

# Le repère international de référence terrestre est-il géocentrique?

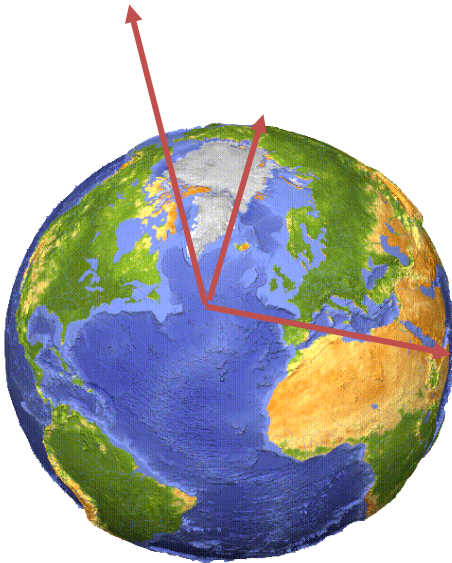
**X. Collilieux**



Remerciements: Z. Altamimi, L. Métivier, D. Lercier, D. Argus

IGN, SR / Laboratoire de recherche en géodésie  
Université Paris Diderot, 75205 Paris Cedex 13, France ; GRGS

## Le Système International de Référence Terrestre (ITRS)



- Origine :  
Centre des masses
- Évolution temporelle de l'Orientation :  
Condition dite de non rotation globale

$$\vec{h}_C = \iint_C \vec{r} \wedge \left[ \frac{d}{dt} \vec{r} \right]_{\mathfrak{R}_b} dM = \vec{0}$$

- Échelle :  
unités SI

## Le Système International de Référence Terrestre (ITRS)

- Adopté par l'UGGI en 1991 et 2007 pour les applications en sciences de la Terre
- Adopté par le BIPM en 2011 pour les applications métrologiques
- Réalisations numériques : les ITRF déterminés par les services scientifiques de l'IERS et le Centre ITRS (IGN/LAREG)

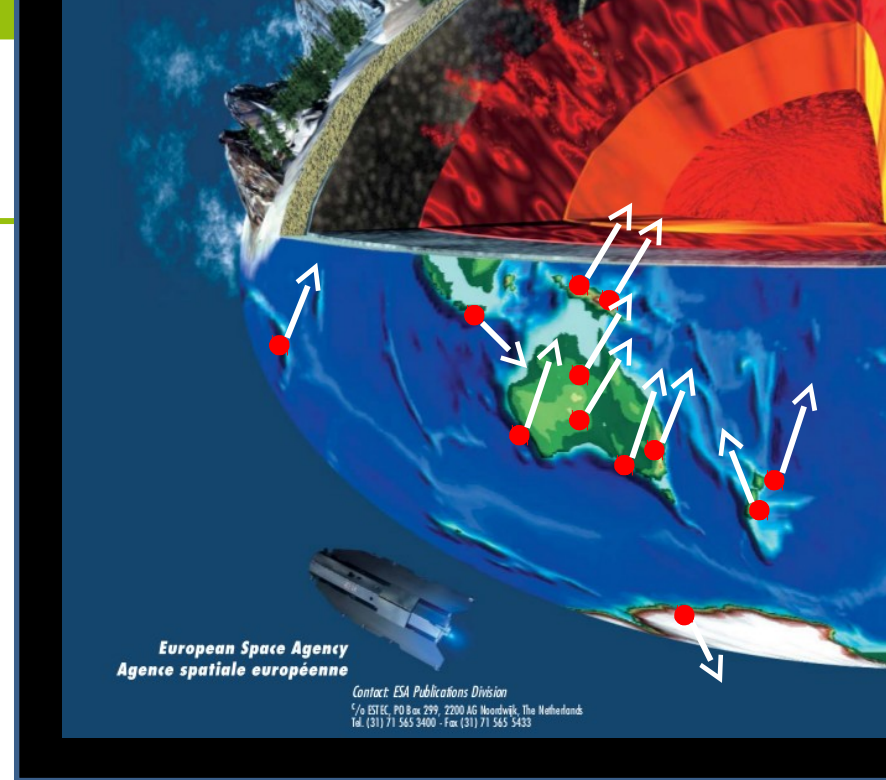
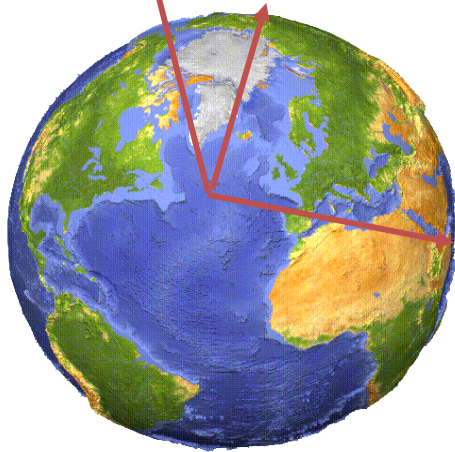


*International Earth Rotation and  
Reference Systems Service*



# Introduction

Le Système de Référence Terrestre International



Le Repère de Référence Terrestre International  
International Terrestrial Reference Frame : **ITRF**

**L'ITRF est une table de coordonnées (positions + vitesses).**

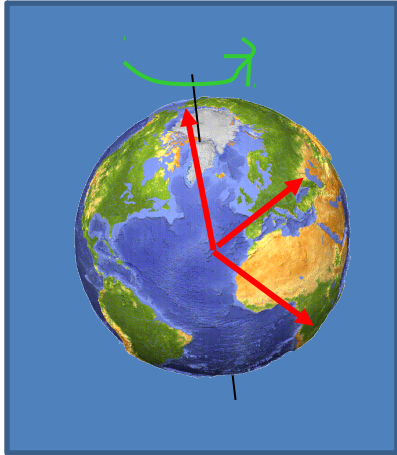
Réalisations: **ITRF88, 89, ..., 2000, 2005, 2008**

<http://itrf.ign.fr>

Plus de 900 stations  
localisées sur plus de 500  
sites

- **Raison des mises à jour**
  - Baisse de la précision des coordonnées
  - Amélioration des traitements
  - Nouvelles stations de mesure
  - Vitesses non constantes

# Introduction



## Mesure des déformations

A cartoon illustration of two men. The man on the left is taller and has a ruler placed against his height. The man on the right is shorter and has a ruler placed against his height. A question mark is positioned below the shorter man's ruler, suggesting a comparison or measurement of deformation.

A globe showing red arrows indicating the direction and magnitude of plate tectonics and post-glacial rebound. The arrows are concentrated around the Atlantic and Indian Oceans.

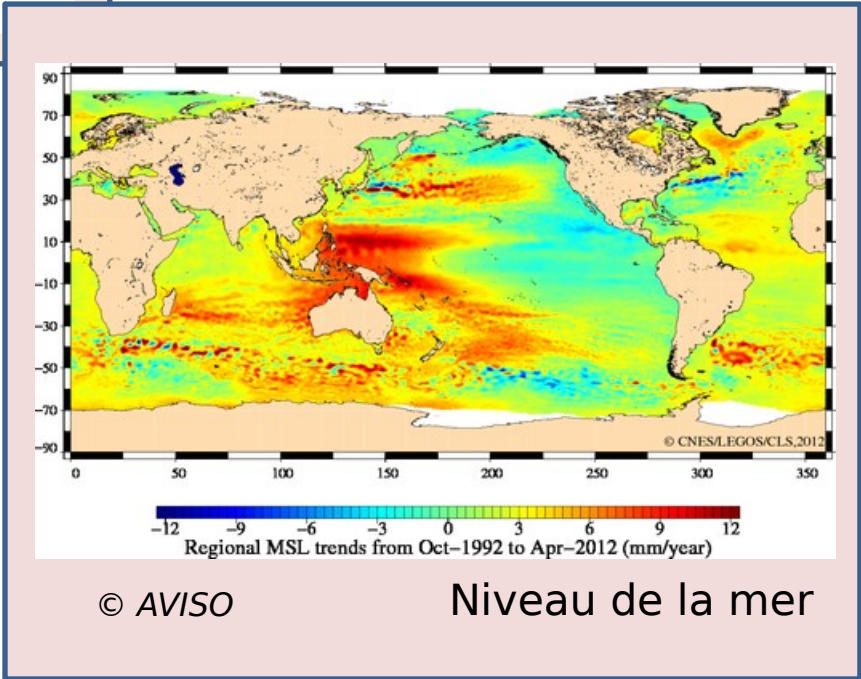
etc...  
Tectonique des plaques  
Rebond post-glaciaire

## Etalonnage

- Altimètre satellitaire
- Constantes antennes GPS à bord de sat.

A technical diagram of a Block II antenna assembly. It shows a central antenna with various components labeled: SPACECRAFT CG, CENTER OF RETROREFLECTOR ARRAY, and GPS ARRAY PHASE CENTER. Dimensions are given: 278.4 mm, 862.6 mm, and 524.5 mm. A coordinate system with X, Y, and Z axes is shown.

Block II antenna assembly (Degnan and Pavlis 1994)



# Les coordonnées des points du réseau ITRF sont-elles conformes aux spécifications?

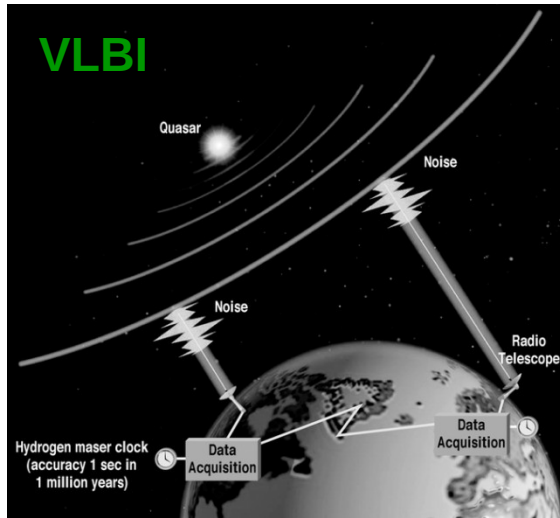
**Sont-elles géocentriques (i.e. relatives au centre des masses de la Terre)?**

- I Le repère international de référence terrestre
- II Evaluation du repère
- III Mouvement du géocentre

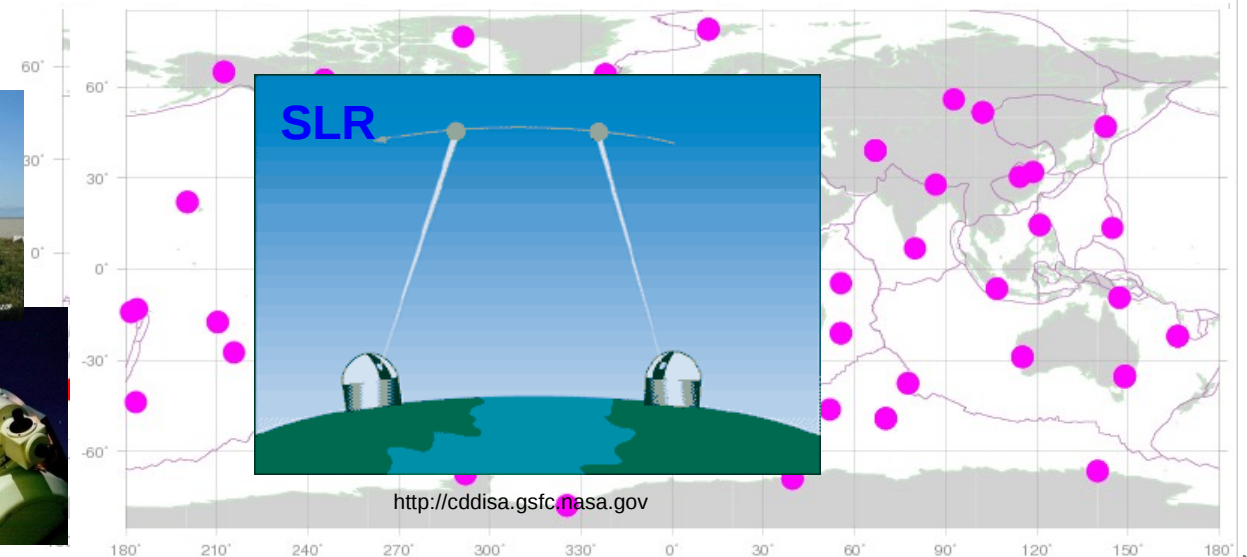
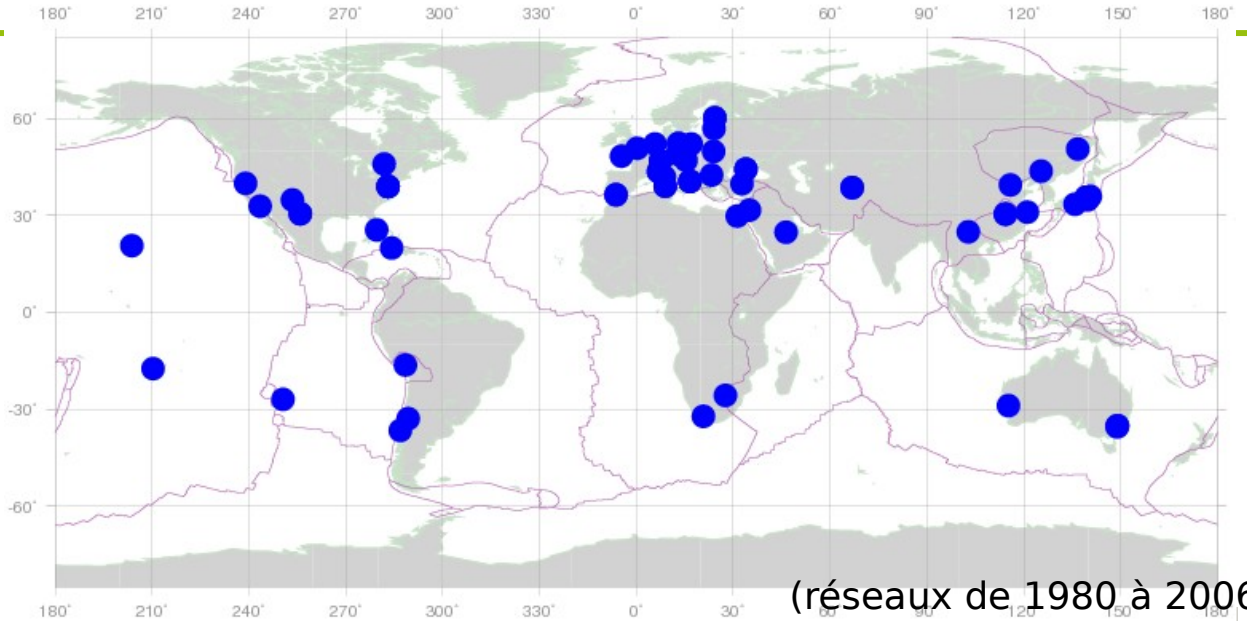
# 01. Le repère de référence terrestre international



# Le repère international de référence TERRESTRE

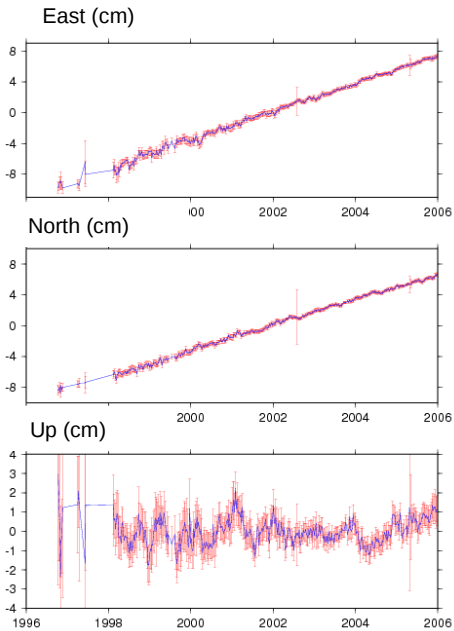


<http://ivs.nict.go.jp>

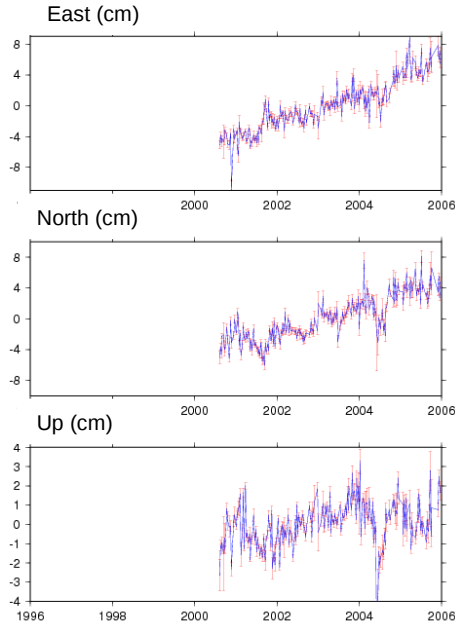


# Le repère international de référence TERRESTRE

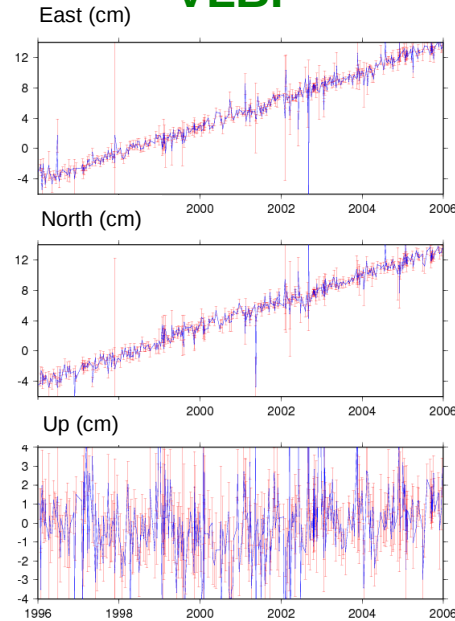
**GPS**



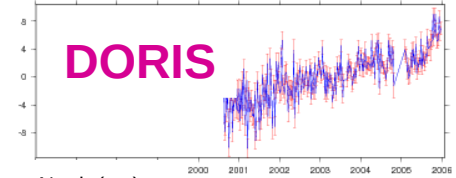
**SLR**



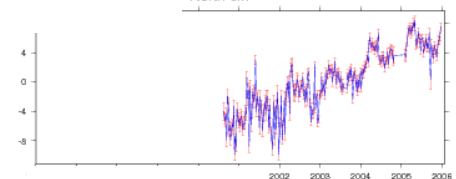
**VLBI**



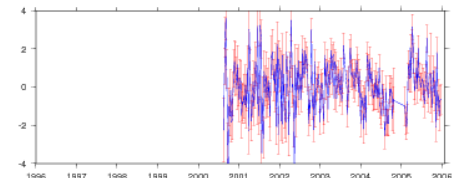
East (cm)



North (cm)



Up (cm)



ITRF2008 calculé à partir des solutions fournies par : IGS, ILRS, IVS et IDS



# Le repère international de référence TERRESTRE

Pourquoi plusieurs techniques de mesures?

Paramètres de définition de l'ITRF2008

- Origine : télémétrie laser sur satellite
- Echelle : moyenne de la télémétrie laser (SLR) avec l'interférométrie à très longue base (VLBI)
- Orientation: Alignée sur l'ITRF2005

avec 179 stations situées sur 131 sites

NB: L'orientation des vitesses de l'ITRF2000 est par construction proche de celle d'un modèle cinématique de la croûte qui ne comprend pas de rotation globale

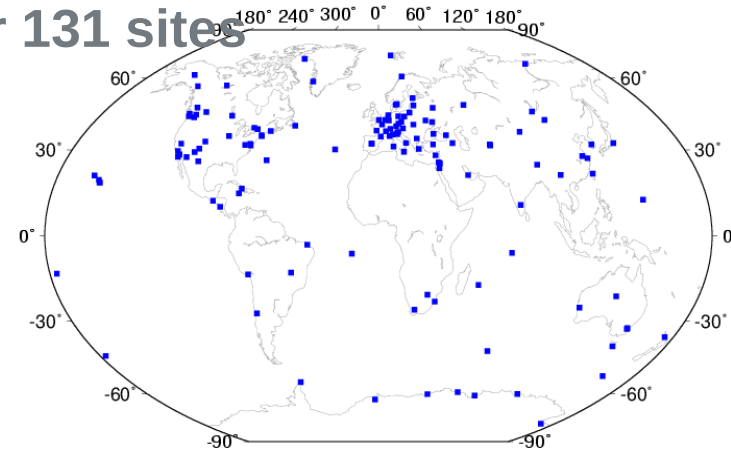


Fig. Sites utilisés pour l'alignement en orientation sur l'ITRF2005

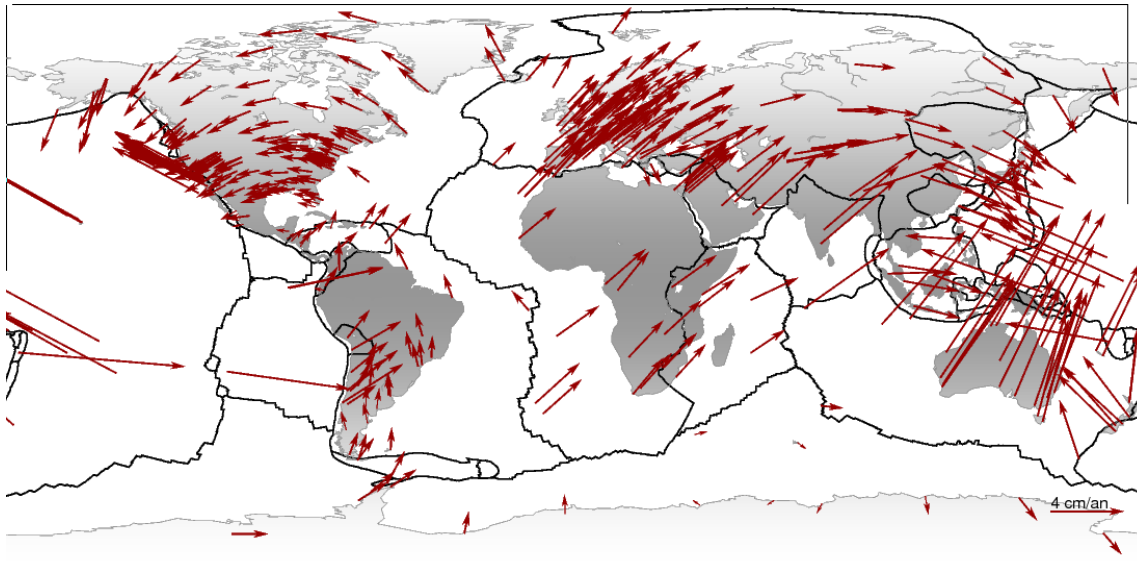
# Le repère international de référence TERRESTRE

## ITRF2008

(inclus des données de 1980 à 2009)

SITE NAME	ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz	Sigmas			SOLN	DATA_START	DATA_END
		-----m/m/y-----								
<b>Paris</b>	OPMT	4202777.371	171367.999	4778660.203	0.001	0.001	0.001			
		-.0125	0.0178	0.0107	.0001	.0000	.0001			
<b>Grasse (OCA)</b>	GRAS	4581690.901	556114.831	4389360.793	0.001	0.001	0.001	1	00:000:00000	03:113:00000
		-.0133	0.0188	0.0120	.0001	.0000	.0001			
<b>Grasse (OCA)</b>	GRAS	4581690.900	556114.837	4389360.793	0.001	0.001	0.001	2	03:113:00000	04:295:43200
		-.0133	0.0188	0.0120	.0001	.0000	.0001			
....										

*ITRF2008 précisions sur les vitesses < 2mm/yr*



Vitesses  
horizontales

580 sites (935 stations)

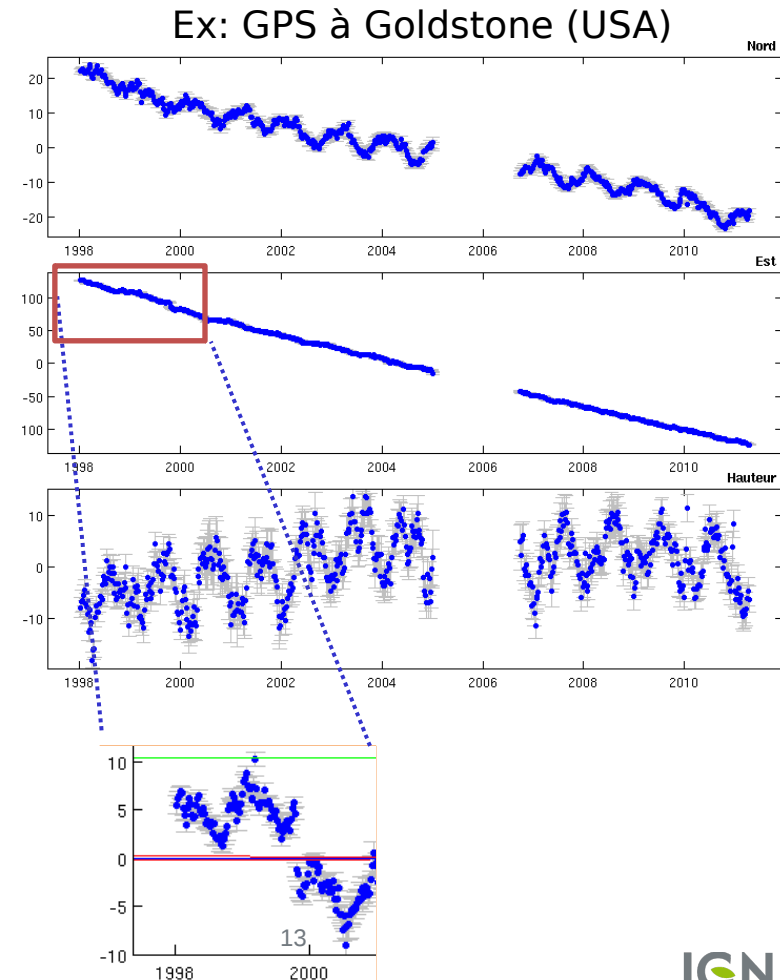
# Le repère international de référence TERRESTRE

## Comment est calculé l'ITRF?

### 1) Estimation d'un repère par technique (positions et vitesses)

- On retire des séries de coord. des erreurs spatialement corrélées (référencement)
- On identifie préalablement les « discontinuités ». Cf. figure

### 2) Combinaison des 4 repères pour former un repère unique.



# Le repère international de référence TERRESTRE

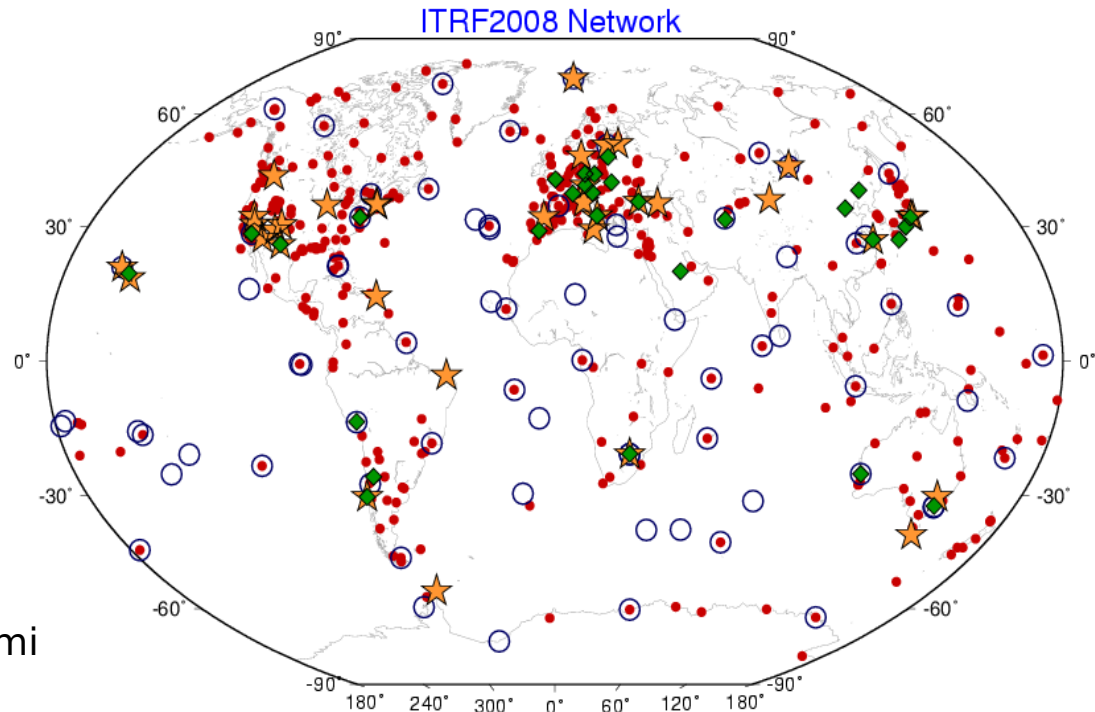
Comment est calculé l'ITRF?

Pour construire un repère unique et exprimer les coordonnées dans le même repère, il faut estimer les **formules de passage** entre les coordonnées des stations de chaque technique.

★ VLBI    ◆ SLR    ● GPS    ○ DORIS

463 Sites Nord

117 Sites Sud



© Z. Altamimi

104 fichiers de positions relatives disponibles.

# Le repère international de référence TERRESTRE

Comment est calculé l'ITRF?

- 1) Loi de passage d'un repère à un autre
- 2) Mesures locales

Similitude euclidienne linéarisée  
positions et vitesses

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + T + DX_1 + RX_1 \\ \dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \end{cases}$$

Changement d'**origine**  
Changement d'**échelle**  
Changement d'**orientation**

On peut les estimer car on suppose:

- même vitesse sur les sites co-localisés
- les positions relatives connues sur les sites co-localisés

On les utilise pour définir le repère estimé

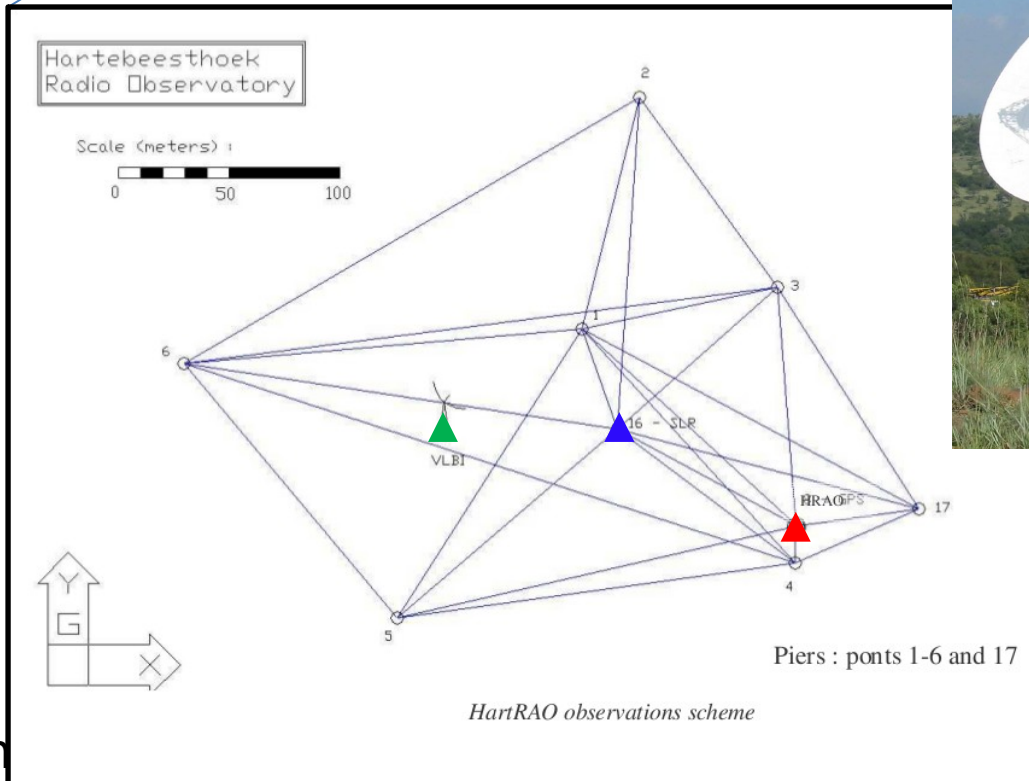
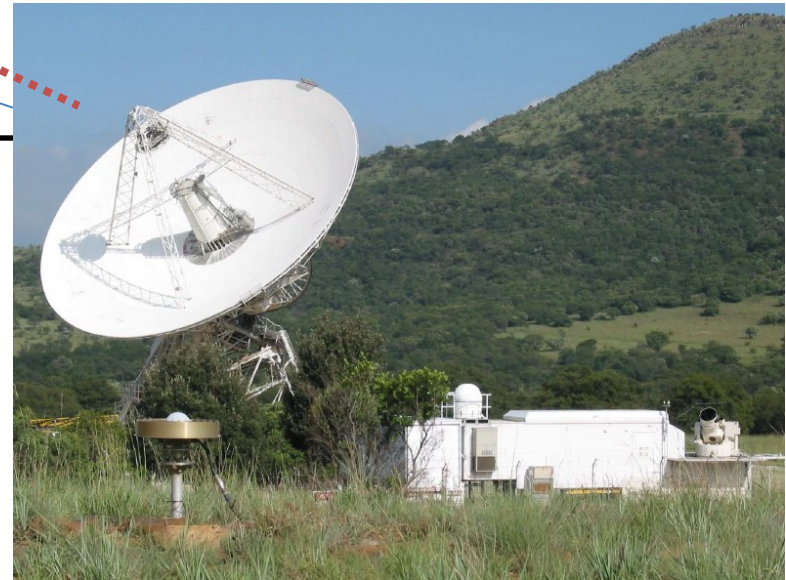
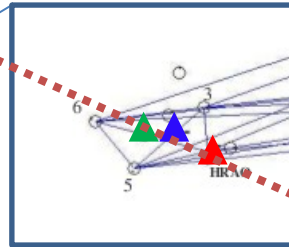
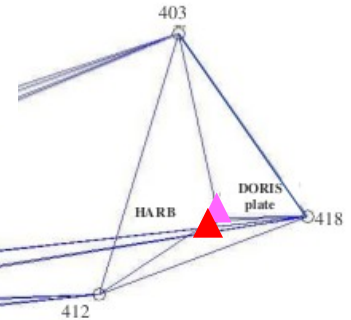
# Le repère international

## Comment est calculé l'ITRI

- 1) Loi de passage d'un repère
- 2) Mesures locales

Carte du réseau géodésique et visées sur le site d'Hartebeesthoek en 2003 par l'IGN

*Axe de la prise de vue*



- ▲ Antenne GPS
- ▲ Balise DORIS
- ▲ Télescope Laser
- ▲ Télescope Interférométrie

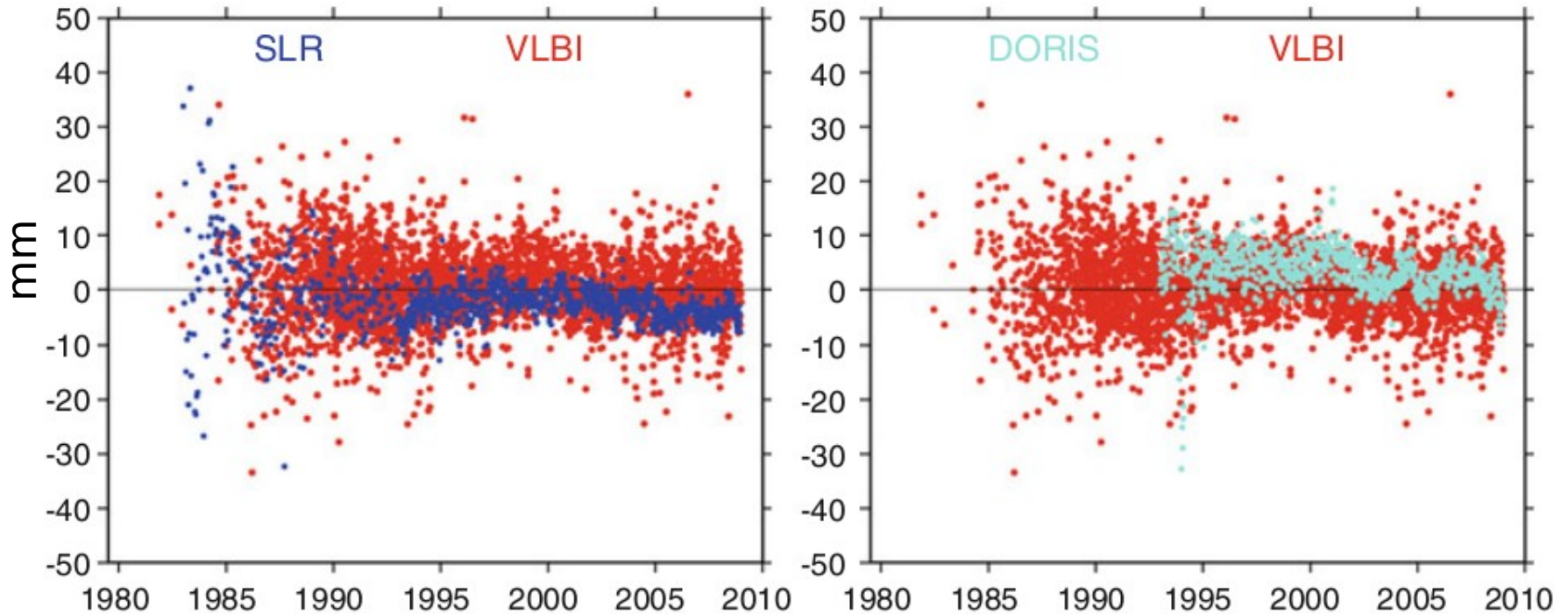


# Le repère international de référence TERRESTRE

Comment est calculé l'ITRF?

Dans l'ajustement, on estime donc des biais entre les coordonnées de chaque technique simultanément aux coordonnées des stations

Facteurs d'échelle (convertis en distance)



Différence moyenne, par rapport à l'ITRF2008, des coordonnées verticales quasi-instantanées des réseaux de **télémétrie laser**, **DORIS** et d'**interférométrie (VLBI)**

# Le repère international de référence TERRESTRE

Pourcentage de lignes de bases ayant pour origine une station GPS pour lesquelles les écarts entre géodésie spatiale et rattachements sont:

	VLBI	SLR	DORIS
< 6 mm	47 %	43 %	34 %
6-10 mm	24 %	29 %	12 %
> 10 mm	29 %	28 %	54 %

D'après *Altamimi et al., 2011*

## Conclusions:

- Des erreurs systématiques dans les coordonnées estimées par géodésie spatiale persistent; carte d'antennes GPS [Baire et al., 2012], déformation gravitationnelles des antennes VLBI [Sarti et al., 2010], biais en distance SLR [Coulot et al., 2009] etc...
- Erreurs dans les coordonnées des rattachements

# Le repère international de référence TERRESTRE

Relation entre l'ITRF2008 et l'ITRF2005 ?

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + T + DX_1 + RX_1 \\ \dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \end{cases}$$

Changement d'**origine**  
 Changement d'**échelle**  
 Changement d'**orientation**

Translations et appoint au facteur d'échelle entre les ITRFs

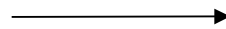
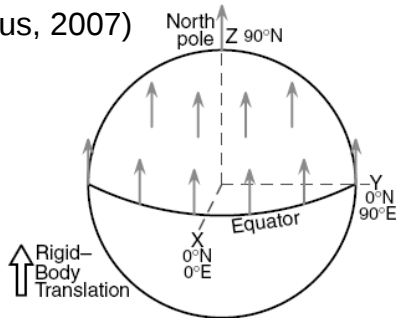
	<b>TX</b>	<b>TY</b>	<b>TZ</b>	<b>Echelle</b>
A l'époque <u>2000.0</u>	mm	mm	mm	ppb
<b>ITRF2000- &gt;ITRF2005</b>	0.1	-0.8	-5.8	0.40
Dérives (/an)	-0.2	0.1	<b>-1.8</b>	0.08
<b>ITRF2005- &gt;ITRF2008</b>	-2.0	-0.9	-4.7	0.94
Dérives (/an)	<b>0.3</b>	0.0	0.0	0.00

# Le repère international de référence TERRESTRE

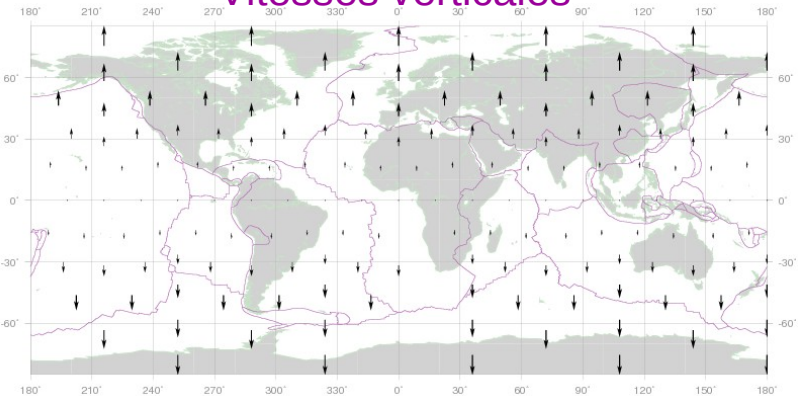
Problème: cette différence d'origine entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005 ne peut être expliquée par un phénomène géophysique (Métivier et al., 2010, 2011)

Conséquences d'une dérive d'origine selon Z

(Argus, 2007)



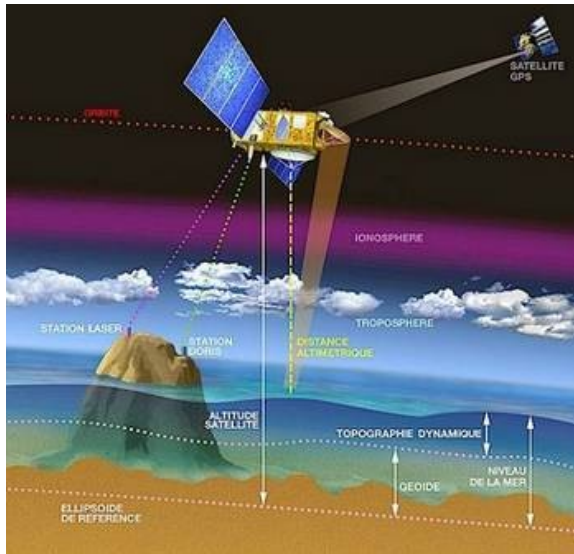
Vitesses verticales



# Le repère international de référence TERRESTRE

## Conséquences d'une dérive d'origine selon Z

**Exemple: conséquences pour l'estimation de la montée du niveau de la mer obtenue par altimétrie?**



© aviso

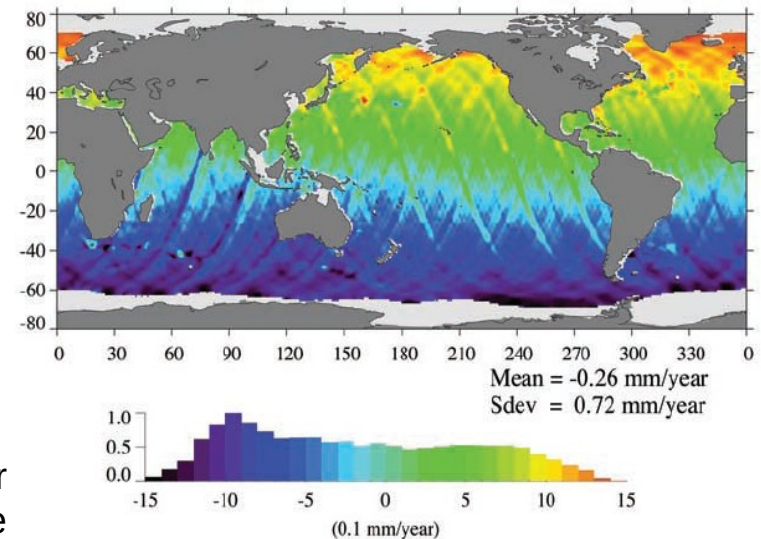


Fig. Différence de la montée du niveau de la mer obtenue à partir de deux repères de référence différents CSR95 (proche ITRF2000) et ITRF2005

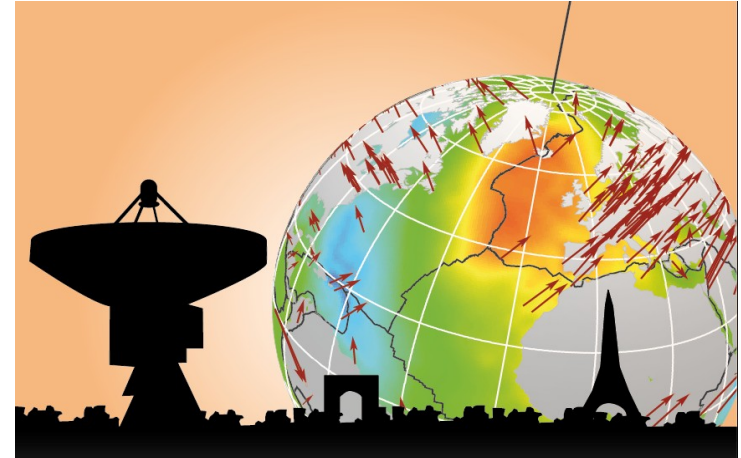
Beckley et al., 2007

## 02. Evaluation du Repère terrestre

# Evaluation du repère terrestre

Initiative de Claude Boucher, groupe de travail  
“External evaluation of the Terrestrial Reference  
Frame»  
commission 1.2 de l’AIG

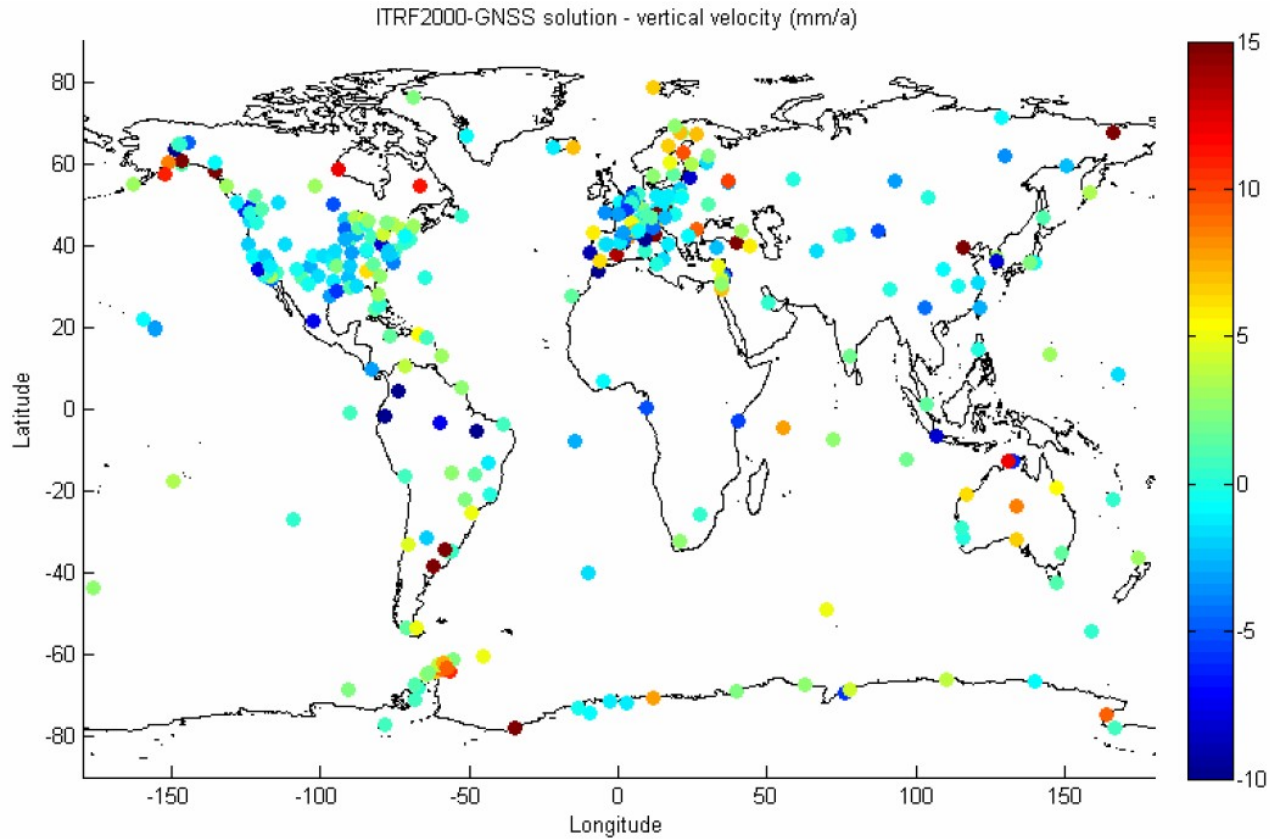
Membres: Z. Altamimi, D. F. Argus, C. Boucher, X. Collilieux, A. Dermanis, B. J. Haines, T. A. Herring, C. W. Kreemer, F. G. Lemoine, C. Ma, D. S. MacMillan, J. Mäkinen, L. Métivier, J. Ries, F. N. Teferle, X. Wu



## Questions principales:

- Comment évaluer l’exactitude d’un repère?
- Quelle est l’exactitude du repère de ref. actuel?

## Evaluation des vitesses individuelles: exemple

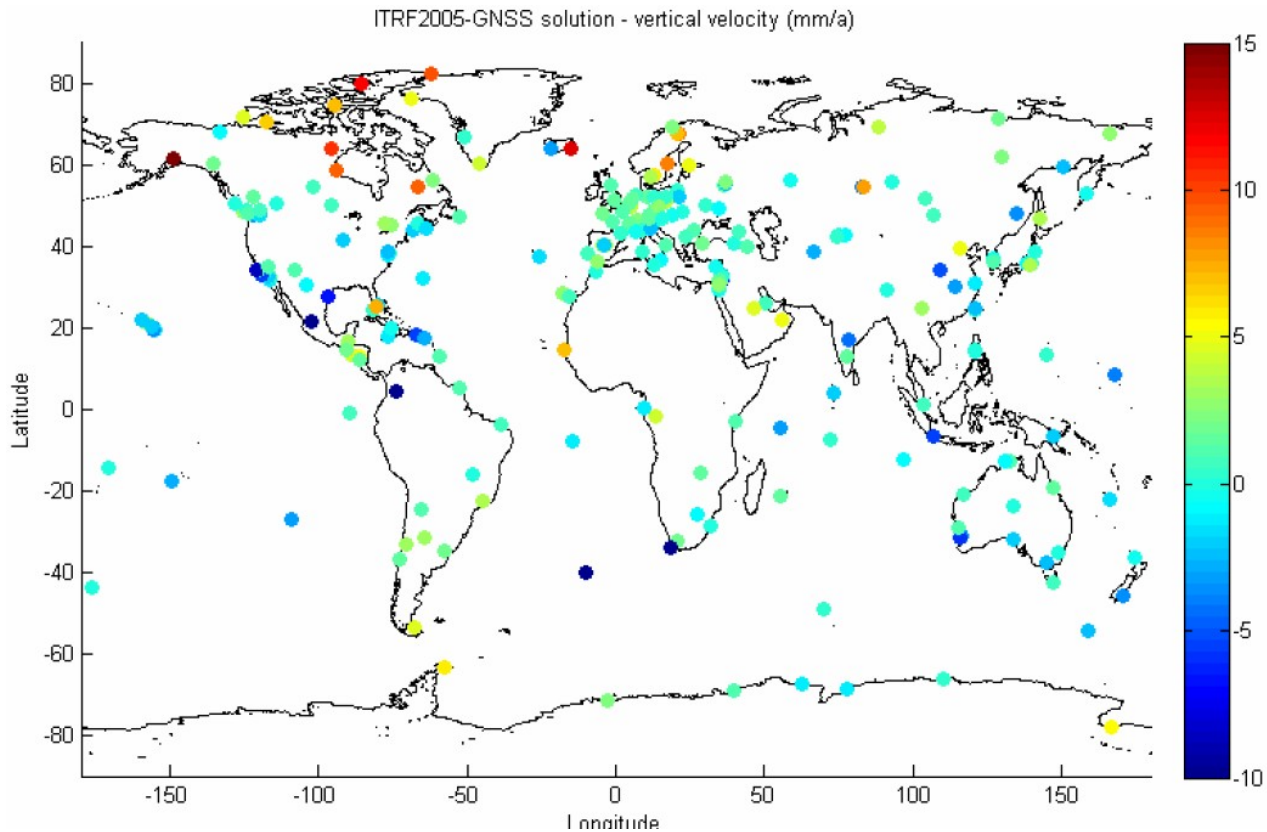


Vitesses verticales ITRF2000

© Métivier L.



## Evaluation des vitesses individuelles: exemple

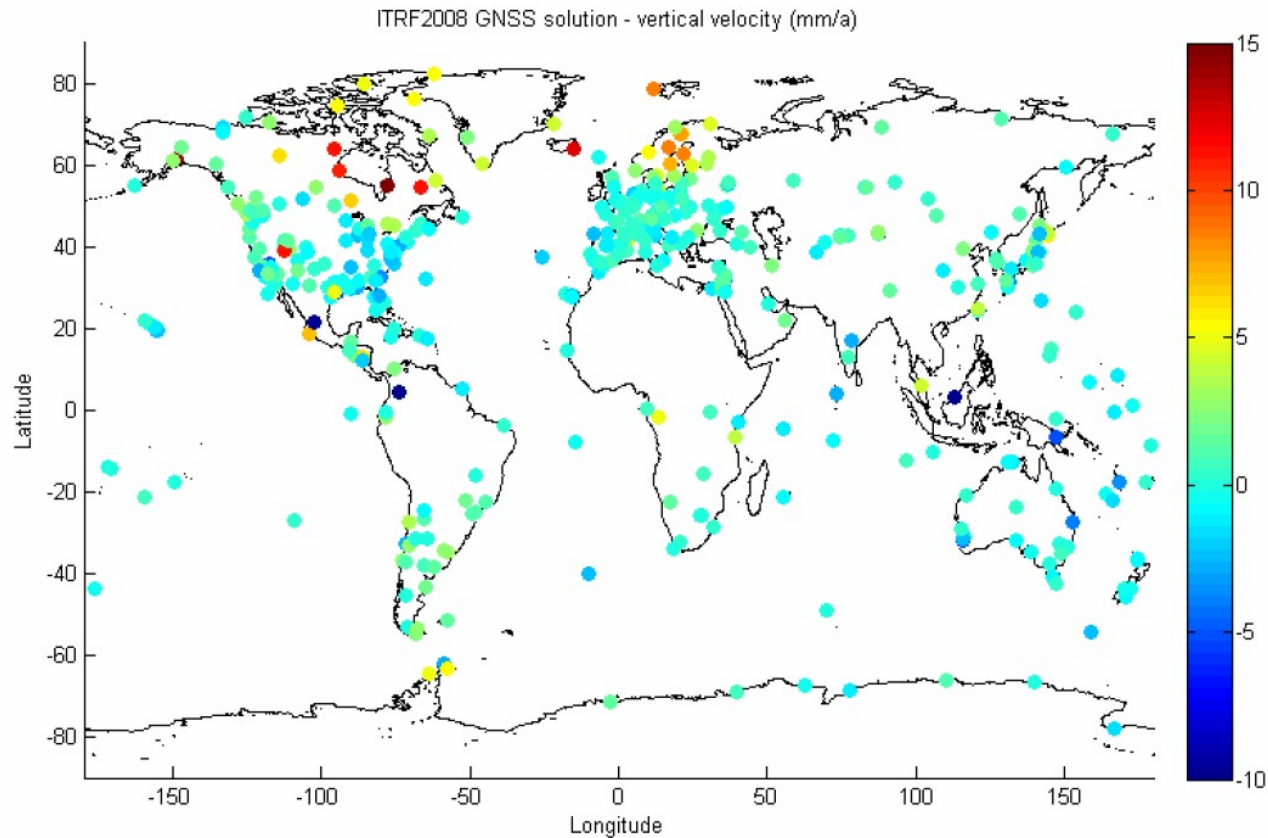


Vitesses verticales ITRF2005

© Métivier L.

# Evaluation du repère terrestre

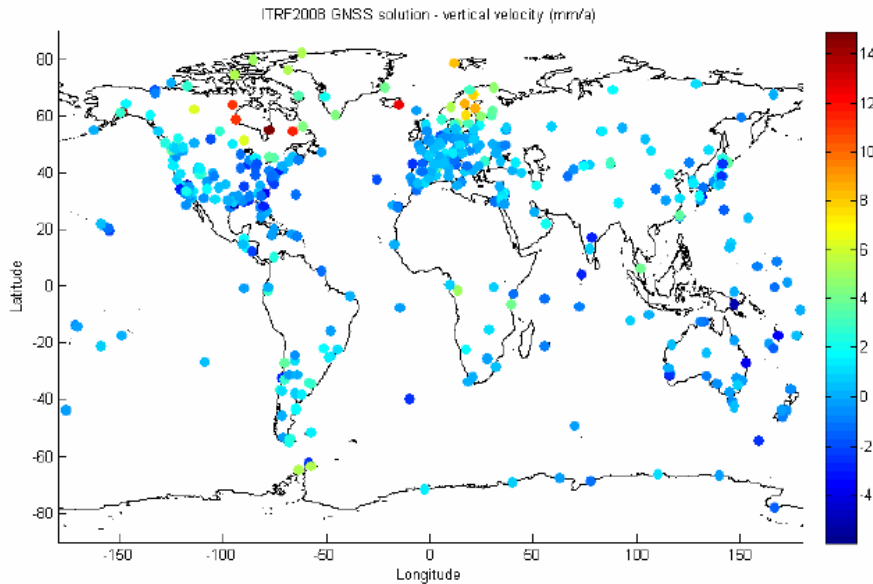
## Evaluation des vitesses individuelles: exemple



Vitesses verticales ITRF2008

© Métivier L.

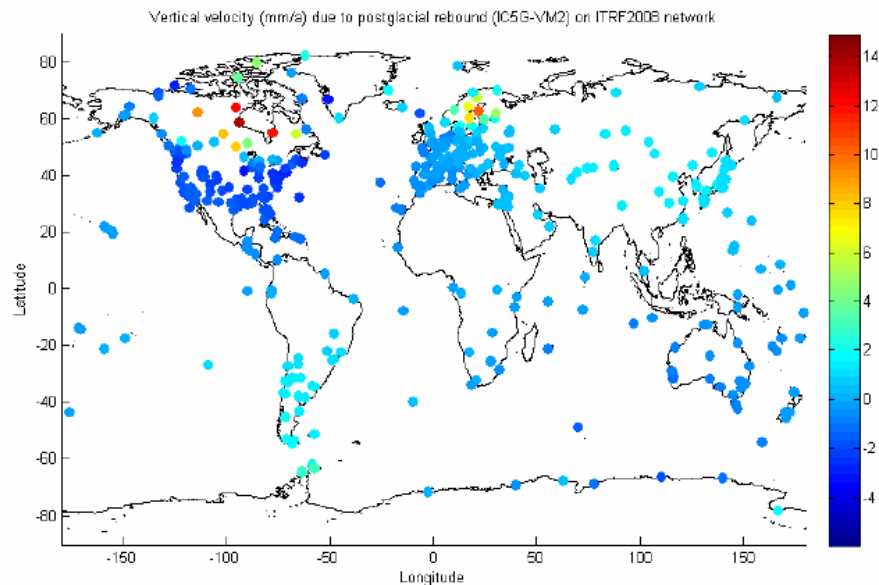
# Evaluation du repère terrestre



## ITRF2008 GNSS vertical velocities

After exclusion of a few stations presenting large non-geophysical subsidence or a large error

Vertical velocities induced by the postglacial rebound (PGR) (ICE5G-VM2 model, Peltier 2004)



# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

Tout d'abord, quelle différence entre les techniques de mesure?

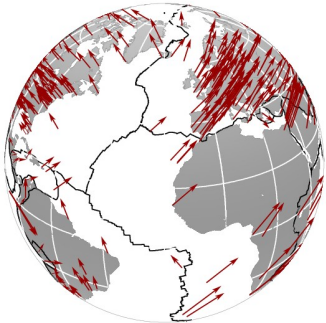
t = 2005.0		Origin	Scale
<b>VLBI</b>		-	<b>Reference</b>
<b>SLR</b>	<i>Altamimi et al. (2011)</i>	<b>Reference</b>	(~ -7 mm, ~ - 0.3 mm/yr)
<b>DORIS</b>		(~ 20 mm, ~ 5 mm/yr)	(~ 1 mm, ~ - 0.15 mm/yr)
<b>GPS</b>	<i>Haines et al. (2010), Collilieux et al. (2010), Collilieux et Schmid (2012)</i>	(~ 10 mm, ~ 1 mm/yr)	( + ~ 20 mm , ~ - 0.45 mm/yr)

**Table** Maximum differences reported according to recent studies

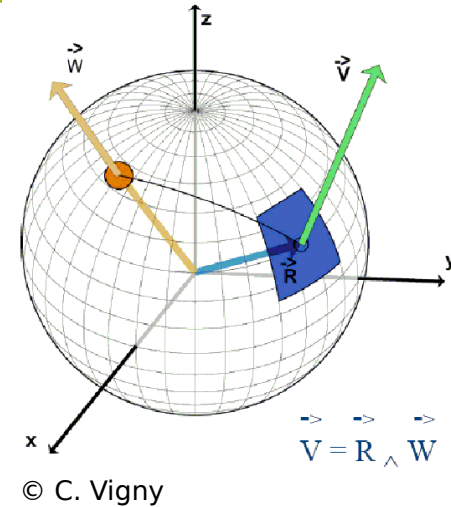
# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses



$$\left. \begin{array}{l} \text{Horizontal velocity} \\ \text{TRF} \end{array} \right\} = \text{Euler pole model} - \text{T} \quad (\text{rigid plate motion})$$



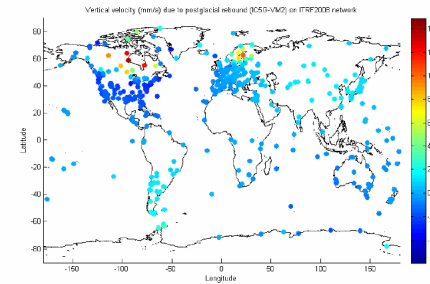
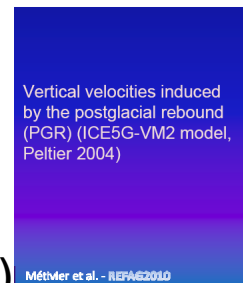
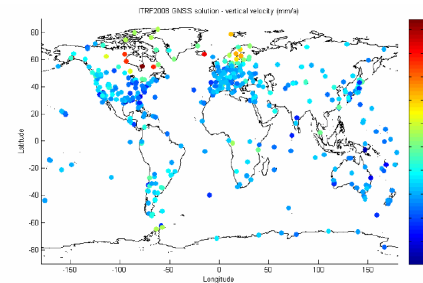
Study	Tx (mm/yr)	Ty (mm/yr)	Tz (mm/yr)	Comment
Argus et al. (2011) ITRF2008	$-0.46 \pm 0.40$	$-0.23 \pm 0.61$	$-1.24 \pm 0.54$	
Argus et al. (2011) GEODVEL	$0.17 \pm 0.72$	$0.26 \pm 0.86$	$-1.04 \pm 0.78$	Converted to ITRF2008 using 0 translation
Kogan et Steblou (2008)	$0.6 \pm 0.2$	$0.1 \pm 0.2$	$-2.5 \pm 0.2$	Converted to ITRF2008 using 0 translation
Altamimi et al. (2012)	$-0.41 \pm 0.27$	$-0.22 \pm 0.32$	$-0.41 \pm 0.30$	

# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

$$\text{Vertical velocity} \Big|_{\text{TRF}} = \text{GIModel} - \mathbf{T}$$



Remerciement: D. Argus (JPL)  
modèle ICE-5G VM2 T90 Rot (Peltier 2007)

Study	T <sub>x</sub> (mm/yr)	T <sub>y</sub> (mm/yr)	T <sub>z</sub> (mm/yr)	Comment
<i>Argus et al. (2011)</i>	-0.18±0.32	0.68±0.32	-0.47±0.26	ITRF2008
<i>Argus et al. (2011)</i>	0.00±0.11	0.54±0.10	-0.96±0.09	GPS Nevada, (ITRF2008)

# Evaluation du repère terrestre

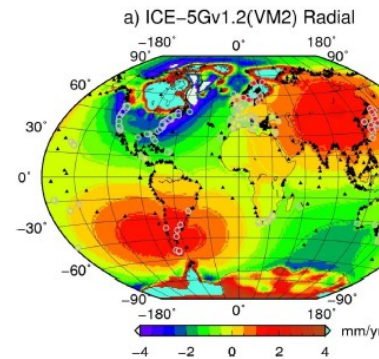
## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référer
- 2) Vitesses

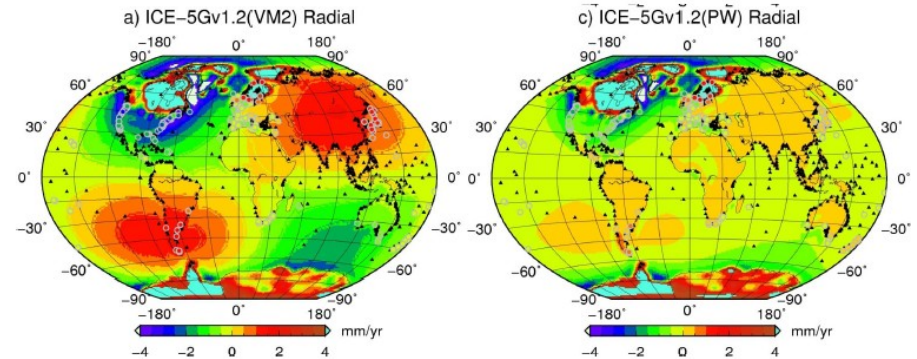
Comparaison des vitesses verticales à un modèle de rebond  
King et al.; 2011, 2012

- Cyan = best fit
- Magenta = best fit after GPS Z-translation rate of -1.2mm/yr [c.f. Argus et al., 2007, 2010, 2011]

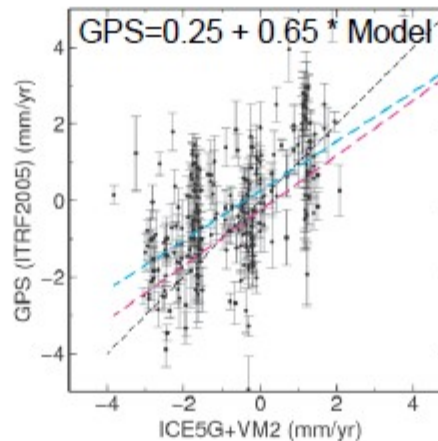
GIA Model  
(ICE-5G+VM2)



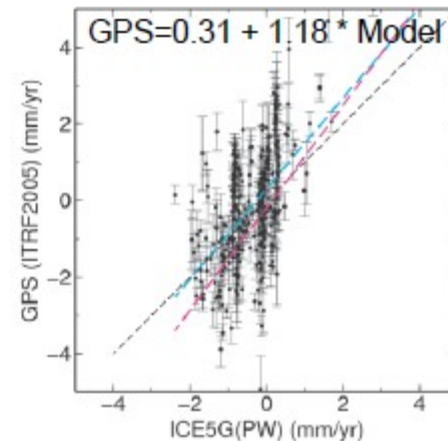
GIA model (ICE-5G+~VM2; PW comps)



ICE5Gv1.2(VM2) vs GPS



ICE5Gv1.2(PW) vs GPS

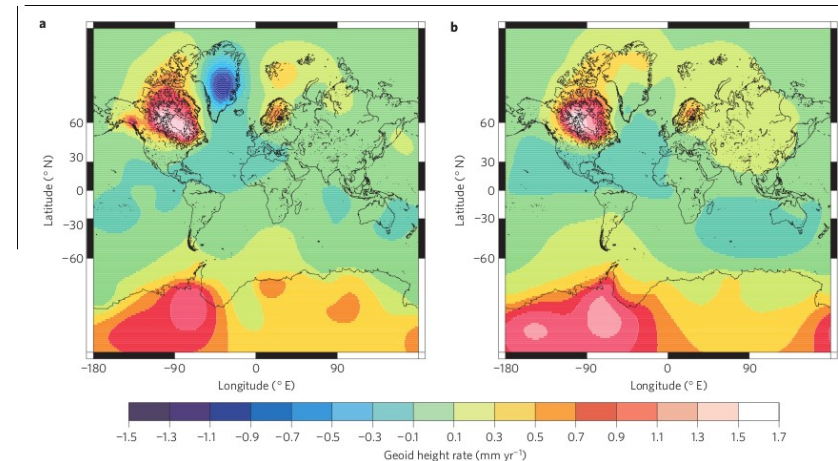


# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

- *Wu et al. (2010)* ont estimé simultanément le rebond post-glaciaire, la fonte des glaces récente et la tectonique des plaques à partir de mesures GPS, de modèles de pression de fond de mer et de gravimétrie spatiale.



*Wu et al. 2010, nature geoscience*

- *Wu et al. (2011)* ont fait une étude similaire à partir des vitesses ITRF2008 et en introduisant des termes d'erreur d'origine et d'échelle. Hypothèse: le "rayon terrestre est constant" dans le temps.

	T <sub>x</sub> (mm/yr)	T <sub>y</sub> (mm/yr)	T <sub>z</sub> (mm/yr)	Echelle (mm/yr)
--	---------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------

ITRF2008 + GRACE + ECCO + OMCT	- 0.4 ± 0.1	- 0.2 ± 0.1	- 0.5 ± 0.2	- 0.1 ± 0.2
--------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------



# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

**Les données marégraphiques corrigées des déplacements verticaux GPS fournissent la montée du niveau des mers par rapport au centre des masses (celui de l'ITRF)**

Appuyez pour modifier les styles du texte du masque

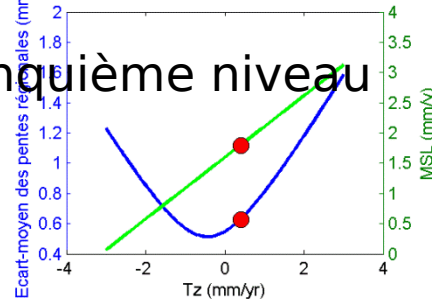
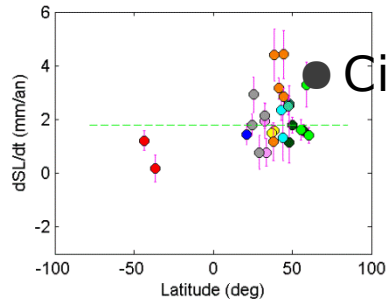
Toutes les valeurs de la montée géocentrique des océans sont-elles acceptables?



● Troisième niveau

Comment la montée du niveau de la mer est-elle affectée quand l'origine du repère change?

● Quatrième niveau



● Cinquième niveau

*Collilieux et Wöppelmann, 2011*

# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

### Origine :

Erreur d'origine

GPS/Marégraphes (27 sites)

ITRF2005	-0.44 ± 0.22 mm/an
ITRF2000	1.36 ± 0.22 mm/an

*Collilieux et  
Wöppelmann, 2011*

Simulations avec deux modèles de rebond post-glaciaire

ICE5G VM2 (Peltier 2004) *	-0.04 mm/an
ICE5G VM4 *	0.01 mm/an

## Evaluation du repère terrestre

### Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

Validation à l'aide de données de gravimètres absolues.

Vitesse verticale =  $\alpha(\lambda, \varphi)$  pente  
gravimétrique

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

Précision 0.1  $\mu$ Gal/yr  
Relatif au centre des masses

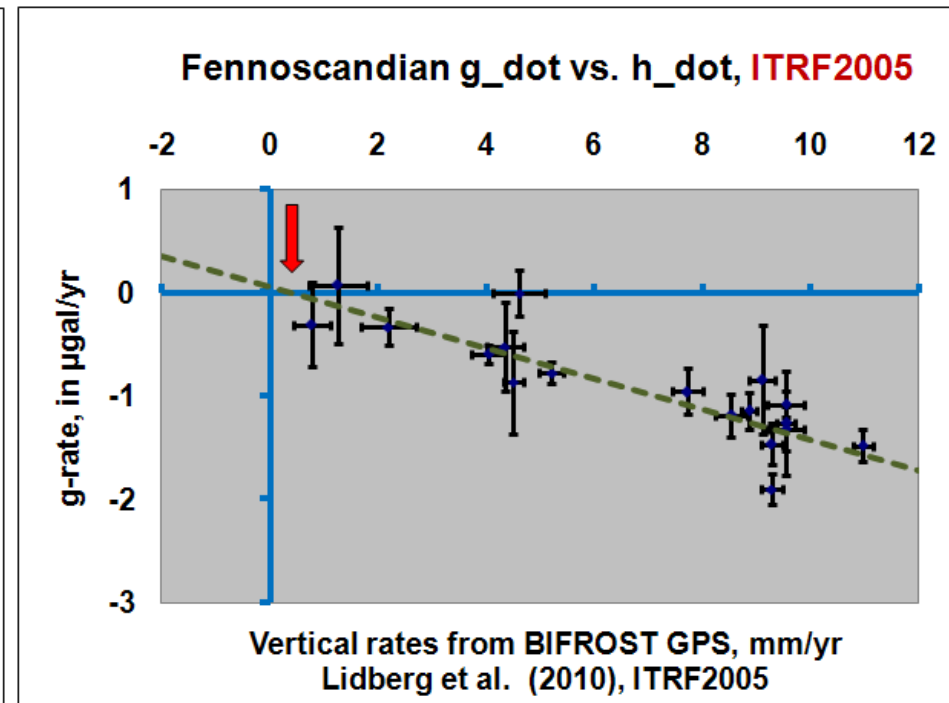
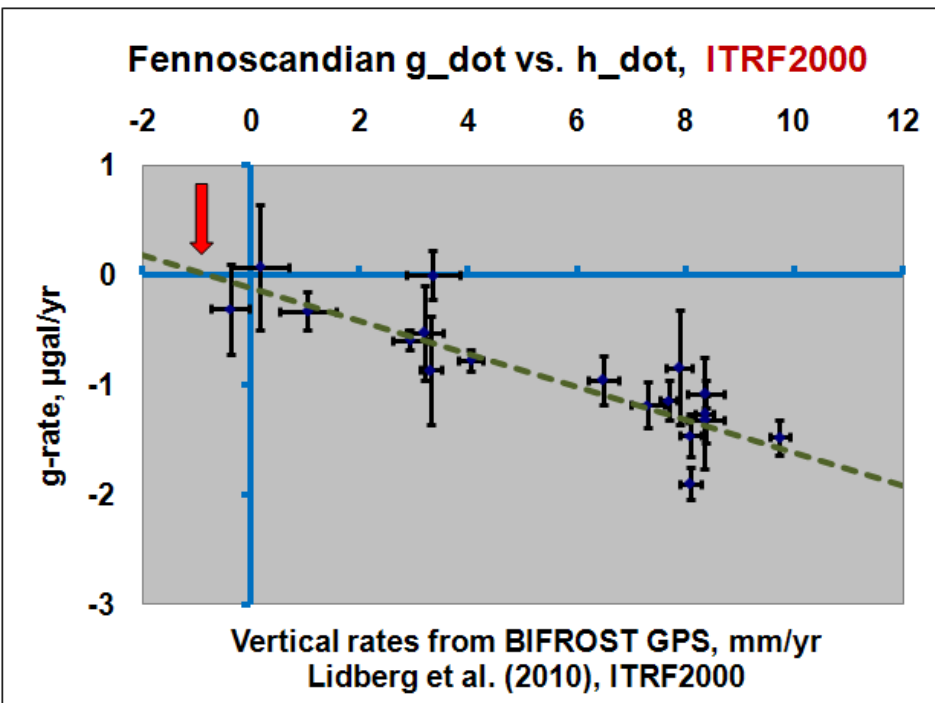
Etude non publiée proposée par Plag et al., 2007

# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
- 2) Vitesses

Dérive gravimétrique en fonction de la vitesse verticale en Scandinavie (Collilieux et al., 2011; figure réalisée par J. Mäkinen)

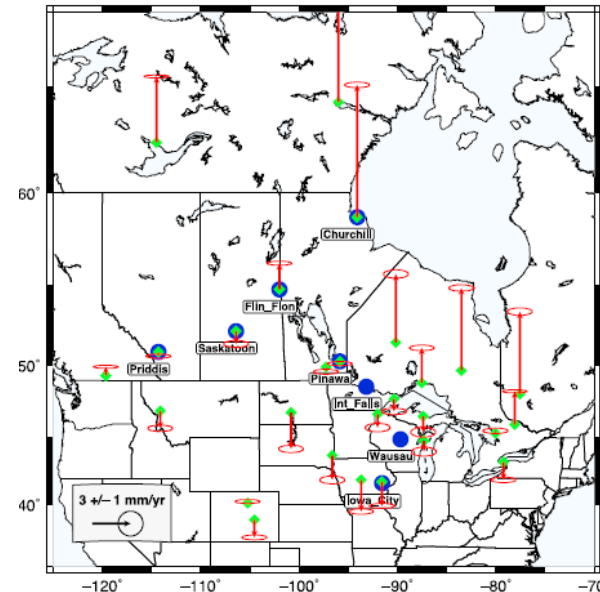
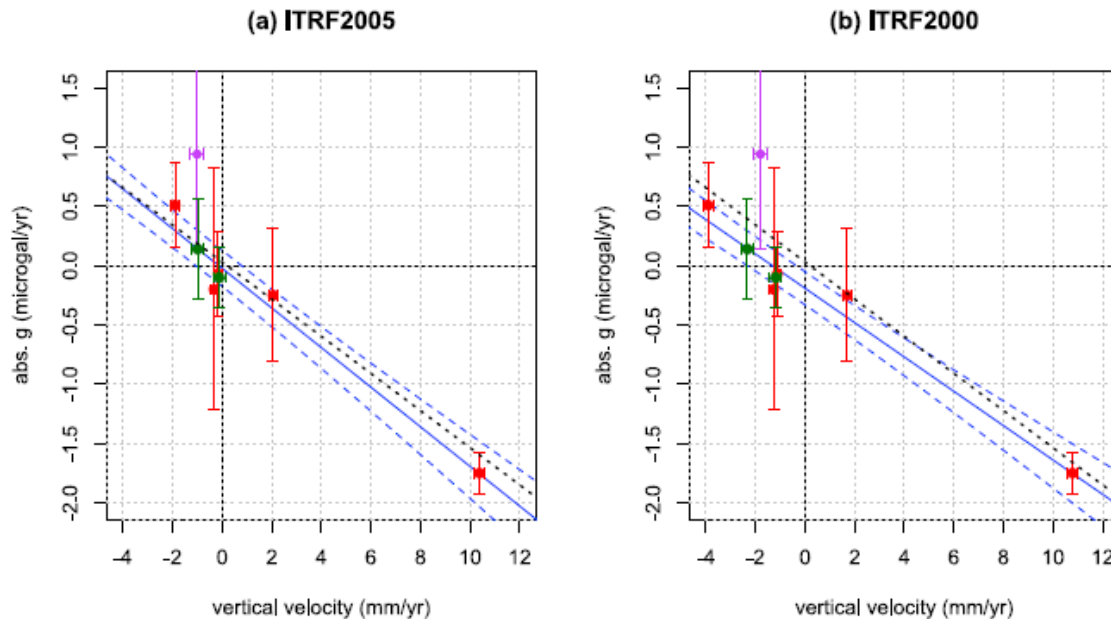


**Nordic AG Project (coordinated by the Nordic Geodetic Commission)**

# Evaluation du repère terrestre

## Evaluation des paramètres du repères (origine, échelle)

- 1) Coordonnées à l'instant de référence
  - 2) Vitesses
- gravimètre  
◆ GPS



**Figure 2.** Absolute gravity vs. GPS uplift rates. GPS vertical velocities aligned to (a) ITRF2005 and (b) ITRF2000. Red and green symbols show absolute gravity and GPS uplift rates with 95% confidence intervals at collocated and interpolated sites, respectively. From left to right, gravity stations are: Iowa City, Wausau, Saskatoon (purple symbol not used in fit), Priddis, Pinawa, Int. Falls, Flin Flon, Churchill. Blue solid and dashed lines show best-fit linear regression and its 95% confidence interval, respectively. Black dashed line shows model-predicted, center-of-mass aligned, linear relation based on rates predicted by the Multi-Dome-1/VM2 model.

*Mazzotti et al., 2011*

# Evaluation du repère terrestre

---

## Conclusions:

Les données externes (marégraphiques, gravimétriques) et les modèles géophysiques apportent une réelle information sur l'exactitude de l'ITRF!

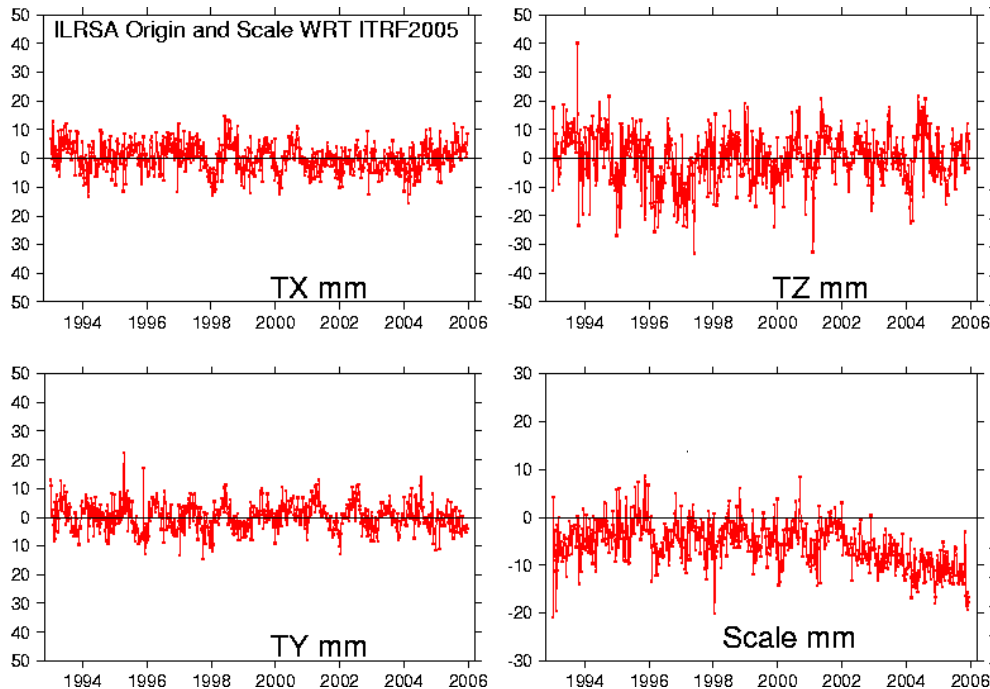
Précision sur la détermination de l'évolution temporelle de l'origine dans l'ITRF2008 avec des données externes:

- bilan le plus optimiste : 0.5 mm/an selon les 3 composantes

# 03. Mouvement du geocentre

# Mouvement du géocentre

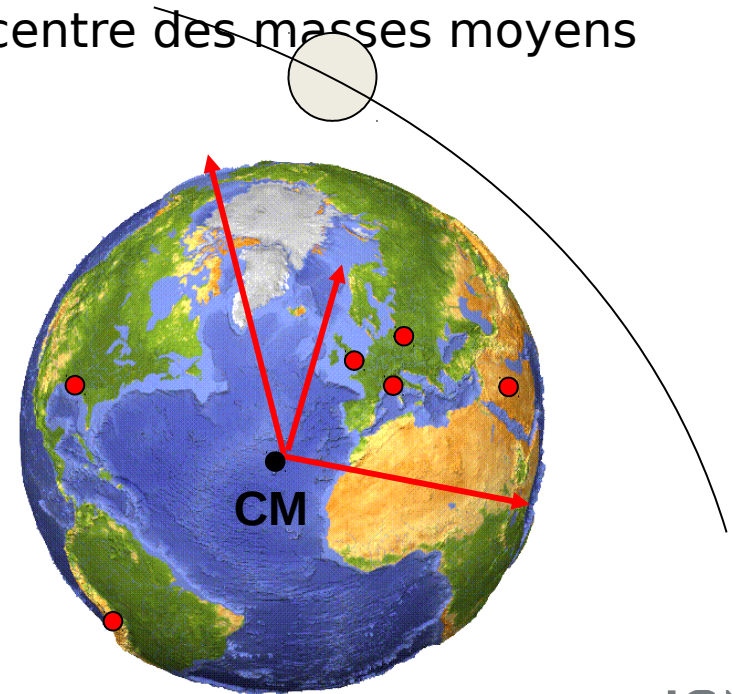
## Différence d'origine entre les coordonnées hebdomadaires SLR et l'ITRF



Ex: translations télémétrie Laser / ITRF2005

Que symbolisent ces paramètres?

Le mouvement du centre des masses CM quasi-instantané par rapport au centre des masses moyens



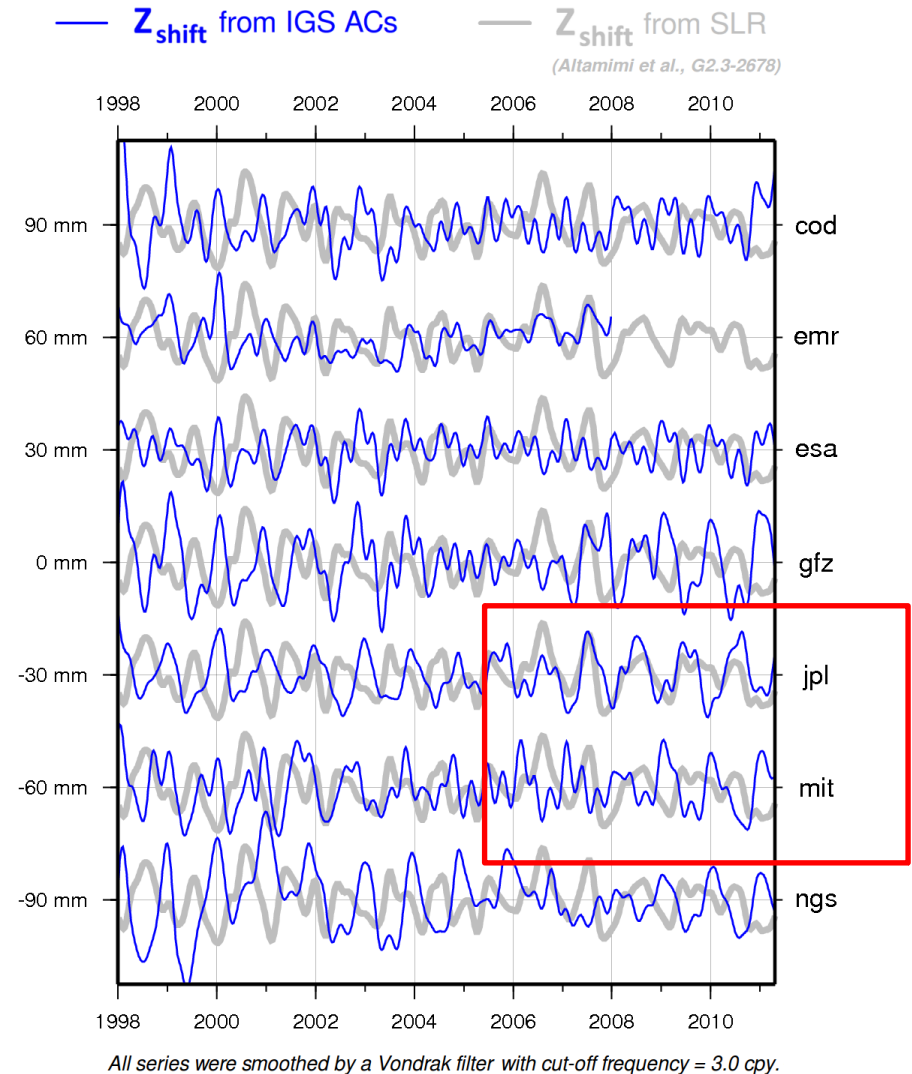


# Mouvement du géocentre

Obtient-on la même chose avec le GPS?

Ex: composante Z  
Différents traitements (différents centres d'analyse) donnent différents résultats!

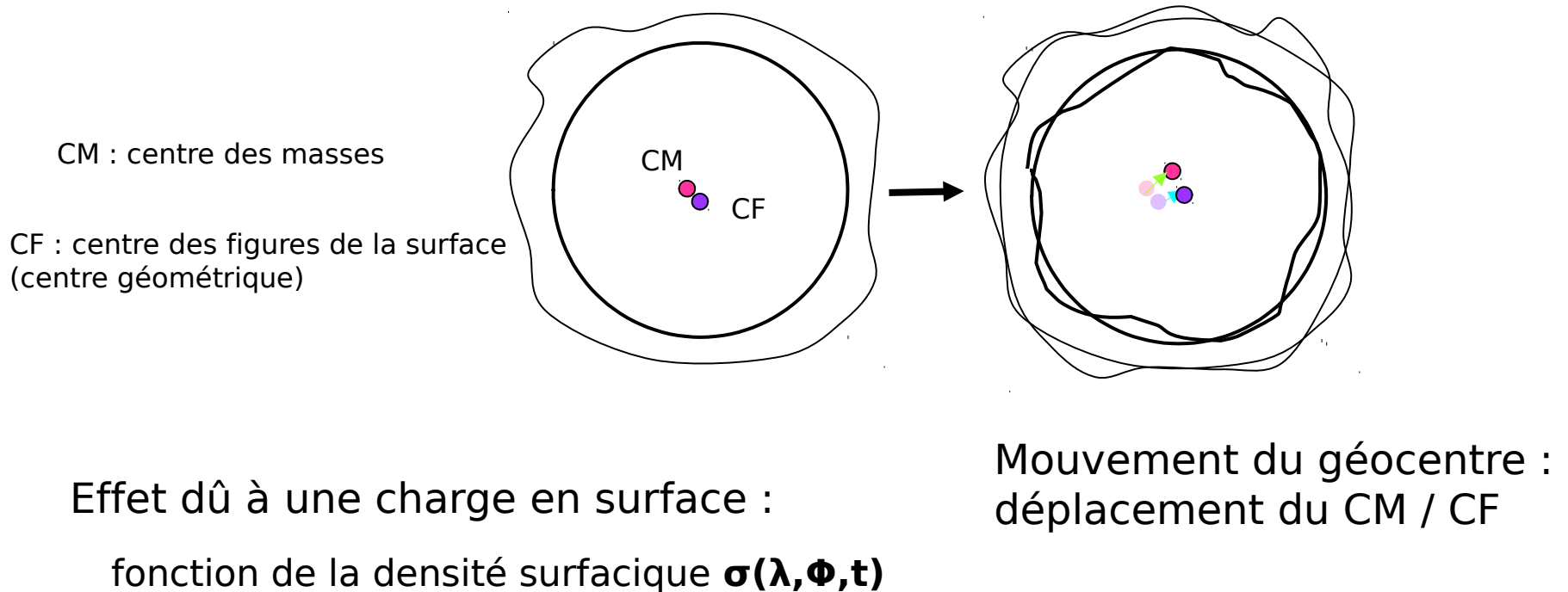
*Rebischung et al., 2012*



# Mouvement du géocentre

Quelle est l'origine physique des déplacements attendus?

A notre échelle de temps, ce sont les transferts de masse en surface!



**NB:** on peut donc prendre les déplacements GPS observés et estimer les masses qui causent ces déplacements (Blewitt et al., 2001)

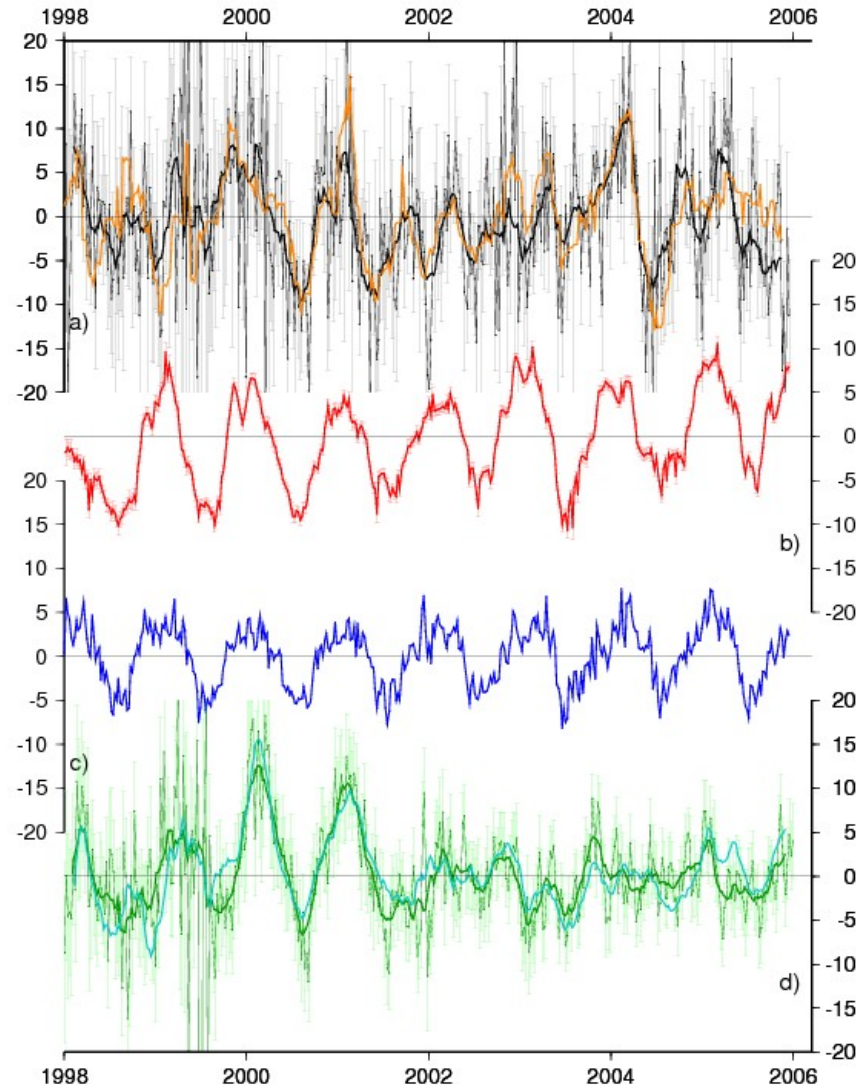
# Mouvement du géocentre

(Collilieux 2008, Collilieux et al., 2009)

## Composante Z

en mm

- Laser**
  - ILRS (ITRF2005)  
( $2.7 \pm 0.5$  mm,  $0 \pm 10^\circ$ )
  - ILRS + GPS  
( $3.4 \pm 0.5$  mm,  $17 \pm 8^\circ$ )
- Inversion de la masse qui provoque les déplacements observé par GPS**
  - GPS/OBP (Wu et al.)  
( $4.6 \pm 0.3$  mm,  $23 \pm 3^\circ$ )
- Modèle obtenu à partir de données sol**
  - GGFC (van Dam)  
( $2.4 \pm 0.1$  mm,  $51 \pm 3^\circ$ )
  - Inversion IGS  
( $2.3 \pm 0.3$  mm,  $22 \pm 7^\circ$ )



# Mouvement du géocentre

le mouvement du géocentre ne soit pas inclus dans l'ITRF. Est-ce un problème?

$$\begin{array}{l} \text{Position instantannée} \\ \text{théorique} \end{array} (t) = \begin{array}{l} \text{Coordonnées} \\ \text{référence} \end{array} (t) + \text{Déplacements modélisés} (t)$$
$$(t) = X(t_0) + V(t-t_0) + \sum_i dX(t-t_i) + \sum_i dV(t-t_i)$$

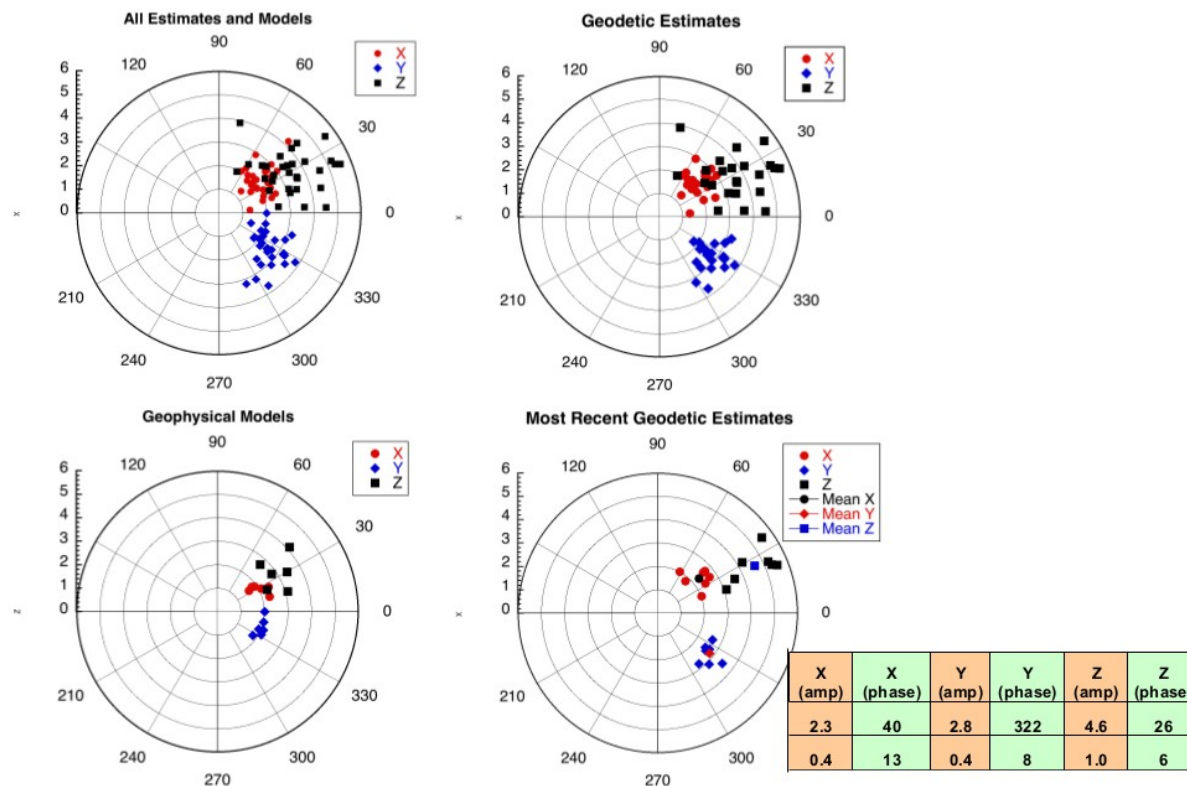
Les déplacements modélisés incluent:

- Marées terrestres
- Marée polaire
- Surcharge océanique

Mais pas de modèle de surcharges (atmosphère, océan non-marée, eaux continentales) qui inclut le mouvement du géocentre.

# Mouvement du géocentre

Certains chercheurs sont favorables à la diffusion d'un modèle de mouvement du géocentre (terme annuel) contraint par



*Ries, (2011)*

Mais attention aux confusions potentielles!

# Conclusions

## Ordre de grandeur du mouvement du géocentre:

< 6 mm sur chaque composante à l'annuel. Faut-il fournir un modèle contraint par la géodésie spatiale?

## Références:

- Collilieux, X., Z. Altamimi, D.F. Argus, C. Boucher, A. Dermanis, B.J. Haines, T.A. Herring, C. Kreemer, F.G. Lemoine, C. Ma, D.S. MacMillan, J. Makinen, L. Métivier, J.C. Ries, F.N. Teferle and X. Wu (inpress) External evaluation of the Terrestrial Reference Frame: report of the task force of the IAG sub-commission 1.2, Proceedings of the XXV IUGG General Assembly, P. Willis Ed., vol. 139, International Association of Geodesy Symposia, Springer

- Collilieux, X. and Z. Altamimi (2012) External Evaluation of the Origin and the Scale of the International Terrestrial Reference Frame , Proceedings of the IAG Symposium. REFAG2010. Marne-La-Vallée, Z. altamimi and X. Collilieux Ed., vol. 138 (in press), International Association of Geodesy Symposia, Springer, doi:10.1007/978-3-642-32998-2\_5

- Collilieux, X., Z. Altamimi, J. Ray, T. van Dam and X. Wu (2009) Effect of the satellite laser ranging network distribution on geocenter motion estimation , Journal of Geophysical Research, 114, doi:10.1029/2008JB005727