



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE



EXPLOITATION SCIENTIFIQUE DES VITESSES VERTICALES DE L'ITRF2014

Laurent Métivier

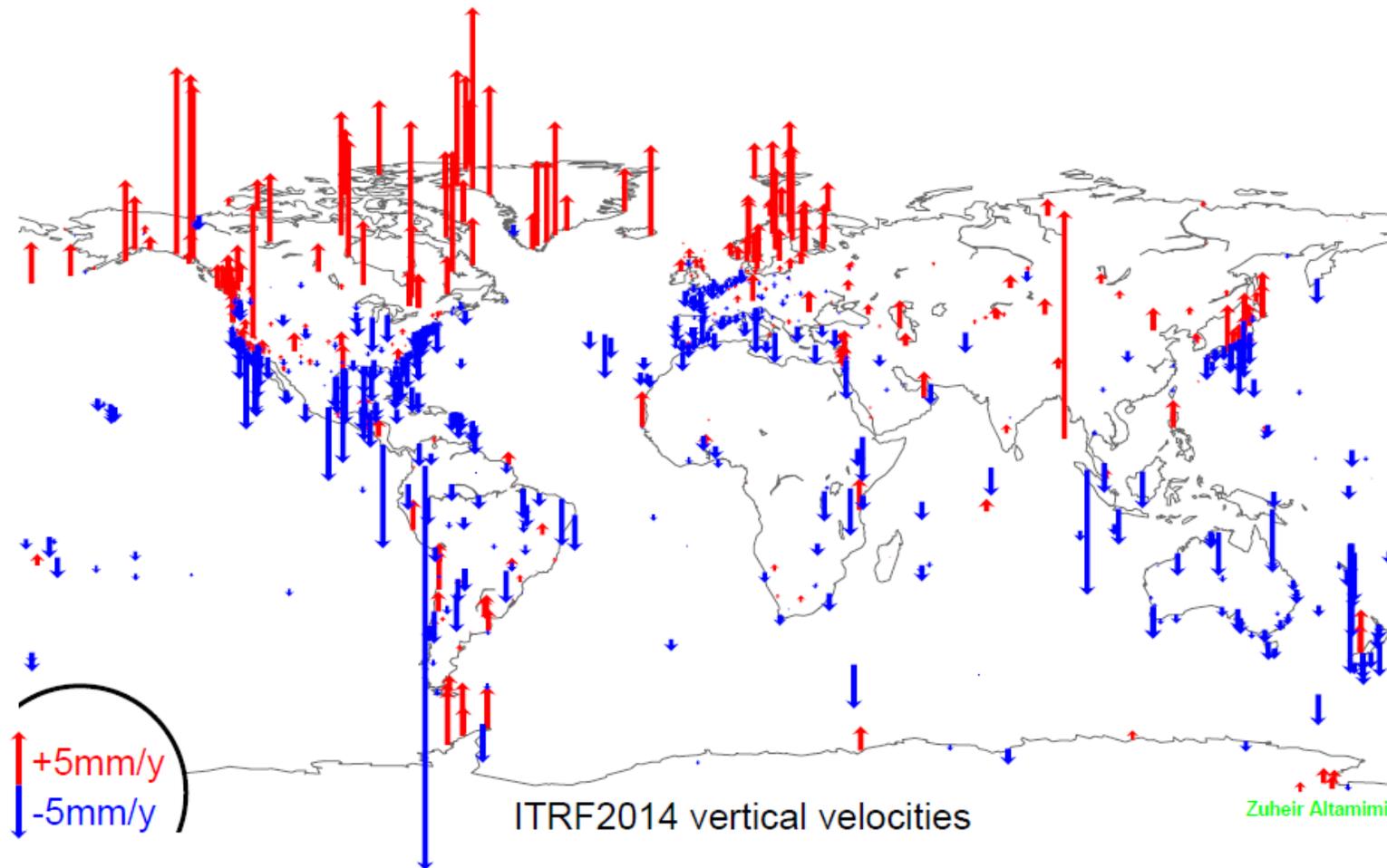
Participation de : Hélène Rouby , Paul Rebischung et Zuheir Altamimi
IGN/LAREG



PLAN

- 1. Introduction : les vitesses verticales ITRF2014.**
- 2. Contexte géophysique.**
- 3. Evaluation de l'ITRF : le rebond postglaciaire comme évaluateur géophysique.**
- 4. Valorisation scientifique de l'ITRF2014 : les variations de figure de la Terre. Quelles informations sur les processus s'opérant sur Terre ? Une signature propre à l'ITRF2014.**
- 5. Conclusions.**

ITRF2014 - VITESSES VERTICALES



VITESSES VERTICALES « LONG TERMES »

Vitesses verticales de l'ITRF2014, périodes d'analyse :

VLBI : 1980 – 2015,
GPS : 1994 – 2015,

SLR : 1983 – 2015,
DORIS : 1993 – 2015.

Sources potentielles de vitesses verticales :

■ Rebond postglaciaire

Réajustement viscoélastique du sol suite à la dernière déglaciation.
(Canada, Scandinavie, Antarctique, Groenland, ...)

■ Changements climatiques

Réponse de la Terre solide à la fonte des glaces/montée du niveau des mers

■ Déformations tectoniques



petites en verticale

■ Déformations co- et post-sismiques

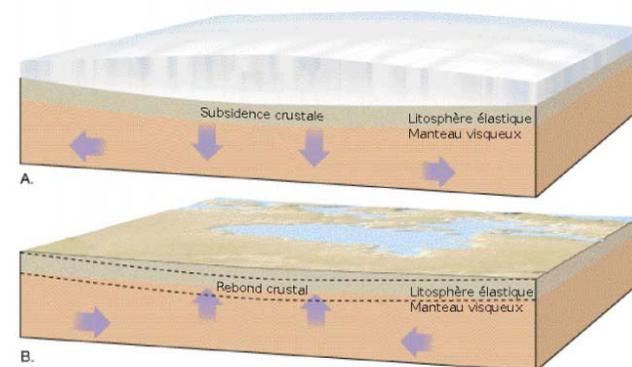


« corrigées » dans l'ITRF2014

■ Sources anthropogéniques (pompage des nappes, barrages, etc...)



déformations locales

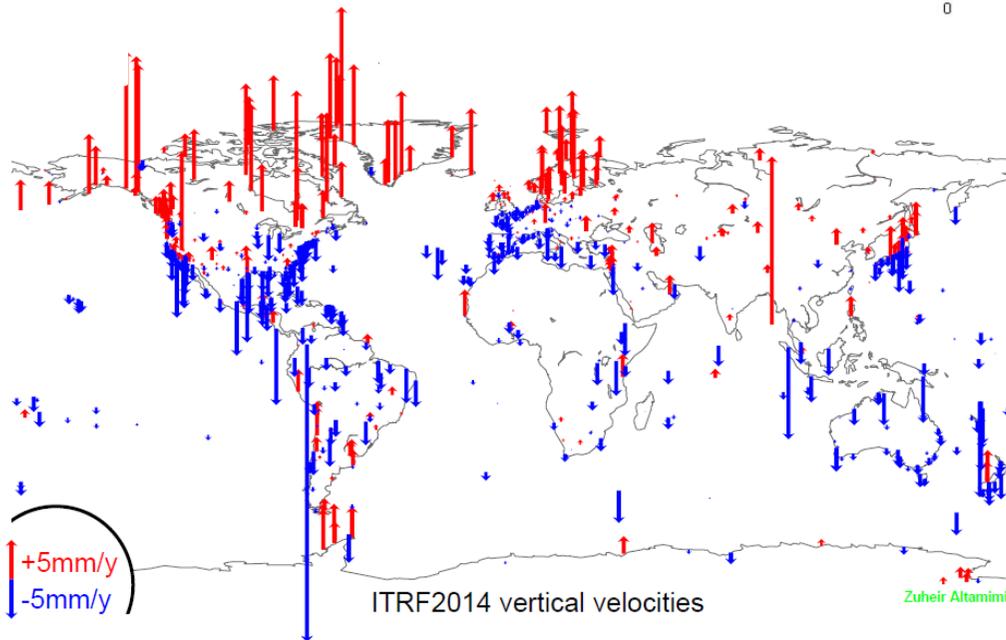
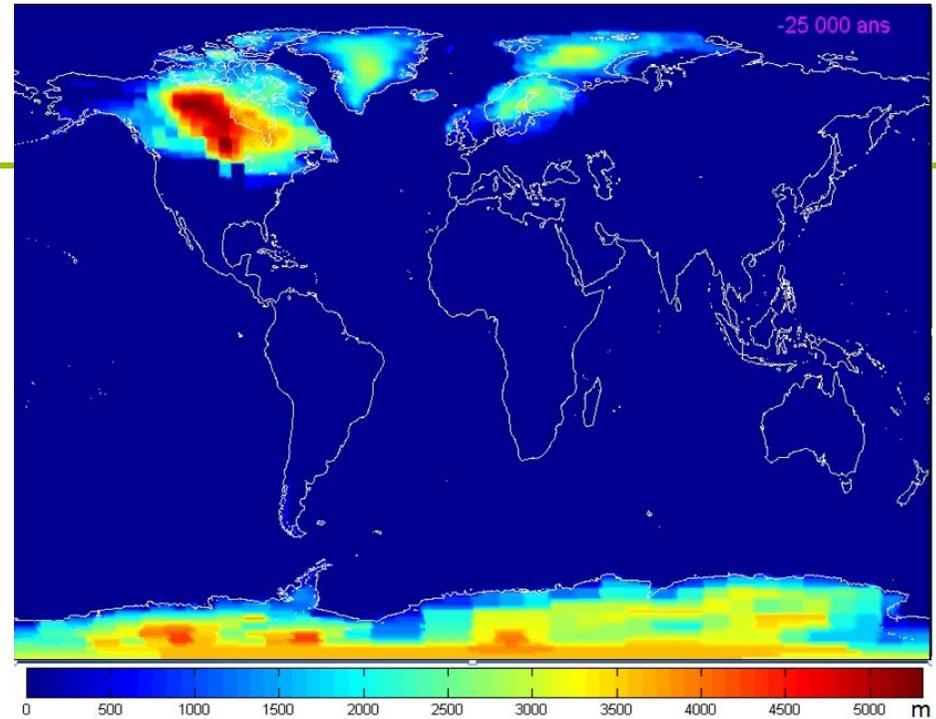


CONTEXTE GÉOPHYSIQUE

REBOND POSTGLACIAIRE

- Réajustement viscoélastique lent du sol induit par la dernière déglaciation

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



- Principale source de mouvements verticaux long-terms :

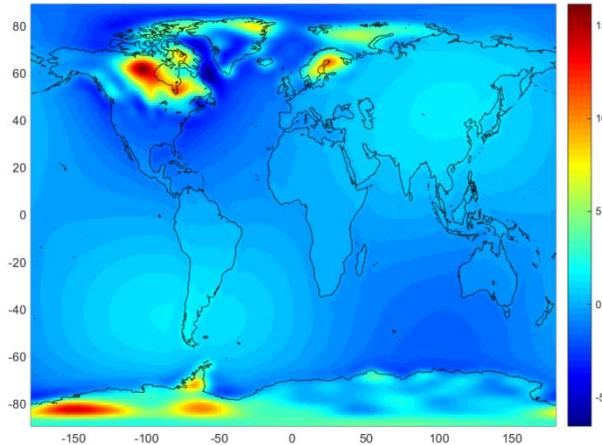
- Vitesses jusqu'à 15-20 mm/an
- Localisation principale : Canada, Scandinavie, Antarctique, Groenland
- Ajustement concomitant du niveau des mers

MODÉLISATION DU REBOND POSTGLACIAIRE

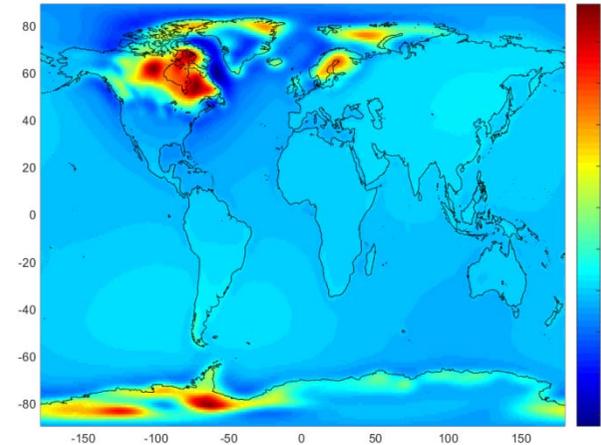
- **Un modèle souvent considéré comme « référence » : ICE5G (Peltier, 2004). ICE6G sa mise à jour récente (Peltier et al., 2015) ?**
- **Remises en cause majeures du modèle ICE5G (VM2)**
 - Trop de glace en Laurentide ouest, pas assez à l'est
 - Trop de glace en Antarctique (Whitehouse 2012)
 - Rotational feedback 7 fois trop grands (Chambers et al., 2010 ; Métivier et al., 2012)
 - Vitesses tangentielles incohérentes (Argus & Peltier, 2010)
- **Difficultés de la modélisation :**
 - Imbrication des réponses géophysiques, astronomiques et climatiques :
 - déformations viscoélastiques de la Terre solide,
 - variations du champ de pesanteur,
 - variations du niveaux de mers et déformations de surcharge,
 - perturbation de l'axe de rotation et réajustement viscoélastique du bourrelet équatorial (Rotational feedback),
 - mouvements du géocentre
 - Des inconnues intrinsèques majeures :
 - historique des niveaux de glace,
 - propriétés rhéologiques (viscosité) de la Terre.

DIFFÉRENTS MODÈLES DE REBOND POSTGLACIAIRE

ICE5G



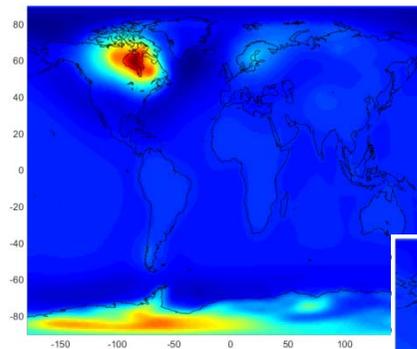
ICE6G



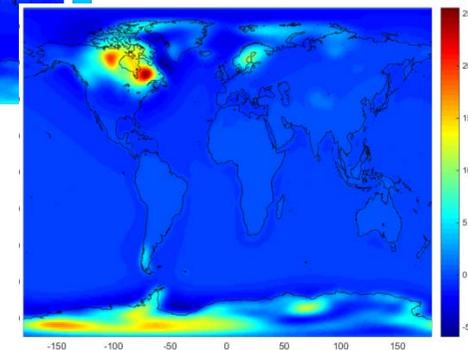
■ **Modèles alternatifs avec re-détermination des niveaux de glace :**

- Globaux : ANU (Lambeck et al., 2014)
- Locaux : BIFROST (Scandinavie), Ivins & James, Whitehouse (Antarctique)

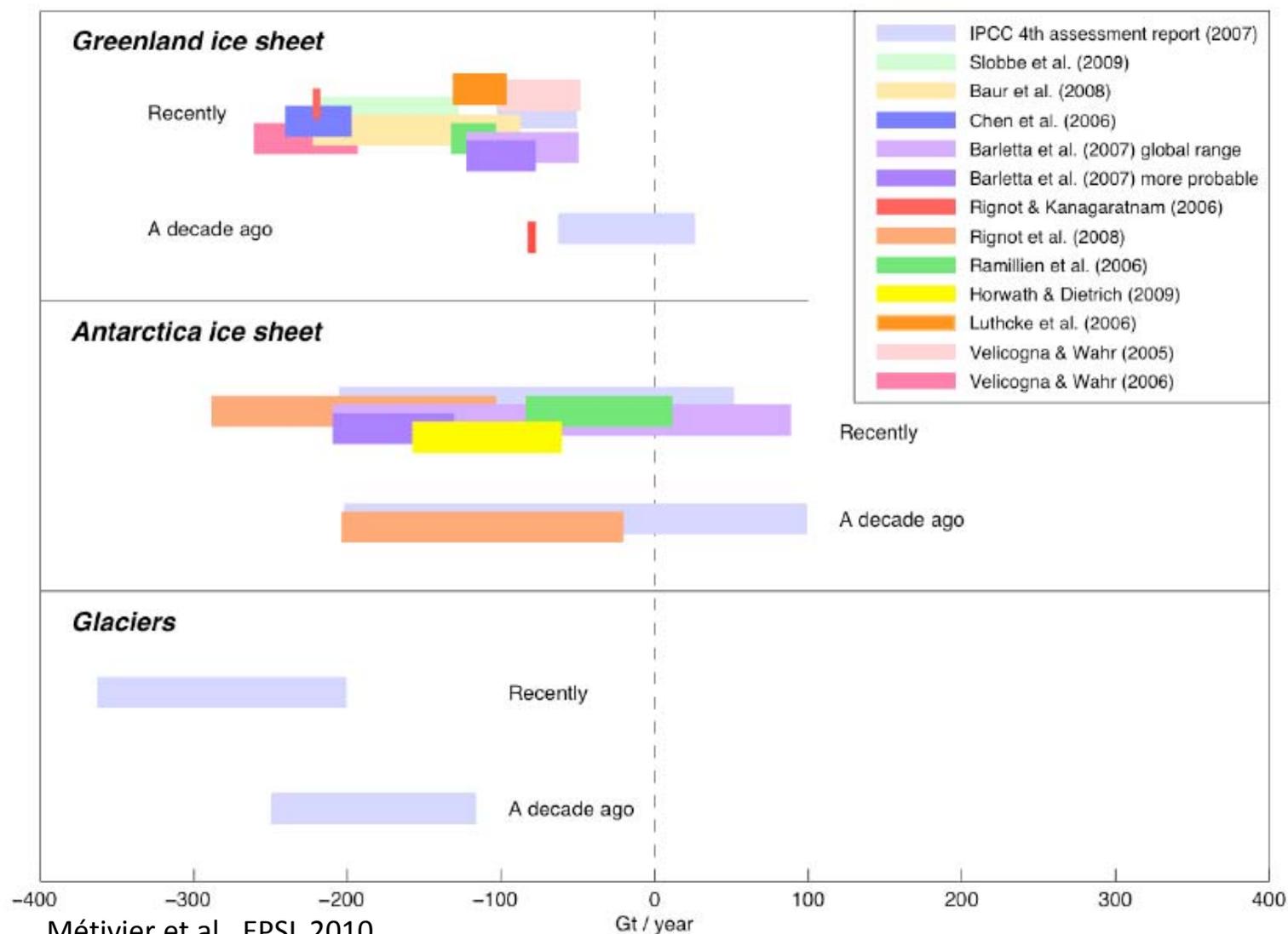
ANU – V3



ANU – V2



BILAN ACTUEL DES MASSES DE GLACE

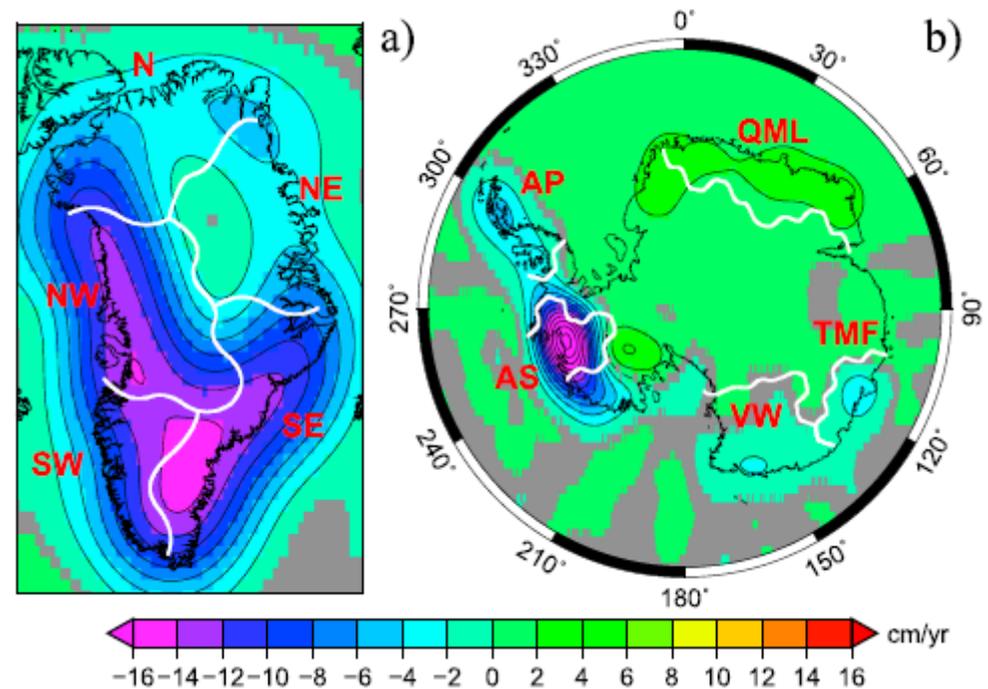


FONTE DES GLACES ACTUELLE

■ 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.



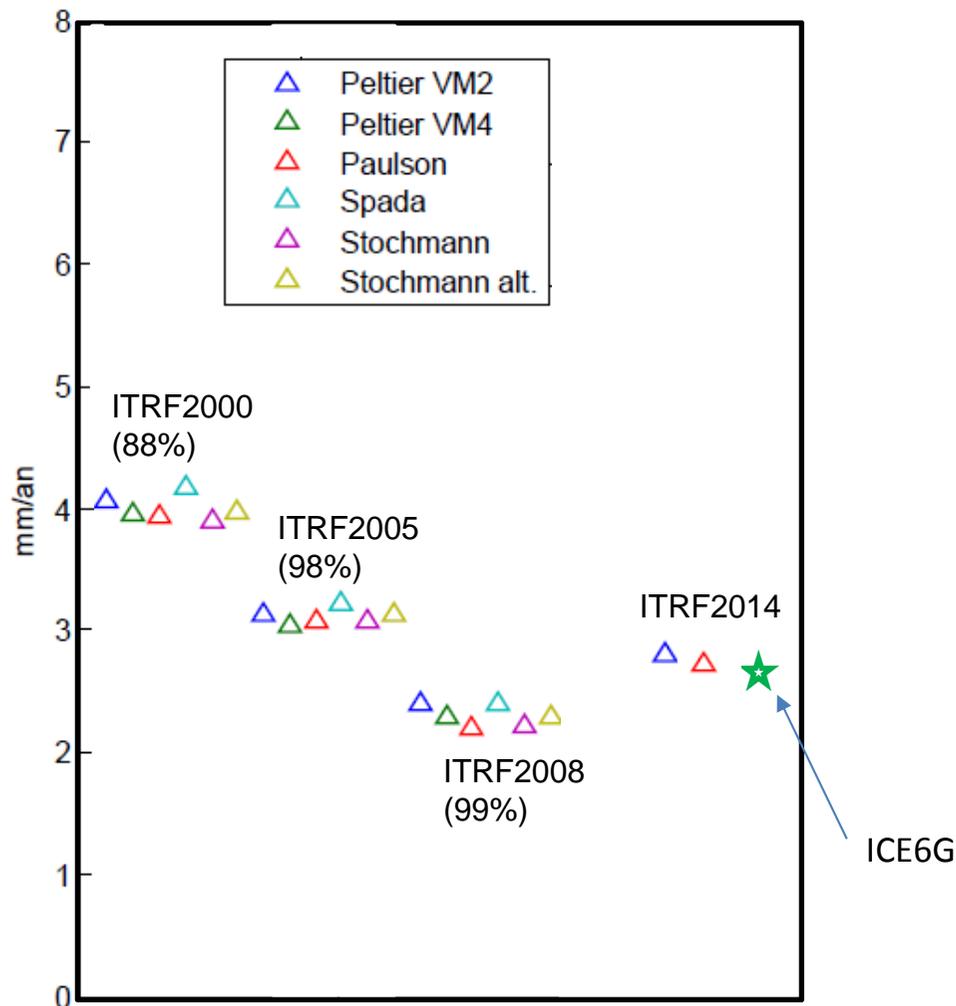
■ Accélération ?

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

LE REBOND POSTGLACIAIRE COMME ÉVALUATEUR GÉOPHYSIQUE DE L'ITRF

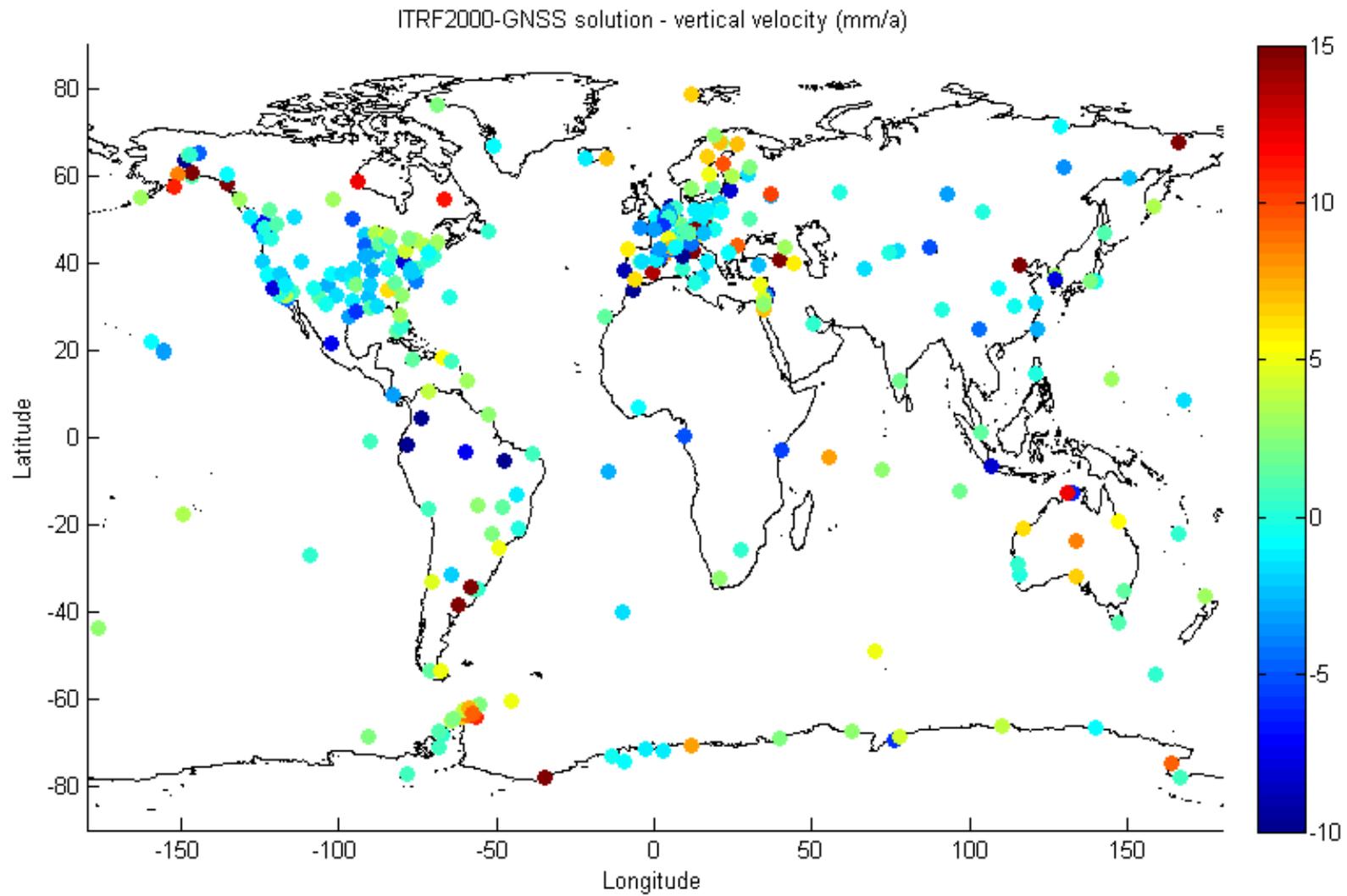
EVALUATION DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS ITRF

■ Le rebond postglaciaire comme évaluateur géophysique

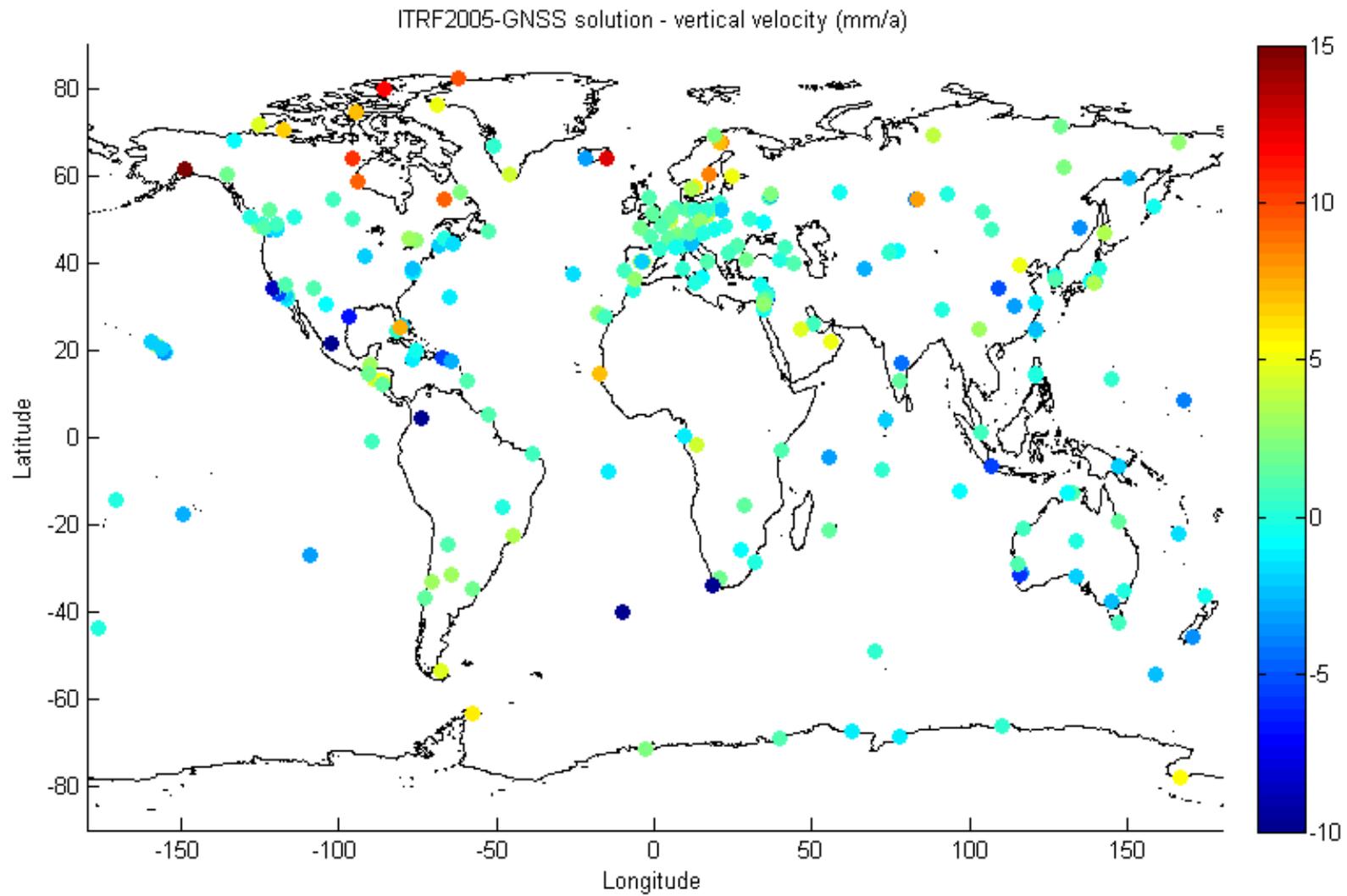


- Etude de différents modèles de rebond postglaciaire (en général basés sur ICE5G).
- Interpolation des modèles sur les réseaux GPS ITRF2000, ITRF2005 et ITRF2008 (stations avec au moins 1cm/an de précision sur les vitesses et sans post-sismique avéré).
- Calcul du RMS global pour chaque modèle avec les vraies vitesses estimées

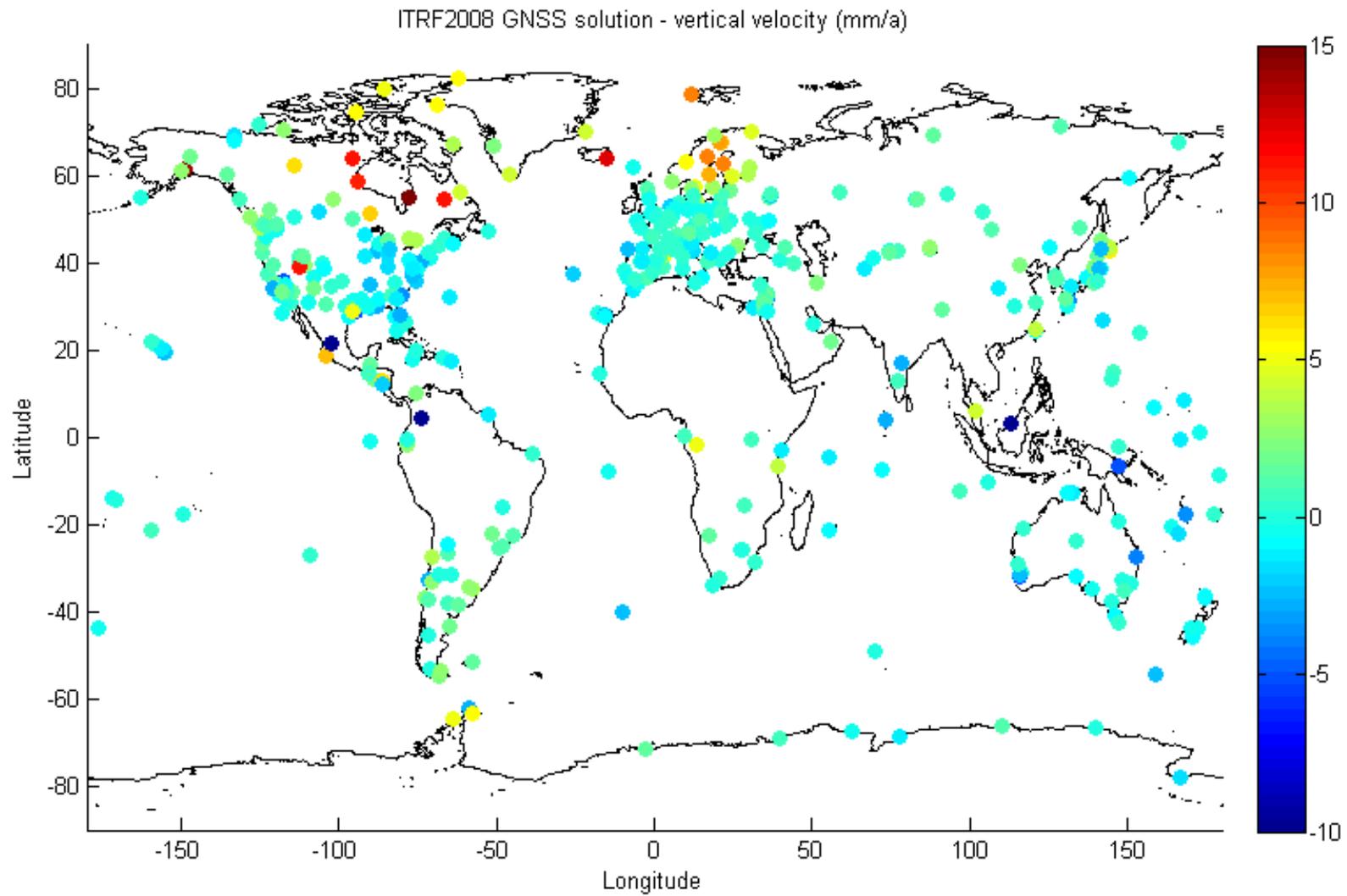
ITRF2000 – GPS VITESSES VERTICALES



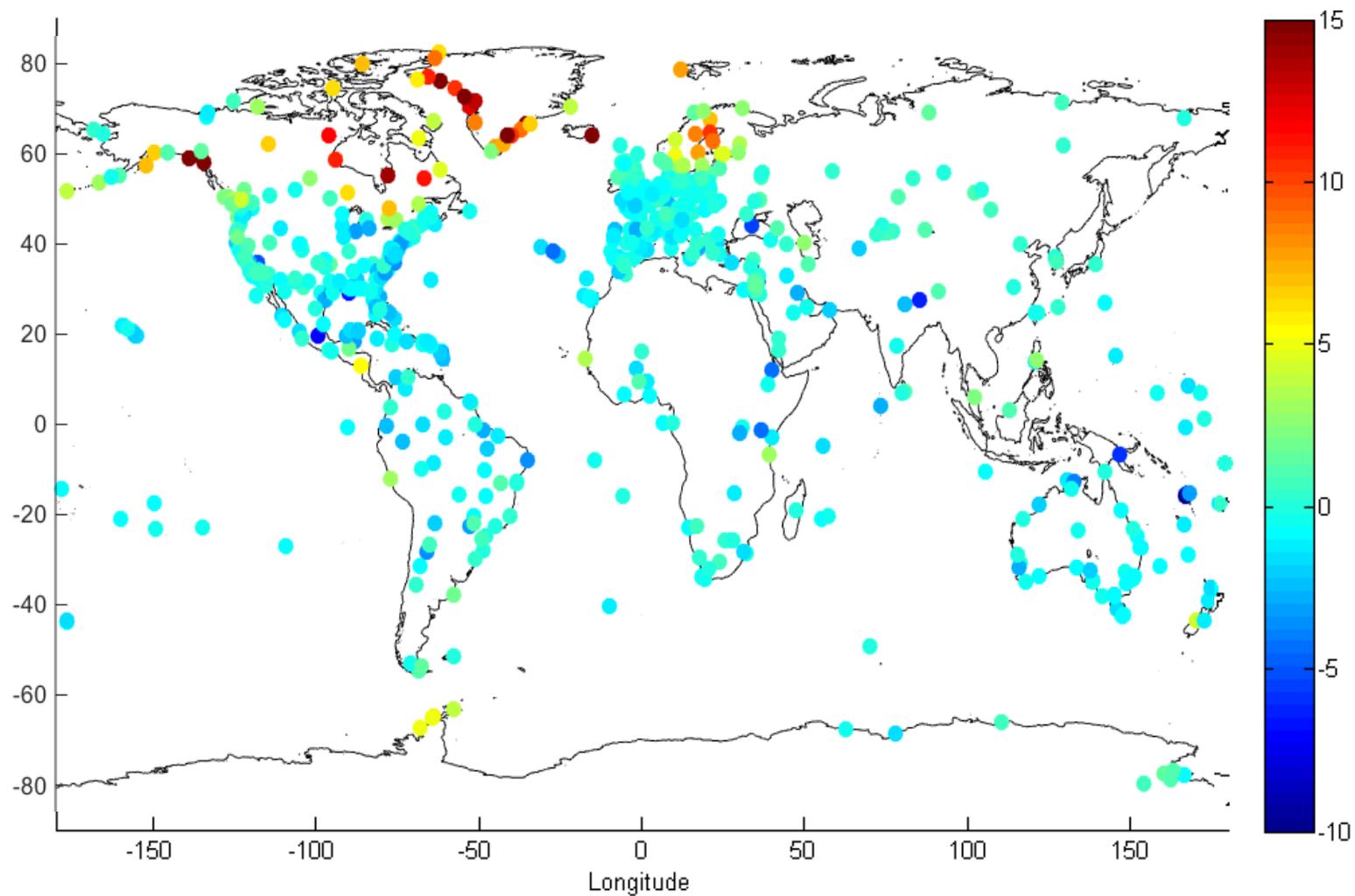
ITRF2005 – GPS VITESSES VERTICALES



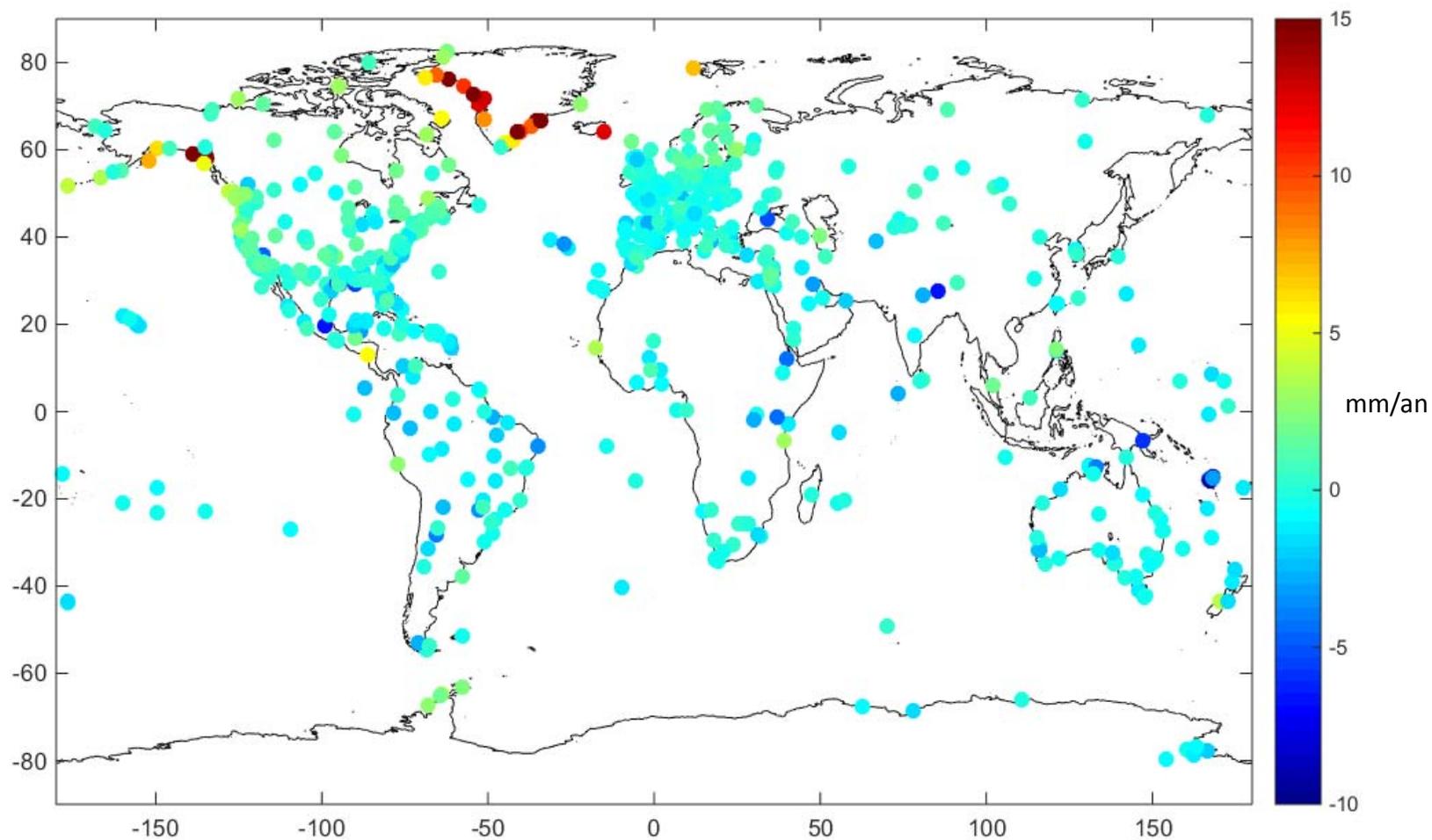
ITRF2008 – GPS VITESSES VERTICALES



ITRF2014 – GPS VITESSES VERTICALES (EN 2013)



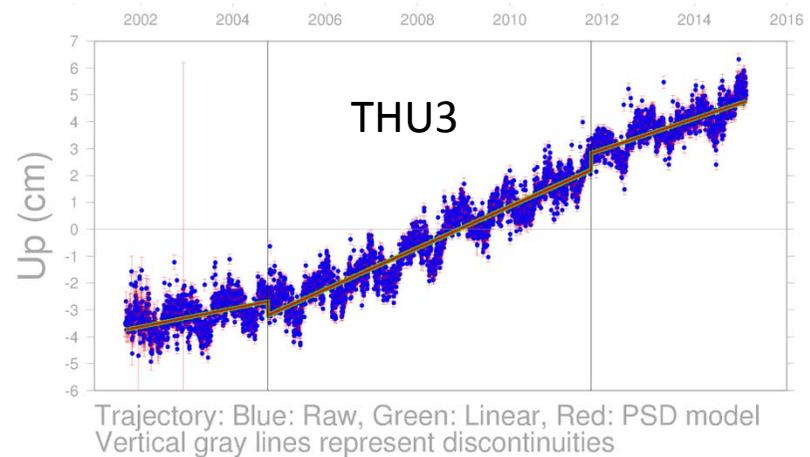
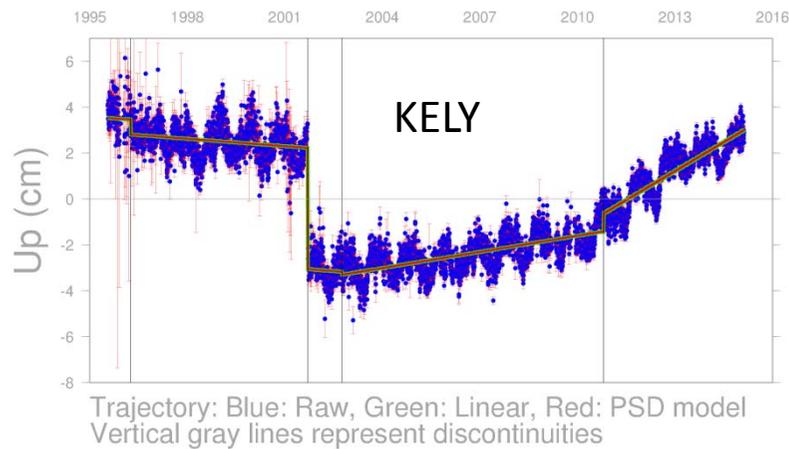
DIFFÉRENCES ITRF2014 - ICE6G



LES VARIATIONS DE FIGURE DE LA TERRE

STATIONS GPS AU GROENLAND

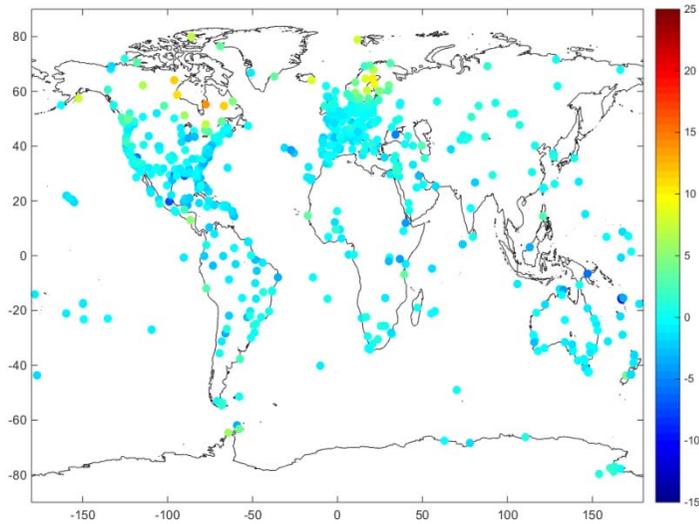
- Exemples de station de l'ITRF2014 :



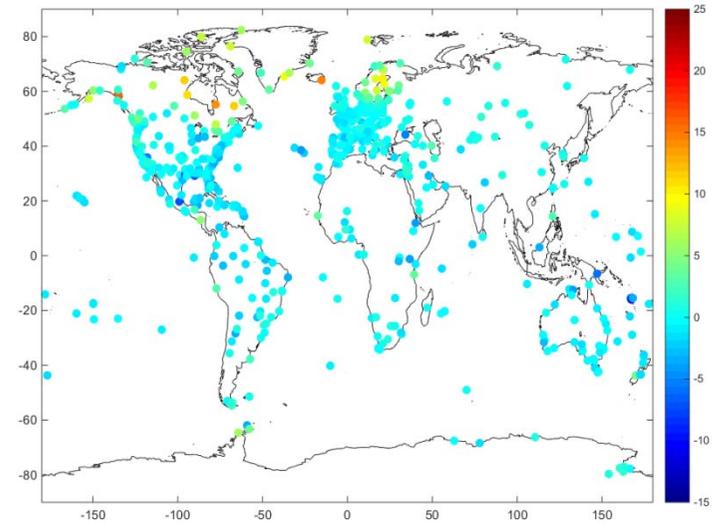
- Vitesses multiples pour les stations les plus vieilles.
- La majorité des stations GPS au Groenland ont moins de 5-10 ans.

EVOLUTION TEMPORELLE DES VITESSES VERTICALES DANS L'ITRF2014

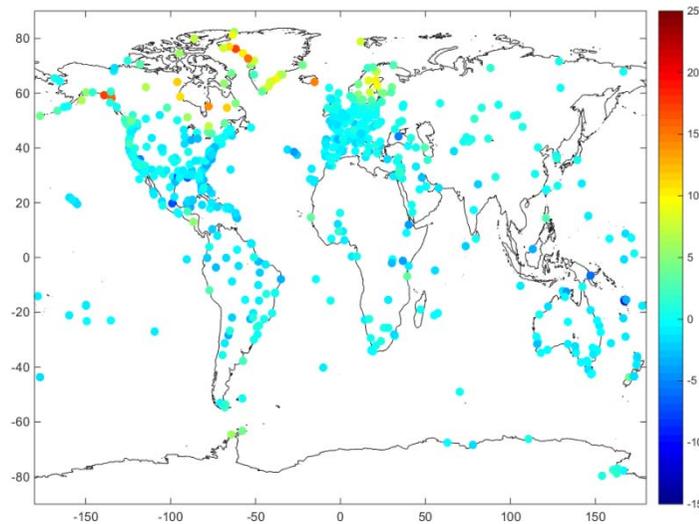
2000



2005



2008



2013

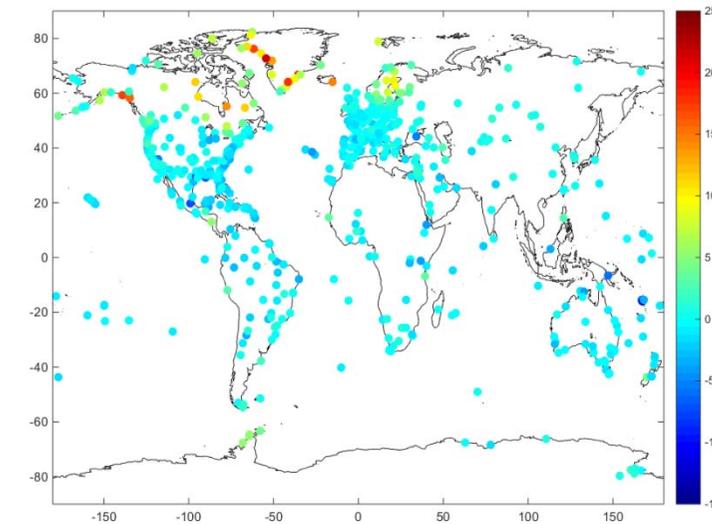


FIGURE DE LA TERRE

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)

(θ, λ) Colatitude, Longitude

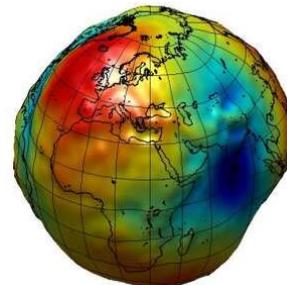
■ Coefficients HS de degrés 1 et 2 de figure de la Terre solide :

\dot{C}_{10}
 \dot{C}_{11} } Mouvement du géocentre selon l'axe $\left\{ \begin{array}{l} Z \\ X \\ Y \end{array} \right.$
 \dot{S}_{11}

\dot{C}_{20} → Ellipticité

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

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

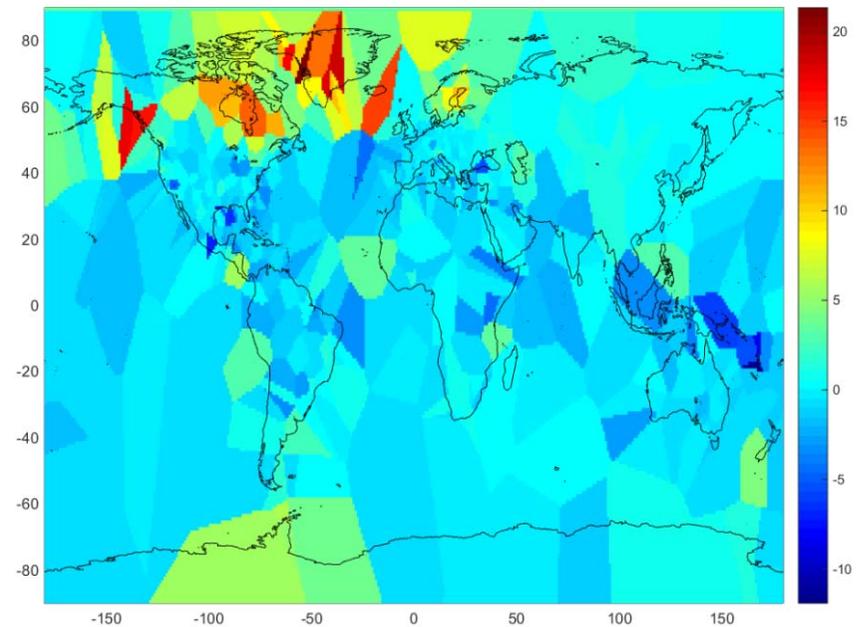


■ Ellipticité du géoïde (référence des altitudes) :

$$\dot{J}_2$$

MÉTHODES DE RÉOLUTION

- **Moindre carré :**
 - Comment minimiser le repli spectral ? Quel degré maximum ?
 - Déséquilibre de réseau
- **Transformée de Legendre sur diagramme de Voronoï :**
 - Réalisme de l'extension régionale ?
 - Déséquilibre du réseau
- **Comment évaluer de façon réaliste les erreurs et notamment les biais induits par l'hétérogénéité du réseau GPS ?**



Cellules de Voronoï sur les vitesses GPS - ITRF2014

EVALUATION DES MÉTHODES ET ESTIMATION DES BIAIS/ERREURS

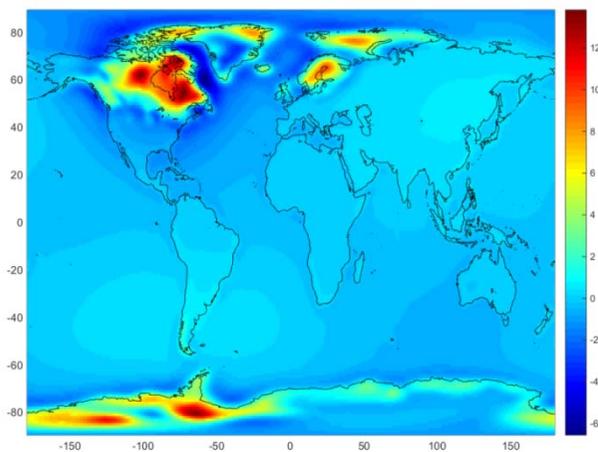
■ Construction de modèles synthétiques :

- Modèles de rebond postglaciaire :
ICE5G-PE, ICE5G-PA, ICE6G, ANU-V1, ..., ANU-V5
- Modèles de fonte des glaces actuelle :
Ensemble de modèles intégrant la dispersion des bilans de masse publiés.

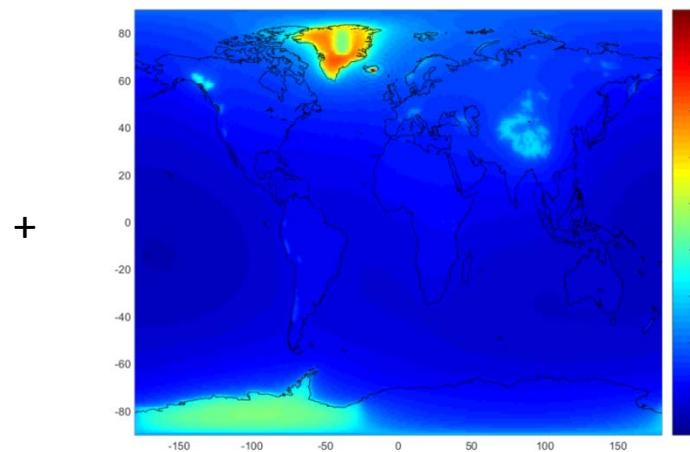
■ Près de 50 000 modèles synthétiques

Ex.

Rebond postglaciaire (ICE6G)

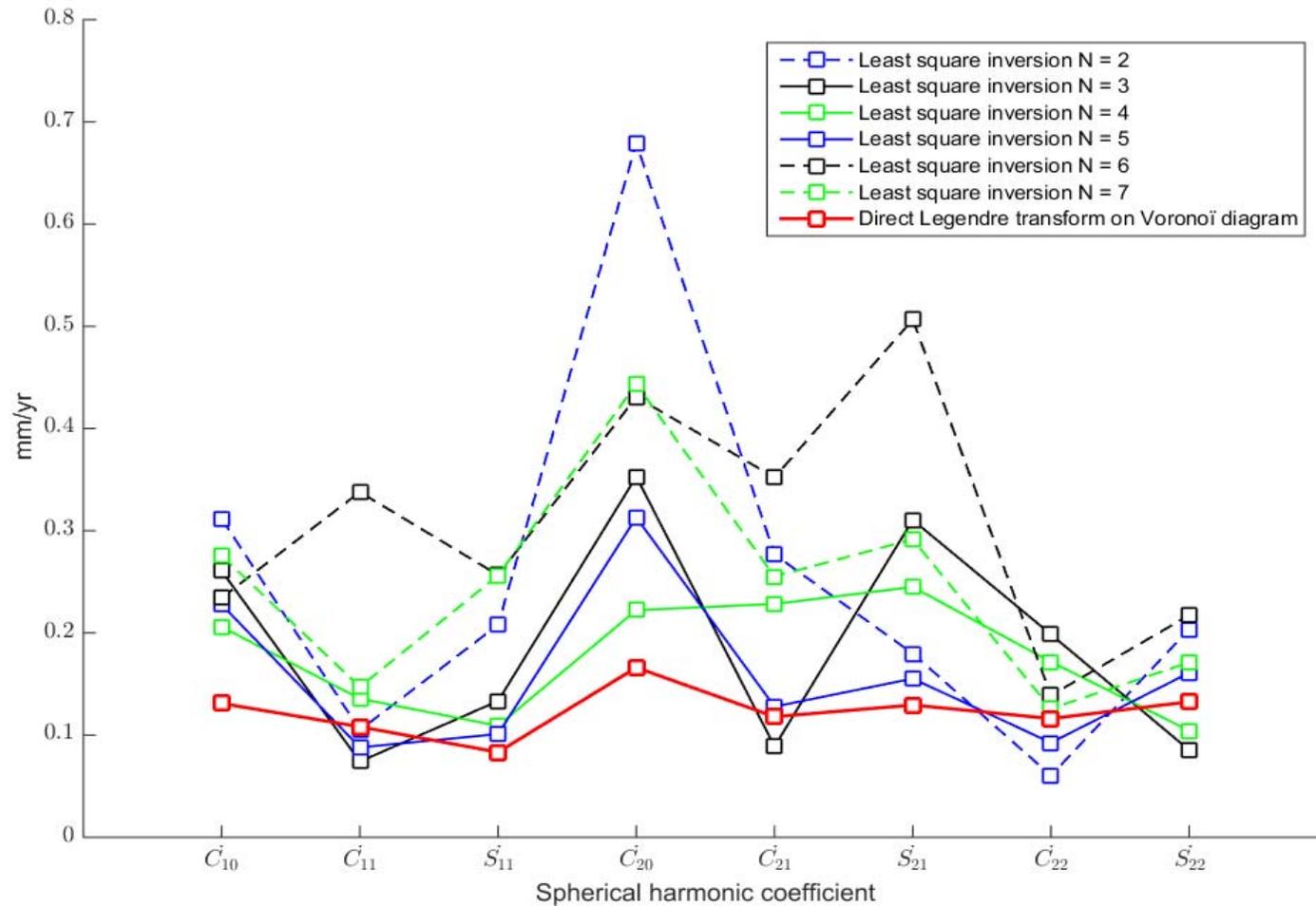


Fonte des glaces actuelle / niveaux des mers

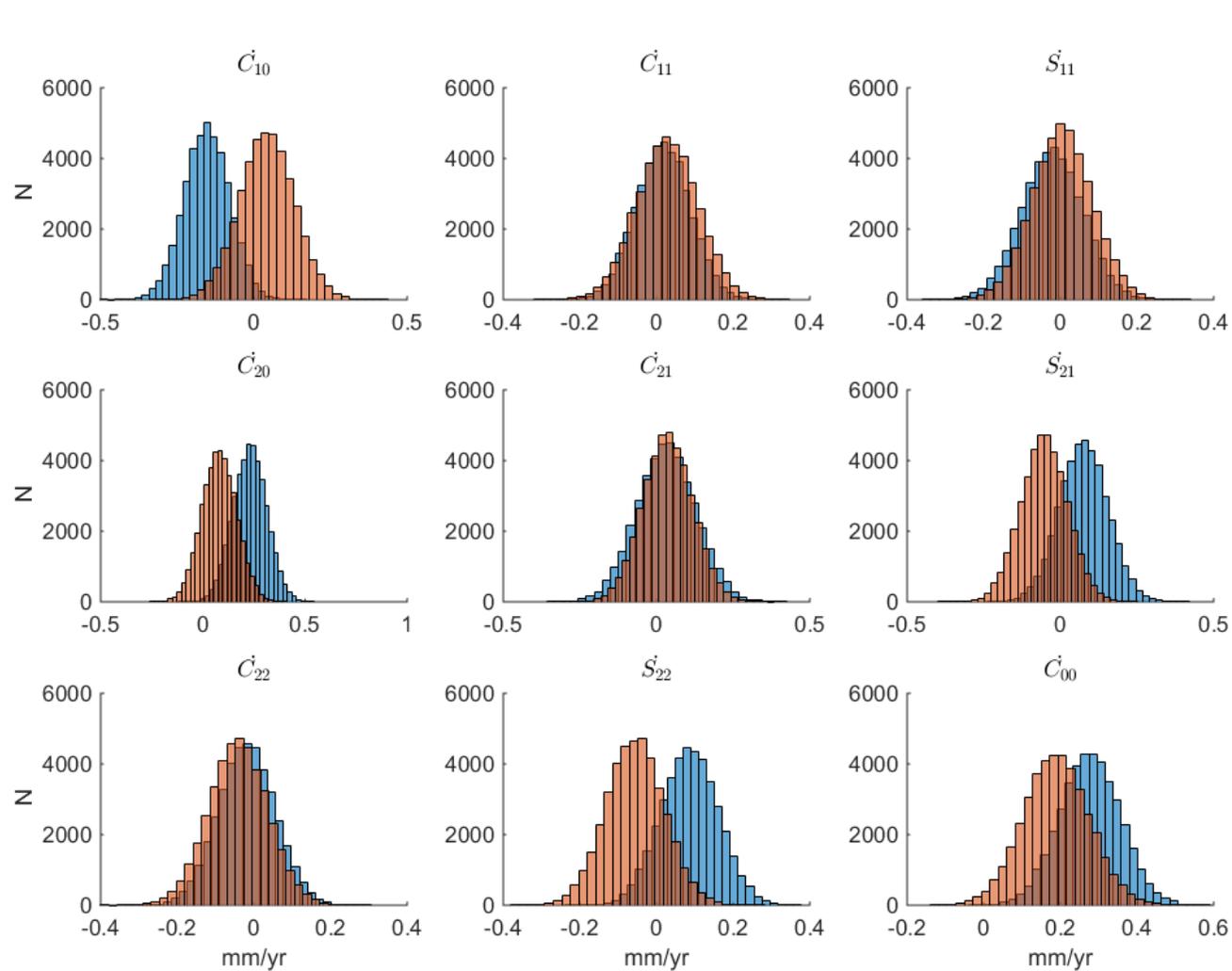


MINIMISATION DU REPLI SPECTRAL

RMS des résidus de calcul sur tous les modèles basés sur ICEG6 en 2013 :



BIAIS ET DISPERSIONS DES RÉSIDUS (EX. ICE6G)

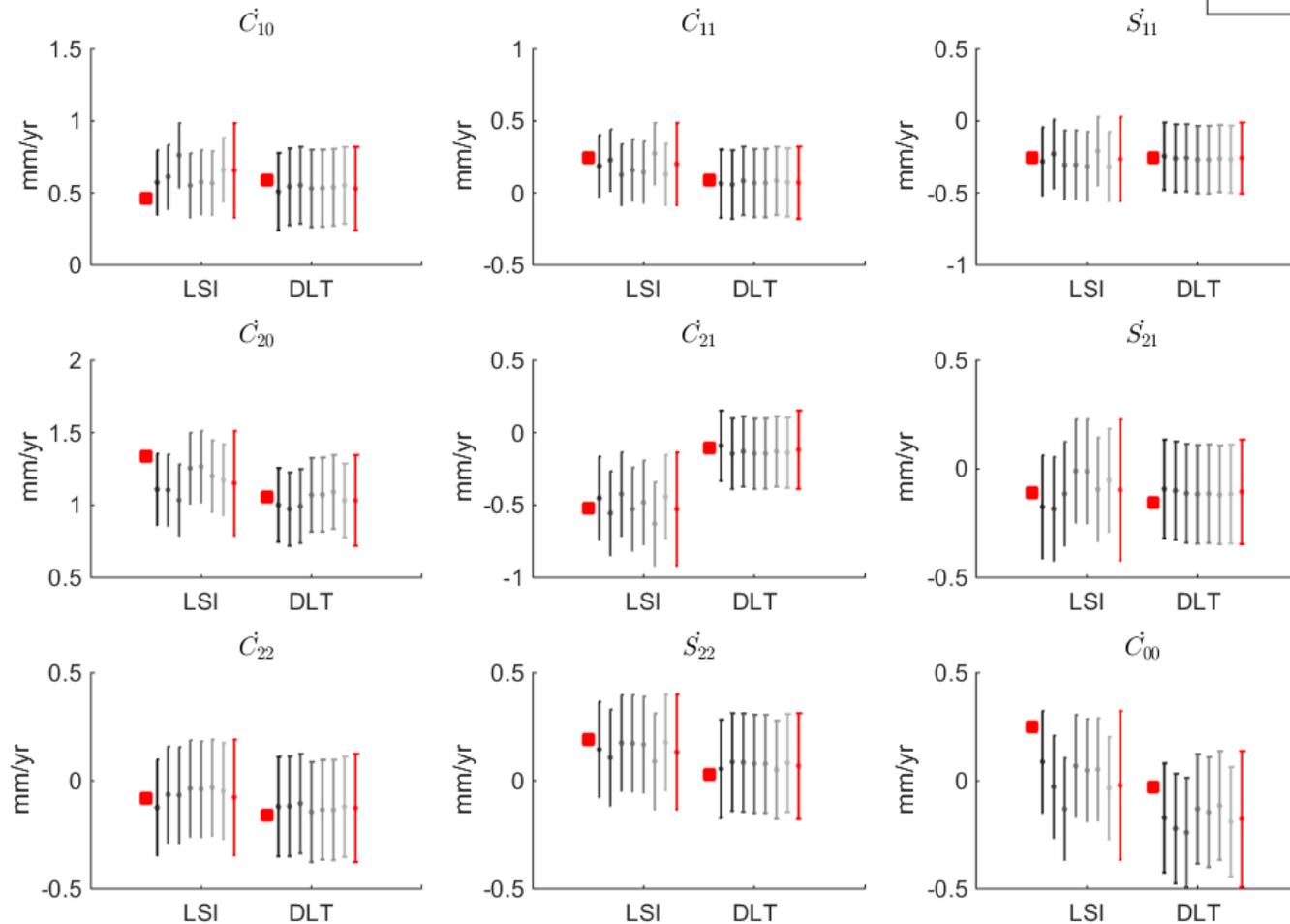


Bleu : Least Square
Inversion

Rouge : Direct
Legendre Transform

SOLUTIONS « DÉBIAISÉES »

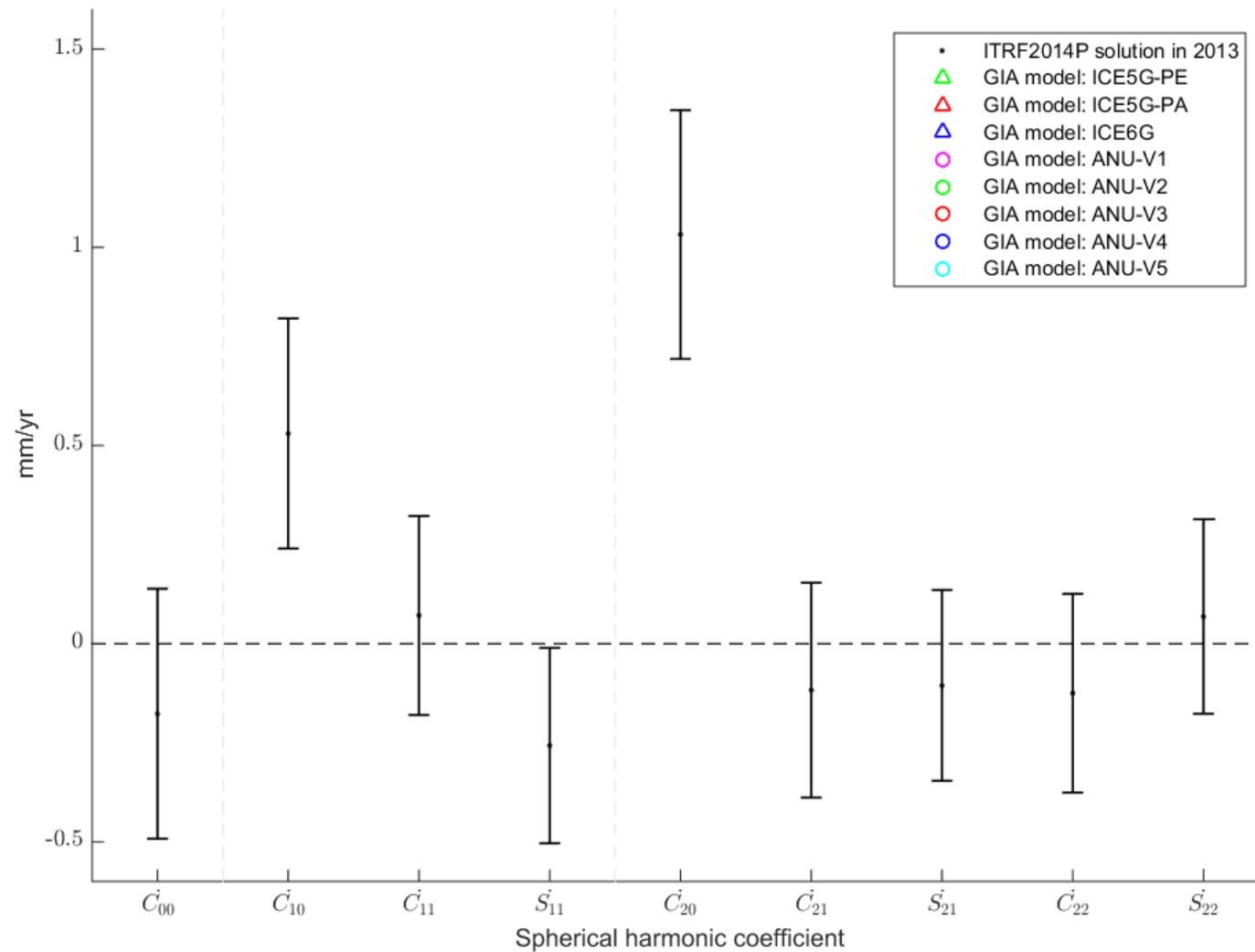
- ITRF2014 initial solution
- Unbiased solution assuming ICE5G-PA
- Unbiased solution assuming ICE6G
- Unbiased solution assuming ANU-1
- Unbiased solution assuming ANU-2
- Unbiased solution assuming ANU-3
- Unbiased solution assuming ANU-4
- Unbiased solution assuming ANU-5
- Final ITRF2014 unbiased solution



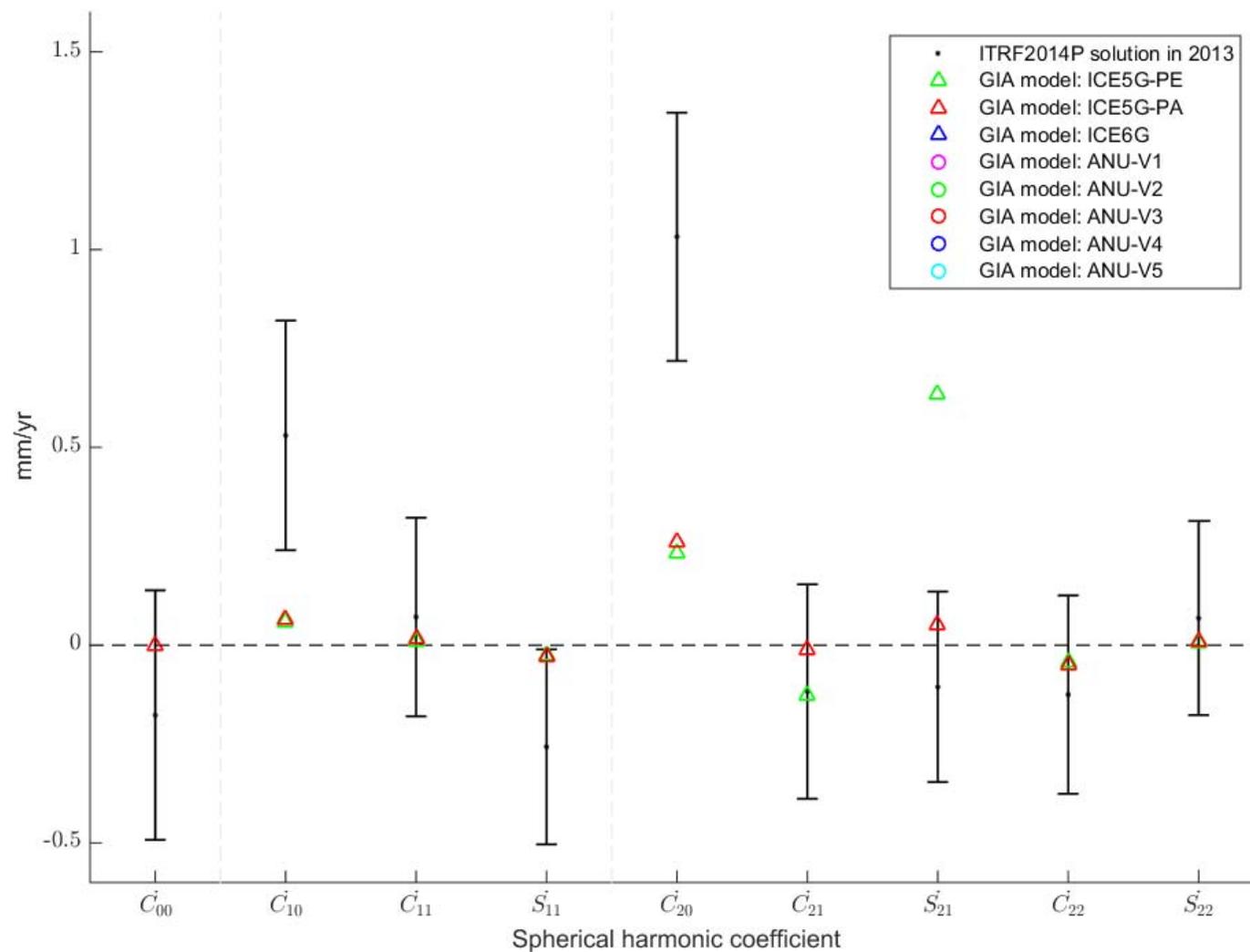
LSI : Least Square
Inversion

DLT : Direct Legendre
Transform

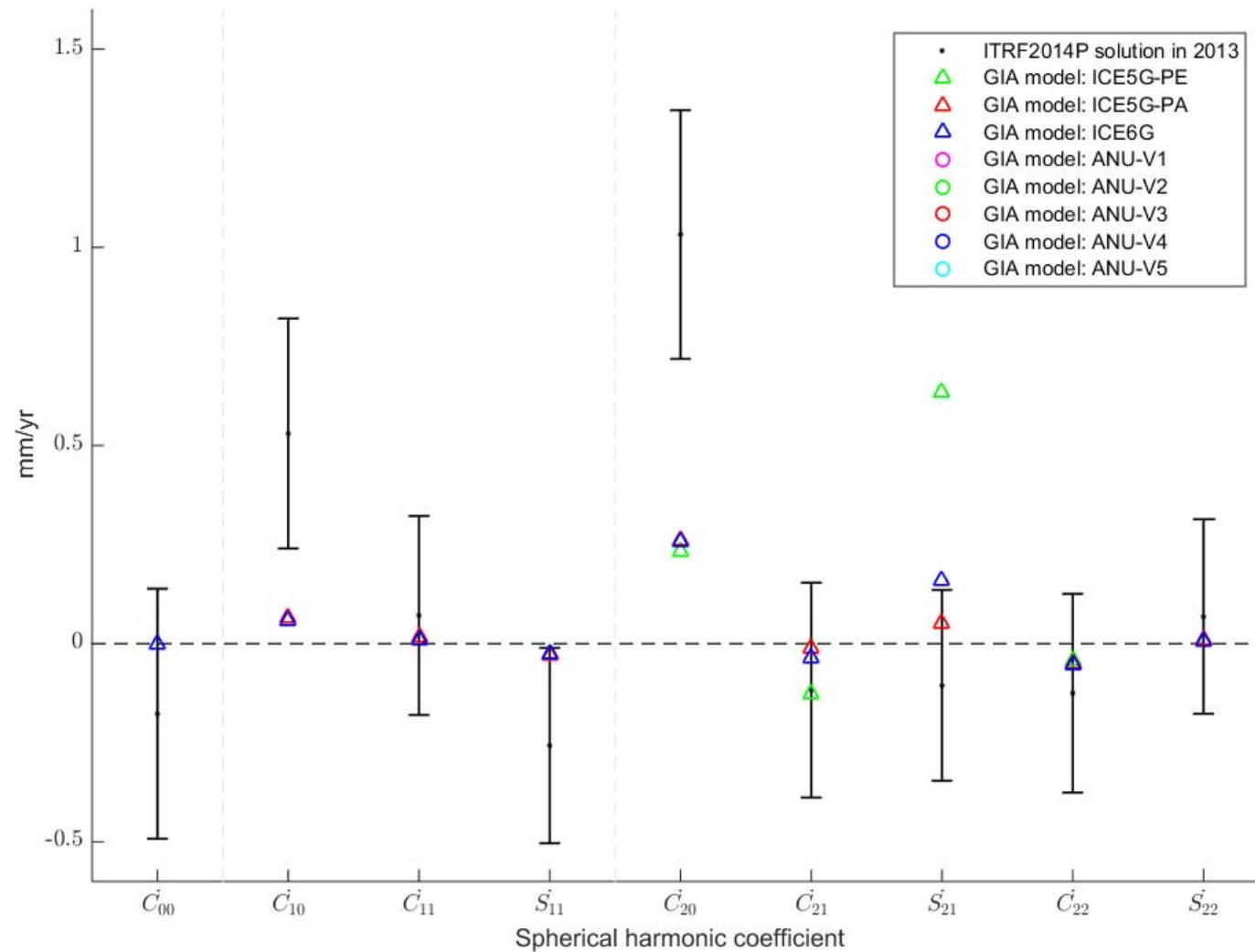
RÉSULTATS - 2013



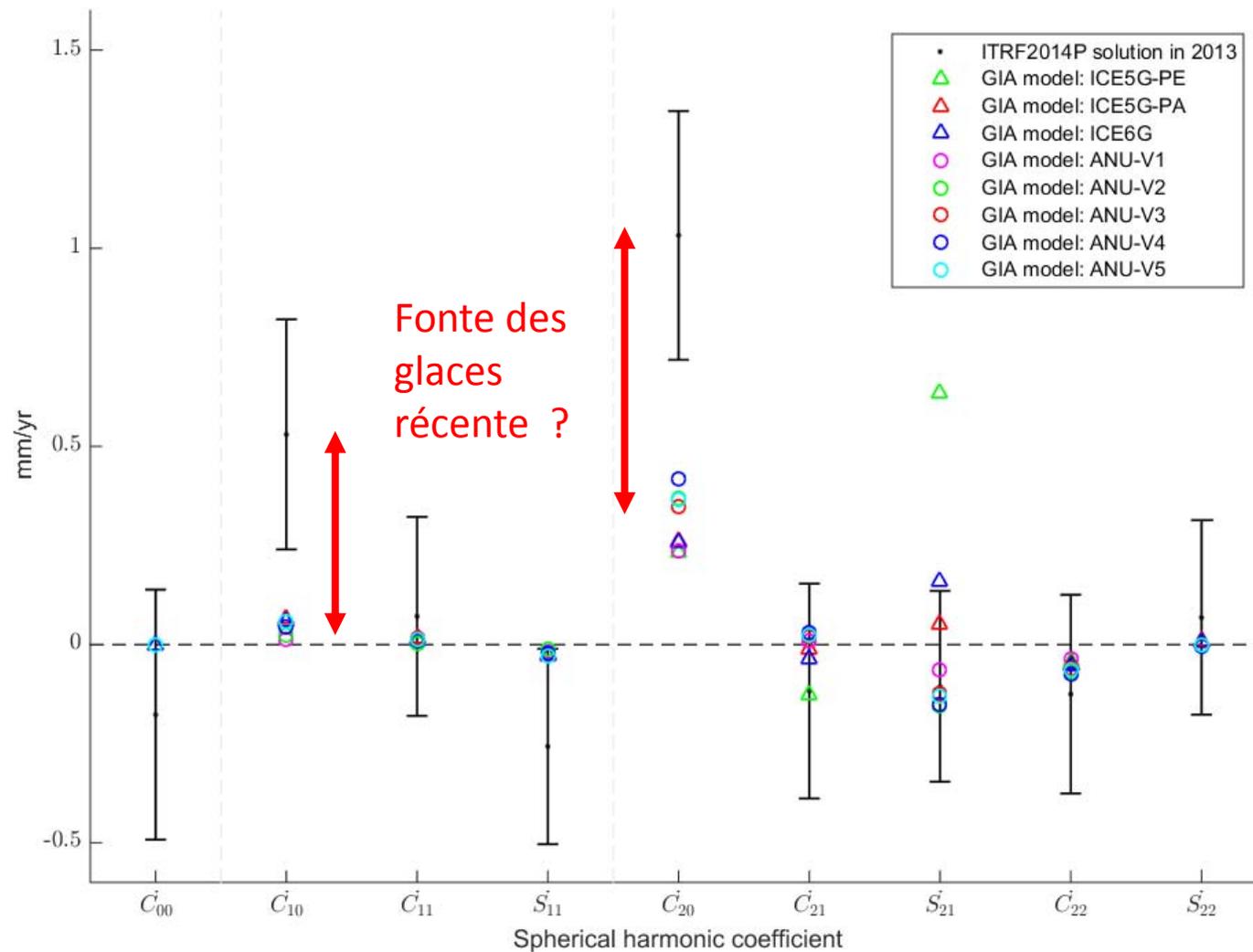
RÉSULTATS - 2013



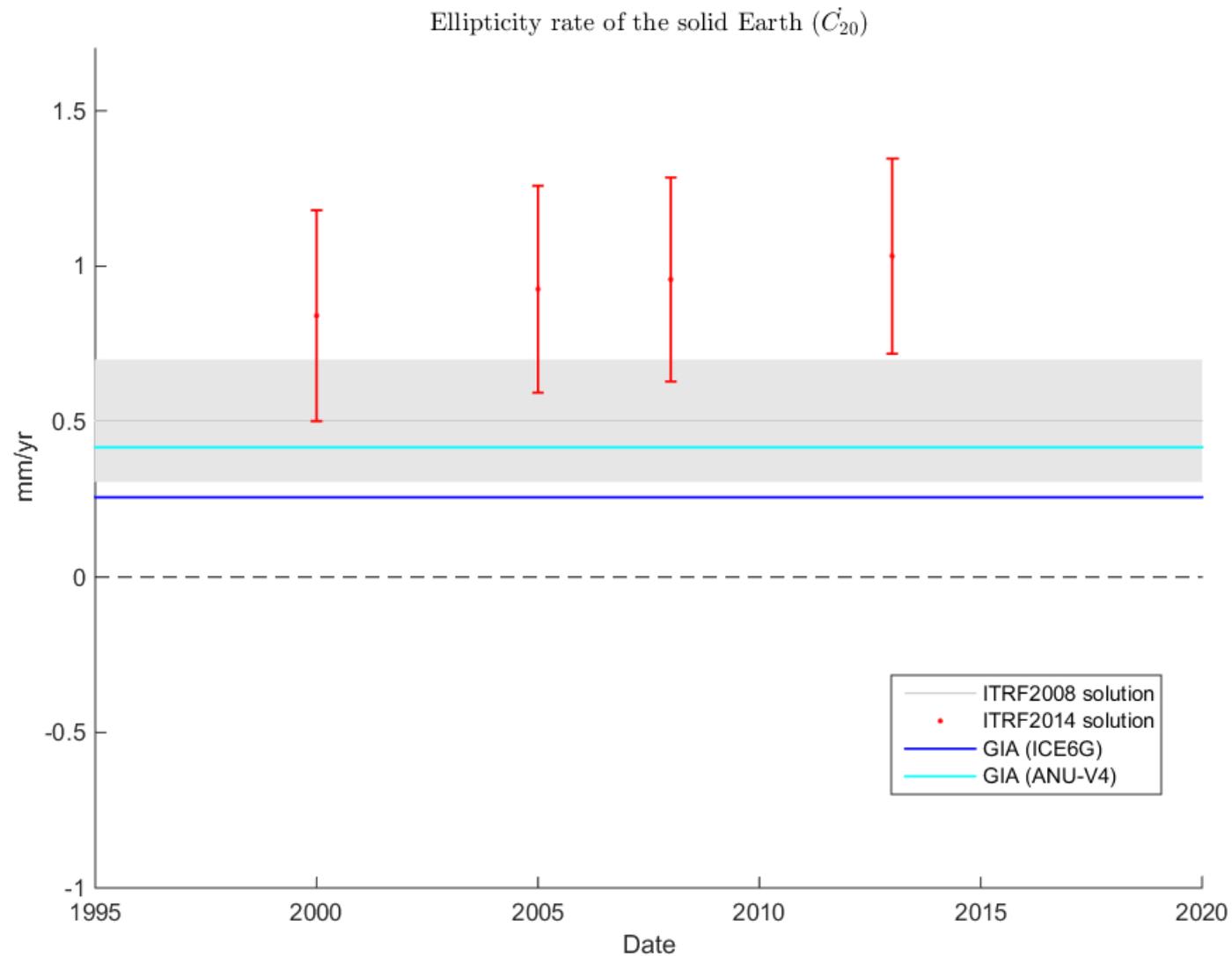
RÉSULTATS - 2013



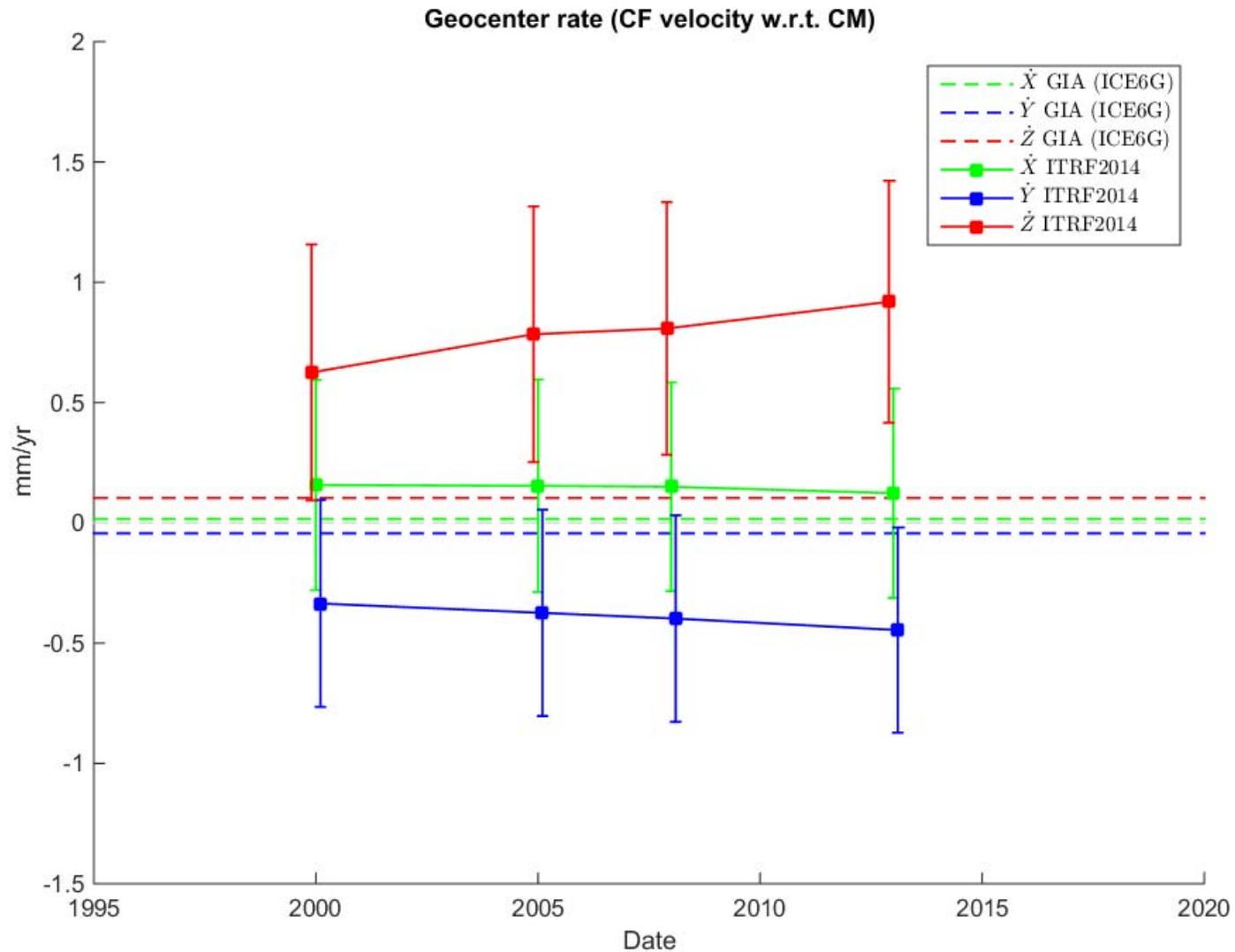
RÉSULTATS - 2013



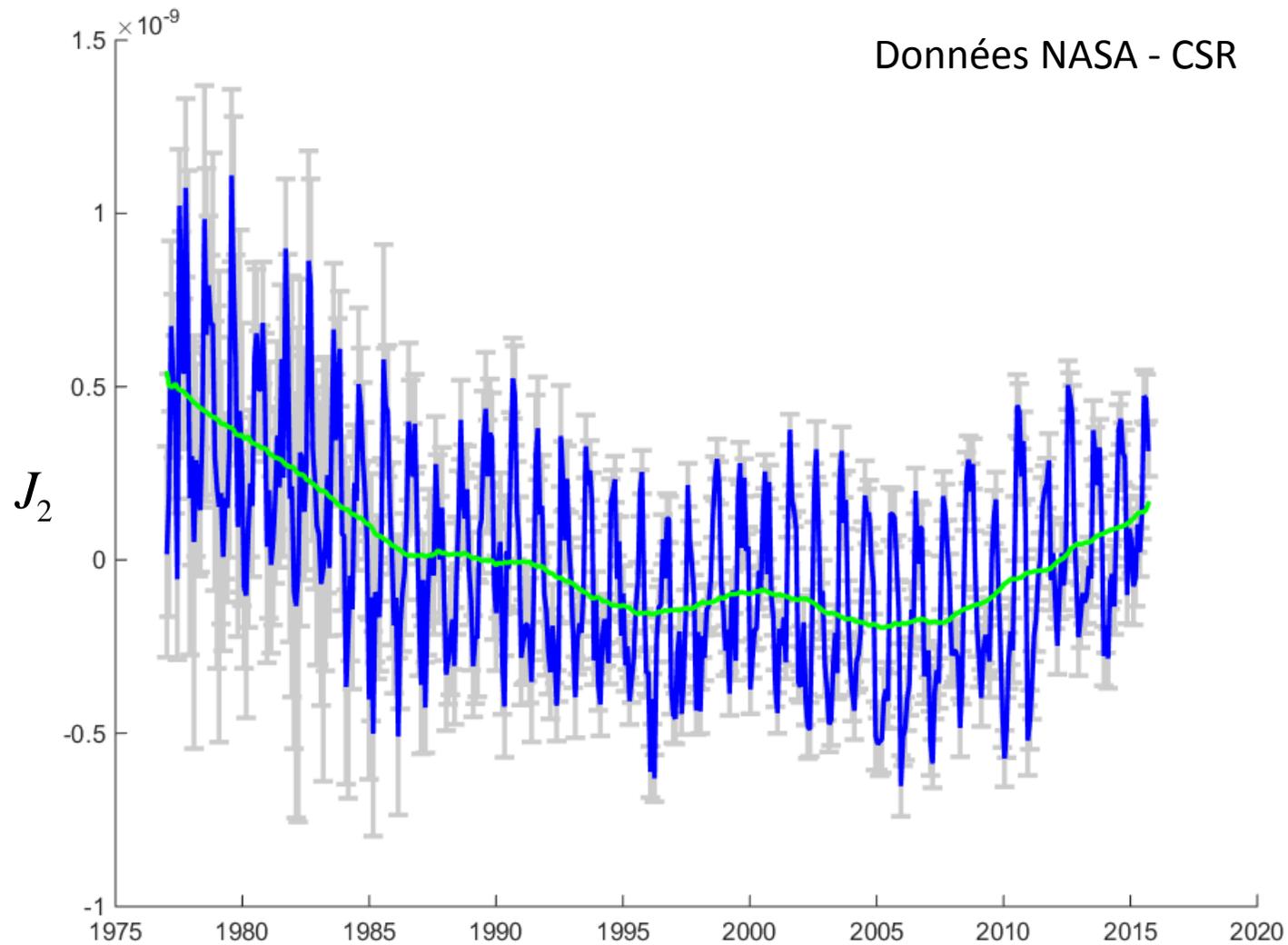
VARIATION D'ELLIPTICITÉ



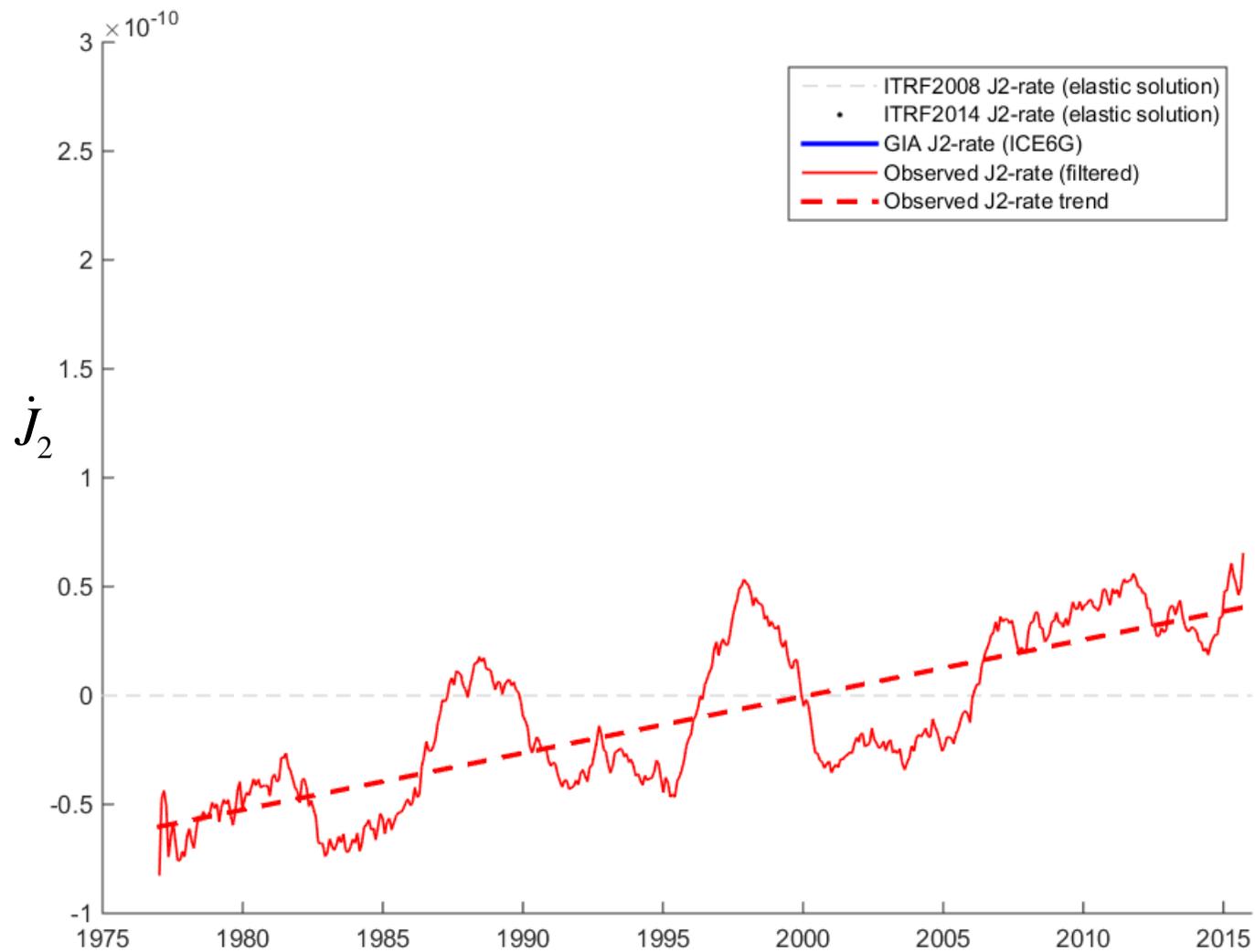
MOUVEMENT DU GÉOCENTRE



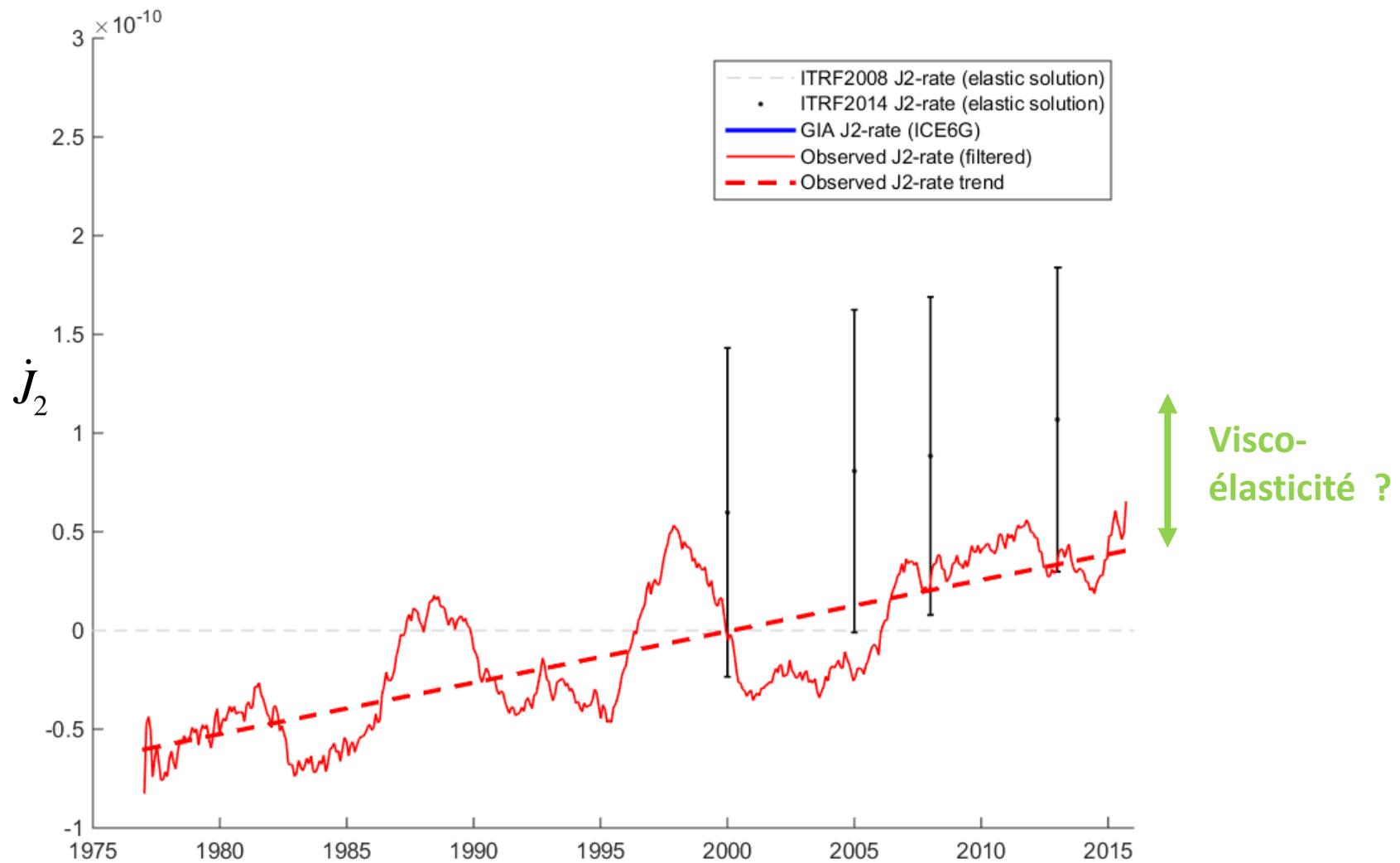
LES ANOMALIES DU J_2 (ELLIPTICITÉ DU GÉOÏDE)



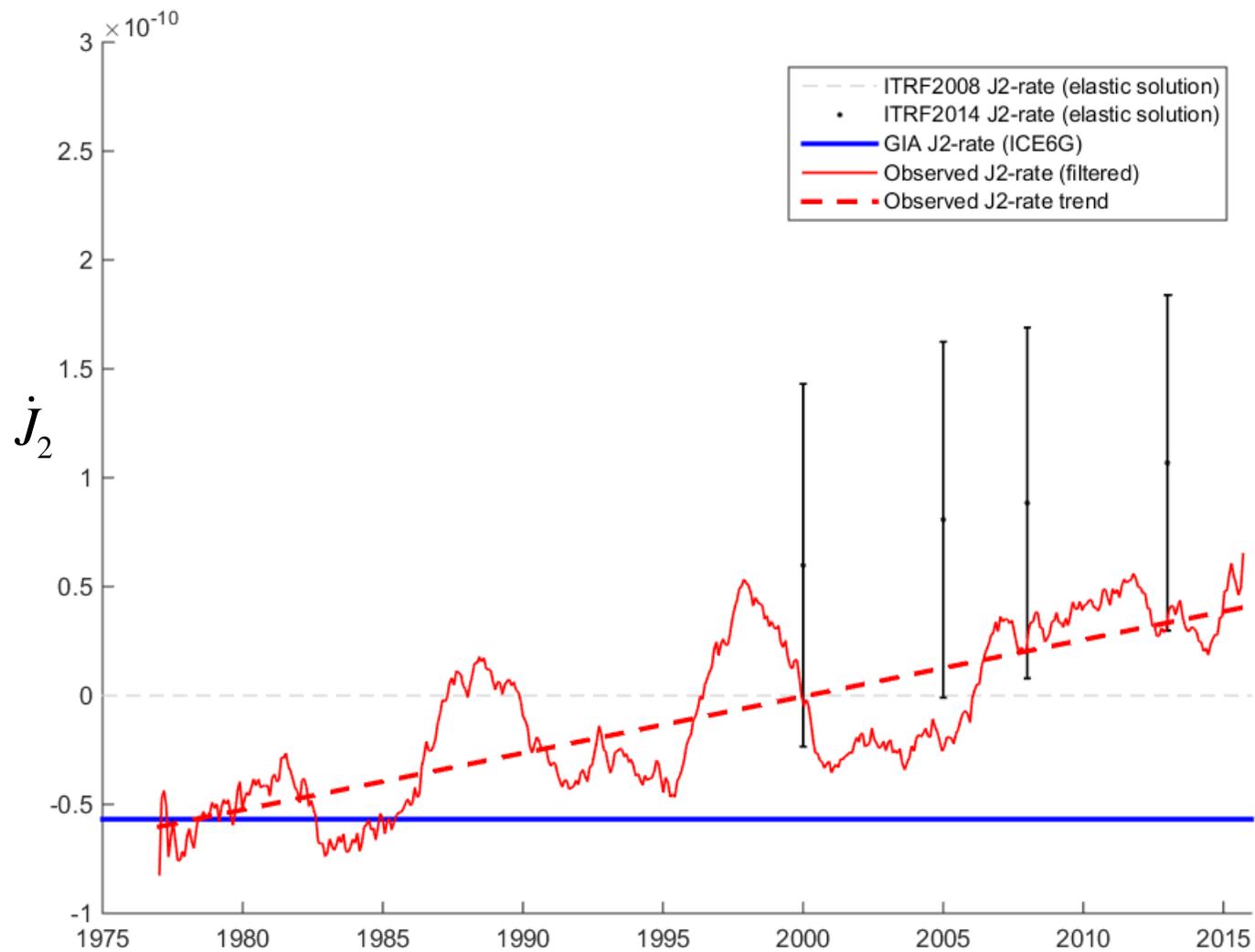
TAUX DE VARIATION DU J_2

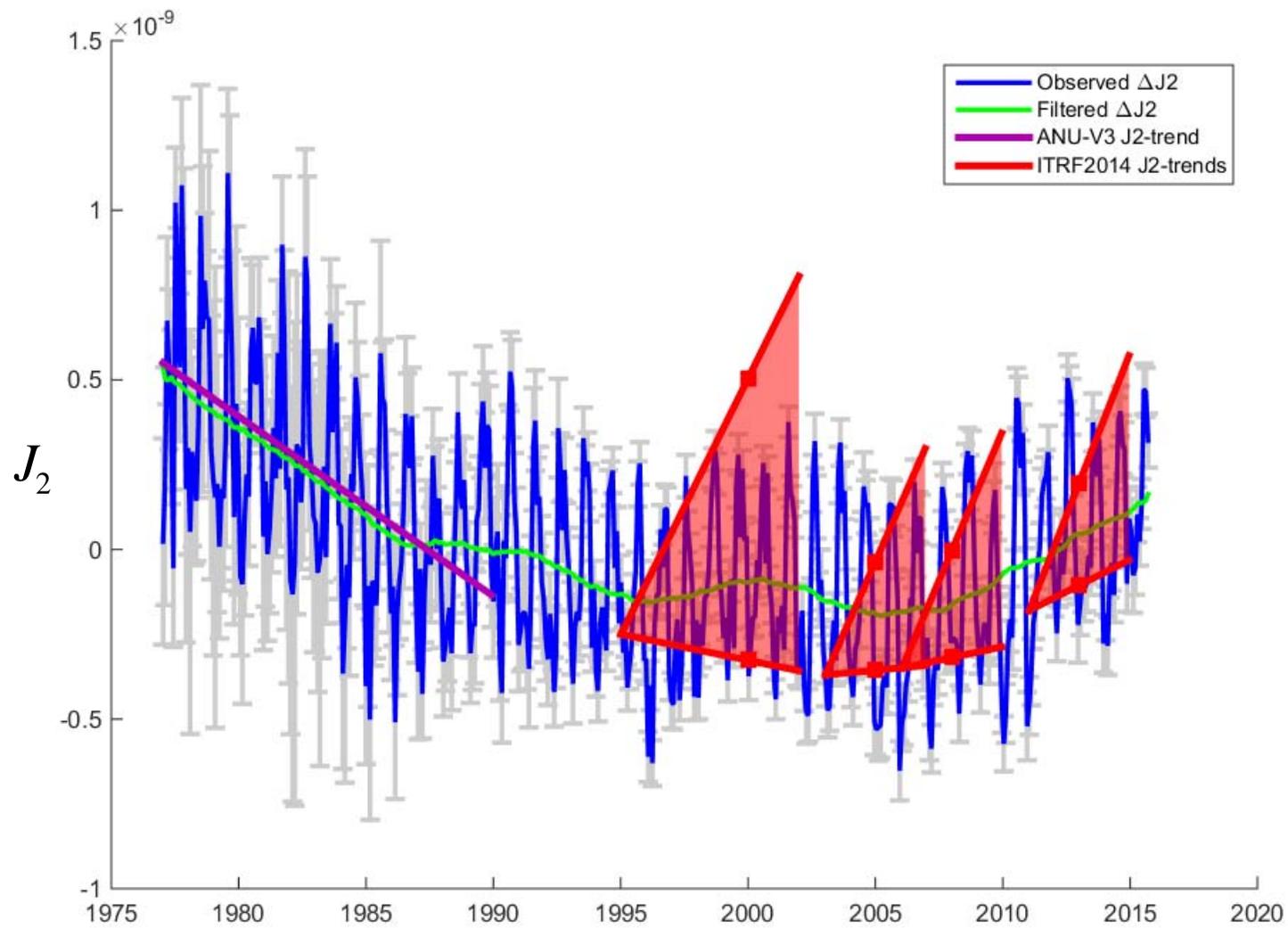


TAUX DE VARIATION DU J_2



TAUX DE VARIATION DU J_2

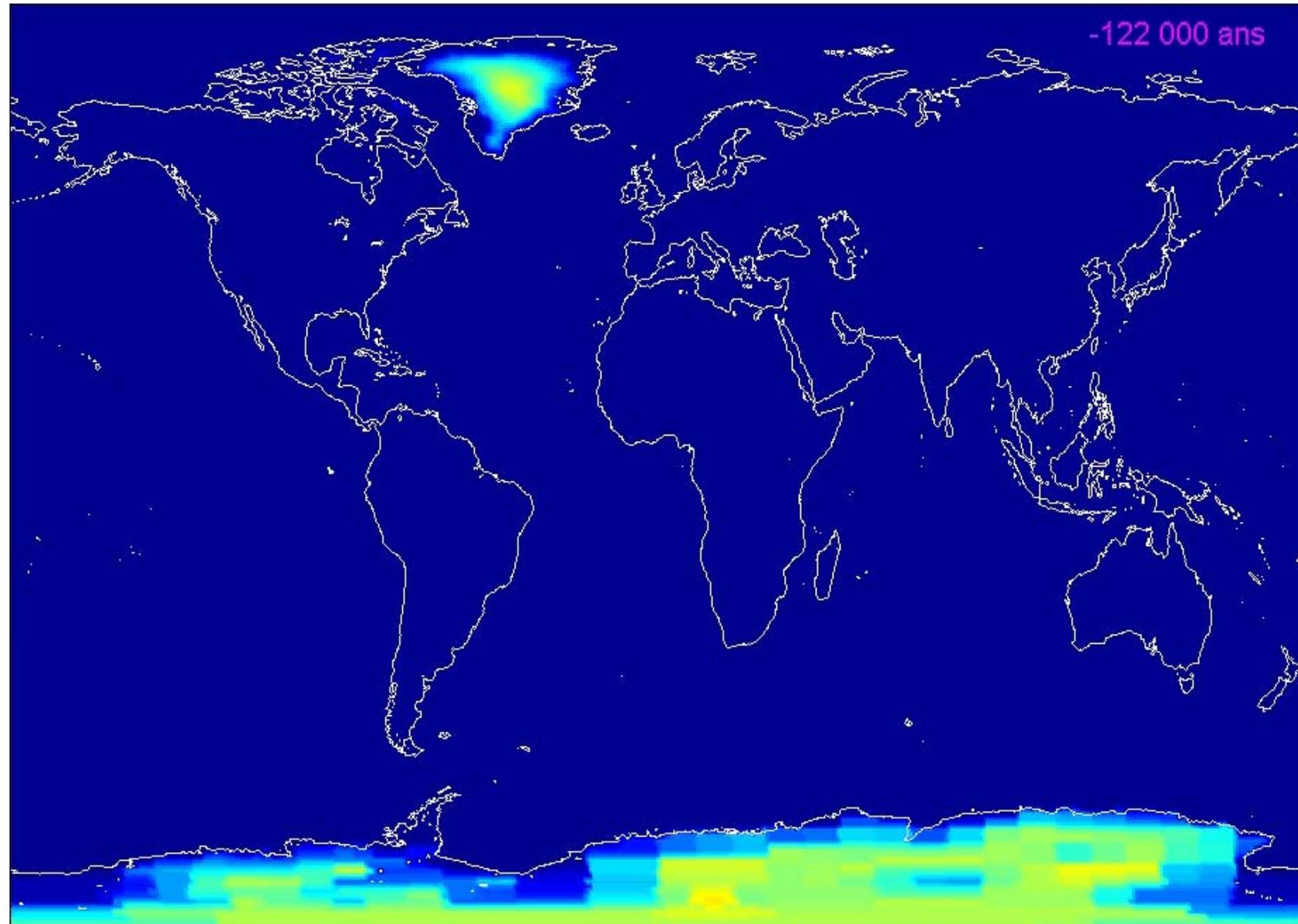




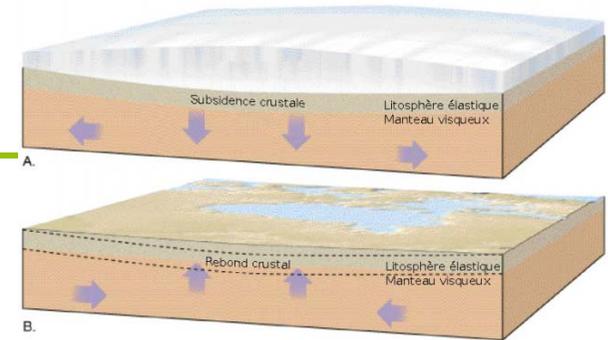
CONCLUSIONS

- **ITRF2014 - les vitesses verticales montrent :**
 - Une homogénéité globale, en cohérence avec le rebond postglaciaire.
 - Un signal très fort au Groenland, en Alaska, voire en Antarctique sans précédent.
- **Les stations en région polaire présentent des vitesses verticales qui varient dans le temps et qui impliquent des changements de figure de la Terre :**
 - Accélération du géocentre : le CF/CM se déplace vers le Nord avec une vitesse proche de 1mm/an aujourd'hui.
 - Diminution accélérée de l'ellipticité de la Terre principalement due à la fonte des glaces actuelles.
 - Peu de perturbation de rotation. Le modèle ICE6G surévalue légèrement le rotational feedback. Le modèle ANU semble meilleur.
- **L'ITRF2014 corrobore une inversion récente de la courbe des anomalies de J2 a priori due aux changements climatiques.**
- **Possible début de relaxation viscoélastique due à la fonte des glaces d'il y a trois décennies. Impliquerait une sous-évaluation des bilans de masses de glace en jeu aujourd'hui.**

ÉLÉVATIONS DES GLACES DEPUIS 122 KA (ICE5G)



CONTEXTE



■ Sources de vitesses verticales « long termes »

- Rebond postglaciaire (Canada, Scandinavie, Antarctique, Groenland, ...)
- Changements climatiques (Fonte des glaces/niveau des mers)
- Déformations tectoniques → **Petites en verticale**
- Déformations co- et post-sismiques
- Sources anthropogéniques (pompage des nappes, barrages, etc...)

■ Traitement ITRF2014 – Prise en compte des

- Déformations co- et post-sismiques