

Quelques enseignements des analyses GPS conduites par le consortium ULR de l'IGS

Guy WOPPELMANN¹, Zuheir ALTAMIMI² et Marie-Noëlle BOUIN²

¹ CLDG - Université de La Rochelle

² LAREG - Institut Géographique National



- Stratégie d'analyse des mesures GPS
- Définition du repère terrestre
- Construction des séries temporelles
- Evaluation de la mise en référence
- Conclusions et perspectives

Colloque G², Le Mans, 17-19 novembre 2004

Stratégie d'analyse des mesures GPS

Software

- ⇒ GAMIT, traitement des mesures GPS (R.King, MIT)
- ⇒ CATREF, combinaison et mise en référence des solutions GPS (Z.Altamimi, IGN)

Options du traitement GPS

- ⇒ Adoption des standards GPS proposés par TIGA (IERS Conventions...)
- ⇒ Observable : double différence sur la phase
- ⇒ Angle de coupure d'élévation : 10°
- ⇒ Niell mapping function – ZPD estimés toutes les 2 heures
- ⇒ Corrections de surcharge océanique fournies par Scherneck & Bos
- ⇒ Solution en réseau libre : $\sigma_{\text{Positions}} = 1\text{m}$, $\sigma_{\text{Satellites}} = 0.20\text{m}$ (orbites *a priori* : IGS finales, transformées dans l'ITR2000 avec la procédure de R.Ferland)

Résultats

- ⇒ ~6 ans de mesures GPS traitées à ce jour, couvrant la période 1997 – 2003.
- ⇒ Réseau global comprenant jusque 122 stations GPS@TG
- ⇒ Solutions hebdomadaires au format SINEX envoyées au TIGA-PP (GFZ)
(disponibles sur le serveur ftp.sonef.org, de même que les solutions journalières)

Définition du repère terrestre

Qu'est ce qu'on entend par solution GPS ?

- ⇒ Résolution d'équations normales : $N \cdot \Delta X = K$
 $\Delta X = X - X_{a\ priori}$ (inconnues linéarisées)
- ⇒ Intérêt dans certaines inconnues : jeu de coordonnées de stations $X(t_1), X(t_2), \dots$

Ambiguïté de repère terrestre

- ⇒ **N** est singulière (défaut de rang) : sensibilité ou pas à certains paramètres du TRF
- Par exemple :
 - VLBI : origine du repère terrestre, i.e. 3 paramètres (6 si vitesses)
 - Autres techniques : orientation, i.e. 3 paramètres (6..)

Différentes approches possibles

- ⇒ Contraintes fortes ($\sigma \leq 10^{-10}$ m)
- ⇒ Contraintes « détachables » ($\sigma \approx 10^{-5}$ m)
- ⇒ Contraintes lâches (« loose ») ou réseau libre
- ⇒ Contraintes minimales

Relation entre deux TRF / Solutions

Comment réalise-t-on en pratique un repère terrestre ?

Chaque solution X_i , jeu de coordonnées de stations, définit implicitement un repère
 → Par exemple, ITRF2000 est la "meilleure" solution qui réalise numériquement l'ITRF et, par suite, donne accès à ce repère.

Quelle relation lie deux repères terrestres (jeux de coordonnées de stations) ?

$$X_2 = X_1 + T + D \cdot X_1 + R \cdot X_1 \quad \Leftrightarrow 7 \text{ paramètres de transformation}$$

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \underbrace{\dot{T}}_{\approx 0} + \underbrace{\dot{D}}_{\approx 0} \cdot X_1 + \dot{R} \cdot X_1$$

$$\dot{T} = \begin{pmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{pmatrix} \quad \dot{R} = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & 0 & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Généralisation :

$$X_2 = X_1 + A \cdot \Theta \quad \Leftrightarrow 14 \text{ degrés de liberté pour définir un TRF}$$

$$\Theta = (T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z, \dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{D}, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z)$$

Commentaires sur les différentes stratégies d'alignement des solutions

N est une matrice singulière : de l'information complémentaire est nécessaire pour résoudre le défaut de rang.

SOLUTIONS

1. Contraintes fortes ($\sigma \leq 10^{-10}$ m)
 - ⇒ Problème numérique pour évaluer la qualité de la solution
2. Contraintes détachables ($\sigma \approx 10^{-5}$ m)
 - ⇒ Propagation des erreurs des stations de référence...
 - ⇒ Les meilleures stations sont "fixées"...
3. Contraintes lâches ($\sigma \geq 1$ m)
 - ⇒ Biais dans l'estimation des paramètres de transformation...
4. Contraintes minimales (Altamimi et al, JGR 2002)

Définition du repère par contraintes minimales

Relation entre deux solutions (l'une étant la réalisation du repère, ex. ITRF2000) :

$$X_{Datum} = X_1 + A \cdot \Theta$$

Solution des moindres carrés:

$$\Theta = \underbrace{(A^T \cdot A)^{-1}}_B \cdot A^T \cdot (X_{Datum} - X_1)$$

Pour aligner X_1 sur X_{Datum} à Σ_Θ près, l'équation suivante, dite de contraintes minimales, peut être posée :

$$B \cdot (X_{Datum} - X_1) = 0 \quad (\Sigma_\Theta)$$

En termes d'équations normales :

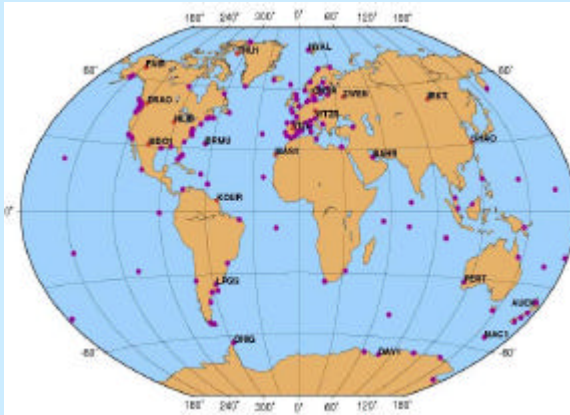
$$B^T \cdot \Sigma_\Theta^{-1} \cdot B \cdot (X_{Datum} - X_1) = 0$$

Les contraintes ne portent plus sur les coordonnées des stations mais sur les paramètres de transformation !!!

Pour plus de détails voir Altamimi et al (JGR 2002)

Réalisation du repère terrestre

Stations GPS calculées à l'ULR



Sélection des stations de référence (résultats ITRF2000)

22 stations des 55 proposées (IGS core stations), satisfont les critères suivants :

- 1- Stations traitées par au moins 3 centres d'analyses.
- 2- Minimum de 2 ans de données GPS.
- 3- $\sigma_x < 3$ mm , $\sigma_y < 1$ mm/an dans l'ITRF2000
- 4- RMS pondérés inférieurs à 1,5 mm (composantes planes), inférieurs à 2,5 mm (vertical), inférieurs à 1.4 mm/an (vitesses horizontales), inférieurs à 2.5 mm/an (vertical),

Construction des séries temporelles - Modèle

Entrées :

- ⇒ Solutions hebdomadaires (...) $X(t_s)$ - fichiers SINEX
- (Chaque solution individuelle définit son repère...)

Modèle :

$$\begin{cases} X_s^i = X_{itrj}^i + (t_s^i - t_0) \cdot \dot{X}_{itrj}^i + T_k + D_k \cdot X_{itrj}^i + R_k \cdot X_{itrj}^i \\ \quad + (t_s^i - t_k) \cdot [\dot{T}_k + \dot{D}_k \cdot X_{itrj}^i + \dot{R}_k \cdot X_{itrj}^i] \\ \dot{X}_s^i = \dot{X}_{itrj}^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k \cdot X_{itrj}^i + \dot{R}_k \cdot X_{itrj}^i \end{cases}$$

Sorties :

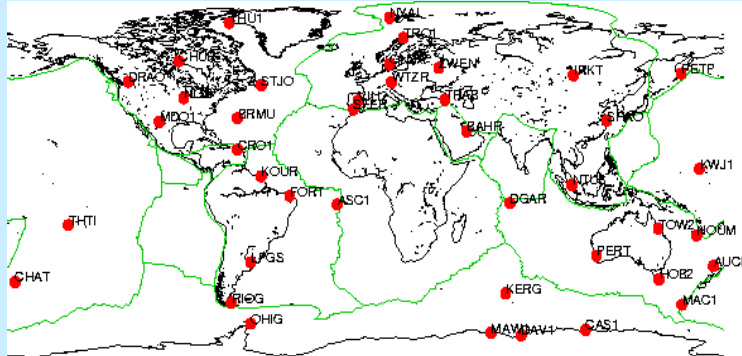
- ⇒ Solution combinée : positions $X_{itrj}(t_0)$, vitesses \dot{X}_{itrj}
- ⇒ Paramètres de transformation de chaque solution à la solution combinée ($T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z$)
- ⇒ Résidus à l'issue de l'ajustement (coordonnées des stations)

Le repère est défini en appliquant les contraintes minimales

Modèle implanté dans CATREF (Altamimi, 2002)

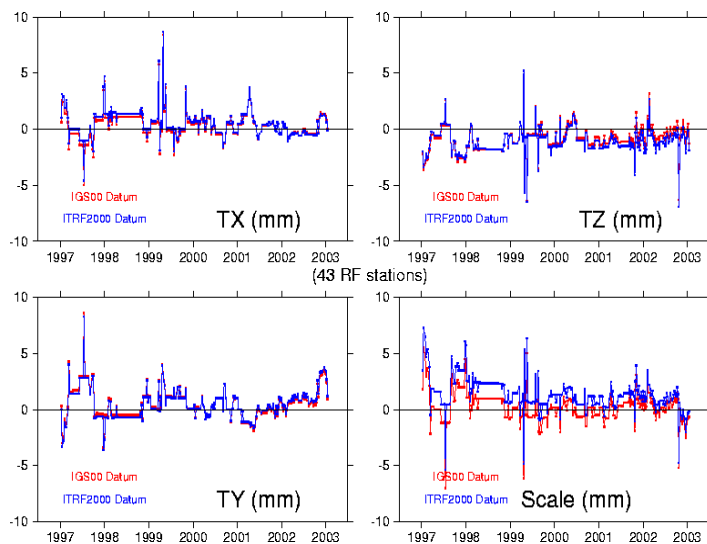
Analyse des solutions hebdomadaires

- Quelle est la qualité de l'alignement des solutions hebdomadaires dans l'ITRF ?
- Le choix de la solution de référence (IGS00 vs ITRF2000) est-il critique ?
- Quel est l'influence du choix des stations de référence ?



Stations de référence IGS (IGSMail 4666, octobre 2003)
présentes dans les solutions ULR (43/99)

Analyse des solutions hebdomadaires

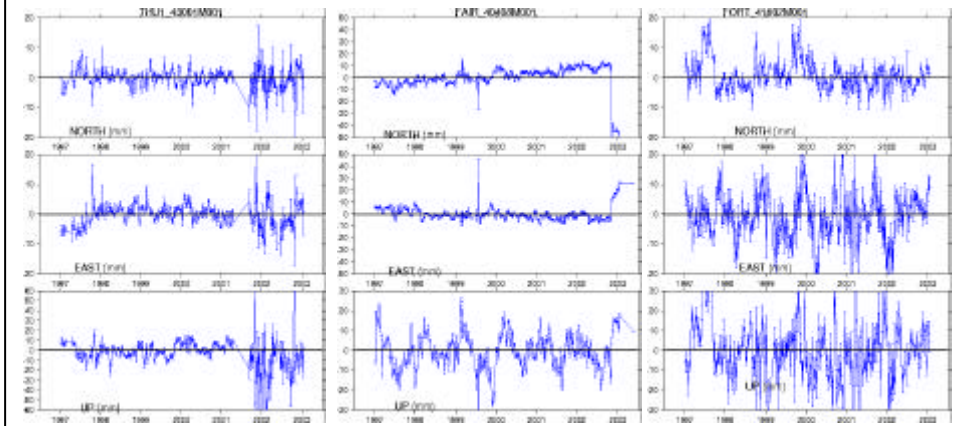


Paramètres de transformation
entre chaque solution et la solution combinée

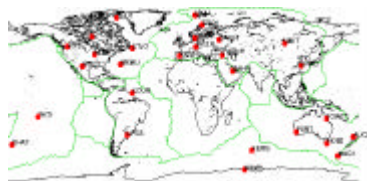
Résidus des stations de référence...

Les résidus issus de la combinaison des jeux de coordonnées permettent d'évaluer la qualité d'une station.

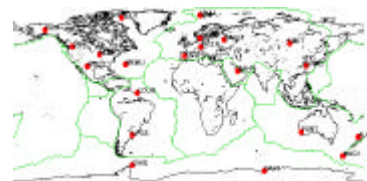
Un examen attentif de ces résidus montre que certaines stations de référence sont sujettes à problèmes : les graphiques ci-dessous illustrent ces problèmes.



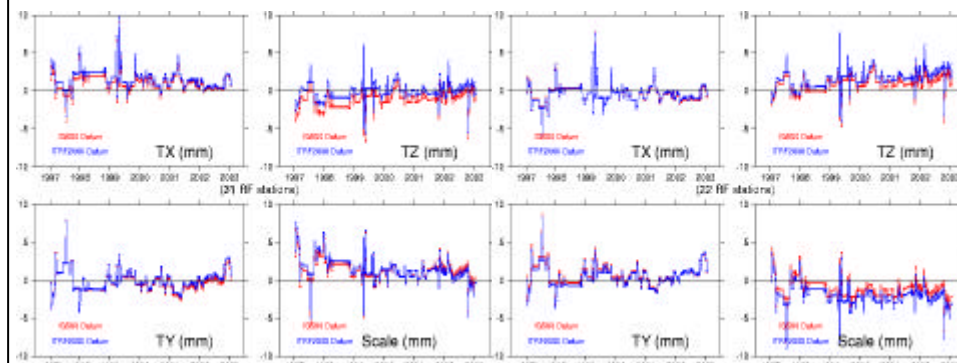
Evaluation IGS00 vs ITRF2000



Stations de référence (31) avec minimum outliers, faible variabilité et pas de sauts (au-delà de 2 cm)



Stations de référence (22) utilisées suivant les critères de sélection "a priori" (ITRF2000)

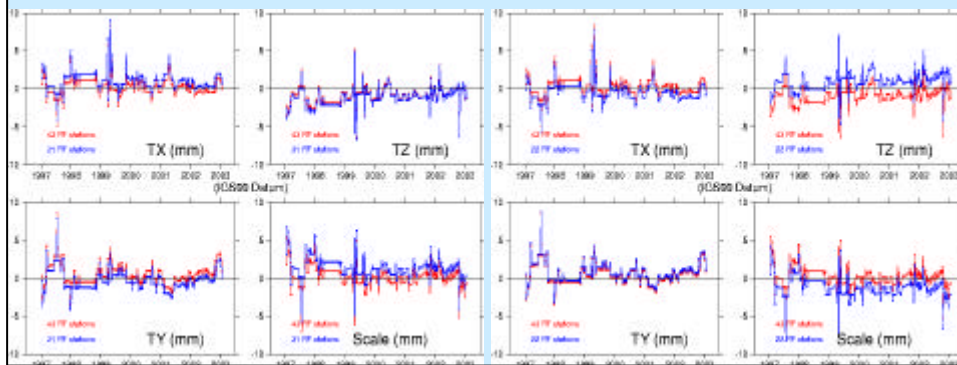


Impact des stations de référence

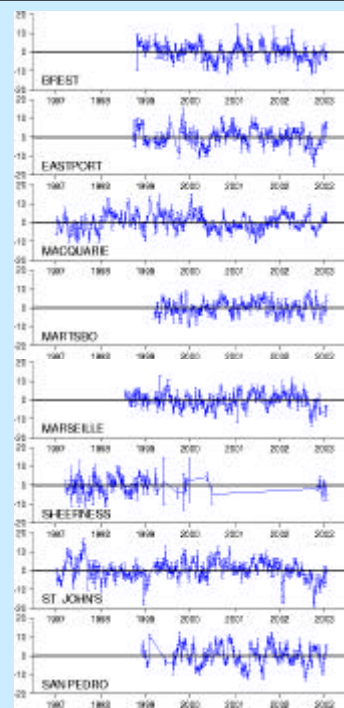
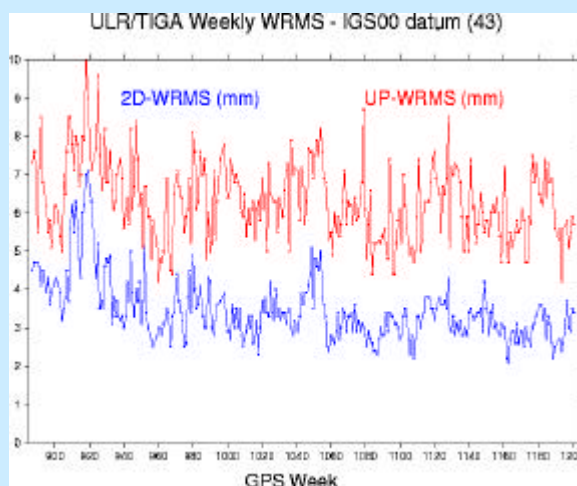
Les résultats précédents montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les solutions IGS00 ou ITRF2000 pour aligner nos solutions hebdomadaires. Comme IGS00 semble légèrement moins biaisée que ITRF2000, nous l'avons retenue dans la suite des analyses.

Trois jeux de stations de référence sont considérés :

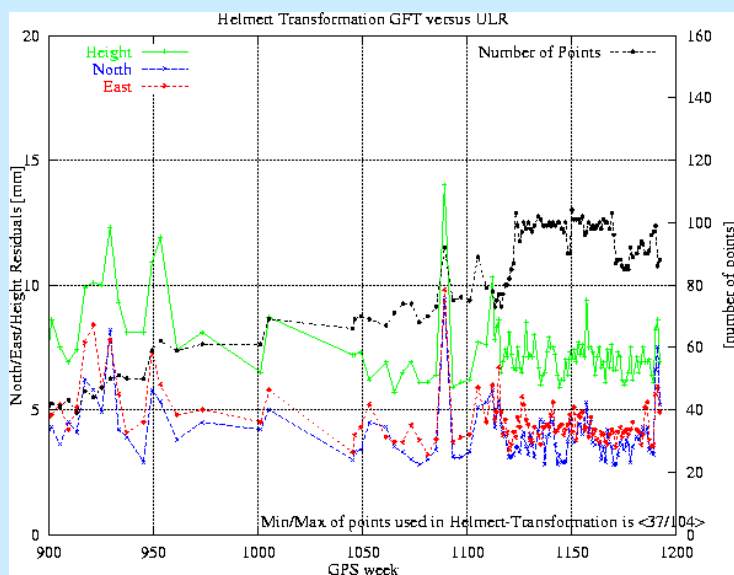
- Toutes les stations de référence effectivement présentes (43)
- Les "meilleures" stations de référence *a posteriori*, suivant l'analyse des résidus (31)
- Les "meilleures" stations de référence *a priori*, traitements en routine ULR (22)



Synthèse des résultats



Comparaisons avec les solutions GFZ



Conclusions et Perspectives

- ✓ Cette étude montre qu'il n'y a pas de différences significatives dans le choix : IGS00 vs ITRF2000
- ✓ Le repère est réalisé à quelques millimètres près d'une semaine à l'autre (stabilité et précision sur 6 ans)
- ✓ Les stations de référence ont une influence dans la stabilité et l'exactitude de la réalisation du repère :
 - ✓ Plus le nombre de stations de référence est important, meilleure sont les résultats (les problèmes individuels semblent atténués par le nombre qui garantit une bonne distribution)
- ✓ L'infrastructure de centre global d'analyses GPS ULR est encore en cours de développement, mais opérationnelle.
 - ✓ compléter l'étude sur les vitesses verticales
 - ✓ poursuivre le traitement des mesures anciennes
 - ✓ être en mesure de recalculer rapidement l'ensemble des mesures