

DORIS : orbite et localisation précises

G. TAVERNIER Projet DORIS

Le système DORIS a été développé pour répondre au besoin de détermination précise de la position des satellites, lié aux missions altimétriques de mesure de la topographie océanique, et au besoin de localisation précise de balises terrestres. Ces missions demandent une grande précision de mesure et une bonne couverture géographique pour atteindre la précision sub-décimétrique requise sur le calcul de l'altitude du satellite ou celui de la position d'une balise. Par ailleurs la précision visée exige des modèles précis des forces agissant sur le satellite ainsi qu'une très bonne connaissance et une stabilité du système de référence terrestre dans lequel la solution est fournie.

La conception de DORIS, à laquelle ont participé le CNES, le GRGS et l'IGN, a été optimisée en fonction de l'ensemble de ces objectifs.

DORIS est un système radioélectrique bénéficiant d'un fonctionnement tout temps. Le système est basé sur une mesure Doppler de grande précision (0,3 mm/s), bifréquence pour la correction des effets ionosphériques. Le recours à des oscillateurs ultra stables permet d'utiliser une voie montante simple. Cela assure une centralisation de l'ensemble des mesures à bord du satellite et simplifie leur collecte au sol par le centre de contrôle. Le réseau sol est constitué de balises autonomes contribuant à la robustesse du système, il comprend plus de 50 balises dont la répartition est homogène sur toute la surface terrestre. Le centre de contrôle assure la surveillance de l'ensemble du système (instrument bord et balises), la programmation des instruments, le traitement et l'archivage des données.

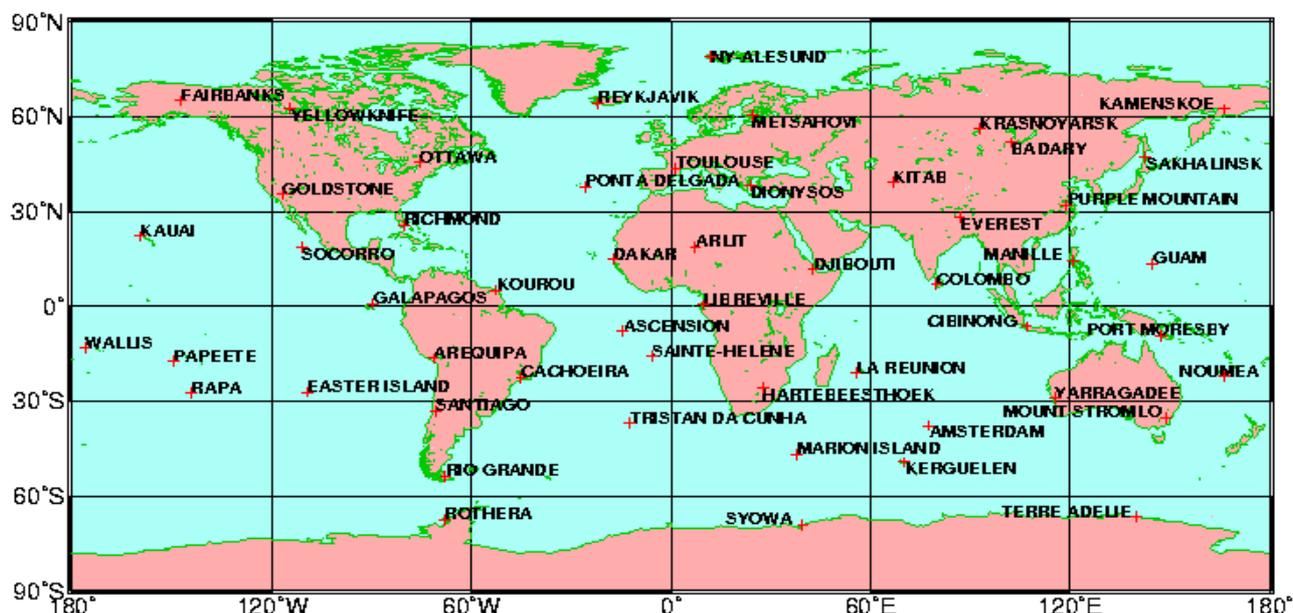


Figure 1. Réseau DORIS

La précision des mesures et la bonne couverture du réseau permettent d'assurer un calcul d'orbite précis (<3 cm sur l'altitude de TOPEX/POSEIDON). Grâce à la qualité des mesures et au nombre de récepteurs en opérations, DORIS/SPOT2 (depuis 1990), DORIS/SPOT3 (1993-1996) TOPEX/POSEIDON (depuis 1992), DORIS/SPOT4 (depuis mars 1998), JASON1 et ENVISAT dans un avenir proche, la localisation des balises atteint une précision centimétrique ce qui permet d'assurer la stabilité du système de référence. La colocation de balises DORIS avec les autres techniques de mesure (VLBI, Laser, GPS) permet d'intégrer cette référence dans le système de référence international ITRF de l'IERS.

De plus les mesures sont utilisées pour améliorer la connaissance et la modélisation des forces agissant sur le satellite et notamment le champ de gravité terrestre. Enfin la collecte des mesures à bord permet, dans le cas de SPOT4 et des autres missions à venir, un calcul d'orbite temps réel, autonome à bord de grande précision (navigateur DIODE : quelques mètres pour SPOT4, quelques dizaines de centimètres pour les missions suivantes).

L'orbite des satellites équipés de récepteurs DORIS étant connue avec précision, il est possible de placer des balises supplémentaires pour des durées de quelques jours à quelques mois, voire quelques années, et de déterminer précisément leur position.

La capacité de localisation précise du système DORIS, tant en ce qui concerne les balises du réseau permanent, dites balises d'orbitographie, qu'en ce qui concerne les balises utilisées occasionnellement ou au cours de campagnes de localisation conduit à des applications scientifiques et commerciales que nous allons illustrer avec quelques exemples.

DETERMINATION D'ORBITE PRECISE

Pendant longtemps, le calcul d'orbite précise n'a été possible que pour des satellites spécialement conçus à cet effet. Il s'agissait généralement de très petits satellites, très denses, et sphériques, évoluant à des altitudes relativement élevées, pour s'affranchir de l'effet des forces de surface et de la connaissance imparfaite du champ de gravité de la Terre. On peut citer notamment LAGEOS, STARLETTE et STELLA.

Le système DORIS a été conçu pour offrir une précision de restitution d'orbite compatible avec le niveau de précision des altimètres embarqués sur TOPEX/POSEIDON.

L'objectif de précision visé, de l'ordre de 10 centimètres dans la détermination de l'altitude du satellite au-dessus des océans, constituait à l'époque un défi pour les spécialistes du calcul d'orbite.

Cela a nécessité des améliorations significatives dans la connaissance du champ de gravité terrestre, le développement de modèles dynamiques sophistiqués, en particulier pour les forces de surface. Dans le cadre de la préparation de la mission TOPEX/POSEIDON un plan de comparaison des logiciels du CNES (ZOOM), de la NASA (GEODYN) et de l'Université du Texas (UTOPIA) a permis de vérifier la cohérence de niveau centimétrique entre les différents outils destinés à offrir la meilleure orbite possible à la communauté scientifique internationale.

Plus de 6 ans après le lancement de TOPEX/POSEIDON, on peut constater avec satisfaction que les objectifs ont été largement atteints : l'erreur de position radiale est estimée à 2,8 cm RMS, soit près de 5 fois moins que les spécifications initiales.

Cette réussite a permis d'atteindre un bilan total d'erreur de 4,3 cm pour une mesure altimétrique élémentaire. Après lissage spatio-temporel, les mesures de TOPEX/POSEIDON peuvent être comparées à mieux que 2 cm avec des mesures in situ. Les données collectées, globales, continues et d'un niveau de précision jamais atteint auparavant ont permis des avancées majeures dans le domaine de l'océanographie et de la géophysique.

DORIS, par la couverture presque continue de son réseau apporte la principale contribution à la précision de la composant radiale de l'orbite. La technologie Laser, par la fourniture de mesures absolues particulièrement précises et bien datées permet d'introduire une forte contrainte de recalage de l'orbite par rapport au centre de la Terre. L'association des deux systèmes s'est ainsi avérée particulièrement efficace. Ils seront à nouveau présent sur JASON1, en association avec GPS, qui n'était embarqué qu'à titre expérimental sur TOPEX/POSEIDON. Cette mission, qui permettra prochainement de prolonger la mission en cours, s'est donnée une spécification de précision équivalente, et un objectif ambitieux de 1 cm sur la composante radiale.

LE NAVIGATEUR DIODE SUR SPOT4

Le projet DIODE avait pour objectif initial d'implanter une fonction supplémentaire de calcul d'orbite à bord dans le récepteur DORIS destiné à SPOT4 afin de positionner le satellite porteur en temps réel.

DIODE est une partie de l'instrument DORIS embarqué sur SPOT4, qui calcule la position et la vitesse du satellite toutes les 10 secondes en combinant modélisation dynamique (extrapolation d'orbite) et prise en compte des mesures Doppler reçues à bord. Un tel équipement localise le satellite qui l'embarque, en le positionnant par rapport au réseau mondial de balises DORIS. C'est pourquoi DIODE est aussi appelé le « Navigateur ».

Le projet DIODE a rempli son principal objectif : le Calcul d'Orbite Embarqué est désormais un point acquis et démontré opérationnellement en 11 mois de vol. Il faut saluer les acteurs de ce projet, la R&T du CNES qui a financé ces développements et le projet SPOT4 qui a donné l'impulsion décisive en proposant d'embarquer DORIS/DIODE et d'utiliser ses produits.

L'expérience DIODE/SPOT4 permet en outre de mettre en évidence quelques-uns des atouts du concept :

- allègement opérationnel,
- précision : environ 3 m RMS sur les composantes radiale et normale, 4,5 m sur la composante tangentielle,
- caractère opérationnel :
 - disponibilité de 99,4% en phase opérationnelle avec 1 seule interruption en 11 mois de fonctionnement (8 mois de fonctionnement continu depuis le seul incident en phase opérationnelle, jusqu'à ce jour),
 - fiabilité des résultats produits (tenue des spécifications) : 100% en période de fonctionnement,
- simplification du système,
- vérification en vol des performances (précision, robustesse) évaluées au sol, avant le lancement, à l'aide mesures DORIS recueillies en vol, à l'occasion de missions précédentes.

Une version améliorée du navigateur est déjà disponible, validée et évaluée au sol à l'aide de mesures simulées et recueillies en vol, en vue de son utilisation avec les prochains récepteurs DORIS embarqués sur ENVISAT, JASON1 et SPOT5 :

- auto-initialisation : mise en route sans nécessité de télécharger un bulletin initial,
- datation précise (TAI) de tops bord,
- programmation autonome,
- performances accrues par l'amélioration de la modélisation : précision submétrique sur les 3 composantes (RMS),
- amélioration de l'indice de qualité qui permet d'estimer la précision des résultats produits.

Ces résultats montrent l'intérêt que représente DORIS pour des applications de navigation autonome : la détermination d'orbite à bord est sortie de son stade probatoire.

Dans les années qui viennent, le contrôle des satellites devra s'automatiser (notamment avec l'avènement de grandes constellations) et il est probable que l'on verra émerger bientôt de véritables systèmes de Contrôle d'Orbite Autonome. Le CNES a la capacité de participer activement à cette évolution.

DETERMINATION DU MOUVEMENT DES PLAQUES TECTONIQUES

Si le calcul d'orbite précise constitue le premier objectif de DORIS, ce système permet également la localisation précise des balises au sol [10] avec de nombreuses applications [11].

Depuis le début des années 1990, des mesures issues de techniques de géodésie spatiale ont été utilisées pour déterminer les déplacements actuels des plaques tectoniques. L'objet initial de ces études est, d'une part, d'évaluer si les observations géodésiques collectées sur quelques années sont cohérentes avec les modèles cinématiques récents base sur des données géologiques caractérisant les mouvements de plaques sur les 2-3 derniers millions d'années, d'autre part de déterminer si ces mouvements sont stables dans le temps. Un autre objectif important est d'analyser la rigidité des plaques et d'évaluer l'ampleur des déformations dans les zones à la frontière des plaques. Les réseaux géodésiques tels que celui du système DORIS présentent en outre l'avantage de fournir des estimations de mouvement pour des plaques peu ou pas étudiées à l'aide des données géologiques.

Le lecteur intéressé par ce thème pourra se référer à l'ouvrage de A. Cazenave et K. Feigl [5].

Les premières estimations de mouvement de plaques ont été réalisées à l'aide de techniques VLBI et SLR. Du fait de la couverture limitée des sites VLBI et Laser, seuls les mouvements relatifs de quatre plaques (Eurasie, Amérique du Nord, Australie et Pacifique) ont pu être déterminés.

Plus récemment, les mesures GPS collectées par l'IGS ont permis la détermination du mouvement de six plaques. Les deux nouvelles plaques couvertes par GPS sont l'Amérique du Sud et l'Afrique, mais avec seulement deux sites sur chacune d'elles. Par la suite, les vitesses absolues de huit plaques ont pu être calculées et l'on a pu constater un bon accord entre les techniques spatiales et les modèles cinématiques.

Des résultats préliminaires s'appuyant sur trois années de données DORIS collectées par les satellites SPOT2 et TOPEX/POSEIDON ont fait l'objet d'une publication dès 1995 (GRGS - 19 sites [9]). Une étude plus récente, publiée en 1998 (GRGS [6]), fournit de nouveaux résultats de déplacement de plaques à l'aide de 4 ans de données DORIS (1993 à 1996), collectées par trois satellites (SPOT2, SPOT3 et TOPEX/POSEIDON). Les positions et vitesses absolues de 48 balises DORIS ont été calculées. Les vitesses horizontales de 28 d'entre elles, situées dans des zones stables, c'est-à-dire loin des zones de déformations (frontières de plaques, zones sismiques intra plaques...) ont été utilisées pour calculer les déplacements de la douzaine de plaques majeures, caractérisés par une vitesse de rotation angulaire et un axe de rotation. Les résultats obtenus pour le mouvement des plaques tectoniques montrent un accord remarquable avec les modèles cinématiques et les autres techniques spatiales.

La méthode utilisée par le GRGS est de type dynamique, avec une estimation simultanée de l'orbite des satellites, des positions et vitesses des balises, de même que des paramètres d'amélioration des modèles de force et de correction de mesure. Les performances de DORIS en localisation se sont constamment améliorées au cours du temps : de 10 cm après 1 an de vol de SPOT2 à 1 cm actuellement, avec 3 satellites en vol. La dégradation est de l'ordre du cm avec seulement 2 satellites. Le niveau atteint dans la détermination de l'évolution des coordonnées du pôle est de l'ordre de 1 milliseconde, d'après des comparaisons avec les résultats des techniques VLBI, SLR et GPS.

Avec de nouveaux satellites en vol prochainement (ENVISAT, JASON1 ...), la précision de localisation absolue devrait atteindre un niveau subcentimétrique pour l'ensemble du réseau et le mouvement du pôle devrait être suivi avec une précision meilleure que la milliseconde d'arc.

CONTRIBUTION DE DORIS A L'IERS

L'IERS a été créé en 1988 par l'UAI et par l'UGGI. Il remplace le Service International du mouvement du Pôle (SIMP) et la Section de la Rotation Terrestre du Bureau International de l'Heure (BIH).

La mission de l'IERS est de maintenir le repère de référence terrestre international et le repère de référence céleste international, et de fournir d'une manière régulière les meilleures données concernant la rotation de la Terre.

Le Système de Référence Terrestre International (ITRS) : son origine est au centre de masse de la Terre entière, incluant les océans et l'atmosphère. L'évolution temporelle de son orientation a une rotation d'ensemble nulle par rapport à la croûte terrestre.

Le repère de référence terrestre ITRF est la réalisation pratique de l'ITRS. Il consiste en un catalogue des positions et des vitesses de plusieurs centaines de points de la croûte terrestre localisée par géodésie satellitaire ou VLBI. Il est obtenu par la combinaison de repères terrestres obtenus par les centres d'analyses de l'IERS. Pour obtenir un repère de référence de qualité optimale, il faut d'abord rendre exacts et homogènes les jeux de coordonnées provenant des différentes techniques.

L'obtention d'une solution ITRF consiste à combiner les différentes solutions proposées en intégrant des contraintes de rattachement entre les points de référence des différentes techniques présentes sur un même site et à leur imposer des vitesses égales.

La précision actuelle de l'ITRF est de 1cm ou mieux.

La précision atteinte par DORIS a permis à l'IERS d'inclure ce système comme nouvelle technique pour la réalisation de l'ITRF [1] et le calcul de séries de paramètres de rotation de la Terre [7] en 1996, avec une première contribution à l'ITRF 1994 publié cette année là.

Le réseau DORIS, particulièrement dense et homogène, a permis de densifier le réseau terrestre de l'IERS et de compléter la couverture de l'hémisphère sud, mal assurée par les autres techniques spatiales. Sept groupes scientifiques dans le monde (3 en France, 2 aux Etats-Unis, 1 aux Pays-Bas et 1 en Russie) ont été sélectionnés pour traiter les données DORIS et proposer des solutions à l'IERS. D'ores et déjà, l'accord interne entre ces groupes est de l'ordre du centimètre en positionnement et de quelques millimètres par seconde pour les vitesses.

Initialement, trois solutions DORIS (CSR : 47 sites, GRGS : 47 sites, IGN : 49 sites) ont été soumises à l'IERS et retenues dans la solution ITRF94. Celle-ci inclut en outre 4 solutions VLBI, 2 solutions SLR et 3 solutions GPS.

Très récemment, trois solutions DORIS (CSR : 54 sites, GRGS : 63 sites, IGN : 69 sites) et une solution mixte DORIS/ Laser (GRGS, en liaison avec les travaux sur les modèles de potentiel terrestre GRIM : 143 sites) ont été soumises à l'IERS et retenues dans la solution ITRF97. Celle-ci inclut en outre 4 solutions VLBI, 5 solutions SLR et 6 solutions GPS.

La figure ci-dessous présente l'ensemble du réseau IERS en identifiant les sites où plusieurs techniques sont en collocation. On note que les 4 techniques contribuant à l'IERS (VLBI, Laser, GPS et DORIS) sont simultanément présentes sur 6 de ces sites.

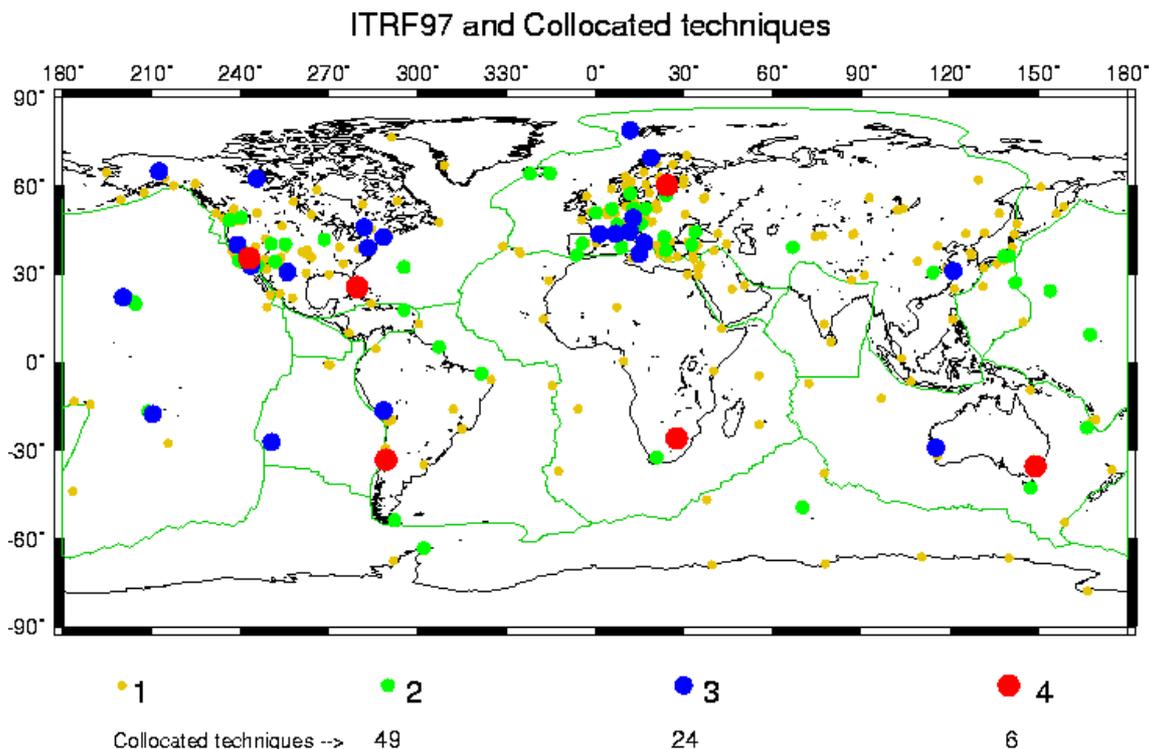


Figure 2. Réseau IERS (VLBI, SLR, GPS, DORIS)

CAMPAGNE DE POSITIONNEMENT DORIS AU CHILI

Cette expérience pilote a été décidée lors d'un colloque INSU/CNES sur le positionnement spatial, en 1990 et suite aux réflexions d'un groupe de travail sur le positionnement DORIS et GPS.

Elle a consisté à surveiller une lacune sismique, c'est à dire une zone qui a une grande probabilité d'être affectée par un séisme majeur (amplitude 8.5 à 8.8) dans un futur proche. Le choix s'est porté sur la région côtière du Nord Chili, au voisinage de la frontière des plaques tectoniques

Nazca et Amérique du Sud. Dans cette région du globe, de nombreuses ruptures de faille se sont produites au cours du siècle écoulé. La lacune choisie a connu une forte secousse sismique en 1877 et est la seule à ne pas avoir rompu depuis.

L'implantation, à partir de janvier 1992, de deux balises formant une base de 150 km, dans l'Altiplano andin (Cariquima) et dans la région côtière (Iquique), pour le compte de l'IPG, a permis de réaliser une surveillance continue de la zone de déformation et l'étude du cycle sismique jusqu'en 1998, avec des mesures des satellites SPOT2 et SPOT3 (jusqu'en 1996 pour ce dernier).

Trois balises du réseau permanent d'orbitographie, implantées à proximité, ont également contribué à l'expérience. Il s'agit des sites de l'Île de Pâques, de Arequipa et Santiago (utilisation des satellites SPOT2, SPOT3 et TOPEX/POSEIDON).

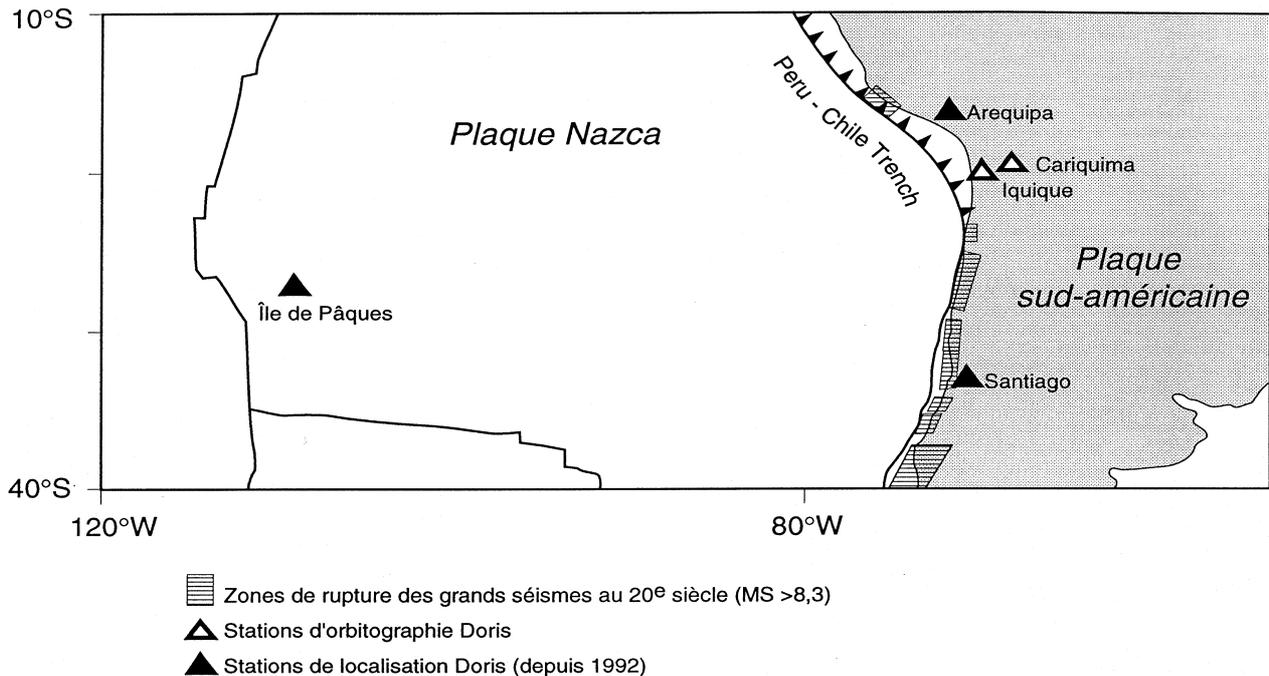


Figure 3. Schéma simplifié de la fosse du Chili-Pérou et réseau des sites DORIS.

La localisation des balises s'est améliorée d'un facteur 5 depuis le début de l'expérience. 2 mois d'observation sont nécessaires pour obtenir la meilleure précision. Il est également possible d'obtenir des résultats avec 10 jours d'observation au prix d'une dégradation de la précision.

En termes de résultats [8] :

- le taux de déformation de la base de 150 km définie par les deux sites de Iquique et Cariquima, qui traduit l'accumulation de contraintes au voisinage de la frontière de la plaque, est inférieur à 1,5 cm par an. Ce résultat a été confirmé par les observations GPS,
- le séisme attendu ne s'est pas encore produit : seule la partie Sud a rompu en 1995, la partie Nord est toujours bloquée malgré un déplacement relatif des plaques de 80 mm/an (soit quelques m depuis 1 siècle). Une rupture assismique s'est peut être déjà produite en zone profonde (phénomène déjà observé au Japon), mais on n'a pas pu observer de rupture sismique en surface.

CAMPAGNE DE POSITIONNEMENT DORIS EN NOUVELLE-CALEDONIE

Cette expérience a consisté à observer la zone de subduction de la fosse des Nouvelles-Hébrides, dans le Pacifique Ouest, de 1993 à fin 1998. La convergence des plaques tectoniques dans cette zone est connue pour être l'une des plus rapides du globe, dépassant les 10 cm par an.

Deux balises de localisation (programmées sur les satellites SPOT2 et SPOT3) ont été installées pour le compte de l'IRD :

- une balise DORIS est implantée à Lifou dans l'archipel de Nouvelle Calédonie, sur la plaque australienne en subduction,
- une seconde balise est implantée sur l'île de Tanna dans la partie méridionale de l'archipel de Vanuatu, sur la plaque chevauchante.

A proximité des sites sélectionnés pour la surveillance de la tectonique régionale, se trouvent les balises du réseau permanent d'orbitographie de Nouméa et Wallis (programmées sur SPOT2, SPOT3 et TOPEX/POSEIDON).

Le traitement de l'ensemble des mesures par CLS et le GRGS a permis de constituer des jeux précis de coordonnées et de vitesses pour tous les points de ce réseau régional. Sa déformation a ainsi pu être analysée et comparée aux informations correspondantes obtenues par GPS ou à l'aide de modèles géophysiques.

Les résultats sont concluants [3] [4]. On a observé des mouvements absolus et relatifs cohérents avec ceux estimés à l'aide de GPS ou du modèle Nuvel-1 :

- déplacement absolu de Lifou de 5 cm par an (direction Nord-Est),
- mouvement relatif de 12 cm par an de la balise de Tanna relativement à Lifou (direction Sud-Ouest), c'est à dire une convergence régulière.

Si les résultats obtenus avec DORIS et GPS pour ce type d'expérience sont comparables, on peut noter que DORIS, par la centralisation des mesures et le fonctionnement automatique des balises, se prête particulièrement bien aux observations permanentes dans des zones isolées dépourvues d'infrastructure.

CGG/TOPNAV : APPLICATION DE DORIS DANS LE DOMAINE PETROLIER

La prospection pétrolière est souvent réalisée dans des régions du monde ne disposant pas d'un réseau géodésique local rattaché à un système de référence mondial. Ainsi, dans le domaine de l'exploration pétrolière, l'établissement d'un réseau géodésique de référence précis revêt une grande importance. Un tel réseau est en effet nécessaire dans la conduite des opérations de terrain, l'interprétation des travaux de prospection sismique ou encore le marquage des limites de concession.

La division Topographie-Navigation de la Compagnie Générale de Géophysique intervient auprès de sociétés de l'industrie pétrolière comme prestataire de service. Les services proposés par TOPNAV s'appuient, de manière complémentaire, sur les systèmes DORIS et GPS [2]. DORIS est utilisé pour la détermination de réseaux primaires de points d'appui. Les coordonnées absolues de ces points sont calculées avec précision et exprimées dans le système de référence international ITRF de l'IERS, largement adopté par la communauté pétrolière. Tout chantier est ainsi rattaché, grâce à DORIS, à un système global unique et cohérent. A partir de ces points, la technique de positionnement différentiel par GPS est utilisée pour densifier le réseau géodésique local. TOPNAV a ainsi recours au système DORIS pour ses applications pétrolières principalement en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie du Sud-Est.

TOPNAV assure les opérations de terrain à l'aide des deux balises DORIS dont elle dispose en permanence. Leur mise en œuvre s'effectue en quelques minutes et ne requiert ni compétence, ni précaution particulière. La gestion de la programmation des récepteurs bord, la récupération et le traitement des données, le calcul des positions et leur fourniture dans le système de référence international sont assurés par CLS, filiale du CNES, prestataire du service de positionnement. Ce service est disponible en tout point de la Terre, à tout moment et dans un délai de quelques jours. Lorsque l'on dispose de deux satellites en vol, comme SPOT2 et SPOT4 par exemple, on obtient une précision de l'ordre de 15 cm pour un positionnement absolu après 2 à 3 jours d'observation. Des travaux sont en cours afin d'atteindre une précision décimétrique, niveau correspondant de plus en plus à la demande des clients. Les coordonnées sont fournies au client 48 heures après la réalisation de la dernière mesure sur un site. Les points d'appui DORIS sont réalisés séquentiellement. En élaborant un positionnement relatif DORIS par différences de coordonnées absolues que l'on compare ensuite systématiquement aux résultats du positionnement différentiel

GPS, lorsque les récepteurs GPS occupent des points d'appui, on note un accord meilleur que 20 cm, bien que les points DORIS ne soient pas issus d'acquisitions synchrones.

CONCLUSION

DORIS est, depuis 1996, la quatrième technique contribuant à l'IERS. Les trois autres techniques se sont dotées d'un « Service International » permettant de fédérer la communauté scientifique et de coordonner les travaux scientifiques (centres d'analyse, groupes de travail, coordinateurs) afin d'obtenir des données (stations, centres d'opération, centres de données) et produits de haute qualité grâce à une structure internationale (Comité Directeur comprenant des représentants de l'IAG et de l'IERS, Bureau Central pour la mise en œuvre des directives du Comité Directeur, la coordination et la gestion courant du service, membres, membres associés, membres correspondants) :

- IVS pour le VLBI
- IGS depuis 1994 pour GPS
- ILRS depuis 1998 pour le Laser

Il existe maintenant une demande pour la création d'un service équivalent pour DORIS. Dans ce contexte, l'expérience du CNES et de l'IGN en matière de coopération internationale est un atout fondamental. Un IDS verra-t-il le jour prochainement ?

Références :

- [1] Boucher C., Altamini Z., Sillard P., Contribution de DORIS au Système International de Référence Terrestre ITRS, *Recueil des actes des journées DORIS*, 27-29 avril 1998
- [2] Boucquaert F., Application de DORIS dans le domaine pétrolier
Recueil des actes des journées DORIS, 27-29 avril 1998
- [3] Calmant S., Lebellegard P., Taylor F., Bevis M., Maillard D., Recy J., Bonneau J.
Geodetic measurements of convergence across the New Hebrides subduction zone
Geophys. Res. Lett., 22-19, 2573-2576, 1995
- [4] Calmant S., Valette J.J., Cazenave A., Soudarin L., Crétaux J.F., Etude de la convergence à travers la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides par le système DORIS
Recueil des actes des journées DORIS, 27-29 avril 1998
- [5] Cazenave A., Feigl K. : Formes et Mouvements de la Terre, Editions CNRS (BELIN 1994).
- [6] Crétaux J.F., Soudarin L., Cazenave A., Bouillé F., Present-day tectonic plate motion and crustal deformations from the DORIS space system, *JGR Vol. 103 N° B12* – Pages 30,167-30,181 – December 10, 1998
- [7] Gambis D., Eisop E., DORIS contribution to the determination of the Earth Polar Motion
Recueil des actes des journées DORIS, 27-29 avril 1998
- [8] Ruegg J.C., Valette J.J., Cazenave A., Armijo R., Soudarin L., Crétaux J.F., DORIS sismo-tectonic monitoring in Northern Chili, *Recueil des actes des journées DORIS*, 27-29 avril 1998
- [9] Soudarin L., Cazenave A., Large scale tectonic plate motions measured with the DORIS space geodesy system, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 469-472, 1995
- [10] Valette J.J., Nhun Fat B., Loac M.N., DORIS operational location performance
Recueil des actes des journées DORIS, 27-29 avril 1998
- [11] Willis P., Sillard P., Weekly DORIS solutions for stations coordinates : early results and perspectives,
Recueil des actes des journées DORIS, 27-29 avril 1998

Sites Web

- [CDDIS] Serveur du Centre de Données DORIS IERS du GSFC : <http://cddisa.gsfc.nasa.gov/cddis.html>
[DORIS] Serveur des missions scientifiques du CNES : DORIS : <http://doris@www-projet.cst.cnes.fr:8060>
[DORIS] Serveur DORIS de l'IGN : <http://lareg.ensg.ign.fr/DORIS/index.html>
[GSFC] Serveur Orbite Précise du GSFC : <http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/podps/html/welcome.html>
[IERS] Serveur de l'IERS : <http://hpiers.obspm.fr>

Liste de noms ou d'abréviations

CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CLS	Collecte et Localisation par Satellites
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales

CSR	Center for S pace R earch de l'Université du Texas
DIODE	D étermination I mmédiate d' O rbite par D ORIS E mbarqué
DORIS	D étermination d' O rbite et R adiopositionnement I ntégrés par S atellite
GPS	G lobal P ositioning S ystem
GRGS	G roupe de R echerche en G éodésie S patiale - CNES/CNRS/IGN/Université Paul Sabatier
GSFC	G oddard S pace F light C enter (NASA)
IERS	I nternational E arth R otation S ervice
IGN	I nstitut G éographique N ational
IGS	I nternational G PS S ervice
ILRS	I nternational L aser R anging S ervice
IPG	I nstitut de P hysique du G lobe
IRD	I nstitut de R echerche pour le D éveloppement
ITRF	I nternational T errestrial R eference F rame
ITRS	I nternational T errestrial R eference S ystem
IVS	I nternational V LBI S ervice
NUVEL-1	Modèle Géologique de déplacement de plaques (hypothèse plaques rigides)
SIMB	S ervice d' I nstallation et de M aintenance des B alises (IGN)
SLR	S atellite L aser R anging
TAI	T emps A tomique I nternational
UAI	U nion A stronomique I nternationale
UGGI	U nion G éodésique et G éophysique I nternational
VLBI	V ery L arge B ase I nterferometry