

GEODESIE SPATIALE : AVANCEES RECENTES

P. Exertier, J. Nicolas et P. Bonnefond

Observatoire de la Côte d'Azur, départ. CERGA, av. Copernic, F-06130 Grasse

ملخص

إن هذا المقال يعرض بصفة شاملة التطورات الحديثة المحققة في قطاع الجيوديزيا الفضائية وهذا بفضل التقنيات الفضائية كـتقنية DORIS (تحديد المدارات وتحديد المواقع اللاسلكي المدمج بالأقمار الصناعية)، قياس المسافات الليزري، قياس الارتفاعات بالأقمار الصناعية. إن وصف الأعمال المحققة في الأعوام الأخيرة يوضح جلياً مساهمة كوكبة الأقمار الصناعية DORIS والأقمار الصناعية الليزرية (أقمار صناعية مجهزة بعكاس رجعي ليزري) في إعطاء شكل للمدارات (وصف القوات) وتحديد حقل الجاذبية للأرض وتغيراته الزمنية، وكذا إنجاز معلم المرجع الأرضي الأساسي. بعد عرض سريع لأسس أنظمة الجيوديزيا الفضائية وميزاتها الأساسية، سوف نعرض النتائج المحصل عليها من طرف فرق مختلفة خلال السنوات الماضية.

إن النظام الفضائي الفرنسي (DORIS) و الذي تم إطلاقه أول مرة على القمر الصناعي (spot 2) سنة 1990، قد أثبت منذ ذلك الوقت تطبيقات علمية عديدة لتحديد مدارات الأقمار الصناعية السفلى، الجيوديزيا والجيوفيزياء. ومن جهته، تطور قياس المسافات الليزري خلال السنوات الأخيرة سواء في دوره أو في إنجازاته. وبفضل التحسين في دقتها ووضعها لتنسيق أفضل للشبكة العالمية لمحطات رصد الأقمار الصناعية، قد شغلت هذه التقنية مكانة فريدة في تحديد الموجات الطويلة المدى لحقل الجاذبية، مشاهدة الظواهر البطيئة التغير ومعايرة التقنيات اللاسلكية -الكهربائية (PARARE - DORIS-GPS) ذات الطابع التفاضلي وذات التطور الناجح. وفي الأخير فإن تقنية قياس المسافات بالأقمار الصناعية التي تم ضبطها في السبعينات والمحدودة أساساً بخطأ المدار النصف قطري للأقمار الصناعية الأوقيانوغرافية، شهدت تحسن إنجازاتها بصفة واسعة في التسعينات لا سيما بفضل التحديد المداري العالي الدقة المحقق من طرف DORIS وقياس المسافات الليزري. إن خطأ المدار المحصل عليه بالقمر الصناعي TOPEX/Poseidon الذي تم إطلاقه سنة 1992 هو من درجة 25 مم حالياً.

RESUME

Ce papier synthétise les progrès récents réalisés dans le secteur de la géodésie spatiale grâce aux techniques spatiales comme DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite), la télémétrie laser et l'altimétrie satellitaire. La description des travaux réalisés ces dernières années met en évidence de l'apport des constellations des satellites DORIS et des satellites laser (satellites équipés de rétro-rélecteurs laser) à la modélisation d'orbite (description des forces), à la détermination du champ de gravité de la Terre et de ses variations temporelles, et à la réalisation du repère de référence terrestre fondamental.

Après une présentation rapide des principes des systèmes de géodésie spatiale et de leurs principales caractéristiques, on présentera les résultats obtenus par différents groupes au cours de ces dernières années.

Le système spatial français DORIS, lancé pour la première fois sur le satellite SPOT-2 en 1990 a depuis cette date démontré de nombreuses applications scientifiques pour la détermination d'orbite de satellites bas, la géodésie et la géophysique. De son côté, la télémétrie laser a sensiblement évolué au cours de ces dernières années, tant dans son rôle que dans ses performances. Par une amélioration de sa précision et la mise en place d'une meilleure coordination du réseau mondial des stations de poursuite de satellites, cette technique spatiale occupe une place unique dans la détermination des grandes longueurs d'onde du champ de gravité, l'observation de phénomènes lentement variables et l'étalonnage de techniques radio-électriques (GPS, DORIS, PRARE) à caractère différentiel dont le développement est un succès. Enfin, l'altimétrie satellitaire, technique mise au point dans les années 70 et limitée essentiellement par l'erreur d'orbite radiale des satellites océanographiques, a vu ses performances largement améliorées dans les années 90 grâce notamment à une orbitographie de très haute précision réalisée par DORIS et la télémétrie laser; l'erreur d'orbite obtenue avec le satellite TOPEX/Poseidon (lancé en 1992) est de l'ordre de 25 mm actuellement.

ABSTRACT

This paper synthesizes the recent progress in spatial geodetic sector thanks to the spatial techniques as DORIS (Orbit Determination and Radio-positioning integrated by Satellite), laser telemetry and satellite altimetry. The description of works realized in the last years, underlines the contribution of DORIS satellites and laser satellites (satellite equipped with retro-reflectors) constellations, to the orbit modeling (forces description), to the determination of gravity field of the earth and its temporal variations, and to the fundamental reference system of the earth.

After a quick representation of the principles of spatial geodesy systems and their main characteristics, we will present the results obtained by different groups during the last years.

The French spatial system DORIS, launched for the first time on Spot-2 satellite in 1990 has since that time shown several scientific applications for low satellites orbit determination, geodesy and geophysics. From its side, the laser telemetry has markedly evolved during the last years, in its role as well as in its achievements. By an improvement of its accuracy and a set up of a best coordination of the world network tracking satellites stations, this technique holds a unique place in field gravity long wavelength determination, the slowly variable phenomena observation and the standardization of radio-electric techniques (GPS, DORIS, PRARE) of a differential nature and of a successful development. Finally, the satellite altimetry, a technique perfected in the 70th, essentially limited by radial satellite error of oceanographic satellites, has notably improved in the 90th thanks to an orbitography of a high accuracy realized by DORIS and laser telemetry, the orbit error obtained with Topex/Poseidon (launched in 1992) is of 25mm actually.

1. INTRODUCTION

La qualité des recherches menées en Géodésie Spatiale, et par conséquent aussi en Sciences de la Terre, est pour beaucoup fondée sur celles des mesures qui doivent être nombreuses, précises, établies sur de larges spectres spatio-temporels. Les techniques de mesures précises de position, de vitesse et d'accélération sur des objets extérieurs à la Terre ont été développées depuis une trentaine d'années et ont acquis progressivement une très grande capacité de précision et de répétitivité spatio-temporelle. L'expérience aidant, la géodésie spatiale a défini des techniques de mesures originales (télémétrie laser, Doppler, altimétrie radar, etc) qui ont été mises en œuvre dans de grands projets spatiaux tels que l'altimétrie des océans (Table 1).

Ceci implique l'existence d'une politique fondée sur la durée. En l'espace de vingt ans - entre les années 1970 et 1990 - toutes les techniques de poursuite de satellites ont gagné plusieurs ordres de grandeur tant

sous l'aspect qualitatif (précision et exactitude des mesures) que sous l'aspect quantitatif (nombre global de données, rapidité de leur disponibilité et échantillonnage spatio-temporel). Au cours des années 90, les applications des systèmes radioélectriques comme DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite), GPS (Global Positioning System) et GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) ont eu une progression telle qu'à la fin de cette décennie ces techniques fonctionnent en réseau mondial et ont rejoint en précision l'autre technique déjà établie : la télémétrie laser. Dans le même temps, la télémétrie laser a vu l'avènement de nouveaux détecteurs, très schématiquement les photodiodes à avalanche en Europe ou les photo-multiplificateurs à micro-canaux (MCP) aux Etats-Unis, portant la précision de mesure de distance à un niveau sub-centimétrique pour environ 30% des instruments laser dans le monde (ILRS, 1999).

Table 1. 25 ans de missions altimétriques. En cm : erreur d'orbite prévue, précision de l'altimètre embarqué, erreur d'orbite obtenue (avec, entre parenthèses, les meilleurs résultats obtenus), et technique laser comme technique de poursuite unique (**) ou non (*); d'après (Cheney, 1995; Lefebvre, private communication, 1999).

Missions	Laser	Dates	Err. rad. d'orb. prévue	Précis. altim.	Err. radial d'orb.
GEOS-3	*	1975-78	200	15	100
Seasat	*	1978	200	9	75 (20)
Geosat	*	1985-89	100	7	40 (15)
ERS-1	**	1991-00	20	4	20 (3-4)
T/P	*	1992-	12	3-4	4 (2-3)
GFO	**	1998-	5	4	10-15
ERS-2	*	1995-	15	4	6
Jason-1	*	2001-	<4	2.5	objectif : 1
EnviSat	*	2001-	10	3-4	objectif : 3

Le système DORIS est un système français, développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) en collaboration avec l'IGN (Institut Géographique National) et le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale) pour la détermination précise d'orbite de satellites bas, et en vue de nombreuses applications en géodésie et en géophysique. Le premier satellite comportant un récepteur DORIS a été le satellite SPOT-2 lancé en 1990, qui est toujours opérationnel (bien après sa durée de vie nominale). Depuis cette date, d'autres satellites ont embarqué des récepteurs DORIS : TOPEX/Poseidon (T/P) en août 1992, SPOT-3 en octobre 1993 (jusqu'en novembre 1996), et SPOT-4 en mars 1998. Plusieurs autres satellites sont prévus dans un avenir proche, ENVISAT fin 2001, Jason-1 au printemps 2001, SPOT-5,... Le système DORIS est un système ascendant : un réseau de balises permanentes (une soixantaine de stations uniformément réparties dans plus de 30 pays) émettent depuis le sol des signaux

omnidirectionnels qui sont captés par des satellites (à bord desquels on peut faire des mesures de l'effet Doppler). Afin d'estimer au mieux le retard ionosphérique, le système DORIS utilise deux fréquences : 2036.25 Mhz et 401.25 Mhz (Willis, 1998a). Les mesures mémorisées à bord sont transmises périodiquement au Centre de Contrôle mis en œuvre par la société CLS (Collecte Localisation Satellites) à Toulouse. Le traitement fin des mesures permet d'obtenir une connaissance de l'orbite des satellites avec une précision de quelques centimètres. Le succès de T/P est ainsi lié à la réussite de DORIS, lui-même lié à la réussite des oscillateurs ultra stables (OUS, à quartz) embarqués. Pour la première fois dans une mission d'observation des océans, la précision du calcul d'orbite est comparable à celle de la mesure du radar altimètre (cf. Table 1), ce qui permet d'accéder à la connaissance de la topographie des océans (Barlier et al., 1996). La seconde mission de DORIS, la localisation, a de nombreuses

applications dans les domaines de la géodésie et de la géophysique (Crétaux et al., 1998). On peut rappeler: le mouvement régulier des plaques tectoniques, les mouvements verticaux de la croûte terrestre, le mouvement du centre de la Terre, ou encore celui de son axe de rotation.

L'avantage de la télémétrie laser se situe dans la simplicité du concept de la mesure (temps de trajet d'une impulsion lumineuse) et dans son exactitude. Elle utilise des rétro-rélecteurs, d'un coût modeste, qui sont placés à bord des satellites ou encore, dans le cas de la Lune, qui ont été déposés par les missions américaines et soviétiques entre 1969 et 1973. En revanche, la technique est tributaire de la météorologie et de la nécessité d'un personnel spécialisé pour la mettre en œuvre au sol. La situation est un peu opposée à celle des techniques radio-électriques (DORIS, GPS ou GLONASS), qui sont de type tous temps, très faciles d'utilisation sur le terrain et dont le coût très important est essentiellement dans la technologie embarquée à bord du ou des satellites. L'apport des données de télémétrie laser acquises ces dernières années sur les satellites géodésiques Starlette, Stella, Ajisai, LAGEOS et LAGEOS-2, notamment, a été essentiel dans l'amélioration du modèle de champ de gravité de la Terre à grandes longueurs d'onde (Schwintzer et al., 1997). Or, la connaissance du champ et de ses variations temporelles est fondamentale pour l'orbitographie et, par conséquent, pour le positionnement et l'océanographie spatiale. En comparaison à DORIS, le réseau des stations laser est moins bien distribué géographiquement. De plus, il n'est pas exactement reproductible dans le temps compte tenu des conditions météorologiques changeantes. De ces

limitations de la couverture spatio-temporelle laser découlent les difficultés rencontrées dans le calcul d'orbite au démarrage de missions comme ERS-1 ou GFO (Table 1), à 800 km d'altitude, pour lesquelles l'erreur d'orbite atteignait environ 20 cm (Scharroo et al., 1992). Mais ce qu'il faut avant tout retenir de la contribution de la télémétrie laser à la dynamique orbitale, au cours des années 90, est l'apport de mesures de distance de plus en plus exactes, notamment à faible distance zénithale où l'incertitude liée aux corrections de propagation atmosphérique est la moins importante. Ces données (à caractère absolu) ont ainsi permis d'obtenir une validation et une grande maîtrise du bilan de l'erreur radiale des orbites des satellites altimétriques (Tapley et al., 1994; Scharroo and Visser, 1998). Nous pourrions appeler cela le *facteur d'échelle* des orbites, en référence aux faits que, (i) les systèmes radio-électriques ne donnent accès qu'à des mesures de poursuite à caractère différentiel (Doppler et GPS), et que (ii) ces dernières mesures sont beaucoup plus sensibles, par rapport au laser, au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, paramètre qui est encore mal maîtrisé actuellement.

Au cours du temps, si toutes les techniques spatiales ont progressé dans leur précision, elles se sont aussi spécialisées dans leur rôle et leur utilisation pour la géodésie, la géophysique et l'océanographie. La télémétrie laser n'apparaît pas comme étant la technique la plus précise avec la meilleure résolution temporelle. Elle apparaît en revanche comme la plus exacte sur le long terme, ce qui lui confère une place unique pour l'observation des phénomènes lentement variables (par ex. le rebond post-glaciaire, ...) et la réalisation d'un système de référence terrestre géocentrique très stable dans le temps et à très grandes mailles (plusieurs milliers de km) (Tapley et

al., 1993). La durée de vie des cibles spatiales (LAGEOS, Starlette, Stella) est quasi infinie à l'échelle humaine, et la qualité de la métrologie faite au niveau du sol peut être non seulement contrôlée en permanence avec exactitude mais aussi améliorée. Les erreurs introduites par la propagation de la lumière dans l'atmosphère sont aussi minimales pour la technique laser, ce qui n'est pas le cas pour les techniques radio-électriques. En fournissant un facteur d'échelle absolu - via la détermination de la constante gravitationnelle (GM) par les données acquises sur LAGEOS (Dunn et al., 1999) -, d'une part à l'orbitographie et d'autre part à l'étalonnage des altimètres radar T/P (1992), ERS (1991 et 1995) et enfin GFO (1998), la télémétrie laser a occupé une place tout à fait indispensable et complémentaire des autres techniques au cours des années 1990 (Francis, 1992; Ménard et al., 1994; Marshall et al., 1995; Scharroo and Visser, 1998; Bonnefond et al., 1995; 1999).

2. DYNAMIQUE ORBITALE

Les progrès réalisés dans la précision et l'exactitude des techniques spatiales ont encouragé le développement de nouvelles solutions du champ de gravité de la Terre. Les modèles GRIM, qui sont issus d'une longue coopération entre le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS, Grasse, Paris, Toulouse) et le GeoForschungZentrum (GFZ, Berlin), sont fondés sur l'analyse d'une constellation de 36 satellites, dont les satellites équipés du système DORIS ainsi qu'environ 20 cibles laser. Ces dernières ont une unique et large répartition en inclinaison et altitude, avec des durées de vie très importantes. Ceci, allié à de longues séries temporelles d'observations

centimétriques laser disponibles depuis 10-15 ans, a permis une amélioration sensible des grandes longueurs d'onde du géoïde ainsi que des termes de marées océaniques (Schwintzer et al., 1997; Biancale et al., 2000). En particulier, l'étude du mouvement de LAGEOS observé depuis plus de 20 ans en continu par la télémétrie laser a pris une place considérable en géodynamique globale. Par exemple, l'analyse d'orbite à long terme a permis de séparer correctement aujourd'hui l'amplitude de la marée océanique à 18.6 ans, qui est estimée à 1.65 ± 0.15 cm, du rebond post-glaciaire estimé à $-2.71 \pm 0.2 \times 10^{-11}$ par an (Exertier et al., 1999; Cazenave et al., 1996; Cheng et al., 1997).

La qualité croissante de l'orbite du satellite T/P entre 1992 et 1996 (Table 2), jusqu'à 2-3 cm aujourd'hui (Lemoine et al., 1998), et l'amélioration induite de l'orbite des satellites ERS (Le Traon and Ogor, 1998), constituent une véritable avancée. Il est vrai que ces résultats sont surtout le reflet de la très bonne couverture de l'orbite des satellites altimétriques par le système DORIS sur T/P (Nouël et al., 1994), sans oublier PRARE sur ERS-2 (Andersen et al., 1998). Outre l'amélioration d'orbite obtenue par l'amélioration de la connaissance du champ de gravité, une nette diminution des erreurs d'orbite a été obtenue aussi grâce à l'introduction, plus ou moins systématique dans les modèles non gravitationnels, de coefficients d'accélération empirique et/ou stochastique à caractère "pseudo-modélisateur" (Créaux et al., 1994). Ces coefficients sont en effet estimés avec une erreur d'autant moins grande que les données sont plus nombreuses et bien réparties le long de la trajectoire (Barrotto and Berthias, 1996).

Table 2. Estimations, bilans d'erreur et résidus laser (unités en mm) estimés et/ou prévus pour les orbites de TOPEX/Poseidon de la classe JGM-2, puis JGM-3, de Jason-1 (prévu et futur), et de Starlette (niveau EGM96. ou GRIM5); d'après les réf. indiquées et (Lemoine et al., 1998; Biancale et al., 2000), and J.P. Berthias (CNES, private communication 1999).

Bilan	T/P < 95	T/P > 95	References	Jason-1	Jason (futur)	Starlette
Err. d'orbite	30-40	28		15		
Rés. laser (rms)	40-50	35-40	Tapley et al., 96			35-45
Champ de gravité	22	9	Marshall et al., 95	5	4	25-30
Marées	12-15	7	id.	5	4	10
Var. Tempor.	10	10		5	4	10
Press rad.	15-20	15-20	Tapley et al., 94	10	5	5-10
Freinage	10-15	10	Barrotto, 96	5	4	15
Coord. stat.	10	10	Tapley et al., 94	10	5	10
Mesures :			id.			
Attitude	2-3	2-3			1-2	
Réflecteurs	3-4	3-4	Schwartz, 90		1-2	1
Atmosphère	3-4	3-4	id.	3-4	2-3	3-4
err./system. Laser	5	5		5	5	5
Total (rss)	33-40	25-30		15-18	10-12	35-40
References				Vincent, AVISO, 98		Biancale, 00

En parallèle de la détermination d'orbite, des activités d'évaluation et d'analyse d'erreurs ont pris un nouvel essor dans la communauté de géodésie spatiale, avec la nécessité d'évaluer les produits de base de l'océanographie spatiale - l'orbite et le repère de référence terrestre - à un niveau de précision de l'ordre de 1 à 2 centimètres au maximum. Dans le domaine de la validation d'orbite, les données laser ont permis d'établir des points de contrôles locaux, voire régionaux, de l'erreur d'orbite à ce niveau de précision. Mais il faut toutefois ajouter que GPS peut être une solution alternative pour le futur, comme cela a été montré sur la mission T/P à titre de démonstration (Bertiger et al., 1994). Toutefois, des progrès sont encore à faire pour que le système GPS démontre qu'il est vraiment facile d'emploi vis-à-vis du calcul d'orbite; rappelons que le système n'a pas fonctionné sur la récente mission d'océanographie Geosat-Follow-On (GFO) lancée en 1998.

Dans le cas de T/P, selon le principe de comparaison de solutions (orbites) indépendantes, les solutions dynamiques (POEs) obtenues au CNES et à la NASA ont été comparées, d'une part à la solution de type "reduced-dynamic" obtenue à partir des seules données GPS (Yunck et al., 1994), et d'autre part à la solution purement laser, entièrement géométrique, obtenue en utilisant une méthode de détermination par arcs courts (Bonnefond et al., 1995). Compte tenu du caractère très différent des erreurs rencontrées dans les deux types d'approche - géométrique ou dynamique -, la comparaison de ces différentes solutions a permis de fournir une mesure spatio-temporelle fiable de l'erreur radiale des orbites dynamiques de T/P (Marshall et al., 1995; Bonnefond et al., 1999). Dans le cas des missions ERS, la télémétrie laser a également joué un rôle important (Scharroo, 1992; Scharroo and Visser, 1998), mais du à la plus basse altitude d'ERS la couverture mondiale de la trajectoire a plutôt été apportée par les données

altimétriques aux points de croisements des arcs (Le Traon and Ogor, 1998). Au niveau global, il faut noter que toutes les stations du réseau laser international ont respecté le jeu des priorités de tir définies par le nouveau service international laser (ILRS, International Laser Ranging Service) sur ERS, T/P, puis GFO, et ceci pendant plusieurs années. Cela a ainsi permis de mettre en évidence la notion d'erreur géographiquement corrélée sur au moins deux grandes zones du globe couvertes par la télémétrie laser, l'Europe et les US (Bonnefond et al., 1999).

Dans l'objectif de la mission Jason-1, avec une prévision de l'erreur radiale au niveau de 15 mm, les méthodes d'évaluation de la qualité d'orbite et de sa stabilité au cours du temps, basées sur la télémétrie laser, DORIS et GPS, conserveront donc une importance majeure pour l'océanographie. Plus localement, pour les expériences d'étalonnage en absolu des altimètres radar, comme celle réalisée en Corse dans le cadre de la mission T/P et pour la préparation de Jason-1 (Bonnefond et al., 1997), la télémétrie laser est encore la seule technique de mesure de distance capable d'atteindre, en absolu et donc en exactitude, le niveau centimétrique.

3. POSITIONNEMENT

Plusieurs groupes, notamment au CNES et à l'IGN, se sont intéressés aux performances du système DORIS pour la localisation précise des stations du réseau permanent d'orbitographie. Grâce aux mesures DORIS effectuées sur plusieurs satellites (jusqu'à 3 à l'heure actuelle), il est possible d'obtenir des exactitudes de positionnement de l'ordre de 26-28 mm à partir de plusieurs jours d'observations. Une des limitations actuelles est le faible nombre de

satellites équipés de récepteurs DORIS à bord. En observant sur plusieurs années, il est aussi possible de déterminer les vitesses de déplacement de ces stations, dues au phénomène de tectonique des plaques. Plusieurs contributions majeures ont été publiées sur ce sujet par le CNES (Soudarin et al., 1999; Crétaux et al., 1998). Il semble en particulier que DORIS soit un système apte à détecter des vitesses verticales de stations; ceci a des implications importantes dans de nombreuses études scientifiques liées à la quantification de l'élévation du niveau moyen des mers (Chambers et al., 1998; Cazenave et al., 1999). Actuellement les résultats obtenus dépendent bien évidemment de la durée totale des observations prises en compte pour estimer ces vitesses. Pour les stations les mieux observées, il est actuellement possible d'obtenir des vitesses de déplacement issus de DORIS à une exactitude de l'ordre de 5 mm/an (vérifiée par d'autres techniques de mesures indépendantes comme le VLBI, la télémétrie laser sur satellites ou le GPS). De plus, ces calculs de position de stations du réseau peuvent être obtenus de manière continue, sous forme de séries temporelles mensuelles voire hebdomadaires (Willis, 1998b). En prenant en compte les signaux globaux, qui affectent l'ensemble du réseau des balises, des variations millimétriques du géocentre ont pu être mises en évidence (e.g., Sillard, 1998); elles sont dues aux variations de masses de l'ensemble Terre-Océan-Atmosphère. Des nouveaux progrès significatifs sont attendus avec le lancement du satellite Jason-1 en 2001.

Le système DORIS présente un intérêt important pour le Service International de la Rotation Terrestre (IERS). Ses performances en terme de localisation

géodésique des stations ainsi que pour la détermination précise de la rotation terrestre sont pratiquement comparables avec celles des autres systèmes actuels déjà cités. Ses coûts d'installation et de maintenance le rendent très compétitif même par rapport au GPS. Enfin, l'IGN, en charge de l'installation et de la maintenance des balises du réseau a pris soin de répartir les stations de manière relativement homogène sur le globe tout en essayant de favoriser les co-localisations avec d'autres systèmes existants de géodésie spatiale (télémétrie laser, GPS, Very Long Baseline Interferometry, VLBI, par exemples).

Enfin, DORIS a aussi des applications pour la détermination de certains paramètres de l'atmosphère terrestre : le retard ionosphérique peut être parfaitement déterminé grâce aux deux fréquences très différentes émises par les balises et reçues à bord des satellites. De plus, des études récentes ont montré que le système DORIS, tout comme le système GPS, est capable d'estimer le retard troposphérique lié au pourcentage d'humidité au-dessus de la station, permettant ainsi de nouvelles applications en météorologie ou en climatologie.

De son côté, la télémétrie laser a beaucoup progressé ces dernières années en France et dans le réseau mondial (e.g. Nicolas et al., xxxx). Il est apparu en effet que dans un passé encore récent (1997) des mesures faites par les stations présentaient souvent des biais pouvant atteindre quelques centimètres, avec une variabilité temporelle du même niveau et d'un **spectre complexe**. Un point gênant venait de ce que **ces biais pouvaient être détectés trop longtemps (jusqu'à un an) après les observations**, rendant

l'analyse de leur origine presque impossible à réaliser correctement. Cette réalité a amené les centres d'analyse à effectuer un contrôle de qualité des mesures dans des délais beaucoup plus courts qu'auparavant. Le progrès réalisé est très sensible.

Dans ce contexte, la communauté a souhaité un renforcement de la coopération européenne pour intercomparer les erreurs d'éphémérides, telles qu'elles peuvent apparaître aux observateurs, en utilisant principalement les satellites d'altitude élevée comme LAGEOS, GPS-35 et -36 qui sont équipés de réflecteurs laser (Table 3). Le service international ILRS, qui vient d'être mis sur pied, s'inspire de ce qui a fait le succès de GPS. Ce service rénové de la coopération internationale en matière de télémétrie laser, s'est fixé comme objectif de définir un certain nombre de programmes prioritaires, d'organiser des campagnes, et d'évaluer presque au jour le jour la qualité des résultats de mesures, voire des produits qui en découlent. En particulier, la publication régulière et comparative des biais instrumentaux à différentes échelles de temps, ou celle de la précision des points normaux, crée une compétition permanente invitant les stations à satisfaire de mieux en mieux des critères de qualité et de performance. Il en ressort que la détection des biais peut se faire sans retard au niveau des stations, ce qui contribue plus efficacement à l'amélioration de l'exactitude de la mesure de distance, et surtout à une meilleure stabilité à l'échelle de quelques mois et plus encore à l'échelle de l'année ou au-delà. La tenue régulière de réunions techniques et la publication de leur compte-rendu, comme en 1996 à Shanghai et en 1998 à Deggendorf (Allemagne), ont contribué à cet effort commun international.

Table 3. Bilan d'erreurs (unités en mm) pour l'orbite de LAGEOS, pour des arcs de 10 jours. $\sigma(1998)$ est obtenu à partir des champs JGM-3 ou GRIM4, et $\sigma(2000)$ à partir de la solution plus récente GRIM5.

Source d'err.	$\sigma(1998)$	$\sigma(2000)$	Réf.
Champ de G.	4-6	2-3	Tapley, 1996
Non-gravit.	8-12	5-8	
Autres	2-3	1-2	
Position Stat.	3-5	2-3	
Vitesses	1-3	1-2	
Mvt global rés.	2-4	1-2	
Mesures las.	8-22	8-12	
Total	15-25	10-15	
			Biancale, 2000

Il résulte de cette nouvelle maîtrise de la technique laser au niveau mondial, une amélioration de la qualité des éphémérides et, peu à peu également, une amélioration de la solution laser du repère de référence terrestre ITRF publié par l'IERS (Boucher et al. 1999). Mais toutes les stations du réseau (environ 40 plus ou moins permanentes) n'ont pas suivi le même rythme dans l'amélioration de leur technologie ; la dispersion des biais laser peut encore atteindre 20-30 mm et plus pour de nombreux instruments en dehors des 12 à 15 meilleurs sites actuels, qui ont une exactitude de l'ordre de 10 à 15 mm. Ceci a entraîné une petite hétérogénéité des champs de vitesse des coordonnées des stations laser, en particulier dans la direction verticale, problème qui devient prépondérant dans le transfert d'erreur sur l'orbite des satellites océanographiques, dans la détermination du mouvement du géocentre, et plus généralement dans la contribution du laser à réalisation d'un repère de référence vertical le plus stable possible (Boucher and Carter 1997; Bonnefond et al., 1999).

Les réseaux sur lesquels s'appuient les différentes techniques spatiales ont un caractère global et mondial; ils sont gérés par des services internationaux. Les techniques se développant de manière indépendante, une coordination est nécessaire; sur le plan géodésique, il faut pouvoir intercomparer et, finalement, relier entre eux les repères propres à chacune des techniques. C'est le rôle de l'International Earth Rotation Service (IERS), en tant que coordinateur, de fournir un système de référence unique. Les co-localisations d'instruments spatiaux, pas toujours aisées à réaliser sur le terrain, doivent être aussi nombreuses que possible. A Grasse, par exemple, le site de l'observatoire réunit à la fois la télémétrie laser (deux stations fixes, pour les satellites et la Lune), le GPS (une antenne permanente), GLONASS (idem) ainsi qu'un site d'accueil pour d'autres instruments à caractère géodynamique (Nicolas et al., 1999).

4. REFERENCES VERTICALES

Un point de plus en plus important en géodésie est celui de la réalisation d'une référence verticale mondiale absolu et suffisamment stable. Tous les projets spatiaux des années à venir, qu'ils soient d'océanographie (niveau moyen des mers) ou de géophysique (champ de gravité et ses variations temporelles), requiert en effet la réalisation d'un repère de référence terrestre dont l'évolution dans le temps soit maîtrisée au niveau de quelques millimètres voire mieux.

Dans ce contexte et compte tenu des améliorations citées plus haut, qui portent à la fois sur les techniques et sur les modèles, les géodésiens ont développé des

applications visant à mesurer les déformations verticales de la croûte terrestre. Ceci à déboucher sur la mesure des déplacements séculaires dus au rebond post-glaciaire dans les zones de haute latitude (Pan and Sjöberg, 1999; Soudarin et al., 1999), ainsi que sur la mesure des déplacements dus aux effets de charges (océans et atmosphère), qui sont plutôt à caractère saisonniers (e.g., VanDam et al., 1994). A Grasse par exemple, une campagne spécifique d'observation des satellites LAGEOS et LAGEOS-2 par télémétrie laser a été réalisée entre fin 1997 et 2000, soit trois ans environ. Des solutions de coordonnées du site ont été calculées régulièrement à partir du calcul de l'orbite des deux satellites (voir performances Table 3) qui a été réalisé sur des arcs de 10 jours. Les coordonnées de deux autres stations laser du réseau européen (Graz en Autriche et Hertsmonceux au Royaume-Uni) ont également été calculées à titre de comparaison. La Figure 1 montre les variations du positionnement laser selon la coordonnée d'altitude pour les trois stations mentionnées (étoiles). Les effets sont nettement à caractère saisonnier d'une amplitude de plus d'un centimètre pic à pic. D'autre part, les effets de charge dus à l'atmosphère (champs de pression atmosphérique calculés toutes les six heures par l'European Centre for Medium Wavelength Forecast, ECMWF) ainsi que les effets de marée polaire (modifications dues au mouvement du pôle et aux variations de la rotation de la Terre) ont été modélisés suivant les recommandations de l'IERS (IERS Conventions, 1996); les variations du positionnement vertical sur les trois sites choisis sont indiquées (traits) Figure 1 également, sachant que les principaux effets de charges dus à l'océan sont supposés être de moyenne nulle sur les périodes de calcul des orbites et

des coordonnées des stations. La corrélation entre observations et effets géophysiques est très importante, ce qui montre bien la capacité actuelle des techniques spatiales de positionnement.

REFERENCES

- Andersen, P.H., K. Aksnes, H. Skonnord: 1998, Precise ERS-2 orbit determination using SLR, PRARE, and RA observations, *J. of Geodesy*, 72, 421-429
- Barlier, F., P.Y. Le Traon, A. Cazenave: 1996, Point sur les Missions d'Altimétrie Spatiale TOPEX/Poseidon et ERS-1, *Compte Rendu Acad. Sci. Paris*, 323 (IIa), 737-753
- Barotto, B. and J.P. Berthias: 1996, First results of reduced dynamics with DORIS on TOPEX/Poseidon and SPOT, *J. of Guidance and Dynamics*, 19-6, 1296-1302
- Bertiger, W.I. et al.: 1994, GPS precise tracking of TOPEX/Poseidon: results and implications, *J. of Geophys. Res.*, 99(C12), 24449-24464
- Biancale, R., et al.: 2000, A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1, *Geophys. Res. Lett.*, in press
- Bonnefond, P., P. Exertier, P. Schaeffer, S. Bruinsma, and F. Barlier: 1995, Satellite altimetry from a short-arc orbit technique : Application to the Mediterranean, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 25365-25382
- Bonnefond, P., P. Exertier, Y. Ménard, E. Jeansou, G. Manzella, S. Sparnocchia, F. Barlier: 1997, Calibration of Radar Altimeters and Validation of Orbit Determination in the Corsica-Capraia Area, in *Proceedings of the 3rd ERS Symposium*, Florence, Italy; Vol. 3, pp. 1525-1528
- Bonnefond, P., P. Exertier, F. Barlier: 1999, Geographically Correlated Errors Observed from a Laser-based Short-Arc Technique, *J. Geophys. Res.*, 104(C7), 15885-15893
- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard: 1999, The ITRF97, in *IERS Technical Note*, 27, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, France, May 1999
- Boucher, C. and W.E. Carter: 1997, Vertical references, *IERS missions, present and future -*

Report on the 1996 IERS Workshop, IERS Techn. Note 22, Obs. de Paris

Cazenave, A., P. Gegout, G. Ferhat and R. Biancale: 1996, Temporal variations of the gravity field from LAGEOS 1 and LAGEOS 2 observations, in "Global Gravity Field and its Temporal Variations", *Proceed. of IAG Symp. G3*, Springer-Verlag, New York, Vol. 116, pp. 141-151

Cazenave, A., K. Dominh, L. Soudarin, F. Ponchaud, Ch. Le Provost: 1999, Sea level changes from TOPEX/Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *Geophys. Res. Lett.*, 26(14), 2077-2080

Chambers, D.P., J.C. Ries, C.K. Shum, and B.D. Tapley: 1998, On the use of tide gauges to determine altimeter drift, *J. of Geophys. Res.*, 103(C6), 12885-12890

Cheney, R.E.: 1995, TOPEX/Poseidon scientific results - Preface, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 24893

Cheng, M.K., Shum C.K., and B.D. Tapley: 1997, Determination of long-term changes in the Earth's gravity field from satellite laser ranging observations, *J. of Geophys. Res.*, 102(B10), 22377-22390

Crétaux, J.F., F. Nouel, C. Valorge, P. Janière: 1994, Introduction of empirical parameters deduced from Hill's equations for satellite orbit determination, *Manus. Geodaetica*, 19, 135-156

Crétaux, J.F., L. Soudarin, A. Cazenave and F. Bouillé: 1998, Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system, *J. of Geophys. Res.*, 103, 30167-30181

Dunn, P., M. Torrence, R. Kolenkiewicz, and D. Smith: 1999, Earth Scale defined by Modern Satellite Ranging Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 26(10), 1489-1492

Exertier, P., S. Bruinsma, G. Métris, Y. Boudon and F. Barlier: 1999, Geodynamics from the analysis of the mean orbital motion of geodetic satellites, in *IAG Symposia - Geodesy beyond 2000 - The challenges of the first decade*, Schwartz Ed., Springer, Vol. 121, pp. 262-270

Francis, C.R.: 1992, The height calibration of the ERS-1 radar altimeter, in *Proceed. of the first ERS-1 Symp. - Space at the Service of our Environment*, ESA Spec. Pub., ESA SP-359(1), pp. 381-393

ILRS: 1999, Report of the Third General Assembly of the International Laser Ranging Service (ILRS), Florence, Italy, Sept. 20, 1999

Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthcke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, E.C. Pavlis, R.H. Rapp, T.R. Olson: 1998, The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, *NASA/TP--1998-206861*, GSFC, Greenbelt, Maryland, July 1998

Le Traon, P.Y. and F. Ogor: 1998, ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/Poseidon: the 2 cm challenge, *J. of Geophys. Res.*, 103(C4), 8045-8057

Marshall, J.A., N.P. Zelensky, S.M. Klosko, D.S. Chinn, S.B. Luthcke, K.E. Rachlin, R.G. Williamson: 1995, The temporal characteristics of TOPEX/Poseidon radial orbit error, *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 253331-25352

Ménard, Y., et al.: 1994, Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa : Additional results at Harvest, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24487-24504

Nicolas, J., P. Exertier, P. Bonnefond, F. Pierron, Y. Boudon, J.F. Mangin, F. Barlier, M. Kasser and J. Haase: 1999, Stability control of range biases on the French laser ranging stations, in *Proceed. of the EOS/SPIE Symp. on Remote Sensing*, Florence, Italy, Europto Ser., Vol. 3865, pp. 27-32

Nouël, F., J.P. Berthias, M. Delouze, A. Guitart, P. Laudet, A. Piuze, D. Pralines, C. Valorge, C. Dejoie, M.F. Susini, and D. Taburiau: 1994, Precise Centre National d'Etudes Spatiales orbits for TOPEX/Poseidon : Is reaching 2 cm still a Challenge ?, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24405-24419

Pan, M. and L. Sjöberg: 1999, Estimating present-day postglacial rebound and horizontal movements in Fennoscandia by repeated GPS campaigns in 1993 and 1997, field, *Geophys. Res. Lett.*, 26(6), 771-774

Scharroo, R. and P. Visser: 1998, Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, *J. of Geophys. Res.*, 103(C4), 8113-8127

Scharroo, R. et al.: 1992, ERS-1 Precise Orbit Determination, in *Proceed. of the first ERS-1 Symp. - Space at the Service of our Environment*, ESA Spec. Pub., ESA SP-359(1), pp. 477-482

Schwintzer, P., et al.: 1997, Long-wavelength global gravity field models : GRIM4-S4, GRIM4-C4, *J. of Geodesy*, 71, 189-208

Sillard, P., Z. Altamimi, C. Boucher: 1998, The ITRF96 realization and its associated Velocity field, *Geophys. Res. Lett.*, 25(17), 3223-3226

Soudarin, L., J.F. Crétau and A. Cazenave: 1999, Vertical crustal motions from the DORIS space-geodesy system, *Geophys. Res. Lett.*, 26(9), 1207-1210

Tapley, B.D., M.M. Watkins, J.C. Ries, G.W. Davis, R.J. Eanes, S.R. Poole, H.J. Rim, B.E. Schutz and C.K. Shum: 1996, The joint Gravity Model 3, *J. Geophys. Res.*, 101(B12), 28029-28049

Tapley, B.D. et al.: 1994, Precise orbit determination for TOPEX/Poseidon, *J. of Geophys. Res.*, 99(C12), 24383-24404

Tapley, B.D., B.E. Schutz, R.J. Eanes, J.C. Ries, M.M. Watkins: 1993, Lageos laser ranging

contributions to geodynamics, geodesy, and orbital dynamics, in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics, Geodyn. Ser.*, 24, pp. 147-174

VanDam, T.M., et al.: 1994, Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations, *J. of Geophys. Res.*, 99(B12), 23939-23950

Willis, P.: 1998a, Le système DORIS: présentation, rôle et recherches à l'IGN, *Revue Internationale de Géomatique*, 6, 2, 3, pp. 289-304

Willis, P.: 1998b, Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data: monthly and weekly comparisons toward ITRF references, *IERS Workshop*, Potsdam, Allemagne, October 1998

Yunck, T.P. et al.: 1994, First assessment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on TOPEX/Poseidon, *Geophys. Res. Lett.*, 21(7), 541-54

Figure 1. Variations du positionnement vertical sur trois sites géodynamiques européens : Grasse (France), Graz (Autriche) et Herstmonceux (Royaume-Uni). Etoiles : solutions obtenues par télémétrie laser et calculs d'orbites précises avec les satellites LAGEOS et LAGEOS-2 (altitudes d'environ 6000 km); le système de référence est l'ITRF-97. Trait : modélisation (de moyenne nulle) des effets de charges sur la croûte terrestre dus à l'atmosphère (données toutes les 6 heures de l'ECMWF), et des effets du mouvement du pôle (marée polaire).

