

L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations

Zuheir ALTAMIMI - Paul REBISCHUNG - Laurent MÉTIVIER - Xavier COLLILIEUX

La dernière solution du repère international de référence terrestre (ITRF), l'ITRF2014, apporte une amélioration significative par rapport aux précédentes versions du référentiel international. Pour la première fois dans l'histoire de l'ITRF, cette solution s'appuie sur la modélisation précise des mouvements non linéaires des stations, à savoir l'estimation des termes saisonniers (annuels, semi-annuels) qu'on retrouve dans les séries temporelles des coordonnées des stations, et les paramètres décrivant les déformations post-sismiques (PSD : Post-Seismic Deformations) des sites ayant subi d'importants tremblements de Terre. Alors que l'ITRF2014 fournit les produits géodésiques habituels : positions des stations à une époque de référence (2010.0) et des vitesses linéaires de déplacement, ainsi que les paramètres de rotation de la Terre, les modèles paramétriques de déformations post-sismiques font partie intégrante des produits du repère. L'utilisateur doit par conséquent calculer la correction PSD totale à rajouter aux coordonnées ITRF2014, si l'époque de la position de la station qui l'intéresse se trouve dans l'intervalle de relaxation post-sismique. Les données complètes des modèles paramétriques pour toutes les stations concernées, ainsi que des routines en Fortran sont fournies à cette fin et sont disponibles aux utilisateurs sur le site web de l'ITRF2014.

MOTS-CLÉS

Systèmes de référence, mouvements non-linéaires, ITRF, ITRF2014

L'ITRF2014 a été officiellement publié le 21 janvier 2016, sur le site web dédié aux résultats et autres informations et descriptions relatives à l'élaboration du repère : http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/. Un article détaillé a été aussi publié dans le Journal of Geophysical Research (JGR) et est disponible en accès libre (Open Access) : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098/full#>, (Altamimi et al., 2016).

Pourquoi un repère de référence terrestre ?

Comment la terre se déforme-t-elle sous l'effet de la tectonique des plaques, des déformations co- et post-sismiques, de la dynamique des couches fluides qui l'enveloppent, et de la fonte actuelle des glaces ? Comment déterminer la position précise d'un point sur la surface de la terre en constante déformation ? Quel est le taux de variation du niveau marin, et sa ramification avec le chan-

gement climatique ? Pour répondre à ces questions scientifiques et fondamentales pour la compréhension de la dynamique de notre planète, mais aussi la détermination précise d'orbites satellitaires et du positionnement au sens large, il devient important d'assurer la disponibilité et la mise à jour continue d'un repère de référence terrestre global, précis et stable dans le temps, tel que l'ITRF.

Par l'intermédiaire de deux résolutions, un système de référence terrestre unifié à vocation scientifique et de géodésie opérationnelle, le système international de référence terrestre (ITRS : *International Terrestrial Reference System*) a été adopté formellement par l'Union Géodésique et Géophysique Internationale comme référence standard. Il en découle que ses réalisations numériques, appelées ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) sont elles aussi recommandées. L'adoption de l'ITRF comme référence en sciences de la Terre et

pour le positionnement, et donc pour la détermination d'orbites précises (à la fois pour les systèmes de navigation GNSS et les satellites altimétriques) se traduit par une exigence de qualité et de pérennité. La récente résolution adoptée le 26 février 2015 par l'Assemblée générale des Nations Unies sur le cadre de référence géodésique mondial (GGRF) pour le développement durable (http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/69/L.53), reconnaissant l'adoption de l'ITRF par la communauté scientifique et de géodésie opérationnelle, témoigne de l'importance critique du référentiel terrestre pour les applications scientifiques et sociétales.

La construction de l'ITRF2014

L'approche actuellement adoptée dans la matérialisation de l'ITRS est de considérer son repère associé, l'ITRF, comme un repère séculaire (ou linéaire) dont les paramètres de définition (origine, échelle et orientation) sont spécifiés à une époque de référence, et varient linéairement au cours du temps. Par conséquent, les positions des stations ITRF sont déterminées à une époque de référence et leurs vitesses de déplacement sont linéaires et constantes dans le temps. Dans le but d'améliorer l'exactitude du référentiel international, ainsi que la précision des vitesses linéaires de déplacement, il est devenu indispensable de modéliser avec précision les mouvements non linéaires des stations et ainsi limiter leur impact sur les paramètres du référentiel.

Les données en entrée du calcul de l'ITRF2014 ont été fournies sous forme de séries temporelles de positions journalières des stations GNSS et VLBI, et hebdomadaires des stations SLR et DORIS. La figure 1 illustre la répartition des 975 sites de l'ITRF2014 dont près de 10 % sont des sites co-localisés avec 2, 3 ou 4 techniques de mesure. Le calcul de l'ITRF2014 proprement dit

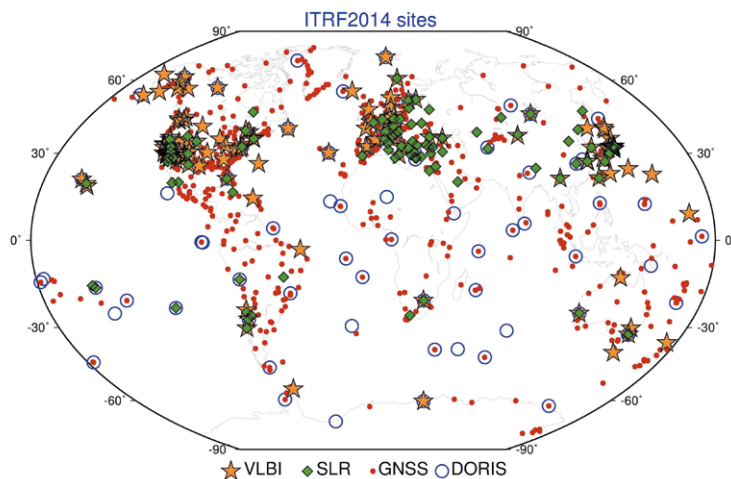


Figure 1. Répartition des 975 sites de l'ITRF2014 mettant en évidence les stations VLBI, SLR et DORIS co-localisés avec des stations GNSS

comporte deux étapes. La première étape consiste à cumuler (au sens des moindres carrés) les séries temporelles des coordonnées des stations et des paramètres de rotation de la Terre pour chacune des quatre techniques individuellement, pour en déduire un repère à long terme (positions et vitesses des stations). La deuxième étape combine les quatre repères à long terme dont les liens sont assurés par l'ajout des rattachements géodésiques locaux au sein des sites dits co-localisés (sites avec plusieurs instruments de mesure). Comme décrit brièvement dans les paragraphes suivants, des modèles paramétriques des déformations post-sismiques sont déterminés, en amont de la première étape au cours de laquelle les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels) sont ajustés.

Modélisation des déformations post-sismiques

La modélisation des déformations post-sismiques par une fonction linéaire par morceaux, comme dans les précédentes versions de l'ITRF, est devenue, à l'évidence, une approche inappropriée pour décrire avec précision la trajectoire d'une station qui a subi un tremblement de terre majeur. En préalable au calcul de l'ITRF2014, des modèles empiriques de déformation post-sismique, basés sur des fonctions exponentielles et/ou logarithmiques ont été développés. Différents modèles ont été ajustés aux séries temporelles de toutes les stations GNSS de l'ITRF2014 présentant des déformations post-sismiques significatives. Le

modèle le plus approprié a été ensuite choisi au cas par cas à l'aide de critères statistiques. Les séries temporelles, non seulement des stations GNSS, mais aussi des stations co-localisées des trois autres techniques, ont finalement été corrigées de ces modèles avant le calcul final de l'ITRF2014. En comparaison à la modélisation linéaire par morceaux précédemment employée pour décrire les déformations post-sismiques, cette nouvelle approche constitue un progrès important. A titre d'illustration, la figure 2 montre la trajectoire de deux stations GNSS et VLBI co-localisées à Tsukuba (Japon) où l'on voit en bleu les séries temporelles brutes, en rouge le modèle

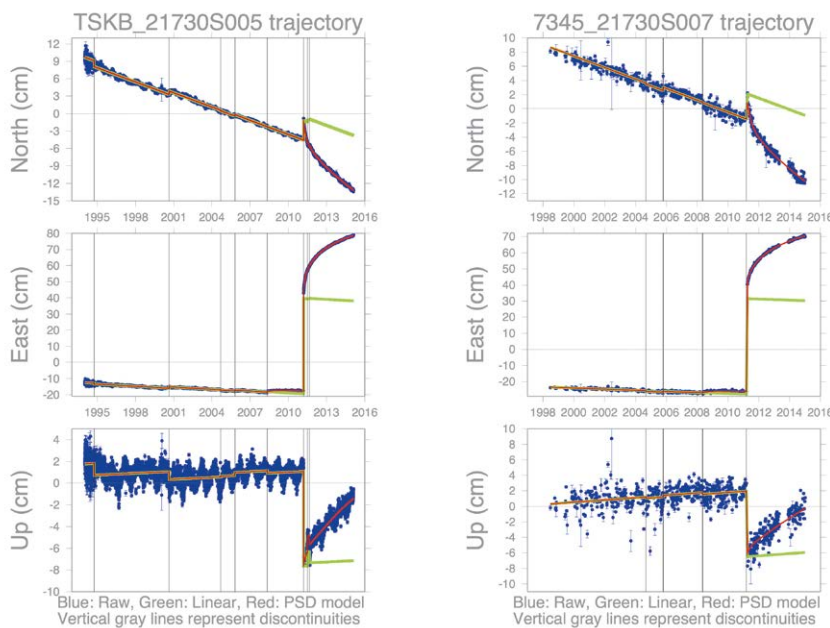


Figure 2. La trajectoire de Tsukuba (Japon), GPS (gauche) et VLBI (droite). La série de positions brute en bleu, la vitesse linéaire en vert, et le modèle paramétrique de déformation post-sismique en rouge

paramétrique et en vert la trajectoire linéaire représentant la position régularisée de l'ITRF2014. Cette figure montre l'accord remarquable du modèle paramétrique avec la série GNSS, mais aussi VLBI.

Modélisation des termes saisonniers

Il est très fréquent d'observer des signaux périodiques dans les séries temporelles de coordonnées des stations fournies par les différentes techniques de géodésie spatiale pour la construction de l'ITRF, comme on peut le voir distinctement sur la composante verticale de la station GPS à Tsukuba (Japon) de la figure 2. Ces signaux sont en réalité le reflet des surcharges (hydrologique, atmosphérique et océanique) agissant sur la croûte terrestre, mais aussi des erreurs systématiques des techniques elles-mêmes, tel que l'effet draconitique du système GPS (période de 351.6 jours au cours de laquelle la constellation satellitaire répète son orientation par rapport au soleil). La non-modélisation des signaux périodiques peut avoir un effet d'imprécision sur les vitesses estimées et en particulier sur la composante verticale allant jusqu'à 1 mm par an. Les signaux annuels et semi-annuels des séries temporelles de positions des stations des quatre techniques ont ainsi



été estimés par une fonction sinusoïdale décrivant ces mouvements.

■ Usage des coordonnées ITRF2014

Par définition et construction, l'ITRF est un repère séculaire (linéaire), et de ce fait les coordonnées des stations varient linéairement avec le temps, y compris pour les stations ayant des déformations post-sismiques significatives. Cependant, dans le cas de l'ITRF2014, l'utilisateur qui s'intéresse aux coordonnées pendant la période de relaxation doit calculer la somme totale des corrections PSD, $X_{PSD}(t)$ et la rajouter aux coordonnées linéairement propagées avec la vitesse linéaire, en utilisant l'équation suivante :

$$X_{PSD}(t) = X(t_0) + \dot{X} \cdot (t - t_0) + X_{PSD}(t) \quad (1)$$

où \dot{X} est la vitesse linéaire, et $X_{PSD}(t)$ est la somme totale des corrections PSD à l'époque t . Les modèles paramétriques de l'ITRF2014 sont une partie intégrante du repère et sont disponibles sur le site web : http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/.

■ ITRF2014 et modèle de mouvement de plaques tectonique

A chaque solution ITRF, nous estimons un nouveau modèle de mouvement des plaques tectoniques en cohérence avec le repère et sa précision. Une des difficultés de ce travail est d'extraire un ensemble de stations fiables dont les vitesses horizontales ne sont a priori affectées que par la tectonique des plaques. Cela demande d'exclure de nombreuses stations, en particulier celles situées en zones de déformations actives, zones elles-mêmes à définir et à qualifier.

Ce type de modèle est particulièrement demandé par les utilisateurs GNSS qui exploitent les vitesses horizontales, que ce soit pour des applications scientifiques ou de géodésie opérationnelle. Un modèle de mouvement de plaques ITRF2014 a donc été estimé et publié dans *Geophysical Journal International* (Altamimi et al., 2017). C'est un modèle construit sur le champ de vitesses horizontales de 297 sites répartis sur 11 plaques, dont la sélection est basée sur des critères géophysiques et statistiques assez stricts. Il est cohérent avec

la notion de plaques rigides au niveau de 0.3 mm/an, qui est l'erreur moyenne quadratique pondérée de l'ajustement par moindres carrés.

Conclusion

Avec la publication de l'ITRF2014, modélisant les mouvements non linéaires des stations, un grand pas a été franchi dans l'amélioration du référentiel international. La modélisation des signaux saisonniers (annuels et semi-annuels) constitue non seulement un produit scientifique précieux à analyser et interpréter, mais permet aussi d'améliorer l'estimation des vitesses linéaires des stations, en particulier sur la composante verticale.

L'ajustement des modèles paramétriques de déformations post-sismiques permet de décrire fidèlement la trajectoire des stations qui ont subi des tremblements de terre majeurs, mais aussi de déterminer la partie linéaire du mouvement de manière plus précise.

Les analyses approfondies des données de l'ITRF2014 ont confirmé la persistance du biais d'échelle entre les repères SLR et VLBI, qui est de l'ordre de 1.4 ppb (équivalent à 8.7 mm à l'équateur). Ce biais d'échelle est un indicateur d'erreurs systématiques dans les deux techniques dont il est urgent d'investiguer les causes.

Les résultats de l'ITRF2014 ont aussi montré l'existence pour un nombre important de sites de co-localisation d'écarts significatifs entre les vecteurs issus des rattachements terrestres et les estimations de géodésie spatiale. En effet, plus de 50 % des vecteurs rattachements entre les points de référence des instruments SLR et VLBI d'une part et ceux des GNSS d'autre part, présentent des écarts supérieurs à 5 mm, et 30 % ont un écart supérieur à 10 mm. L'expérience passée a montré que ces écarts sont largement dus aux erreurs systématiques des techniques spatiales, plutôt qu'aux erreurs des rattachements locaux. La maintenance et l'amélioration continue de l'infrastructure géodésique mondiale sont une condition préalable à l'amélioration et la durabilité à long terme de l'ITRF, tel que reconnu par la résolution de l'Assemblée générale des Nations Unies sur

le repère géodésique mondial pour le développement durable. ●

Références

- Altamimi, Z., L. Métivier, P. Rebischung, H. Rouby, and X. Collilieux (2017) *ITRF2014 plate motion model*, *Geophysical Journal International*, Volume 209, Issue 3, 1 June 2017, Pages 1906-1912, <https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>.
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2016) *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions*, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <https://doi.org/10.1002/2016JB01309>.

Contacts

Zuheir ALTAMIMI, Paul REBISCHUNG, Laurent MÉTIVIER, Xavier COLLILIEUX (@ign.fr)

Institut national de l'information géographique et forestière

ABSTRACT

For the first time of the history of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), the ITRF2014 provides a significant improvement over the past versions of the international reference. The ITRF2014 innovation is the accurate modelling of station nonlinear motions, by estimating the seasonal signals (annual and semi-annual) present in the time series of station coordinates, as well as the parameters describing the post-seismic deformations (PSD) of sites that were subject to major earthquakes. While the ITRF2014 provides the usual geodetic products: station positions at a reference epoch (2010.0), station linear velocities, as well as Earth orientation parameters, the parametric models of post-seismic deformations are an essential part of the frame products. The user should therefore compute the total PSD correction to be added to the ITRF2014 coordinates, if the epoch of the station position occurs within the post-seismic relaxation period. The complete parametric models for all concerned stations, as well as subroutines in FORTRAN are provided at the ITRF2014 website: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/.