

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 2^e partie

Le positionnement statique suivant les méthodes indirectes du pivot central ou de la station virtuelle

■ Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

Après avoir abordé dans le numéro 132 la première méthode statique permettant par "filtrage et moyenne de positions NRTK" de déterminer en temps réel les coordonnées d'un point à 2-3 cm près (précision 3D à 1σ), nous allons continuer dans cette seconde partie notre progression par complexité croissante à la recherche d'une classe de précision meilleure, toujours en mode statique, c'est-à-dire récepteur immobile sur le point stationné pendant une dizaine de minutes minimum :

MOTS-CLÉS

GNSS, NRTK, RTK, PPK, NPPK, Statique, Statique rapide, RGP, réseaux temps réel

| La réalisation d'observations GNSS de qualité | | | | | |
|---|-------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Levers cinématiques | | | | Levers statiques | |
| Calcul des positions en temps réel | | Calcul des positions en temps différé | | Calcul des positions en temps différé | |
| NRTK | RTK "Pivot libre" | NPPK | PPK "Pivot libre" (physique ou virtuel) | Filtrage et moyenne de positions obtenues en NRTK | Statique et statique rapide "multi-stations" Méthodes "indirectes" du "pivot central" ou de la "station virtuelle" |

Tableau 1. Structure du document. Les différentes techniques de positionnement GNSS en réseau apparaissent sur la dernière ligne du tableau, la méta-fiche relative à la réalisation d'observations de qualité étant quant à elle représentée sur la première ligne du tableau.

La structure de cet article reprend la trame de la fiche correspondante en y développant un exemple sur un point du RBF (Réseau de Base Français matérialisant la Référence Nationale Géodésique RGF93) afin d'étayer le propos.

Objectifs et applications

Cette méthode permet de déterminer les coordonnées précises, voire très précises (classe de précision inférieure à 2 cm) d'un point ou de plusieurs points stationnés quelques minutes afin de matérialiser très exactement la référence nationale sur un chantier. Elle peut donc être utilisée pour :

- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématiques de type RTK, NRTK, NPPK, PPK, Station optique).

- Déterminer les points d'appui d'un canevas local : mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.
- Suivre précisément l'évolution des coordonnées d'un point.

Matériels et logiciels nécessaires

- Deux récepteurs GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquences, équipés d'un trépied ou a minima d'un bipode permettant de les laisser en place sur le point stationné de manière suffisamment longue, de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.
- Un logiciel de post-traitement permettant le calcul des lignes de base GNSS par multi différentiation installé sur un poste informatique muni d'une

connexion Internet. Cette connexion permettra la récupération (typiquement sur le site du RGP) des observations GNSS des différentes stations permanentes encadrant le chantier. Les éphémérides précises, les modèles ionosphériques ainsi que les différents produits utiles pourront éventuellement être aussi téléchargés. Afin de réaliser des calculs plus complexes, le logiciel devra éventuellement permettre d'effectuer un calcul en réseau (ajustement libre ou contraint par moindres carrés).

Principe de la méthode

Le lever est fait à partir de données brutes observées à la fois sur le "mobile" et sur un "pivot" placé au plus proche du centre du chantier. Les ambiguïtés entières sont fixées lors du post-traitement. Les coordonnées RGF93 du



pivot sont déterminées au bureau à partir des observations GNSS réalisées sur les stations permanentes de référence (encadrant le chantier). Une fois ces coordonnées déterminées, les lignes de base entre le "pivot" et le "mobile" seront également calculées au bureau lors d'une autre étape de post-traitement, antérieure ou postérieure à la précédente.

L'utilisation de la méthode du pivot central permet de réduire les temps d'observation par rapport à la méthode "statique multi-stations". En l'état actuel (stations RGP à moins de 100 km les unes des autres au 01/02/12), cette méthode est pertinente pour le calcul de lignes de base "pivot central- point à lever" de moins de 10-15 km.

A moins de 10-15 km d'une station du RGP, l'utilisateur pourra envisager d'utiliser cette station permanente comme pivot afin de réduire les contraintes opérationnelles (exemple des agglomérations ayant installé une station permanente intégrée au RGP). En milieu rural, l'utilisation de son propre pivot central demeure souvent la solution la plus judicieuse.

Il est également à noter qu'une station virtuelle peut être utilisée comme pivot central : dans ce cas de figure, plusieurs stations GNSS permanentes physiques permettent de calculer les observations virtuelles en correspondance avec les observations qui auraient effectivement pu être réalisées sur la position centrale du chantier. Dans ce cas de figure, de nombreuses contraintes opérationnelles disparaissent comme la nécessité de disposer d'un second récepteur GNSS, de le mettre en station dans un endroit sécurisé ou encore de le rattacher à la référence nationale. L'utilisateur devra cependant être conscient que les données d'une station virtuelle obtenue par calcul contiennent déjà une certaine part d'incertitude liée :

- aux approximations réalisées lors du calcul des observations virtuelles, notamment lors de la modélisation des erreurs spatialement corrélées (erreurs atmosphériques).
- au fait que la constellation visible sur chacune des stations permanentes servant à modéliser la station virtuelle puisse différer et donc induire un RDOP potentiellement plus fort entre

le mobile et la station virtuelle. En effet, la station virtuelle ne contient par nature que les observations virtuelles des satellites communs à toutes les stations de référence utilisées.

Planification de la mission

■ Détermination des stations de référence à utiliser pour la mise en référence du pivot central.

Choisissez au moins deux stations permanentes afin de calculer la position du pivot :

1. Par intersection de deux lignes de base si votre logiciel de post-traitement est capable de réaliser un ajustement
2. Par moyenne des deux jeux de coordonnées obtenus si votre logiciel de post-traitement GNSS ne permet pas de réaliser un ajustement

Le fait d'utiliser trois stations permanentes permet de détecter une éventuelle faute de calcul ou d'éliminer la ligne de base apportant le plus d'imprécision dans la solution tandis qu'une quatrième station permet d'effectuer un éventuel contrôle : idéalement, il faut donc disposer de 3 stations permanentes plaçant le pivot central au barycentre d'un triangle quasi équilatéral. Une quatrième station située à proximité du pivot central sera également requise pour effectuer un contrôle des travaux (les coordonnées de cette station ne seront pas fixées lors de l'éventuelle phase d'ajustement). En effet en comparant les coordonnées calculées pour ce point avec les coordonnées publiées

nous pourrons vérifier la qualité de mise en référence du pivot (cf. figure 1).

Deux critères topologiques doivent guider votre choix dans la sélection des stations de référence à savoir proximité et répartition. Il convient de choisir les stations de référence permettant de former les lignes de base les plus courtes possibles s'interceptant le plus possible à angles droits afin de limiter au maximum (sur le point calculé) le volume formé par l'intersection des ellipsoïdes d'erreurs associés à chacune des lignes de base.

Pour des applications topographiques avec des logiciels commerciaux, les lignes de base ne doivent normalement pas excéder 200 km. Pour les lignes de base supérieures à 200 kilomètres, de nombreuses précautions particulières devront être prises (modèles ionosphériques, modèles troposphériques, éphémérides précises...).

Les stations de référence servent à se rattacher au système géodésique légal en vigueur, à savoir le RGF93. Elles doivent donc être référencées dans ce système ou pour des stations frontalières dans une réalisation d'un système compatible avec le RGF93 et très bien déterminé (système ETRS89 et réalisations associées ETRF) permettant une transformation fiable et précise.

Le RGP apporte une couverture dense sur le territoire français (plus de 300 stations au 01/02/12). Les données de ce réseau GNSS sont fournies sur le site Internet du RGP au plus tard 1 heure après la dernière heure d'observation (<http://rgp.ign.fr/>).



Figure 1. Choix des stations permanentes du RGP (cercles verts) pour le calcul du pivot central (carré rouge).



■ Evaluation des temps de mesure

De manière à avoir le maximum de précision sur les coordonnées du point stationné, vous devez chercher à fixer les ambiguïtés entières sur toutes les fréquences mesurées, objectif pour lequel il vous faut un certain volume minimum de mesure et donc un certain temps d'observation.

Mesure du pivot central

Vous ne devez prendre aucun risque quant à la détermination du pivot car une erreur sur sa position peut rendre vaine une ou plusieurs journées de travail sur le terrain. En fonction de la longueur des vecteurs, stationner le pivot a minima une à deux heures.

Mesure des points du canevas

L'équation ci-dessous permet de donner une idée de la durée à respecter lorsque vous stationnez sur un point du canevas. On observe ici que 10 minutes représentent le temps minimum d'acquisition requis. On privilégiera néanmoins des durées d'observations d'environ 20 minutes afin de limiter les erreurs liées à la propagation des signaux (multitrajets GPS par exemple : pour rappel on estime que le temps moyen d'un multitrajet est d'environ 20 minutes).

Temps de station = 10 minutes + 1 minute par kilomètre de ligne de base + 1 minute par 100 mètres de dénivelée

Équation 1. Temps de station nécessaire en fonction des paramètres d'une ligne de base.

Phase terrain

■ Choix de l'emplacement et monumentation du point

Cette phase de planification réalisée, installez le pivot sur un point central sécurisé, stable, bien dégagé et per-



Figure 2. Exemple d'installation d'un récepteur GNSS en mode statique.

mettant la réalisation d'observations GNSS de qualité conformément aux prérequis présentés dans le document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS".

Une fois l'emplacement choisi, matérialisez au sol le point à stationner à l'aide d'un repère stable (clou, borne, etc). Installez ensuite le mobile sur des points répondant aux mêmes critères et matérialisez-les également au sol afin de pouvoir les réoccuper.

■ Installation des équipements

Procédez à l'installation du pivot en prenant soin de monter le trépied de la manière la plus stable possible, de centrer et de buller convenablement l'embase sur laquelle est fixée l'antenne. Lors de cette phase, il faut particulièrement veiller à bien enfoncer les pieds du trépied dans le sol et à serrer convenablement les vis de réglage dudit trépied. En cas de forte chaleur et de forte exposition au rayonnement solaire, préférez utiliser un trépied en bois plutôt qu'en aluminium pour limiter les phénomènes de dilatation et si nécessaire n'hésitez pas à créer une zone d'ombre à l'aide d'un parasol posé au sol permettant d'abriter le trépied sans masquer l'antenne.

Mesurez alors la hauteur d'antenne selon les recommandations de l'équi-

pementier choisi, soit de manière inclinée soit verticalement (cf. figure 2).

N'oubliez pas de mesurer les hauteurs d'antenne (3 lectures les plus indépendantes possible) et de vérifier le bullage de l'embase en fin de session afin de s'assurer de la stabilité effective de la mise en station.

Procédez de même avec le mobile.

Phase bureau

■ Positionnement du pivot central dans le RGF93

Dans un premier temps vous devez déterminer les coordonnées RGF93 du pivot central en calculant les lignes de base le séparant des stations de référence préalablement choisies (cf. figure 3).

Pour ce faire, vous pouvez vous référer au prochain article sur le positionnement statique "multi-stations" si vous pouvez réaliser un ajustement avec votre logiciel de post-traitement.

Dans le cas contraire, vous calculerez la moyenne des coordonnées du pivot central obtenues à partir de chaque ligne de base. Vous analyserez ensuite les écarts à la moyenne des coordonnées obtenues avec chaque ligne de base, ces écarts ne devant pas excéder 2 cm.

■ Positionnement des points du chantier

Comme son nom l'indique, le pivot central est la station qui sert de base au calcul de tous les autres points de canevas stationnés du chantier. Avec la méthode du pivot central il suffit donc de former des lignes de base "en étoile" autour du pivot (cf. figure 4).

Dans un second temps vous devez déterminer les coordonnées RGF93 de tous les points du chantier à partir du pivot central (PC). Cette procédure est illustrée sur la figure 5 où le point S3 du

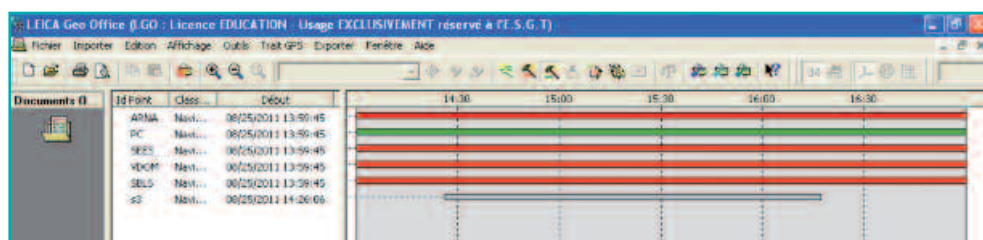


Figure 3. Configuration du traitement pour la détermination du pivot central (en rouge les stations permanentes du RGP fixées à leurs coordonnées RGF93 et en vert le pivot central, PC, dont on détermine les coordonnées).

▶ chantier sera déterminé à partir de PC. Bien entendu, on peut déterminer simultanément l'ensemble des autres points du chantier de la *figure 4* à partir du pivot central.

■ Masque d'élévation

A partir des observations, calculez chaque ligne de base avec un masque d'élévation de 10-15°. Cette procédure vous permettra d'utiliser une constellation bien répartie tout en ne prenant pas en compte les satellites les plus bas sur l'horizon. En effet, les délais de propagation atmosphérique des signaux de ces satellites sont très importants et les sources de perturbation desdits signaux sont donc inacceptables pour la classe de précision recherchée.

■ Intervalle de traitement

Choisissez un intervalle de traitement de 15 ou 30 secondes afin de limiter le phénomène de corrélation temporelle qui engendrerait artificiellement de trop bons résultats. En effet, en traitant les lignes de base avec un intervalle de traitement de 1 seconde, le volume de don-

nées est certes plus important mais nettement moins significatif en terme d'évolution des conditions atmosphériques (ionosphère, troposphère) et des potentiels artefacts liés au nombre de satellites, leur état de santé et leur disposition géométrique (DOP) : à un hertz, les positions sont alors moins indépendantes qu'à une fréquence plus faible, le fait de disposer de mesures indépendantes étant un prérequis de base pour tous les traitements statistiques réalisés lors du calcul des positions.

■ Modèles d'antenne à utiliser

Les décalages de centre de phase des antennes (PCO pour *Phase Center Offset*) doivent être correctement renseignés dans le logiciel de post-traitement utilisé.

En l'état actuel des choses, il est recommandé d'utiliser des modèles de calibration absolus, un fichier formaté étant disponible sur le site de l'IGS (International GNSS Service) à l'adresse suivante : http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs_cb/station/general/igs08.atx ou sur le site du RGP en téléchargeant le fichier

ngs08.atx (<http://rgp.ign.fr/STATIONS/antennes.php>).

Les variations du centre de phase en fonction de l'élévation et de l'azimut des satellites (PCV pour *Phase Center Variation*) peuvent être utilisées. Dans ce cas, les antennes devront être orientées au Nord Géographique de manière à ce que la position du centre de phase puisse correctement être déterminée pour chaque antenne époque après époque.

■ Constellations à utiliser

Lors de la réalisation de tels calculs où la précision optimale est recherchée, il est dans un premier temps préférable de travailler en mode GPS seul. En effet, un calcul GNSS trop complexe peut induire une perte de précision si l'opérateur ne respecte pas les précautions d'usage. Sans entrer trop dans les détails, nous pouvons citer les problématiques suivantes :

1. Synchronisation temporelle des différentes constellations.
2. Mise en référence des orbites des satellites dans un système géodésique commun.
3. Normalisation des bruits interférences sur le mobile ainsi que sur les différentes stations de référence utilisées, notamment dans un contexte multimarque.

Notez alors que cette stratégie n'est pas trop pénalisante pour ce type de lever. En effet, on cherche principalement ici à déterminer des points de contrôle (ou des points de base), il est donc aisé pour de tels points de se mettre dans des endroits parfaitement stationnables par méthodes GNSS.

Toutefois, les observations GLONASS peuvent être utilisées en cas de problème majeur (impossibilité de résoudre les ambiguïtés entières sur une ligne de base) afin d'améliorer les



Figure 4. Construction des lignes de base dans la méthode du pivot central.

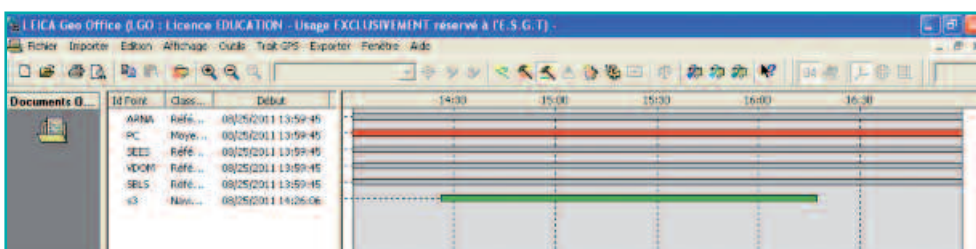


Figure 5. Configuration du traitement pour la détermination des points du chantier (en rouge le pivot central préalablement déterminé et en vert un point du chantier, S3, dont on détermine les coordonnées).

DOPs et d'augmenter significativement la quantité de données observées (nombre d'équations d'observation). Les lignes de base formées étant intrinsèquement courtes (inférieures à 15 km) de par la nature même de la méthode, préférez la fixation des ambiguïtés entières sur L1 et L2. En cas d'impossibilité à fixer les ambiguïtés entières pour certaines lignes de base, utilisez la combinaison linéaire "iono free" L3 (encore parfois notée LC).

■ Ephémérides utilisées

Il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser des éphémérides précises. Les éphémérides radiodiffusées sont suffisantes pour ce type de calcul. Cependant, si les ambiguïtés entières ne pouvaient être fixées pour certaines lignes de base, il est possible d'utiliser les éphémérides ultra-rapides prédites, rapides voire finales en fonction de vos impératifs en termes de délais de livraison.

Pour plus d'information à ce sujet, référez-vous au document "*Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*".

■ De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique ou troposphérique

Il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser un modèle d'ionosphère ou de troposphère pour des lignes de base aussi courtes, le calcul différentiel tendant à annuler quasi totalement la réfraction ionosphérique et troposphérique pour des lignes de base de seulement quelques kilomètres.

Cependant, si les ambiguïtés entières ne pouvaient être fixées pour certaines lignes de base, il est possible d'appliquer de tels modèles.

Pour plus d'information à ce sujet, référez-vous au document "*Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*".

■ Les différents indicateurs statistiques utilisés pour qualifier la qualité du calcul d'une ligne de base

A ce stade du rattachement, vous obtenez un ensemble de lignes pour lesquelles les ambiguïtés entières sont fixées. Un certain nombre d'indicateurs statistiques traduisant la qualité de ces

lignes de base sont également fournis. En plus du PDOP, du GDOP et du RDOP décrits dans les prérequis du document "*Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*", il est possible d'analyser les deux indicateurs suivants :

1. Ratio : Le ratio donne une indication sur la validité statistique de la résolution des ambiguïtés entières déterminées de manière itérative. Les deux meilleures solutions sont alors comparées (ratio) et cet indicateur se doit d'être supérieur à 1,5 pour que la meilleure solution ait de bonnes raisons statistiques d'être retenue.

2. RMS : Le RMS (*Root Mean Square*) correspond à la somme quadratique de la moyenne et de l'écart-type des résidus sur le calcul de la ligne de base pour chaque époque. Au final, les résidus (ou bruit de la mesure) sur chaque satellite devraient être centrés en 0 avec un écart-type de plus ou moins 15 mm, le plus souvent possible inférieur à 20 mm en n'excédant jamais 30 mm.

■ Moyens de contrôle

Contrôle relatif :

- Vous calculez une seule ligne de base pour chaque point, à savoir la ligne entre le point mesuré et le pivot central. Par conséquent il est primordial de se contrôler en réoccupant entre 10 et 100 % des points stationnés avant par exemple de les utiliser comme point de base d'un lever. Il est alors recommandé de laisser s'écouler de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures entre deux occupations afin de laisser suffisamment changer l'état de la constellation. Plus ce temps entre deux déterminations sera long, meilleure sera la solution, et plus vous aurez de déterminations pour un même point, plus sa qualité sera avérée.

Conformément aux explications données dans le document "*Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*", il n'est pas recommandé de réoccuper un même point de jour en jour aux mêmes heures avec 4 (GPS) ou 90 (GLONASS) minutes d'avance au risque de se retrouver avec des DOPs similaires, mêmes si les conditions atmosphériques ont changé.

- Si vous disposez d'une station optique

procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence) entre les différents points stationnés.

Contrôle absolu :

Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF, autres...) afin d'assurer un contrôle absolu de la qualité de votre lever ou procédez aux observations nécessaires pour un contrôle par méthodes statiques. Cette méthode de contrôle doit vous permettre d'obtenir pour votre point de contrôle des coordonnées au moins deux fois plus précises que celles obtenues par la méthode du pivot central (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003 relatif aux classes de précision applicables aux différentes catégories de travaux topographiques).

En d'autres termes et si aucun point de contrôle n'était disponible, utilisez la méthode statique "multi-stations" en prenant toutes les précautions nécessaires permettant d'obtenir les coordonnées "les plus précises possibles" par méthodes GNSS. Néanmoins, il est important de noter que le coefficient de sécurité de 2 mentionné dans l'arrêté du 16 septembre 2003 sera parfois difficile à justifier. Procédez aux observations à un autre moment que celui de votre chantier (observations indépendantes) et effectuer si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour mettre en référence le pivot central. ●

Le prochain article traitera en détail de la méthode statique "multi-stations" permettant d'obtenir la meilleure classe de précision possible par méthode GNSS.

Contact

Romain LEGROS Directeur Général
de la société GEODATA DIFFUSION
r.legros@orpheon.biz

Laurent MOREL
Maître de conférences à l'ESGT
laurent.morel@esgt.cnam.fr

Flavien VIGUIER
Direction de l'ingénierie de la SNCF
flavien.viguiier@sncf.fr

Florian BIROT - Responsable technique
de la société GEODATA DIFFUSION
florian.biro@geoaction.eu

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

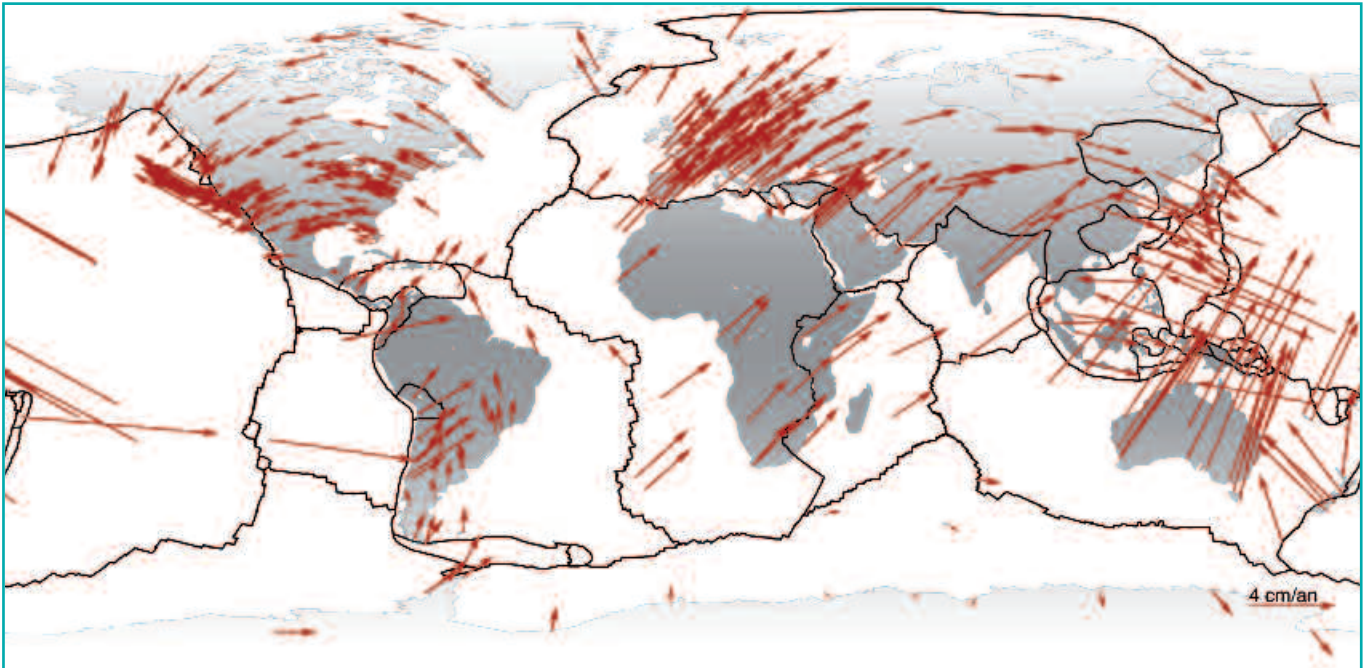


Figure 1. Vitesses horizontales déterminées par géodésie spatiale et tirées de la table de positions et vitesse de la solution ITRF2008 (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2008/).

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 ($0.05 \cdot 10^{-9}/\text{an}$) 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

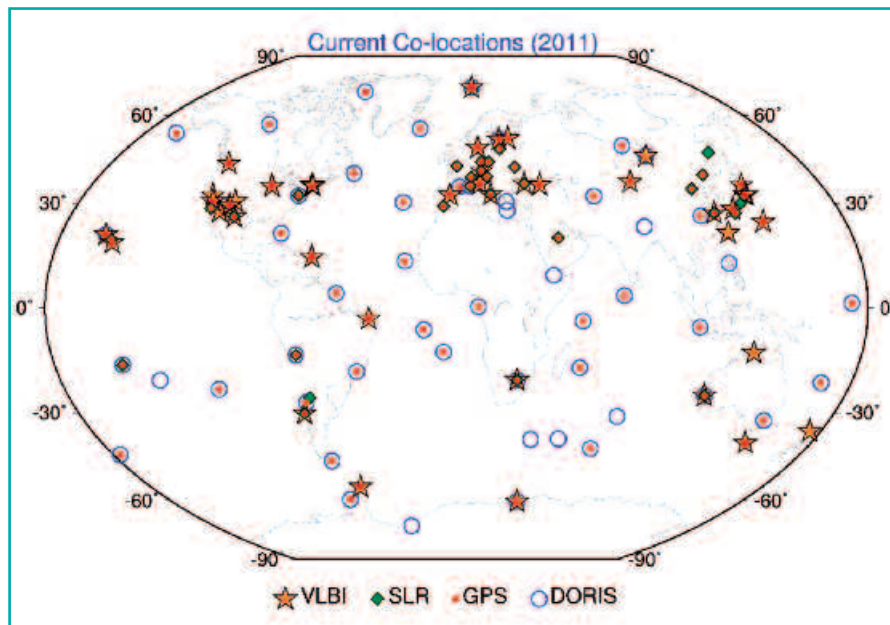


Figure 2. La répartition des sites DORIS, SLR et VLBI en opération (2011) ainsi que leurs co-localisations avec GPS/GNSS.

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 rénovée 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.

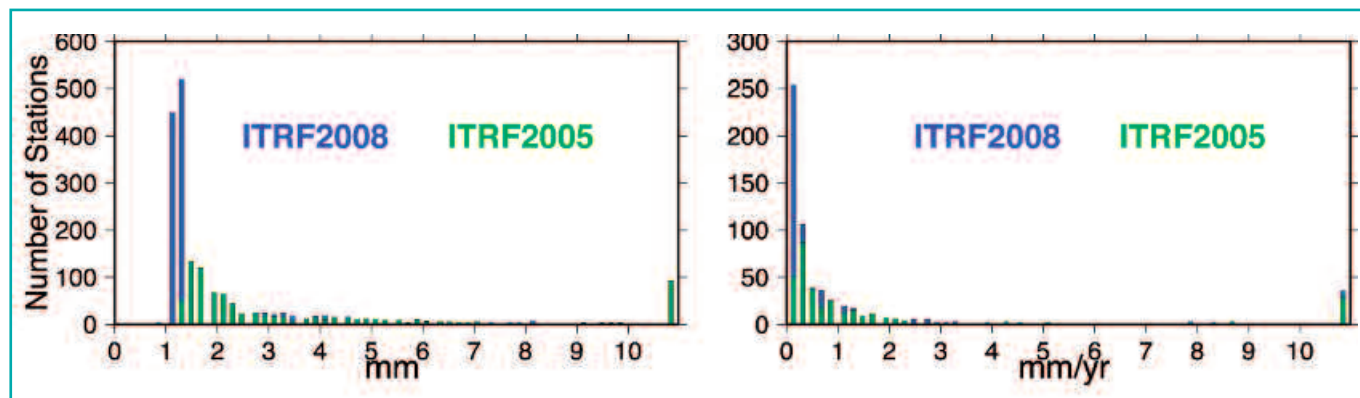


Figure 3. Erreurs sphériques formelles en position (en mm) et vitesse (en mm/an) des deux dernières solutions ITRF.

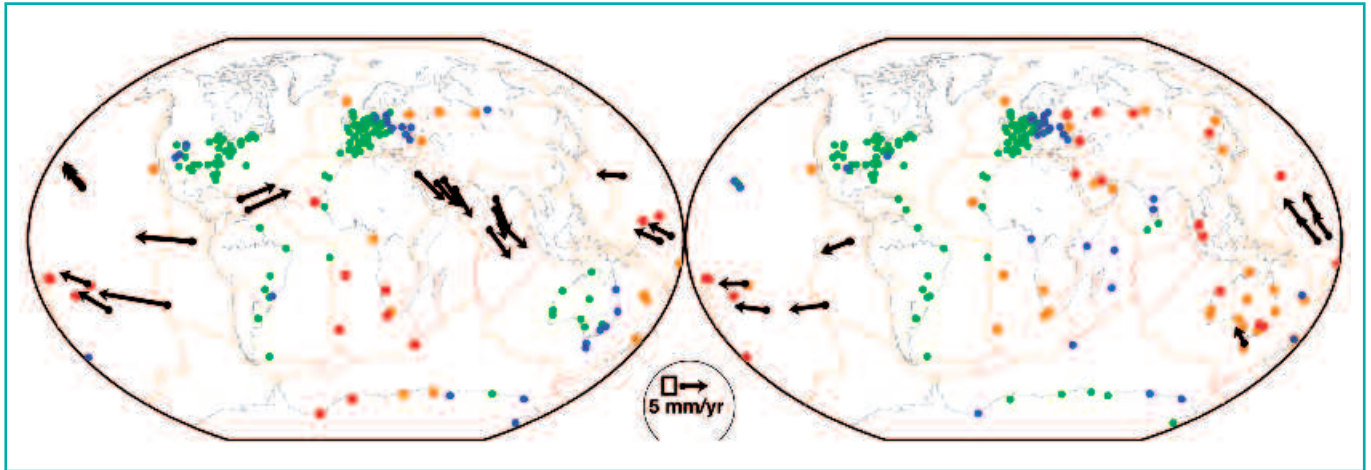


Figure 4. Différences de vitesses (après retrait d'une rotation différentielle) entre l'ITRF2008 et NNR-NUVEL-1A (gauche) et NNR-MORVEL56 (droite). En mm/an ; vert : inférieure à 2 ; bleu : entre 2 et 3 ; orange : entre 3 et 4 ; rouge : entre 4 et 5 et noir : supérieur à 5.

Les systèmes/repères de référence associés aux systèmes GNSS actuels sont WGS84 pour GPS, PZ-90 pour GLONASS, 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.metivier@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.