

Le Repère International de Référence Terrestre: ITRF2000

Zuheir Altamimi

Institut Géographique National / France
ENSG/LAREG
6-8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes, Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée, France

RESUME :

Le Service International de la Rotation Terrestre (IERS) est en charge de la réalisation des systèmes de référence céleste et terrestre (ICRS et ITRS) ainsi que la détermination des paramètres d'orientation de la Terre reliant ces deux systèmes. Cet article est consacré à l'ITRS et sa réalisation, appelée le Repère International de Référence Terrestre (ITRF). La dernière réalisation en date, ITRF2000 est décrite en détails, mettant en lumière les résultats géodésiques et géophysiques importants.

ABSTRACT:

The International Earth Rotation Service (IERS) is in charge of the realization of the International Celestial and Terrestrial Reference Systems (ICRS and ITRS) as well as the determination of the Earth Orientation Parameters connecting the two systems. This article focus on the ITRS and its realization called the International Terrestrial Reference Frame (ITRF). The latest ITRF version, namely ITRF2000 is presented in details, highlighting the important geodetic and geophysical results.

Introduction

Un des buts ultimes de la géodésie spatiale est l'estimation des positions des points ou d'objets sur la surface de la Terre ou dans son environnement proche. Cependant, les positions de points ne sont ni observables, ni des quantités absolues. Elles doivent donc être exprimées par rapport à une référence. Nous appelons «Système de Référence Terrestre» (SRT), un objet mathématique satisfaisant une définition idéale et dans lequel les positions de points seront exprimées. Néanmoins, l'accès aux positions des points nécessite des moyens d'observation permettant leur lien à l'objet mathématique. Nous appelons ainsi un «Repère de Référence Terrestre» (RRT), une matérialisation physique du SRT, utilisant les observations déduites des techniques de géodésie spatiale.

La distinction entre «système» et «repère» est donc subtile car le premier est plutôt invariable et inaccessible alors que le second est accessible et perfectible. Les concepts généraux relatifs aux systèmes et repères de référence ont été discutés dans les années 80 dans les communautés astronomique et géodésique (Kovalevsky et al., 1989) et sont largement décrits dans (Boucher, 2001).

L'utilisation des techniques de géodésie spatiale depuis les années 80 a profondément amélioré le positionnement sur la surface de la Terre. Les incertitudes initialement décimétriques sont maintenant centimétriques, voire millimétriques. Il est cependant à noter que chaque technique et chaque analyse de données définie et réalise son propre SRT. Par conséquent une multitude de réalisations peuvent exister, ayant des systématismes les unes par rapport aux autres. Cet état de fait a conduit l'Union International de Géodésie et de Géophysique (UGGI) et l'Association International de Géodésie (AIG) à adopter un système unique, appelé le Système International de Référence Terrestre (ITRS) pour toutes les applications des Sciences de la Terre (Geodesist's Handbook, Bulletin Géodésique 1992). L'ITRS est défini par :

L'origine est le centre des masses de la Terre entière, comprenant les océans et l'atmosphère;

L'unité de longueur est le mètre (SI) de sorte que l'échelle est compatible avec le Temps Coordonné Géocentrique (TCG) en accord avec les résolutions de l'Union Astronomique Internationale (IAU) et de l'UGGI;

L'orientation est compatible avec celle du Bureau International de l'Heure (BIH) à l'époque de 1984.0;

L'évolution temporelle en orientation est assurée par une condition de no rotation globale par rapport aux mouvements tectoniques horizontaux sur la surface de la Terre entière.

L'idée de base de l'ITRF est de combiner les positions de stations (et leur vitesses), calculées par différents centres d'analyse en utilisant les observations des techniques spatiales telle que l'interferométrie à très longues lignes de base (VLBI) la télémétrie laser sur la Lune et sur satellite (LLR, SLR), le Global Positioning System (GPS) et Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). La méthode de combinaison a prouvé son efficacité de produire un repère de référence global bénéficiant des qualités des différentes techniques.

Depuis la première réalisation de l'ITRS, l'ITRF88, 9 autres versions de l'ITRF ont été calculés et publiées. Des améliorations ont constamment été apportées dans la stratégie d'analyse pour aboutir à une combinaison optimale de l'ITRF, (Altamimi et al., 1993, Boucher et Altamimi, 1993, 1996, Sillard et al., 1998, Altamimi et al., 2001).

Etant donné la large utilisation de l'ITRF dans les applications géodésiques et géophysiques, le but de l'ITRF2000 est d'avoir un repère amélioré en termes de qualité, de réseau et de définition. L'ITRF2000 reflète la qualité réelle des solutions individuelles des techniques de géodésie spatiale, dans la mesure où ces solutions sont libres de toute contrainte externe. L'ITRF2000 comprend d'une part, les réseaux primaires VLBI, SLR, GPS et DORIS et, d'autre part, des réseaux GPS régionaux de densification.

Les données d'entrée de l'ITRF2000

Les solutions individuelles incluses dans la combinaison ITRF2000 contiennent des positions et vitesses de stations avec matrices de variance complètes, fournies en format SINEX. 30 solutions ont ainsi été combinées : 3 VLBI, 1 LLR, 7 SLR, 6 GPS, 2 DORIS, 2 multi-techniques et 9 solutions régionales GPS. Ces solutions ont été estimées par les centres d'analyse en introduisant l'un des trois types de contraintes suivants :

Contraintes qu'on peut facilement enlever: les positions/vitesses sont contraintes à des valeurs externes avec une incertitude de l'ordre de 10^{-5} mètres pour les positions et mètres/an pour les vitesses.

Contraintes lâches : les incertitudes des contraintes sont de l'ordre d'un mètre pour les positions et 10 cm/an pour les vitesses.

Contraintes minimales, dont le seul but est de définir le système de référence sous-jacent en termes d'origine, échelle, orientation et évolution temporelle.

Les observations utilisées dans ces solutions couvrent une période de la vingtaine d'années pour les techniques pionnières VLBI, LLR, SLR et une dizaine d'années pour GPS et DORIS. La figure 1 montre la répartition des sites de l'ITRF2000.

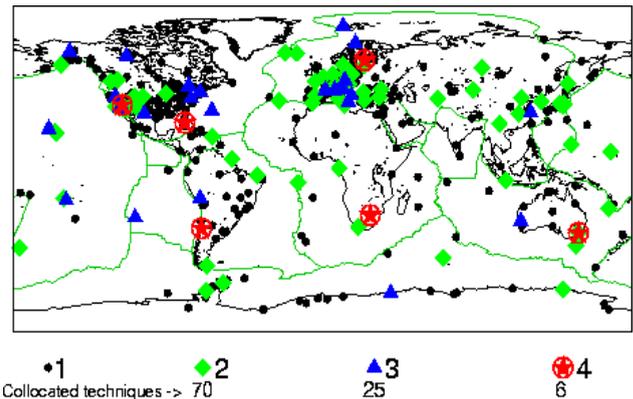


Figure 1. Le réseau primaire de l'ITRF2000

En plus des solutions individuelles des techniques spatiales, des rattachements locaux dans les sites de collocation ont été introduits dans la combinaison globale de l'ITRF2000. Ces rattachements sont essentiels pour faire le lien entre les différentes techniques de mesure.

L'Analyse des données de l'ITRF2000

Trois innovations majeures ont été implémentées afin d'améliorer la combinaison ITRF2000:

La combinaison de solutions libres de toute contrainte externe, mais pour lesquelles des contraintes minimales ont été appliquées afin de définir de la manière la plus précise possible, le système de référence en origine, échelle, orientation et évolution temporelle;

L'origine de l'ITRF2000 est le centre des masses, définie par la technique SLR et, pour une meilleure définition de l'évolution temporelle en orientation, celle-ci a été établie sur une sélection de sites géodésiques de très grande qualité.

Les étapes suivantes ont été adoptées dans le calcul de l'ITRF2000 :

Remplacer les contraintes externes appliquées par les centres d'analyse par des contraintes minimales ;
Propager les solutions individuelles aux époques de variance minimale

Combiner les solutions ainsi obtenues en y ajoutant les rattachements dans les sites de collocation.

Le modèle de combinaison utilisé dans le calcul de l'ITRF2000 est donné par l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_s^i &= \mathbf{X}_c^i + (t_s^i - t_0) \mathbf{T}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{X}_c^i + \mathbf{R}_k \mathbf{X}_c^i \\ &+ (t_s^i - t_k) [\mathbf{T}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{X}_c^i + \mathbf{R}_k \mathbf{X}_c^i] \\ \dot{\mathbf{X}}_s^i &= \dot{\mathbf{X}}_c^i + \dot{\mathbf{T}}_k + \dot{\mathbf{D}}_k \mathbf{X}_c^i + \dot{\mathbf{R}}_k \mathbf{X}_c^i \end{aligned}$$

Où pour chaque solution individuelle s, k, \mathbf{T}_k , \mathbf{D}_k et \mathbf{R}_k sont respectivement la translation, le facteur d'échelle et la matrice de rotation. Les paramètres pointés représentent les dérivées par rapport au temps.

La définition de l'ITRF2000

En termes de définition de système de référence, l'ITRF2000 a les caractéristiques suivantes :

L'échelle et sa dérivée sont définies par une moyenne pondérée de celles des solutions VLBI et celles les plus en accord des solutions SLR.

Les translations et leurs vitesses sont définies par celles des solutions SLR les plus en accord ;

L'orientation a été alignée à celle de l'ITRF97 à l'époque 1997.0, et son évolution temporelle a été alignée à celle du modèle géophysique NNR-NUVEL-1A. Il faut noter que l'orientation et sa dérivée ont été implémentées sur une sélection de sites de grande qualité géodésique, satisfaisant les critères suivants :

Observés en continue pendant au moins trois ans;

Situés loin des frontières des plaques tectoniques et des zones de déformation ;

Les vitesses combinées doivent être précises à mieux que 3 mm/an

Les résidus sur les vitesses doivent être inférieurs à 3 mm/an pour au moins 3 solutions différentes.

Basée sur l'analyse de l'ITRF2000, la sélection des sites a été opérée suivant les critères ci-dessus fournissant 54 sites à l'intérieur des plaques tectoniques et 41 sites dans des zones de déformation. Parmi les 54 sites sélectionnés, 50 seulement ont été utilisés dans l'alignement au modèle NNR-NUVEL-1A. Les 4 autres sites ont des vitesses significativement différentes du modèle.

Les résultats de l'ITRF2000

Les résultats de la combinaison globale ITRF2000 sont les positions des stations à l'époque 1997.0 et leur vitesses de déplacement ainsi que les paramètres de transformation entre les solutions individuelles et l'ITRF2000. Les stations appartenant à un même site ont été contraintes à avoir la même vitesse. Etant donné que l'ITRF2000 combine des solutions ayant des contraintes minimales, les paramètres de rotation sont arbitraires. Ce constat est également applicable aux composantes des origines des solutions VLBI. Par conséquent, nous allons nous intéresser aux échelles et origines des solutions satellitaires ainsi qu'aux échelles des solutions VLBI.

Origines et échelles des solutions individuelles

En sélectionnant l'intervalle 1991-2000 comme étant la période commune des observations des solutions individuelles incluses dans l'ITRF2000, la figure 2 montre les variations linéaires des translations des solutions SLR et GPS, par rapport à l'origine ITRF2000 (définie par la moyenne de 5 solutions SLR). La figure 3 illustre les variations linéaires des échelles des solutions VLBI, SLR et GPS, par rapport à l'échelle de l'ITRF2000 (définie par la moyenne des 3 solutions VLBI et 5 SLR).

La figure 2 montre le très bon accord entre les solutions SLR en termes d'origine, au niveau de 5mm, sur les trois composantes X Y Z. Les solutions GPS exhibent de larges différences, et en particulier autour des axes X et Y.

La figure 3 montre l'accord remarquable en termes d'échelle des trois solutions VLBI. D'autre part, la plus part des solutions SLR s'accordent en échelle à 1 ppb (10^{-9}) près.

A fin d'évaluer la stabilité à long terme de l'ITRF2000, la dispersion (ou erreur moyenne quadratique pondérée) a été calculée sur les différences d'échelles et de translations des 3 solutions VLBI et 5 SLR qui ont été utilisées dans la définition de l'ITRF2000. Les valeurs de dispersion sont données dans la Table 1 qui montre (en terme d'erreur moyenne quadratique pondérée) que la stabilité de l'ITRF2000 sur une dizaine d'années est de l'ordre de 4 mm en origine et 0.5 ppb en échelle (équivalent à un biais en vertical de l'ordre de 3 mm).

Paramètre/dérivée	EMQP(1997.0)	EMQP (sur 10 ans)
	Echelle	
D(ppb)	0.2 (~1.2 mm)	0.5 (3mm)
\dot{D} (ppb/an)	0.03 (~0.2mm/an)	
	Origine	
Tx(mm)	0.4	1.4
\dot{T}_x (mm/an)	0.1	
Ty(mm)	0.5	1.5
\dot{T}_y (mm/an)	0.1	
Tz(mm)	0.9	3.9
\dot{T}_z (mm/an)	0.3	

Table 1. Stabilité à long-terme de l'origine et de l'échelle de l'ITRF2000

Evaluation de la qualité ITRF2000

La qualité de l'ITRF2000 dépend des qualités relatives des solutions individuelles ainsi que de la stratégie d'analyse et de combinaison appliquée à ces solutions.

Un indicateur de qualité des solutions individuelles est l'erreur moyenne quadratique pondérée (EMQP) calculée pour chacune de ces solutions. Les valeurs EMQP sont données dans la Table 2, indiquant un niveau de 2-5 mm en position et de 1-2 mm/an en vitesse est atteint par la plus part des solutions utilisées.

Il est aussi intéressant de comparer l'ITRF2000 par rapport à l'ITRF97 en termes

D'erreurs formelles, illustrées dans la figure 4, à la fois en positions et vitesses. Ces erreurs formelles représentent non seulement la précision des positions et vitesses mais aussi l'exactitude de la définition de l'ITRF2000.

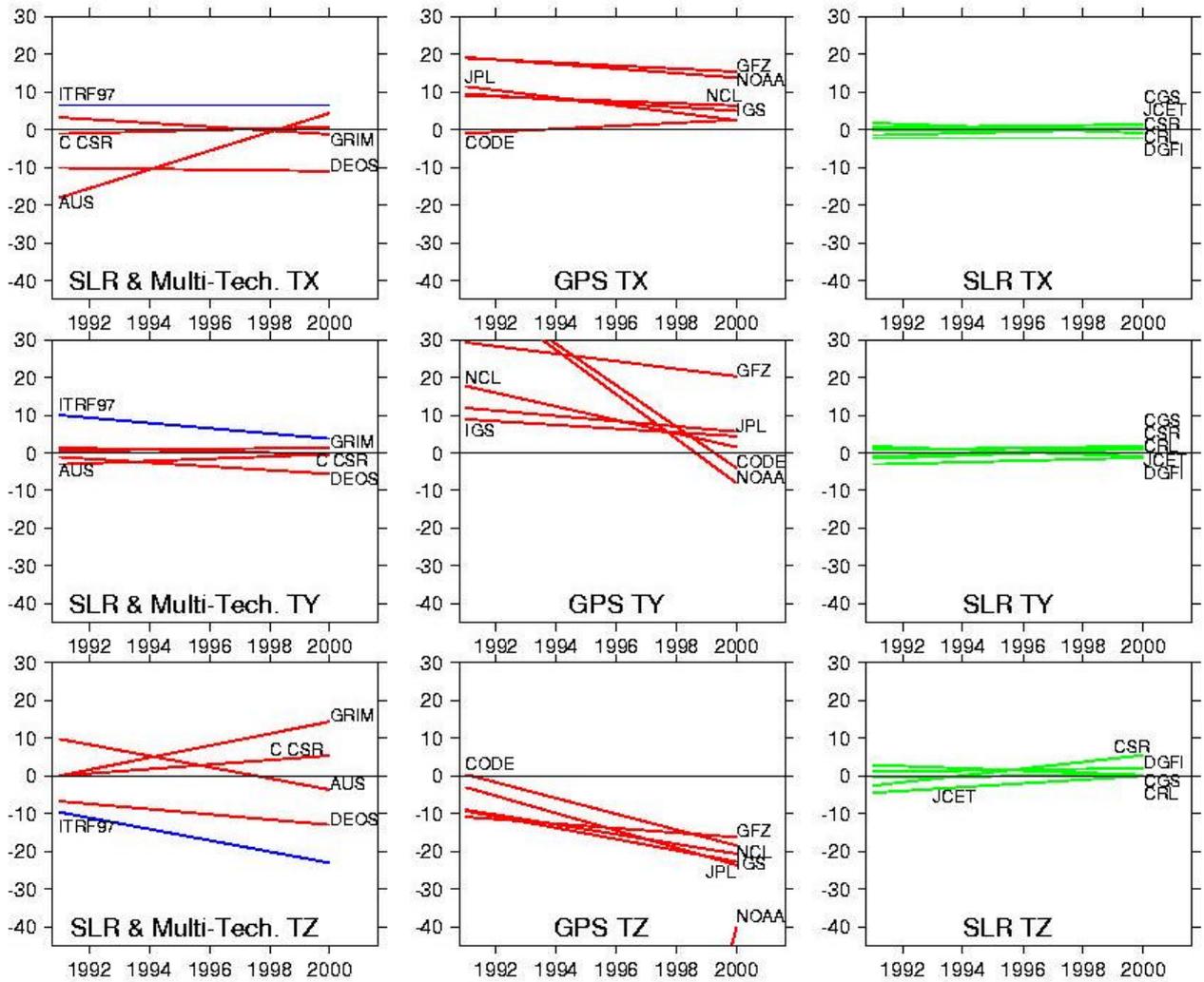


Figure 2. Variations des translations des solutions individuelles incluses

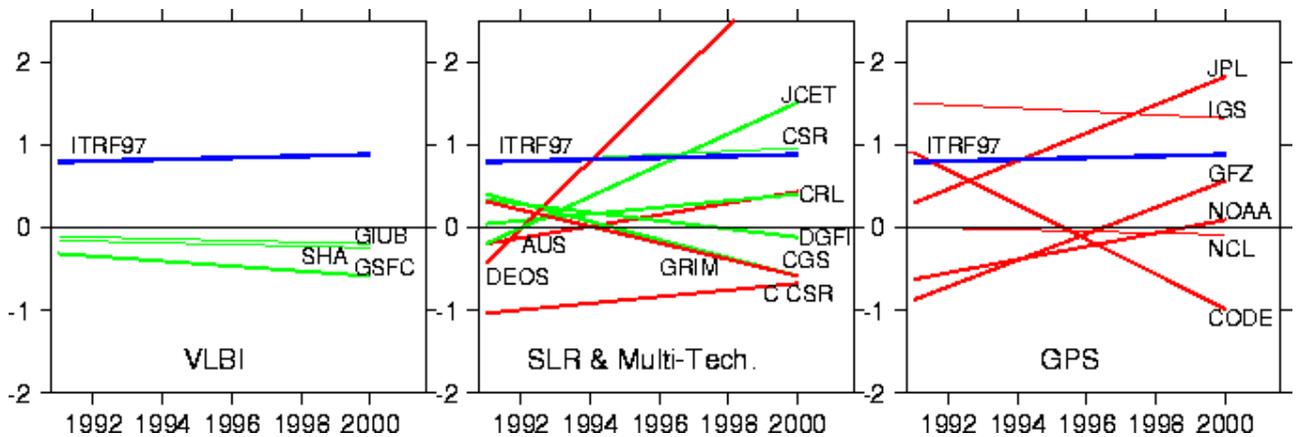


Figure 3. Variations des échelles des solutions individuelles incluses dans l'ITRF2000

Technique	Nombre de solutions	EMQP en Position (mm)	EMQP en vitesse (mm/an)
VLBI	3	2-3	1
SLR	7	2-14	1-5
GPS	6	2-5	1-2
DORIS	2	25-30	4-5
Multi-techniques	2	6-9	2
GPS Regional	9	1-8	1-4

Table 2. Résumé des EMQP des solutions incluses dans l'ITRF2000

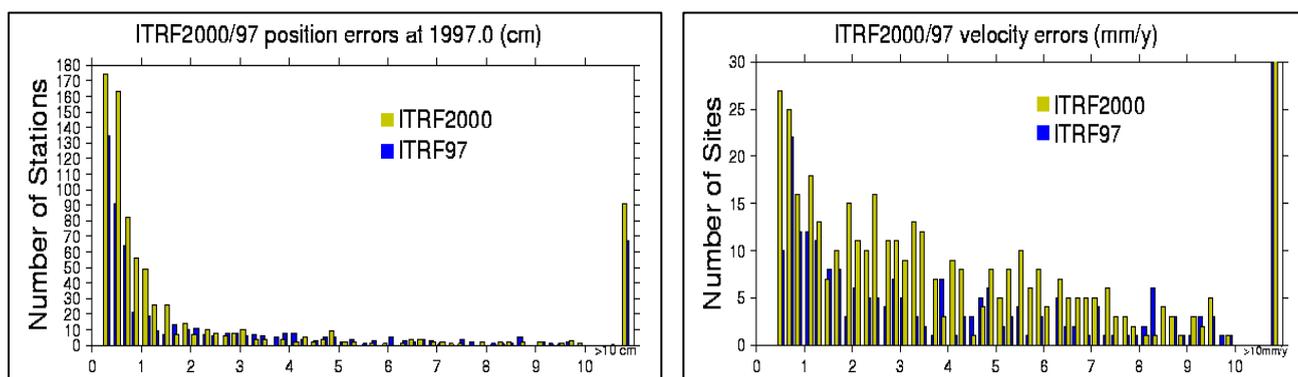


Figure 4. Histogrammes des positions et vitesses des stations ITRF2000/ITRF97

Les champs de vitesses des stations de l'ITRF2000

Bien que l'ITRF2000 ait été aligné sur le modèle NNR-NUVEL-1A, il est instructif de quantifier les vitesses résiduelles entre les deux. La figure 5 illustre les différences de vitesses entre l'ITRF2000 et NNR-NUVEL-1A pour 49 des 50 sites choisis, répartis sur 6 plaques tectoniques ayant au moins 4 sites. Cette figure montre clairement des résidus systématiques par plaque entre les deux champs de vitesses, comme par exemple entre les plaques Eurasie et Nord Amérique, pour n'en citer que ces deux. Ce comportement résiduel suggère qu'il y a des différences significatives des vitesses relatives entre-plaques, entre l'ITRF2000 et le modèle relatif NUVEL-1A.

Cette différence est, globalement, de l'ordre de 3mm/an. Cependant ceci n'altère pas la qualité interne de l'ITRF2000, dans la mesure où le but de l'alignement de l'ITRF2000 au modèle est de définir uniquement l'orientation différentielle de l'ITRF2000. Par conséquent, l'utilisateur doit être conscient que les pôles de rotation prédits par le modèle NNR-NUVEL-1A ne sont pas égaux à ceux qui pourraient être estimés à partir des vitesses ITRF2000.

La figure 6 montre les différences des vitesses calculées par les pôles de rotation de l'ITRF2000 d'une part et le modèle NNR-NUVEL-1A d'autre part. De plus, un pôle de rotation estimé par l'ITRF2000 dépend des sites choisis et du niveau de rigidité de la plaque en question, alors que le modèle fourni toujours le même pôle, pour n'importe quel ensemble de sites de la plaque.

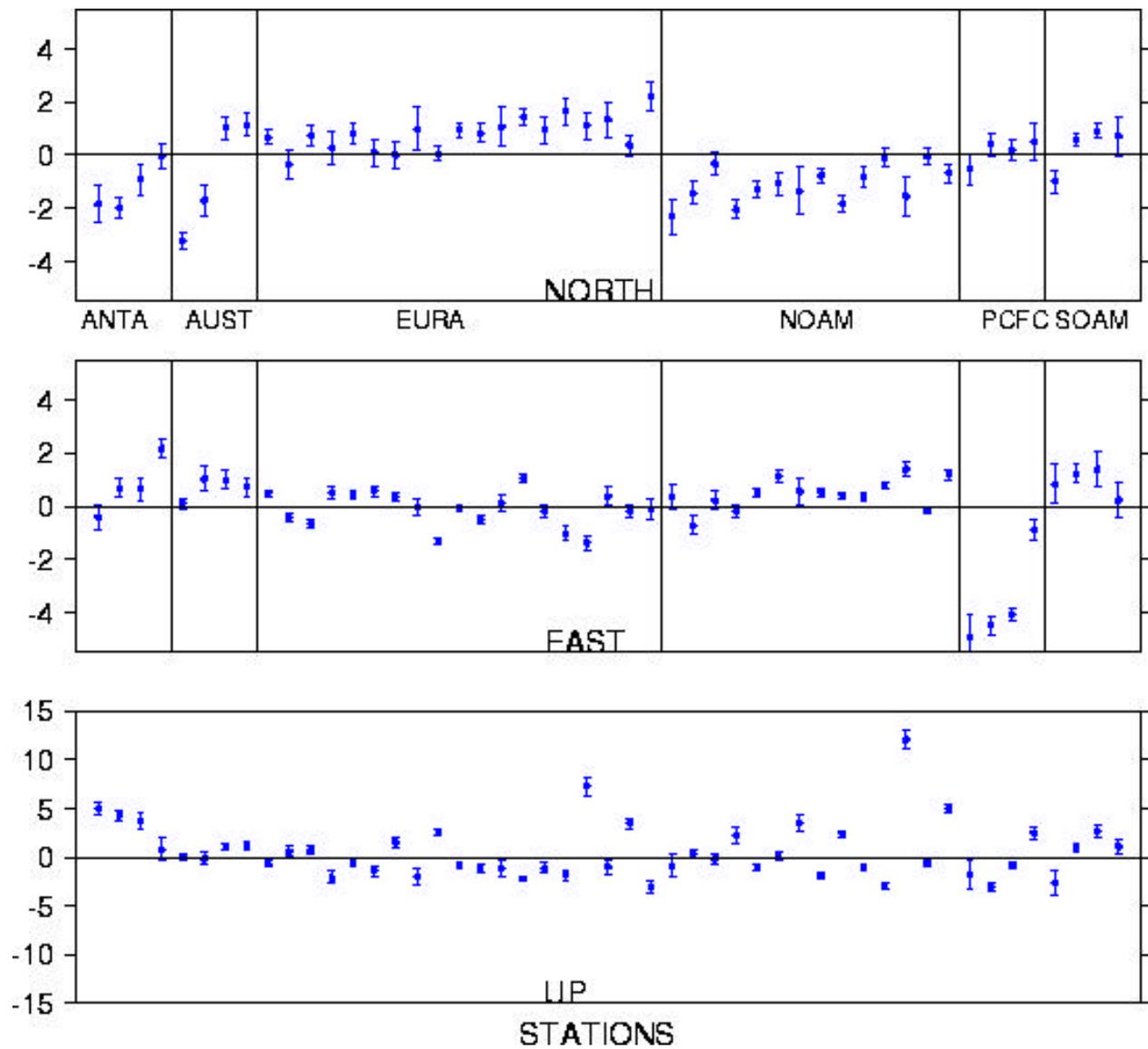


Figure 5. Différences des vitesses entre l'ITRF2000 et le modèle NNR-NUVEL-1A pour 49 sites.

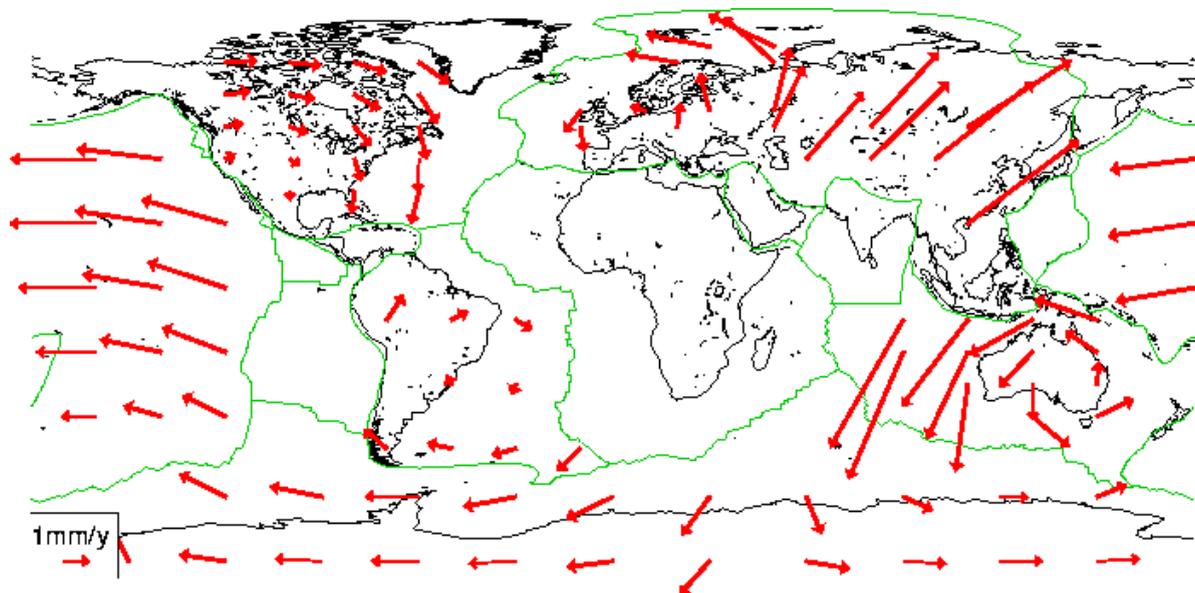


Figure 6. Différences des vitesses entre l'ITRF2000 et le modèle NNR-NUVEL-1A calculées à partir de leurs pôles de rotation respectifs.

Afin d'illustrer la discussion ci-dessus, nous avons utilisé les vitesses ITRF2000 pour estimer les pôles de rotation de 6 plaques, données dans la table 3. Dans cette estimation, les 49 sites ont été utilisés, augmentés d'un site sur la plaque Antarctique et un autre sur la plaque Pacifique pour améliorer la géométrie des sites sur ces deux plaques.

Le modèle d'observation utilisé dans cette estimation est l'équation suivante, reliant le vecteur d'Euler \mathbf{w}_p à la vitesse du point \dot{X}_i ayant X_i comme position et est situé sur la plaque p :

$$\dot{X}_i = \mathbf{w}_p \wedge X_i$$

La matrice de variance complète des vitesses des 51 sites, extraite de celle de l'ITRF2000, a été utilisée dans l'estimation des pôles des rotations, en un ajustement unique, préservant ainsi les corrélations entre les paramètres.

Le modèle de mouvement des plaques tectonique issu de l'ITRF2000

En utilisant les six pôles absolus de rotations, des pôles relatifs ont ensuite été calculés par addition de vecteurs. Les pôles relatifs de rotation des plaques sont insensibles à la définition du système de référence. Il est donc intéressant de comparer les pôles déduits de l'ITRF2000 à ceux prédits par le modèle géophysique (voir Table 4).

Table 4. Pôles relatifs des plaques tectoniques de l'ITRF2000

Plaque	(°N)	(°E)	x	y	z	N			
--------	------	------	---	---	---	---	--	--	--

Par rapport à la plaque Pacifique

ANTA	65.688	-84.208	.000640	-.006305	.014029	.882	.870	.025	0.7
AUST	61.482	6.530	.008747	.001001	.016203	1.057	1.074	.054	4.9
AURA	63.118	-79.215	.001357	-.007126	.014309	.919	.859	.083	6.9
NOAM	50.488	-75.134	.002152	-.008107	.010171	.755	.749	.036	2.2
SOAM	-58.070	-85.633	-.000463	.006058	-.009749	.658	.637	.041	3.9

Par Rapport à la plaque Nord Américaine

EURA	73.032	128.99	-.000794	.000981	.004138	.248	.214	0.56	4.6
------	--------	--------	----------	---------	---------	------	------	------	-----

x , y et z sont les composantes cartésiennes des pôles relatifs en radians par million d'années. N et N sont respectivement les pôles de l'ITRF2000 et NUVEL-1A, en degrés par million d'années. N est la magnitude de la différence de vitesse en mm/an sur la surface de la Terre.

Plaque	(°N)	(°E)	(°/m.an)
ANTA	61.830 ±2.143	-125.574 ±3.689	0.231 ±0.015
AUST	32.327 ±0.652	39.437 ±0.816	0.614 ±0.006
EURA	57.965 ±1.211	-99.374 ±2.710	0.260 ±0.005
NOAM	-5.036 ±1.142	-83.144 ±1.945	0.194 ±0.003
PCFC	-64.176 ±0.404	110.194 ±1.345	0.666 ±0.005
SOAM	-21.457 ±2.806	-134.631 ±4.762	0.113 ±0.005

Table 3. Pôles des rotations de 6 plaques tectoniques principale de l'ITRF2000

Cette Table montre que les différences entre les deux modèles se situent entre 0.03° et 0.08° par millions d'années, équivalent à environs 1 – 7 mm/an sur la surface de la Terre. Comme le montre la Table 4, par rapport à la plaque Pacifique, les vitesses ITRF2000 des autres plaques sont plus rapides que celles prédites par le modèle géophysique, à l'exception de la plaque Australienne. De plus, les résultats de l'ITRF2000 montrent un mouvement relatif entre les plaques Eurasie et Nord Amérique, plus rapide que celui du modèle géophysique par environs 0.056°/millions d'années.

Conclusion

L'ITRF2000 est, de loin, la version ITRF la plus étendue et la plus précise jamais réalisée. Cette solution contient près de 800 stations réparties sur près de 500 sites. La cohérence interne des solutions VLBI et SLR ont permis une définition précise de l'échelle et de l'origine. La stabilité à long terme de l'ITRF2000, évaluée sur une dizaine d'années, est de l'ordre de 4 mm en origine et de 0.5 ppb en échelle (environ 3 mm sur la surface de la Terre).

Références Bibliographiques :

- Altamimi Z., C. Boucher and P. Sillard, New Trends for the Realization of the International Terrestrial Reference System, *Adv. Space Res.*, 2001.
- Altamimi, Z., C. Boucher and L. Duhem, The Worldwide Centimetric Terrestrial Reference Frame and its Associated Velocity Field, *Adv. Space Res.* 13, (11)151-160, 1993.
- Argus, D. F., and R.G. Gordon, No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model Nuvel-1, *Geophys. Res. Lett.* 18, 2038-2042, 1991.
- Boucher, C., Terrestrial coordinate systems and frames, in *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, MacMillan, 2001.
- Boucher C., and Z. Altamimi, International Terrestrial Reference Frame, *GPS World* 7, 71-74, 1996.
- Boucher C., and Z. Altamimi, Towards an improved realization of the BIH terrestrial frame, *The MERIT/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames*, Vol. 2, edited by I.I Mueller, OSU/DGS, Columbus, Ohio, USA 1985.
- Boucher C., and Z. Altamimi, Development of a Conventional Terrestrial Reference Frame, in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*, *Geodyn. Ser.*, vol 24, edited by D.E. Smith & D.L. Turcotte, pp. 89-97, AGU, Washington D.C., 1993.
- Boucher, C., Current Intercomparisons Between CTS's, in *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*, edited by Kovalevsky, J., Mueller, I. I., and B. Kolaczek, 474 pp., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1989.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, Current plate motions, *J. Geophys. Res.* 101, 425-478, 1990.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res.* 21(20), 2191-2194, 1994.
- Kovalevsky, J., Mueller, I. I., and B. Kolaczek (Eds.), *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*, 474 pp., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1989.
- Sillard, P., Z. Altamimi and C. Boucher, The ITRF96 realization and its associated Velocity field, 25, 3223-3226, 1998.
-