

le repère international de référence terrestre

Le prix de cartographie de l'Académie des Sciences a été décerné aux deux auteurs de cet article en 1996 en récompense de leurs travaux sur les systèmes de référence géodésique.

Claude Boucher et Zuheir Altamimi (IGN)

Le repère International de Référence Terrestre (ITRF : International Terrestrial Reference Frame) est la réalisation du Système International de Référence Terrestre (ITRS : International Terrestrial Reference System). L'ITRS est un système de référence terrestre conventionnel particulier, défini par un ensemble cohérent de définitions et de modèles. Un système terrestre est généralement réalisé par la donnée des coordonnées d'un ensemble de stations terrestres.

L'origine de l'ITRS est le centre des masses de la Terre entière, incluant les océans et l'atmosphère. Son unité de longueur est le mètre du Système International SI, définie dans un repère local de la Terre au sens de la théorie relativiste de la gravitation. L'orientation de ses axes est cohérente avec le système du Bureau International de l'Heure (BIH) à l'époque de 1984.0 et est en accord avec les résolutions de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique (UGGI) et l'Union Astronomique Internationale (UAI). (Le BIH est le prédécesseur du Service International de la Rotation Terrestre (IERS : International Earth Rotation Service) et dont les activités ont été reprises par l'IERS en 1988). L'évolution temporelle de l'orientation de l'ITRS est telle qu'il n'y ait pas de rotation résiduelle horizontale en vitesse par rapport à la croûte terrestre.

L'ITRF (appelé repère de référence terrestre de l'IERS au début des activités de ce dernier) est établi et maintenu par la section système terrestre du Bureau Central de l'IERS. L'ITRF représente l'un des trois produits de l'IERS, les deux autres étant d'une part la détermination des paramètres de rotation de la Terre (les coordonnées du pôle et le temps universel) et, d'autre part, la réalisation du Système International de Référence Céleste. Ce dernier est un système fixe de l'espace dans lequel sont exprimées les positions des quasars et d'autres objets célestes.

La construction de l'ITRF est basée sur la combinaison de jeux de coordonnées et vitesses des stations déduites des observations des techniques de géodésie spatiale par divers centres d'analyse au niveau mondial. Les techniques utilisées depuis 1988 sont l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie Laser sur satellite (SLR) et sur la Lune (LLR), le GPS (Global Positioning System) depuis 1991 et DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) depuis 1994. Des solutions annuelles de l'ITRF ont été calculées et publiées dans les rapports et notes techniques de l'IERS. Notons que l'ITRF_{aa} est réalisé l'année aa+1, utilisant les données des observations cumulées depuis les années 70 jusqu'à l'année aa.

La solution ITRF94, dernière réalisation en date et qui est utilisée comme référence actuellement, a été construite par combinaison des jeux de coordonnées et vitesses incluant 104 sites VLBI, 62 SLR, 66 GPS et 52 DORIS (voir Figure 1). Plusieurs sites regroupent deux techniques de mesure ou plus (colocations).

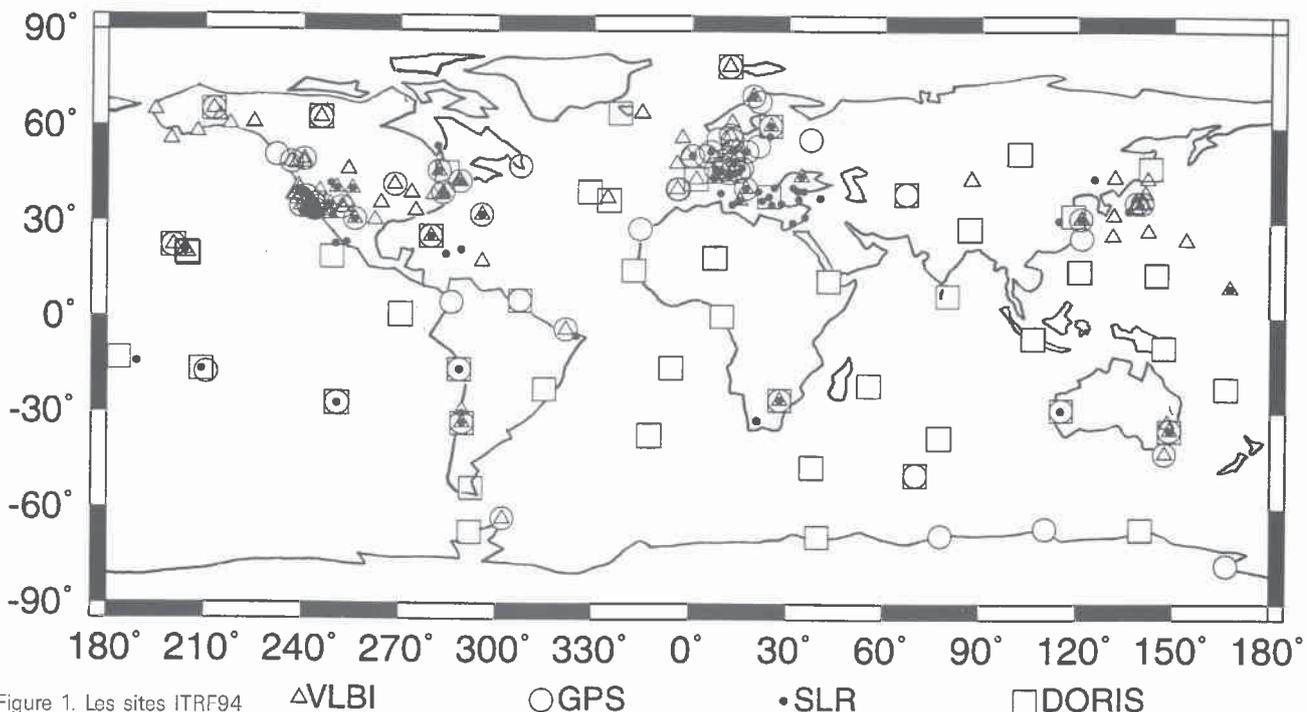


Figure 1. Les sites ITRF94

Le calcul de l'ITRF

La procédure de base utilisée dans le calcul de l'ITRF comporte plusieurs étapes. La première étape consiste en la réduction des solutions des techniques individuelles à une époque de référence t_0 , en utilisant leurs modèles respectifs de vitesses de stations (modèles géophysiques de mouvement de plaques tectoniques ou des champs de vitesses estimées). Cette étape est suivie par une estimation par moindres carrés des coordonnées des stations de l'ITRF ainsi que les 7 paramètres de transformation de chaque solution individuelle par rapport à l'ITRF. Le modèle standard utilisé dans la procédure de combinaison est basé sur une similitude Euclidienne à 7 paramètres, qui est la forme générale de transformation entre deux systèmes de référence terrestres. Ce modèle est donné par :

$$\begin{pmatrix} X^s \\ Y^s \\ Z^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T1^s \\ T2^s \\ T3^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D^s & -R3^s & R2^s \\ R3^s & D^s & -R1^s \\ -R2^s & R1^s & D^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

où X, Y, Z sont les coordonnées d'une station exprimée dans l'ITRF, et X^s, Y^s, Z^s sont les coordonnées de la même station dans la solution individuelle s. $T1^s, T2^s, T3^s, D^s, R1^s, R2^s, R3^s$ sont respectivement les trois translations, le facteur d'échelle et les trois rotations liant l'ITRF à la solution s. D'autre part, les rattachements entre les stations en colocation sont utilisés avec des écarts types appropriés en fonction de leurs incertitudes.

Les vitesses des stations de l'ITRF sont actuellement estimées :

- soit par recombinaison, de manière similaire à la combinaison des coordonnées. La méthode de combinaison des vitesses est équivalente à celle de combinaison des coordonnées en utilisant la dérivée par rapport au temps de l'équation 1.
- soit en différenciant les coordonnées combinées à deux époques différentes.

Des améliorations successives ont été apportées dans la stratégie d'analyse des données pour la combinaison depuis 1988. Par exemple, l'ITRF le plus récent, ITRF94, a été calculé en utilisant les matrices complètes de variances-covariances entre positions et vitesses des solutions individuelles.

La définition de l'ITRF

Afin de définir explicitement un repère de référence terrestre, dans une analyse spécifique de données, quatre éléments intrinsèques (orientation, origine, échelle et évolution temporelle) doivent être clairement définis. Dans le cas particulier de combinaison des coordonnées, ceci est généralement réalisé en fixant ou contraignant au moins 7 paramètres de transformation et les 7 dérivées correspondantes.

Orientation. De l'ITRF88 à l'ITRF92, l'orientation a été définie de telle sorte qu'il n'y ait pas de rotation entre ses repères. L'orientation de l'ITRF93 a été contrainte à être en accord avec les séries de paramètres de rotation de la Terre de l'IERS à l'époque 1988.0. Par contre, l'orientation de l'ITRF94 a été alignée à celle de l'ITRF92 à l'époque 1988.0.

Origine. Les origines de l'ITRF88 jusqu'à l'ITRF93 ont été fixées à celles des solutions SLR du CSR (Center for

Space Research, Texas University) incluses dans chaque solution ITRF. L'origine de l'ITRF94 a été définie par une moyenne pondérée de quelques solutions SLR et GPS.

Échelle. Les solutions SLR du CSR ont également été utilisées pour définir les échelles de l'ITRF88 jusqu'à l'ITRF93. En ce qui concerne l'ITRF94, son échelle a été définie par une moyenne pondérée de quelques solutions VLBI, SLR et GPS. Une correction supplémentaire de $0,7 \times 10^{-9}$ a ensuite été appliquée pour être en accord avec les résolutions de l'UGGI et de l'UAI. Cette correction représente la différence entre le temps TAI (Temps Atomique International) utilisé par les centres d'analyse de l'IERS et le temps TCG (Temps Coordonné Géocentrique) recommandé par les résolutions de l'UGGI et de l'UAI.

Évolution temporelle. Les positions des stations sur la surface de la Terre varient lentement (jusqu'à 10 cm par an dans certains endroits du Globe) en raison des mouvements des plaques tectoniques, connus sous le nom familier de dérives des continents. De l'ITRF88 à l'ITRF90, le modèle absolu des mouvements des plaques AMO-2 a été sélectionné comme modèle de vitesses associé à ces repères. De l'ITRF91 à l'ITRF93, des champs de vitesses ont été ajustés par combinaison des vitesses estimées par VLBI, SLR et (depuis 1993) GPS. Notons que pour l'ITRF91 et l'ITRF92, leur évolution temporelle est en accord avec le modèle géophysique NNR-NUVEL1. L'évolution temporelle de l'ITRF93 a été contrainte à suivre les séries de paramètres de rotation de la Terre de l'IERS. Le champ de vitesses de l'ITRF93 ainsi obtenu a une rotation différentielle en comparaison au modèle NNR-NUVEL1A, utilisé comme référence dans cette solution. Le champ de vitesses associé à l'ITRF94 a été estimé en différenciant les coordonnées combinées aux deux époques ; 1988.0 et 1993.0. L'évolution temporelle de l'ITRF94 est en accord avec le modèle NNR-NUVEL1A.

Les paramètres de transformation

Afin de quantifier les quatre caractéristiques de la définition de l'ITRF décrites précédemment, nous donnons ici, Tableau 1, les 7 paramètres de transformation et leur variations entre l'ITRF95 et les ITRF précédents. Ces paramètres de transformation doivent être utilisés avec l'équation 1 et son valable à l'époque t_0 . Par conséquent, pour un paramètre P, sa valeur à l'époque t est obtenue par :

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P} \cdot (t - t_0) \quad (2)$$

Si \dot{P} n'est pas donné, alors P est égal à zéro.

Tableau 1 : Paramètres de transformation et leur variations de l'ITRF94 vers les autres ITRF

ITRF	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3	Epoque
	cm	cm	cm	10^{-8}	0.001"	0.001"	0.001"	
Variations	\dot{T}_1	\dot{T}_2	\dot{T}_3	\dot{D}	\dot{R}_1	\dot{R}_2	\dot{R}_3	
	cm/y	cm/y	cm/y	$10^{-8}/y$	0.001"/y	0.001"/y	0.001"/y	
ITRF93	0.6	-0.5	-1.5	0.04	-0.39	0.80	-0.96	88.0
Variations	-0.29	0.04	0.08	0.00	-0.11	-0.19	0.05	
ITRF92	0.8	0.2	-0.8	-0.08	0.0	0.0	0.0	88.0
ITRF91	2.0	1.6	-1.4	0.06	0.0	0.0	0.0	88.0
ITRF90	1.8	1.2	-3.0	0.09	0.0	0.0	0.0	88.0
ITRF89	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.0	0.0	0.0	88.0
ITRF88	1.8	0.0	-9.2	0.74	0.1	0.0	0.0	88.0

L'ITRF et le GPS

La relation entre l'ITRF et le GPS est devenue plus importante avec la création de l'IGS (International GPS Service for Geodynamics) depuis 1992. L'IGS et l'IERS travaillent en étroite collaboration. À travers cette collaboration, l'IERS est en charge de la production des coordonnées et vitesses des stations ITRF ainsi que les valeurs des paramètres d'orientation de la Terre. L'IGS quant à lui apporte son soutien à la réalisation, l'accès et l'amélioration de l'ITRF.

Depuis le début des activités préliminaires de l'IGS en 1992, les centres d'analyse IGS ont utilisé les coordonnées ITRF pour un sous ensemble de stations dans leurs calculs d'orbites. De plus, les éphémérides IGS combinées sont exprimées dans l'ITRF dans la mesure où les coordonnées utilisées par l'IGS sont issues de l'ITRF91 depuis le début jusqu'à la fin de l'année 1993 ; l'ITRF92 pendant 1994 ; l'ITRF93 pendant 1995 et jusqu'à fin juin 1996 ; et l'ITRF94 depuis le 1^{er} juillet jusqu'à présent.

Les coordonnées ITRF des sites GPS

Comment un utilisateur GPS peut-il obtenir des coordonnées ITRF d'un site GPS donné ? Pour une campagne GPS donnée dont les mesures ont une époque centrale t_c , il existe principalement deux cas de figure, en fonction des éphémérides utilisées dans le traitement des données GPS collectées :

1) Si les éphémérides précises de l'IGS sont utilisées dans le traitement des données, les coordonnées ainsi obtenues de la campagne GPS à l'époque t_c sont en accord avec l'ITRF $_{yy}$, où yy désigne la version ITRF utilisée par l'IGS pour générer les éphémérides. Ceci est vrai dans le cas où l'utilisateur traite les données en réseau libre ou en un ajustement utilisant la technique des contraintes minimales. Si des contraintes sur des coordonnées des stations ITRF $_{zz}$ sont appliquées, l'utilisateur doit choisir l'ITRF le plus récent et convertir les coordonnées en utilisant l'une des trois approches suivantes :

- a) si $zz > yy$, l'utilisateur doit calculer les coordonnées des stations en réseau libre ou en réseau avec contraintes minimales en utilisant des éphémérides exprimées dans l'ITRF $_{yy}$. L'utilisateur doit ensuite convertir les coordonnées de l'ITRF $_{yy}$ en ITRF $_{zz}$ par les paramètres de transformation appropriés à l'époque t_c déduits du Tableau 1. Les contraintes sur les coordonnées des stations sont ensuite introduites en utilisant les valeurs ITRF $_{zz}$.
- b) si $zz = yy$, l'utilisateur appliquera directement les contraintes sur les coordonnées des stations, travaillant ainsi dans l'ITRF $_{yy}$.
- c) si $zz < yy$, les coordonnées des stations doivent être transformées de l'ITRF $_{zz}$ en ITRF $_{yy}$ en utilisant les valeurs des paramètres de transformation du Tableau 1, à l'époque t_c , et continuer ensuite comme dans le cas b. Cette approche est loin d'être optimale, dans la mesure où il y a une grande probabilité que les coordonnées des stations ITRF $_{zz}$ ne soient pas d'une meilleure estimation.

II) Si les éphémérides WGS84 sont utilisées dans le traitement des données GPS collectées avant la mi-94, les coordonnées des stations ainsi obtenues sont en accord

avec n'importe quelle version ITRF au niveau du mètre. Ceci est dû au fait que le WGS84 (qui a été réalisé initialement en utilisant le système « U.S. Navy Navigation Satellite System », connu sous le nom Transit et ayant une précision métrique) peut être assimilé à l'ITRS, au mieux, à ce niveau de cohérence. En juin 1994, une nouvelle version du WGS84 a été implémentée, appelé WGS84 (G730). Cette nouvelle version utilise des coordonnées affinées des stations de poursuite GPS de l'« Air Force and Defense Mapping Agency », produisant ainsi un repère de référence WGS84 opérationnel coïncidant avec l'ITRF au niveau de 10 centimètres.

Conclusion

Dans cet article très bref, nous avons essayé de présenter l'ITRF, en mettant l'accent sur des points importants sur son évolution d'année en année, et comment obtenir des coordonnées ITRF pour un site observé par GPS. Pour des informations complémentaires sur l'ITRF et sa relation avec le GPS, le lecteur pourra se reporter aux références données ci-dessous.

(Version Française d'un article publié en anglais dans GPS WORLD, Septembre 1996).

Références

Pour des détails complémentaires sur le développement de l'ITRF94, voir :

- « Résultats and Analysis of the ITRF94, » by C. Boucher, Z. Altamimi, M. Feissel and P. Sillard, *IERS Technical Note 20*, Observatoire de Paris, France, 1996.

Les données et résultats de l'ITRF94 sont accessibles sur le serveur du Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) : <ftp://schubert.ign.fr/CIAG/witrf/itrf94.html>

Pour des informations sur le WGS84 et ses améliorations :

- « Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System 1984, » by S. Malys and J. A. Slater, in the *Proceedings of ION GPS-94*, the seventh International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, held in Salt Lake City, Utah September 1994, pp. 17-24.

Pour les modèles géophysiques des mouvements des plaques tectoniques, voir :

- « Present-day Plate Motions, » by J.B. Minster and T.H. Jordan, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No. B11, 1978, pp. 5331-5354.
- « No-net-rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model NUVEL-1, » by D.F. Argus and R.G. Gordon, in *Geophysical Research Letters*, Vol. 18, N° 11, 1991, pp. 2039-2042.
- « Effect of Recent Revisions to the Géo-magnétique Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions, » by C. DeMets, R.G. Gordon, D.F. Argus, and S. Stein, in *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, N° 20, 1994, pp. 2191-2194.

Pour une référence générale sur GPS à la fois récente et en français, voir :

- « GPS : localisation et navigation, » par S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even et P. Willis, Ed. HERMES, nov. 1996.