

Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF) : état actuel et perspectives

■ Zuheir ALTAMIMI - Xavier COLLILIEUX - Laurent MÉTIVIER

Cet article résume synthétiquement l'état actuel de l'ITRF et de son infrastructure géodésique, et ses liens avec les repères de référence terrestres associés aux systèmes de navigation par satellites ainsi que les repères régionaux. Il présente aussi succinctement la version actuelle de l'ITRF, à savoir l'ITRF2008, ainsi que les perspectives futures.

MOTS-CLÉS

Systèmes et repères de référence terrestres, ITRF, GNSS, Repères de référence régionaux

La détermination de coordonnées de points et d'objets sur la surface de la Terre est essentielle pour de nombreuses applications d'observation de la Terre. Tout aussi important est de pouvoir déterminer les variations temporelles de ces coordonnées, nécessaires lorsque l'on définit un repère de référence global attaché à la Terre qui est déformable. La plupart des domaines scientifiques relatifs à l'observation de la Terre et aux applications de géo-référencement, de même que la société en général, requièrent la détermination des positions de points et la localisation d'objets avec une précision millimétrique. Or, pour que ces positions soient pleinement exploitables, elles doivent être exprimées dans un repère de référence terrestre bien défini. La plupart des repères de référence terrestres globaux et régionaux qui existent aujourd'hui, reposent sur le Repère International de Référence Terrestre (ITRF), qui est la réalisation la plus précise du Système International de Référence Terrestre (ITRS). L'ITRS, qui est défini et réalisé par le Service International de la Rotation de la Terre et des Systèmes de Référence (IERS – <http://www.iers.org>), a été adopté par l'Association Internationale de Géodésie (AIG – <http://www.iag-aig.org>) et l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI – <http://www.iuggi.org>).

L'ITRF est calculé par le centre ITRS (<http://itrf.ign.fr>), hébergé par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). Il est le fruit d'une collaboration géodésique internationale qui a été engagée depuis une trentaine d'années. Sa construction dépend fondamentalement de la disponibilité d'une infrastructure géodésique globale, qui aujourd'hui comprend des réseaux primaires d'instruments de mesure, financés et opérés par un grand nombre d'agences spatiales et instituts géographiques, et coordonnés globalement par les services scientifiques de l'AIG. Déterminer des positions exprimées dans l'ITRF ou ses densifications régionales ou nationales à une précision sub-centimétrique se fait aujourd'hui relativement aisément à l'aide des signaux émis par les satellites de navigation GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Les repères de référence terrestres

Les positions des milliers de stations géodésiques sont actuellement déterminées avec une précision millimétrique et, par conséquent, les déformations de la croûte terrestre peuvent être modélisées au niveau du millimètre par an. La *figure 1* fournit par exemple une image du champ de déplacement horizontal estimé sur un réseau mondial de

stations géodésiques. Cette performance devient possible grâce à la précision des méthodes modernes de la géodésie spatiale qui ont révolutionné notre compréhension de la Terre, permettant ainsi d'observer, par exemple, le mouvement actuel des plaques tectoniques. La forme de la Terre, son champ gravitationnel tout comme son orientation dans l'espace, sont précisément estimés pour satisfaire de nombreuses autres applications ; citons par exemple la détermination de la redistribution des masses liée au cycle de l'eau dans les enveloppes fluides externes (les océans, l'atmosphère, la cryosphère et l'hydrosphère terrestre). Toutes ces applications scientifiques dépendent fondamentalement de l'existence et de la disponibilité d'un système de référence terrestre global que seule la géodésie spatiale peut réaliser [Altamimi et al., 2001, 2002, 2007, 2011]. Plus particulièrement, le défi de quantifier les variations du niveau moyen des mers à long terme, avec ses ramifications sur le changement climatique, impose que les observations soient faites en continu. Ces variations ne peuvent être appréhendées que dans le contexte d'un système de référence terrestre stable dans le temps, de sorte que les mesures du niveau des mers aujourd'hui puissent être comparées et confrontées à celles qui seront faites dans 10 ans, avec une exactitude submillimétrique. En plus des applications scientifiques, un repère de référence est indispensable pour assurer l'intégrité, la détermination des orbites précises et l'interopérabilité des GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, COMPAS/BAIDOU, etc.). Toutefois, les axes du système de référence ne sont pas accessibles par l'observation, on utilise donc un réseau de points de référence

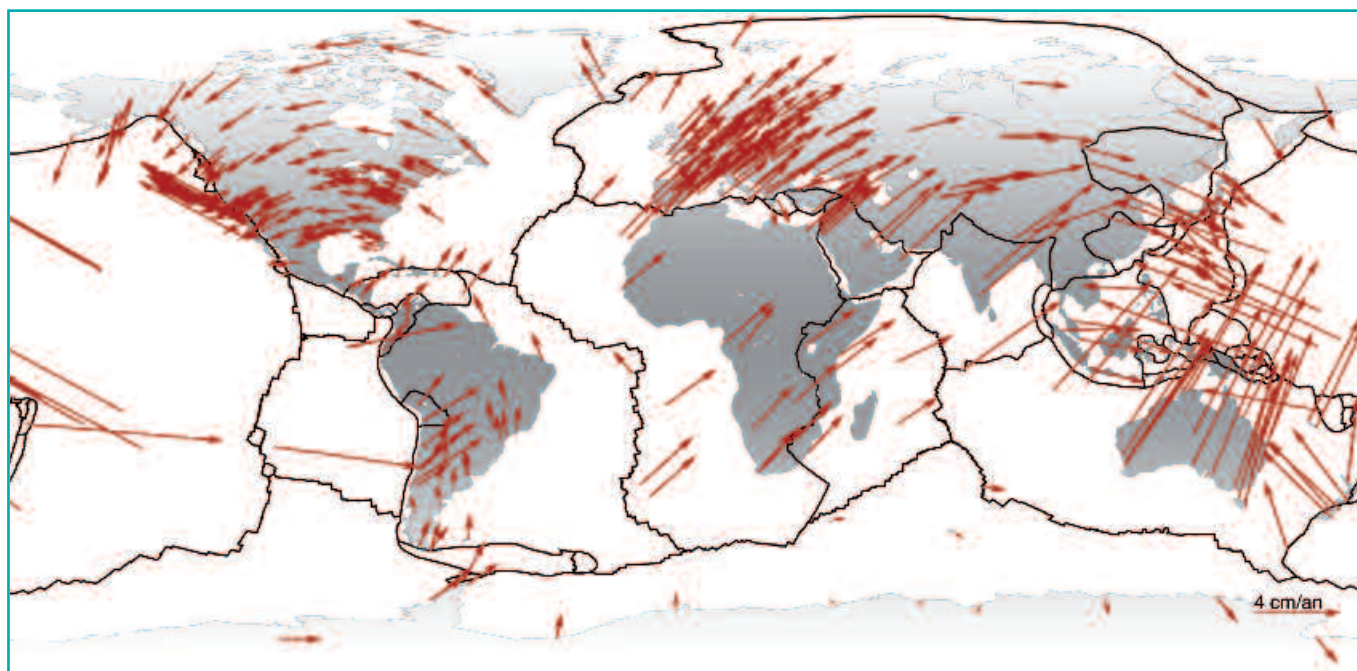


Figure 1. Vitesses horizontales déterminées par géodésie spatiale et tirées de la table de positions et vitesse de la solution ITRF2008 (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2008/).

comme intermédiaire dont positions et vitesses sont déterminées avec la plus grande précision, et exprimées dans un repère de référence avec une origine, une échelle et une orientation. Les positions et vitesses des stations sont régulièrement mises à jour, à chaque nouvelle solution ITRF, principalement en raison de la dégradation de leur précision au fur et à mesure que le temps s'écoule et des mouvements non prédictibles de la croûte terrestre. Un exemple de tables de positions et vitesses de stations est celui de l'ITRF2008, disponible sur le site web de ce repère : (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2008/more_ITRF2008.php).

Le repère international de référence terrestre

L'ITRS a été formellement adopté par l'UGGI en 1991 et 2007 pour les applications en sciences de la Terre. Un des enjeux fondamentaux de la réalisation de l'ITRS est la définition optimale de ses paramètres (origine, échelle et orientation) et leurs stabilités en fonction du temps. Toute dérive temporelle des paramètres physiques (origine et échelle) du repère, se propagera inévitablement sur les paramètres géophysiques (et leur interprétation) qui dépendent de l'usage de l'ITRF. Comme

précisé plus haut, les enjeux et applications scientifiques d'un tel référentiel sont nombreux. Par exemple, une dérive de l'origine de 1 mm/an de l'ITRF sur la composante Z engendrerait une erreur d'environ -0.12 mm/an sur les variations du niveau global des mers déterminé par l'altimétrie satellitaire [Morel et Willis, 2005]. Cet effet peut être plus important sur le niveau régional des mers, en particulier à hautes latitudes où il peut atteindre 0.7 mm/an. Une dérive de l'échelle de 0.05 ppb/an ($0.05 \cdot 10^{-9}$ /an) se traduirait par une dérive de 0.3 mm/an du niveau marin déterminé par combinaison de GPS et marégraphie (le GPS étant utilisé pour corriger les enregistrements marégraphiques du mouvement vertical de l'instrument exprimés dans l'ITRF).

Ces quantités sont à comparer avec l'ordre de grandeur des estimations actuelles de l'élévation moyenne du niveau des mers qui serait passée d'environ 1 à 3 mm/an à cause des changements climatiques récents [rapport du GIEC, voir Bindoff et al., 2007]. Mais notons toutefois que les deux chiffres de 1 mm/an et 0.05 ppb/an exposés plus haut pourraient constituer une majoration de l'erreur potentielle de l'ITRF que l'on s'attelle aujourd'hui à déterminer le plus finement possible (Collilieux et al., 2012).

L'implémentation de l'ITRF est basée sur la combinaison rigoureuse de produits géodésiques dérivés des données issues des techniques spatiales. Elle est possible dès lors que l'on dispose des données acquises ou dérivées d'instruments de mesure co-localisés sur un réseau de sites fondamentaux. Les techniques de mesures qui contribuent à la construction de l'ITRF, en plus des GNSS, sont : l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie laser sur satellite (SLR) et la détermination d'orbite et de radiopositionnement intégrés par satellite (DORIS). Les communautés scientifiques se basant sur les données de ces quatre techniques sont organisées sous l'égide de l'AIG en tant que services internationaux : le service international de la rotation de la terre et des systèmes de référence (IERS), [Petit and Luzum, 2010] ; le service international GNSS (IGS – <http://igs.org>), [Dow et al., 2009], le service international VLBI (IVS – <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>) [Schlüter et al., 2007], le service international SLR (ILRS – <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>) [Pearlman et al., 2002] et le service international DORIS (IDS – <http://ids.cls.fr>) [Willis et al., 2010].

Cependant, aucune de ces techniques ne peut fournir tous les paramètres du repère de manière précise, à savoir,





l'origine, l'échelle et l'orientation. Alors que les techniques satellitaires sont sensibles au centre des masses de la Terre (point autour duquel le satellite dessine son orbite ; une origine naturelle d'un repère de référence), les observables de la technique VLBI ne sont pas affectées par un changement d'origine des coordonnées des instruments. L'échelle est fonction de paramètres physiques et de constantes fondamentales, et l'orientation absolue du repère par rapport à la croûte terrestre (qui n'est observée par aucune technique) ne peut être que conventionnellement définie par des contraintes spécifiques. Une combinaison des techniques est par conséquent nécessaire pour une définition optimale des paramètres du repère terrestre.

L'élément clé d'un ajustement robuste des coordonnées ITRF est la disponibilité d'un nombre suffisant et d'une répartition géographique globale de sites co-localisés. Un site co-localisé est défini par le fait qu'au moins deux instruments de mesure sont en opération, séparés par une distance inférieure à un kilomètre et dont les points de référence sont rattachés par géodésie classique ou par GPS. Le rattachement géodésique inclut donc le plus souvent des mesures de distances, d'angles et de nivellement entre les points de mesure des instruments ou des repères matérialisés. Un ajustement par moindres carrés est ensuite opéré pour estimer les coordonnées différentielles entre les points de référence des instruments de mesure.

Au moment où nous écrivons, l'IVS coordonne un réseau de 42 radio télescopes, l'ILRS 32 télescopes laser, l'IDS 52 balises et l'IGS plus de 400 stations

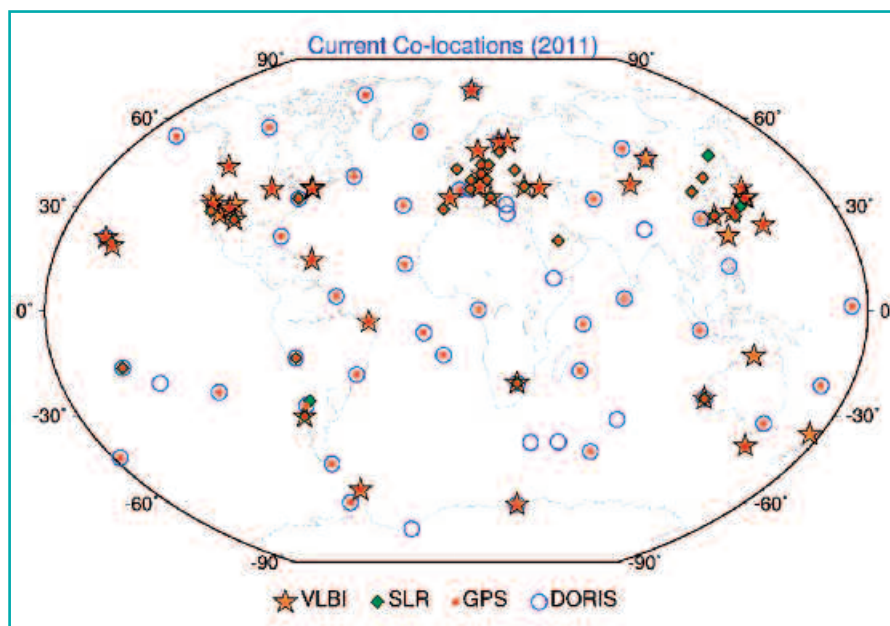


Figure 2. La répartition des sites DORIS, SLR et VLBI en opération (2011) ainsi que leurs co-localisations avec GPS/GNSS.

GNSS permanentes. La figure 2 illustre la répartition de tous les sites VLBI, SLR et DORIS en opération à l'heure actuelle, ainsi que les sites GPS/GNSS co-localisés. Il y a en tout et pour tout 82 sites co-localisés, dont 40 sont des co-localisations GNSS-DORIS. Il n'y a que 8 sites co-localisés SLR-VLBI, un très faible nombre pour assurer un lien optimal entre les repères de ces deux techniques. Dans les combinaisons ITRF, le réseau IGS/GNSS joue un rôle fondamental, connectant les repères des trois autres techniques ensemble. En effet, la majorité des sites VLBI et SLR, ainsi que 40 sites DORIS sont co-localisés avec des instruments GPS/GNSS.

L'inconvénient de cette situation est que si la solution de coordonnées GPS/GNSS utilisée dans le calcul de l'ITRF présente des erreurs non homo-

gènes, les paramètres de définition de l'ITRF seront affectés, en particulier l'origine et l'échelle qui sont déterminées par SLR et VLBI. Il est aussi important de noter que plus de la moitié des sites VLBI et SLR hébergent des instruments d'anciennes générations. L'infrastructure géodésique de l'ITRF a par conséquent urgemment besoin d'être renouvelée par des instruments de nouvelle génération.

L'ITRF et les repères de référence associés aux GNSS

Afin d'assurer l'intégrité d'un système de navigation par satellite et déterminer précisément son orbite, un repère de référence terrestre bien défini et maintenu dans le temps doit lui être associé.

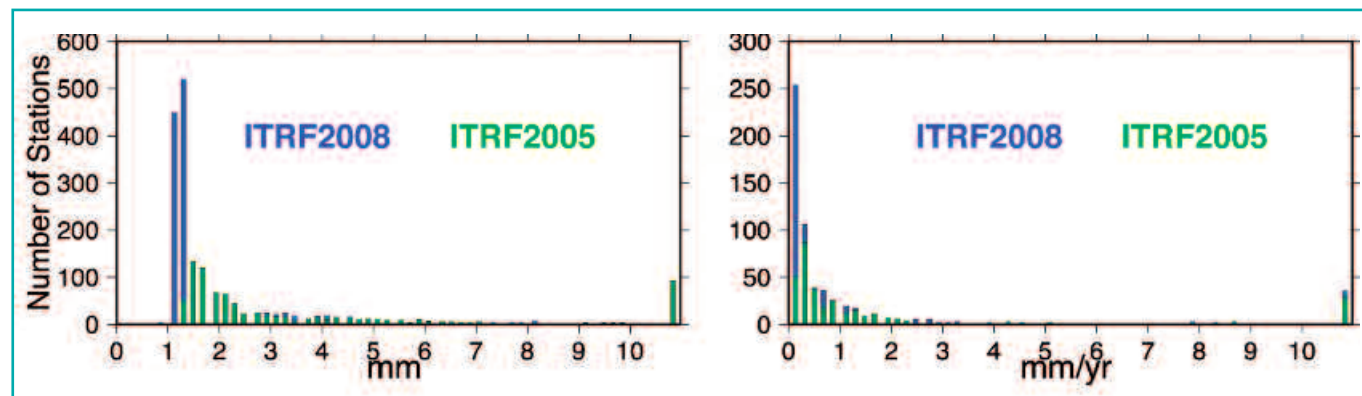


Figure 3. Erreurs sphériques formelles en position (en mm) et vitesse (en mm/an) des deux dernières solutions ITRF.

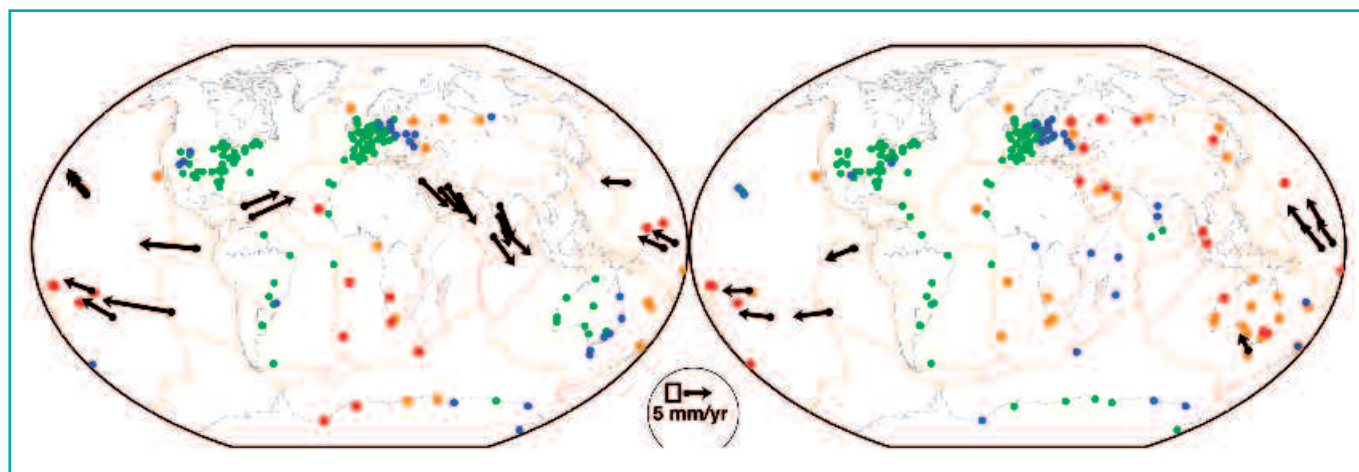


Figure 4. Différences de vitesses (après retrait d'une rotation différentielle) entre l'ITRF2008 et NNR-NUVEL-1A (gauche) et NNR-MORVEL56 (droite). En mm/an ; vert : inférieure à 2 ; bleu : entre 2 et 3 ; orange : entre 3 et 4 ; rouge : entre 4 et 5 et noir : supérieur à 5.

Les systèmes/repères de référence associés aux systèmes GNSS actuels sont WGS84 pour GPS, PZ-90 pour GLONAS, CGCS2000 pour COMPAS, JGS2010 pour GZSS et le GTRF pour GALILEO. Bien que ces repères de référence soient grossièrement alignés à l'ITRF, il est important que les utilisateurs multi-GNSS puissent déterminer leurs positions dans un repère unique. Pour assurer une interopérabilité entre les différents systèmes GNSS, le groupe de travail D (Working Group D) du comité international GNSS (International Committee on GNSS - ICG) interagit activement avec les fournisseurs d'accès GNSS pour un alignement optimal et précis des repères de référence GNSS sur l'ITRF.

L'ITRF et les systèmes et repères régionaux

La Commission 1 de l'AIG comprend six entités régionales en charge de l'implémentation de repères régionaux et leurs rattachements à l'ITRF : AFREF pour l'Afrique, NAREF et SIRGAS pour l'Amérique du nord et du sud, EUREF pour l'Europe, APREF pour l'Asie et le Pacifique, et SCAR pour l'Antarctique. Les systèmes/repères régionaux sont définis et réalisés par rapport à l'ITRS/ITRF, et implémentés par ces entités régionales, les plus connus étant, l'ETRS89 pour l'Europe, NAD83 pour l'Amérique du nord, et SIRGAS pour l'Amérique du sud. De plus, la plupart des pays ont redéfini, ou sont dans

le processus de redéfinir leurs systèmes géodésiques, de façon à ce qu'ils soient directement rattachés à l'ITRF ou ses dérivés régionaux, en utilisant leurs réseaux GNSS permanents.

L'ITRF2008

L'ITRF2008 représente une version améliorée de l'ITRF, basée sur la combinaison rigoureuse de solutions recalculées de manière homogène des quatre techniques de géodésie spatiale (DORIS, GNSS, SLR, VLBI). Celles-ci sont calculées par les services internationaux des techniques mentionnées plus haut et sont fournies sous forme de séries temporelles de positions de stations et des paramètres d'orientation de la Terre. La combinaison a été opérée avec un soin particulier apporté à la correction des discontinuités dans les séries temporelles des positions des stations, et avec une pondération appropriée des solutions de géodésie spatiale et des rattachements dans les sites co-localisés. Une évaluation des paramètres de définition du repère a montré une exactitude de l'origine estimée à 1 cm sur la période de 26 années de mesures SLR. L'exactitude de l'échelle ITRF2008 est évaluée à 1.2 ppb (8 mm à l'équateur), sur la période commune aux observations SLR et VLBI (26 ans), et qui correspond à l'accord entre les solutions de ces deux techniques, dont la moyenne des échelles définit celle de l'ITRF2008. La performance de l'ITRF2008 en positions et

vitesses des stations est bien supérieure à celle des versions ITRF précédentes, y compris l'ITRF2005. A titre d'illustration, la figure 3 montre les erreurs formelles en positions et vitesses des stations, reflétant le gain de précision de l'ITRF2008 par rapport à l'ITRF2005.

Bien que la supériorité de l'ITRF2008 ait été démontrée, les analyses associées ont mis en évidence l'existence de désaccord entre la géodésie spatiale et les rattachements terrestres dans les sites co-localisés : plus de 50 % des vecteurs de rattachement entre VLBI, SLR, DORIS et GPS sont en désaccord de plus de 6 mm avec la géodésie spatiale, et 30 % ont des résidus après ajustement supérieurs à 10 mm (Altamimi et al., 2011).

Le modèle de mouvement de plaques ITRF2008

Il est possible, lorsqu'une station est localisée sur une plaque tectonique majeure, de disposer d'une vitesse de déplacement horizontal a priori. En effet, un modèle de mouvement de plaques tectoniques issu du champ de vitesses ITRF2008 et cohérent avec celui-ci a été récemment calculé (Altamimi et al., 2012). L'analyse effectuée a consisté en l'estimation simultanée des pôles de rotations de 14 plaques, avec une erreur moyenne quadratique pondérée globale de 0.3 mm/an. Outre l'estimation précise des pôles de rotation des plaques, la



comparaison aux modèles géophysiques de mouvement des plaques, à savoir NNR-NUVEL-1A datant de 1991 et NNR-MORVEL56 publié en 2011 a été réalisée, voir la figure 4. Nous avons observé une large vitesse angulaire résiduelle de l'ordre de 4 mm/an pour la plaque Australienne entre le modèle ITRF2008 et le nouveau modèle géologique NNR-MORVEL56, comme le montre la Figure 4. Ce biais n'étant pas observé dans la comparaison au modèle NNR-NUVEL-1A, il se pourrait que le nouveau modèle géologique NNR-MORVEL56 soit à l'origine de ce défaut pour la plaque Australienne.

Conclusions et perspectives

La prochaine solution ITRF est prévue à l'horizon 2014, et sera appelée ITRF2013, incluant les observations accumulées des quatre techniques jusqu'à fin 2013. Parmi les améliorations prévues pour l'ITRF2013, on peut mentionner : un recalcul complet des séries temporelles de coordonnées des quatre techniques ; une modélisation des variations non linéaires de coordonnées des stations, et en particulier les variations saisonnières ; et l'amélioration de la détection des sauts présents dans les séries temporelles de positions des stations.

Depuis le début des activités de combinaison multi-techniques destinées à l'élaboration de l'ITRF, des améliorations ont continuellement été apportées, non seulement au niveau des solutions individuelles de coordonnées des stations des techniques, mais aussi au niveau de leur combinaison. Malgré toutes ces améliorations, l'exactitude exigée par les applications en science de la Terre, à savoir 1 mm et 0.1 mm/an pour les paramètres de définition de l'ITRF et leurs évolutions temporelles n'est pas encore atteinte. Cependant, la condition préalable à l'amélioration de l'ITRF est l'amélioration de son infrastructure géodésique. ●

Contacts

Zuheir Altamimi
zuheir.altamimi@ign.fr
Xavier Collilieux
xavier.collilieux@ign.fr

Laurent Métivier
laurent.mativier@ign.fr
Institut National de l'Information
Géographique et Forestière

Références

- Altamimi, Z., D. Angermann, D. Argus, G. Blewitt, C. Boucher, B. Chao, H. Drewes, R. Eanes, M. Feissel, R. Ferland, T. Herring, B. Holt, J. Johannsson, K. Larson, C. Ma, J. Manning, C. Meertens, A. Nothnagel, E. Pavlis, G. Petit, J. Ray, John Ries, H.-G. Scherneck, P. Sillard, and M. Watkins (2001), *The terrestrial reference frame and the dynamic Earth*, *Eos, Transactions, Am. Geophys. U.* 82(25):273-279.
- Altamimi, Z., P. Sillard, and C. Boucher, (2002), *ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application*, *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561.
- Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, Garayt B and Boucher C, (2007), *ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters*, *J. Geophys. Res.* 112, B09401, doi: 10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier (2011) *ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame*, *Journal of Geodesy*, 85(8):457-473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
- Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier (2012), *ITRF2008 plate motion model*, *J. Geophys. Res.*, 117, B07402, doi:10.1029/2011JB008930.
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D., Unnikrishnan, A., (2007) *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level*. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Collilieux, X., Z. Altamimi, D.F. Argus, C. Boucher, A. Dermanis, B.J. Haines, T.A. Herring, C. Kreemer, F.G. Lemoine, C. Ma,

D.S. MacMillan, J. Mäkinen, L. Métivier, J.C. Ries, F.N. Teferle and X. Wu (2012) *External evaluation of the Terrestrial Reference Frame: report of the task force of the IAG sub-commission 1.2*, *Proceedings of the XXV IUGG General Assembly*, P. Willis Ed., sous presse

Dow J, Neilan R E, Rizos C, (2009) *The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems*, *J Geod* 83(3-4):191-198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3

Morel, L. and P. Willis (2005) *Terrestrial reference frame effects on global sea level rise determination from TOPEX/Poseidon altimetric data*, *Advances in Space Research* 36(3):358-368, doi:10.1016/j.asr.2005.05.113

Petit, G., and B. Luzum (eds.) (2010), *IERS Conventions (2010)*, IERS Technical Note 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany.

Pearlman, M.R., J. Degnan, and J. Bosworth (2002). *The International Laser Ranging Service*, *Adv. Space Res.*, 36(3), 135-143, DOI:10.1016/S0273-1177(02)00277-6.

Plag H.-P., Pearlman M. (eds.) (2009): *Global Geodetic Observing System – Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Springer, 2009.

Schlüter W, Behrend D, (2007) *The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), Current capabilities and future prospects*, *J Geod* 81(6-8):379-387.

Willis P, Fagard H, Ferrage P, Lemoine F G, Noll C E, Noomen R, Otten M, Ries J C, Rothacher M, Soudarin L, Tavernier G, Valette J J, (2010) *The International DORIS Service, Toward maturity, in DORIS: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics*, P. Willis (Ed.), *Adv Space Res* 45(12):1408-1420, doi:10.1016/j.asr.2009.11.018

ABSTRACT

This article summarizes synthetically the current status of the ITRF and its geodetic infrastructure, and its link to terrestrial reference frames associated with Global Satellite Navigation Systems, as well as to regional reference frames. It also presents succinctly the current ITRF version, namely the ITRF2008, as well as future perspectives.