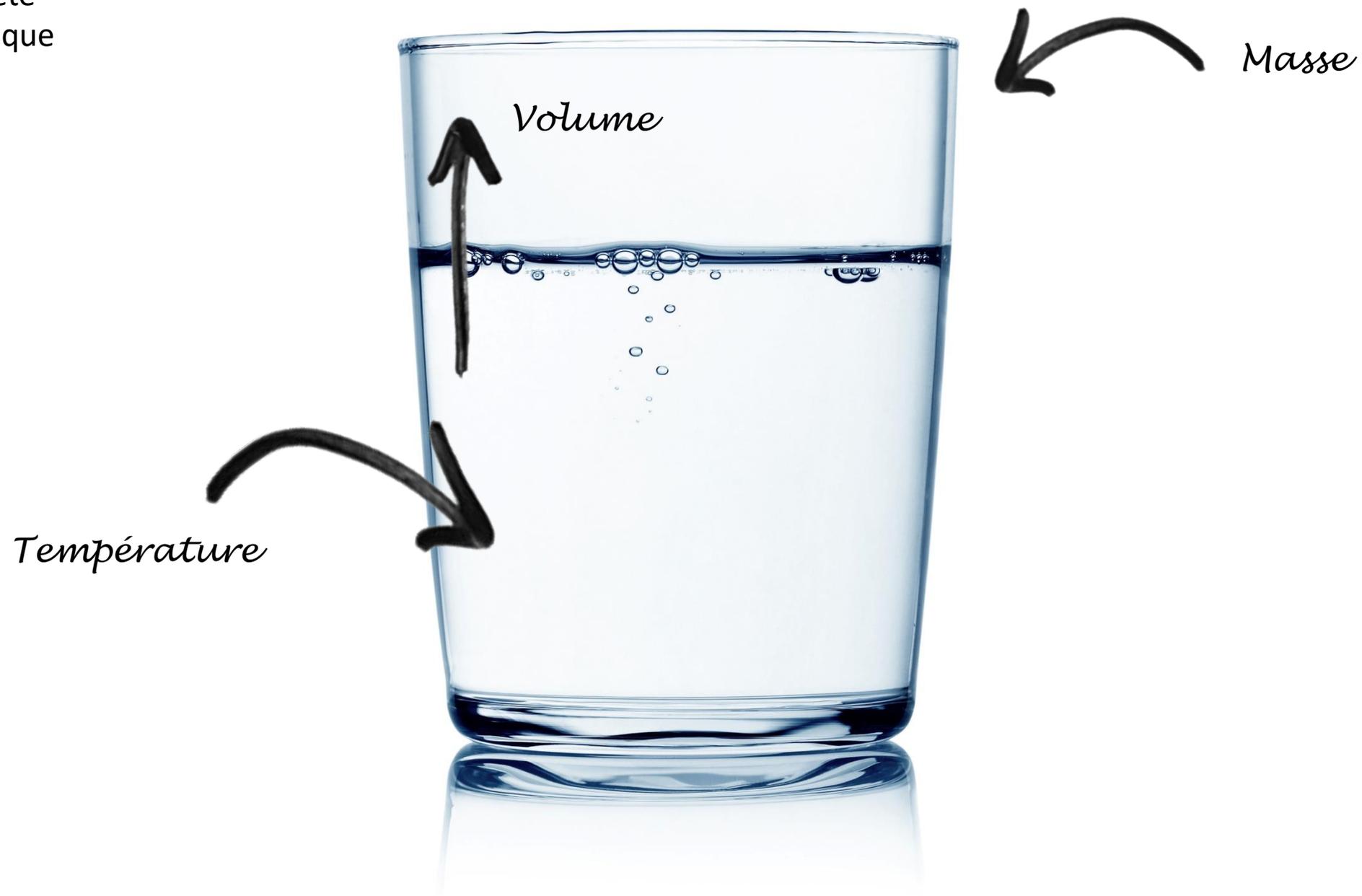
# Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

- Pendant la dernière période interglaciaire (il y a ~125.000 ans), avec températures supérieures de 2 °C aux températures du XIX<sup>e</sup> siècle, le niveau moyen des mers a été supérieur au niveau actuel d'entre 5 et 10 m [*Rapport GIEC 2013*].
- En 2010, 10% de la population mondiale (~ 740 M) à moins de 10 m du niveau moyen de la mer. En 2050, plus de 950 M. Dans l'UE, 41% de la population habite dans une région « côtière » [*Eurostat*].
- La montée du niveau de la mer représente un risque pour la population.
- 100 Gt de perte de glace ≈ 0,3 mm d'élévation du niveau global moyen des mers.  
Glaciers ≈ 0,5 m ; Ouest Antarctique ≈ 3,3 m ; Groenland ≈ 7 m ; Est Antarctique ≈ 52 m.
- La variation du niveau de la mer est un indice de la variation du climat et **le repère terrestre y joue un rôle fondamentale.**

Modèle de notre planète

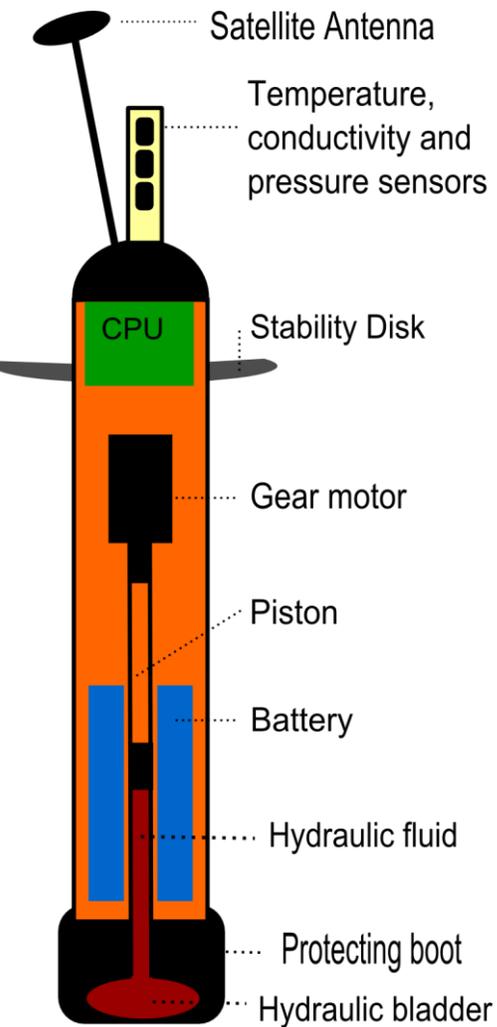


Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique



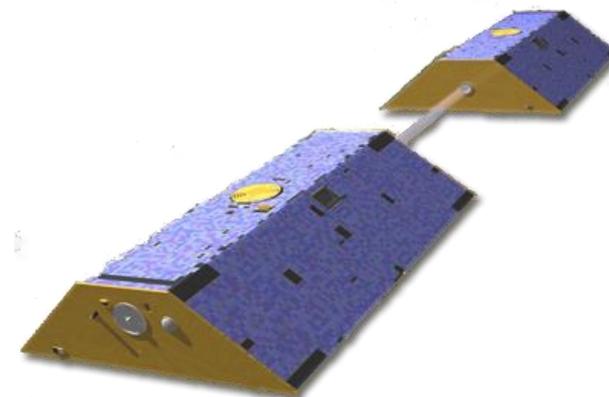
Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique

Flotteur ARGO

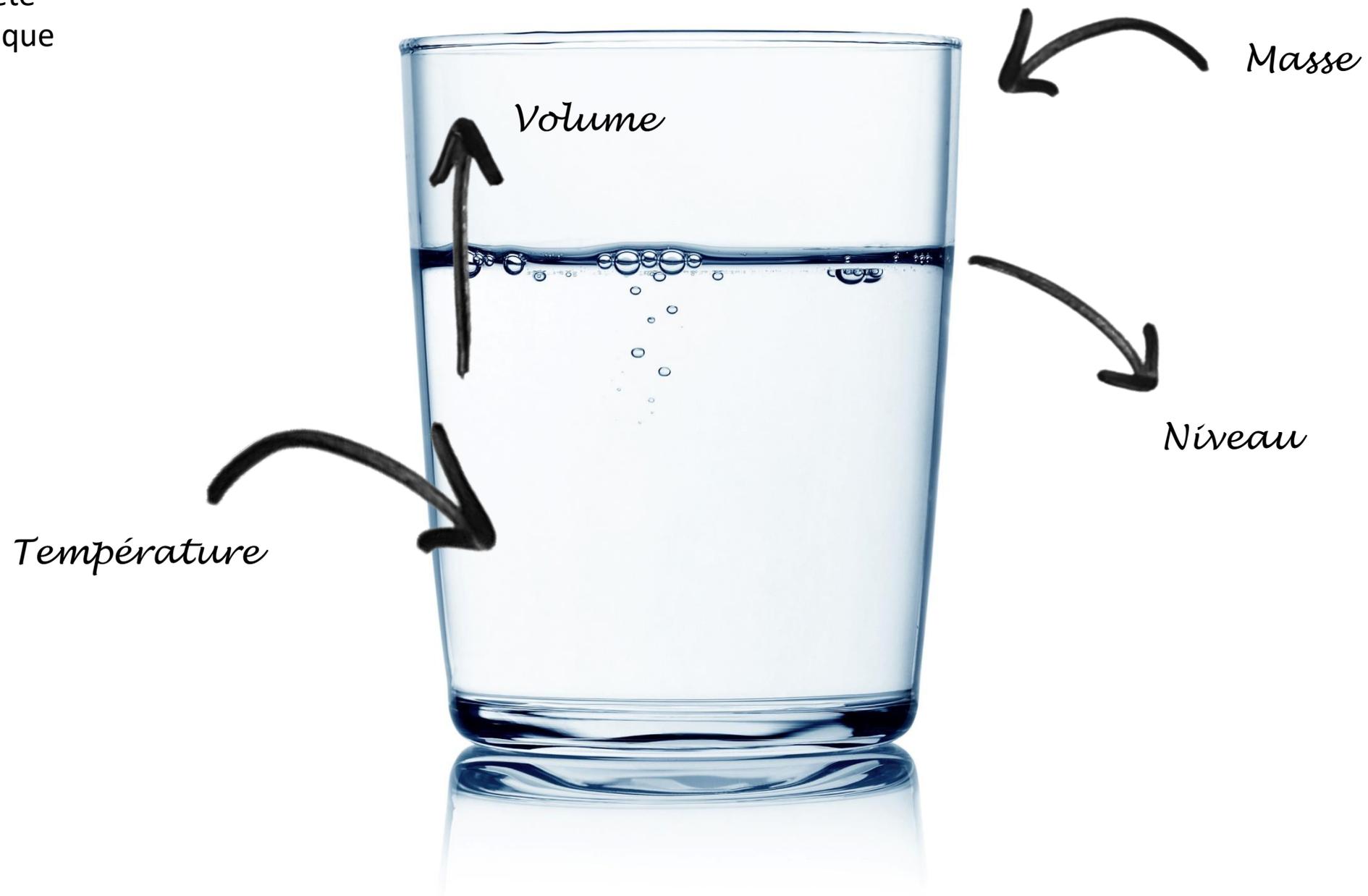


← Masse

Mission GRACE



Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique



Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique

Niveau des mers par rapport à :

- La côte (marégraphie)
- Le centre de masse (altimétrie)

Marégraphes (depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle)



*Température*



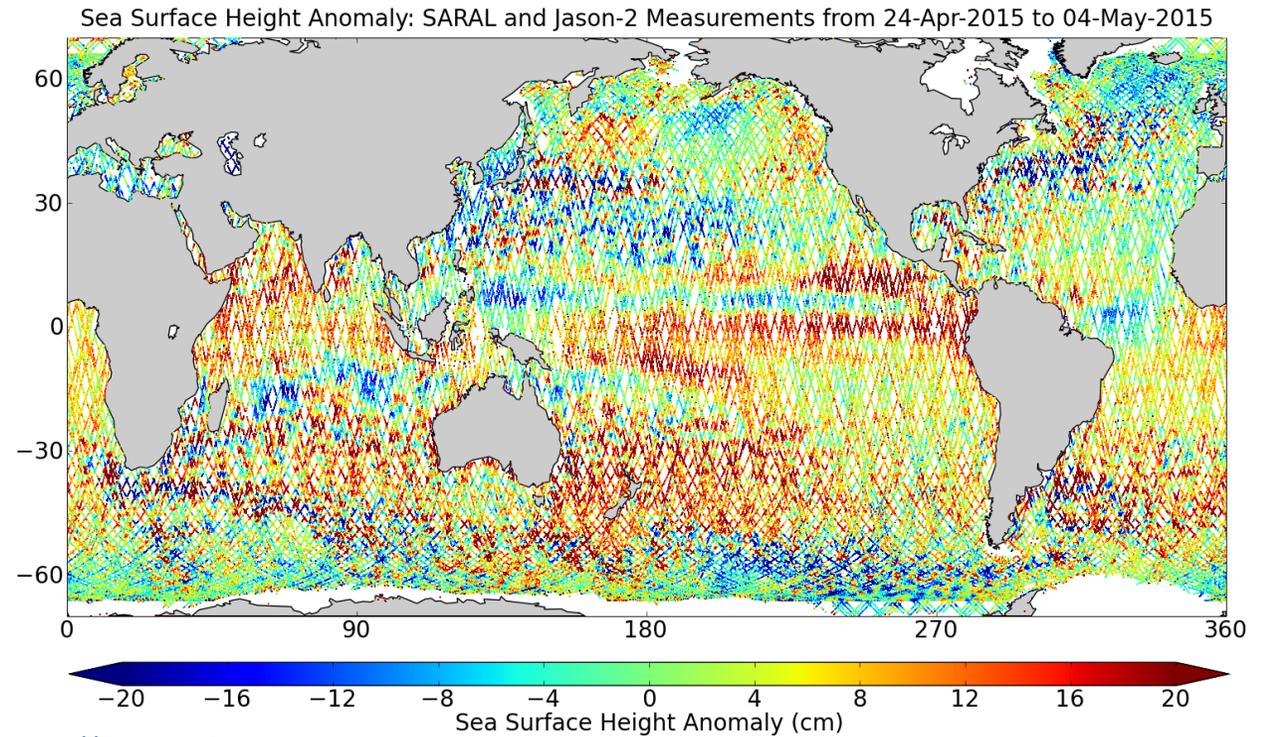
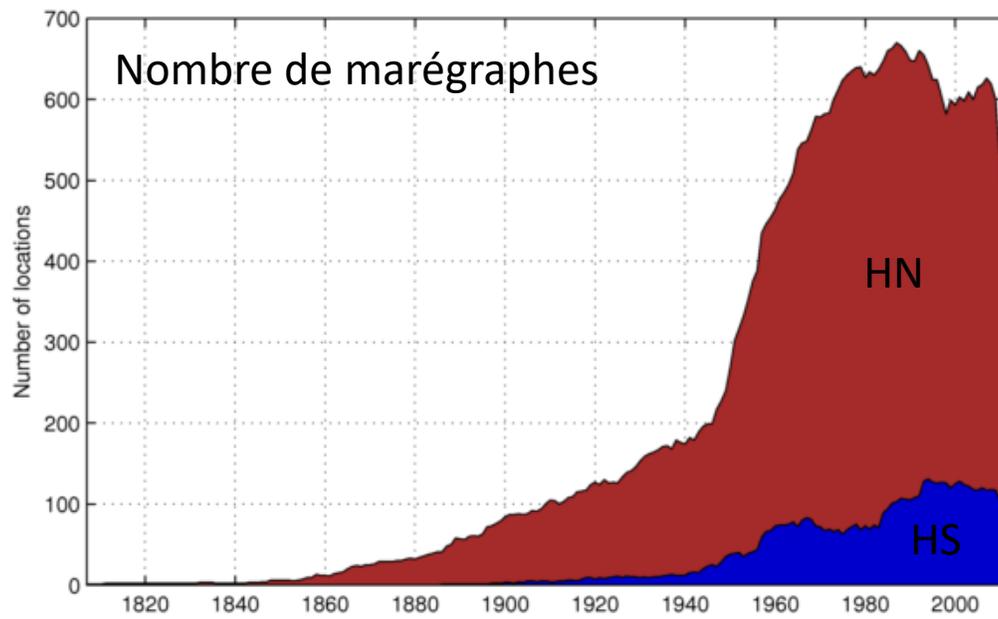
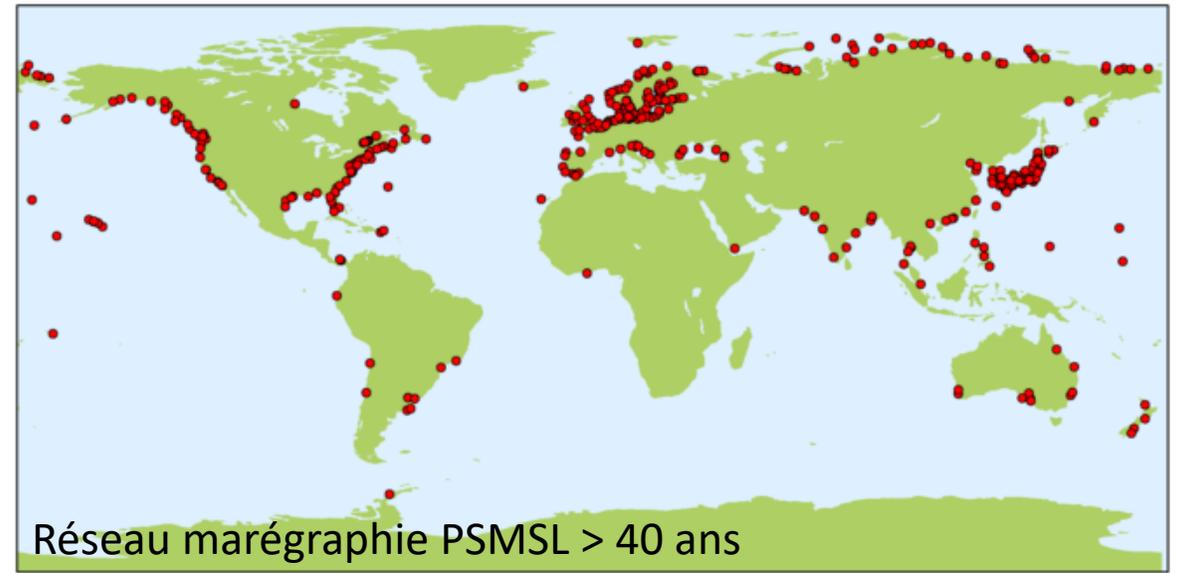
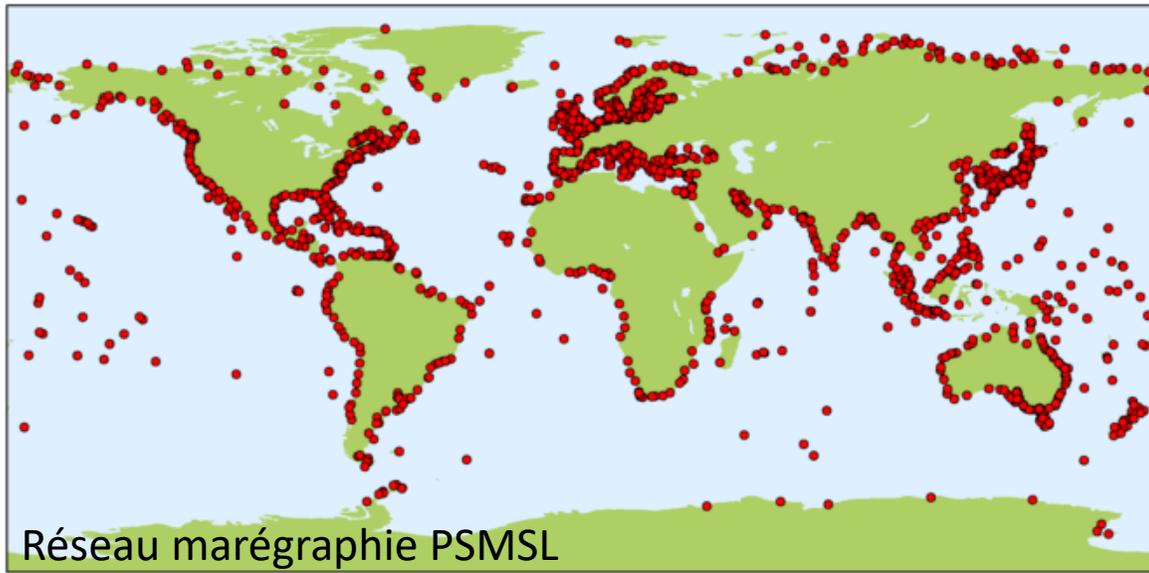
*Volume*

*Masse*

*Niveau*

Altimètres satellite  
(depuis 1992)





Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique

Niveau des mers par rapport à :

- La côte (marégraphie)
- Le centre de masse (altimétrie)

Marégraphes (depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle)



*Température*



*Volume*

*Niveau*



*Masse*



Altimètres satellite  
(depuis 1992)



Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique

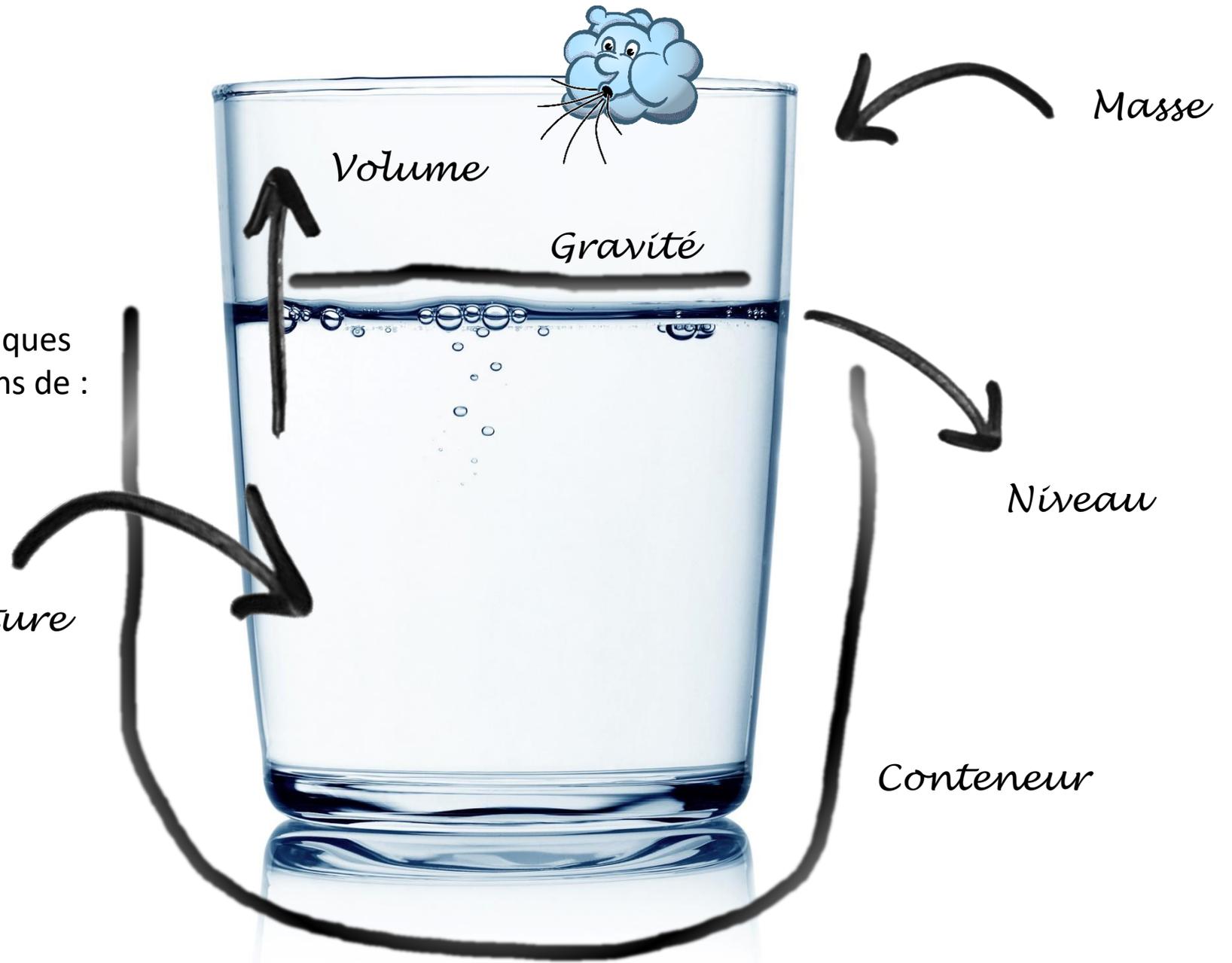
Niveau des mers par rapport à :

- La côte (marégraphie)
- Le centre de masse (altimétrie)

Contamination des variations climatiques  
du niveau de la mer par des variations de :

- Forçage atmosphérique
- Géoïde
- Déformation de la Terre solide

*Température*



*Conteneur*

Modèle de notre planète  
Réchauffement climatique

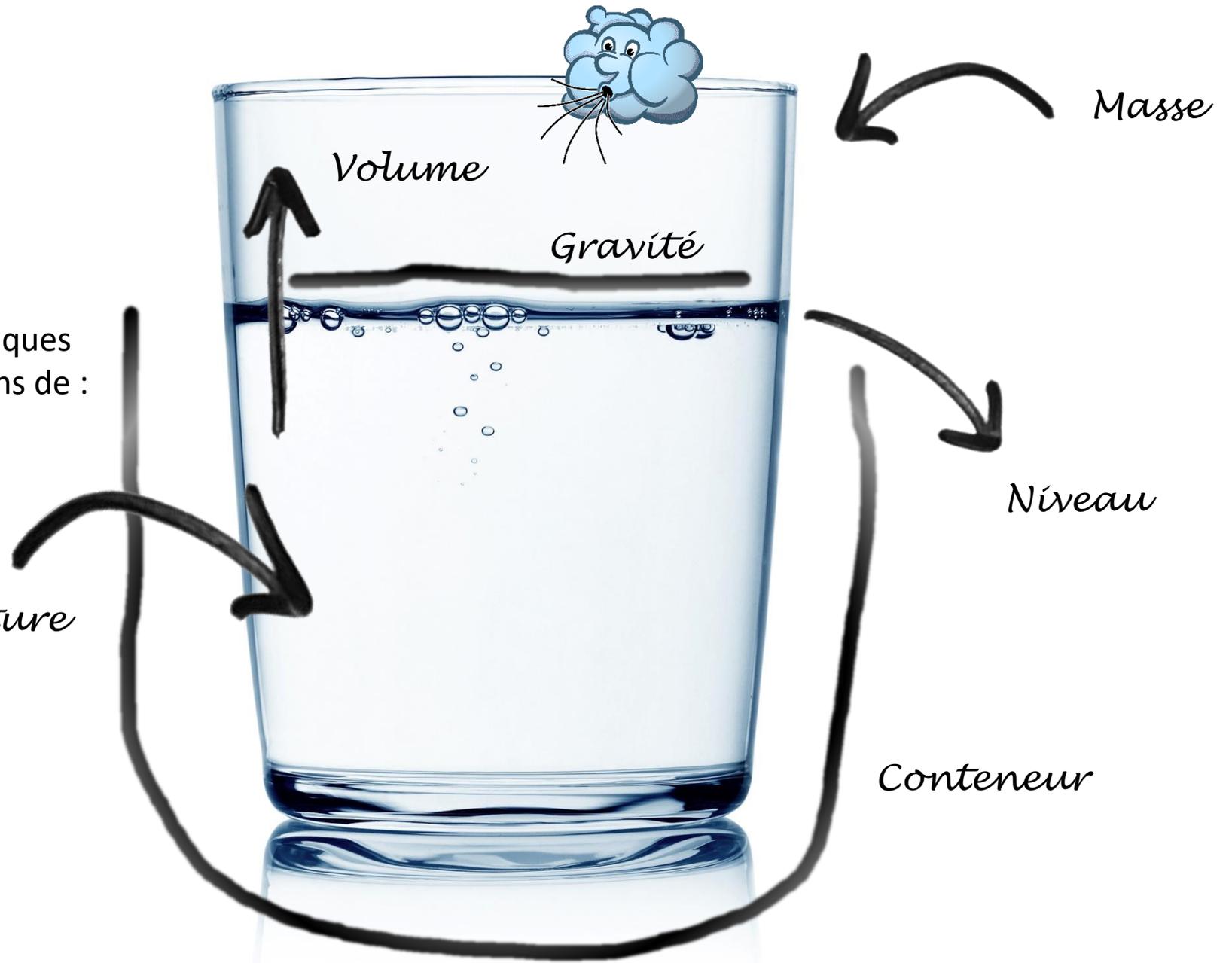
Niveau des mers par rapport à :

- La côte (marégraphie)
- **Le centre de masse** (altimétrie)

Contamination des variations climatiques  
du niveau de la mer par des variations de :

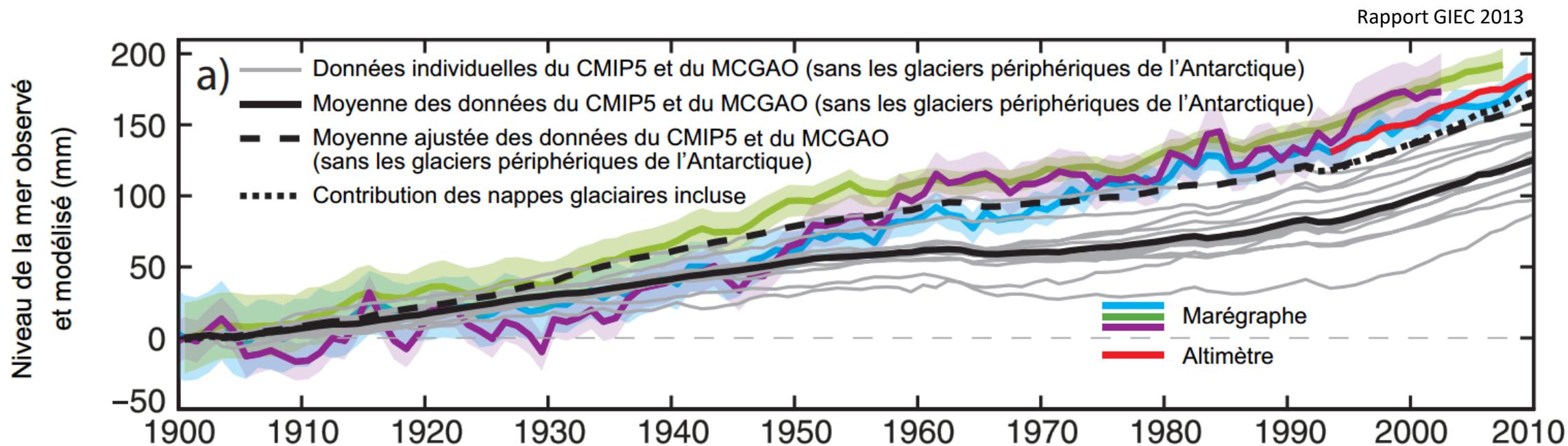
- Forçage atmosphérique
- Géoïde
- **Déformation de la Terre solide**

*Température*



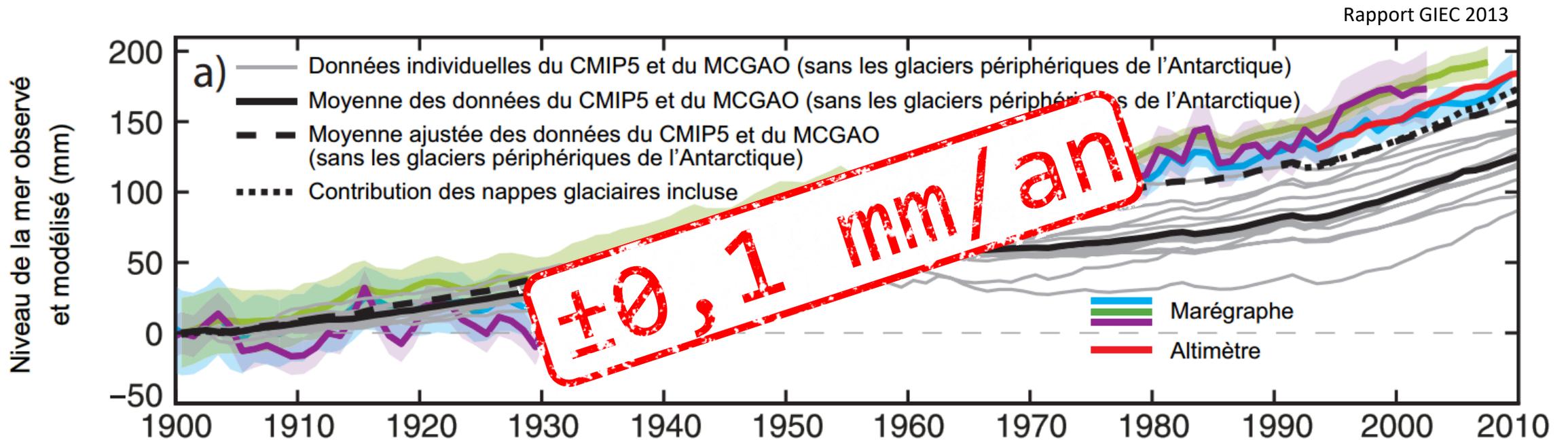
# Combien a monté le niveau de la mer ?

- Entre 1900 et 2010 le niveau moyen global a monté de 1,1 à 1,9 mm/an [*différentes études*].
- Entre 1993 et 2014 (période altimétrique), entre 2,2 et 3 mm/an ( $1\sigma$ ) [*Watson et al. 2015*].



# Combien a déjà monté le niveau de la mer ?

- Entre 1900 et 2010 le niveau moyen global a monté de 1,1 à 1,9 mm/an [*différentes études*].
- Entre 1993 et 2014 (période altimétrique), entre 2,2 et 3 mm/an ( $1\sigma$ ) [*Watson et al. 2015*].



# L'impact du repère terrestre dans l'altimétrie

La fonction de transfert du repère terrestre vers le niveau de la mer dépend de la géométrie du réseau de suivi, de la technique géodésique, de l'inclinaison de l'orbite et du paramétrage de l'orbite.

DORIS : L'échelle du repère a un impact négligeable sur les orbites des altimètres (position radiale).

L'origine a un impact de 74% d'erreur sur  $\dot{T}_Z$  (impact de  $\dot{T}_X$  et  $\dot{T}_Y$  est 5 - 7 %).

Sur la surface d'océan échantillonnée => 12% d'erreur

Morel and Willis, 2005

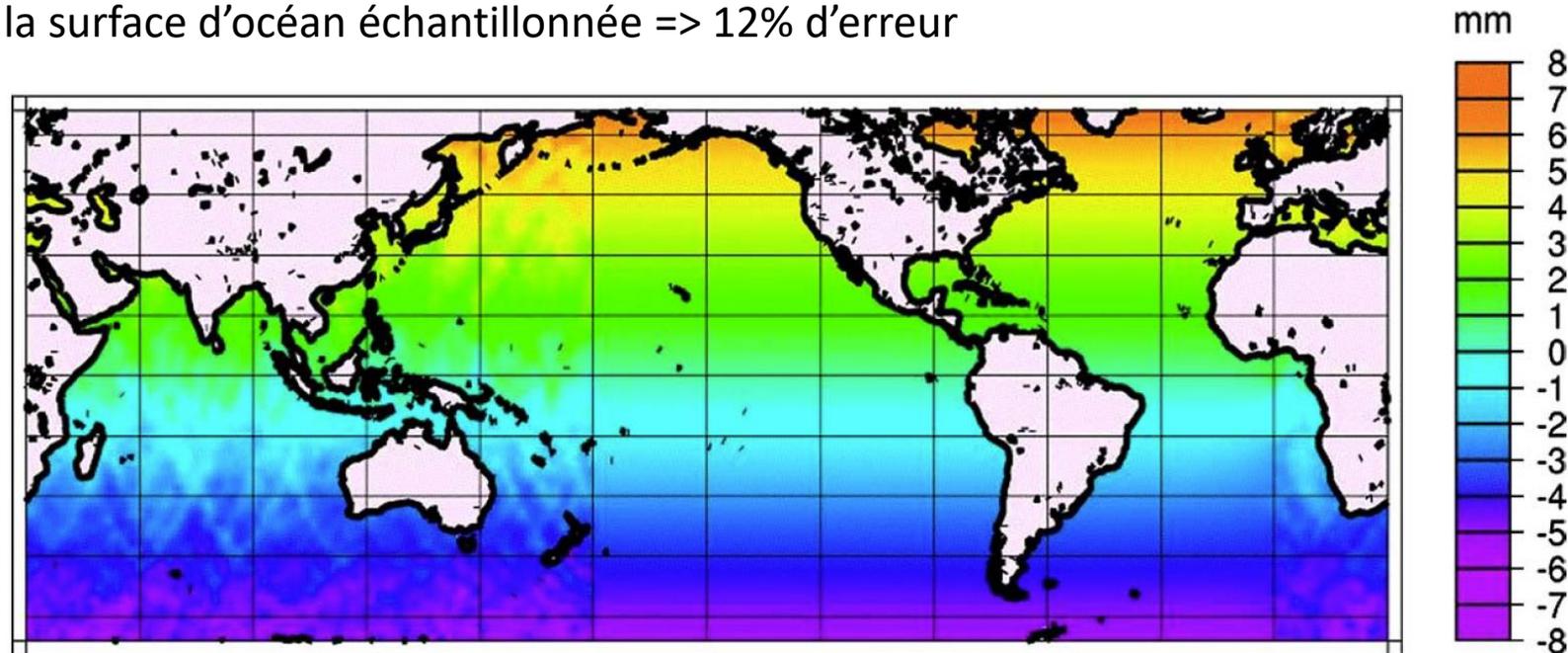
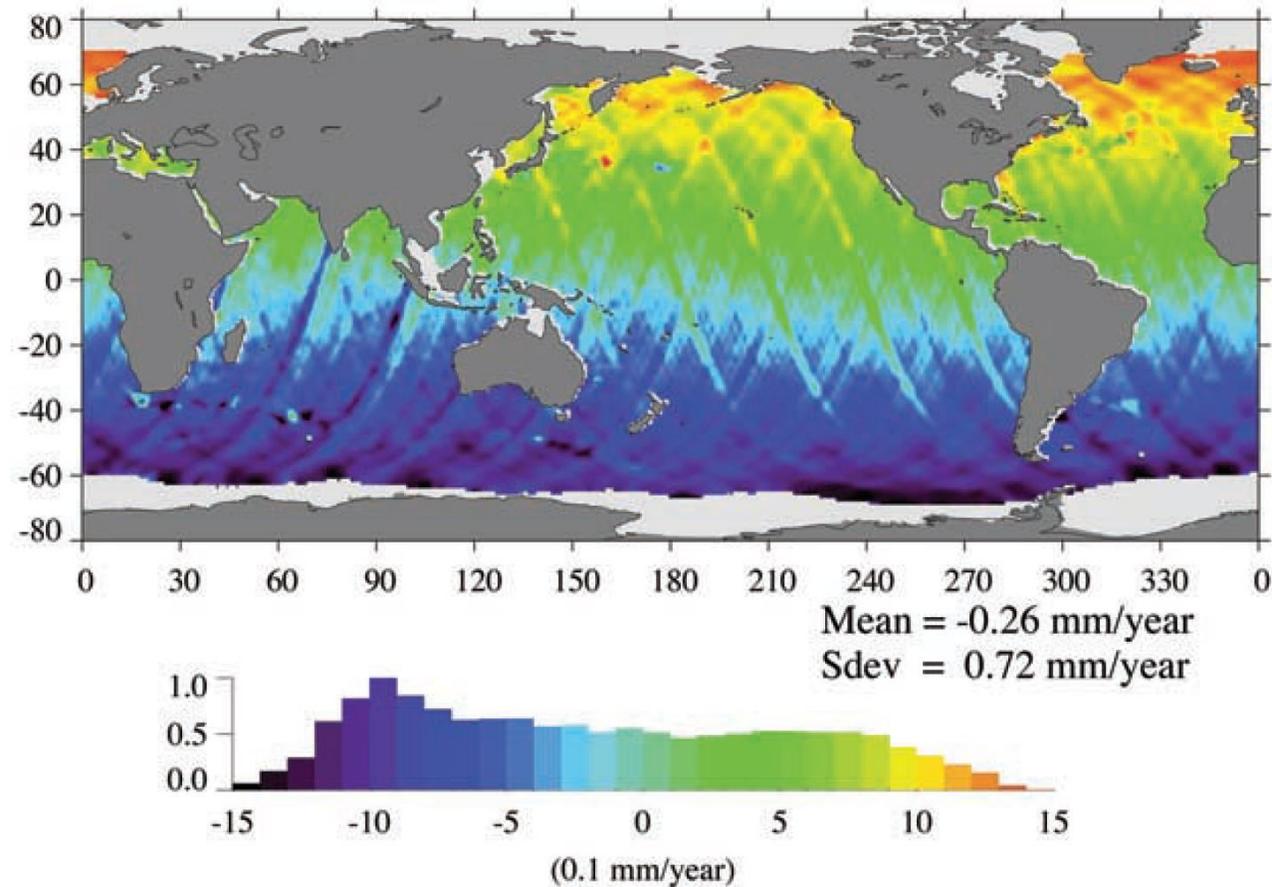


Fig. 5. Observed geographical mean sea level errors resulting from a 10 mm Z-translation of the Terrestrial Reference Frame (DORIS station coordinates).

Beckley et al. 2007



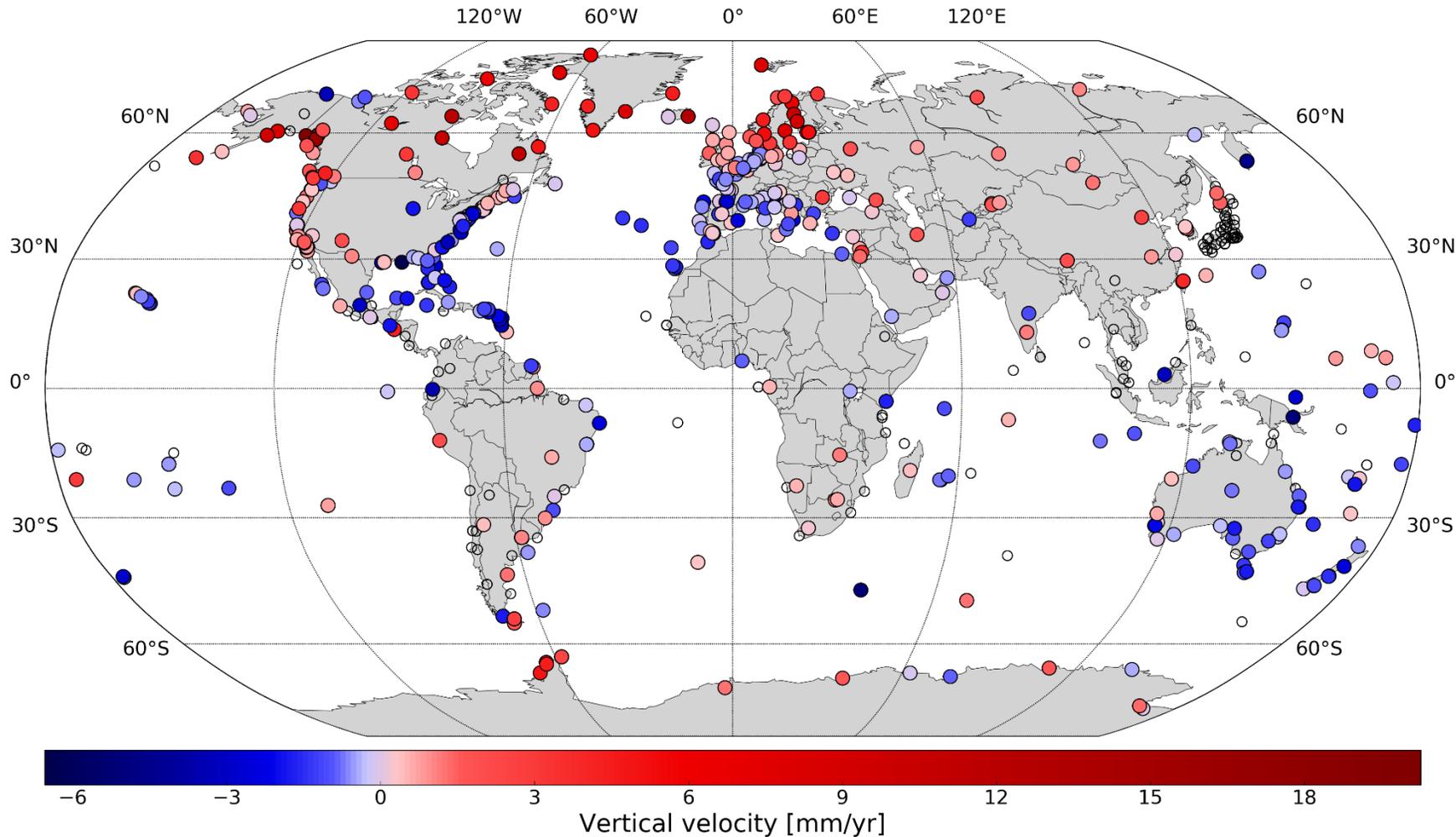
**Figure 2.** Regional TOPEX (1993–2002) sea surface height (SSH) trend differences from direct impact of [ITRF2005 \(GGM02C\)](#) minus [CSR95 \(JGM3\)](#) orbit differences. The positive values in the Northern Hemisphere indicate a previous underestimation of MSL of up to 1.5 mm/yr in the northwest Atlantic.

Impact sur le niveau moyen global de la mer : -0,26 mm/an. Impact régional jusqu'à 1,5 mm/an.

« The effects of changing the reference frame are of the same order as the recent reported mass loss from Greenland or Antarctica »

# L'impact du repère dans la marégraphie

Mouvement du sol par GPS : Solution ULR6 (IGS repro2, ITRF2014)

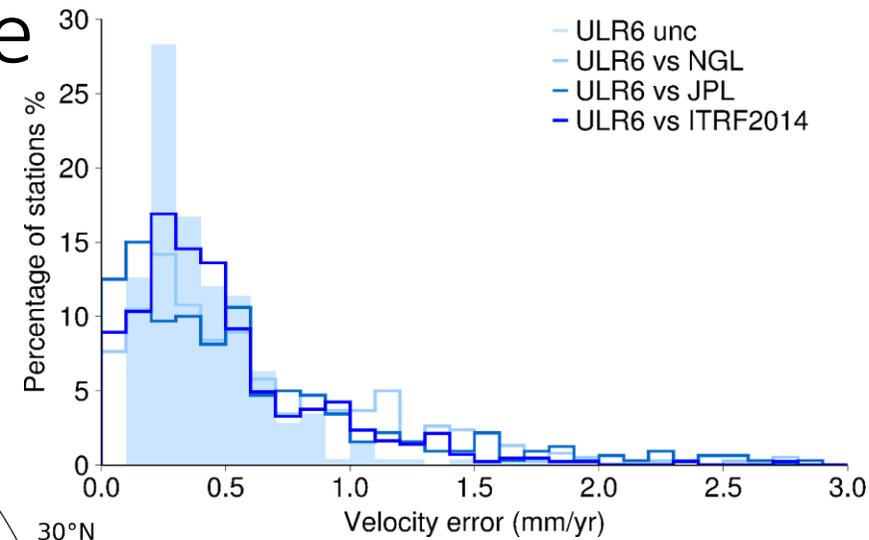
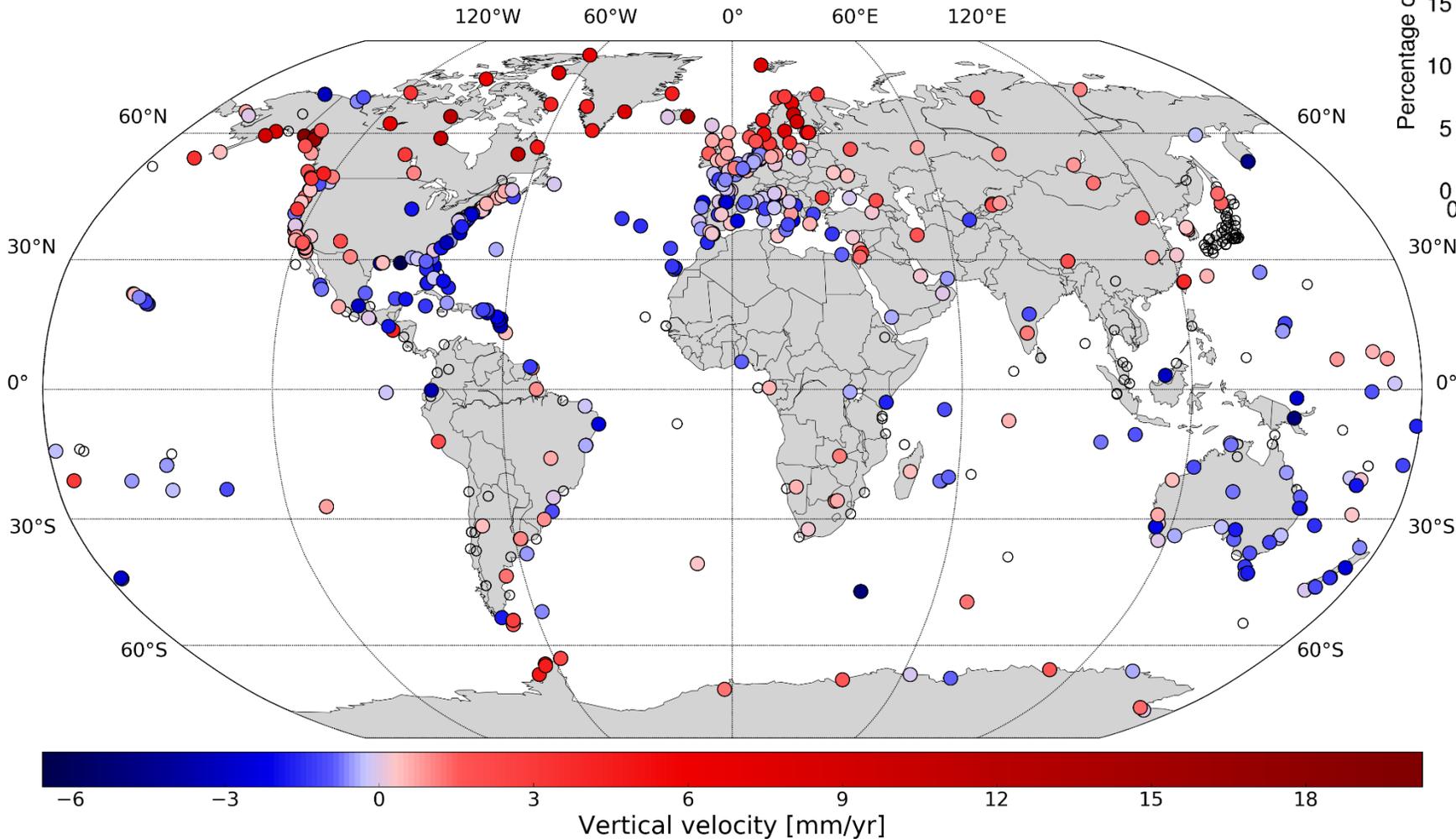


[www.sonel.org](http://www.sonel.org)

Santamaría-Gómez et al. (en révision)

# L'impact du repère dans la marégraphie

Mouvement du sol par GPS : Solution ULR6 (IGS repro2, ITRF2014)



[www.sonel.org](http://www.sonel.org)

Santamaría-Gómez et al. (en révision)

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

- 1) Orientation
- 2) Evolution de l'origine et échelle

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

## 1) Orientation

Le déplacement séculaire du pôle de rotation (au delà de la période de Chandler) produit une déformation non linéaire de la Terre à grande échelle.

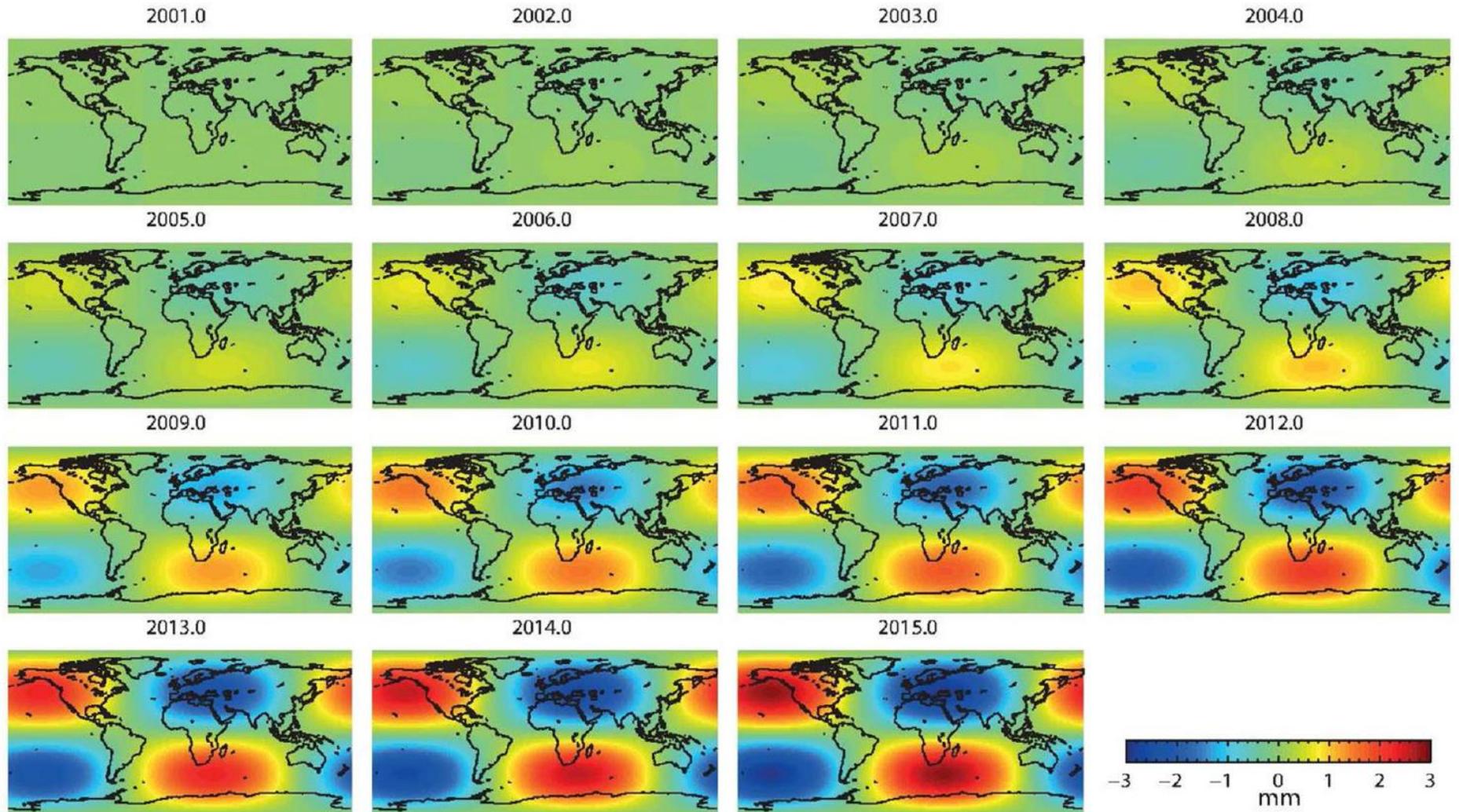
Cette déformation n'est pas corrigée par le modèle élastique de marée polaire de l'IERS.

Effet systématique sur les vitesses verticales d'entre -0,3 et 0,3 mm/an [*King and Watson, 2014*].

L'effet sur le niveau moyen de la mer à l'échelle globale est négligeable, mais atteint 0,1 mm/an à l'échelle régionale [*Santamaría-Gómez et al. en révision*].

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

## 1) Orientation



King and Watson, 2014

**Figure 2.** Modelled deformation patterns for 2001 January 1 to 2015 January 1 expressed as anomalies to the average pattern (related to polar motion) over the 20th century.

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

## 2) Evolution de l'origine et échelle

$$\delta v_{up}(\lambda, \varphi) = \delta \dot{d} + G(\lambda, \varphi) \delta \dot{T}$$

[Collilieux and Wöppelmann, 2010]

$\delta v_{up}(\lambda, \varphi)$  erreur de vitesse verticale selon lon  $\lambda$  et lat  $\varphi$

$\delta \dot{d}$  erreur sur l'échelle

$\delta \dot{T}$  erreur sur la translation

$G(\lambda, \varphi)$  matrice de rotation géocentrique -> topocentrique

Origine : impact global réduit avec un réseau marégraphe bien reparti

impact régional important

Echelle : impact global et régional

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

## 2) Evolution de l'origine et échelle

$$\delta v_{up}(\lambda, \varphi) = \delta \dot{d} + G(\lambda, \varphi) \delta \dot{T}$$

[Collilieux and Wöppelmann, 2010]

$\delta v_{up}(\lambda, \varphi)$  erreur de vitesse verticale selon lon  $\lambda$  et lat  $\varphi$

$\delta \dot{d}$  erreur sur l'échelle

$\delta \dot{T}$  erreur sur les translations

$G(\lambda, \varphi)$  matrice de rotation géocentrique -> topocentrique

Origine : impact global réduit avec un réseau marégraphe bien reparti

impact régional important

Echelle : impact global et régional direct

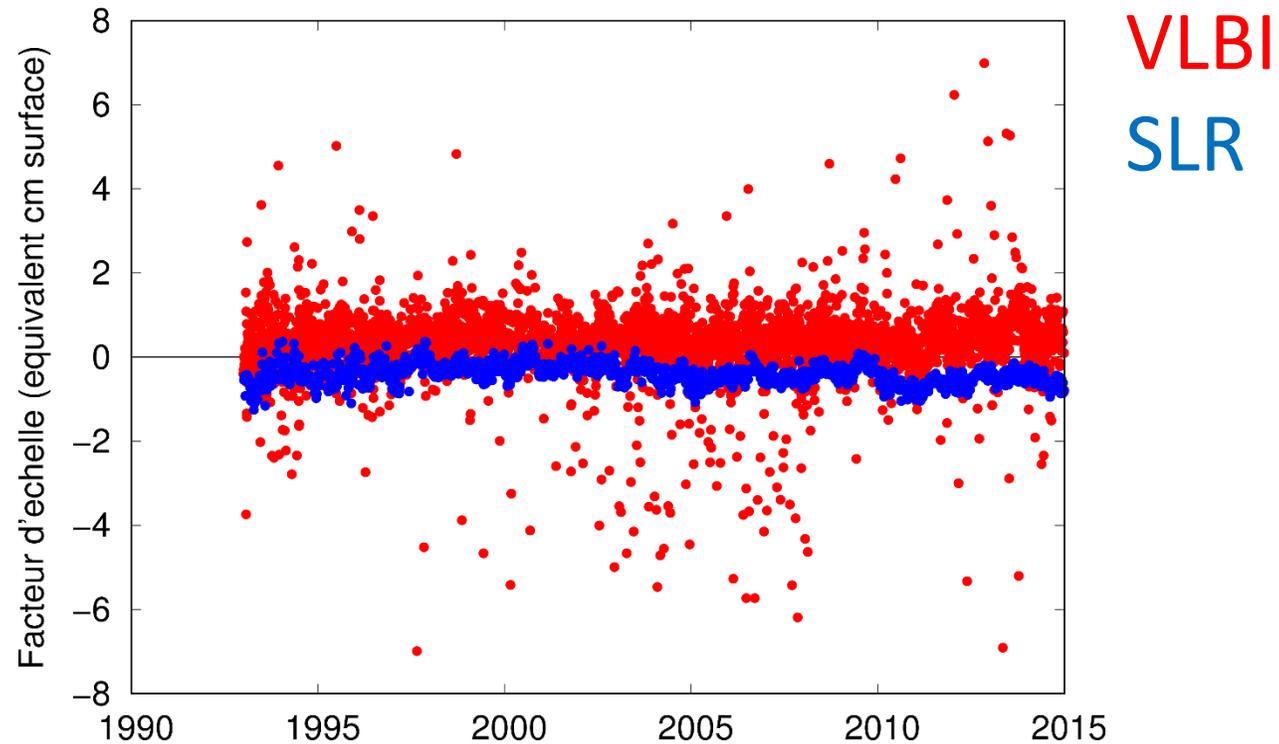
**Géométrie du réseau ...**

**Corrélation entre  
translation et échelle ...**



# L'échelle du repère terrestre

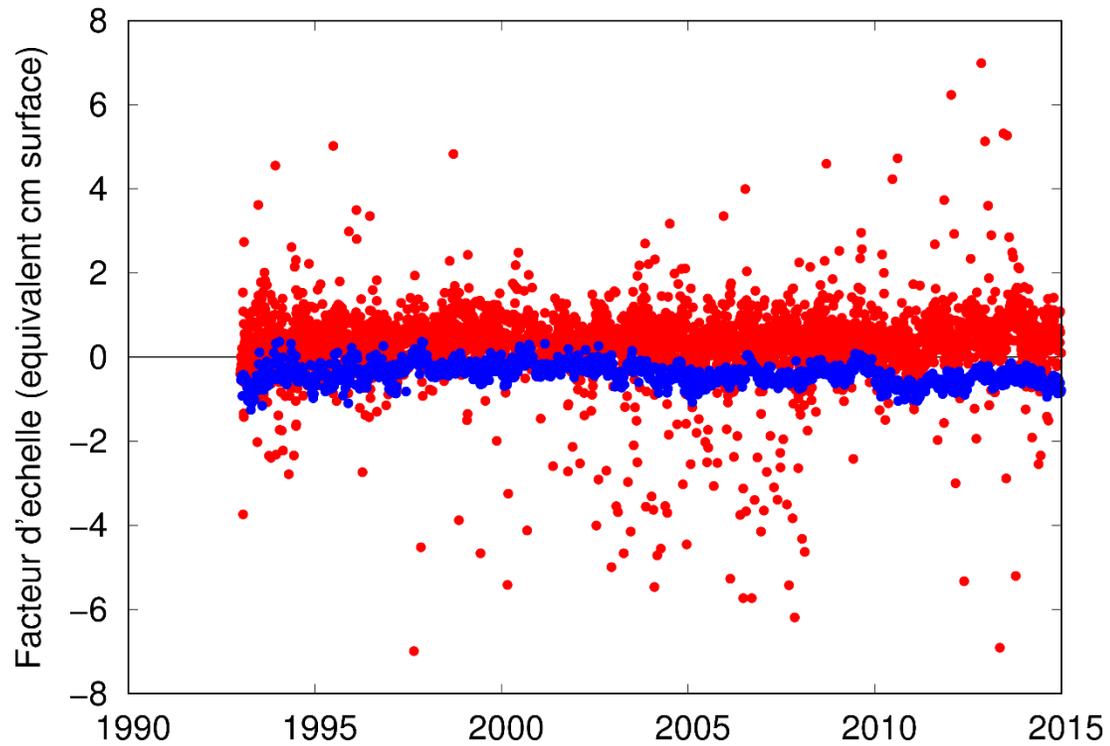
Facteur d'échelle du repère VLBI et SLR par rapport à l'ITRF2014 (signal annuel enlevé).



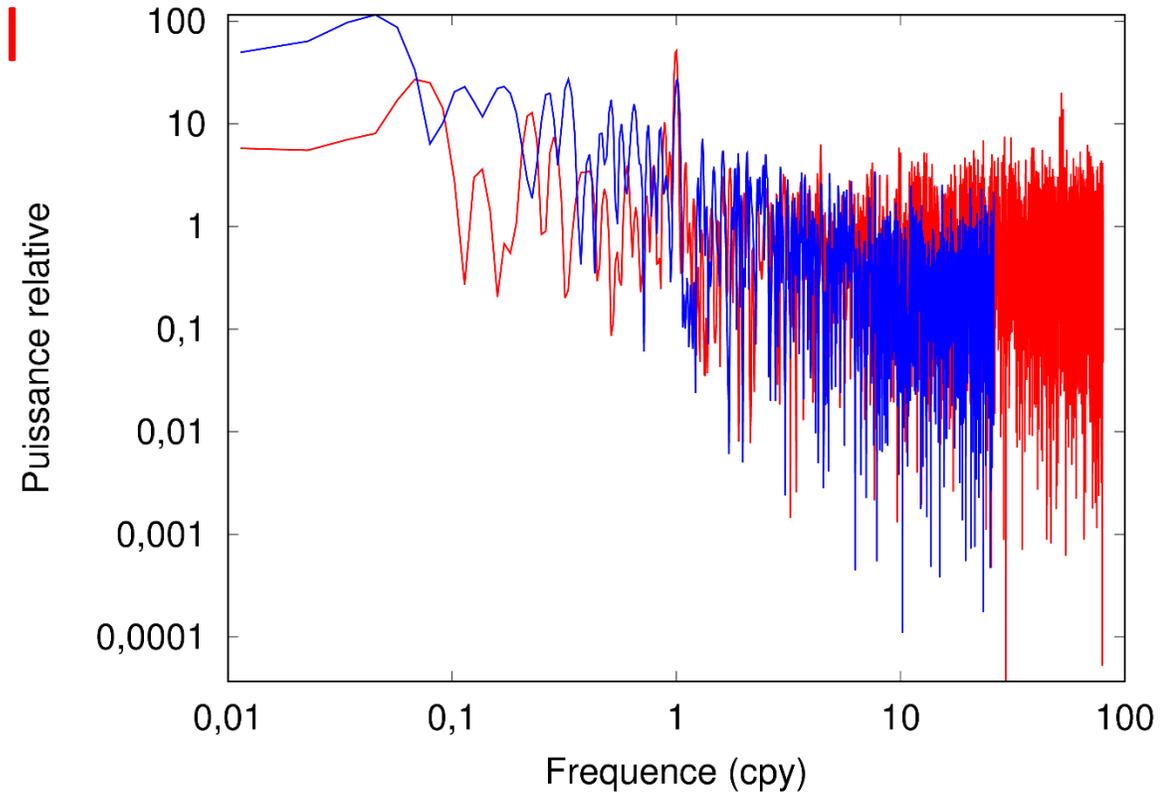
L'évolution de l'échelle de l'ITRF est définie linéaire et contrainte à zéro.

# L'échelle du repère terrestre

Facteur d'échelle du repère VLBI et SLR par rapport à l'ITRF2014 (signal annuel enlevé).



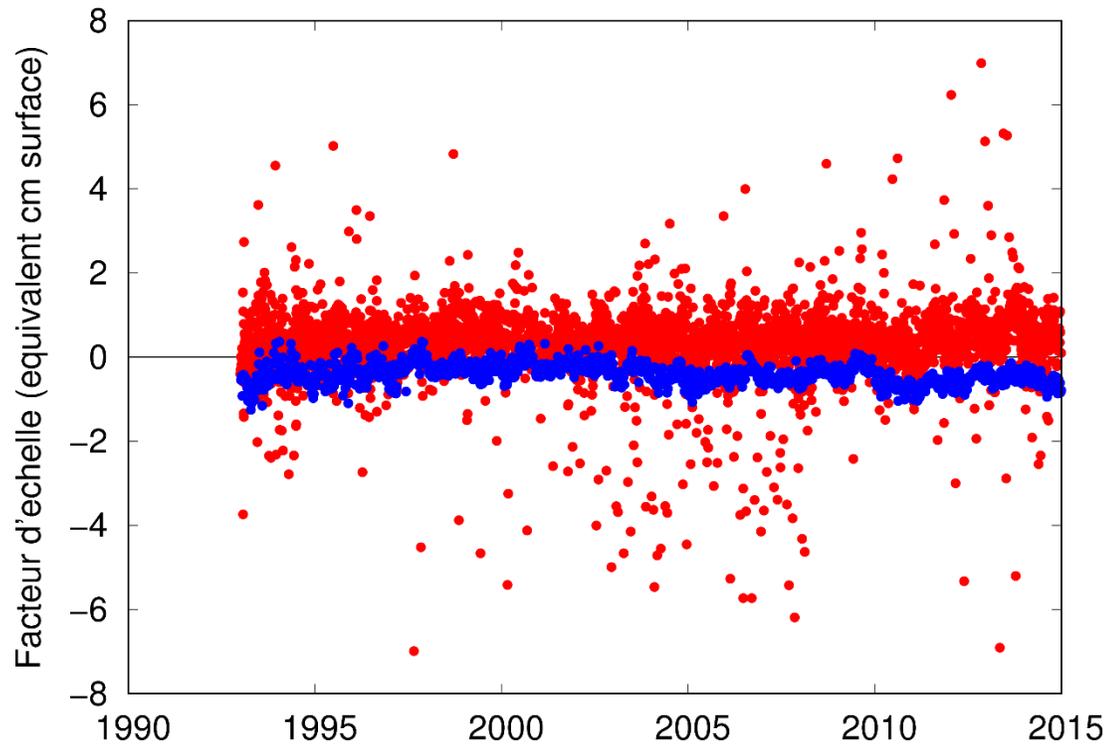
VLBI  
SLR



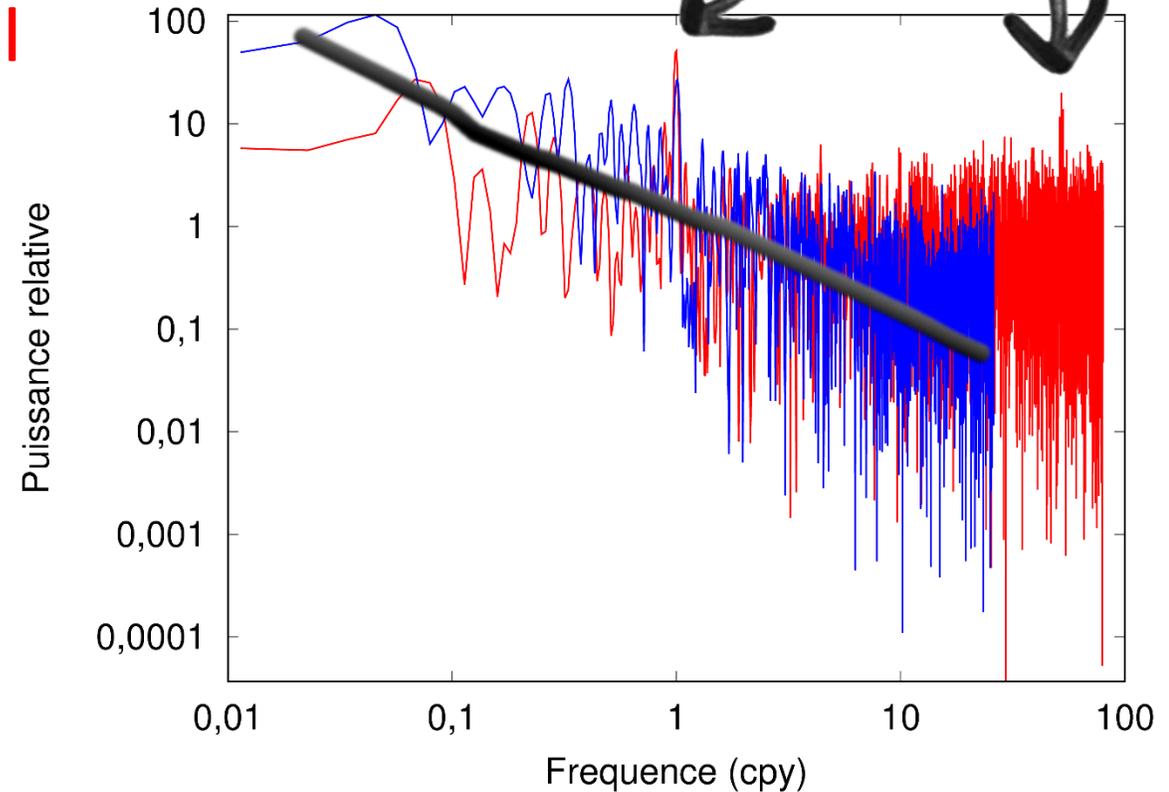
L'évolution de l'échelle de l'ITRF est définie linéaire et contrainte à zéro.

# L'échelle du repère terrestre

Facteur d'échelle du repère VLBI et SLR par rapport à l'ITRF2014 (signal annuel enlevé).



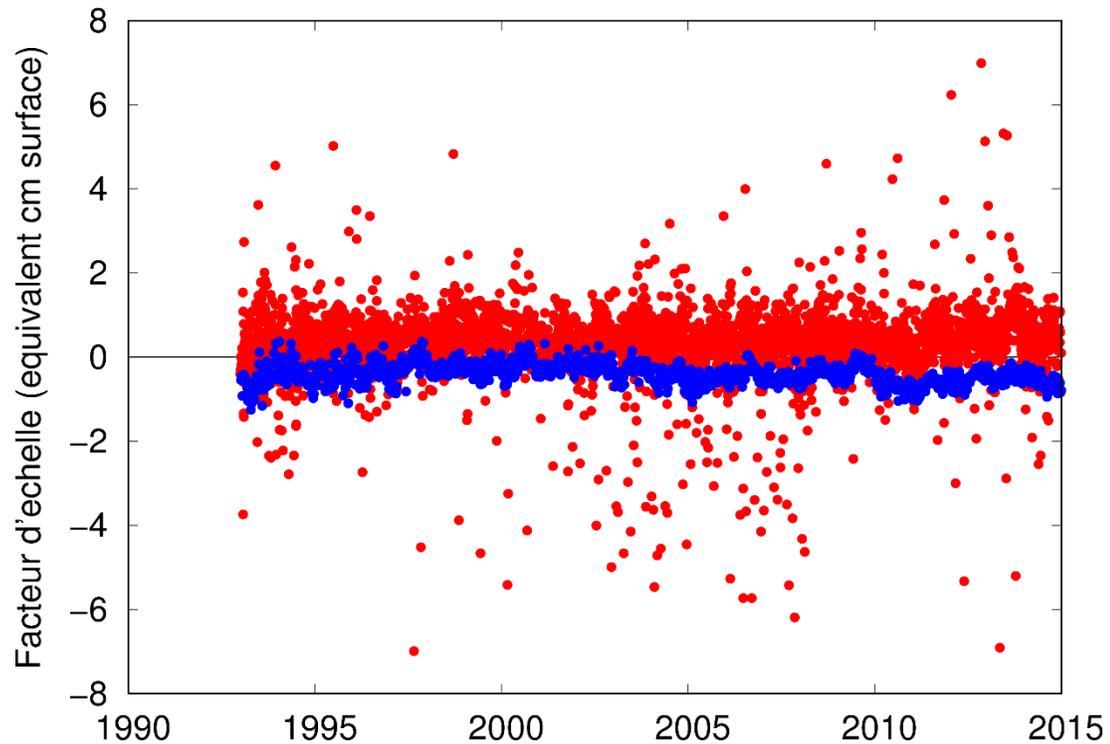
VLBI  
SLR



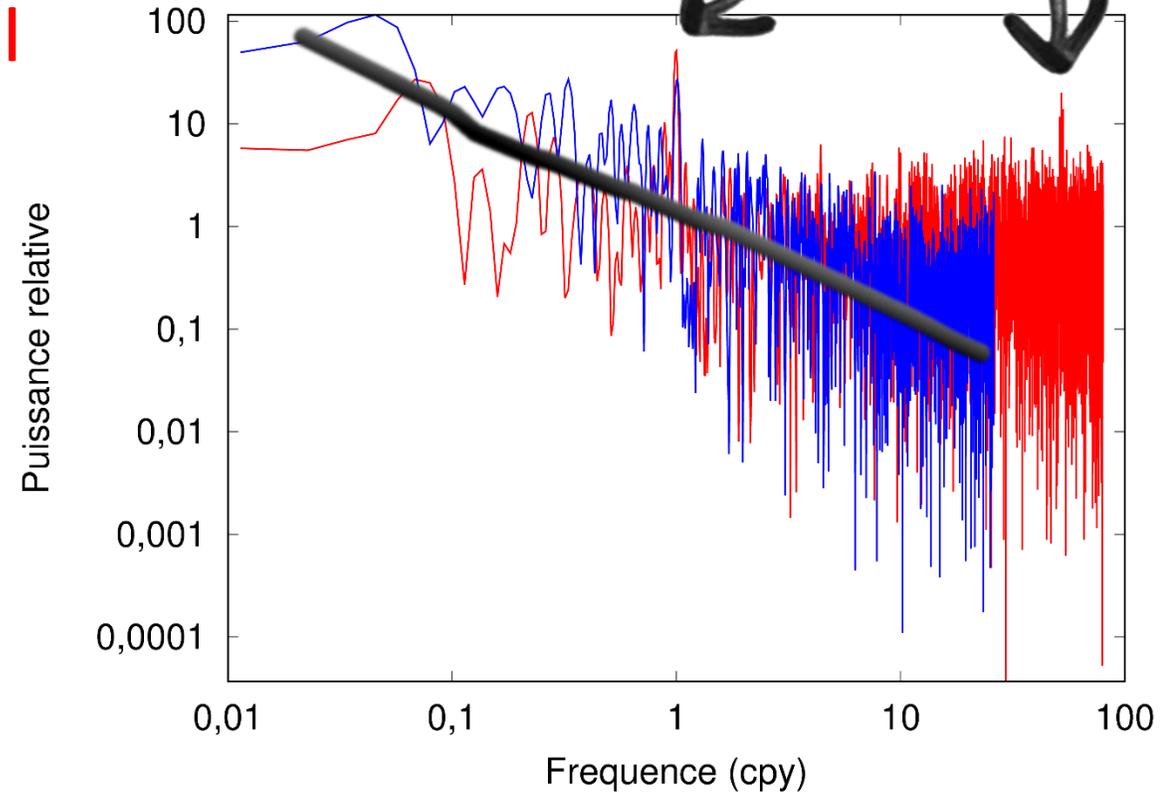
L'évolution de l'échelle de l'ITRF est définie linéaire et contrainte à zéro.

# L'échelle du repère terrestre

Facteur d'échelle du repère VLBI et SLR par rapport à l'ITRF2014 (signal annuel enlevé).



VLBI  
SLR



L'évolution de l'échelle de l'ITRF est définie linéaire et contrainte à zéro... **avec une incertitude de 0,1 mm/an**

# L'impact du repère sur les vitesses verticales GPS

## 2) Evolution de l'origine et échelle

$$\delta v_{up}(\lambda, \varphi) = \delta \dot{d} + G(\lambda, \varphi) \delta \dot{T}$$

[Collilieux and Wöppelmann, 2010]

$\delta v_{up}(\lambda, \varphi)$  erreur de vitesse verticale selon lon  $\lambda$  et lat  $\varphi$

$\delta \dot{d}$  erreur sur l'échelle **0,1 mm/an**

$\delta \dot{T}$  erreur sur la translation **0,1 (TX) 0,1 (TY) 0,3 (TZ) mm/an**

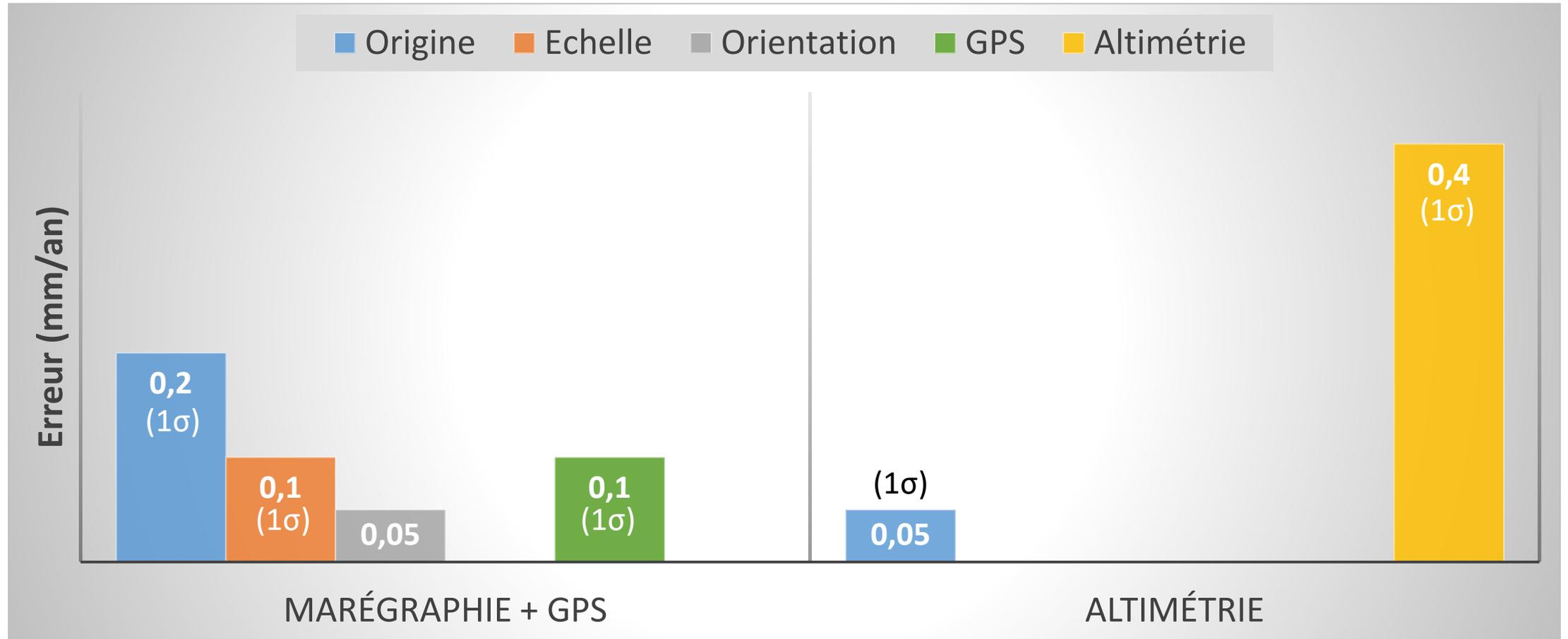
$G(\lambda, \varphi)$  matrice de rotation géocentrique -> topocentrique

Origine : impact global réduit avec un réseau marégraphe bien reparti

impact régional important

Echelle : impact global et régional

# Contributions géodésiques au niveau de la mer



# Conclusions

- La montée du niveau de la mer est un :
  - Risque direct pour la population côtière.
  - Indicateur du réchauffement climatique.
  - Défi scientifique interdisciplinaire.
- La géodésie spatiale, notamment la réalisation du repère terrestre, joue un rôle important :
  - L'incertitude dans la réalisation de l'évolution du géocentre est de l'ordre de 0,3 mm/an. L'impact sur le niveau de la mer régional est important. L'impact sur la moyenne globale est réduit avec un réseau marégraphique bien réparti (erreur maximale de 12% pour l'altimétrie).
  - L'incertitude dans la réalisation de l'évolution de l'échelle est de l'ordre de 0,1 mm/an. Elle est propagée directement sur la variation du niveau moyen global et régional obtenue à partir des observations marégraphiques (pas d'impact pour l'altimétrie).
  - Le pôle de rotation moyen conventionnel introduit des erreurs sur la variation du niveau de la mer régionale par marégraphie à 0,1 mm/an (négligeable sur la moyenne globale).