

# ITRF2020 : Un référentiel augmenté affinant la modélisation des mouvements non linéaires des stations

■ Zuheir ALTAMIMI - Paul REBISCHUNG - Xavier COLLILIEUX - Laurent MÉTIVIER - Kristel CHANARD

*Pour mieux décrire la forme de la surface de la Terre en constante déformation, la dernière réalisation du système international de référence terrestre (ITRF : International Terrestrial Reference Frame), l'ITRF2020, est fourni sous la forme d'un repère de référence terrestre augmenté qui modélise avec précision les mouvements non linéaires des stations, à savoir les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels) présents dans les séries temporelles de positions de stations ainsi que les déformations post-sismiques (PSD : Post-Seismic Deformation) des sites ayant subi d'importants tremblements de terre. Des solutions retraitées sous forme de séries temporelles de positions de stations et de paramètres d'orientation de la Terre basées sur l'historique complet des observations fournies par les quatre techniques géodésiques spatiales (DORIS, GNSS, télémétrie laser sur satellite (SLR) et interférométrie à très longue base (VLBI)) ont été utilisées, couvrant 28, 27, 38 et 41 années d'observations, respectivement.*

*L'origine à long terme de l'ITRF2020 suit linéairement avec le temps le centre des masses (CM) de la Terre tel que détecté par la technique SLR sur la période 1993.0-2021.0. L'exactitude de l'origine à long terme de l'ITRF2020 est évaluée, par comparaison aux solutions passées, à savoir ITRF2014, ITRF2008 et ITRF2005, au niveau de 5 mm, et 0,5 mm/an pour son évolution dans le temps.*

*L'échelle à long terme de l'ITRF2020 est définie par une moyenne pondérée rigoureuse des sessions VLBI sélectionnées jusqu'en 2013.75 et des solutions hebdomadaires SLR couvrant la période 1997.7-2021.0. Pour la première fois de l'histoire de l'ITRF, l'accord en échelle entre les solutions à long terme SLR et VLBI est de l'ordre de 0,15 ppb<sup>1</sup> (1 mm à l'équateur) à l'époque 2015.0, avec une dérive nulle. L'ITRF2020 a été officiellement publié le 15 avril 2022, sur le site web dédié : <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. Un article détaillé est en cours de soumission au Journal of Geodesy (Altamimi et al., 2022).*

## Pourquoi un repère de référence terrestre ?

Les applications en sciences de la Terre solide et en géodésie opérationnelle ont nécessairement besoin de disposer d'un repère de référence terrestre mondial, en tant que référence unique, afin d'assurer l'interopérabilité et la cohérence des produits géodésiques et d'exploiter de façon optimale les différentes mesures recueillies par les capteurs au sol ou des satellites artificiels.

Le système international de référence terrestre (ITRS) et sa réalisation, le

repère international de référence terrestre (ITRF) sont ainsi recommandés par un certain nombre d'organisations scientifiques internationales, telles que l'Union astronomique internationale, et l'Union géodésique et géophysique internationale (IUGG 2007, 2019)<sup>1</sup>.

L'ITRF est aujourd'hui indispensable à de nombreuses applications en sciences

<sup>1</sup> ppb = part per billion pour partie par milliard. 1 ppb d'écart en échelle équivaut à environ 6,4 mm à la surface de la Terre.

<sup>2</sup> <https://iugg.org/meetings/iugg-general-assemblies/#5776d8e80445797e0>

## MOTS-CLÉS

Systèmes de référence, ITRF2020

de la Terre : c'est la référence pour le positionnement sur laquelle s'appuie la détermination des orbites précises des satellites qui observent notre planète (à la fois pour les systèmes de navigation GNSS et les satellites altimétriques) ; il permet aux astronomes, géophysiciens et climatologues du monde entier d'étudier les déformations et les mouvements de la Terre. C'est enfin pour tous les passionnés de géodésie ou de l'évolution de notre planète, une source incontournable d'informations sur sa dynamique.

## La construction de l'ITRF2020

Les données en entrée du calcul de l'ITRF2020 ont été fournies sous forme de séries temporelles de positions journalières pour les stations d'observation GNSS et VLBI, et hebdomadaires pour les stations DORIS et SLR. La figure 1 illustre la répartition des 1 223 sites de l'ITRF2020 dont près de 10 % sont des sites de stations co-localisées avec deux, trois ou quatre techniques de mesure.

L'approche adoptée pour l'ITRF2020, matérialisant l'ITRS, est de fournir aux utilisateurs, pour chaque point du réseau, les éléments permettant de calculer sa position à tout instant en prenant en compte :

- sa vitesse de déplacement ;
- ses variations saisonnières (annuelles et semi-annuelles) ;
- des déplacements soudains liés à des séismes ou changements de matériel ;
- éventuellement des déformations post-sismiques.

Parmi un certain nombre d'innovations et d'améliorations de l'analyse, pour la première fois de l'histoire de l'ITRF, l'ITRF2020 a été déterminé

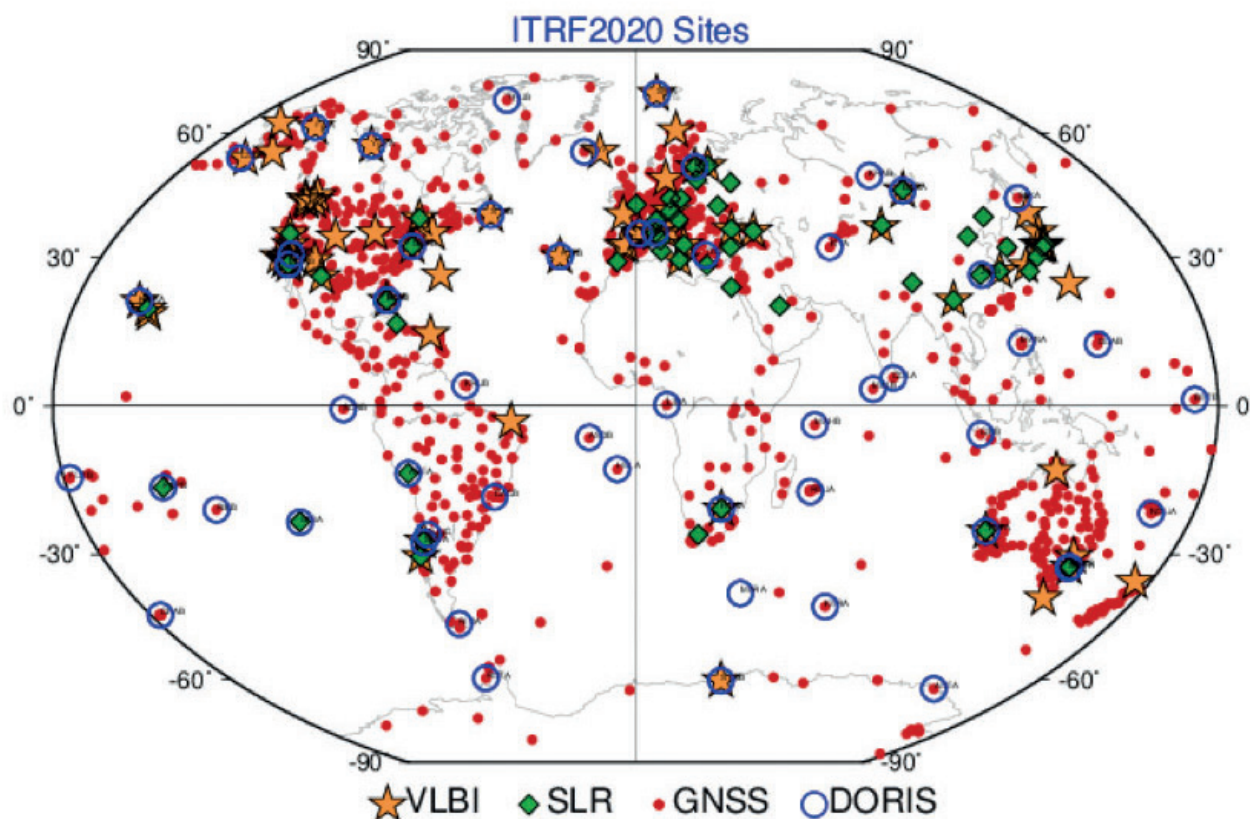


Figure 1. Répartition des 1 223 sites de l'ITRF2020 mettant en évidence les stations DORIS, SLR et VLBI co-localisées avec des stations GNSS.

par un cumul simultané des séries temporelles de positions des quatre techniques de géodésie spatiale, dont les liens sont assurés par l'ajout au sein des sites de co-localisation (sites avec plusieurs instruments de mesure) de rattachements géodésiques locaux, mais aussi de contraintes de co-mouvement (égalité des vitesses et des termes saisonniers).

Les positions des stations ITRF2020 sont ainsi obtenues à une époque de référence (2015.0), en même temps que leurs vitesses de déplacement linéaires, et que des fonctions sinusoïdales d'amplitude et de phase constantes décrivant les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels). Les modèles paramétriques des déformations post-sismiques sont déterminés en amont du cumul simultané, comme décrit brièvement dans le paragraphe suivant.

#### ■ Modélisation des déformations post-sismiques

Initiés lors du calcul de l'ITRF2014, des modèles empiriques de déformation post-sismique, basés sur des fonctions exponentielles et/ou logarithmiques ont

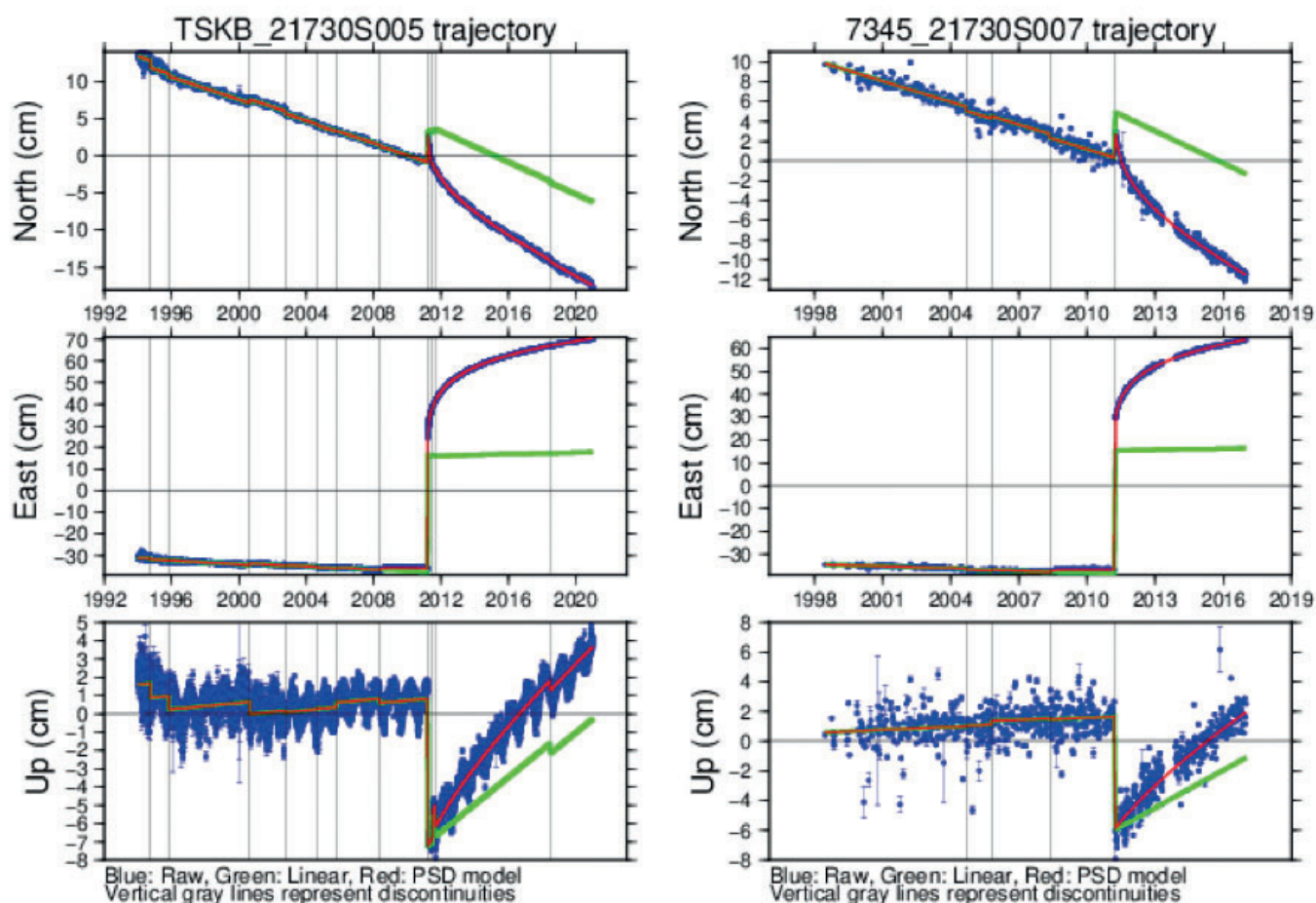
été développés et raffinés pour le calcul de l'ITRF2020. Différents modèles ont été ajustés aux séries temporelles de toutes les stations GNSS de l'ITRF2020 présentant des déformations post-sismiques significatives. Le modèle le plus approprié a été ensuite choisi au cas par cas à l'aide de critères 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'ITRF2020. À 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 paramétrique et en vert la trajectoire linéaire représentant la position régularisée de l'ITRF2020. 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 GNSS à Tsukuba (Japon) de la figure 2.

Ces signaux sont en partie le reflet des effets de surcharges (hydrologique, atmosphérique et océanique) agissant sur la Terre solide, mais recouvrent aussi des erreurs systématiques des techniques elles-mêmes, telles que les erreurs draconitiques du système GPS (période de 351.4 jours au cours de laquelle la constellation satellitaire répète son orientation par rapport au soleil). La non-modélisation des signaux périodiques peut entraîner une imprécision sur les vitesses estimées allant jusqu'à 1 mm par an sur la composante verticale. Les signaux annuels et semi-annuels des séries temporelles de positions des stations des quatre techniques ont ainsi été modélisés par des fonctions sinusoïdales exprimées par rapport au centre des masses de la Terre (CM) tel que détecté par la technique SLR. Pour convenir à une classe plus



**Figure 2.** Séries temporelles de position d’une station GNSS (gauche) et d’une station VLBI (droite) enregistrées sur le site de Tsukuba (Japon). La série de positions brute est représentée en bleu, la trajectoire linéaire en vert, et le modèle paramétrique de déformation post-sismique en rouge.

large d’utilisateurs, les déplacements saisonniers par rapport au centre de figure de la Terre (CF) sont également fournis. La différence entre les signaux exprimés dans les deux repères (CM et CF) correspond au mouvement saisonnier du CM par rapport à CF, appelé mouvement du géocentre saisonnier.

### ■ Paramètres de définition de l’ITRF2020

L’origine long-terme est définie de telle sorte qu’il n’y ait pas de paramètre de translation à l’époque 2015.0, ni de dérive de translation entre l’ITRF2020 et le repère long-terme SLR sur la période 1993.0-2021.0.

L’origine des signaux saisonniers exprimés dans le repère du CM SLR est définie de telle manière qu’il n’y ait pas de translation saisonnière entre les signaux saisonniers ITRF2020 et les solutions SLR sur la période 1993.0-2021.0.

L’échelle long-terme est déterminée de telle sorte qu’il y ait une échelle et une dérive d’échelle nulles entre l’ITRF2020 et les moyennes d’échelle et de dérive d’échelle des sessions VLBI sélectionnées jusqu’en 2013.75 et des solutions hebdomadaires SLR couvrant la période 1997.75-2021.0. L’échelle des signaux saisonniers est déterminée de sorte qu’il n’y ait pas de variations d’échelle saisonnières entre les solutions SLR sélectionnées et l’ITRF2020.

L’orientation long-terme est définie de telle manière qu’il y ait des paramètres de rotation nuls à l’époque 2015.0 et des taux de rotation nuls entre l’ITRF2020 et l’ITRF2014. Ces deux conditions ont été appliquées sur un ensemble de 131 stations de référence réparties sur 105 sites.

L’orientation des signaux saisonniers est définie de manière à ce qu’il n’y ait pas de rotation saisonnière nette de ce même réseau de référence.

### ■ Usage des coordonnées ITRF2020

En fonction des besoins de l’utilisateur, les coordonnées cartésiennes géocentriques d’une station donnée peuvent être calculées en utilisant l’équation suivante :

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

où le couple  $(X(t_0), \dot{X})$  est la position à l’époque de référence  $t_0 = 2015.0$  et la vitesse,  $\delta X_{PSD}(t)$  est la somme totale des corrections PSD à l’époque  $t$ , et  $\delta X_f(t)$  la somme des termes saisonniers. Les modèles paramétriques de l’ITRF2020 sont une partie intégrante du repère et sont disponibles sur le site internet : <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. Des informations complètes concernant les modèles PSD adaptés aux stations soumises à des tremblements de terre majeurs, et quelques sous-programmes utiles en Fortran sont aussi disponibles sur le site web de l’ITRF2020.





Les utilisateurs doivent être conscients qu'ils doivent calculer la somme totale des corrections  $\delta X_{PSD}(t)$ , à l'aide des équations fournies sur le site web ITRF2020, ainsi que dans l'article Altamimi et al. (2022). Ne pas introduire ce terme de l'équation (1) introduirait des erreurs de position décimétriques pour de nombreuses stations impactées par des déformations post-sismiques.

La principale motivation de l'estimation des signaux saisonniers cohérents avec l'ITRF2020 est de fournir aux utilisateurs, par exemple ceux traitant de la détermination des orbites précises des satellites, un moyen de rapporter les coordonnées ITRF2020 au CM quasi instantané de la Terre, le point autour duquel un satellite artificiel orbite naturellement. Pour utiliser cette nouvelle fonctionnalité, l'utilisateur doit calculer les variations de coordonnées saisonnières  $\delta X_f(t)$  à l'aide de l'équation (2) et les ajouter aux coordonnées de la station à l'époque  $t$ , à l'aide de l'équation (1).

$$\delta X_f(t) = \sum_{i=1}^2 \begin{pmatrix} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{pmatrix} \cos(2i\pi \cdot t) + \begin{pmatrix} b_x^i \\ b_y^i \\ b_z^i \end{pmatrix} \sin(2i\pi \cdot t)$$

où  $t$  est l'année décimale et

$(a_x^i, a_y^i, a_z^i, b_x^i, b_y^i, b_z^i)$  sont les coefficients de la fonction sinusoïdale à la fréquence  $i$  (annuelle :  $i = 1$  ; semi-annuelle :  $i = 2$ ).

## Paramètres de transformation entre l'ITRF2020 et les versions passées

Pour un certain nombre d'applications, les utilisateurs ont besoin des paramètres de transformation entre les différentes versions de l'ITRF. La liste des paramètres de transformation de l'ITRF2020 vers les versions passées est accessible via le site web de l'ITRF2020 : [https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020\\_TRFs.txt](https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt).

## Conclusion

Avec la publication de l'ITRF2020 en tant que repère de référence terrestre augmenté de fonctions paramétriques décrivant les mouvements non linéaires des stations, un grand pas a été franchi

dans l'amélioration du référentiel international. Les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels), ainsi que les modèles paramétriques de déformations post-sismiques font partie intégrante du nouveau repère et permettent à l'utilisateur de déterminer une position plus fidèle des stations ITRF2020.

Les analyses approfondies des données de l'ITRF2020 ont abouti, pour la première fois, à un accord d'échelle entre SLR et VLBI à hauteur de 0,15 ppb (environ 1 mm à l'équateur) à l'époque 2015.0, sans dérive significative : une conclusion clé de l'analyse ITRF2020.

Les résultats de l'ITRF2020 montrent des améliorations modestes, mais notables en termes d'accord entre les rattachements terrestres locaux et les estimations de la géodésie spatiale sur les sites de co-localisation. Nous pensons toujours que la plus grande partie (sinon la totalité) de ces écarts est causée par des erreurs systématiques des techniques de géodésie spatiale plutôt que par les mesures terrestres. Améliorer la cohérence entre les deux ensembles ne pourra être possible sans améliorer l'infrastructure géodésique mondiale en investissant dans des technologies SLR et VLBI de nouvelle génération, avec une meilleure répartition entre les hémisphères nord et sud.

La maintenance et l'amélioration en continu 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 (2015)<sup>2</sup> sur le repère géodésique mondial pour le développement durable. ●

## Références

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L. and Chanard, K. (2022) *ITRF2020: An augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions*, Journal of Geodesy, submitted.

<sup>2</sup> [http://ggim.un.org/documents/A\\_69\\_L53\\_F.pdf](http://ggim.un.org/documents/A_69_L53_F.pdf)

## Contacts

Zuheir ALTAMIMI<sup>4</sup>

zuheir.altamimi@ign.fr,

Paul REBISCHUNG<sup>4</sup>, Xavier COLLILIEUX<sup>5</sup>,  
Laurent MÉTIVIER<sup>4</sup>, Kristel CHANARD<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Université de Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, IGN, F-75005 Paris, France.

<sup>5</sup> ENSG-Géomatique, IGN, F-77455 Marne-la-Vallée, France.

## ABSTRACT

*For the first time in the history of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), the ITRF2020 is provided in the form of an augmented terrestrial reference frame, so that in addition to station positions and velocities, parametric functions describing station nonlinear motions are part of the new frame: seasonal signals (annual and semi-annual) present in the time series of station coordinates, as well as post-seismic deformation (PSD) parametric models for sites that were subject to major earthquakes. The long-term origin of ITRF2020 follows linearly with time the center of mass (CM) of the Earth as sensed by the SLR technique, using observations collected over the period 1993.0-2021.0. The accuracy of the ITRF2020 long-term origin is evaluated against past solutions, namely ITRF2014, ITRF2008 and ITRF2005, to be at the level of 5 mm, and 0.5 mm/year for its evolution over time. The ITRF2020 long-term scale is defined by a rigorous weighted average of selected VLBI sessions up to 2013.75 and weekly SLR solutions covering the period 1997.7 - 2021.0. For the first time in the ITRF history, the scale agreement between SLR and VLBI long-term solutions is at the level of 0.15 ppb (1 mm at the equator) at epoch 2015.0, with zero drift. The ITRF2020 was officially published on April 15, 2022, at a dedicated website containing the results and other information and descriptions relating to the development of the new frame: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. A detailed article is being submitted to the Journal of Geodesy (Altamimi et al., 2022).*