

Déformations induites par les charges superficielles

Jean-Paul Boy,

Pierre Baudet, Anthony Mémin, Patrice Ulrich,
Bryant Loomis and Scott Luthcke

Déformations induites par les charges superficielles

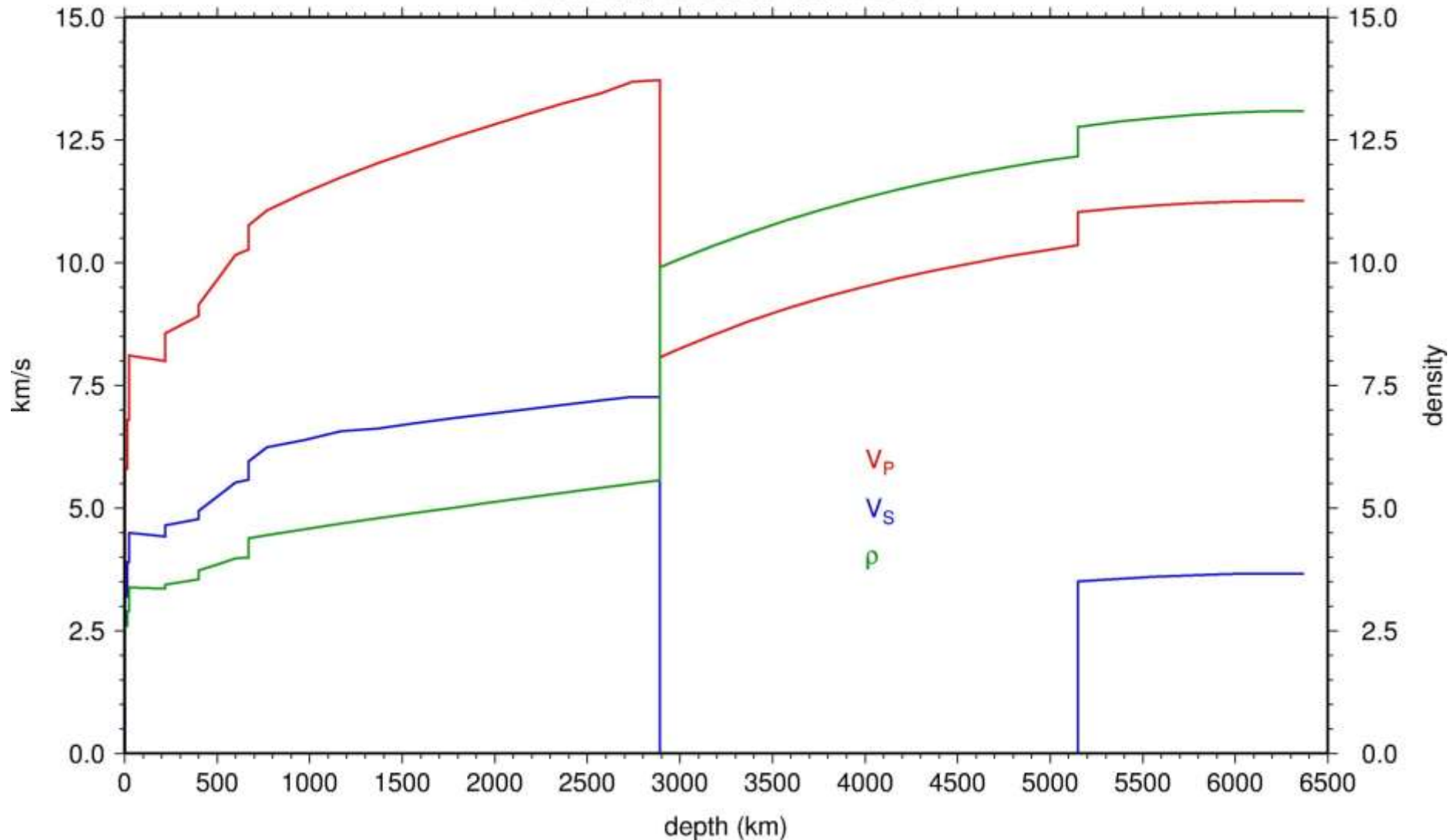
- Modélisation des charges superficielles
 - Systèmes de référence
 - Contenu spectral des charges environnementales
- Solutions GPS globales avec prise en compte des charges
 - Baromètre inversé / réponse dynamique des océans (TUGO-m)
 - Modèle hydrologique / solution GRACE
 - Corrections a priori / a posteriori
- Conclusion et perspectives

Déformations induites par les charges superficielles

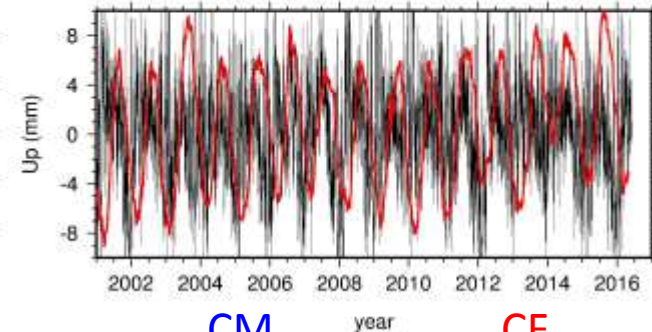
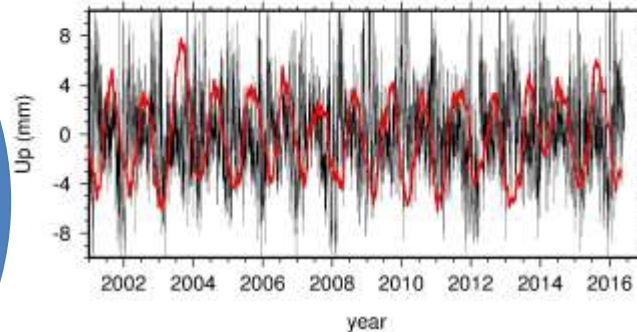
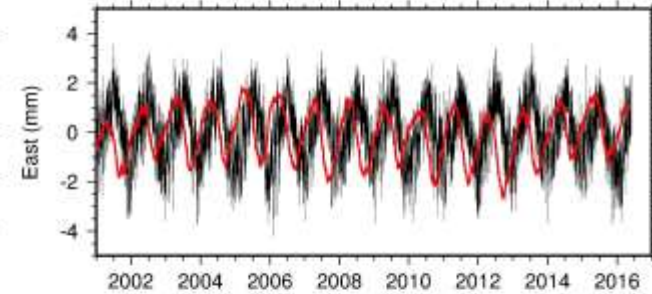
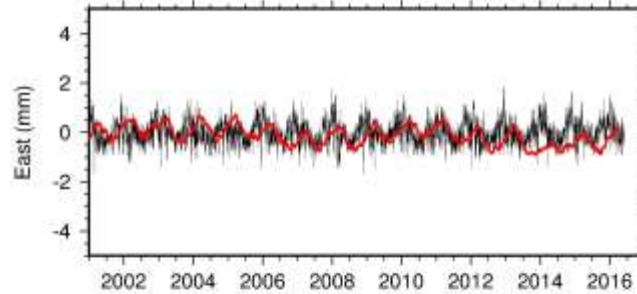
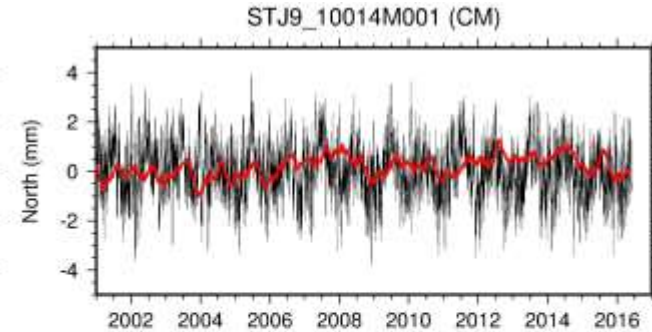
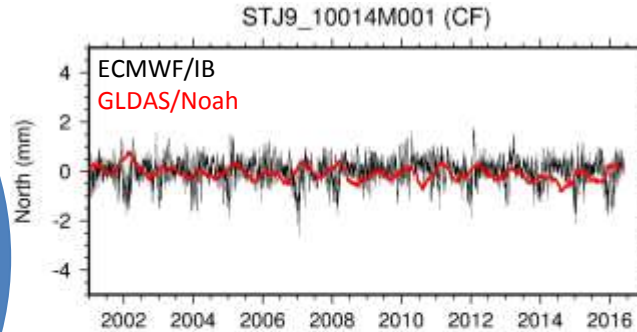
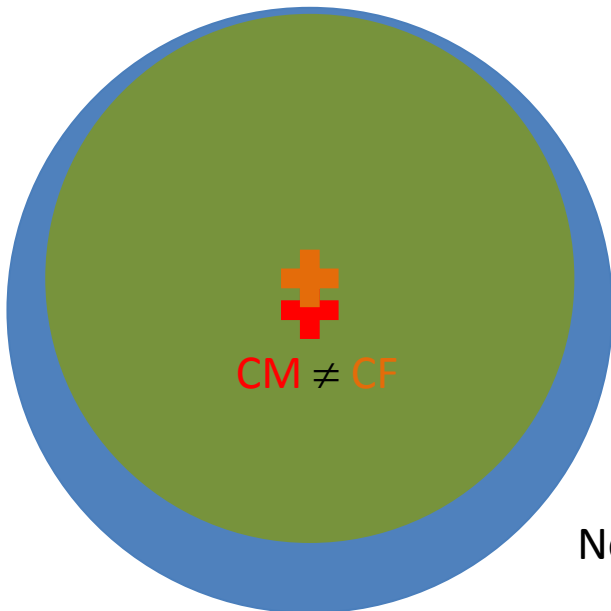
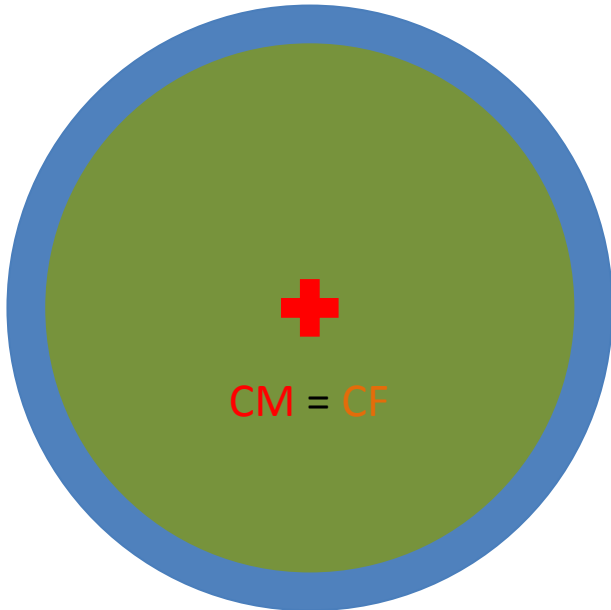
- Modélisation des charges superficielles
 - Systèmes de référence
 - Contenu spectral des charges environnementales
- Solutions GPS globales avec prise en compte des charges
 - Baromètre inversé / réponse dynamique des océans (TUGO-m)
 - Modèle hydrologique / solution GRACE
 - Corrections a priori / a posteriori
- Conclusion et perspectives

Modèle de Terre (SNREI)

Preliminary Reference Earth Model



Modélisation des charges / Système de Référence



CM

CF

$$h_1' = -1.286$$

$$h_1' = -0.286$$

$$l_1' = -0.896$$

$$l_1' = +0.104$$

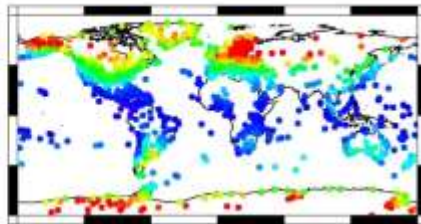
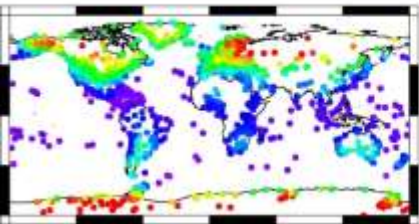
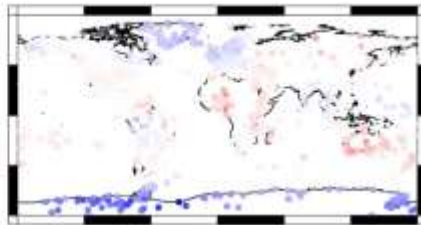
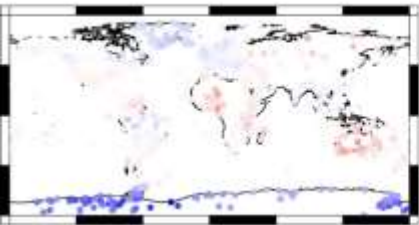
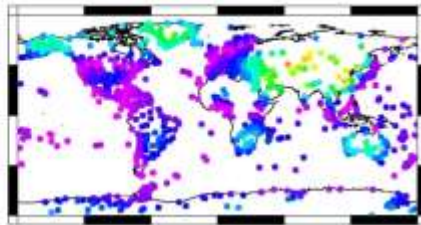
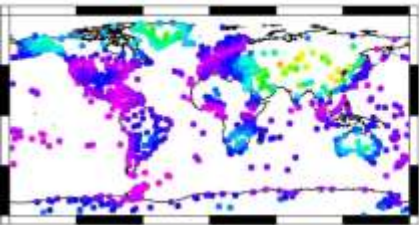
Nombre de Love (élastique) de degré 1

Charges atmosphériques , océaniques induites et hydrologiques

Atmosphère & réponse océanique induite

ECMWF / IB

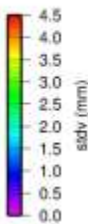
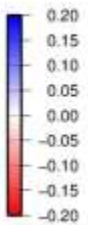
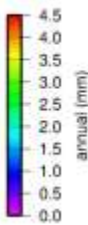
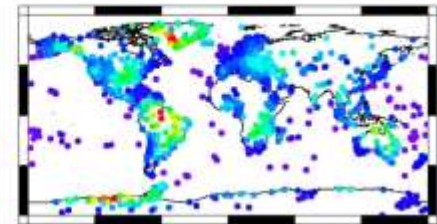
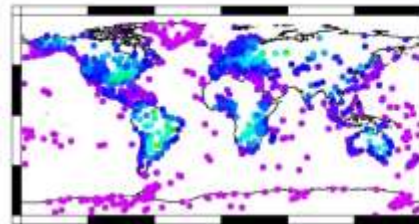
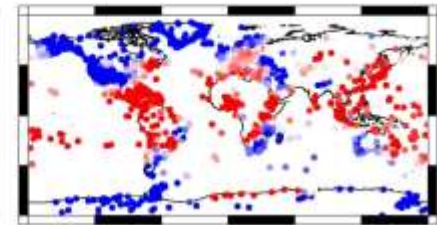
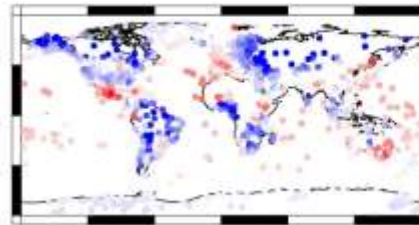
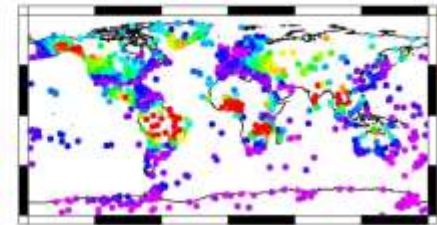
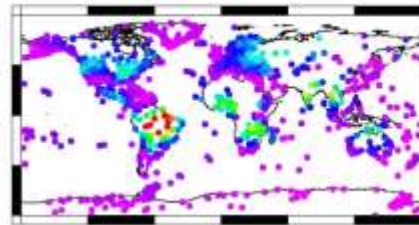
ECMWF + TUGO-m



Hydrologie (pas de "glace" dans GLDAS)

GLDAS/Noah

GRACE



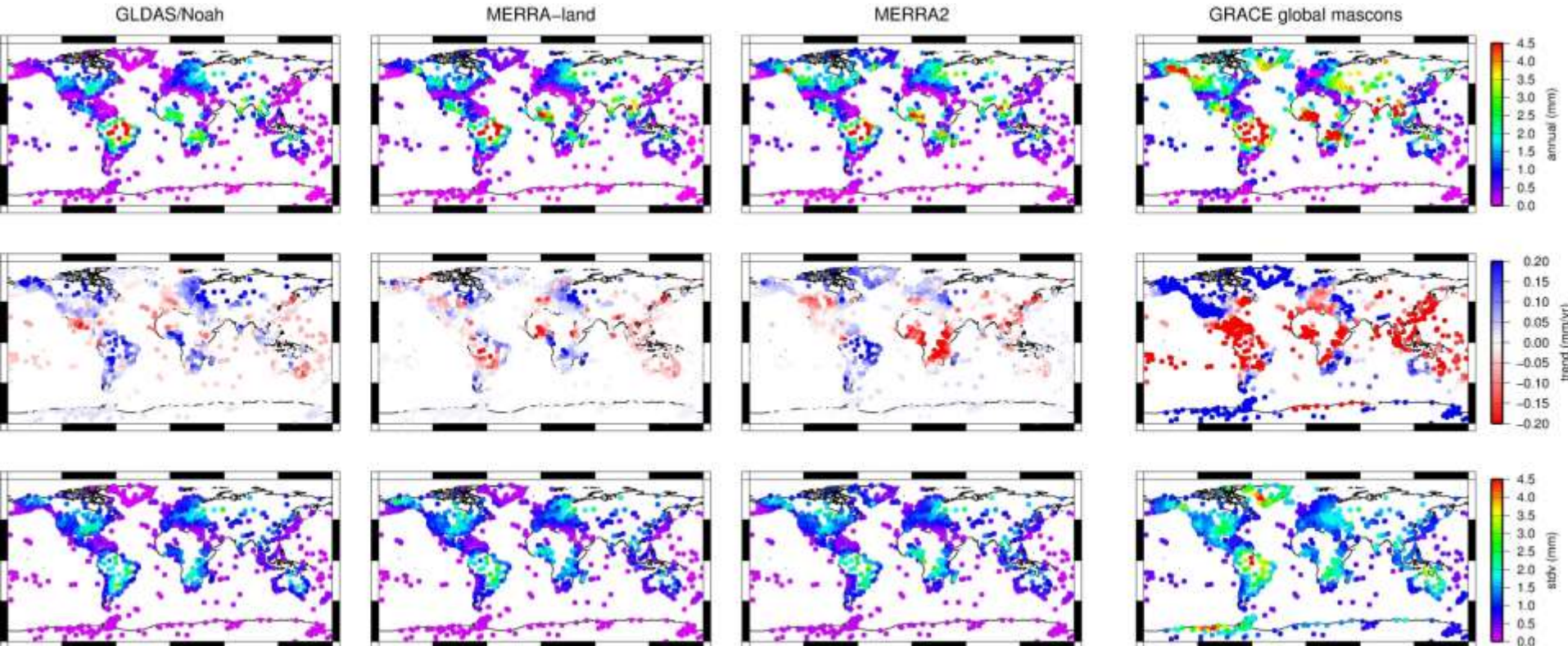
Référentiel : Centre de Figure

Période : 2002 – 2016 – champs à 3 heures et $\sim 0.25^\circ$, sauf GRACE (1 mois et 1°)

Comparaisons entre différents modèles hydrologiques et GRACE

Modèles hydrologiques

GRACE



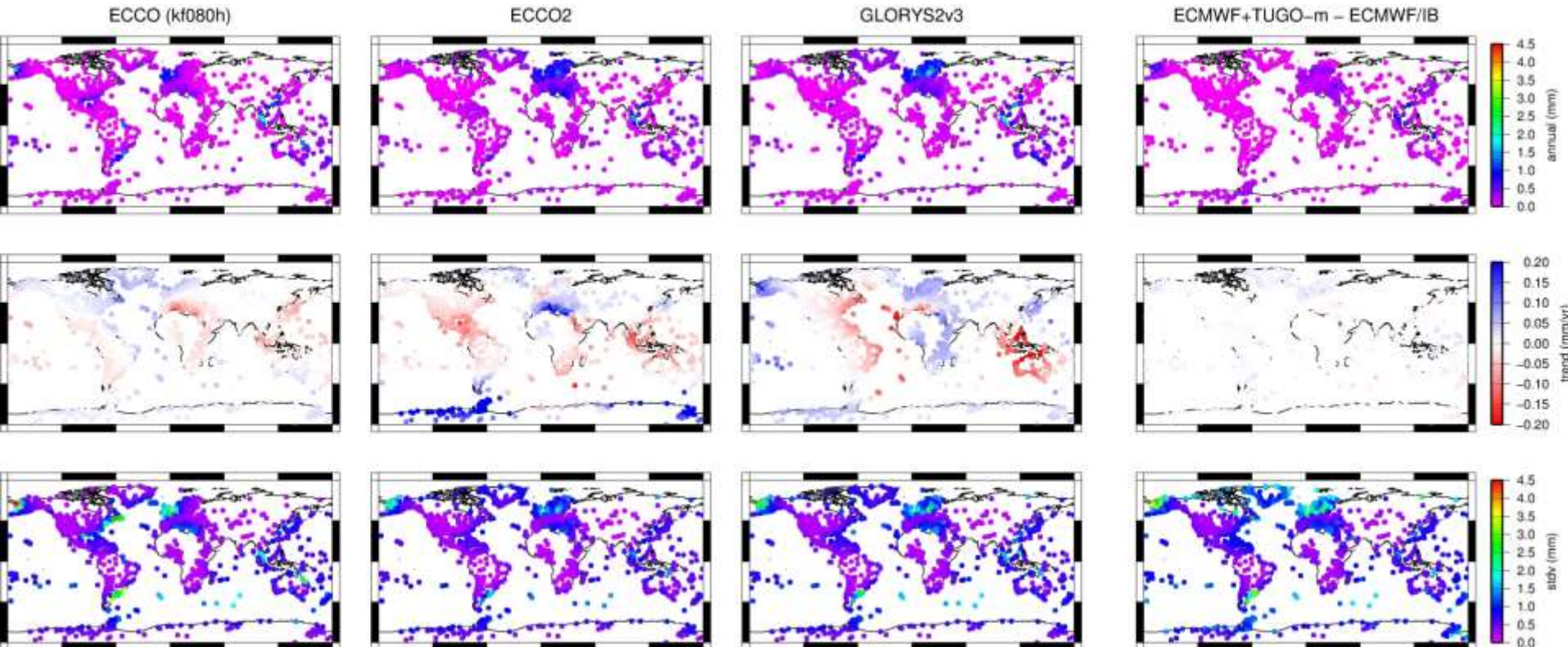
Pas de différences significatives pour le saisonnier et la variabilité.
Ecart significatif pour les tendances.

Période : 2002 – 2016 – champs à 3 heures (GLDAS/Noah) et 1 heure (MERRA-land & MERRA2)

Différences entre TUGO-m et les modèles de circulation barocline

Modèles baroclines (circulation)

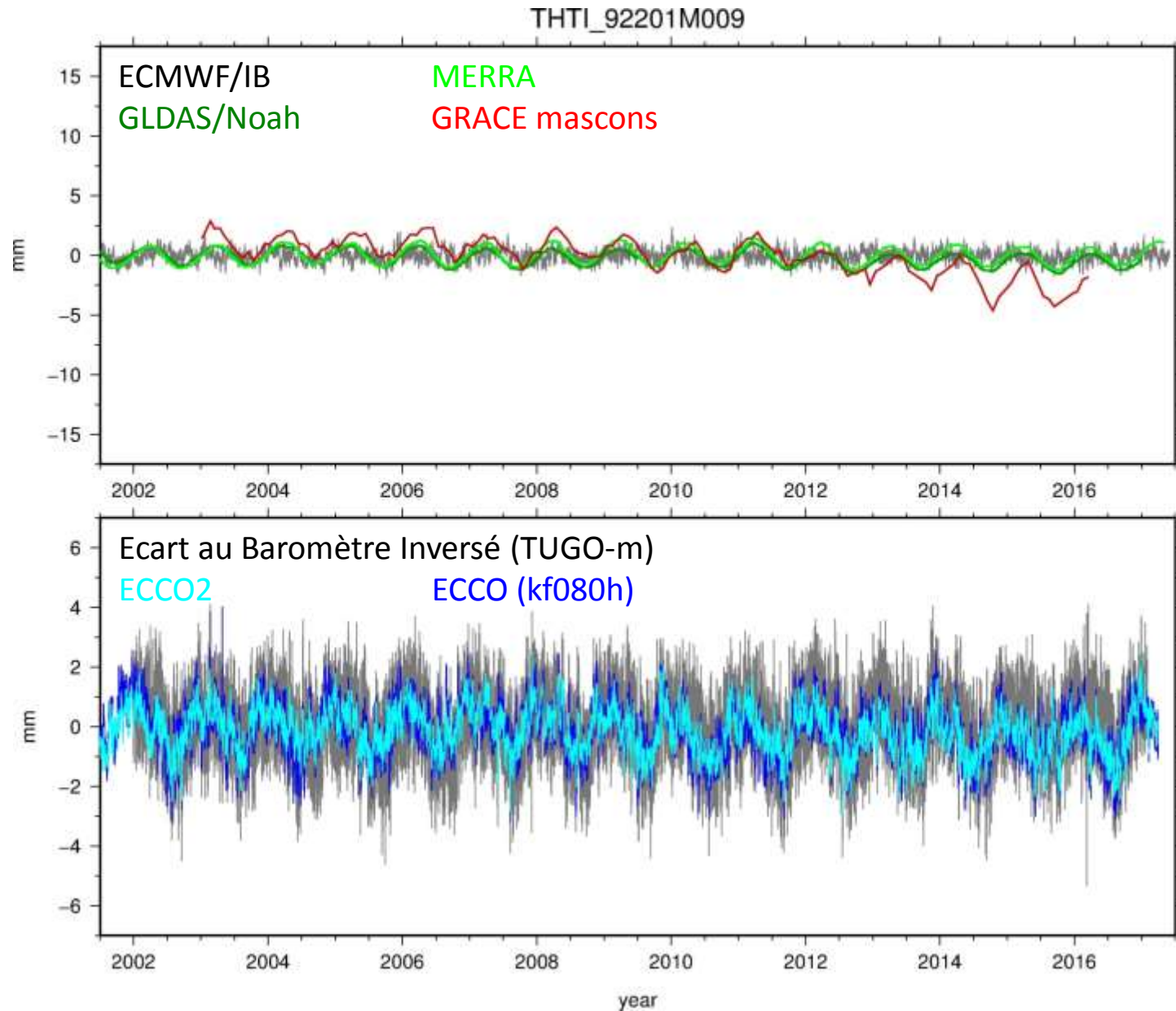
Modèle barotrope



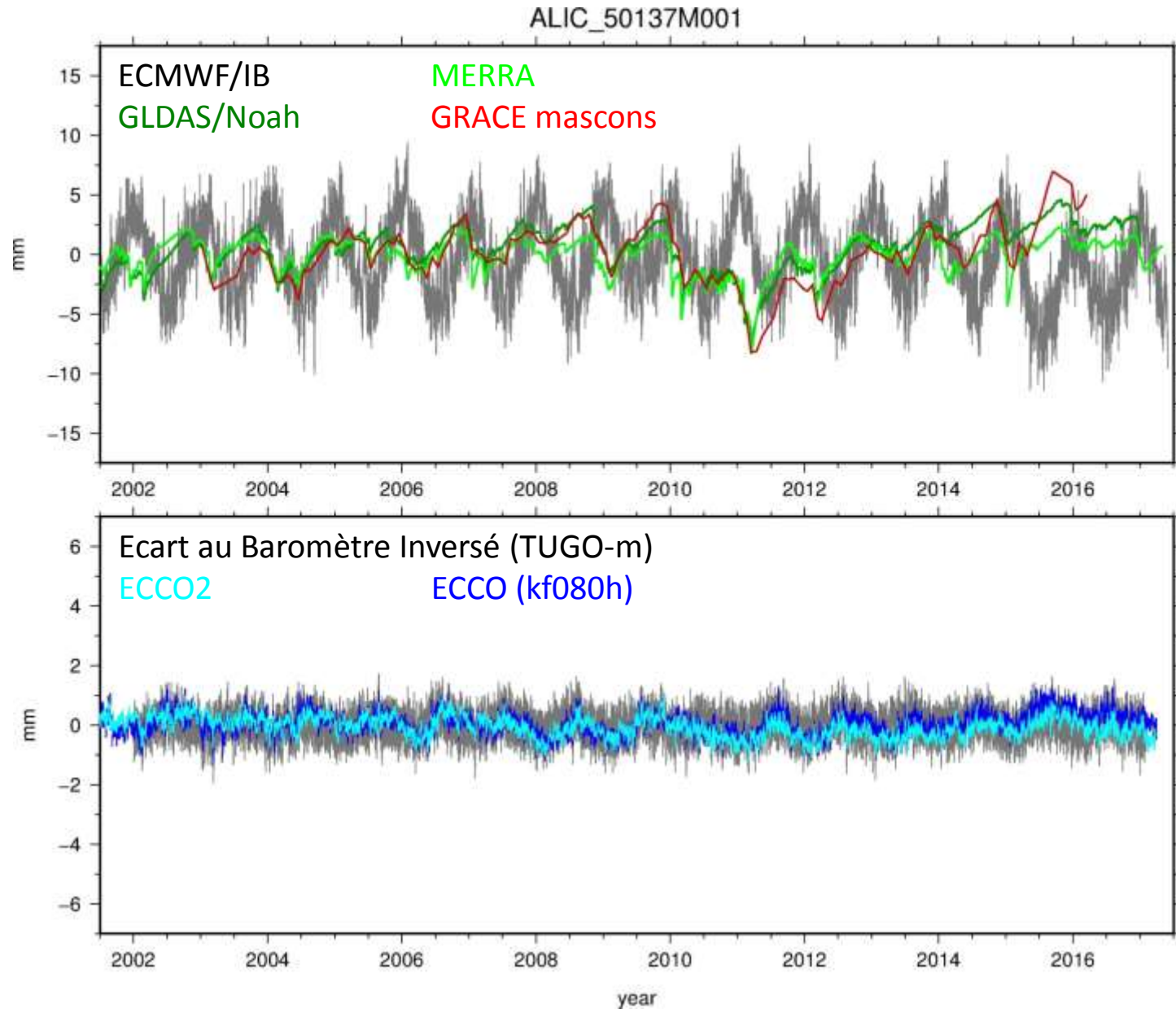
Les modèles baroclines (ECCO, ECCO2 & GLORYS) sont forcés par les vents, les flux d'eau douce (P-E) et de chaleur.

Le modèle barotrope (TUGO-m) est forcé par les vents et la pression atmosphérique.

Exemple de séries temporelles : Tahiti

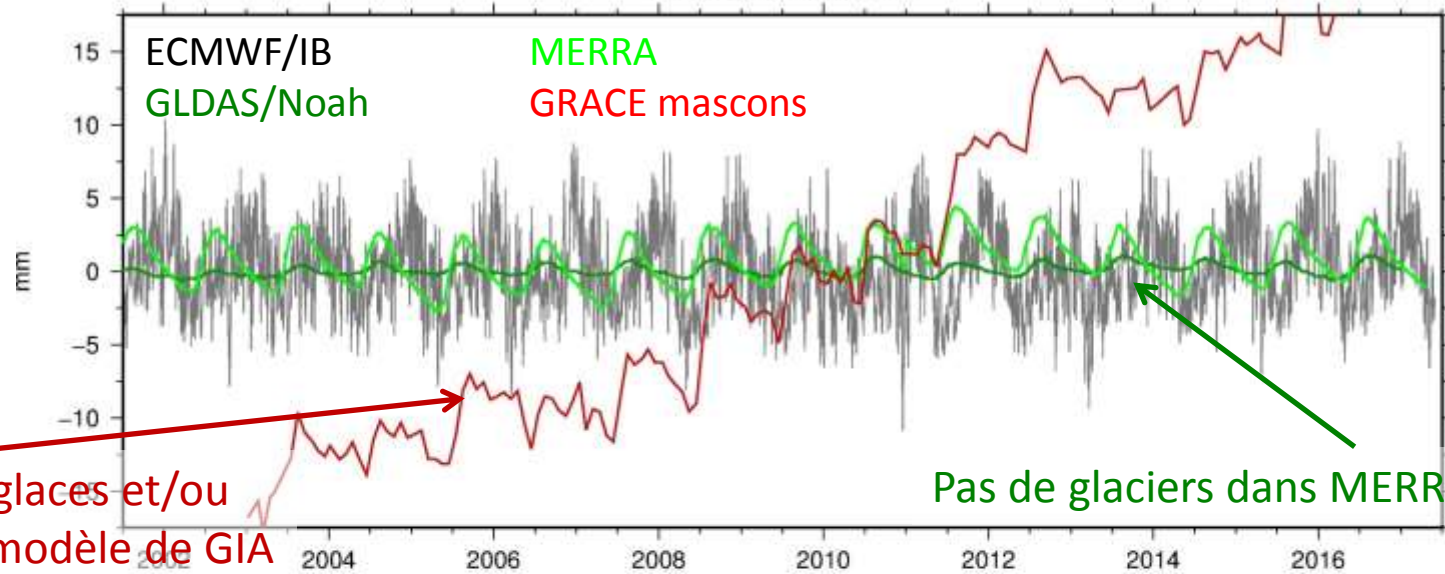


Exemple de séries temporelles : Australie



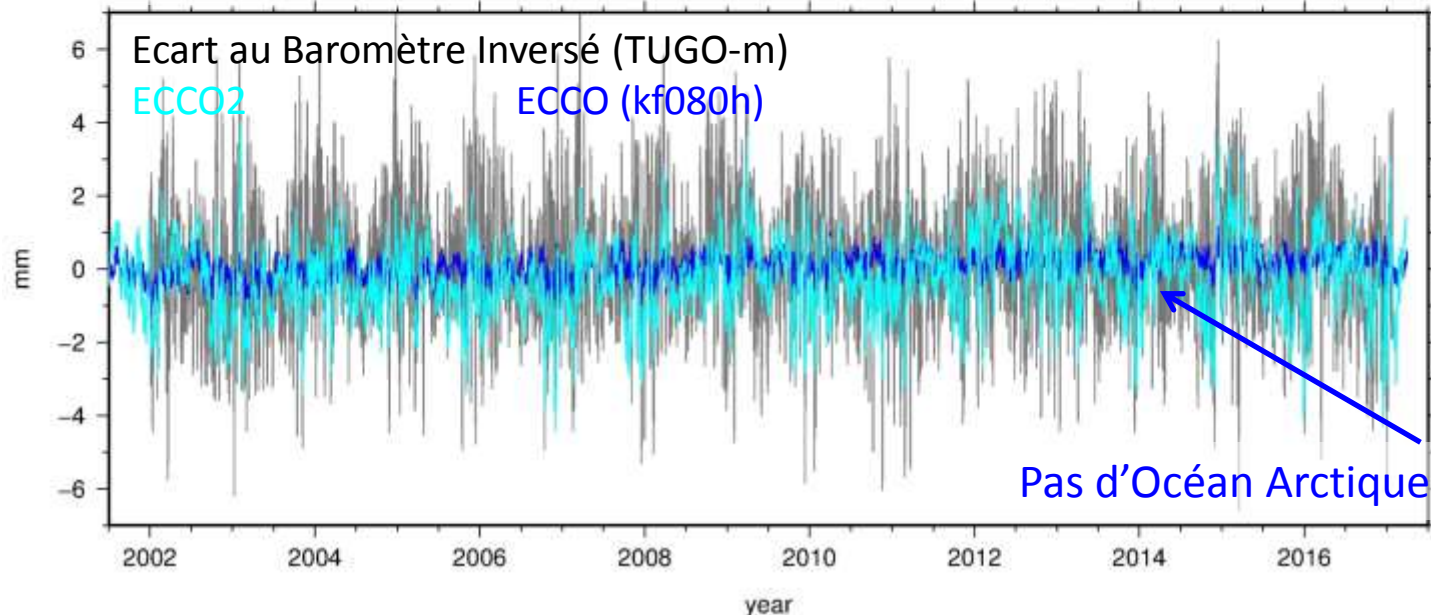
Exemple de séries temporelles : Alaska

ALRT_40162M001



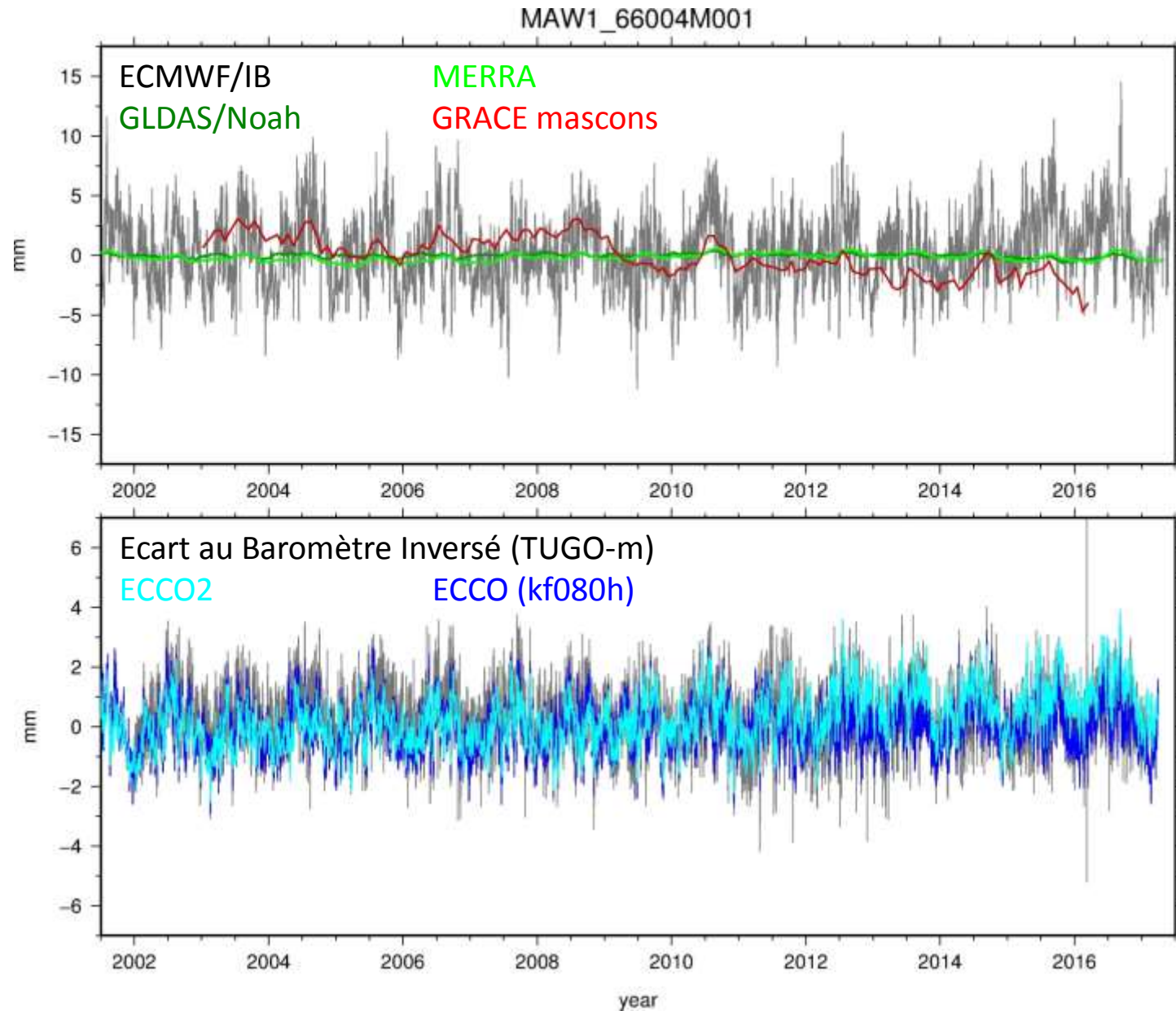
Fonte des glaces et/ou
erreur du modèle de GIA

Pas de glaciers dans MERRA et GLDAS



Pas d'Océan Arctique dans ECCO

Exemple de séries temporelles : Antarctique



Déformations induites par les charges superficielles

- Modélisation des charges superficielles
 - Systèmes de référence
 - Contenu spectral des charges environnementales
- Solutions GPS globales avec prise en compte des charges
 - Baromètre inversé / réponse dynamique des océans (TUGO-m)
 - Modèle hydrologique / solution GRACE
 - Corrections a priori / a posteriori
- Conclusion et perspectives

Modélisation des effets de charge dans le traitement des données GPS

- Hormis les marées océaniques, l'IERS recommande de ne pas corriger des effets de charges environnementales.
- Ces corrections peuvent se faire *a posteriori* ou au niveau des observations. Seules ces dernières permettent de prendre en compte les phénomènes rapides (marées atmosphériques par exemple).
- Investigation des effets induits par la modélisation des charges (atmosphère, océan et hydrologie, référentiel : CM) sur un réseau global de 117 stations GPS permanentes sur la période 2002-2016 analysé avec GAMIT/GLOBK (v10.6).
- Les marées océaniques sont modélisées avec FES2014a (1/16°).
- VMF1, délais estimés toutes les 2 heures, 2 gradients/jour.

Solutions et modèles de charge

- Pas de modèle de charges environnementales (solution classique)
- ECMWF/IB
- ECMWF + TUGO-m (Carrère & Lyard, 2003)
- ECMWF + TUGO-m + GLDAS/Noah (v1) (Rodell et al., 2004)
- ECMWF + TUGO-m + GRACE solution mascon itérée (1° & 1 mois) du NASA/GSFC (Luthcke et al., 2013; Loomis & Luthcke, 2016)

Les modèles de charge peuvent être appliqués :

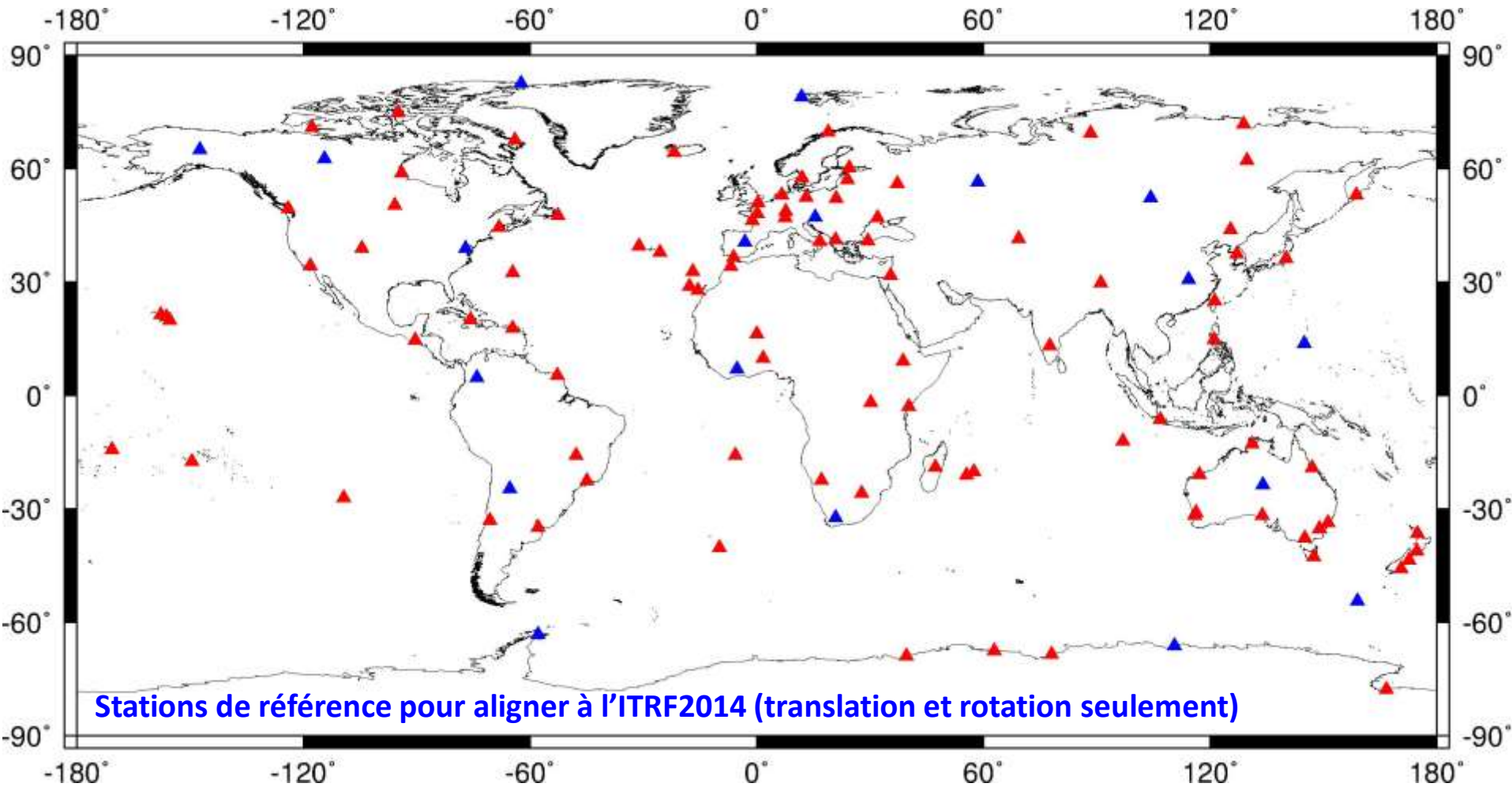
- au niveau des observations (cette étude), ou
- a posteriori (ECMWF + TUGO-m + GLDAS à titre de comparaison).

On compare les solutions avec charge à la solution classique.

Tous les modèles sont disponibles sur le service des charges de l'EOST :

<http://loading.u-strasbg.fr>.

Réseau GPS global analysé (2003-2015)

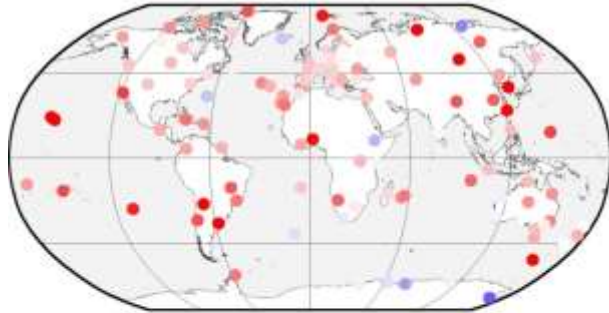


Méthodologie

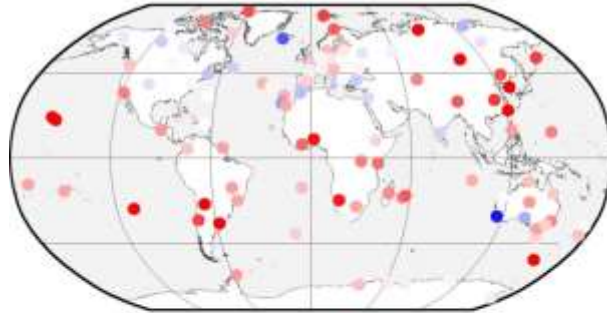
- Calcul des différentes solutions journalières:
 1. pas de charge,
 2. ECMWF/IB,
 3. ECMWF+TUGO-m,
 4. ECMWF+TUGO-m + GLDAS,
 5. ECMWF+TUGO-m + GRACE.
- Calcul des tendances linéaires, du signal saisonnier et de la variabilité.
- On compare les solutions à la solution classique (sans charge), en investiguant la réduction de variabilité, du signal saisonnier et les différences de tendances.

Comparaison avec la solution sans charge variabilité

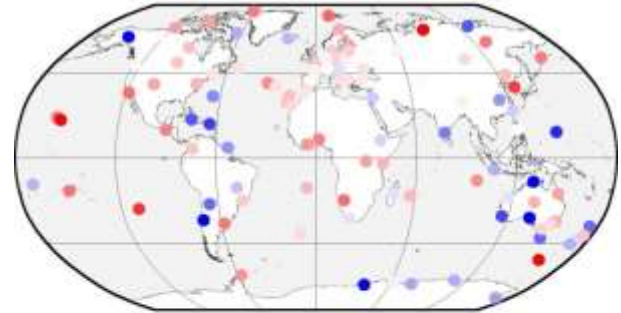
ECMWF/IB (N)



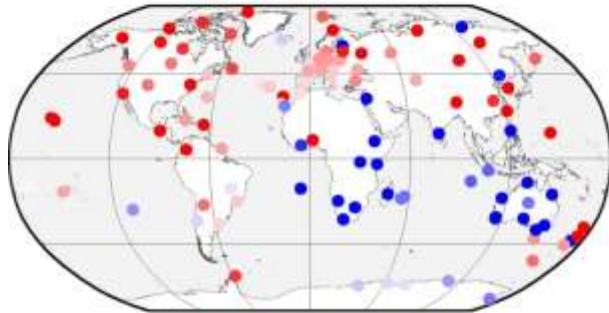
ECMWF+TUGO-m (N)



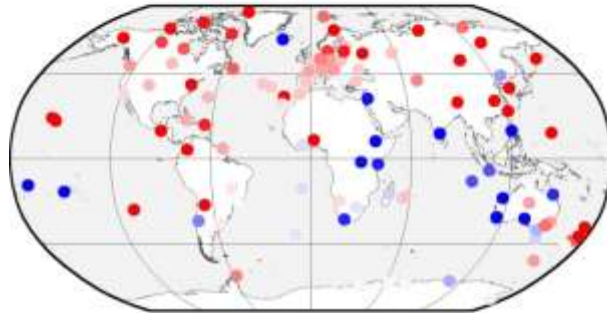
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



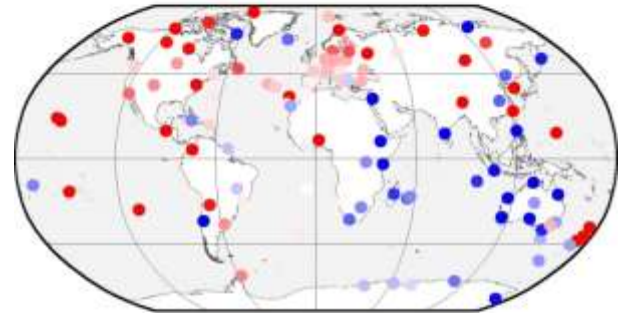
ECMWF/IB (E)



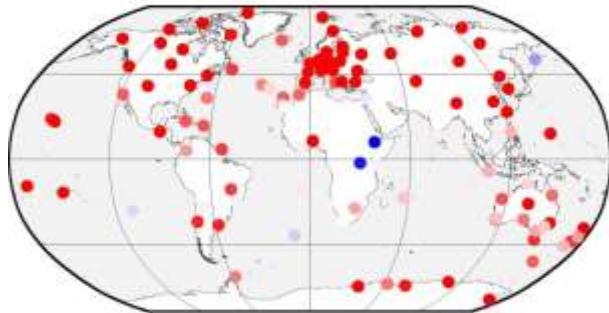
ECMWF+TUGO-m (E)



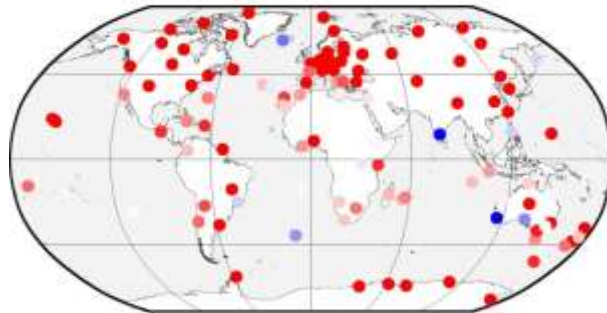
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



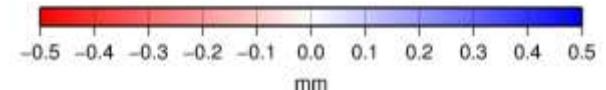
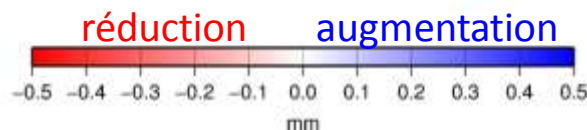
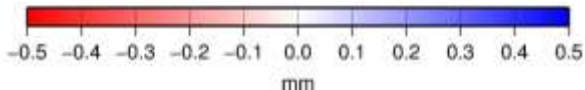
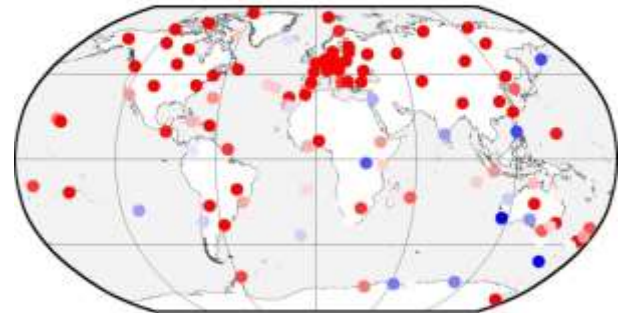
ECMWF/IB (U)



ECMWF+TUGO-m (U)

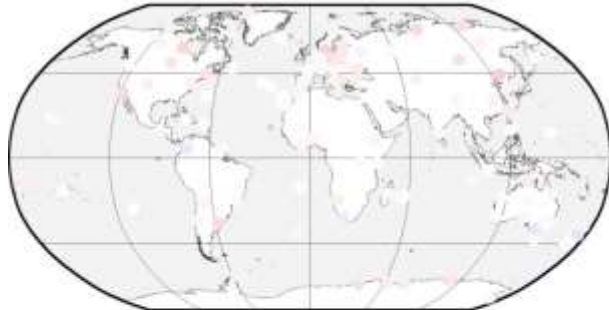


ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)

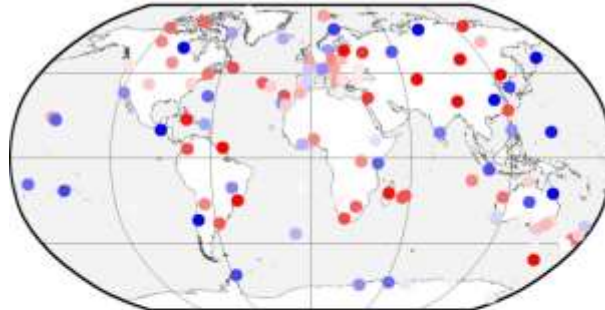


Comparaison avec la solution sans charge variabilité

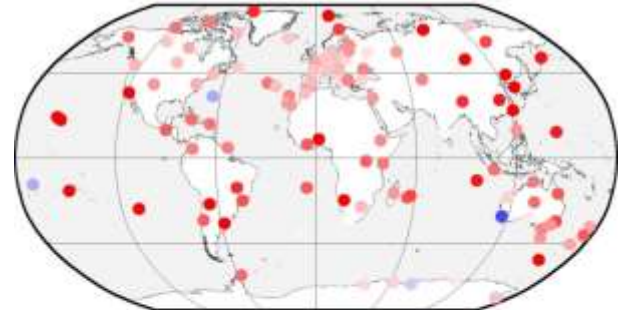
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (N)



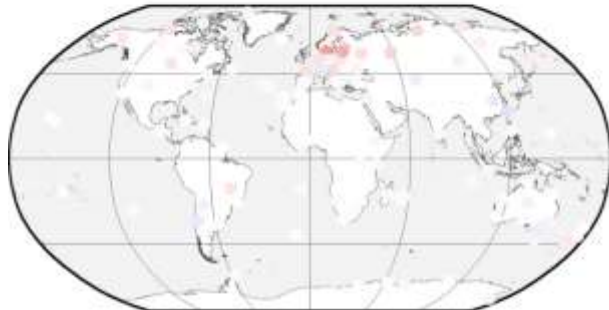
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



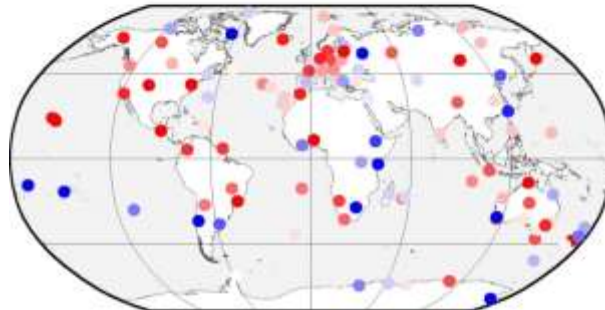
ECMWF+TUGO-m+GRACE (N)



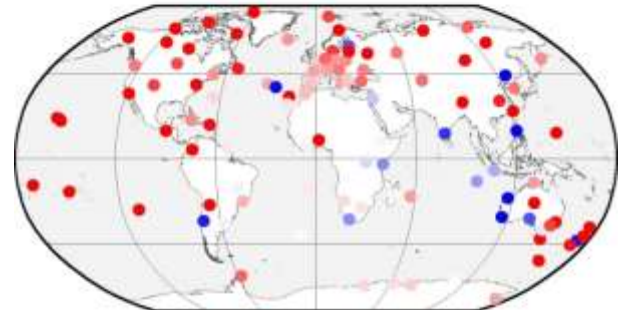
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (E)



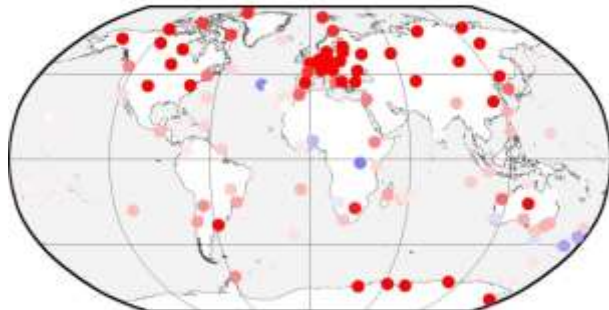
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



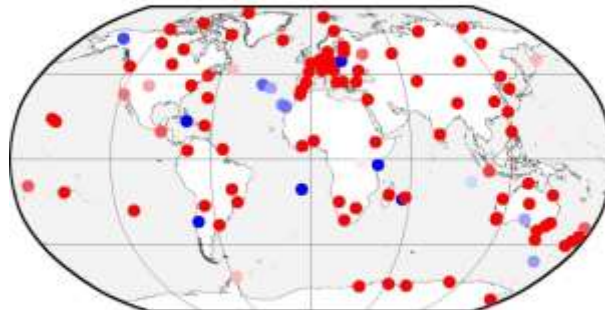
ECMWF+TUGO-m+GRACE (E)



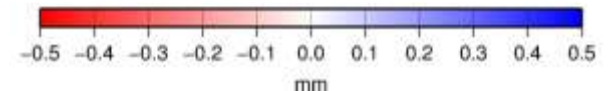
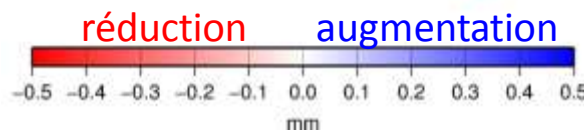
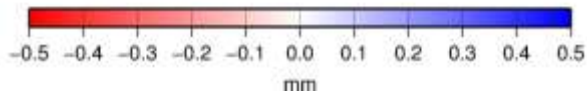
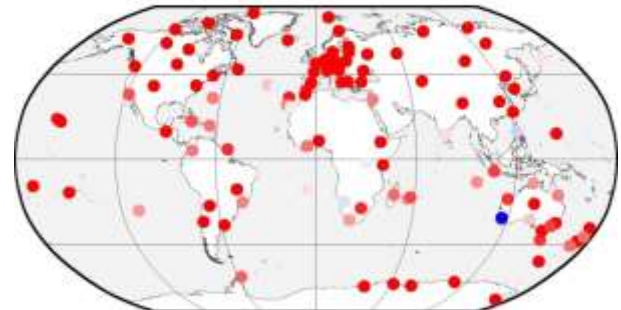
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (U)



ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)



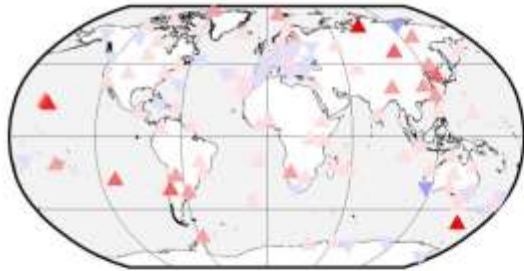
ECMWF+TUGO-m+GRACE (U)



Réduction relative

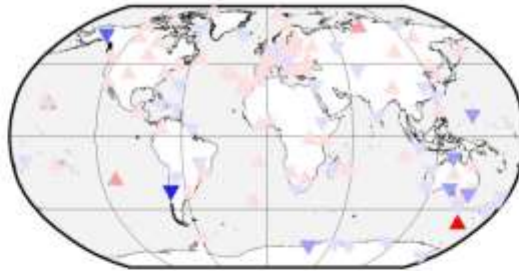
ECMWF/IB + GLDAS

North



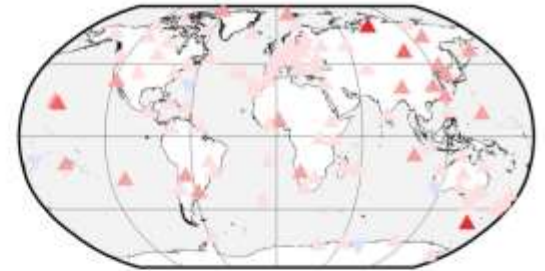
ECMWF + TUGO-m + GLDAS

North

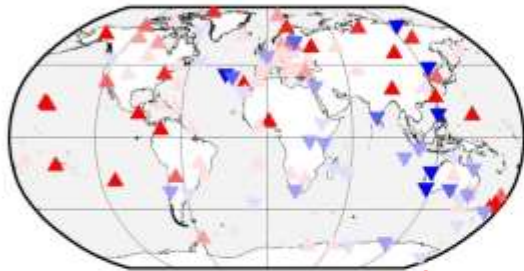


ECMWF + TUGO-m + GRACE

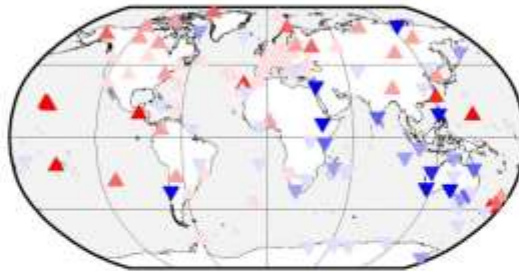
North



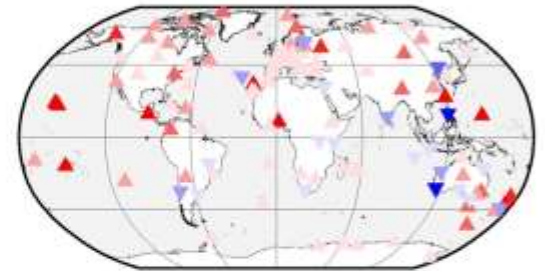
East



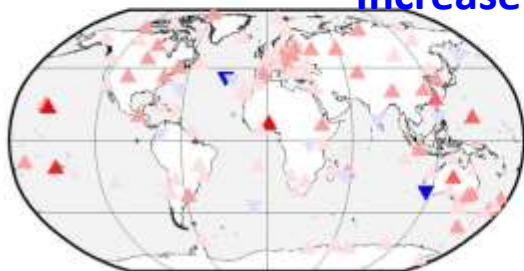
East



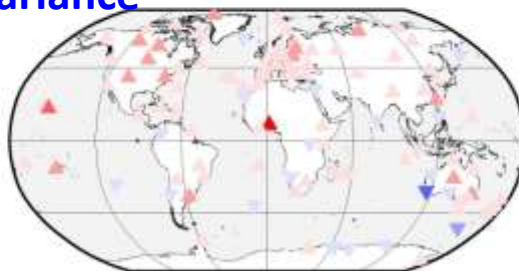
East



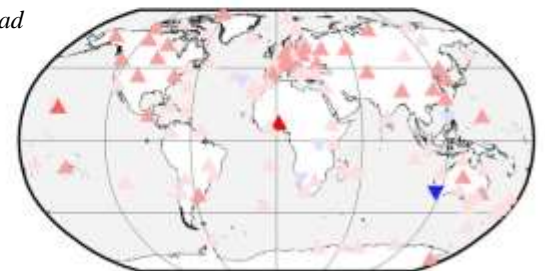
Up



Up



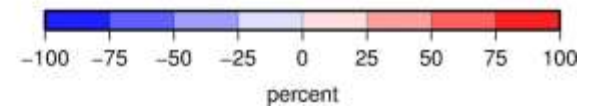
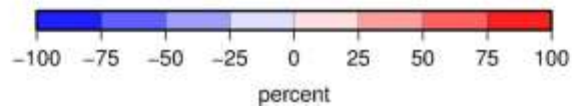
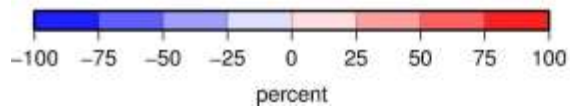
Up



Reduction of variance

Increase of variance

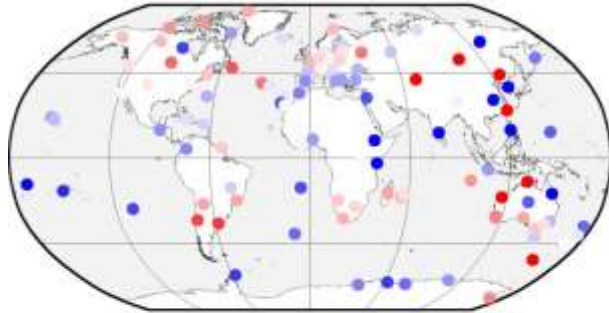
$$\frac{\sigma_{GPS(\text{without load})} - \sigma_{GPS(\text{with load})}}{\sigma_{load}}$$



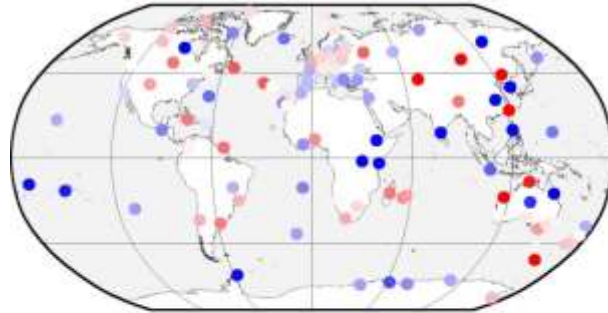
Comparaison avec la solution sans charge

Signal annuel

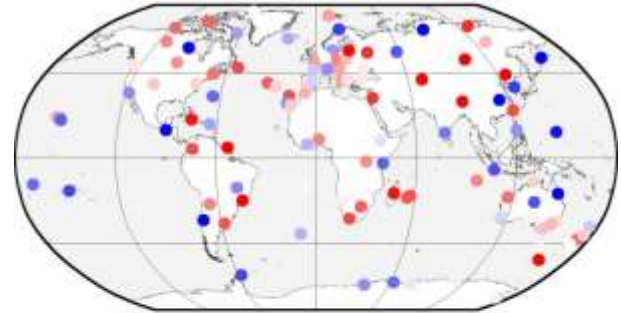
ECMWF/IB (N)



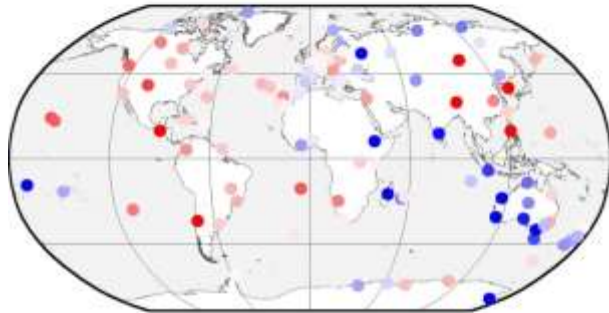
ECMWF+TUGO-m (N)



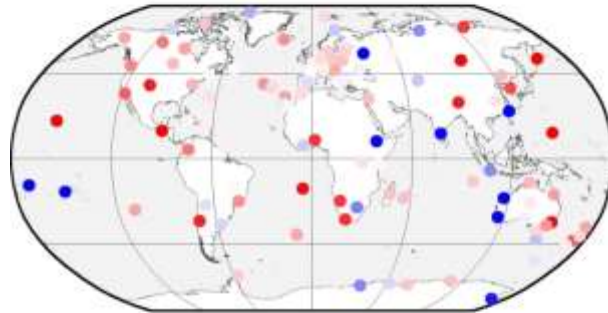
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



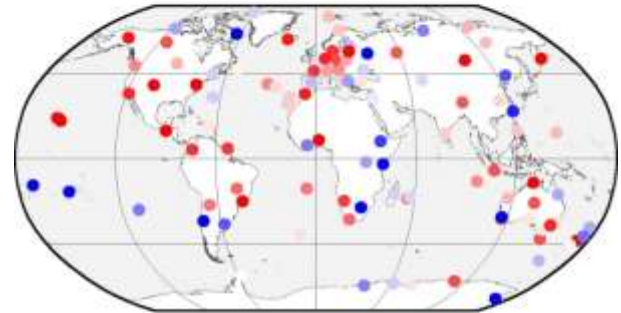
ECMWF/IB (E)



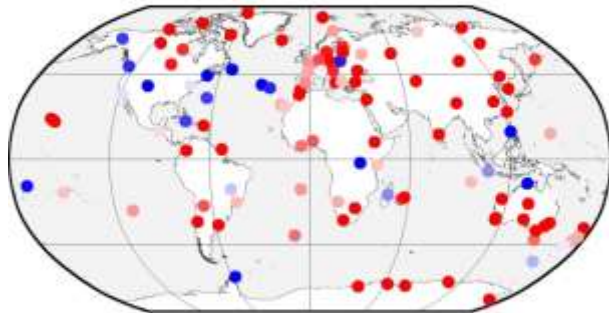
ECMWF+TUGO-m (E)



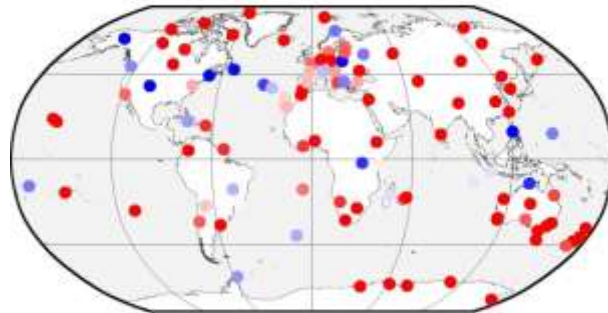
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



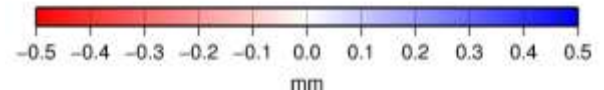
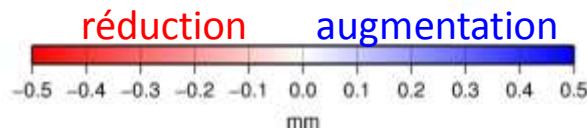
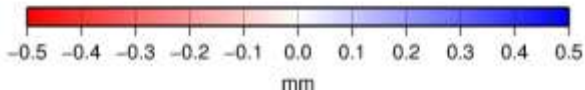
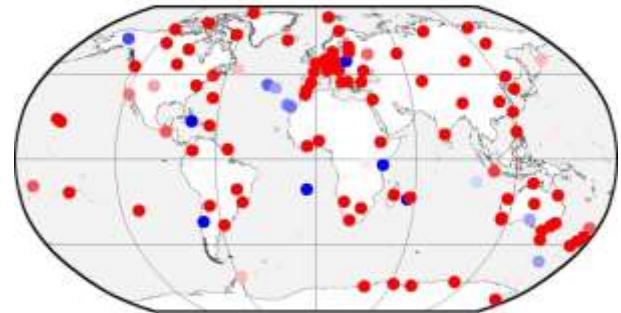
ECMWF/IB (U)



ECMWF+TUGO-m (U)



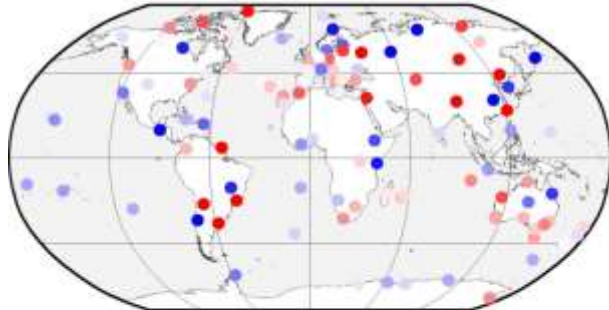
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)



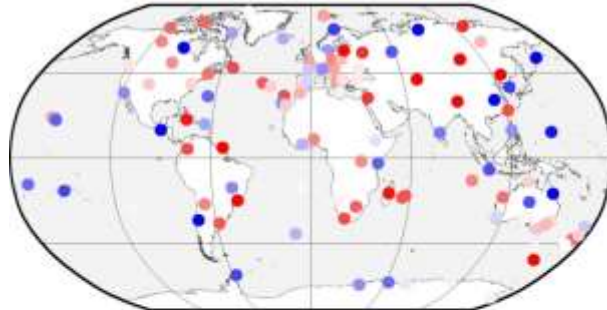
Comparaison avec la solution sans charge

Signal annuel

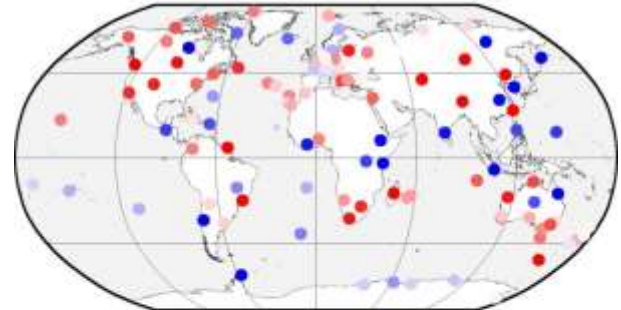
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (N)



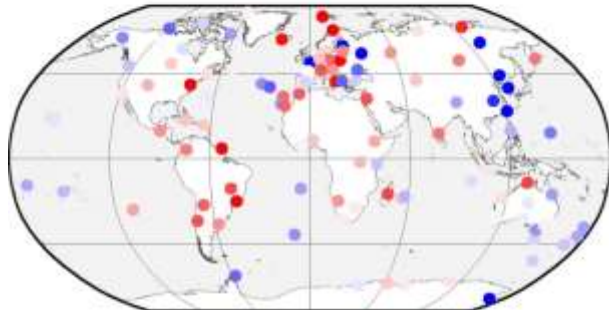
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



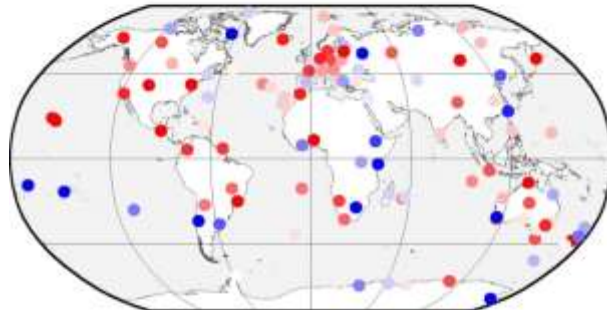
ECMWF+TUGO-m+GRACE (N)



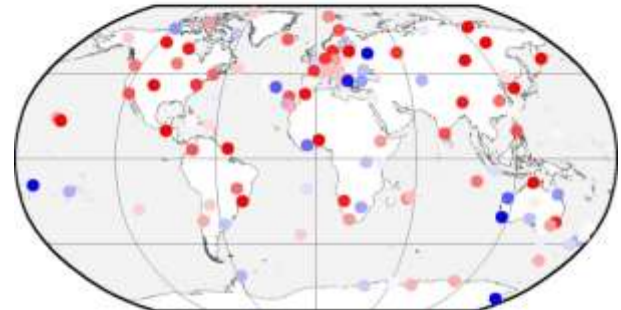
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (E)



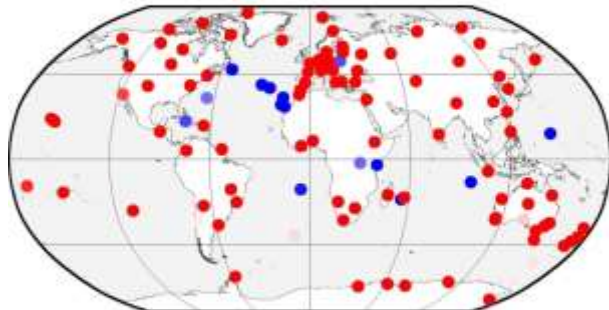
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



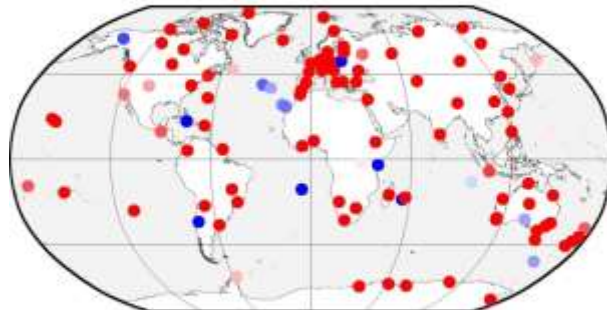
ECMWF+TUGO-m+GRACE (E)



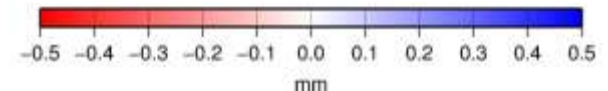
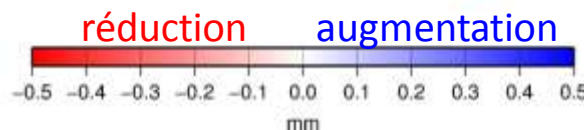
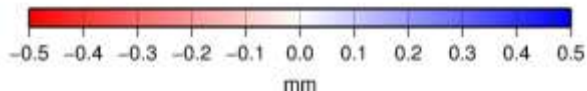
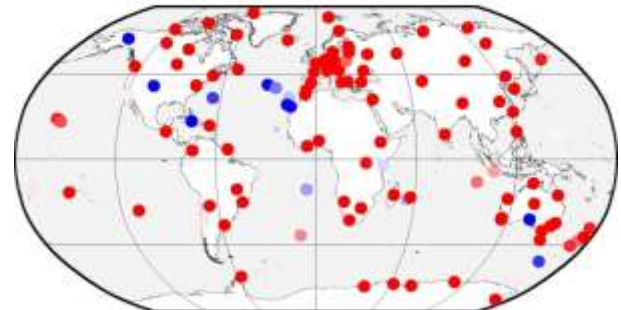
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (U)



ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)



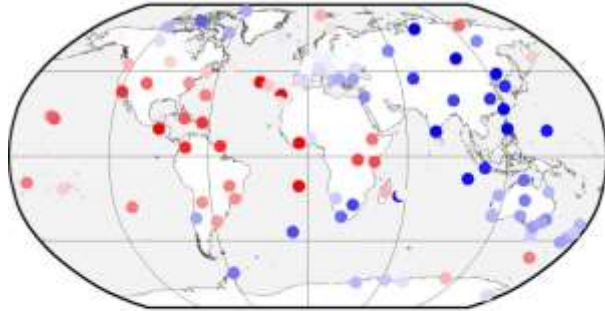
ECMWF+TUGO-m+GRACE (U)



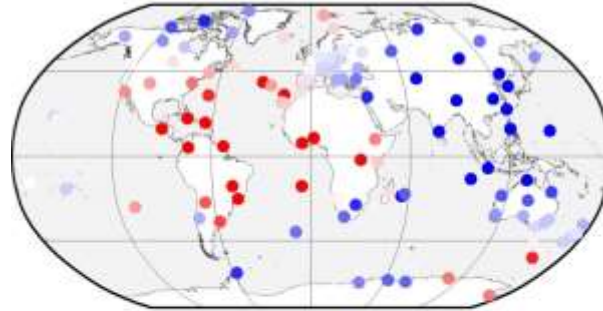
Comparaison avec la solution sans charge

Tendances linéaires

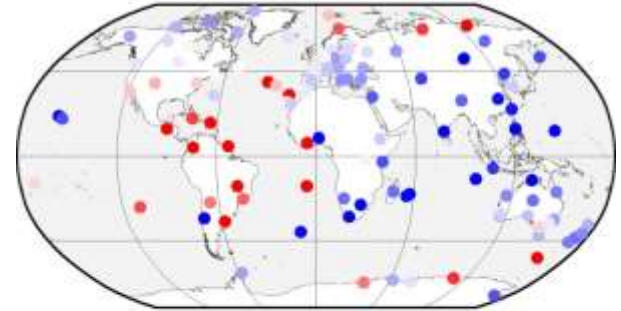
ECMWF/IB (N)



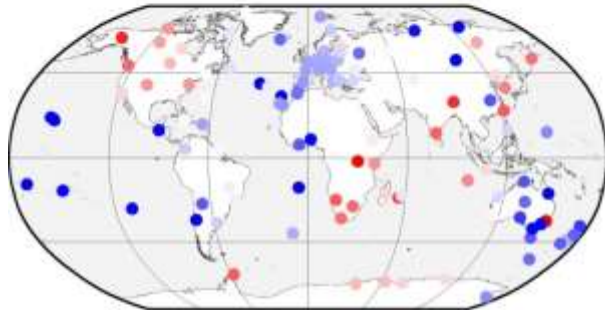
ECMWF+TUGO-m (N)



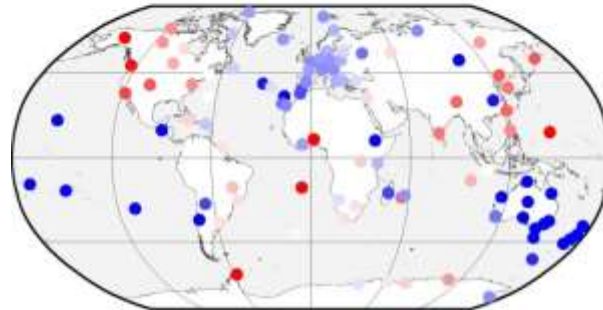
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



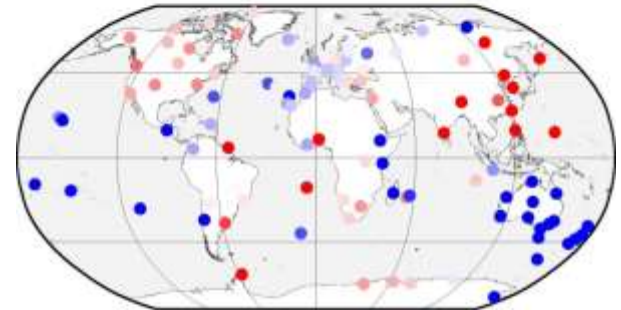
ECMWF/IB (E)



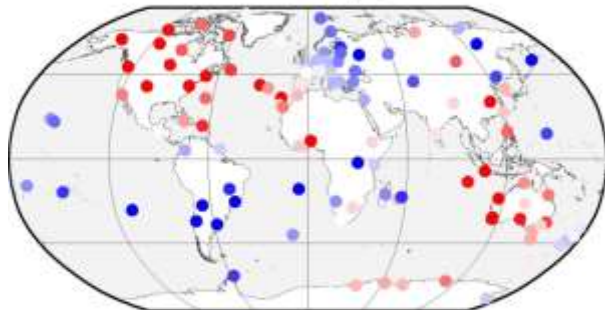
ECMWF+TUGO-m (E)



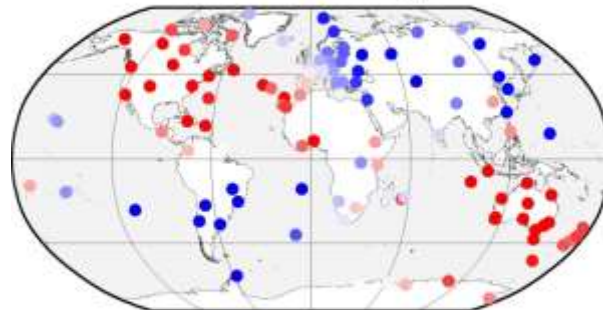
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



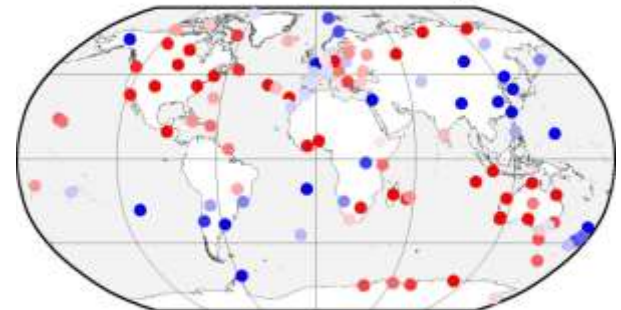
ECMWF/IB (U)



ECMWF+TUGO-m (U)



ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)



mm/yr



mm/yr

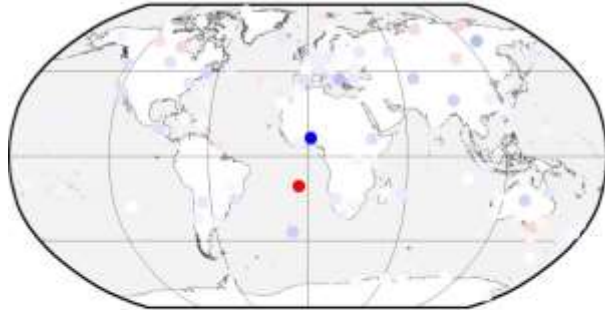


mm/yr

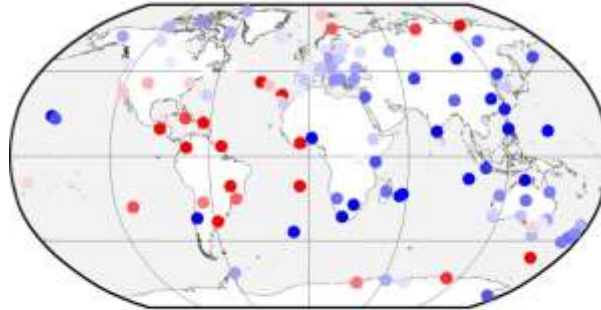
Comparaison avec la solution sans charge

Tendances linéaires

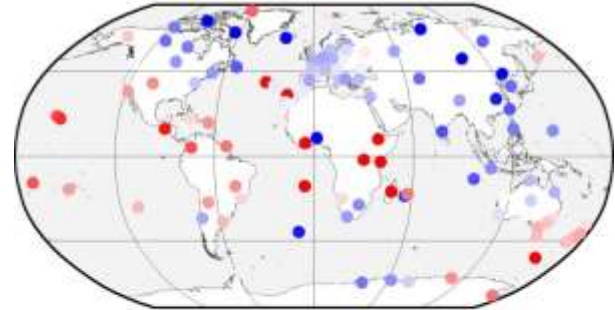
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (N)



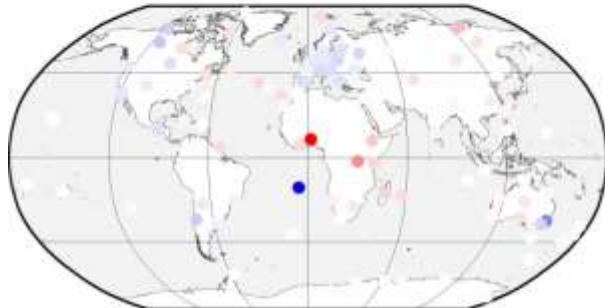
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (N)



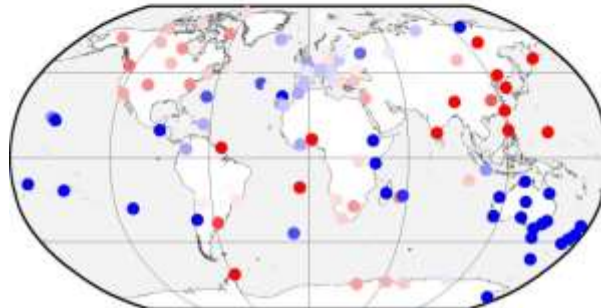
ECMWF+TUGO-m+GRACE (N)



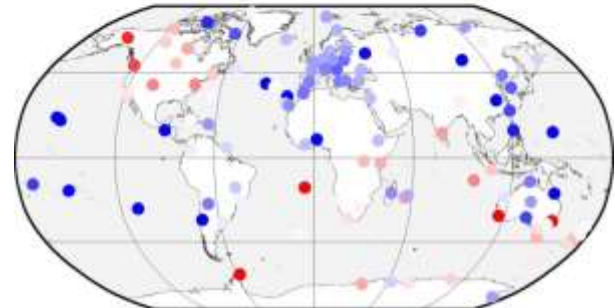
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (E)



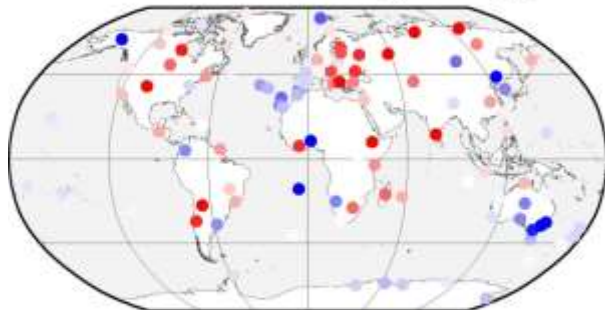
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (E)



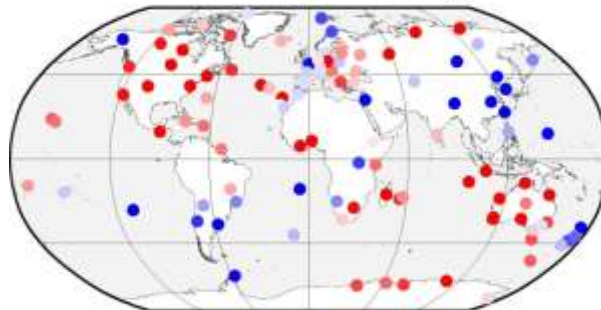
ECMWF+TUGO-m+GRACE (E)



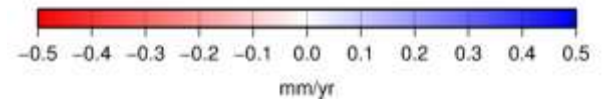
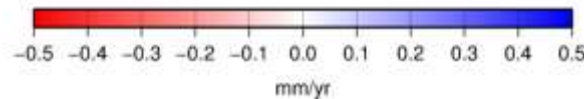
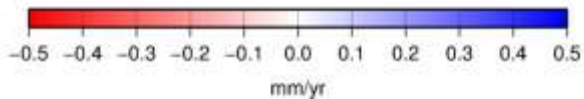
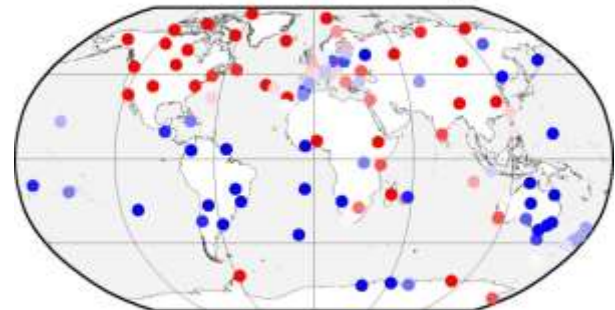
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (a posteriori) (U)



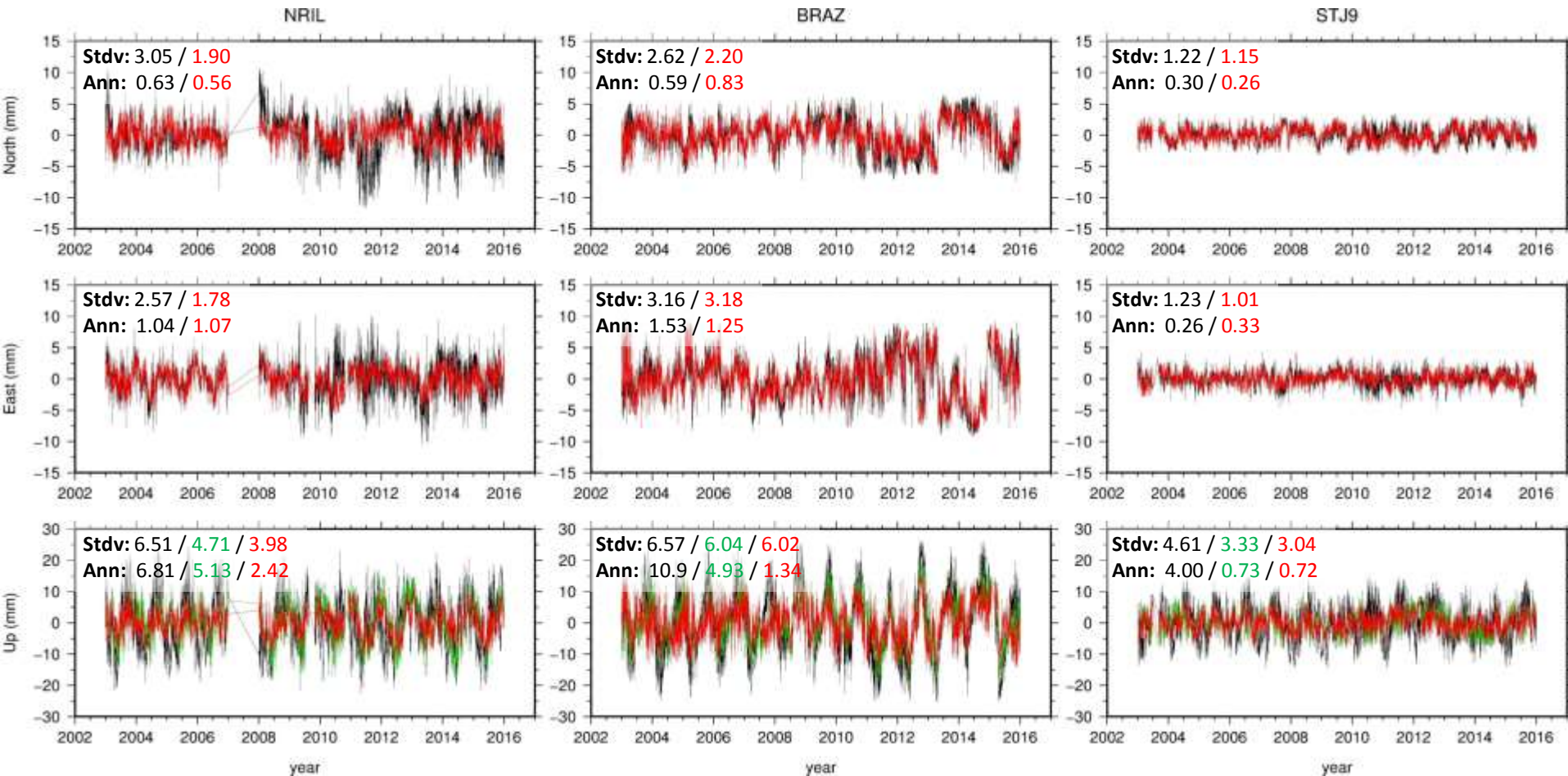
ECMWF+TUGO-m+GLDAS (U)



ECMWF+TUGO-m+GRACE (U)



Séries GPS (tendances polynomiales corrigées) avec ou sans correction de charges



Pas de correction

ECMWF+TUGO-m + GLDAS

ECMWF+TUGO-m + GRACE

Déformations induites par les charges superficielles

- Modélisation des charges superficielles
 - Systèmes de référence
 - Contenu spectral des charges environnementales
- Solutions GPS globales avec prise en compte des charges
 - Baromètre inversé / réponse dynamique des océans (TUGO-m)
 - Modèle hydrologique / solution GRACE
 - Corrections a priori / a posteriori
- Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

- Les effets de charge peuvent être calculés avec précision et opérationnellement à l'aide des différents modèles de circulation atmosphérique, océanique et hydrologique.
- Les différences entre les modèles hydrologiques diminuent significativement, malgré leurs limitations (pas de calottes glaciaires, non prise en compte des eaux de surface et des nappes). GRACE et GRACE follow-on (lancement prévu fin avril) permettent d'accéder aux variations totales de masse sur les continents.
- Le modèle barotrope TUGO-m permet de modéliser non seulement la dynamique rapide des océans, mais également est suffisant pour modéliser les effets saisonniers (en déplacement).

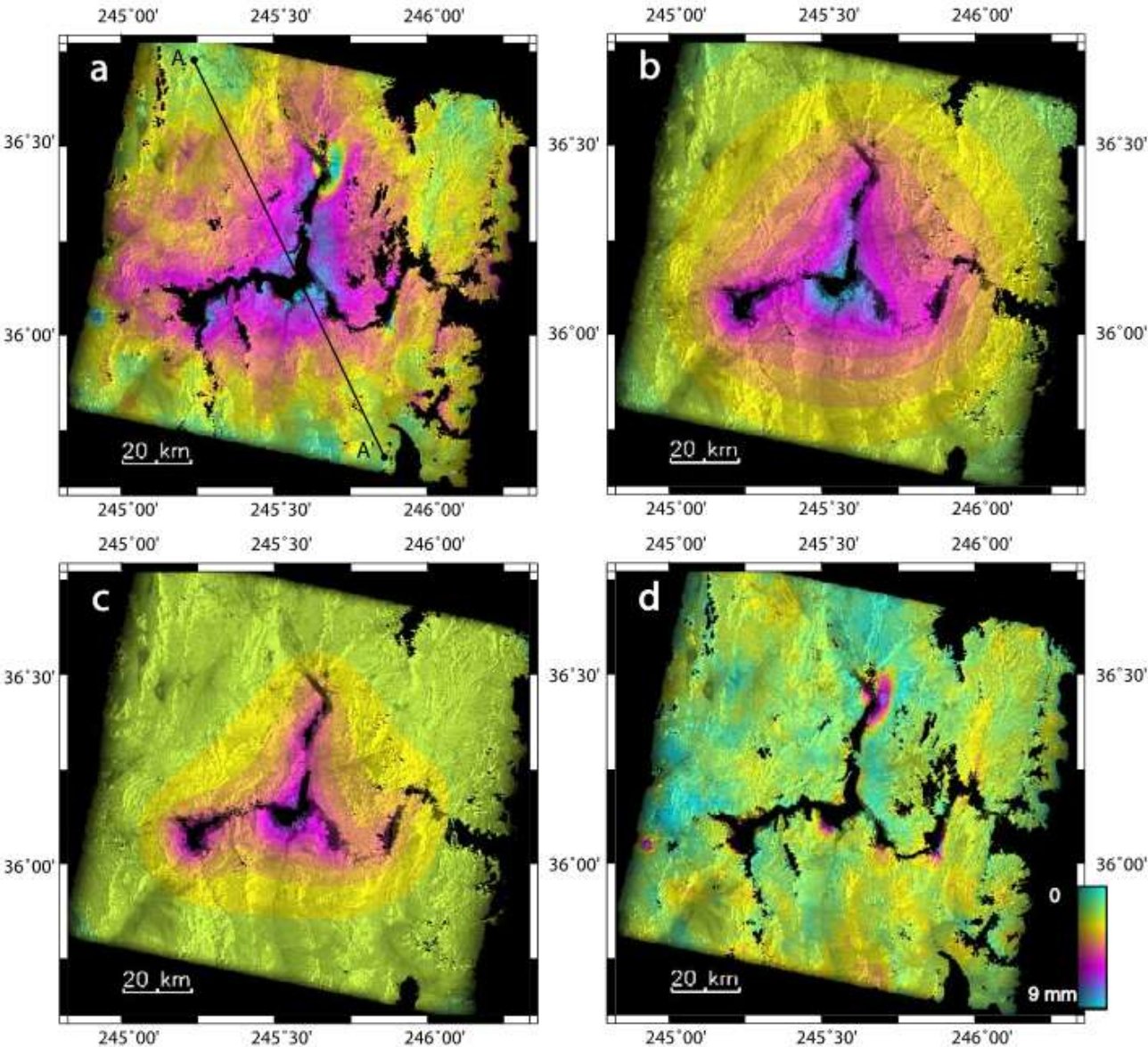
Conclusion et perspectives

- Prise en compte au niveau des observations de l'ensemble des surcharges environnementales (atmosphère, océan et hydrologie) dans le traitement GPS (avec GAMIT/GLOBK).
- La réponse dynamique des océans (TUGO-m) permet une meilleure réduction de la variabilité que l'hypothèse classique statique du baromètre inversé.
- La prise en compte de l'hydrologie permet de réduire le signal saisonnier, mais aussi une partie de la variabilité. GRACE (ici solution mascon itérée) est meilleure que le modèle GLDAS/Noah, malgré de plus faibles résolutions temporelle et spatiale.
- Les stations *problématiques* sont généralement insulaires ou côtières : les délais troposphériques sont probablement la cause.

Conclusion et perspectives

- Pas de différences importantes entre les corrections *a priori* et *a posteriori* des charges pour la composante verticale.
- Par contre, les corrections *a posteriori* n'ont aucun effet sur les composantes horizontales, alors que les corrections *a priori* permettent de réduire significativement et systématiquement les variabilités haute-fréquence et saisonnière.
- Cette différence provient de la mise en référence : les déplacements horizontaux sont extrêmement sensibles au degré-1 (géocentre).
- Aux cycles saisonniers et aux plus longues périodes, la rhéologie élastique n'est peut-être plus suffisante...

Rhéologie élastique / visco-élastique



Déformation (1992-2002)
autour du lac Mead

- (a) Observations (INSAR)
- (b) Modèle visco- élastique
- (c) Modèle élastique
- (d) Résidus

D'après Cavali  et al., 2007.

Modèles rhéologiques

- ① Élasticité (compressible)

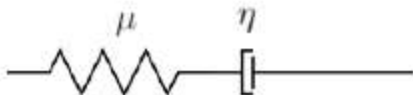
$$\sigma_{kl} = 2\mu\epsilon_{kl} + \lambda (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \delta_{kl}$$

- ② Fluide Newtonien visqueux incompressible

$$\sigma_{kl} = 2\eta\dot{\epsilon}_{kl}$$

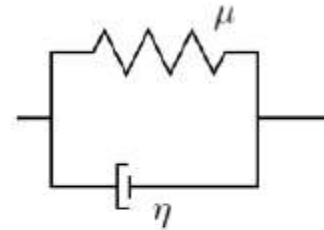
- ③ Maxwell (incompressible)

$$\dot{\sigma}_{kl} + \frac{\mu}{\eta}\sigma_{kl} = 2\mu\dot{\epsilon}_{kl}$$



- ④ Kelvin-Voigt (incompressible)

$$\sigma_{kl} = 2\mu\epsilon_{kl} + 2\eta\dot{\epsilon}_{kl}$$



- ⑤ Standard linear solid (SLS)

$$\dot{\sigma}_{kl} + \frac{\mu_2}{\eta_2}\sigma_{kl} = 2(\mu_1 + \mu_2)\dot{\epsilon}_{kl} + 2\frac{\mu_1\mu_2}{\eta_2}\epsilon_{kl}$$

