

GPS



DORIS



Du Repère International de Référence Terrestre au Repère de référence du système GALILEO

Zuheir Altamimi

Institut Géographique National

Laboratoire de Recherche en Géodésie

VLBI



GIOVE



SLR



La géodésie

- discipline fondamentale pour les applications en sciences de la Terre et la navigation satellitaire
- est la seule capable de réaliser un **système de référence terrestre global**
- Le progrès accompli par la géodésie depuis plus d'un quart de siècle est le fruit de contributions internationales fondées sur le volontariat et la coopération pour l'intérêt scientifique
- ==> **Création de services scientifiques**

Pourquoi un système de référence?

- **Détermination d'orbites précises pour:**
 - **GNSS: Global Navigation Satellite Systems**
 - **Autres satellites: altimétrie, océanographie, champs de gravité**
- **Applications en Sciences de la Terre**
 - **Mouvement tectonique et déformation crustale**
 - **Variations spatio-temporelle du niveau des mers**
 - **Rotation de la Terre**
 - ...
- **Autres applications**
 - **Navigation: Aviation, Terrestre, Maritime**
 - **Systèmes géodésiques nationaux**
 - **Cartographie et positionnement**

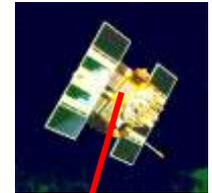
Définir un système et un repère de référence :

Trois niveaux conceptuels :

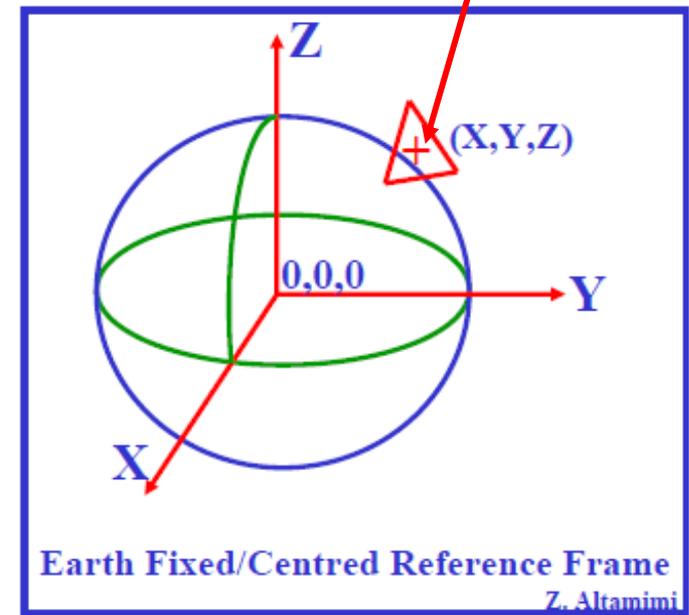
- **Systeme de référence terrestre idéal (TRS):**
Idéal, mathématique, théorique ...
- **Repère de référence terrestre (TRF):**
Réalisation numérique du TRS auquel les utilisateurs ont accès
- **Systeme de coordonnées:** cartesian (X,Y,Z), geographic (λ , ϕ , h), ...
 - Le TRF hérite les propriétés mathématiques du TRS
 - Les deux sont définis par **origine, échelle & orientation**
 - Le TRF est construit par les observations géodésiques

Qu'est-ce qu'un repère de référence ?

- Repère fixé/centré à la Terre: permet d'exprimer des positions sur la surface de la Terre en **fonction du temps**
- Cela parait simple, mais ... on doit tenir compte de:
 - La théorie relativiste
 - Forces agissant sur le satellite
 - L'atmosphère
 - Rotation de la Terre
 - Marrées terrestres et océaniques
 - Mouvement tectonique
 - ...
- **Les positions/vitesses des stations sont déterminées avec une précision millimétrique**



Origine, Echelle & Orientation



International Terrestrial Reference System (ITRS)

- Réalisé par le **Center ITRS** de l'IERS (IGN/LAREG)

Adopté par l'IUGG en 1991 & 2007
Pour les applications Science de la Terre

- Réalisation : **ITRF**

positions/vitesses des stations **estimées par combinaison** des données VLBI, SLR, GPS et DORIS

Plus de 800 stations dans plus de 500 sites

Versions disponibles:
ITRF88, 89,..., 2000, 2005
Version courante: **ITRF2008**

**Basé sur les sites
Co-localisés**

<http://itrf.ign.fr>

Sites de Co-localisation

- Site où au moins deux instruments sont en opération
- Rattachés en 3 dimensions par géodésie classique ou GPS
- Coordonnées différentielles (DX, DY, DZ) sont disponibles

$$DX_{(GPS,VLBI)} = X_{VLBI} - X_{GPS}$$

SLR/LLR



VLBI



GNSS



DORIS



Historique de l'ITRF (1/2)

- **1^{er} repère multi-technique combiné en 1985:**
 - **BTS84 (Boucher & Altamimi, 1985)**
 - **Suivi par BTS85, 86, 87**
 - **Dans le cadre du projet MERIT (Monitoring of Earth Rotation and Inter-comparison of Techniques)**
 - **VLBI + SLR + Doppler/TRANSIT**
- **Le succès de MERIT a conduit à la création de l'IERS (1988)**
- **ITRF88 suivi par ITRF89, ITRF90**

Historique de l'ITRF (2/2)

- 1^{er} Champ de Vitesses combinées avec l'ITRF91
- 1^{ère} solution GPS (JPL: GIG'91) incluse dans l'ITRF91
- 1^{ère} solution DORIS incluse dans l'ITRF94
- Le format SINEX a commencé avec l'ITRF94
- ITRF2000: solutions individuelles libres de toutes contraintes externes
(Altamimi et al., JGR, 2002)
- ITRF2005-2008: fondés sur les séries temporelles de positions de stations et des EOPs

Définition de l'ITRF

- **Origine:** "CdM", réalisée par la technique SLR (Translation nulle entre solutions SLR et l'ITRF)
- **Échelle :**
 - Compatible avec le TCG jusqu'à l'ITRF97
 - Compatible avec le TT à partir de l'ITRF2000
 - Réalisée par une moyenne VLBI et SLR
- **Orientation:** définie par alignements successifs
- **Condition NNR:** remplie implicitement par alignement à un modèle géophysique (présentement: NNR-NUVEL-1A)

Le logiciel CATREF

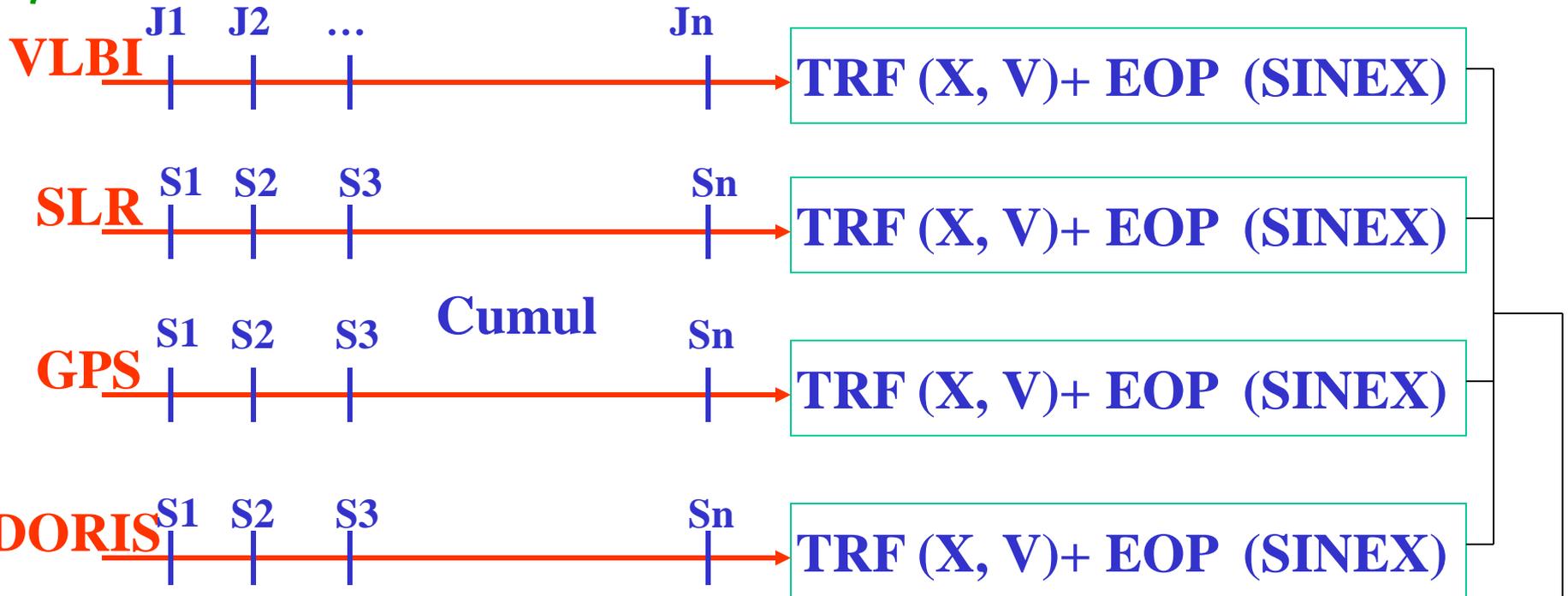
Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames

- Développement commencé en 1995 avec la création du format SINEX (variance complète)
- Opère par module pour:
 - Enlever les contraintes initiales
 - Appliquer des contraintes minimales et/ou internes
 - Combiner des solutions globales (pos., vit. & EOP)
 - Cumuler des séries temporelles (X(t) & EOP)
 - Différentes options de définition du RRT combiné
- Exporté (USA, Canada, Australie, Belgique, Hongrie, ...)
- Est utilisé pour la réalisation du SRT Galileo:
 - Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)
 - Consortium européen: Galileo Geodetic Service Provider (GGSP)

L'ITRF aujourd'hui (1/2)

Séries temporelles

Etape 1



Rattachements

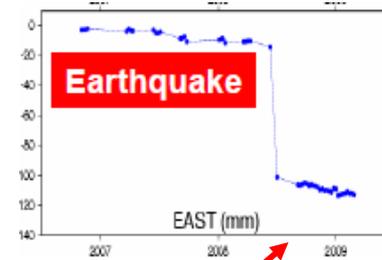
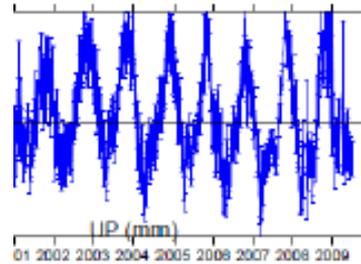
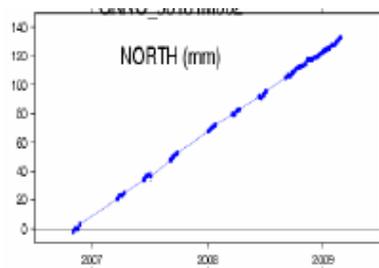
Combinaison
ITRF

Etape 2

TRF (X, V) + EOP (SINEX)

L'ITRF aujourd'hui (2/2)

- Evaluer le comportement de chaque station
 - Linéaire, non linéaire (saisonnier), discontinuité

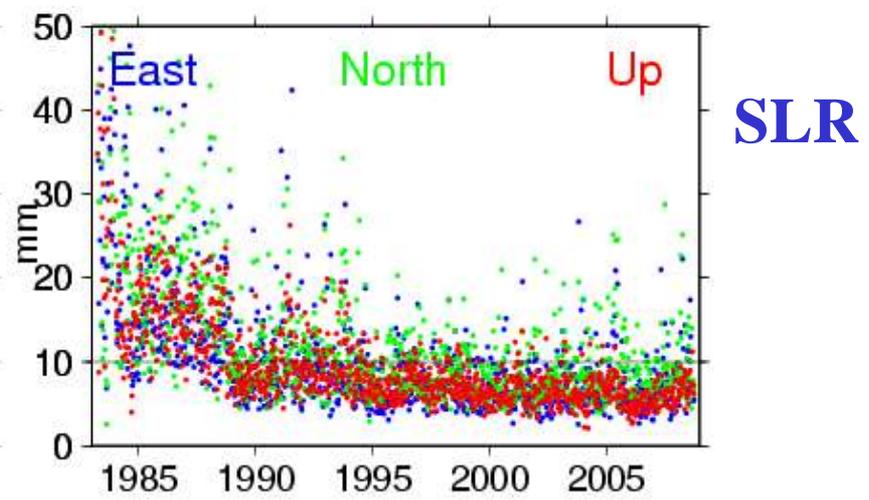
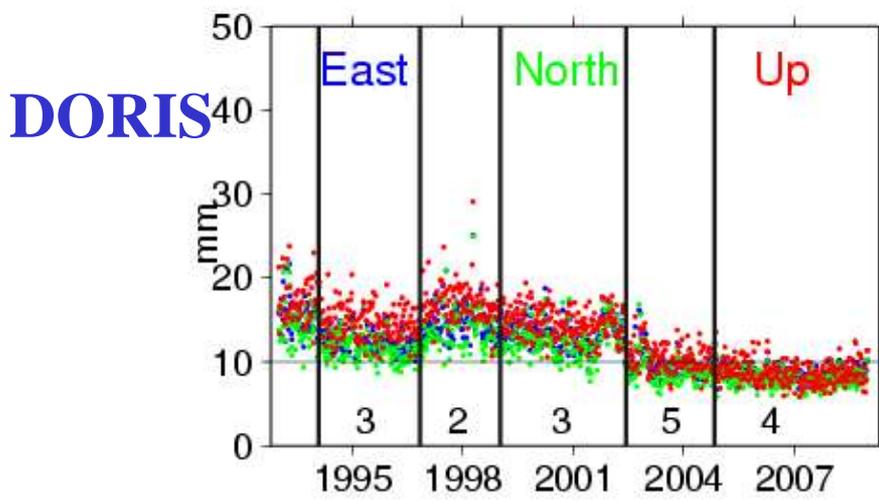
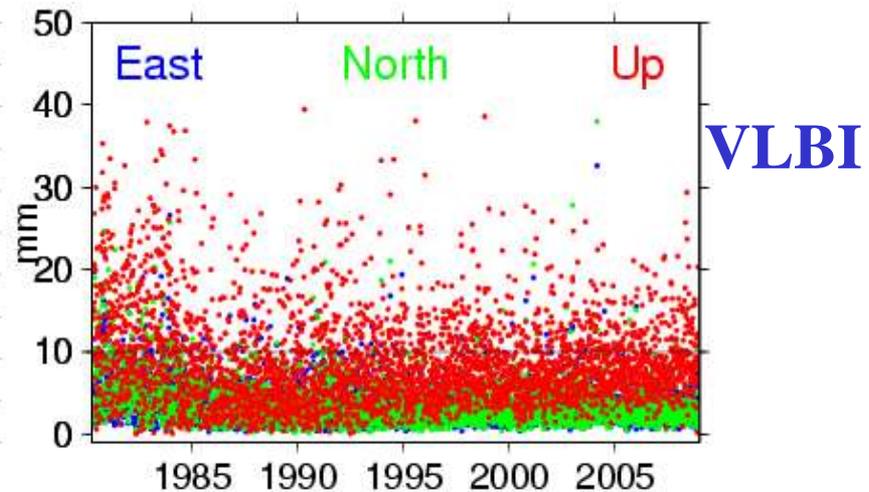
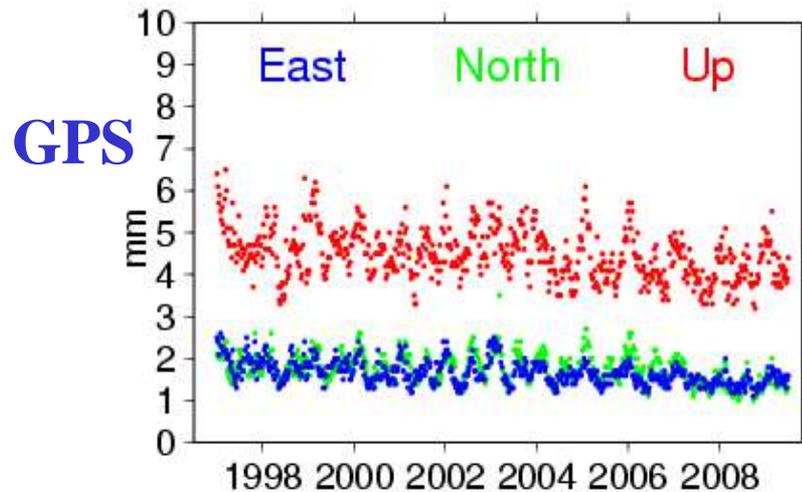


Station expérimentale Galileo

- Evaluer l'évolution temporelle des paramètres physiques du repère (origine et échelle)
- Estimation d'un repère à long terme de manière robuste

WRMS - précision interne

Analyses ITRF2008



WRMS – Valeurs médianes en mm

| Technique | Est | Nord | Verticale |
|-----------|------|------|-----------|
| GPS | 1.6 | 1.7 | 4.4 |
| VLBI | 2.9 | 3.0 | 7.4 |
| SLR | 7.9 | 9.4 | 7.9 |
| DORIS | 11.9 | 10.9 | 13.3 |

Valeurs à prendre avec précaution:

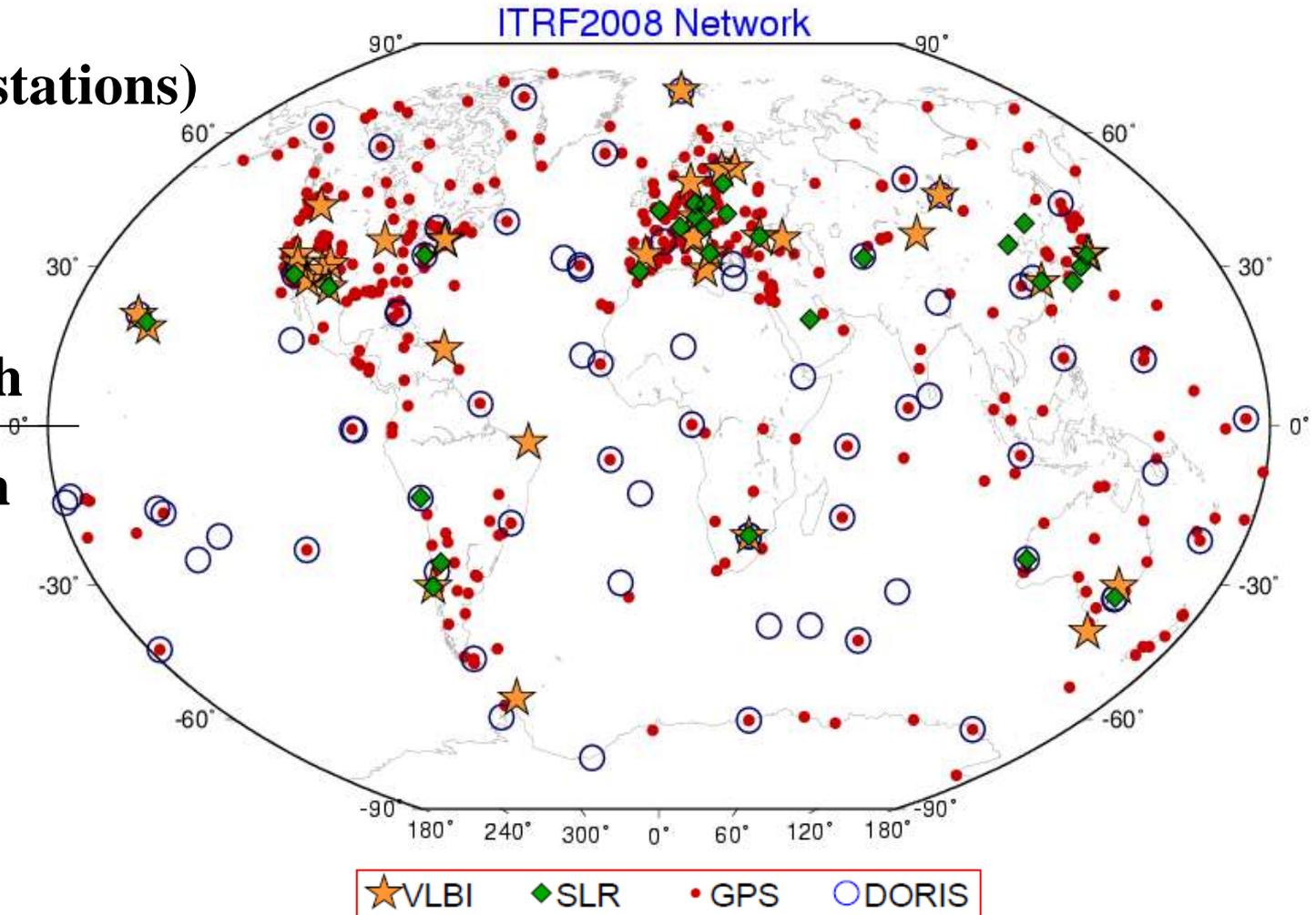
- dépendent de la performance des stations
- échantillonnage et périodes d'observations

ITRF2008

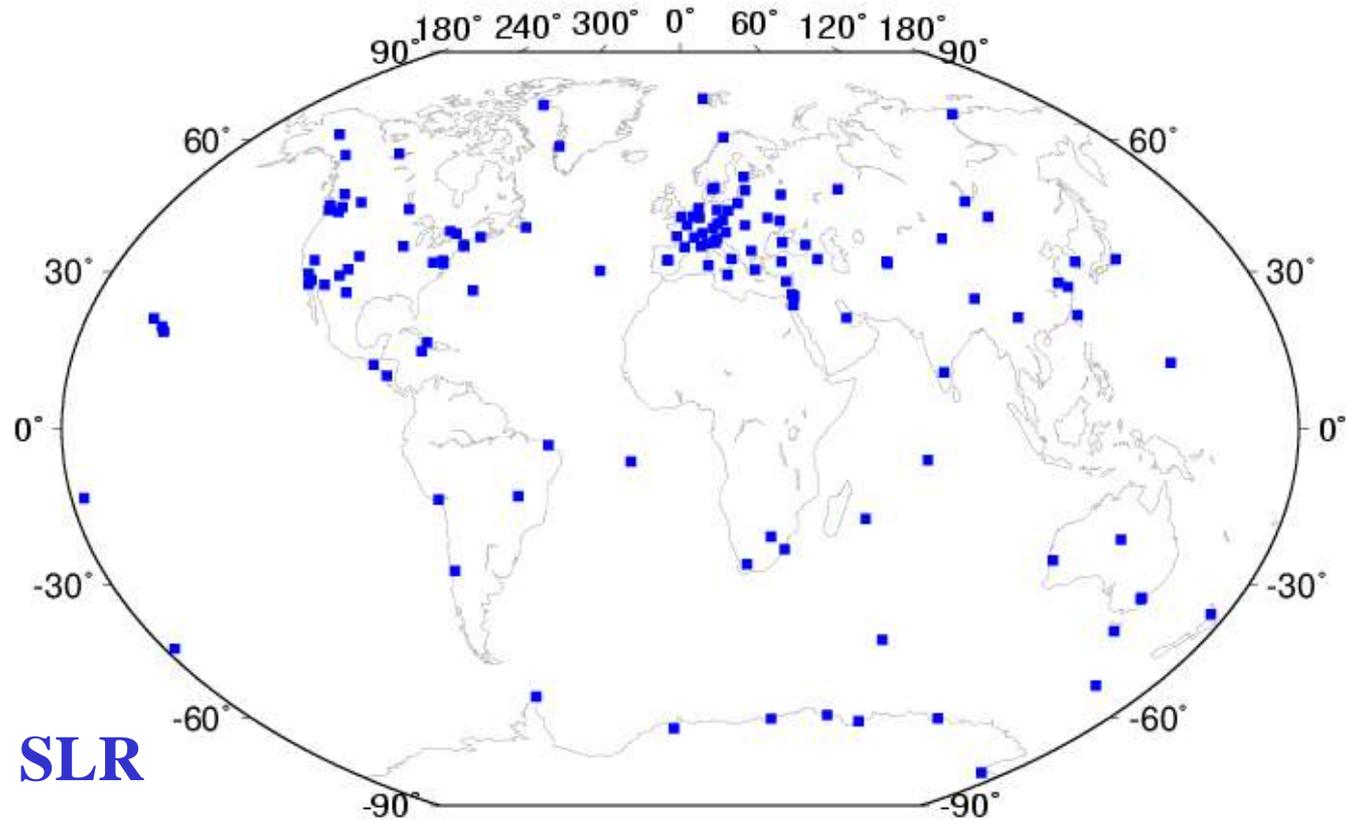
579 sites (920 stations)

461 Sites North

118 Sites South



Paramètres de définition de l'ITRF2008

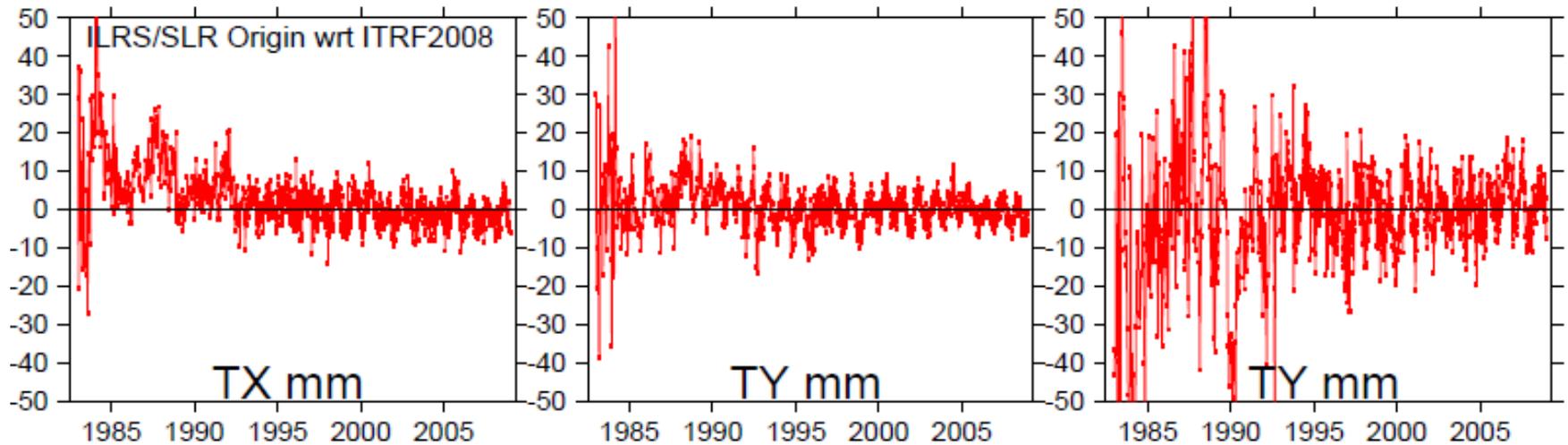


- **Origine: SLR**
- **Echelle : Moyenne des solutions SLR & VLBI**
- **Orientation: Alignement à l'ITRF2005**

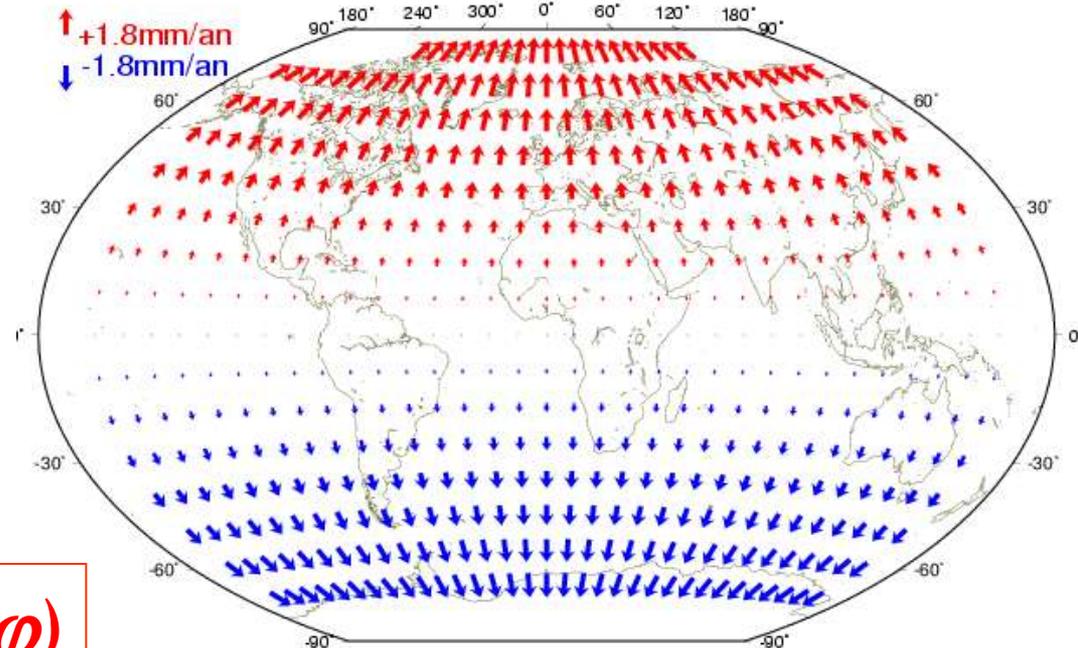
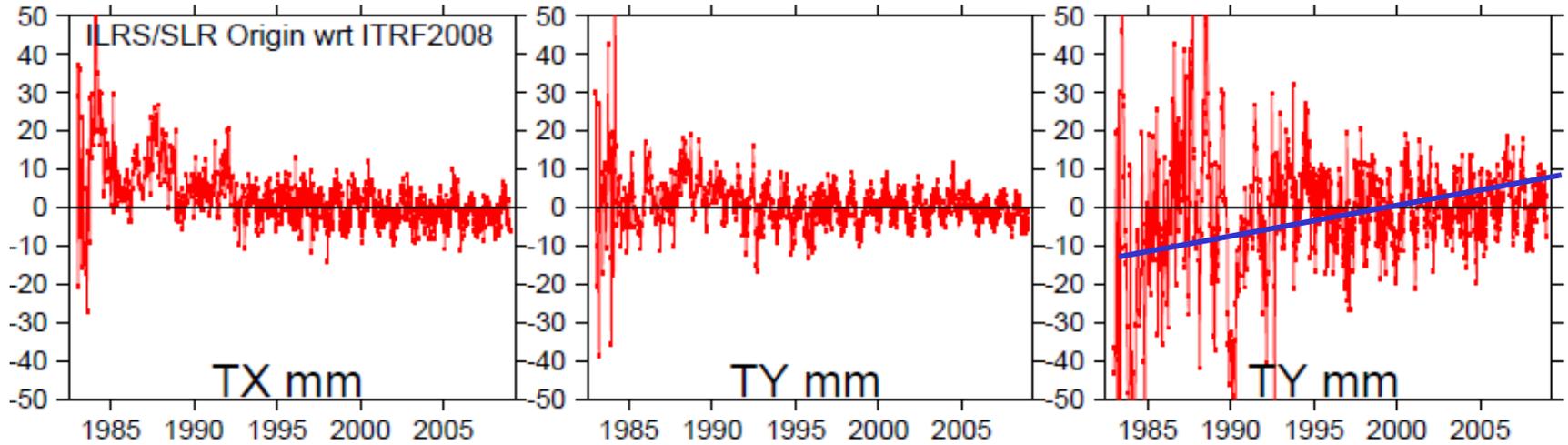
179 stations dans 131 sites

– 104 dans l'hémisphère nord - 27 dans l'hémisphère sud

Origine SLR par rapport à l'ITRF2008

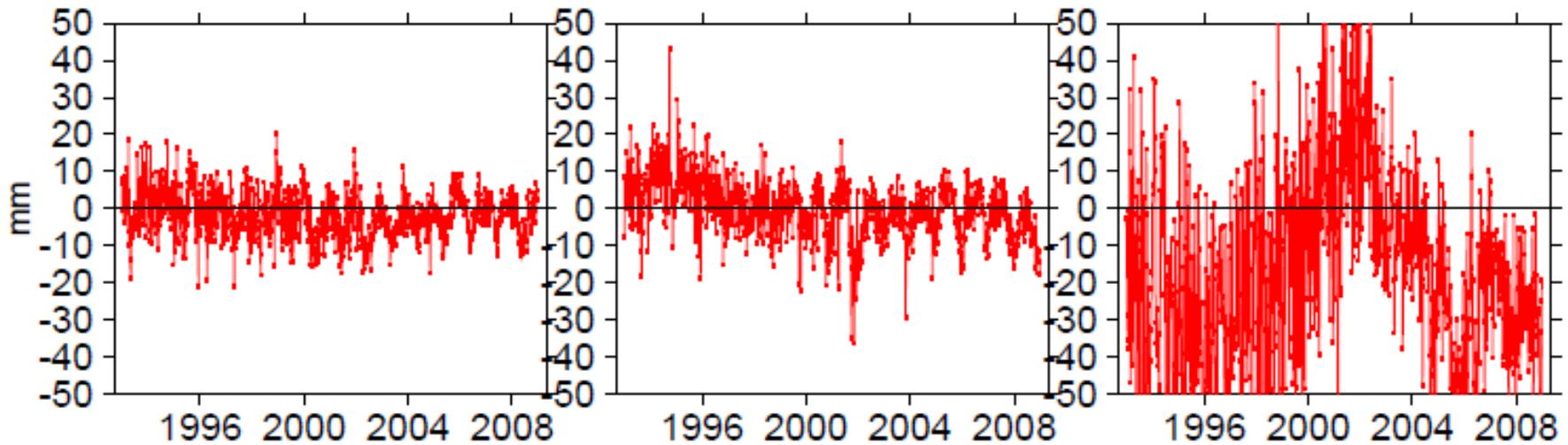


Origine SLR par rapport à l'ITRF2008

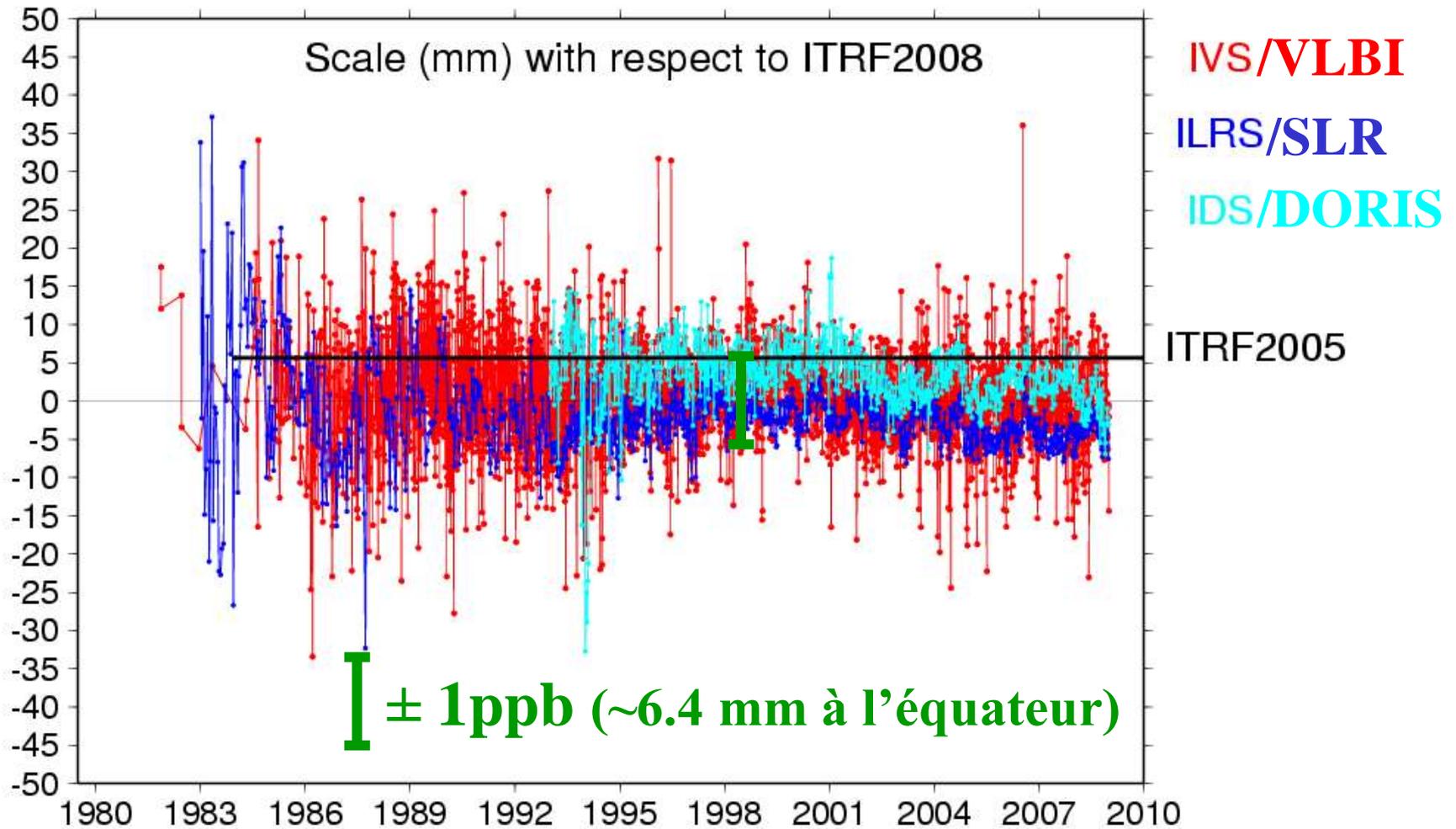


$$V_h = \delta T_z \sin(\varphi)$$

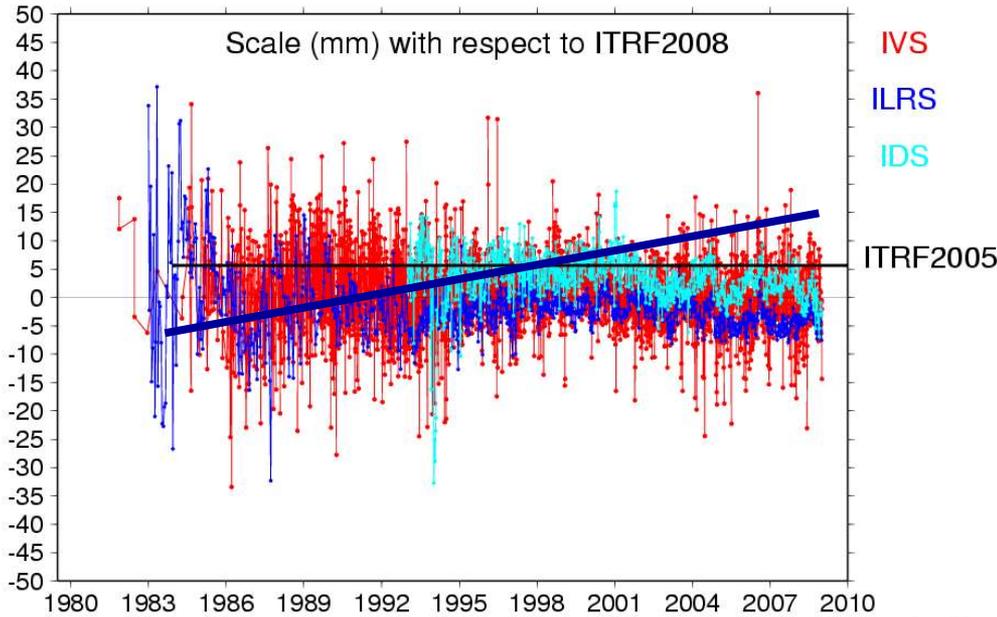
L'origine DORIS par rapport ITRF2008



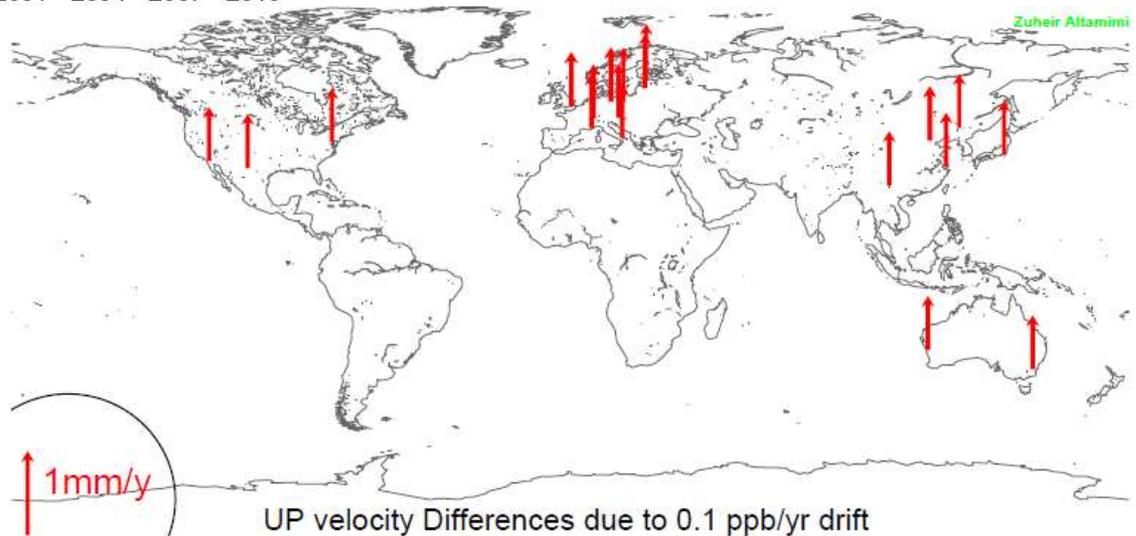
Echelle ITRF2008 : moyenne VLBI et SLR



ITRF2008 Scale: mean of VLBI and SLR



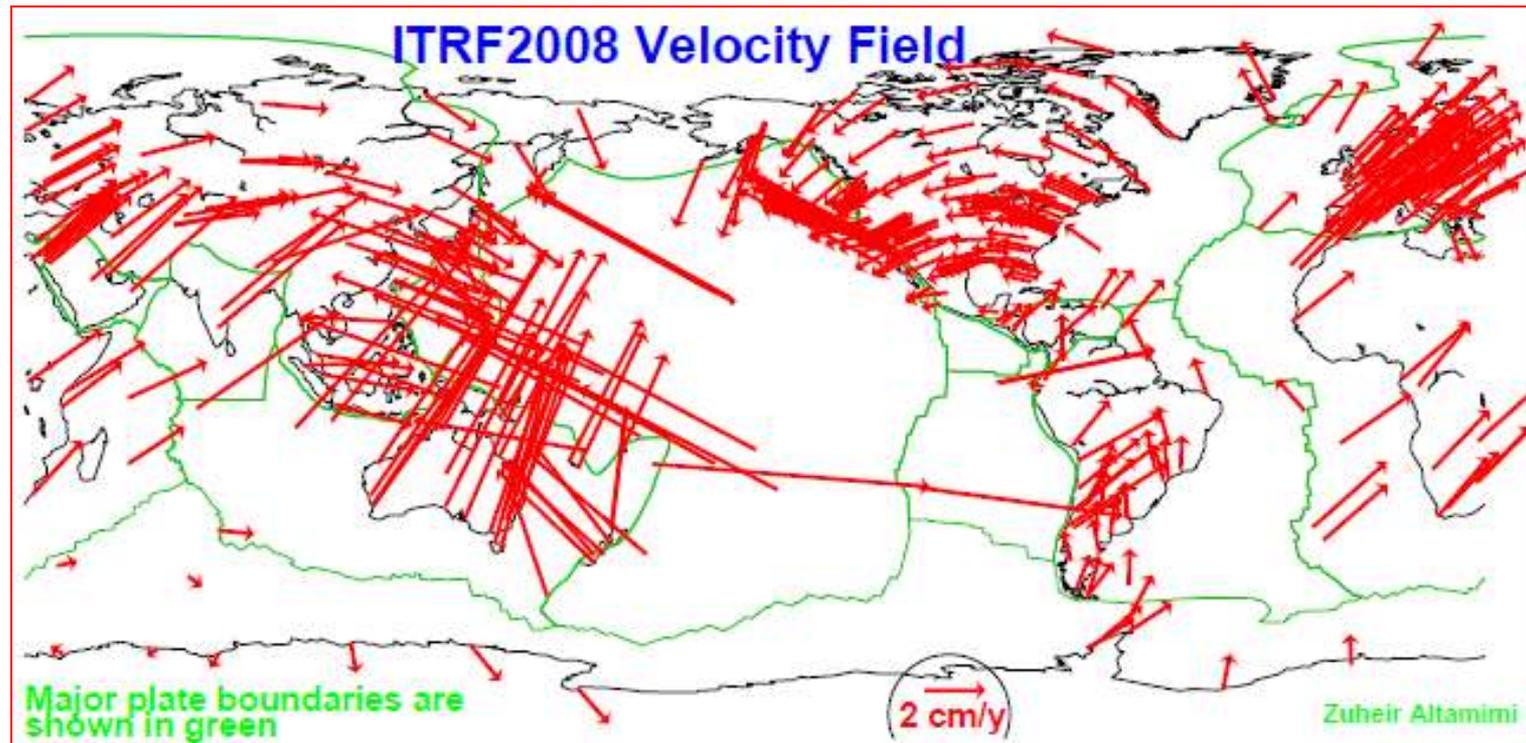
Dérive de 0.1 ppb/an



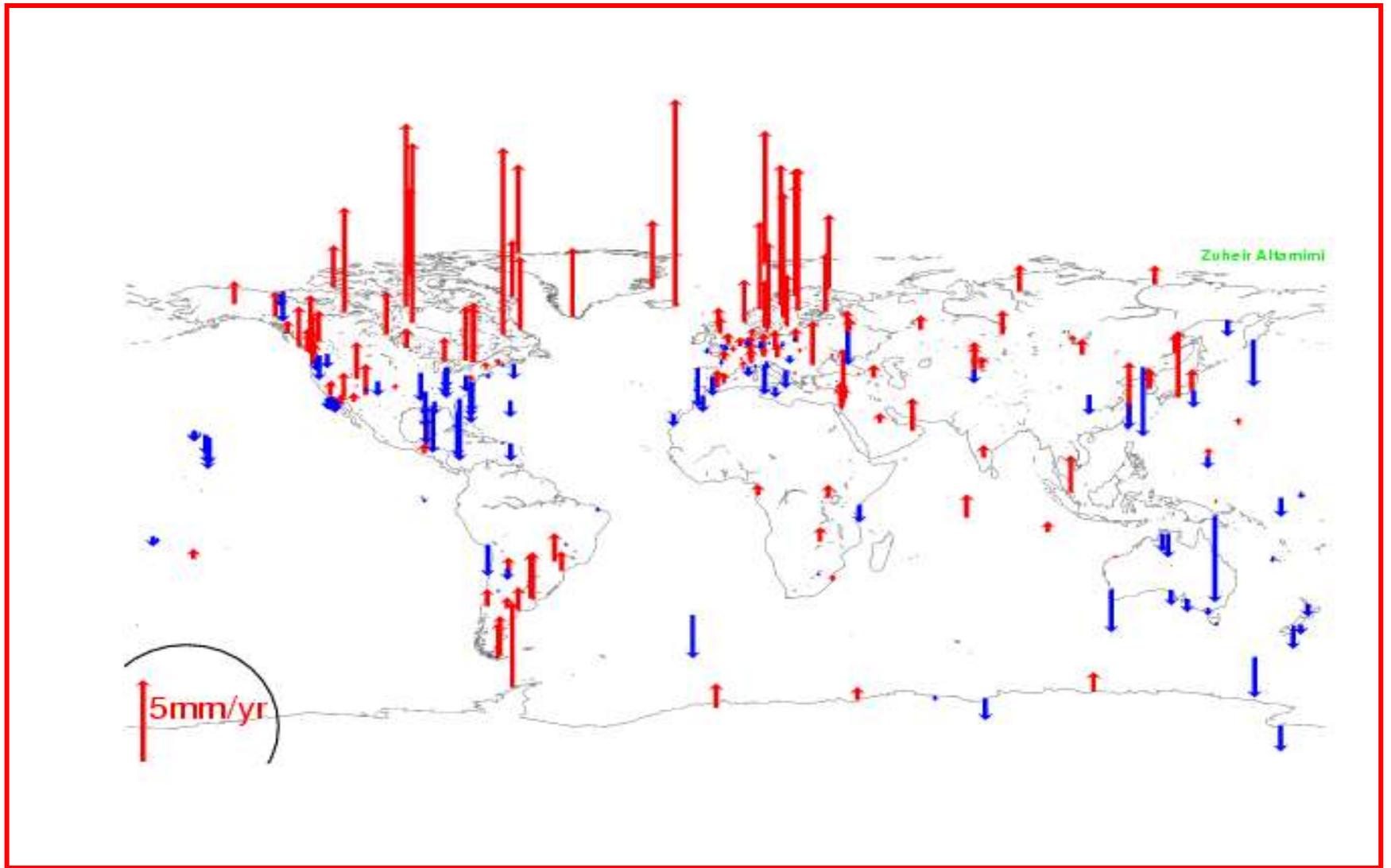
Echelle: erreurs formelle (1 σ)/GPS

| | Echelle ppb | Dérive ppb/yr |
|--------------|------------------------------|------------------------------|
| VLBI | ± 0.10 | ± 0.01 |
| SLR | ± 0.12 | ± 0.01 |
| DORIS | ± 0.20 | ± 0.03 |

Vitesses horizontales ITRF2008 ($\sigma < 1\text{mm/y}$)



Vitesses verticales ITRF2008 ($\sigma < 1\text{mm/y}$)



« Exactitude » de l'origine l'ITRF2008

- Définie par SLR uniquement
- Accord avec l'ITRF2005
 - 4.7 mm translation en Z à l'époque 2005.0
 - 0.3 mm/an dérive en X
- ==> “Exactitude ”: 1 cm sur la période des observations SLR (26 ans)

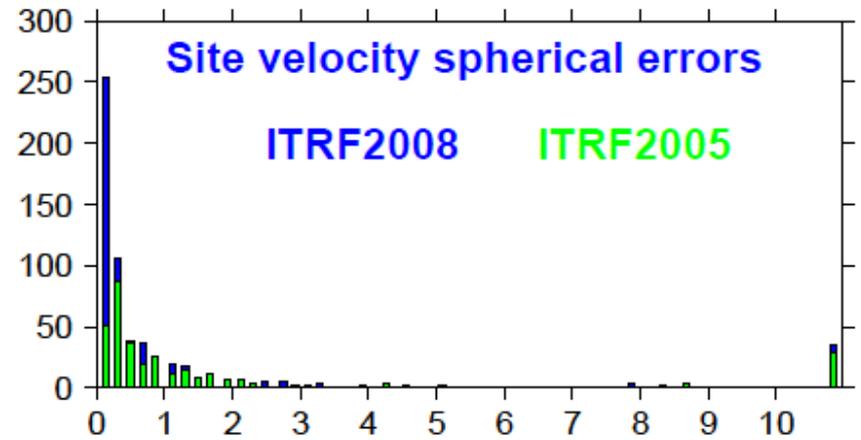
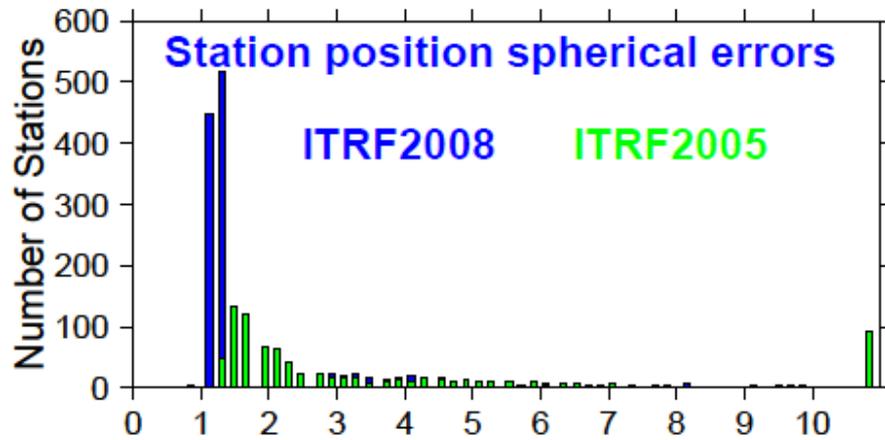
« Exactitude » de l'échelle ITRF2008

- Définie par une moyenne VLBI et SLR
- Différence entre les deux solutions:
 - 1.05 ppb (10^{-9}) à l'époques 2005.0
 - une dérive de 0.049 ppb/an
- ==> “Exactitude”: 1.2 ppb (8 mm) sur la période des observations VLBI et SLR

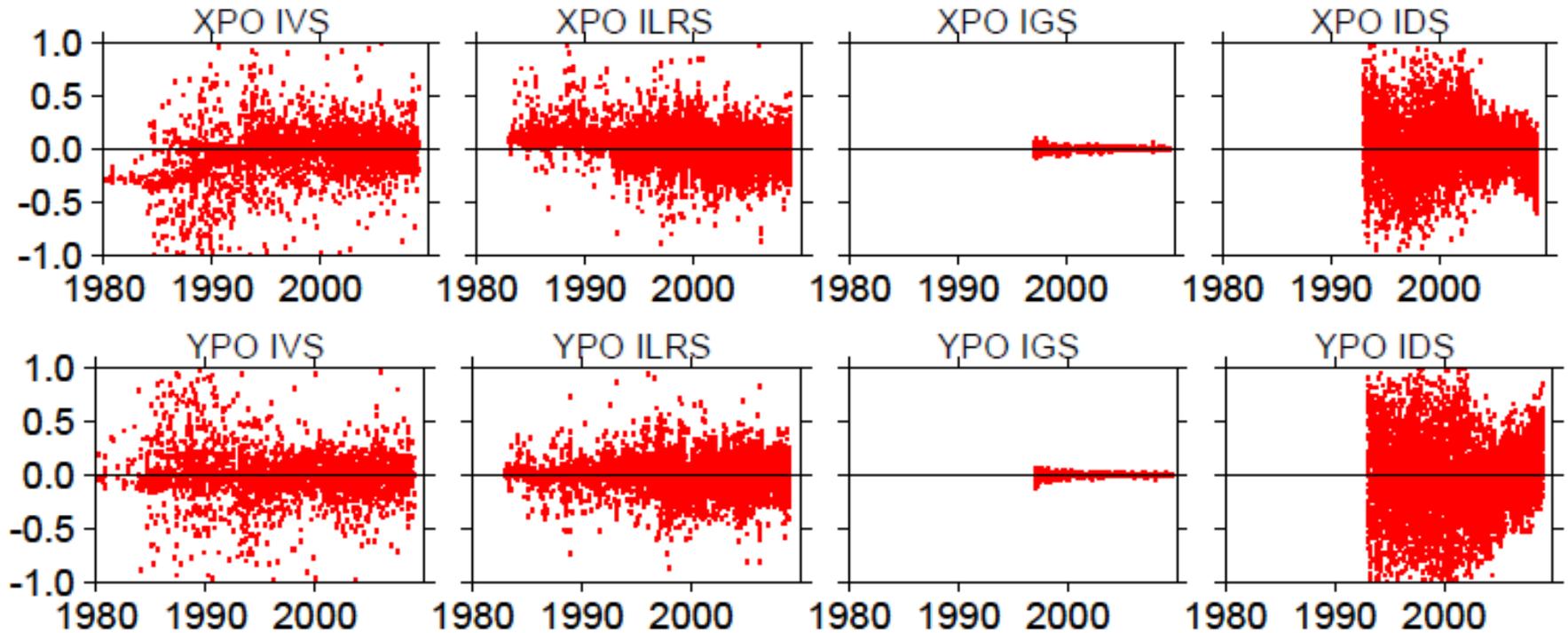
Incertitudes sur le Transfert de l'origine SLR et échelle SLR&VLBI au repère GPS

| Ties used | TX mm | TY mm | TZ mm | Scale mm |
|---|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Ties – SG Discrepancies < 6 mm | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 1.4 |
| Ties – SG Discrepancies < 10 mm | 1.4 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| All – SNX ITRF2008 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |

Le gain de précision ITRF2008



Résidus mouvement du pôle ITRF2008 PM

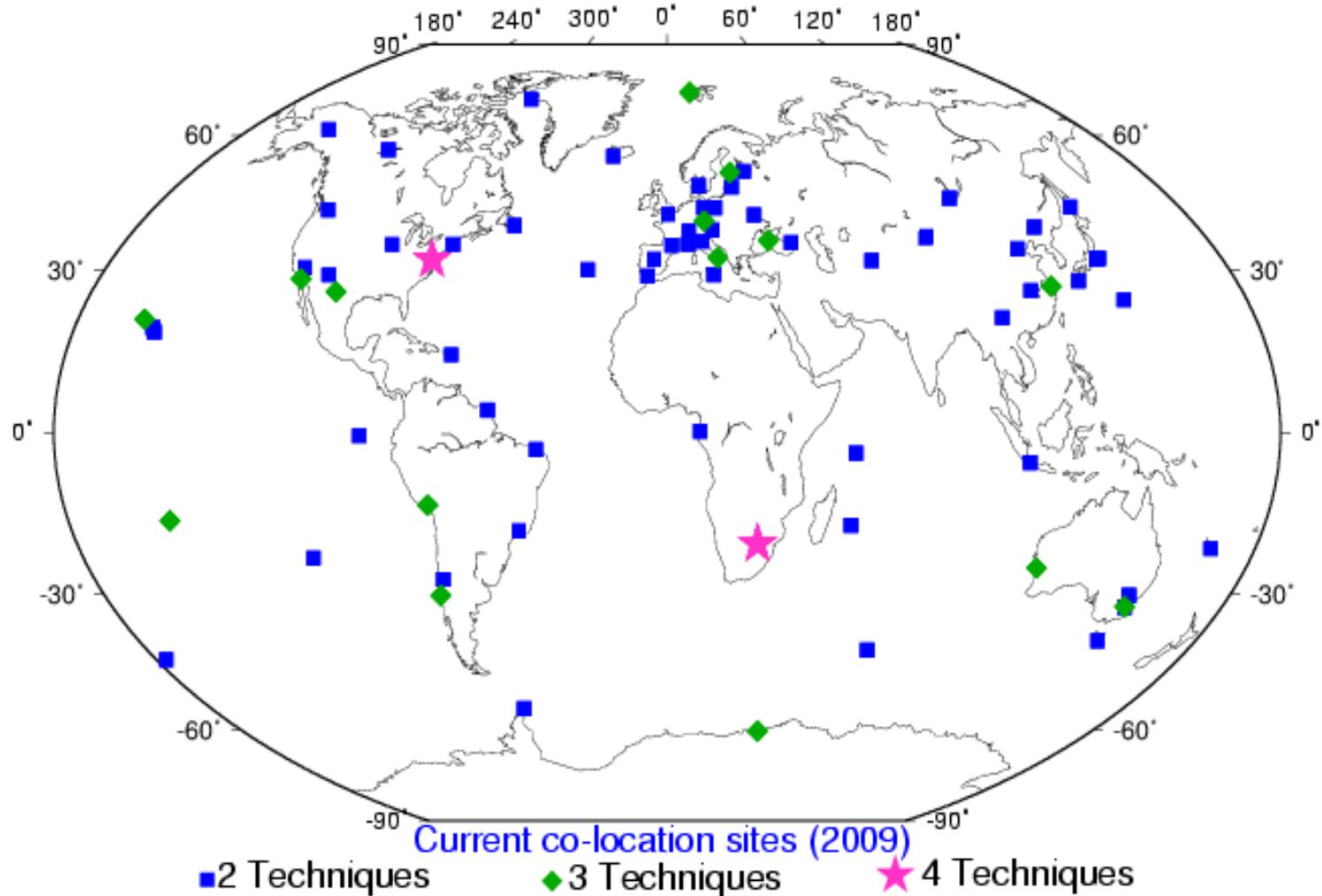


WRMS en μas

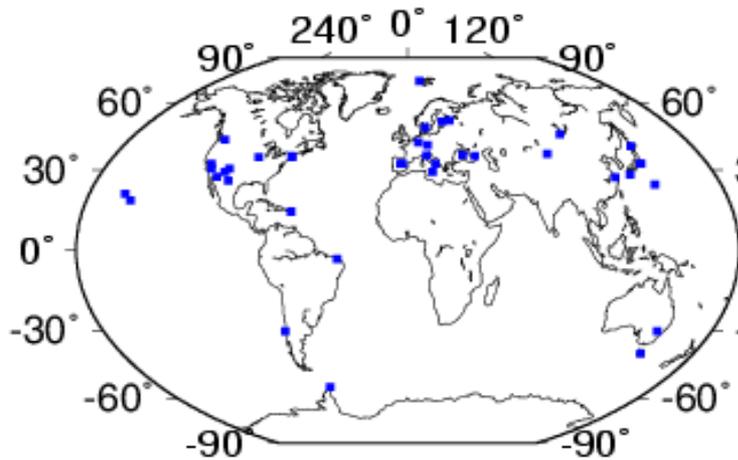
| | X-pole | Y-pole |
|-------|--------|--------|
| GPS | 10 | 10 |
| DORIS | 239 | 353 |

| | X-pole | Y-pole |
|------|--------|--------|
| VLBI | 142 | 120 |
| SLR | 144 | 128 |

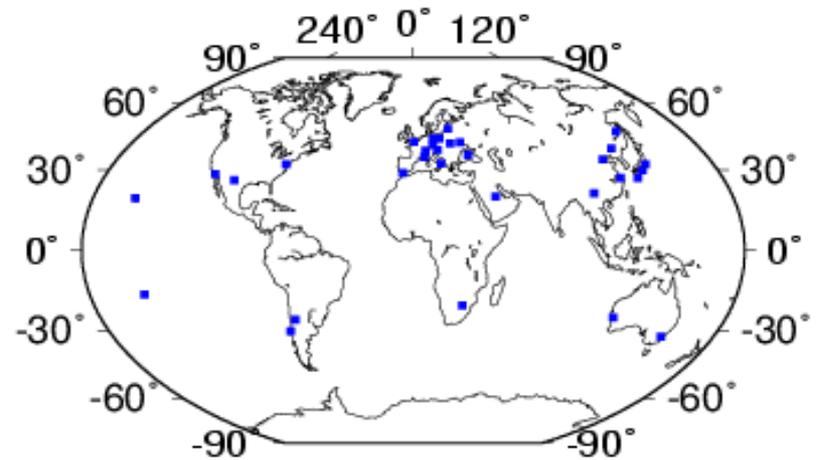
Sites Co-localisés actuels (2009)



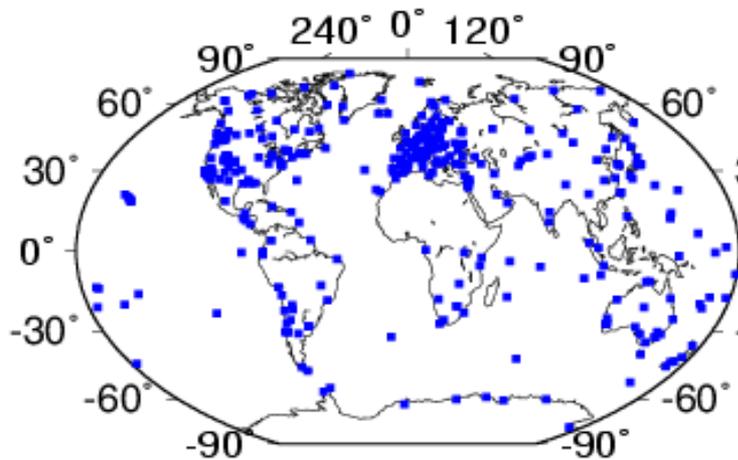
Les réseaux actuels (2009)



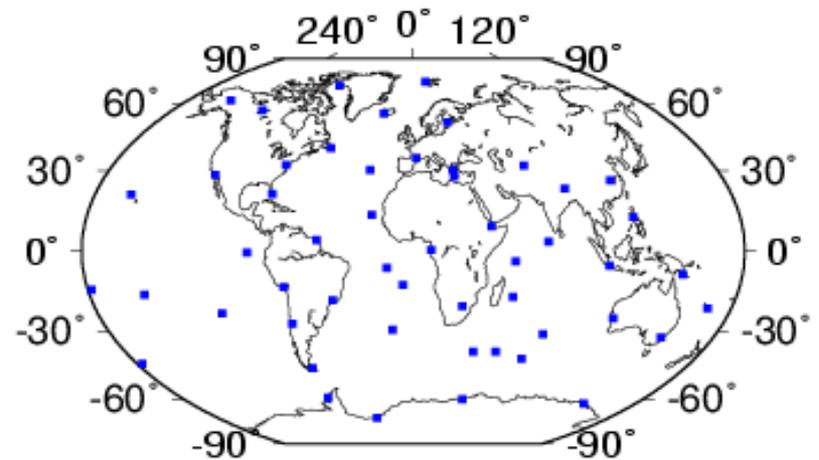
VLBI



SLR



GPS



DORIS

GNSS et systèmes de référence associés

| <u>GNSS</u> | <u>Système de réf</u> |
|----------------------|-----------------------|
| • GPS (radiodiffusé) | WGS84 |
| • GPS précis (IGS) | ITRS/ITRF |
| • GLONASS | PZ90 |
| • GALILEO | GTRF/ITRF |

WGS84, PZ90 et GTRF sont alignés sur l'ITRF

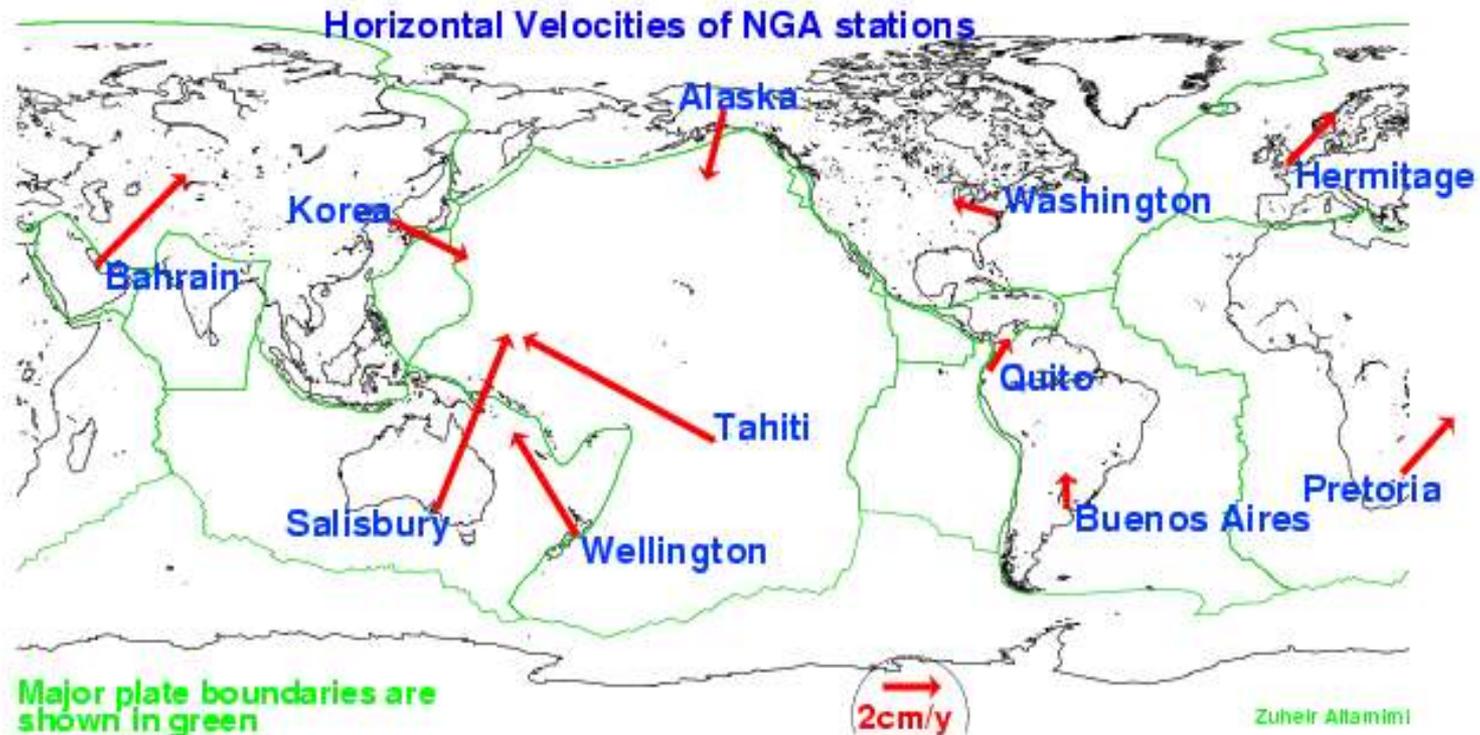
WGS 84-(G1150)



- Coordinates of ~20 stations fixed to ITRF2000
- No station velocities

WGS84 - NGA Stations in ITRF2008

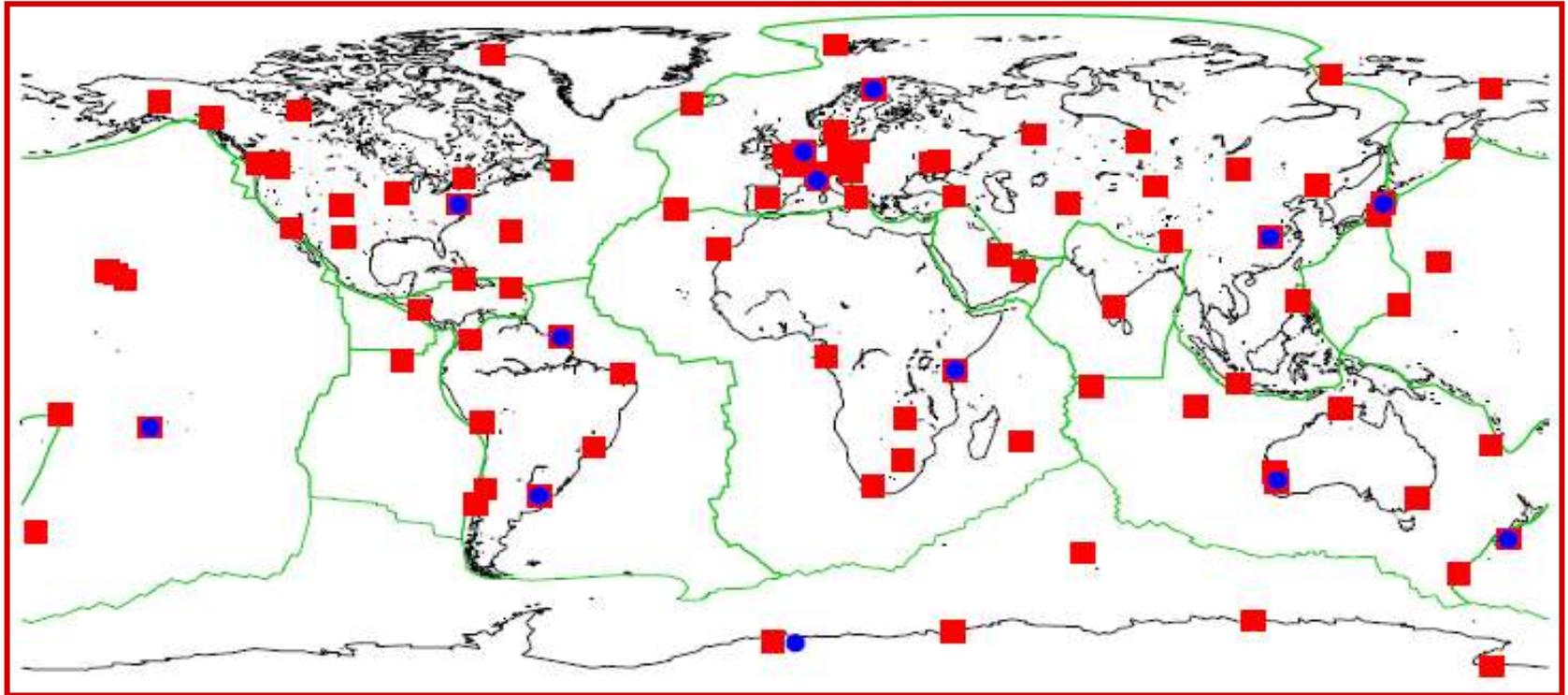
NGA: National Geospatial-Intelligence Agency



Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)

- Galileo Geodesy Service Provider (GGSP)
- GGSP Consortium (GFZ, AIUB, ESOC, BKG, IGN + NRCan & Wuhan University)
 - Définir, réaliser et maintenir le GTRF dans le temps
 - Le GTRF doit être compatible avec l'ITRF au niveau de 3 cm

L'expérience GTRF



● GESS (13)

■ IGS station (~120)

- Détermination initiale des positions/vitesses des stations GESS basée sur des observations GPS
- Versions subséquentes du GTRF utilisant des observations GPS + Galileo
- Des observations Galileo dans la phase ultime

Le GTRF en pratique

- **Prototype utilisant 13 stations GESS :**
 - 7 campagnes de 4 semaines tout les 3 mois
 - Phase IOV fictive: calcul continue durant 6 mois
 - Période totale: 2.34 années
- **Solution hebdomadaires (positions des stations et ERPs) générées par 3 centres d'analyse (AIUB, ESOC, GFZ)**
- **Combinaison/analyse hebdomadaire des 3 solutions**
 - Solution cumulée (positions and velocities)
 - Transformation dans l'ITRF courant
 - En utilisant les outils CATREF
- **3 versions GTRF ont été calculé**

Stratégie de combinaison

- Equations normales des 3 centres
- Analyse et combinaison
- Solutions hebdo et cumulée
- Expression dans l'ITRF en utilisant les contraintes minimales

$$\begin{array}{ccc} \boxed{X_R = X_c + A\theta} & \xrightarrow{\theta = 0} & \boxed{(A^T A)^{-1} A^T (X_R - X_c) = 0} \\ \uparrow & & \uparrow \\ \text{ITRF} & & \text{Solution cumulée} \\ & & \text{(GTRF)} \end{array}$$

Comparison of GTRF09v01 to ITRF2005

- Transformation parameters

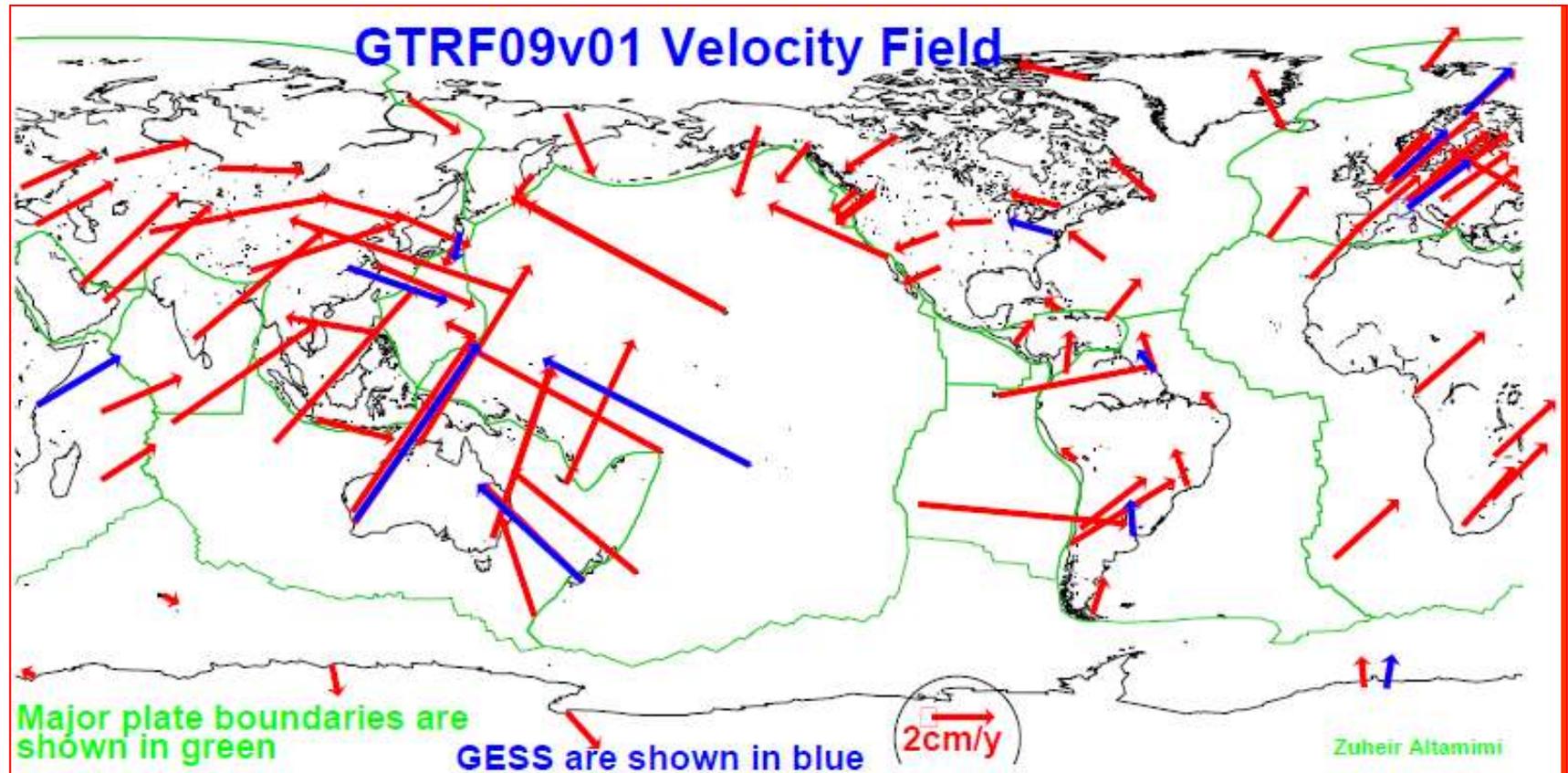
| | T1 | T2 | T3 | D | R1 | R2 | R3 | Epoch |
|----------|-------|-------|-------|------------------|---------|---------|---------|-------|
| | mm | mm | mm | 10 ⁻⁹ | mas | mas | mas | y |
| ITRF2005 | 0.3 | -0.3 | -0.2 | -0.02 | -0.003 | -0.007 | -0.006 | 7:360 |
| | ± 0.2 | ± 0.2 | ± 0.2 | ± 0.03 | ± 0.007 | ± 0.008 | ± 0.008 | |
| Rates | 0.0 | -0.1 | -0.1 | 0.01 | -0.001 | -0.002 | -0.001 | |
| | ± 0.2 | ± 0.2 | ± 0.2 | ± 0.03 | ± 0.007 | ± 0.008 | ± 0.008 | |

==> Perfect GTRF alignment to the ITRF at the sub-mm level

- RMS difference between stations coordinates and velocities

| | N | WRMS-Pos. | | | Epoch | WRMS-Vel. | | |
|----------|----|-----------|-----|-----|-------|-----------|-----|-----|
| | | E | N | U | | E | N | U |
| | | mm | | | y | mm/y | | |
| ITRF2005 | 89 | 1.0 | 1.2 | 2.6 | 7:360 | 0.3 | 0.3 | 0.6 |

GTRF09v01 horizontal velocities



Conclusion

- **L'ITRF**
 - **L'exactitude de l'ITRF2008: 1 cm sur sa période d'observations**
 - **Le plus optimal, rassemblant les qualités des 4 techniques**
- **L'adoption de l'ITRS/ITRF par les GNSS facilitera l'interopérabilité**
- **Une procédure optimale d'alignement des RR GNSS à l'ITRF est disponible**
- **Procédure utilisée pour la détermination du GTRF**
- **Les RR GNSS doivent tenir compte des vitesses des stations**
- **L'observation continue est fondamentale**
- **L'amélioration de l'infrastructure géodésique est plus que vitale pour assurer la pérennité de l'ITRF**



International
Association of
Geodesy

A Constituent Association of the IUGG

... advancing geodesy ...

IAG Commission 1 Symposium: Reference Frames for Applications in Geosciences

The poster features a central globe with red and blue lines representing geodesic reference frames. To the left is a silhouette of a satellite dish, and to the right is a silhouette of a building. The text 'REFAG' is prominently displayed at the top, with 'Marne-La-Vallée, FRANCE (20 min from Paris)' below it. The dates '4 - 8 october 2010' are on the left. A URL 'http://iag-ign.fr/index.php?id=140' is written across the globe. At the bottom, the title '«Reference Frames for Applications in Geosciences»' is enclosed in quotes, followed by 'International Association of Geodesy Commission 1 Symposium 2010'. Below this, the venue 'ENSIG, 6 et 8 Avenue Blaise Pascal Cité Descartes - Champs-sur-Marne-77453 Marne la Vallée cedex 2' and public transportation information are provided. The bottom of the poster displays logos for IAG, IGN, ENSG, CNES, NASA, and Leica Geosystems.

REFAG
Marne-La-Vallée, FRANCE (20 min from Paris)

4 - 8
october
2010

<http://iag-ign.fr/index.php?id=140>

«Reference Frames for Applications in Geosciences»
International Association of Geodesy Commission 1 Symposium 2010.

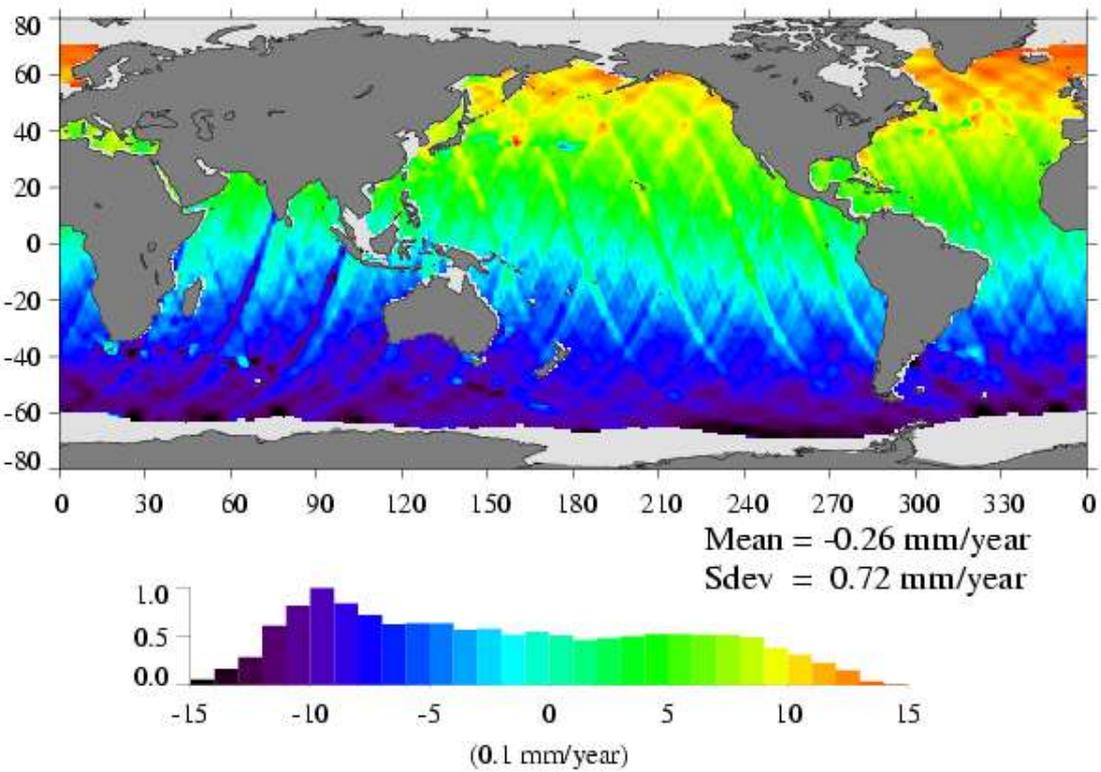
Venue:
ENSIG, 6 et 8 Avenue Blaise Pascal Cité Descartes - Champs-sur-Marne-77453 Marne la Vallée cedex 2
Public transportation from PARIS : RER A, Noisy-Champs station.

IAG IGN ENSG CNES NASA Leica Geosystems

Backup slides



Impact of the Terrestrial Reference Frame on Regional Mean Sea Level Trends



Regional **TOPEX (1993-2002)** Sea Surface Height Trend differences from direct impact of the **ITRF2005 (GGM02C)** minus **CSR95 (JGM3)** orbit differences. The positive values in the northern hemisphere indicate a previous underestimation of MSL of up to 1.5 mm/yr in the northeast Atlantic based on earlier terrestrial reference frame realizations.

Beckley, B., F. Lemoine, S. Luthcke, R. Ray, and N. Zelensky (2007), A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits, *Geophysical Research Letters*, doi:101029/2007GL030002.

Arequipa Earthquake

