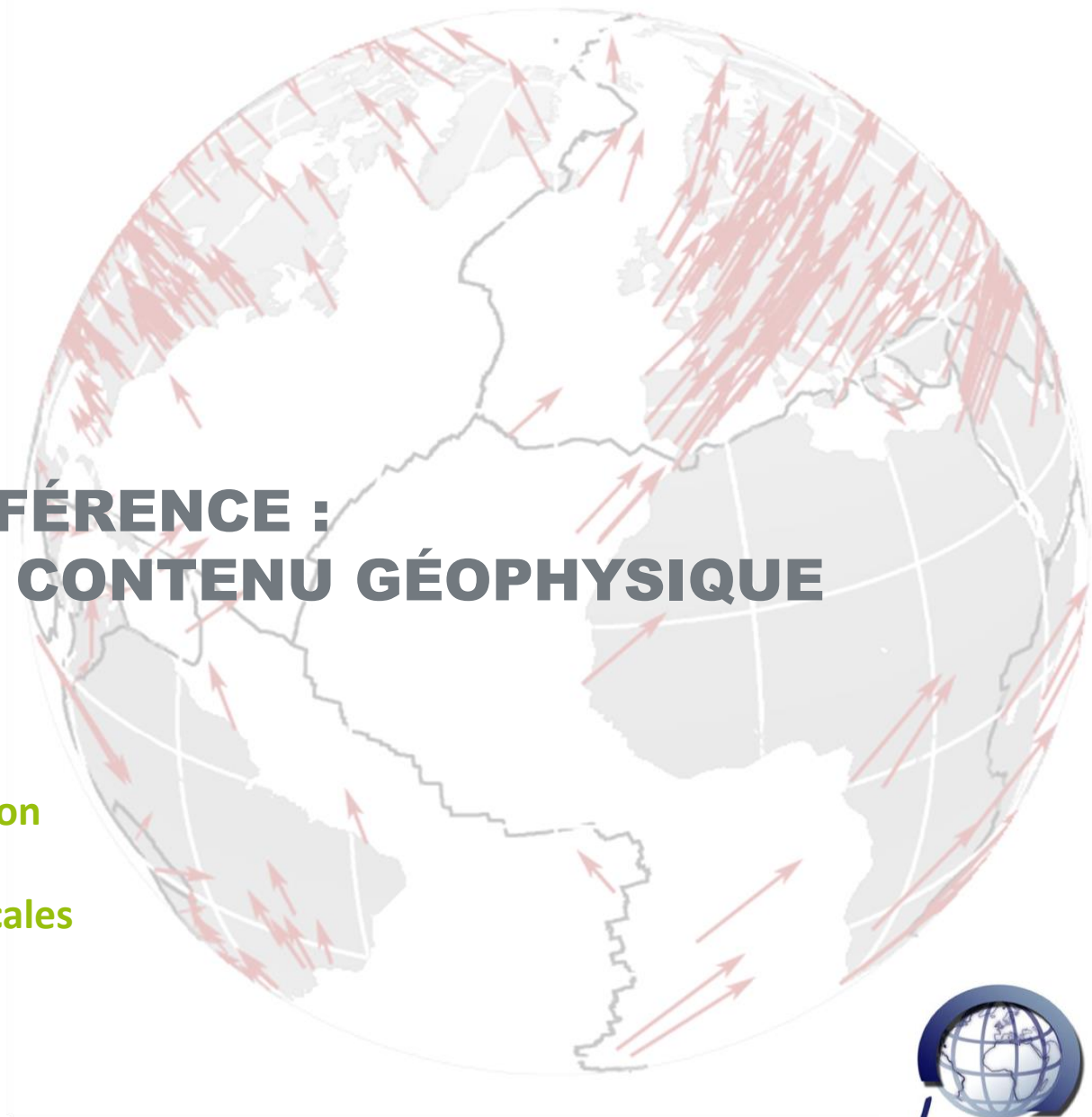


# REPÈRES DE RÉFÉRENCE : EVALUATION ET CONTENU GÉOPHYSIQUE

Laurent Métivier

- I. Le problème de l'évaluation
- II. ITRF2000 vs ITRF2005
- III. ITRF2014 – vitesses verticales
- IV. Conclusions



# COMMENT ÉVALUER L'EXACTITUDE ET LA PRÉCISION DE L'ITRF ?

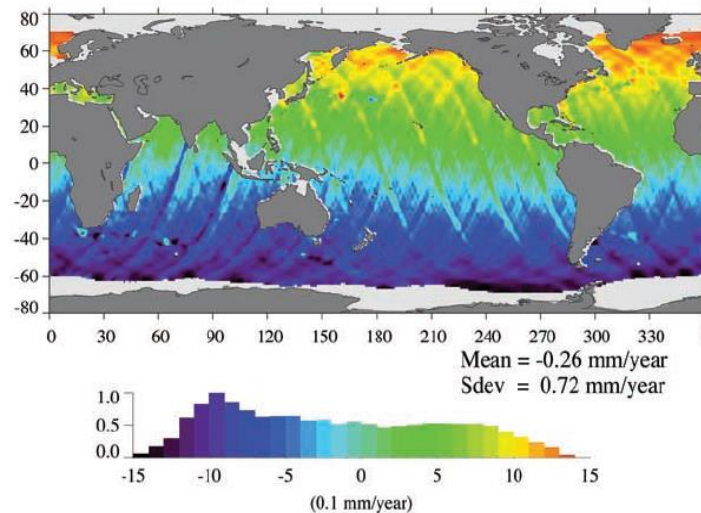
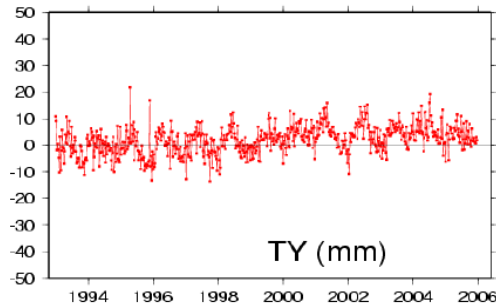
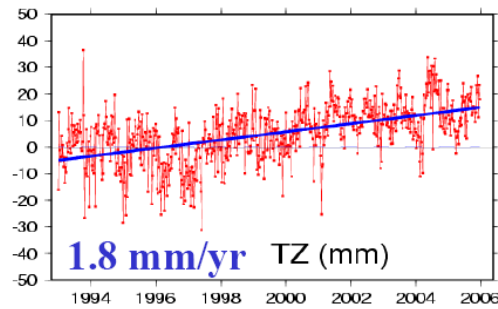
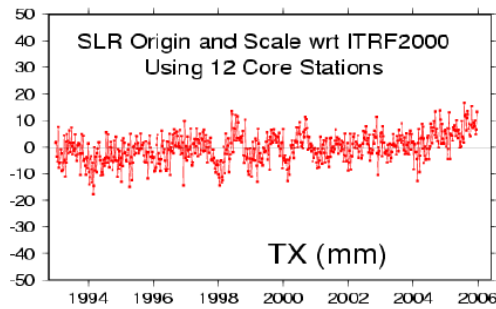
Methods	Relative	Origin		Scale		Orientation w.r.t. crust			
		Positions	Velocities	constant	drift	constant	drift	constant	drift
Space geod.	VLBI								
	GNSS								
	SLR								
	DORIS								
	POD								
	Combination obs. level								
Ground data/Models	GIA								
	Estimated Tectonic plate motion model (Euler pole)		2D only						
	Estimated GIA + Euler Pole + Present day mass trends								
	Absolute gravity		Up only						
	Tide gauges		Up only						
	INSAR								
	Local tectonic model								

Fig. 2 Classification of the TRF evaluation methods and their contributions.

Collilieux et al., 2013, IUGG proceedings

(GIA : Glacial Isostatic Adjustment)

# CAS DE LA DÉRIVE DU CENTRE DU REPÈRE ENTRE L'ITRF2000 ET L'ITRF2005



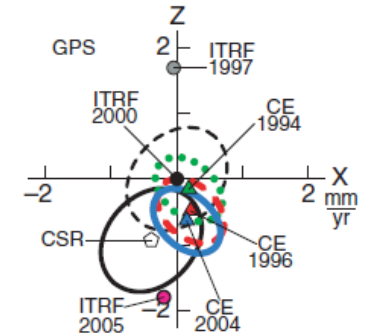
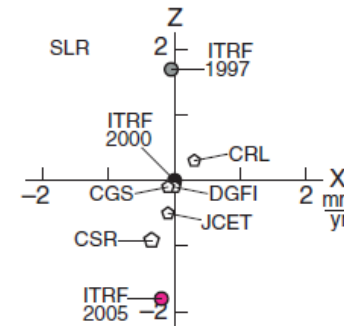
Les solutions ITRF2000 et ITRF2005 présentent, l'une par rapport à l'autre, une dérive de l'origine de près de 2 mm/an le long de l'axe Z

TOPEX (1993-2002): différences régionales de niveau des mers selon le repère de référence utilisé (ITRF2005 par rapport à CSR95/ITRF2000)

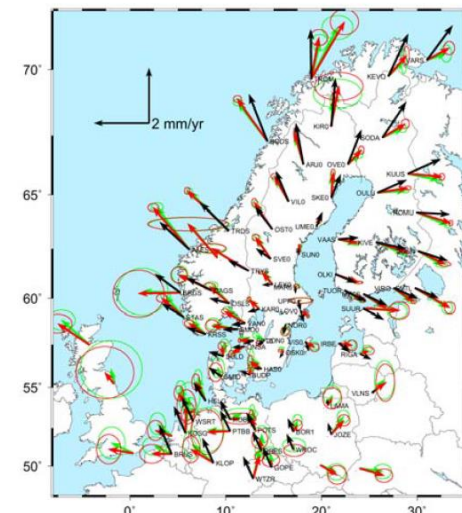
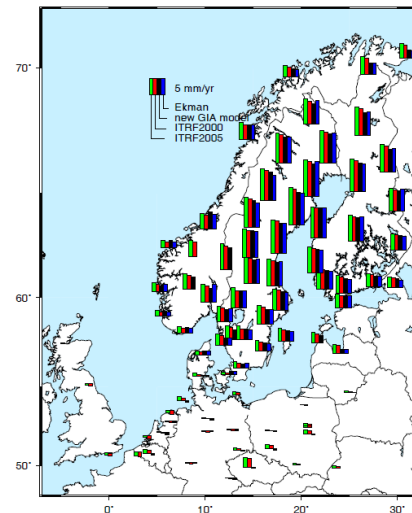
Beckley et al. (2007)

# L'ITRF2000 EST-IL MEILLEUR ?

- **Argus (2007) : Tectonique + GIA**
  - Vitesse CE ~ vitesse CM
  - CE modélisé plus proche du CM de l'ITRF2000
- **Lindberg & Johansson (2007)**
  - BIFROST : GPS en Scandinavie
  - Légèrement plus cohérent avec modélisation GIA dans l'ITRF2000
- **Tregoning & Lambeck (EGU 2010)**
  - GPS vertical : en Scandinavie plus cohérent avec un modèle GIA dans l'ITRF2000

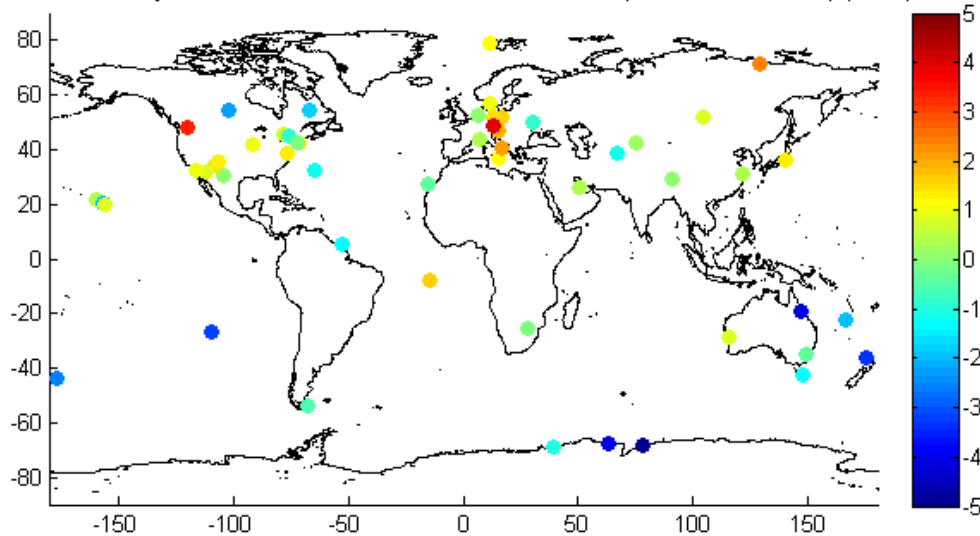


Argus (2007)



Lindberg & Johansson (2007)

Vertical velocity differences between ITRF2005 and ITRF2000 (core station network) (mm/a)

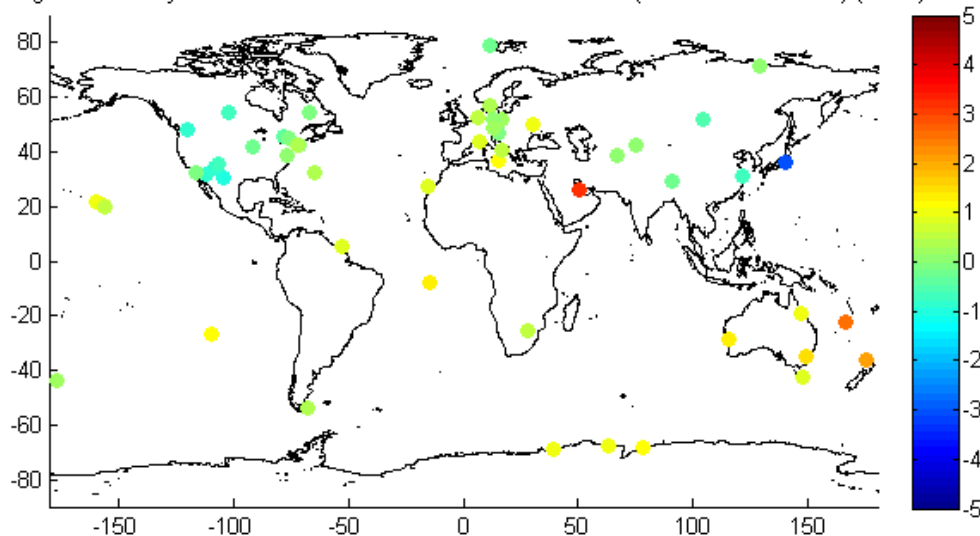


## VITESSES VERTICALES

- Amplitude des vitesses :  
1-20 mm/yr
- Différence relative moyenne entre les vitesses ITRF2005 et ITRF2000:

**700 %**

Tangential velocity differences between ITRF2005 and ITRF2000 (core station network) (mm/a)



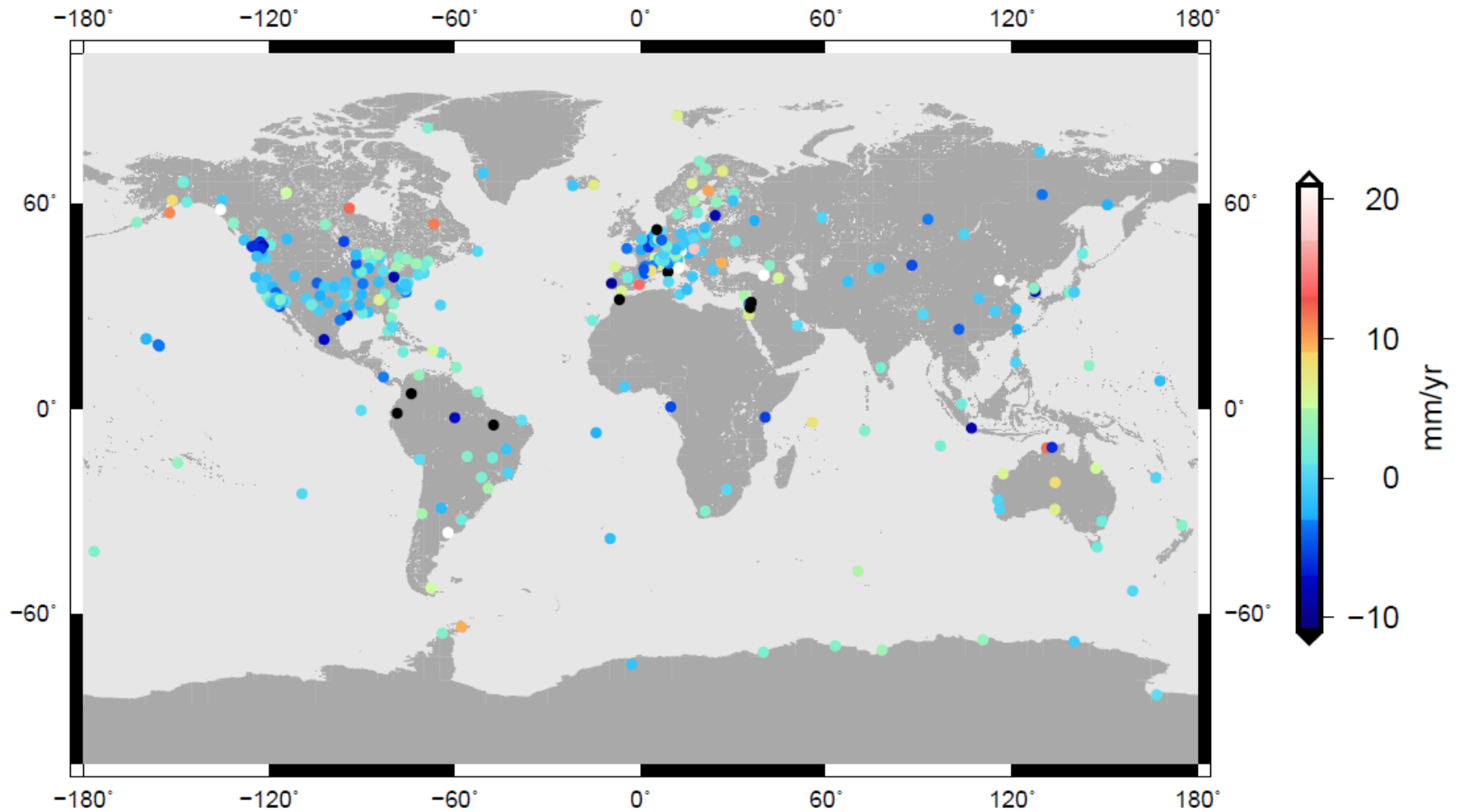
## VITESSES HORIZONTALES

- Amplitude des vitesses :  
1-20 cm/yr
- Différence relative moyenne entre les vitesses ITRF2005 et ITRF2000 :

**4 %**

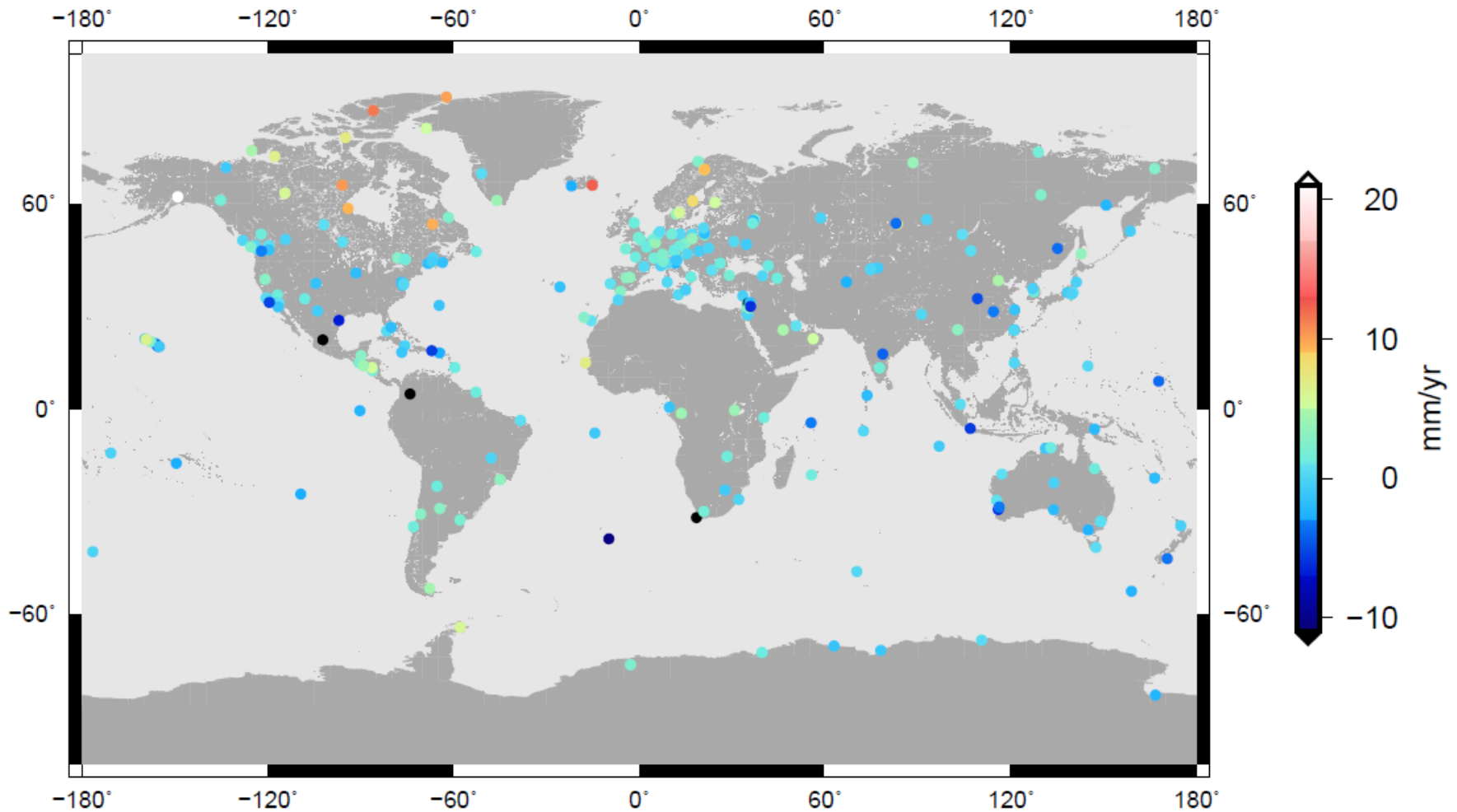
# COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2000

ITRF2000-GNSS vertical velocities



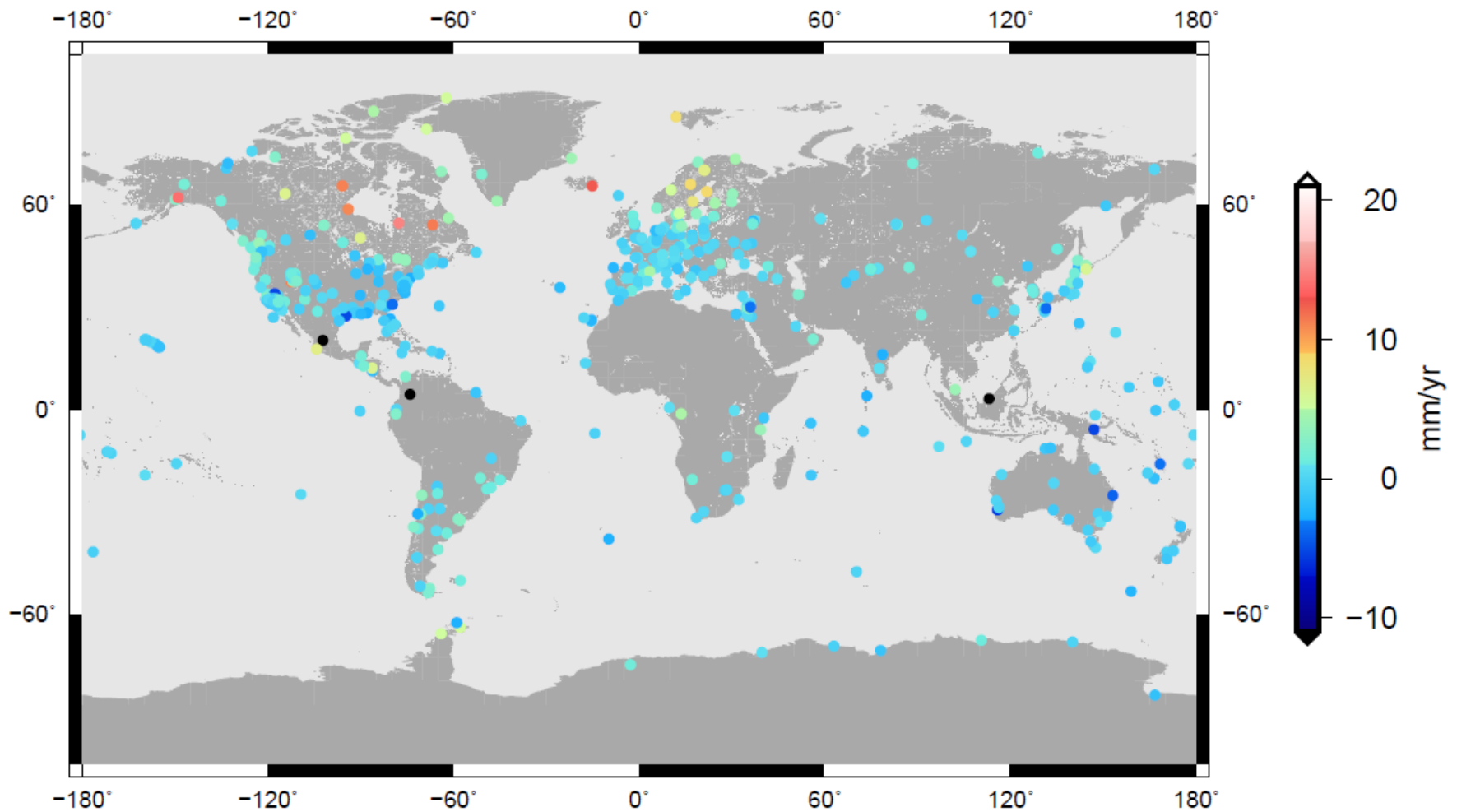
# COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2005

ITRF2005-GNSS vertical velocities



# COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2008

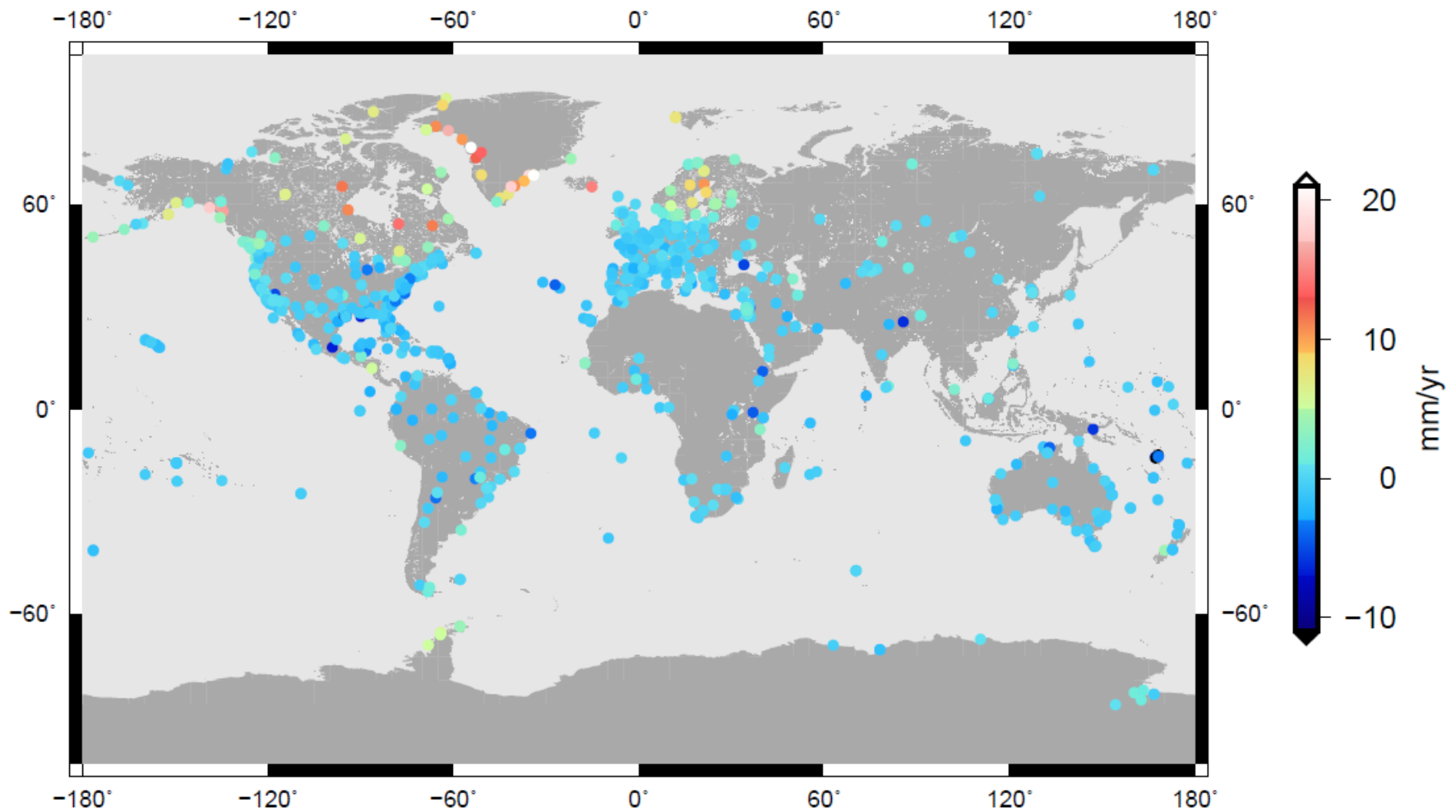
ITRF2008-GNSS vertical velocities



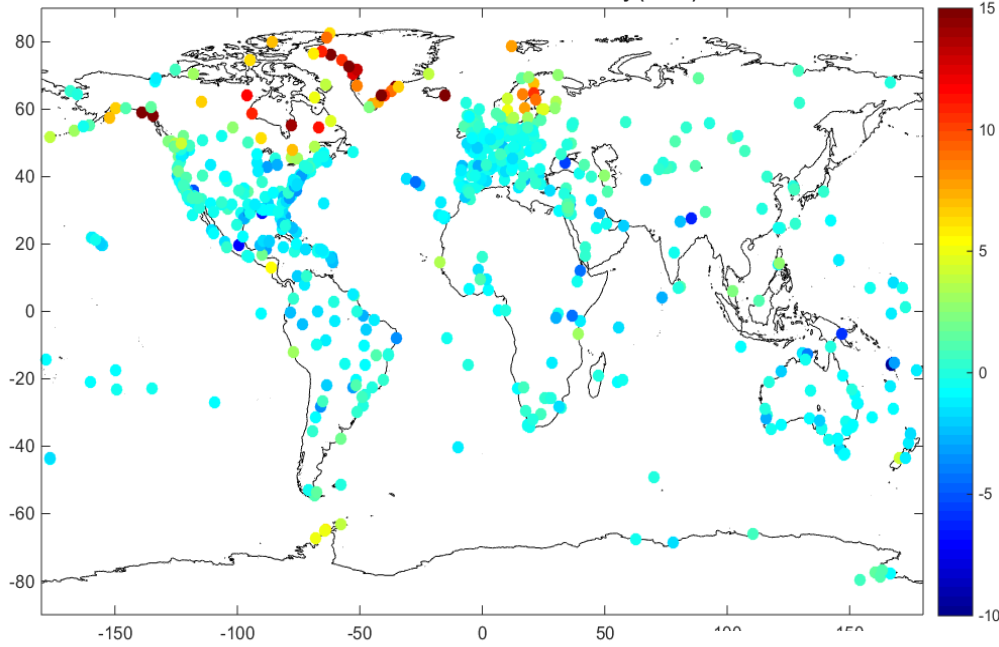


# COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2014

ITRF2014-GNSS vertical velocities



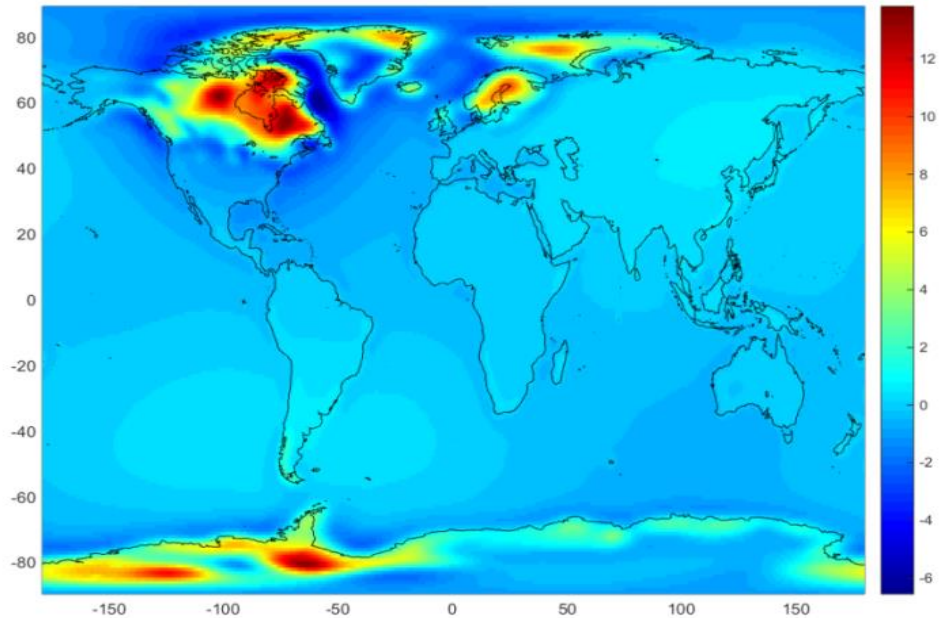
ITRF2014 GNSS solution - vertical velocity (mm/a)



# VITESSES VERTICALES

Vitesses verticales des meilleures stations GNSS de l'ITRF2014

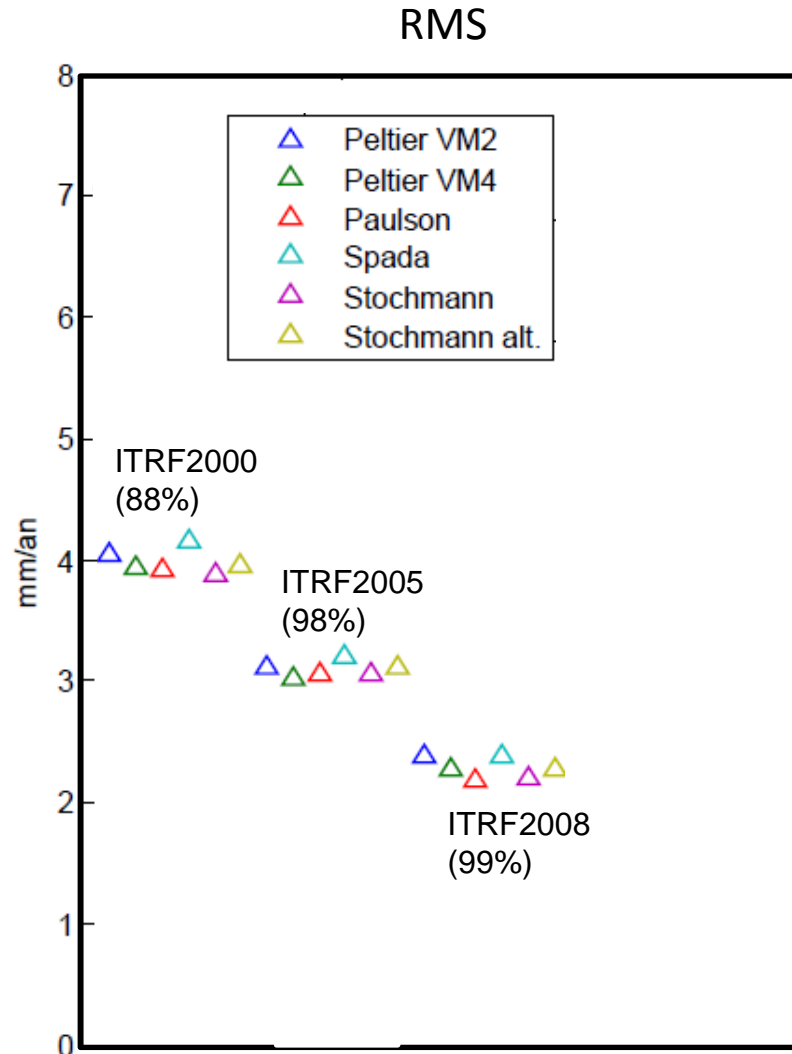
Vitesses verticales induites par le rebond postglaciaire (modèle ICE6G ; Peltier et al. 2016)



# COMPARAISON AVEC DES MODÈLES RPG

Moyenne quadratique  
entre vitesses verticales  
mesurées et modélisées  
pour différentes solutions  
ITRF

Ne sont considérées que les  
stations avec une précision  
minimum de 1 cm/an  
(entre parenthèses : la proportion  
de stations que cela représente)



Différents  
modèles de  
rebond  
postglaciaire

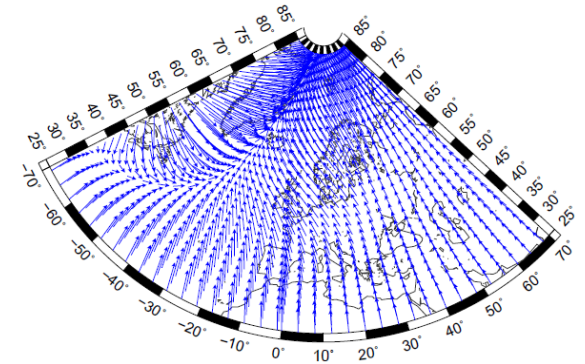
# L'ITRF2000 EST-IL MEILLEUR ? NON

Exactitude des vitesses verticales  
ITRF2000 est nettement plus faible.

- **Argus (2007) : Tectonique + GIA**
  - Vitesse CE ~ vitesse CM
  - CE modélisé plus proche du CM de l'ITRF2000
- **Lindberg & Johansson (2007)**
  - BIFROST : GPS en Scandinavie
  - Légèrement plus cohérent avec modélisation GIA dans ITRF2000
- **Tregoning & Lambeck (EGU 2010)**
  - GPS vertical : en Scandinavie plus cohérent avec un modèle GIA



Vitesses horizontales : transfert d'erreur entre tectonique et GIA



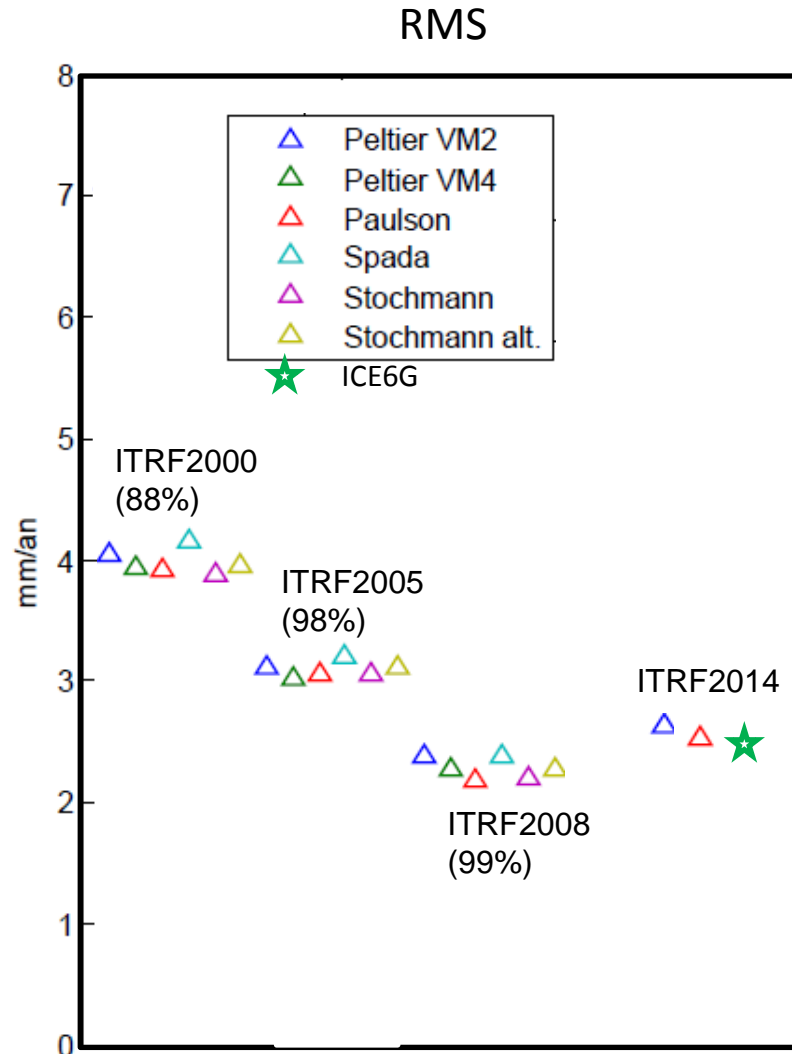
Comparaisons locales : une erreur régionale de modélisation est facilement interprétable comme une translation

Remise en cause des modèles de GIA. Trois modélisations GIA différentes et souvent obsolètes aujourd'hui.

# COMPARAISON AVEC DES MODÈLES RPG

Moyenne quadratique  
entre vitesses verticales  
mesurées et modélisées  
pour différentes solutions  
ITRF

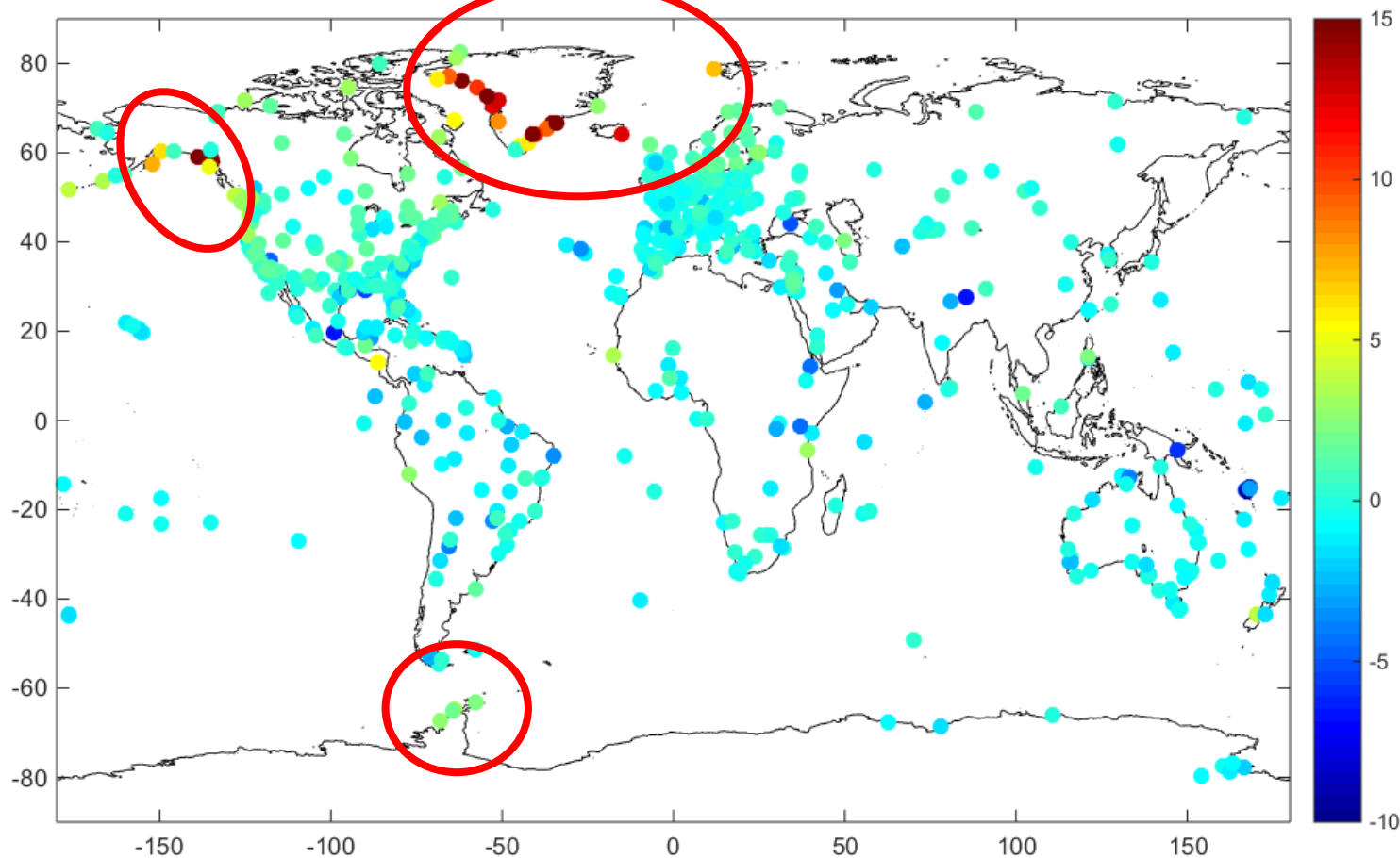
Ne sont considérées que les  
stations avec une précision  
minimum de 1 cm/an  
(entre parenthèses : la proportion  
de stations que cela représente)



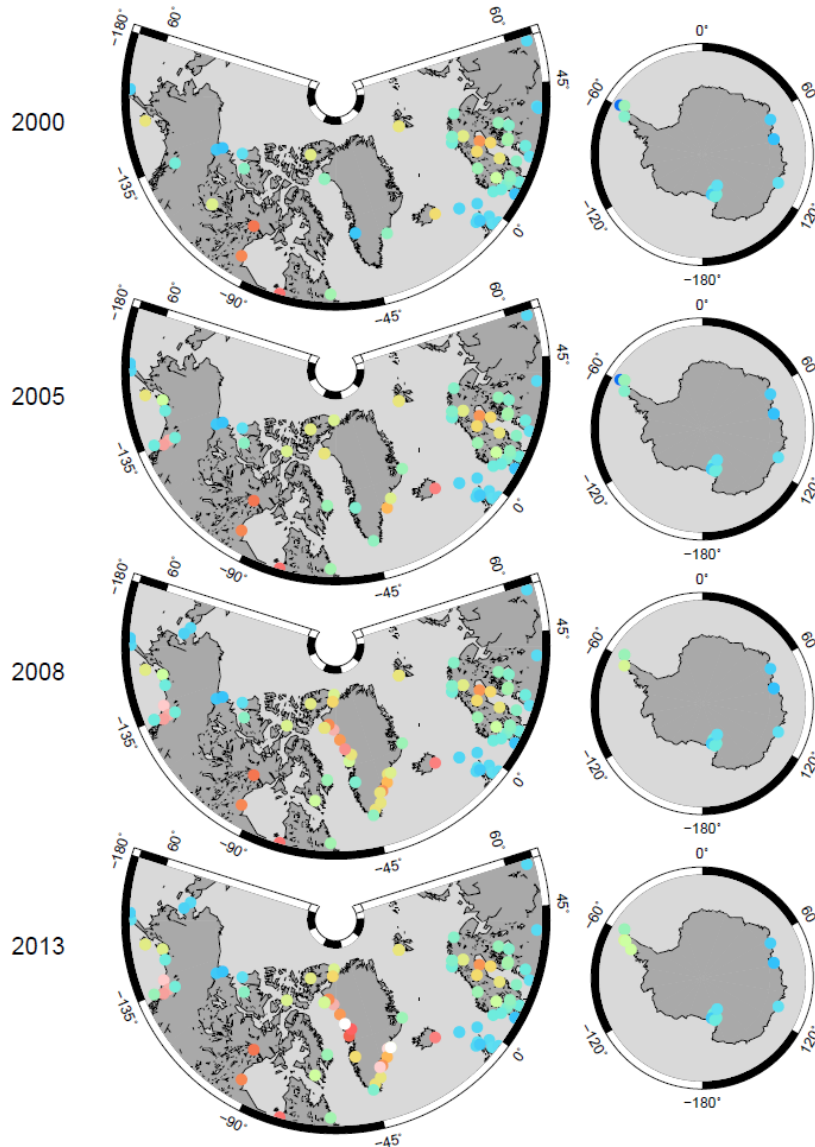
Différents  
modèles de  
rebond  
postglaciaire

# Différences entre les vitesses verticales GNSS de l'ITRF2014 et un modèle de rebond postglaciaire (ICE6G)

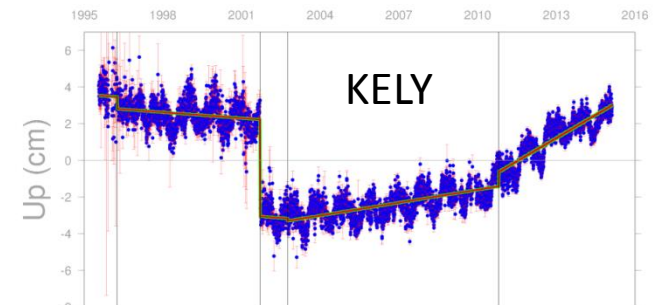
Fonte des glaces actuelle ?



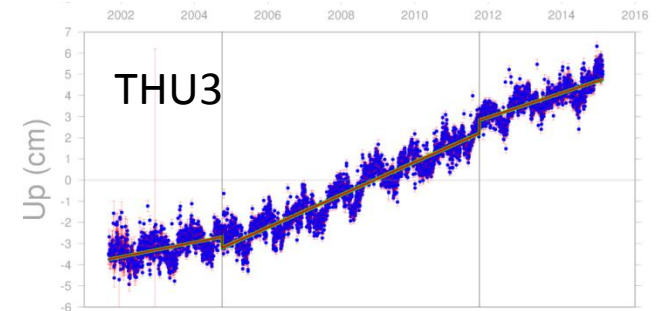
# L'ITRF2014 AU NIVEAU DES CALOTTES POLAIRES



## Evolution temporelle du réseau et des vitesses verticales GNSS



Trajectory: Blue: Raw, Green: Linear, Red: PSD model  
Vertical gray lines represent discontinuities



Trajectory: Blue: Raw, Green: Linear, Red: PSD model  
Vertical gray lines represent discontinuities

# FIGURE DE LA TERRE SOLIDE

Vitesses verticales

$$v_r(\theta, \lambda, t) = \sum_{l=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+l} \dot{C}_{nm}(t) Y^c_{nm}(\theta, \lambda) + \dot{S}_{nm}(t) Y^s_{nm}(\theta, \lambda)$$

$Y^c_{nm} / Y^s_{nm}$  Fonctions Harmonique Sphérique (HS)

$(\theta, \lambda)$  Colatitude, Longitude

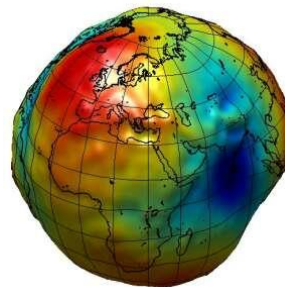
## ■ Coefficients HS de degrés 1 et 2 de figure de la Terre solide :

$\dot{C}_{10}$	} Mouvement du géocentre selon l'axe	} Z
$\dot{C}_{11}$		
$\dot{S}_{11}$		

$\dot{C}_{20}$  → Ellipticité

$\dot{C}_{21}$	} Rotations
$\dot{S}_{21}$	

$\dot{C}_{22}$	} Triaxialité
$\dot{S}_{22}$	



## ■ Ellipticité du géoïde (référence des altitudes) :

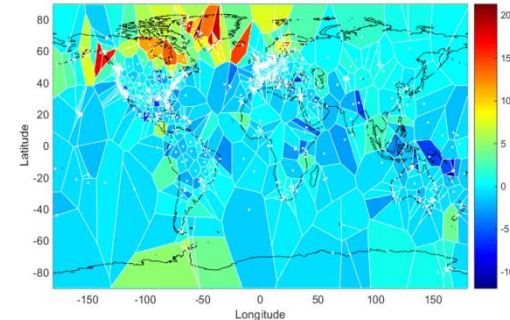
$$\dot{J}_2$$



# MÉTHODES DE RÉOLUTION

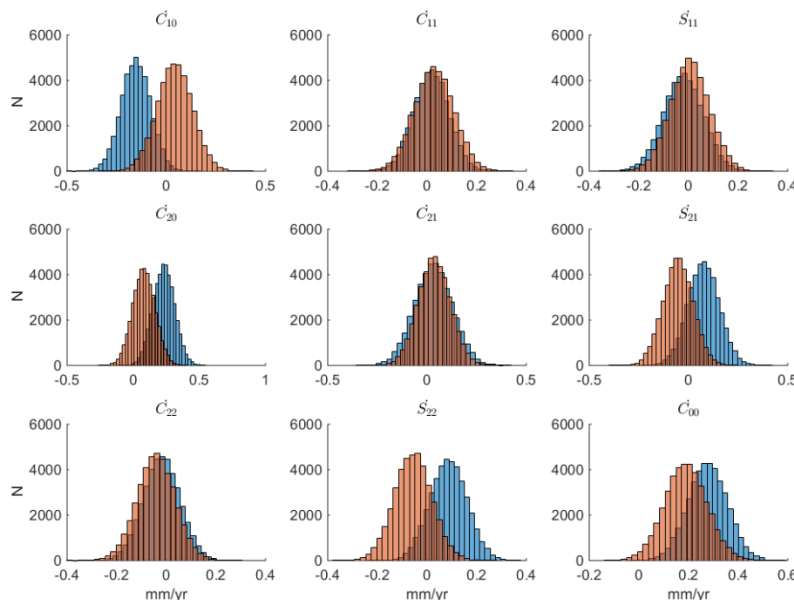
- Plusieurs méthodes testées pour limiter l'aliasing :

- Moindre carré
- Transformée de Legendre sur diagramme de Voronoï



- Evaluation des Méthodes et estimation des biais/erreurs réalistes :

- Près de 50 000 modèles synthétiques testés combinant modèles de GIA et modèles de fonte des glaces actuelle.

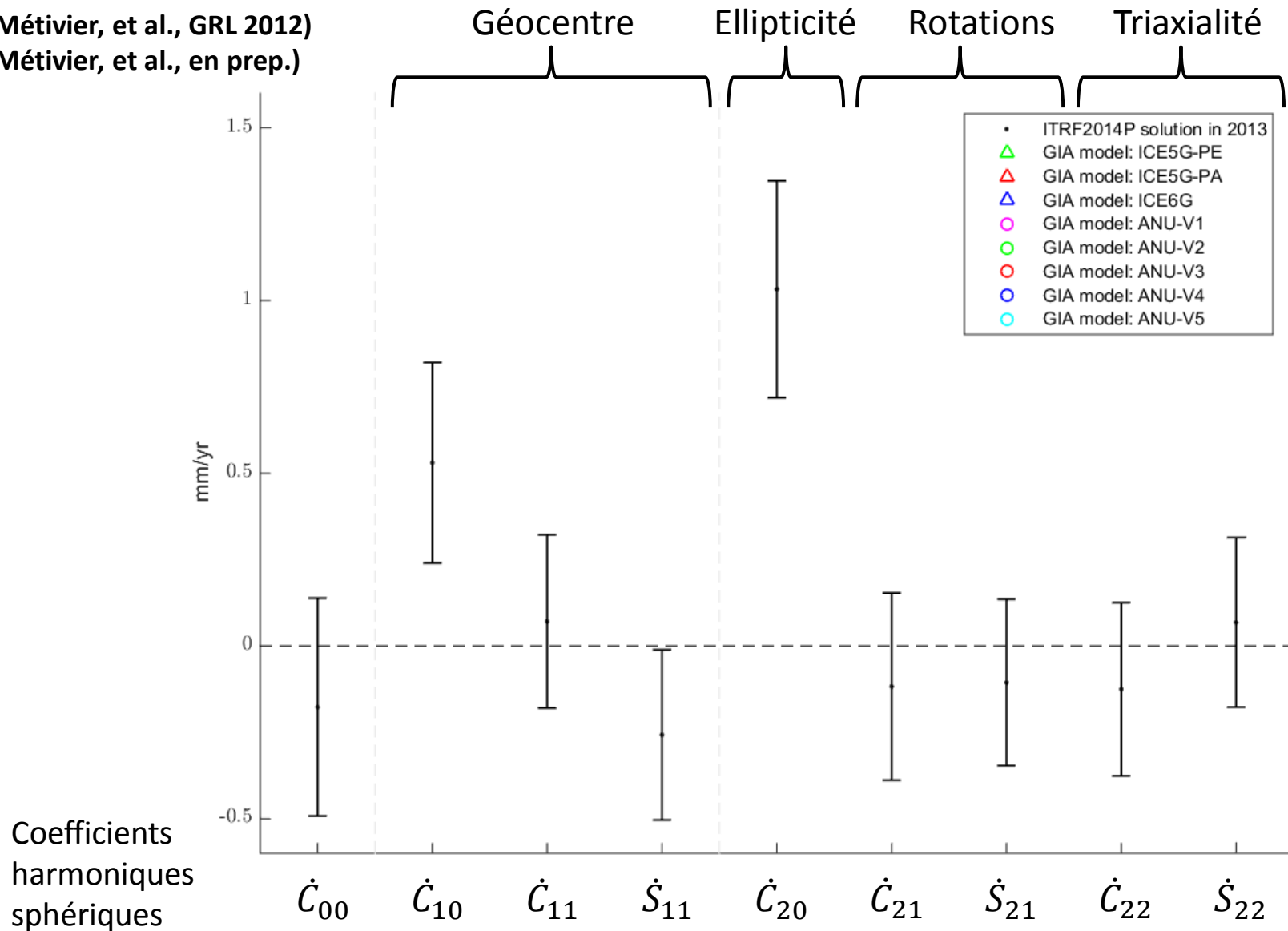


Bleu : Least Square Inversion  
Rouge : Direct Legendre Transform

Biais et dispersions des résidus  
(ex. ICE6G)

# ITRF2014 : VARIATIONS DE FORMES DE LA TERRE SOLIDE DE GRANDES LONGUEURS D'ONDE (2013)

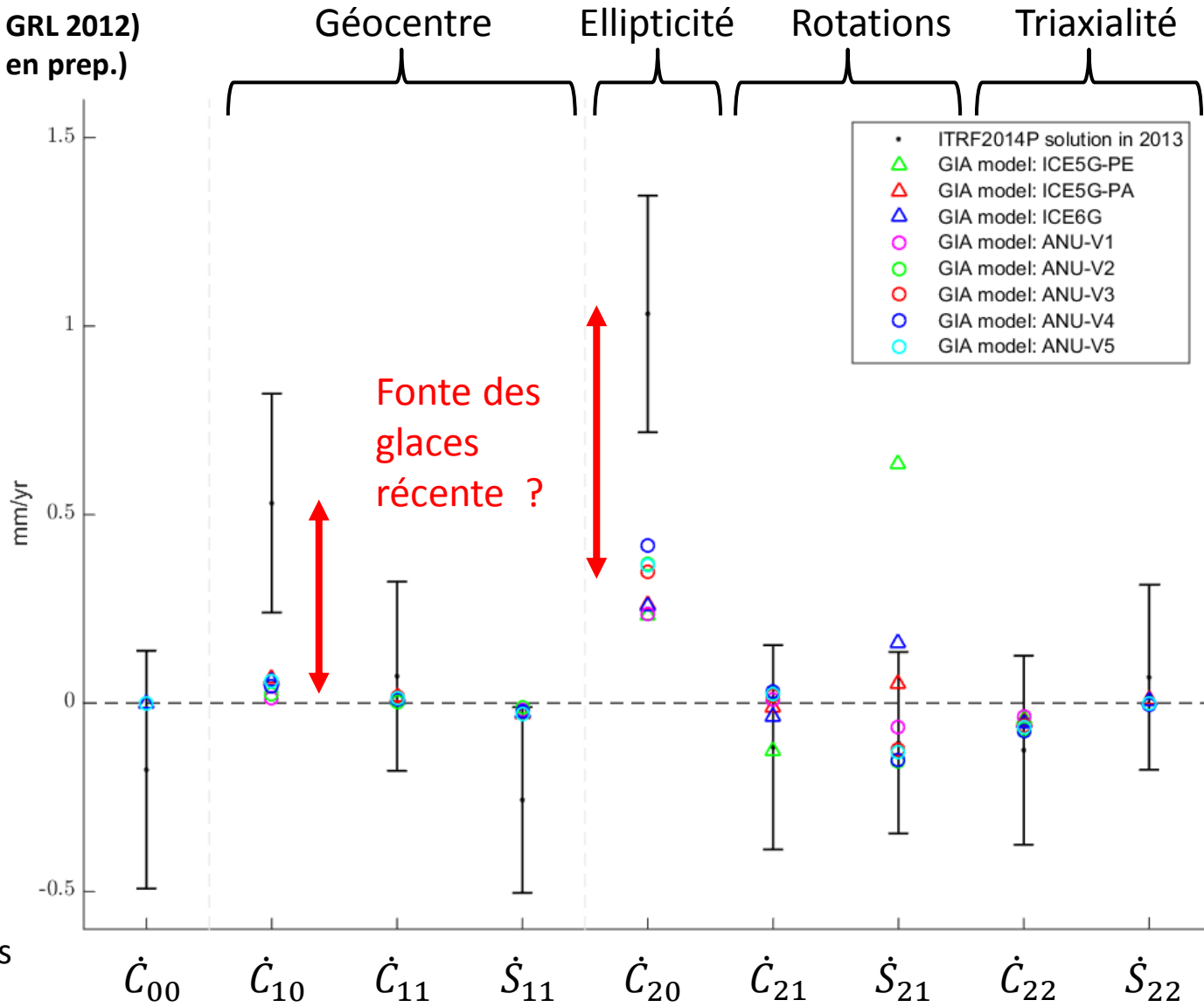
(Métivier, et al., GRL 2012)  
(Métivier, et al., en prep.)



Coefficients  
harmoniques  
sphériques

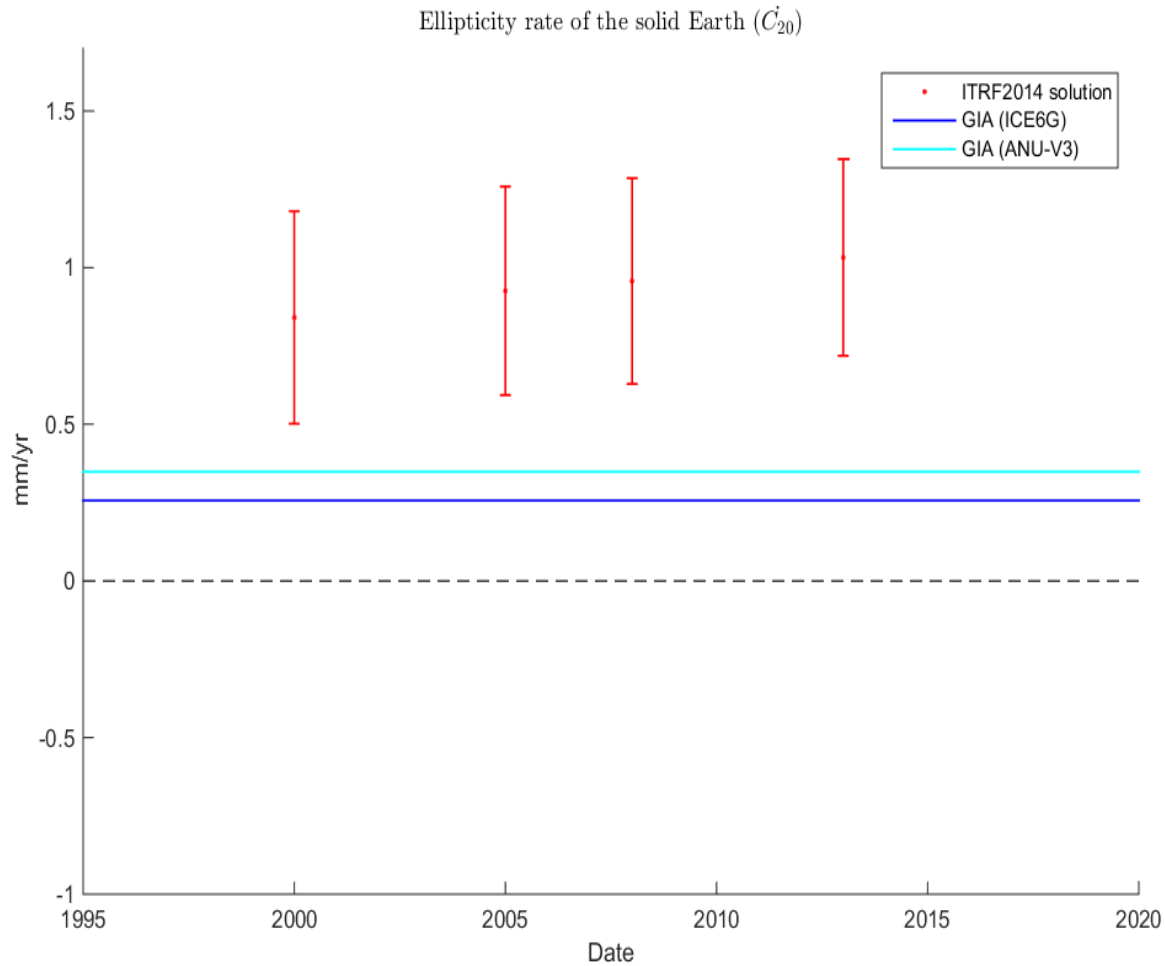
# ITRF2014 : VARIATIONS DE FORMES DE LA TERRE SOLIDE DE GRANDES LONGUEURS D'ONDE (2013)

(Métivier, et al., GRL 2012)  
(Métivier, et al., en prep.)



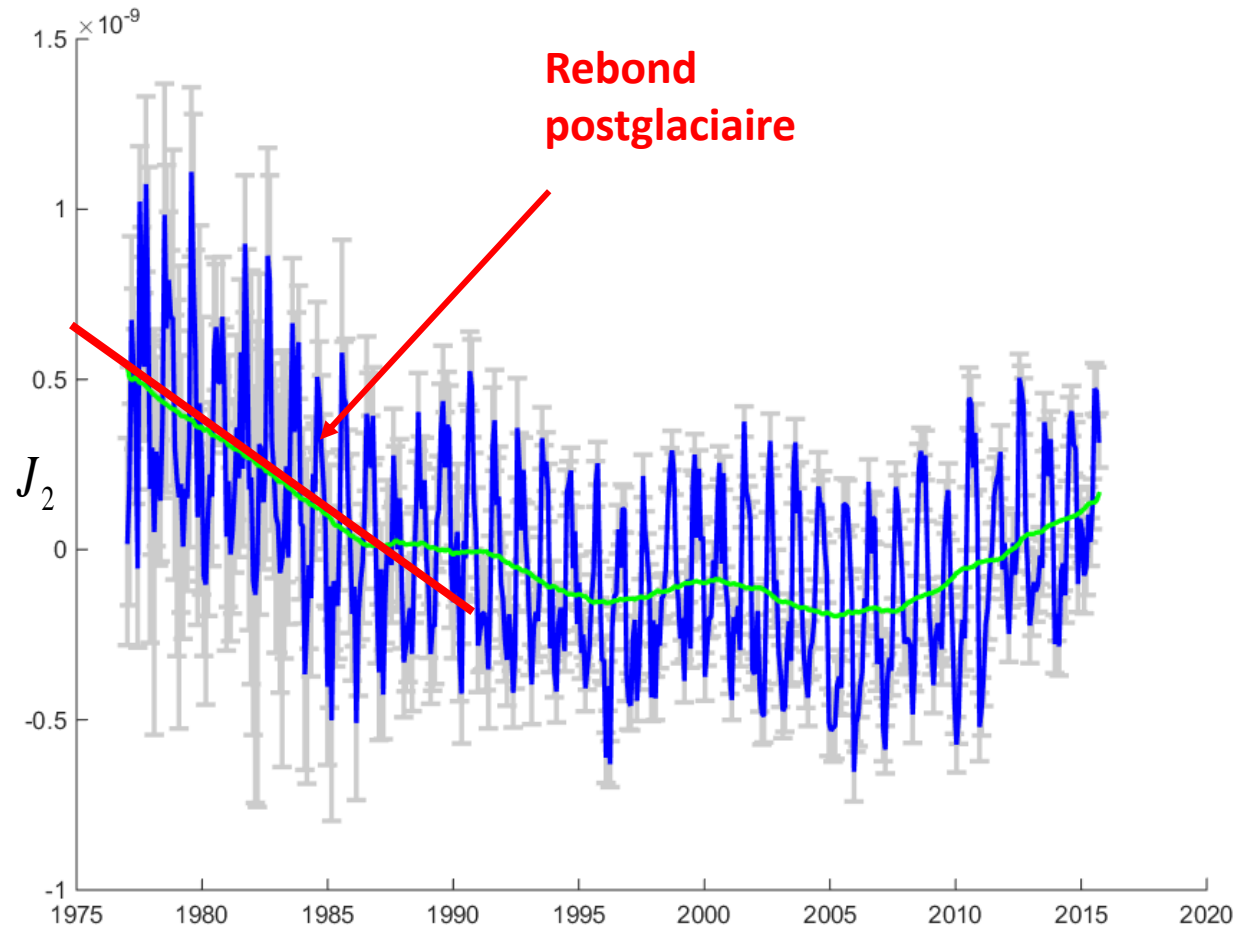
Coefficients  
harmoniques  
sphériques

# VARIATIONS TEMPORELLES D'ELLIPTICITÉ



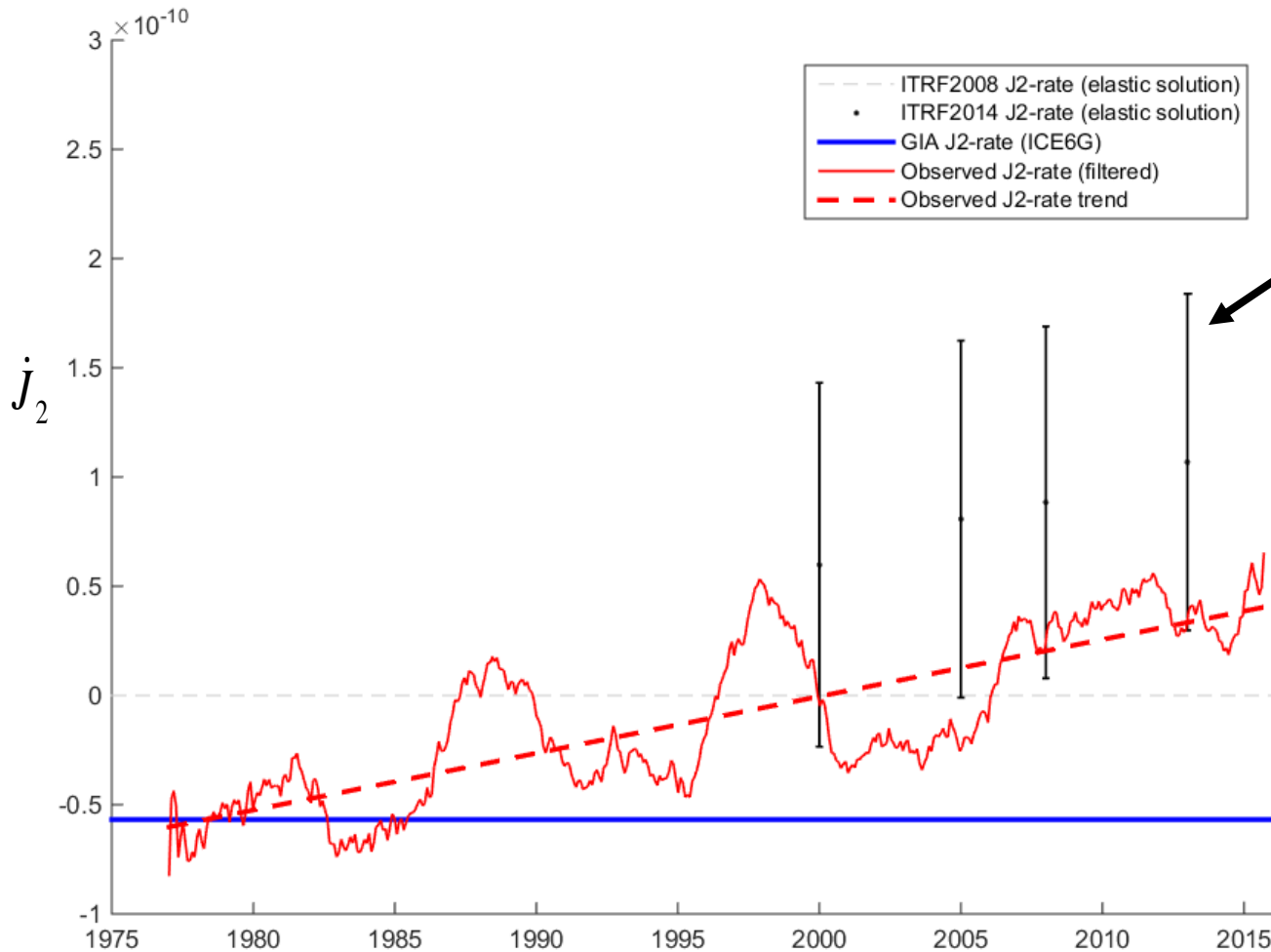
# L'APLATISSEMENT DU GÉOÏDE (J2)

Données NASA - CSR



# TAUX DE VARIATION DU $J_2$

$$\dot{j}_2 = \dot{j}_2^{GIA} + \dot{j}_2^{RIM} = \dot{j}_2^{GIA} + \sqrt{5} \frac{1 + k'_2}{h'_2} \frac{1}{a} (\dot{C}_{20}^{ITRF} - \dot{C}_{20}^{GIA}).$$



**ITRF2014 en supposant que la fonte des glaces actuelle engendre des déformations élastiques**

**Visco-élasticité ?**

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES

- **L'évaluation des repères de référence ne peut s'abstraire d'une évaluation géophysique. Comparaison des vitesses de stations et de l'origine avec les phénomènes suivants :**
  - Tectonique des plaques
  - Rebond postglaciaire (GIA)
  - Fonte des glaces actuelle
- **Problème de la séparation des sources en géophysique :**
  - Modélisation GIA largement remise en cause (viscosité – Métivier et al. 2016)
  - Pollution du GIA dans les modèles de tectonique des plaques
  - Séparation des signaux de GIA et des changements climatiques actuels
- **L'ITRF2014 – vitesses verticales GNSS :**
  - Présente une signature climatique sans précédent
  - Corroboie une inversion récente de la courbe des anomalies de J2 a priori due aux changements climatiques et à l'accélération de la fonte des glaces
  - Probable composante viscoélastique dans les déformations actuelles

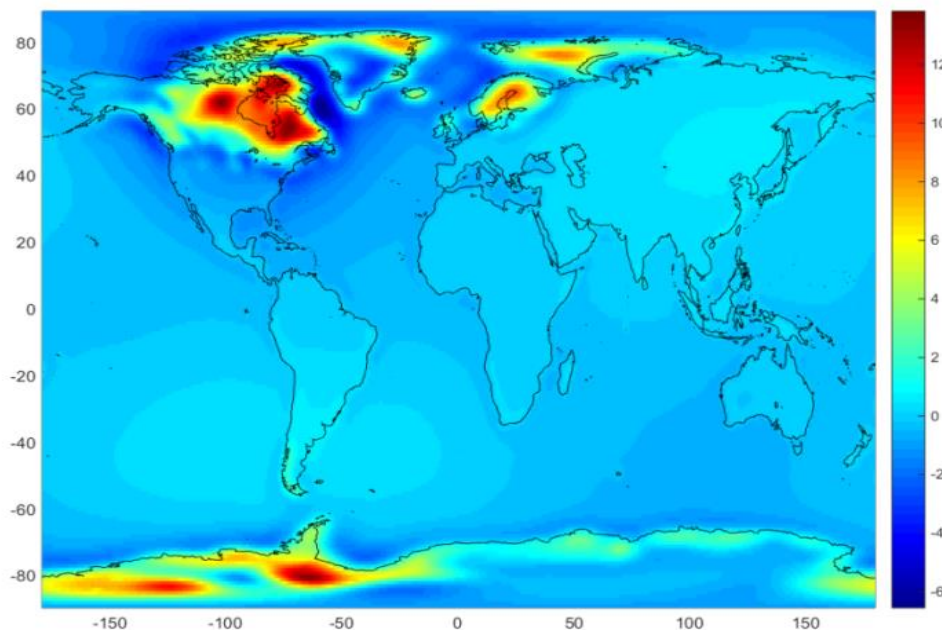
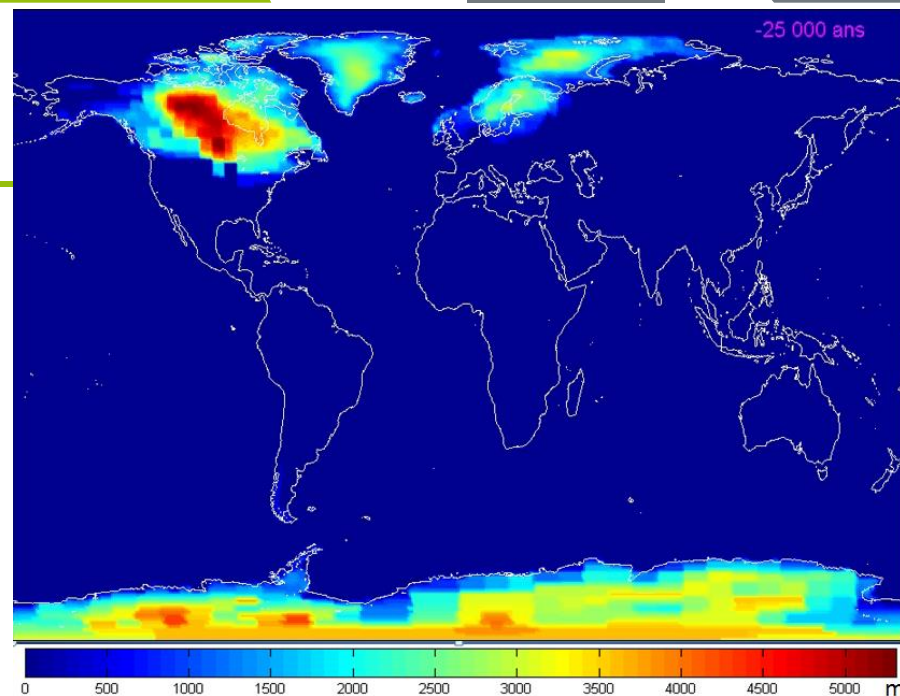
**FIN**



# REBOND POSTGLACIAIRE

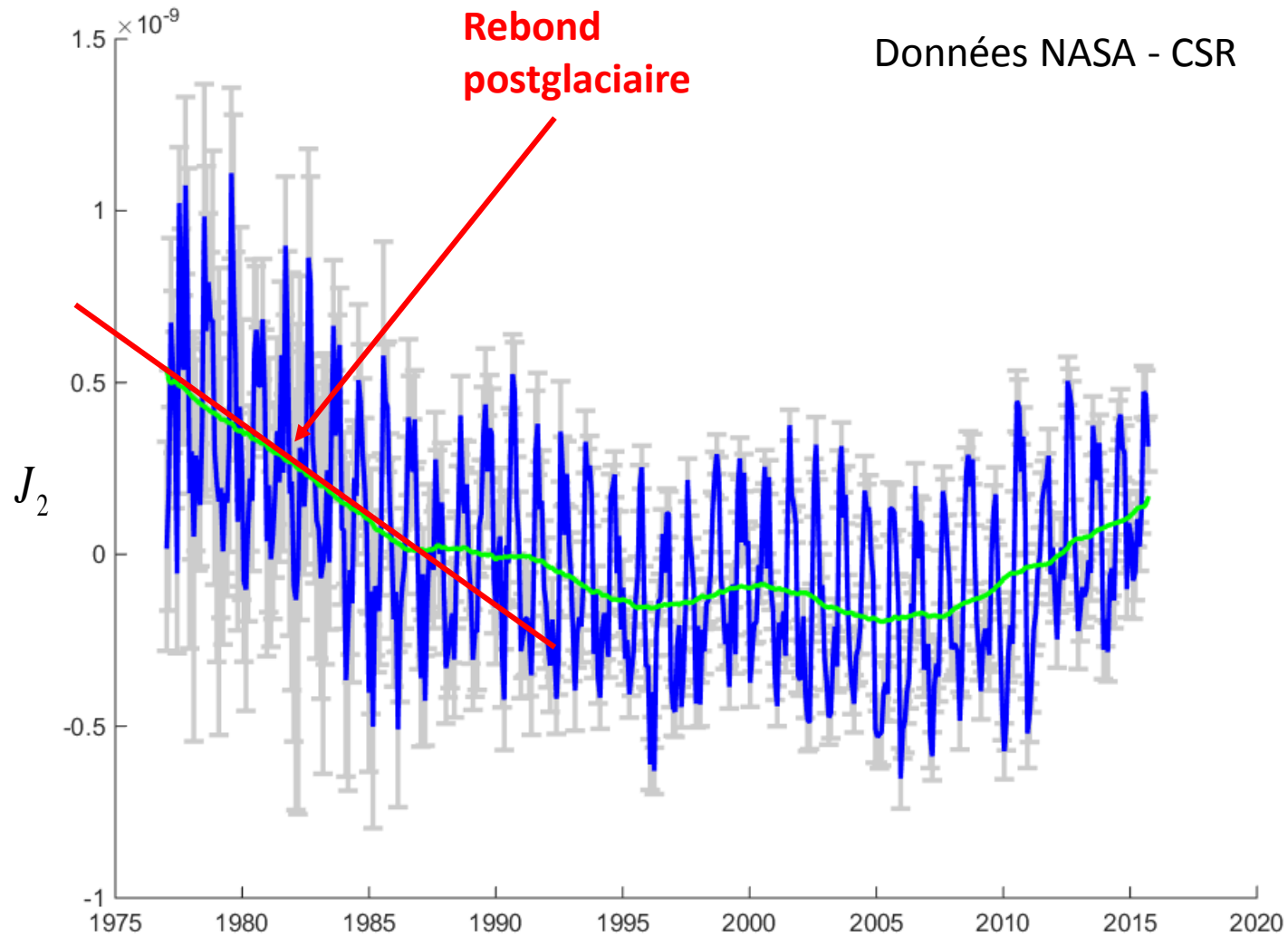
- Réajustement viscoélastique lent du sol induit par la dernière déglaciation

Hauteur de glace au dernier maximum glaciaire (-25 ka).  
(Modèle ICE5G)

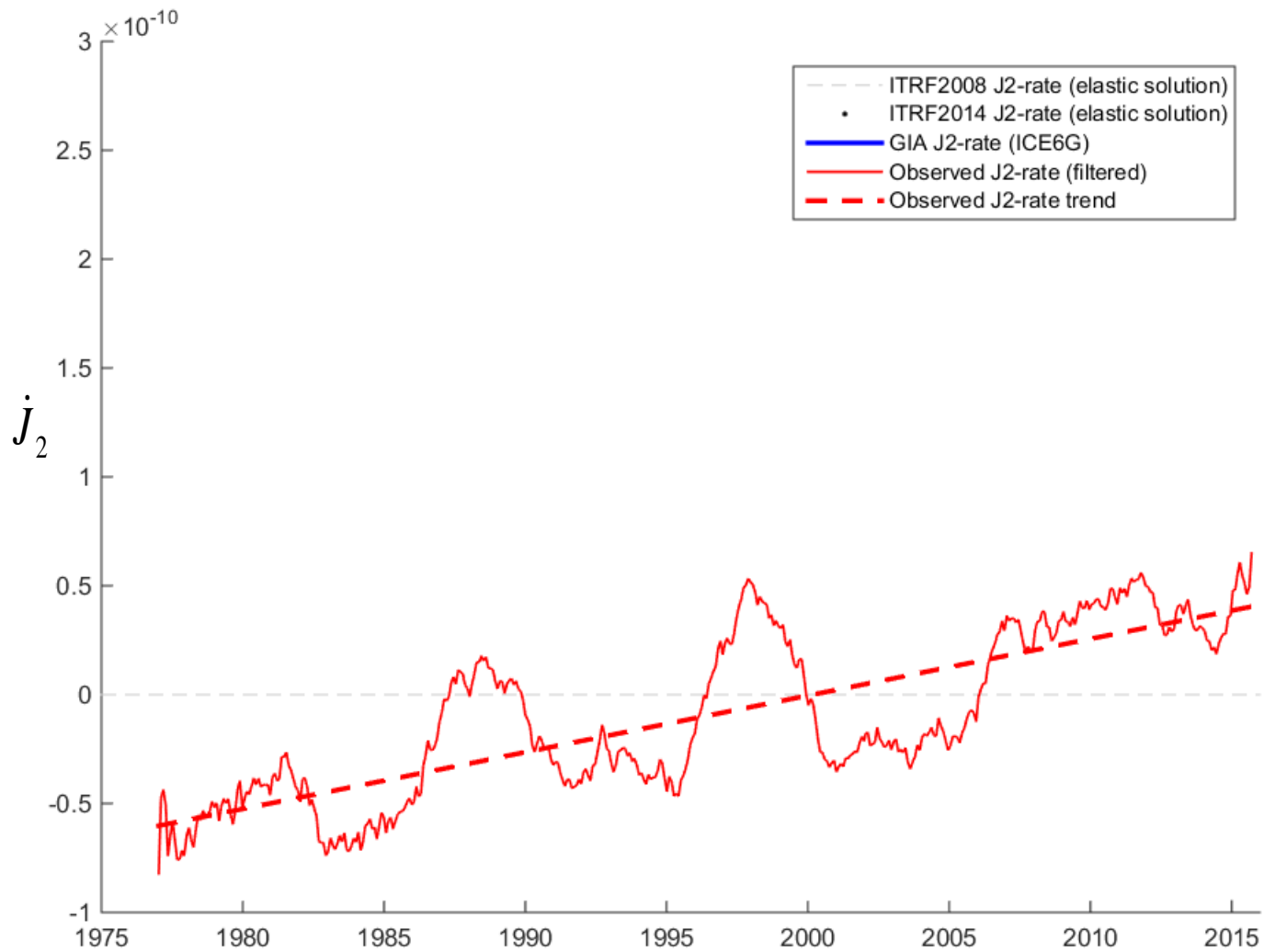


- Source aujourd'hui de mouvements verticaux long-termes :
  - Vitesses jusqu'à 15-20 mm/an
  - Localisation principale : Canada, Scandinavie, Antarctique, Groenland
  - Ajustement concomitant du niveau des mers

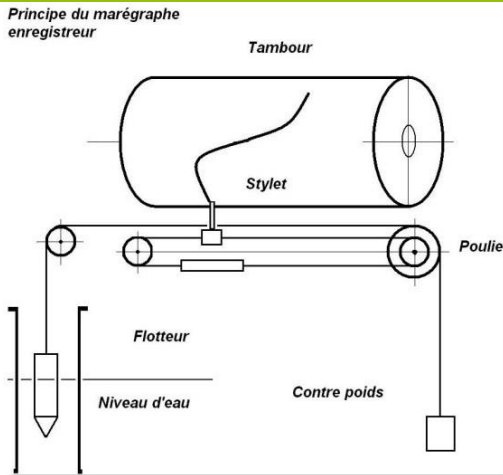
# LES ANOMALIES DU $J_2$ (ELLIPTICITÉ DU GÉOÏDE)



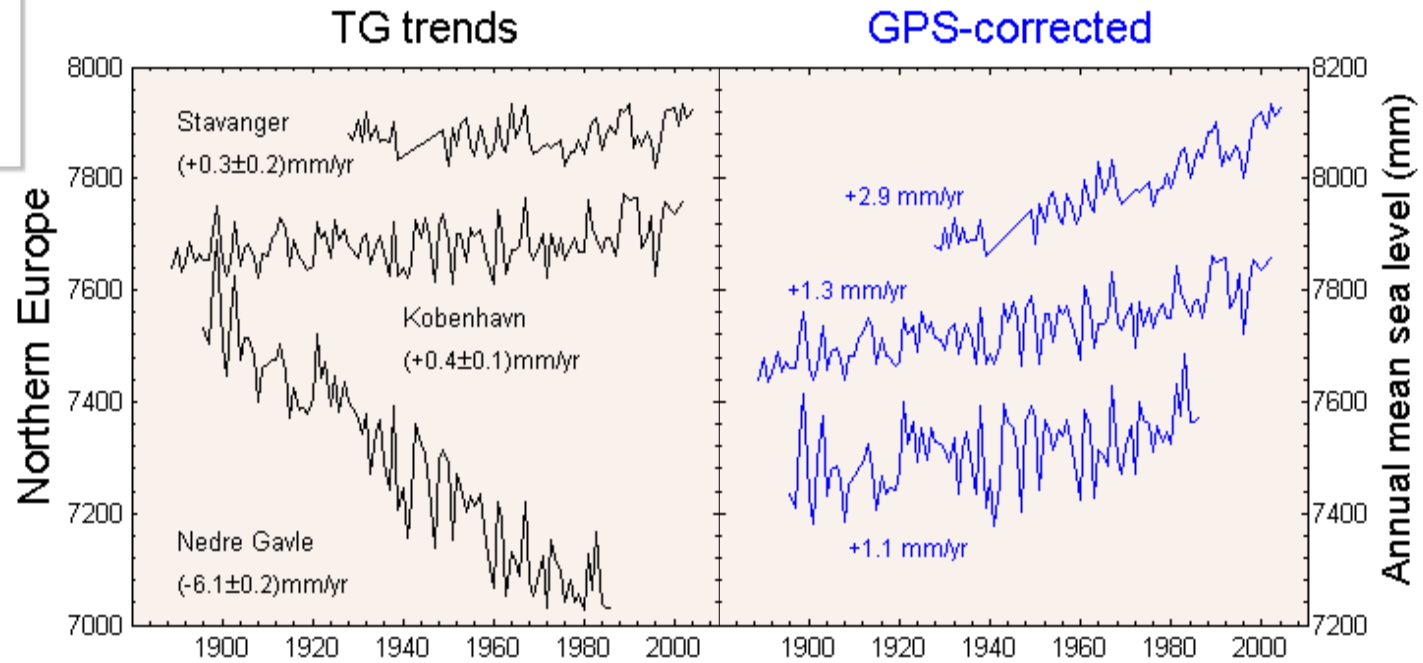
# TAUX DE VARIATION DU $J_2$



# MARÉGRAPHIE ET GPS

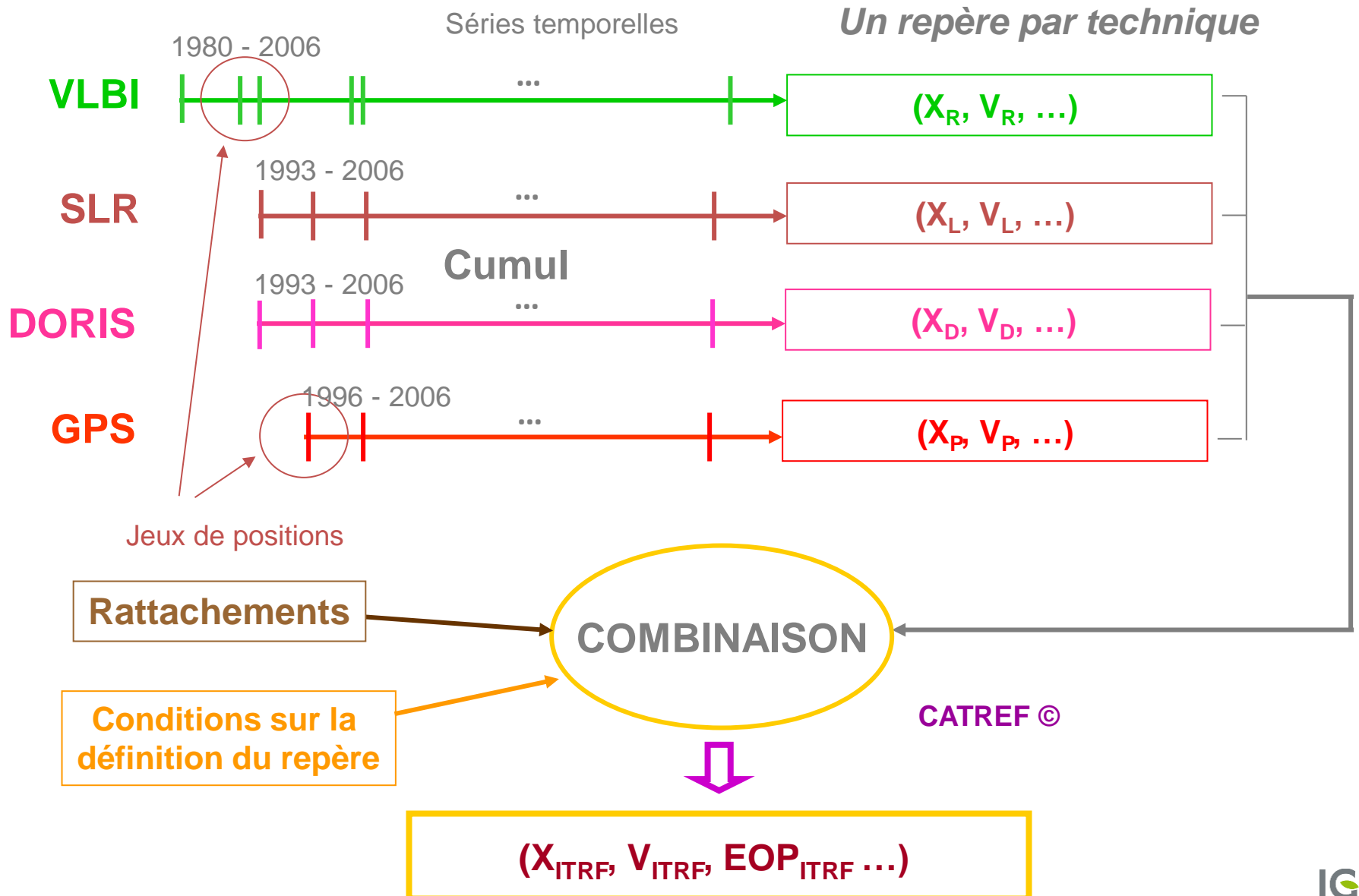


Marégraphe de Marseille



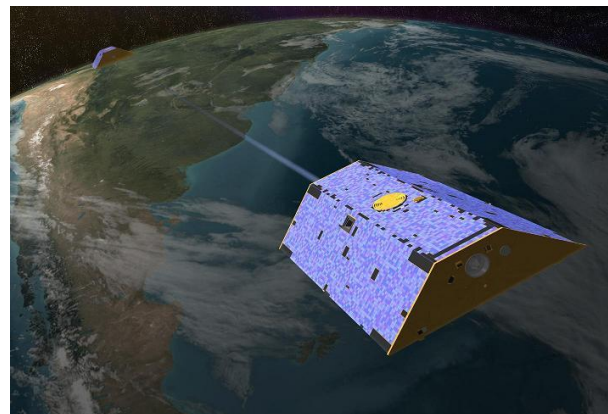
Woppelmann et al. (2009)

# SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE EN GÉODÉSIE SPATIALE

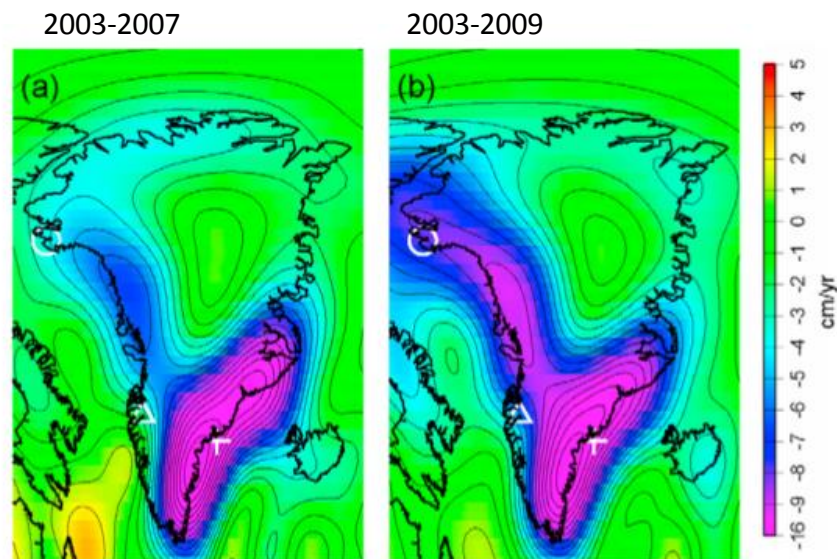


# VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP DE PESANTEUR

- Perturbation de la gravité mesurée par la mission satellitaire GRACE depuis 2003

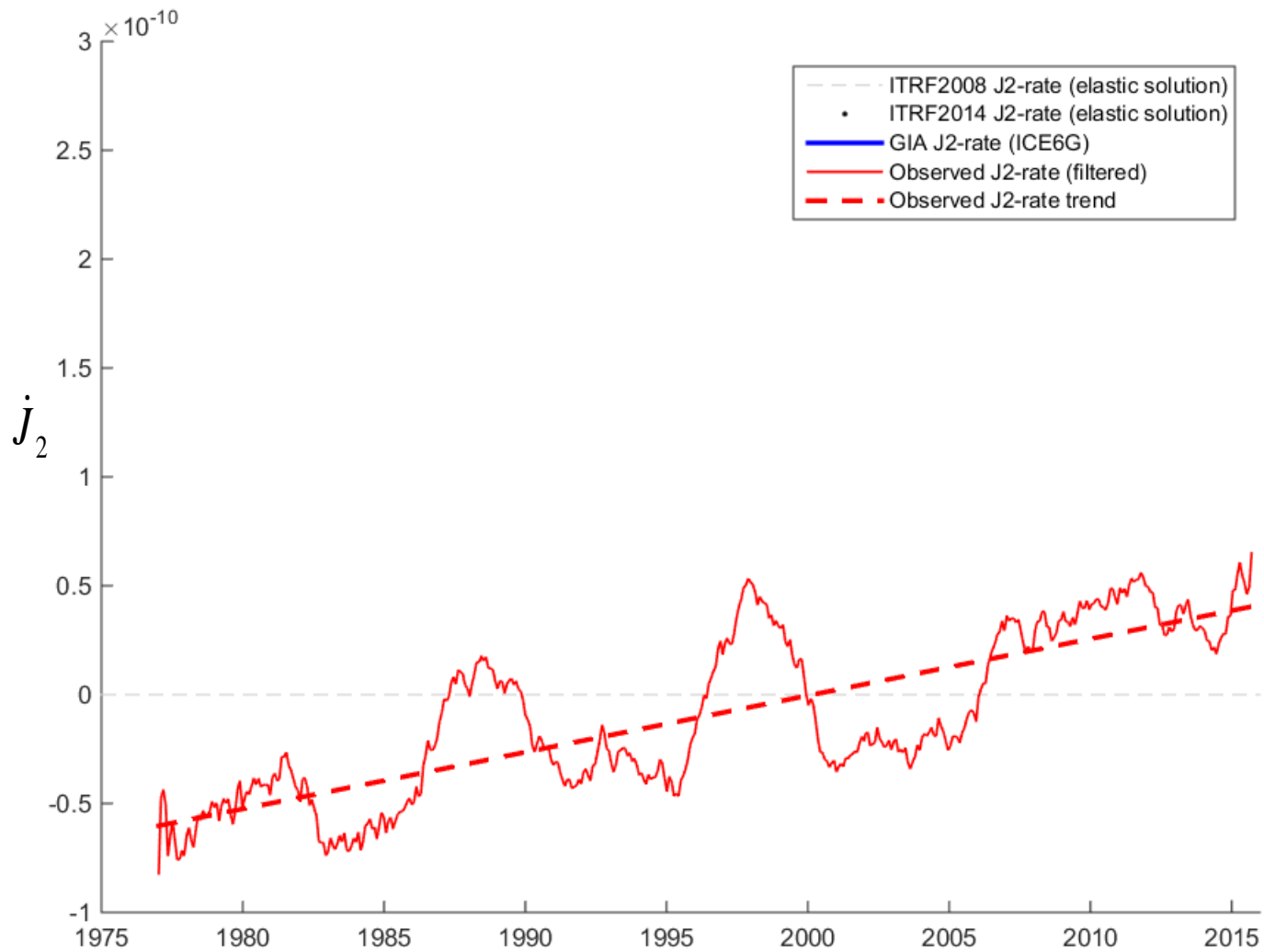


- Evidence d'une fonte de la calotte glaciaire au Groenland depuis 2003 avec une extension du phénomène vers 2006

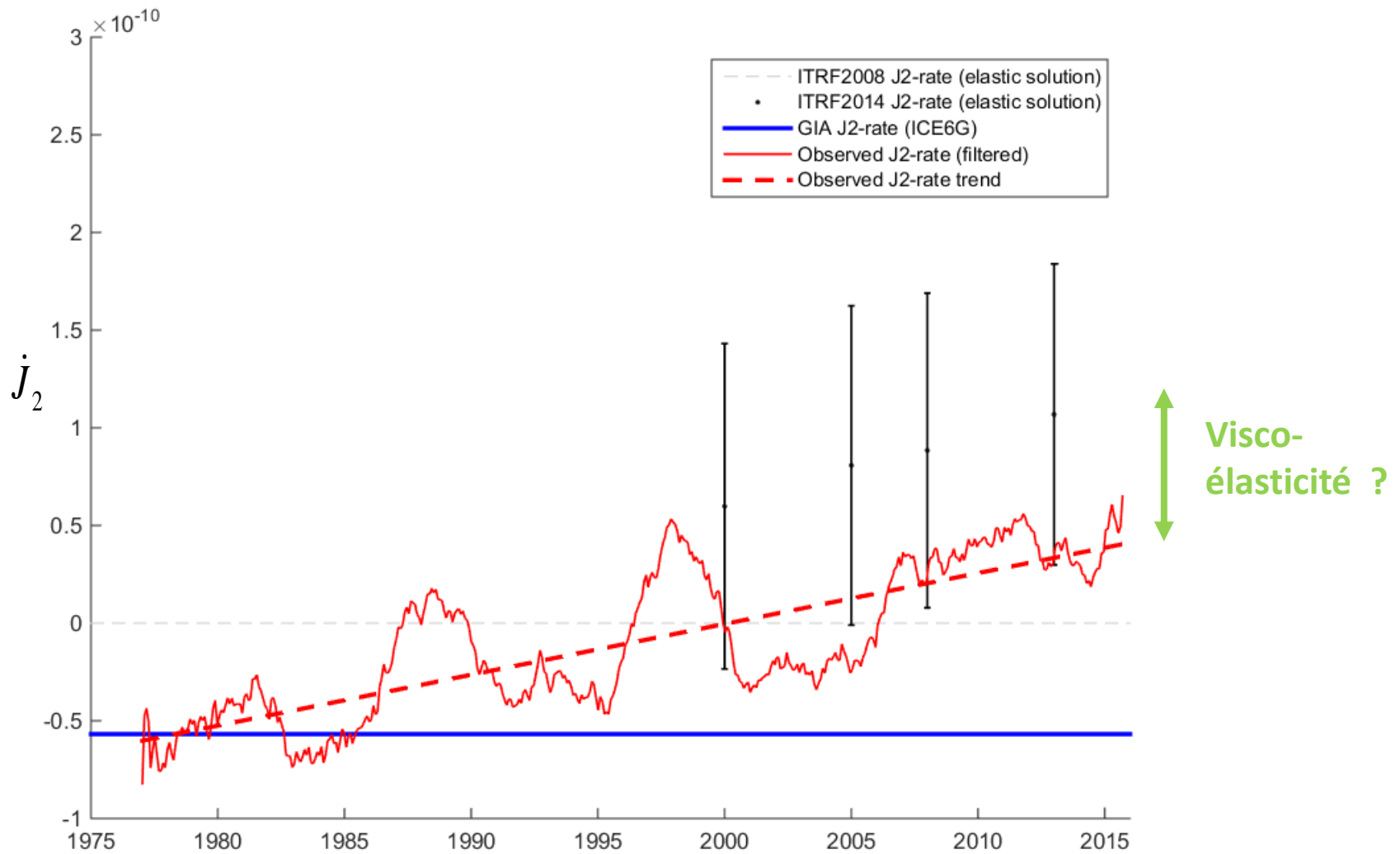


*Khan et al., (2010)*

# TAUX DE VARIATION DU $J_2$

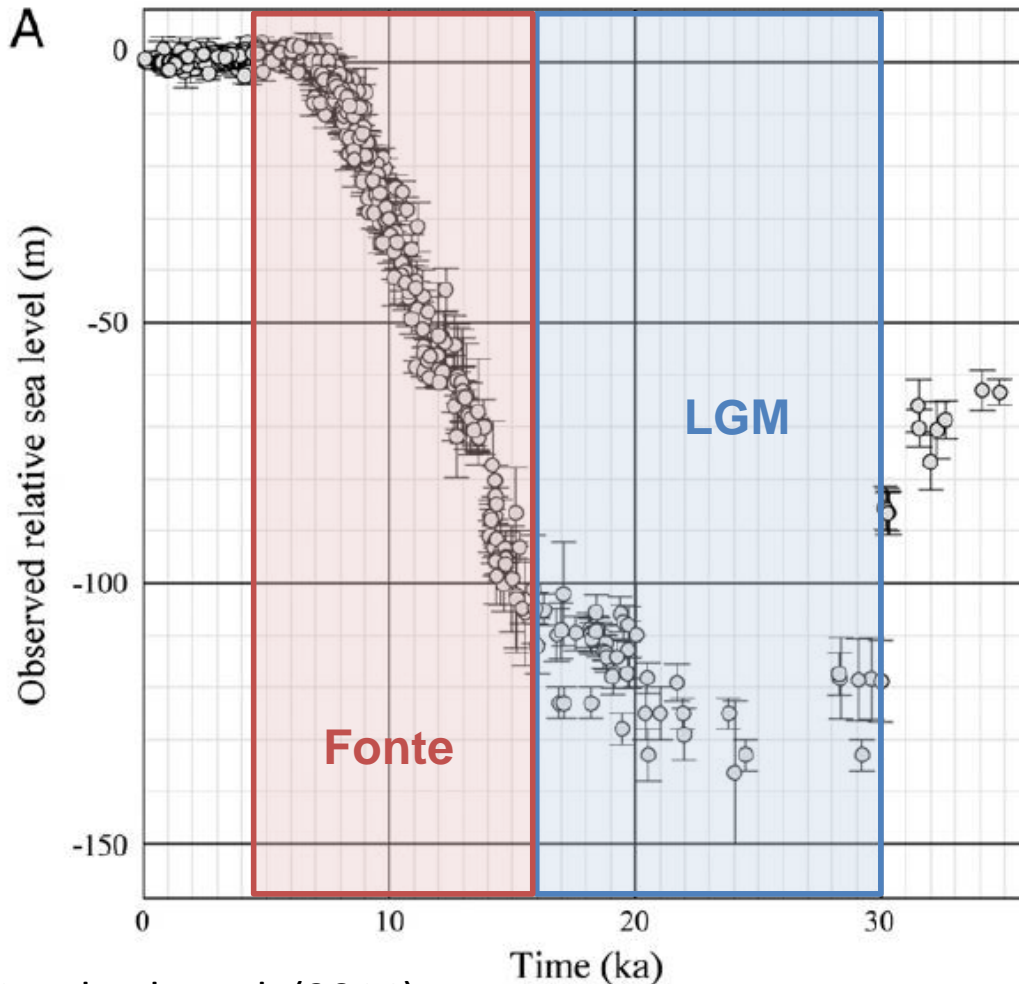


# TAUX DE VARIATION DU $J_2$





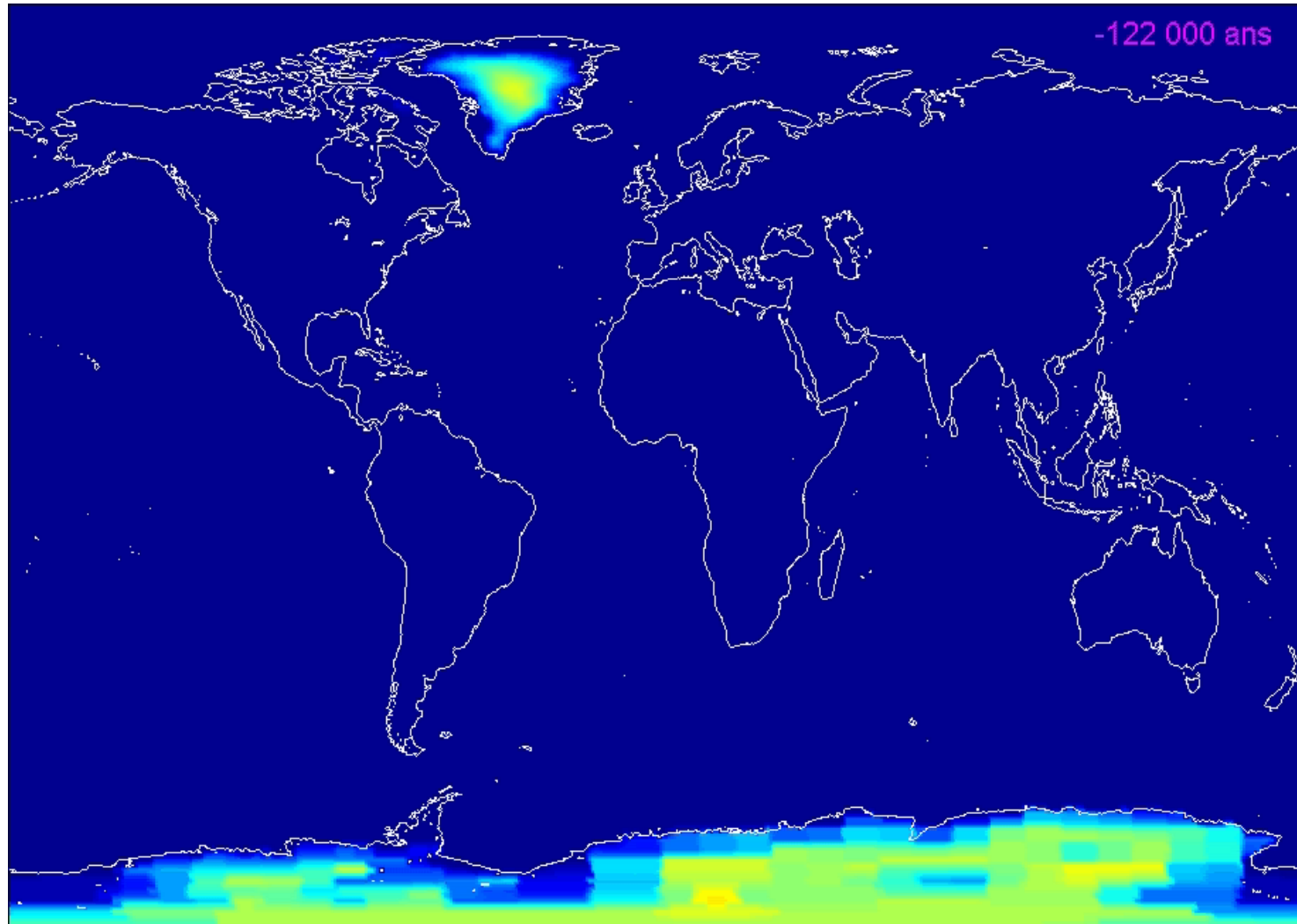
# REBOND POSTGLACIAIRE : VARIATIONS DU NIVEAU MOYEN DES MERS DEPUIS 40 000 ANS



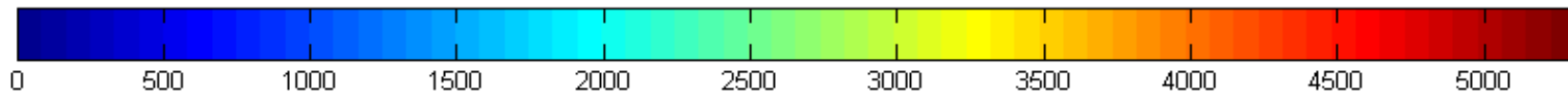
- Mesures du niveau des mers en champ lointain
  - Dépôts sédimentaires
  - Coraux fossilisés
- Last Glacial Maximum (LGM) :
  - Entre 16-30 ka
  - Niveau des mers plus bas de 110-130 m
- Période de déglaciation :
  - Entre 5-16ka
  - En moyenne  $\sim 1$  cm/an de remontée des mers

Lambeck et al. (2014)

# REBOND POSTGLACIAIRE : HAUTEURS DE GLACE



Modèle ICE-5G  
Peltier (2004)



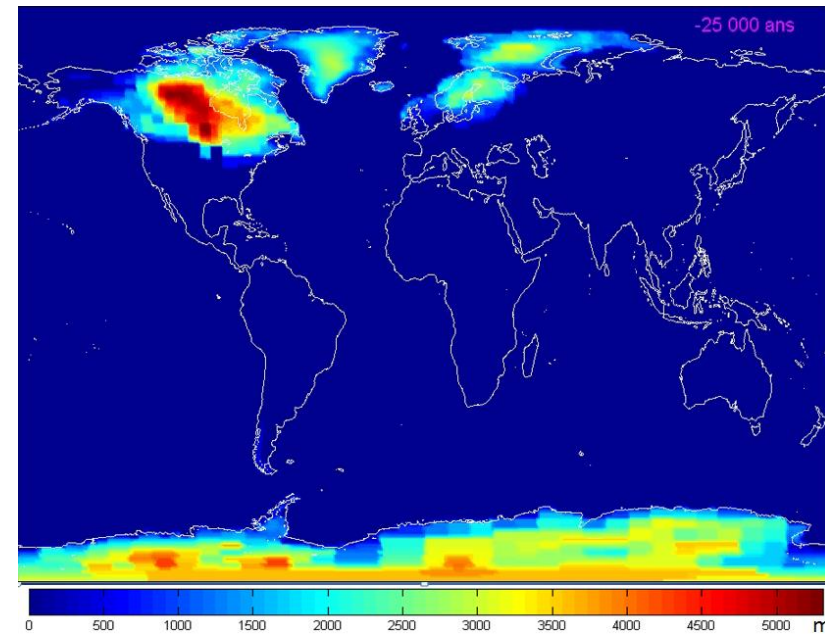
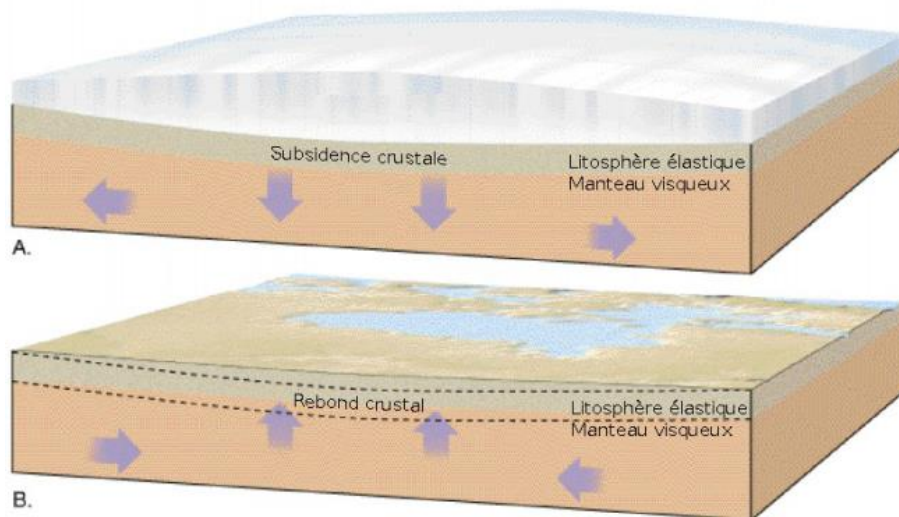
# RÉAJUSTEMENT ISOSTATIQUE POSTGLACIAIRE

## ■ LGM – Hauteurs de glace sur les différentes calottes polaires :

- Laurentide (Am. Nord) : max. 5-6 km
- Scandinavie (Europe Nord) : max. 3-4 km
- Antarctique : max. 5 km
- Groenland : max. 3-4 km
- Islande, Svalbard, Patagonie : max. 0.5-2 km

## ■ LGM – Enfoncement du sol sous les calottes :

- Laurentide : entre 500m -1km d'enfoncement



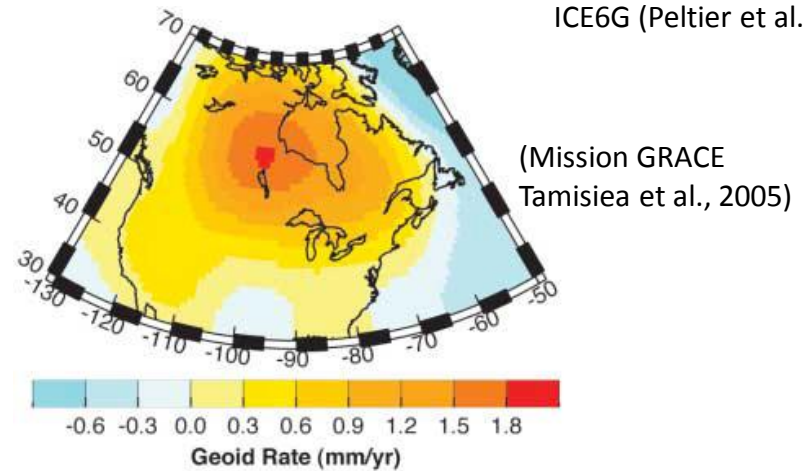
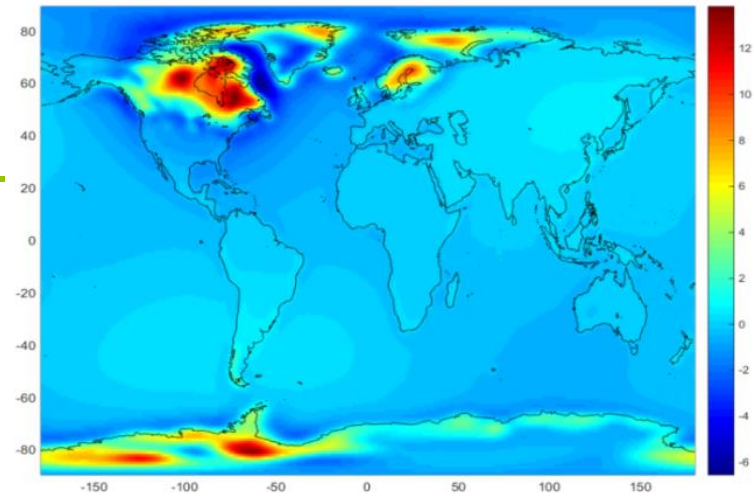
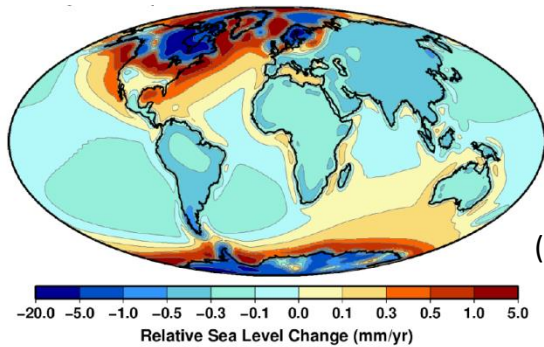
## ■ Déglaciation :

- Relâchement des contraintes
- Réajustement isostatique du sol

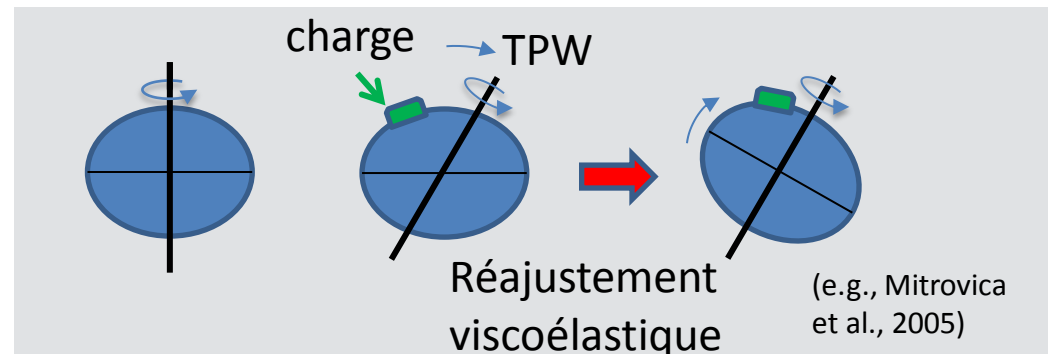
➔ **Déformations gravito-viscoélastiques toujours en cours actuellement**

# IMPACT ACTUEL DU GIA

- Remontée viscoélastique du sol
  - max. ~14-20 mm/an
- Perturbations du champ de pesanteur
  - max. ~2-3 mm/an sur le géoïde
- Variations du niveau des mers



- Perturbation de la rotation et réajustement du bourrelet équatorial (rotational feedback)



- **Certaines comparaisons locales de mesures de vitesse avec un modèle de rebond postglaciaire semblent plus cohérentes avec la solution ITRF2000**

(Argus, 2007 ; Lidberg & Johansson, 2007 ; tregoning & Lambeck, EGU 2010)

**L'ITRF2000 serait-il meilleur que l'ITRF2005 et l'ITRF2008 ? D'où vient la dérive de l'origine du repère ?**

- **La fonte des glaces ne peut engendrer une augmentation de la vitesse du géocentre de plus de 0.7 mm/an en 10-20 ans. La dérive de l'origine du repère n'est pas d'origine géophysique** (métivier et al., 2010)

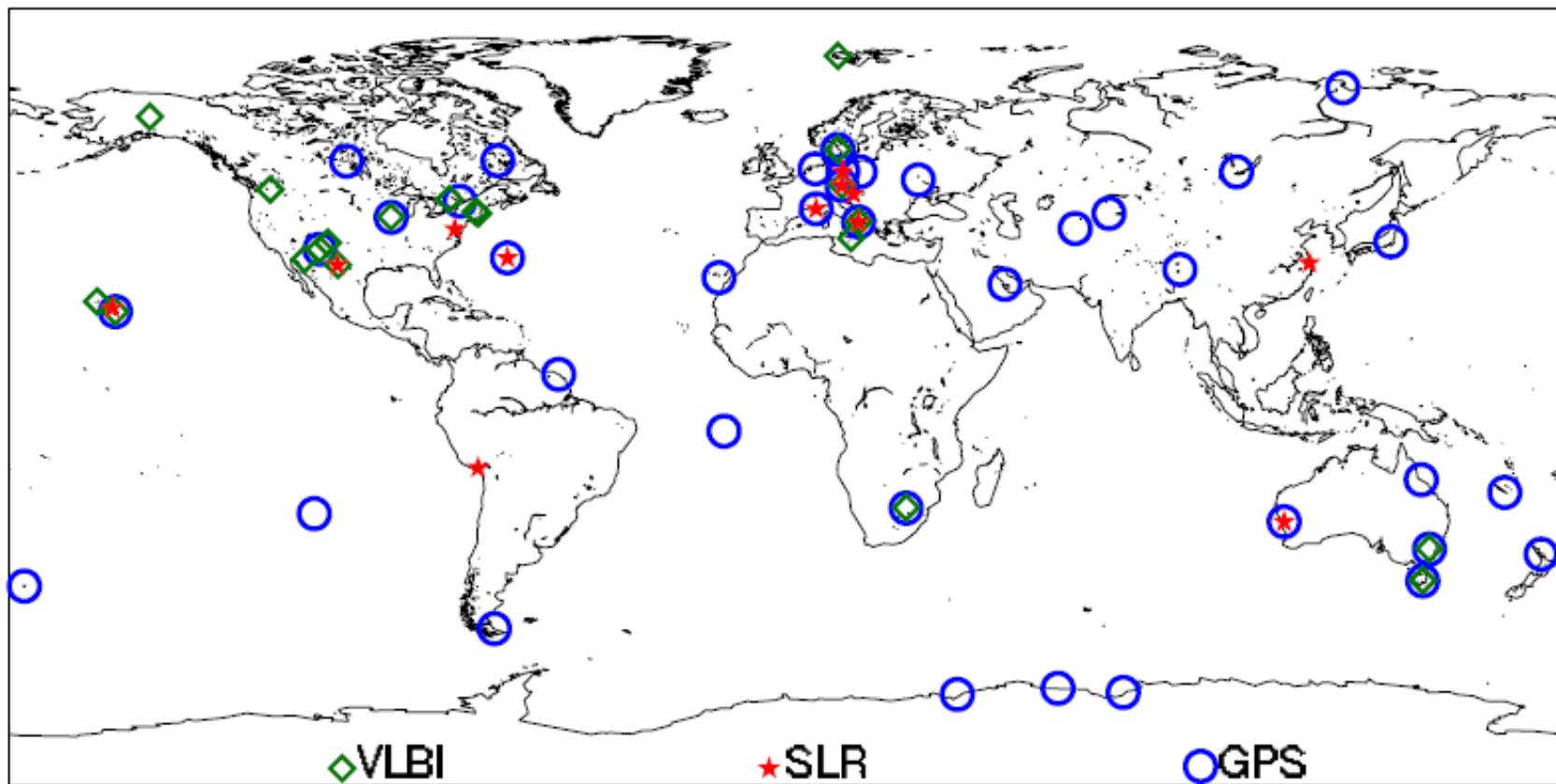
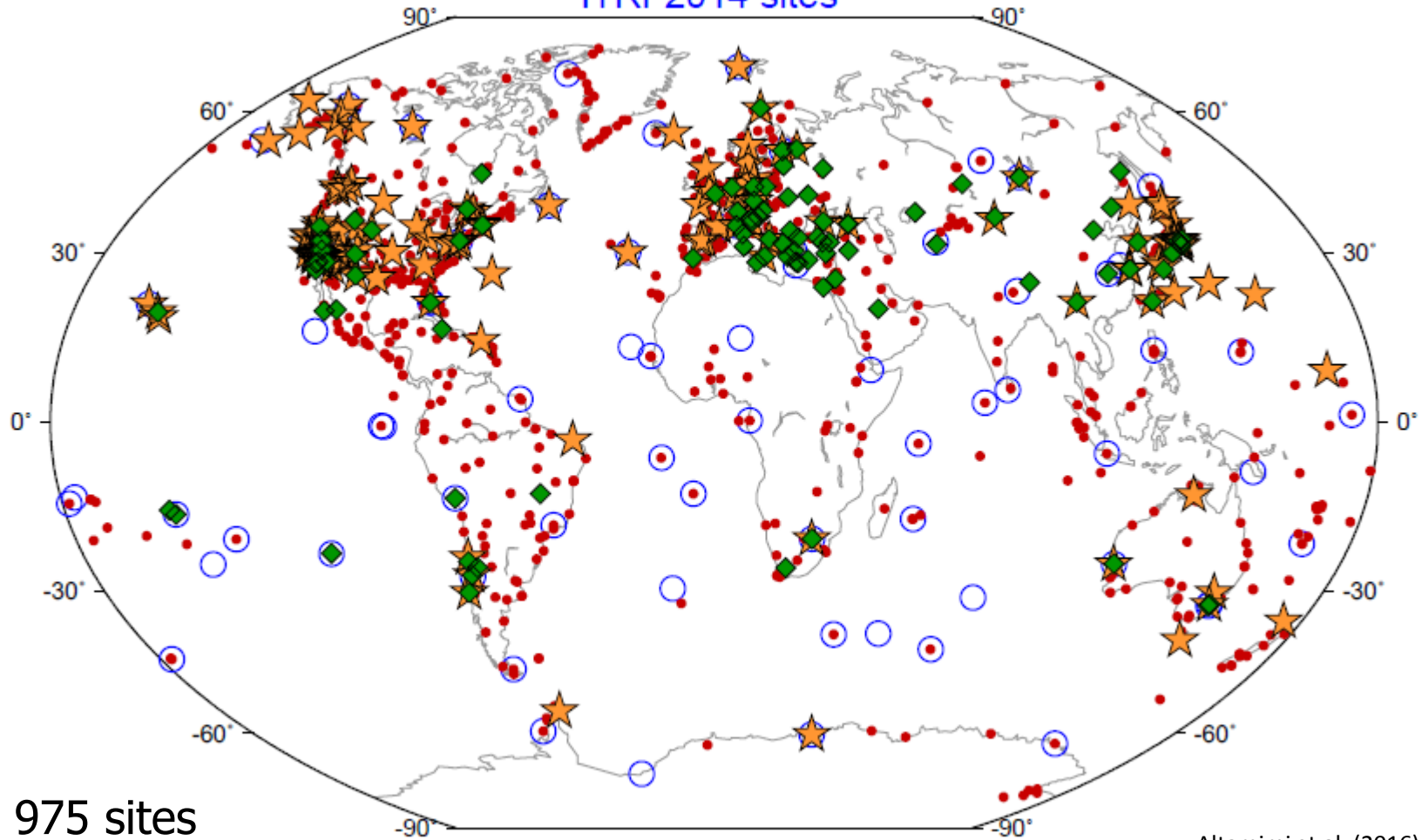


Figure 9. Core stations used in the orientation and its rate alignment of the ITRF2005 to the ITRF2000.

Sous réseau utilisé pour comparer l'ITRF2005 et l'ITRF2000  
(Altamimi et al, 2007)

# INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME

ITRF2014 sites

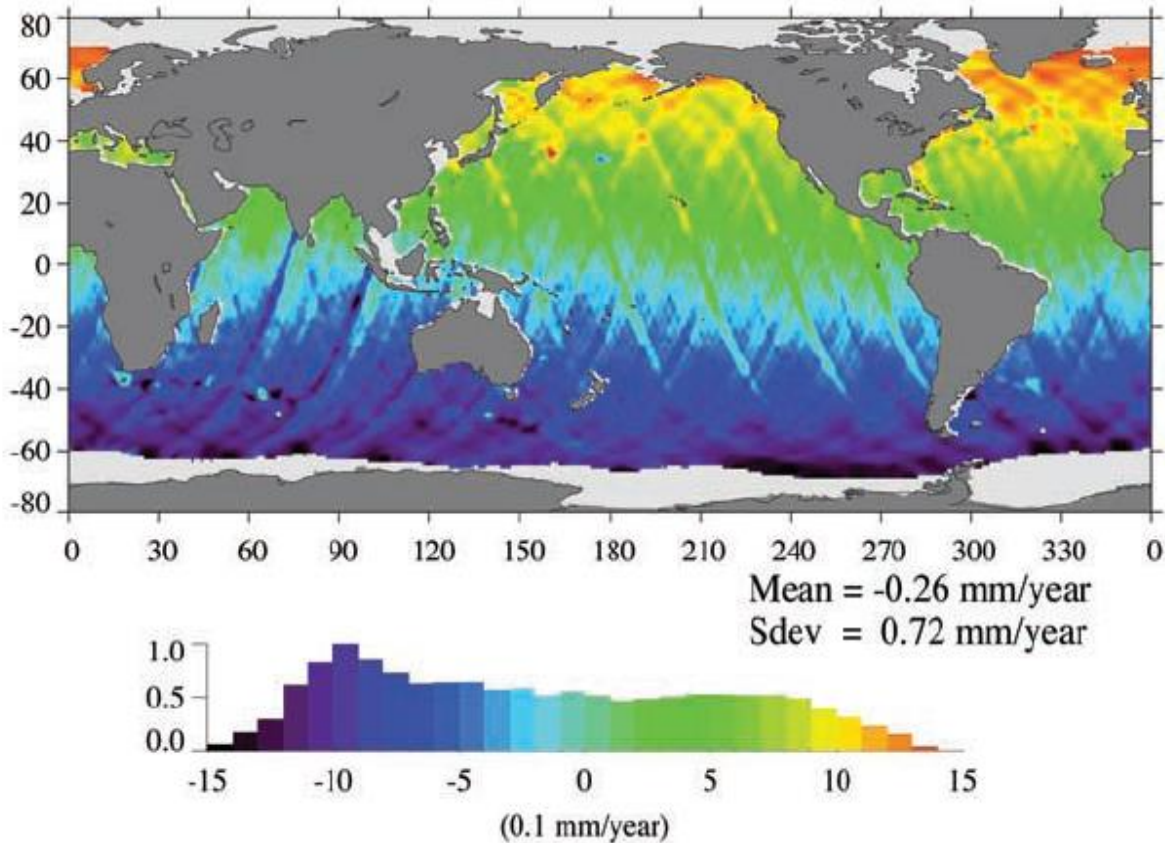


975 sites  
(1499 stations)

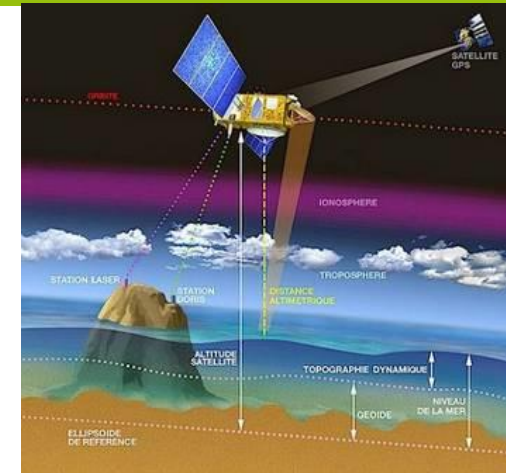
★ VLBI    ◆ SLR    ● GNSS    ○ DORIS

Altamimi et al. (2016)

# NIVEAU DES MERS PAR ALTIMÉTRIE SATELLITAIRE



Beckley et al. (2007)



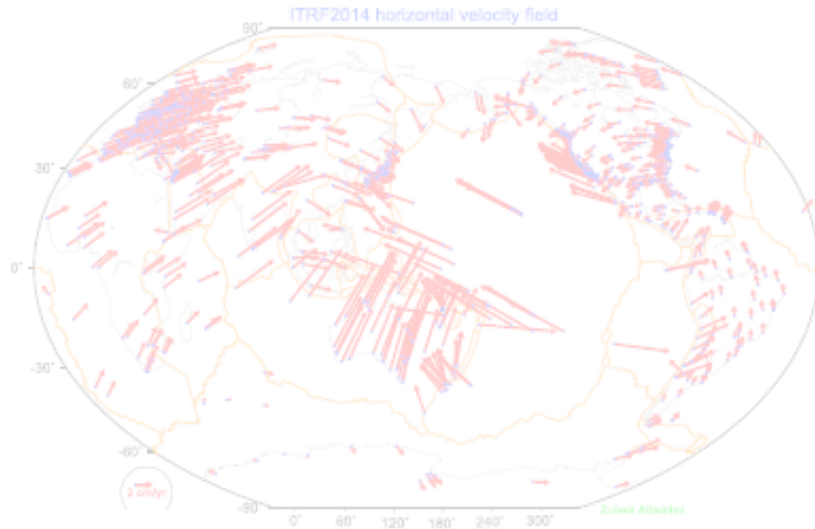
© aviso

**TOPEX (1993-2002):**  
différences régionales de  
niveau des mers selon le  
repère de référence utilisé  
**(ITRF2005 par rapport à  
CSR95/ITRF2000)**

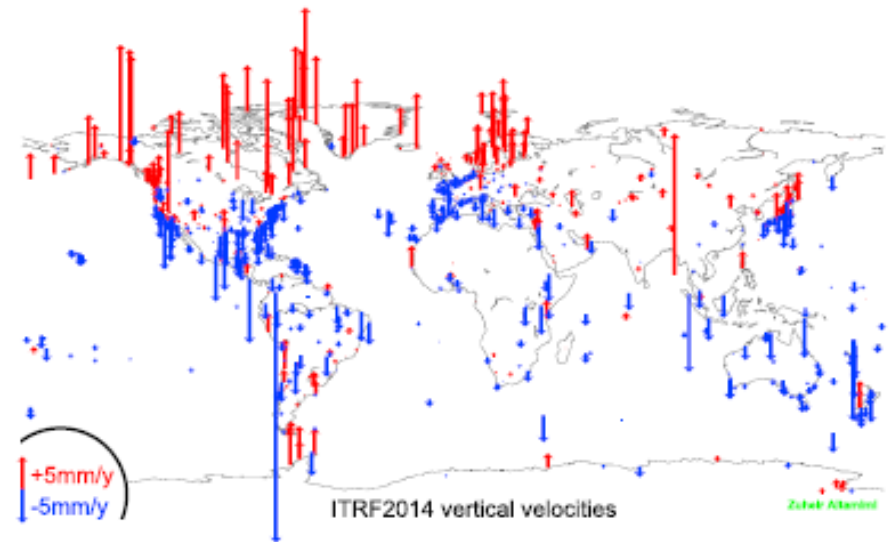


# VITESSES DES STATIONS DE L'ITRF2014

## Vitesse horizontales



## Vitesse verticales



Altamimi et al. (2016)

Estimation IGN  
précise des pôles de  
rotation des  
plaques tectonique

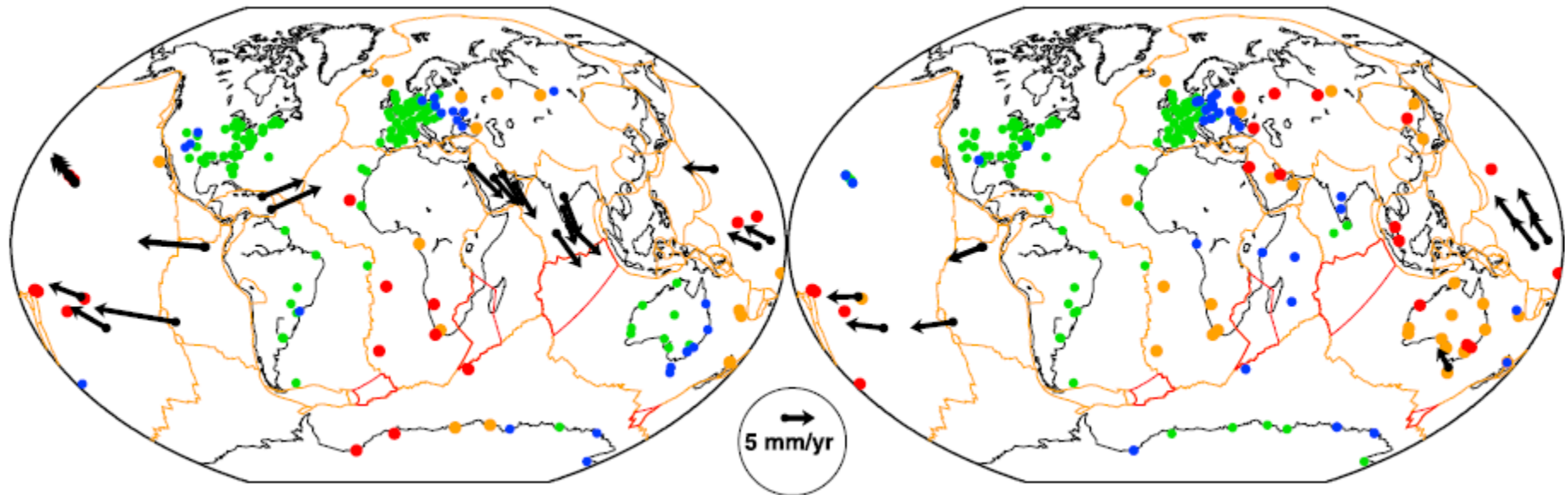
Altamimi et al. (in review)



Plaques tectoniques  
Modèle MORVEL56  
(Argus et al., 2011)

# COMPARISON BTW ITRF2008 AND NNR-NUVEL-1 AND NNR-MORVEL56

## Velocity differences after rot. rate transformation



### NNR-NUVEL-1A

RMS:

East : 2.5 mm/yr

North: 2.0 mm/yr



$R_y = 0.025 \text{ mas/yr}$

### NNR-MORVEL56

RMS:

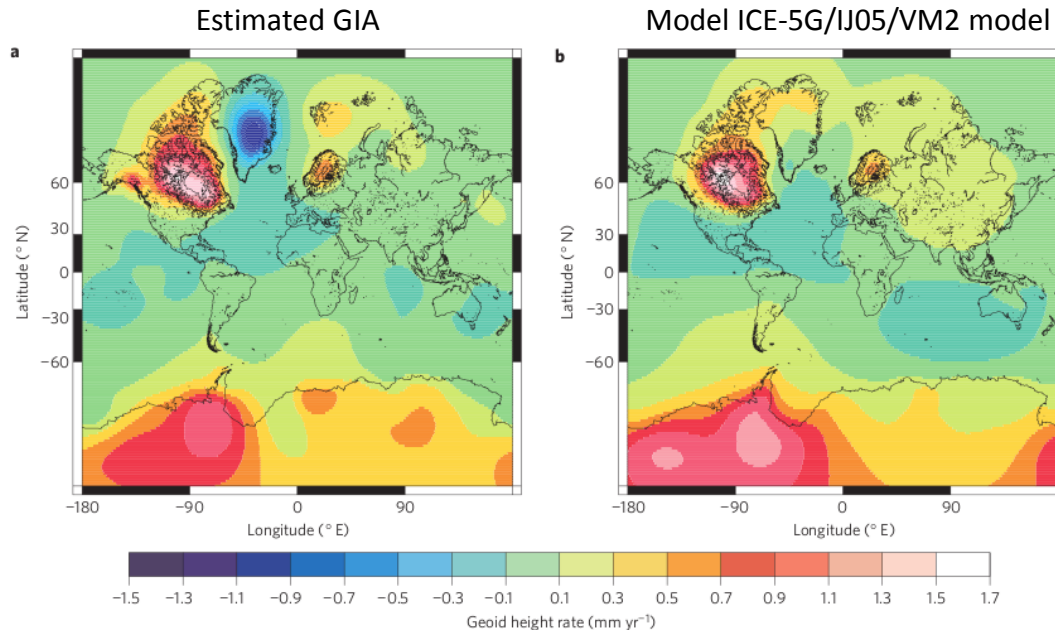
East : 1.7 mm/yr

North: 1.7 mm/yr

$R_x = 0.084 \text{ mas/yr}$

# Evaluation of ITRF origin

*Wu et al. (2011)* have estimated simultaneously Glacial Isostatic Adjustment (GIA), present-day surface mass trend and tectonic plate motion from **ITRF2008** velocities, GRACE gravity estimates and OBP models.



*Wu et al. 2010, nature geoscience*

	<b>T<sub>x</sub></b> (mm/yr)	<b>T<sub>y</sub></b> (mm/yr)	<b>T<sub>z</sub></b> (mm/yr)	<b>Scale</b> (mm/yr)
<b>ITRF2008 + GRACE + ECCO + OMCT</b>	<b>- 0.4 ± 0.1</b>	<b>- 0.2 ± 0.1</b>	<b>- 0.5 ± 0.2</b>	<b>- 0.1 ± 0.2</b>

Consistent with Métivier et al. (EPSL 2010) results

# Evaluation of ITRF origin

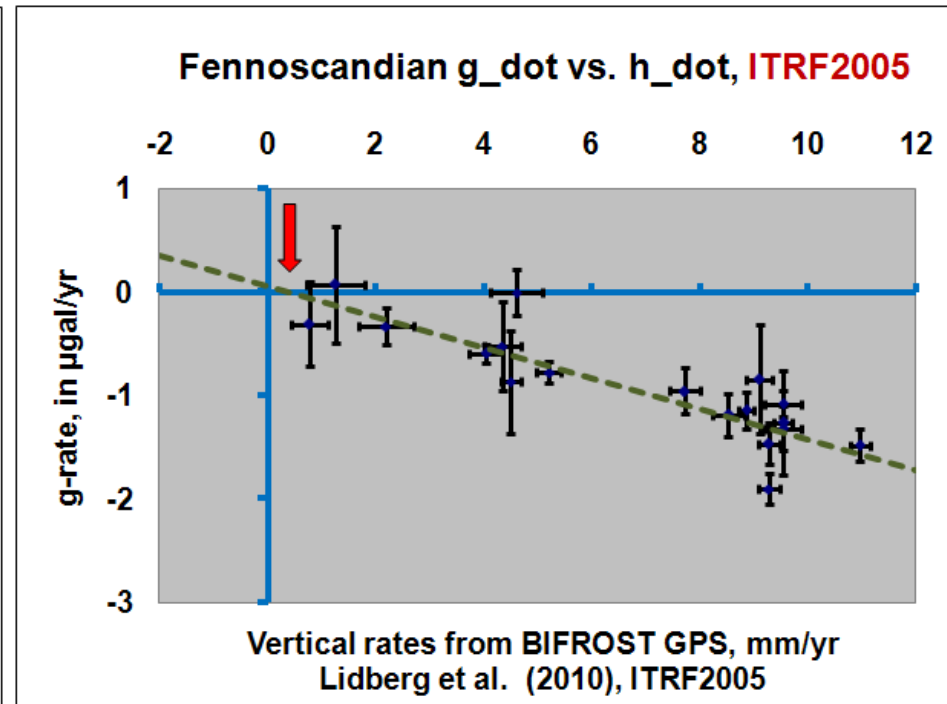
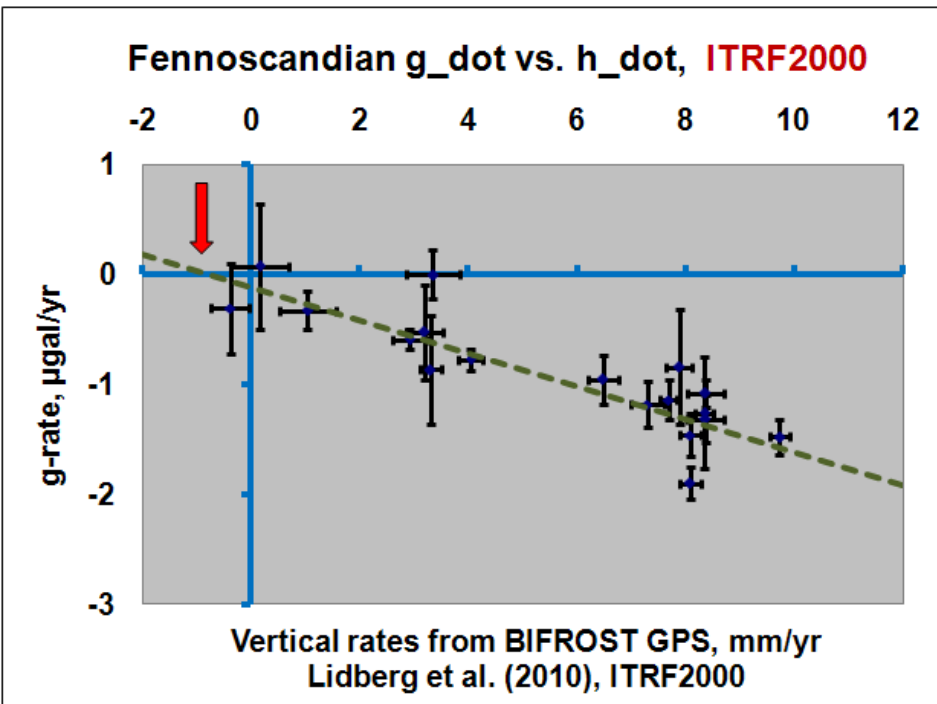
GPS height velocities and Absolute gravimeter trends

Vertical velocities =  $\alpha(\lambda, \phi)$  absolute gravimeter trends + TRF origin error

$\in [-6.66, -2.85]$  mm/ $\mu$ Gal  
(Richter et al., 2004)

Précision 0.1  $\mu$ Gal/yr w.r.t. Earth Center of Mass

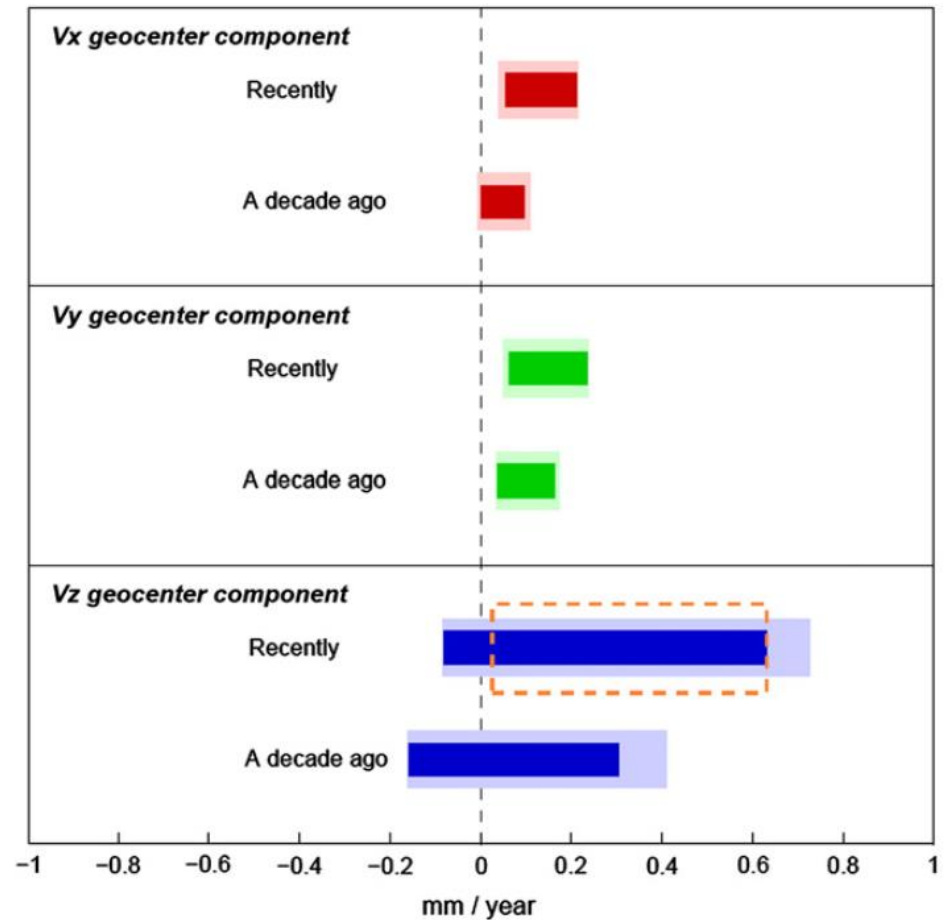
Nordic AG Project (coordinated by the Nordic Geodetic Commission) (Courtesy J. Mäkinen)



(Plag et al., 2007; Collilieux et al., 2013, proceedings UGGI; see also Mazzotti et al., 2013)

# L'ORIGINE DE L'ITRF : MOUVEMENT GÉOPHYSIQUE ?

- Un changement de vitesse de l'origine du repère entre deux réalisations peut-elle avoir une origine géophysique ?
- Résultats de modélisations géophysiques (mouvement du Centre de Figure par rapport au Centre de Masse) :
  - **Mouvement maximum** du centre de masse de l'ordre de **1 mm/an**.
  - **Probable augmentation** ces 10-20 dernières années mais seulement **quelques 0.1 mm/an**.



Métivier et al. (2010, 2011)

# PRÉCISION ET BESOINS

## ■ Variations spatiotemporelles du niveau des mers :

Une erreur de **2 mm/an** le long de l'axe Z ==> erreur dans les données altimétrie satellitaire :

- Jusqu'à **0.3 mm/an** sur le niveau moyen des mers
- Jusqu'à **1.8 mm/an** sur les variations régionales du niveau des mers



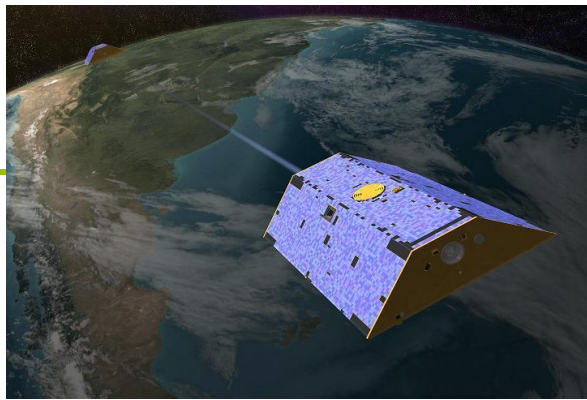
**L'erreur due au repère de référence peut être au niveau des variations long termes induites par les changements climatiques**

## ■ Besoins scientifiques en terme d'exactitude et de stabilité de l'origine :

- **1 mm en position**
- **0.1 mm/an en vitesse**

(GGOS2020, Plag & Pearlman, 2009;  
Blewitt et al., 2010;  
US National Research Council report, 2010)

# FONTE DES GLACES ACTUELLE

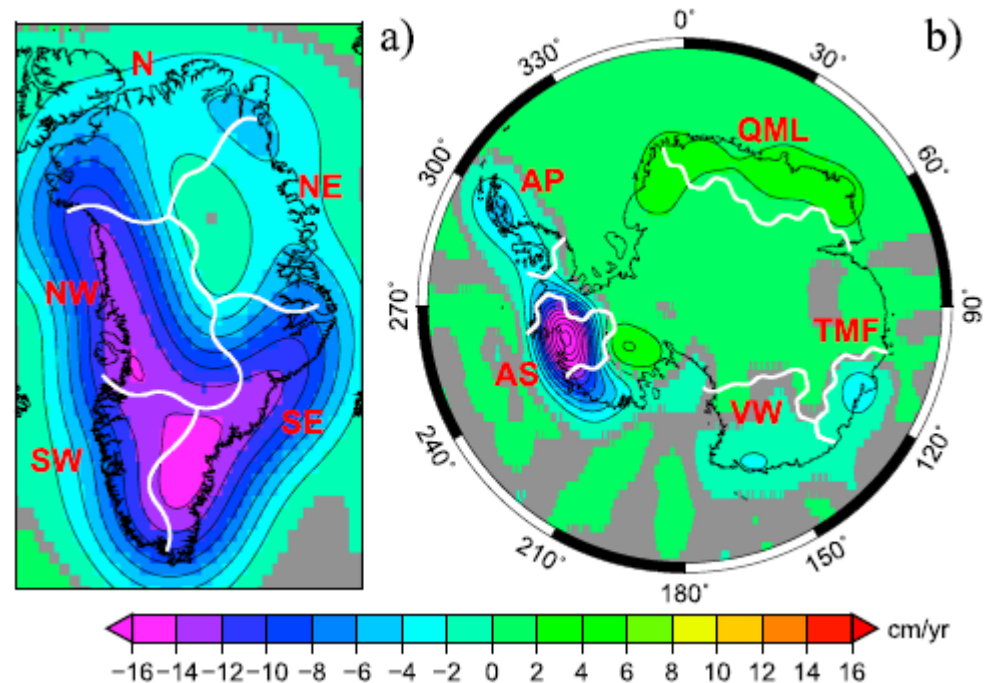


Mission GRACE depuis 2003

## ■ Taux de fonte :

Shepherd et al. (2012) - synthèse et combinaison des observations de gravimétrie spatiale et d'altimétrie satellitaire (~50 auteurs) :

Groenland - 200/-250 Gt/an,  
Antarctique -50/-100 Gt an.

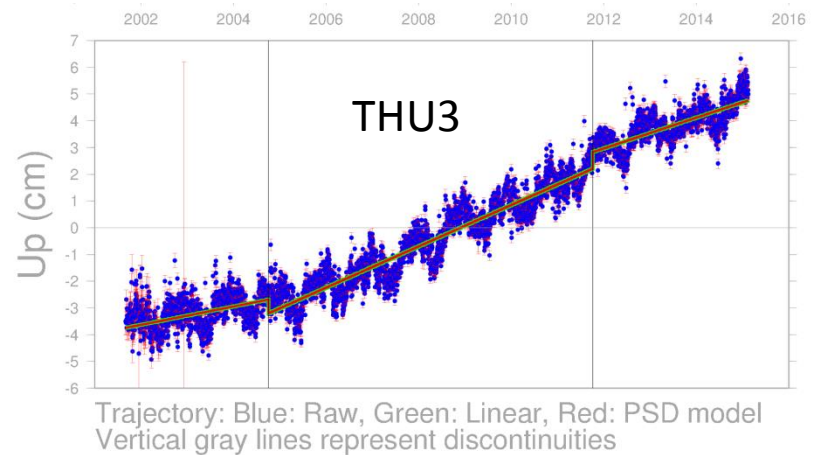
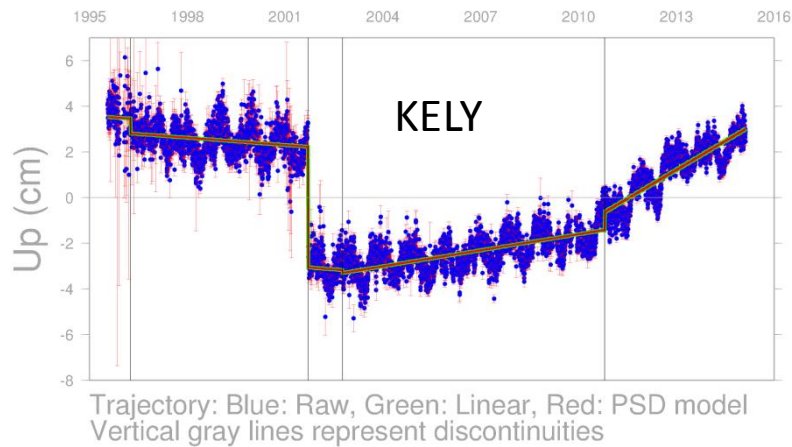


## ■ Accélération ?

- Rignot et al. (2011) – glaciologie et niveau des mers
- Matsuo et al. (2013) – gravimétrie et altimétrie spatiales
- Vélécogna et al. (2014) – gravimétrie spatiale

# STATIONS GPS AU GROENLAND

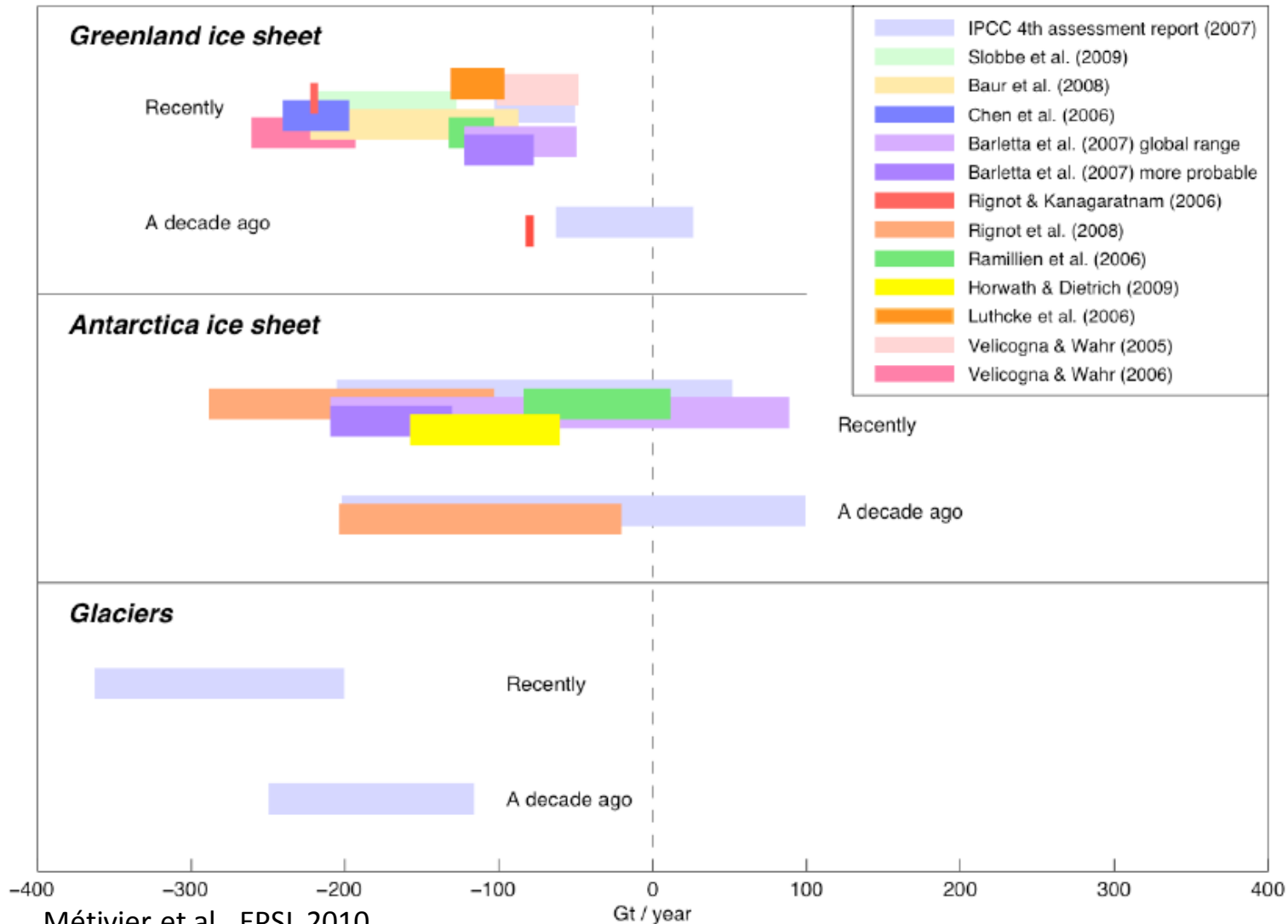
## ■ Exemples de station de l'ITRF2014 :



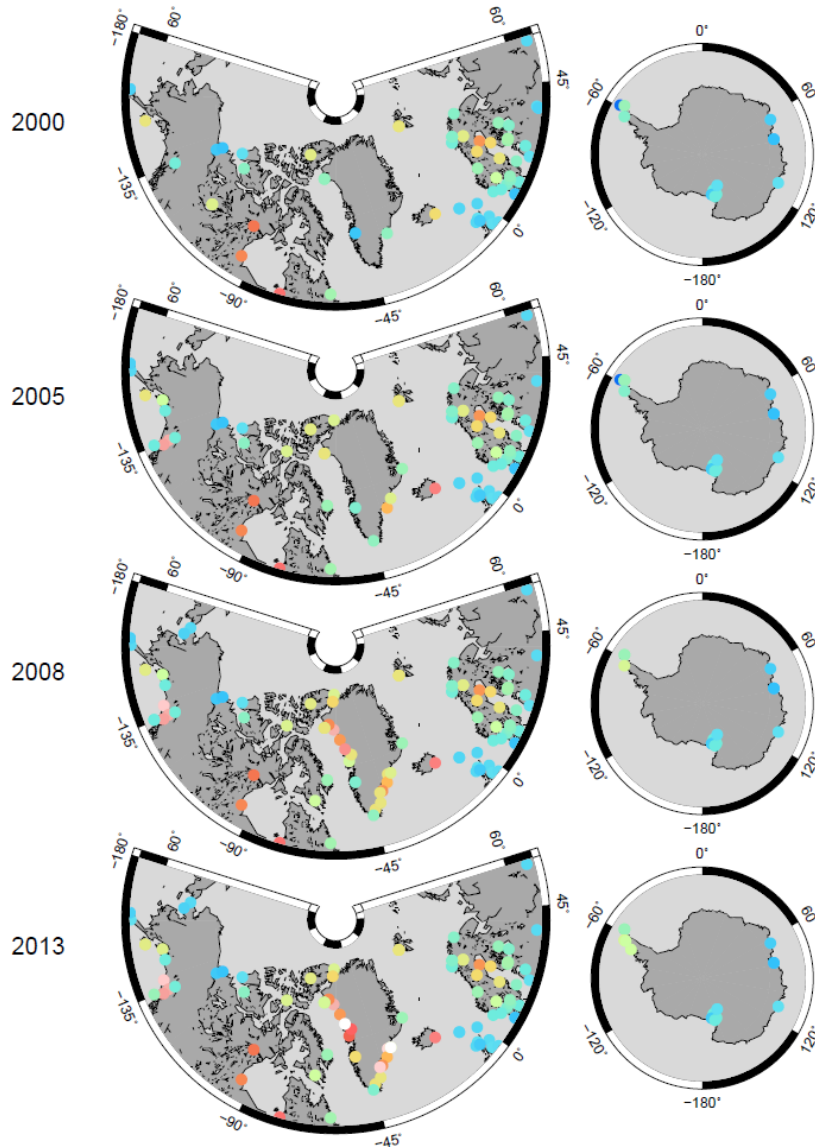
- Vitesses multiples pour les stations les plus vieilles.
- La majorité des stations GPS au Groenland ont moins de 5-10 ans.



# BILAN ACTUEL DES MASSES DE GLACE



# L'ITRF2014 AU NIVEAU DES CALOTTES POLAIRES



Evolution temporelle du réseau et des vitesses verticales