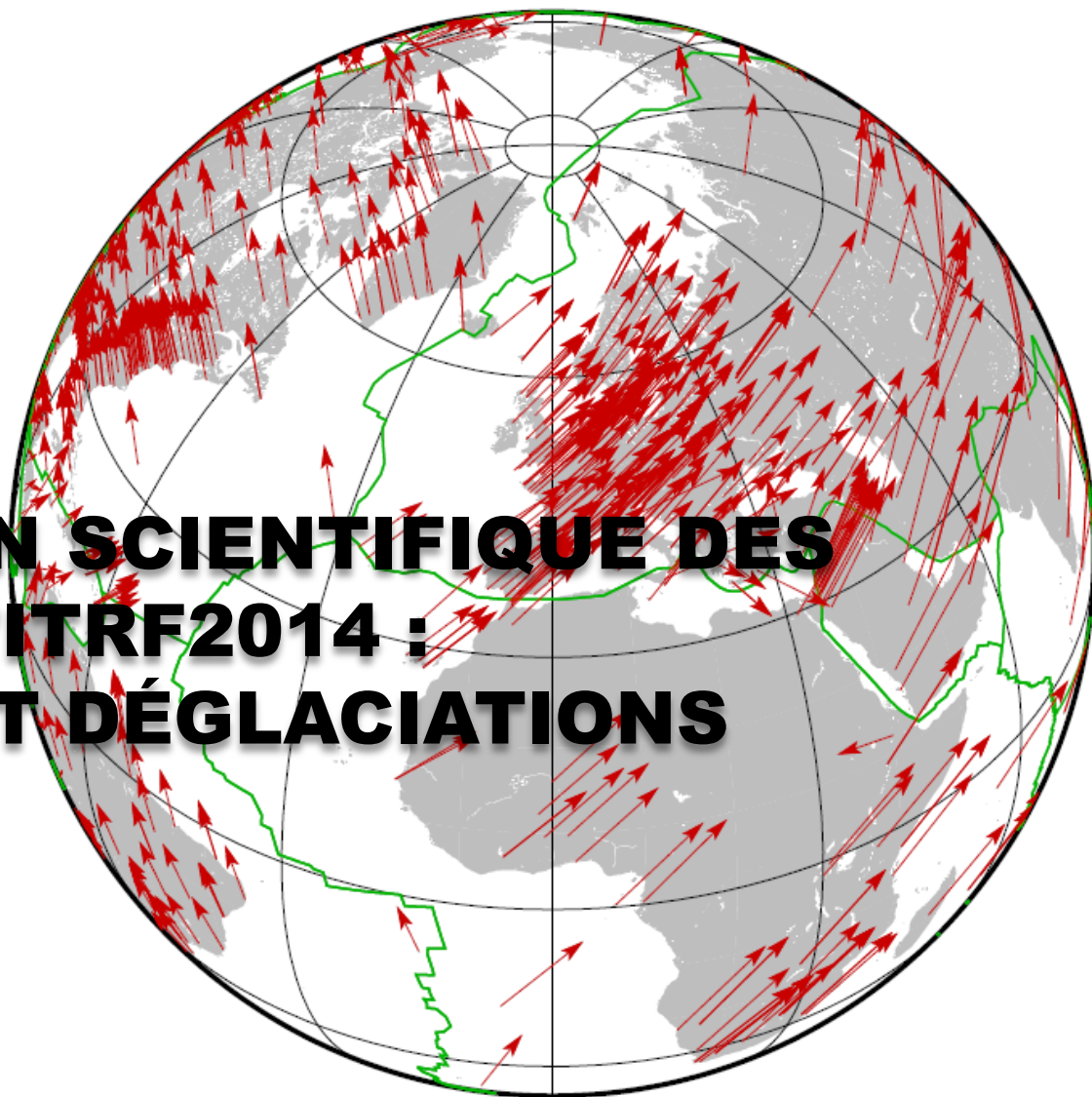


L'EXPLOITATION SCIENTIFIQUE DES VITESSES DE L'ITRF2014 : TECTONIQUE ET DÉGLACIATIONS

L. Métivier
H. Rouby
P. Rebischung
Z. Altamimi

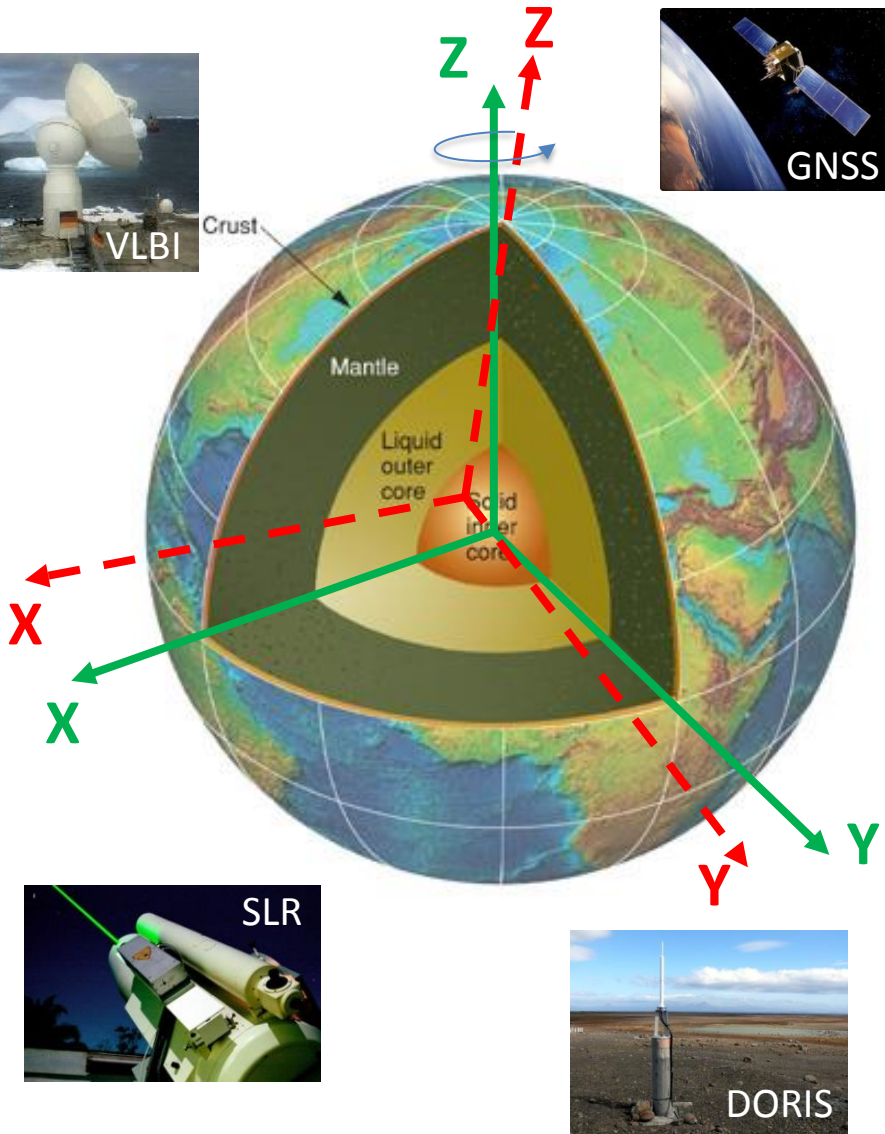
IGN, LAREG, Paris-Diderot University, Paris, France.



PLAN

- 1. ITRF2014 et vitesses des stations géodésiques.**
- 2. Contexte géophysique.**
- 3. Vitesses horizontales : tectonique des plaques et GIA.**
- 4. Vitesses verticales : GIA et changements climatiques. Une signature propre à l'ITRF2014.**
- 5. Conclusions.**

SYSTÈME/REPÈRE INTERNATIONAL DE RÉFÉRENCE TERRESTRE



■ Le système (ITRS)

- Origine : **centre des masses**
- Évolution temporelle de l'orientation : condition de **non rotation** globale
- Échelle : **unités SI**

■ Le repère (ITRF)

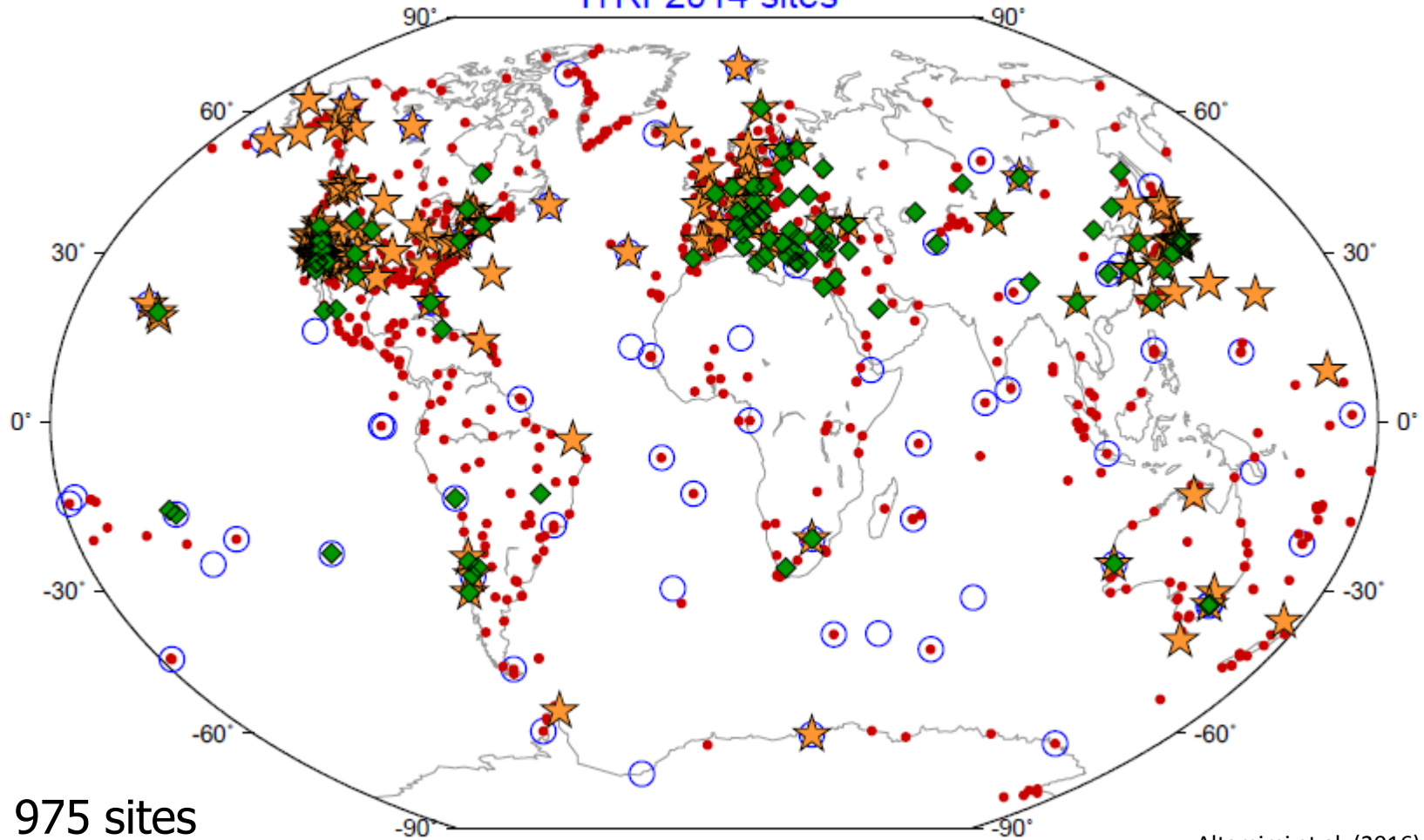
- Réalisation physique du système de référence :
« Etalon » de positions et vitesses de points à la surface de la Terre
- Combinaison de mesures des techniques de géodésie spatiale :
GNSS – SLR – VLBI – DORIS

■ **ITRF2014** (Altamimi et al., 2016) : dernière réalisation du système

- **Nouveauté** : Modélisation des mouvements non-linéaires des stations
- **Origine** : Satellite Laser Ranging (SLR)
- **Echelle** : moyenne SLR et VLBI
- **Orientation** : aligné sur l'ITRF2008
- **Précision** : **qq mms en position et ~1 mm/yr en vitesse**

INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME

ITRF2014 sites

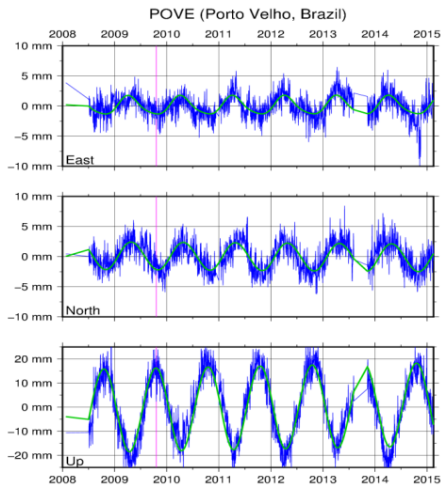


975 sites
(1499 stations)

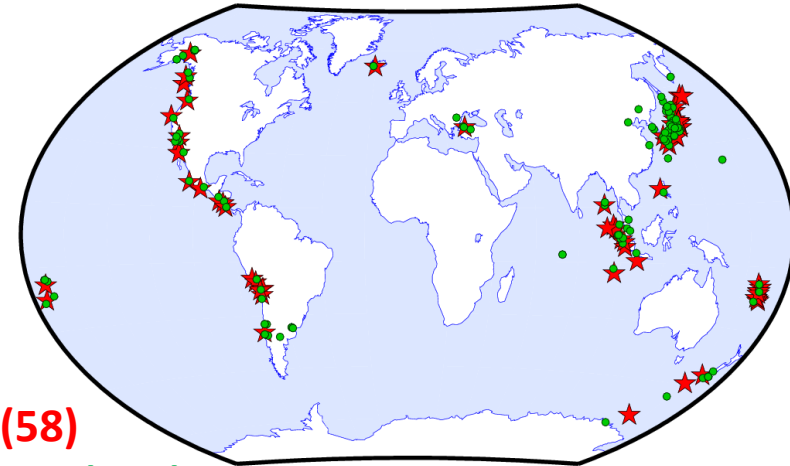
★ VLBI ◆ SLR ● GNSS ○ DORIS

Altamimi et al. (2016)

ITRF2014: MODELLING NON-LINEAR STATION MOTIONS



- Position time series of all stations exhibit periodic signals



Red Stars: EQ Epicenters (58)

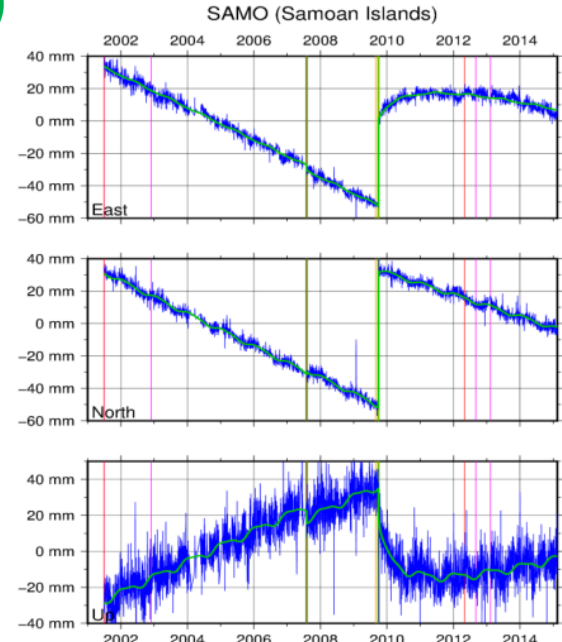
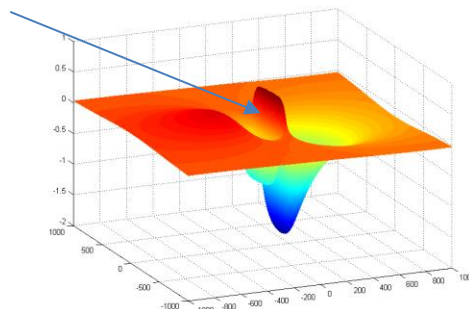
Green circles: ITRF2014 sites (117)

- More than 100 sites are subject to Post-Seismic Deformation due to major earthquakes (Lercier, 2014)

Precisely modeling those components leads to more robust secular frame and site velocities.

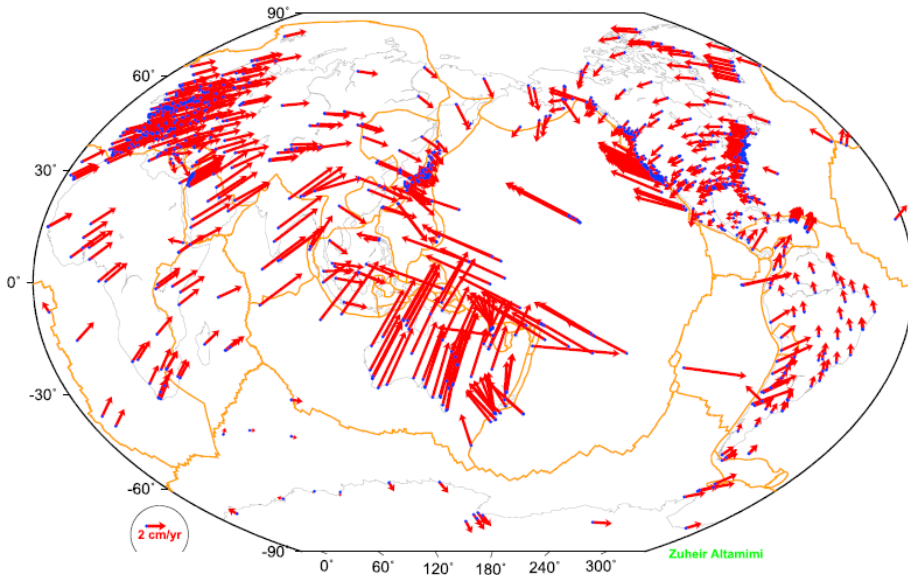
- Discontinuity detection in position time series (e.g. co-seismic modelling; Métivier et al. 2014)

Epicenter

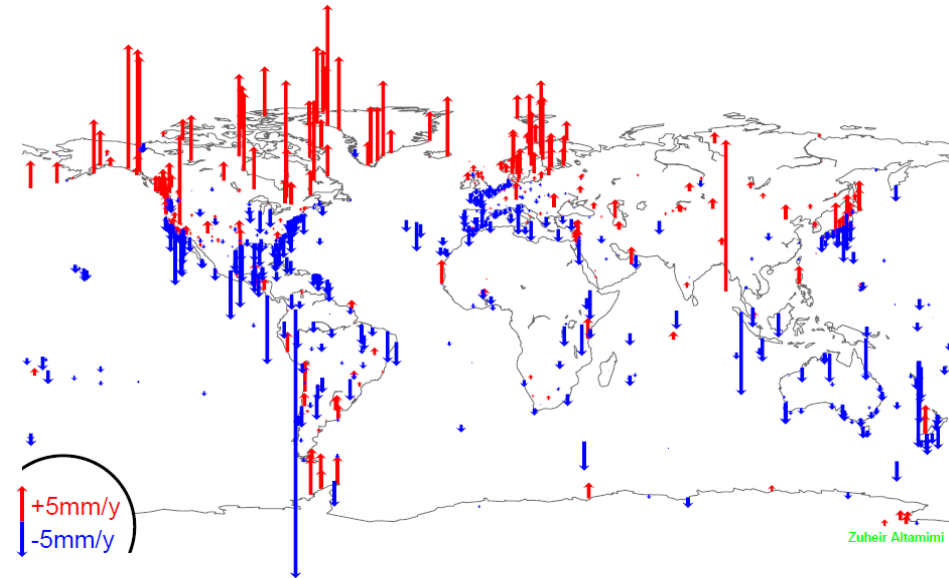


ITRF2014 – VITESSES DES STATIONS

Composante Horizontale



Composante verticale



VITESSES « LONG TERMES »

Vitesses de l'ITRF2014, périodes d'analyse :

VLBI : 1980 – 2015, SLR : 1983 – 2015,
GPS : 1994 – 2015, DORIS : 1993 – 2015.

Sources potentielles de vitesses :

- Déformations tectoniques



**Prédominance horizontale
(petites en verticale)**



- Déformations co- et post-sismiques



« corrigées » dans l'ITRF2014

- **Rebond postglaciaire**

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



**Vitesses verticales et
horizontales**

- **Changements climatiques**

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



Prédominance verticale

- **Sources anthropogéniques (pompage des nappes, barrages, etc...)**

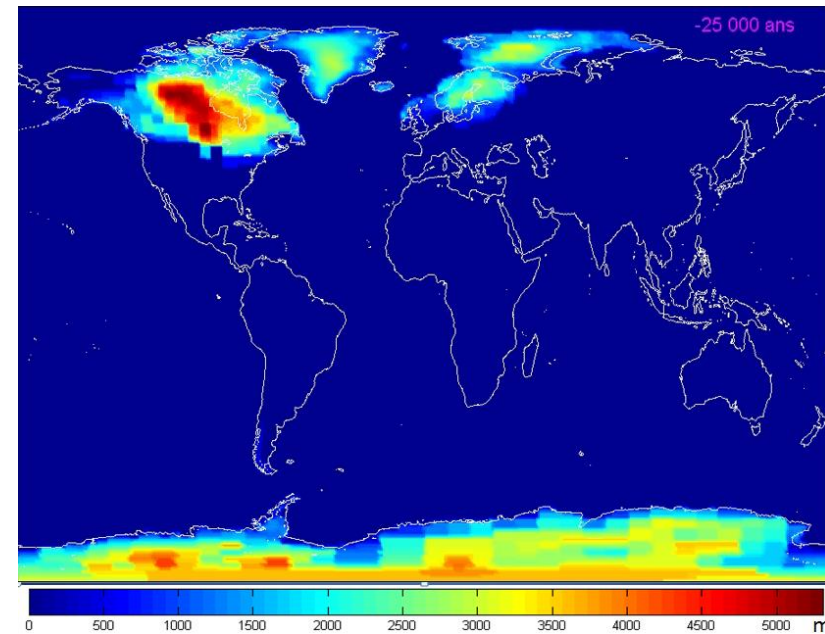
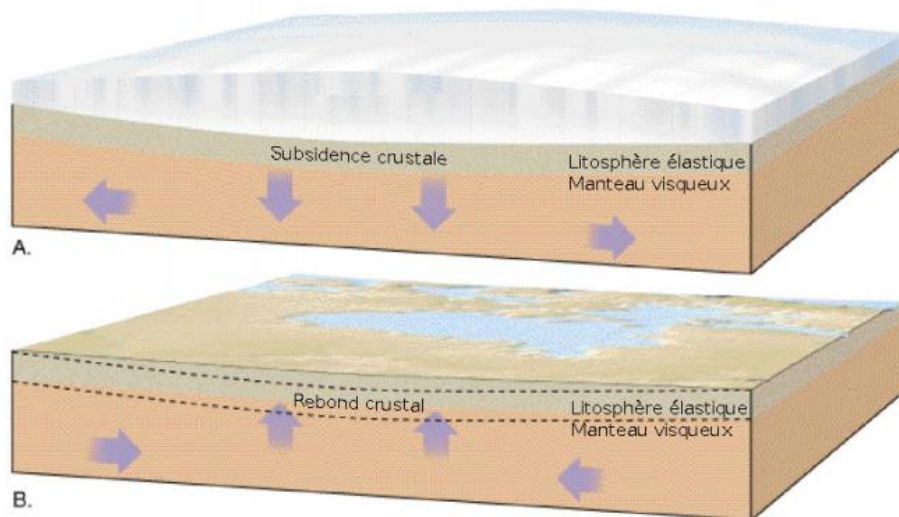


déformations locales

RÉAJUSTEMENT ISOSTATIQUE POSTGLACIAIRE (GIA : GLACIAL ISOSTATIC ADJUSTMENT)

Dernier Maximum Glaciaire (~20 000 ans) :

- 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
- Enfoncement du sol sous les calottes :
 - Laurentide : entre 500m -1km d'enfoncement



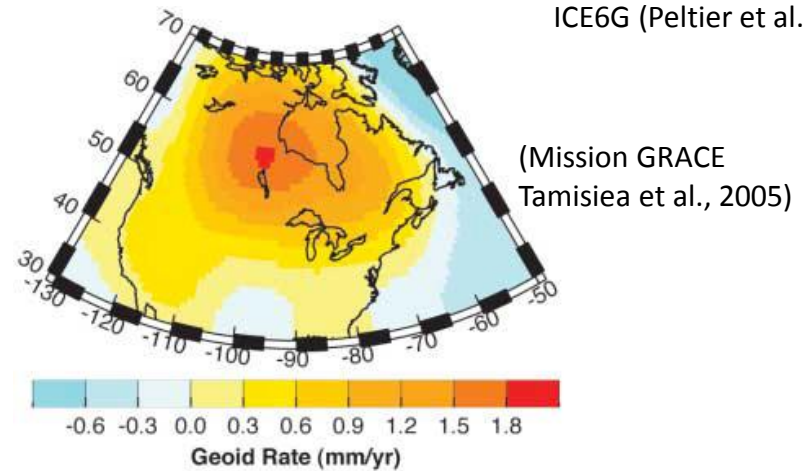
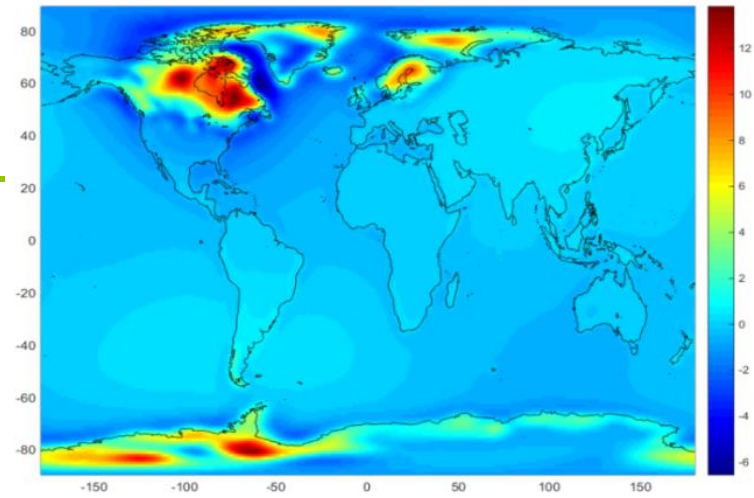
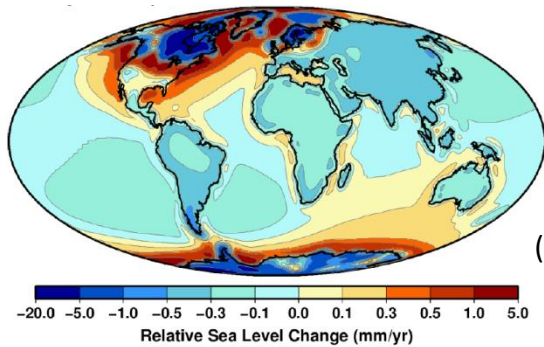
■ **Déglaciation :**

- Relâchement des contraintes
- Réajustement isostatique du sol

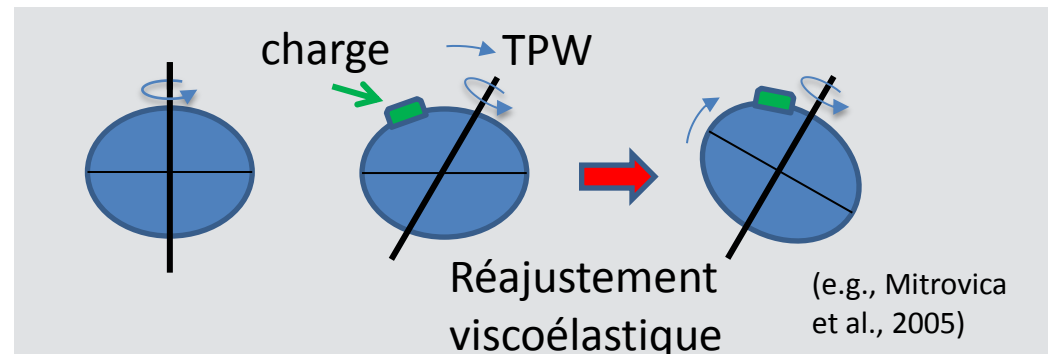
➔ **Déformations gravito-viscoélastiques toujours en cours actuellement**

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

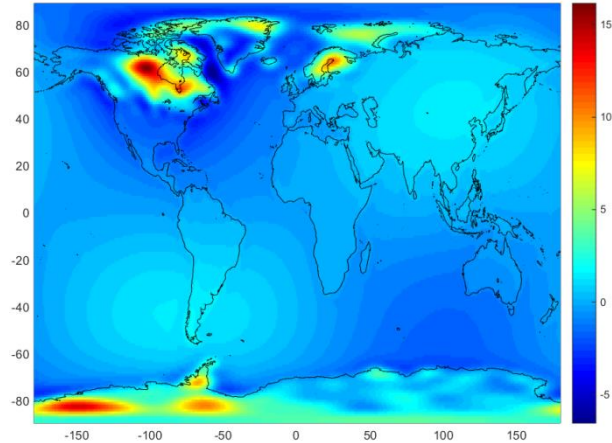


- Perturbation de la rotation et réajustement du bourrelet équatorial (rotational feedback)

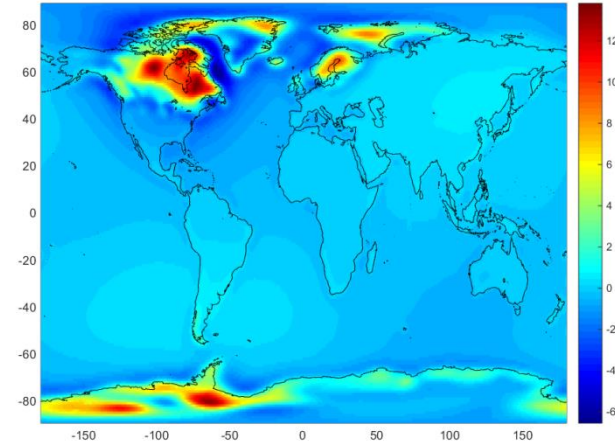


DIFFÉRENTS MODÈLES DE GIA

ICE5G



ICE6G

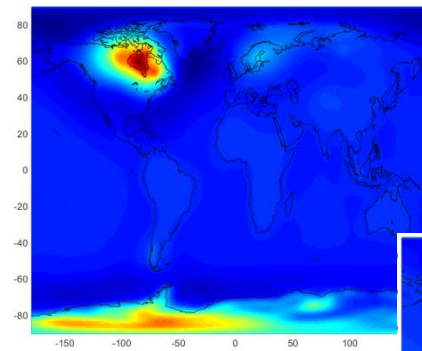


■ Remises en cause majeures du modèle ICE5G (VM2)

- 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)

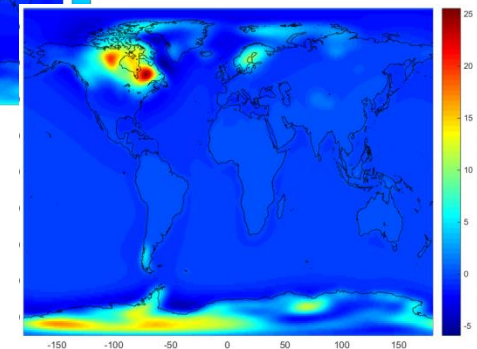
■ Modèles alternatifs avec re-détermination des niveaux de glace :

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

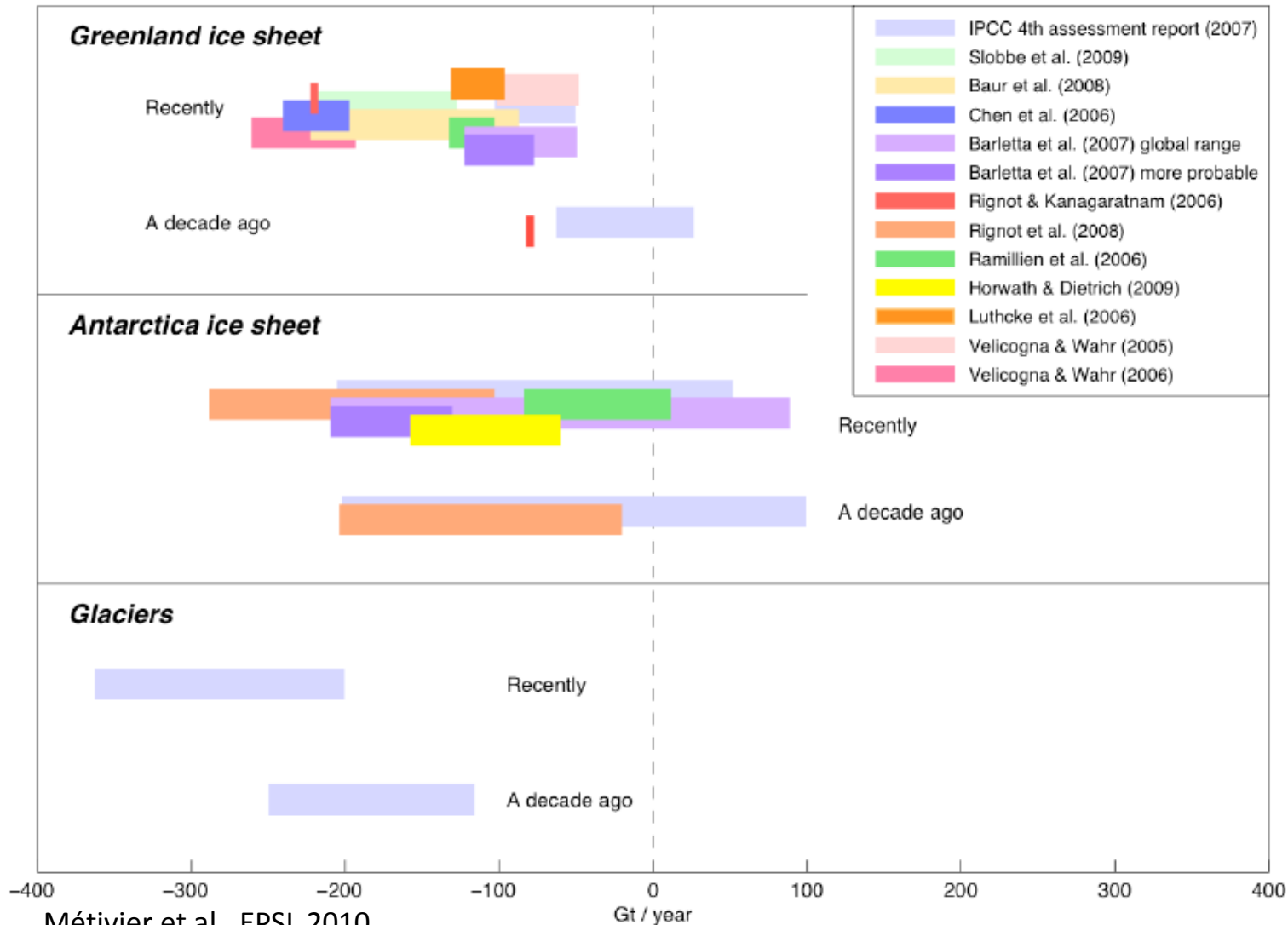


ANU – V3

ANU – V2



BILAN ACTUEL DES MASSES DE GLACE



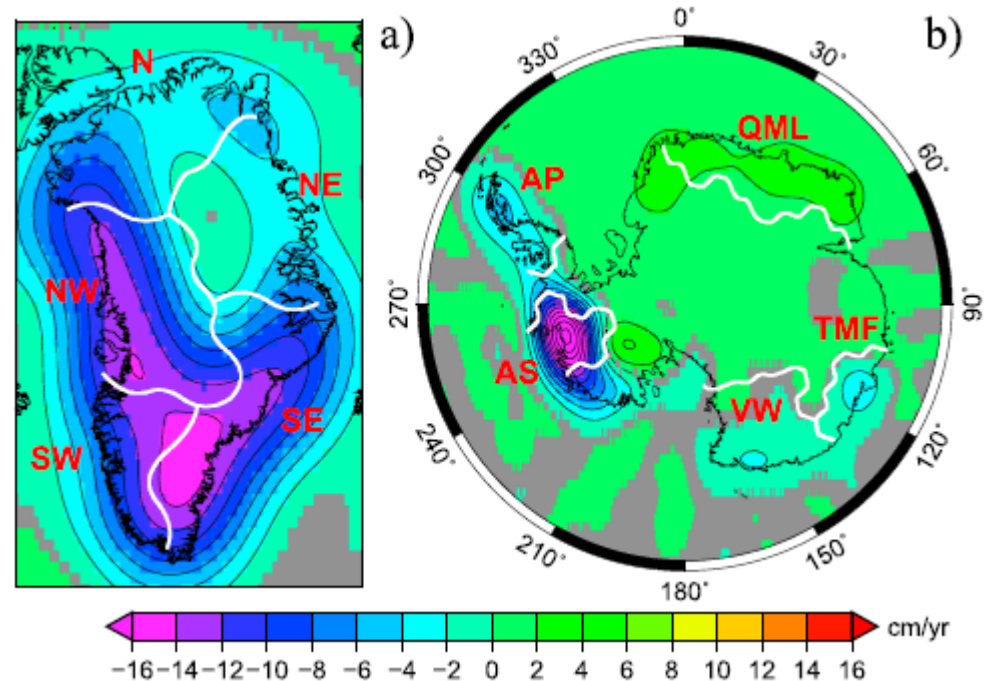
Métivier et al., EPSL 2010

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.



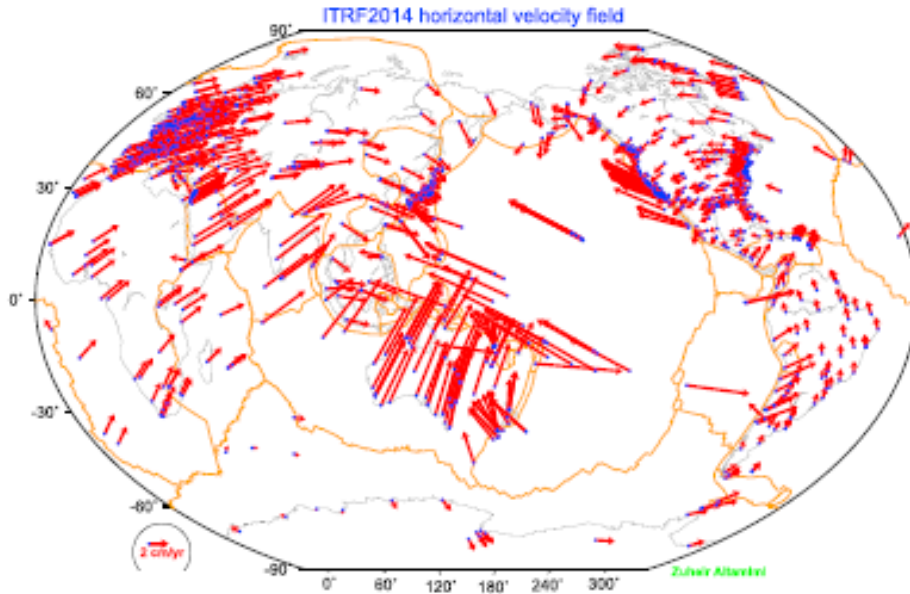
■ Accélération ?

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

VITESSES HORIZONTALES ITRF2014

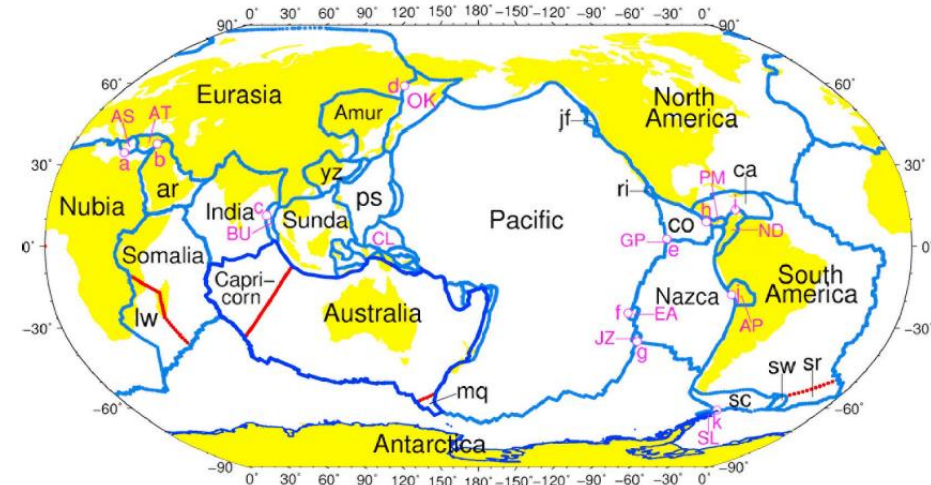
VITESSES DES STATIONS DE L'ITRF2014

Vitesse horizontales



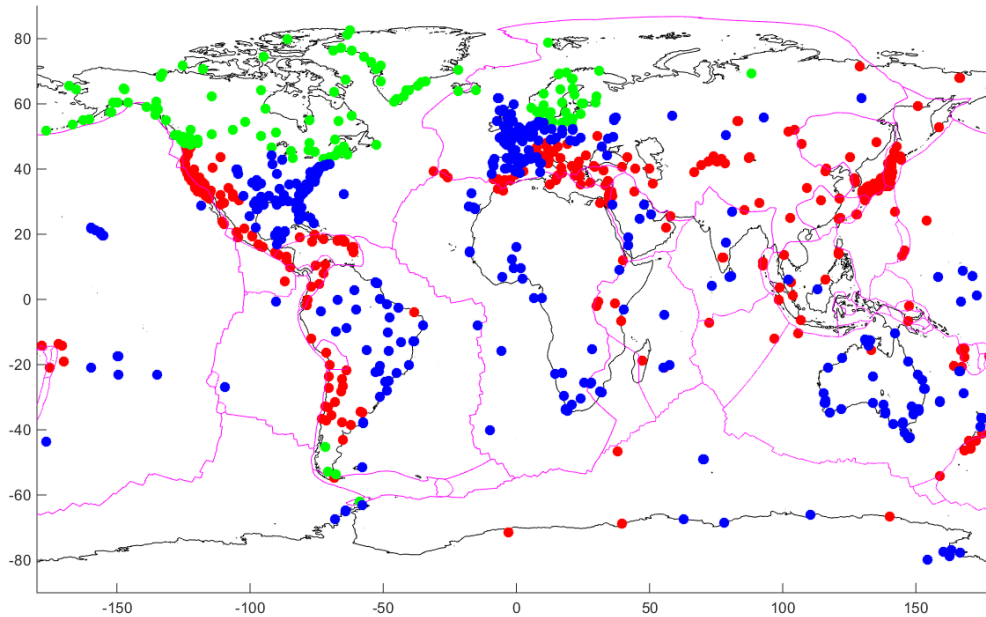
Altamimi et al. (2016)

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



Estimation précise des pôles de rotation des plaques tectoniques

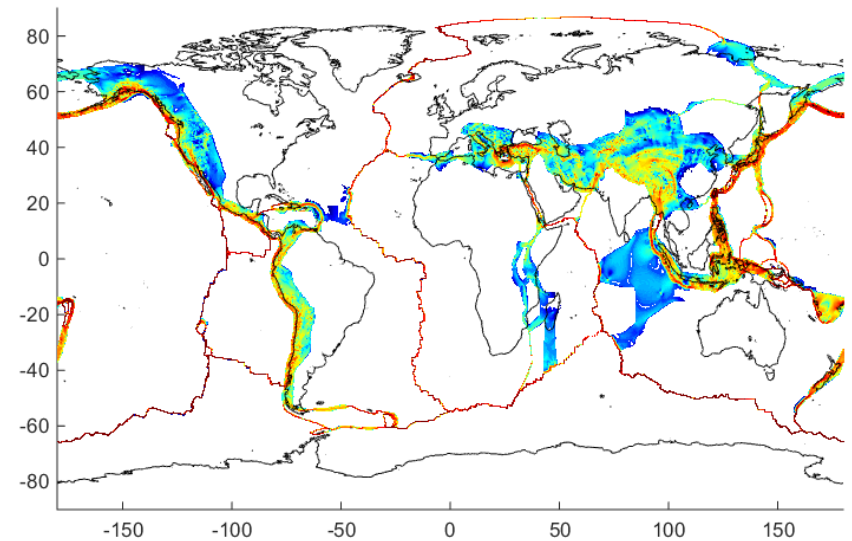
SÉLECTION DES STATIONS



Critères de sélection des stations :

- Rouge :
 - Présence de post-sismique évident.
 - Zones de déformation de Kreemer et al.
- Vert :
 - Zones de GIA (selon ICE6G ou ANU).
 - Zones polaires (fonte de glace récente).
- Bleu :
 - Autres stations : Sélection finale

Second invariant du tenseur des déformations de la Lithosphère (Kreemer et al., 2014)



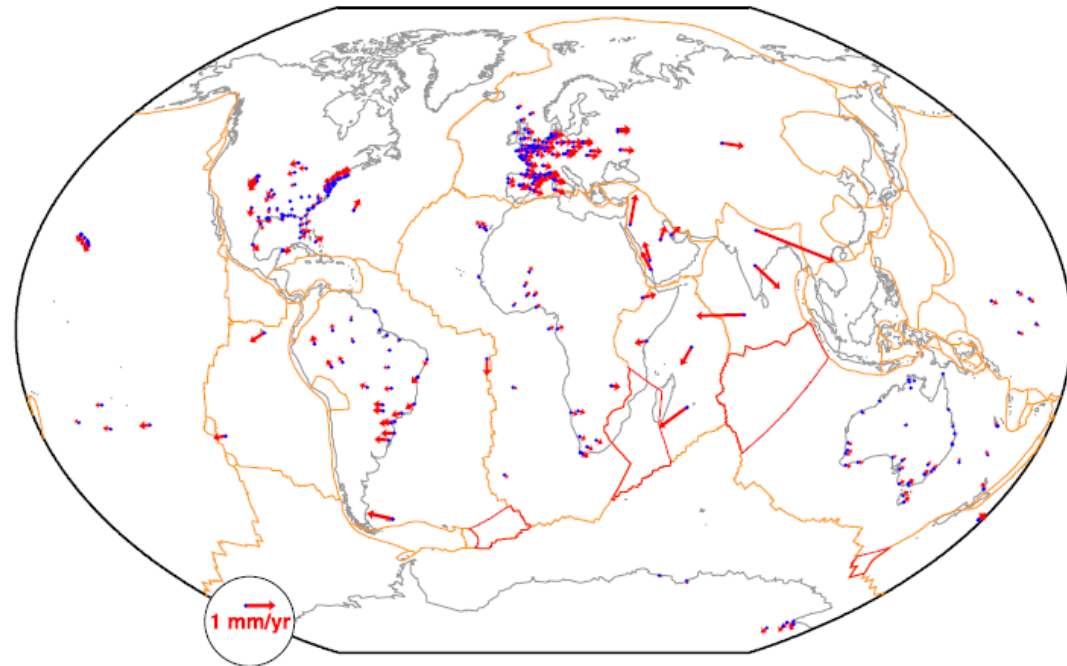
PÔLES DES PLAQUES TECTONIQUE

Table 1. Absolute plate rotation poles defining ITRF2014-PMM.

Plate	NS ^a	ω_x	ω_y	ω_z	ω	WRMS	
						E	N
		(mas yr ⁻¹)			(° Ma ⁻¹)	(mm yr ⁻¹)	
ANTA	7	-0.248	-0.324	0.675	0.219	0.20	0.16
±		0.004	0.004	0.008	0.002		
ARAB	5	1.154	-0.136	1.444	0.515	0.36	0.43
±		0.020	0.022	0.014	0.006		
AUST	36	1.510	1.182	1.215	0.631	0.24	0.20
±		0.004	0.004	0.004	0.001		
EURA	97	-0.085	-0.531	0.770	0.261	0.23	0.19
±		0.004	0.002	0.005	0.001		
INDI	3	1.154	-0.005	1.454	0.516	0.21	0.21
±		0.027	0.117	0.035	0.012		
NAZC	2	-0.333	-1.544	1.623	0.629	0.13	0.19
±		0.006	0.015	0.007	0.002		
NOAM	72	0.024	-0.694	-0.063	0.194	0.23	0.28
±		0.002	0.005	0.004	0.001		
NUBI	24	0.099	-0.614	0.733	0.267	0.28	0.36
±		0.004	0.003	0.003	0.001		
PCFC	18	-0.409	1.047	-2.169	0.679	0.36	0.31
±		0.003	0.004	0.004	0.001		
SOAM	30	-0.270	-0.301	-0.140	0.119	0.34	0.35
±		0.006	0.006	0.003	0.001		
SOMA	3	-0.121	-0.794	0.884	0.332	0.32	0.30
±		0.035	0.034	0.008	0.008		
ITRF2014-PMM overall fit						0.26	0.26

^a Number of sites.

■ Comparaison entre modèles de plaques ITRF2014 et ITRF2008

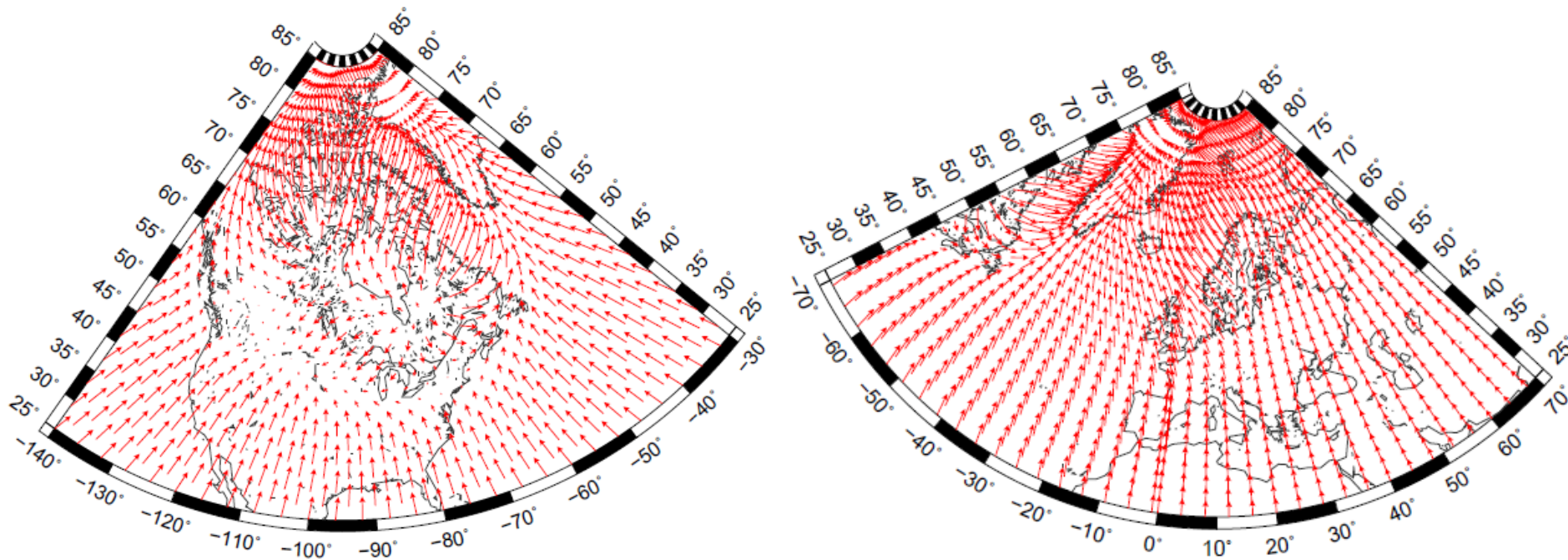


(Altamimi et al., GJI 2017)

IMPACT DU REBOND POSTGLACIAIRE

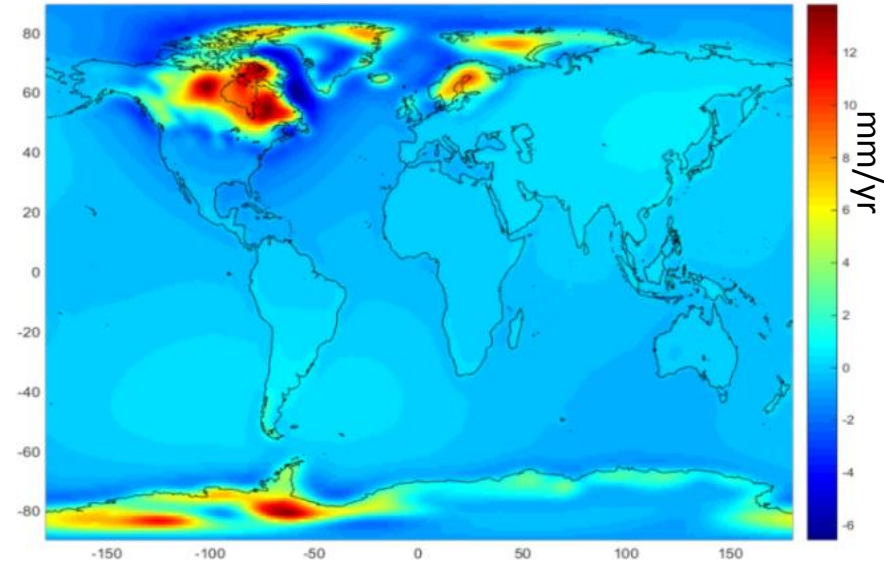
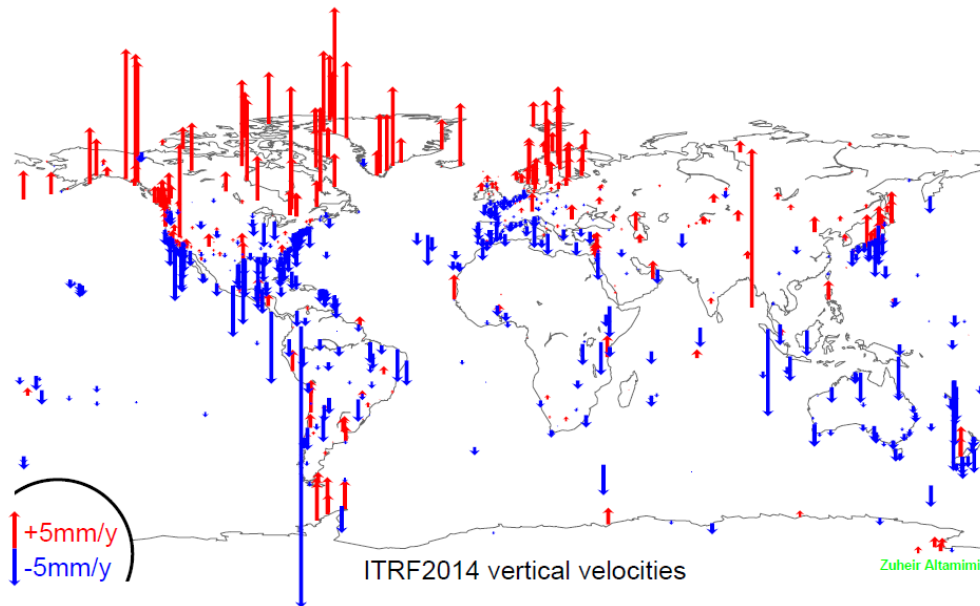
- L'impact du GIA est largement sous-estimé :

Vitesses horizontales induites par le GIA (modèle ANU)



VITESSES VERTICALES ITRF2014

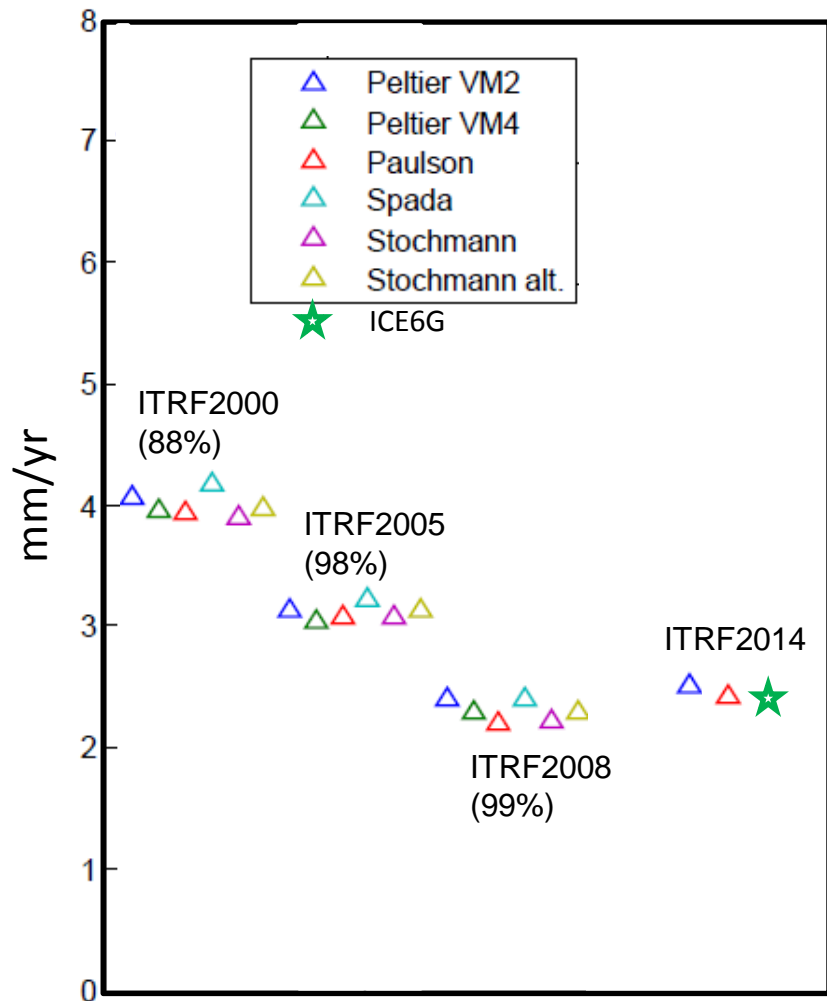
ITRF2014 – VITESSE VERTICALE DES STATIONS



Glacial Isostatic Adjustment (GIA)
(e.g. ICE-6G model; Peltier et al., 2016)

EVALUATION DES SOLUTIONS ITRF : VITESSES VERTICALES GIA

RMS



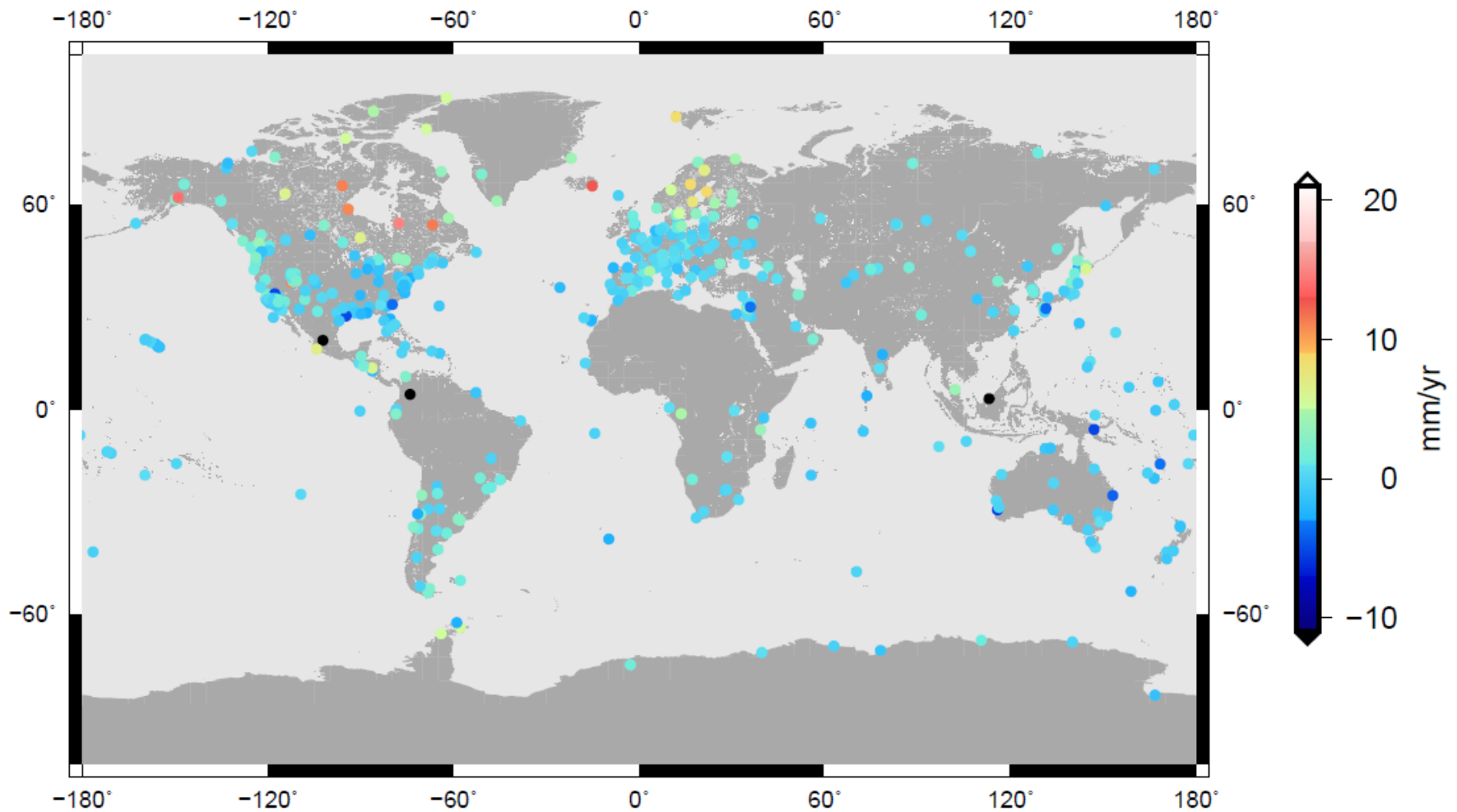
- Les vitesses verticales GNSS ITRF sont comparées aux prédictions GIA sur les réseaux ITRF.
- Les solutions ITRF sont de plus en plus cohérentes avec les modèles GIA avec le temps.

NB : Exclusion des stations avec une précision supérieure à 1 mm/an ou présentant des déformations postsismiques (entre parenthèses : % des stations du réseau gardées)

... Excepté l'ITRF2014 !

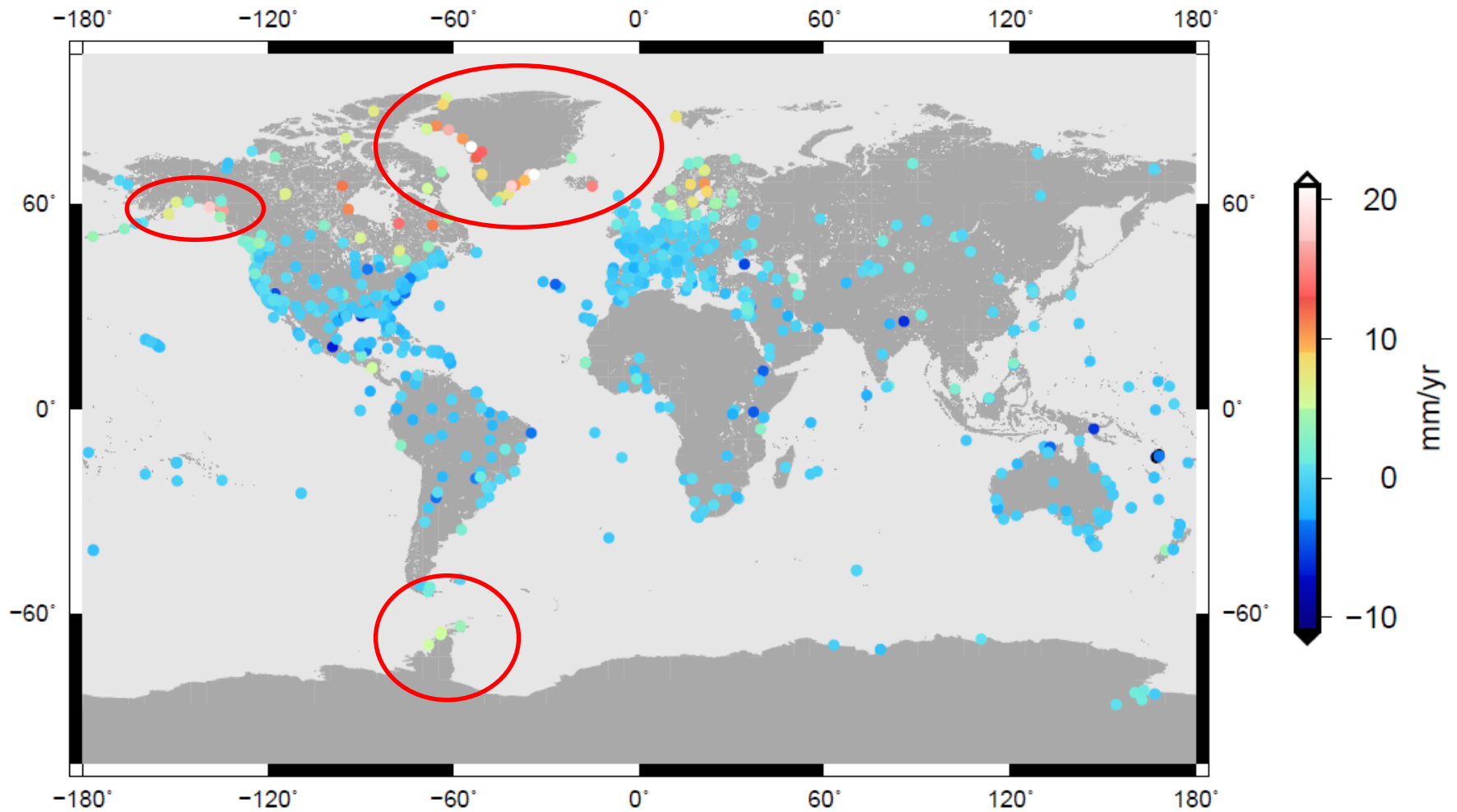
COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2008

ITRF2008-GNSS vertical velocities



COHÉRENCE DES VITESSES VERTICALES : ITRF2014

ITRF2014-GNSS vertical velocities

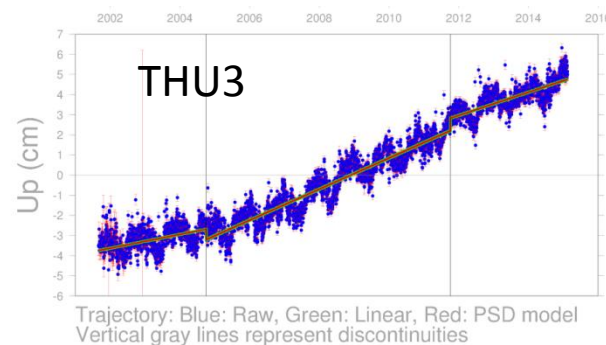
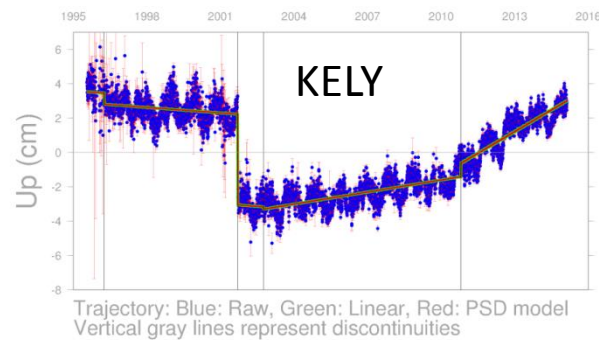
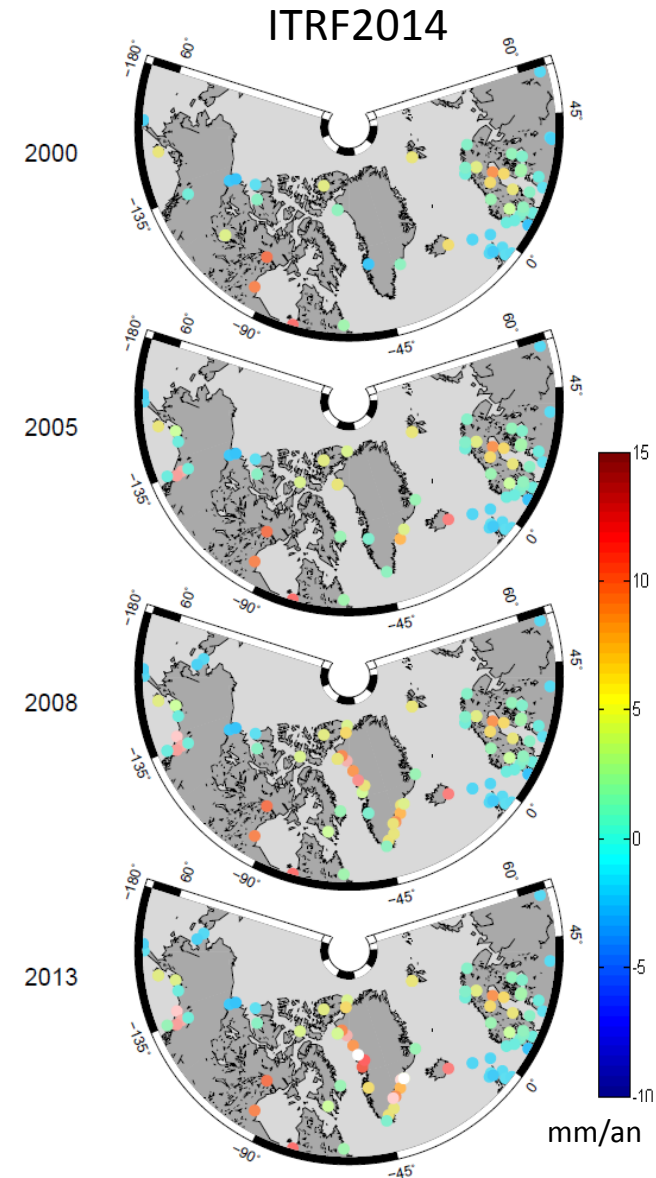


ITRF2014 : PARTICULARITÉ

- A la différence des solutions précédentes, l'ITRF2014 présente un signal fort sur le Groenland, l'Alaska et la péninsule Antarctique.

➔ Déglaciation actuelle

- Groenland (Alaska, Antarctique):
 - Nombreuses nouvelles stations
 - Non-linéarités : discontinuités de vitesse



GLOBAL SOLID EARTH FIGURE

Vertical velocities

$$v_r(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \dot{C}_{nm}(t) Y_{nm}^c(\theta, \lambda) + \dot{S}_{nm}(t) Y_{nm}^s(\theta, \lambda)$$

Y_{nm}^c / Y_{nm}^s Spherical harmonic (SH) functions
 (θ, λ) Colatitude, Longitude

- Spherical Harmonic Coefficients (SHC) rates of degree 1 and 2 of the solid Earth figure:

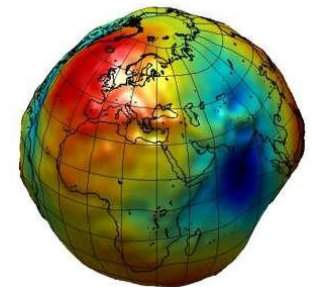
$(\dot{C}_{10}, \dot{C}_{11}, \dot{S}_{11})$ Geocenter motions (CF w.r.t. CM) along (Z, X, Y) axes

\dot{C}_{20} Solid Earth ellipticity

$(\dot{C}_{21}, \dot{S}_{21})$ Rotations

$(\dot{C}_{22}, \dot{S}_{22})$ Triaxiality

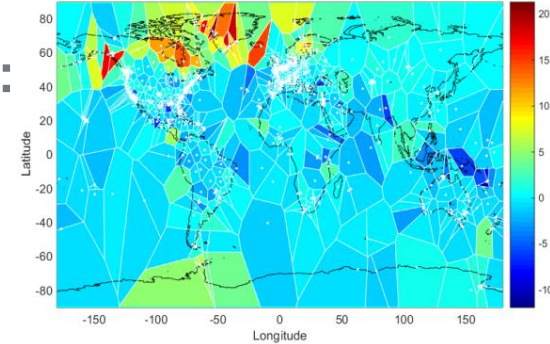
\dot{J}_2 Geoid ellipticity



MÉTHODES DE RÉOLUTION

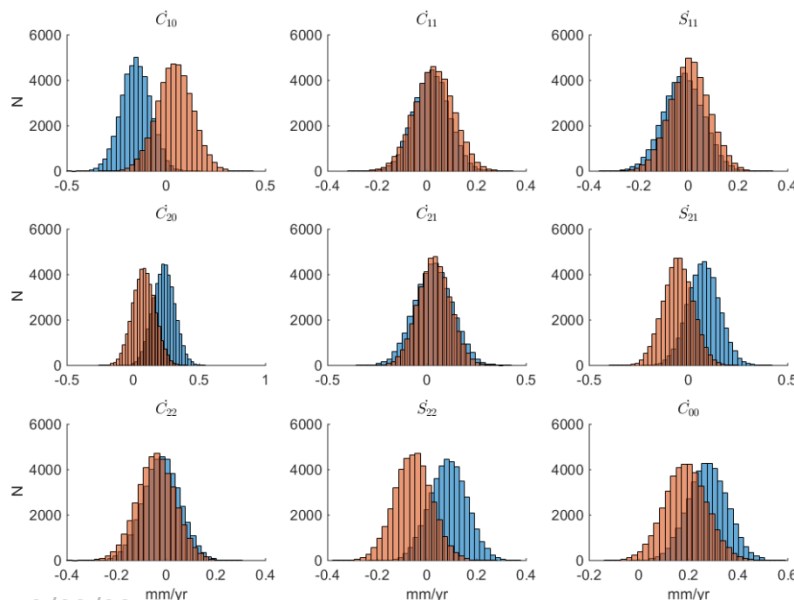
- Plusieurs méthodes testées pour limiter l'aliasing :

- 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.

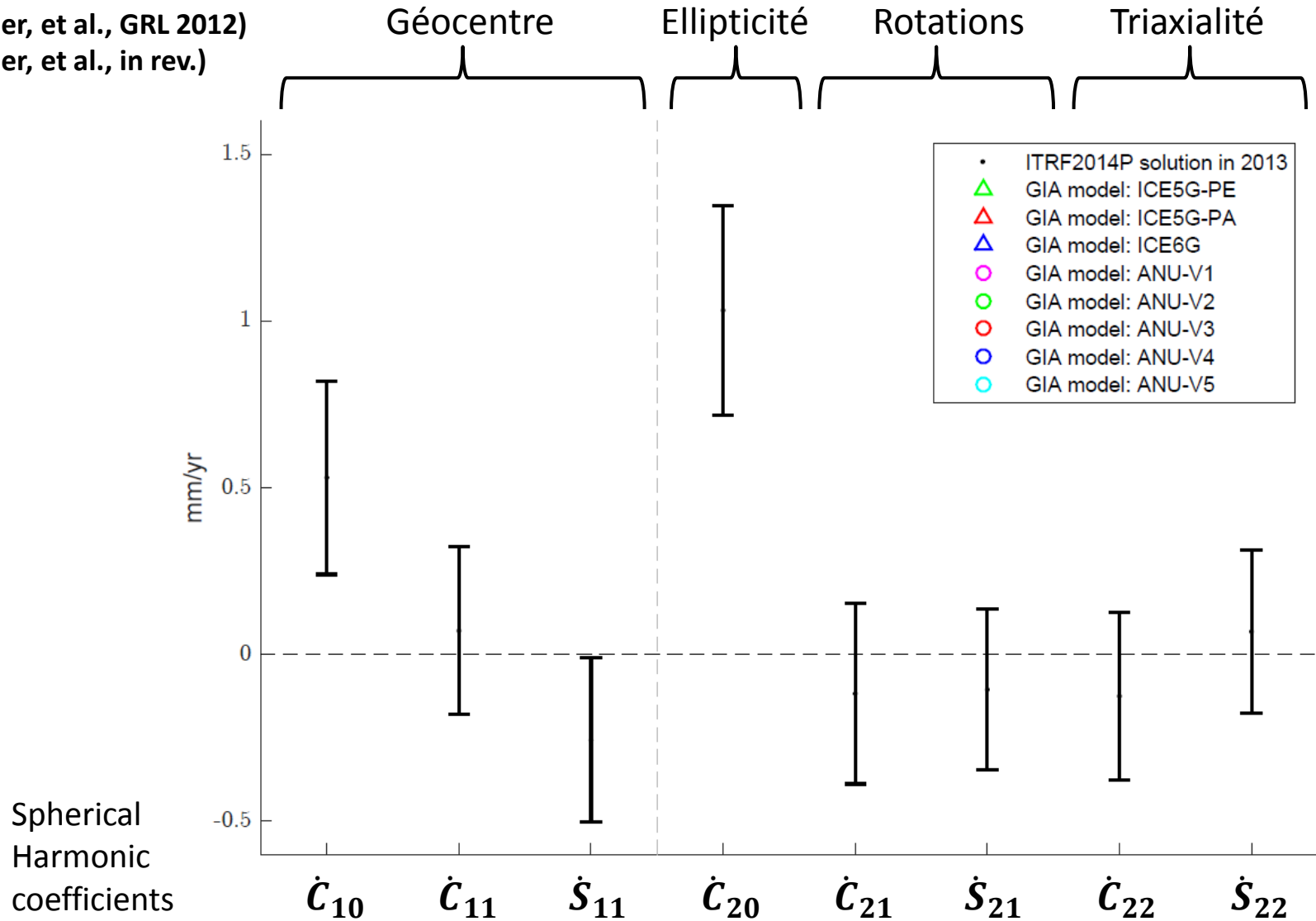


Bleu : Least Square Inversion
Rouge : Direct Legendre Transform

Biais et dispersions des résidus
(ex. ICE6G)

RÉSULTATS : COEFFICIENTS HS (2013)

(Métivier, et al., GRL 2012)
(Métivier, et al., in rev.)

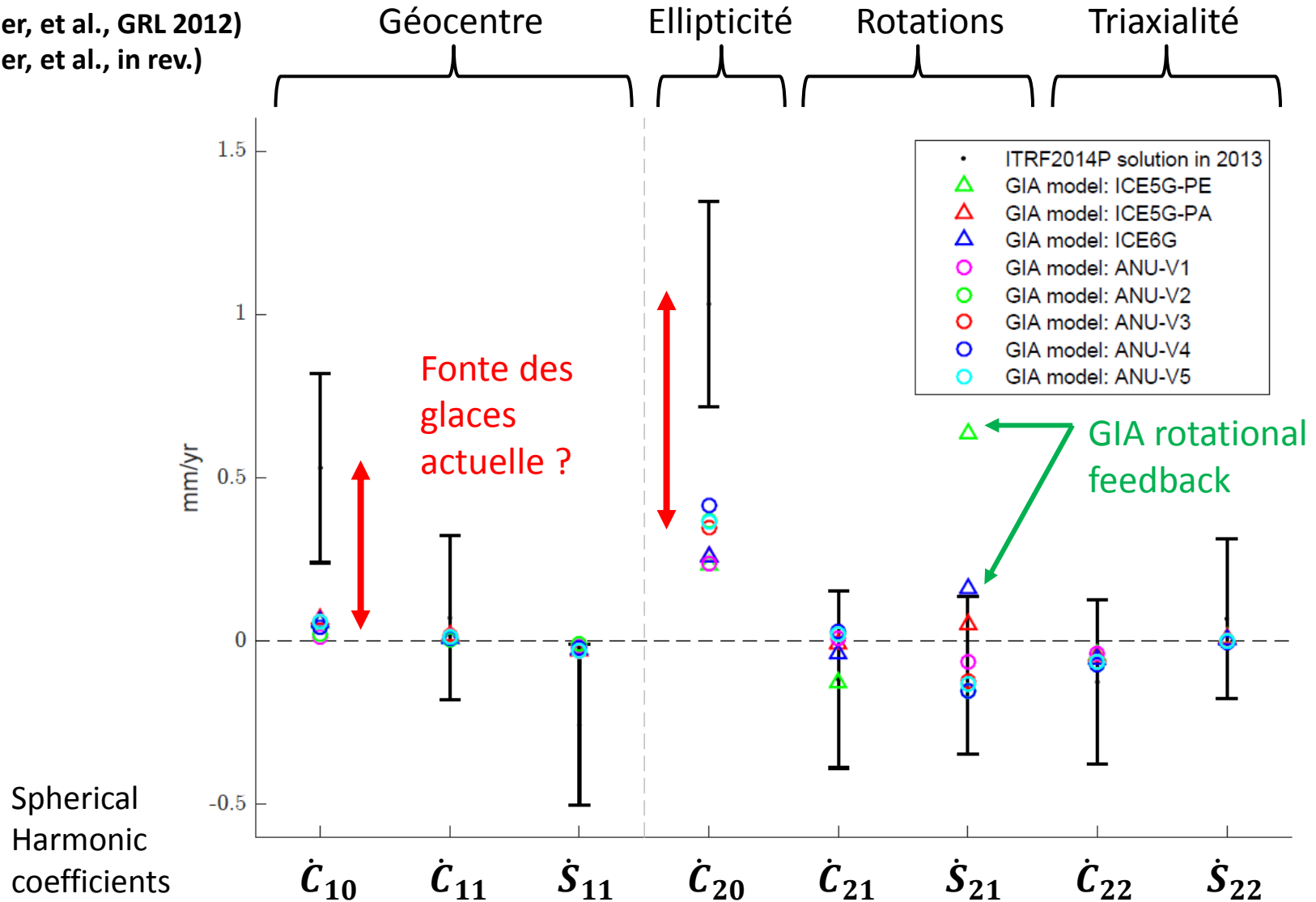


Spherical
Harmonic
coefficients

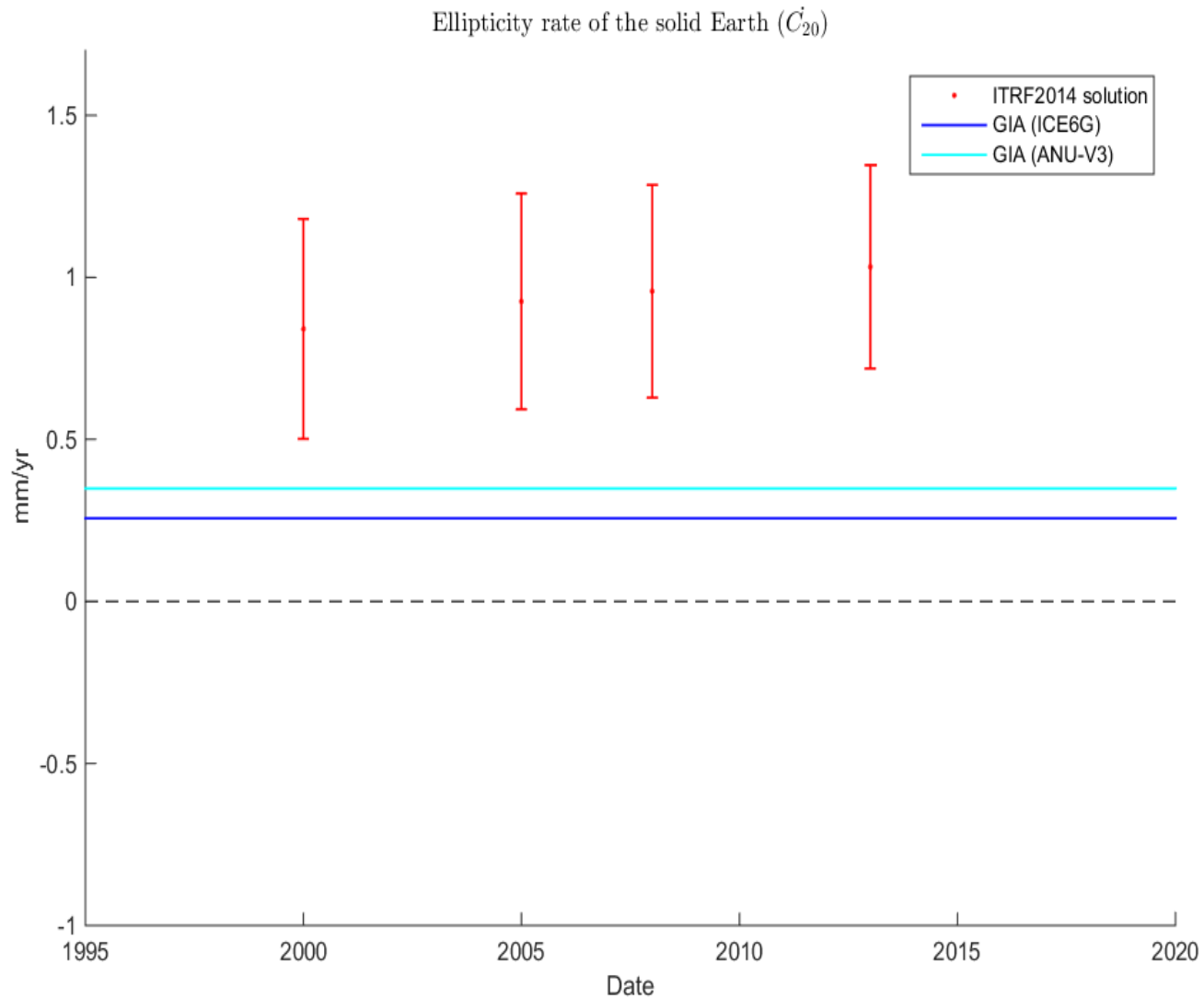
- ITRF2014P solution in 2013
- ▲ GIA model: ICE5G-PE
- ▲ GIA model: ICE5G-PA
- ▲ GIA model: ICE6G
- GIA model: ANU-V1
- GIA model: ANU-V2
- GIA model: ANU-V3
- GIA model: ANU-V4
- GIA model: ANU-V5

RÉSULTATS : COEFFICIENTS HS (2013)

(Métivier, et al., GRL 2012)
(Métivier, et al., in rev.)



VARIATIONS D'ELLIPTICITÉ DE LA TERRE SOLIDE



MOUVEMENTS DU GÉOCENTRE ET VARIATIONS DU J2

■ Problèmes :

- Mouvements de géocentre : il nous faudrait les vitesses horizontales corrigées de la tectonique des plaques.
- Variations du J2 (ellipticité du géoïde) : ne peuvent être déduites du C20 sans considérations rhéologiques.

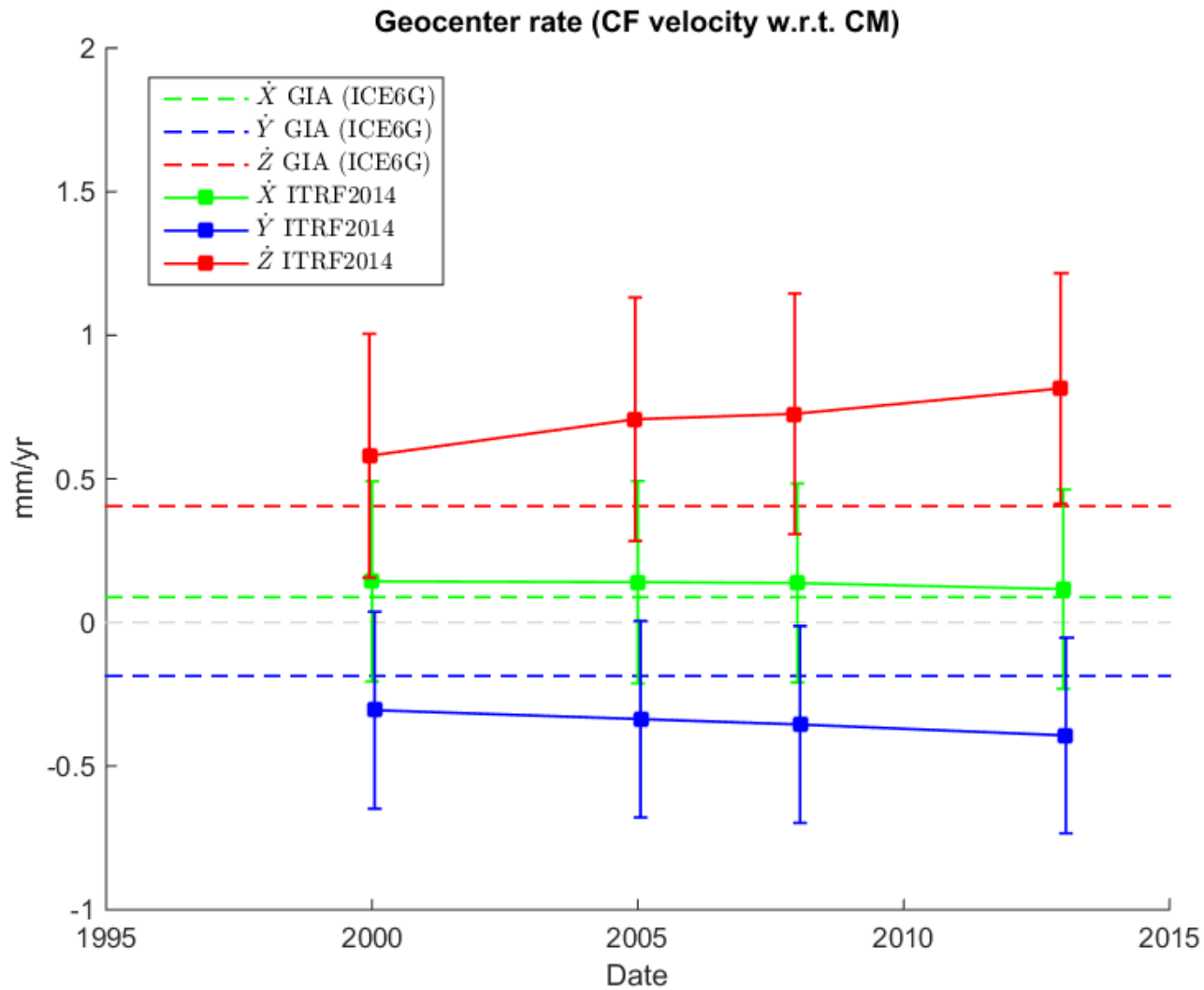
■ Méthode :

1. Considérant un modèle GIA donné,
2. Supposant que les différences de coefficients HS avec le GIA sont dues à la fonte des glaces actuelle,
3. Supposant classiquement que les déformations due à la fonte actuelle sont élastiques,



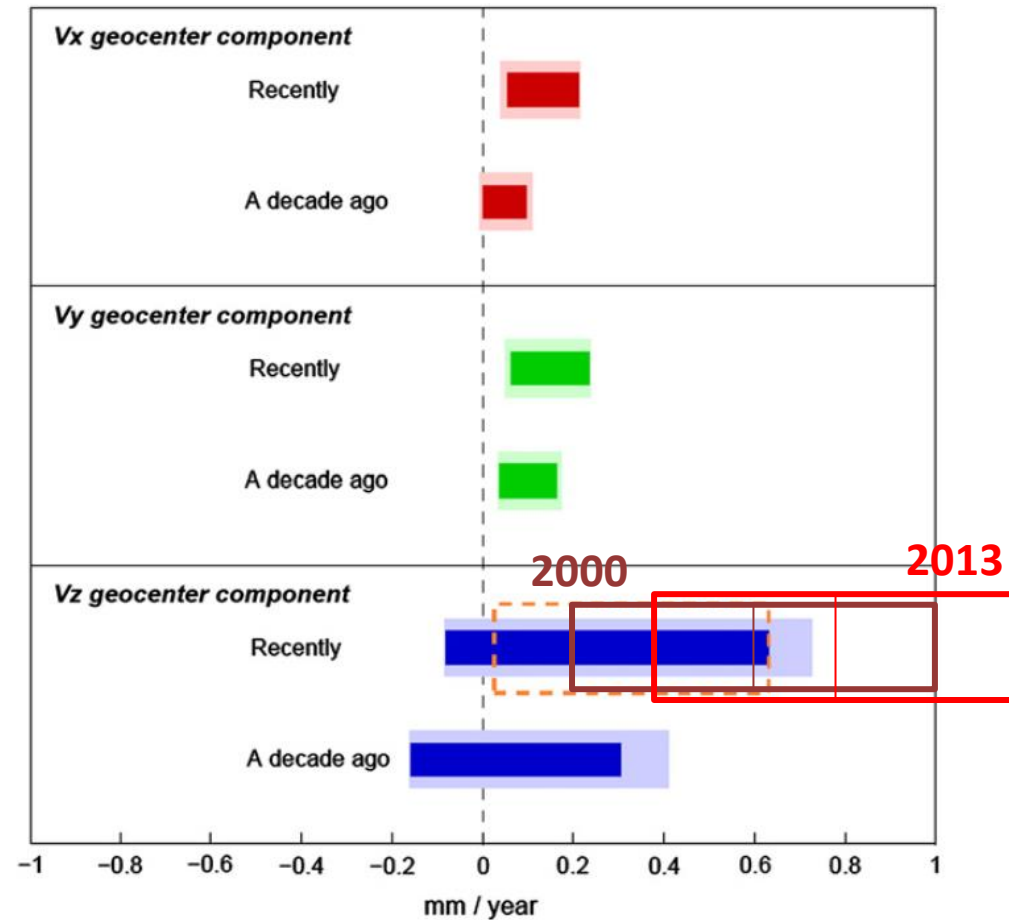
On peut alors estimer le mouvement du géocentre et les variations de J2 à partir de l'ITRF2014

MOUVEMENTS DU GÉOCENTRE



DIFFÉRENTES ESTIMATIONS DU MOUVEMENT DU GÉOCENTRE

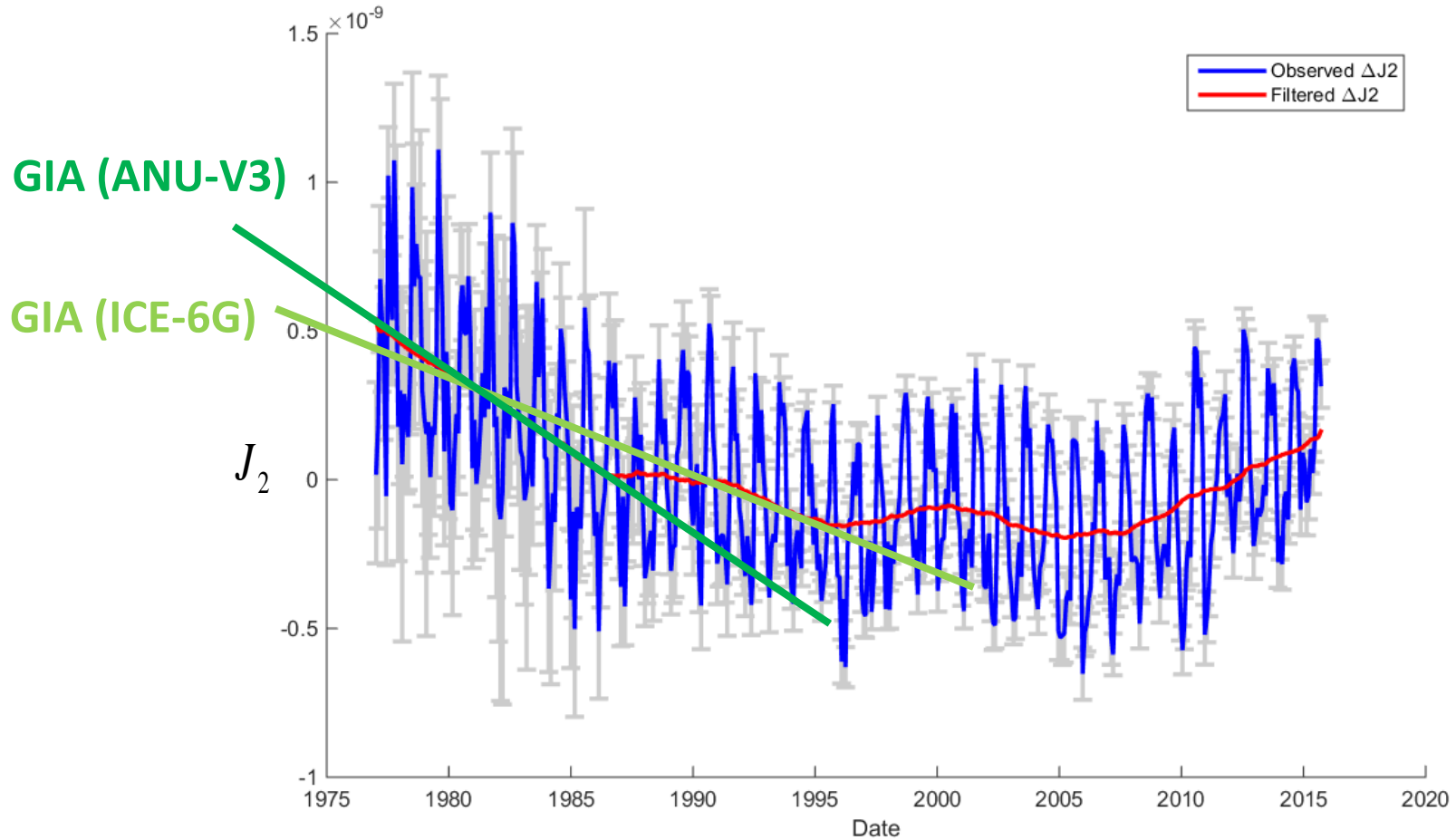
- Wu et al. (2011) : mouvement du géocentre ~ 0.5 mm/an (composante Z)
- Métivier et al. (2010) : modélisation géophysique (figure).
- ITRF2014 : mouvement du géocentre de 0.92 ± 0.50 mm/an en 2013.
- Evolution temporelle (composante Z) :
 - 2000 : 0.6 ± 0.4 mm/an
 - 2013 : 0.8 ± 0.4 mm/an



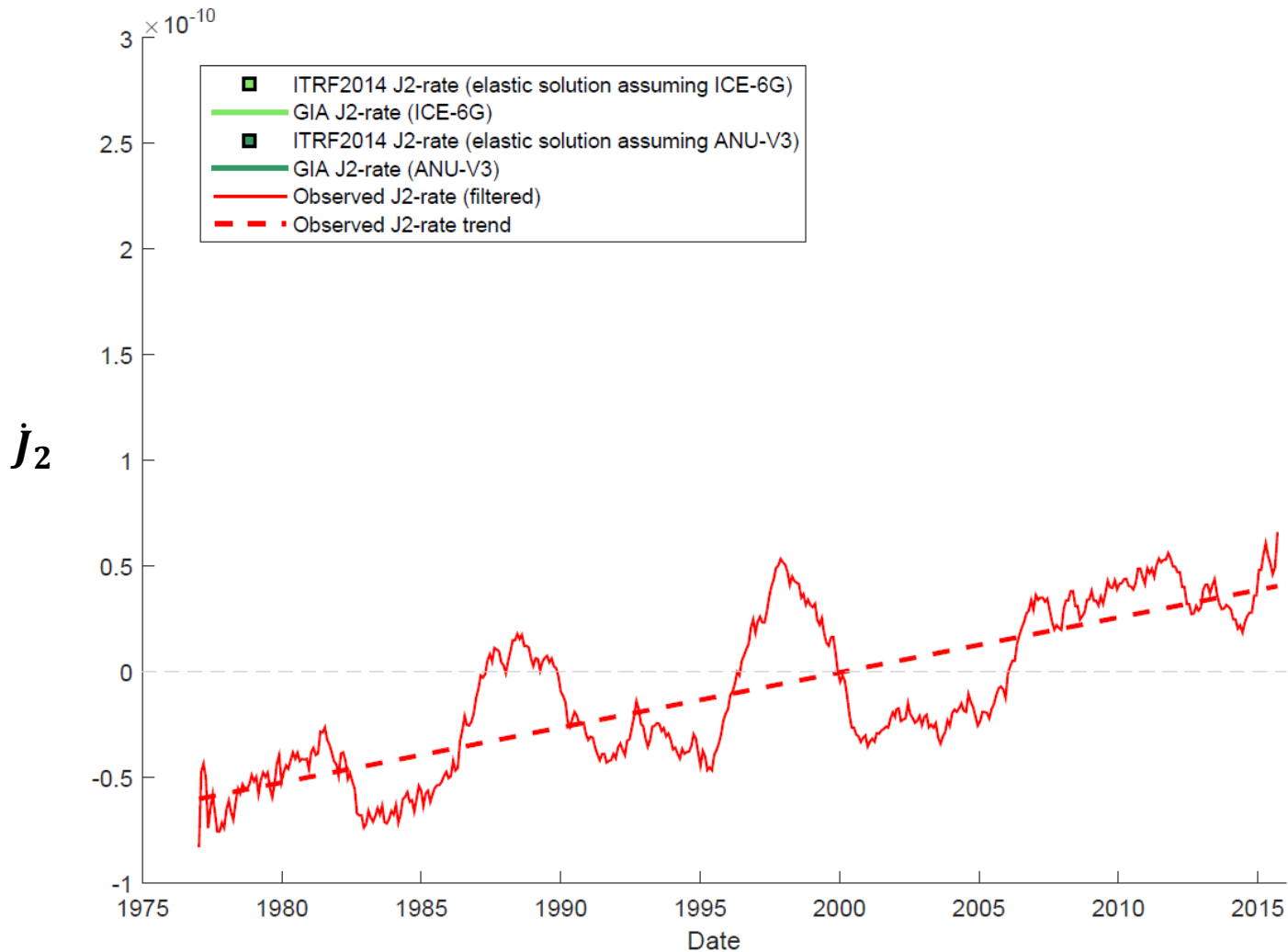
Métivier et al. (2010, 2011)

ANOMALIES DU J2 (ELLIPTICITÉ DU GÉOÏDE)

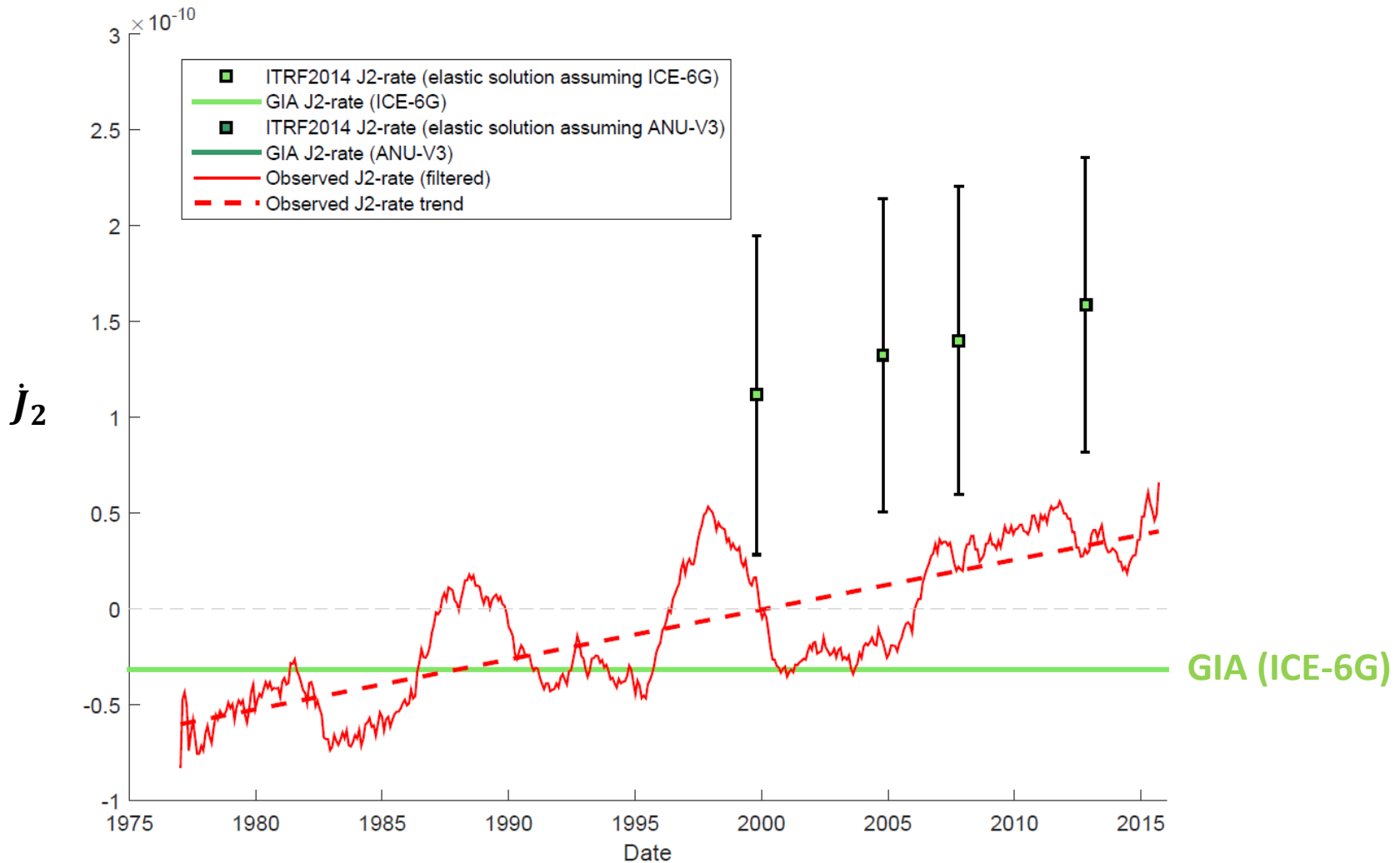
Observations : NASA/CSR



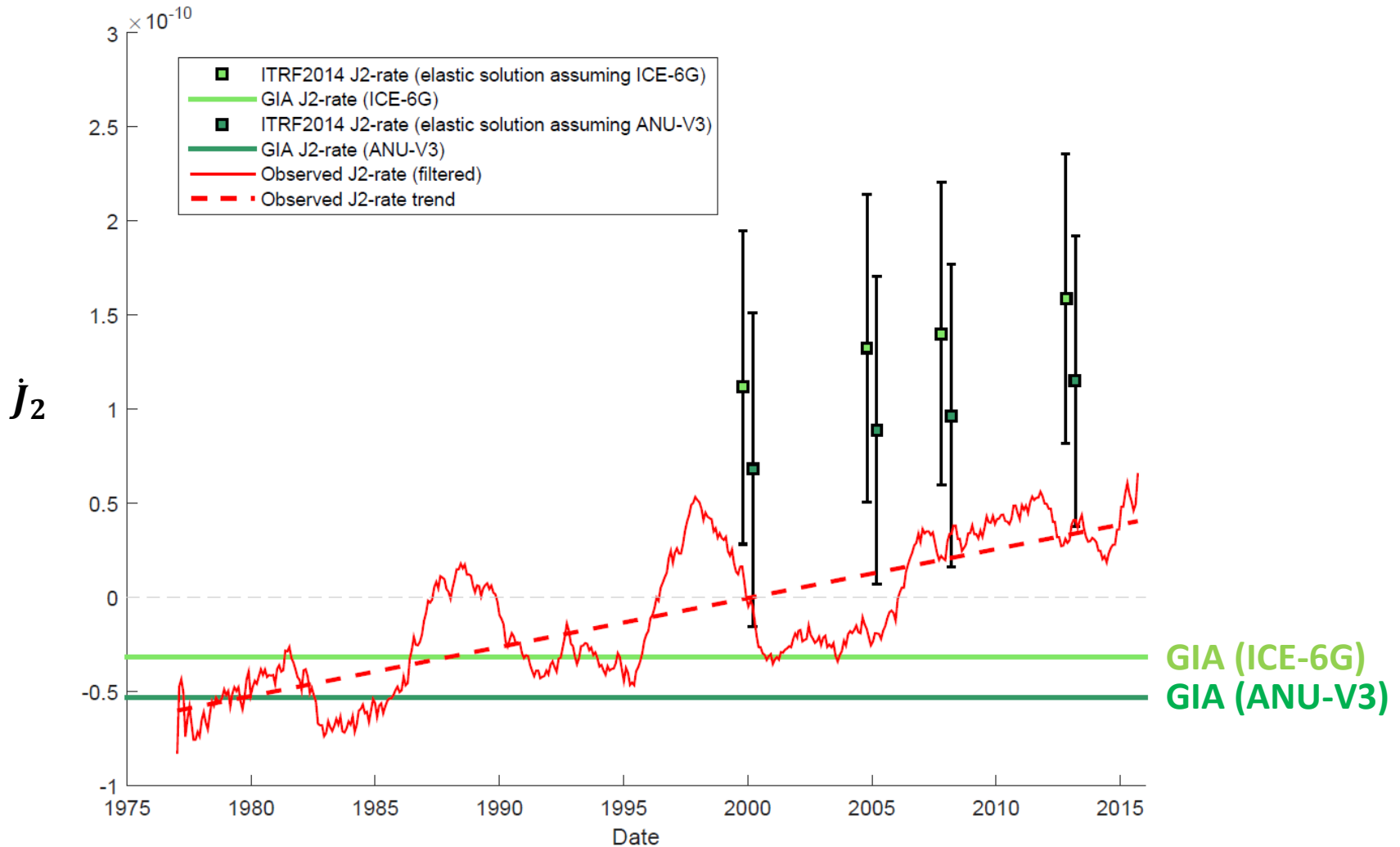
TAUX DE VARIATION DU J_2



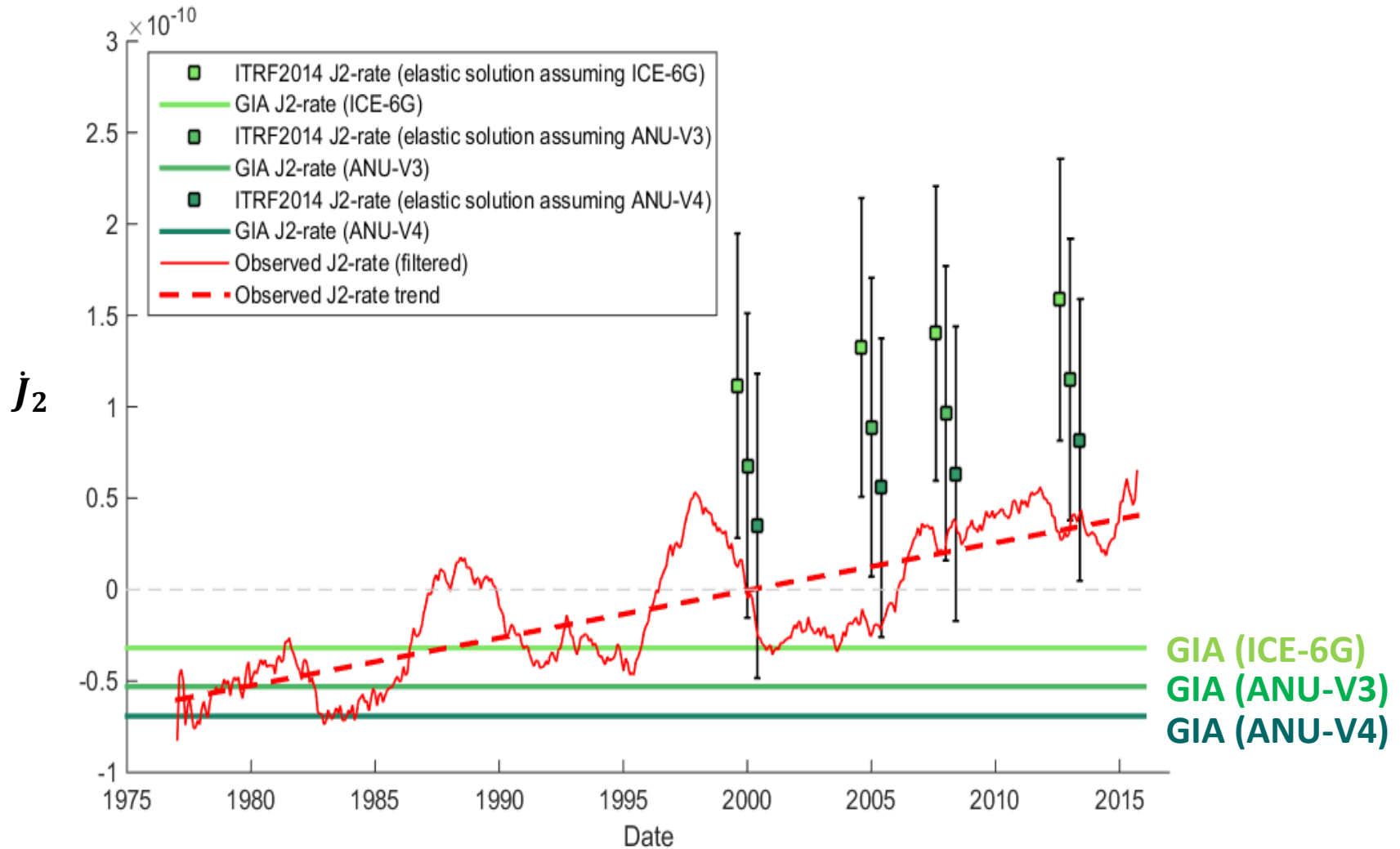
TAUX DE VARIATION DU J_2



TAUX DE VARIATION DU J_2

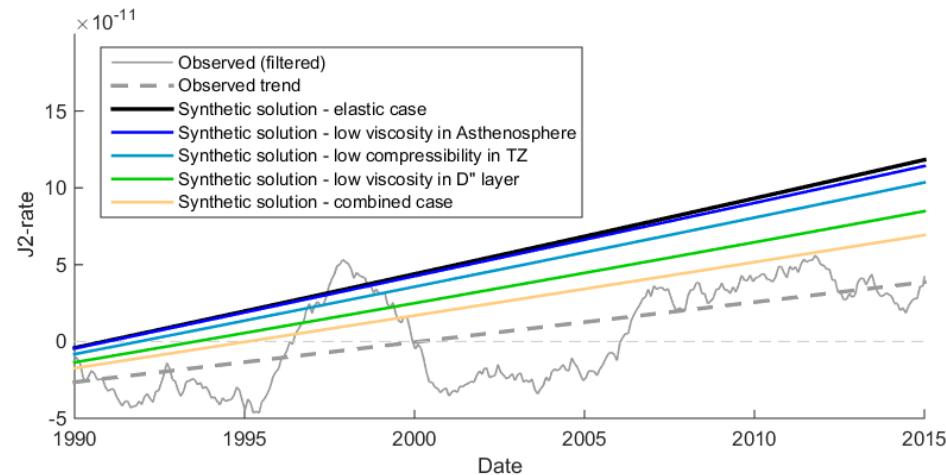
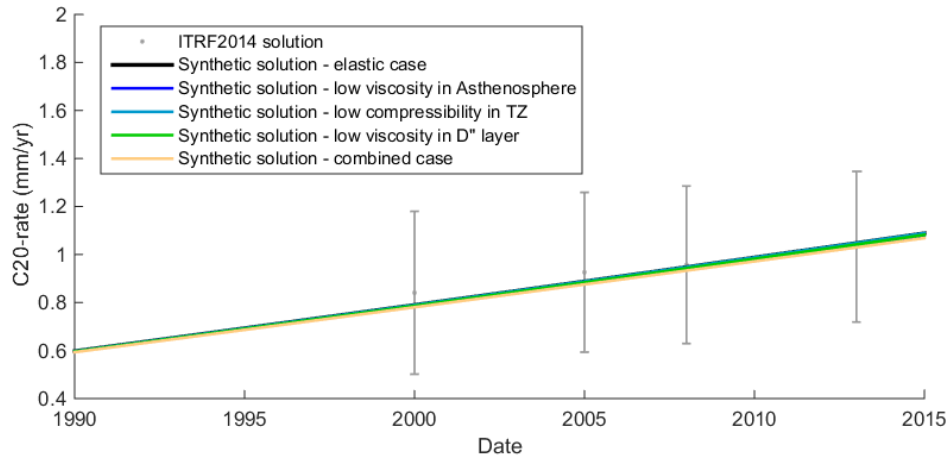


TAUX DE VARIATION DU J_2



GIA (ICE-6G)
GIA (ANU-V3)
GIA (ANU-V4)

ÉLASTICITÉ VS VISCO-ÉLASTICITÉ



- Introduire un peu de visco-élasticité permet de diminuer le taux de J2.
- Mais cela ne peut expliquer la totalité des écarts observés. Ce qui manque est probablement dû à la modélisation du GIA.

CONCLUSIONS

■ ITRF2014 – vitesses des stations :

- Solution précise qui évolue dans le temps au niveau des calottes polaires.
- Particularité : signature climatique sans précédent dans les vitesses verticales (fonte des glaces actuelle).
- Comment séparer l'impact de la tectonique, du GIA et des changements climatiques actuels ?

■ Vitesses horizontales :

- Nouveau modèle de tectonique des plaques (Altamimi et al., GJI 2017).
- Impact du GIA mésestimé et potentiellement fort.

■ Vitesses verticales :

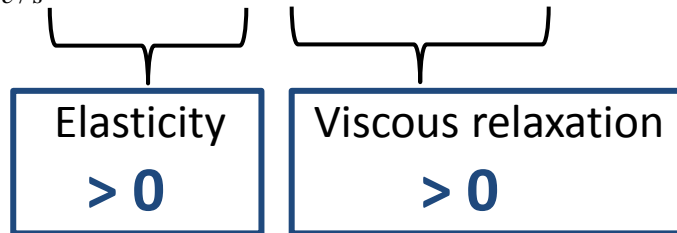
- Variations de figure de la Terre induites par le GIA et la fonte des glaces actuelle.
- La solution ITRF2014 tend à corroborer l'accélération de la fonte des glaces.
- Notre solution surestime le taux de J_2 , probablement parce que l'on néglige la relaxation visqueuse et/ou que les modèles GIA sont imprécis.

MERCI

ÉLASTICITÉ VS VISCO-ÉLASTICITÉ

Vitesses verticales :

$$v_r(\theta, \lambda, t) = \frac{1}{g_0} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{i=c/s} \left(h_n^E V_{nm}^{ice}(t) + h_n^V(t) * V_{nm}^{ice}(t) \right) Y_{nm}^i(\theta, \lambda)$$



Nombres de Love :

$$h_n^E, k_n^E, h_n^V(t), k_n^V(t)$$

Potentiel charge glace :

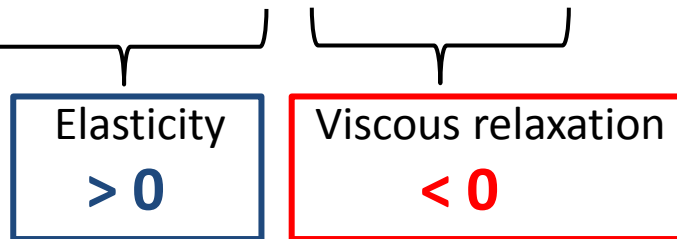
$$V_{nm}^{ice}(t)$$

Harmonique sphérique :

$$Y_{nm}^i(\theta, \lambda)$$

Perturbations du potentiel de gravité :

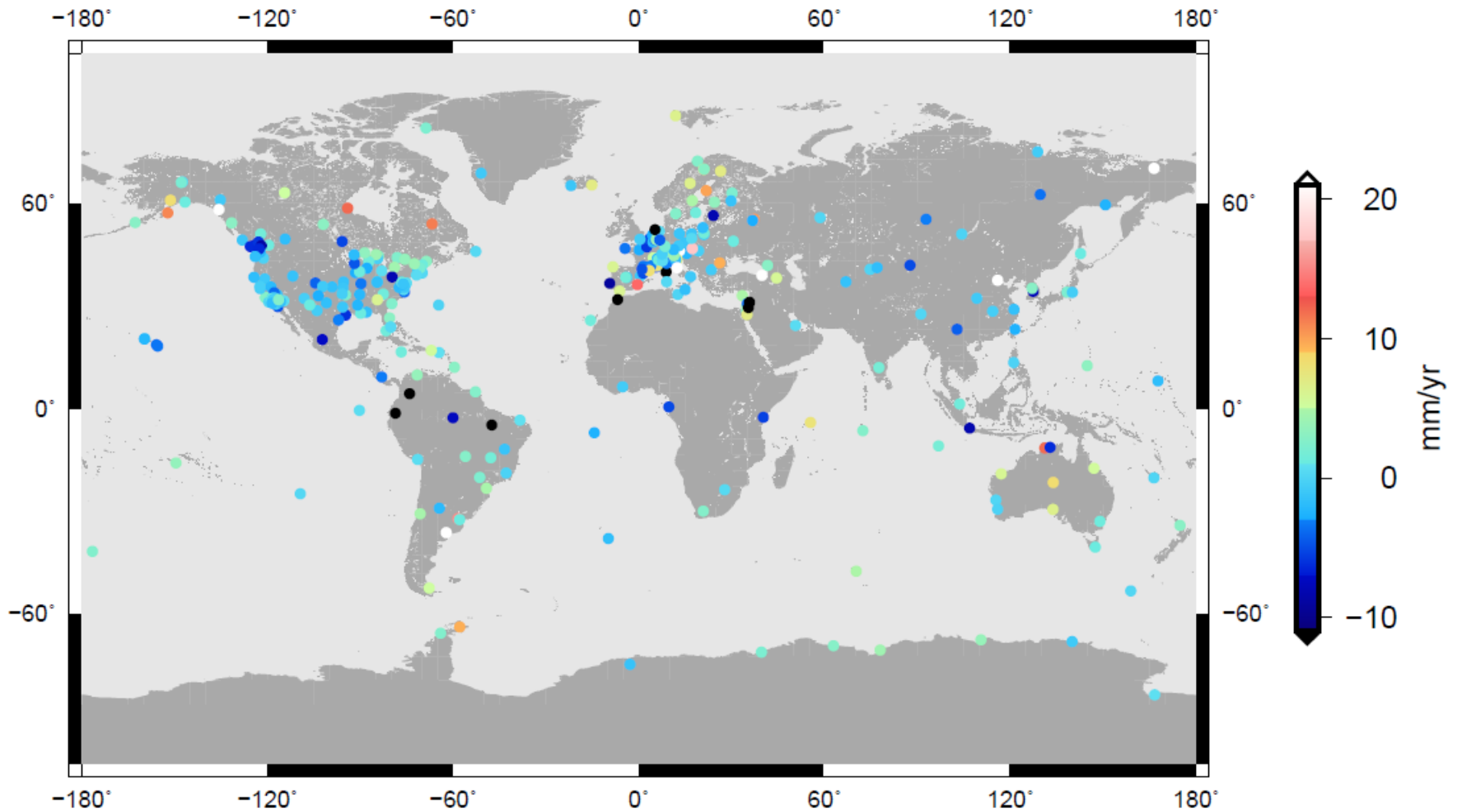
$$\phi(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{i=c/s} \left((1 + k_n^E) V_{nm}^{ice}(t) + k_n^V(t) * V_{nm}^{ice}(t) \right) Y_{nm}^i(\theta, \lambda)$$



Adding viscous relaxations in RIM deformations would increase solid Earth vertical motions and the C_{20} coefficient, but decrease gravitational potential perturbations and the J_2 -rate.

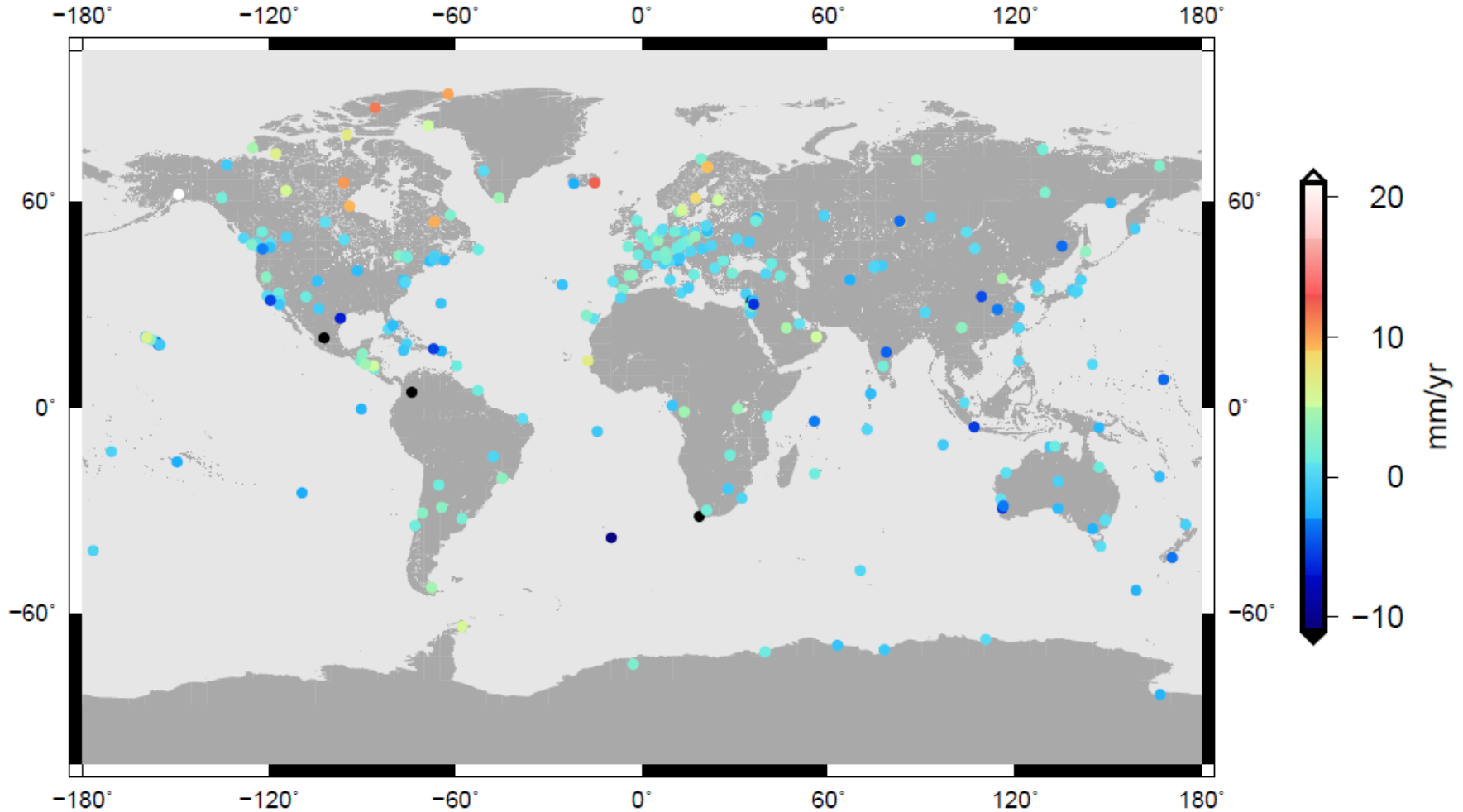
VERTICAL VELOCITIES: ITRF2000

ITRF2000-GNSS vertical velocities

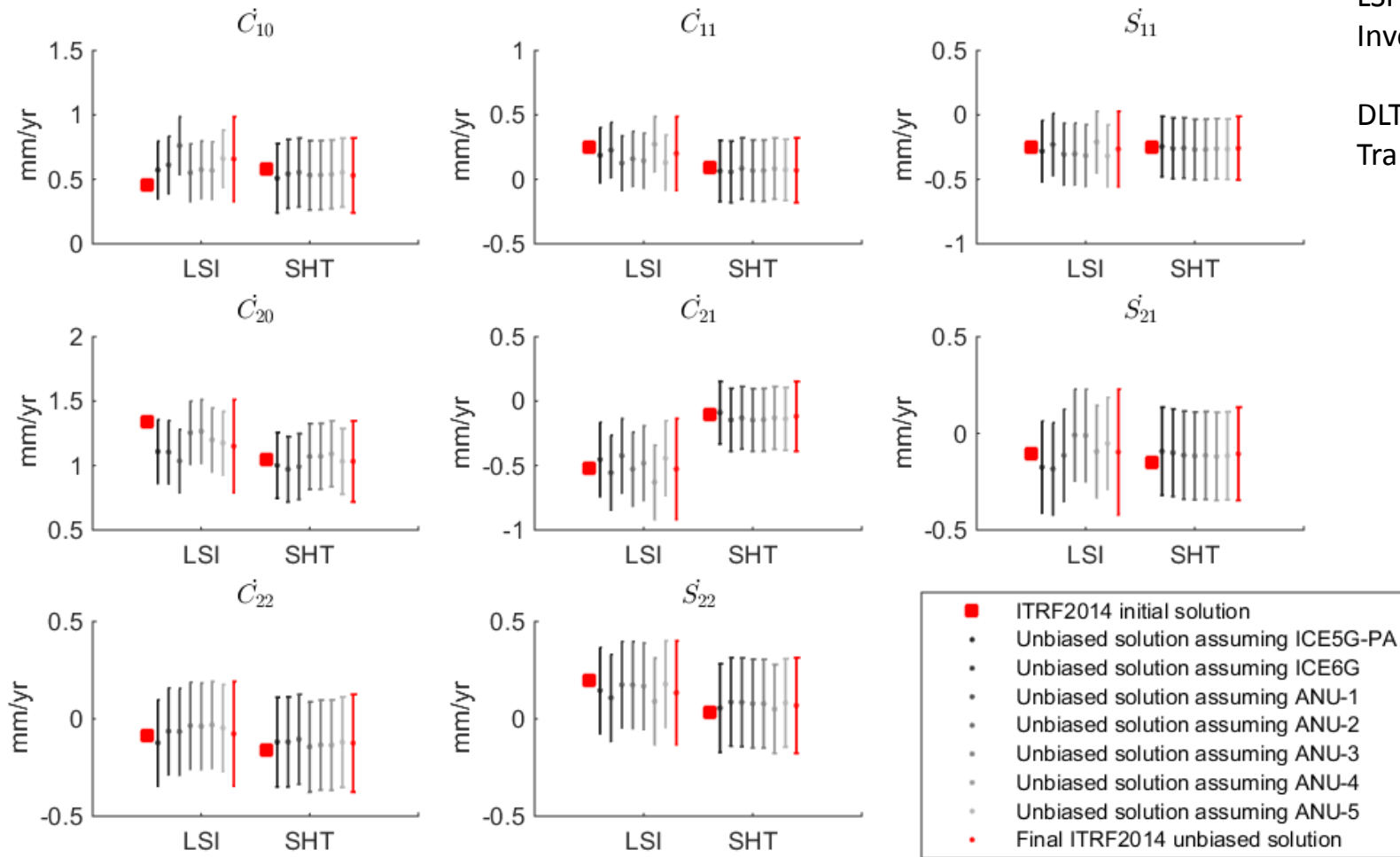


VERTICAL VELOCITIES: ITRF2005

ITRF2005-GNSS vertical velocities



« UNBIASED » SOLUTIONS

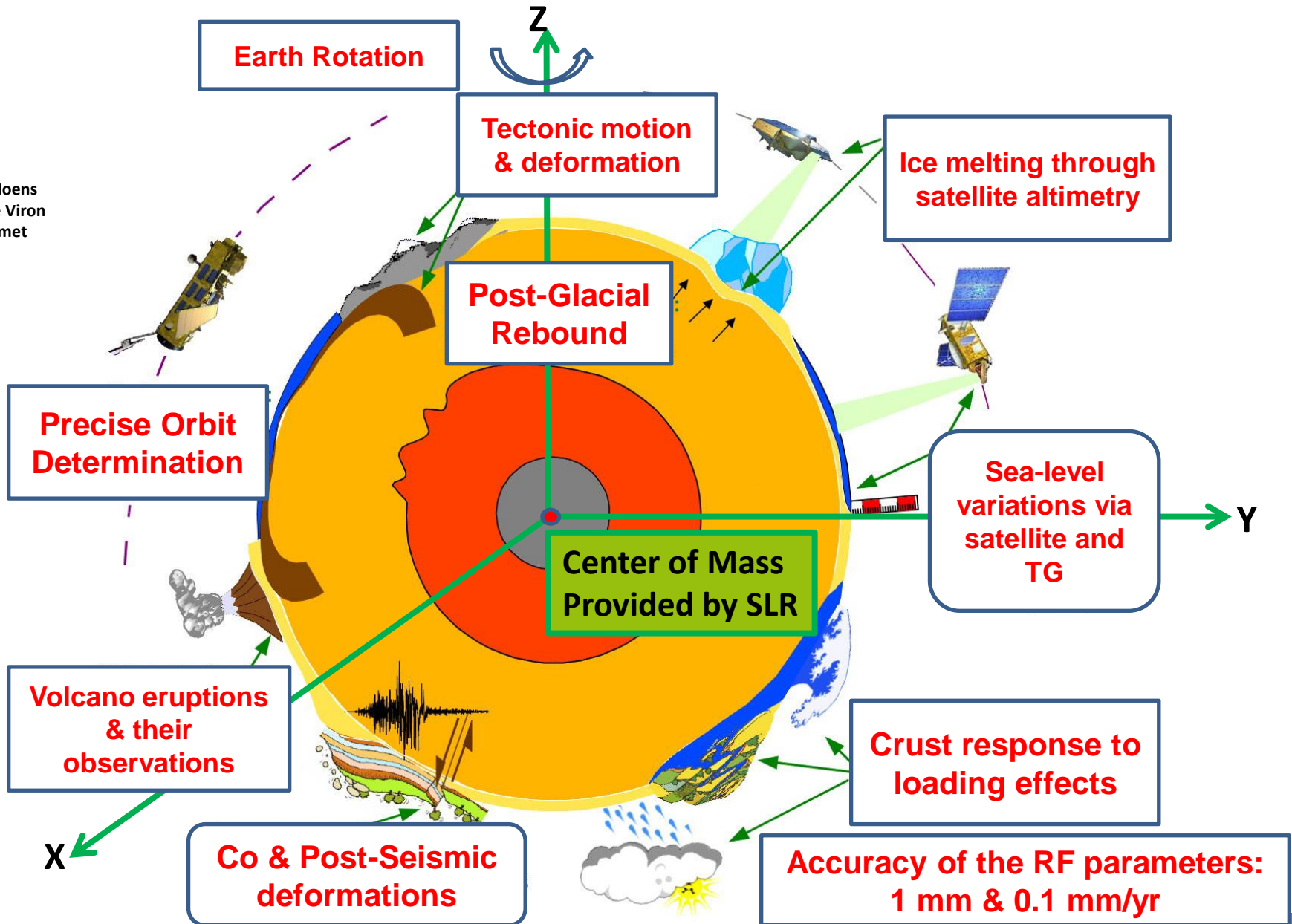


LSI : Least Square Inversion

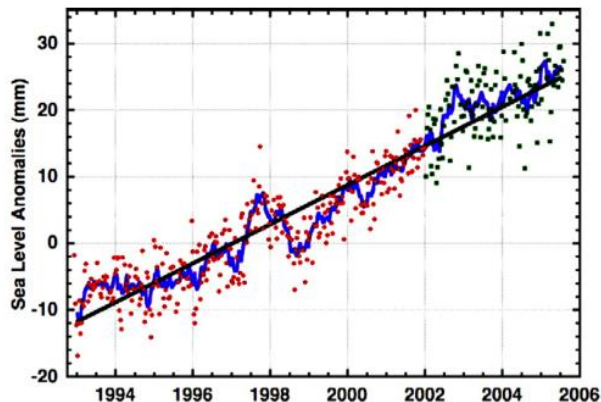
DLT : Direct Legendre Transform

THE ITRF & EARTH SCIENCE APPLICATIONS

Image:
© Thierry Moens
© Olivier de Viron
© Olivier Jamet
© ZA
© ESA
© CNES



VARIATIONS DU NIVEAU DES MERS

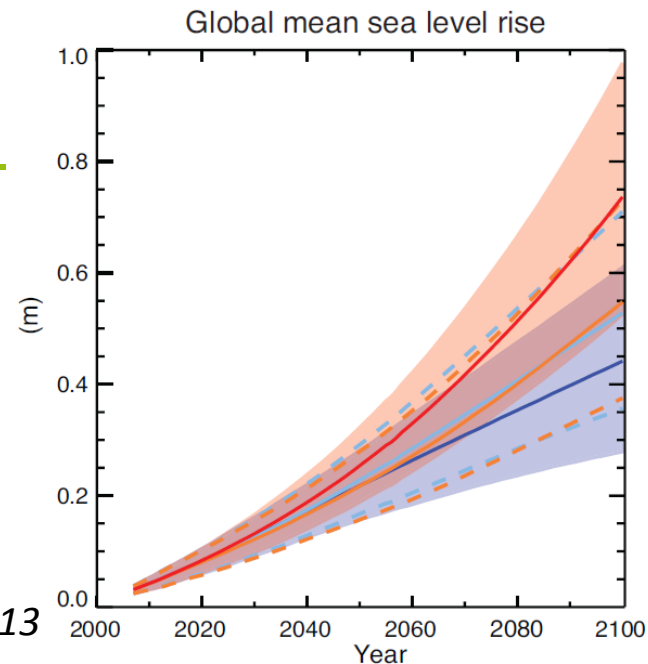


Nerem (2006)

Élévation moyenne du niveau des océans :

3,0-3,5 mm/an
(Altimétrie satellitaire)

IPCC Climate Change 2013



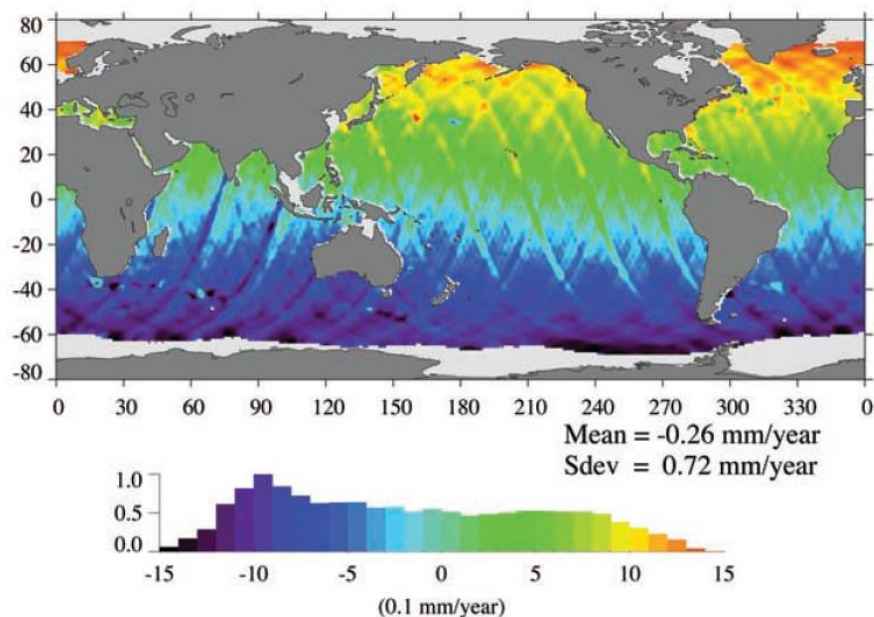
Erreur due au référencement :

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

~**0.5 mm/an** sur le niveau moyen des mers

~**2 mm/an** sur les variations régionales du niveau des mers

Objectifs : 1 mm & 0.1 mm/an



Beckley et al. (2007)