

40 ans de géodésie spatiale au CNES

Georges BALMINO - Pierre EXERTIER - Jean-Michel LEMOINE - Félix PEROSANZ

Groupe de recherche de géodésie spatiale, Toulouse

Faisant suite à l'état qui avait été dressé en 2010 dans cette revue par Kovalevsky et Barlier [31] et qui concernait tous les organismes impliqués en géodésie spatiale, nous décrivons, par thème et chronologiquement, les activités du CNES [49] dans ce domaine depuis un peu plus de quatre décennies. Il s'agit essentiellement de ce qui concerne l'orbitographie précise, avec des développements dans plusieurs techniques, pour des applications pratiques et scientifiques : poursuite du soutien à la télémétrie laser ; élaboration, mise en place et opération continue du système DORIS (Détermination d'orbite et radiopositionnement intégré par satellite) principalement pour l'altimétrie des océans (initialement, et en particulier, en collaboration avec les USA) ; contribution à l'amélioration et à l'évolution des GNSS (Géolocalisation et navigation par un système de satellites). Dans le cadre du GRGS [50] (Groupe de recherche de géodésie spatiale) l'intérêt du CNES pour la géodésie dynamique, i.e. l'étude des forces agissant sur tout satellite et leur modélisation afin d'améliorer nos connaissances dans diverses branches des géosciences, s'est poursuivi au fil du temps en entreprenant et soutenant des travaux majeurs sur le calcul de modèles du champ de gravité terrestre, en participant (depuis 2000) à des missions spécifiques en coopération bilatérale avec l'Allemagne et avec l'Agence spatiale européenne (ESA). Cet intérêt s'est étendu à l'application des techniques et méthodes de géodésie spatiale à la planétologie, par exemple pour l'étude de Mars. Cet article est le pendant de celui de F. Duquenne en 2019 [21] qui décrivait les travaux menés parallèlement à l'IGN pour des objectifs d'intérêt général et aussi spécifiques à cet organisme.

MOTS-CLÉS

Géodésie, satellites, systèmes de référence, orbite précise, positionnement, altimétrie, champ de gravité

Introduction

Dès le début des premiers satellites artificiels, beaucoup d'activités du CNES ont dû se concentrer sur des problèmes fondamentaux qu'il fallait résoudre : positionnement des stations d'observation, calcul des trajectoires dans les champs de force de l'environnement terrestre, définition précise des systèmes de référence et leurs liens, mesure du temps et synchronisations, toutes questions relevant de l'astronomie et de la mécanique céleste, de la géodésie classique et en général de nature métrologique. Les objectifs de toutes ces activités ont beaucoup évolué depuis leur début, partant de l'étude de la forme de la Terre et de son champ de pesanteur (Balmino, 1986 [1] ; Levallois, 1988 [18]), pour constituer désormais une discipline incontournable dans la plupart des géosciences [2].

Différents systèmes d'observation des satellites contribuent aujourd'hui à améliorer notre connaissance de la Terre (figure 1), de plus en plus de manière combinée, entre eux et bien sûr avec des mesures et informations géophysiques non spatiales. Ces techniques,

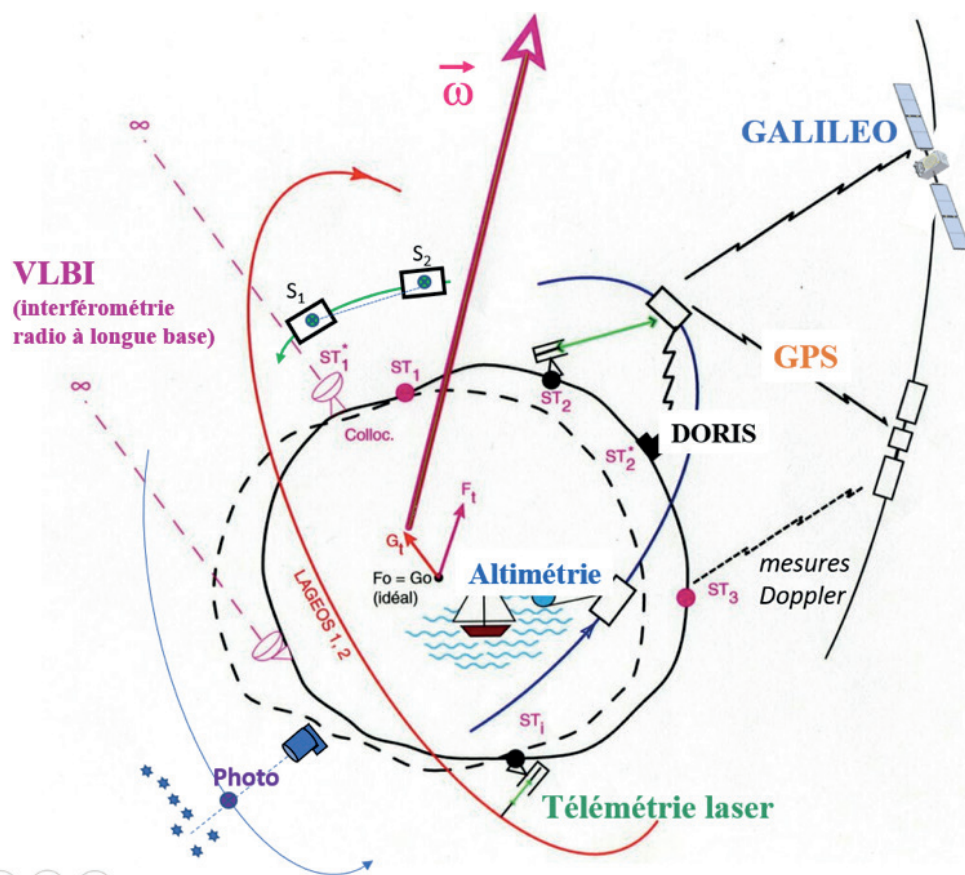


Figure 1. Les techniques d'observation des satellites en géodésie spatiale.



au départ limitées à la photographie des satellites sur fond d'étoiles et aux mesures de l'effet Doppler sur les signaux radioélectriques émis par les satellites, se sont enrichies et ont vu leur précision s'accroître constamment : télémétrie laser, système DORIS, mesures GNSS, altimétrie radar et laser (océans et calottes polaires), mesures intersatellites de distance ou de vitesse, sans oublier la technique d'interférométrie à très longue base (VLBI).

Toute mesure entre un point de la surface de la Terre (station, ou élément de surface – cas de l'altimétrie spatiale) et un satellite en orbite renseigne sur la position dans l'espace de cette surface et du satellite, i.e. sur les systèmes de référence dans lesquels sont repérés ces points, sur les mouvements et déformations de la surface, sur toutes les forces agissant sur le satellite : attraction gravitationnelle de tous les éléments constituant la Terre (parties solides et fluides avec toutes leurs variations – en particulier celles dues aux marées, à la météorologie, aux transferts de masses hydrologiques, glaciaires et océaniques) ; attraction des autres corps du système solaire ; forces appliquées à la surface du satellite (frottement dans la haute atmosphère, pressions de radiation – solaire directe, réfléchie par la Terre et émise par celle-ci dans l'infrarouge). La mesure renseigne aussi sur les propriétés du milieu traversé par l'onde électromagnétique du système et, enfin doit être interprétée – tout comme le mouvement du satellite, dans le cadre de la relativité générale vu les niveaux de précision aujourd'hui atteints. Tout ceci peut être étendu à d'autres corps du système solaire, offrant la possibilité d'étudier planètes et satellites à partir des perturbations d'une sonde spatiale en orbite autour – ou passant à proximité de ces corps, voire d'un atterrisseur posé ou mobile à leur surface (*lander*, ou *rover*).

L'ensemble de ces secteurs de recherche, très vaste, constitue un cercle vertueux (*figure 2*) qui définit la géodésie spatiale, terrestre et planétaire, vaste science en elle-même, au carrefour de l'astronomie, de la mécanique céleste, de la géophysique en général (interne, externe – incluant l'océanographie, l'hy-

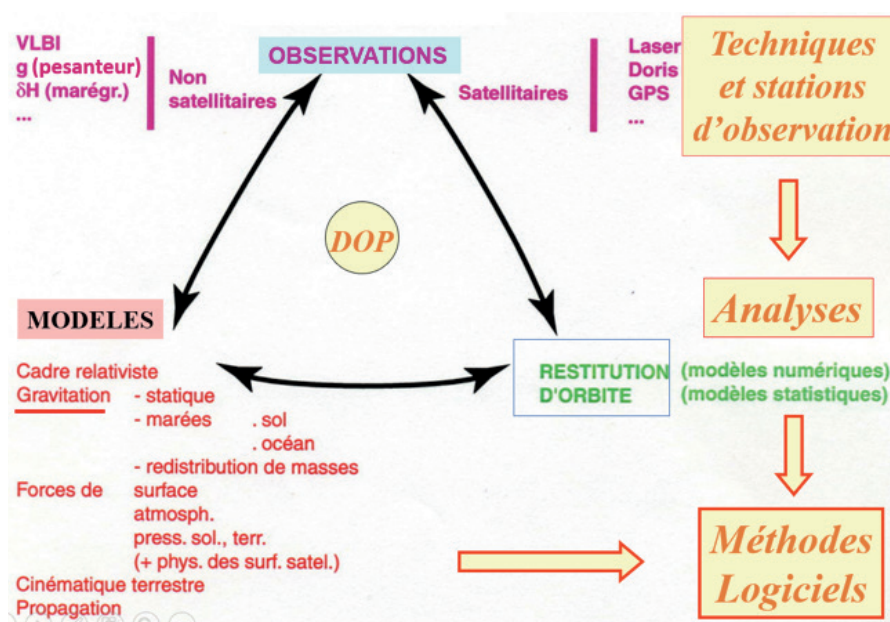


Figure 2. La géodésie spatiale : un "cercle vertueux" autour de la détermination d'orbite précise (DOP).

drologie, la glaciologie...). Le cœur de ce cercle est la détermination d'orbite précise, vaste sujet de recherche qui n'a cessé de s'étendre au fur et à mesure de l'élargissement de nos connaissances des milieux physiques concernés, de l'accroissement de la précision des systèmes de mesure, des progrès en analyse numérique et des capacités de calcul des ordinateurs. Les méthodes, algorithmes et logiciels, leur historique et l'état de l'art ont fait l'objet en France de nombreux cours et écoles d'été, à l'initiative du CNES et du GRGS, et de publications : voir par exemple [3], [4] pour les méthodes générales ; [5], [6], pour les questions d'intégration numérique spécialisée ; [7], [8] et surtout [51] pour les algorithmes. Par ailleurs, beaucoup de modèles physiques ont vu leur description et représentation harmonisées au niveau international, sous forme de "standards" – cf. [27], permettant de progresser et de mieux comparer les travaux effectués par les nombreuses équipes travaillant en géodésie spatiale.

Les débuts de la géodésie spatiale au CNES

Ceux-ci ont été décrits avec quelques détails par Kovalevsky & Barlier [31], déjà cités ; nous les avons résumés – et complétés – dans la *table 1*. Il est

clair que, très tôt après sa création (19 décembre 1961), le CNES a soutenu les activités de géodésie spatiale qui apparaissaient essentielles à son développement : soutien de la technique de télémétrie laser (développement de stations, mesures laser Terre-Lune), utilisation de son lanceur Diamant pour mettre en orbite les satellites D1C et D1D, puis STARLETTE (dont l'un des premiers objectifs fut de déterminer les termes à grande longueur d'onde des marées océaniques) et D5B qui emportait le premier accéléromètre électrostatique ultra-sensible fabriqué par l'ONERA et destiné à l'étude de la haute atmosphère et des forces de surface qui doivent être, de manière incontournable, mesurées ou modélisées.

Sur un plan général, le démarrage des activités en géodésie dynamique globale (étude de toutes les forces en jeu et amélioration des modèles – cf. *figure 2*) avec la réalisation des grands logiciels GIN et DYNAMO, le début de la coopération avec l'Allemagne dans ce domaine et la création du GRGS décidèrent de l'avenir de la géodésie spatiale en France. Celle-ci a continué à s'affirmer, en particulier au CNES : soutien renouvelé à l'évolution de la technique laser ; développement, pilotage et utilisation du système radioélectrique ascendant



| | Lancements : satellite (lanceur) | Mesures: orbitographie et positionnement | Activités géodésiques spécifiques. Campagnes - Évènements |
|------|---|--|--|
| 1965 | ASTERIX (Diamant A) | Doppler mono-freq. | |
| | FR1 (Scout, USA) | Doppler bi-freq. | |
| | 1 ^{re} station laser : CNES-CNRS/SA | | Hte-Provence ; Tirs sur BE B/C |
| 1966 | D1A = Diapason (Diamant A) | Doppler bi-freq. | Liaisons : France-Algérie Nice-Beyrouth |
| 1967 | D1C = Diadème 1 (Diamant A) D1D = Diadème 2 (id.) | Doppler bi-freq. Laser | Triangulation : Hte-Provence, Stéphanion, Colomb- Béchar (+ mes. optiques Geos A/B) |
| | 2 ^e station laser : CNES | | RCP 133 (CNES-CNRS- IGN) |
| 1970 | PEOLE (Diamant B) | Doppler bi-freq. Laser | <ul style="list-style-type: none"> • Création du département de géodésie spatiale au CNES • Décision campagne ISAGEX • Début "géodésie dynamique" |
| | Luna 17 (URSS) – réflecteurs laser (CNES-InterKosmos) sur Lunokhod 1 | Laser-Lune | |
| 1971 | | | <ul style="list-style-type: none"> • Création du GRGS (17 fév.) • Campagne ISAGEX • Début coopération France- Allemagne en géodésie dynamique |
| 1972 | | | Logiciel GIN – 1 ^{re} version ¹ Démarrage logiciel DYNAMO (calcul modèles champ gravi.) |
| 1973 | Luna 21 (URSS) – réflecteurs laser (CNES-InterKosmos) sur Lunokhod 2 | Laser-Lune | |
| | | | Fin traitements ISAGEX |
| 1975 | STARLETTE (Diamant B-P4) | Laser | |
| | D5B = CASTOR (id.) | Laser, Doppler (+ μ -accéléro ONERA) | Étude de la haute atmosphère. Forces de surface sur les satellites |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • Campagne EDOC1 (Transit) • 1^{er} modèle géopotentiel non US : GRIM1 (publié en 1976) |

Table 1. Satellites et activités géodésiques du CNES jusqu'en 1975.

(1) GIN : Géodésie par intégration numérique ; deviendra GINS
(Géodésie par intégrations numériques simultanées) en 1994. Voir aussi [51]

DORIS (principalement pour l'altimétrie des océans) ; création du centre d'analyse CNES-CLS (Collecte localisation satellites) de l'IGS (*International GNSS Service*) pour les applications scientifiques des GNSS ; poursuite des activités de modélisation du champ de gravité terrestre et soutien aux nouvelles missions dédiées à sa cartographie – non seulement pour le champ moyen (de plus en plus détaillé et précis), mais aussi ses variations temporelles. Sans oublier l'extension des méthodes et logiciels, devenue très importante, aux problèmes analogues en planétologie : positionnement, paramètres de rotation, modèles de champ de gravité. C'est ce que nous décrivons dans les chapitres suivants.

La télémétrie laser et le soutien du CNES

Dès le début de l'ère spatiale et sur la base du "best effort", le CNES et la NASA (SAO) ont travaillé ensemble afin de développer des systèmes de télémétrie laser et de les déployer sur plusieurs continents dans le but de contribuer à l'orbitographie de missions spatiales spécifiques [30]. Les données laser ont été immédiatement disponibles pour toute la communauté de géodésie impliquée dans des domaines de la géodynamique, de l'océanographie par altimétrie, de la physique fondamentale et de la propagation atmosphérique. La télémétrie laser sur satellites est très vite apparue comme un outil indispensable pour déterminer la taille et la forme de la Terre ; ses limitations – la précision de la mesure de distance – étaient essentiellement dues à la largeur des pulses laser (plusieurs nanosecondes, ns), aux temps de réaction des détecteurs et à leur stabilité, aux dateurs d'évènements ainsi qu'aux effets de propagation des rayons lumineux dans l'atmosphère.

Avec la perspective d'une amélioration rapide de la technologie laser vers un niveau de précision centimétrique, l'intérêt pour des satellites géodésiques sphériques et massifs a émergé très tôt dans la communauté. Non seulement les effets gravitationnels reflétant notamment la structure interne de la Terre et ses enveloppes fluides peuvent



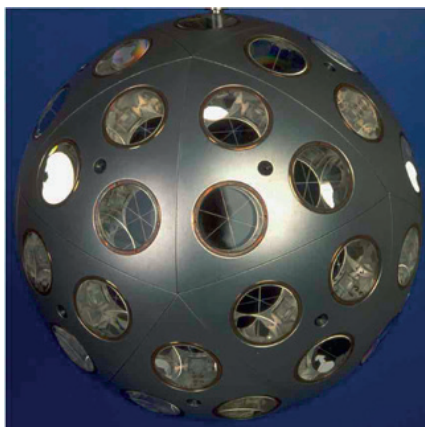


Figure 3. Satellite géodésique Starlette/Stella.

être maximisés, compte tenu du très faible rapport surface sur masse de ces cibles, mais aussi la simplicité de leur mise en œuvre et leur durée de vie dans l'espace peut permettre d'obtenir des mesures sur des périodes de temps de plusieurs décennies. Le CNES a étudié, puis mis en œuvre le premier satellite géodésique, STARLETTE lancé en 1975 (à 800 km (figure 3), qui a été suivi par le satellite américain de la NASA, LAGEOS lancé en 1976 (à 6 000 km). Parallèlement au très important succès des mesures de distance complémentaires acquises sur ces deux premières cibles géodésiques, notamment grâce au design et au nombre de réflecteurs laser utilisés, la collaboration du CNES avec les laboratoires et instituts a permis d'organiser des campagnes internationales, mais aussi de promouvoir l'amélioration de la technologie laser. Un peu plus tard en 1993, le CNES a lancé le satellite géodésique STELLA, copie du précédent, mais à une inclinaison de l'orbite très différente de manière à promouvoir l'étude de la variabilité du champ à différentes fréquences et en particulier les ondes de marées océaniques.

Concernant la technologie impliquée en télémétrie laser, l'apparition de nouveaux détecteurs (diodes compensées) ultra-compacts dont le rendement quantique est très élevé dans le vert (à 532 nm) a poussé les laboratoires comme le CERGA à l'Observatoire de la Côte d'Azur à adapter des lasers verts cadencés à une fréquence de 10 Hz (figure 4).

Avec une largeur de pulse laser de l'ordre de 0.150 ns, la précision de la mesure de distance en simple aller-retour est passée à 2-3 cm se réduisant à 2-3 mm pour les points normaux : mesures synthétiques calculées sur 30 à 120 secondes suivant les cibles et la cadence de retour des échos laser. Cet effort financé en grande partie par le CNES a permis d'atteindre une précision d'orbite (par combinaison du laser avec les données DORIS) de 3-5 cm sur le satellite océanographique TOPEX/

Poseidon, lancé en 1992, toujours dans un esprit de coopération franco-américaine. La télémétrie laser est alors devenue un outil métrologique indispensable à l'altimétrie des océans à titre de mesure ultime de l'exactitude, indépendante de DORIS et GPS, qui est vraiment atteinte par l'orbitographie de précision (voir la stabilité à un an par station laser, figure 5) [22].

Concernant l'altimétrie, le CNES, en collaboration avec l'IGN et l'OCA, a développé la station laser ultra-mobile (SLUM) [41]) afin de se doter d'un instrument de calibration des radars altimétriques en vol au niveau du centimètre [21]. Avec l'arrivée des missions Jason à partir de 2001, plusieurs campagnes internationales ont été réalisées par l'OCA, le CNES et l'IGN, notamment à Tahiti (avec l'Université de la Polynésie française), en Tasmanie (avec Geoscience Australia), en Crète

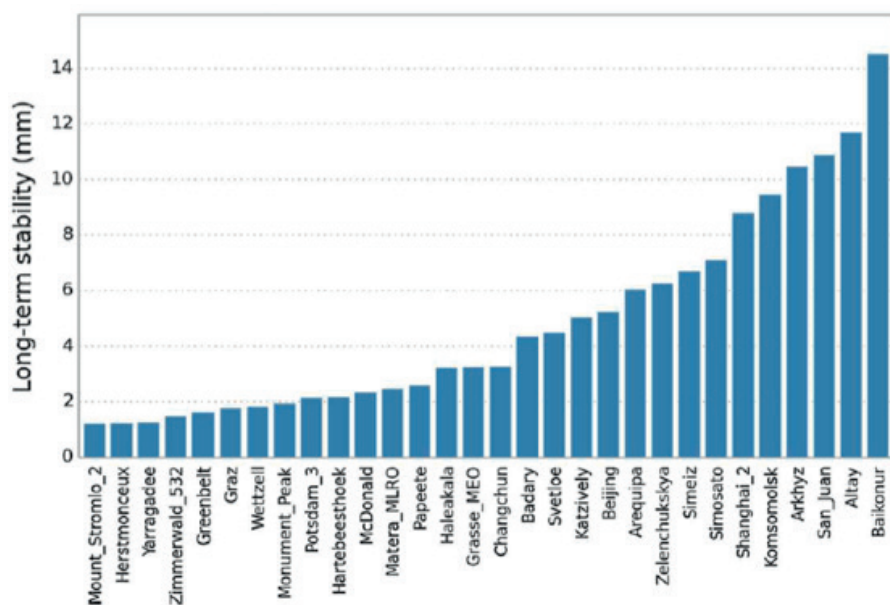


Figure 5. Stabilité (mm) à un an des mesures laser par station.



Figure 4. Observatoire Géodésique du plateau de Calern, OCA.



(avec l'Union européenne), et en Corse où le CNES et l'OCA ont établi un site d'étalonnage absolu équipé de marégraphes et stations GNSS et DORIS permanentes en plus des visites récurrentes de la SLUM entre 1997 et 2008.

Avec la possibilité d'embarquer à bord de la mission Jason-2 en juin 2008, un dateur d'évènement ultra-précis (quelques picosecondes, ps) associé à un détecteur compensé extrêmement petit à côté du bloc de réflecteurs laser développés pour la série des Jason, le CNES a développé le premier instrument de transfert de temps par lien laser (T2L2), que l'OCA a imaginé, puis exploité pendant près de neuf ans [23]. Grâce aux performances atteintes par cet instrument (synchronisation d'horloges à 2-3 ps sur 30 secondes en vue commune), les acteurs de la mission ont pu faire la démonstration, au-delà de la géodésie et dans un cadre métrologique propre au temps-fréquence, d'une grande maîtrise des liens optiques spatiaux ouvrant sur des applications en physique fondamentale, sur la synchronisation de stations géodésiques au sol à 2-3 ns en vue non commune [24] et sur l'étude des oscillateurs DORIS en vol étant soumis à des perturbations de fréquence au passage dans l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud.

L'avenir des liens optiques se situe maintenant dans une utilisation combinée entre télécom et géodésie/transfert de temps. Le CNES continue son soutien en direction d'une technologie laser de pointe qu'il faut sans cesse réinventer, notamment avec des lasers à haute cadence (de un à plusieurs dizaines de kHz), des pulses d'une largeur de 10 ps voire moins, des détecteurs très petits de l'ordre de 40 μm et l'utilisation de deux couleurs simultanément dans le but d'éliminer les effets de propagation dans l'atmosphère [16]. En outre, avec l'arrivée de la constellation GALILEO, la télémétrie laser, aidée par un développement de réflecteurs plus petits et d'un meilleur design, peut être envisagée comme l'un des moyens de suivi continu des orbites et donc, à terme, un meilleur potentiel de positionnement/navigation pour le réseau permanent au sol tout comme pour des satellites LEO. Avec l'objectif de rééquiper

l'Observatoire géodésique Fondamental de Tahiti, en collaboration avec le NASA/Goddard, le CNES avec les autres partenaires de la géodésie spatiale pousse pour une introduction de techniques géodésiques revisitées dans le Pacifique Sud et surtout des stations de poursuite autonomes dont la télémétrie laser. Les études sont lancées.

Le système DORIS pour la géodésie

Le système DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) a été conçu et développé au début des années 1980 par le CNES, l'IGN et le GRGS pour déterminer avec une grande précision les orbites des satellites altimétriques dédiés à la surveillance océanique.

Ce système est basé sur des mesures de décalage Doppler de signaux radiofréquences (400 MHz et 2 GHz) transmis par un réseau de stations au sol, utilisées comme points de référence à la surface de la Terre. Le déploiement de ce réseau a commencé en 1986 grâce à la très forte implication de l'IGN dans cette entreprise et grâce à la mobilisation de ses nombreux contacts avec les agences géographiques et géodésiques nationales. Les stations, au nombre de trente-deux à l'origine, étaient équipées avec la première génération de balises DORIS et avec des antennes ALCATEL, volumineuses, de type "A". La densification du réseau s'est poursuivie au cours de la première décennie d'existence de DORIS, jusqu'à un total de cinquante-quatre stations en 1999. Parallèlement, les antennes Alcatel étaient progressivement remplacées par des antennes Starec de type "B", plus légères et plus sveltes que les premières. Il existe aujourd'hui environ soixante stations DORIS uniformément réparties dans le monde, et ces stations sont hébergées par quarante-huit agences internationales d'accueil (cf. Duquenne, *ibid.* – fig. 22).

Le système de localisation radioélectrique DORIS a été embarqué pour la première fois par le satellite SPOT-2 qui a enregistré les premières mesures DORIS le 3 février 1990. DORIS, qui avait été emporté à titre expérimental sur ce satellite avec un objectif de fonctionnement

de six mois, a fonctionné parfaitement pendant plus de dix-neuf ans ! Depuis lors, le système a fonctionné en continu sur dix-huit satellites, dont les satellites d'imagerie spatiale SPOT-2/3/4/5, Pléiades1A-1B et les missions d'altimétrie pour les observations océaniques et/ou hydrologiques et glaciologiques telles que TOPEX-Poséidon, Envisat, Jason-1/2/3, HY-2A, Saral / AltiKa, Sentinel3-A / B. Sur les dernières missions telles que Sentinel-3A / 3B, le système DORIS permet d'obtenir une précision d'orbite radiale de l'ordre de 8-10 mm. Les données DORIS sont utilisées à la fois pour la détermination de l'orbite en temps réel à bord du satellite (navigateur DIODE, dont la première version a volé en 1998) et des orbites précises produites en temps différé, avec un délai de deux jours à quelques semaines, pour une utilisation avec les données altimétriques fournies par ces différentes missions.

En plus de la détermination précise de l'orbite, le système DORIS peut aussi localiser les positions au sol avec la même précision intrinsèque. Les données sont également utilisées pour déterminer les paramètres d'orientation de la Terre (EOP) et peuvent permettre de suivre le mouvement du géocentre de la Terre. DORIS est l'une des quatre techniques géodésiques spatiales qui contribuent au référentiel terrestre international ITRF.

Parallèlement au déploiement du réseau de stations sol et des récepteurs à bord, le CNES et l'IGN se sont donc impliqués dans l'exploitation scientifique des données DORIS. En 1994, les deux premiers centres d'analyse, IGN et LEGOS/GRGS, ont contribué pour la première fois au calcul de l'ITRF. Cette participation s'est poursuivie avec un nombre croissant de centres d'analyse à l'occasion des ITRF-2005, 2008, 2014 et, tout récemment, 2020. Le nombre croissant de centres d'analyse a conduit le 1^{er} juillet 2003 à la création du service international DORIS (IDS) de l'IAG. Cette création est l'aboutissement d'une phase pilote démarrée en 1999. En 2005 les centres d'analyse participant à l'ITRF étaient au nombre de quatre : IGN/JPL, LEGOS/CLS, INASAN, NASA/GSFC. En 2006,



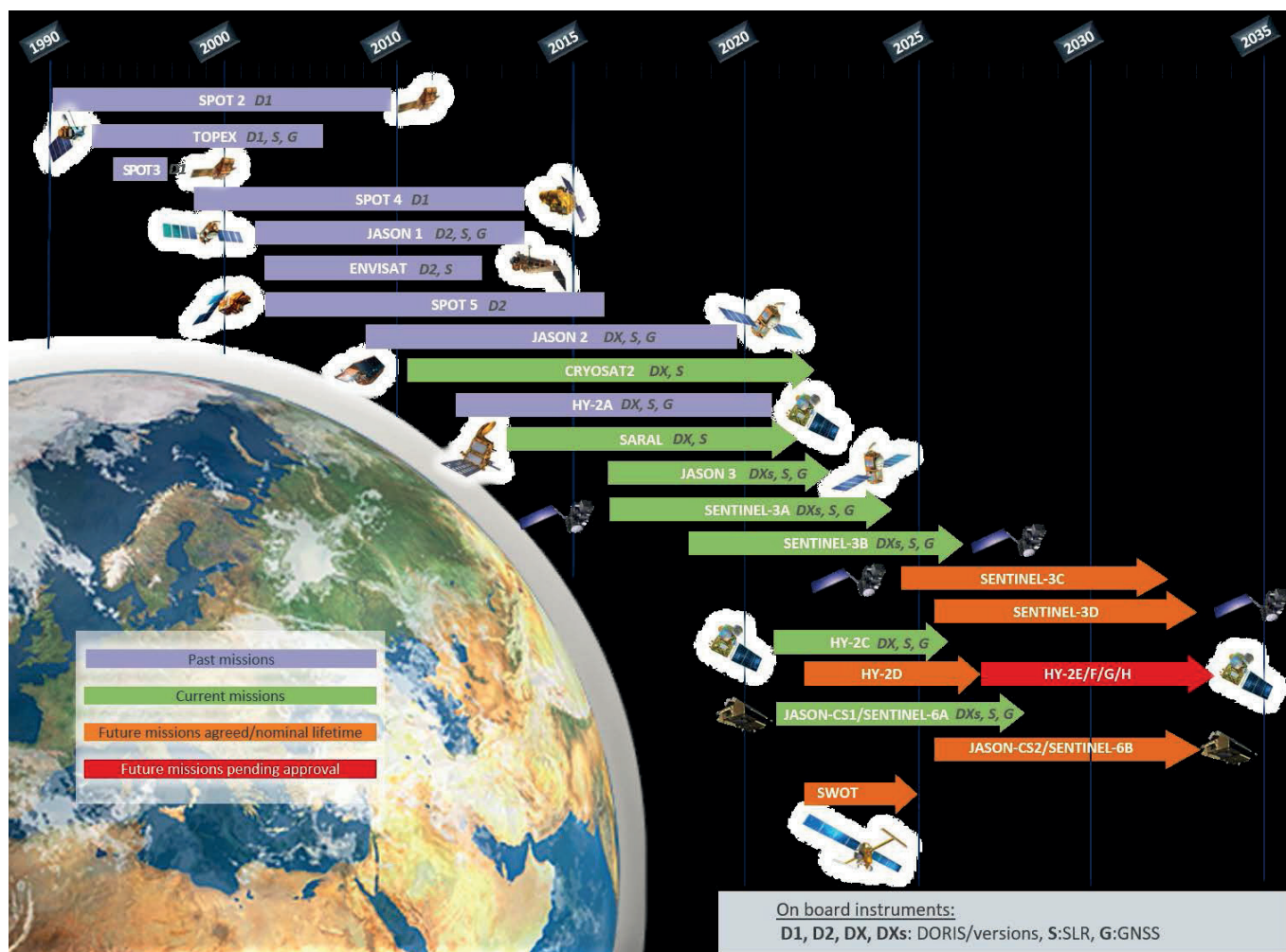


Figure 6. Liste des missions géodésiques porteuses d'un récepteur DORIS.



la responsabilité du centre d'analyse du CNES a été transférée du laboratoire mixte LEGOS au laboratoire mixte GET de l'Observatoire Midi-Pyrénées, toujours avec un support opérationnel et algorithmique de CLS ; le nom du centre d'analyse devient CNES/CLS. En 2009 est créé le centre de combinaison des produits IDS et sept centres d'analyse de l'IDS participent à l'ITRF2008 : IGN/JPL, CNES/CLS, INASAN, NASA/GSFC, ESO, GOP, Geosciences Australia.

Au cours des trente dernières années, DORIS a élargi le champ de ses applications scientifiques :

1. DORIS a contribué au suivi des changements du niveau moyen de la mer, tant au niveau régional que mondial, en utilisant les données des missions TOPEX / Poséidon et Jason 1, 2 et 3 [45] ;
2. grâce aux orbites précises calculées pour les missions Envisat, CryoSat-2, Saral / AltiKa et Sentinel3-A / B, le

système DORIS a participé au suivi de l'évolution de la hauteur de la calotte glaciaire antarctique pendant 25 ans [47], [26], [46] ;

3. DORIS contribue à la réalisation et à la maintenance du système de référence terrestre ITRF avec des performances accrues chaque fois [38], [39], [19] ;
4. la colocalisation de DORIS avec des marégraphes permet de suivre sur un même site les mouvements verticaux du sol mesurés par la technique DORIS et les variations du niveau de la mer par rapport au sol enregistrées par le marégraphe afin d'en déduire les variations absolues de niveau de la mer et de pouvoir les comparer aux valeurs obtenues par altimétrie satellitaire [44], [25] ;
5. DORIS observe et permet l'analyse de phénomènes géophysiques tels que les tremblements de terre ou les événements périodiques d'inflation et de déflation des volcans,

les mouvements des plaques tectoniques, le soulèvement ou l'affaissement local du sol [38].

Les instruments DORIS (à bord des satellites et au sol), ainsi que le système de surveillance et de contrôle DORIS ont fait l'objet d'une amélioration continue au fil des années. La gestion centralisée CNES/IGN a permis de maîtriser le développement du réseau et d'atteindre plus facilement un objectif primordial : le réseau DORIS est aujourd'hui le réseau géodésique le plus homogène, stable et durable au monde. La plupart des stations DORIS sont colocalisées avec d'autres techniques géodésiques spatiales (télémétrie laser par satellite, interférométrie à très longue base et systèmes mondiaux de navigation par satellite) et des marégraphes, favorisant ainsi les comparaisons technologiques et les progrès scientifiques.



En 30 ans, la précision radiale des orbites précises est passée de 13 cm à moins de 1 cm. Le navigateur DORIS-DIODE embarqué sur les satellites calcule la trajectoire du satellite en temps réel avec une précision radiale de 2 à 3 cm. La contribution de DORIS à l'ITRF a progressé de la même manière avec de nouvelles applications possibles.

Des progrès supplémentaires sont attendus dans la prochaine décennie avec la balise de 4^e génération et l'antenne de 3^e génération, dont les déploiements ont commencé en 2019. L'antenne de 3^e génération (antenne Starec "C") garantit la localisation du centre de phase 2 GHz avec une précision de ± 2 mm. L'avenir du système DORIS est assuré au moins jusqu'à l'horizon 2033 (*figure 6*) grâce aux futures missions ayant décidé l'emport d'un récepteur DORIS.

Cependant le système DORIS ne restera pertinent et performant qu'au prix d'une remise en question et d'une amélioration permanentes. C'est dans cet esprit qu'a été organisée en 2018 la première "retraite" IDS, afin d'élaborer un plan stratégique pour les années à venir. Une vingtaine de recommandations ont été présentées aux parties prenantes lors du comité de pilotage DORIS (CNES / IGN) fin 2019. Ces recommandations s'articulent autour de trois axes principaux :

- élargir la communauté DORIS ;
- faire évoluer la technologie ;
- améliorer l'infrastructure et le traitement des données.

Certaines recommandations sont déjà mises en œuvre ; d'autres sont en préparation. Des études sont par exemple en cours pour le développement d'un futur récepteur embarqué miniaturisé couplant les signaux GNSS et DORIS. Une autre étude débute, concernant l'emport d'un récepteur DORIS à bord d'un satellite Galileo expérimental en compagnie des trois autres techniques géodésiques, afin de constituer une plateforme satellitale dédiée au système de référence terrestre.

Si cet effort d'amélioration se maintient, le système DORIS a un bel avenir devant lui et contribuera au succès de nombreuses missions futures.

Les GNSS et la géodésie spatiale

Le potentiel des systèmes de navigation par satellite pour la géodésie, devint évident dès les années 1980 avec l'apparition de récepteurs spécifiques capables de mesurer la phase du signal et donc la distance satellite-récepteur avec une précision millimétrique. Il restait à déployer un réseau mondial de ces récepteurs, ce qui nécessita une coopération internationale au sein du CIGNET (*Cooperative International GPS Network*), puis d'un service scientifique dédié : l'IGS. Ainsi, dès le début des années 1990, un nombre croissant de stations géodésiques GPS furent installées. Selon le principe rappelé dans le paragraphe "introduction" de cet article, les mesures GPS permirent la restitution précise des orbites des satellites de cette constellation ainsi que l'estimation de paramètres géodésiques fondamentaux comme les coordonnées des stations ou le mouvement du pôle. Ce système de navigation GPS s'est ainsi imposé comme une technique géodésique spatiale à part entière au même titre que DORIS ou le SLR. Ces potentialités du GPS n'ont pas échappé au CNES et à l'IGN qui, très tôt, s'associèrent pour contribuer à l'effort international de densification du réseau mondial de stations de l'IGS avec les sites de Toulouse, Grasse, Kerguelen, Tahiti, Hartebeesthoek (Afrique du Sud) et Kourou.

Le lancement en 1992 du satellite TOPEX/Poséidon (coopération NASA-CNES) fut, lui aussi, un élément déterminant pour les activités du CNES sur GPS. Ce satellite altimétrique embarquait pour la première fois un récepteur GPS de qualité géodésique au titre de démonstrateur aux côtés des équipements opérationnels DORIS et Laser. L'un des avantages considérables de la poursuite de satellites LEO depuis une constellation et non depuis un réseau de stations au sol, est que la trajectoire du LEO est observée de façon continue, quelle que soit son altitude. Cela faisait naturellement du GPS une technique privilégiée dans tous les scénarios des futures missions dédiées au champ de gravité (et donc orbitant

à des altitudes basses inférieures à 500 km). Ce fut donc la mission TOPEX/Poséidon qui motiva une évolution majeure du logiciel GIN afin qu'il soit capable d'estimer simultanément les orbites d'une constellation de satellites MEO et celle d'un LEO [42]. GIN devint GINS comme évoqué précédemment. Cette capacité essentielle permit d'exploiter, à partir de 2000, les données de la mission CHAMP suivie par GPS et SLR (coopération NASA-GFZ-CNES) et de gagner un ordre de grandeur sur la précision des modèles de champ de gravité comme détaillé dans la section suivante.

Au milieu des années 2000, le traitement géodésique de données GPS avait atteint une grande maturité grâce à l'IGS et une décennie d'efforts de densification du réseau de stations, d'amélioration de la qualité des produits et des modèles utilisés pour les traitements. À cette période-là, les "Centres d'analyse" (CA) de l'IGS exploitaient les logiciels qu'ils développaient eux-mêmes, comme GIPSY (NASA/JPL), GAMIT (MIT) ou BERNES (CODE) par exemple, afin de délivrer les produits qui étaient évalués et combinés par un "coordinateur". Cette "compétition amicale" fut le moteur de progrès considérables et fit de l'IGS la référence mondiale de la géodésie à base de GNSS.

Le logiciel GINS du CNES était doté de fonctionnalités similaires à celles de ces logiciels et était exploité en routine pour le calcul des orbites des satellites GPS dans le cadre de l'expérience CRC de l'IERS [14]. La capacité à résoudre les ambiguïtés des mesures de phase aux échelles globales (gage d'un gain sensible de précision) faisait initialement défaut. Au même moment, des travaux menés au sein de l'équipe "orbitographie" du CNES aboutirent à une approche novatrice pour résoudre ce problème. L'idée consistait à traiter les mesures de phase GNSS dans un formalisme où le nombre entier de cycles de phase (appelé ambiguïtés entières), les biais "hardware" des satellites et des récepteurs ainsi que les biais d'horloge des satellites étaient cohérents et observés individuellement [33]. Le traitement des données se





faisait sans différentiation, c'est-à-dire sans nécessiter de combiner entre elles les mesures de plusieurs récepteurs, ce qui était véritablement révolutionnaire. Ainsi, l'idée d'une part d'intégrer l'IGS comme CA en fournissant à l'aide de GINS des produits géodésiques "finaux" (les plus précis possible avec un délai d'une dizaine de jours) et d'autre part d'implémenter ce formalisme novateur de résolution des ambiguïtés entières dans ce logiciel, apparut comme une évidence. La candidature fut déposée en 2007 au titre du GRGS et sur les bases d'un partenariat entre le CNES et sa filiale CLS.

À l'issue d'un long, mais formateur, processus d'évaluation, le GRGS intégra le cercle des CA de l'IGS au mois de mai 2010 [52] et délivre depuis à la communauté scientifique internationale des produits sous l'acronyme "GRG" [53]. Au-delà de la participation à ce service scientifique international, ces produits bénéficiaient de plus d'une propriété intrinsèque remarquable qui fit leur succès [35]. En effet, l'utilisation combinée des biais GRG "hardware" et d'horloge des satellites GPS permettait de conserver la nature entière des ambiguïtés de phase en mode non différencié, ce qui ouvrait

la porte à un nouveau mode de positionnement appelé PPP-AR (*Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution*). Cela fut exploité au travers de nombreuses collaborations scientifiques soutenues par le CA pour des objectifs aussi variés que la calibration d'altimètres spatiaux [20], l'étude des modes vibratoires d'un glacier [33], la comparaison d'horloges atomiques [43], l'étude des déformations de charge hydrologiques [40], la mesure des déformations co-sismiques [12] ou le suivi de drones marins [18] par exemple. Cette méthode "CNES" de fixation des ambiguïtés entières est également valorisée depuis 2010 dans le cadre du "Real Time Service" de l'IGS dont les applications, bien que remarquables, sortent du contexte de cet article.

Les années 2010 virent aussi la revitalisation de GLONASS et surtout le déploiement des constellations Galileo et Beidou. Si les perspectives d'une hybridation de ces systèmes étaient alléchantes, différents obstacles devaient être franchis comme équiper un nombre suffisant de stations géodésiques de récepteurs multi-GNSS et faire évoluer les outils de traitement. L'IGS qui avait anticipé en créant le groupe de travail MGEX pour fédérer la communauté

autour de ces questions, joua encore un rôle déterminant [37]. Pour ce qui est du CNES, ses liens "naturels" avec l'ESA d'une part et son implication dans le groupe de travail interministériel Galileo d'autre part, le poussèrent naturellement à porter son intérêt sur ce système. L'ambitieux projet REGINA fondé sur le déploiement d'un réseau mondial de près de quarante stations multi-GNSS fut décidé en 2012 en partenariat avec l'IGN [54]. Au-delà d'une forme de souveraineté nationale et d'autonomie pour l'accès aux données, ce réseau de stations particulièrement bien distribué sur le globe et souvent colocalisé avec des stations DORIS a joué et continuera de jouer un rôle majeur pour la géodésie. En parallèle, le logiciel GINS fut adapté pour pouvoir traiter les données des systèmes GLONASS en 2011, puis Galileo en 2012.

Il fallut cependant attendre 2017 et un nombre de satellites suffisant pour que les produits GRG Galileo intègrent comme pour GPS la propriété permettant de résoudre les ambiguïtés entières de phase en mode non différencié [28]. Depuis, le CNES fournit les produits d'orbite/horloge "finaux" des satellites Galileo en support au "Galileo Reference Center" et à la GSA (*European GNSS*

| Modèle | Année | Degré Max. | N.bre de Satellites | N.bre de Stations | 1°x1° Δg | 1°x1° Δg-alt. | Constituants marées océan |
|---------|-------|------------|---------------------|-------------------|--------------|---------------|---------------------------|
| GRIM1 | 1975 | 10 | 10 | 36 | | | 0 |
| GRIM2 | 1976 | 23 | 20 | 38 | 5°x5° : 1638 | | 0 |
| GRIM3 | 1981 | 36 | 21 | 95 | 25001 | 27916 | 0 |
| GRIM3B | 1983 | 36 | 21 | 109 | 18504 | 38345 | 0 |
| GRIM4S1 | 1990 | 50 | 27 | 220 | - | | 0 |
| GRIM4C1 | 1990 | 50 | 27 | 220 | 22527 | 28258 | 0 |
| GRIM4S2 | 1991 | 50 | 29 | 296 | | | 12 |
| GRIM4C2 | 1991 | 50 | 29 | 296 | 22527 | 28258 | 12 |
| GRIM4S3 | 1992 | 60 | 31 | 300 | - | - | 12 |
| GRIM4C3 | 1992 | 60 | 31 | 300 | 22527 | 28258 | 12 |
| GRIM4S4 | 1995 | 70 | 34 | 323 | - | - | 8 |
| GRIM4C4 | 1995 | 72 | 21 | 300 | 25070 | 29718 | 12 |
| GRIM5S1 | 1999 | 99 | 31 | 438 | - | - | 14 |
| GRIM5C1 | 1999 | 120 | 31 | 438 | 38139 | 35873 | 14 |
| GRIM5S2 | 2001 | 99 | 31 | 438 | - | - | 14 |

Table 2. Les modèles GRIM. À partir de 1990 furent calculées séparément les solutions S avec des observations satellitaires seules et les modèles combinés C avec ajout de valeurs moyennes de données de surface (gravimétriques pures Δg, et déduites de l'altimétrie océanique Δg-alt.).

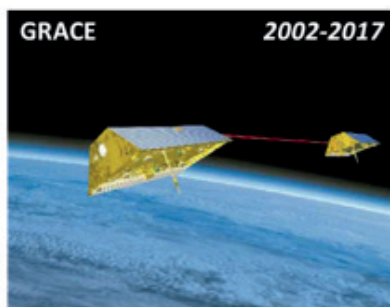
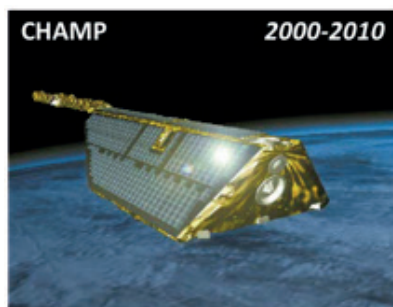


Figure 7. Les trois missions dédiées à la cartographie du champ de gravité terrestre.

Agency) comme produit externe de référence. Enfin, l'intérêt de l'hybridation GPS-Galileo en mode PPP-AR put lui aussi être démontré [29].

En 2021, l'ITRF2020 devrait être publié sur la base d'une combinaison des contributions de différents CA des différents techniques géodésiques. Il inclura pour la première fois une contribution GNSS française basée sur le traitement de vingt années de données GPS, treize années de GLONASS et quatre années de Galileo réalisée par la société CLS pour le CNES et le GRGS.

La détermination de modèles de champ de gravité

La connaissance du champ de gravité de la Terre (du corps central, plus généralement) est indispensable à tout calcul d'orbite (figure 2). Utilisant au début les modèles américains (*Standard Earth 1 & 2*, [55]), le CNES s'est très tôt lancé dans la détermination de tels modèles avec le développement d'un logiciel, GIN (renommé GINS quelques années plus tard – cf. table 1) basé sur l'intégration numérique des équations de trajectoire et complété par un ensemble de programmes d'algèbre linéaire et de gestion spécifiques au domaine (logiciel DYNAMO). Simultanément, une équipe allemande de l'Université Technique de Munich développait une méthode analytico numérique de détermination des harmoniques dits "de résonance", une classe de coefficients parmi l'ensemble de la série d'harmoniques sphériques représentant le potentiel gravitationnel.

Un accord de coopération entre le CNES et cette équipe fut passé en 1971 qui, renouvelé plusieurs fois depuis – avec les groupes allemands successive-

ment en charge de ces activités (DGFI, puis GFZ) et dans le cadre du GRGS, fut à la base de travaux et de projets communs depuis un demi-siècle. Les méthodes sous-jacentes à ces activités sont décrites en [9]. Les modèles ainsi produits, du nom de GRIM, couvrent la période 1975 à 2001 ; la table 2 résume leurs caractéristiques principales.

Les deux décennies suivantes virent l'avènement de trois missions dédiées à la cartographie fine du champ de gravité (figure 7), dont les principes avaient été décrits dès les années soixante, toutes sur orbite basse, munies d'accéléromètres ultra-sensibles et portant des récepteurs GPS et des réflecteurs laser pour la trajectographie.

Le CNES participa directement à la première, CHAMP (conduite par le GFZ, Allemagne), en fournissant le micro-accéléromètre STAR développé par l'ONERA. GRACE, mission de la NASA

et du DLR (agence spatiale allemande), constituée de deux satellites co-orbitant proches l'un de l'autre, permettait – outre le suivi par GPS –, la mesure de leur vitesse relative (avec un radar en bande Kb), avec pour objectif principal la détermination des variations temporelles du champ gravitationnel, donc complémentaire à GOCE dont le but était d'affiner notre connaissance de sa moyenne (champ statique). Cette troisième mission, de l'ESA, sur l'orbite la plus basse possible (altitude ~250 km, nécessitant un système de compensation des forces de surface) embarquait, pour la première fois au monde, un gradiomètre constitué de six micro-accéléromètres pour la mesure directe, en orbite, du gradient de gravité. Le CNES a soutenu les équipes du GRGS travaillant sur le traitement des données de ces nouvelles missions, la détermination de nouveaux modèles et leur utilisation.

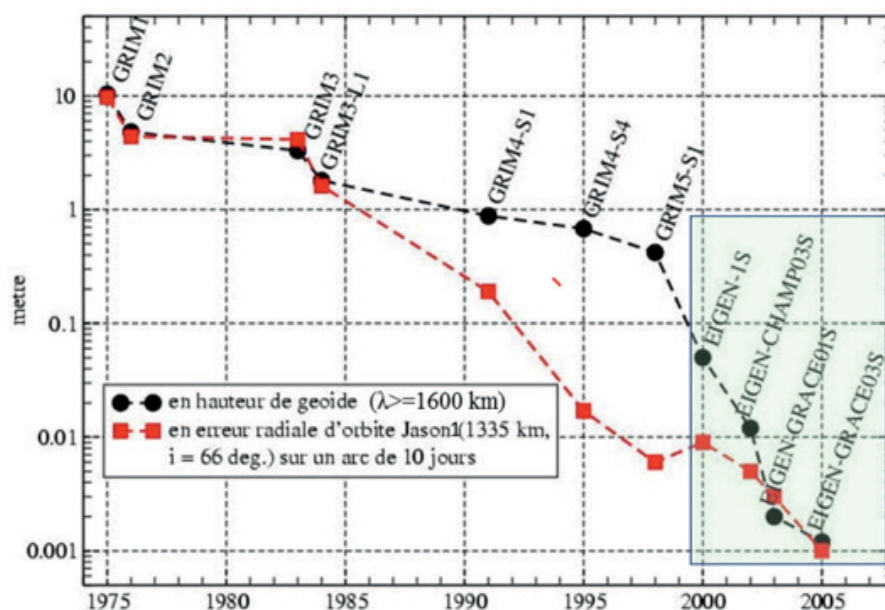


Figure 8. Évolution sur trente ans de la précision estimée des modèles de champ : hauteur du géoïde et connaissance radiale de l'orbite d'un satellite altimétrique.



La figure 8 montre le progrès sur trente ans des modèles moyens franco-allemands (en 2000 et, après le lancement de CHAMP, leur nom générique fut changé de GRIM en EIGEN pour les solutions dérivées de CHAMP ou/et de GRACE).

À l'évidence CHAMP et GRACE ont permis un bond fantastique en résolution et précision, ensuite augmentées par la mission GOCE. Sur la figure 9 on peut apprécier ce gain, en termes d'anomalies de gravité sur l'Europe et le bassin méditerranéen.

De nombreuses équipes dans le monde déterminent aujourd'hui des modèles de potentiel ; ils sont archivés au GFZ [55]. Les modèles produits par l'équipe GRGS du CNES sont parmi les meilleurs. En particulier, les solutions mensuelles (et même à dix jours) obtenues à partir de la mission GRACE [56] sont les plus riches spectralement et constituent des données d'entrée importantes pour l'étude globale du cycle de l'eau et plus généralement des transferts de masse (figure 10).

On a vu ainsi naître, avec GRACE, une nouvelle discipline (que l'on pourrait appeler l'hydrologie spatiale – en référence à l'altimétrie satellitaire), dont les impacts sociétaux sont évidemment très grands. C'est pourquoi une nouvelle mission, GRACE-FO (*Follow On*), a été lancée par la NASA en 2018 après la fin de GRACE, pour continuer à suivre les variations temporelles des transferts de masse à l'échelle planétaire. Cette mission GRACE-FO, à laquelle participe l'équipe GRGS du CNES, est très semblable à la précédente, mais possède un instrument supplémentaire (LRI : *Laser Ranging Interferometer*) qui permet de mesurer la distance entre les deux satellites avec une précision très supérieure. Le problème se pose d'assurer la continuité de ce type de système d'observation globale dans l'avenir, à l'instar de l'altimétrie spatiale. La NASA, l'ESA, le DLR et le CNES étudient comment faire suite à GRACE-FO, si possible en améliorant encore les performances. Plusieurs scénarios sont actuellement envisagés : deux couples de satellites co-orbitants, dans des plans d'inclinaisons

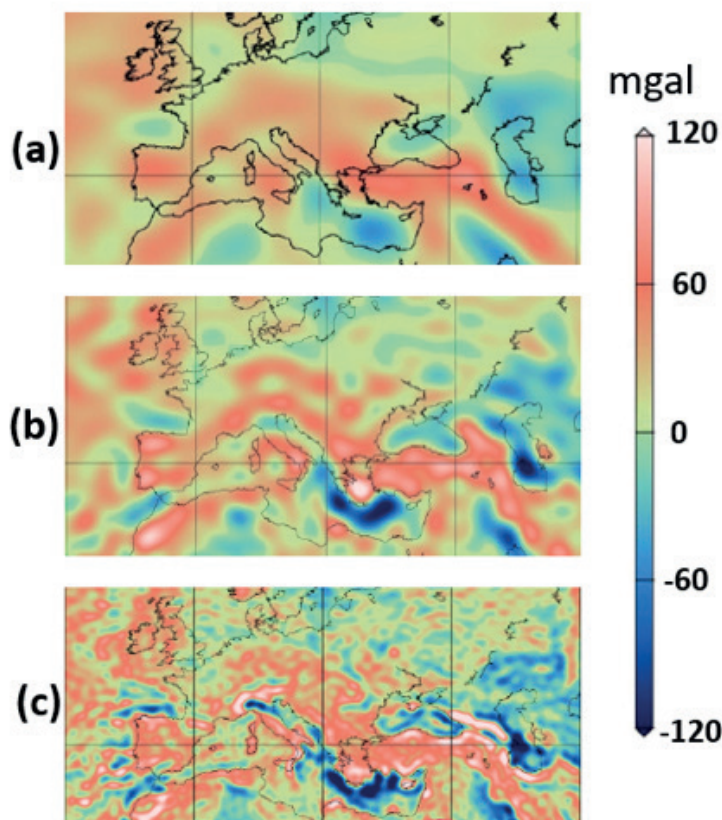


Figure 9. Les progrès des modèles statiques franco-allemands dus aux missions de gravité dédiées. Anomalies de gravité (à l'air libre). (a) GRIM5-S1 : 31 satellites (1967-1999) ; (b) CHAMP (2000-2009), résolution ~300km ; (c) GOCE (2009-2013), plus GRACE (2002-2014), plus satellites "laser" (2002-2018), résolution ~80 km (modèle GOCE-DIR-R6).

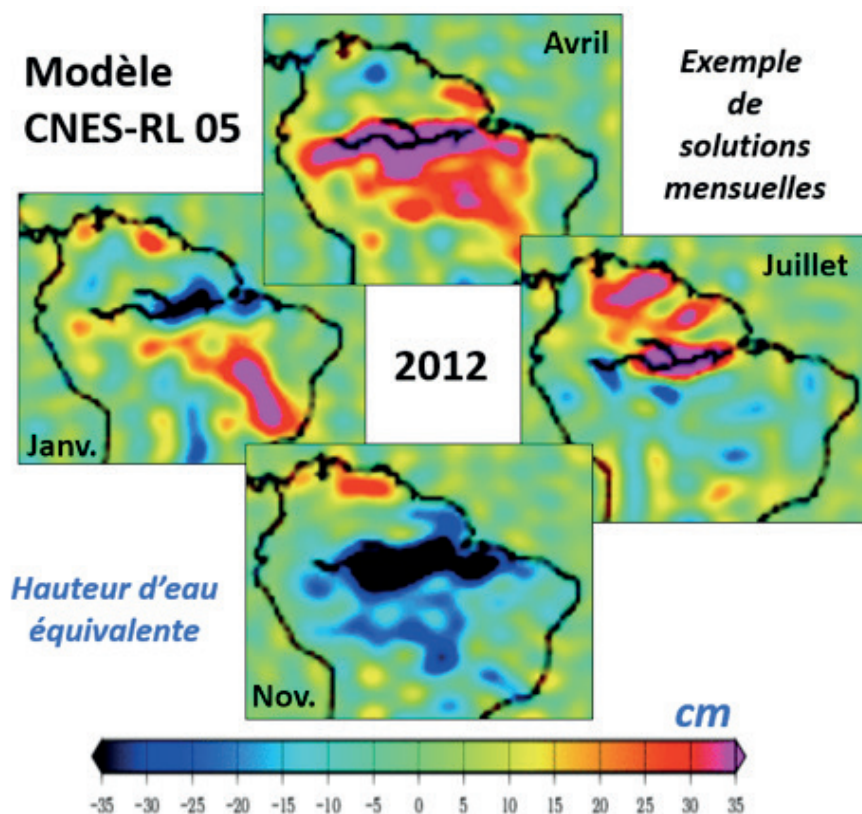


Figure 10. Exemple de changements temporels du champ de gravité (ici représentés en variations équivalentes de hauteur d'eau). Solution CNES-RL 05.

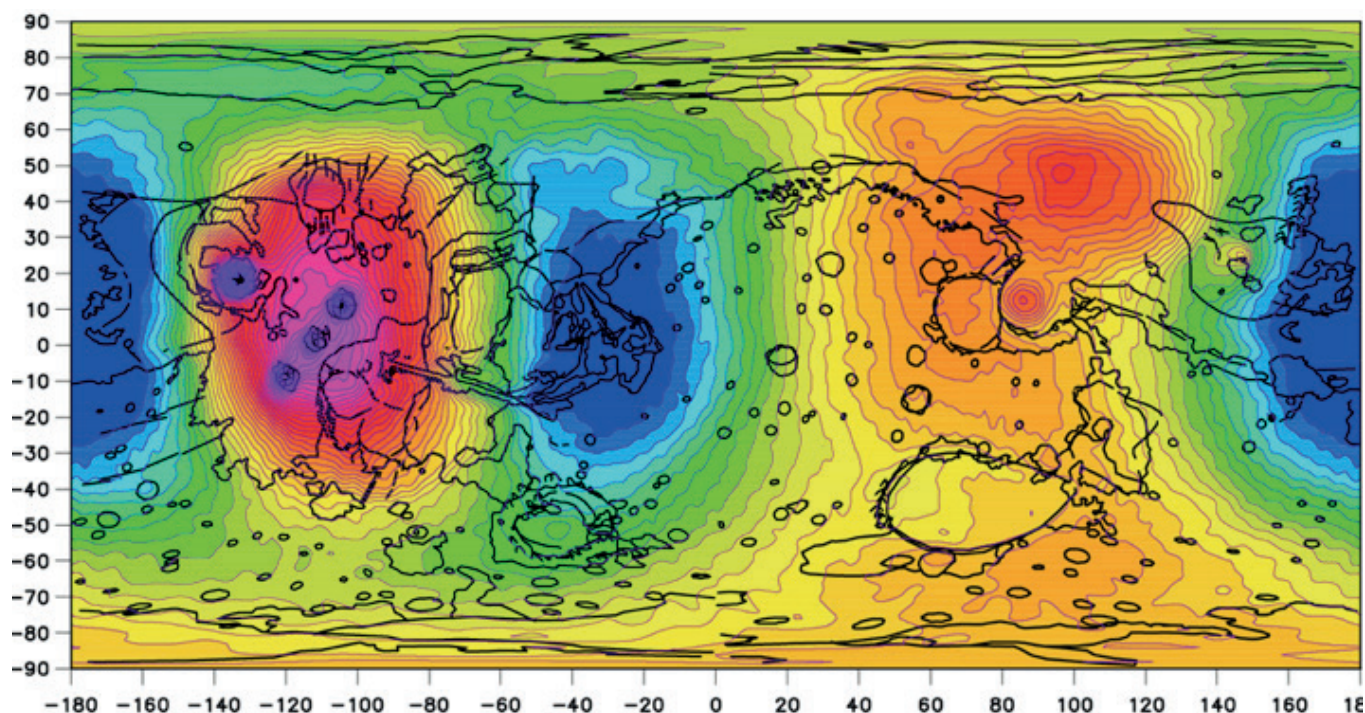


Figure 11. Le géoïde de Mars. Modèle en harmoniques sphériques de degré et ordre 95, déterminé avec les mesures (Doppler et distances radar) de Mars Global Surveyor et Mars Odyssey.

différentes (configuration de type "Bender") ; ou (projet MARVEL) garder un seul couple et avoir un troisième satellite effectuant des mesures de distance (par chronométrie laser) dans un mouvement relatif oscillant par rapport aux deux autres (configuration dite "pendulaire"). Une coopération entre les agences spatiales précitées est évidemment souhaitable.

Et la géodésie planétaire ?

Nous avons été les premiers en Europe, avec la détermination d'un modèle de potentiel gravitationnel de Mars [10], [17], à élargir le champ d'application de nos méthodes de géodésie spatiale au cas d'autres corps du système solaire. Soutenus par le CNES nous avons poursuivi dans cette voie : amélioration du modèle martien [11], positionnement des landers Viking et détermination des nutations solaires de Mars [15]. Notre participation à de nombreuses missions planétaires américaines s'est concrétisée, en particulier, par la détermination de nouveaux modèles de champ de gravité de Vénus [13], Mars [36], [48] – cf. figure 11. Au sein du CNES, nous avons construit et développé une expertise en géodésie planétaire qui a, par exemple, conduit à calculer un modèle de champ

du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko (avec les données de la mission Rosetta) – solution en cours d'évaluation [57] et qui nous permet de participer à la préparation de nouvelles missions (e.g. MMX : lunes martiennes, Hera : mission vers l'astéroïde double Didymos).

Conclusion

L'implication du CNES en géodésie spatiale s'est poursuivie au fil du temps. Cette nouvelle science a gagné ses lettres de noblesse en s'imposant comme un ensemble d'approches d'une grande richesse et efficacité pour, alliées à d'autres disciplines, répondre à des questions scientifiques majeures et d'implications sociétales nombreuses. Nous avons passé en revue les faits et les résultats les plus marquants impliquant le CNES dans les principaux secteurs et nous attendons de cet acteur primordial en France et incontournable au niveau international une continuité de soutien et de financement. Un point important est de poursuivre ses contributions à des postes clés des organismes (UGGI, AIG) et services internationaux (IDS, IGS) dans lesquels certains de ses ingénieurs s'illustrent par leur expertise souvent

unique. Quelques questions devront trouver réponse à court ou moyen terme. Dans le domaine de la télémétrie laser, l'installation du nouveau site géodésique pluritechnique de Tahiti demande un engagement rapide. L'évolution du système DORIS est garantie pour encore une décennie ; faudra-t-il le remplacer, le faire évoluer (et comment) ou l'abandonner face aux systèmes GNSS ? Le suivi des variations temporelles du champ de gravité est en phase de devenir un système supplémentaire de surveillance de l'hydrosphère terrestre, tout comme l'altimétrie l'est devenue pour l'océanographie ; considérant notre historique et notre expertise comment notre pays et le CNES peuvent-ils se positionner, avec les autres agences spatiales, pour contribuer et participer à cette surveillance sur le long terme, avec de nouvelles missions comme celles aujourd'hui en cours de définition (e.g. MARVEL) et avec les moyens humains adéquats ? Espérons que les stratégies des différentes parties prenantes convergent dans un proche avenir. ●

Contact

Georges BALMINO
georges.balmino81@orange.fr





Références

- [1] Balmino, G., *Champ de pesanteur terrestre et géoïde*, C.R.Ac.Sc., T. 3, n° 4, 1986
- [2] Balmino G., *Géophysique Spatiale*, Atlas de l'Espace, Encyclopedia Universalis, 1988
- [3] Balmino G., *Determination of the Earth potential by space methods*. CNES, École d'été : la Géodynamique Spatiale, Lannion, France. Abalakin et al., Ed., 1974
- [4] Balmino G., A. Cazenave, A. Comolet-Tirman, J.C. Husson et M. Lefebvre : *Cours de Géodésie Dynamique et Spatiale*, ENSTA Ed., Paris, 1982
- [5] Balmino G., *Numerical Methods of Orbital Dynamics*, Proceedings, COSPAR-IAU-IUTAM - Symposium C, Sao Paulo, Brésil, 1974
- [6] Balmino G., J.P. Barriot, *Numerical Integration Techniques Revisited*, Manuscripta Geodaetica, n° 15, 1990
- [7] Balmino G., J.P. Barriot, N. Valès, *Non Singular Fast Formulation of the Gravity Vector and Gravity Gradient Tensor in Spherical Harmonics*, Manuscripta Geodaetica, n° 15, 1990
- [8] Balmino G., Marty J.C., *Self-shadowing of a spacecraft in the computation of surface forces. An example in planetary geodesy*. Artificial Satellites, Warsaw, Vol. 53, No. 1, 2018
- [9] Balmino G., *Gravity Methods, Satellites*. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, H.K. Gupta, Ed., 2nd edition, 2020
- [10] Balmino G., E.J. Christensen, B. Moynot, P. Roucher, N. Valès, *Mars Gravity Field Model from Mariner 9, Viking 1 and 2 Data*, 2nd Int. Symp. : The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, Lagonissi, Greece, Proceedings, 1978
- [11] Balmino, G., B. Moynot, N. Valès, *Gravity Field Model of Mars in Spherical Harmonics up to Degree and Order Eighteen*, J. Geophys. Res., vol. 87, B12, 1982
- [12] Barbu A., J. Laurent-Varin, F. Perosanz, F. Mercier, J.C. Marty, *Efficient QR Sequential Least Squares algorithm for high frequency GNSS Precise Point Positioning*, Seismic application, Adv. Space Res., <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.032>, 2018
- [13] Barriot J.P., G. Balmino, N. Valès, P. Rosenblatt, *A 180th degree and order model of the Venus gravity field from Magellan line of sight residual Doppler data*, Geophysical Research Letters, Vol. 25, n° 19, 1998
- [14] Biancale R., D. Gambis, J.-M. Lemoine, J.-C. Marty, S. Loyer, L. Soudarin, Z. Altamimi, T. Carlucci, N. Capitaine, D. Coulot, P. Berio, P. Exertier, P. Charlot, *Earth kinematics and reference frame from combination of geodetic techniques*, IAG Session G4, Paper 91, Dynamic Planet, Cairns, 2005
- [15] Borderies N., G. Balmino, L. Castel, B. Moynot, *Study of Mars Dynamics from Lander Tracking Data Analysis*, The Moon and the Planets, vol. 22, n° 2, 1980
- [16] Chabé J., C. Courde, J. M. Torre, S. Bouquillon, A. Bourgoïn, M. Aimar, and N. Maurice, *Recent progress in lunar laser ranging at Grasse laser ranging station*. Earth and Space Science, 7(3), e2019EA000785, 2020
- [17] Christensen E.J. and G. Balmino, *Analysis of a Twelfth Degree and Order Gravity Model for Mars*, J. Geophys. Res., 84, B14, 1979
- [18] Chupin C., V. Ballu, L. Testut, Y.T. Tranchant, M. Calzas, E. Poirier, T. Coulombier 1, O. Laurain, P. Bonnefond, *Team FOAM Project, Mapping Sea Surface Height Using New Concepts of Kinematic GNSS Instruments*, Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs12162656, 2020
- [19] Couhert A., F. Mercier, J. Moyard, R. Biancale, *Systematic error mitigation in DORIS-derived geocenter motion*, J. of Geoph. Res. Solid Earth, 123(11):10142-10161, doi: 10.1029/2018jb015453, 2018
- [20] Cretaux J. F., S. Calmant, V. Romanovski, F. Perosanz, S. Tashbaeva, P. Bonnefond, D. Moreira, C.K. Shum, F. Nino, M. Berge-Nguyen, S. Fleury, P. Gegout, R.A. Del Rio, P. Maisongrande, P., *Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over Lake Issykkul*, Marine Geodesy 34(3-4): 291-318, 2011
- [21] Duquenne F., *40 ans de géodésie à l'IGN - 1^{re} partie : la géodésie spatiale*, XYZ n° 161 - 4^e trimestre 2019
- [22] Exertier P., P. Bonnefond, J. Nicolas and F. Barlier, *Contributions of satellite laser ranging to past and future radar altimetry missions*. Surveys in geophysics, 22(5-6), 491-507, 2001
- [23] Exertier P., E. Samain, C. Courde, M. Aimar, J.M. Torre, G.D. Rovera and U. Schreiber, *Sub-ns time transfer consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2*. Metrologia, 53(6), 1395, 2016
- [24] Exertier P., A. Belli, and J.M. Lemoine, *Time biases in laser ranging observations: a concerning issue of space geodesy*. Advances in Space Research, 60(5), 948-968, 2017
- [25] Fadil A.; L. Sichoix, J.P. Barriot, P. Ortéga, P. Willis, *Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records*, Comptes Rendus Geosciences, 343(5):331-341, doi: 10.1016/j.crte.2011.02.002, 2011
- [26] Govind R., J.J. Valette, F.G. Lemoine, *A DORIS determination of the absolute velocities of the Sorsdal and Mellor glaciers in Antarctica*, in DORIS Special Issue: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics, P. Willis (Ed.), Ad. in Space Res., 45(12):1523-1534, doi: 10.1016/j.asr.2010.02.011, 2010
- [27] IERS (International Earth Rotation Service), *IERS conventions*, IERS technical note 36, Frankfurt, 2010.
- [28] Katsigianni G., S. Loyer, F. Perosanz, F. Mercier, R. Zajdel, K. Sosnica, *Improving Galileo orbit determination using zero-difference ambiguity fixing in a Multi-GNSS processing*, Adv. Space Res. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.035>, 2018
- [29] Katsigianni G., S. Loyer, F. Perosanz, *PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS*, Remote Sensing, 11,21,2477, <https://doi.org/10.3390/rs11212477>, 2019
- [30] Kaula W., *NASA (Williamstown report): The terrestrial environment, solid-earth and ocean physics, application of space and astronomic techniques*. Report of a study at Williamstown, Mass, USA, 1969
- [31] Kovalevsky J., Barlier F., *Les débuts de la géodésie spatiale en France*, XYZ n° 125 - 4^e trimestre 2010
- [32] Laurichesse D., F. Mercier, J.P. Berthias, P. Broca, L. Cerri, *Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurement and its application to PPP and satellite precise orbit determination*, Navigation Vol 56, N°2, summer 2009
- [33] Lescarmontier L., B. Legresy, R. Coleman, F. Perosanz, C. Mayet, L. Testut, *Vibrations of Mertz Glacier ice tongue, East Antarctica*, Journal of Glaciology 58(210): 665-676, 2012
- [34] Levallois J.-J., *Mesurer la Terre : 300 ans de géodésie française - De la toise du Châtelet au satellite*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées /AFT, 1988
- [35] Loyer S., F. Perosanz, F. Mercier, H. Capdeville, J.C. Marty, *Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center*, Journal of Geodesy 86(11): 991-1003, 2012
- [36] Marty J.C., G. Balmino, J. Duron, P. Rosenblatt, S. Le Maistre, A. Rivoldini, V. Dehant, T. Van Hoolst, *Martian gravity field model and its time variations from MGS and Odyssey data*, Planetary and Space Science 57, 2009



- [37] Montenbruck O., P. Steigenberger, L. Prange, Z. Deng, Q. Zhao, F. Perosanz, I. Romero, C. Noll, A. Stürze, G. Weber, R. Schmid, K. MacLeod, S. Schaer, *The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges*, Advances in Space Research, Volume 59, Issue 7, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>, 2017
- [38] Moreaux G., F.G. Lemoine, H. Capdeville et al., *The International DORIS Service contribution to the 2014 realization of the International Terrestrial Reference Frame*, Advances in Space Research, doi: 10.1016/j.asr.2015.12.021, 2016
- [39] Moreaux G., P. Willis, F.G. Lemoine, N.P. Zelensky, A. Couhert, H. Ait Lakbir, P. Ferrage, P., *DPOD2014: a new DORIS extension of ITRF2014 for Precise Orbit Determination*, 2019, Advances in Space Research, 63(1):118-138, doi: 10.1016/j.asr.2018.08.043
- [40] Moreira D., S. Calmant, F. Perosanz, L. Luciano Xavier, O. Rotunno Filho, F. Seyler, A. Monteiro, *Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon Basin*, Geophysical Research Letters, doi:10.1002/2016GL070265, 2016
- [41] Nicolas J., F. Pierron, M. Kasser, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier, J. Haase, *French transportable laser ranging station: scientific objectives, technical features, and performance*. Applied Optics, 39(3), 402-410, 2000
- [42] Perosanz F., J.C. Marty, G. Balmino, *Dynamic orbit determination and gravity field model improvement from GPS, DORIS and Laser measurements on Topex/Poseidon satellite*, Journal of Geodesy, 71: 160-170, 1997
- [43] Petit G., A. Kanj, S. Loyer, J. Delporte, F. Mercier, F. Perosanz, *1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution*, Metrologia 52 301-309, doi:10.1088/0026-1394/52/2/301, 2015
- [44] Ray R.D.; B.D. Beckley, F.G. Lemoine, *Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements*; in DORIS Special Issue: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics, P. Willis (Ed.), Adv. in Space Res., 45(12):1510-1522, doi: 10.1016/j.asr.2010.02.020, 2010
- [45] Rudenko S., K.-H. Neumayer, D. Dettmering, S. Esselborn, T. Schöne, J.-C. Raimondo, *Improvements in precise orbits of altimetry satellites and their*

impact on mean sea level monitoring, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(6), 3382-3395, doi: 10.1109/TGRS.2017.2670061

[46] Schrama E., *Precision orbit determination performance for CryoSat-2*, Adv. in Space Res., 61(1), 235-247, doi: 10.1016/j.asr.2017.11.001, 2017

[47] Talpe M.J., R.S. Nerem, E. Forootan, M. Schmidt, F.G. Lemoine, E.M. Enderlin, F.W. Landerer, *Ice mass change in Greenland and Antarctica between 1993 and 2013 from satellite gravity measurements*, Journal of Geodesy, 91(11), 1283-1298, doi: 10.1007/s00190-017-1025-y, 2017

[48] [20] Tyler G.L., G. Balmino, D. Hinson, W.L. Sjogren, *Radio Science Investigations with Mars Observer*, J. Geophys. Res., Vol. 97, N°E5, 1992

Les liens internet

[49] CNES : <https://www.cnes.fr/>

[50] GRGS : <https://grgs.obs-mip.fr/>

[51] Algorithmic documentation of the GINS software, 2018, CNES. https://www5.obs-mip.fr/wp-content-omp/uploads/sites/28/2020/05/GINS_Algo.pdf

[52] <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2010/007526.html>

[53] <https://igsac-cnes.cls.fr/>

[54] <https://regina.cnes.fr>

[55] GFZ-ICGEM : <http://icgem.gfz-potsdam.de/>

[56] GRACE - modèles du GRGS : <http://thegraceplotter.com>

[57] https://eost.unistra.fr/uploads/media/G2_Laurent_Varin.pdf

ABSTRACT

We describe the development of the CNES activities in satellite geodesy since the mid-seventies, with an emphasis on the technological means which the agency helped building or consolidating: laser ranging, the DORIS system, the GNSS. A major outcome of the efforts has been and still is the determination of Earth gravity field models, and especially of the time variations which are associated with large mass transfers between different parts of our planet. Some of the methods developed have been applied to other bodies in the solar system. This paper follows and complements the article written by Kovalevsky and Barlier a decade ago.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre,
professeur associé, ENSTA Bretagne,
Brest

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

HULLO Jean-François,
dr. ing., ingénieur de recherche,
EDF Energy, Royaume-Uni

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA
Strasbourg

LEQUEUX James,
astronome émérite à l'Observatoire
de Paris

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène,
ingénieur recherche, ENSTA
Bretagne, Brest

MOREL Laurent,
professeur des universités, ESGT
Le Mans

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier,
ingénieur, traducteur, Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas,
dr. ing. géomètre, EDF

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

Font partie du comité de lecture
les membres du comité de rédaction
et la rédaction (la directrice
des publications et son adjoint,
le rédacteur en chef et son adjoint),
voir la liste en *page sommaire*.