

Le système DORIS et certaines améliorations récentes

■ **Jordane STRITTMATTER**

Cet article présente certaines améliorations récentes apportées aux résultats du système DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite) au centre de calcul de l'IGN. DORIS est un système français permettant de déterminer l'orbite précise des satellites à partir de mesures Doppler. C'est l'une des quatre techniques de géodésie spatiale utilisée pour réaliser le Repère International de Référence Terrestre, ITRF. Cette technique permet de déterminer la position des 56 stations du réseau et d'obtenir, de manière indirecte, les mouvements du géocentre. De récents travaux ont porté sur l'amélioration de l'orbite du satellite Cryosat-2 qui présentait de fortes accélérations empiriques dues à une erreur de modélisation de la force de pression de radiation solaire. De même les données du nouveau satellite chinois, HY-2A, ont été intégrées aux calculs permettant ainsi de pérenniser la constellation de satellites DORIS et d'assurer la qualité des solutions géodésiques.

■ MOTS-CLÉS

DORIS, Repère de Référence Terrestre, ITRF, Cryosat-2, HY-2A, Pression de radiation solaire.

DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite, Willis et al., 2010a) est un système français permettant de calculer l'orbite précise de satellites et de déterminer les coordonnées des stations du réseau. À partir des variations temporelles de ces coordonnées, il est possible de déterminer les mouvements du géocentre (déplacement du centre des masses du système Terre-Océans-Atmosphère par rapport à l'origine du repère).

Grâce à la qualité de ses résultats géodésiques, DORIS est l'une des quatre techniques de géodésie spatiale (VLBI, SLR, GNSS, DORIS) utilisée pour la réalisation du repère international de référence terrestre ITRF (<http://itrf.ensg.ign.fr/>). L'ITRF2013 étant en cours d'établissement et, pour fournir une solution DORIS de qualité, l'International DORIS Service (IDS, <http://ids-doris.org/>) souhaite recalculer une nouvelle solution à partir de l'ensemble des mesures DORIS disponibles et de nouvelles options de calcul.

Dans le cadre de mon travail de fin d'études d'élève ingénieur ESGT (École Supérieure des Géomètres et Topographes), je me suis attachée à l'étude de certaines améliorations récentes. La première consiste à préciser l'orbitographie précise du satellite Cryosat-2 dont les accélérations empiriques à la période orbitale présentaient des valeurs trop élevées par rapport à celles obtenues par d'autres centres de

calculs de l'IDS. La seconde porte sur l'ajout des données DORIS issues du nouveau satellite chinois HY-2A lancé en 2010 et dont les mesures DORIS étaient disponibles.

Après avoir rappelé brièvement les principales caractéristiques du système DORIS et présenté quelques applications en géodésie, nous analyserons plus en détail les deux développements réalisés durant ce stage de recherche à l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière).

Le système DORIS

DORIS est un système de poursuite de satellites initialement développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et l'IGN, en partenariat avec le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale), à la fin des années 80. Ce système fut conçu initialement pour les besoins de la mission océanique franco-américaine TOPEX/Poséidon qui nécessitait une trajectographie précise de ce satellite.

Son objectif visait à fournir l'orbite avec une précision proche de 10 cm. Le résultat fut encore meilleur que prévu car la composante radiale (qui intéresse directement les océanographes) a été obtenue avec une précision de 2 cm dès 1994, aujourd'hui très proche du centimètre.

Ainsi, le système DORIS a rempli son rôle de détermination d'orbite avec suc-

cès et s'est ouvert sur d'autres horizons. À partir d'un calcul classique de géodésie spatiale, il est alors possible de calculer la position et les paramètres d'orientation de la Terre (position instantanée de l'axe de la rotation terrestre sur la croûte terrestre et vitesse de rotation). Ces résultats scientifiques ont permis au système DORIS de contribuer très rapidement à l'élaboration de l'ITRF (Altamimi et al., 2010). En plus de ses capacités géodésiques et géophysiques, son principe de fonctionnement permet d'utiliser les mesures pour des études atmosphériques et climatologiques.

Le principe de fonctionnement de ce système ascendant est basé sur l'effet Doppler qui consiste à mesurer la différence de fréquence entre le signal émis par la station de poursuite au sol et le signal reçu par le satellite. Les stations de poursuite au sol émettent, grâce à un oscillateur ultra-stable, deux ondes connues en fréquence (2,036GHz et 401,25MHz) dans toutes les directions du ciel. Le matériel embarqué à bord du satellite reçoit, lorsqu'il passe au-dessus des stations, une onde dont il détermine le décalage Doppler en faisant une différence de phase entre le début et la fin du comptage. Les mesures du signal à 400 MHz permettent de corriger les effets ionosphériques. Il faut noter que les nouveaux récepteurs DORIS (DG-XX) permettent de mesurer directement la phase et se rapprochent donc de la technologie GPS.



Figure 1. Carte des stations DORIS et des co-localisations éventuelles

DORIS est reconnu pour la qualité de son réseau de stations. Elles sont réparties de façon très homogène à la surface du globe et notamment entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud qui est généralement moins bien équipé pour des raisons économiques. Les stations, réparties dans plus de 30 pays, sont aujourd'hui au nombre de 56. Le réseau permet donc une couverture quasi totale de la surface du globe. Il est aussi important de noter que de nombreuses stations (44 sur 56 en 2011) sont colocalisées avec d'autres techniques de géodésie spatiale (GNSS, VLBI ou SLR) ainsi qu'avec des marégraphes et des gravimètres. Ces colocalisations permettent de comparer les résultats des différentes mesures et de les vérifier entre elles. (Figure 1)

En ce qui concerne les équipements embarqués à bord des satellites, le système DORIS peut être considéré comme un passager et a fait partie jusqu'à présent de dix missions spatiales pour l'altimétrie, la télédétection ou l'environnement. Grâce au récepteur de bord, nous disposons d'informations sur la vitesse relative du satellite (récep-

teur) par rapport aux balises au sol (transmetteurs) entre deux instants. Cette vitesse est l'élément de base du calcul de géodésie spatiale. (Figure 2)

Aujourd'hui, les satellites disponibles sont au nombre de six. Il est important de signaler qu'il faut au minimum quatre satellites afin d'obtenir une solution géodésique de qualité, soit 10 mm dans un repère de référence mondial à partir d'une semaine de mesures (Willis, 2007). Plusieurs autres satellites sont d'ores et déjà prévus : SARAL/AltiKa (fin 2012), Sentinel-3A (2014), Jason-3 (2014), Sentinel-3B (2017), Jason-CS (2017), SWOT(2020), HY-2B, HY-2C, HY-2D, etc.



Figure 2. Le satellite JASON-2

Les différentes applications du système DORIS

Comme expliqué précédemment, les mesures DORIS permettent de calculer les orbites précises des satellites, d'obtenir la position et la vitesse des stations ou encore d'estimer la position du géocentre. Nous allons voir comment la recherche exploite ces différentes possibilités.

■ Les applications géophysiques

Les applications géophysiques (Terre solide) utilisant le système DORIS sont nombreuses et cette partie ne pourrait pas être exhaustive. Nous allons donc voir trois exemples récents dans lesquels DORIS a eu un rôle important.

Le premier exemple, qui est lié à l'objectif principal du système, est l'observation du niveau des océans. Les satellites TOPEX/Poséidon, Jason-1 et Jason-2 sont porteurs de trois missions successives ayant pour objectif de surveiller les océans (Cazenave et al., 2004). Pour remplir leur mission, l'orbite de ces



satellites a besoin d'être connue de façon indépendante. C'est ici qu'intervient le système DORIS (ainsi que les systèmes GPS et SLR) pour déterminer l'orbite précise des satellites. De nombreuses études ont été menées autour de ce thème afin d'estimer la sensibilité des résultats altimétriques aux erreurs sur la détermination des orbites comme celle de Morel et Willis, 2005 ou encore Cerri et al., 2010.

Le deuxième exemple concerne la mise en place des modèles de tectonique des plaques. Il existe de nombreux modèles qui utilisent des données en entrée et des caractéristiques *a priori* différentes. On peut citer un modèle récent qui est GEODVEL 2010 (Argus et al., 2010). Ce modèle utilise les résultats de quatre systèmes de géodésie spatiale (GPS, VLBI, SLR et DORIS) mais diffère sur de nombreux points des modèles existants (origine du repère, pôle de rotation des plaques tectoniques et amplitude du mouvement de ces plaques).

Le troisième et dernier exemple porte sur la détection de déformations terrestres liées à des phénomènes naturels. La station DORIS de l'île volcanique de Socorro (Mexique) et le marégraphe situé à proximité ont permis de mesurer l'effet d'une éruption volcanique sous-marine (1993) ainsi que des déplacements en valeur absolue liés à la subsidence d'un volcan proche. En effet, deux déplacements ont été constatés suite à l'éruption. Le premier est dû à la subsidence naturelle du volcan après une éruption et le second à l'arrivée de lave dans un conduit secondaire (Briole et al., 2009). (Figure 3)

■ Les applications atmosphériques

Le système DORIS a fait l'objet de plusieurs études portant sur les effets de la troposphère et notamment celles de Willis, 2010b ; Bock et al., 2010 ; Teke et al., 2010. Les deux premières études se basent sur une comparaison des résultats obtenus par DORIS et par GPS. L'étude de Teke et al. porte sur la campagne de mesures CONT08 (du 12 au 26 août 2008) où de nombreuses mesures ont été effectuées sur une dizaine de sites afin de pouvoir comparer les résultats troposphériques obtenus par les systèmes VLBI, GPS, DORIS et des mesures locales de radio-sondages WVR (Water Vapor Radiometer). On constate que le système DORIS permet de bien estimer les effets troposphériques avec des résultats très proches des autres systèmes mais avec une dispersion plus élevée due au faible nombre de satellites DORIS disponibles ne permettant d'obtenir que peu de mesures par station.

De plus, le réseau DORIS présente une très bonne stabilité temporelle et spatiale et a ainsi permis de mettre en évidence une discontinuité de 5 mm dans les résultats troposphériques GPS (Bock et al., 2010), correspondant à une différence entre deux calculs GPS différents (Figure 4). Cette discontinuité s'explique par le changement du modèle de variation du centre de phase dans les méthodes de calculs GPS (modèle relatif par rapport au modèle absolu plus récent). Ainsi, DORIS pourrait servir d'étalon dans l'estimation des effets troposphériques avec des applications potentielles nouvelles en climatologie.

Améliorations récentes des calculs

Au cours du premier semestre 2012, nous avons travaillé sur l'amélioration des calculs DORIS réalisés par l'IGN. Ces travaux ont porté sur deux satellites : Cryosat-2 et HY-2A.

■ Cryosat-2

Cryosat-2 est un satellite lancé par l'Agence spatiale européenne (ESA) et a pour fonction de surveiller l'épaisseur

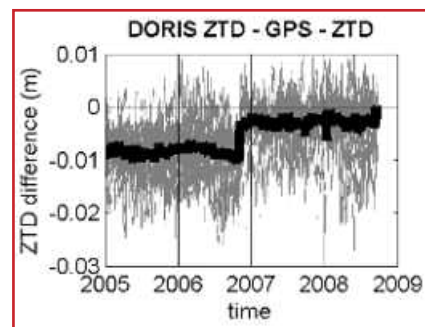


Figure 4. Mise en évidence grâce à DORIS d'une discontinuité de 5 mm suite au changement du modèle d'antenne GPS (de relative à absolue, le 5 novembre 2006) (Bock et al., 2010)

des glaces continentales et de la banquise (Figure 5). Afin de déterminer son orbite avec précision, ce satellite est équipé d'un récepteur DORIS et d'un prisme rétro-réflécteur pour les mesures SLR. Dans le cadre des calculs DORIS, nous réalisons un ajustement de l'orbite *a priori* (filtrage ou moindres carrés) à partir des mesures Doppler DORIS. L'orbite *a priori* est obtenue grâce à un ensemble de modèles qui ont pour but de représenter les forces auxquelles est soumis le satellite. Or, ces modèles ne sont pas parfaits et afin de les corriger, nous avons la possibilité d'ajouter des accélérations empiriques à la période orbitale pour lesquelles l'amplitude et la phase restent à estimer pour chacune des trois composantes (le long de la trace du satellite, suivant la composante radiale et perpendiculairement au plan d'orbite). Ces accélérations sont généralement de l'ordre de 3 nm.s⁻². En théorie, elles devraient même être exactement nulles si les modèles utilisés dans les logiciels étaient parfaits. Une valeur estimée importante suppose donc *a priori* une mauvaise modélisation. Dans le cas de Cryosat-2, les calculs obtenus avant mon stage montraient une valeur moyenne de 12 nm.s⁻². Cette amplitude trop importante n'était pas confirmée par les autres centres de calculs de l'IDS (actuellement au nombre de 8), montrant ainsi une erreur de modélisation dans les calculs IGN.

Nos différentes recherches ont mené à analyser en détail le macro-modèle implémenté pour Cryosat-2 (définissant



Figure 3. Déplacement de la station DORIS sur l'île de Socorro

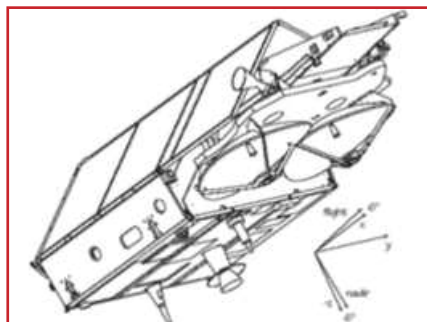


Figure 5. Le satellite Cryosat-2

les différentes surfaces composant le satellite et fournissant les paramètres physiques importants comme l'orientation dans l'espace au cours du temps, la surface ainsi que les coefficients de réflectivité). A partir de cette modélisation, nous sommes alors capables d'estimer la force de pression de la radiation solaire. Cette force correspond au transfert d'énergie de la lumière du Soleil (impact des photons) sur les surfaces du satellite (Figure 6).

En comparant le modèle théorique fourni par le CNES et celui du logiciel GIPSY/OASIS utilisé à l'IGN, nous avons constaté deux erreurs. La première, erreur de signe, était liée à une différence de convention sur l'orientation de l'axe Z. La seconde erreur était due à une mauvaise interprétation du document concernant l'orientation des faces S2+ et S4+. Après avoir corrigé ces paramètres dans le logiciel GIPSY/OASIS, nous avons constaté une très forte réduction des accélérations empiriques tangentielles et avons constaté une moyenne de $2,82 \text{ nm.s}^{-2}$ très proche de ce qui est obtenu actuellement dans les meilleurs centres de calculs de l'IDS.

On constate, sur la courbe bleue, la présence d'un signal périodique (Figure 7).

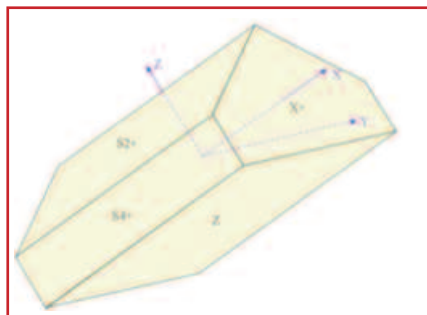


Figure 6. Macro-modèle du satellite Cryosat-2

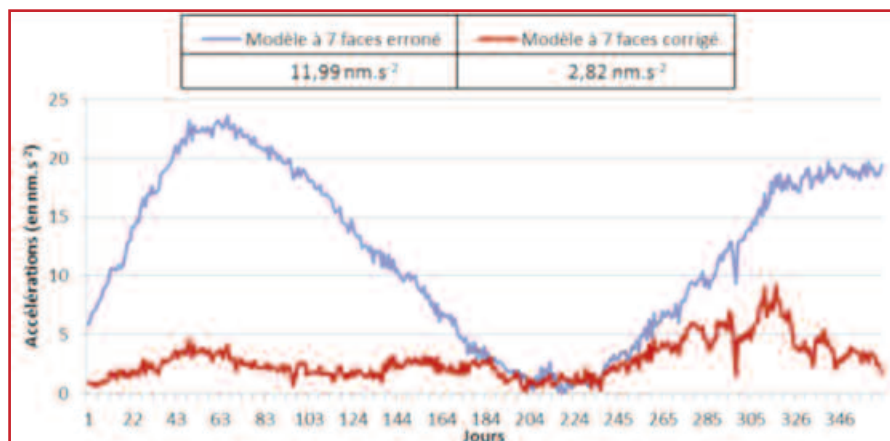


Figure 7. Accélérations empiriques tangentielles de Cryosat-2

Cryosat-2 n'est pas sur une orbite héliosynchrone donc l'angle entre le plan orbital et l'axe Terre-Soleil varie au cours du temps. Ces variations ont une périodicité de 480 jours et le cycle détecté est de 240 jours, soit la moitié. Cette différence s'explique par la symétrie du mouvement par rapport à l'axe Terre-Soleil.

L'amélioration constatée sur l'amplitude estimée des accélérations empiriques signifie que la nouvelle modélisation s'est rapprochée de la réalité physique. En revanche, les accélérations empiriques normales restent encore un peu élevées et une autre étude devrait être menée sur ce point. Enfin, nous avons pu constater que les solutions géodésiques (positions des stations au sol) n'étaient que peu affectées par ces erreurs, ce qui explique qu'elles n'avaient pas été détectées plus tôt.

■ HY-2A

HY-2A est un satellite lancé par l'agence spatiale chinoise CNSA, le premier d'une série de quatre satellites (Figure 8). Afin de remplir sa mission de surveillance des océans, il est équipé d'un récepteur DORIS, d'un récepteur GPS et d'un prisme rétro-rélecteur pour les mesures SLR.

Lancé le 15 août 2011, nous avons eu les premières données à notre disposition au mois de mars 2012. Afin de calculer l'orbite précise de ce satellite et d'intégrer ses données à la solution géodésique, nous avons tout d'abord programmé l'ensemble des fichiers et modèles nécessaires. Puis, dans un

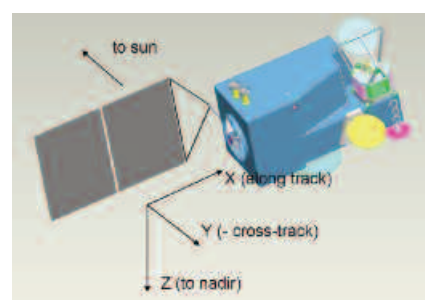


Figure 8. Le satellite HY-2A

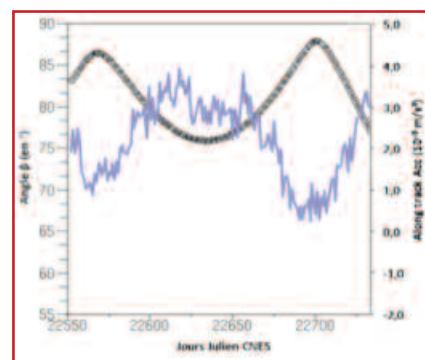


Figure 9. Corrélation des accélérations tangentielles et de l'angle

second temps, nous avons réalisé une série de tests nous permettant de juger de la qualité des résultats obtenus.

Les premiers résultats sont très satisfaisants car nous obtenons pour la composante radiale (la plus importante pour des missions altimétriques), une précision moyenne de 1,3 cm avec des écarts faibles entre les différents jours (les orbites sont calculées jour par jour à partir des données DORIS uniquement).

De plus, les accélérations tangentielles sont elles aussi très bonnes puisqu'elles sont en moyenne de $2,19 \text{ nm.s}^{-2}$, confirmant ainsi la qualité de notre modélisation physique du satellite.



Nous avons pu constater que les variations de l'angle entre le plan orbital et l'axe Terre-Soleil qui sont dues à la déclinaison du Soleil influent sur les valeurs de nos accélérations. Lorsque l'angle β est proche de 90° , les accélérations sont au minimum et inversement (Figure 9). En revanche, les accélérations empiriques normales sont très élevées et après analyse, elles présentent un biais de 15 nm.s^{-2} qui a aussi été constaté à partir du traitement des seules mesures GPS par d'autres groupes.

L'impact de HY-2A est très faible sur la précision des coordonnées de station. Il est fort probable que ceci soit dû à l'inclinaison de son orbite qui est trop proche des autres satellites (Spot et Envisat) et n'améliore donc pas la géométrie du système (Willis et al., 2007). Il semble aussi que les deux premiers mois de mesures présentent une forte instabilité (confirmée par d'autres groupes) et pour lesquelles une étude a été engagée.

Enfin, même si HY-2A n'améliore pas la solution, il va permettre de garder un nombre suffisant de satellites pour obtenir de bons résultats. La période de données analysée compte six satellites (Spot-4, Spot-5, Envisat, Jason-2, Cryosat-2 et HY-2A) mais le 9 mai 2012, Envisat a cessé de fonctionner et ne fournit donc plus de données DORIS. Désormais, nous n'avons plus que cinq satellites disponibles.

L'IDS, et en particulier l'IGN (centre d'analyses DORIS), va mener d'autres travaux dont l'objectif est de fournir la meilleure solution DORIS possible pour le calcul de l'ITRF2013. Ces travaux seront axés sur l'orbitographie des satellites (accélérations empiriques de certains satellites qui restent trop élevées (Jason-2 à l'IGN, mais d'autres satellites pour d'autres groupes), les modèles à utiliser (champ de gravité et ses variations temporelles, modèle de corrections de phase des antennes sol, fonction de rabattement pour la correction troposphérique, etc.). Tous ces modèles doivent avoir une qualité suffisante sur les vingt années de données (de début 1993 à fin 2013). ●

Contact

Jordane STRITTMATTER

jordane.strittmatter@gmail.com

Références

- Altamimi Z., Collilieux X. (2010), *Quality assessment of the IDS contribution to ITRF2008*, Advances in Space Research, vol. 45, number 12, doi:10.1016/j.asr.2010.03.010
- Argus D.F., Gordon R.G., Heflin M.B., Ma C., Eanes R.J., Willis P., Peltier W.R., Owen S.E. (2010), *The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy*, Geophys. J. Int. 180, 913-960, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x
- Bock O., Willis P., Lacarra M., Bosser P. (2010), *An inter-comparison of zenith tropospheric delays derived from DORIS and GPS data*, Advances in Space Research 46, 1648-1660, doi:10.1016/j.asr.2010.05.018
- Briole P., Willis P., Dubois J., Charade O. (2009), *Potential volcanological applications of the DORIS system. A geodetic study of the Socorro Island (Mexico) coordinate time-series*, Geophys. J. Int. 178, 581-590, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04087.x
- Cazenave A., Gennero M.C. and DoMinh K. (2004), *Present-day sea level rise: from satellite and in situ observations to physical causes*, in Satellite Altimetry for geodesy, geophysics and oceanography, International Association of Geodesy Symposia, vol.126, F. Sanso Ed., Springer-Verlag, Berlin, pp.23-33
- Cerri L., Berthias J. P., Bertiger W. I., Haines B. J., Lemoine F. G., Mercier F., Ries J.C., Willis P., Zelensky N. P., Ziebart M. (2010), *Precision Orbit Determination Standards for the Jason Series of Altimeter Missions*, Marine Geodesy, 33:S1, 379-418, doi: 10.1080/01490419.2010.488966
- Morel L., Willis P. (2005), *Terrestrial reference frame effects on global sea level rise determination from TOPEX/Poseidon altimetric data*, Advances in Space Research, doi:10.1016/j.asr.2005.05.113
- Teke K., Böhm J., Nilsson T., Schuh H., Steigenberger P., Dach R., Heinkelmann R., Willis P., Haas R., Garcia-Espada S., Hobiger T., Ichikawa R., Shimizu S. (2011), *Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during*

CONT08, J Geod 85:395-413, doi:

10.1007/s00190-010-0434-y

Willis P. (2007), *Analysis of a possible future degradation in the DORIS geodetic results related to changes in the satellite constellation*, Advances in Space Research, 39(10):1582-1588. DOI:

10.1016/j.asr.2006.11.018

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., (2010a). *The International DORIS Service, Toward maturity*, in DORIS: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics, P. Willis (Ed.), Advances in Space Research, 45(12):1408-1420, DOI: 10.1016/j.asr.2009.11.018

Willis P. (2010b), *Preface*, in DORIS: scientific applications in geodesy and geodynamics, P. Willis (Ed.), Advances in Space Research, 45(12):1407, DOI: 10.1016/j.asr.2010.04.013

ABSTRACT

Keywords: DORIS, Terrestrial Reference Frame, ITRF, Cryosat-2, HY-2A, solar radiation pressure.

This article presents some latest improvements in DORIS data processing (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) at IGN. DORIS is a French system based on Doppler measurements and used for precise orbit determination. It is also one of the four geodetic techniques (VLBI, SLR, GPS and DORIS) used to produce the International Terrestrial Reference Frame ITRF. This technique allows geodetic positioning of the 56 stations of the network and indirectly accessing to geocenter motion. Recent studies have focused on improving the orbit of the satellite Cryosat-2 which had strong empirical accelerations due to incorrect modeling of the solar radiation pressure. In addition, data from the new Chinese satellite, HY-2A, were included in the processing thereby perpetuating the DORIS constellation and ensuring the quality of our geodetic solutions. Results from this work will be considered for the new International Terrestrial Reference Frame ITRF2013.