



Collection du Bureau des longitudes

Volume 11

100 ans de géodésie française
(1919-2019)
Fascicule 3



***Le GRGS,
50 ans de contributions aux
missions spatiales et à la
coopération internationale***

Collection du Bureau des longitudes - Volume 11

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Fascicule 3



Le GRGS, 50 ans de contributions aux missions spatiales et à la coopération internationale

Bureau des longitudes

Le Bureau des longitudes a décidé de publier cet ouvrage à l'occasion du Cinquantenaire du GRGS.
Ce document se place dans la série « 100 ans de géodésie française », publiée dans la Collection du Bureau des longitudes.

© Bureau des longitudes, 2026

ISBN : 978-2-491688-09-7
ISSN : 2724-8372

Préface

Claude Boucher

Coordinateur de la publication

Lors de la célébration du cinquantenaire du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS), le Bureau des longitudes, l'un de ses membres fondateurs, avait proposé de coordonner la publication dans sa collection d'un ouvrage collectif retraçant l'histoire des activités menées dans ce cadre depuis sa création en 1971.

A ce jour, un ensemble remarquable de contributions ont été apportées et le Bureau a estimé souhaitable de mettre en ligne dès à présent le document qui les compile, sans attendre quelques textes qui manquent.

J'espère néanmoins obtenir à terme un document complet, qui sera alors également disponible en version papier.

1. Le GRGS 1971-2021

Le **GRGS** : Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, est un **Groupement scientifique** qui fédère en France des équipes de recherche appartenant à des institutions nationales ayant des activités en géodésie spatiale.

1.1. Contexte et création

Le démarrage de la géodésie spatiale en France a été décrit par Levallois (1988), Kovalevsky et Barlier (2010). A la fin des années soixante plusieurs équipes françaises avaient acquis l'expertise des systèmes d'observation par moyens optique, laser et Doppler à partir surtout des projets du CNES : DIAPASON, DIADEME 1 et 2.

En 1967 le CNRS avait créé une structure légère, appelée "Recherche Coopérative sur Programme" (RCP 133) sous la direction de J.J. Levallois de l'IGN. Son but était de centraliser les moyens du CNRS dans le domaine de la géodésie spatiale. Cela permit aussi d'unifier les programmes hors CNES qui y trouvaient un interlocuteur unique pour superviser et financer les programmes de géodésie spatiale. La RCP 133 devint aussi un interlocuteur à l'étranger, et particulièrement avec les Etats-Unis et l'Espagne.

Un grand tournant se fit en 1969 : quel pouvait être l'apport des données de géodésie spatiale aux sciences de la Terre ? D'un atelier de travail organisé par la NASA à Williamstown en 1969 (auquel quatre ingénieurs et chercheurs français furent invités : O. Calame, A. Orsag, J.C. Husson et F. Barlier) découla, sous la présidence de W. Kaula, une vision prophétique : les conclusions montrèrent clairement la voie vers un programme qui serait un apport majeur pour la géodynamique, l'océanographie physique et en général les géosciences et leurs applications sociétales (Kaula, 1969).

Le 27 mars 1970 le CNES, avec son Président J.F. Denisse, donnait un signal fort en créant, au sein de sa Division Mathématiques et Traitements, le Département de Géodésie Spatiale avec M. Lefebvre à sa tête.

Les activités françaises de géodésie spatiale étaient alors conduites dans quelques équipes (certaines très petites) : le Service des Calculs du Bureau des Longitudes (dynamique des satellites, géodésie Doppler), le CNES (orbitographie, mécanique spatiale, géodésie dynamique), l'Observatoire de Haute Provence (télémétrie laser – reprise par le CNES à Brétigny), l'Observatoire de Nice (caméra Antarès), l'IGN (réseaux, géodésie géométrique), l'Observatoire de Paris à Meudon (observations optiques, effets dynamiques de la haute atmosphère, géodésie géométrique et dynamique).

Une RCP était une structure provisoire et non contraignante vis-à-vis des établissements. Pour stabiliser et consolider ce que la RCP 133 avait ébauché, et pour prendre le train en marche avec les USA il fallait mettre en place une stratégie cohérente. Le rôle du Bureau des Longitudes fut en cela primordial.

La lecture des procès-verbaux des séances du BDL de 1970 et 1971 fait clairement apparaître l'importance que le Bureau accorde au projet de fédération de la géodésie spatiale en France, ainsi que le rôle de creuset qu'a joué cette institution pour la réalisation du projet.

En janvier 1970, le projet apparaît sous la forme d'un « Comité Directeur de la géodésie spatiale », puis, en décembre 1970, sous celle du « Groupe de recherche de géodésie spatiale » ; ce projet se précise lors de la séance du BDL du 27 janvier 1971, au cours de laquelle l'accord des présidents ou directeurs des quatre organismes pressentis, est confirmé.

Dès le début, le souhait fut de créer une structure « souple » afin « de favoriser le fonctionnement harmonieux d'une entreprise scientifique ». La création du GRGS est entérinée, à la suite de la séance du BDL du **17 février 1971**, par la signature d'un protocole (fig. 1.1) par les quatre Présidents ou Directeurs des organismes qui sont ainsi devenus les « membres fondateurs » du GRGS : le **Bureau des Longitudes**, le **Centre National d'Etudes Spatiales**, l'**Institut Géographique National** et l'**Observatoire de Paris**. Constitués en Comité Directeur (voir ci-après) ce même jour ils rédigèrent une Charte d'organisation. Trois des signataires sont membres du BDL : André Gougenheim (géographe, Président du BDL), Jean Delhaye (Directeur de l'Observatoire de Paris), Jean-François Denisse (Président du CNES) ; Georges Laclavère, Directeur de l'IGN, est à l'époque le « membre en service extraordinaire » représentant l'IGN au sein du Bureau. Cette appartenance commune au BDL a incontestablement eu un rôle favorisant.

Comme l'attestent les procès-verbaux des séances des années suivantes, les activités du GRGS sont ensuite régulièrement suivies par le BDL, comme elles le sont encore 50 ans plus tard, au cours des séances actuelles, ainsi que dans les ouvrages publiés par ce Bureau, tels que le Livre blanc de la Géodésie (2001) ou bien le « Livre sur les Observatoires » (2009).

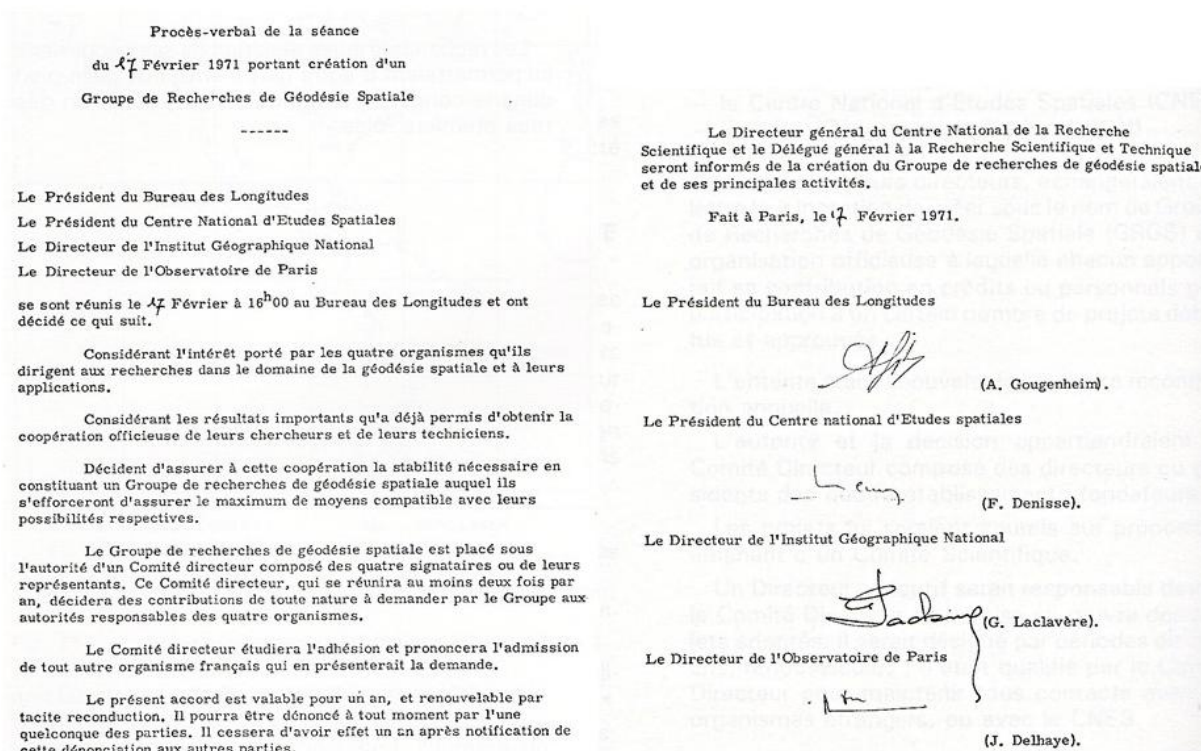


Fig. 1.1. Le protocole de création du GRGS le 17 février 1971.

A sa création le GRGS fut placé sous la direction exécutive de J. Kovalevsky. Et sur proposition de J.J Levallois, l'IGN mit à la disposition du nouveau groupement un secrétaire administratif J. Villecrose; il eut un rôle efficace et très important dans la gestion du GRGS et de ses moyens financiers pendant plus de vingt-cinq ans.

Les équipes étaient les suivantes (avec les noms des personnes responsables) :

- Dynamique spatiale (F. Barlier)
- Géodésie dynamique (M. Lefèbvre)
- Géodésie géométrique (H.M. Dufour et A. Fontaine)
- Haute atmosphère (F.Barlier)
- Mouvement de la Lune (J. Kovalevsky)
- Laser-Lune (A. Orszag)
- Laser satellites (J. Gaignebet)
- Caméra Antarès (P. Muller)

Au total, on peut estimer à une quarantaine de personnes (chercheurs, ingénieurs et techniciens) le nombre de collaborateurs du GRGS à ses débuts.

1.2. Les statuts et l'organisation

Le GRGS est un groupement scientifique sans personnalité morale, constitué par des **organismes membres**, aussi appelés *organismes de tutelle*, qui ont signé un **Protocole d'accord**. Ce protocole a été renouvelé plusieurs fois par avenant, en particulier lors de l'entrée de nouveaux organismes membres. A ce protocole est adjoint une **Charte d'Organisation**, modifiée la première fois en 2000 et révisée depuis – dernièrement en 2004. Suivant ce protocole et cette charte le GRGS comprend :

- un Comité Directeur, formé des directeurs ou présidents (ou leurs représentants) des organismes membres, et qui statue sur les activités,
- un Directeur Exécutif, qui met en œuvre les décisions du Comité Directeur,
- un Bureau Exécutif pour assister le Directeur Exécutif,
- un Conseil Scientifique et son Président, dont la charge est de coordonner l'activité scientifique,
- des personnels : (i) de recherche appartenant aux organismes membres ou à d'autres organismes (sous réserve, dans ce dernier cas, que les personnes aient recueilli l'accord de leurs employeurs) ; (ii) techniques et administratifs relevant des organismes membres. Ces personnels constituent les *équipes* du GRGS, chacune relevant d'un des *organismes membres*.
- un Groupe d'Evaluation Scientifique (créé lors de la nouvelle Charte en 2000) est chargé d'évaluer les activités du GRGS.

En outre le Directeur Exécutif peut s'adjoindre un secrétariat pour l'aider dans ses tâches de gestion et d'organisation.

Les mandats du Directeur Exécutif, des membres du Conseil Scientifique et du Groupe d'Evaluation Scientifique, sont de quatre ans depuis l'an 2000, et renouvelables une fois.

1.3. Les organismes membres et les équipes du GRGS

Au nombre de onze en 2021, les organismes membres sont :

- les membres fondateurs : Bureau des Longitudes, Centre National d'Etudes Spatiales, Institut Géographique National, Observatoire de Paris ;
- les membres qui se joignirent au fil des ans :
 - L'Institut National des Sciences de l'Univers en 1987,
 - L'Observatoire de la Côte d'Azur en 1988,
 - Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine en 1993,
 - L'Observatoire Midi-Pyrénées en 1997,
 - L'Université de Polynésie Française en 2003,
 - le Conservatoire National des Arts et Métiers en 2007,
 - L'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre en 2013.

A cette même date l'état des équipes est le suivant :

Centre National d'Études Spatiales

Équipe de Géodésie Spatiale (GS)

Équipe LEGOS (LG)

Institut Géographique National

Laboratoire de Recherches en Géodésie (LAREG)

Service de Géodésie et Nivellement (SGN)

Observatoire de Paris

Laboratoire Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE)

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)

Observatoire de la Côte d'Azur

Laboratoire Géoazur,

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Équipe Géophysique (Shom: DOPS/STM/GEOPHY)

Équipe Recherche (Shom: DOPS/STM/REC)

Équipe Marée courant (Shom: DOPS/STM/MAC)

Observatoire Midi-Pyrénées

Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatial (LEGOS) – avec équipe LG du CNES

Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET)

Université de Polynésie Française

Observatoire Géodésique de Tahiti (OGT)

École Supérieure des Géomètres et Topographes

Laboratoire Géomatique et Foncier (GEF)

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre

Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES)

Ceci représente environ 120 chercheurs, ingénieurs et techniciens.

La table 1 donne les équipes de direction, conseil scientifique et secrétariat, qui se sont succédées depuis la création.

Table 1. Liste des Directeurs Exécutifs, Présidents du Conseil Scientifique, et Secrétariats du GRGS, de 1971 à 2021.

Année	Directeur Exécutif	Président du Conseil Scientifique	Secrétaire Administratif
1971-1979	Jean Kovalevsky	Bernard Lago (1976-1979)	Julien Villecrose
1979-1982	Bernard Lago	Bernard Guinot	Julien Villecrose
1982-1985	Bernard Guinot	Michel Deck (1982-1984) Claude Boucher (1984-1985)	Julien Villecrose
1985-1988	Claude Boucher	Anny Cazenave	Julien Villecrose
1988-1991	Claude Boucher	Anny Cazenave	Julien Villecrose
1991-1994	François Barlier	Martine Feissel	Julien Villecrose
1994-1997	François Barlier	Martine Feissel	Julien Villecrose
1997-2000	Georges Balmino	François Barlier	Nicole Lestieu Irmtraud Biancale
2000-2004	Georges Balmino	François Mignard	Nicole Lestieu Christine Menesplier
2004-2008	Michel Kasser	Nicole Capitaine	Christiane Guérin Pascale Baudoin
2008-2012	Richard Biancale	Nicole Capitaine Pierre Exertier (2010 →)	Nicole Lestieu
2012-2016	Richard Biancale	Pierre Exertier Guillaume Ramillien (2015→)	Agnès Patu
2016-2020	Jean-Paul Boy	Guillaume Ramillien	Agnès Patu
2021-	Jean-Paul Boy	Christophe Le Poncin-Laffite	

1.4. Les objectifs et la recherche

Les objectifs propres au GRGS sont l'acquisition et l'expertise des mesures géodésiques, terrestres ou planétaires, obtenues par des techniques spatiales - techniques qui sont elles-mêmes des objets de recherche, pour l'élaboration de modèles (Bureau des Longitudes, 2009). Ces derniers sont utilisés dans divers domaines des sciences de la Terre et de l'univers conduisant à l'interprétation et la compréhension de phénomènes physiques. Ces objectifs comprennent aussi l'acquisition de données d'autres types quand les méthodes de la géodésie spatiale jouent un rôle essentiel dans leur obtention, ou bien l'utilisation de telles données lorsqu'elles sont indispensables à l'élaboration des produits géodésiques. Les domaines spécifiques de recherche sont ceux définis en 1969 à Williamstown (Kaula, *ibid.*), révisés et affinés ultérieurement lors de séminaires européens (ESA, 1978, 1986) :

- Gravimétrie spatiale et terrestre
- Systèmes de référence et rotation de la Terre
- Océanographie spatiale et marégraphie
- Hydrologie spatiale
- Techniques satellitaires : Laser, GNSS, DORIS, VLBI, InSAR
- Géodésie planétaire
- Thermosphère
- Physique fondamentale

Ces activités, développées au cours de l'histoire du GRGS, ont fait l'objet de plusieurs articles et ouvrages de synthèse (par ex. Cazenave et Feigl, 1994 ; Barlier et Lefebvre, 2001) et sont décrites dans les chapitres suivants.

1.5. Ressources financières et humaines

D'après la Charte d'organisation les projets scientifiques et propositions de recherche discutés au Conseil Scientifique du GRGS sont présentés par le Directeur Exécutif au Comité Directeur qui décide de celles qui sont soumises aux organismes qui les financeront. La mise en oeuvre des projets fait aussi appel aux moyens d'exécution des *organismes membres*.

Les activités du GRGS sont ainsi financées :

- par les *organismes membres* du GRGS qui veulent y participer, en personnel, crédits, ou prestations de service, dont ils décident le volume et qu'ils gèrent directement ; des protocoles d'accord bilatéraux ou multilatéraux peuvent à la demande être établis à ce sujet entre les organismes intéressés.
- par convention passée par tout contractant avec un établissement public, membre du GRGS, ayant la personnalité morale, qui en assurera la gestion comptable et administrative réglementaire dans le cadre de son statut et mettra les crédits correspondants à la disposition du GRGS. Le Directeur Exécutif est le responsable scientifique de ces conventions.
- par des organismes extérieurs qui accordent des crédits au GRGS, dont ils assurent eux-mêmes la gestion.

1.6. Les coopérations internationales

La coopération avec les États-Unis, commencée dès le début de l'ère spatiale – avec le SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) lors de la RCP mentionnée en 1.1, s'est poursuivie avec les centres de la NASA : GSFC (Goddard Space Flight Center), JPL (Jet Propulsion Laboratory) dans divers domaines : programme Crustal Dynamics (télémétrie laser – avec en particulier la station Moblas 8 de Tahiti), observations radioélectriques pour la géodésie (systèmes Tranet, Doris, GNSS), altimétrie spatiale (débutée en 1975 avec la participation française au suivi du satellite GEOS 3, puis établie en 1987 avec Topex-Poseidon lancé en 1992), sans parler des nombreuses participation à des missions de planétologie.

Mentionnons également une coopération débutée avec l'URSS dès les années soixante (programme Intercosmos de géodésie), qui fut suivie par les observations des réflecteurs laser français placés sur les rovers lunaires soviétiques, par la participation à des projets de planétologie sur Vénus.

Au niveau européen, dans le cadre des Journées Luxembourgeoises de Géodynamique (Flick et al., 2002), le rôle du GRGS fut notable dans la constitution d'une communauté de géodésiens qui ensuite mirent sur pied d'autres collaborations et élaborèrent nombre de propositions présentées aux agences spatiales nationales ou à l'ESA.

La coopération internationale s'est enfin développée dans le cadre de l'UGGI (Union de Géodésie et de Géophysique Internationale), de ses associations - en particulier l'AIG

(Association Internationale de Géodésie), et en particulier des services internationaux auxquels contribuent des équipes du GRGS, souvent avec un rôle majeur :

International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)
International DORIS Service (IDS)
International GNSS Service (IGS)
International Laser Ranging Service (ILRS)
International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)
International Gravity Field Service (IGFS)
Combination Service for Time-variable Gravity fields (COST-G)
Bureau Gravimétrique International (BGI)
International Geodynamics and Earth Tides Service (IGETS)
International Service for the Geoid (ISG)
Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).

Nombre de ces collaborations sont détaillées dans les différents chapitres de cet ouvrage ; certaines ont fait l'objet de conventions de longue durée entre le GRGS et :

- le GFZ (GeoForschungsZentrum) sur le champ de gravité de la Terre, convention du 30 novembre 1995, actualisée le 30 septembre 2010 (cette convention faisant suite à celles établies avec nos partenaires allemands depuis le début de nos activités en coopération en 1971),
- l'ORB (Observatoire Royal de Belgique) sur la planétologie, convention du 25 avril 2000,
- l'AIUB (Astronomical Institute University of Bern) pour le traitement GPS, convention du 28 février 1992.

1.7. Les écoles d'été

Instituées en 2002, neuf écoles se sont tenues, tous les deux ans, sur des thèmes de recherche du GRGS : cf. chapitre 4. Elles ont contribué à l'arrivée de nouveaux chercheurs et ont permis de renforcer certains aspects interdisciplinaires de nos activités.

En outre des ateliers spécifiques se sont tenus sur le thème de la *géodésie millimétrique*, à but prospectif et afin d'établir une feuille de route dans ce domaine.

1.8. Les publications

Les personnes des différentes équipes du GRGS publient leurs articles de recherche dans de nombreuses revues internationales de haut niveau, par exemple : Journal of Geodesy, Marine Geodesy, Journal of Geophysical Research, Inside GNSS, TransNav, Geophysical Journal International, Geophysical Research Letters, Surveys in Geophysics, Journal of Geodynamics, Metrologia, Advances in Space Research, Planetary and Space Science, Space Science Reviews, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Astronomy and Astrophysics, Icarus, Artificial Satellites-Journal of Planetary Geodesy, Acta Astronautica, Reviews of Geophysics and Space Physics, Nature, Science, etc.

Par ailleurs le GRGS a publié, les premières années, une série de notes techniques et de bulletins (*fig. 1.2*), de contenu très détaillé en général, qui étaient destinés à faire le point sur les méthodes, les instruments et même les logiciels, certains documents (digitalisés) étant

encore très utiles car conservateurs d'informations et de savoir-faire précieux. Enfin des rapports d'activités ont été régulièrement publiés, tout d'abord sous forme d'un document annuel résumant les faits marquants et les nouvelles publications, puis sous forme d'un rapport d'activités complet, compilé tous les quatre ans pour examen par le Groupe d'Evaluation Scientifique, publication qui est passée plus récemment à un cycle quinquennal.

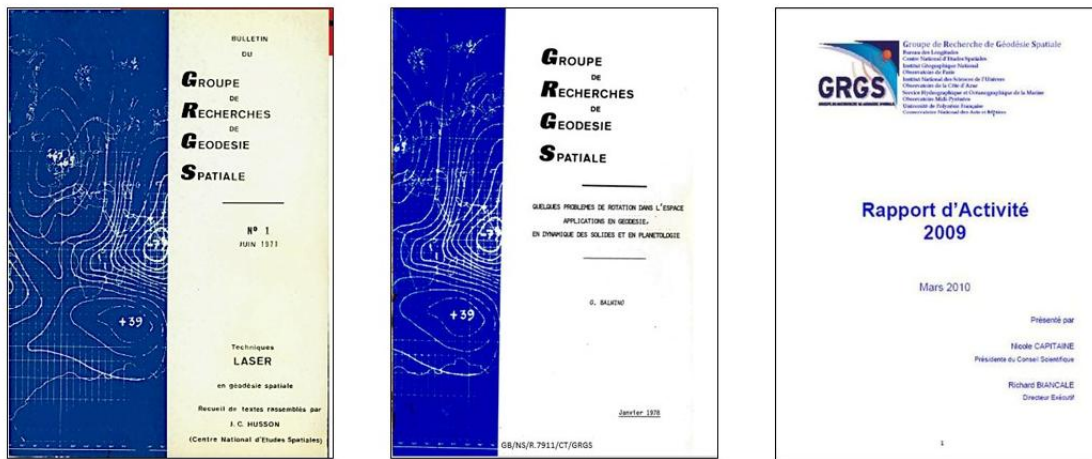


Fig. 1.2. Exemples de publications "internes" du GRGS : bulletin, note technique, rapport d'activité annuel.

2. Contributions aux missions spatiales du CNES (seul ou en multilatéral)

2.1 Missions géodésiques et accélérométriques

Le lancement du premier satellite artificiel SPOUTNIK 1 par l'URSS le 4 octobre 1957 fut un choc et un événement majeur dans la communauté scientifique internationale ; il se trouva que dès le premier jour la communauté française y participa en faisant les premières observations visuelles du satellite grâce à Paul Muller alors au Pic du Midi.

Les années qui suivirent furent en France très fécondes et très fructueuses dans le domaine de la géodésie spatiale avec le lancement réussi des satellites DIAPASON (1966), DIADEMES D1C et D1D (1967), PEOLE (1970), le succès de la première campagne internationale de poursuite des satellites géodésiques par laser (ISAGEX 1971-1972), les premières observations sur les rétro réflecteurs lunaires au Pic du Midi (1970) et de beaucoup d'autres actions à caractère géodésique; l'ensemble est décrit dans un cahier thématique de l'annuaire du Bureau des longitudes et du guide de données astronomiques en 2020 (F. Barlier et C. Boucher, 100 ans de géodésie).

Finalement tout cela aboutit positivement à la création du GRGS le 17 février 1971 au Bureau des longitudes, événement décrit dans l'article de G.Balmino sur le GRGS, « 50 ans de contribution aux missions spatiales et à la coopération internationale, 1971-2021 ». Dans la communauté géodésique française, cela changea la manière de proposer des missions notamment au Centre national d'études spatiales, le CNES crée en 1961. Parmi les premières propositions à caractère géodésique soumises avec succès dans ce cadre on peut retenir les missions STARLETTE/STELLA, CASTOR/CACTUS, le projet BIRAMIS, que nous allons brièvement décrire et nous citerons aussi sans les décrire (cela fera l'objet de publications spécifiques), les missions CHAMP, GOCE, MICROSCOPE, à base de technologies accélérométriques développées par l'ONERA dans la continuité de la première mission de 1975.

Les missions STARLETTE et STELLA

Caractéristiques des satellites Starlette et Stella.

Le succès de la première grande campagne de poursuite des satellites par télémétrie laser organisé par la France dans les années 1971-1972 avait bien montré que compte tenu des grands progrès accomplis dans la précision des mesures laser au niveau décimétrique, et en potentialité d'amélioration vers le niveau centimétrique, le rôle des techniques photographiques allait aller en diminuant tandis que le rôle de la télémétrie laser allait aller au contraire en augmentant pour des applications toujours plus nombreuses de la géodésie spatiale. Pour calculer la trajectoire du satellite il était désormais impératif d'étudier et de connaître la position la plus exacte possible des rétro-réflecteurs laser par rapport au centre des masses du satellite contrairement aux premières missions géodésiques comme celles des satellites Diadèmes ; en 1975 cela conduisit naturellement à utiliser un satellite sphérique recouvert de rétro-réflecteurs.

Starlette (Satellite de taille adaptée avec réflecteurs laser pour les études de la terre, Fig. 1) fut lancé le 6 février 1975, son responsable scientifique étant Anny Cazenave et son

responsable technique Lucien Gosset. Stella son frère jumeau fut lancé le 26 septembre 1993, avec comme responsable scientifique Richard Biancale. Ce sont deux petits satellites à peu près identiques à vocation géodésique. Ces satellites développés par le Centre national d'études spatiales (CNES) sont sphériques (24 cm de diamètre d'un poids de 47,30 kg et 48,00 kg respectivement avec un noyau en alliage d'uranium 238 non radioactif avec 1,5 % de molybdène pour Starlette et en plus 0,2% de vanadium pour Stella; ils sont recouverts de 60 rétro-rélecteurs avec une correction de centre de masse de 7,5 cm à appliquer aux mesures de distance par télémétrie laser. Les éléments orbitaux sont différents (49,8 degrés d'inclinaison, des paramètres d'altitudes géométriques 790-1100 km pour Starlette avec le lanceur Diamant BP 4 depuis Kourou) et (98,7 degrés d'inclinaison, des paramètres d'altitudes géométriques 800-810 km pour Stella avec le lanceur Ariane 4 conjointement avec d'autres satellites notamment Spot 3). La prise de décision de lancer Starlette racontée par Michel Lefebvre mérite ici quelques lignes !

Comment fut prise la décision.

Tout s'est passé dans la file de queue de la cafétéria au Centre spatiale de Bretigny sur Orge entre Jean-Claude Husson et lui-même au début des années 70. Il fallait tester le tout nouveau lanceur Diamant BP 4 mais pratiquement sans disposer d'assez d'argent pour lancer un nouveau satellite standard d'un prix classique. Dans la continuité des idées dans l'air, Michel Lefebvre fit alors la proposition d'un petit satellite sphérique, aussi massif que possible et recouvert de rétro-rélecteurs laser. À l'arrivée à la fin de la queue dans la cafétéria, la décision était prise par Jean-Claude Husson, responsable des programmes scientifiques de la Terre et de la planétologie ; il lançait une étude puis dans la suite, avec l'accord de nos collègues américains du Smithsonian Astrophysical Observatory d'assurer le contrôle de la bonne mise en orbite, il fit réaliser le satellite (Starlette est un satellite totalement passif et les observations photographiques deviennent alors indispensables pour le calcul des premières orbites précises et pour la petite histoire on a commencé à tirer au laser sur le troisième étage !). La fabrication ultérieure du satellite fut faite en coopération avec le Commissariat de l'énergie atomique qui a fourni l'uranium nécessaire à la fabrication pour avoir un satellite le plus massif et le plus lourd possible. L'ensemble fut un record pour le concept à l'ordre du jour dans ces années soixante-dix pour lancer une mission spatiale « Faster, Better, Cheaper and Longer » (Faster, décision finale prise en six mois, Better plus de 45 ans de mesures utilisées (et ce n'est pas fini), Cheaper 300 000 € hors lanceur, Longer durée de vie 10 000 ans environ!). Ceci a de quoi faire rêver les proposants d'aujourd'hui pour obtenir une décision aussi rapide, mais cela doit faire réfléchir aussi aux nombreux autres domaines de la Recherche même s'il s'agit ici d'une situation un peu exceptionnelle, de l'importance de savoir accélérer une prise de décision avec une prise de risque.

Observations des ondes de marées terrestres et océaniques, lieu de dissipation dans la Terre et dans les océans profonds, conséquences sur l'éloignement de la Lune, le ralentissement séculaire de la vitesse de rotation de la Terre.

L'objectif scientifique principal était au départ la détermination des paramètres des modèles de marées océaniques et terrestres à partir de la trajectographie précise de la trajectoire de Starlette conjointement avec celles d'autres satellites existants et plus tard celle aussi de Stella, frère jumeau de Starlette lancé en 1993. L'intérêt de cette détermination est explicité

dans le livre d'Anny Cazenave et de Kurt Feigl (Réf. 1, page 135) ; les marées créent des variations du champ de gravité de la Terre, qui génèrent des perturbations sur les trajectoires des satellites ; elles sont très petites, par ailleurs et en plus, pour citer un chiffre de l'ordre de grandeur , il pourrait y avoir même un facteur 10 entre l'effet observé sur la trajectoire par les marées terrestres et celui observé par les marées océaniques qui est donc encore plus petit ; il faut ainsi être en mesure de calculer des trajectoires très précises. Ceci est heureusement aujourd'hui possible pour ces satellites sphériques et massifs, comme Starlette ou Stella ou d'autres comme Lageos peu sensibles aux forces non gravitationnelles susceptibles de corrompre les mesures recherchées ; le résidu moyen des observations sur les arcs de trajectoires utilisés est actuellement d'environ 2 cm pour Starlette. (Fig. 2).

La Terre étant un corps elastiquo-visqueux, les déformations de la Terre solide et des océans dues à l'action de la Lune et du Soleil se produisent toujours avec un certain décalage dans le temps, décalage entre l'action et la déformation ; ceci se traduit alors par une dissipation globale d'énergie par frottement dans des couches géophysiques solides ou liquides mises en jeu ; on peut l'estimer. On s'est posé longtemps la question de savoir où se faisait précisément cette dissipation d'énergie ; en fait la question est aujourd'hui résolue sans ambiguïté grâce aux données de l'altimétrie spatiale et en premier lieu celles de Topex/Poséidon. Cette dissipation se produit majoritairement par dissipation d'ondes de marées dans l'océan profond ; finalement on a pu ainsi avoir une vision cohérente d'un bilan entre l'énergie globale dissipée et ses conséquences géophysiques observées sur le ralentissement séculaire de rotation de la Terre (la durée du jour qui varie, augmente en moyenne d'environ 1,8 ms/siècles sur des durées longues en dizaines voire en quelques centaines de millions d'années) ; l'éloignement moyen de la Lune de la Terre qui lui est lié, est d'environ 3,8 cm par an) ; cela est expliqué dans l'ouvrage cité en référence d'A. Cazenave et de K. Feigl.(Réf. 1, page 117, et Réf.14, N. Capitaine, page 115).

Variations de l'aplatissement géodynamique de la Terre, son origine, ses conséquences sur la variation séculaire de la vitesse de rotation de la Terre. Rôle du rebond post-glaciaire.

Dans ce contexte les auteurs (Réf 1) décrivent dans leur livre l'intérêt de ces satellites type Starlette ou aussi Lageos pour l'étude des variations temporelles du champ de gravité terrestre telle par exemple la diminution séculaire observée de l'aplatissement géodynamique de la Terre (Réf 1, page 130) (l'aplatissement qui vaut $1/298,25$ correspond à une différence de 21 km entre le rayon polaire et le rayon équatorial.); la diminution de l'aplatissement vaut actuellement $2,7 \cdot 10^{-11}$ /par an ce qui est très petit ; cela n'a pu être mis en évidence que par l'analyse des trajectoires précises de ces satellites sur des temps assez longs.

Les paramètres décrivant le champ de gravité de la Terre dépendent de la distribution interne de la matière et de sa variation dans le temps et dans le cas présent concernant la diminution de l'aplatissement de sa redistribution en latitude ; on a ainsi mis en évidence clairement le rôle du rebond post-glaciaire qui a suivi et suit encore la fin de la dernière époque glaciaire pour rendre compte de cette diminution (il y a environ 20.000 ans). Il faut alors noter que ceci doit se traduire par une Terre qui tourne plus vite, contrairement à la dissipation des ondes de marées qui se traduit inversement par une Terre qui tourne de moins en moins vite. Sur le très long terme et à l'échelle des temps géologiques, c'est ce dernier effet qui l'emporte. Il y a trois cents cinquante millions d'années la Terre tournait beaucoup plus vite sur elle-même que maintenant comme le montre l'analyse des coraux fossiles et la durée du jour était alors de 22 heures seulement ! (Réf. 1 page 119.)

Multiplicité des phénomènes géophysiques affectant la vitesse de rotation de la Terre.

On a mis en évidence l'importance de la dissipation des ondes de marées luni-solaires dans l'océan profond comme le rôle du rebond post-glaciaire affectant la vitesse de rotation de la Terre mais d'autres phénomènes géophysiques jouent aussi un rôle non-négligeable avec d'importantes variations comme le montre la Figure 3 sur cette vitesse de rotation et donc la durée du jour; la figure 3 issue des travaux de l'IERS (International Earth Rotation Service) du département Syrte de l'Observatoire de Paris présente les excès de la durée du jour relativement à une valeur conventionnelle de 1998 à 2020.

Statistiquement les excès sont positifs, la Terre ralentit donc bien mais parfois elle est négative, alors la Terre accélère ; cela est clairement apparent sur cette figure 3. Les causes pouvant affecter la vitesse de rotation de la Terre sont multiples et ont des périodicités très variables. Des phénomènes météorologiques comme le régime des vents zonaux, l'effet des marées zonales, certains mouvements à l'intérieur du noyau liquide, jouent un rôle avec des variations ayant de multiples périodes (annuelles, semi-annuelles, saisonnières, inter-annuelles) (Réf. 1, page 120, Réf.14, N. Capitaine p. 115).

La surveillance des variations temporelles des premiers termes du développement en harmoniques sphériques du champ de gravité terrestre par télémétrie laser sur cibles dédiées; un évènement particulier : à partir de 2016 la Terre accélère sa vitesse de rotation plus vite qu'attendue.

On vient de montrer tout l'intérêt d'estimer la variation séculaire de l'aplatissement géodynamique de la Terre pour l'étude de la rotation terrestre. On peut aussi étudier les variations temporelles d'autres phénomènes géophysiques, ainsi les variations de la position du centre de masse de la Terre par rapport à la croûte terrestre, le mouvement du pôle, les variations du tenseur des moments d'inertie, autant de phénomènes représentés par les premiers termes du développement en harmoniques sphériques décrivant le champ de gravité de la Terre. On ne peut cependant les décrire ici dans ces quelques pages. Nous nous sommes limités ici principalement à une illustration d'un phénomène géophysique et à titre d'exemple, celui de la vitesse de rotation de la Terre.

Concernant les harmoniques de degré élevé des progrès spectaculaires ont été faits depuis l'an 2000 sur une modélisation globale du champ de gravité au cours du temps avec une résolution spatiale et temporelle sans cesse améliorée ; pour cela on s'est appuyé sur plusieurs missions spatiales remarquables, Champ (2000), Grace (2002), Goce (2009), Grace Follow-on (2017) (voir l'article de Georges Balmino dans une étude pour commémorer les 50 ans du GRGS). Cependant un point très important doit maintenant être souligné. Les progrès accomplis sur la connaissance globale du champ de gravité reposent certes sur ces nouvelles technologies citées avec des satellites orbitant à quelques centaines de km mais il faut ajouter aussi de manière indispensable les résultats obtenus classiquement par des mesures de télémétrie laser sur des satellites type Lageos ou Starlette; les deux approches doivent être impérativement combinées; Ces satellites laser orbitent en effet à des altitudes beaucoup plus élevées (5000 km et 800 km respectivement), mais cette situation est en fait très favorable pour déterminer les termes de bas degré tel l'aplatissement terrestre car plus l'altitude est élevée, plus on filtre l'effet des harmoniques de degrés élevés qui pourraient alors dégrader l'exactitude de la détermination de l'effet des harmoniques de bas degré

comme celui correspondant à l'aplatissement. Il faut déterminer tout l'ensemble des degrés du spectre des harmoniques. Les deux approches doivent ainsi se compléter.

En conclusion cette diminution de l'aplatissement géodynamique est importante sur le plan de la vitesse de rotation de la Terre. Cette dernière évolue dans le temps. Comme on vient de le voir de nombreuses variations avec de multiples périodes (annuelles, semi-annuelles, saisonnières, inter-annuelles) sont à considérer ; sous l'influence de plusieurs causes géophysiques, on peut observer des effets contraires par rapport à la tendance séculaire moyenne. C'est ainsi le cas depuis 2016 où l'on observe une accélération significative de la vitesse de rotation de la Terre dont la cause exacte nous échappe encore (voir la figure 3). Ce qu'il faut retenir en conséquence est l'importance de poursuivre par télémétrie laser les observations des cibles type Lageos, Starlette aussi bien que la pérennité d'une mission comme Grace-FO pour apporter une réponse claire à l'interprétation des variations observées. Autrement dit 25 ans après son lancement l'intérêt scientifique de Starlette n'est plus le même mais il existe toujours dans un contexte différent et il est nécessaire de le situer.

Intérêt scientifique des missions Starlette et Stella au tournant de l'an 2000, dans les dernières décennies et celles à venir.

Les satellites géodésiques laser ont été à nouveau et récemment décrits par Pearlman (Réf 17 Pearlman et al., 2019) avec leurs caractéristiques et leurs applications. Aujourd'hui, on peut dire que les satellites géodésiques Starlette et Stella continuent à contribuer à la détermination des paramètres géodésiques fondamentaux mais ils y contribuent ensemble et avec d'autres satellites et associés à d'autres technologies. La modélisation d'orbite permet aujourd'hui d'atteindre sur les trajectoires des précisions 6.5 mm et 6.0 mm, respectivement; il faut cependant noter que le nombre d'observations laser est souvent deux fois plus faible pour Stella que pour Starlette. Avec Starlette, le mouvement du pôle peut être déterminé à 300 micro arc seconde (rms, équivalent à 0.3 mas) et la durée du jour à 130 micro seconde et, d'un autre côté, le bruit sur le positionnement 3D des stations laser, après transformation de Helmert du réseau correspondant, est de 20 mm. Mais la combinaison des deux satellites n'est pas meilleure à cause d'un manque de données sur Stella.

En revanche, de meilleurs résultats (pôle et coordonnées) sont obtenus en utilisant la combinaison avec d'autres satellites tel le satellite Ajisai, dont le nombre de mesures reste toujours important. Rappelons en outre que certains auteurs ont utilisé ces deux satellites bas (LEO) pour déterminer des paramètres de la Terre solide élastique jusqu'en 2012.

De bien meilleurs résultats sont finalement obtenus en combinant les données de Starlette et Stella avec les données d'autres satellites géodésiques tout particulièrement ceux d'altitudes plus élevés comme les Lageos. Par exemple sur les composantes du mouvement du géocentre, l'erreur moyenne est de 0.7-0.9 mm sur les composantes X, Y et Z ; les amplitudes annuelles et semi-annuelles sont déterminées \pm à 0.18-0.25 mm. Une des raisons qui a été clairement identifiée avec les solutions LAGEOS seules, est que les paramètres empiriques ajustés au regard des effets non-gravitationnels (effets étudiés par ailleurs par nos proches collègues Farinella, Mignard, Barlier, Métris et Vokrouhlicky) biaisent les résultats ; ces effets viennent se corrélérer aux composantes du géocentre, et en particulier à la composante Z. Cette erreur est heureusement réduite dans le cas de combinaison de données de satellites hauts et bas à des altitudes différentes. La même amélioration est aussi à noter, sur une analyse de 20 ans de données laser Lageos avec les satellites orbitant à des altitudes inférieures; on l'observe ainsi sur les paramètres du pôle, avec un bruit résiduel à 145 micro arc seconde et 56 micro seconde pour la durée du jour. En outre, le facteur d'échelle du repère de référence terrestre

est également bien plus comparable à celui établi grâce aux données du VLBI, avec la combinaison des satellites laser à des altitudes différentes comme on peut le voir avec la solution ITRF2008. En revanche, on doit noter que l'estimation du biais des stations laser n'est pas recommandée en utilisant les satellites géodésiques bas, tels Starlette et Stella; même si quelques stations laser ont toujours des difficultés à atteindre Lageos en observation de jour, il est préférable d'utiliser ces derniers satellites.

L'intérêt de cet apport de Starlette (lancé en 1975) et de Stella (1993) par les mesures laser de distances réalisées sur eux a existé depuis le début et se maintient toujours dans la communauté nationale et internationale mais dans un contexte différent qui a beaucoup évolué; on le voit dans les publications et dans les références jointes concernant plusieurs applications utilisées pendant les décennies récentes; c'est la meilleure preuve de l'intérêt des recherches et des investissements faits. On peut rappeler encore ici que cela concerne les différents paramètres de la rotation de la Terre, les variations temporelles des premiers harmoniques du développement du potentiel de gravité terrestre, la détermination des positions précises des positions de stations lasers nécessaires à la réalisation de l'ITRF (Réf.13), le mouvement du centre des masses de la Terre. Starlette et Stella sont ainsi une belle contribution de la France à la géodésie spatiale par télémétrie laser avec des applications importantes dans les sciences de la Terre et ils sont « bons pour le service » pendant encore de nombreuses années ; leur intérêt scientifique doit en revanche se situer désormais en synergie avec l'apport des observations sur d'autres cibles laser et avec les autres technologies géodésiques. En conclusion il faut poursuivre l'effort d'observation des satellites par télémétrie laser, analyser les données avec les autres données et techniques géodésiques et assurer la pérennité de certaines missions géodésiques spécifiques comme Grace-FO aujourd'hui. Toutes ces observations ont un apport irremplaçable pour la surveillance d'un bon nombre de problèmes géophysiques liées à des transferts de masse interne au système Terre tels la climatologie, l'élévation du niveau des mers, l'océanographie, la glaciologie, l'hydrologie, en un mot pour beaucoup des sciences de la Terre.

Figure 1. Photo du satellite Starlette (crédit CNES).



Figure 2. Residus moyens des mesures de distance après le calcul d'orbite, soit environ 2 cm. Dans la partie inférieure de la figure on trouve le nombre de points normaux (ce sont des moyennes de mesures individuelles de distance) ; ces moyennes utilisées ont été d'environ de 1500 à 2000 par semaine et pour l'ensemble de tout le réseau de stations laser de 2001 à 2009 (crédit Mike Pearlman-ILRS).

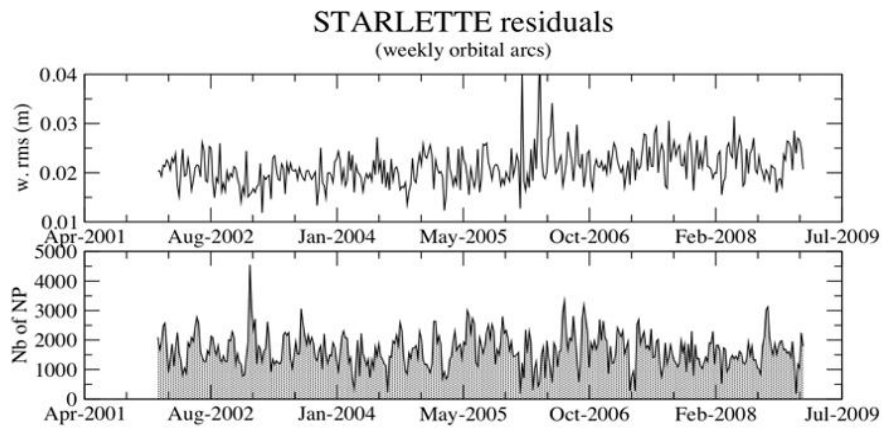
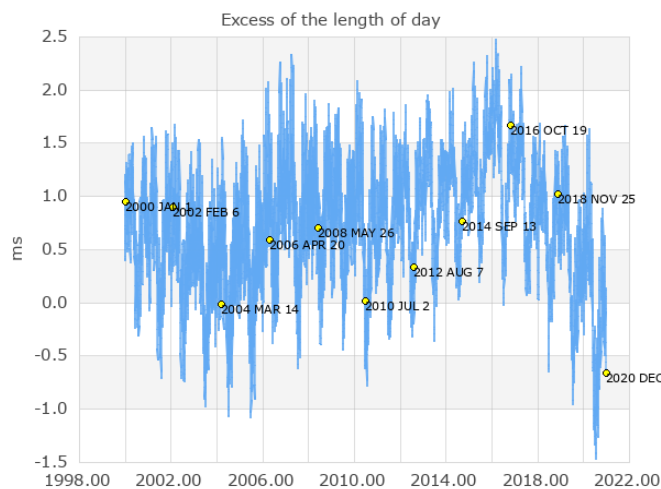


Figure 3. Excès de la longueur du jour par rapport à une origine conventionnelle ; quand cet excès est positif, la Terre tourne moins vite et elle tourne plus vite s'il est négatif -de 1998 à 2020-. (crédit Syrte /Observatoire de Paris/IERS)



La mission CASTOR/CACTUS

La mission CASTOR /CACTUS fut à l'origine une mission préparatoire à caractère de navigation donc de positionnement dont l'importance sur le plan militaire et sociétal était évidente et intéressait beaucoup la France. L'intérêt géodésique et environnemental en était alors une conséquence par l'étude nécessaire de l'impact de l'environnement terrestre sur les forces non-gravitationnelles subies par le satellite dans l'Espace, ces forces étant susceptibles de modifier la trajectoire du satellite. Pour cela l'idée fut de s'appuyer sur la mesure de ces forces non-gravitationnelles par un accéléromètre ultrasensible à bord d'un satellite dont il faudrait valider le concept et la réalisation. À partir de ces mesures il fallait ensuite être en mesure de les compenser automatiquement par des micro poussées d'un moteur spécifique, ce qui serait l'objet de la mission associée Pollux, lancée en même temps que la mission CASTOR. A titre d'exemple les Etats-Unis avaient montré le potentiel d'un système de positionnement pour leur marine de guerre, le système Transit développé dès 1958 et opérationnel en 1964 mais pour avoir une qualité prédictive il fallait de fait chercher à avoir des trajectoires si possible non soumises ou peu sensibles à des forces de nature chaotique comme celles générées par le freinage atmosphérique. L'idée était alors d'utiliser des trajectoires d'altitudes assez élevées comme celles des satellites Transit avec des paramètres orbitaux remis à jour très régulièrement ou des trajectoires dites « drag free » c'est-à-dire fondées sur l'utilisation de satellites capables de compenser les forces de freinage par des petites poussées générées de manière automatique. Cette mission CASTOR fut un succès pour démontrer le potentiel et la qualité de l'accéléromètre CACTUS de l'ONERA (Capteur accélérométrique triaxial Ultra Sensible) dans les différents domaines de la navigation, mais aussi par voie de conséquence dans celui de la géodésie et de l'environnement. Les résultats de la mission POLLUX furent en revanche très mitigés et la mission n'a fonctionné qu'un temps limité. On n'en développera pas ici les résultats.

Le lancement de la mission CASTOR /CACTUS, ses caractéristiques

Les deux satellites CASTOR et POLLUX furent lancés par le CNES le 15 mai 1975 par une fusée Diamant-BP4 depuis le centre de lancement de Kourou en Guyane (masse respective de 77,5 kg et de 37,5 kg dont 7 kg d'hydrazine pour tester le fonctionnement d'un propulseur à hydrazine). La fusée Diamant BP 4, plus puissante, faisait suite à la fusée Diamant A qui avait servi aux lancements réussis des satellites Diadèmes en 1967 et comportait un étage à poudre (d'où en principe le P dans BP 4) . La puissance de la fusée imposa l'inclinaison de la trajectoire sur l'équateur à 30 degrés. Pour les besoins de la mission il fallait également un périégée aux environs de 300 km et un apogée vers 1300 km.

Le premier lancement effectué le 21 mai 1973 fut malheureusement un échec pour le lanceur de l'époque mais le second en 1975 fut un succès.

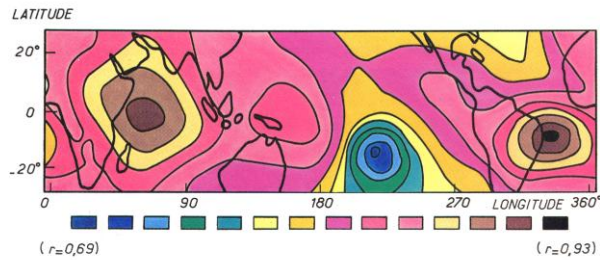
Le satellite CASTOR avec à bord l'accéléromètre CACTUS (CASTOR encore appelé D5B avant le lancement selon l'usage et dans les premières publications) avait aussi des applications intéressantes à caractère géodésique et environnemental ; d'une masse de 77,5 kg il avait une forme polyédrique de 80 cm de diamètre. Le satellite devait permettre de tester le fonctionnement de l'instrument CACTUS. Chaque face du satellite était recouverte de cellules solaires ainsi que d'un réflecteur laser pour permettre une trajectoire précise grâce à des observations de télémétrie laser. Des senseurs solaires permettaient une restitution d'attitude à quelques degrés près. Le satellite est rentré dans l'atmosphère terrestre le 18 février 1979.

L'accéléromètre devait permettre de mesurer aussi bien des accélérations dues au freinage de l'atmosphère au niveau de quelques 10^{-6} m/s² au périégée à 270 km que des accélérations plus faibles à l'apogée à 1300 km dues aux pressions de radiation confirmant ainsi le zéro de l'instrument évalué de l'ordre de 10^{-8} m/s². La pression de radiation solaire avait été évaluée avant tir de ce niveau.

Les premiers résultats obtenus furent et seront très encourageants et confirmèrent le très bon fonctionnement de l'accéléromètre ; on peut citer ainsi un ensemble de résultats très satisfaisants :

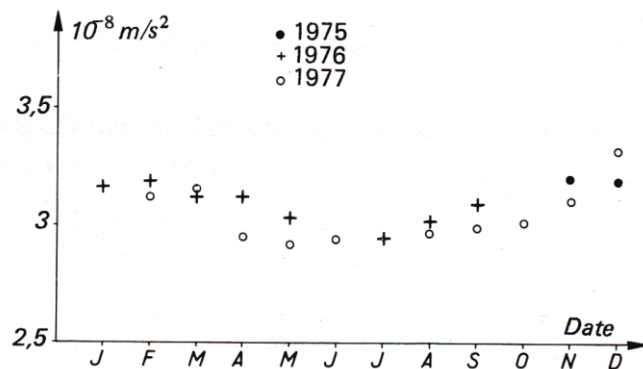
- Les mesures de la densité de l'atmosphère au périégée seront en très bon accord avec les données de freinage déduites de l'analyse de la trajectoire du satellite. (Fig 1). On donne le rapport entre la valeur de la densité mesurée et la valeur d'un modèle de densité de référence donnant seulement une valeur moyenne en fonction de l'altitude, cela fait apparaître les variations en fonction de la latitude et de la longitude. Il est clair que l'atmosphère n'est pas uniforme à la précision des mesures (Réf. 2, Fig.1).

- Figure 1



- L'effet attendu de l'activité géomagnétique sur valeur de la densité déduite des modèles de thermosphère qui sera aussi en très bon accord avec les mesures de l'accéléromètre.
- L'utilisation de données accélérométriques pour la modélisation de la thermosphère qui sera très développée et fera l'objet d'un document spécifique pour les 50 ans du GRGS (Modèles de densité de la haute atmosphère et orbitographie spatiale par François Barlier et Sean Bruinsma publiés dans le cadre des 50 ans du GRGS).
- La mesure du saut d'accélération subie par le satellite lors des passages ombre-lumière du Soleil du satellite lors des altitudes supérieures à 800 km qui sera faite avec précision ; Initialement l'objectif de qualification de l'accéléromètre était d'arriver à observer ce saut mais l'accéléromètre permet d'atteindre des résultats meilleurs que ceux espérés avec la mise en évidence des variations temporelles de la valeur de ce saut soit 7 % au cours de l'année ; ce saut varie en accord avec les variations de la distance satellite-Soleil dues à l'excentricité de l'orbite terrestre. On a pu ainsi retrouver l'effet de cette excentricité sur les variations de la mesure de ce saut, ce résultat extrêmement satisfaisant permet de qualifier définitivement les caractéristiques de l'accéléromètre (A.M. Mainguy Réf. 1, Réf. 5, Fig.2).

Figure 2



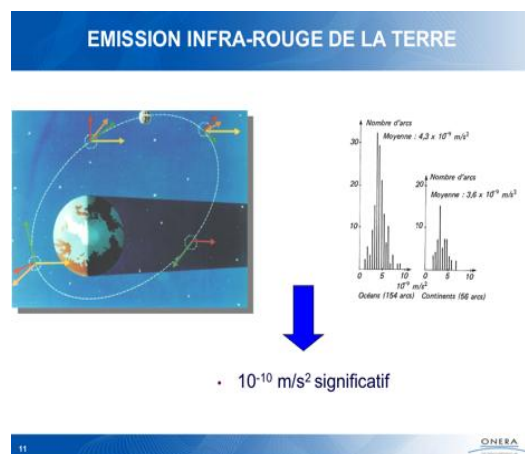
- Autre résultat obtenu l'effet de la précipitation de protons sur le fonctionnement de l'accéléromètre au-dessus de l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud, qui modifie la charge électrique acquise par la masse d'épreuve sans contact matériel avec le satellite et qui est le cœur du dispositif de mesures de l'accéléromètre ; il sera bien conforme aux attentes théoriques de la modélisation déduites des mesures des précipitations de protons dans cette zone de l'Atlantique Sud.

Limites ultimes de la sensibilité de l'accéléromètre.

- Pour cela on a choisi de donner des résultats sur la mesure du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre dans les zones tropicales et équatoriales.

En effet grâce à la grande quantité de données acquises et à une technique de traitement approprié, des mesures d'accélération furent obtenues et avec une bien meilleure sensibilité que celle attendue avant le lancement soit environ 10^{-9} m/s² pour les valeurs individuelles et quelques 10^{-10} m/s² voire un peu mieux pour les valeurs moyennes. Ce faisant et contrairement à ce qui était donc attendu l'appareil était ainsi capable de mesurer l'effet du rayonnement infrarouge d'origine terrestre et de ses variations, en fonction de la nature des surfaces survolées. (Réf. 4, Fig. 3) à partir des moyennes du rayonnement Infrarouge au-dessus des continents ou des océans.

Figure 3



De manière un peu dommageable à l'époque la télémessure n'avait pas prévu un nombre suffisant de digits pour exploiter pleinement les capacités de l'accéléromètre et cela entraîna malheureusement une perte d'information. Les résultats cependant excellents sont explicités et donnés dans deux articles ; un article concerne les mesures de très faibles accélérations subies par le satellite quand il est dans l'ombre de la Terre et à des altitudes proches de l'apogée (1290 km au début de la mission). Celles-ci sont dues, notamment, à la pression de rayonnement IR de la Terre, mais aussi à des problèmes de forces parasites internes comme la charge électrique de la masse d'épreuve ; ces forces parasites sont également dues à la poussée à laquelle le satellite est soumis suite à l'anisotropie de son propre rayonnement et qu'on appelle également la poussée thermique; le satellite tourne en effet très lentement et des écarts de 80°C peuvent être enregistrés entre certaines parties de la surface du satellite. On ne peut évidemment pas détailler ici la complexité du traitement des données incluant également différentes forces gravitationnelles internes, des craquements thermiques liés aux variations de température, l'impact des micrométéorites, mais toutes ces questions ont fait l'objet d'études spécifiques, permettant d'aboutir à la mesure la plus exacte possible de l'accélération d'origine externe subie par le satellite. On a pu ainsi étudier comme dit ci-dessus les effets du rayonnement IR en fonction de la nature des différentes surfaces survolées, océan ou continent (Fig. 3) des types de nébulosité rencontrés, et aussi de la latitude, zone équatoriale ou tropicale, (Réf. 2, Boudon et al. 1979 et Réf. 4). Un autre article concerne la mesure du rayonnement renvoyé par la Terre explicité ci-dessous.

- Modélisation de l'albédo de la Terre dans les zones tropicales et équatoriales.

Le second article concerne un modèle d'albédo lié au rayonnement réfléchi par la Terre quand le satellite est éclairé par le Soleil. L'albédo que l'on peut calculer et modéliser en un point de la surface terrestre varie en fonction de l'heure locale solaire, de la latitude dans la zone considérée entre 30° Nord et 30° Sud du fait de l'inclinaison de la trajectoire sur l'équateur, de la nature de la surface terrestre considérée, continents ou océans. Ce modèle s'appuie sur les mesures d'accélération mais aussi sur les données des senseurs solaires. (Ref. 3, Lala et al. 1978).

Cette mission de 1975 n'a pas débouché sur des applications dans le domaine du positionnement et de la navigation, comme envisagée au départ. La solution du problème de navigation et de positionnement reposera en fait sur les constellations à très hautes altitudes proches de 20 000 km, les GNSS (par exemple le GPS aux Etats-Unis, la constellation GALILEO en Europe, GLONASS en Union Soviétique). Il y aura aussi le déploiement du système français de positionnement DORIS. Ces sujets seront abordés dans d'autres analyses publiées dans le cadre de cette même célébration des 50 ans du GRGS. En revanche d'autres applications verront le jour.

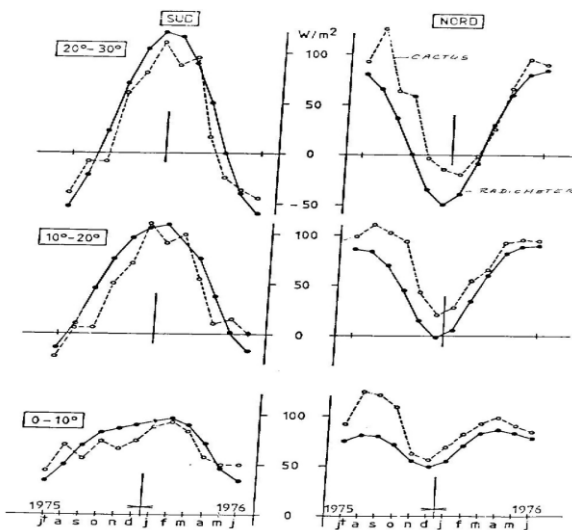
Le projet sur la mesure du bilan radiatif local et régional par accélérométrie, le projet BIRAMIS.

Une application très importante de cette mission : la mesure du bilan radiatif de la Terre par accélérométrie, le projet Biramis (sous contrat ESA) ; dans le cadre de la mission CASTOR /CACTUS la mesure du Bilan radiatif local a pu être faite dans les zones équatoriales et tropicales.

Les résultats obtenus sur le satellite CASTOR dont le but était de vérifier que l'instrument CACTUS, un accéléromètre, était capable de mesurer les forces de surface s'exerçant sur la peau du satellite ont conduit des responsables de l'ESA à envisager une expérience de mesure directe du bilan radiatif de la Terre. Pour cela, il fallait bien sûr considérer des orbites polaires circulaires et à une altitude permettant de s'affranchir pour l'essentiel des effets du freinage atmosphérique sur la trajectoire du satellite, soit à une altitude un peu supérieure à 1000 km. En effet l'accéléromètre fournit directement la résultante de l'échange radiatif (Soleil-Terre-Atmosphère) avec une seule erreur de mesure contrairement à la méthode utilisée classiquement comportant trois radiomètres : deux dans le visible pour le Soleil et l'albédo terrestre et un dans l'infrarouge pour l'émission propre de la Terre. La précision du bilan global dépendra bien sûr du nombre de satellites utilisés (comme dans la méthode classique) mais également de l'homogénéité de la réponse de la peau du satellite aux différentes longueurs d'onde. Une étude par Anne-Marie Mainguy (Réf 5) a montré qu'un satellite de forme sphérique permettait de s'affranchir de ce problème car la peau absorbante ou réfléchissante donnait la même réponse. Le satellite CASTOR de forme polyédrique s'approchait de cette forme et à partir de ces principes on a pu déjà étudier les variations des bilans radiatifs locaux obtenus avec les mesures faites par CACTUS dans les zones considérées de latitude équatoriales et tropicales.

Pour valider au mieux la méthode et l'expérience CASTOR/CACTUS il a été fait en parallèle des comparaisons avec des résultats obtenus avec des radiomètres (Réf. 7, Fig. 4). En trait plein sont données les mesures faites par radiométrie et en trait pointillé les mesures faites par accélérométrie. Quand la valeur du bilan est positive, la zone de latitude considérée pour le mois considéré reçoit plus de rayonnement qu'elle n'en réémet et inversement si cette valeur est négative la zone émet plus de rayonnement qu'elle n'en absorbe. Globalement pour la Terre entière, on est en moyenne très proche d'un état d'équilibre mais la petite différence à cet état d'équilibre est un indicateur précieux en climatologie pour savoir si globalement on est dans une situation de réchauffement ou de refroidissement. Dans le cas présent, on ne disposait malheureusement d'information que dans les zones équatoriales et tropicales, rendant impossible toute estimation moyenne et globale pour la Terre entière à cette époque. Cependant ceci a montré une bonne cohérence entre la méthode classique à base des radiomètres et la méthode accélérométrique (Y.Boudon Réf. 4).

Figure 4



Pour des comparaisons avec des données radiométriques il a fallu étalonner l'accéléromètre qui mesure l'effet de la pression solaire directe en m/s^2 , et les convertir en W/m^2 ; le saut des mesures de l'accéléromètre quand on passe du satellite dans l'ombre au satellite en pleine lumière correspond en effet à l'action de la pression solaire directe dont l'amplitude est donnée par la valeur de la Constante solaire (proche de $1370 W/m^2$ à une unité astronomique de distance). Au cours de l'année, cet effet de la pression solaire directe varie puisque la distance Terre-Soleil varie, la trajectoire de la Terre étant elliptique ; l'analyse des données permet de retrouver comme on l'a déjà dit, les effets de l'excentricité de l'orbite terrestre. Ceci confirme bien la qualité remarquable de l'accéléromètre qui permet d'atteindre pour les valeurs moyennes une précision de l'ordre de quelques $10^{-10} m/s^2$ (Ref. 4, Fig. 3) et même mieux ; Pour la comparaison des bilans radiatifs obtenus par différentes techniques, il faut évidemment ramener les mesures radiométriques et accélérométriques à la même altitude, moyennant nécessairement certaines hypothèses. Il est important de rappeler que l'accéléromètre mesure directement la différence entre ce qui est émis et reçu par la surface terrestre, ce qui est un grand avantage, contrairement aux radiomètres qui mesurent séparément ce qui est émis et ce qui est reçu, quantités toujours assez proches et qu'il faut donc ensuite soustraire l'une à l'autre pour avoir le bilan. Des résultats sur le bilan radiatif obtenus dans l'expérience CASTOR/CACTUS ont été présentés à Vienne en 1983 (Ref. 5, Berroir et al., 1983). La comparaison des résultats obtenus est en moyenne satisfaisante comme on peut le voir sur la figure 4 mais des différences significatives existent qu'il serait précisément très intéressant d'analyser dans une future mission dédiée à lancer.

Anne-Marie Mainguy (Réf. 5) a ainsi finalement proposé puis étendu les résultats de l'expérience CASTOR/CACTUS dans l'esprit décrit ci-dessus ; elle a développé un nouveau projet de mission spatiale, le projet BIRAMIS (Bilan Radiatif de la Terre par Micro

accélérométrie Spatiale). À noter que L'expérience Biramis pourrait permettre d'autres résultats que celui du bilan radiatif comme le suivi de l'évolution de la constante solaire grâce aux transitions jour-nuit où encore des tentatives de modélisation de l'émission infrarouge de la Terre. À souligner encore que l'expérience CASTOR permet également de s'affranchir des forces parasites que mesure l'accéléromètre et d'étalonner la réponse de la peau du satellite car le capteur devient l'accéléromètre plus l'enveloppe du satellite.

En dépit des résultats prometteurs obtenus, du soutien obtenu lors du colloque SONG de l'ESA (Space Oceanography, Navigation and Geodynamics-16-21 janvier 1978, ESA -SP-137), compte tenu de la compétition toujours rude dans le choix des missions spatiales, ou le projet n'a cependant pas été retenu. On peut le regretter surtout aujourd'hui avec le changement climatique et l'augmentation trop rapide des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; le bilan radiatif global de la Terre n'est plus à l'équilibre; à un instant donné la Terre reçoit plus de rayonnement qu'elle ne peut en réémettre d'où un réchauffement; le bilan radiatif local, zonal et global et leurs variations demeurent alors à suivre en attendant le retour à l'équilibre ou à un état proche de l'équilibre avec notamment la diminution puis l'arrêt de l'augmentation des gaz à effet de serre.

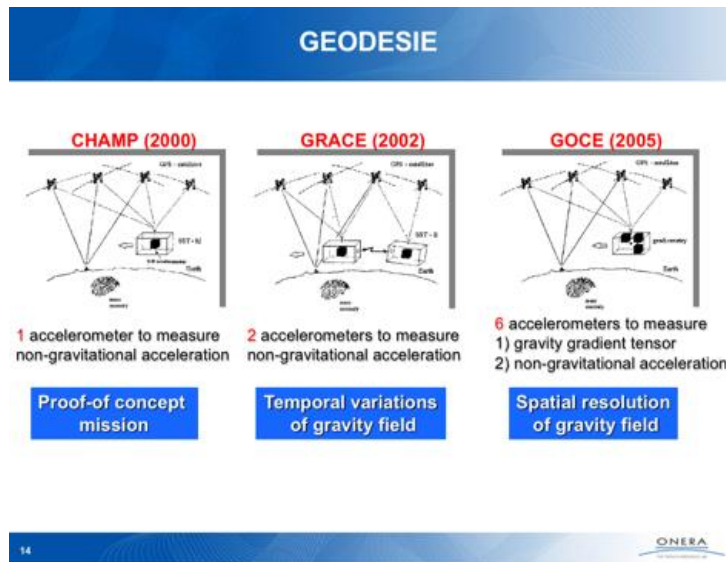
Dans ce contexte on doit cependant et maintenant signaler une étude très récente de 2018 (Réf. 8) faite par la NASA et le JPL laboratory en collaboration avec l'ONERA et qui reprend très justement l'étude de l'ancien projet BIRAMIS de 1983 de manière très intéressante et très approfondie, dans le cadre du changement climatique actuel ; ceci est une grande satisfaction pour les anciens promoteurs du projet. Le présent article souligne la complexité de l'estimation du déséquilibre énergétique de la Terre directement à partir de l'espace et de son importance. La mesure des composants radiatifs individuels demeure indispensable pour comprendre les causes des perturbations du bilan énergétique comme les changements temporels du contenu thermique des océans qui représentent un puits de chaleur. Nous ne savons cependant pas en ce moment si une suite sera donnée à cette nouvelle étude.

Exemples de diverses autres applications spatiales de l'accélérométrie développée par l'ONERA en géodésie et en physique fondamentale.

D'autres applications importantes furent ensuite très heureusement et positivement réalisées comme résultats de cette mission de 1975. Elles concernent la mise au point par l'ONERA de nouveaux accéléromètres spatiaux dédiés à différentes missions, telle celle concernant la détermination du champ de gravité terrestre, mission allemande Champ (2000), mission germano-américaine Grace et Grace-Follow-On (2002 et 2017), mission de l'ESA en gradiométrie GOCE (2009). (Fig. 5). On doit ajouter que grâce à ces études sur l'accélérométrie spatiale, la mission Microscope a pu vérifier à un niveau de précision relative encore jamais atteint (2. 10⁻¹⁴) la validité du principe d'Equivalence de la Relativité Générale (2016) ; des théoriciens pensent en effet que ce principe pourrait (ou devrait) ne plus être valide à partir

d'un certain niveau de précision ouvrant des horizons nouveaux sur des limites de la Relativité générale; enfin on doit signaler la réussite de cette mission Pathfinder (2015), mission préparatoire à la mission LISA sur la détection des ondes gravitationnelles prévues par la Relativité Générale (mission qui devrait être lancée en 2034). Toutes les différentes missions lancées ont été un succès (Fig.5) et plusieurs ont fait l'objet de presentation pour les 50 ans du GRGS et font donc l'objet d'une publication spécifique dans ce cadre des 50 ans.

Figure 5



2.2 Missions altimétriques (Topex/Poseidon, Jason(s))

Préambule

Depuis plus de 40 ans, les satellites altimétriques observent les hauteurs du niveau de la mer, celles des rivières, lacs, réservoirs, terres humides, de la glace et glace de mer, tout ceci avec une période de répétitivité (ou pas) allant de 10 jours jusqu'à 35 jours et plus pour des questions de géodésie. L'objectif principal est la compréhension de la dynamique océanique et le rôle de l'océan dans le climat de la Terre. Mais l'altimétrie est également une source de données très importante pour la géophysique marine et la mesure du géoïde à l'échelle mondiale (forme et champ de gravité de la Terre). Le principe de l'altimétrie consiste à mesurer les hauteurs de la surface de la Terre à partir d'instruments embarqués utilisant des signaux radar ou laser (par différence de temps entre émission et réception) à une altitude entre 800 et 1300 km et avec une précision qui a toujours progressé au cours du temps ; d'environ 1-2 m au départ en 1975 jusqu'à moins de 2 cm aujourd'hui (2022). De nouvelles technologies et applications ont émergé et se sont considérablement développées ; une nouvelle génération de capteurs altimétriques, opérant à différentes fréquences (bandes Ku, Ka et optique), utilisent des principes de mesure aujourd'hui très variés ; pulse radar, mesures Doppler, entièrement focalisées ou pas (radar à synthèse d'ouverture), ou encore interférométriques donc avec deux antennes à bord. En dehors des applications géodésiques et géophysiques, qui sont fondamentales pour construire des modèles de Terre, l'objectif de l'altimétrie spatiale est d'observer en continue la topographie de l'océan afin de mieux comprendre sa dynamique (circulation, marées, hausse du niveau de la mer) et les processus d'interactions avec l'atmosphère et la terre solide, si possible sur le long terme donc sur plusieurs décennies. En outre, favoriser l'utilisation opérationnelle des données de topographie des océans et des continents ouvre la voie à nombre d'études liées à l'environnement et au suivi des changements climatiques ; et cela débouche sur la mise en place de services applicatifs qui, d'un point de vue sociétal (prévision de l'état de l'océan, sécurité, navigation, préservation, etc.), deviennent indispensables au développement durable et à une véritable gestion de l'océan. La France a une situation particulière car elle est présente dans la plupart des mers du globe et à toutes les latitudes (Manche, Mer du Nord, Méditerranée, Caraïbes, et océans Atlantique, Indien, Pacifique, et Austral) ; et ceci représente environ 11 millions de km² sous souveraineté ou bien juridiction nationale (97% en Outre-mer). Les responsabilités sont donc importantes. Si l'on doit d'abord citer le rôle majeur joué par Michel Lefebvre et ses collaborateurs pour la réussite d'un programme coopératif exceptionnel entre le CNES et la NASA signé en 1987, le programme TOPEX/Poséidon dont nous reparlerons plus loin, on s'attachera en fait à mettre en avant la contribution française en matière d'océanographie, de géodésie spatiale et de technologies sol et spatiales, contribution qui est remarquable à tous les points de vue ; avec notamment les travaux de Christian Le Provost et collaborateurs sur les marées océaniques, référence internationale dans ce domaine, les travaux du CNES et de l'IGN dans le développement du système de radio positionnement DORIS, et ceux menés avec Thalès Alenia Space sur le développement des radars altimètres *Poséidon*. Les différentes sections du présent chapitre illustrent les étapes et la difficulté d'opérer plusieurs missions d'altimétrie successives tout en garantissant une grande homogénéité des résultats et donc une grande stabilité sur le long terme (plusieurs décennies) ainsi qu'une large accessibilité aux sorties des modèles océanographiques. Il y est

fait une place très importante au spatial, sans oublier les indispensables systèmes et techniques de mesure in situ.

Un Océan – une nouvelle vision

Un colloque très opportun pour les géosciences spatiales, terre solide et océans, eut lieu à Williamstown (Massachusetts, Etats Unis) en juillet 1969 ; il permit de faire émerger une perspective remarquable des applications potentielles de l'Espace en sciences de la Terre et des océans, applications qui faisaient alors déjà l'objet de nombreuses réflexions dans le monde scientifique. « Solid Earth and Ocean Physics — Applications of Space and Astronomic Techniques » fut le thème du colloque (voir le rapport de W.M. Kaula, 1969) ; il sera le déclenchement d'une succession d'entreprises et de collaborations auxquelles de plus en plus d'acteurs se rallièrent progressivement. Avec la promesse de mesures spatiales et donc globales et répétitives, tout devenait en effet très novateur, ouvrant de nouveaux horizons comme les déterminations du champ de gravité de la Terre et du géoïde, la topographie des océans, l'évolution des couvertures continentales et polaires, etc. On mesure aujourd'hui combien cela orienta beaucoup la géodésie, la géophysique et l'océanographie spatiales dans la communauté française.

Hommage à Michel Lefebvre

Dans l'esprit des conclusions du colloque de Williamstown, Michel Lefebvre écrivit en avril 1970 avec François Barlier un premier document fondateur « Propositions à long terme en géodynamique » ; il fut largement diffusé dans la communauté (Barlier & Lefebvre, 1971). Il y est décrit tout ce que l'on peut espérer obtenir en géodynamique à partir de l'analyse des mouvements (et des mesures) des satellites artificiels. Ce texte et le document associé serviront de référence dans la définition des objectifs scientifiques tant pour la création du Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS) en 1971, que pour la fondation du nouvel Observatoire à Grasse dans les Alpes Maritimes, le CERGA (Centre d'Etudes et de Recherche en Géodynamique et en Astronomie), autour de Jean Kovalevsky et de François Barlier. Le tempérament de Michel Lefebvre, son enthousiasme exceptionnel, son charisme à rassembler des forces et des énergies non seulement chez les jeunes et les décideurs en France mais aussi à l'étranger, en Europe et aux Etats-Unis, permit d'influencer en profondeur avec succès dans tout le secteur de l'Observation de la Terre et d'y introduire les techniques spatiales. Michel Lefebvre fut appelé à siéger dans de nombreuses commissions à l'échelle européenne ou en coopération avec les Etats Unis, dans le but de participer et d'animer avec ses collaborateurs des programmes d'océanographie et d'altimétrie des océans. En 1978, il participa avec la communauté française à un grand colloque, à Schloss Elmau (Bavière) en Allemagne, ayant comme objectif de définir un vaste programme européen de coopération appelé SONG (Satellite Oceanography Navigation Geodynamics); les mots d'Océanographie et Géodynamique sont essentiels ; ce colloque fut le pendant européen de ce que les américains avait organisé en 1969 à Williamstown. Ce sera une référence. En 1997 avec N.R. Smith (Australie), Michel Lefebvre initiait au plan international le Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), dont les motivations venaient, non pas de la recherche fondamentale, mais de multiples besoins sociétaux (météorologie, transports, pêche, biologie et ressources,

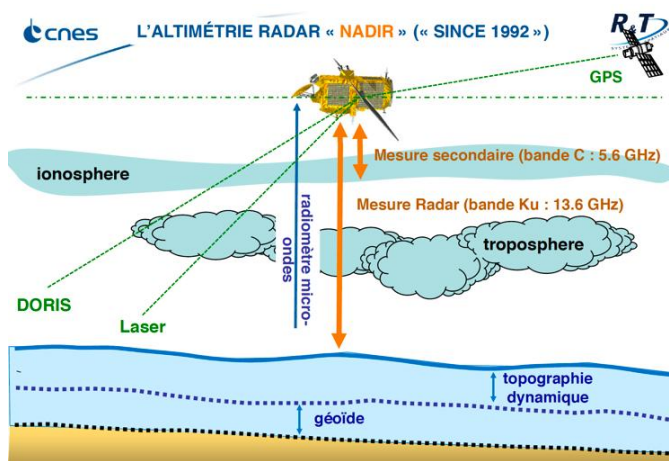
etc.) liés à la connaissance de l'environnement marin mais conditionnés par l'accès à de nombreux produits venant de l'assimilation opérationnelle de données spatiales et in situ (Smith & Lefebvre, 1997). Il participa aussi à WOCE (World Ocean Circulation Experiment), 1990-2002 dirigé par Carl Wunsch. En France, une coopération inter-organismes (CNRS, Ifremer, IRD, Météo-France et SHOM) a permis précisément le développement dans ce sens du projet opérationnel MERCATOR sur les océans (prévisions de son état, développement économique, protection de l'environnement biologique et physique etc...); il est dirigé depuis le début par Pierre Bahurel (Bahurel et al., 2006). En février 2022 s'est tenu à Brest le « One Ocean Summit » colloque où la communauté internationale s'est engagée à mettre l'océan au cœur de l'agenda politique international; MERCATOR Ocean International est alors devenu un organisme intergouvernemental; de son côté la commission européenne a conçu les services Copernicus (ex GMES) afin de soutenir les programmes de l'Union pour la préservation de la nature et de la biodiversité; on y trouve le service de Surveillance de l'Environnement Marin (Le Traon et al., 2019).

Altimétrie par satellite

Principe

L'altimétrie spatiale est une technique d'observation de la surface de la Terre et de ses océans par satellite. Le principe de l'altimétrie est d'abord de mesurer avec une grande précision l'altitude du satellite par rapport à la surface et, dans le même temps, de déterminer sa position dans un référentiel terrestre adopté par tous et reconnu sur le plan international (International Terrestrial Reference Frame, ITRF). Pour simple que puisse être le principe de l'altimétrie (Figure 1), sa réalisation demeure complexe. Le positionnement du satellite, ou disons le calcul de sa trajectoire, s'appuie sur les équations de la Mécanique Céleste combinées à des mesures géodésiques dites de poursuite (distance par laser et/ou vitesse relative par effet Doppler). Ceci requiert l'utilisation de réseaux d'observatoires, de stations, ou d'antennes au sol, ainsi que de constellations de satellites (constellation GNSS), qu'il faut pouvoir déployer de manière aussi large que possible. Ensuite, c'est le rôle du radar embarqué de mesurer la distance satellite-surface, en estimant le temps aller-retour d'une onde électromagnétique (2 à 35 GHz) émise vers le nadir du satellite, onde qui se réfléchit sur cette surface (mer, glace, etc.). En faisant la différence entre l'altitude calculée du satellite et cette mesure, on obtient finalement la "hauteur de mer" dans un référentiel parfaitement défini.

Figure 1. Principe de l'altimétrie par satellite.



Le principe de l'altimétrie est donc basé sur trois éléments clés : le calcul d'orbite, l'instrument radar (généralement en bande Ku, soit à environ 13 GHz) et les systèmes de mesures et corrections additionnels (*Escudier et al., 2017*). Ces corrections sont liées à plusieurs effets ; au niveau instrumental, il y a l'interprétation de la forme de l'onde radar émise/reçue sous forme de train d'impulsions, le biais électromagnétique, les effets de la traversée de l'ionosphère et de la troposphère (composantes sèche et humide) ; au niveau géophysique, il y a les corrections de marée solide, de marée océanique, de charge sur la croûte océanique, de marée polaire et enfin la correction de dynamique atmosphérique (baromètre inverse au 1^{er} ordre) liée à la charge de l'atmosphère. Toutes ces questions ne peuvent être abordées et ne seront pas abordées ici de manière exhaustive. Nous fournirons plutôt au lecteur des éléments fondamentaux, tout en faisant place à la contribution française qui fut particulièrement originale et décisive sur les questions comme le système de suivi/poursuite d'orbite DORIS, l'instrumentation radar *Poséidon* et les méthodes d'étalonnage et de validation des mesures, l'océanographie physique et la modélisation, le développement de services.

Les précurseurs : premières missions d'altimétrie spatiale

L'objectif principal de l'altimétrie était l'étude de la dynamique de l'océan (marées, courants, tourbillons, niveau de la mer, etc.) avec l'idée d'analyser si possible en parallèle des observations de surface comme la température et la densité des eaux. En outre, le calcul de surfaces topographiques moyennes océaniques devait également permettre d'améliorer la connaissance du géoïde marin (les anomalies de gravité) et de faire émerger des recherches innovantes en géophysiques liées à la bathymétrie, aux volcans, la lithosphère etc. (*Cazenave et al., 1988*).

En dehors des premiers essais d'un altimètre radar embarqué sur SkyLab (1973), c'est entre 1975 et 1978 que la NASA lance GEOS-3 (Geodynamics and Earth Ocean Satellite) puis Seasat. Ces deux missions ont apporté à la communauté scientifique, notamment aux océanographes et aux géodésiens, une somme considérable de données de presque 3 ans et 106 jours, respectivement. Avec des bruits instrumentaux (radar) de respectivement 23 cm et 5 cm rms à 1-sec, la principale source d'incertitude venait du calcul d'orbite, à environ 2 m en absolu mais réduit à 70 cm et environ 20 cm respectivement, par réduction des différences corrigées aux "points de croisements" des arcs de trajectoire. Ont alors émergé des surfaces moyennes océaniques plus précises, calculées au plan régional, débouchant sur des études en géodésie-géophysique ; voir les travaux de la communauté française en Méditerranée (*Barlier et al., 1991*) ainsi que le premier géoïde marin par altimétrie aux Iles Kerguelen calculé au GRGS par G. Balmino (*JGR 84, 1979*). Suite à la courte durée de vie de Seasat (panne électrique), la mission GeoSat (Geodetic Satellite, 1985) de la marine américaine, qui fut équipée d'un radar (~3 cm de précision) issu des technologies précédentes, a cependant permis d'atteindre pleinement la description d'un géoïde marin complet, avec des anomalies de gravité relativement fines, grâce à une intertrace orbitale de 6 km due au phasage sur un cycle très long (*Olgati et al., 1995*). En outre avec un second phasage de l'orbite sur un cycle de 17 jours, suivi également par son successeur GeoSat-FO en 1998, il a été possible d'atteindre les variations périodiques du niveau de l'océan (*Périgaud and Delecluse, 1992*).

Les données de ces premières missions d'altimétrie devaient déboucher sur l'estimation de la variabilité océanique à méso-échelle ; c'est la première fois qu'il était possible de séparer la partie quasi-stationnaire de l'océan du géoïde. En outre, l'analyse du front d'onde radar réfléchi par la surface a permis de mieux comprendre l'état de mer instantané et même d'en extraire la vitesse du vent. On renvoie le lecteur vers les issues spéciales de "*Journal of Geophysical Research*" (JGR, 84, B8, 1979, puis en 1982 et 1983) et celles de "*Marine Geodesy*" (Vol. 3, 1980, puis en 1983) qui présentent de nombreux articles sur les analyses complémentaires entre géodésie marine et dynamique océanique. La communauté française a été très présente dans tous ces domaines.

TOPEX/Poséidon et ERS : un progrès décisif

On considère la mission franco-américaine TOPEX/Poséidon (T/P, 1992) comme étant la porte d'entrée vers une altimétrie de grande précision qui se développe depuis plus de 30 ans sur la même trajectoire avec la filière Jason (répétitivité de 10 j) ; car toutes ces missions, lancées à un peu plus de 1300 km et 66.5° d'inclinaison, disposent de trois systèmes de positionnement à bord — DORIS, laser et GNSS (voir plus loin la section correspondante), ce qui constitue un atout majeur. T/P a été définitivement arrêté en janvier 2006, soit après plus de 13 ans de fonctionnement. Cette longue durée de vie a permis d'identifier les variations à grande échelle de la circulation océanique et notamment les variations saisonnières et inter annuelles, ainsi que l'augmentation du niveau moyen des mers. De plus, pour la première fois, a été effectué le calcul précis d'un modèle de marées complet, en plein océan, ceci sur plusieurs années (*Le Provost et al., 1998*). Enfin, en remettant en cause les mécanismes de dissipation d'énergie, il a été possible de proposer qu'une partie de cette énergie joue un rôle moteur dans la circulation profonde (*Le Provost & Lyard, 1997*) et donc sur l'évolution séculaire du système Terre-Lune mieux comprise.

TOPEX/Poséidon a eu une influence majeure aussi grâce à la complémentarité avec les deux satellites ERS (1991, 1995) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Le calage sur la surface de référence T/P (inter-trace de 315 km à l'équateur) a permis d'améliorer les résultats de ces deux missions altimétriques (*Le Traon & Ogor, 1998*). Mais en retour, l'échantillonnage complémentaire et substantiel des ERS (inter-trace de 90 km) a permis un calcul déterministe de la circulation tourbillonnaire, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications nouvelles (*Ducet et al., 2000*). Enfin, le satellite ERS-1 a pu être placé sur une orbite géodésique à maille encore plus fine (intertrace de 8 km) permettant le calcul du premier géoïde marin à haute résolution (*Cazenave et al., 1996*) et permettant aussi d'analyser la situation des zones polaires (*Rémy et al., 1999*).

Cette mini-constellation de satellites altimétriques a produit une couverture spatio-temporelle juste suffisante pour ouvrir le champ de l'océanographie à l'opérationnel et à l'étude du climat (long terme). Dans l'histoire des rapports entre l'océan et le climat, le rôle de la longue série temporelle de T/P est un cas unique ou en tout cas exemplaire ; elle est et restera une contribution "décisive" à l'étude de la Terre, mais elle n'est pas suffisante.

Les missions d'altimétrie après 2000

Le 15 septembre 2001 le satellite T/P a été décalé d'une demi inter-trace par rapport à sa position d'origine en laissant la place à la mission CNES/NASA Jason-1. A la différence de T/P, cette mission a été conçue pour des objectifs plus complexes dans les domaines de l'océanographie et les prévisions océaniques, la climatologie et les prévisions climatiques ainsi que pour la météorologie marine. Jason-1 a été arrêté en juillet 2013, suivi par OSTM/Jason-2 (collaboration NASA/CNES/NOAA/EUMETSAT, 2008) qui a continué ses mesures jusqu'en octobre 2019 ; puis Jason-3 (2016) a poursuivi la série. En fournissant les données à nombre de programmes internationaux d'étude du climat et à nombre de systèmes de surveillance et d'alerte, données disponibles en temps quasi-réel, la série Jason a véritablement marqué l'ère de l'océanographie opérationnelle, notamment avec MERCATOR (*Bahurel et al., 2006*), ou encore le service européen Copernicus (CMEMS) dédié à l'espace marin (*Le Traon et al., 2019*).

En 2002, le satellite Envisat est venu compléter et maintenir la couverture altimétrique sur les traces des ERS ainsi que la diversité nécessaire par rapport aux orbites Jason. En effet, il faut au moins deux altimètres, comme Envisat (répétitivité de 35 j) et Jason-1 (10 j), pour combiner répétitivité et distance de l'inter-trace orbitale et ainsi atteindre la variabilité océanique à méso échelle, soit à 200 km et plus (*Pascual et al., 2006*). De nombreuses combinaisons ont ainsi été calculées à partir de la série dite de référence T/P-Jason ; mais comme l'explique Ch. Le Provost en 2003, il faut une résolution minimale du géoïde pour atteindre de manière précise la topographie dynamique moyenne de l'océan, les deux étant liés dans la surface topographique déterminée par l'altimétrie. Pour cela, la mission gravimétrique européenne GOCE (2009) a permis de déterminer de manière très précise (1 mGal soit 10^{-5} m.s^{-2} à 100 km) les anomalies du champ de gravité terrestre (*Bruinsma et al., 2013*), ce qui a ouvert la voie à nombre d'études et de solutions ; voir les travaux de CNES-CLS à ce propos.

Certes la coopération entre l'Europe et les Etats Unis, représentée en altimétrie par le groupe "Ocean Surface Topography Science Team" (OSTST, NOAA/NASA/EUMETSAT/ CNES/ESA), a été d'une grande richesse pour le développement et l'exploitation des missions océanographiques "historiques" TOPEX/Poseidon, ERS puis les Jason (*International Altimetry Team, 2021*). Mais il faut citer aussi depuis quelques années les coopérations de la France avec l'Inde et la Chine. Sur les zones réduites et les côtes, l'utilisation de l'altimètre franco-indien SARAL/AltiKa (2013) en bande Ka, placé sur les traces historiques de ERS et Envisat, reste un très grand succès (*Verron et al., 2021*). En outre, les missions chinoises Haiyang, HY-2A (2011, coopération sino-française) puis HY-2B (2018) et HY-2C&D (2020) qui ont également été équipées des trois systèmes de positionnement à bord, ont permis nombre d'échanges nouveaux et fructueux ; notons par exemple l'amélioration de leur calcul d'orbite (donc des hauteurs de mer) et/ou l'estimation des calibrations relatives de leur radar, grâce au croisement de leurs mesures altimétriques avec celles de Jason-2 et -3, respectivement.

Depuis 2016, ce sont maintenant les satellites Sentinel-3A &-3B (2016, 2018) de l'ESA (radar altimètre en mode SAR, voir section plus loin) développés dans le cadre du programme Copernicus de la commission européenne et lancés à 814 km (orbite héliosynchrone ; répétitivité de 27 j), qui permettent d'assurer le contrôle et la surveillance de l'environnement marin. La composante de topographie des océans est prise en charge par le nouveau satellite Sentinel-6A Michael Freilich/Jason-CS (2020), dans un esprit de continuité de l'observation de

la dynamique océanique, satellite qui a donc été placé sur la même orbite que celle de T/P-Jason.

Concernant les zones polaires, même si l'océan joue un rôle majeur dans l'évolution du climat de la Terre, en particulier sous l'effet grandissant des gaz à effet de serre et du réchauffement que cela implique, les contributions des calottes polaires (Groenland et Antarctique) à des changements du niveau des mers sont essentielles à quantifier (*Blazquez et al., 2018*) ; de ce point de vue, la synergie entre l'altimétrie des glaces polaires et les missions de gravimétrie spatiale GRACE & -FO depuis 2002 est un atout considérable (*Tapley et al., 2004*). Avec l'altimètre interférométrique à très haute résolution (SIRAL) développé pour la mission européenne CryoSat-2 (2010), il a été possible de mesurer les variations de l'épaisseur des couches de glaces maritimes et du bilan de masse des glaces continentales avec une précision inégalée ; de 2-5 cm pour l'océan Arctique et quelques mm pour l'Antarctique (*Guerreiro et al., 2016*). En complément et également jusqu'à 88° de latitude, il faut citer le seul altimètre utilisant un laser qui a été placé à bord de la mission américaine ICESat-2 depuis 2018 (*Abdalati et al., 2010*) ; l'objectif est de maintenir une série d'observation des glaces et océans polaires, si possible sans interruption. Ces régions sont en fait observées depuis ERS-1 (1991), y compris avec SARAL/AltiKa puis avec Sentinel-3, mais seulement en partie c'est-à-dire jusqu'à ~81.5°.

25 ans de progrès en océanographie

Le symposium OSTST de Ponta Delgada (Açores, Portugal, 2018) a réuni plus de 500 experts internationaux et plus de 1000 co-auteurs, représentant la communauté internationale d'altimétrie. Les participants ont exprimé leur vision des progrès récents obtenus dans les domaines de l'océanographie (globale et côtière), de l'hydrologie, des sciences de la cryosphère et de la géodésie. Il était très opportun de lancer ce symposium sur les progrès de la recherche spatiale afin de créer une vision de bout en bout des missions d'altimétrie, du passé et du présent, du développement des algorithmes, de l'étalonnage et de la validation, de la modélisation et de l'assimilation, etc. (*International Altimetry Team, 2021*).

Le développement des systèmes de positionnement

Dans les années 1970 et jusqu'au milieu des années 90, la principale source d'erreur de la technique d'altimétrie provient du calcul d'orbite. De très nombreuses études ont donc été réalisées afin de soit réduire l'effet de cette erreur au niveau des bassins océaniques (points de croisements), soit améliorer la qualité intrinsèque des modèles sous-jacents : i) effets gravitationnels venant du champ de gravité et des marées océaniques, et ii) effets non-gravitationnels provenant de l'atmosphère (freinage) et de la pression de radiation solaire.

Dans l'objectif d'améliorer les calculs d'orbite, il fallait certes améliorer la modélisation à commencer par celle du champ de gravité (fixe et variable), mais il fallait surtout développer des réseaux de poursuite de satellites avec un principe de mesure simple. Aussi, les caméras de poursuite et autres instruments à signaux radio ont été remplacés par des mesures directionnelles de type micro-onde (vitesse radiale par effet Doppler) ; l'idée d'utiliser un système "simple trajet montant" permettait de garder le maximum de simplicité pour les balises émettrices placées au sol. Ce sera le concept ARGOS, opérationnel depuis 1978, issu d'une coopération entre le CNES et les agences américaines NASA et NOAA ; il sera réutilisé

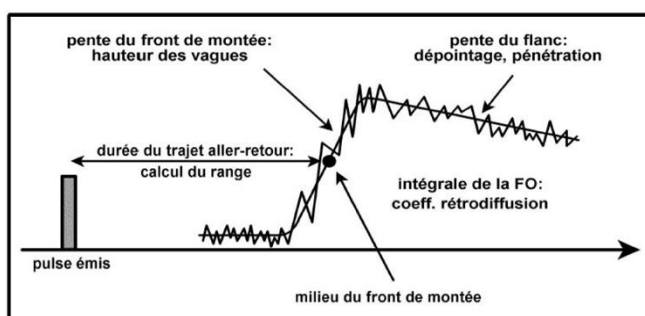
côté français pour développer le système Doppler montant bi-fréquence DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégré par Satellite) proposé par le CNES et l'IGN (*Willis et al., 1990*). Certes l'expansion mondiale des réseaux de poursuite de satellites comme le système américain TRANSIT avec plus de 30 stations, puis le système DORIS (environ 50 balises émettrices) a joué et joue encore un rôle fondamental pour l'orbitographie des satellites d'Observation de la Terre, pour la détermination du champ de gravité et pour le développement d'un repère de référence terrestre global, pérenne et aussi stable que possible (*Boucher et al., 1991*). Mais, il faut dire que l'étendue de la surface océanique sur Terre et le besoin d'une observation globale, permanente, précise et répétitive de l'océan ont eu un rôle décisif dans le déploiement de ces réseaux. Dans l'objectif de TOPEX/Poséidon (1992), le système de poursuite Doppler DORIS a d'abord été testé avec succès sur le satellite SPOT-2 lancé deux ans auparavant (*Soudarin & Cazenave, 1993*). Parmi les systèmes de radio positionnement, il faut citer également le système allemand PRARE (Precise Ranging And Range-rate Equipment : distance deux voies et Doppler) qui a été placé sur les satellites altimétriques européens ERS-1 &-2 (1991 et 1995) puis a été abandonné (*Andersen et al., 1998*).

Parmi les techniques géodésiques de poursuite de satellites, il faut noter aussi le rôle prépondérant qu'a joué la télémétrie laser pour l'altimétrie satellitaire (*Exertier et al., 2001*), y compris sur les précurseurs GEOS-3 et Seasat, et pour la géodynamique globale. La technique de télémétrie laser développée dès les années 1970 aux Etats-Unis et en France (*Kovalevsky, 1972*), soit 20 ans avant DORIS, est basée sur une porteuse optique allant du vert à l'infrarouge ; cela a l'immense avantage d'apporter des mesures absolues de distance station-satellite/Lune qui sont peu sensibles à la composante humide de l'atmosphère et pas du tout à l'ionosphère. En particulier, nous verrons que la calibration/validation des radars altimétriques fut longtemps basée sur des stations laser mobiles déployées précisément sous des arcs d'orbite comme aux Bermudes (*Kolenkiewicz & Martin, 1982*), en Méditerranée (*Ménard et al., 1994 ; Exertier et al., 2004 ; Mertikas et al., 2010*), en Tasmanie (*Watson et al., 2011*) puis à Tahiti (*Wang et al., 2014*). Avec les améliorations technologiques effectuées sur de plus en plus de stations laser à partir des années 1990 (*Nicolas et al., 2000*), la télémétrie est devenue une méthode d'évaluation incontournable de la qualité globale des calculs d'orbite, ceci en utilisant les mesures acquises à haute élévation ($> 70^\circ$). En effet, la télémétrie laser a peu à peu adopté des largeurs d'impulsion passant de 1 ns (soit 30 cm) à 100 ps et moins (aujourd'hui à 10-20 ps), des cadences de tir plus élevées de 10 à 50 Hz (et même 1-2 kHz un peu plus tard), des détecteurs (diodes à avalanche) extrêmement rapides et très petits, et enfin des dateurs d'événement picoseconde en remplacement des intervalloètres bien moins exacts ; soit une précision des Points Normaux calculés à 30 secondes, qui s'est abaissée jusqu'à atteindre quelques mm. Enfin, le Global Positioning System (GPS) ayant énormément progressé dans sa technologie (années 1980), des récepteurs bi-fréquence ont été développés spécifiquement pour être placés à bord des satellites d'océanographie ; en premier lieu, des tests ont été effectués afin de démontrer la potentialité de reconstruire une orbite à partir de mesures 3D acquises à bord d'une mission < 3000 km d'altitude (*Yunck et al., 1990*). Disposant alors de trois systèmes de positionnement à bord (DORIS, GPS et le réflecteur laser), le calcul d'orbite de TOPEX/Poséidon s'est énormément amélioré comme nous le verrons. En effet, d'une part la co-localisation des techniques spatiales permet de réduire les systématismes en faisant des comparaisons et, d'autre part, avec la grande quantité de

mesures disponibles le long de la trajectoire, il est possible de développer de nouvelles techniques de traitement basées sur la cinématique et le filtrage plutôt que sur la dynamique (Bertiger *et al.*, 1994). Ce dernier point constitue en fait un grand bouleversement dans le secteur de la dynamique spatiale.

L'évolution des radar-altimètres

Figure 2. Modèle de Brown de l'écho radar



Les radars altimètres fonctionnent essentiellement en bandes Ku/C (13.575 et 5.3 GHz) avec une répétitivité d'environ 2000 Hz. Les formes d'onde (ou échos radar) sont très variables selon les surfaces survolées ; l'altimètre fonctionne en continu et fournit une intégrale de l'énergie qui est donc très dépendante de la nature du terrain. La forme d'onde est ajustée sur un modèle a priori (Figure 2) et, compte tenu de la répétitivité, l'ensemble est moyenné sur un large nombre d'échos (environ 100 et plus). Mais cela donne accès à d'autres paramètres, comme la hauteur des vagues, la puissance rétrodiffusée ou encore le dépointage de l'altimètre. La taille de la tâche du signal radar au sol est aussi une notion importante pour mieux comprendre ce que l'altimètre peut vraiment observer et mesurer. Une impulsion radar n'est pas aussi étroite que celle d'un faisceau laser — cas de la mission ICESat-2. Le faisceau radar éclaire un cercle de la surface des océans ou des terres avec un diamètre de 3 à 5 km en fonction de l'état de la mer, de la hauteur des vagues ou de l'ondulation du terrain — c'est environ 70 m pour le laser ; une mer calme ou une surface de terrain plate implique une empreinte étroite (typiquement 2 km), alors qu'une mer très agitée implique une empreinte bien plus large (10 km). A l'approche des côtes, certains échos peuvent donc provenir des réflexions sur les terres, corrompre la forme d'onde et par conséquent la mesure de distance (Bonfond *et al.*, 2013).

Le traitement de la mesure est tout d'abord effectué à bord du satellite sous le nom de suivi bord ou "tracking" ; un tel traitement consiste à ajuster le milieu de front de montée afin de permettre à l'altimètre d'optimiser les paramètres d'acquisition de l'instrument pour les mesures suivantes. Un traitement différent peut aussi être effectué au sol mais à l'aide d'autres algorithmes. Cette opération porte le nom de retraitement ou "retracking". Les algorithmes utilisés pour ce retraitement peuvent ainsi être adaptés au type de surface survolée par l'instrument au moment de l'acquisition des mesures ; voir les travaux concernant le niveau des eaux en zone continentale (Frappart *et al.*, 2006). En mesurant les

caractéristiques des échos radar et en combinant ceci avec les données d'un radiomètre à double voire triple fréquence (entre 18 et 37 GHz), qui est destiné à la mesure des contenus en vapeur d'eau liquide de l'atmosphère dite correction de troposphère humide, l'estimation de la hauteur satellite-surface atteint finalement un niveau centimétrique ; c'est le mode conventionnel dit LRM (Low Resolution Mode), émission/réception en continu entre 1 et 4 kHz de répétition, dont la précision est calculée sur 1-sec.

Le CNES a joué très tôt un rôle important dans l'instrumentation radar dédiée à la topographie des océans ; le projet DORADE (1969-1970) d'un radar altimétrique embarqué fut retenu en priorité 1 et étudié jusqu'en fin de phase B. Il devait être lancé en 1976. Mais son sort fut cependant scellé négativement par la "duplication" avec le projet américain GEOS-3, et surtout, par l'abandon du lanceur français Diamant au profit d'Ariane début 1974. C'est en fait le radar de Seasat (1978) qui, en introduisant plusieurs types d'innovations, a servi de modèle-standard pour les instruments développés par la suite. Les altimètres *Poséidon* mis au point par Thalès Alenia Space (TAS) pour le compte du CNES depuis leur première version (-1) sur TOPEX/Poseidon en 1992, puis sur toute la filière Jason en bi-fréquence, ont été dédiés tout d'abord au suivi des océans (*Escudier et al., 2017*). Mais à partir de Jason-2 en 2008 (version Poséidon-3), s'est développée une adaptation à la mesure des hauteurs de mer des régions côtières, des zones de transition terre-mer, des rivières et des lacs, ce qui a provoqué un véritable essor de l'hydrologie spatiale (*Desjonquères et al., 2010*) ; en outre, le couplage avec l'algorithme d'orbitographie DIODE/DORIS, qui tourne à bord des missions depuis cette version (*Jayles et al., 2010*), a également permis une bien meilleure acquisition de mesures dans des zones de faible étendue grâce au calcul d'une prévision presque instantanée de la hauteur à mesurer, ceci à condition d'avoir un bon modèle numérique de terrain téléchargé à bord. Voir le cas de Jason-3 (2016) pour l'observation des hauteurs d'eau en rivières (*Biancamaria et al., 2018*).

La deuxième famille de radar altimètres, conçue par l'Agence européenne, a été développée pour observer également des terres émergées ceci grâce au mode "continent" à bord des missions multi-capteurs ERS (1991, 1995) puis Envisat (2002) ; voir le site de l'Agence <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers>. En dehors de ces premières missions, le premier radar à synthèse d'ouverture (SAR : *Synthetic Aperture Radar*) interférométrique à très haute résolution a été placé sur la mission CryoSat-2 (2010), en plus du mode LRM également possible sur cette mission. Le SAR constitue en fait un véritable virage pour l'altimétrie, puisque l'algorithme générique, ou disons conventionnel dit également "incohérent", évolue vers un traitement proche de l'imagerie. Ce mode, avec des impulsions radar très courtes (Figure 3), permet d'atteindre une bien meilleure précision sur la distance ; et avec une empreinte au sol bien plus faible le long du mouvement (300 m), cela permet d'atteindre une meilleure résolution, qui reste de plus constante en fonction de l'état de mer. Les méthodes de traitement du signal ont donc fortement évolué afin de prendre en compte le signal sous différents modes : SAR, (in)SAR interférométrique et même pseudo-LRM (statistiquement dégradé), avec l'idée de comparer le mode conventionnel avec le mode SAR au-dessus de l'océan (*Tournadre & Chaprono, 2020*) ; voir la Figure 4.

Figure 3. Modèles d'écho radar-altimètre ; modes LRM et SAR

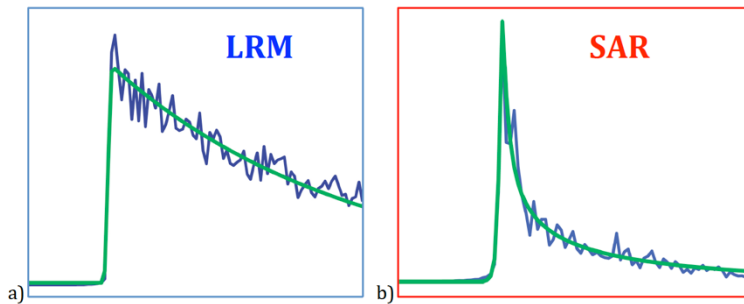
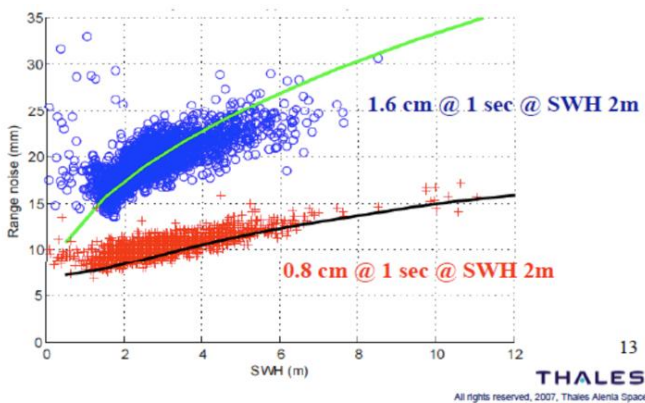


Figure 4. CryoSat-2 : bruit de mesure en fonction de la hauteur de vague en modes pseudo LRM (bleu) et SAR (rouge).



Enfin, dans le but d'améliorer la dynamique océanique à de plus petites échelles, d'obtenir des données altimétriques bien plus près des côtes et sur des types de surface très variés (eau, neige, et glace), il faut citer l'utilisation de la bande de fréquence Ka (35.75 GHz) sur la mission franco-indienne SARAL/AltiKa. (2013). Cette démonstration technologique (seul satellite altimètre utilisant un radar à très haute fréquence) a permis non seulement une réduction du bruit de mesure, une taille de l'empreinte au sol bien plus petite, une étude des taux de pénétration dans divers milieux, mais aussi une grande qualité des mesures malgré les nuages et l'humidité. L'altimétrie a donc gagné en termes de résolution le long de la trace, de sensibilité (facteur 26 par rapport à la bande Ku) et surtout d'homogénéité des mesures/résultats quelle que soit la nature du sol (Bonnefond et al., 2018). La bande Ka sera à nouveau opérationnelle sur le futur altimètre interféromètre à large fauchée (KaRIn, incidence de 1 à 4°) à bord de SWOT, mission prévue fin 2022, en plus de l'altimètre nadir Poseidon-3C (bande Ku/C).

On peut rapidement classer les radar altimètres en terme de bruit/précision calculé à 1-sec et pour une hauteur de vague de 2m. Le mode LRM (bande Ku) est passé de 5 cm rms sur TOPEX sans retracking, à 2.4 cm sur Envisat, puis à 1.7 cm sur Jason-2 & -3, et finalement à 1.5 cm sur Jason-CS/Sentinel-6a & -6b (2020, version Poséidon-4) avec un objectif à 1 cm ; la bande Ka

sur SARAL/AltiKa permet de gagner un facteur deux. En revanche en mode SAR, le bruit est passé de 1.3 cm sur Sentinel-3A (2016) à 0.8 cm sur Jason-CS (objectif à 0.5 cm). Comparé au précédent (Sentinel-3 et aussi CryoSat-2, voir Figure 4) qui utilise un mode SAR dit “burst” avec une série d’émission puis une série de réception (à 20 kHz) mais sans réception des échos pendant les 2/3 du temps, l’altimètre Jason-CS offre un mode dit “entrelacé” ; il opère simultanément les modes nadir conventionnel et SAR-Doppler, à 9 kHz. En conséquence, la résolution le long du mouvement passe de 7 km (toujours le cas avec Jason-3) à environ 300 m, ce qui est très important pour les zones côtières. Ce dernier altimètre offre donc des performances améliorées par rapport à la génération précédente, grâce à 29 ans d’héritage en orbite.

Calibration/Validation : les progrès de l’exactitude

Les mesures effectuées par les satellites altimétriques depuis plus de 30 ans permettent de constituer une série temporelle très longue, de laquelle on déduit aujourd’hui une augmentation du niveau des mers de l’ordre de 3 mm/an ± 0.4 avec une accélération (environ 0.100 mm/an² ± 0.07), donc pas seulement linéaire comme on le pensait (*Legeais et al., 2018*). Pourtant, une telle série temporelle continue n’aurait pu voir le jour sans un effort constant d’étalonnage et de validation des données altimétriques ; car la série est en fait issue de différentes missions et donc instruments ayant leurs propres incertitudes et spécificités (voir Figure 5).

Afin de relier les jeux de données, plusieurs sites d’étalonnage ont été développés sur la base de ce qui avait été imaginé au départ pour Seasat (1978), puis ensuite pour TOPEX/Poseidon (*Ménard et al., 1994*). Mais compte tenu de la difficulté d’opérer des mesures géodésiques précises et répétitives depuis une île ou une plateforme isolée, la communauté française (CNES, IGN, Observatoire de la Côte d’Azur et SHOM) a investi un double site en Corse (Cap de Sénétosa et base militaire d’Aspretto, Ajaccio) depuis 1998. Ce site s’est peu à peu étendu afin d’accéder aux traces des missions ERS, Envisat et SARAL/AltiKa ainsi que Sentinel-3 ; voir (*Bonnefond et al., 2019*).

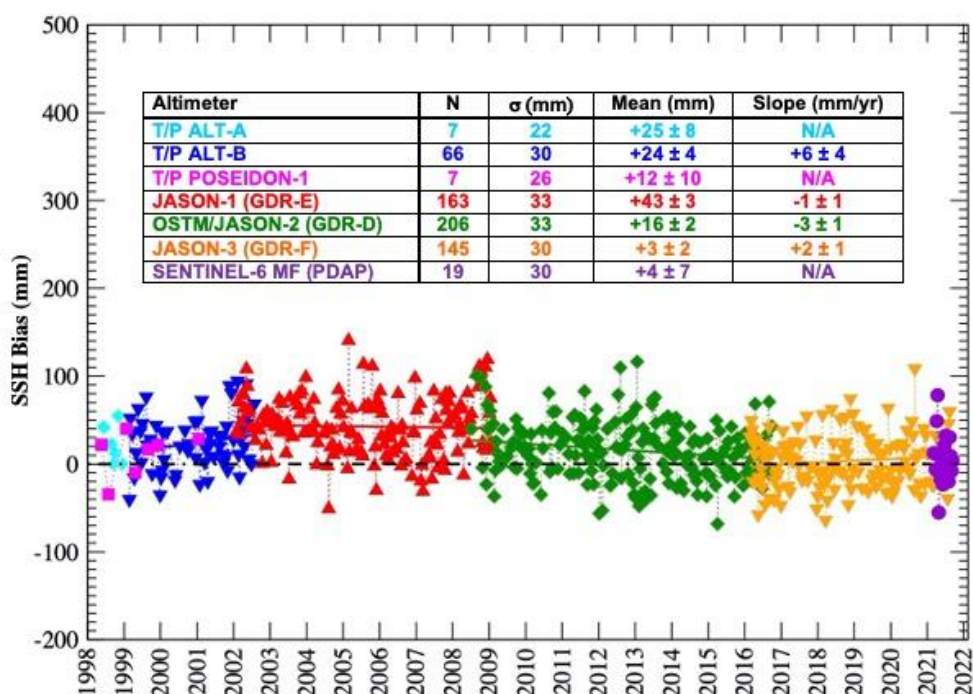
L’étalonnage des radar altimètres, conçu au départ à partir de mesures de télémétrie laser effectuées par une station mobile si possible au zénith (*Nicolas et al., 2000*), a été remplacé par un positionnement GNSS beaucoup plus instantané de bouées et de marégraphes ; le savoir-faire s’est développé à partir du site offshore JPL/NASA de Harvest, CA (*Haines et al., 2010*). Il s’est ensuite exporté dans de nombreux sites y compris en milieu continental afin de qualifier les mesures altimétriques ainsi que les corrections (troposphère, état de mer, etc.) dans des milieux très différents (*Calmant et al., 2008 ; Crétaux et al., 2009*).

En outre, d’autres types d’instruments sont venus enrichir la validation des données spatiales et/ou compléter les analyses, notamment avec des données marégraphiques (“in situ” ou à la côte). Celles-ci ont été rassemblées au plan international grâce à la coordination menée par le programme GLOSS dès 1985, sous l’égide de la Commission Océanographique Internationale (UNESCO) ; au plan national, SONEL (<https://www.sonel.org/>) vise à regrouper tous les réseaux existants vue l’extension très importante du domaine maritime français. En association entre le SHOM, l’IGN et l’INSU, SONEL recueille et diffuse des données du niveau

de la mer de grande qualité métrologique obtenues à partir de marégraphes (niveau relatif) et de techniques de géodésie (déplacements verticaux et niveau absolu) pour l'étude des tendances à long terme (Wöppelmann & Marcos, 2016). Enfin, et à l'instar de ce qui avait été proposé au départ de l'altimétrie spatiale, des mesures de température et de salinité ont également été prises en compte ; dans un contexte de réchauffement continu de l'océan depuis plusieurs décennies et des questions qui se posent sur le rôle qu'il joue et jouera dans le changement climatique, les données des 3000 bouées dérivantes du système Argo ont donc été associées aux analyses (Valladeau et al., 2012).

Le projet FOAM proposé dans le cadre du "EUMETSAT/CNES research announcement" afin de rassembler les différentes propositions, besoins et nouvelles idées, est régulièrement prolongé et financé (Chupin et al., 2020).

Figure 5. Série temporelle des différents instruments d'altimétrie, étalonnés sur le site de Corse.



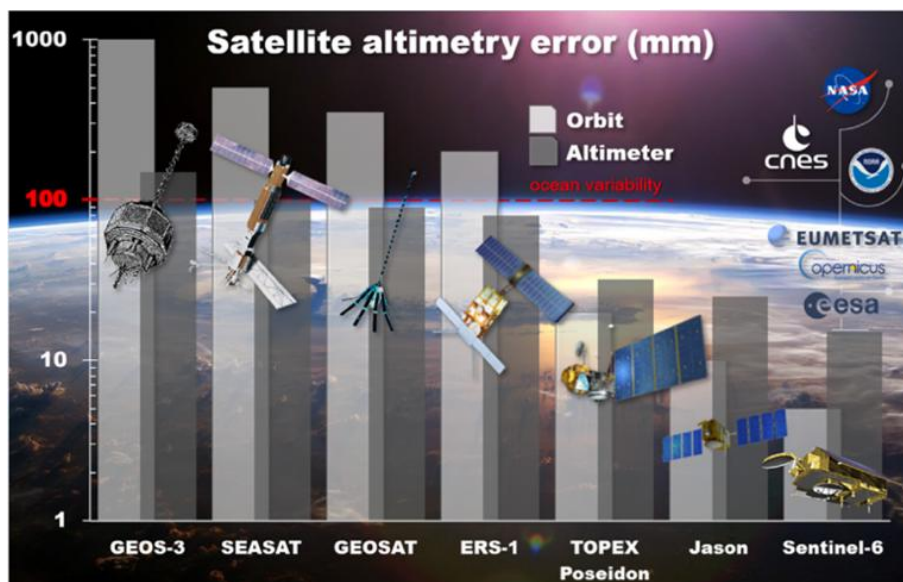
L'évolution du bilan des erreurs au cours du temps

Au départ peu de personnes voulaient croire à la capacité potentielle de positionnement du système radioélectrique DORIS, et on parlait côté américain du « *French Bluff* » plutôt que du « *2 cm challenge* » comme proposé par Michel Lefebvre au CNES. Dans le projet final écrit de TOPEX/Poséidon avant le lancement, on ne pourra officiellement retenir que la valeur de 13 cm comme valeur de la précision d'orbite (radiale) de base. Mais le challenge du « *2 cm level* » fut bien relevé un peu plus tard (Nouël et al., 1994).

Que s'est-il passé ? Alors que le bilan d'erreur de l'altimétrie était largement dominé par l'erreur radiale de l'orbite des satellites jusque dans les années 1990 (Figure 6), des efforts importants se sont portés sur l'amélioration des modèles de champ de gravité et de marées,

sur la modélisation des forces de surface (freinage atmosphérique et pressions de radiation) et enfin sur la réalisation des références géodésiques ainsi que sur les modèles géophysiques. La perspective du programme TOPEX/Poseidon (T/P) a servi de locomotive ; durant cette période, les avancées sur les développements effectués en matière de géodésie spatiale furent très nombreuses (Barlier & Lefebvre, 2001).

Figure 6. Evolution du bilan d'erreur de l'altimétrie.



Concernant l'amélioration du champ de gravité, parties fixe et maréale, le premier élément a été d'assimiler des données de satellites situés sur des orbites d'altitudes et d'inclinaisons variées afin de mieux décorréler les coefficients harmoniques à grande et moyenne longueurs d'onde. Il y a eu les solutions GEM côté NASA/Goddard Space Flight Center (Marsh et al., 1990), les modèles franco-germaniques GRIM (GRGs & Institute Munich) (Schwintzer et al., 1998) et de nouveaux modèles de marées océaniques (Williamson & Marsh, 1985). Il faut rappeler que pour le champ de gravité, le géoïde marin déterminé par altimétrie est une source de données très importante, de type gravimétrique-dérivée, permettant d'augmenter la résolution des solutions ; de ce point de vue, les précurseurs GEOS-3 et Seasat ont joué un rôle important aussi bien au plan de la géodésie qu'au plan des applications géophysiques ; voir la récente revue (Flechtner et al., 2021). Concernant les effets non-gravitationnels, alors toujours problématiques même entre 800 et 1300 km, on doit citer le progrès attribué au modèle DTM pour la densité atmosphérique (Berger et al., 1998). Bien entendu aussi, les références géodésiques ainsi que les standards IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service : <https://www.iers.org>) ont fortement progressé durant cette période (Altamimi, Sillard and Boucher, 2002). En outre, l'organisation de différents services internationaux par l'Association Internationale de Géodésie (AIG), a permis de gérer l'évolution des techniques spatiales de positionnement/poursuite à travers le développement de centres d'analyse et de combinaison, de systèmes de collecte, de stockage et d'accès aux données, mais aussi à travers un ensemble de recommandations coordonnées (IERS). Voir par exemple le développement du Service International DORIS, IDS (Willis et al., 2010).

En résumé avant 1994, l'erreur radiale d'orbite de T/P était estimée à environ 30-40 mm RMS; elle est passée à 25 mm par la suite grâce aux efforts menés unilatéralement par les partenaires du CNES et de la NASA (*Le Traon et al., 1994 ; Marshall et al., 1995*).

Pour atteindre une précision de moins de 1-cm sur une orbite calculée sur 10 jours (satellites Jason), il faut encore préciser le rôle très important des modèles de champ de gravité variable (*Couhert et al. 2015*). Ces derniers sont apparus avec les données de la mission GRACE lancée en 2002 (*Tapley et al., 2004*), en plus des solutions venant de la télémétrie laser sur les satellites géodésiques qui se révèlent toujours nécessaires pour les plus bas degrés (*Exertier et al., 2000*). Avec une partie variable (saisonnnière, notamment) du champ, disponible mensuellement voire moins jusqu'au degré 50 (*Lemoine et al. 2010*), les progrès sur le bilan d'erreur d'orbite des satellites altimétriques ont été très marqués au plan global. Avec le lancement de Jason-1 (2001), l'erreur radiale prévue était de 15 mm ; elle est passée peu à peu à environ 8 mm sur Jason-2 lancé en 2008 (*Cerri et al. 2010 ; Lemoine et al. 2010*), puis à 6 mm avec Jason-3 lancé en 2016. Là encore, l'avancement des solutions du repère de référence terrestre global (ITRF) entre 2000 et 2014 a joué un rôle important, à la fois sur l'étendue du repère (nombre, diversité et qualité des sites géodésiques), sur l'évolution du modèle sous-jacent (coordonnées des sites linéaires puis non-linéaires, paramètres d'orientation EOP), sur la combinaison des solutions par technique, mais aussi sur la définition/réalisation de l'échelle et de l'origine (*Altamimi et al., 2002 ; 2016*).

Comme nous le décrivons plus haut, le développement tout d'abord du GPS puis des autres systèmes GNSS, dont le récent Galileo pour l'Europe (*Katsigianni et al., 2019*), a profondément modifié le secteur de la dynamique spatiale, ou disons de la détermination d'orbite des missions d'Observation de la Terre. Comme il y a au moins deux techniques de positionnement à bord des missions (DORIS et/ou GNSS, plus un réflecteur laser qui est toujours plus fiable et bien moins coûteux) et même trois pour T/P et ses successeurs, il est possible d'ajuster de nombreux paramètres empiriques (forces stochastiques) tout au long de la trajectoire et ainsi absorber les erreurs résiduelles de la modélisation d'orbite (surfaces exposées et attitude, zones d'ombre, densité atmosphérique, pressions de radiation diverses, etc.). Ceci, à tel point que l'erreur radiale d'orbite ne dépend plus tellement de l'altitude des missions (*F. Mercier, CNES, communication privée*). Le bouleversement réalisé en matière de méthode de calcul d'orbite provient en fait du développement de l'orbitographie dite "pseudo-dynamique", grâce en particulier au suivi 3D par GPS sur T/P (*Bertiger et al., 1994*), puis avec DORIS (*Barotto & Berthias, 1996*). Ces méthodes permettent en outre une évaluation indépendante des erreurs géographiquement corrélées qu'il est important de détecter vis-à-vis de la topographie des océans déterminée par altimétrie (*Bonnefond et al., 1999*).

Il a donc fallu environ 20 ans de travaux de modélisations, d'analyses et de progrès technologiques après T/P pour atteindre ces chiffres : une erreur radiale d'orbite (< 10 mm) qui est devenue plus faible que l'erreur instrumentale (< 20 mm) ; voir Figure 6. Par exemple, le système DORIS (IDS) est à même de fournir des orbites de la classe 9-10 mm rms à la fois sur SARAL/AltiKa (2013) et sur les Sentinel-3A & -3B (2016, 2018). DORIS est donc devenu une des composantes majeures, en fait le système de base, pour le calcul d'orbite des satellites altimétriques (*Willis et al., 2016*).

Nouveaux défis et missions à venir

La masse mouvante de l'océan, la complexité des échanges thermiques qui l'animent et de ceux qu'il entretient avec l'atmosphère en font un acteur majeur du comportement et de l'évolution du climat de notre planète. La hausse du niveau de la mer causée par la fonte des glaces continentales et le réchauffement de l'océan est aujourd'hui une application majeure de l'altimétrie spatiale de haute précision. Cet objectif justifie à lui seul la continuité des missions de type Jason afin de suivre, sur le long terme, l'évolution de la hausse du niveau de la mer (dont l'accélération est bien établie) et de quantifier les différentes contributions, en combinant avec les données GRACE (transport de masses) et Argo (température et salinité) ; l'objectif étant d'améliorer les projections futures (Cazenave & Moreira, 2022). Dans un contexte de pression anthropique toujours plus grande et de changement climatique clairement identifié, notre océan et nos côtes sont en effet durement et durablement affectés (IPCC, SROCC et AR6, 2019, 2021). L'altimétrie est aussi un outil très utile afin de quantifier le déséquilibre énergétique global de la planète, qui est lié aux émissions de gaz à effet de serre, et ses conséquences sur le long terme (Meysignac et al., 2019).

En dehors des effets globaux dus au changement climatique d'origine anthropique, les tendances régionales sont encore largement dominées par la variabilité interne du système climatique et sa réponse à des modes naturels liés au couplage océan-atmosphère (ENSO, Oscillation Nord-Atlantique, Oscillation Décennale du Pacifique). Cependant, dans certaines régions comme l'océan austral, le signal anthropique est déjà détectable (Hamlington et al., 2020). Toutefois, le rapport signal sur bruit est encore faible, l'incertitude sur les tendances régionales du niveau des mers étant de l'ordre de 1 à 3 mm/an, alors que l'incertitude sur le niveau moyen global est estimée à 0.3-0.4 mm/an (Ablain et al., 2019). L'analyse d'erreur devient plus difficile à établir au plan régional (Couhert et al., 2015), en grande partie à cause des erreurs géographiquement corrélées (orbite) et des incertitudes sur certains modèles (marées, dynamique atmosphérique, ...) qui restent moins performants qu'au niveau global.

Le système altimétrique tout entier est donc soumis à des analyses d'erreur à long terme de plus en plus critiques. Il s'agit notamment *i)* de la performance des altimètres (étalonnages, dérives, corrections de troposphère humide par les radiomètres, ...) (Ablain et al., 2019), *ii)* de celle des séries de données externes comme Argo (températures et salinités) (Barnoud et al., 2021) et enfin *iii)* des séries marégraphiques dont il faut absolument mesurer la stabilité (objectif à 0.1 mm/an sur 10 ans) à cause des mouvements verticaux (terre solide) toujours possible (Wöppelmann & Marcos, 2016). L'OSTST, dont les appels d'offre sont publiés tous les quatre ans, voit en effet l'essentiel des propositions & demandes orientées vers des études sur la stabilité à long terme du niveau moyen des mers et sur le suivi de la variabilité de l'océan à méso échelle et en-dessous. Mais l'orbitographie, les instruments, la calibration/validation, les bilans d'erreur, les algorithmes et données auxiliaires, la définition des produits et l'évolution des usages ainsi que les retours d'expérience font partis des éléments clés de l'OSTST (Escudier et al., 2017).

En outre, pour maintenir un bilan global et régional sur plusieurs décennies, voire l'améliorer pour atteindre une stabilité de 0.1 mm/an sur les produits géodésiques, dont le niveau moyen des mers déterminé dans un référentiel terrestre global (recommandation du GGOS), il est recommandé aux communautés scientifiques et aux agences spatiales de maintenir sur le long

terme, en parallèle de l'océanographie spatiale, les systèmes d'observations et les modèles géophysiques notamment afin de (Cazenave et al., 2018, 2019) :

- i) déterminer le champ de gravité variable,
- ii) assurer un repère de référence terrestre et des paramètres d'orientation de la Terre (objectif à 1 mm sur 10 ans),
- iii) faire progresser les techniques géodésiques (technologies, distribution géographique des réseaux, co-locations, etc.) comme DORIS, GNSS et laser engagées dans le positionnement et la poursuite,
- iv) maintenir les sites de calibration/validation et y développer des méthodes nouvelles (drones, réflectivité GNSS, etc.)

Par ailleurs, un nouveau défi pour l'altimétrie de haute précision est de mesurer les variations de niveau de la mer dans les zones côtières de la planète, en particulier les régions basses et très peuplées (Benveniste et al., 2020). Les missions Sentinel-3A/3B et SWOT sont, à ce titre, très prometteuses compte tenu de la haute résolution spatiale de leurs mesures (Benveniste et al., 2019).

Les océans ont aussi d'autres "utilisateurs" pour lesquels courants, tourbillons, hauteur des vagues, etc. sont à titre divers des données essentielles. Prévoir le climat, mieux naviguer, mieux gérer les ressources halieutiques, sécuriser les constructions au large, avoir une météo plus sûre... sont autant de raisons pour observer les océans, autant de domaines pour lesquels l'altimètre est un outil d'investigation inégalé. GODAE (Smith and Lefebvre, 1997) a fourni une aide considérable à de nombreux pays en termes de système de prédiction opérationnel de l'océan. Et il a démontré que la prédiction des phénomènes (océan ouvert) est tout à fait possible dans de multiples régions. Aujourd'hui la communauté des utilisateurs de l'océanographie opérationnelle (MERCATOR, Ifremer, CLS, CMEMS, ...) attend avec impatience le satellite SWOT (prévu fin 2022) qui va permettre d'élargir la fauchée et de travailler également sur les zones côtières ainsi que les eaux continentales.

SWOT, Jason-CS/Sentinel-6

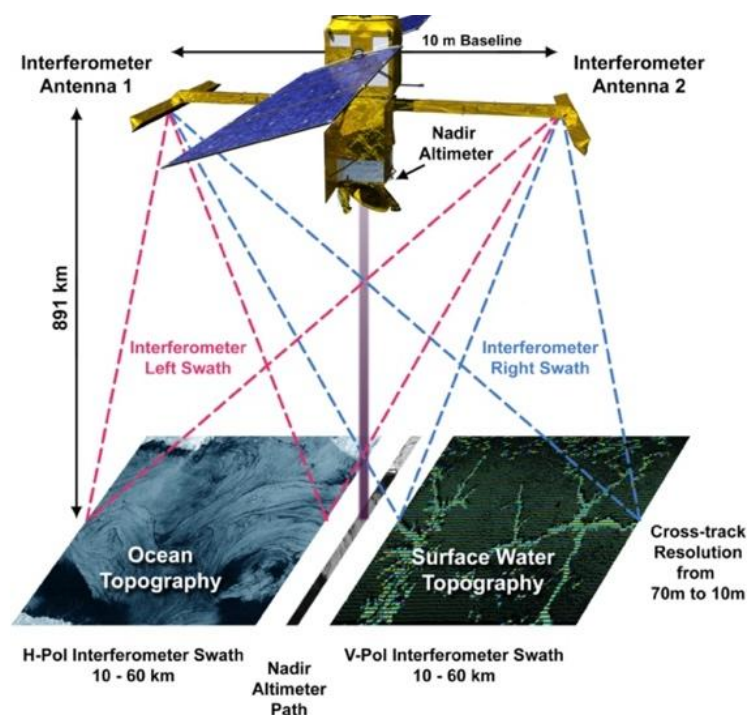
L'utilisation des données issues de radar altimétriques sur les eaux continentales est relativement récente ; et il y a peu de temps, elle présentait encore plusieurs difficultés. Citons entre autres : i) la largeur du faisceau de l'altimètre conçu pour s'affranchir de la variabilité de la surface océanique mais qui présente dans le cas des rivières l'inconvénient de la contamination du signal par des échos parasites dans l'empreinte du faisceau (berges, îles, végétation), ii) la forme de l'onde réfléchi qui est très différente du cas océanique et qui présente donc des particularités à intégrer pour la restitution de la hauteur d'eau. Mais il y a eu beaucoup de progrès effectués sur la technologie des radar-altimètres notamment avec le développement du SAR et les très bons résultats obtenus avec la bande de fréquence Ka.

La principale question concerne le cycle global de l'eau sur Terre, à savoir : quelle est la variabilité spatiale et temporelle de l'eau en zones continentales, stockée et perdue ? Comment prédire ces variations avec plus de précision ? Et quelle sera la conséquence pour la gestion des ressources en eau, notamment dans le cas de très grands fleuves (transfrontaliers) ?

La mission franco-américaine de topographie des eaux de surface et des océans, SWOT (2022), sera chargée de mesurer les eaux de surface en zones continentales ainsi que la pente des

principales rivières pour estimer leur débit ; ceci à des périodes sub-mensuelles, saisonnières et annuelles sur une base de 42 mois (3,5 ans). L'utilisation d'un interféromètre avec une base à bord de 10m de large en bande Ka permettra d'atteindre la haute résolution (environ 50 m), un niveau moyenné sur 1 km² à mieux que 10 cm (1- σ) pour les lacs, et une pente mesurée à mieux que 1.7 cm/km pour les rivières de 50-100 m de large et plus (Figure 7).

Figure 7. Mission franco-américaine SWOT, prévue fin 2022.



Pour la partie océanographique, via la topographie de l'océan, les nouvelles missions comme SWOT s'orientent vers une résolution spatiale plus fine que celle visée jusqu'à aujourd'hui (soit ~200 km) avec une résolution des pixels de 2x2 km et une précision meilleure que 1.2 cm ; les tourbillons et les écoulements méso échelles océaniques contribuent en effet de façon importante au transport de masses d'eau et de chaleur dans l'océan. La compréhension de leurs dynamiques et de leurs interactions avec la topographie est primordiale pour caractériser les échanges thermohalins, le déplacement d'espèces biologiques ou de polluants. En particulier, les courants et tourbillons de surface, situés dans les cent ou deux cents premiers mètres de profondeur, jouent un rôle capital dans les échanges entre la zone côtière et la zone hauturière. Il faut donc des données altimétriques afin de faire le lien entre une topographie de l'océan à 200 km jusqu'aux échelles plus petites (environ 15 km). L'altimétrie continue donc à améliorer le spectre spatial de la topographie dynamique à ces échelles avec une répétitivité ad hoc (Cazenave et al., 2018) ; cela permet de mieux comprendre le cycle climatique, les grandes échelles nourrissant les plus petites et réciproquement (cascades d'énergie).

Remerciements

En matière d'altimétrie, la contribution de la France à travers ses organismes menant des actions de recherche (CNES, CNRS/INSU, IRD, SHOM, Ifremer, IGM, Observatoires ...) et ses groupements d'actions de recherche coopératives tel le GRGS, est vraiment remarquable. Le rayonnement de la communauté altimétrique a même été étudié à titre d'exemple dans une analyse de scientométrie récente (*Yang et al., 2022*).

On a dit avec raison que la coopération franco-américaine dans le programme d'océanographie TOPEX/Poseidon (1992) fondé sur l'altimétrie spatiale était le plus bel exemple d'une coopération parfaitement réussie avec les États-Unis. Le principe d'ouvrir sans délai l'accès aux données à tous les scientifiques intéressés et à en assurer aussi une mise en valeur scientifique exceptionnelle dans le monde entier est la base de cette réussite. La communauté scientifique française a fait preuve d'une qualité à laquelle nous avons déjà rendu hommage pour sa contribution (Michel Lefebvre, Christian Le Provost, Yves Menard et tant d'autres.).

La liste des références bibliographiques que nous donnons ici est donc très importante et fondamentale ; elle illustre et précise ces contributions avec le nom de leurs auteurs, contributions que nous n'avons pu décrire en quelques pages. Cependant nous voudrions souligner plus spécifiquement, le rôle éminent de notre collègue Anny Cazenave (OMP/LEGOS) qui a bien voulu relire le texte présent ; elle est membre de l'Académie des Sciences, professeure invitée au Collège de France, et quelque chose de très important ici, elle est un des auteurs principaux du chapitre « Élévation du niveau de la mer » du 5^e rapport du [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat](#) (GIEC). Les rapports du GIEC sont absolument fondamentaux tant sur le plan recherche que sur le plan sociétal et environnemental et ils nous ont vraiment guidés dans l'analyse des contributions. Enfin ajoutons en plus qu'Anny Cazenave est récipiendaire de très nombreuses distinctions nationales, européennes, et internationales. Elle est aussi auteur de très nombreuses publications scientifiques, revues et livres, soit comme contributrice soit comme éditrice, notamment encore en 2017 dans un ouvrage de plus de 600 pages avec D. Stammer « *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces* » où l'on trouve de très nombreuses références et informations dont la contribution de Philippe Escudier dans ce domaine (voir notre bibliographie).

Le fonctionnement et l'organisation annuelle des colloques OSTST (Ocean Surface Topography Science Team) est maintenant aussi à souligner ; le rôle des « Project Scientist » est en effet majeur dans les préparations de ces colloques et le succès des échanges associés. Le dernier en date côté français, est aujourd'hui Pascal Bonnefond (OP/Syrte) qui a bien voulu également relire ce texte. Avec Jérôme Benveniste (ESA), il a animé une synthèse des travaux sur 25 ans d'altimétrie spatiale, publication que nous avons citée et qui a été pour nous une référence et une source inestimable d'informations pour rendre compte de la contribution notamment française dans ce domaine. Nous remercions spécifiquement Anny Cazenave et Pascal Bonnefond pour leur relecture et leurs remarques et commentaires pertinents. À tous nos autres collègues qui nous ont fourni la matière à ce document nous exprimons aussi tous nos vifs remerciements.

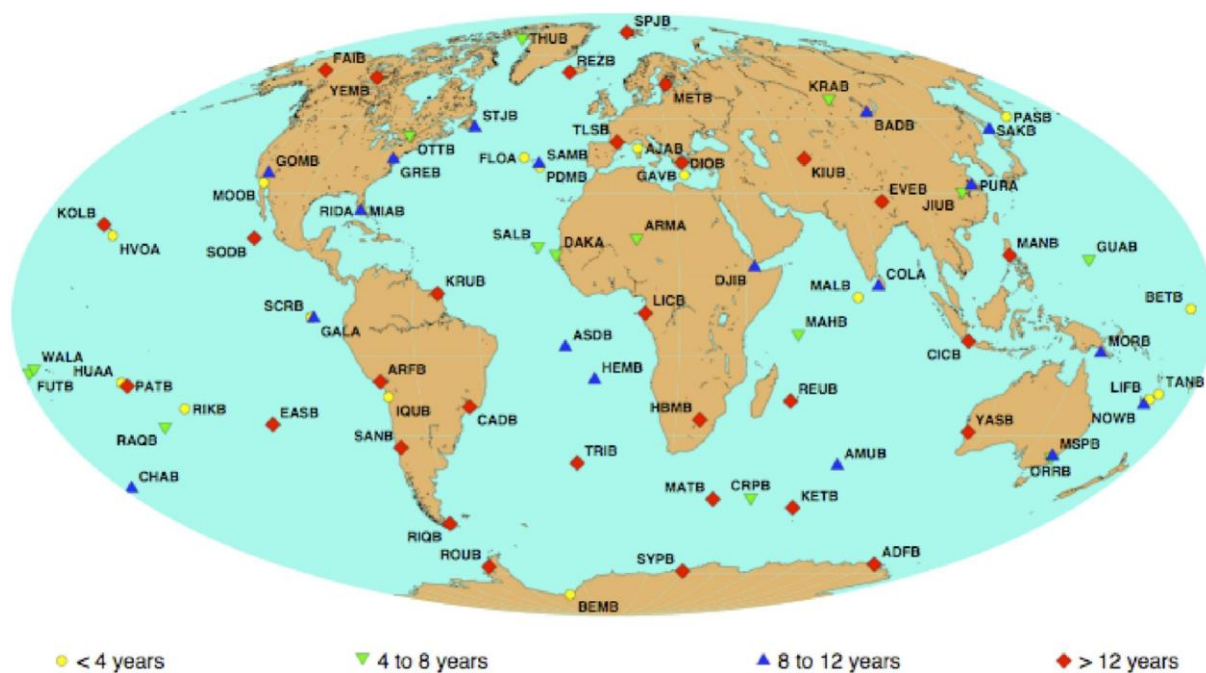
2.3 DORIS sur SPOT-2

L'émergence du système DORIS au CNES est la résultante de divers développements dont certains ont été évoqués ici : expériences de Doppler inversé sur EOLE et ARGOS difficultés opérationnelles du réseau MEDOC, diverses études dans le domaine radio. C'est aussi la disponibilité de nouveaux oscillateurs à quartz ultra-stables (BVA).

L'occasion fut donnée par la mission franco-américaine TOPEX/Poséidon d'altimétrie satellitaire pour concevoir un système d'orbitographie précise et robuste utilisant ces éléments, le système DORIS, composé d'un récepteur embarqué et d'un réseau sol mondial de balises émettrices d'une paire d'ondes radio à 400 MHz et 2 GHz.

Le système fut embarqué sur le satellite d'observation de la Terre SPOT-2 lancé en 1990 pour évaluation, avant son embarquement sur TOPEX lancé en 1992. Le GRGS fut alors principalement impliqué par la détermination d'un champ de potentiel spécialisé.

En parallèle, le CNES et l'IGN signèrent un accord de coopération spécifique sur DORIS concernant principalement l'étude des performances de positionnement utilisant DORIS et le déploiement d'un réseau mondial de balises, réalisé avec succès par l'IGN en partenariat avec le CNES.



2.4 VLBI pour Ballons de Venus

Les 11 et 15 juin 1985, les deux sondes spatiales soviétiques VEGA lâchèrent chacune un ballon dans l'atmosphère de Vénus avant de continuer leur route vers la comète de Halley. Cette mission fut la première à effectuer des mesures in-situ dans l'atmosphère de Vénus, fournies par les instruments à bord des ballons pendant le vol d'environ 46 heures qui leur fit parcourir environ 110 degrés en longitude, entraînés par les vents atmosphériques.

La trajectoire des ballons dans l'atmosphère de Vénus a été reconstituée grâce à des signaux radio enregistrés par un réseau d'une vingtaine de radiotélescopes répartis sur toute la surface terrestre pour permettre un suivi continu. Le traitement des observations interférométriques a été réalisé par une équipe internationale aux USA, incluant des participants de trois établissements français, Loïc Boloh (LB) du CNES, Gérard Petit (GP) de l'IGN, Arturo Ortega Molina (AOM) de l'Observatoire Paris-Meudon, avec le soutien financier du GRGS pour GP, le CNES assurant directement l'essentiel du support français à la mission.

Avant de décrire le traitement des données, qui fut le cœur de la participation française (pour la partie soutenue par le GRGS) à la mission Ballons de Vénus et les résultats scientifiques de la mission, il faut revenir sur le contexte géopolitique et sur le contexte scientifique de l'époque car ils ont joué un rôle pour justifier et même rendre indispensable cette participation française.

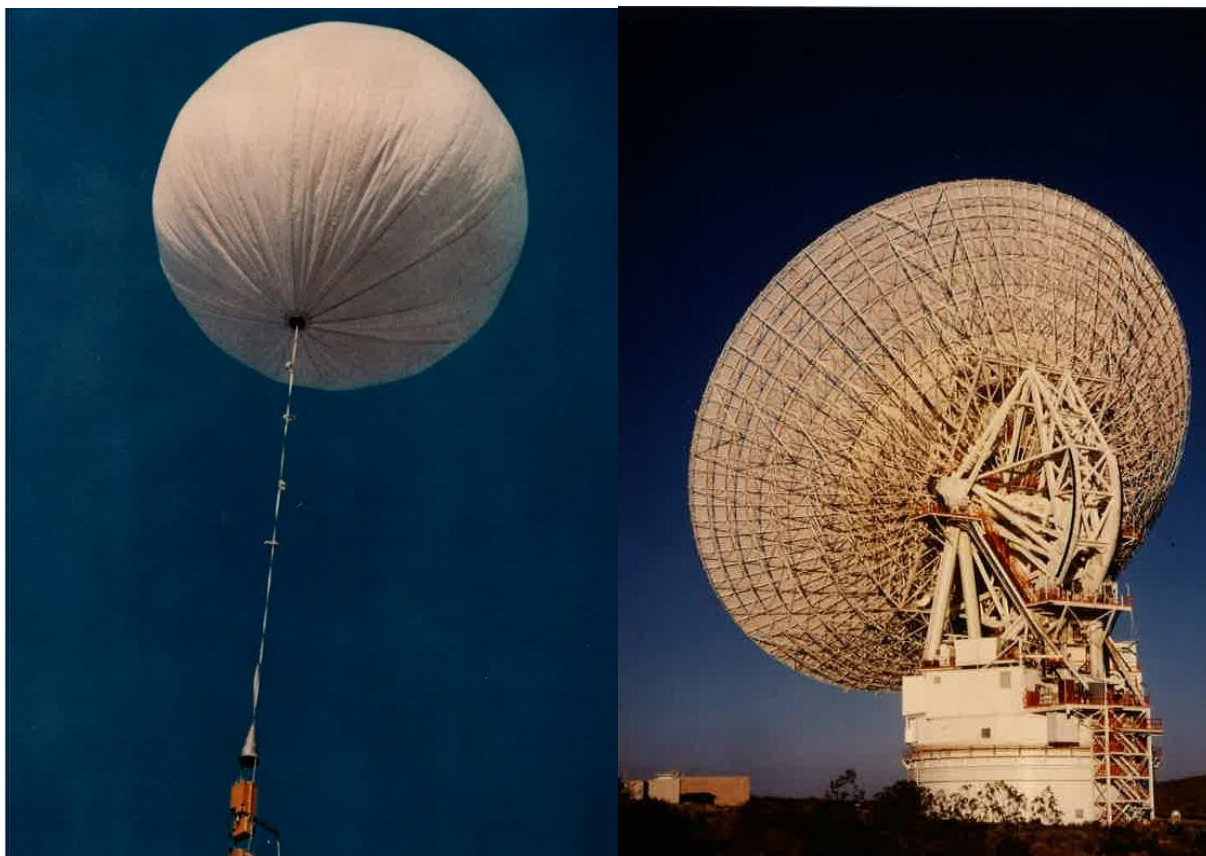


Fig. 2.4.1. Gauche : Un modèle de ballon de Vénus. D'un diamètre de 3.4 m, gonflé à l'hélium, il supporte une nacelle de 6.5 kg. Droite : Le radiotélescope de 64 m de diamètre du DSN à Goldstone (Californie) a participé à la poursuite des sondes et des ballons.

Le contexte géopolitique

Au début des années 1980, l'URSS est encore une puissance mondiale engagée dans la « guerre froide » avec les Etats Unis, même si la fin du long règne de Brejnev qui a cédé la place à Andropov en 1982, puis Tchernenko en 1984 laisse entrevoir de possibles changements. Les Etats-Unis et une cinquantaine de pays ayant boycotté les JO de Moscou en 1980, l'URSS et les pays du bloc soviétique ont boycotté les JO de Los Angeles en 1984. Une collaboration scientifique et technique entre URSS et USA avait débuté dès la décennie précédente avec une première mission spatiale conjointe Apollo-Soyouz en 1975 mais une telle collaboration officielle ne se renouvellerait pas avant la chute de l'URSS. Cependant cette politique officielle n'a pas empêché des comportements plus pragmatiques quand le besoin s'en est fait sentir, comme dans le cas des Ballons de Vénus. Jacques Blamont, qui était directeur du Service d'Aéronomie du CNRS et conseiller scientifique au CNES, fut à l'origine de cette mission et en a imaginé l'essentiel des principes. L'ambitieux projet Eos conçu dans les années 1970 alliait le solide programme spatial soviétique et l'expérience française des ballons. La partie française devait concevoir et fournir ballon et expériences pour une charge utile de 20 kg. Dans son livre [Vénus dévoilée, 1987] J. Blamont expose l'étonnant historique de ses vicissitudes au gré des décisions politiques. Au final, le projet glissa de 10 ans et la participation de la France se réduisit à fournir certains instruments et organiser via le CNES le réseau international de radiotélescopes nécessaire à la poursuite des sondes. En effet le CNES pouvait discuter avec le Jet Propulsion Laboratory (JPL) pour obtenir l'utilisation des trois grandes antennes du Deep Space Network (DSN) et il s'était également laissé convaincre de l'intérêt des techniques d'interférométrie à longue base (VLBI) qui devaient être utilisées par la mission. La technique VLBI fut donc centrale à la participation française, comme on le verra.

Le contexte scientifique en géodésie spatiale

Au moment de la naissance du GRGS, les techniques de positionnement par géodésie spatiale reposaient principalement sur l'utilisation de satellites artificiels comme « mires spatiales » optiques d'une part, et des mesures d'effet Doppler sur des porteuses radio d'autre part.

Le système GPS avait commencé à déployer son segment spatial en 1978 mais la constellation disponible resta très réduite jusqu'au lancement des satellites du Block II une décennie plus tard. Bien que le Service de Positionnement Standard du GPS fournisse une position dégradée, l'option politique d'ouvrir le système aux utilisateurs civils fut officiellement promue par le président Reagan en 1983 après la tragédie de l'avion de la Korean Air abattu par des chasseurs Soviétiques. Les premiers récepteurs destinés à des applications civiles commençaient à apparaître (Macrometer, Texas Instruments) et les géodésiens furent les premiers à les expérimenter. Cependant il n'était pas immédiatement évident que le GPS deviendrait la technique de positionnement ultra-précise et d'utilisation universelle que nous connaissons aujourd'hui avec plusieurs systèmes globaux de navigation.

Il était donc logique pour la communauté géodésique de suivre avec attention les progrès du VLBI. Cette technique d'interférométrie non connectée fut d'abord développée par les radioastronomes dans les années 1960 pour étudier la structure de sources radio en supposant connues la position des antennes et l'orientation de la Terre dans l'espace. Mais, au début des années 1980, l'amélioration de l'instrumentation, comme le système d'enregistrement Mark III [Rogers, 1983] multipliant par 28 la bande passante par rapport au

système Mark II basé sur des cassettes vidéo, et la construction d'antennes de taille et coût plus modestes entraîne une grande augmentation du nombre et de la qualité des mesures. Le VLBI permet alors, par une analyse globale, d'obtenir en même temps la position des sources radio (astrométrie), la position des antennes (géodésie) et l'orientation de la Terre avec des incertitudes de l'ordre de quelques cm pour les positions et 1 mas pour les angles. Le VLBI devient une technique fondamentale pour la géodésie globale et des stations VLBI mobiles permettent d'envisager une certaine densification de ces réseaux globaux.

Même si la mission Ballons de Vénus n'utilise que l'enregistreur Mark II, participer aux observations et au traitement de données était pour la communauté française l'occasion de se former aux matériels et processus du VLBI. C'était également une occasion de travailler au sein d'une équipe du JPL qui était partie prenante des développements du VLBI astrométrique et géodésique.

La participation française à la mission Ballons de Vénus

Après de nombreuses péripéties qui ont amené un changement radical de la mission initialement planifiée [Blamont, 1987] le contour final de la mission VEGA est fixé en 1982 avec une maîtrise soviétique sur la construction des sondes, des atterrisseurs et des ballons, et intégrant des sous-ensembles ou instruments fournis par des contributeurs notamment français. Pour ce qui concerne la mission des ballons, le CNES accepte d'organiser le réseau de poursuite international qui comprendra 14 radiotélescopes s'ajoutant aux 6 télescopes du réseau soviétique et affecte un ingénieur, Gérard Laurans, à cette mission. Le CNES finance également à l'Observatoire de Meudon l'équipe d'André Boischoit et François Biraud pour équiper l'antenne d'Atibaia au Brésil, ajoutant une station dans l'hémisphère Sud. Les équipes du JPL qui développent la navigation spatiale par VLBI, sous la direction de Bob Preston, décidèrent de s'investir dans le traitement. En 1983 le CNES décide, pour assister l'équipe de traitement, de contribuer à la mission de deux ingénieurs. Le GRGS, par son directeur Bernard Guinot, voit une opportunité de développer le traitement VLBI en France, suivant les expériences de VLBI astrométrique initiées par Jean-François Lestrade de l'Observatoire de Meudon, déjà en collaboration avec le JPL. Le GRGS décide donc de contribuer également et c'est ainsi que, fin 1984, LB et GP rejoignent au JPL l'équipe de Bob Preston, avec George Purcell et Claude Hildebrand. Ils seront rejoints quelques mois plus tard par AOM.

Le traitement des données VLBI de la mission Ballons de Vénus

Pour chaque mission VEGA les signaux sont émis par deux objets, le ballon et sa sonde de survol, en bande L (~1668 MHz). Ils se composent d'une part de sessions de télémétrie (TM) avec principalement une porteuse (on ne s'intéresse pas ici au contenu de la télémétrie) d'autre part de sessions où la porteuse est remplacée par deux tons séparés de plusieurs MHz (sessions synthèse de bande BWS). A partir des données de plusieurs stations formant des lignes de base avec une bonne géométrie, les sessions BWS (toutes les deux heures) permettent de déterminer la position transverse relative des deux objets alors que les sessions TM (il y en a soit une soit trois entre deux sessions BWS) permettent de déterminer la vitesse transverse relative des deux objets. La technique employée, dite Δ VLBI [Counselman, 1972], utilise les phases différentielles issues de la corrélation entre les signaux enregistrés et un modèle calculé par l'analyste. Comme les deux objets sont angulairement proches, quelques minutes d'arc, leurs signaux sont enregistrés simultanément à chaque radiotélescope et les

effets des retards troposphériques et ionosphériques s'annulent parfaitement. Quelques observations additionnelles de VLBI sur quasar permettent obtenir les retards d'horloge entre les stations du réseau de poursuite nécessaires à la cohérence des modèles. On trouvera une présentation détaillée de l'ensemble de la chaîne de traitement dans la thèse de doctorat de AOM [Ortega Molina, 1988].

Les signaux sont reçus dans chaque station du réseau de poursuite, convertis avec une instrumentation adaptée pour cette expérience afin de regrouper tous les signaux dans la bande de 2 MHz du format MarkII et enregistrés sur des cassettes vidéo classiques. Les centaines de cassettes sont ensuite récupérées au JPL pour traitement par « l'équipe française ». En fait l'équipe de traitement était à pied d'œuvre depuis fin 1984 car le premier travail fut de valider le nouveau corrélateur 'Block2' installé au California Institute of Technology (CalTech). Ce nouveau corrélateur compatible MarkII et MarkIII était dimensionné pour permettre un traitement de toutes les données dans un temps raisonnable mais n'était pas complètement opérationnel. L'ancien corrélateur 'Block0' pour MarkII servit de référence pour la validation du Block2, un travail qui occupa la majeure partie de l'année 1985. Le Block0 fut aussi utilisé pour la corrélation des données quasar fournissant les retards d'horloge entre stations. Finalement, l'ensemble des données a pu être traité. Des résultats ont été obtenus pour environ 94% des milliers d'observations (une observation = un ton pour une session et une station), l'essentiel des manques étant du fait des sondes VEGA : VEGA2 a été occultée pendant quelques heures par Vénus (c'était évidemment prévu) et VEGA1 n'a pas transmis correctement pendant 6 sessions.

Il faut indiquer qu'en sus de ces résultats qui étaient à la charge de « l'équipe française », d'autres mesures et analyses ont été nécessaires pour aboutir aux résultats scientifiques. D'une part l'équipe d'orbitographie du JPL affectée à la mission VEGA a fourni la position des sondes dans un repère inertiel, ce qui permet in fine d'obtenir la position des ballons par rapport à Vénus : $\text{Ballon/Vénus} = \text{Ballon/Sonde} (\Delta\text{VLBI}) + \text{Sonde/Inertiel (orbite)} - \text{Vénus/Inertiel (éphémérides)}$. D'autre part les stations dédiées à la télémétrie ont fourni les mesures des capteurs des ballons, notamment la pression atmosphérique qui donne une information sur l'altitude du ballon.

Les résultats scientifiques de la mission Ballons de Vénus

Vénus est entourée d'une épaisse atmosphère et des mesures en ultra-violet depuis la Terre ou depuis des sondes spatiales dès les années 1960 ont montré l'existence d'une super-rotation zonale rétrograde dans laquelle la haute atmosphère tourne environ 60 fois plus vite que la planète elle-même. Les missions spatiales suivantes ont essentiellement fourni des profils verticaux de l'atmosphère qui ont confirmé la super-rotation et ont mis en évidence les conditions extrêmes de température et pression à la surface ainsi que leur variation avec l'altitude. L'envoi de ballons dans l'atmosphère de Vénus avait alors été identifié comme la technique de choix pour étudier l'atmosphère in-situ sur une longue durée et une grande étendue spatiale.

Les ballons de Vénus ont en effet permis de mesurer précisément la vitesse du vent le long de leur trajectoire et ont montré que VEGA 1, à la latitude de 7° Nord au-dessus d'un terrain de plaines, a suivi une trajectoire régulière et subi peu de turbulences. Au contraire VEGA 2, injecté à la latitude de 7° Sud, a été beaucoup plus affectée avec de fortes turbulences ainsi

qu'une déviation vers le Nord, l'ensemble étant associé au survol de la partie montagneuse Aphrodite Terra (Fig 2.4.2). Après son passage au-dessus du sommet, le ballon a plongé brusquement de 3 km avant de remonter. Une analyse comprehensive de l'ensemble des données (trajectoire + mesures in situ) a permis d'obtenir une estimation du transfert de chaleur vertical et de montrer l'existence d'ondes de gravité associées au relief. La mission et ses premiers résultats ont fait l'objet d'une série de rapports dans Science le 21 mars 1986 [Sagdeev, 1986 ; Preston, 1986 ; Blamont, 1986]. L'inclusion des mesures VLBI pour la trajectographie des ballons a demandé plus de temps et les résultats finaux ont été publiés au début des années 1990 [Sagdeev, 1992 ; Blamont, 1993].

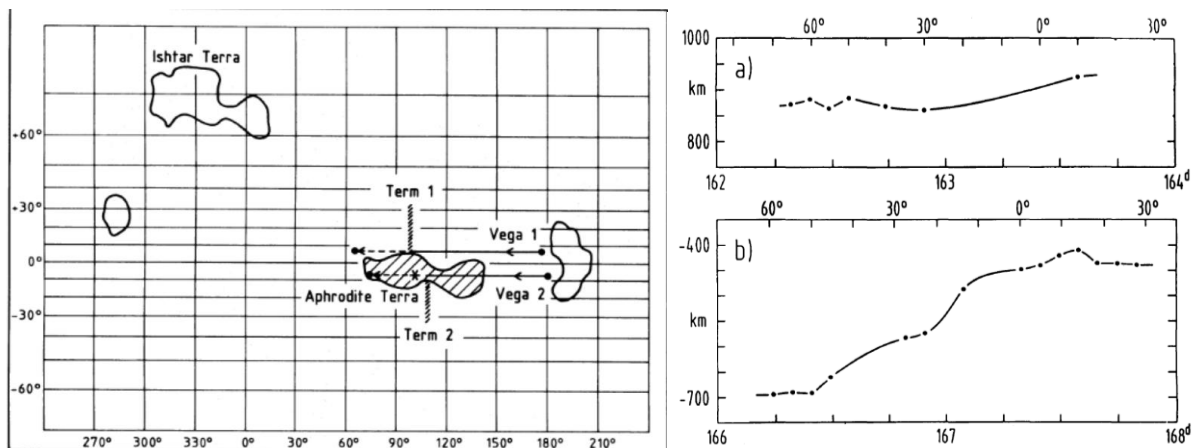


Fig. 2.4.2. Gauche : Trajectoire nominale depuis l'injection jusqu'à la fin des émissions avec la position de la limite nuit-jour pour chaque ballon. Droite : Trajectoire reconstituée en fonction de la date pour VEGA 1 (a) et VEGA 2 (b). Reproduit de [Sagdeev, 1992].

Les expériences associées et les conséquences à plus long terme

Après s'être familiarisé avec le logiciel de traitement VLBI du JPL, MASTERFIT, GP l'a installé en 1986 sur un nouveau mini-ordinateur à l'IGN. Ce fut l'occasion de passer de l'ère du « centre informatique » à celle de l'informatique décentralisée. La capacité d'analyse VLBI permit de traiter plusieurs expériences VLBI, certaines directement issues de cette mission Ballons de Vénus :

- Au moment même de la mission, des expériences opportunistes ont utilisé le matériel et les radiotélescopes en place. Ainsi deux sessions VLBI à but géodésique ont été réalisées fin juin-début juillet 1985 avec 5 radiotélescopes en Europe, Afrique et Amérique du Sud. Malgré l'utilisation du système MarkII et d'observations à une seule bande de fréquence, une incertitude décimétrique a été obtenue, validée par les 3 stations disposant déjà de résultats de VLBI géodésique. C'est la première détermination décimétrique d'une ligne de base entre l'Amérique du Sud (Atibaia au Brésil) et les autres continents [Petit, 1989].
- Ensuite, l'existence de stations VLBI mobiles et la compétence acquise au JPL en traitement VLBI géodésique ont été mises à profit pour participer à une campagne de mesure de VLBI mobile Européenne en 1989 avec deux stations en France : Brest et l'OCA (plateau de Calern). L'analyse des données [Rebai, 1992] de la station de Brest a permis de mettre en évidence l'effet de charge océanique et la station OCA a fourni une colocation avec la station laser satellite (ainsi que laser lune) un élément important pour la réalisation des premiers systèmes de référence terrestres sous la bannière de l'IERS [Altamimi, 1993].

Enfin les développements réalisés pour la mission Ballons de Vénus (convertisseurs vidéo spécifiques, traitements de corrélation spécifiques) ont contribué à faire germer l'idée qu'il peut être plus simple d'utiliser un système d'acquisition qui numérise les données, de les stocker sur un support informatique et les traiter ensuite sur un ordinateur générique ou un calculateur dédié. Cette approche a été mise en œuvre dès les années suivantes dans plusieurs expériences : En premier lieu, pour montrer la faisabilité du VLBI sur pulsars, avec un test entre Effelsberg et Nançay [Petit, 1990] où, à cette occasion, un maser à hydrogène a été installé avec le soutien du GRGS. Les expériences d'astrométrie VLBI de pulsars qui suivirent sont décrites dans la thèse de doctorat de GP [Petit, 1994]. En second lieu, pour réaliser le chronométrage de pulsars à partir d'observations VLBI [Petit, 1995], puis faire des recherches de signaux de pulsars dans les observations d'un radiotélescope [Rougeaux, 2000 ; Davoust, 2011].

Ces implémentations particulières n'ont pas été poursuivies sur le long terme. Cependant le principe de cette approche, nommée maintenant Software Defined Radio (SDR), s'est imposée dans de nombreux domaines par exemple en géodésie spatiale pour concevoir un récepteur GNSS [Principe, 2011], pour la technique de transfert de temps à deux voies [Huang, 2016] ou pour l'acquisition VLBI large bande [Sekido, 2021].

2.5 Missions de gravimétrie spatiales, rôle de l'accélérométrie

Les limitations des techniques satellitaires classiques avaient été identifiées depuis longtemps. Les exigences scientifiques avaient été formulées au colloque de Williamstown (voir chap. 1) mais avaient évolué. A l'atelier de travail SONG (ESA, 1978) les scientifiques européens établirent une feuille de route très complète dans laquelle le champ de gravité et l'océanographie occupaient une place majeure. Devaient en résulter les grandes missions d'altimétrie spatiale des années 90 et suivantes, et de nouveaux projets novateurs pour la détermination du potentiel gravitationnel.

Pour améliorer l'acuité et la précision d'une mission de cartographie du potentiel, il faut satisfaire à un ou plusieurs critères : (i) orbite la plus basse possible, (ii) suivi continu de la trajectoire, (iii) s'affranchir des forces de surface ou les mesurer, (iv) augmenter la sensibilité de la mesure par différentiation ; les critères (i) et (ii) doivent en outre être associés à une couverture spatiale complète de la Terre. Leur mise en œuvre, rendue possible grâce à des progrès technologiques importants (dont le GPS pour le second critère et l'accélérométrie ultrasensible pour le troisième), a conduit à trois missions révolutionnaires dans ce domaine :

- CHAMP concrétise l'approche "SST high-low" (poursuite de satellite par satellite en configuration haut-bas) : satisfait aux critères (i), (ii) et (iii) ;
- GRACE est une approche "SST low-low" (deux satellites bas co-orbitant) : satisfait à (i), (ii), (iii), et (iv) dans une certaine mesure ;
- GOCE embarque pour la première fois un gradiomètre (mesure du tenseur gradient de gravité en tout point de l'orbite) et satisfait aux quatre critères.

Ceci a pris plus de trente ans, entre les concepts, les nombreuses analyses de missions et simulations, les propositions aux agences spatiales (et les nombreux échecs), et le début de leur réalisation, un long chemin ponctué d'évènements qui sont rappelés dans Balmino (2021). L'accélérométrie ultra-sensible a été au cœur de ces trois missions, le seul moyen de satisfaire au critère (iii). Mais ceci oblige à un traitement particulier, l'étalonnage des mesures de cette technique, parce qu'elles ne sont pas absolues. Le facteur d'échelle peut être significativement différent de 1, à cause de l'électronique ou des variations de température. Pour CHAMP par exemple (voir ci-après), ces facteurs étaient environ 0.83 pour les deux axes sensibles. Les biais peuvent également être plus grands que le signal. Il est donc indispensable d'étalonner les accéléromètres, en estimant un facteur d'échelle et un biais, typiquement une fois par jour, avec une très grande précision. Ceci n'est possible que grâce aux mesures GPS très précises et continues.

CHAMP (2000-2010)

Parmi les systèmes possibles rappelés précédemment et qui avaient fait l'objet de plusieurs propositions aux agences spatiales sans jamais pouvoir s'insérer dans une ligne programmatique donnée, l'approche "SST high-low" s'avérait la plus faisable dans les années quatre-vingt-dix : un récepteur embarqué GPS bifréquence (Turbo-Rogue) fonctionnait sur le satellite TOPEX-Poséidon depuis 1992 ; les nouveaux accéléromètres français développés par

l'ONERA à la suite de CACTUS (Boudon et al., 1979) embarqué sur le satellite français CASTOR-D5B en 1975, avaient acquis leur certification spatiale avec les tests de l'instrument ASTRE sur le vol STS78 de la navette spatiale américaine (Touboul et al., 1996, 1999a). A la suite de la réunification allemande, la création à Potsdam du GFZ, centre spécialisé dans les géosciences avec des moyens humains et logistiques conséquents, et la volonté de la DARA (plus tard intégrée dans le DLR) de mettre en œuvre un projet notable fédérant des industries de l'ex-RDA, résultèrent en la formulation du projet CHAMP (**CH**allenging **Mini**satellite **Pay**load. Lancé le 15 juillet 2000 par un lanceur russe, CHAMP inaugura la "décennie pour les géopotentiels" (*Decade of Geopotentials*) proclamée en 1999 par l'UGGI – cela incluait aussi le champ magnétique terrestre.

CHAMP a principalement mesuré les champs gravifique et magnétique, le but étant d'améliorer considérablement les modèles jusqu'à une résolution de 800 km (au moins), d'où l'altitude moyenne choisie de 450 km en début de vie (260 km en 2010, en fin de mission). L'inclinaison orbitale ($87^{\circ},3$) a permis une couverture presque complète de la Terre. Pour le champ de gravité étaient embarqués un récepteur GPS Black-Jack bifréquence (fourni par NASA/JPL), **un micro-accéléromètre triaxial STAR** (de classe $3 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$) **construit par l'ONERA et fourni par le CNES**, ainsi qu'un rétro-réflecteur laser du GFZ. Le contrôle d'attitude du satellite et sa mesure étaient assurés par des capteurs de couples magnétiques, des propulseurs à gaz froid et des senseurs d'étoiles (fournis par DUT) – figure 2.5.1.

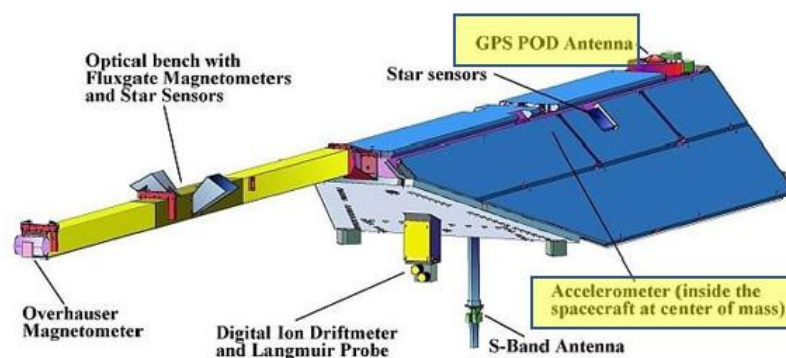


Fig. 2.5.1. Le satellite CHAMP et ses principaux instruments de mesure.

Les équipes du CNES-GRGS et du GFZ avaient minutieusement élaboré les méthodes et préparé les logiciels de traitement de données. Néanmoins, comme dans toute mission novatrice, l'analyse précise des mesures, en particulier de l'accéléromètre (influence de la température, réaction aux vibrations du bras portant les magnétomètres lors des poussées de gaz froid pour le maintien de l'attitude, axe radial en panne) requièrent des développements rapides supplémentaires qui permirent *in fine* l'exploitation optimale des données. Après seulement un an le gain en précision sur les modèles de potentiel s'avéra remarquable (Reigber et al. 2002). A titre d'exemple l'erreur sur les hauteurs du géoïde jusqu'à la résolution de 800 km passa de 60 cm à 6 cm environ.

GRACE (2002-2017) et GRACE-FO (2018-)

Le principe de GRACE, deux satellites co-orbitant sur une orbite basse et quasi polaire et mesurant leur distance ou vitesse relative, avait été envisagé en 1969 aux USA, repris et étudié au CNES (projet DIABOLO ; Balmino, 1972), proposé par des équipes américaines à la NASA mais sans succès. Une variante (projet SLALOM) avait aussi été présentée à l'ESA. Fin 1995, NASA/JPL venait d'achever l'étude d'un système de mesure radar inter-satellites de grande précision – auquel s'intéressait le CSR (Center for Space Research, Austin, Texas), et les études sur CHAMP continuaient à progresser en Allemagne. Les trois organismes : GFZ (avec le DLR), JPL et CSR, décidèrent alors d'entamer des études de développement de ce qui allait devenir la mission GRACE (**G**ravity **R**ecovery **A**nd **C**limate Experiment) acceptée en 1997. L'objectif principal était de déterminer les variations temporelles du potentiel, signatures de transferts de masses, à l'intervalle minimum du mois, aux échelles spatiales de 400 à 40000 km, et d'atteindre une précision du modèle moyen qui en résulterait cent à mille fois meilleure que ce que permettait CHAMP. Pour ce faire chacun des deux satellites (fig. 2.5.2) embarqua un récepteur GPS Black-Jack, un **accéléromètre Super-STAR** (de la classe 10^{-10} ms^{-2}) fabriqué par l'ONERA (Touboul et al., 1999b) *mais non fourni par la France* malheureusement. Les équipes françaises étaient prêtes à participer mais cela allait les mettre en difficulté pour l'accès rapide aux données. L'instrument principal, KBR (K band radar), de précision $0.1 \mu\text{m/s}$ sur la vitesse inter-satellite, fut fabriqué et fourni par le JPL. Tout comme pour CHAMP des propulseurs à gaz froid assuraient le contrôle de l'attitude - suivie par deux senseurs stellaires danois (DUT) équipant chaque satellite, et un rétro-réflecteur laser du GFZ était implanté du côté nadir. Ici aussi, un second objectif de la mission fut de déterminer des profils de densité et de température dans la haute atmosphère grâce aux mesures d'occultation GPS. Les satellites furent lancés le 17 mars 2002 par un lanceur russe, et placés sur une orbite d'inclinaison 89° , à 500 km d'altitude moyenne (qui allait décroître jusqu'à 350 km en fin de mission), distants l'un de l'autre de 220 km en moyenne. La mission devait durer initialement 5 ans, elle se poursuivit de fait durant 15 ans (jusqu'en septembre 2017), une prouesse remarquable d'ingénierie.

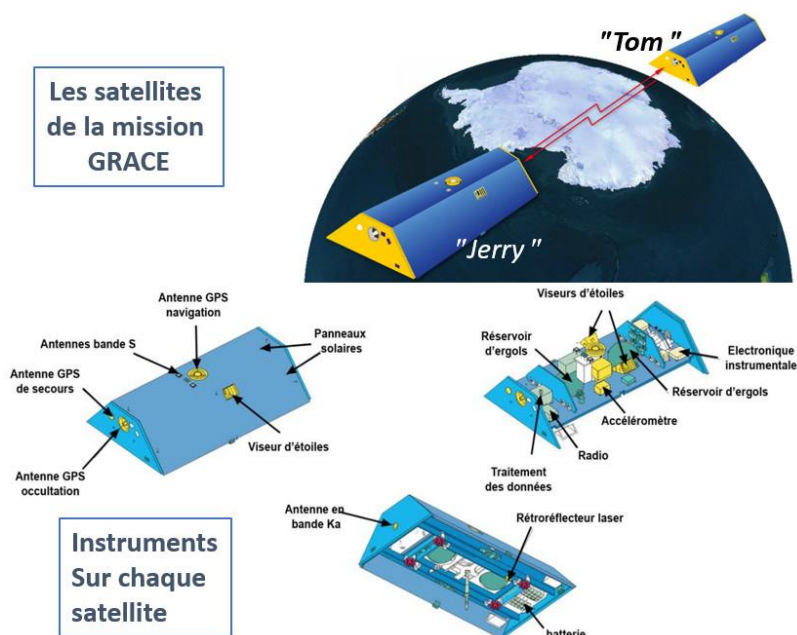


Fig. 2.5.2. Les satellites (appelés Tom et Jerry) de la mission GRACE et leurs instruments.

Les modèles moyens ont fait un bond fantastique en précision aux grandes et moyennes longueurs d'onde. Un ordre de grandeur a été gagné avec GRACE, comparé à CHAMP, avec le calcul de nouveaux modèles au CSR (à Austin) et au GFZ. Au début la contribution du GRGS ne pouvait être officielle, les données étant réservées aux équipes P-I (*Principal Investigator*). Mais à partir de 2005 le GFZ et le GRGS purent reprendre la publication en commun de nouveaux modèles, solutions satellites avec GRACE et LAGEOS et solutions combinées - avec données gravimétriques et altimétriques (Förste et al., 2008). L'effort fut porté au CNES-GRGS sur les modèles temporels - solutions mensuelles ou décadaires (Bruinsma et al., 2010), en combinant les mesures de GRACE avec les données de télémétrie laser des satellites LAGEOS et en développant une méthode de résolution propre à réduire les erreurs inhérentes à la géométrie orbitale de la mission et au système de mesure.

Les résultats scientifiques de GRACE sont innombrables ; les publications se comptent par milliers à travers le monde dans les domaines de la géodésie, de l'hydrologie, de la glaciologie, de l'océanographie, de la physique de la Terre solide. Les contributions des diverses équipes du GRGS sont très importantes dans pratiquement tous ces domaines.

Les impacts sociétaux de ces résultats et des capacités d'une telle mission sont 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 (mais résultant en un trou d'observabilité de 9 mois environ), pour continuer à suivre les variations temporelles des transferts de masse à l'échelle planétaire. GRACE-FO, à laquelle participe l'équipe GRGS du CNES (l'accès aux données ayant été ouvert), est très semblable à la précédente : partenariat USA-Allemagne, configuration orbitale identique, mêmes instruments (dont **les accéléromètres Super-STAR de l'ONERA**) ; mais elle possède un instrument supplémentaire (LRI : **Laser Ranging Interferometer**, co-développé par les USA et l'Allemagne) qui permet de mesurer la distance entre les deux satellites avec une précision très supérieure, de l'ordre de 10 nm. Malheureusement l'un des accéléromètres est défaillant, obligeant pour l'un des satellites à une modélisation des forces de surface moins précise qu'une mesure directe. Néanmoins les performances de GRACE-FO s'avèrent être équivalentes à celles de son prédécesseur.

GOCE (2009-2013)

La gradiométrie spatiale est une technique qui avait été envisagée il y a longtemps, en particulier pour cartographier le champ de gravité de la Lune sur sa face cachée et à basse altitude (grâce à l'inexistence d'atmosphère), sans avoir recours à un satellite relais. L'application à la Terre est plus difficile car, pour obtenir la résolution nécessaire, il faut contrecarrer les effets du frottement sur un satellite bas pendant suffisamment longtemps. Les progrès dans les accéléromètres conçus et fabriqués par l'ONERA, qui pouvaient être utilisés à la fois pour la mesure du gradient de gravité et la compensation du frottement (système "*drag free*"), laissaient espérer une solution dès 1980. Une proposition fut faite au CNES au *Séminaire de Prospective des Arcs* (Balmino et al., 1981), qui conduisit à l'étude du projet GRADIO, lequel combinait la détermination des champs de gravité et magnétique. Le projet passa sous l'égide de l'ESA en 1986 sous le nom d'ARISTOTELES, donna lieu à nombre d'études mais malheureusement fut abandonné en 1992 (risques technologiques, coût trop élevé). Les scientifiques européens (en particulier les océanographes) et l'ESA se mobilisèrent pour concevoir un nouveau projet purement gravimétrique, GOCE¹ (**G**ravity and steady-state

¹ *Nom choisi en écho à WOCE (World Ocean Circulation Experiment)*

Ocean Circulation Explorer) qui fut présélectionné en 1996, puis choisi en tant que première mission *Earth Explorer* du programme *Living Planet* (ESA, 1999). L'objectif scientifique était, pour le champ moyen, d'atteindre la résolution (demi-longueur d'onde) de 100 km sur toute la Terre (excepté aux pôles à cause de l'inclinaison orbitale) avec une précision de 1 milligal (10^{-5} ms^{-2}) sur les anomalies de gravité et de 1 à 2 cm sur le géoïde.

GOCE fut un projet novateur, le premier à embarquer un gradiomètre de haute sensibilité volant sur un satellite civil d'altitude très basse. Ce gradiomètre (fig. 2.5.3) est constitué de trois paires **d'accéléromètres de l'ONERA** de sensibilité 10^{-12} ms^{-2} permettant, sur une distance de 0,5 m (entre deux accéléromètres de chaque paire), la mesure 3-D des gradients de gravité avec une précision de quelques milli-Eötvös ($1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ s}^{-2}$) dans une bande passante 0.005 Hz-0.1 Hz (Touboul et al., 1999b).

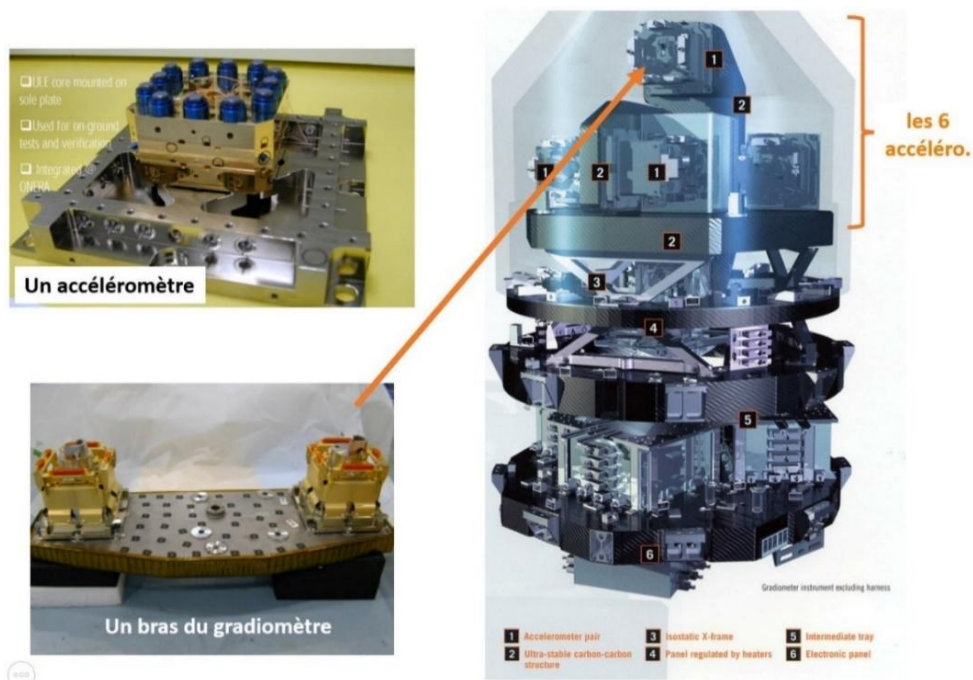


Figure 2.5.3. Gradiomètre de GOCE : un accéléromètre ; un bras du gradiomètre ; l'instrument complet (ESA & ONERA).

Les autres instruments sont un récepteur GPS (GRAS) de l'ESA et un réflecteur laser pour la détermination d'orbite précise (niveau $\sim 1 \text{ cm}$), et trois senseurs stellaires pour l'attitude : les mesures gradiométriques contenant les effets rotationnels du satellite (vitesse et accélération angulaires), il faut les soustraire - grâce aux mesures de ces senseurs et du gradiomètre lui-même. Les mesures des accéléromètres sont utilisées en temps réel pour piloter le système "drag free" qui consiste en des propulseurs ioniques au xénon. Le satellite fut mis sur une orbite presque héliosynchrone (inclinaison $\sim 96.7^\circ$), quasi circulaire et d'altitude moyenne 255 km, par une fusée russe (Rokot) le 17 mars 2009. L'altitude fut baissée Jusqu'à 230 km environ la dernière année de la mission (août 2012-novembre 2013).

La complexité des mesures, la bande passante de l'instrument, la taille du problème inverse à résoudre, nécessitèrent le développement de nouvelles méthodes et de logiciels spécifiques. Cet effort fut conduit au niveau européen par un consortium, EGGC (European GOCE Gravity Consortium) créé en 2000 peu après la sélection de la mission, qui réunissait dix équipes –

dont celle du CNES-GRGS, et soutenu financièrement par l'ESA. EGGC devint la "High level Processing Facility" (HPF) en 2004, ses activités cessèrent en 2019.

GOCE, qui a produit des modèles de haute résolution du champ statique (moyen - sur sa durée de vie) était absolument complémentaire de GRACE dont l'objectif était de suivre les variations temporelles. Cependant, la longévité exceptionnelle de GRACE et ses performances conduisirent également à une très bonne connaissance du champ moyen à l'aide de ses seules mesures, bien qu'à une résolution inférieure à celle obtenue par GOCE. Il était donc évident que l'on devait combiner les données des deux missions pour obtenir la meilleure description possible du champ moyen, ce qui fut fait ; les données laser des satellites LAGEOS tout d'abord puis des autres cibles laser disponibles furent également introduites pour permettre la détermination très précise des très grandes longueurs d'onde.

Les contributions françaises aux modèles ayant utilisé GOCE, seul ou en combinaison avec GRACE et les satellites laser, s'étalent sur plusieurs années, au fur et à mesure de l'accumulation des mesures, également de leurs retraitements suite à des progrès dans leur compréhension et l'analyse de leurs erreurs. Les modèles furent déterminés par une méthode directe en coopération avec le GFZ (Bruinsma et al., 2013) alors que d'autres équipes du consortium avaient adopté une approche fréquentielle, soit temporelle, soit spatiale.

Les progrès apportés par les trois missions CHAMP, GRACE, GOCE sont considérables. Une simple comparaison visuelle (fig. 2.5.4) permet d'en apprécier la teneur. Outre le gain en résolution, la précision des anomalies de gravité du dernier modèle combinant GOCE-GRACE-satellites laser (Förste et al., 2019) atteint 1 mGal à 100 km, ce qui était le but à atteindre.

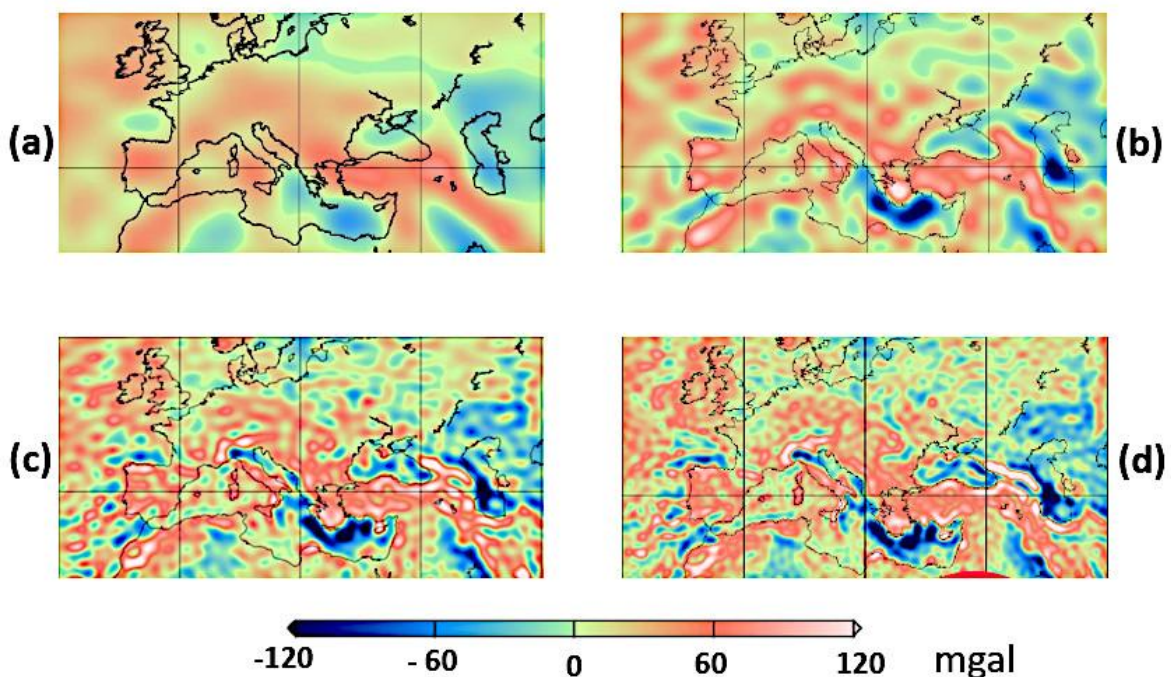


Figure 2.5.4. Progrès des modèles statiques franco-allemands suite aux missions de gravité dédiées, en termes d'anomalies de gravité. **(a)** Auparavant, analyse classique des perturbations : modèle GRIM5-S1 (Biancale et al., 2000) : 31 satellites (1967-1999), résolution ~800 km ; **(b)** CHAMP (2000-2009), résolution ~300 km ; **(c)** GRACE (2002-2014), résolution ~150 km ; **(d)** GOCE (2009-2013), plus GRACE (2002-2014), plus six satellites "laser" (2002-2018), résolution ~80 km.

2.6 Géodésie planétaire pour missions d'exploration planétaire

La géodésie spatiale fut très tôt reconnue pour sa contribution à l'étude des autres corps du système solaire, en particulier pour ce qui concerne leur structure interne qui traduit leur formation, leur évolution, c'est-à-dire leur histoire thermique. Alliée aux outils de la mécanique céleste, de la géologie, de la géophysique et aux observations télescopiques classiques, la géodésie devient *planétaire* et permet de répondre à ces interrogations fondamentales.

Tout comme dans le cas des sciences de la Terre c'est en comparant le champ de gravité réel à celui d'un corps idéal (par exemple un ellipsoïde en équilibre hydrostatique), que l'on définit des anomalies qui caractérisent des écarts à un état d'équilibre interne (c'est-à-dire des variations non radiales de la masse volumique), d'où une possibilité de sondage de l'intérieur de la planète. Ceci n'est en fait que l'un des quatre principaux moyens de "regarder" en profondeur, les trois autres étant la sismologie, l'étude du champ magnétique et l'analyse des variations de la rotation du corps ; mais la connaissance du champ de gravité est fondamentale parce qu'elle apporte une information directe (bien qu'intégrée et donc non inversible de manière univoque) sur le champ de densité.

Dès 1976, fort de son expérience récente dans la modélisation du champ de gravité terrestre (premiers modèles GRIM – cf. chap. 3.6) le GRGS s'orienta naturellement vers la détermination des champs planétaires. Suite à une proposition acceptée par la NASA, avec l'accès aux données de la mission martienne Mariner 9 et l'arrivée des missions Viking autour de Mars, c'est cette planète qui devint l'objet de nos premières recherches. Nous avons été les premiers en Europe, avec la détermination d'un modèle de potentiel gravitationnel de Mars, 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, positionnement des *landers* Viking 1 & 2, et détermination des nutations de Mars d'origine solaire.

La position privilégiée, au sein de groupes américains, de certains membres des équipes GRGS permit de poursuivre jusqu'à nos jours ces activités de géodésie planétaire (table 2.6.1). Citons la détermination du champ de gravité de Vénus (mission Magellan), de l'astéroïde Eros (mission NEAR), et la reprise de la modélisation du champ de gravité de Mars – y compris ses variations temporelles à grande longueur d'onde, grâce aux missions MGS et ODYSSEY de la NASA (Tyler et al., 1992 ; Smith et al., 1999). La plupart de ces travaux sont, depuis 2000, menés en collaboration avec une équipe de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB), par exemple le modèle de champ martien précité (fig. 2.6.1), dont les travaux pour son amélioration se poursuivent grâce en particulier à la longévité de la mission MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) lancée en 2005.

Table 2.6.1. Coopération avec NASA sur les missions planétaires : modélisation des champs de gravité (essentiellement)

Années	Cadre et activités	Résultats	Références (sélectionnées)
1976-1982	MDAP (Mars Data Analysis Program) : Participation analyse des données Mariner 9 et Viking	Modèles du champ de gravité de Mars Paramètres de rotation de Mars	Balmino et al., 1978, 1982 Borderies et al., 1980
1980-1997	Co-investigation sur Venus Radar Mapper – devenu Magellan. Analyse des données DSN	Plusieurs modèles du champ de gravité de Vénus (régionaux et globaux)	Barriot & Balmino, 1992 Barriot et al., 1998
1996-2001	Co-investigation NASA-JPL CNES-GRGS Mission NEAR autour de 433 Eros	Champ de gravité de l'astéroïde Eros	Garmier et al., 2002
1990-2010	Co-investigation NASA-JPL CNES-GRGS Mars Observer → Mars Global Surveyor; puis ODYSSEY	Modèles du champ de gravité de Mars	Esposito & Balmino, 1992 Zuber et al., 2000 Marty et al., 2009

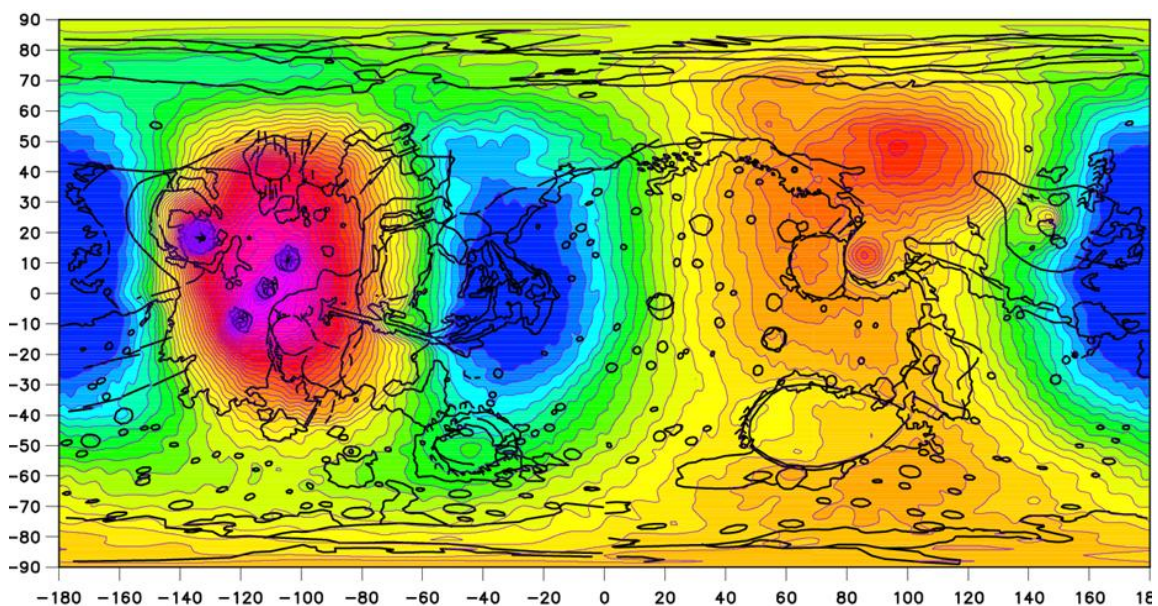


Figure 2.6.1. Le géoïde de Mars. Modèle en harmoniques sphériques de degré et ordre 95, déterminé avec les mesures (Doppler et distances radar) de Mars Global Surveyor et Mars Odyssey ; (Marty et al., 2009).

Notre savoir-faire s'est également appliqué aux astéroïdes et petits corps : mission Dawn et champ de gravité de Vesta (Ermakov et al., 2014) ; étude de la comète Churyumov-Gerasimenko autour de laquelle la mission Rosetta fut en orbite entre mi-2014 et 2016 (Laurent-Varin, 2015) : malgré les contraintes importantes liées à l'environnement et au déroulement de la mission, un modèle de champ de gravité du noyau est en cours de détermination en collaboration avec l'équipe de M. Paetzold (Université de Cologne), PI de la radioscience sur Rosetta.

Le GRGS contribue aussi à l'étude des atmosphères planétaires pour lesquelles on peut utiliser les accéléromètres embarqués sur les sondes spatiales et les données collectées aux passages au périastre. Par exemple, pendant la phase d'aérofreinage du satellite TGO autour de Mars (Mission ESA-Roscosmos : Exomars Trace Gas Orbiter), le frottement atmosphérique a été utilisé pour circulariser l'orbite du satellite (de mars 2017 à mars 2018). Pendant les passages au périastre (altitude autour de 100km), les panneaux solaires, habituellement orientés vers le soleil, sont alors tournés pour être perpendiculaires à la direction de la vitesse du satellite de manière à avoir un frottement maximum. Pendant ces courtes périodes d'environ 5 minutes il est possible d'analyser les données de l'accéléromètre embarqué, et ainsi mesurer les forces de surface agissant sur le satellite, notamment le frottement. Le logiciel (GINS) permet de calculer une orbite précise et de comparer la force de frottement issue des modèles avec les mesures accélérométriques. Cela conduit à améliorer la modélisation de la densité atmosphérique dans la tranche d'altitude 100-120 km. Les solutions obtenues se raccordent très bien avec les données de l'instrument NGIMS du satellite MAVEN de la NASA qui mesure à plus haute altitude (140-170 km ; Siddle et al., 2020). Ces modèles pourront ensuite être utilisés pour planifier les phases d'aérofreinage voire d'aérocapture des futures missions martiennes, essentielles pour circulariser les orbites à moindre coût puisqu'aucune propulsion n'est nécessaire pendant ces phases.

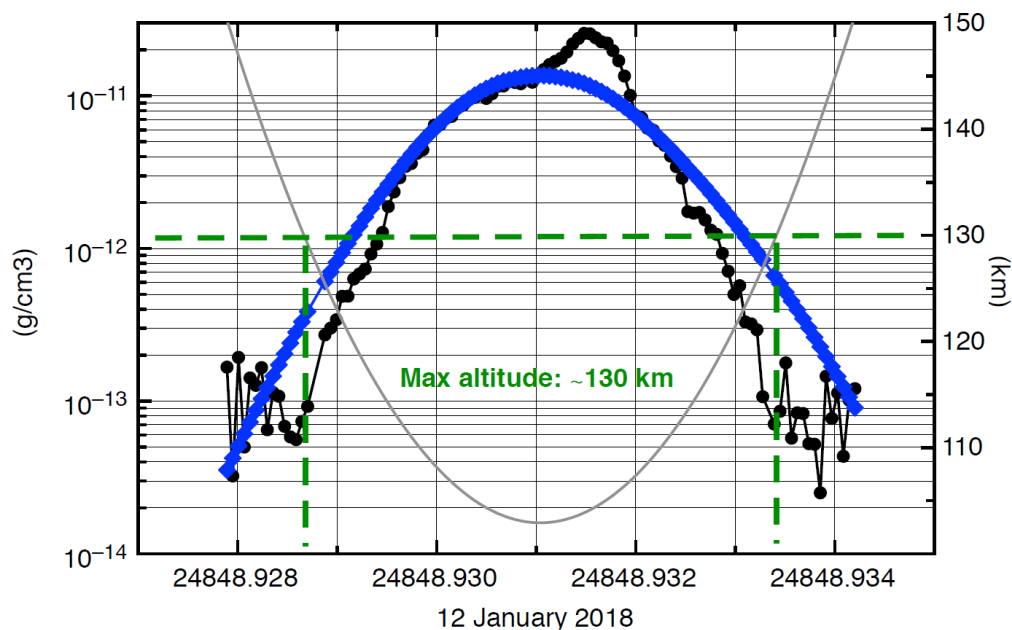


Figure 2.6.2. Comparaison entre les densités issues du modèles MarsGram 2005, en bleu et celles déduites des mesures accélérométriques de TGO, en noir, pour un passage au périastre. L'altitude est en gris clair.

Des études similaires ont aussi été menées avec la mission Venus Express, qui ont permis de mettre en évidence des ondes de gravité à petite échelle (100 à 300 km de longueur d'onde horizontale) dans l'atmosphère de Vénus (Müller-Wodarg et al., 2016).

De plus l'équipe GRGS-CNES participera à la mission Bepi Colombo (collaboration des agences spatiales européenne et japonaise), lancée en 2018 et qui devrait commencer en 2025 sa phase orbitale autour de Mercure, complétant l'exploration faite de 2011 à 2015 par la mission Messenger de la NASA.

Avec l'ORB l'équipe CNES du GRGS est aussi impliquée dans l'utilisation des mesures de poursuite du *rover* Insight à la surface de Mars (depuis novembre 2018) afin de mieux contraindre les paramètres de rotation de la planète, et notamment son taux de précession (Kahan et al., 2021) ; avec une année supplémentaire de données nous devrions aussi avoir accès aux paramètres de nutation de Mars, en attendant l'arrivée du *rover* de ExoMars 2020 (prévue mi 2023) qui embarquera le transpondeur LARA permettant de prolonger l'étude commencée avec Insight.

Au sein du CNES nous avons ainsi construit et développé une expertise en géodésie planétaire unique en Europe. Ceci nous permet de participer à la préparation de nouvelles missions, par exemple :

- MMX, Martian Moons Exploration (mission japonaise en collaboration avec le CNES, qui devra ramener des échantillons du sol de Phobos) et pour laquelle le logiciel GINS sera utilisé par la JAXA pour les études de géodésie,
- Hera : mission de l'ESA vers l'astéroïde binaire Didymos,
- EnVision, mission candidate au programme Cosmic Vision de l'ESA qui prévoit une nouvelle détermination du champ de gravité de Vénus et dont les simulations de performances de restitution du champ ont été menées avec GINS (Rosenblatt, 2021).

De nombreux résultats scientifiques nouveaux concernant ces corps sont évidemment attendus.

2.7 Modèles de densité de la haute atmosphère et orbitographie spatiale

Introduction

Après le lancement du premier satellite autour de la Terre le 4 octobre 1957, Spoutnik 1, de nombreuses études de mécanique céleste et spatiale furent développées pour modéliser la trajectoire de la nouvelle petite lune artificielle. Dans cette modélisation outre l'effet majeur du champ de gravité terrestre, l'effet du freinage atmosphérique sur le satellite est apparu relativement important aux altitudes considérées pour modéliser la trajectoire du satellite avec un périégée à 230 km et un apogée à 950 km et pour finalement connaître avec un peu de précision l'heure de passage du satellite au-dessus des différents endroits survolés de la Terre. Il fut rapidement évident que pour se faire, les modèles existants alors de l'atmosphère supérieure de la Terre et de la thermosphère devaient être révisés ; heureusement l'analyse des effets mesurés du freinage atmosphérique sur le mouvement des satellites pouvait être en même temps une information essentielle pour procéder à cette révision des modèles.

L'acquisition de données de freinage et de densité totale de la haute atmosphère de la Terre au-delà de 120 km

De cette période du début de l'ère spatiale on pourra retenir parmi plusieurs modèles existants le modèle de Jacchia 1965 du Smithsonian Astrophysical Observatory (le SAO); il fut sans doute un des plus utilisés à l'époque. Le SAO avait en effet la responsabilité d'un réseau unique de poursuite des satellites avec des caméras photographiques, le réseau mondial Baker Nunn reparti tout autour de la Terre ; il pouvait permettre un positionnement angulaire du satellite avec une précision de l'ordre de 2 secondes de degré à un instant donné et noté avec une précision de quelques millisecondes de temps. Cette méthode essentielle à l'époque pour les travaux les plus précis de géodésie spatiale était cependant assez lourde à mettre en œuvre mais on pouvait heureusement se contenter aussi d'une solution plus expéditive, moins précise mais très utile en pratique sur le plan opérationnel du suivi quotidien des trajectoires des satellites artificiels. À côté de ces techniques photographiques relativement précises du réseau Baker Nunn, beaucoup d'autres approches photographiques ou visuelles de plusieurs pays passionnés par ce nouvel âge spatial, à l'Est comme à l'Ouest comme on disait alors, ont fourni aussi des données de freinage et de densité totale très utiles y compris des données d'amateurs, et sans oublier les systèmes américains de surveillance des objets spatiaux; l'ensemble de ces données pouvait être évidemment de qualité pas toujours homogène.

Le passage de l'effet du freinage mesuré à la densité totale déduite n'est pas simple en lui-même et nécessite de connaître la forme et l'attitude du satellite aussi bien que l'interaction de l'atmosphère et de la surface du satellite à travers un coefficient aérodynamique noté souvent C_D . Tout cela est une source potentielle d'erreurs qu'il faut apprécier.

Caractéristiques essentielles de la haute atmosphère de la Terre au-delà de 120 km : l'hétérosphère, la thermosphère, l'exosphère

Dans cette génération de modèles mais aussi dans les suivantes, l'altitude inférieure de la modélisation fut en général de 120 km ; en effet d'après les travaux de l'époque et qui sont toujours valables, notamment ceux de Marcel Nicolet en Belgique au Service d'aéronomie à Uccle, à partir de cette altitude on peut considérer que les différents et principaux constituants de l'atmosphère, oxygène moléculaire, azote moléculaire, oxygène atomique,

hélium, hydrogène, se répartissent verticalement en altitude comme s'ils étaient seuls et seulement en fonction de leur masse moléculaire ou atomique et du profil de température. On passe d'une distribution de mélange des divers constituants dans les couches inférieures de l'atmosphère en dessous de 120 km (on appelle cette zone de l'atmosphère, l'homosphère ayant une masse moléculaire moyenne constante) à une distribution où les différents constituants se répartissent de manière stratifiée en fonction de l'altitude et deviennent successivement majoritaires; la masse moléculaire moyenne de l'atmosphère supérieure va alors en décroissant avec l'altitude; en partant de 120 km on observe ainsi comme constituants majoritaires d'abord les constituants de masse moléculaire la plus élevée (l'oxygène et l'azote moléculaire puis l'oxygène atomique) et finalement aux altitudes élevées les constituants ayant une petite masse atomique, hélium et hydrogène; ces constituants légers posent néanmoins pour ce qui est de leurs variations avec l'altitude des problèmes spécifiques différents des constituants de masse moléculaire ou atomique plus grande, notamment en raison de leur vitesse moyenne d'agitation plus grande pour les températures existantes; il faut un traitement particulier; mais finalement et sans entrer dans la complexité des processus physiques dès lors que l'on se donne en tous points de la Terre un profil vertical de température et une valeur de la concentration des constituants à 120 km on peut connaître une estimation de la valeur de ces constituants le long de cette verticale; il suffit alors d'en faire la somme pour avoir la densité totale. Concernant le profil de température on doit rappeler que la température augmente avec l'altitude puis tend vers une limite à plusieurs centaines de km d'altitude, limite qu'on appelle la température exosphérique. La connaissance de la forme de ce profil de température que l'on se donne et que l'on définit empiriquement à l'aide de quelques paramètres permet ainsi et à titre d'exemple d'intégrer l'équation de diffusion correspondant à un équilibre hydrostatique supposé réalisé. Dans les débuts de l'ère spatiale on ne disposait pas de mesures directes de la température dans cette zone d'altitude au-dessus de 120 km; cette zone fait partie de la thermosphère (fig 2.7.1) en raison de l'augmentation de la température, liée à des processus de chauffage par exemple par absorption du rayonnement solaire à différentes longueurs d'onde, mais aussi au contraire en prenant également en compte des processus de refroidissement par émission de rayonnement; il faut également prendre en compte des effets de chauffage dus à l'activité géomagnétique tout particulièrement dans les régions aurorales et polaires et aussi des effets de l'activité solaire. Tout cela est physiquement assez complexe.

La figure 2.7.1 présente les prédictions de densité et température du modèle MCM (Jackson et al., 2020), dont DTM2020 constitue la partie thermosphérique, pour des activités solaires faibles et forts; l'effet est très fort dans la thermosphère, et absent dans les couches atmosphériques plus basses.

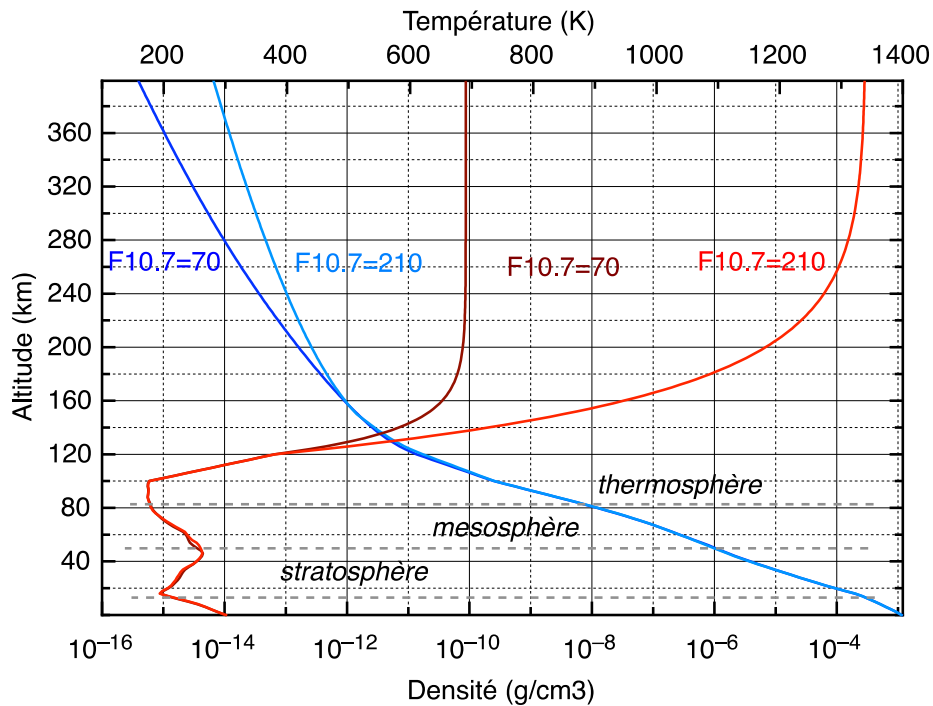


Figure 2.7.1. La densité (bleu) et la température (rouge) à l'équateur à midi, pour activité solaire faible et fort. (Prédictions du modèle MCM ; swami-h2020.eu).

Principe de la modélisation de la haute atmosphère de la Terre au-delà de 120 km

Pour modéliser la haute atmosphère de la Terre (l'hétérosphère, la thermosphère, l'exosphère) il fallait donc déterminer la valeur d'un certain nombre de paramètres à 120 km à partir de ces seules données de densité totale obtenues évidemment dans les conditions les variées possibles et cela en fonction de leurs coordonnées géographiques (la latitude joue le rôle majeur) et aussi en fonction de l'heure locale solaire, des saisons, de l'activité solaire et géomagnétique. Ces derniers effets sont assez compliqués en eux-mêmes et nécessitent l'utilisation de ce que l'on appelle des proxies aussi représentatifs que possible des phénomènes d'origine solaire ou géomagnétique, tel le flux solaire sur onde décimétrique à 10,7 cm ou les indices Kp pour l'activité géomagnétique proprement dite ; il faut en discuter soigneusement l'efficacité, voir s'ils sont toujours disponibles et de qualité dans le temps et des études ont été faites dans ce sens. Les paramètres à déterminer sont la valeur des principaux constituants à 120 km, et aussi la valeur de certaines caractéristiques du profil de température, telle la température exosphérique comme on l'a dit plus haut.

En conclusion comme on ne disposait pas de données de température, on cherchait à représenter aussi bien que possible les données disponibles de densité totale tout autour de la Terre et durant le cycle solaire en cours en utilisant sur le plan mathématique des techniques d'ajustement de paramètres type moindres carrés. Le résultat est un modèle appelé souvent semi-empirique car on ajuste empiriquement aux observations des paramètres du modèle avec une physique sous-jacente simplifiée ; on suppose ainsi que la diffusion des constituants principaux satisfait en général à la loi de l'équilibre hydrostatique; il n'y a aucun processus dynamique impliqué. On avait bien conscience des limites de ces procédures simplifiées et des biais que l'on introduisait mais elles constituaient déjà un premier progrès très utile pour disposer de modèles de travail. Sur le plan pratique du calcul des trajectoires des satellites, il apparaissait en conséquence nécessaire d'ajuster chaque fois aux paramètres définissant la trajectoire du satellite à déterminer (position et vitesse du satellite à un instant donné) un paramètre empirique multiplicateur des valeurs de densité totale prédites par le modèle adopté. En fait on continue encore aujourd'hui et en dépit des

progrès accomplis dans la modélisation à utiliser cette procédure pour déterminer les trajectoires des satellites de la manière la plus précise possible.

Importance d'utiliser des mesures directes de la température dans la modélisation de la haute atmosphère et de la thermosphère

A titre d'exemple d'erreurs systématiques commises dans les tout premiers modèles, sans utiliser de mesure directe de la température, l'heure prédite du maximum de température diurne était à 14 h heure. Quand des mesures directes de température purent être obtenues dès le milieu des années soixante avec les sondeurs à diffusion incohérente en France à Saint Santin / Nancay et aussi à Arecibo (National Astronomy and Ionosphere Center à Porto Rico, aujourd'hui malheureusement détruit depuis 2020), on s'aperçût que ce maximum était en fait décalé vers 16 h -17 h dans les latitudes moyennes. Ceci fut également confirmé avec les données de température exosphérique obtenues à bord du satellite américain OGO 6 (Orbiting Geophysical Observatory -orbite polaire aux altitudes de 413 - 1077 km, lancé en juin 1969).

Genèse du modèle DTM de la haute atmosphère de la Terre au-delà de 120 km (Drag Temperature Model 1978)

Dès lors dès que des données de température ont été disponibles, ce qui était essentiel, on a donc cherché à modéliser la haute atmosphère en combinant cette fois mesures de température et données de densité totale, éliminant bien des biais. Comme précédemment sans données de température on détermine un certain nombre de paramètres à 120 km en fonction de divers paramètres géophysiques (heure locale solaire, saison, activité solaire et géomagnétique) y inclus les paramètres du profil de température, la température exosphérique, le cas échéant la température à 120 km, et son gradient de croissance verticale, mais on évite des erreurs systématiques en utilisant directement des mesures de température dans les procédures d'ajustement, ce qui est un progrès très significatif.

Le premier modèle DTM (Drag Temperature Model 1978 ; DTM78) est né de cette idée d'utiliser en même temps des données de température obtenues dans la haute atmosphère et des données de freinage atmosphérique déduites du mouvement observé des satellites artificiels.

La densité totale dans la zone d'altitude considérée (au-delà de 120 km) est calculée en faisant la somme des principaux constituants (oxygène moléculaire, azote moléculaire, oxygène atomique, hélium, hydrogène) qui sont tour à tour le constituant majoritaire dans la composition lorsque l'on considère des altitudes de plus en plus élevées. On suppose que chaque constituant est distribué en général selon la loi de l'équilibre hydrostatique de diffusion des gaz parfaits avec une situation particulière pour l'hélium et l'hydrogène qui doit être prise en compte. On utilise un profil de température identique pour tous les constituants. Le premier modèle DTM ainsi obtenu sur ce principe a été publié en 1978 (Barlier et al., 1978). Depuis des améliorations importantes ont été apportées au cours du temps sur ce premier modèle ; elles concernent notamment l'effet de l'activité solaire que l'on détermine à l'aide de proxies de mieux en mieux représentatifs des effets de l'activité solaire. Ils vont être décrits dans la suite du texte. Elles concernent aussi de nouvelles données de densité totale notamment déduites de mesures d'accéléromètres ultra-sensibles embarqués à bord de satellites pour des missions de détermination du champ de gravité terrestre dans les années 2000. On a ajouté enfin des données de concentration des constituants obtenues à bord de différents satellites. L'ensemble de ces améliorations successives va être explicité dans la suite et permet des améliorations importantes pour de nombreuses applications en géodésie

spatiale, un des objectifs majeurs de ces travaux, et notamment pour les applications nécessitant des trajectographies les plus précises possibles.

L'évolution des modèles DTM

Depuis ce premier modèle DTM78, cinq versions ont été développées : DTM94 (Berger et al., 1998), DTM2000 (Bruinsma et al., 2003), DTM2009 (Bruinsma et al., 2012), DTM2013 (Bruinsma, 2015)) et DTM2020 (swami-h2020.eu). Les versions bénéficient de plus de données de densité, des indices solaires ou géomagnétiques différents, et des algorithmes améliorés. Mais le facteur le plus important pour améliorer des modèles semi-empiriques comme DTM c'est de disposer des nouvelles données, de bonne qualité et avec une bonne couverture spatiale et temporelle : des mesures avec une précision de quelques pourcents, de pôle à pôle, et sur au moins un cycle solaire d'environ 11 ans.

En raison de l'absence d'une base physique rigoureuse, les modèles semi-empiriques (par opposition aux modèles physiques) reposent entièrement sur les données de densité, composition et de température assimilées. Les prédictions dans des conditions pour lesquelles aucune ou (trop) peu de données étaient disponibles, ou des données inexactes ont été assimilées, peuvent être très erronées. Les lots de données actuellement disponibles ne sont pas de qualité homogène et, dans certains cas, ils sont biaisés par exemple à cause des paramètres d'étalonnage instrumentaux qui n'ont pas pu être déterminés avec précision. De plus, beaucoup de lots de données ont une couverture géographique limitée (par exemple en raison de l'inclinaison ou l'excentricité de l'orbite) et / ou temporelle (par exemple uniquement lors d'une activité solaire élevée ou faible, ou que pour une saison spécifique). La qualité de DTM aujourd'hui est limitée par un manque des mesures de température et de composition récentes, par la qualité et la distribution souvent éparses des données, et pas (encore) par l'algorithme simplifié.

Les nouvelles données de densité à haute résolution

La situation est quand même bien meilleure qu'au début de l'ère DTM notamment grâce aux missions gravimétriques CHAMP, GRACE et GOCE. Ces missions ont permis la création d'une base de données de densité totale de grande précision et de haute résolution, qui couvrent plus d'un cycle solaire (2000-2017). La première mission, le satellite CHAMP, a été lancé en juillet 2000. Les principaux objectifs de la mission sont la cartographie des champs magnétiques et gravimétriques de la Terre et l'observation de l'ionosphère et de la troposphère. L'un des objectifs secondaires était l'observation de la densité thermosphérique. Le profil de la mission CHAMP est particulièrement intéressant pour les études de la haute atmosphère : il offre une bonne couverture géographique sur une période de dix ans 2000-2010. L'inclinaison de l'orbite à 87° assure une couverture latitudinale presque complète, tandis que l'heure solaire locale est complètement échantillonnée (0-24 heures) environ tous les quatre mois. L'altitude initiale en juillet 2000 était de 454 km. Pendant les dix ans de mission, l'accéléromètre STAR a pris des mesures dans des conditions d'activité solaire allant du maximum (2000-2002) au minimum (2008-09).

La densité atmosphérique est proportionnelle à la traînée atmosphérique et donc à l'accélération mesurée puis étalonnée de STAR. Afin d'isoler la composante de la traînée, les accélérations dues à la pression de radiation (solaire direct, albédo terrestre et IR) doivent être retirées des mesures STAR en utilisant des modèles. L'expression générale de l'accélération de la traînée atmosphérique est la suivante :

$$a_{traînée} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{A}{m} v^2 \quad (1)$$

Dans cette équation, ρ est la densité atmosphérique, C_D est le coefficient aérodynamique, A est la surface perpendiculaire à la vitesse, m est la masse de l'engin spatial, et v est sa vitesse par rapport à l'atmosphère (qui est considérée en co-rotation avec La terre). La mesure accélérométrique, l'orbite, un modèle du satellite et un modèle de coefficient aérodynamique, permettent de calculer la densité atmosphérique (Bruinsma et al., 2003). Les densités des missions GRACE et GOCE ont été calculées de la même façon (strictement parlant, la poussée de la propulsion ionique a été utilisée dans le cas de GOCE). Il y a deux points importants à noter concernant des densités déduites via l'équation (1). Premièrement, la mesure ne donne pas d'information ni sur la composition, ni sur la température. Deuxièmement, des biais peuvent être introduits dans la densité à cause des erreurs d'étalonnage de l'accéléromètre, dans les surfaces ou masses utilisées dans le calcul, mais surtout à cause du modèle de C_D employé.

La quantité, qualité et la répartition des données de ces missions ont permis des améliorations substantielles des modèles DTM. La résolution des observations est typiquement passée d'une mesure par jour avec une précision de 10% avec la base de données de DTM78, à une mesure toutes les 10 secondes (environ 80 km) le long de l'orbite avec une précision de 1-5%. Ces observations précises à haute résolution ont aussi permis de détecter et caractériser des ondes de gravité (Bruinsma et Forbes, 2007 ; 2008) et même des ondes acoustiques après un séisme (Garcia et al., 2014). La base de données des densités de DTM78 contient environ 65000 mesures, sur une période de 12 ans ; CHAMP, GRACE ou GOCE fournissent des millions de mesures par an et permettent une bien meilleure séparation des variations périodiques de longues à courtes périodes (cycle solaire, saisonnières, rotation solaire, diurnes, semi-diurnes), les gradients latitudinaux, ainsi que les couplages entre l'activité solaire et les variations périodiques (e.g. l'amplitude de la variation diurne modulée par F10.7).

Les profils de ces missions gravimétriques sont présentés dans la Figure 2.7.2. Les altitudes inférieures à 500 km semblent relativement bien couvertes sur une période plus longue qu'un cycle solaire. Mais la couverture dans l'espace 3D (altitude, latitude, heure locale) et dans le temps (un cycle solaire au minimum) est en réalité toujours éparse.

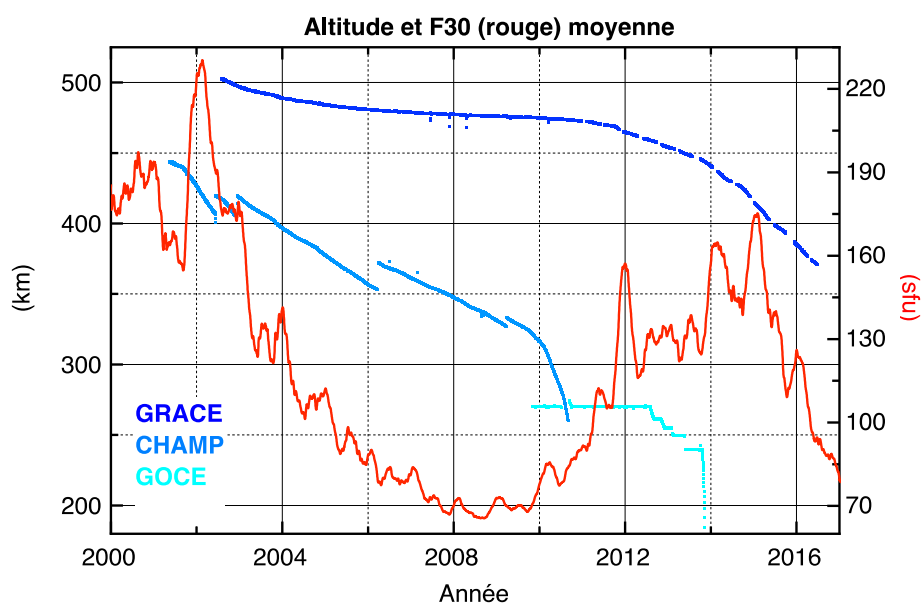


Figure 2.7.2. Les profils d'altitude des missions CHAMP, GRACE et GOCE, et le flux moyen F30.

Les indices solaires et géomagnétiques

La spécification de la haute atmosphère repose fortement sur des proxies solaires capables de reproduire plus ou moins correctement les variations dans les émissions solaires dans l'extrême ultra-violet (EUV). Alors que le flux radiométrique à 10.7 nm (également appelé indice F10.7), observé au Canada, a été usuellement utilisé comme proxy solaire dans les modèles de thermosphère, des mesures spatiales bien plus représentatives des émissions EUV sont disponibles comme l'indice MgII, et surtout l'émission Hell à 30.4 nm dans l'EUV (Dudok de Wit et Bruinsma, 2011). La ligne spectrale Hell offre les meilleures performances globales dans la reconstruction de densité, mais la mesure souffre de sérieux problèmes d'étalonnage. DTM2000 était le premier modèle à utiliser un proxy observé depuis l'espace, le MgII, mais cet indice n'était pas mesuré avec une bonne continuité. Après, des études d'utiliser la mesure de Hell ont été menées puis abandonnées à cause de problèmes de stabilité à long terme des mesures solaires spatiales. L'étalonnage et la dégradation des spectromètres étant problématique, les modèles DTM utilisent des indices mesurés au sol tel F10.7, et à partir de DTM2013, le flux radiométrique à 30 nm (F30 ; Dudok de Wit et al., 2014). La performance de F30 est supérieure à celui de F10.7 nm lorsqu'il s'agit de modéliser la réponse de la haute atmosphère à des échelles de temps de jours et au-delà. La raison est la présence plus forte dans le flux à 30 nm de bremsstrahlung provenant des plages et des facules. Le modèle américain JB2008 utilise entre autres la mesure Hell (appelé S81), après conversion en unités de l'indice F10.7, et la Figure 2.7.3 montre son instabilité après des étalonnages successifs.

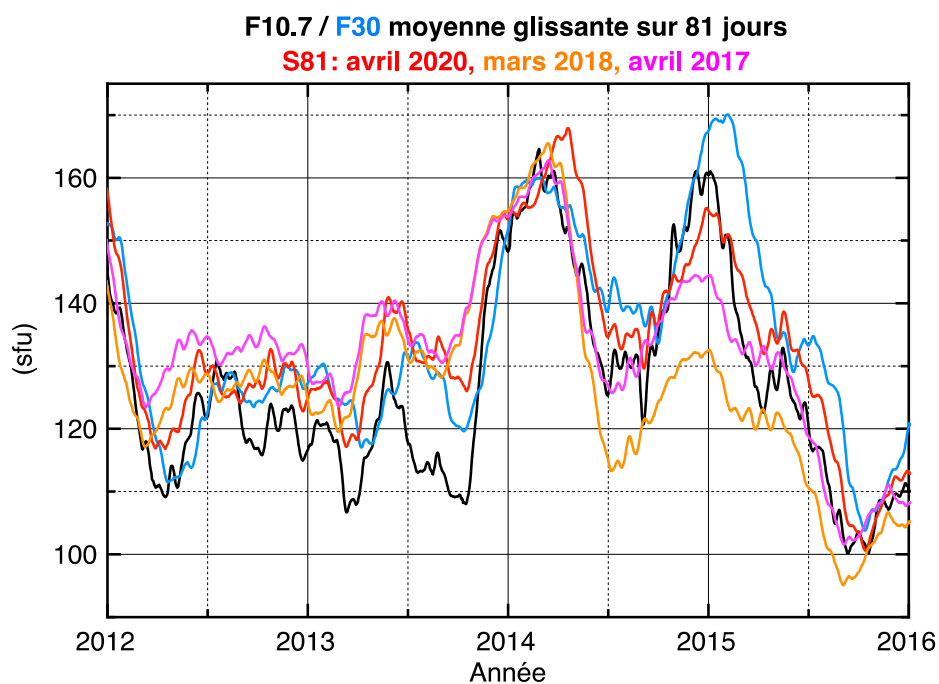


Figure 2.7.3. Les flux moyens radiométriques F10.7 et F30, et trois versions des indices S81 (Hell) du modèle de thermosphère américain JB2008.

Le deuxième proxy concerne les indices pour l'activité géomagnétique, qui sont corrélés avec l'apport énergétique du vent solaire et le chauffage de la thermosphère par l'effet Joule principalement. Les indices tri-horaire Kp ou ap sont utilisés dans tous les modèles DTM excepté la version recherche de DTM2020. Ce dernier utilise un nouvel indice similaire à Kp mais avec une cadence de 1 heure, le Hp60, ce qui permet une meilleure reconstruction de la densité pendant des orages géomagnétiques.

Pour donner une idée du progrès à environ 250/400/475 km d'altitude (i.e. GOCE/CHAMP/SwarmA) dans la modélisation entre la première et la dernière version de DTM, les écarts types sont listés dans le tableau 2.7.1. Les données de densité HASDM (High Accuracy Satellite Drag Model ; Storz et al., 2005), mises à disposition par Space Environment Technologies (<https://spacexw.com>), de 2000-2011 sont indépendantes et valident les résultats de l'ajustement. Cette amélioration est atteinte aussi grâce à l'utilisation des meilleurs indicateurs ('proxies') d'activité solaire dans DTM2020. L'amélioration de DTM2020 comparée à celle de DTM2013 est modeste globalement, car relativement peu de données additionnelles ont été assimilées ; mais ce modèle est considérable plus précis en cas d'orage géomagnétique. En revanche, le grand progrès grâce aux données CHAMP, GRACE et GOCE ainsi que les nouveaux indices est évident. DTM2020 est également la contribution thermosphérique du modèle MCM (Jackson et al., 2020), qui couvre les altitudes 0 à environ 1500 km.

Tableau 2.7.1. L'évolution des modèles DTM et l'amélioration grâce aux nouveaux indices et aux nouvelles données de densité.

	DTM78	DTM94	DTM2013	DTM2020
Indices	F10.7 & Kp	F10.7 & Kp	F30 & Kp	F30 & Hp60
Données assimilées				
CHAMP	-	-	10 ans	10 ans
GRACE	-	-	9 ans	14 ans
GOCE	-	-	2 ans	3.5 ans
Spectromètres sur DE2*	-	T, O, N2 He	T, O, N2, He	T, O, N2, He
Données BD DTM	oui	oui	-	-
Ecart type GOCE	22.1%	15.5%	11.6%	9.5%
Ecart type CHAMP	41.2%	31.6%	20.3%	18.5%
Ecart type SwarmA	32.9%	26.8%	22.0%	19.2%
Ecart type HASDM 250 km	25.8%	18.1%	13.1%	12.6%
Ecart type HASDM 400 km	46.9%	34.9%	19.1%	17.7%
Ecart type HASDM 475 km	57.1%	44.9%	23.5%	22.5%

* Dynamics Explorer 2 ; satellite de la NASA

2.8 Missions astrométriques (Hipparcos, Gaia)

I - Présentation

Avec la création du GRGS en 1970, puis celle du CERGA en 1974 un vent nouveau soufflait sur l'astronomie fondamentale et la géodésie spatiale naissante. Dans le cas de l'astrométrie son image avait alors beaucoup souffert de l'interminable entreprise de la Carte du Ciel et surtout des succès accumulés par l'astrophysique, qui par contraste renforçait l'aspect un peu poussiéreux et dépassé de l'astronomie classique. Mais les performances de l'astrométrie n'étaient pas limitées par la sensibilité, donc la taille des télescopes, mais bien plus par la stabilité mécanique, la correction des effets atmosphériques, les étalonnages de plaques, etc. Il y avait donc fort à faire pour revitaliser le domaine et le rendre attirant pour de nouveaux jeunes chercheurs.

II - Hipparcos

C'est dans ce contexte favorable que fut remise à l'honneur une idée émise en 1967 par P. Lacroute (1906-1993), à l'époque directeur de l'Observatoire de Strasbourg, de placer en dehors de l'atmosphère un petit télescope spatial destiné à la mesure précise de la position et du mouvement des étoiles. Le principe était totalement nouveau pour les astrométristes avec une observation simultanée dans deux directions pour mesurer des distances angulaires plus larges que dans le champ d'un instrument classique. Le CNES évalua positivement l'idée, qui n'eut pas de suite immédiate en raison des coûts, de l'aspect un peu isolé de la proposition par rapport à la communauté concernée, et probablement aussi de sa trop grande nouveauté. Cependant les bonnes idées ne meurent jamais totalement et la vision de P. Lacroute va revivre autour de 1980 avec l'agence spatiale européenne et la communauté astronomique. Cela aboutira à l'approbation, quasi miraculeuse, du projet Hipparcos proposé par les astrométristes mais soutenu par une large communauté astrophysique consciente de l'apport des mesures fondamentales de distances pour la physique des étoiles et de celles des mouvements pour l'étude de la structure de la Galaxie. Dans cette phase, et pour se limiter à la France, des personnalités comme Jean Delay, Pierre Bacchus et Jean Kovalevsky ont eu une place éminente pour mobiliser la communauté française et européenne autour de ce projet et ont fortement contribué à sa sélection par l'ESA.

La mission avait pour objectif de réaliser une cartographie de très haute précision de la sphère céleste en observant environ 120 000 étoiles soigneusement sélectionnées et bien distribuées sur le ciel avec une précision en position de $0.002''$. Outre les positions, la parallaxe des étoiles du programme devait être obtenue avec cette même qualité et constituait le résultat le plus attendu par l'ensemble des astronomes en raison de l'importance de ce paramètre dans les théories d'évolution stellaire et pour la compréhension de l'histoire de l'Univers. Il faut ajouter qu'au début des années 1980, le nombre de parallaxes raisonnablement mesurées par la méthode trigonométrique plafonnait autour de 5000.

Le satellite Hipparcos était équipé d'un télescope de taille très modeste, 29 cm de diamètre, ce qui permettait néanmoins d'observer des étoiles jusqu'à la magnitude 12.5. Les étoiles

étaient observées simultanément dans deux directions, distantes de 58 degrés (angle de base) l'une de l'autre, et leurs images se formaient au plan focal de l'instrument sur une grille d'analyse composée de 2 688 fentes de période 1.208". Le champ sur le ciel était de 0.9° x 0.9°. L'angle de base réalisé par un prisme jouait le rôle d'étalon angulaire et sa stabilité était essentielle.

Hipparcos était un satellite à balayage dont la mission d'observation avait été entièrement planifiée et optimisée avant le lancement. L'exploration de la sphère céleste s'est effectuée selon une loi calculée pour assurer une couverture complète du ciel et traquer les 120 000 étoiles du programme, à raison d'une trentaine d'époques différentes par étoile. Du fait de la rotation du satellite les images stellaires se déplaçaient sur la grille d'analyse permettant de moduler la lumière reçue par le détecteur placé juste derrière cette grille. Tout cela se passait avant l'utilisation des CCD dans l'espace et le détecteur avait fondamentalement le rendement d'une conversion photoélectrique.

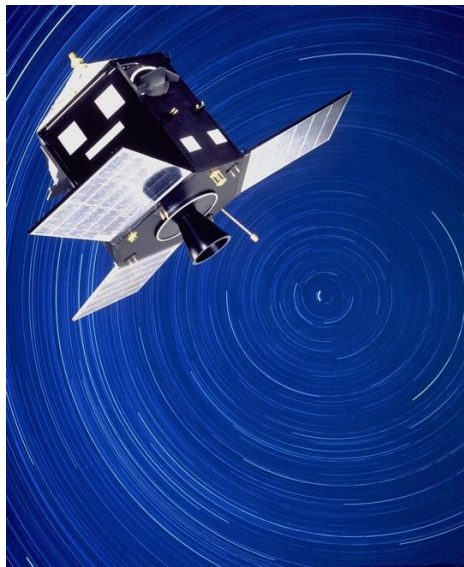


Figure 1. Vue d'artiste du satellite Hipparcos. Crédit ESA.

La sélection des étoiles a elle-même constitué un vaste travail coopératif au sein du consortium européen INCA dirigé par C. Turon à l'Observatoire de Paris-Meudon. Cette sélection répondait à de nombreux critères scientifiques et à de fortes contraintes provenant de l'instrument et du balayage du ciel. Hipparcos ne pouvait mesurer qu'une étoile à la fois parmi celles présentes dans le champ combiné des deux directions. Aujourd'hui ce travail d'optimisation se ferait sans difficulté sur un ordinateur portable bas de gamme, mais en 1985-90 cela a représenté un défi informatique conséquent avec beaucoup d'empirisme pour définir et pondérer les bons facteurs de mérites.

La réalisation du catalogue d'entrée avait déjà permis de mener à bien une mise à jour et une homogénéisation de l'information provenant de multiples catalogues de taille et d'origines très variées, tant pour les données astrométriques (positions, mouvements propres, vitesses radiales) que photométriques. Un travail considérable pour ce consortium pour un catalogue dont l'obsolescence était programmée dans quelques années.

III - La mission et les résultats

Le satellite Hipparcos a été lancé par la fusée Ariane IV le 8 août 1989 depuis la base de Kourou. A la suite d'une défaillance du moteur d'apogée, il fut impossible de placer le satellite sur l'orbite circulaire géostationnaire de 42 000 km de rayon à partir de laquelle devait se dérouler la mission. Le sentiment qui prévalait alors était celui d'un échec total et qu'au mieux on ne pourrait qu'effectuer quelques semaines d'observation avec une charge utile qui n'avait pas été conçue pour traverser deux fois par jour les ceintures de van Allen et leur particules létales pour une électronique de bord non protégée.

Une mission adaptée à ce nouvel environnement fut redéfinie en quelques semaines et le satellite a très correctement fonctionné jusqu'au 15 août 1993, jour où les responsables de la mission au centre de contrôle de l'ESA à Darmstadt décidèrent l'arrêt des opérations à la suite d'avaries répétées du système de guidage et de l'ordinateur de bord.

C'est le second miracle d'Hipparcos après les péripéties de sa sélection : le lancement catastrophique en 1989 n'a pas empêché le succès complet de la mission et l'écriture d'une nouvelle page de l'astrométrie avec un gain de près de deux autres de grandeurs (après le retraitement des données par F. van Leeuwen à l'Université de Cambridge) par rapport à l'astrométrie de référence au sol. Aucune révolution technologique comparable n'a jamais eu lieu en astrométrie pendant les deux millénaires précédents : les progrès ont toujours été lents et ni l'avènement de la lunette et son adaptation aux visées précises quelques décennies plus tard, ni l'intervention de la plaque photographique deux siècles plus tard, n'ont conduit à un saut dans la précision comparable à celui réalisé avec Hipparcos, et répété 25 ans après par Gaia. Si ces progrès ont permis des avancées importantes, par exemple sur la complétude de l'exploration et la productivité, leur impact sur la précision a été modéré.

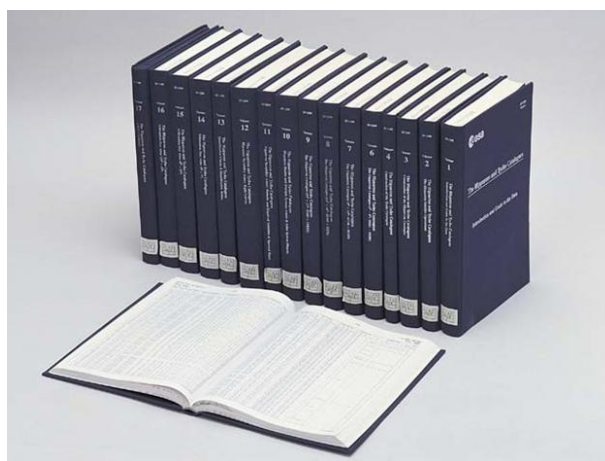


Figure 3. Le catalogue Hipparcos dans sa version papier : 17 volumes pour un total de 8000 pages d'explications, de tables et de figures.

L'image surannée de l'astrométrie a disparu avec le succès et les retombées d'Hipparcos en physique stellaire et galactique, concrétisées à court terme par un nombre important de publications et couronnées plus tard par la sélection de Gaia, grandement facilitée par ce

succès planétaire de la première mission spatiale entièrement consacrée à l'astrométrie. p astronomie touche pratiquement tous les secteurs du monde des étoiles et même la physique fondamentale s'intéresse à l'astrométrie pour les tests de la théorie de la relativité générale comme elle l'avait fait en 1919 pour mettre en évidence la déflexion des rayons lumineux prévue par la théorie d'Einstein.

La France et ses institutions scientifiques ont été étroitement associées à ce succès avec une implication très forte du CNES dans les opérations de traitement (un modèle de coopération avec une grande agence qui n'a pas pour vocation première l'exploitation scientifique), le CNRS au travers de ses laboratoires et d'un GDR (Groupement de Recherche) qui soutiendra les équipes pendant près de 15 ans, l'INSU et le CDS (Centre des Données Stellaires, devenu par la suite le Centre des Données Astronomiques) créée par J. Delhaye en 1972 indispensable pour la préparation du catalogue d'entrée et la distribution des résultats à la communauté internationale. Sans être un programme du GRGS, les équipes participantes, en particulier au CERGA, avait un lien étroit avec les groupes de la géodésie spatiale et la solution astrométrique globale, la rigidité de la sphère, le défaut de rang dans la solution étaient des concepts plus familiers aux géodésiens qu'aux astronomes. Le rattachement de la solution aux sources radios du futur ICRF a nécessité un programme spécial impliquant le GRGS.

Même en regard des catalogues stellaires du début de la fin du XIXe siècle, Hipparcos avec ses 100 000 étoiles est un petit catalogue et ce fait peut interpeller au premier abord. L'objectif n'était pas ici l'inventaire, mais la réalisation d'une référence, ce que les astronomes appellent un catalogue fondamental. Au XIXe siècle ces catalogues très particuliers comportaient quelques dizaines d'étoiles et il fallait pratiquement une vie d'astronome pour les réaliser au moyen d'observations conjointes et répétées des étoiles et du Soleil. Déjà le contraste numérique avec les grands inventaires de l'époque était frappant.

Sur une plaque photographique il suffit d'avoir quelques étoiles de référence dont la position est connue avec une bonne précision pour ensuite pouvoir rattacher des étoiles secondaires et obtenir leurs positions. Mais il faut bien que quelqu'un utilise une technique différente pour obtenir la position de ces étoiles de référence. C'est le rôle des catalogues fondamentaux qui vont ensuite servir de jalons pour repérer tous les autres objets astronomiques : les autres étoiles, les galaxies, les planètes mais aussi étudier la rotation de la Terre et même la dérive des continents. Ces catalogues sont à peu près pour l'astronomie ce que sont les étalons ou les réalisations primaires des unités pour la physique de laboratoire. Lors du lancement d'HIPPARCOS, le catalogue fondamental en vigueur, officiellement approuvé par l'Union Astronomique Internationale n'avait que 1500 sources, toutes brillantes. Hipparcos ambitionnait de produire un catalogue fondamental comprenant près de cent fois plus de sources de référence que son prédécesseur immédiat, à partir duquel on a produit de nombreux catalogues secondaires qui y sont rattachés.

IV - Résultats globaux et conséquences

A la fin du traitement on possédait une solution astrométrique donnant la position, la parallaxe et les deux composantes du mouvement propre de chaque Etoile du programme. Environ 20 000 sources ont été détectées comme systèmes multiples et on fait l'objet d'un traitement complémentaire pour résoudre les composantes lorsque cela était possible. La précision finale pour une Etoile de magnitude 8.5 du Catalogue Hipparcos était de 0.001" sur

les positions (Fig. 2) et la parallaxe, et 0.001'' par an sur les mouvements propres. LA dégradation était environ d'un facteur deux pour les étoiles de magnitude 11. Le Catalogue a été publié par l'ESA en 1997 avec toutes ses annexes relatives aux systèmes multiples et à la photométrie. Simultanément le Catalogue Tycho, et un peu plus tard, Tycho-2 sont venus parachever la mission avec une référence de 2 millions d'étoiles, pratiquement complet à la magnitude 12.5 et dont les mouvements propres ont pu être obtenus avec les positions du Catalogue astrographique de la Carte du Ciel. La boucle était bouclée !

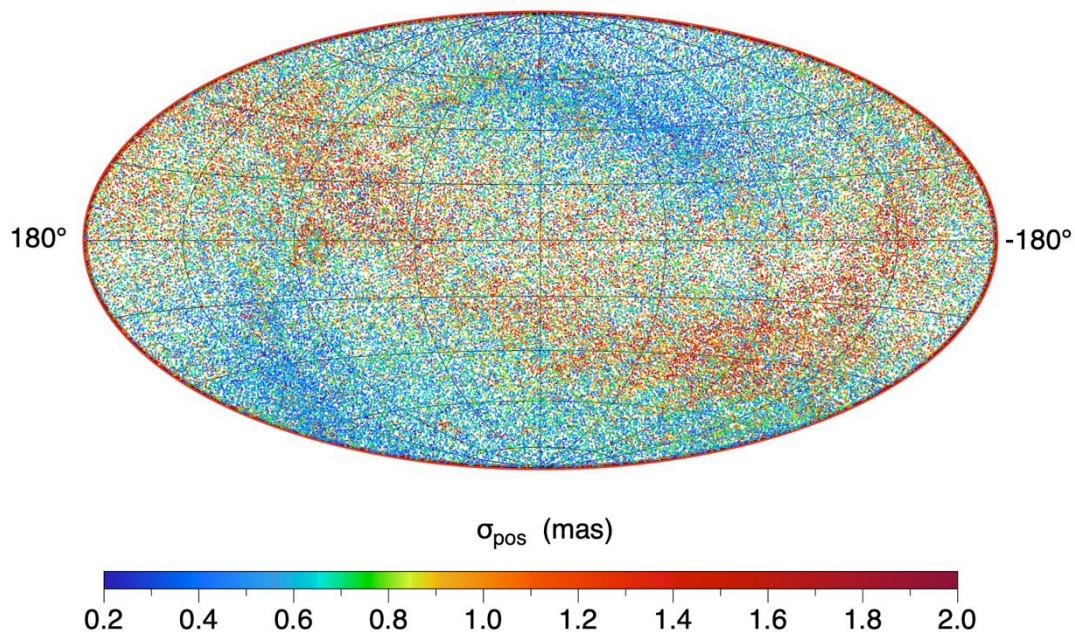


Figure 2. Précision astrométrique en position du Catalogue Hipparcos à l'époque 1991.25. Carte en coordonnées équatoriales avec la marque bien nette du plan de l'écliptique, montrant les systématismes dus à la loi de balayage.

Maitrisant une nouvelle technique pour réaliser de l'astrométrie globale (observation de grands angles sur l'ensemble du ciel par opposition aux cheminements successifs de l'astrométrie relative dans des petits champs) et conscient de son rôle fondateur pour l'ensemble de l'astrophysique, les astronomes se sont unis autour d'un nouveau projet spatial avec l'agence spatiale européenne. Trois ans après la publication du Catalogue Hipparcos, l'ESA retenait la mission Gaia comme Pierre Angulaire de son programme scientifique, pour un lancement à la fin de 2011. Il aura lieu en décembre 2013, deux ans que l'on ne peut pas qualifier de retard pour un programme spatial et un calendrier prévisionnel établi avant la fin des études. On est dans l'exception bien plus que dans la norme pour des projets comparables, que ce soit au sol ou dans l'espace. Le CNES et les équipes françaises sont toujours très présentes, et si le GRGS n'est pas formellement impliqué, les retombées de la mission le concerne du fait de l'impact de Gaia sur le système de référence céleste, les exigences qu'il a mis sur les éphémérides du système solaire et les besoins sans précédent en matière de restitution de l'orbite d'une sonde spatiale à grande distance.

3. Contributions aux projets de coopération internationale

bi- ou multi-latérale

3.1 Laser satellite et lunaire, ILRS

La télémétrie laser est la seule technique spatiale à porteur optique (à 532 nm) ; elle est a priori exacte et l'observable est extrêmement simple à mettre en œuvre dans les logiciels. Les corrections à apporter aux mesures (calibration instrumentale, propagation troposphérique et relativité générale) sont très bien connues. La télémétrie laser apporte une information essentielle au champ de gravité à grandes longueurs d'onde, au positionnement géocentrique absolu, à la Calibration & Validation des orbites des satellites altimétriques (Exertier et al., 2006) et plus récemment à la validation des orbites MEO (satellites GNSS). En outre, grâce à une très longue série temporelle de mesures acquises sur les réflecteurs lunaires, américains (Apollo) et russes (Lunokhod), la télémétrie laser Lune ouvre une porte sur la physique fondamentale (Principe d'Equivalence) et sur la Sélénodésie (rotation et structure interne). Enfin, le laser a démontré aussi une capacité à synchroniser des horloges distantes au sol, via un oscillateur spatial (OUS DORIS), au niveau de 0.1 nanoseconde en vue commune (T2L2). Le futur projet ACES/Pharao prévu sur la station spatiale internationale utilisera également le laser avec l'objectif d'atteindre maintenant quelques picosecondes sur des distances intercontinentales.

Le laser en France

Les instruments de télémétrie laser, mis en opération au CERGA au cours des années 1980, ont pour mission de contribuer à l'Observation de la Terre ainsi qu'à l'étude du système Terre-Lune (Pearlman et al., 2019a). L'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), sous l'impulsion de J. Kovalevsky, F. Barlier et collègues a développé deux instruments. Un télescope de 1.54m dédié aux observations de la Lune et un télescope de 1m (rénové par l'ONERA, années 1990) dédié aux satellites artificiels dont LAGEOS (1976) et Starlette (1975) pour la géodésie et aux satellites océanographiques dont TOPEX/Poseidon (1992) (Pearlman et al., 2019b). Les deux télémètres laser ont suivi une évolution technologique assez parallèle pour aboutir vers 1995 à une précision de mesure de quelques mm, notamment en utilisant de nouveaux détecteurs « simple photon » côté laser Lune, ou à diode compensée côté laser satellites. L'infrastructure géodésique locale, permettant notamment l'étalonnage des instruments de télémétrie laser sur cibles externes, a été pris en charge par l'IGN (service de Géodésie). Entre 2005 et 2008, le laboratoire GEMINI de l'OCA (dirigé par P. Exertier et D. Mourard) en charge de l'exploitation et du développement des deux instruments laser devenus trop lourds à porter, a fusionné les deux programmes d'observation sur un seul télescope, le télémètre laser MeO de 1,54m. Une opération de rénovation très importante (bâtiment, coupoles, laboratoires et télescope), appelée T2000 et soutenue par la Région PACA, l'INSU, le CNES et l'OCA a permis de relancer une activité de recherche technologique devenue nécessaire eu égard aux nouveaux enjeux scientifiques (objectifs du Global Geodetic Observing System, GGOS) et aux applications potentielles (transfert de temps, GNSS, débris spatiaux, télécommunications optiques).

Cette évolution a été décrite dans le cadre de la publication « le GRGS, 50 ans de contributions aux missions spatiales et à la coopération internationale ».

Le service international laser

La participation de la France à l'*International Laser Ranging Service* (ILRS, <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/>) (Pearlman et al., 2019c), placé sous l'égide de l'AIG (<https://www.iag-aig.org>), a débuté en 2008 à l'OCA sous la forme d'un Service National d'Observation (SNO) souhaité par l'INSU/CNRS. Ce Service comprend plusieurs tâches (observations et analyses), dont :

- Le fonctionnement de la station de télémétrie laser MeO conduit par E. Samain (IR CNRS), puis par C. Courde (id) et enfin J. Chabé (Astronome-Adjt) à partir de 2015 (Chabé et al., 2020).
- L'analyse des données laser satellites conduite par F. Deleflie (CNAP) (Deleflie et al., 2013) à partir de 2005.
La mise en place dans les analyses globales menées pour l'ITRF/IERS, d'une estimation des biais en distance de chaque instrument/station, qui a abouti dans les solutions de 2020 à un facteur d'échelle cohérent entre les techniques laser et VLBI à ± 1 mm (travaux de Altamimi et al.).
- L'analyse des données laser Lune conduite par S. Bouquillon (SYRTE, Observatoire de Paris, OP) et dont l'IMCCE a aussi largement contribué à travers le développement de l'éphéméride numérique planétaire INPOP (Fienga et al., 2016).
- Le transfert de temps optique T2L2 sur Jason-2 a été développé comme un Service d'Observation labellisé par l'INSU/CNRS pendant toute la période 2008-2017, pour le compte de 35 stations laser participantes.

La contribution de l'OCA à la télémétrie laser Lune est unique dans le monde du fait de sa production pratiquement ininterrompue depuis plus de 35 ans (elle représente plus de 50% des données mondiales en volume). Sa technologie a toujours évolué jusqu'à aboutir à l'ajout d'une voie Infra-Rouge (à 1032 nm) en 2015 (Martinot-Lagarde et al., 2016), ce qui a révolutionné la manière d'observer la Lune. Le Service POLAC de l'Observatoire de Paris a parfaitement joué le jeu des prévisions (éphémérides), de l'analyse et du contrôle des données avant leur envoi dans les banques de données internationales (EDC en Europe et CDDIS aux Etats-Unis). Ont été démontrées une bien meilleure répartition des mesures de télémétrie sur le cycle mensuel complet de la Lune, ainsi qu'une acquisition bien plus large spatialement avec l'utilisation de tous les réflecteurs laser disponibles, les trois Apollo et les deux Lunokhod (Courde et al., 2017). De nombreux articles scientifiques et technologiques ont permis de valoriser ces investissements, notamment sur la structure interne de la Lune (voir les solutions v17 de INPOP, Fienga & Visvanathan).

Enfin, d'autres types de contributions du laser ont fait l'objet de recherches et d'investissements à partir du télescope MeO et des laboratoires afférents (Exertier et al., 2017 ; 2019). Les travaux menés autour du système de transfert de temps spatial T2L2 ont permis d'atteindre un transfert de temps sol-sol en vue commune de 138 ps d'exactitude, qui n'a jamais été dépassé depuis (Exertier et al. 2016). Des tirs laser (en Infra-Rouge et dans le vert) ont été menés avec succès sur la sonde américaine LRO autour de la Lune (Mazarico et

al., 2020). Enfin, la mise en place d'instruments de sondage de la qualité de l'atmosphère permet de mener des études sur l'amélioration de l'exactitude de mesure.

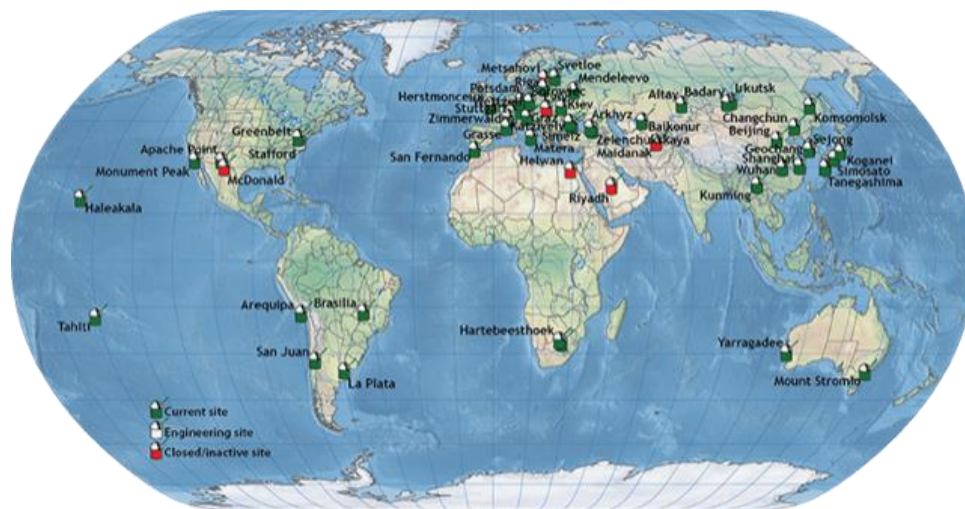


Figure 2. Réseau laser mondial; site web <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>

La contribution de l'OCA à la télémétrie laser satellites a été continue dans le temps. Avec les recommandations de l'ILRS faites au plan international depuis 1998, les satellites LAGEOS (6000 km) et Etalon (19400 km) sont devenus prioritaires afin d'établir les solutions du repère de référence terrestre ITRF (mouvement du géocentre et facteur d'échelle), du mouvement du pôle et de la durée du jour (IERS) ; les séries de données (en fait, les matrices normales calculées par les Centres d'Analyses toutes les semaines) utilisées couvrent deux périodes de 1983 à 1993 et de 1993 à 2015 pour la solution ITRF2014 (Altamimi et al., 2016), soit 1147 semaines pour la seconde période. Cette contribution est aujourd'hui au niveau de précision de 9-11-8 mm pour les composantes Est-Nord-Alt des stations, comparé à 2-2-6 pour le GNSS et 4-4-11 pour le VLBI. Rappelons que la télémétrie laser est la seule technique de détermination de l'origine du repère dont la stabilité, hors effets annuels, est de l'ordre de 1.6-1.9-2.4 mm selon les axes X-Y-Z (Appleby et al., 2016) & (Couhert et al., 2020).

Il faut noter en outre, et plus récemment, une importante contribution de la télémétrie laser de l'OCA sur la constellation des satellites GALILEO qui s'est faite en collaboration avec l'Observatoire de Paris et l'ESA (plusieurs campagnes depuis 2015) (Bury et al., 2019). Concernant ces dernières données, le CNES joue également un rôle important puisqu'il est lui-même investi dans le service international IGS (F. Perosanz) et qu'il est donc moteur dans l'utilisation des données laser pour améliorer les solutions d'orbite GALILEO (travaux de Couhert et al.).

L'évolution du laser

Compte tenu du vieillissement du parc mondial des stations laser, des projets de nouvelle génération de station laser ont vu le jour depuis quelques années. La NASA joue un rôle important, puis la Chine l'Europe et enfin la Russie, ceci dans l'objectif d'améliorer la couverture mondiale, la qualité des sites géodésiques et les technologies utilisées (Boucher et al., 2015). Il s'agit essentiellement du développement de la haute cadence, soit à 1-2 kHz, afin d'atteindre une précision de mesure de distance sub-millimétrique (Wilkinson et al.,

2019). La recherche d'une meilleure exactitude de la mesure mais surtout d'une grande stabilité sur le long terme de l'ensemble des équipements, autour de 1-2 mm sur plusieurs années, est aussi une grande priorité (Appleby et al., 2016 ; Altamimi et al., 2016 ; Pearlman et al., 2019c) ; l'utilisation d'un télémètre laser à deux couleurs, plus complexe à mettre en œuvre mais pourtant essentielle pour réduire les effets de la propagation troposphérique, continue d'être étudiée (Courde et al., 2017 ; Chabé et al., 2020).

Quelle est le rôle et le futur de la télémétrie laser, en termes de Géodésie ?

La communauté de géodésie s'appuie très fortement sur les constellations de satellites de navigation (GNSS), et sur des récepteurs au sol compatibles GPS-GLONASS-Galileo extrêmement nombreux et dont le coût reste accessible. Les applications en géophysique (déformations, surcharges, aléas et risques, etc.) ainsi qu'en océanographie (niveau des mers, courants, tsunamis, etc.) parviennent ainsi à étudier les phénomènes régionaux et globaux, d'origine naturelle ou anthropique, au niveau de 0.1-0.2 mm/an en termes de vitesses linéaires horizontales et de 0.2-0.3 mm/an verticalement. Mais le calcul des références terrestres fondamentales (facteur d'échelle du repère, géocentre, bas degré du champ, orientation de l'axe de rotation) n'atteint pas encore 1 mm d'exactitude et 0.1 mm/an de stabilité sur 10 ans voire plus, comme il est recommandé par les instances scientifiques (GGOS), ce qui est une source d'incertitude pour l'étude des effets du changement climatique et ses conséquences (Messignac et al., 2019). En outre, la constante de gravitation GM de la Terre n'est connue qu'à 2 ppb (10^{-9}) près Terre (Ries et al., 1992). La télémétrie laser, grâce au Service international ILRS, doit donc absolument progresser, à la fois au plan stratégique (nouveaux sites, nouvelles campagnes, etc.), au plan technologique (laser haute cadence et deux couleurs en test à l'OCA) ainsi qu'au plan de la réduction des données (services d'Observations).

En septembre 2021, les russes ont fait une nouvelle proposition de lancement de satellites géodésiques en couples à 2000 km (BLITS-M2) et à 5000 km (GLASS). Ceux-ci viennent s'ajouter au satellite Larets (lancé en 2003) ainsi qu'au projet du second satellite italien Lares-2. Dans tous ces cas, l'idée est de rendre les mesures laser sur ces cibles insensibles à la signature (correction optique) des différentes technologies utilisées dans les stations du réseau international. Mais pour les analystes, il faut requérir à des orbites d'altitudes très différentes, et surtout prendre en compte toute la constellation des satellites géodésiques, plutôt que le seul couple LAGEOS-Etalon largement utilisé pour l'ITRF/ IERS. Bien entendu, la contrepartie est qu'il faudra acquérir des mesures en nombre suffisant sur chaque cible, ce qui provoquera inévitablement des problèmes de suivi pour les stations laser non automatisées. En outre, le laser étant un outil essentiel pour valider, mais aussi faire progresser, les orbites des satellites de navigation, la situation pourra devenir critique si une stratégie de réseau n'est pas mise en place. Les membres de l'ILRS (représentés par Toshimichi Otsubo et Erricos Pavlis) réfléchissent à la mise en place de simulations convaincantes pour déterminer à terme ces stratégies (calculs et observations).

En regard de la nécessité de pratiquer des simulations, pour de nouvelles missions en particulier, les équipes mixtes de géodésie CNES-IGN-Observatoires ont choisi d'analyser toutes les données laser existantes entre 2000 et 2020. Il faut citer ici les travaux de *Coulot et al.* à l'IGN ainsi que de *Couhert et al.* au CNES, avec l'aide des services de CNES/CLS sur les techniques GNSS et DORIS.

3.2 Doppler, TRAPOL, MEDOC, DORIS et IDS

Mesures Doppler sur satellites

Cette technique est l'une des plus anciennes, si ce n'est la plus ancienne des méthodes de mesure de géodésie spatiale, car son principe remonte au lancement du premier satellite artificiel terrestre en 1957, le satellite russe Spoutnik-1. C'est en effet en recevant le signal radio émis par ce satellite, qu'une équipe américaine de la John Hopkins University eut l'idée d'en mesurer l'effet Doppler créé par la variation de distance satellite-récepteur et d'utiliser ces mesures pour déterminer l'orbite du satellite.

C'est ainsi que le satellite français DIAPASON (D1A) lancé en 1966 embarqua un oscillateur générateur d'ondes radio dont des récepteurs au sol fabriqués par la société SAT purent mesurer l'effet Doppler. Deux stations furent ainsi déployées à Nice et à Beyrouth. L'année suivante vit la réalisation et le lancement de deux autres satellites DIADÈME (D1C et D1D) embarquant de nouveau un émetteur radio, ainsi que des réflecteurs laser (voir par exemple Barlier et Boucher, 2021).

Le CNES imagina alors que la mesure Doppler effectuée au sol à partir d'une émission à bord d'un satellite pouvait être inversée, permettant ainsi une collecte des données centralisée à bord du satellite, en évitant les contraintes d'une collecte à chaque station du réseau sol. Ceci fut mis en œuvre pour le satellite PEOLE en 1970, qui validait les technologies utilisées par EOLE lancé en 1971, qui avait pour objectif de localiser un ensemble de ballons atmosphériques.

Au niveau international, ce fut le développement par la Marine américaine du système de navigation Transit qui rendit accessible cette technologie au monde civil, après sa déclassification en 1967. A côté du système Transit ou Navy Navigation Satellite System (NNSS) opérationnel, un réseau mondial de poursuite de ces satellites fut également déployé par la Marine américaine, le réseau TRANET, et exploité par le Naval Weapons Laboratory (NWL).

La SAT adapta ainsi ses récepteurs à ce nouveau système qui participèrent à la campagne Trapol qui visait spécifiquement la détermination du mouvement du pôle par cette méthode. Cette campagne fut la première implication du GRGS récemment créé, et se déroula d'avril à mai 1972, incluant les stations de Brest, Brétigny, Caussols et Paris.

Le but principal de cette expérience était d'étudier ce qui pouvait être obtenu concernant le mouvement du pôle de la Terre en utilisant des observations Doppler d'un satellite artificiel à partir d'une station et des éphémérides précises du satellite fournies par le NWL.

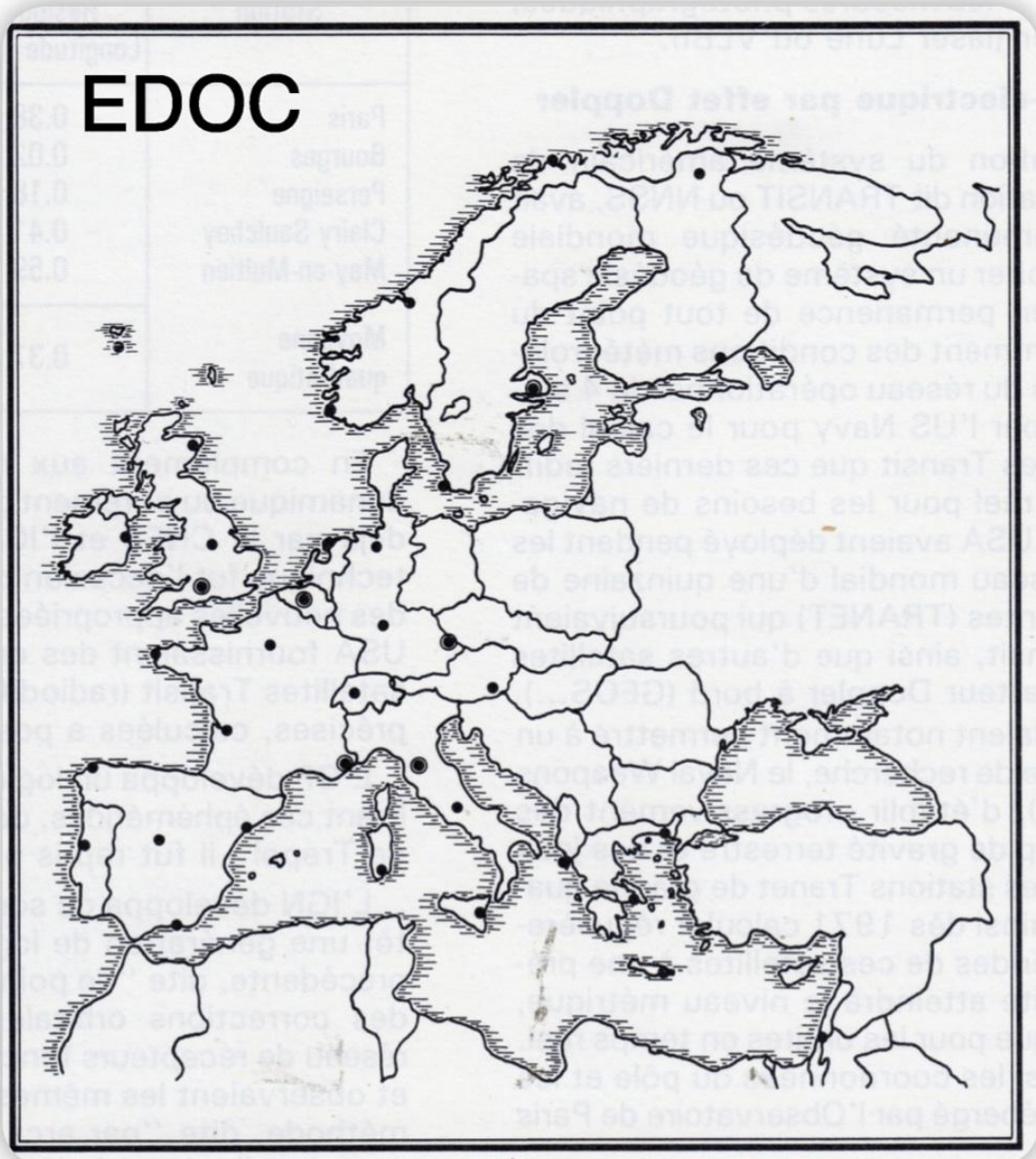
Trois stations françaises ont observé régulièrement le satellite Transit 1967-92A pendant cette expérience, mais, pour des raisons techniques connues, seule la station de Brétigny a obtenu des résultats de bonne qualité et nous donnons seulement un résumé de la méthode utilisée et des résultats obtenus.

Après cette expérience préliminaire, des améliorations ont été faites dans le mode d'observations et dans les calculs. Les résultats obtenus par l'expérience TRAPOL ont poussé à l'installation d'une station Doppler permanente au CERGA. Celle-ci a été exploitée avec succès par le CERGA pour des déterminations de latitude et de longitude, en utilisant le programme de traitement mis en place pour l'expérience TRAPOL. Cela a permis d'obtenir, sur une base régulière, des résultats de même qualité que les meilleurs résultats obtenus dans le cadre de l'expérience TRAPOL. Diverses analyses comparatives de ces résultats avec ceux du BIH (Bureau International de l'Heure) et du DPMS (Dahlgren Polar Monitoring System) ont été menés, ainsi qu'avec les résultats des observations par l'astrolabe de Danjon du CERGA. Les insuffisances techniques de cette station Doppler ont conduit à l'abandon des mesures en Janvier 1976. Une nouvelle station plus moderne a été installée par la suite et exploitée avec succès par le CERGA pour des déterminations de latitude et de longitude.

Mais c'est en 1974 qu'une évolution profonde survient par l'acquisition par l'IGN de premiers récepteurs compacts de réception des signaux des satellites Transit (6 récepteurs JMR-1). Le GRGS fit l'année suivante l'acquisition de 2 autres récepteurs.

Les campagnes EDOC, auxquelles le GRGS participa, furent organisées au niveau européen dans le cadre des Journées luxembourgeoises de géodynamique et marquèrent le début de décennies de coopérations en géodésie spatiale Doppler via l'organisation de campagnes ou le déploiement de réseaux permanents. EDOC-1 organisé en 1975 comportait 7 stations, puis EDOC-2 en 1977 avec 36 stations, traitées par 3 centres d'analyse (IFAG, IGN et ORB) (voir carte)

En 1976, l'IGN organisa, dans le cadre du GRGS, une campagne internationale LESARD, avec la participation de l'Espagne



Campagnes EDOC

A côté de l'organisation de campagnes, la maîtrise d'une analyse globale de ces mesures par méthode dynamique fut un objectif du GRGS. C'est ainsi que quelques années plus tard, le GRGS organisa le réseau mondial MEDOC de stations Doppler sur satellites Transit.



Réseau mondial MEDOC

DORIS

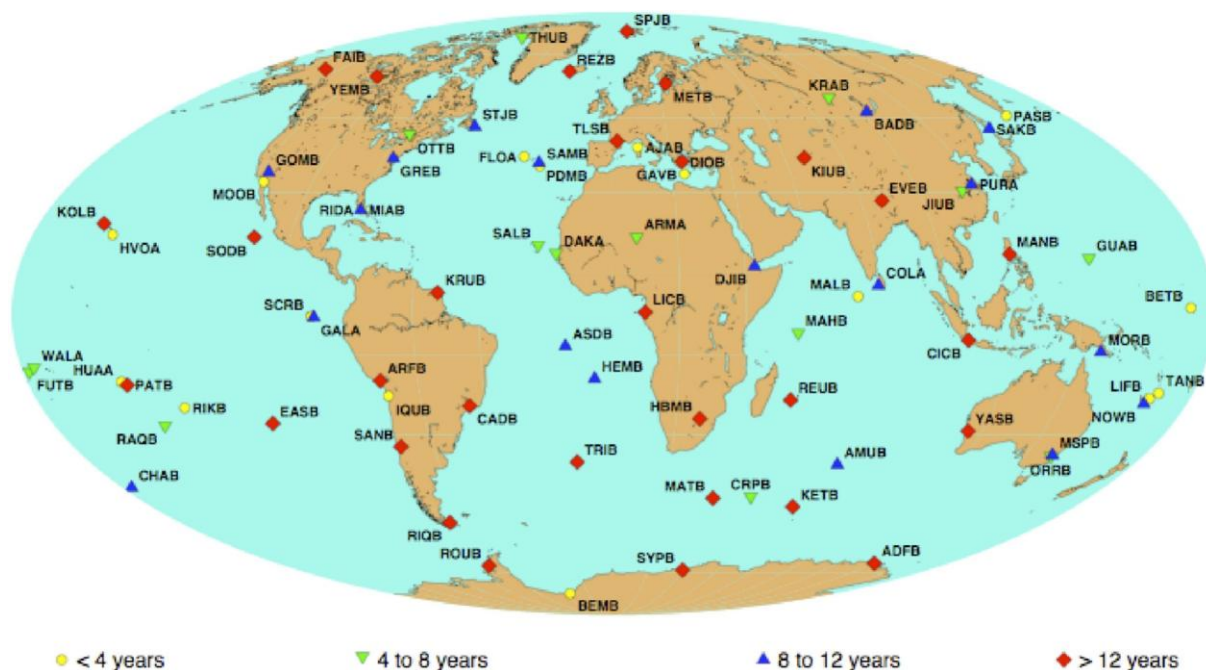
L'émergence du système DORIS au CNES a été décrite au paragraphe 2-3

Ce système d'orbitographie précise et robuste est composé d'un récepteur embarqué sur satellite et d'un réseau sol mondial de balises émettrices d'une paire d'ondes radio à 400 MHz et 2 GHz. Le système fut initialement embarqué sur le satellite d'observation de la Terre SPOT-2 lancé en 1990 pour évaluation, avant son embarquement sur TOPEX lancé en 1992.

DORIS est aujourd'hui utilisé à bord de très nombreux satellites, notamment dans le domaine de l'altimétrie et de l'océanographie spatiale. Il est aussi utilisé dans l'établissement du Système de référence terrestre (l'ITRS) dans le cadre de l'IDS (International DORIS Service) et dans le cadre de l'IERS (service international de la détermination des paramètres de la rotation

terrestre). Le service international de système de navigation autonome DIODE permettant au satellite de connaître sa position du satellite de par lui-même avec grande précision est une application majeure sur le plan opérationnel. Un document de mise à jour de la situation du système DORIS et des contributions françaises et internationales sera ainsi nécessaire et hautement bienvenu.

Un important à noter fut le déploiement d'un réseau mondial de balises, réalisé avec succès par l'IGN en partenariat avec le CNES.



La participation explicite du GRGS au développement de DORIS, à côté du CNES et de l'IGN, fut initialement le développement de champs de potentiel spécialisés. (voir chapitre ad hoc). Dans un second temps le GRGS soutint le développement de deux centres d'analyse de mesures DORIS, à savoir celui du CNES avec GINS, animé par Anny Cazenave, et celui de l'IGN avec GIPSY dans le cadre d'une coopération avec le JPL et animé par Pascal Willis.

3.3 GNSS et IGS

3.4 VLBI et IVS

3.5 Gravimétrie et BGI

Les mesures gravimétriques à la surface de la Terre ont eu, et gardent une très grande importance pour la connaissance du champ de gravité à diverses échelles : pour l'utilisation très fine de la gravité dans des zones d'intérêt géophysique certain (géologie structurale, tectonique, volcanisme, hydrologie...), pour la recherche minière, pour la constitution de réseaux de nivellement de haute précision, pour accroître la résolution des modèles globaux déterminés par la géodésie spatiale (voir *chap. 2.5, 3.6*) avec aujourd'hui des applications à des problèmes sociétaux planétaires. Sur l'ensemble des océans, depuis environ quatre décennies, les mesures gravimétriques sont souvent remplacées par les données altimétriques satellitaires qui permettent d'en déduire la gravité moyennant certaines corrections (et hypothèses), mais celles-ci restent trop imprécises dans certaines régions – zones côtières par exemple.

Historique

Très tôt la communauté internationale s'est organisée pour coordonner la constitution de réseaux gravimétriques, les campagnes de densification de mesures, leur compilation, validation, archivage et utilisation (surtout à des fins géodésiques). C'est ainsi et pour cela qu'a été créé le Bureau Gravimétrique International (BGI), par l'AIG (Association Internationale de Géodésie) sous l'égide de son Union, l'UGGI, lors de l'Assemblée Générale de 1951 à Bruxelles. Le BGI commença effectivement à fonctionner en 1953, à Paris, avec son premier directeur le R.P. Lejay jusqu'en 1958². Placé ensuite sous la direction de P. Tardi (1959-1972) qui le dirigeait depuis l'IGN, il fut transféré à l'IPG Paris sous la responsabilité de J.J. Levallois (de l'IGN) assisté de S. Coron³.

En 1979, pour prendre en compte l'importance grandissante des données spatiales (et en particulier les données altimétriques), le BGI fut transféré au GRGS dans l'équipe toulousaine sous la direction de G. Balmino ; ceci entraîna un accès direct à la base de données gravimétriques mondiales qui venait d'être constituée (sous forme numérique) avec l'aide du BRGM, du SHOM et de l'IFREMER, et donna un nouveau souffle au service en démarrant des activités de compilation des données altimétriques en mer, de leur transformation en anomalies de gravité et de leur utilisation dans les modèles globaux.

La direction du BGI – qui est sise à Toulouse dans les locaux de l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) changea ensuite par deux fois : à la suite de l'assemblée générale de l'UGGI à Birmingham (1999) elle passa à J.P. Barriot (jusqu'en 2006), puis à S. Bonvalot en 2007 (après l'intérim de R. Biancale durant une année).

Depuis 2001 le BGI est l'un des "Centres" de l'IGFS (International Gravity Field Service) qui coordonne dans l'AIG les actions et réponses aux besoins en données, logiciels et informations gravimétriques de la communauté géodésique et géophysique. Le BGI contribue aussi directement à la Commission 2 (Gravity Field) de l'AIG et à GGOS (Global Geodetic Observing System). Après avoir été un des services de la "Federation of Astronomical and Geophysical

² Dans les locaux du centre d'enseignement de la Compagnie de Jésus, rue de Sèvres.

³ Le BGI fut dans les locaux de l'AIG, rue Gay-Lussac, de 1960 à 1968 (Levallois était alors secrétaire général de l'AIG), puis dans ceux de l'IPG, quai St Bernard, en mars 1968.

Services" (FAGS) il est reconnu par l' "International Science Council" (ex-ICSU) comme une des composantes du "World Data System" (WDS) créé en 2008.

Le BGI, dont le bureau central est hébergé à l'OMP Toulouse, fonctionne aujourd'hui avec la participation et le soutien d'organismes nationaux (CNRS/INSU, CNES, IGN, BRGM, SHOM, IFREMER, IRD) et d'unités de recherche et d'observatoires impliqués dans l'acquisition et l'exploitation de données gravimétriques (Toulouse, Montpellier, Paris, Strasbourg, Clermont-Ferrand, Brest, La Rochelle, Nice, Grenoble, Le Mans). Il bénéficie également de la collaboration d'institutions étrangères : Allemagne (BKG), Italie (POLIMI), Danemark (DTU), République Tchèque (VUGTK), Grèce (AUTH), USA (NGA).

La base de données : enrichissement, validation, accès

Le volume des données archivées au BGI, initialement très faible (~ 800 000 points en 1976), s'est accru de manière successive lors de la mise à disposition de grands lots de mesures par d'autres organismes centralisateurs, citons : la NGA (ex-NIMA, ex-DMA) dans les années quatre-vingt, le NGDC (surtout des données marines) en 1993. Des efforts permanents – appels au niveau international auprès des pays classifiant les données gravimétriques (cf. Balmino, 1983), résultèrent en une collecte certes irrégulière mais *in fine* importante, bien que parfois limitée à des valeurs moyennes d'anomalies de gravité de résolution variable obtenues lors de projets menés en collaboration (par exemple sur l'ex-URSS, Makedonskii et al., 1994).

Depuis 2006 le BGI a rénové complètement l'archivage, la gestion et la mise à disposition de ses données. Elles se sont enrichies :

- de mesures absolues en grand nombre, remplaçant dans beaucoup de pays les anciennes stations de référence,
- de grilles et de cartes d'anomalies de gravité, globales et régionales.

La figure 3.5.1 est une vue synoptique des mesures ponctuelles relatives et absolues archivées.

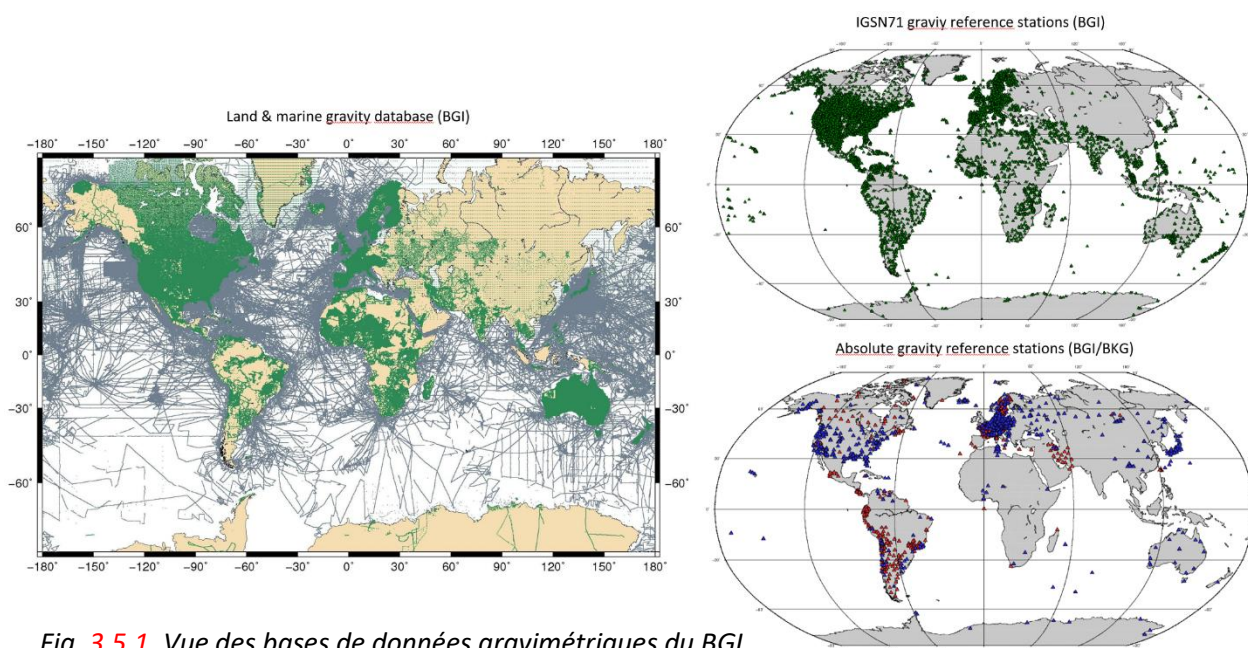


Fig. 3.5.1. Vue des bases de données gravimétriques du BGI.

Les logiciels de validation et de mise à disposition des données ont beaucoup évolué au fil des ans, nécessitant des refontes complètes tenant compte de nouvelles procédures de validation et la mise en œuvre de logiciels commerciaux (GeoSoft) ou d'outils développés par des partenaires du BGI comme par exemple MGL_QuickView (Gabalda & Bonvalot, 2017) pour les données de gravimètres absolus FG5, A10 et AQG, CG3TOOL/CG5TOOL/CG6TOOL (Gabalda et al., 2003) pour les données terrestres Scintrex, CTGeos (SHOM) et Caraïbes (Ifremer) pour les données marines.

L'utilisation des données altimétriques

Le rôle de l'altimétrie satellitaire sur les océans s'est imposé spectaculairement depuis l'avènement du GRGS avec la mise dans le domaine public (1990) des mesures de GEOSAT (USA, 1985-1989), avec les missions ERS1 (1991-2000) et ERS2 (1995-2011) de l'ESA, et TOPEX-Poséidon (USA & France, 1992-2005). Le BGI, l'équipe GRGS-CNES et CLS (Collecte-Localisation-Satellites) ont acquis l'expertise de traitement de ces données pour leur transformation en anomalies de gravité (Balmino et al., 1987 ; Olgiati et al., 1995 ; Sarrailh et al., 1997 ; BGI & CLS, 1999), contribuant à certains des modèles GRIM combinés (cf. *chap. 3.6*).

Contribution à des programmes externes de compilation régionale de données

Entre 1986 et 1995 le BGI participa à de nouvelles compilations et nouvelles campagnes conduites par un groupe (ULIS) de l'Université de Leeds (équipe devenue GETECH), avec de grands programmes de rassemblement de données existantes et l'appui de compagnies pétrolières : en Afrique (AGP, Fairhead et al., 1989), en Amérique du sud (SAGP, Green et al., 1991), en Asie du sud-est (SEAGP, Manton et al., 1993), en Europe (WEEGP, Green et al., 1994). Le BGI partagea les activités de validation et de cartographie de ces projets dont les produits restent soumis à certaines restrictions; ils purent néanmoins être utilisés pour les modèles globaux de géopotential à haute résolution EGM1996 et EGM2008 (Lemoine et al., 1996 ; Pavlis et al., 2012) ainsi que pour le modèle EGM2020 en cours de réalisation par la NGA. Récemment, le BGI a contribué à une compilation régionale de données gravimétriques sur l'ensemble de l'arc alpin et à la mise à disposition d'une carte d'anomalies à haute résolution pour le projet ALP-ARRAY (Zahorec et al., 2021).

Calcul de géoïdes

Un certain nombre de géoïdes régionaux ont été déterminés par le BGI, en utilisant les données terrestres, marines et altimétriques (et les meilleurs modèles globaux du moment) : sur Madagascar (Rakotoary, 1986), autour du Japon (Adjaout et al., 1997), sur le Vietnam (Vu et al., 2019). Le BGI participe depuis 2015 au projet GEOMED2 de calcul d'un nouveau géoïde sur la Méditerranée (Barzaghi et al., 2019) à l'aide de toutes les données disponibles et par plusieurs méthodes - y compris en utilisant seulement la surface moyenne altimétrique et un modèle de circulation océanique ; le projet a mis en évidence les erreurs principalement liées aux données gravimétriques marines anciennes (fig. 3.5.2).

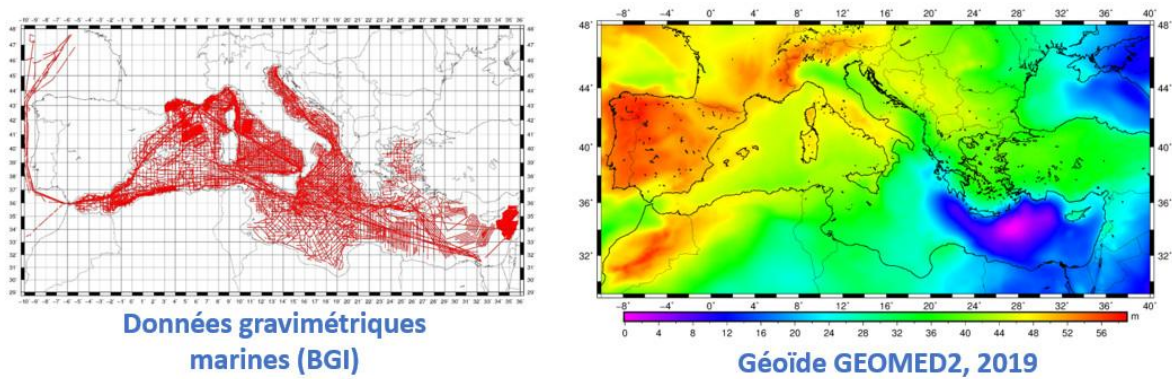


Fig. 3.5.2. Projet GEOMED2. Données gravimétriques marines (BGI et SHOM). Résultat d'un calcul de géoïde ; les données terrestres et altimétriques ne sont pas représentées.

Cartes régionales et mondiales d'anomalies gravimétriques

Dans le cadre d'un projet (IBCM, 1985-1989) de l' "International Oceanographic Commission", le BGI compila les données gravimétriques sur la Méditerranée (mesures ponctuelles de bateaux, et cartes qui furent digitalisées) pour produire une grille 3'x5' d'anomalies de Bouguer. Par ailleurs, avec le "Geological Survey of Canada", le BGI contribua en 1991 (pour la partie terres émergées) à une carte mondiale d'anomalies de Bouguer à la résolution de 5'.

En 2009, pour la "Commission for the Geological Map of the World" (CGMW) de l'UNESCO, le BGI entreprit le calcul de grilles d'anomalies de gravité basées sur les meilleurs modèles globaux de champ de gravité EGM2008 et DTU10, la base de données ETOPO1 et autres données topographiques et bathymétriques sur les lacs et banquises. Après certaines corrections, la transformation fut conduite (une première dans le domaine : Balmino et al., 2012) par analyses en harmoniques sphériques de très hauts degrés et ordres des grilles topographiques-bathymétriques, puis synthèses pour produire les grilles (1'x1') d'anomalies à l'air libre (au sens de Molodenski *i.e.* sur la surface topographique), d'anomalies de Bouguer sphériques, et d'anomalies isostatiques (fig. 3.5.3) – voir Bonvalot et al., 2012.

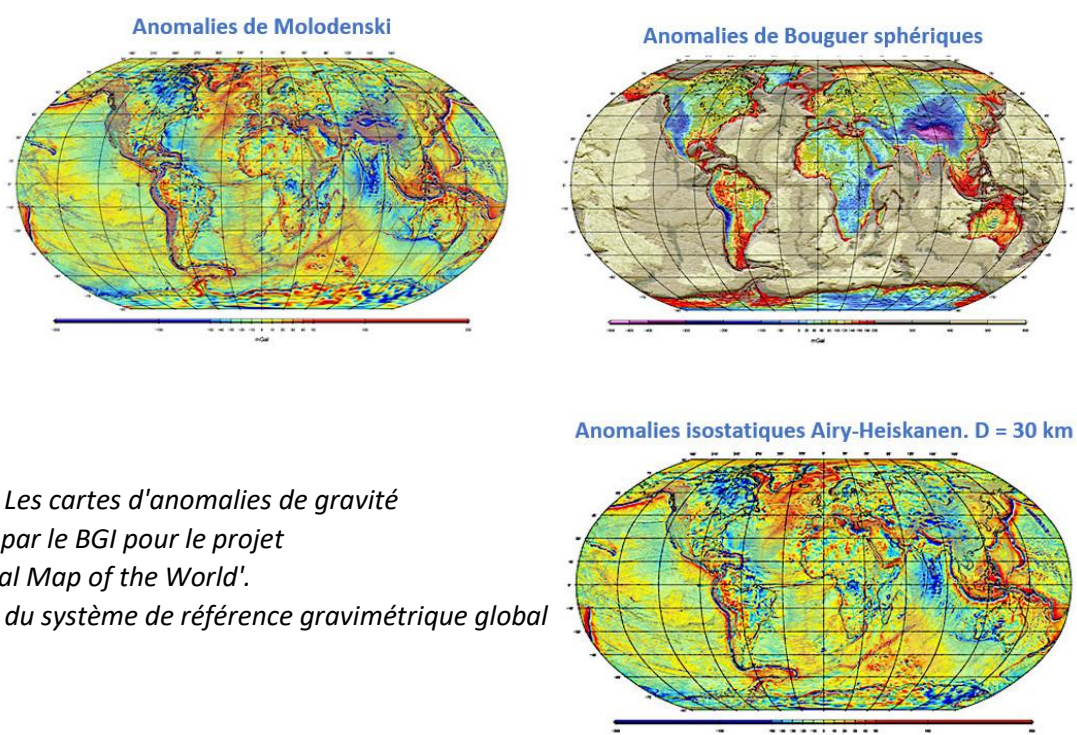


Fig. 3.5.3. Les cartes d'anomalies de gravité produites par le BGI pour le projet 'Geological Map of the World'. Définition du système de référence gravimétrique global

Le BGI contribue activement à plusieurs Working Groups de l'IAIG donnant lieu à la définition de standards internationaux et de réseaux ou produits globaux pour la communauté gravimétrique internationale. Faisant suite à la résolution de l'ONU recommandant la définition d'un système de référence global terrestre, l'IAIG/GGOS a entrepris de définir les bases d'un système de référence gravimétrique international destiné (i) à remplacer le système IGNS71 adopté en 1971 et obsolète et (ii) à assurer un monitoring absolu et précis du champ de gravité terrestre à l'échelle globale. Ce projet, piloté par le BKG Germany et le BGI (Wziontek et al., 2021), repose sur la mise en œuvre de stratégies de mesures de haute précision impliquant l'état de l'art de la gravimétrie absolue (instruments balistiques ou à atomes froids) sur des campagnes d'inter-comparaisons internationales pour garantir la traçabilité des instruments de mesures et sur des mesures en laboratoire ("core sites", réseau de référence) ou sur le terrain (réseaux secondaires de stations).

Autres travaux

Le BGI, à travers ses partenaires et des moyens de mesures nationaux (RESIF, CNRS/INSU, IGN, IRD, SHOM, BGRM...), contribue également à des campagnes de mesures relatives ou absolues dans différentes régions du monde dans le cadre de projets de recherche, d'appui à l'installation de réseaux nationaux ou d'inter-comparaisons instrumentales. Des campagnes ont ainsi été effectuées depuis deux décennies sur le territoire national (France métropolitaine, Antilles, La Réunion, Guyane, Nouvelle Calédonie, Polynésie, Kerguelen, St Pierre et Miquelon, Antarctique) ; en Europe (Luxembourg, Allemagne, Italie, Pologne, Norvège, Hongrie, République Tchèque), en Amérique du sud (Chili, Argentine, Pérou), en Afrique (Niger, Bénin), en Iran, en Australie, en Amérique du nord.

De même il contribue, en lien avec ses partenaires français et étrangers, à l'évaluation de capteurs innovants (gravimètres à atomes froids) opérationnels développés pour des mesures absolues terrestres, marines ou aéroportées (ex : Menoret et al., 2018).

Colloques, ateliers, écoles

De nombreux ateliers de travail et colloques ont été (co-) organisés par le BGI :

- jusqu'en 1999, en tant qu'organe exécutif et secrétariat de l' IGC (International Gravity Commission), les réunions quadriennales de cette commission : Paris (1982), Toulouse (1986, 1990), Graz (1994), Trieste (1998) ;
- les colloques de clôture de : AGP (African Gravity Project), Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), 1986 ; SAGP (South American Gravity Project), Quito (Equateur), 1988 ;
- les ateliers de travail de : SEAGP (South-East Asia Gravity Project), Leeds (UK), 1991 ; Toulouse (F), 1992; Houston (USA), 1994 ;
- le colloque de clôture de WEEGP (Western & Eastern Europe Gravity Project), Toulouse, 1994 ;
- l'atelier de travail "Marine gravity data validation", Toulouse, 1992.

Le BGI et l'ICET (International Centre for Earth Tides) organisèrent deux écoles d'été :

- "Terrestrial Gravity Data Acquisition Techniques", Louvain-la-Neuve, Belgique, 2002 ;
- "Gravimetric methods", Lanzarote, Iles Canaries, Espagne, 2005.

Enfin le BGI co-organise avec l'IGFS et l'IgeS (International Geoid Service) des écoles "Determination and Use of the Geoid" : Johor Bahru, Malaisie, fév. 2000 ; Come, Italie, sept. 2008 ; La Plata, Argentine, sept. 2009.

Publications

Outre les articles scientifiques de ses membres, le BGI a une publication dédiée : le Bulletin d'Information, de 1963 à 2002 (semestriel), auquel a succédé – en coopération avec l'IGS (International Geoid Service) le "Newton's Bulletin" (irrégulier). Ces publications sont toutes numérisées et accessibles sur le site du BGI.

Didacticiels

Des articles sur la définition des anomalies gravimétriques (Balmino et Bonvalot, 2016) ou encore sur les gravimètres à atomes froids (Pereira et Bonvalot, 2016) ont été rédigés pour l'Encyclopedia of Geodesy. D'autres didacticiels sont également disponibles sur le site du BGI :

- . **Gravitation, gravimétrie, géodésie spatiale, géophysique,**
- . **Champ de pesanteur terrestre et géoïde. Principes, progrès et connaissance actuelle,**
- . **Modern concepts, concerns and satellite projects in the determination and use of the Earth's gravity field,**
- . **Geodetic satellite orbits in the Earth's gravity field,**
- . **La mesure du champ de gravité de la Terre,**
- . **Les sources d'erreurs en gravimétrie marine.**

3.6 Coopération franco-allemande sur les modèles globaux de potentiel

Incontournable pour définir les altitudes physiques, nécessité pour la détermination d'orbite précise pour le CNES et toutes les agences spatiales, mais aussi objet d'étude en soi pour mieux comprendre le système Terre, le potentiel de gravitation et le champ qui en dérive sont liés à la forme, à la structure et à l'évolution de notre planète. La géodésie spatiale a été une vraie révolution pour la connaissance de la forme de la Terre, de ses mouvements et dans la manière de déterminer des modèles de potentiel. Contrairement aux méthodes gravimétriques (et astro-géodésiques, anciennement), forcément limitées par la distribution des mesures, encore aujourd'hui disparates et inhomogènes, l'on pouvait accéder rapidement à une information globale en exploitant l'analyse des perturbations de trajectoire des satellites afin de calculer les forces responsables de ces perturbations, une approche (problème inverse) bien connue en mécanique céleste. Ceci sous réserve, bien sûr, de satisfaire un certain nombre de conditions : (1) observer des satellites d'altitude la plus basse possible (mais limitée par l'atmosphère terrestre) pour bénéficier de perturbations orbitales maximales; (2) pouvoir soustraire des perturbations celles dues à d'autres forces que dérivant du potentiel terrestre (forces de surface – dont le frottement atmosphérique précité, attraction des autres corps : Lune, Soleil, planètes, attraction due aux marées solides et océaniques); (3) avoir une couverture suffisante de mesures, à la fois au niveau des trajectoires et par rapport à la surface terrestre, posant le double problème des types d'orbite à observer et de la couverture spatiale de la Terre, donc de la répartition et du nombre de stations d'observation; (4) avoir des systèmes de mesure de précision en adéquation avec les perturbations à analyser, le début d'une longue quête au cours de laquelle, itérativement, la connaissance des irrégularités du potentiel s'affinera, des découvertes en résulteront, conduisant à la nécessité de développer des instruments meilleurs et même de créer de nouveaux systèmes d'observation. En cela la France s'est particulièrement illustrée dans la télémétrie laser (*cf. chap. 3.1*), le système DORIS développé par le CNES (*cf. chap. 2.3*), et les micro-accéléromètres de l'ONERA (*Bernard et al., 1980*) qui ont conduit à l'avènement et permis la mise en œuvre de nouvelles missions dédiées à la mesure du champ de gravité. Mais les modèles ainsi calculés à partir des seules mesures spatiales, dénommés "*solutions satellites*", ont une résolution limitée par l'altitude des trajectoires observées; très tôt ont donc été calculés des modèles dits "*combinés*" utilisant en outre les mesures gravimétriques de surface (sur terre et sur les mers) - malgré leur inhomogénéité et leurs erreurs, ainsi que, à partir des années 1980, les mesures altimétriques sur les océans (*cf. chap. 2.2*) - en général sous formes d'anomalies de gravité dérivées, après corrections pour déduire le géoïde de la surface moyenne océanique. Ces modèles ont ainsi accru notre connaissance mais avec des imperfections inhérentes aux données de surface elles-mêmes. Ce sont ces imperfections, ainsi que des trous de couverture (surtout sur les terres émergées, les glaces) qui ont conduit avant les années 2000 à définir et proposer de nouvelles missions de cartographie du potentiel: CHAMP, GRACE, GOCE (*cf. chap. 2.5*), spécifiques - contrairement à la plupart des précédentes, la géodésie spatiale ayant profité de l'observation nécessaire des trajectoires de satellites qui avaient de fait d'autres objectifs.

Le CNES se lance très tôt dans la détermination de tels modèles avec le développement d'un logiciel, GIN (démarré en 1967, renommé GINS en 1994) basé sur l'intégration numérique des équations de trajectoire, complété plus tard par un ensemble de programmes d'algèbre linéaire et de gestion spécifiques au domaine (logiciel DYNAMO). Simultanément une équipe allemande, avec M. Schneider et C. Reigber à l'Institut *for Astronomy and Physical Geodesy* (IAPG) de l'Université Technique de Munich, développe 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. Parallèlement G. Balmino étudie à l'observatoire de Meudon, avec F. Barlier et J. Kovalevsky, des méthodes de représentation et de détermination du géopotential. Avec le lancement du satellite Peole fin 1970, le démarrage de la campagne ISAGEX (conduite par G. Brachet jusqu'en 1972) et la création du GRGS la France montre sa volonté de s'affirmer dans l'utilisation des satellites pour la géodésie. Les Allemands, qui viennent de créer la SFB 78 (*SonderForschungsbereich : unité de recherche spéciale*) pour la détermination du champ de gravité, sont intéressés par tester leur méthode avec des mesures réelles et prennent contact avec le tout jeune GRGS. Le CNES accepte dès 1971 que leur logiciel GIN soit utilisé pour les travaux de M. Schneider et C. Reigber, et ces dispositions sont élargies quelques mois plus tard avec une décision – *Kurzprotokoll*, entre le GRGS et la SFB78/TUM pour une mise en commun de moyens *pour la détermination de modèles du champ de gravité de la Terre*, convention qui a perduré jusqu'à nos jours après nombre de renouvellements et reformulations.

En 1972 G. Balmino prend la responsabilité des activités de dynamique orbitale et de la détermination du potentiel dans le département de M. Lefebvre au CNES. Il s'agit d'étendre les capacités du logiciel GIN et de construire une chaîne de programmes permettant le calcul d'un grand nombre de paramètres dynamiques (dont les harmoniques sphériques du potentiel) dans les configurations les plus variées. Cet ensemble, DYNAMO, est essentiellement confié à B. Moynot qui en assurera les transformations et la maintenance (jusqu'aux derniers modèles GRIM). Au fur et à mesure de l'évolution des logiciels GIN et DYNAMO, un transfert des algorithmes s'effectue vers l'IAPG à Munich, qui a entrepris l'élaboration d'outils similaires : MUCGIN et REST, le premier étant au début (1973-1975) une copie légèrement modifiée de GIN. Cela permettra par la suite de comparer, voire croiser différents algorithmes, au bénéfice de l'efficacité et de la sûreté des logiciels. A l'automne 1973 C. Reigber fait un séjour de longue durée au CNES. Avec le soutien de J.C. Husson et de M. Lefebvre, dont l'enthousiasme ne faiblira jamais, sont mis en place tous les éléments (validation des logiciels, stratégie et partage du traitement des données) pour la détermination d'un premier modèle global de potentiel franco-allemand. C'est le début d'une remarquable coopération à long terme.

Le nom des modèles communs, **GRIM**, provient de **GRGS** et de **IAPG Munich** - pas très bien choisi pour les anglophones (puisque signifiant *triste, sombre* !) mais il marquera son époque. Le premier modèle, GRIM1 (*Balmino et al., 1975*) est une solution modeste, basée sur les données de 10 satellites, complète aux degré/ordre (10,10) plus des harmoniques de résonance d'ordres 13 et 14 jusqu'au degré 30. Il est rapidement suivi de GRIM2 (*Balmino et al., 1976, 1978*), modèle complet jusqu'à (23,23), combinant les données de 20 satellites et 38 stations avec des valeurs moyennes 5°x 5° d'anomalies de gravité qui avaient été compilées par la DMA (Defense Mapping Agency, USA); il se compare en qualité au modèle GEM4 du GSFC, une référence d'alors.

Avec les lancements des satellites passifs dédiés à la télémétrie laser : STARLETTE (1975) par le CNES, et LAGEOS 1 (1976) par la NASA, la géodésie spatiale dispose de cibles de choix pour des mesures de distance qui ont gagné en précision. En outre l'altimétrie radar au-dessus des océans est devenue une technique éprouvée, avec les satellites américains GEOS 3 (1975-1979) et SEASAT (1978). A cette époque, le Bureau Gravimétrique International (BGI) est transféré de l'IPGP (Institut de Physique du Globe, Paris) au GRGS dans l'équipe toulousaine sous la direction de G. Balmino (*cf. chap. 3.5*) ; ceci donne un accès direct à la base de mesures gravimétriques mondiales du BGI, et signe le démarrage des activités de compilation des données altimétriques en mer, de leur transformation en anomalies de gravité et de leur utilisation dans les modèles globaux. S'ensuivent trois modèles (36,36) : GRIM3, GRIM3B, GRIM3L1, obtenus avec les données d'une vingtaine de satellites, une centaine de stations, combinées avec des valeurs moyennes de la gravité déduites de mesures au sol et altimétriques marines. Entre-temps, en 1981, les activités de l'Université Technique de Munich dans ce domaine sont déplacées au DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) dont C. Reigber a pris la direction – et où R. Biancale travaille sur le projet POPSAT, et la SFB78 s'achève en 1982.

A partir des années 1980 on assiste à des progrès notables dans la précision des données satellites, à la naissance du système DORIS (qui volera sur SPOT2 en 1990, sur TOPEX en 1992), et à l'avènement des récepteurs GPS embarqués. Cela nécessite une révision profonde des logiciels de traitement, pour accroître leur précision (cadre relativiste), pour une meilleure représentation des forces perturbatrices, pour le traitement des nouveaux types de mesure. Ces travaux sont effectués sous la direction de R. Biancale qui, rentré au CNES en 1982, a la responsabilité du calcul des nouveaux modèles, en parallèle avec P. Schwintzer au DGFI. Le rôle de R. Biancale et de P. Schwintzer sera prépondérant pour le développement des modèles GRIM4 et suivants - qui seront désormais systématiquement séparés en *solution satellite* et *solution combinée*.

Les données du système DORIS (avec son réseau dense de stations) sont incluses à partir de 1991, puis celles de LAGEOS 2 (NASA, 1992), de STELLA (CNES, 1993) complétant une panoplie de cibles laser très précises qui permettent de renforcer la précision des modèles et qui s'avèreront sur le long terme très complémentaires des nouvelles missions de cartographie du potentiel pour la détermination des harmoniques de bas degré dans la caractérisation des variations temporelles. Par ailleurs les données de surface s'enrichissent au fil des ans grâce à l'action du BGI, à une validation systématique des mesures gravimétriques anciennes (aux USA), grâce aussi à de nouvelles compilations et nouvelles campagnes, par exemple sous l'égide de ULIS (Université de Leeds) puis de GETECH avec de grands programmes de rassemblement de données existantes - et auxquels participe le BGI. L'altimétrie des océans s'amplifie aussi spectaculairement au cours de cette période, citons les données des missions GEOSAT (USA, 1985-1989), ERS1 (1991-2000) et ERS2 (1995-2011) de l'ESA, TOPEX-Poséidon (USA & France, 1992-2005), contribuant à certains des modèles GRIM combinés.

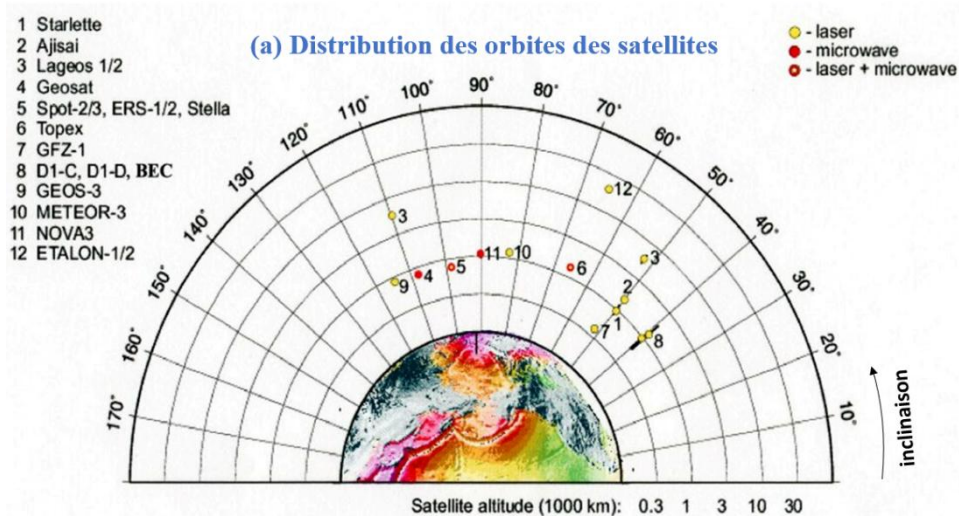
La table 3.6.1 résume les caractéristiques des modèles GRIM calculés entre 1990 et 2000. A noter que, durant cette période, l'équipe du DGFI (Munich) a été transférée en grande partie au GFZ (GeoForschungsZentrum, Potsdam) créé après la réunification allemande, où Ch. Reigber a pris la direction du Département de Géodésie et Observation de la Terre en 1992 ; il y fait développer (à partir de MUCGIN et DOGS précités) un logiciel nouveau, EPOS, qui reste celui utilisé aujourd'hui par l'équipe allemande. Parallèlement, au CNES, GIN évolue en GINS (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées) en devenant capable, en particulier, de

traiter simultanément les constellations de satellites. Par la publication des modèles GRIM4 à GRIM5 on peut remarquer la prédominance du leadership allemand, qui s'explique par le niveau des moyens attribués aux activités dans ce domaine, ayant bénéficié d'un soutien phénoménal de l'Etat suite à la fusion avec l'ex-RDA, soutien qui permettra aussi de mettre en œuvre la mission CHAMP (cf. chap. 2.5)⁴.

Table 3.6.1. Les modèles GRIM de 1990 à 2000. Chaque constituant de marée océanique est développé en harmoniques sphériques déterminés conjointement. Les derniers modèles (GRIM5) n'utilisent plus les anciennes mesures optiques trop imprécises.

Modèle	Année	Max. degré	N.bre de satellites	N.bre de stations	Constituants Marées Océan.	Données de surface 1°x 1° g(mes)/g(alti)	Réf.
GRIM4-S1	1990	50	27	220	12	-	Schwintzer et al., 1991
GRIM4-C1	1990	50	27	220	12	22527/28258	
GRIM4-S2	1991	50	29	296	12	-	Schwintzer et al., 1992
GRIM4-C2	1991	50	29	296	12	22527/28258	
GRIM4-S3	1992	60	31	300	12	-	Schwintzer et al., 1993
GRIM4-C3	1992	60	31	300	12	22527/28258	
GRIM4-S4	1995	70	34	323	8	-	Schwintzer et al., 1997
GRIM4-C4	1995	72	31	300	12	25070/29718	
GRIM5-S1	1999	99	21	438	14	-	Biancale et al., 2000
GRIM5-C1	1999	120	21	438	14	38139/35873	Gruber et al., 2000

La figure 3.6.1 montre l'état de nos connaissances du géoïde et du champ de gravité dérivés des techniques classiques disponibles à la fin du siècle dernier et obtenus par les équipes franco-allemandes.



⁴ Les modèles suivants (moyens) des équipes franco-allemandes, obtenus à partir des nouvelles missions CHAMP et GRACE seront appelés EIGEN, et GOCE-DIR pour ceux relatifs à GOCE.

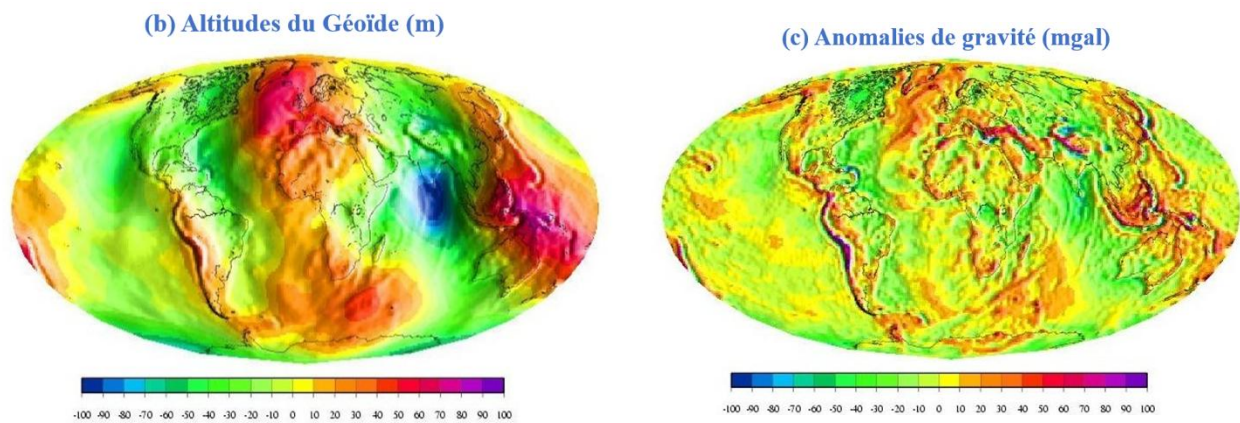


Fig. 3.6.1. Le modèle GRIM 5-C1, obtenu après 30 ans d'observations de satellites, combinées à des mesures de pesanteur et des valeurs de la gravité sur les océans déduites de données altimétriques. Sa précision aux demi-longueurs d'onde 400 km / 170 km (résolution ultime) est estimée à 0.3 m / 0.5 m pour le géoïde, et à 1.5 mGal / 5.5 mGal pour le champ de gravité.

3.7 Marégraphie et PSMSL

Les mesures du niveau de la mer réalisées à la côte par des marégraphes ont eu très tôt une importance particulière en géodésie pour l'établissement de références verticales à terre (origine des altitudes) comme en mer (sondes bathymétriques), permettant une description précise de la surface de la Terre et de ses variations sur la composante verticale. Vers la fin du 20^{ème} siècle, elles ont acquis une importance renouvelée pour la connaissance des variations du niveau de la mer et de ses extrêmes en relation avec les changements climatiques. Les applications touchent alors des problèmes sociétaux planétaires et les études visent à mieux comprendre les phénomènes à l'origine de ces variations, à mieux les modéliser pour mieux les prédire dans l'espoir de mieux anticiper le futur, en particulier en termes de risques liés aux submersions marines et à l'érosion côtière.

Depuis près de quatre décennies, les mesures *in situ* des marégraphes sont complétées par les données des satellites d'altimétrie radar, mais ces dernières restent encore trop imprécises à proximité des côtes, principalement en raison de la contamination de l'écho radar par les terres émergées. Une autre limitation vient de l'échantillonnage temporel (dix jours au mieux pour les missions de type Jason) que seule une constellation d'altimètres pourrait pallier, mais une telle perspective n'est pas sérieusement envisagée en raison du nombre de satellites nécessaires pour obtenir un échantillonnage élevé équivalent aux marégraphes. L'approche privilégiée reste alors la combinaison des méthodes, tirant partie des avantages de l'échantillonnage spatial des satellites et temporel des marégraphes. Cette combinaison doit néanmoins passer par une meilleure connaissance des processus physiques à la côte, qui peuvent différer notablement au large (Woodworth et al., 2019).

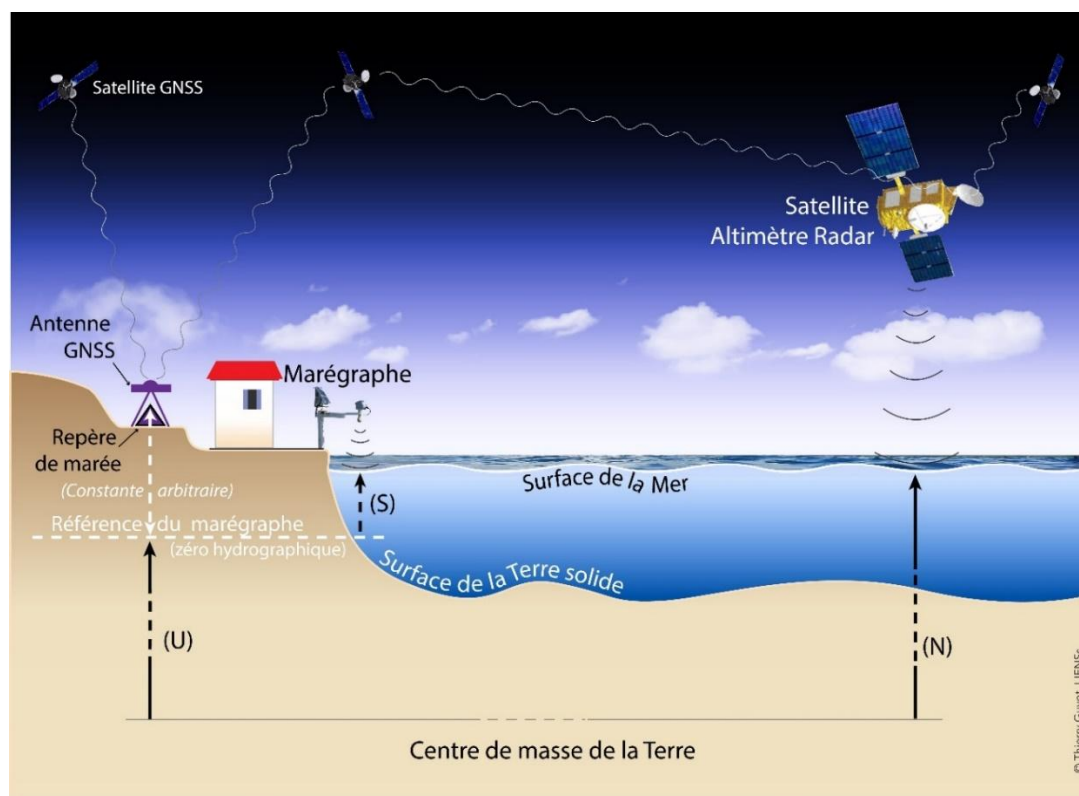


Fig. 3.7.1. Observations du niveau de la mer *in situ* et depuis l'espace (source : T. Guyot, 2021).

La combinaison des méthodes *in situ* et depuis l'espace nécessite de considérer la nature relative ou géocentrique des grandeurs mesurées (Fig. 3.7.1). Les systèmes GNSS peuvent apporter le complément nécessaire à cette combinaison. Ils sont tout aussi utiles dans une perspective d'exploitation des données d'altimétrie pour obtenir la quantité relative à la côte, qui intéresse les études d'impact ou d'aménagement du territoire, que dans celle de l'analyse des données des marégraphes pour séparer les contributions climatiques de la surface de la mer des contributions géophysiques de la surface de la Terre solide. La figure 3.7.1 illustre les différentes quantités en jeu et les principales méthodes d'observation associées.

Service international pour le niveau moyen de la mer (PSMSL)

Très tôt la communauté internationale s'est organisée pour coordonner des campagnes marégraphiques de grande ampleur, par exemple en 1835 en plusieurs centaines de ports d'Europe et d'Amérique du nord (Cartwright, 1999), puis pour l'établissement de réseaux de marégraphes à vocation permanente, la compilation de leurs mesures, validation, archivage, diffusion et valorisation. C'est ainsi, et pour cela, qu'est établi le Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) en 1933 sous l'égide de l'UGGI comme service scientifique des associations internationales AIG et AIPSO (Association Internationale des Sciences Physiques de l'Océan). Le PSMSL commence à fonctionner en 1933 au sein du Liverpool Observatory and Tidal Institute ; il opère aujourd'hui au sein du National Oceanography Centre à Liverpool (Woodworth *et al.*, 2021).

Le dernier rapport d'activités du PSMSL à l'UGGI (2019) fait état d'une archive de données de plus de 70000 années-stations, issues de plus de 2200 marégraphes, répartis autour du globe (rapport en ligne sur www.psmsl.org). Les données des marégraphes de Brest (SHOM) et de Marseille (IGN) font partie des séries pluri-centenaires (rares) de cette archive ; Brest étant la plus longue disponible à ce jour.

Programme mondial GLOSS (COI/UNESCO)

Dans les années 1980s, des projets internationaux émergent avec des nouveaux objectifs scientifiques et besoins, qui stimulent l'acquisition et l'échange de mesures de marégraphes à l'échelle globale. C'est le cas du projet TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) avec l'ambition de comprendre les échanges océan-atmosphère, ou encore de WOCE (World Ocean Circulation Experiment) portant sur la circulation océanique. Un cadre de coopération plus large et pérenne est alors établi avec la création du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS, <https://gloss-sealevel.org/>) en 1985 sous l'égide de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO. Ce cadre va stimuler les échanges internationaux et accroître les volumes de données, aussi bien au sein du PSMSL que dans les autres centres de données associés à GLOSS. Le périmètre du programme GLOSS couvre également les échanges d'expérience et de savoir-faire avec un volet formation qui se concrétise par l'organisation d'écoles d'été et l'édition de manuels (voir par ex. la collection des Manuels & Guides, dont deux volumes sont listés en référence, COI 1985, 2020).

Structuration française autour du service d'observation SONEL

La figure 3.7.2 présente l'ossature dudit réseau 'core' des stations GLOSS. Dès l'origine de ce programme, des français sont présents avec, par exemple, C. Le Provost (CNRS), nommé contact national pour ce programme par le Comité national pour la COI (CN-COI), ou encore C. Boucher (IGN) et B. Simon (SHOM) membres du groupe d'experts GLOSS.

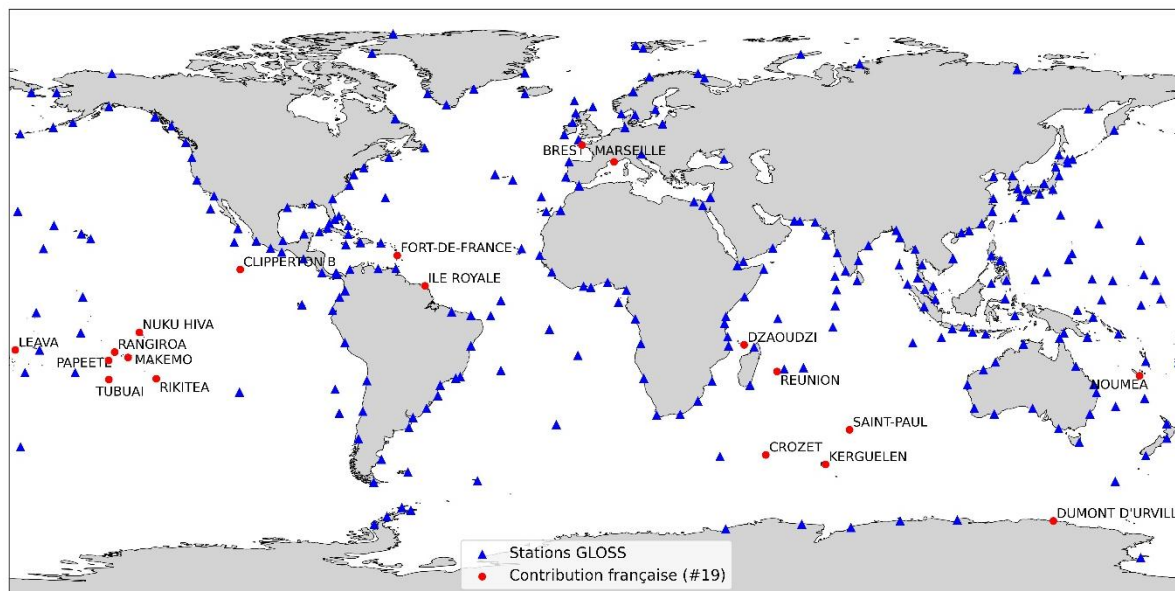


Fig. 3.7.2. Réseau de stations de l'ossature globale du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS) et stations françaises contribuant à ce réseau (en rouge avec label).

La contribution française va cependant souffrir initialement d'un manque de cadre de coopération avec des ressources dédiées pour assurer l'installation ou la maintenance en condition opérationnelle des stations. Ce sont les équipes GRGS de l'IGN et du SHOM qui vont finalement apporter un cadre (le GRGS) et obtenir des ressources financières pour structurer la communauté française et l'aider à remplir ses engagements internationaux ; l'INSU-CNRS prendra le relais en 2011 avec une labellisation de Service national d'observation (SNO). Cette structuration s'est faite autour du projet de Système d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL, www.sonel.org) imaginé par l'IGN (C. Boucher) et le SHOM (B. Simon) à la fin des années 1990s, puis mis en œuvre avec deux unités mixtes de recherche associant le CNRS aux universités de La Rochelle et de Toulouse. Ce cadre va rapidement se révéler fructueux et placer la France en tête du peloton des pays participant activement aux objectifs du programme GLOSS avec, par exemple, une mise à disposition des données horaires des marégraphes suivant les critères de l'UNESCO (libre accès et gratuité) en 2003, soit le second pays en Europe à le faire après la Norvège.

Déplacements verticaux aux marégraphes et rôle du GNSS

D'abord rattaché au domaine Surfaces et interfaces continentales de l'INSU, puis dans Atmosphère-Océan, le service SONEL pourrait aussi prétendre à un rattachement au domaine Terre solide en raison de l'importance des mouvements verticaux de cette composante dans les variations du niveau de la mer observées à la côte. A cet égard, le rôle du GNSS s'est imposé progressivement à partir de la fin des années 1980s (Carter et al., 1989), puis de manière

spectaculaire avec le déploiement de réseaux de stations GPS permanentes en colocalisation avec les marégraphes (Neilan et al., 1998).

De par la longueur et qualité de leur série de mesures, les marégraphes de Brest et de Marseille seront les premiers (1998) à être équipés d'une station GNSS permanente dédiée, en France. La priorité sera ensuite portée sur les autres stations françaises du programme GLOSS, plus éloignées (Fig. 3.7.2), puis aux marégraphes qui présentent un fort intérêt et potentiel de valorisation scientifique, par exemple lié à la calibration et validation (cal/val) des mesures des altimètres radar embarqués sur satellite (Ajaccio, île d'Aix...).

Le GRGS a donc fourni un cadre de coopération étroite entre les équipes de l'IGN et du SHOM, qui s'est révélé efficace à surmonter les difficultés de tout ordre, parfois nombreuses et inattendues, dans l'installation de nouvel équipement en zones portuaires hautement régulées et protégées. A Brest, par exemple, dans les années 1990s le nouveau Préfet maritime avait fait retirer toute antenne du château, soucieux de la valeur historique de celui-ci. Or, c'est au pied du château, dans le port militaire, que se trouve le marégraphe pluricentenaire. Dans ce contexte, c'est en soulignant la valeur historique du marégraphe de Brest et de sa série de mesures, que C. Le Visage (SHOM) obtint l'autorisation d'implanter l'antenne GNSS sur un des murs du château, qui plus est, avec pour seul accès les jardins du logement de fonction du Préfet maritime.

Calcul de solutions GNSS de positions et déplacement

En parallèle de l'acquisition des mesures GNSS aux marégraphes, l'équipe GRGS-IGN et l'université de la Rochelle ont acquis une expertise dans le traitement des mesures GNSS avec une stratégie en réseau global libre (ajustement simultanée des positions des stations et des orbites des satellites) et une réanalyse aussi homogène que possible (modèles, corrections et paramétrisation) sur l'ensemble des données disponibles (Wöppelmann et al., 2007). Cette expertise est aujourd'hui reconnue dans l'IGS au travers dudit centre d'analyses 'ULR' avec une participation régulière aux campagnes de réanalyses dites 'repro' de l'IGS. Un certain nombre de solutions globales ont ainsi été produites par ce centre avec des stratégies d'analyse qui ont évolué avec l'état de l'art des connaissances au sein de l'IGS (Santamaría-Gómez et al., 2017). Les produits ULR de séries temporelles de position GNSS et de vitesses de déplacement des stations aux marégraphes sont diffusés via le service SONEL, qui a acquis une dimension internationale dans le programme GLOSS en 2012 avec le statut de centre de données GNSS aux marégraphes (COI, 2012).

Patrimoine historique à fort potentiel scientifique

Le service SONEL, à travers ses partenaires et moyens de mesures nationaux (CNRS/INSU, IGN, SHOM, ILICO, RESIF...), contribue par ailleurs à valoriser le patrimoine historique de la France, particulièrement riche en mesures du niveau de la mer (Gouriou et al., 2008) en promouvant leur numérisation, archivage, contrôle qualité et diffusion, mais aussi en dressant un état des connaissances le long des côtes françaises (Dodet et al., 2019). Les marégraphes de Brest et de Marseille ont reçu une attention toute particulière avec, par exemple, l'accompagnement GRGS de thèses de doctorat (Wöppelmann, 1997 ; Pouvreau, 2008).

L'IGN a par ailleurs accompli un travail remarquable de restauration des bâtiments du marégraphe de Marseille, que le départ du dernier gardien avait laissé quelque peu à l'abandon en 1988. Cette restauration s'est accélérée à partir de l'effraction survenue en 1997 et le vandalisme de l'instrument mécanique pluri-centenaire encore en opération. L'ouvrage dédié à ce marégraphe par A. Coulomb (IGN) est fascinant, aussi bien sur le plan technique qu'historique, tout en mettant en lumière le rôle des personnes qui l'ont aidé à traverser les siècles jusqu'à nos jours (Coulomb, 2014).

Autres travaux

Des nouvelles méthodes de mesure du niveau de la mer continuent d'être imaginées et leurs performances sont explorées par les partenaires de SONEL. Mentionnons les bouées GNSS (André et al., 2013), la réflectométrie GNSS (Santamaría-Gómez et al., 2015), ou encore les drones marins de surface (Sakic et al., 2021). Ces drones ouvrent des pistes particulièrement intéressantes, aussi bien pour combler le gap entre les mesures littorales des marégraphes et hauturières des satellites que pour la géodésie de fond de mer avec la perspective de contraintes observationnelles nouvelles (sous la mer) aux modèles géophysiques de déplacements de la Terre solide.

Enfin, une veille active est assurée dans l'application aux marégraphes des méthodes géodésiques alternatives ou complémentaires aux GNSS, par exemple avec DORIS (Moreaux et al. 2016), la gravimétrie absolue (Amalvict et al., 2017) ou l'InSAR (Poitevin et al., 2019) sans oublier le nivellement de précision (Woodworth et al. 2017).

Publications

Outre les articles scientifiques de ses membres, les équipes du service SONEL produisent régulièrement un état des activités françaises en marégraphie, et ses compléments indispensables, en préambule des réunions du groupe d'experts GLOSS, qui se réunit tous les deux ou trois ans. Ces publications sont toutes numérisées et accessibles sur le site de SONEL (www.sonel.org).

3.8 Systèmes célestes, terrestres, rotation de la Terre, BIH et IERS

Ce chapitre est une présentation synthétique de cinquante ans de contributions du GRGS au domaine des systèmes de référence et de la rotation de la Terre. Pour plus de détails sur les développements dans ce domaine, le lecteur pourra se rapporter à deux ouvrages récents⁵ dans lesquels les différents thèmes de ce chapitre sont largement exposés. A noter que les références bibliographiques de ce chapitre sont limitées, sauf exception, à celles auxquelles des membres du GRGS ont été étroitement associées et ne représentent qu'une sélection restreinte de celles-ci.

3.8.1 Introduction

Toute recherche dans le domaine de la géodésie spatiale repose sur l'accès aux meilleures réalisations des systèmes de référence terrestre et céleste, ainsi qu'à la meilleure modélisation possible de l'orientation de la Terre dans l'espace, c'est à dire de la rotation du repère terrestre par rapport au repère céleste géocentrique.

Depuis la création du GRGS en 1971, ce thème a connu une évolution spectaculaire du fait du développement continu d'étalons atomiques de temps de plus en plus performants et du remplacement progressif, pour diverses applications de type astrométrique ou géodésique, des techniques de l'astrométrie optique par des techniques satellitaires, la télémétrie laser sur la Lune, l'interférométrie à très longue base (VLBI) sur radiosources extragalactiques et l'astrométrie spatiale.

Ainsi, les techniques fondées sur les observations Doppler de satellites artificiels (1971), la télémétrie laser sur la Lune (1970) et sur satellites artificiels (1975), la VLBI sur radiosources extragalactiques (1980) et les systèmes radioélectriques GNSS et DORIS (1990), qui sont toutes basées sur des mesures de temps, ont permis d'améliorer en 50 ans l'exactitude de la détermination des repères terrestres (de 10 m à 1 cm) et des repères célestes dans le domaine radio (de 50 mas à 50 μ as), ainsi que la précision de la détermination des paramètres d'orientation de la Terre (de 10 mas à quelques dizaines de μ as). L'amélioration de la précision des mesures a nécessité le développement de modèles toujours plus complets et le raffinement continu du traitement des observations. De plus, les missions d'astrométrie spatiale de l'Agence spatiale européenne, Hipparcos (lancée en 1996) et Gaia (lancée en 2013), ont révolutionné la réalisation d'un repère de référence céleste global dans le domaine visible avec un gain considérable en densité d'objets, comme en précision.

Une telle évolution des techniques, de l'astronomie géodésique à la géodésie et l'astrométrie spatiales (Levallois 1998), avec des progrès instrumentaux remarquables, ainsi que la diversité des objets observés, ont amené à un bouleversement majeur des références d'espace et de

⁵ « Les références de temps et d'espace. Un panorama encyclopédique : histoire, présent et perspectives », C. Boucher, éd. , Hermann, 2017 et « Introduction aux éphémérides et phénomènes astronomiques », coord. par P. Descamps, J. Berthier, F. Mignard, IMCCE et EDP Sciences, Paris, 2021.

temps pour l'astronomie, la géodésie et la métrologie, exigeant un cadre théorique élargi (voir par exemple Boucher & Lestrade 1984, Petit 2000). Ceci a nécessité une large réflexion au niveau international concernant les concepts et la définition des systèmes de référence (voir par exemple Kovalevsky & Mueller 1981, Kovalevsky et al. 1989), ainsi que l'optimisation de leurs réalisations et de leurs transformations. Cette réflexion a abouti à l'adoption de résolutions successives de l'Union astronomique internationale (UAI) et de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) concernant les systèmes de référence d'espace et de temps et la représentation de la rotation de la Terre. Ces résolutions ont recommandé l'adoption du cadre théorique de la relativité générale en 1991, du système international de référence terrestre (ITRS) en 1991, du système international de référence céleste (ICRS) et de sa réalisation (ICRF) en 1997, ainsi que d'une définition plus exacte du Temps universel (UT) et d'un modèle de précession-nutation de la Terre de haute précision en 2000 et 2006. Ceci a été accompagné d'une modernisation des concepts et de la nomenclature associée.

Le GRGS a pris part à de nombreux aspects de cette évolution, aussi bien au niveau du développement et de l'implémentation des nouvelles techniques, que de l'analyse et la combinaison de leurs données, ainsi que de la modélisation des phénomènes à considérer, de la réalisation des systèmes de référence et de l'organisation et la coordination internationale dans ce domaine. Les équipes du GRGS ont également contribué activement à l'initiative et la préparation des résolutions successives de l'UAI et de l'UGGI sur les systèmes de référence.

3.8.2 La rotation de la Terre

Les équipes du GRGS ont contribué aux développements des théories, déterminations, modélisations et analyses de la rotation de la Terre, en particulier pour la combinaison des données et l'interprétation astrométrique et géophysique.

Introduction des techniques spatiales dans le calcul des paramètres de la rotation de la Terre

A la création du GRGS, le calcul des paramètres de rotation de la Terre (ERP : coordonnées du pôle x , y et UT1) par le *Bureau international de l'Heure* (BIH)⁶, établi à l'Observatoire de Paris, était basé sur une combinaison mondiale⁷ des observations de latitude et de temps obtenues par des instruments astrométriques de précision (75 en 1970) observant les étoiles (astrolabe de Danjon, tube zénital photographique, etc.). L'algorithme de calcul tenait compte du poids attribué aux stations et la conservation du pôle de référence était réalisée par une méthode statistique (Feissel 1980). La précision de la série continue des ERP, tous les 5 jours, était de l'ordre de 0,01'' pour x , y et de 0,001 s pour UT1.

Le développement du système de navigation américain Transit, utilisant des observations Doppler de satellites artificiels, fut une étape décisive pour l'amélioration de la détermination des ERP. Le *Naval Weapons Laboratory* (NWL), laboratoire de recherche de *Dahlgren* en Virginie, déterminait notamment des éphémérides précises des satellites Transit, qui leur permit une estimation simultanée des coordonnées du pôle (Anderle & Beuglass 1970). Afin d'étudier la potentialité de cette technique pour la détermination du mouvement du pôle, le

⁶ Service international, rattaché depuis 1919 à l'UAI, l'UGGI et l'URSI (Union radioscopique internationale), d'abord uniquement consacré à l'heure, puis a étendu ses activités au mouvement du pôle et au système de référence terrestre.

⁷ A noter que le *Service International du Mouvement du Pôle* (SIMP/IPMS), dont le bureau central était à Mizusawa, avait également développé une solution globale.

GRGS organisa l'expérience TRAPOL, avec la participation du BIH et du CNES et en coopération avec le NWL qui leur fournissait les éphémérides précises du satellite observé. Trois stations françaises ont ainsi effectué des observations Doppler du satellite Transit 1967-92A, en avril et mai 1972, puis de septembre 1973 à juillet 1974, permettant au GRGS d'acquérir une compétence dans l'utilisation de cette technique pour la détermination des ERP et de la comparer avec la technique astrométrique classique.

Après un certain nombre de tests, le BIH commença dès 1973 à utiliser ces déterminations Doppler de manière opérationnelle, en plus des données astrométriques. En parallèle, d'autres techniques spatiales ont commencé à fournir des estimations de la rotation de la Terre, à savoir la télémétrie laser sur satellites et sur la Lune, ainsi que la radio interférométrie à très longue base, qui furent introduites progressivement dans le traitement du BIH à partir de 1982 (voir Fig. 1).

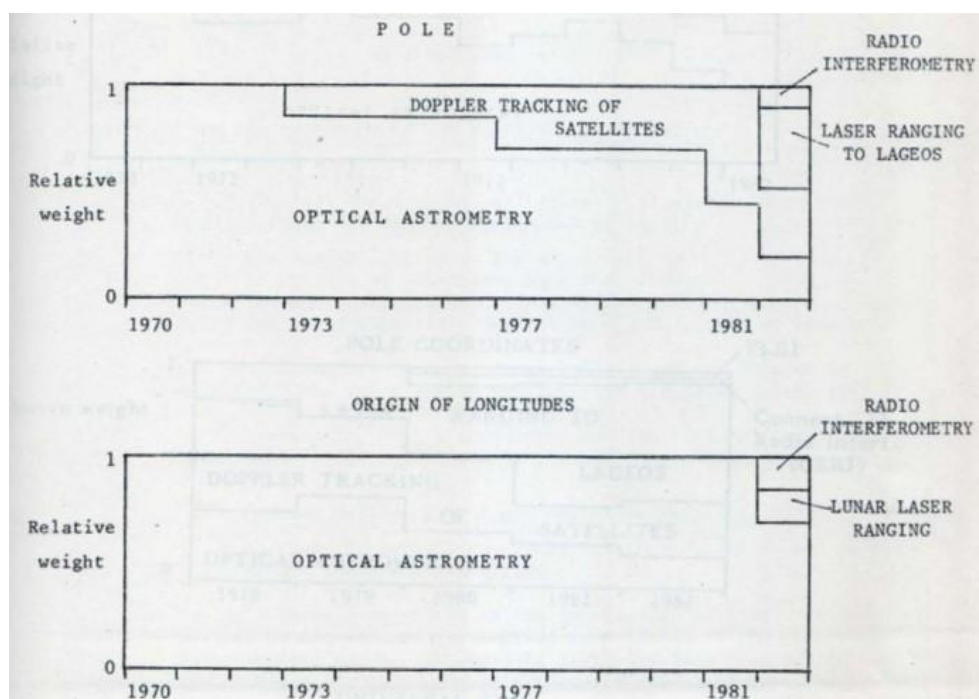


Figure 1 : Introduction successive des techniques dites de géodésie spatiale dans la détermination des paramètres de rotation de la Terre (figure extraite du Rapport annuel du BIH pour 1982).

Du Bureau international de l'Heure au Service international de la rotation de la Terre et des systèmes de référence

Les équipes du GRGS ont pris une part active à la création du service international IERS, qui a remplacé le BIH en 1988, deux services auxquels ces équipes ont largement contribué (et contribuent) depuis l'existence du GRGS.

Le projet international MERIT (Monitoring of Earth Rotation and Inter-comparison of Techniques), formellement soutenu par l'UGGI, en particulier par l'Association Internationale de Géodésie (IAG), lors de l'Assemblée générale de Canberra en 1979, a eu pour but de comparer les techniques susceptibles de contribuer à la détermination de la rotation de la Terre. L'un des objectifs fut de stimuler les observations des diverses techniques à travers l'organisation de deux campagnes internationales: "Short campaign", du 1er août au 31 octobre 1980 et "Main campaign", du 1er septembre 1983 au 31 octobre 1984 (Feissel 1986).

Ces campagnes donnèrent lieu à une organisation complexe avec de multiples intervenants, dans laquelle l'équipe « Rotation de la Terre » du BIH joua le rôle de centre de coordination. En 1988, le projet MERIT permit de dégager une série de recommandations, soumises à l'UAI et l'UGGI (dont l'IAG). La principale recommandation concernait la mise en place d'un nouveau service international, ayant la mission de mesure globale de la rotation de la Terre et de maintenance des référentiels terrestre et céleste internationaux.

Ces mesures aboutirent à la création de l'*International Earth Rotation Service* (IERS), regroupant un bureau central, un comité directeur, des observatoires et des centres de coordination associés aux différentes techniques d'observation retenues. Ce service entra en activité 1^{er} janvier 1988, remplaçant le BIH⁸ dans ses activités astronomiques, géodésiques et géophysiques, et, parallèlement, le service IPMS (voir note 3) cessa son activité. A son origine, les techniques retenues comprenaient uniquement la télémétrie laser et la radioastronomie (par VLBI), du fait que l'astrométrie optique et le système Transit s'étaient révélés beaucoup moins précis. Le GPS étant alors dans une phase de développement, son usage n'entrera dans l'IERS qu'au milieu de la décennie 1990. Une activité de suivi de la dynamique de l'atmosphère, puis des océans et des autres couches fluides qui influencent la rotation de la Terre, sera introduite entre 1990 et 1997. L'IERS a été renommé, en 2002, *International Earth Rotation and Reference systems Service* (en conservant le même sigle), pour insister sur l'importance de sa mission concernant la définition et la réalisation des systèmes de référence terrestre et céleste, ainsi que de leur relation, via les ERP.

A sa création, la coordination scientifique et administrative de l'IERS était assurée par un Bureau central, résidant à Paris, dans le cadre d'une collaboration tripartite entre l'Observatoire de Paris (rotation de la Terre), le Bureau des longitudes (système céleste) et l'IGN (système terrestre). Depuis la dernière réorganisation de l'IERS en 2000, qui a notamment créé des centres de produits, l'Observatoire de Paris a la responsabilité du suivi de la rotation terrestre (*IERS Earth orientation Center*) et partage avec l'*US Naval Observatory* celle du système de référence céleste international (*IERS ICRS Center*) et des celle des conventions (*IERS Convention Center*), tandis que l'IGN conserve celle du système de référence terrestre international (*IERS ITRS Center* et *ITRS Combination Centre*). Le nouveau bureau central, confié au *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG) allemand, est responsable de la gestion générale de l'IERS, la coordination de ses activités, ainsi que de la documentation et l'archivage des produits.

Progrès accomplis dans la connaissance de la rotation de la Terre

La connaissance de la rotation de la Terre a bénéficié de l'amélioration considérable de la précision et de la résolution des observations astro-géodésiques modernes, ainsi que de la qualité des systèmes de référence obtenue grâce à ces techniques. La figure 2 montre l'amélioration de la précision de la détermination des paramètres de rotation de la Terre (UT1 et coordonnées du pôle) depuis 1972

⁸ En parallèle de la création de l'IERS en 1988, la responsabilité du Temps atomique international a été confié au *Bureau international des poids et mesures* (BIPM).

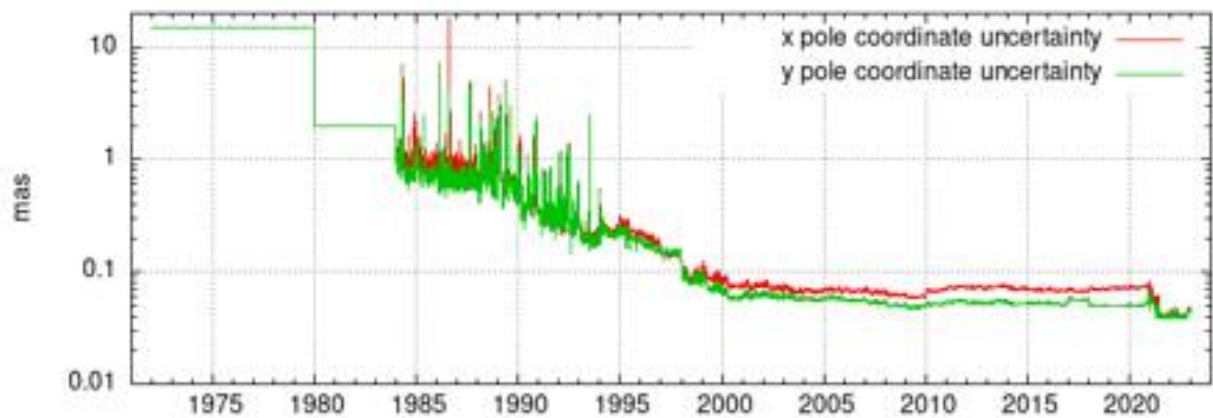
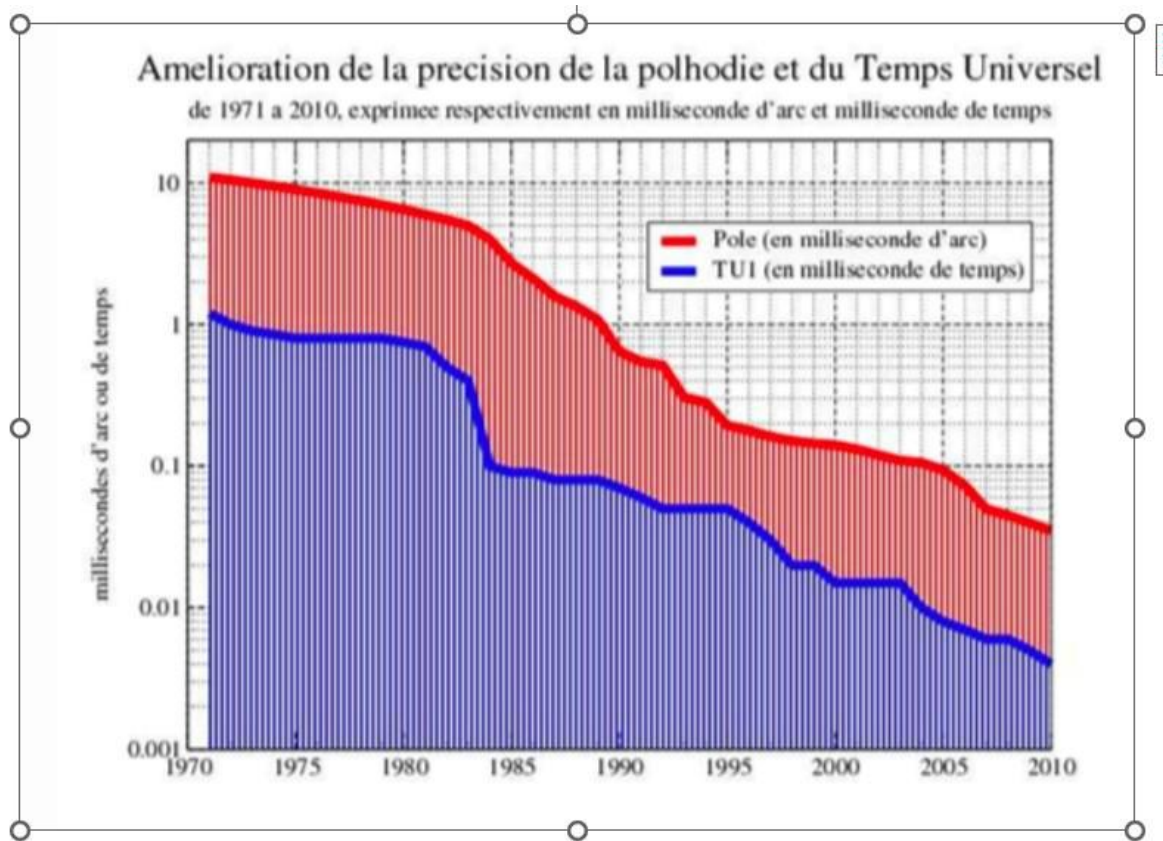


Figure 2 : Amélioration de la précision des coordonnées du pôle et de UT1 depuis 1972.

L' *IERS Earth orientation Center* (à l'Observatoire de Paris) a la responsabilité de la publication de la série temporelle de l'IERS, notée C04, des paramètres de rotation de la Terre, qui doit être maintenue en cohérence avec les dernières réalisations de l'ICRS et de l'ITRF (voir par exemple Bizouard et al. 2019).

La figure 3 montre d'une part la courbe décrite par le pôle sur la Terre, déduite des observations de géodésie spatiale et, d'autre part, les variations observées (de 1972 à 2022) de la durée du jour (lod) par rapport à 86 400 s. A noter que les variations de la lod, qui ont été déterminées exclusivement à partir d'observations optiques jusqu'en 1990, sont déterminées depuis, sur une base routinière, uniquement par le VLBI.

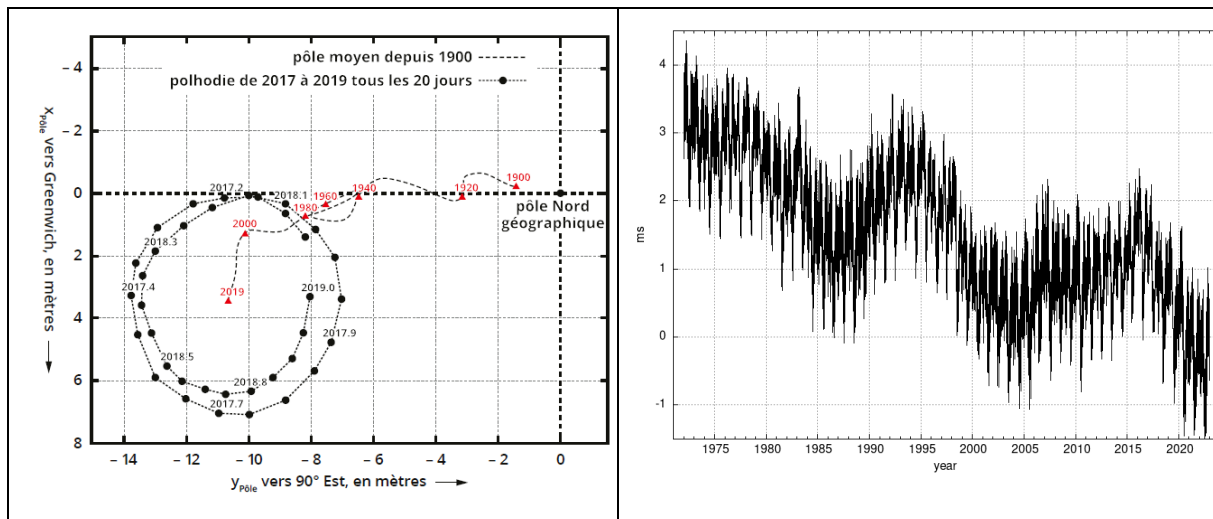


Figure 3 : A gauche - Polhodie 2017-2019 déterminée par quatre techniques différentes et pôle moyen depuis 1900 (unité : m). A droite - Variations de la durée du jour de 1971 à 2022 (unité: ms) déterminée par VLBI (IERS Product Center, Paris).

Grâce à l'amélioration de l'exactitude des déterminations des ERP, associée à l'utilisation des bases de données internationales de moments cinétiques atmosphériques, océaniques et hydrologiques, des progrès considérables ont été accomplis en 50 ans sur la connaissance des diverses fluctuations de la durée du jour (séculaire, irrégulières et décennales, zonales, saisonnières, intra-saisonnières, à courtes périodes, diurnes et sub-diurnes) et du mouvement du pôle (terme de Chandler, terme annuel, terme séculaire, de périodes décennales, diurnes et sub-diurnes). Cela a permis de mieux comprendre et de mieux prendre en compte les mécanismes physiques associés. Ainsi, par exemple, les fortes corrélations avec l'atmosphère ont été précisées (de Viron et al., 1999), les contributions atmosphériques à la nutation ont été calculées (Bizouard et al. 1998), le lien entre gravimétrie et mouvement du pôle a pu être testé (Seoane et al. 2009) et certaines propriétés du mouvement du pôle ont été précisées (Bizouard et al. 2011). Des modèles toujours plus précis ont été développés pour la correction des effets prédictibles, tels les termes dus aux marées océaniques, aux variations zonales, ou à la triaxialité de la Terre, ainsi que des modèles empiriques pour la nutation libre du noyau (*Free core nutation*).

Ces équipes sont également à l'origine des nouveaux concepts (Guinot 1979, Capitaine et al. 2000), adoptés en 2000 par l'UAI et l'UGGI, qui permettent de définir avec une grande exactitude les paramètres de rotation de la Terre (mouvement du pôle, UT1 ou durée du jour, et écarts au pôle céleste) en utilisant une origine non-tournante sur l'équateur en remplacement de l'équinoxe et les coordonnées célestes du Pôle en remplacement des paramètres classiques de précession-nutation.

De plus, grâce à un effort international important, auquel le GRGS a largement participé, la théorie de la précession-nutation adoptée par l'UAI a été grandement améliorée (Souhay & Kinoshita 1997, Souhay et al. 1999, Dehant et al. 1999, Mathews et al. 2002, Capitaine et al. 2003). La précision du modèle a été réduite de de 0.1"/cy à 100 μ as/cy pour la précession, et de 10 mas à 10 μ as pour les amplitudes de nutation (Capitaine et al. 2009).

La figure 4 montre les écarts, de 1985 à 2021, entre la position du pôle céleste déterminés par VLBI et les modèles successifs (UAI 1976/1980 et UAI 2006/2000, respectivement) de précession-nutation. La comparaison des deux graphiques montre ainsi : 1) l'amélioration, de 1975 à 2022, de la précision des observations du déplacement du Pôle céleste dans l'espace, et 2) l'amélioration du modèle de précession-nutation utilisé comme référence dans la réduction des observations (modèle UAI 1976/1980 à gauche, puis modèle UAI 2000/2006 à droite), qui est reflété par le changement d'échelle en ordonnée ainsi que par la disparition des termes périodiques et séculaires entre la courbe de gauche et la courbe de droite.

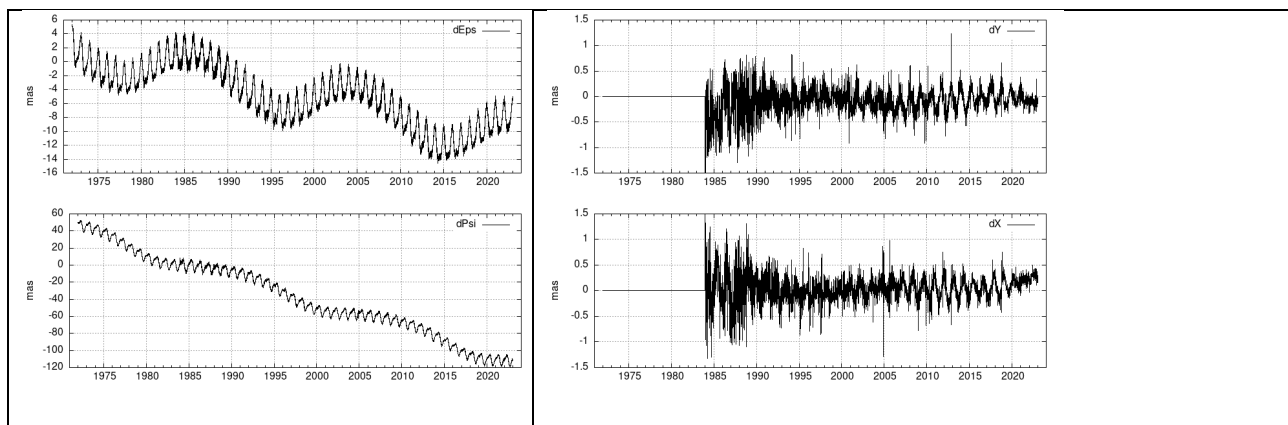


Figure 4 : Écarts, de 1985 à 2021, entre la position du pôle céleste observée par VLBI et le modèle UAI de précession-nutation (modèles UAI 1977/1980 à gauche et UAI2006/2000 à droite). (IERS Product Center, Paris)

A noter que la version UAI 1976/1980 (à gauche) utilise les paramètres classiques de précession-nutation qui se rapportent à l'équinoxe et l'écliptique de la date, tandis que la version UAI 2006/2000 (à droite) utilise les nouveaux concepts UAI 2000 de coordonnées (X, Y) du pôle céleste intermédiaire dans le système de référence céleste géocentrique, GCRS, déduit de l'ICRS.

3.8.3 Le système de référence terrestre

Les équipes du GRGS sont à l'origine des nouveaux concepts de repère terrestre et de sa réalisation par l'IERS, qui ont été adoptés par l'UGGI et l'AIG en 1991.

Naissance d'un repère terrestre international de référence réalisé par géodésie spatiale

Le BIH fournissait à partir de 1967 des valeurs du mouvement du pôle et UT1 selon un algorithme traitant des mesures astrométriques (UT et latitude) exprimées dans un système cohérent dit « 1968 BIH system ». Le système de référence terrestre rattaché à ces déterminations était le système dit « CIO-BIH », système géocentrique dont l'axe Z passait par le pôle de référence CIO. Ce système était notamment réalisé par le repère constitué de l'ensemble des stations astrométriques contribuant au BIH, avec leurs coordonnées astronomiques associées, c'est-à-dire les directions des verticales locales à chaque station. Depuis sa création, le rapport annuel du BIH donnait chaque année la liste de ces coordonnées.

Un changement fondamental de la réalisation du système de référence terrestre a accompagné l'émergence de la géodésie spatiale. C'est dans le cadre de la campagne internationale MERIT et du groupe de travail COTES, qui permirent d'évaluer l'apport de la géodésie spatiale à la détermination de la rotation de la Terre (Wilkins 1988), que fut défini un nouveau type de réalisation du système de référence terrestre international, jusqu'alors assuré par les mesures astrométriques. A l'initiative de B. Guinot, Directeur du BIH, les concepts de réalisation d'un repère terrestre constitué de positions de stations de géodésie spatiale furent dégagés (Boucher & Feissel 1983). Ces concepts et la méthode d'analyse furent présentés lors d'une réunion internationale à Sopron en 1984.

Cette solution fut la première mise en application de la méthode mentionnée, utilisant deux solutions VLBI (NGS et JPL), une solution laser Lune (JPL), une solution laser satellite (CSR) et une solution Doppler (stations déterminées avec des éphémérides précises Transit et archivées par la DMA). Ainsi, dès 1984, un repère terrestre combiné, appelé BTS84, a été obtenu, dans le cadre des activités du BIH, qui jouait le rôle d'un centre de coordination pour la campagne internationale MERIT, en utilisant des coordonnées des stations issues des observations VLBI, LLR, SLR et Doppler/Transit ((Boucher & Altamimi 1985, Boucher & Feissel 1985). De 1984 à 1987, trois autres réalisations du repère de nouveau type avaient été publiées par le BIH (BTS85, BTS86 et BTS87) jusqu'à la création de l'IERS par l'UGGI et l'UAI. En parallèle l

C'est dans le nouveau cadre de l'IERS que fut déterminée la réalisation primaire du nouveau Système international de référence terrestre, initialement nommé *IERS Terrestrial Reference System*, qui reçut finalement sa désignation actuelle, *International Terrestrial Reference System*, et le nom de repère de référence international (*International Terrestrial Reference frame*, ITRF) fut alors adopté pour les futurs produits de l'IERS. L'idée de base de l'ITRF est de combiner les positions et les vitesses de stations calculées par différents centres d'analyse, en utilisant les observations des techniques spatiales : VLBI, télémétrie laser sur satellite (SLR), le Global Positioning System (GPS) et le Doppler Orbitography Radio-Positioning Integrated by Satellite (DORIS). La première réalisation primaire publiée par l'IERS, l'ITRF88 (voir Fig. 5), assura la continuité avec le BTS87, notamment pour son orientation.

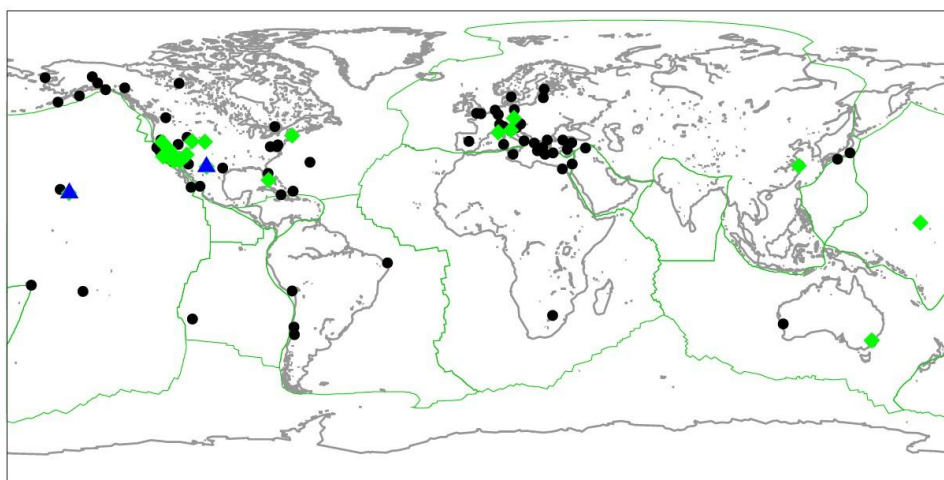


Figure 5 : Carte des sites ITRF88 avec colocations (1, 2 ou 3 techniques)

Les réalisations successives de l'ITRS

Après l'adoption, en 1991, du système international de référence terrestre (ITRS) par l'UGGI - qui en a donné les caractéristiques - et de sa réalisation (ITRF), ce système a donné lieu à une série de réalisations successives par le centre ITRS (<http://itrf.ign.fr>), hébergé par l'IGN, comme combinaison de repères de référence individuels issus du traitement des observations des différentes techniques de géodésie spatiale. Ces réalisations ont été en permanente évolution, tant sur les données utilisées que sur le modèle utilisé pour la réalisation.

Depuis la création du GRGS, quatorze versions successives de l'ITRF ont été publiées, de l'ITRF88 à l'ITRF2020 (voir par ex Altamimi et al. 2002, 2011, 2023 et Altamimi & Guinot 2009).

A chaque réalisation correspond plusieurs années supplémentaires d'observations, de nouveaux sites ajoutés au réseau ITRF, de nouveaux sites de colocalisation, des améliorations des stratégies de traitement des différentes techniques et des solutions retraitées auto-consistantes. Ainsi, chacune de ces réalisations est une amélioration et un remplacement de la précédente. L'ITRF2020 en particulier est en repère de référence augmenté de fonctions paramétriques décrivant les mouvements non-linéaires des stations: déplacements saisonniers (annuels et semi-annuels) et déformations post-sismiques pour les stations qui ont subi des tremblements de Terre majeurs.

A partir de l'ITRF 2005, ce repère est construit en utilisant des séries temporelles de positions de stations et de paramètres de rotation de la Terre, permettant ainsi d'assurer une très bonne cohérence avec l'ICRS. Une série temporelle par technique a été considérée : journalière dans le cas de la technique VLBI et hebdomadaire dans le cas des techniques satellitaires (SLR, GPS et DORIS). La figure 6 montre l'amélioration des erreurs formelles en position et vitesse entre trois solutions successives de l'ITRF.

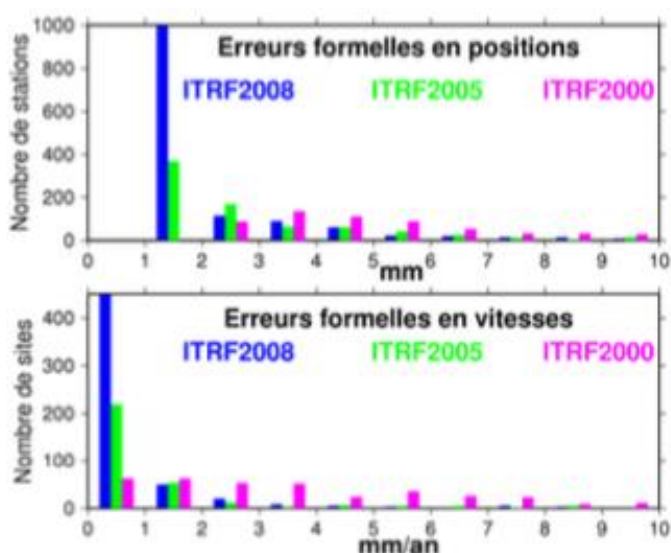


Figure 6 : Comparaison des erreurs formelles en position (en mm) et en vitesses (en mm/an) entre les trois solutions successives ITRF 2000, ITRF 2005 et ITRF2008.

La figure 7 montre le réseau de stations de l'ITRF 2020, avec l'indication des quatre techniques qui y contribuent, ainsi que l'augmentation du nombre des sites avec colocations par rapport à ceux de l'ITRF88 (Fig. 5).

La cohérence de l'ITRF avec les modèles géophysiques, comme par exemple, les prédictions du modèle d'ajustement isostatique global (GIA), s'améliore avec les versions successives de l'ITRF (Métivier et al. 2020).

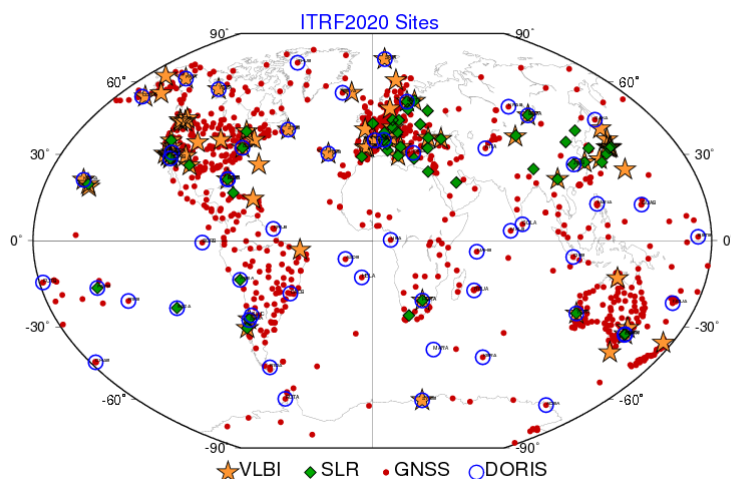


Figure 7 : Carte des sites ITRF2020 mettant en avant les sites DORIS, SLR et VLBI colocalisés avec GNSS.

En 2007, une résolution de l'UGGI a complété les résolutions de 1991 pour les rendre compatibles avec les résolutions 2000 de l'UAI sur les systèmes de référence dans le cadre de la relativité générale ; cette résolution adoptée officiellement l'ITRS pour tous les travaux scientifiques de sa communauté.

L'ITRS a récemment acquis une reconnaissance mondiale plus large puisqu'il a été adopté en 2011 par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) pour toutes les applications météorologiques et qu'il a fait l'objet en 2015 d'une résolution de l'Assemblée générale des Nations unies reconnaissant l'adoption de l'ITRF par la communauté géodésique mondiale.

3.8.4 Le système de référence céleste

Jusqu'en 1997, le système de référence céleste de l'UAI était le référentiel optique FK5, basé sur les observations d'étoiles obtenues par les instruments méridiens. Ce référentiel souffrait de nombreuses imperfections, du fait de la limitation de la précision des observations due à l'atmosphère, de l'effet des erreurs sur les mouvements propres des étoiles, ainsi que sur le modèle de précession-nutation et des erreurs zonales du catalogue. De plus, le référentiel était attaché au pôle de rotation et à l'équinoxe d'une époque de référence, ce qui le liait à la rotation de la Terre et à son mouvement orbital.

L'observation VLBI de radiosources extragalactiques a donné la possibilité de réaliser au mieux un ensemble de directions fixes dans l'Univers, permettant ainsi une amélioration significative de la réalisation d'un système de référence inertiel. De tels développements ont été réalisés

en parallèle avec les missions spatiales Hipparcos et Gaia, dont l'un des objectifs est la réalisation d'un système de référence céleste.

Le GRGS a été impliqué dans ces deux approches très différentes mais complémentaires.

Naissance d'un système céleste international de référence réalisé par des radiosources extragalactiques

La VLBI astro-géodésique a été mise en œuvre, dans les années 1970, dans le cadre de programmes à vocation géophysique, mais des programmes spécifiques ayant pour but la réalisation de catalogues de coordonnées de radiosources extragalactiques ont été entrepris aux Etats-Unis, en coopération avec la communauté scientifique internationale.

En 1987, le BIH a pris l'initiative de publier un catalogue de positions de quasars, résultant de la combinaison des positions obtenues par divers groupes (Arias et al. 1988). A partir de 1988, l'IERS a poursuivi ces travaux expérimentaux en réalisant chaque année un catalogue combiné à partir de l'ensemble des catalogues individuels. Ces catalogues étaient dans le système du FK5, mais la cohésion interne des positions obtenues par VLBI, bien meilleure que celles des positions du FK5, ainsi que l'absence de mouvements propres décelables, ont incité à concevoir un système de référence céleste autonome (Arias et al., 1995).

Prenant en considération le succès de ces efforts expérimentaux, l'UAI a recommandé en 1991 d'attacher le futur repère céleste de référence aux directions de radio-sources extragalactiques, en précisant que l'origine de ce repère serait le barycentre du système solaire, l'axe polaire étant proche de l'axe de rotation de la Terre le 1er janvier 2000 et l'origine des ascensions droites proche de l'équinoxe à cette date. L'UAI a ensuite adopté, en 1994, une liste de 600 sources radio extragalactiques « de définition », et a créé un groupe de travail, auquel des équipes du GRGS ont participé, pour définir les positions de ces sources et déterminer la relation de ce repère extragalactique avec un repère optique défini par les étoiles.

Suivant les recommandations de ce groupe de travail, l'UAI a adopté en 1997, le Système céleste international de référence (ICRS : *International Celestial Reference System*), tel qu'il est décrit par la Résolution de l'UAI de 1991 sur les repères de référence et tel qu'il est défini par l'IERS, ainsi que sa réalisation, le Repère de référence céleste international (*International Celestial Reference Frame*, ICRF), sa contrepartie optique, HCRF, étant le catalogue Hipparcos publié par l'ESA.

La responsabilité de la maintenance de ce système a été confiée à l'*ICRS Product Centre*, le Service international VLBI (IVS), centre technique de l'IERS pour le VLBI, participant de manière routinière à la réalisation et à la maintenance de l'ICRS, notamment par la coordination des programmes d'observation des radiosources pour l'ICRF.

Les réalisations successives de l'ICRF

La première réalisation du repère international de référence céleste (Ma et al. 1998), adoptée par l'UAI en 1997, notée ICRF, ou ICRF1 (voir Fig. 8), représentait une amélioration considérable par rapport au catalogue d'étoiles FK5, jusqu'alors référence officielle de l'UAI. Il comporte 608 sources radio extragalactiques, dont 212 « sources de définition » avec des

incertitudes de coordonnées de l'ordre de 0.4 mas. L'UAI a également adopté le catalogue Hipparcos comme la réalisation primaire de l'ICRS dans le domaine optique.

L'amélioration de l'ICRF a exigé une observation suivie des sources primaires pour s'assurer de leur qualité (absence de structure apparente variable) ainsi qu'une recherche systématique d'autres sources permettant une densification. Une décision capitale, prise en 1991, est que toutes les améliorations seraient apportées en appliquant une condition de non-rotation globale. De nombreuses études, telles par exemple celle de Lambert et Gontier (2009), ont contribué à une meilleure sélection des sources.

Une amélioration significative a été apportée par la deuxième réalisation de l'ICRS, l'ICRF2 (Fey et al. 2015 ; voir Fig. 8), adoptée par l'UAI en 2009, qui comporte cinq fois plus de sources que l'ICRF1, a une stabilité des axes deux fois meilleure et une précision optimale deux fois meilleure.

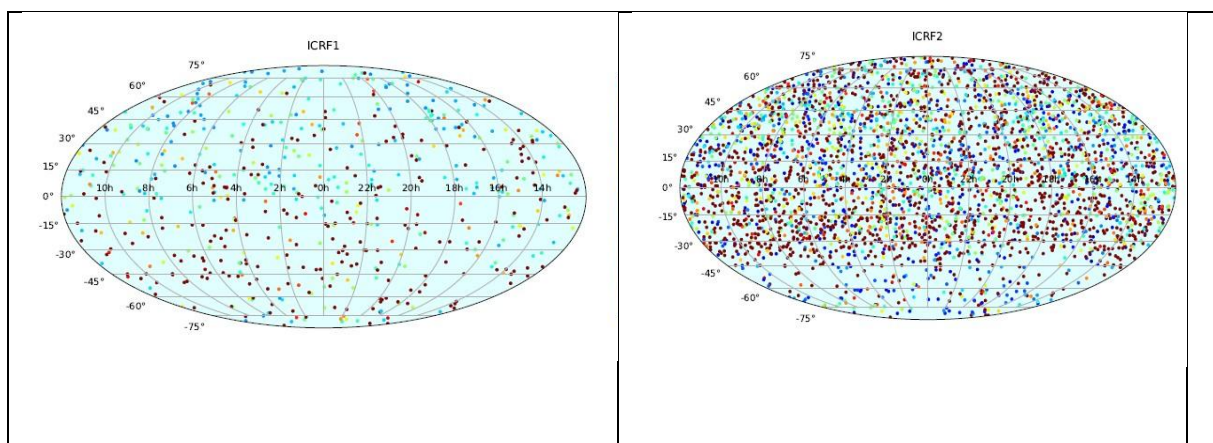


Figure 8 : Cartes du ciel représentant les sources de l'ICRF1 (1997) à gauche et celles de l'ICRF2 (2009) à droite

La troisième version de l'ICRF, ou ICRF3 (Charlot et al., 2020 ; voir Fig. 9), adopté comme repère fondamental par l'UAI en 2018, est constitué des coordonnées de plus de 4500 radiosources extragalactiques à 8 GHz, dont 303 portent les axes du repère. Les meilleurs précisions de position sont de 30 microsecondes de degré. Il donne également les positions de 824 sources à 24 GHz et 678 sources à 32 GHz.

Outre l'aspect multifréquence, ce nouveau repère apporte de nombreuses améliorations par rapport à son prédécesseur. L'erreur médiane de l'ICRF3 est diminuée de façon significative par rapport à celle de l'ICRF2. Par ailleurs, le renforcement du réseau VLBI de l'hémisphère sud et le déploiement partiel du réseau VGOS a permis de densifier l'hémisphère austral rendant le catalogue beaucoup plus homogène en terme d'erreur sur les positions.

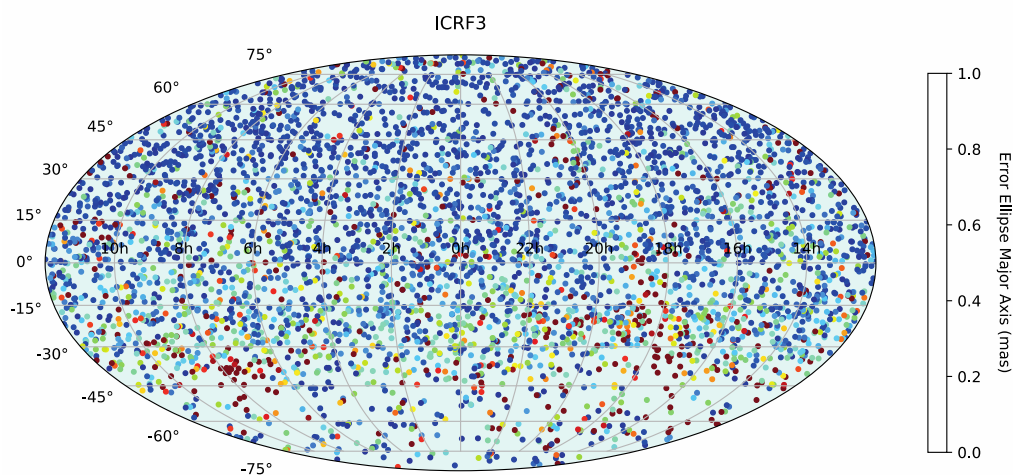


Figure 9 : Carte du ciel représentant les sources de l'ICRF 3 (2019), montrant les 4536 radiosources observées à 8 GHz; la couleur traduit la précision de leurs coordonnées.

Réalisation de l'ICRS en optique

Avec la réalisation de l'ICRF dans le domaine radio, la précision a été privilégiée aux dépens de l'accessibilité directe pour l'astronomie classique dans le visible ou le proche infra-rouge. La technique VLBI était la seule permettant de réaliser un système global, couvrant l'ensemble du ciel, avec une qualité astrométrique meilleure que le millième de seconde de degré dès les années 1990. La contrepartie du système dans le visible ne pouvait être qu'une réalisation secondaire, rattachée au mieux à l'ICRF radio au moyen de quelques sources communes ou par des sources intermédiaires observables avec les deux techniques.

Le système de référence optique HCRF (Hipparcos Celestial Reference System), réalisation en optique de l'ICRS, reste un système stellaire sans source extragalactique ; il doit donc être rattaché à l'ICRF pour assurer son absence de rotation globale par rapport aux quasars (Kovalevsky et al. 1997).

Avec Gaia (Gaia 2016), la situation n'est pas la même, puisque cette mission produit des solutions astrométriques qui sont de véritables réalisations d'un repère de référence céleste autonome et totalement en accord avec les principes fondateurs de l'ICRS. Le système est autonome, car l'absence de rotation globale au sens cinématique est assurée par l'observation directe d'un grand nombre de quasars, et que l'on contraint la solution pour que leur système de mouvements propres ne laisse pas de mouvement d'ensemble (Gaia Collaboration et al., 2018). Pour des raisons de continuité métrologique, les axes du système sont alignés au mieux sur ceux de l'ICRF3 en utilisant les sources communes, mais cet alignement n'a aucune raison physique particulière.

Ainsi, pour la première fois, du fait de la publication quasi-simultanée de l'ICRF3 et de la deuxième remise, *Gaia Data Release 2* (Gaia-DR2, 2018) du catalogue de Gaia réalisé à partir de la mission Gaia, le catalogue VLBI a pu être comparé à un catalogue réalisé par une technique indépendante avec une précision comparable. Le système de référence associé au catalogue de Gaia est le Gaia-CRF2, comprenant près de 560 000 QSOs (Quasi-Stellar Object ou quasars), qui sont distribués de façon relativement uniforme sur l'ensemble du ciel, à

l'exception d'une zone de quelques degrés de latitude au nord et au sud du plan galactique. Ce sous-ensemble donne déjà un accès direct à l'ICRF dans le domaine optique, avec une source par degré carré et une précision tout à fait comparable à celle de la réalisation radio. Avec la troisième remise, le Gaia-CRF3 (Gaia-CRF3 2022, Gaia-DR3, 2023), qui comprend 1,6 millions d'objets, donne pour les contreparties des sources de l'ICRF3, une précision médiane qui coïncide avec celle du VLBI (0,197 mas), ce qui permet une étude extrêmement intéressante des décalages en positions radio et optique en termes de processus d'émission dans les noyaux actifs de galaxie.

Réalisation dynamique de l'ICRS

Le raccordement à l'ICRS du système de référence dynamique réalisé par un éphéméride planétaire ou lunaire donne accès à une réalisation dynamique de l'ICRS. Des raccordements de grande précision, utilisant en particulier, des mesures de télémétrie laser sur la Lune (LLR), ont été obtenus par Folkner et al. (1994) et Chapront et al. (2002).

3.9 Temps Frequence et physique fondamentale

Préambule

De nombreux domaines relevant du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS) sont concernés par la Relativité Générale (RG), comme les systèmes de référence céleste et terrestre, la métrologie du temps et des fréquences, la géodésie, le positionnement et la navigation par satellites, et la dynamique dans/du système Solaire. Ce sont aussi les thèmes fondateurs du GRGS dont il a été célébré les 50 ans d'existence en février 2021, et qui font précisément l'objet d'un ensemble de chapitres en cours d'assemblage. Celui-ci sur la géodésie, le temps-fréquence et la physique fondamentale propose de rassembler les travaux menés par le GRGS sur les différentes manières de tester la Gravitation, notamment en astronomie fondamentale, géodésie spatiale et temps-fréquence.

On peut traiter ces différents domaines dans le cadre de la physique classique et indiquer ce qu'il faut ajouter pour prendre en compte les « effets relativistes » c'est, au plan théorique, ne pas considérer la RG comme un modèle complet de la structure de l'espace et du temps ainsi que de la gravitation et c'est, au plan pratique, prendre des risques sur l'ensemble des corrections à prendre en compte (Guinot, 1997). Les résolutions de l'UAI de 1991 et de 2000 ont conduit à nombre de réflexions et de développements afin d'adopter la RG en tant que modèle théorique (Soffel et al., 2003), aussi bien en astronomie fondamentale qu'en métrologie du temps. Aussi, tous les modèles précis mettant en jeu de la dynamique ou la propagation d'ondes électromagnétiques en présence de Gravitation sont depuis développés dans le cadre de la RG.

Il existe des motivations pour s'interroger sur la complétude de cette théorie, soit en tant que théorie de la Gravitation seule, soit lorsqu'elle doit être couplée à d'autres interactions du domaine de la physique des particules. Il existe de nombreuses façons de mettre la RG à l'épreuve de l'expérience : on peut tester un point particulier tel que le principe d'équivalence (Damour, 1996), on peut contraindre les limites sur une cinquième force, ou on peut estimer des paramètres modélisant de façon générique des possibilités de sortir du cadre de la RG. Dans ce dernier cas, les plus communs sont les paramètres post-Newtoniens (PPN) pour une théorie de la gravitation isolée (Teyssandier, 2005) et l'Extension du Modèle Standard (SME) dans le cas du couplage de la gravitation avec la physique des particules. Aussi, les chercheurs ont continué de mettre à l'épreuve trois de ses prédictions les plus fortes: l'existence des ondes gravitationnelles, la validité du principe d'équivalence (PE), et l'influence des corps massifs sur la dilatation du temps et la déviation des rayons lumineux.

C'est ainsi que l'astronomie fondamentale, la géodésie spatiale et la métrologie du temps-fréquence étant devenus des outils de plus en plus précis, il a fallu reprendre tous les modèles en prenant en compte la relativité (Boucher & Lestrade, 2005) ; inversement, ces mêmes outils sont devenus de plus en plus puissants pour tester les lois de la Gravitation dans le cadre de la RG, et plus généralement en physique fondamentale (Reynaud & Jaekel, 2008).

La communauté française a tenu un rôle majeur dans les expériences proposées pour vérifier ces trois prédictions de la relativité, à la fois au plan technologique, dans la formulation des observables et dans l'analyse des données (voir le volume 2 des *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IV-Physics*, 2001). En outre, l'animation de la communauté

française et internationale est aussi à souligner ; on peut citer ici les Journées “Systèmes de Référence spatio-temporels” de l’Observatoire de Paris, la deuxième école d’été du GRGS de 2004 consacrée à la physique fondamentale, l’école de Physique des Houches, les rencontres de Moriond, et enfin le Programme National GRAM (Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie) créé en 2010 par l’INSU/CNRS. Au plan du temps-fréquence, le Laboratoire d’Excellence FIRST-TF a créé à partir de 2012 un véritable réseau thématique pour la recherche, l’innovation, la formation et les services autour du temps et des fréquences (<https://first-tf.fr/>). Le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale avec plusieurs équipes impliquées dans l’instrumentation sol et spatiale, dans la modélisation et l’analyse des données ainsi que dans l’animation a joué un rôle prépondérant. Dans ce document, nous allons décrire une partie des développements et résultats obtenus en physique fondamentale par des chercheurs en liens avec les thèmes du GRGS, sans pouvoir prétendre à l’exhaustivité tant ils sont nombreux. Nous allons donc passer en revue un ensemble de thèmes ou de domaines, dont on trouvera les références bibliographiques à la fin.

Système solaire et astrométrie

L’approche la plus commune pour tester la gravitation dans le système solaire est l’approche post-newtonienne. Le formalisme PPN permet d’exprimer une forme assez générale des théories métriques de la gravitation respectant le PE, à condition d’être en champ faible et à des vitesses faibles, ce qui est le cas dans le Système solaire où s’exprime la géodésie spatiale ou planétaire (Reynaud & Jaekel, 2008). Sa version moderne inclut 10 paramètres mais les plus couramment testés sont γ , qui quantifie la courbure de l’espace en présence de masse et β , qui caractérise la non-linéarité de la gravité. β et γ valent 0 dans le cadre newtonien et 1 en RG (Will and Nordtvedt, 1972). Plusieurs auteurs ont donc utilisé les éphémérides planétaires, l’astrométrie avec GAIA et les observations du Very Long Baseline Interferometry (VLBI), ainsi que la trajectographie de sondes planétaires (poursuite Doppler ou télémétrie radar).

L’universalité de la chute libre a été testée avec une très grande exactitude. Bien sûr il y a les expériences de laboratoire, mais nous verrons plutôt celles menées dans l’espace avec en outre l’idée de tester l’invariance de Lorentz. Car c’est également une des pierres angulaires de la RG mais aussi du Modèle Standard de la physique des particules. Bien entendu, le laser-Lune continue de jouer un rôle très important pour tester notamment le principe d’équivalence fort, mais très récemment c’est la mission spatiale MICROSCOPE qui va le plus loin (voir section Géodésie spatiale).

Ephémérides planétaires

Les mesures dans le système solaire sont sensibles aux effets de la gravitation à double titre : (i) elles mettent en jeu la propagation d’ondes électromagnétiques dont les trajectoires peuvent être plus ou moins défléchies par la présence de masses, ce qui est caractérisé par le paramètre γ ; (ii) la dynamique des corps massifs est impactée par la non linéarité de la gravité quantifiée par β comme dans le cas emblématique de l’avance du périhélie de Mercure.

Le cadre idéal pour contraindre ces paramètres consiste à concaténer le maximum d’observations et à les intégrer dans un modèle dynamique global du système solaire ; c’est ce qui est réalisé par exemple pour l’élaboration des éphémérides INPOP. Fienga et co-auteurs ont mené une étude très approfondie à partir de la version INPOP17a pour contraindre ces

deux paramètres ainsi que d'autres non décrits ici. Les résultats obtenus sont (Fienga et al., 2015) :

$$\boldsymbol{\gamma} - \mathbf{1} = (-1.55 \pm 5.01) \times 10^{-5} \text{ et } \boldsymbol{\beta} - \mathbf{1} = (0.00 \pm 6.90) \times 10^{-5}$$

Au même titre que certains paramètres PPN, un certain nombre de paramètres du modèle SME peuvent être contraints au moyen de l'observation de la dynamique planétaire. Idéalement cela devrait être fait dans le cadre de l'estimation du modèle dynamique global mais Hess et co-auteurs ont recherché une trace d'une violation de l'invariance de Lorentz en utilisant les avances de périhélie des planètes calculées par d'autres auteurs lors de l'élaboration d'éphémérides globales. Ils n'ont trouvé aucune violation tout en améliorant la contrainte d'un ordre de grandeur sur certains coefficients du modèle SME (Hess et al., 2015).

Du point de vue de la physique des particules, la gravitation pourrait avoir comme médiateur un boson de masse nulle, le graviton. Il a été proposé qu'une éventuelle masse du graviton modifie la métrique de la Relativité Générale par un terme d'amortissement de la forme e^{-R/λ_G} où $\lambda_G = \frac{h}{mc}$ est la longueur d'onde de Compton associée au graviton. Cette modification devrait affecter le mouvement des corps du Système solaire. Bernus et co-auteurs (Bernus et al., 2019) ont utilisé les éphémérides INPOP (Viswanathan et al., 2018) prenant en compte de nombreuses observations et en particulier la radio-science de la sonde Cassini pour apporter une limite supérieure à la masse du graviton compatible avec toutes ces observations. Ils ont obtenu une limite basse de 1.83×10^{13} km pour la longueur de Compton, correspondant à une limite haute de 6.76×10^{-23} eV/c² pour la masse du graviton.

Cette contrainte se situe au même niveau que celle apportée par les instruments VIRGO au plan européen et LIGO aux Etats-Unis, dans un contexte complètement différent puisqu'il s'agit là de réaliser une détection directe des ondes gravitationnelles prédites par la RG (Rüdiger et al., 2001). La France et l'Italie sont à l'origine de VIRGO (interféromètre de Michelson ; Caron et al., 1997), et nos collègues A. Brillet (UMR Artemis/OCA) et T. Damour (IHES) ont été médaillés d'or du CNRS en 2017 pour ces recherches.

Laser Lune

Au lieu de comparer la chute de masses d'épreuves (expérience d'universalité de la chute libre), on peut comparer les chutes de différents corps célestes (Nordvedt, 1968). Ceci offre un avantage important, car ils sont peu affectés par les effets non-gravitationnels ce qui évite de devoir recourir à des montages expérimentaux sophistiqués comme dans le cas de MICROSCOPE en orbite autour de la Terre. En revanche la difficulté est de disposer de mesures suffisamment précises de leur mouvement.

Dans ce contexte, il est remarquable que la télémétrie laser permette de mesurer la distance entre une station terrestre et des réflecteurs posés sur la Lune (trois missions Apollo et deux rovers soviétiques équipés de réflecteurs français) avec une précision qui s'est énormément améliorée depuis les années 1970, jusqu'au niveau sub-centimétrique aujourd'hui (Courde et al., 2017 ; Chabé et al., 2020). Cela permet de comparer les chutes de la Terre et de la Lune sous l'influence de l'attraction gravitationnelle du Soleil. Dans les détails, le mouvement est bien plus complexe puisqu'il met également en jeu les attractions mutuelles de la Terre et de

la Lune ainsi que les perturbations des autres planètes sans compter la forme non sphérique des corps et leur déformabilité.

Grâce à un modèle prenant en compte ces nombreux effets, Viswanathan et al. (2018) ont contraint le paramètre d'Eötvös pour la Terre et la Lune à $\eta^{SEP} = (-3.8 \pm 7.1) \times 10^{-14}$. Bien que un peu moins précise que celle apportée par la mission MICROSCOPE (voir plus loin), cette limite est très intéressante, non seulement parce qu'elle utilise une technique complètement différente, mais surtout parce qu'elle met en jeu des corps beaucoup plus massifs qui ont une énergie interne de self-gravité non négligeable. Ceci permet donc d'apporter une contrainte sur l'impact de la self-gravité sur le mouvement de chute libre ; c'est l'effet Nordvedt discuté depuis les années 1970 eu égard au développement du laser Lune aux Etats-Unis et en France (OCA).

Mission GAIA

La mission d'astronomie fondamentale GAIA de l'Agence européenne (lancée fin 2013), observe un très grand nombre d'étoiles (Prusti et al., 2016). Une fraction de ces observations suivent un chemin optique passant près du Soleil et sont donc incurvés par sa masse comme le prévoit la RG. Cette courbure est quantifiée par le paramètre PPN γ . Le grand nombre d'observations et leur précision devraient permettre de déterminer ce paramètre avec une précision inégalée, probablement meilleure que 10^6 . De plus, la déflexion attendue à cause des planètes les plus massives du système Solaire sera aussi observable ainsi que l'impact du J2 de Jupiter (Crosta & Mignard, 2006).

En plus des étoiles, GAIA observe nombre de petits corps du système Solaire, environ 360,000, avec une précision astrométriques inégalée (inférieure à 1 mas ; Mignard et al., 2007). Des simulations assez réalistes effectuées sur 5 ans avaient montré que les observations étaient en mesure de contraindre un certain nombre de paramètres de la Relativité Générale et de la dynamique (Hess et al., 2015). Les tests ont montré l'apport potentiel au J2 (aplatissement) du Soleil, au paramètre PPN β , au paramètre de Nordvedt η , à l'effet Lense-Thirring, au formalisme de la cinquième force, à une possible variation, linéaire comme périodique, de la constante gravitationnelle solaire GM, etc.

La mission GAIA n'étant pas terminée au moment de l'écriture de ces lignes, les résultats espérés ci-dessus ne sont donc pas tous publiés. Le lecteur pourra consulter les articles à propos des deuxième et troisième "data release" Gaia EDR-2 et -3.

Observations VLBI

Dans le cadre de la technique spatiale VLBI, ce n'est pas la dynamique mais uniquement la propagation du signal qui est à la base du test. Des observations VLBI de 1979 à 2015 ont été utilisées pour contraindre le coefficient \bar{S}^{TT} du modèle SME, et obtenir ainsi une amélioration d'un facteur 5 par rapport aux estimations précédentes (Le Poncin-Lafitte et al., 2016).

Géodésie spatiale

Le GRGS a démarré très tôt de nombreuses investigations en matière de relativité, à la fois sur le plan de la modélisation d'objets géodésiques (repères de référence et géoïde ; e.g. Sillard,

1996 ; Boucher & Lestrade, 2005), sur le développement d'expériences spatiales probantes (ACES/PHARAO, MICROSCOPE, ... ; voir Lemonde et al., 1999 ; Touboul et al., 2001), sur la mise au point puis sur l'utilisation de liens spatiaux optique/laser ou micro-onde à des fins de transfert de temps (GPS, LASSO, T2L2, ... ; voir Wolf & Petit, 1997 ; Fridelance & Veillet, 1995 ; Exertier et al., 2014), sur l'exploitation de la stabilité croissante des nouveaux étalons de fréquence à des fins de géodésie relativiste (e.g. Bize et al., 2005 ; Lion et al., 2017 ; Delva et al., 2017), et enfin sur la méthodologie et la formulation propre à la relativité (e.g. Wolf & Petit, 1995 ; Guinot, 1997 ; Blanchet et al., 2001).

Les objectifs scientifiques mis en avant pour développer et/ou exploiter au cours des dernières décennies des situations potentiellement riches pour la physique fondamentale, sont axés sur l'universalité de la chute libre (tests du PE), l'invariance de Lorentz (gain de plusieurs ordres de grandeur sur des paramètres du SME), l'unification des repères de référence céleste et terrestre, la géodésie physique (champ de gravité et géoïde à ± 1 cm), la métrologie du temps et des fréquences (vers une incertitude à 10^{-18} en part de fréquence), et enfin les échelles de temps atomiques et la comparaison d'horloges (à mieux que 50 ps).

Il y a eu également de nombreuses propositions d'expériences spatiales vers la NASA ou encore vers l'Agence spatiale européenne, qui sont restées infructueuses pour le moment. L'idée d'une mission spatiale du test du PE, avec une possible amélioration jusqu'à 10^{-18} , date du projet américain STEP proposé à l'Agence européenne en 1989 (groupe M2) mais qui n'a pas été retenu. D'un autre côté, la mission Space-Time Explorer and QUantum Equivalence Principle Space Test (STE-QUEST) a été candidate du groupe M3 du programme Cosmic Vision 2015-2025 de l'Agence. La mission a été élaborée pour tester le PE, mais aussi le décalage gravitationnel ("red-shift") et l'invariance locale de Lorentz (Aguilera et al., 2014). Elle n'a pas été retenue, mais une version moins coûteuse et plus mature technologiquement a été soumise en 2022 dans le cadre de l'Appel M7 (Ahlers et al., 2022). Celle-ci a franchi la première phase de sélection mais pas la seconde en revanche.

Mission MICROSCOPE

Principe d'équivalence

Le Principe d'Equivalence est un pilier de la Relativité Générale (Damour, 1996) ; c'est la théorie actuelle pour la gravitation. Cependant, c'est une caractéristique assez singulière qui n'a aucune raison de subsister dans des théories plus générales visant à étendre la gravitation pour l'unifier aux autres interactions au niveau atomique. C'est pourquoi il existe une forte motivation théorique pour tester les limites de la validité du PE. Le principe d'équivalence d'Einstein peut se décliner en plusieurs conséquences dont l'invariance locale de Lorentz et le principe d'équivalence faible (dont l'acronyme anglais est WEP) qui stipule l'universalité de la chute libre pour tous les corps indépendamment de leur composition atomique. En reprenant le formalisme Newtonien (ce qui est un peu abusif puisque le PE est formulé dans un autre cadre) cela reviendrait à l'identité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle.

Le WEP est caractérisé au moyen du paramètre d'Eötvös qui compare les accélérations a_A et a_B de deux corps A et B en pure chute libre dans un même champ de gravitation : $\eta(A, B) = 2 \frac{a_A - a_B}{a_A + a_B}$. En 2008, en raffinant le principe du pendule de torsion (L. Eötvös) le groupe de physiciens américains Eöt-Wash est parvenu à une précision de $2 \cdot 10^{-13}$ pour plusieurs couples

de matériaux (Wagner et al., 2012). Aucune violation du PE n'avait été détectée à ce niveau. L'idée d'une expérience spatiale du test du PE, avec une possible amélioration de plusieurs ordres de grandeur, est venue avec la mission MICROSCOPE. Celle-ci a été sélectionnée en 2004 par le CNES sur proposition de l'ONERA et de l'OCA, avec un objectif de 10^{-15} en utilisant des masses d'épreuve en platine et en titane (Touboul et al., 2001). La mission a été lancée en avril 2016 à 710 km.

L'idée directrice de la mission MICROSCOPE est de comparer les chutes de ces deux masses enfermées dans un satellite en orbite autour de la Terre. Plus précisément, grâce aux accéléromètres dont elles constituent le cœur, le mouvement relatif des masses est détecté par un système capacitif et maintenu à zéro par l'application de forces électrostatiques asservies pour maintenir l'équilibre. Ainsi la mesure de la tension appliquée permet de surveiller les différences d'accélération qui auraient affectées les masses en l'absence du champ électrostatique. De nombreux raffinements ont été nécessaires pour atteindre la précision visée, comme par exemple un système ultra-sensible de contrôle du satellite en rotation et en accélération.

Les analyses ont été conduites par l'OCA et l'ONERA et les premiers résultats datent de 2017, par analyse de 120 orbites (soit 8.26 jours) de chute libre. Cela a permis de démontrer que les deux masses avaient la même chute libre, à une incertitude de 2.10^{-14} (Touboul et al., 2017). Les résultats globaux utilisant l'ensemble des mesures validées, soit 1362 orbites (réparties sur 19 segments non contigus) de chute libre, ont été publiés en 2022 (Touboul et al., 2022). Ils concluent à la confirmation de la validité du WEP avec une précision (somme quadratique des erreurs statistiques et systématiques) de $2.7 \cdot 10^{-15}$. Ainsi MICROSCOPE aura réduit les contraintes sur les nouvelles théories d'environ un facteur 100. Ces résultats ont été déjà repris et exploités par différents théoriciens pour contraindre les paramètres de différents formalismes de violation, comme par exemple les paramètres de Yukawa à propos d'une hypothétique cinquième force.

Invariance de Lorentz

L'Invariance Locale de Lorentz (LLI) stipule que le résultat d'une expérience locale non-gravitationnelle est indépendante de la vitesse et de l'orientation du repère en chute libre dans lequel est réalisée l'expérience. C'est une des conséquences du PE d'Einstein. Une façon de paramétrer une violation de LLI est d'estimer des coefficients qui la représente dans le cadre de l'extension du modèle standard SME (Tasson, 2016). Le SME contient un grand nombre de coefficients ; aussi, différentes expériences menées à titre complémentaire, peuvent permettre de contraindre différentes combinaisons de ces coefficients.

L'idée de tester une violation de LLI à partir de l'expérience spatiale MICROSCOPE, donc avec les deux masses d'épreuve de l'instrument TSAGE et malgré une signature spécifique qui dépend du contexte spatial, est arrivée par (Pihan-le Bars et al., 2019). De même que la violation du WEP, une violation de LLI induirait une différence des forces électrostatiques mesurées pour maintenir les deux masses de composition identiques sur la même trajectoire. Cinq sessions de mesures de l'expérience MICROSCOPE ont été utilisées pour placer une borne supérieure sur l'amplitude d'un tel signal, ce qui a permis d'améliorer les contraintes de un à deux ordres de grandeur sur des combinaisons linéaires de coefficients du SME.

Transfert de fréquences et de temps

A partir de 1971 (14^e Conférence Générale des Poids et Mesures), était reconnue le concept d'une échelle de temps atomique internationale en complément du concept de temps astronomiques (e.g. Fig. 1). Si, au départ, les comparaisons de fréquence entre les étalons (Césium essentiellement) étaient tout à fait possibles à des distances intercontinentales, les comparaisons de temps restaient très incertaines ; et ceci soit à l'occasion du transport d'une horloge en marche, soit par la transmission unidirectionnelle de signaux électro-magnétiques (voir le système de radionavigation Loran-C, avec émetteurs terrestres fixes, ou encore l'utilisation de la réception d'impulsions de la télévision publique). Pour les comparaisons de temps à des distances intercontinentales, l'utilisation de satellites artificiels est devenue incontournable, notamment afin de développer le Temps Atomique International (TAI) et ceci pour des questions à la fois scientifiques et sociétales (Guinot & Arias, 2005).

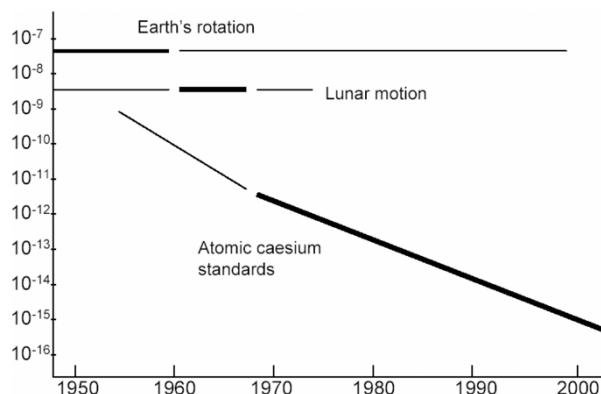


Figure 3. Exactitude relative en fréquence, selon la technique utilisée pour la définition de la Seconde.

Les techniques de transfert de temps par satellite se sont développées essentiellement à partir de questions pratiques, elles-mêmes basées sur la nécessité d'établir des systèmes de référence internationaux d'espace et de temps toujours plus exacts. Les travaux menés en France au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) ont débuté à partir d'un lien deux voies sur le satellite géostationnaire de télécommunications *Symphonie*. Ce lien micro-onde permettait donc d'éliminer les délais de propagation inhérents aux systèmes précédents et a permis d'atteindre environ ± 50 ns d'exactitude essentiellement à cause de problème de calibration des stations au sol (Brunet, 1979). On peut citer également la réception des premiers signaux du Global Positioning System (GPS) en 1983, qui ont permis de réduire nettement les incertitudes de comparaison de temps dans l'intervalle de 10 à 1 ns (Allan et al., 1985).

Le temps mesuré par une horloge idéale (au sol ou embarquée) dépend essentiellement de la gravité et de la vitesse de l'horloge selon la Relativité Générale. Avec l'augmentation de la stabilité des horloges et la qualité croissante des liens sol-satellite, il est apparu de plus en plus important d'inclure systématiquement la RG dans les différents projets et techniques comme le GPS, les télémétries laser et radar et les mesures du VLBI. Inversement, de nombreuses expériences liées à la physique fondamentale ont été proposées et/ou menées avec des horloges embarquées à différentes altitudes et/ou avec des orbites plus ou moins excentriques. En outre, des études sont menées depuis quelques années afin de faire participer des horloges ultra-stables (environ 10^{-17} à 10^{-18} en part de fréquence) à la réalisation du géoïde ou disons à celle des repères de référence d'altitudes au niveau centimétrique.

Liens micro-onde Two-Way et GNSS

Parmi les précurseurs du transfert de temps spatial, on peut citer le système "Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer" (TWSTFT) développé aux Etats-Unis dans les années

1960. Ce système utilisait les premiers satellites de télécommunication (téléphonie et télévision), tout d'abord avec *Telstar* puis avec le programme *Intelsat* fondé sur des satellites géostationnaires. Malgré la difficulté pour les participants de synchroniser leurs observations, le principal avantage de la technique résidait dans le fait de ne pas utiliser la position des horloges ou du satellite (l'effet Sagnac peut être calculé).

Entre 1978 et 1985 est arrivée la première constellation de satellites de navigation GPS, équipés avec des horloges Césium et Rubidium à bord. Mais dans le but d'atteindre au moins la précision annoncée pour le positionnement de type civil, soit ± 100 m, il a fallu tenir compte des effets relativistes (par décalage de la fréquence nominale bord prévue à 10.23 MHz). Le GPS a été déclaré opérationnel dès 1995 ; un des premiers résultats de comparaisons de temps et de fréquence au plan international est donné à environ 5 ns entre 3 laboratoires utilisant le GPS Common-View, soit en vue commune (Allan et al., 1985). L'utilisation du GPS pour comparer des horloges distantes s'est sans cesse améliorée après les premiers succès ; son utilisation croissante par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) a permis de construire une échelle de temps internationale (TAI/UTC) dont la diffusion a commencé en 1988 avec le GPS puis avec le système russe GLONASS à partir de 1996, puis enfin avec le TWSTFT à partir de 1999 (Deyoung et al., 1994).

Plusieurs campagnes ont été réalisées, notamment en Europe (Allemagne, France et Grande-Bretagne) ainsi qu'entre la France et les Etats-Unis, afin d'étudier les performances de plusieurs techniques : *i*) à une voie descendante comme le GPS (avec deux fréquences pour estimer les corrections ionosphériques), *ii*) à deux voies à porteuse micro-onde comme le TWSTFT, et enfin *iii*) avec des techniques optiques (deux voies) basée sur un laser pulsé. Car il devenait essentiel de comparer les liens GPS en Vue Commune pour la comparaison d'horloges (TAI) avec une technique indépendante (Kirchner et al., 1993). L'Observatoire de la Côte d'Azur a été impliqué très tôt dans ces technologies, possédant d'une part une base locale de temps atomique (Césium, puis maser-H) en connexion avec l'Observatoire de Paris (pour l'UTC(OP)), et d'autre part plusieurs antennes (GPS, TWSTFT, puis DORIS par la suite) ainsi que les télescopes laser investis en géodésie spatiale (Baumont & Gaignebets, 1993).

Bien entendu la relativité a été introduite, compte tenu de l'amélioration des horloges (stabilité), de la qualité des liens spatiaux, et de la répartition géographique des 200 à 300 horloges utilisées en plus de quelques étalons primaires de fréquence nécessaires pour l'exactitude (Wolf & Petit, 1995). Inversement, l'idée d'utiliser le GPS, et par la suite d'autres satellites de navigation, dans le but d'établir de nouveaux tests relativistes s'est rapidement concrétisée. A partir des informations et des produits géodésiques mis à disposition par le Service International GNSS (Global Navigation Satellite Systems) de l'AIG, l'idée d'utiliser la constellation des 24 satellites GPS distribuée sur 6 plans à 55 degrés d'inclinaison afin d'effectuer un test relativiste de $\frac{\Delta c}{c}$ est apparue très prometteuse a priori (souvent appelé test de l'isotropie de la vitesse de la lumière). Car, à partir de 8 stations au sol bien distribuées géographiquement et disposant d'un maser à hydrogène, il devenait possible de faire le test non pas sur une direction particulière mais sur un ensemble de directions dans l'espace. Les résultats donnèrent un rapport $\frac{\Delta c}{c} < 2.10^{-9}$ pour la composante dans le plan équatorial (Wolf & Petit, 1997). D'autres tests ont été programmés ensuite, notamment avec les deux satellites Galileo à orbites excentriques (Delva et al., 2018).

Liens optiques

En parallèle des développements du transfert de temps-fréquence à partir du GPS, sont apparues des expériences optiques avec une composante de physique fondamentale forte compte tenu de l'exactitude potentielle du lien laser. En France, c'est à l'OCA que s'est développée l'expérience LASSO (Laser Synchronization from Stationary Orbit) inscrite au programme de l'Agence spatiale européenne. La campagne d'observation par laser a été essentiellement menée entre la France et les Etats-Unis en utilisant le satellite géostationnaire MeteoSAT-P2 (Lewandowski et al., 1993). Les résultats ont été au niveau de moins de 1 nanoseconde (Fridelance & Veillet, 1995), suggérant ainsi le développement d'un instrument nouveau de transfert de temps par lien laser (T2L2) complètement dédié (Fridelance et al., 1997).

L'instrument T2L2 ayant tout d'abord été proposé sur la Station Internationale afin de concourir au potentiel de l'horloge à atomes froids PHARAO accompagnée de l'ensemble ACES (Salomon et al., 2001), il a ensuite été proposé par l'OCA sur la station russe MIR, et a finalement été accepté en 2005 pour voler sur le satellite OSTM/Jason-2 lancé en juillet 2008 à 1350 km. Le dateur picoseconde de T2L2 a donc utilisé l'Oscillateur Ultra-Stable de l'équipement de positionnement/navigation DORIS, dont la stabilité à court terme est d'environ 10^{-13} à 10-20 secondes. La performance prévue pour T2L2 a bien été atteinte, à quelques picosecondes sur 20 secondes (Exertier et al., 2014), et l'exactitude du transfert de temps a été estimé à 50 ps en interne (campagne OCA) et à 240 ps en externe grâce à une campagne en Vue Commune (GPS vs T2L2) menée au-dessus de l'Europe (Exertier et al., 2016). Malgré la difficulté d'utiliser un oscillateur embarqué, qui est sensible aux passages du satellite dans la zone de l'Atlantique Sud, un test de l'isotropie de la vitesse de la lumière a été réalisé avec un objectif de $\Delta c/c$ à $2-3 \cdot 10^{-9}$ (Belli et al., 2017).

D'autres techniques de transfert de temps par lien optique ont été développées grâce aux performances confirmées de T2L2. Dans le cadre de ACES/PHARAO, expérience finalement prévue pour 2025, il s'agit d'un lien laser deux-voies allemand (stations de Wettzell et de Potsdam), et dans le cadre des satellites GNSS de la constellation chinoise Beidou, il s'agit d'un lien laser montant chinois ; voir (Exertier et al., 2019). En outre, un groupe du GRGS a émis l'idée de développer un instrument de type T2L2 à bord des satellites Galileo de la seconde génération. L'objectif, comme pour Beidou, est d'améliorer le système en ayant la possibilité de lire les horloges à bord à partir d'une station laser équipée d'une horloge ultra-stable (Delva et al., 2020).

Avec l'amélioration croissante des liens de transfert de temps spatiaux, s'est rapidement posé le problème du "modèle théorique" relativiste à utiliser. Plusieurs auteurs ont proposé des solutions, et on est donc passé à un niveau supérieur en $1/c^3$, faisant apparaître les contributions relativistes suivantes : i) les effets Doppler de premier et second ordre, ii) le décalage gravitationnel d'Einstein, iii) et d'autres termes mixtes plus petits. En outre, au lien de transfert de temps qui contient le délai standard Shapiro, s'ajoutait les corrections de Sagnac de premier et second ordres (e.g. Petit & Wolf, 1993 ; Blanchet et al., 2001).

Géodésie chronométrique

Depuis 50 ans environ, on a fondé la référence temporelle sur les propriétés atomiques plutôt que sur les mouvements de la Terre. Ce changement a marqué le début d'une période

caractérisée par une amélioration de six ordres de grandeur de l'incertitude de la réalisation des références atomiques (fréquence et temps). Si la stabilité de l'unité de temps atteint depuis quelques années environ 10^{-16} en relatif, les progrès de la métrologie des fréquences optiques au cours des vingt dernières années aboutissent aujourd'hui à environ 10^{-18} pour les standards de fréquence.

Les horloges modernes fournissent donc des fréquences si stables qu'il n'est plus nécessaire d'aller dans l'espace pour détecter l'influence des variations du potentiel de gravité : ces horloges peuvent largement mesurer ces variations entre divers points du globe où le champ de gravité est différent. Il est donc maintenant à notre portée d'utiliser des comparaisons d'horloges pour contribuer à la cartographie du champ de gravité terrestre, probablement à ± 1 cm (ce qui correspond à un décalage relatif de 10^{-18} de la fréquence). Cette technique, la géodésie chronométrique, est très prometteuse au regard de la progression très rapide des performances des horloges (Lion et al., 2017).

Bien entendu, les auteurs ont étudié à ce propos le cadre relativiste nécessaire pour atteindre en géodésie et gravimétrie, avec des horloges ultra performantes, les recommandations du Global Geodetic Observing System (GGOS) soit à 1 mm en position sur la terre solide et à 0.1 mm/an de stabilité sur 10 ans. Sous ses considérations, la géodésie qui utilise le niveau moyen des mers (supposées au repos) comme une réalisation du géoïde, devra donc aussi considérer la variation de niveau moyen des mers détectées par les marégraphes et par l'altimétrie de haute précision depuis TOPEX/Poséidon (1992). Des études sont donc en cours soit pour définir un nouveau potentiel de référence W_0 avec ou sans dérive linéaire ou une autre forme qui reste compatible avec les outils de la relativité (Delva & Geršl, 2017a). Enfin, et sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres ont été testés des réseaux de fibres optiques, aussi bien en 1-voie qu'en aller-retour soit 2-voies. De ce point de vue, les écarts en fréquence dus aux déformations géophysiques ainsi que les variations thermiques constituent encore des problèmes ; mais le cadre relativiste a cependant été étudié (Delva et al., 2017b).

Conclusion

Comme nous le montrons dans ces différentes sections, la Géodésie Spatiale a été et reste toujours un formidable outil de "laboratoire" pour mettre la physique fondamentale à l'épreuve. Le GRGS y a très largement contribué durant ces 50 années d'existence.

Il y a depuis quelques années, sur des thématiques proches et avec la composante de physique fondamentale, plusieurs projets en cours ou déjà proposés : en géodésie (proposition GENESIS vers l'Agence européenne, et proposition sur Galileo-2G), en gravimétrie spatiale (ex e-GRASP, puis MARVEL) au CNES et en lien avec d'autres agences, et bien entendu aussi sur les développements autour des nouveaux capteurs atomiques et des liens fibrés pour le transfert de fréquence.

3.10 Observatoires géodésiques fondamentaux

L'un des principaux aspects communs à la plupart des activités développées dans le cadre du GRGS depuis sa création est l'implication dans l'établissement de stations d'observations au sol et leurs mises en œuvre.

Ces stations sont constituées d'un ou plusieurs instruments (télémètres laser, récepteurs Doppler ou GNSS, gravimètres, marégraphes ...) et installées de façon temporaire lors de campagnes de mesure, ou plus permanentes.

Plus spécifiquement, certaines de ces stations peuvent être qualifiées d'observatoire géodésique (voir par exemple Boucher, Pearlman, Sarti 2014)

Grasse	France	Observatoire du CERGA		
San Fernando	Espagne	Observatoire astronomique de la Marine		
Tahiti	Polynésie	OGT		

Observatoires géodésiques associés au GRGS

Observatoire du CERGA, Grasse

Historique CERGA – plateau de Calern

À la fin des années soixante, une recherche fut entreprise pour créer un nouvel observatoire astronomique centré en priorité sur la mesure de paramètres géométriques d'objets naturels ou artificiels, positions angulaires d'objets célestes, distance des objets à la Terre, diamètre angulaire de certains objets, mesures de très petites distances angulaires d'objets très proches dans le ciel ; à cela aussi il faut ajouter la mesure de paramètres géodésiques et géodynamiques du site de l'Observatoire, position dans les systèmes internationaux de référence terrestre, mesures absolues de la gravité terrestre, mesures d'inclinométrie dans certains gouffres du site ou à proximité, installation d'une station de sismologie, installation d'horloges atomiques pour conserver et diffuser localement le temps ; enfin, on doit finalement indiquer aussi la mesure des paramètres de la rotation terrestre et de paramètres solaires tel son diamètre.

Après différentes recherches et études, notamment en Vendée, dans les Pyrénées orientales, dans les Alpes maritimes, portant sur la qualité des images astronomiques, le nombre de belles nuits utilisables astronomiquement parlant, les conditions matérielles de vie pour le personnel et leur famille, l'accessibilité du site (train, avion, voiture), la présence à proximité d'une Université pour l'enseignement et la formation d'étudiants, le site **du plateau de Calern** fut donc retenu au début des années soixante-dix avec installation d'un Centre de Recherche de Géodynamique et d'Astronomie, à Grasse, le CERGA (aujourd'hui délocalisé en partie à l'Observatoire de Nice devenu ensuite l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) et en autre partie à Sophia Antipolis (depuis 2012) dans l'UMR Geoazur, rattachée également à l'OCA qui est lui-même une composition de l'Université Côte d'Azur.

Le site de Calern est un immense terrain calcaire désertique de type karstique, d'environ 20 km² à 1270 mètres d'altitude ; il est situé sur les communes de Caussols et Cipières, à approximativement 40 minutes en voiture de Grasse. En outre, le site fait aujourd'hui partie d'une des zones *Natura 2000*, qui est gérée par la DREAL (Environnement) de la région PACA. Ceci implique la protection des paysages, de la biodiversité et une surveillance fine de l'évolution de l'hydrologie environnante.



Figure 4. Télescope de Schmidt (crédit S. Favier)

Les instruments

Les premiers instruments développés sur le site de Calern furent le télescope de Schmidt (Fig. 1), le laser-Lune, la station laser-satellite dite de deuxième génération, l'Astrolabe photo électrique; ils furent implantés à côté d'instruments déjà mis en route tels l'astrolabe de Danjon et l'astrolabe solaire (observation du diamètre solaire, des étoiles pour l'observation de la rotation terrestre); on installa aussi un inclinomètre dans un gouffre près du site, on réalisa un laboratoire temps - fréquence de qualité avec des horloges atomiques (Césium), et on commença des mesures absolues de la pesanteur terrestre en collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique (P. Paquet).

Sous l'impulsion de J. Kovalevsky, F. Barlier et collègues ont développé deux instruments de télémétrie laser mis en opération au CERGA au cours des années 1980. Un télescope de 1.54m dédié aux observations de télémétrie laser vers la Lune et un télescope de 1m (rénové par l'ONERA, 1990) dédié aux satellites artificiels dont LAGEOS (1976, NASA) et Starlette (1975, CNES). Ces premiers instruments ont eu une importance considérable dans le contexte international de l'époque (Pearlman et al 2019a). D'une part, le télescope laser-Lune a fourni des données uniques (en précision et en longévité) pour la physique fondamentale (test du Principe d'Equivalence d'Einstein), pour les éphémérides du système solaire (amélioration des solutions semi-analytiques puis numériques de l'Observatoire de Paris et du JPL) et enfin pour la sélénophysique (géodésie et structure interne de la Lune). D'autre part, les données du télescope laser-satellite ont permis d'enrichir les premières déterminations globales du champ de gravité de la Terre et celles des paramètres géodésiques (datum) du repère terrestre qui n'étaient pas accessibles par les seules méthodes terrestres. Les deux télémètres laser ont suivi une évolution technologique assez parallèle pour aboutir vers 1995 à une précision de mesure de quelques mm, notamment en utilisant de nouveaux détecteurs « simple photon » côté laser-Lune (Samain et al., 1998), ou à diode compensée côté laser-satellite.



Figure 5. Les trois télémètres laser, plateau de Calern, OCA

Ces deux instruments de télémétrie laser ont occupé une place très importante au sein du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS), qui fut fondé également au début des années 70. Basé sur l'expérience de ses équipes en matière d'instruments de géodésie et de techniques spatiales, et compte tenu de l'implication importante de la France dans le secteur de l'altimétrie des océans par satellite, le GRGS (M. Kasser à l'IGN et F. Barlier & F. Pierron à l'OCA) a proposé le développement d'une station laser mobile (SLUM, ou FTLRS en anglais). Celle-ci a été développée essentiellement sur le plateau de Calern (Nicolas et al., 2000), grâce au soutien du CNES, dans le but d'effectuer l'étalonnage absolu des radar-altimètres à commencer par TOPEX/Poseidon (CNES-NASA) en 1992 puis ensuite pour la série des Jason (Exertier et al., 2001). Un site géodésique dédié à l'altimétrie, proche et donc complémentaire du site de Calern, a été développé par l'OCA, le CNES puis EUMETSAT au Cap de Senetosa en Corse afin d'y accueillir régulièrement la station laser mobile (Bonfond et al., 2019). En outre, plusieurs campagnes soutenues notamment par le CNES et par l'Europe ont eu lieu avec cette station laser mobile en Corse (Exertier et al., 2004), puis en Crête, en Tasmanie et enfin à Tahiti (Wang et al., 2015).

Vers un Observatoire Géodésique Fondamental

La notion de repère de référence géodésique global est arrivée très tôt, au cours des années 70, avec le développement des deux premières techniques spatiales : le VLBI géodésique et la télémétrie laser (Boucher, Pearlman, Sarti 2015). En outre, avec l'accomplissement des laser à Ruby pulsés (impulsions de 2-3 ns et cadence de tir à 0.2 Hz), puis le lancement des satellites géodésiques, il devenait possible de déterminer les paramètres géodésiques et géodynamiques globaux (de bas degrés) de la Terre de manière beaucoup plus précise et homogène. Les réseaux de stations VLBI et de stations laser se sont alors développés, mais surtout aux Etats-Unis et en Europe. Au plateau de Calern, une campagne du VLBI mobile de

la NASA (programme "Crustal Dynamics") réalisée au cours de l'été 1989, a permis de réellement orienter le développement du site dans le but d'y établir un Observatoire Géodésique Fondamental.

Cette notion d'Observatoire Fondamental est associée à la disponibilité, sur place, de plusieurs types d'instruments géodésiques qui se retrouvent alors en "colocation". Aussi, de nombreux aspects de métrologie au niveau topographique, électronique, temps-fréquence et même opto-mécanique doivent être étudiés avec un bilan millimétrique ou mieux. L'amélioration notable de la télémétrie laser au milieu des années 90, le déploiement de récepteurs géodésiques GNSS puis d'une balise DORIS, l'automatisation du transfert de temps Two-Way avec l'Observatoire de Paris (participation à l'UTC(k)), et enfin la visite régulière des équipes de l'IGN (service de Géodésie) pour mesurer les rattachements locaux ont permis au plateau de Calern d'accéder au groupe des observatoires géodésiques de référence.

Entre 2005 et 2008, le laboratoire GEMINI de l'OCA (dirigé par P. Exertier et D. Mourard) en charge de l'exploitation et du développement des deux instruments laser devenus trop lourds à porter, a fusionné les deux programmes d'observation sur un seul télescope, le télémètre laser MeO de 1,54m. Une opération de rénovation très importante (bâtiment, coupoles, laboratoires et télescope), appelée T2000, soutenue par la Région PACA, l'INSU, le CNES et l'OCA, a permis de relancer une activité de recherche technologique devenue nécessaire eu égard aux nouveaux enjeux scientifiques (objectifs du Global Geodetic Observing System, GGOS) et à d'autres applications potentielles comme le transfert de temps, la surveillance des débris spatiaux, et les télécommunications optiques. Cette évolution a été décrite dans le cadre de la publication « le GRGS, 50 ans de contributions aux missions spatiales et à la coopération internationale ». On constate qu'à partir du télescope laser-Lune développé au départ exclusivement pour la Lune, MeO est devenu une véritable plate-forme technologique.

Enfin, avec le regroupement des équipes de géodésie et de géophysique, voulu par l'INSU/CNRS et l'OCA entre 2008 et 2012, il est apparu presque évident de renforcer le programme d'observations géodynamiques du plateau de Calern, qui avait été pensé au

départ (CERGA) puis relancé ensuite avec les partenaires européens dans le cadre de l'étude du bassin méditerranéen (Barlier et al., 1991). En effet, l'amélioration drastique des techniques géo-désiques VLBI et laser était non seulement nécessaire pour la réalisation des systèmes de référence céleste et terrestre, mais aussi pour permettre la mesure précise des mouvements verticaux des stations ancrées sur la terre solide. Or au plan régional comme global, ceci est d'une grande importance pour permettre le suivi des effets de charge (hydrologie, océan, atmosphère) sur la croûte ; mais en complément, il faut aussi obtenir des observations de nature géodynamique. C'est donc par des campagnes du gravimètre absolu FG-5 (avec l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, J. Hinderer) et par la lecture de l'inclinomètre de l'Université de Montpellier-2 (N. Florsch et F. Boudin) installé dans un gouffre, que le plateau de Calern s'est enrichi en tant que site géodésique et géodynamique (Nicolas et al., 2006). Enfin, la mise en place en 2015 d'instruments de sondage (Fig. 3) de la qualité de l'atmosphère est venue compléter ces



Figure 6. Instruments de sondage, station CATS (UMR Lagrange et Geoazur, OCA)

instruments en permettant de mener des études sur la propagation optique et donc sur les corrections troposphériques (Chabé et al., 2020).

Les contributions marquantes

La contribution de l'OCA à la télémétrie laser sur satellites a été continue dans le temps. Avec les recommandations de l'ILRS (service de l'AIG) faites au plan international depuis 1998 (Pearlman et al., 2019b), les satellites LAGEOS (6000 km) et Etalon (19400 km) sont devenus des cibles prioritaires afin d'établir les solutions régulières (base hebdomadaire) du repère de référence terrestre ITRF (Deleflie et al., 2013). Le plateau de Calern joue aujourd'hui un rôle potentiellement très intéressant, grâce à la plate-forme de télémétrie MeO, avec une importante contribution sur la constellation des satellites GNSS, plus précisément GALILEO, qui s'est faite en collaboration avec l'Observatoire de Paris et l'ESA (plusieurs campagnes depuis 2015) (Bury et al., 2019).

La contribution de l'OCA à la télémétrie laser sur la Lune est unique dans le monde du fait de sa production pratiquement ininterrompue depuis plus de 35 ans (elle représente plus de 50% des données mondiales en volume). Sa technologie a toujours évolué jusqu'à aboutir à l'ajout d'une voie Infra-Rouge (à 1032 nm) en 2015 (Martinot-Lagarde et al., 2016), ce qui a révolutionné la manière d'observer la Lune. Le groupe POLAC de l'Observatoire de Paris a parfaitement joué le jeu des prévisions (éphémérides), de l'analyse et du contrôle des données avant leur envoi dans les banques de données internationales (EDC en Europe et CDDIS aux Etats-Unis). Grâce à l'Infra-Rouge, ont été démontrées une bien meilleure répartition des mesures de télémétrie sur le cycle mensuel complet de la Lune, ainsi qu'une acquisition bien plus large spatialement avec l'utilisation de tous les réflecteurs laser disponibles, les trois Apollo et les deux Lunokhod (Courde et al., 2017). De nombreux articles scientifiques et technologiques ont permis de valoriser ces investissements, notamment sur la libration de la Lune et donc sa structure interne (voir les solutions de INPOP, Fienga & Visvanathan). En outre, sous l'impulsion de P. Exertier et de S. Merkowitz (NASA/GSFC) en 2017, le télescope MeO a tenté des tirs laser à la fois en Infra-Rouge et dans le vert sur le petit réflecteur de la sonde américaine LRO. Plusieurs passages ont ainsi été télémétrés en aller-retour, ouvrant la télémétrie laser du plateau de Calern à des missions d'exploration planétaire (Mazarico et al., 2020).

Enfin, d'autres types de contributions du laser ont fait l'objet de recherches et d'investissements à partir du télescope MeO et des laboratoires afférents. Les travaux menés autour du système de transfert de temps spatial T2L2 (entre 2005 et 2017) placé à bord du satellite Jason-2 (2008), ont permis d'atteindre un transfert de temps sol-sol en vue commune de 138 ps d'exactitude, qui n'a jamais été dépassé depuis (Exertier et al. 2016 ; 2017). Ces activités de transfert de temps ont été largement soutenues par le CNES et par le Laboratoire d'Excellence FIRST-TF entre 2012 et 2022 (N. Dimarq). Un des objectifs à terme est de participer à la mission ACES/Pharao sur la Station Spatiale Internationale afin de valoriser tous les équipements présents ce qui reste unique dans la communauté (laser à 400kHz, horloge Maser et lien Two-Way avec l'OP/SYRTE).

D'un autre côté, un effort de R&D est mené depuis plus de dix ans à propos de la réduction des effets de la traversée de l'atmosphère, à propos des avantages de la télémétrie haute cadence (pulse laser très court < 20 ps), à propos de l'automatisation du télescope, et à propos

de la recherche métrologique autour d'une exactitude de la mesure à 1 mm. Une nouvelle génération de télémètre laser se prépare. L'idée est d'aboutir à des solutions technologiques qui puissent être validées sur le ciel pour être ensuite industrialisées ; la France a en effet l'ambition d'équiper le site de Tahiti en Polynésie Française en collaboration avec son Université (UPF) et le NASA/GSFC qui fournira une station VLBI de nouvelle génération.

Enfin en 2021, dans le cadre du renouvellement des services nationaux d'observation (SNO) sous la responsabilité de l'INSU, Julien Chabé, astronome-adjoint à l'observatoire de la Côte d'Azur et responsable du SNO « Station de télémétrie laser (ILRS 7845) », a établi une fiche de suivi avec aussi la participation de Clément Courde responsable du pôle Observatoire de Geoazur et leurs collègues. Nous nous permettons de citer ici les activités en cours et prévus :

- L'établissement et le maintien des repères de références terrestres et célestes et leur raccordement.
- L'étalonnage des trajectoires des satellites de navigation comme Galileo.
- La détermination d'un repère vertical pour l'observation des variations lentes du niveau des océans (altimétrie spatiale) comme les missions Jason 3 et Sentinel.
- Le transfert de temps par lien laser (Mission T2L2 jusqu'à fin 2018) et mission European Laser Timing (ELT) sur ACES-PHARAO à partir de 2022.
- Les mouvements (éphémérides et librations) de la Lune et le lien avec les éphémérides du système Solaire.

Cette activité ne peut se faire sans collaboration. L'OCA est donc impliqué dans l'ILRS d'une part avec les autres stations laser-géodésiques en Europe et d'autre part avec les centres d'analyse des données (Observatoire de Paris, et CNES-OMP à Toulouse).



Figure 7. Plateau de Calern, OCA 2022

Conclusion

Les activités de l'Observatoire Géodésique Fondamental du plateau de Calern s'appuient sur des collaborations en France, en Europe et avec les Etats-Unis ; plusieurs instruments de géodésie et de géodynamiques y sont installés et sont régulièrement améliorés (laser (SLR et LLR), DORIS, GNSS, INSAR) ; ils sont rattachés et inter calibrés sur une échelle de temps commune. La station laser MeO (Métrologie Optique) constitue la partie centrale des activités. Les observations y sont pratiquées de manière régulière sur différentes cibles (priorités nationales et internationales) ; ses données sont envoyées au service international ILRS, placé sous l'égide de l'Association Internationale de Géodésie (AIG) qui se charge de les diffuser dans les Centres d'Analyse dont en France. Enfin, les activités de R&D touchent de nombreux aspects de métrologie, dont en lien avec l'atmosphère. Tout ceci, y compris les études sur l'automatisation de la station, constitue un bagage pour développer à terme une nouvelle

génération de station laser qui soit exportable sur des sites français situés dans l'hémisphère sud.

Le site du plateau de Calern aujourd'hui comme hier, c'est aussi des instruments d'astronomie-astrophysique, liés à la recherche, aux services d'observation et à la pédagogie en lien avec l'Université de la Côte d'Azur (Fig. 4). On peut citer ici l'utilisation, après rénovation, des deux télescopes de 1 m séparés de 15 m (le C2PU) afin d'établir un relevé d'astéroïdes (Bendjoya et al., 2022), ou encore faire revivre l'interférométrie optique mais avec une sensibilité très largement augmentée grâce aux nouvelles technologies (Guerin et al., 2018) ; en outre, il y a également la mise en route de la version II de l'instrument de mesure du diamètre solaire (Morand et al., 2010) auquel s'ajoute un moniteur d'images solaires afin de quantifier les effets de l'atmosphère sur la mesure (PiCARDSol).

Observatoire de Tahiti

L'Observatoire Géodésique de Tahiti (OGT) a été fondé en 1997 par le professeur Alain Bonneville de l'Université de la Polynésie Française (UPF) avec l'aide du CNES et de l'INSU-CNRS ainsi qu'avec le support du GRGS. Il est un site de référence géodésique fondamentale au sein de l'UPF pour la poursuite des satellites d'étude de la Terre à des fins océanographiques, géodynamiques et géophysiques grâce entre autres à l'installation d'une station de poursuite de satellites par laser MOBILAS-8 de la NASA du réseau ILRS sur le campus de l'Université de la Polynésie française (UPF) à Outumaoro (commune de Punaauia, près de la capitale Papeete). Son directeur actuel (depuis 2006) est le professeur Jean-Pierre Barriot, ancien ingénieur du CNES.

Depuis son installation, la station laser a pu bénéficier de diverses cures de jouvence récentes (2011-2012) grâce à l'intérêt renouvelé de la NASA pour les observations laser, par la mise à niveau d'une grande partie de l'électronique d'acquisition, du support du télescope, des visites techniques plus fréquentes et au soutien à ce jour sans faille du CNES pour la logistique annexe (changement total du système de climatisation, dalle pour la station laser mobile française, mise aux normes des armoires électriques). Elle est actuellement, malgré son âge (plus d'une trentaine d'années), en parfait état de fonctionnement. Elle s'est enrichie au fil des ans de divers équipements en co-location, dont une station permanente DORIS, diverses stations GPS permanentes dont une de la NGA américaine, et depuis 2006 d'un réseau de stations marégraphiques (cinq stations de qualité géodésique) et un gravimètre gPhone en 2007 sur financement UPF et CNES. A noter que l'OGT héberge aussi, depuis 2011, une station GPS permanente du DLR et, depuis 2009, deux stations GPS permanentes fournies gracieusement par la société TRIMBLE. Une station Beidou chinoise a enrichi le parc en 2014.

En tout l'OGT fournit des données à cinq services internationaux relevant de l'Association Internationale de Géodésie (IAG) :

- ILRS (International Laser Ranging Service),
- IGS (International GNSS Service),
- IDS (International DORIS Service),
- PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level),
- ICET / GGP (International Center for Earth Tides / Global Geodynamics Project).

3.11 Services internationaux

4. Ecoles d'été et séminaires

Le GRGS a débuté en 2002 des écoles d'été sur différentes thématiques relatives à la géodésie spatiale et qui ont eu lieu tous les deux ans, les années paires jusqu'en 2018. Le rythme a été ralenti suite à la crise sanitaire, mais la prochaine est prévue en septembre 2024. En complément, notamment les années impaires, des ateliers ou séminaires ont été organisés, les dernières années autour de la thématique de la géodésie millimétrique.

Écoles d'été

Les écoles d'été du GRGS sont ouvertes aux étudiants, doctorants, post-docs, jeunes chercheurs... pour se familiariser avec les différentes disciplines et applications de la géodésie spatiale, en lien avec la thématique choisie par le Conseil Scientifique du GRGS. Elles sont entièrement subventionnées par les organismes de tutelle du GRGS, hormis l'acheminement. Les cours, en français, sont dispensés par des experts des domaines dans les différents laboratoires affiliés au GRGS. Ces écoles accueillent typiquement une quarantaine d'élèves, jeunes diplômés ou chercheurs, en plus d'une quinzaine d'enseignants sur une semaine (du lundi matin au vendredi midi). Les premières se sont tenues sur le site de formation de l'IGN à Forcalquier (Alpes de Haute Provence), puis ont été itinérantes par la suite, avec notamment un passage en Suisse en 2012, puis dans les centres CAES du CNRS de Saint Pierre d'Oléron et Aussois pour les trois dernières.

Plus en détail, les thèmes abordés par ces 9 écoles d'été furent :

- Détermination du champ de gravité terrestre par les nouvelles missions spatiales (Forcalquier, septembre 2002),
- Géodésie Spatiale, Physique de la mesure et Physique Fondamentale (Forcalquier, septembre 2004),
- Méthodes et logiciels pour la Géodésie Spatiale (Forcalquier, septembre 2006),
- Interactions en Géodésie Spatiale, vers une compréhension globale de la Terre (Forcalquier, septembre 2008),
- Mesure et modélisation de la gravité (Carcans – Maubuisson, septembre 2010),
- Localisation précise par moyens spatiaux (Yverdon-les-Bains, Suisse, septembre 2012),
- Altimétrie Spatiale (Saint Pierre d'Oléron, septembre 2014),



- Trajectoires planétaires et interplanétaires (Aussois, septembre 2016),



- Fondements des conventions IERS (Saint Pierre d'Oléron, septembre 2018).



Sans rentrer dans le détail des programmes respectifs de ces écoles d'été, les thèmes choisis sont souvent reliés à des lancements de missions, et/ou activités de services internationaux.

La thématique autour de la gravimétrie spatiale de écoles d'été de 2002 et 2010 est directement reliée aux lancements des missions GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*, NASA/DLR) en mars 2002 et GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*, ESA) en mars 2009.

L'école d'été de 2012, organisée en collaboration avec l'HEIG-VD (*Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud*) et l'AIUB (*Astronomisches Institut - Universität Bern*), a porté plus spécifiquement sur le traitement des données GNSS et leurs applications, et plus spécifiquement sur les logiciels GINS et BERNESE.

L'école d'été de 2014 a permis de montrer l'apport de plus de vingt ans d'altimétrie spatiale radar a pu apporter dans l'étude des océans, de l'hydrologie continentale, et des calottes glaciaires. Enfin le futur de l'altimétrie, avec notamment les mesures interférométriques de la mission SWOT (*Surface Water Ocean Topography*, finalement lancé en décembre 2022), a été introduit.

La neuvième école de 2018 a permis de revisiter l'ensemble des modèles théoriques sur lesquels se basent les conventions IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) utilisées dans le traitement des données géodésiques, en lien notamment avant la réalisation du nouveau système de référence terrestre (ITRF2020), mais aussi céleste (ICRF3).

L'ensemble des cours et présentations dispensés pendant les écoles d'été sont disponibles sur le site web du GRGS à l'adresse : <https://grgs.obs-mip.fr/formation/ecole-dete/>.

Séminaires et ateliers

En plus de ces écoles d'été, le GRGS a organisé plusieurs séminaires et ateliers, typiquement sur des durées de 2-3 jours, sur des sujets plus spécifiques. Ils permettent de réunir une vingtaine de spécialistes français, de faire un état des lieux et des problématiques futures.

Plus en détail, les thèmes abordés furent :

- GRASP (Paris) en octobre 2014,
- Géodésie Millimétrique (Sorèze) en septembre 2015,
- VLBI (Bordeaux) en mars 2017,
- Géodésie Millimétrique (Sorèze) en septembre 2017,



- Géodésie Millimétrique (Toulouse), en septembre 2019,



- Gravimétrie Spatiale (Marseille), en septembre 2021.

L'atelier d'octobre 2014 a permis de réunir la communauté française et de préparer la soumission à l'appel d'offre Earth Explorer Opportunity Mission EE-9 de l'ESA en juin 2016 de la proposition E-GRASP / Eratosthenes (*European Geodetic Reference Antenna in Space / European Reference Antenna of Space Geodetic Techniques Enhancing Earth Science*).

Les ateliers Géodésie Millimétrique de septembre 2015, 2017 et 2019 ont porté sur la localisation précise par les techniques de géodésie spatiale, et d'ouvrir à différentes applications en Sciences de la Terre notamment. La création du service collaboratif SPOTGINS

(*Solutions PPP Partagées et Opérationnelles Traitées avec GINS*) de traitement des données GNSS est directement issu des discussions de ces ateliers.

Le dernier atelier a permis de rassembler la communauté française intéressé par la gravimétrie spatiale et fait suite à la proposition de mission MARVEL (*Mass And Reference Variations for Earth Lookout*) au CNES en phase 0.

Les équipes de Toulouse organisent régulièrement des journées/formations autour du logiciel GINS ; les dernières ont eu lieu en juin 2013, juin 2014, juin 2015, avril 2016, et enfin juin 2019.

5. Conclusions : perspectives

6. Références

- [Abdalati et al 2010] Abdalati W., Zwally, H. J., Bindschadler, R., Csatho, B., Farrell, S. L., Fricker, H. A., ... & Webb, C. (2010) The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 735-751
- [Ablain et al 2019] Ablain M., Meyssignac, B., Zawadzki, L., Jugier, R., Ribes, A., Spada, G., Benveniste, J., Cazenave, A., Picot, N. (2019) Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1189-1202
- [Adjaout, Sarrailh 1997] Adjaout A., M. Sarrailh, *A new gravity map, a new marine geoid around Japan and the detection of the Kuroshio current*. *J of Geodesy*, 71, pp. 725-735, 1997.
- [Aguilera et al 2014] Aguilera D. N., Ahlers, H., Battelier, B., Bawamia, A., Bertoldi, A., Bondarescu, R., ... & Zahzam, N. (2014). STE-QUEST—test of the universality of free fall using cold atom interferometry. *Classical and Quantum Gravity*, 31(11), 115010.
- [Ahlers et al 2022] Ahlers H., Jetzer, P., Zelan, M., Kleinsteinberg, G., Carlesso, M., Giese, E., ... & von Klitzing, W. (2022). *arXiv: STE-QUEST: Space Time Explorer and QUantum Equivalence principle Space Test* (No. CERN-TH-2022-202).
- [Allan et al 1985] Allan, D. W., Davis, D. D., Weiss, M., Clements, A., Guinot, B., Granveaud, M., ... & Ashby, N. (1985). Accuracy of international time and frequency comparisons via global positioning system satellites in common-view. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, (2), 118-125.
- [Altamimi, Boucher, Duhem 1993] Altamimi Z., Boucher C., Duhem L., "The worldwide centimetric terrestrial reference frame and its associated velocity field", *Adv. Space Res.*, 13(11), 151– 160, 1993.
- [Altamimi, Sillard, Boucher 2002] Altamimi Z., Sillard, P. and Boucher, C. (2002) ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10), ETG-2
- [Altamimi, Guinot 2009] Altamimi, Z. et Guinot B., 2009, *Le Système international de référence terrestre (ITRS) et ses réalisations*, Annuaire du Bureau des longitudes. EDP Sciences.
- [Altamimi, Collilieux, Metivier 2011] Altamimi Z., Collilieux X, Métivier L, 2011, ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, *J. Geod.*, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.

[Altamimi et al 2016] Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016), *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions*, *J. Geophys. Res.Solid Earth*, 121, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB01309

[Altamimi et al 2023] Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., Chanard, K., 2023), *ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions*. *J Geod* 97(47). <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>.

[Anderle, Beuglass 1970] Anderle R.J., Beuglass I.K., 1970, Doppler satellite observations of polar motion, *Bull Geod.* 44, 2, pp.125-141.

[Andersen, Aksnes, Skonnord 1998] Andersen P.H., K. Aksnes, H. Skonnord (1998) Precise ERS-2 orbit determination using SLR, PRARE, and RA observations, *J. of Geodesy*, 72(7), 421-429

[Appleby, Rodriguez, Altamimi 2016] Appleby, G., J. Rodriguez, and Z. Altamimi (2016), Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations and estimated impact on ITRF scale: Estimation of systematic errors in LAGEOS observations 1993–2014, *Journal of Geodesy*, 1–18, doi:10.1007/s00190-016-0929-2.

[Arias, Feissel, Lestrade 1988] Arias, E. F., Feissel, M., and Lestrade, J.-F., 1988, A celestial reference frame consistent with the BIH Terrestrial System (1987), *BIH Annual Rep. for 1987*, D-113- D-121.

[Arias et al 1995] Arias, E. F., Charlot, P., Feissel, M., Lestrade, J.-F., 1995, The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, *ICRS*, *A&A* 303, 604-60

[Arnold et al 2019] Arnold, D., Montenbruck, O., Hackel, S., & Soñnica, K. (2019). Satellite laser ranging to low Earth orbiters: orbit and network validation. *Journal of Geodesy*, 93(11), 2315-2334.

[Balmino 1972] Balmino G., *Techniques de poursuite de satellite par satellite*. La Recherche Spatiale, vol. X, n°6, Dunod éd., 1972.

[Balmino, Reigber, Moynot 1975] Balmino G., Ch. Reigber, B. Moynot, *A Geopotential Model Determined from Recent Satellite Observing Campaigns (GRIM 1)*. *Manuscripta Geodaetica*, vol. 1, pp. 41-69, 1975.

[Balmino, Reigber, Moynot 1976] Balmino G., Ch. Reigber et B. Moynot, *Further Evaluation of the GRIM 2 Earth Gravity Field*. 3rd Symp., Geodesy and Physics of the Earth, Weimar, G.D.R., Proceedings, pp. 193-232, 1976.

[Balmino et al 1978] 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.

[Balmino, Reigber, Moynot 1978] Balmino G., Ch. Reigber et B. Moynot, *Le modèle de potentiel gravitationnel terrestre GRIM 2; détermination, évaluation*. Annales de Géophysique, Tome 34, n°2, pp. 55-78, 1978.

[Balmino et al 1981] Balmino G., F. Barlier, A. Bernard, C. Bouzat, A. Riviere, J.J. Runavot. *GRADIO (gradiométrie par satellite), Proposition au CNES*. Séminaire de prospective, Les Arcs, France, 1981.

[Balmino, Moynot, Vales 1982] 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.

[Balmino 1983] Balmino G., *The Surface Gravity Data Available for Improvement of the Global Knowledge of the Geopotential*, IUGG, Hamburg, Symposium C, Proceedings, 1983.

[Balmino et al 1987] Balmino G., B. Moynot, M. Sarrailh, N. Valès, *Free Air Gravity Anomalies over the Oceans from Seasat and Geos 3 Altimeter Data*. EOS, vol. 68, n°2, 1987.

[Balmino et al 2012] Balmino G., Vales N., Bonvalot S., Briaïs A., *Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies*. J of Geodesy, 86, , DOI: 10.1007/s00190-011-0533-4, pp. 499-520, 2012.

[Balmino, Bonvalot 2016] Balmino, G. and S. Bonvalot, *Gravity Anomalies*. In: Grafarend Ed., Encyclopedia of Geodesy, Springer. http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-02370-0_45-1, 2016.

[Balmino 2021] Balmino G., *Contribution française aux modèles globaux de potentiel terrestre, 100 ans de géodésie française (1919-2019)*, Publication du Bureau des Longitudes, 2021.

[Barlier et al 1978] Barlier, F., Berger, C., Falin J.L., Kockarts, G., and Thuillier, G. (1978) A thermospheric model based on satellite drag data, DTM 78, Ann. Geophys., 34, 9-29, 19.

[Barlier, Lefebvre 2001] Barlier F. and M. Lefebvre, *A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences*. The Century of Space Science, J. Bleeker, J. Geiss, M. Huber, eds. Kluwer Academic Publishers, Pays-Bas, pp. 1623-1651, 2001.

[Barriot, Balmino 1992] Barriot J.P., G. Balmino, *Estimation of Local Planetary Gravity Fields Using Line of Sight Gravity Data and an Integral Operator*, Icarus, 99, pp. 202-224, 1992.

[Barriot et al 1998] 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.

[Barzaghi et al 2019] Barzaghi R., D. Carrion, G. S. Vergos, I. N. Tziavos, V. N. Grigoriadis, D. A. Natsiopoulou, S. Bruinsma, F. Reinquin, L. Seoane, S. Bonvalot, M. F. Lequentrec-Lalancette, C. Salaün, O. Andersen, P. Knudsen, A. Abulaitijiang, M. H. Rio, *GEOMED2: High-Resolution Geoid of the Mediterranean*. Int. Symp. on Advancing Geodesy in a Changing World - IAG Scientific Assembly 2017, Kobe, Proceedings, pp. 43-49, 2019.

[BDL, 2001] Bureau des Longitudes, *La géodésie – Bilan et perspectives*, BDL Ed., Paris, 2001.

[BDL, 2009] Bureau des Longitudes, *Les observatoires, observer la Terre*, Hermann Ed., Paris, 2009.

[Beaumont, Gaignebet 1993] Beaumont F. & Gaignebet, J. (1993). Optical techniques for time and frequency transfer. In *Proceedings of the 25th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting* (pp. 119-132).

[Belli, Exertier, Samain 2017] Belli A., Exertier P., Samain E. (2017). A test of the one-way isotropy of the speed of light from the T2L2 space experiment, *Proceedings of the SF2A 2017*, pp. 369-372, Reylé C., Di Matteo P., Herpin F., Lagadec E., Lançon A., Meliani Z., Royer F. Eds

[Berger et al 1998] Berger, C., R. Biancale, M. III, F. Barlier (1998) Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94 - Comparative review on various temporal variations and prospects in space geodesy applications, *J. of Geodesy*, 72, 161- 178.

[Bernard, Gay, Mainguy 1980] Bernard A., M. Gay, A.M. Mainguy, *Super-Cactus: Project of 10⁻¹¹ g three-axis accelerometer*. Acta Astronautica, Elsevier, pp. 401-406, 1980.

[Bernard et al 1977] A Bernard, M Gay, A.M. Mainguy, R Juillerat, J.J. Walch, Y Boudon, F Barlier, P Lala : *Radiation pressures determination with CACTUS accelerometer*, XXe COSPAR, Tel Aviv, 1977 TP Onera 77-76.

[Berroir, Boudon, Barlier 1983] Berroir, A., Y. Boudon and F. Barlier. *High sensitive accelerometry as a tool for radiation measurements Some results of the cactus experiment* Cospar-Imap-Wmo Expert

meeting on satellite systems to measure radiation budget parameters and climate change signals. IGLS Austria , August 1983,

[BGI, CLS 1999] BGI and CLS, *Free air gravity anomalies from CLS-SHOM mean sea surface and ERS1 altimetric data over ice*. Presented at IUGG 22nd General Assembly, Birmingham, 1999.

[Biancale et al 2000] Biancale R., G. Balmino, J.M. Lemoine, J.C. Marty, B. Moynot, F. Barlier, P. Exertier, O. Laurain, P. Gegout, P. Schwintzer, Ch. Reigber, A. Bode, R. König, F-H. Massmann, J-C. Raimondo, R. Schmidt, Sheng Yuan Zhu, *A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations : GRIM5-S1*. Geophysical Research Letters, Vol. 27, n° 22, pp. 3611-3614, 2000.

[Bize et al 2005] Bize S., Laurent, P., Abgrall, M., Marion, H., Maksimovic, I., Cacciapuoti, L., ... & Salomon, C. (2005). Cold atom clocks and applications. *Journal of Physics B: Atomic, molecular and optical physics*, 38(9), S449.

[Bizouard, Brzezinski, Petrov 1998] Bizouard, C., Brzeziński A., Petrov, S., 1998, Diurnal atmospheric forcing and temporal variations of the nutation amplitudes. *Journal of Geodesy* 72, 10, pp. 561-577.

[Bizouard et al 2011] Bizouard, C., Remus, F., Lambert, S.B., Seoane, L., Gambis D., 2011, The Earth's variable Chandler wobble, *A&A* 526, 1-4.

[Bizouard et al 2019] Bizouard, C., Lambert, S.B., Gattano C., Becker, O., Richard, J.Y., 2019, The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014, *J. Geod.* 93, Issue 5, pp.621-633

[Blamont, 1986] Blamont J.E. et al., "Implications of the VEGA balloon results for Venus atmospheric dynamics", *Science* 231, 1422, 1986.

[Blamont, 1987] Blamont J. "Vénus dévoilée - voyage autour d'une planète" Ed. Odile Jacob, 1987, 370 p.

[Blamont, 1993] Blamont J. et al. "Balloons on planet Venus - Final results", *Adv. Space Res.* 13, 2, 145, 1993.

[Blanchet et al 2001] Blanchet L., Salomon, C., Teysandier, P., & Wolf, P. (2001). Relativistic theory for time and frequency transfer to order $1/c^3$. *Astronomy & Astrophysics*, 370(1), 320-329.

[Bonvalot et al, 2012] Bonvalot S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F., Sarrailh, M., *World Gravity Map. 1:50000000 map*, Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris. *Complete Bouguer anomaly (ISBN 978-2-2917310-08-3 2012)* ; *Isostatic anomaly (ISBN 978-2-2917310-09-0)* ; *Surface free-air anomaly (ISBN 978-2-2917310-07-6)*, 2012.

[Borderies et al, 1980] 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.

[Boucher, Feissel 1983] Boucher C., Feissel, M., 1983, Evolution of the BIH activities for the definition, maintenance and dissemination of a conventional terrestrial system, Rapport technique N°1, GRGS.

[Boucher, Lestrade 1984] Boucher C. & Lestrade J.F. (1984). Survey of relativistic effects in geodesy and fundamental astronomy, in *Gravitation, Geometry and Relativistic Physics*, Lecture Notes in Physics, vol. 212, (2005) pp 174-186.

[Boucher, Altamimi 1985] Boucher C., Altamimi Z., 1985, Towards an improved realization of the BIH Terrestrial Frame. In: Mueller (ed) *Proceedings of the international conference on Earth rotation and reference frames*, MERIT/COTES Report, vol 2, 31 July–2 August, 1985, Ohio State University, Columbus, OH, USA, p 551.

[Boucher, Feissel 1985] Boucher C., Feissel M., 1985, Establishment of the BIH terrestrial system by combining the results of different earth rotation space geodesy programs, *Veröff. Zentralinst. Phys. Erde*, 81, Teil I, p. 60.

[Boucher, Pearlman, Sarti 2015] Boucher C, Pearlman M, Sarti P, *Global geodetic observatories*, *Adv. Space Res.*, 55, 24-39 (2015).

[Boucher, Willis, 2017] Boucher, C, P. Willis « Les références de temps et d'espace. Un panorama encyclopédique : histoire, présent et perspectives », C., Hermann, Paris, 2017.

[Boucher, Willis 2017a] Boucher C., Willis P., *Références terrestres*, in « Les références de temps et d'espace. Un panorama encyclopédique histoire, présent et perspectives ». Boucher C (coordonné par), Paris, Hermann, 2017

[Boudon et al, 1979] Boudon Y., F.Barlier, A.Bernard, R.Juillerat, A.M.Mainguay and J.J.Walch, *Synthesis of flight results of the Cactus accelerometer for accelerations below $10^{-9} g$* . *Acta Astronautica*, vol. 16, issue 11, pp. 1387-1398, 1979.

[Boudon, 1984] Boudon Y, *Détermination de la pression de radiation par Microaccélérométrie dans le cadre de l'expérience spatiale Castor/Cactus. Contribution à la mesure du bilan radiatif dans la zone intertropicale*. Thèse, Université Paris VI, le 8 novembre 1984

[Brown et al, 2018] A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, M. Biermann, D. W. Evans, L. Eyer, and et al., 2018, Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties, A&A 616:A1.

[Bruinsma, Thuillier, Barlier, 2003] Bruinsma, S.L., Thuillier, G., Barlier, F. (2003) The P2000 empirical thermosphere model with new data assimilation and constraints at lower boundary: accuracy and properties, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 1053-1070.

[Bruinsma, Tamagnan, Biancale, 2004] Bruinsma, S.L., Tamagnan, D., Biancale, R. (2004) Atmospheric densities derived from CHAMP/STAR accelerometer observations, *Plan. Space Sci.*, 52, 297-312.

[Bruinsma, Forbes, 2007] Bruinsma, S.L., and J.M. Forbes (2007) Global Observation of Traveling Atmospheric Disturbances (TADs) in the Thermosphere, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L14103, doi :10.1029/2007GL030243.

[Bruinsma, Forbes, 2008] Bruinsma, S.L., and J.M Forbes (2008) Medium to Large-Scale Density Variability as Observed by CHAMP, *Space Weather*, Vol. 6, S08002, doi:10.1029/2008SW000411.

[Bruinsma et al, 2010] Bruinsma S., J.M. Lemoine, R. Biancale, N. Valès, *CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation*. *Advances in Space Research*, Vol 45, No. 4, pp. 587-601, 2010.

[Bruinsma et al, 2012] Bruinsma, S.L., N. Sánchez-Ortiz, E. Olmedo, N. Guijarro (2012) Evaluation of the DTM2009 thermosphere model for benchmarking purposes, *J. Space Weather Space Clim.*, <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2012005>.

[Bruinsma et al, 2013] Bruinsma S. L., C. Forste, O. Abrikosov, J.C. Marty, M.H. Rio, S. Mulet, S. Bonvalot, *The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach*. *Geophysical Research Letters*, Vol 40, No. 14, pp. 3607-3612, (*GOCE-DIR4*), 2013

[Bruinsma, 2015] Bruinsma, S.L. (2015) The DTM2013 thermosphere model, *J. Space Weather Space Clim.*, <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2015001>.

[Brunet 1979] Brunet M. (1979). Synchronization of atomic clocks through the 'Symphonie' satellite. *Radio Science*, 14(4), 721-730.

[Bury, Sosnica, Zajdel 2019] Bury, G., Sośnica, K., & Zajdel, R. (2019). Multi-GNSS orbit determination using satellite laser ranging. *Journal of Geodesy*, 93(12), 2447-2463

[Capitaine, Guinot, McCarthy 2000] Capitaine, N., Guinot, B., McCarthy D.D., 2000, Definition of the Celestial Ephemeris Origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame, A&A 355, 398-405

[Capitaine 2002] N. Capitaine et al. (eds), Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions IERS Technical Note 29, 2002, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, ISBN: 3-89888-866-5 (print version)

[Capitaine, Wallace, Chapront 2003] Capitaine, N., Wallace, P. T., and Chapront, J., 2003, Expressions for IAU 2000 precession quantities, A&A 412(2), 567–586, doi:10.1051/0004-6361:20031539

[Capitaine et al 2009] Capitaine, N., Mathews, P.M., Dehant, V., Wallace P.T., Lambert, S.B., 2009, On the IAU 2000/2006 precession-nutation and comparison with other models and VLBI observations, Celest. Mech. Dyn. Astr. 103, 2, 179-190.

[Caron 1997] Caron B., Dominjon, A., Drezen, C., Flaminio, R., Grave, X., Marion, F., ... & Ricci, F. (1997). The VIRGO interferometer. *Classical and Quantum Gravity*, 14(6), 1461.

[Cazenave, Daillet, Lambeck 1977] Cazenave A, Daillet S., Lambeck K., Tidal studies from the perturbations in satellites orbits, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. , 284, 595-606, 1977.

[Cazenave, Daillet, Lambeck 1977a] Cazenave A., Daillet S., Lambeck K., Effet des marées terrestres, océaniques et atmosphériques sur les orbites des satellites, Annales de Geophysique , 33, 1977.

[Cazenave, Daillet 1981] Cazenave, A. and S. Daillet, Lunar tidal acceleration from Earth satellite orbit analysis, J. Geophys. Res. 86 (1981), 1659- 1663, 1981.

[Cazenave, Valette, Boucher 1992] Cazenave A., J.J. Valette, C. Boucher, *Positioning Results with DORIS on SPOT 2 after First year of Mission* J.Geophys.Res.97 B5 7109-7119 (1992)

[Cazenave, Feigl 1994] Cazenave A. et K. Feigl, *Formes et Mouvements de la Terre, Satellites et Géodésie*. Croisée des Sciences, éditions CNRS, Belin ed., Paris, 1994.

[Chabé et al 2020] Chabé J., Courde, C., Torre, J. M. et al. (2020). Recent Progress in Lunar Laser Ranging at Grasse Laser Ranging Station. *Earth and Space Science* 7 (3).

[Chapront, Chapront-Touzé, Francou 2002] Chapront, J., Chapront-Touzé M., and Francou, G., 2002, A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements, *A&A* 387(2), 700-709. doi:10.1051/0004-6361:20020420.

[Charlot et al 2020] Charlot P, Jacobs CS, Gordon D, Lambert S, Böhm J et al., 2020, The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry, *A&A* 644, 159.

[Couhert et al 2020] Couhert A, C. Bizouard, F. Mercier, K. Chanard, M. Greff, and P. Exertier (2020), Self-consistent determination of the Earth's GM, geocenter motion and figure axis orientation. *Journal of Geodesy*, 113,

[Counselman, 1972] Counselman C.C., Hinteregger H.F., Shapiro I.I., "Astronomical applications of differential interferometry", *Science* 178, 607, 1972.

[Courde et al 2017] Courde C., J.M. Torre, E. Samain, G. Martinot-Lagarde, M. Aimar, D. Albanese, J. Chabé, P. Exertier, D. Feraudy, A. Fienga, H. Mariey, G. Metris, H. Viot, and V. Viswanathan (2017) Lunar Laser ranging in infrared at the Grasse laser station, *Astronomie & Astrophysique*, 602, A90

[Crosta, Mignard 2006] Crosta M. T. & Mignard, F. (2006). Micro-arcsecond light bending by Jupiter. *Classical and Quantum Gravity*, 23(15), 4853.

[Damour 1996] Damour T. (1996). Testing the equivalence principle: why and how?. *Classical and Quantum Gravity*, 13(11A), A33.

[Davoust, 2011] Davoust E., Petit G., Fayard T., "One blind and three targeted searches for (sub)millisecond pulsars", *Astron. Astrophys* 534, A7, 2011.

[Dehant et al 1999] Dehant, V., Arias, F., Bizouard, Ch., Bretagnon, P., Brzezinski, A., Buffett, B., Capitaine et al., 1999, Considerations concerning the non-rigid Earth nutation theory, *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 72(4), 245–310, doi:10.1023/A:1008364926215.

[Deleflie et al, 2013] Deleflie, F, Coulot D, de Saint-Jean B, Laurain O, Exertier P (2013) GRGS Evaluation of ITRF2008, from SLR Data, International Association of Geodesy (IAG) Symposia 138, DOI 10.1007/978-3-642-32998-2_6, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, Altamimi Z and Collilieux X Eds

[Delva, Gersl 2017] Delva P., & Geršl, J. (2017a). Theoretical tools for relativistic gravimetry, gradiometry and chronometric geodesy and application to a parameterized Post-Newtonian metric. *Universe*, 3(1), 24.

[Delva et al, 2017] Delva P., Lodewyck, J., Bilicki, S., Bookjans, E., Vallet, G., Le Targat, R., ... & Gill, P. (2017b). Test of special relativity using a fiber network of optical clocks. *Physical Review Letters*, 118(22), 221102.

[Delva et al, 2018] Delva P., Puchades, N., Schönemann, E., Dilssner, F., Courde, C., Bertone, S., ... & Wolf, P. (2018). Gravitational redshift test using eccentric Galileo satellites. *Physical review letters*, 121(23), 231101.

[Delva et al, 2020] Delva P., Courde, C., Samain, E., & Kostic, U. (2020). Augmenting the Time and Frequency Transfer Capabilities of Galileo. In *2020 European Navigation Conference (ENC)* (pp. 1-8). IEEE.

[Descamps, Berthier, Mignard 2021] « Introduction aux éphémérides et phénomènes astronomiques », coord. par P. Descamps, J. Berthier, F. Mignard, IMCCE et EDP Sciences, Paris, 2021.

[De Viron et al 1999] de Viron O., Bizouard, C., Salstein, D., Dehant, V., 1999, Atmospheric torque on the Earth and comparison with atmospheric angular momentum variations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104, B3, 4861-4875.

[Deyoung et al, 1995] Deyoung, J. A., Klepczynski, W. J., McKinley, A. D., Powell, W., Mai, P., Hetzel, P., Bauch, A., Davis, J. A., Pearce, P. R., Baumont, F., Claudon, P., Grudler, P., de Jong, G., Kirchner, D., Ressler, H., Soring, A., Hackman, C., and Veenstra, L. (1995) "The 1994 International Transatlantic Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Experiment: Preliminary Results", *Proceedings of the 26th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting: 6-8 December, 1994, Reston, Virginia*, pp.39-49.

[Dudok de Wit, Bruinsma,Shibasaki, 2014] Dudok de Wit, T., S. Bruinsma, K. Shibasaki (2014) Synoptic radio observations as proxies for upper atmosphere modelling , *J. Space Weather Space Clim.*, <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014003>.

[Dudok de Wit, Bruinsma, 2011] Dudok de Wit, T., S. Bruinsma (2011) Determination of the most pertinent EUV proxy for use in thermosphere modeling, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL049028.

[Eanes, Schutz, Tapley 1983] Eanes,R.J., B.E. Schutz, B.D. Tapley, Earth and ocean tide effects on Lageos and Starlette,Proc. Ninth Int. Symp. Earth Tides, pp. 236-249, E. Schweinzerbert'she Verlagbuchhandlong, Stiuggart, 1983.

[Ermakov et al, 2014] Ermakov A.I., M.T. Zuber, D.E. Smith, C.A. Raymond C.A., G. Balmino, R. Fu, B.A. Ivanov, *Constraints on Vesta's interior structure using gravity and shape models from the Dawn mission*, Icarus 09/2014; 240, pp.146–160, 2014.

[Esposito, Balmino 1992] Esposito, P.B. and G. Balmino, *Mars Gravity and Topography*, in MARS, Arizona Univ. Press, pp. 209-248, 1992.

[ESA 1978] European Space Agency, *Space Oceanography, Navigation and Geodynamics*. SONG Workshop, Schloss Elmau, Germany, (January, 16–21, 1978), ESA-SP-137, 1978.

[ESA 1986] European Space Agency, *Solid Earth Science and Application Mission for Europe*. SESAME Workshop, Chiemsee, Germany (March, 4–6, 1986), ESA-SP-1080, 1986.

[ESA 1999] European Space Agency: *Reports for mission selection - The Four Candidate Earth Explorer Core Missions*. ESA SP-1233(1), ESA Publication Division, Noordwijk, 1999.

[Exertier et al 2006] Exertier, P., P. Bonnefond, F. Deleflie, F. Barlier, M. Kasser, R. Biancale, Y. Ménard (2006) Contribution of laser ranging to Earth's sciences, C.R. Geoscience, 338, 958-967

[Exertier et al 2014] Exertier, P., Samain, E., Martin, N., Courde, C., Laas-Bourez, M., Foussard, C., & Guillemot, P. (2014). Time transfer by laser link: data analysis and validation to the ps level. *Advances in Space Research*, 54(11), 2371-2385.

[Exertier et al 2016] Exertier P., E. Samain, C. Courde, et al. (2016) Sub-ns time transfer consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2, *Metrologia*, 53, 1395-1401.

[Exertier, Belli, Lemoine 2017] Exertier P., A. Belli, J.M. Lemoine (2017) Time biases in laser ranging observations: a concerning issue of Space Geodesy, *JASR*, 60, 948-968.

[Exertier et al 2019] Exertier P., E. Samain, A. Belli A. Schlicht, U. Hugentobler, U. Schreiber, X. Sun, J.F. McGarry, A. Neumann, W. Meng, H. Zhang, K. Tang (2019) Time and Laser Ranging: a window of opportunity for geodesy, navigation and metrology, *Journal of Geodesy*, Vol 93 (11), pp 2389-2404, doi: 10.1007/s00190-018-1173-8

[Fairhead, Watts 1989] Fairhead J.D., and A.B. Watts, *The African Gravity Project: Academic, Government and Commercial Data Integrated for New Map of Continent and Margins*. Lamont News Letter, Vol. 21:6–7, Columbia University, 1989.

[Feissel 1980] Feissel, M., 1980, Determination of the Earth Rotation Parameters by the Bureau International de l'Heure, 1962–1979, *Bull. Geod.* 54, 1, pp. 81–102.

[Feissel 1986] Feissel, M., 1986, Reports on the MERIT-COTES Campaign on Earth Rotation and Reference Systems, Bureau international de l'heure, Section de la rotation terrestre, Observatoire de Paris.

[Fey et al 2015] Fey, A.L., Gordon, D., Jacobs, C.S. et al., 2015, The Second Realization of the The International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, *AJ* 150(2), 58.

[Fienga et al 2015] Fienga A., Laskar, J., Exertier, P. et al. (2015). *Numerical estimation of the sensitivity of INPOP planetary ephemerides to general relativity parameters*. *Celest Mech Dyn Astr* 123, 325–349.

[Flick, Stomp 2002] Flick J. A. et Norbert Stomp, *Sciences de la terre au Luxembourg. Réminiscences. Publication du Musée national d'histoire naturelle du Luxembourg et du Centre européen de géodynamique et de séismologie, 280 pp., 2002.*

[Folkner et al 1994] Folkner, W.M. , Charlot, P. , Finger, M. H. , Williams, J. G. , Sovers, O. J. , Newhall, Xx , Standish, E.M., 1994, Determination of the extragalactic-planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements. *A&A* 287, 279-289.

[Forste et al 2008] Förste C., F. Flechtner, R. Schmidt, R. Stubenvoll, M. Rothacher, J. Kusche, H.K. Neumayer, R. Biancale, J.M. Lemoine, F. Barthelmes, S.L.; Bruinsma, R. König, U. Meyer, *EIGEN-GL05C - A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03426, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-03426, 2008, Vienna, Austria, 2008.

[Forste et al 2019] Förste C., O. Abrykosov, S.L. Bruinsma, C. Dahle, R. König, J.M. Lemoine, *ESA's new satellite-only gravity field model via the direct approach (GOCE-DIR-R6)*. *Frontiers of Geodetic Science*, Stuttgart, 2019.

[Fridelance, Veillet 1995] Fridelance P. & Veillet, C. (1995). Operation and data analysis in the LASSO experiment. *Metrologia*, 32(1), 27.

[Fridelance, Samain, Veillet 1997] Fridelance P., Samain, E., & Veillet, C. (1997). T2L2-Time transfer by Laser link: a new optical time transfer generation. *Experimental Astronomy*, 7(3), 191-207.

[Gabalda, Bonvalot 2017] Gabalda, G. and S. Bonvalot, *MGL_QuickView*. https://bgi.obs-mip.fr/activities/developpements-logiciels/mgl_quickview/, 2017.

[Gabalda, Bonvalot, Hipkin 2003] Gabalda, G., S. Bonvalot, R. Hipkin, *Interactive computer program to process Scintrex CG-3/3M gravity data for high resolution applications*. *Computers & Geosciences*, 29, 2, pp. 155–171, 2003.

[Garcia et al 2014] Garcia, R.F., E. Doornbos, S. Bruinsma, H. Hebert (2014) Atmospheric gravity waves due to the Tohoku-Oki tsunami observed in the thermosphere by GOCE, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2013JD021120.

[Garmier et al 2002] Garmier R, J.P. Barriot, A.S. Konopliv, D.K. Yeomans, *Modeling of the Eros gravity field as an ellipsoidal harmonic expansion from the NEAR Doppler tracking data*, *Geophys. Res. Letters*, Volume 29, Issue 8, 2002.

[Green, Fairhead 1991] Green C. M. and J.D. Fairhead, *The South American Gravity Project*. In: *Recent Geodetic and Gravimetric Research in Latin America*. Edited by W. Torge. Springer-Verlag, Berlin, 1991.

[Green, Fairhead 1994] Green C. M. and J.D. Fairhead, *The European Gravity Data Base and the WEEGP Project; a Tool for Continental Scale Basin Analysis*. EAPG 6th conference and technical exhibition, Vienna, 1994.

[Gruber et al 2000] Gruber T., A. Bode, C. Reigber, P. Schwintzer, G. Balmino, R. Biancale, J.M. Lemoine, *GRIM5-C1: Combination solution of the global gravity field to degree and order 120*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, n° 24, pp. 4005-4008, 2000.

[Guinot 1979] Guinot, B., 1979, Basic Problems in the Kinematics of the Rotation of the Earth, in *Time and the Earth's Rotation*, McCarthy, D. D. and Pilkington, J. D. (eds.), D. Reidel Publishing Company, 7–18.

[Guinot 1997] Guinot B. (1997). Application of general relativity to metrology. *Metrologia*, 34(3), 261.

[Guinot, Arias 2005] Guinot B. & Arias, E. F. (2005). Atomic time-keeping from 1955 to the present. *Metrologia*, 42(3), S20.

[Gutteriez, Wilson 1987] Gutteriez R. and C.R. Wilson, Seasonal air and water redistribution effects on the Lageos and Starlette, *Geophys. Res. Lett.* 14(9), 929-932, 1987.

[Hakuba et al 2018] Hakuba M Z, Graeme L. Stephens, Bruno Christophe, Alfred E. Nash, Bernard Foulon, Srinivas V. Bettadpur, Byron D. Tapley, Frank H. Webb. Earth's Energy Imbalance Measured From Space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, In press, 10.1109/TGRS.2018.2851976 .hal-01870008.HAL Id: hal-01870008 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01870008> Submitted on 7 Sep 2018.

[He, Tapley, Eanes 1982] He, M., B.D. Tapley and R.J. Eanes, Earth rotation parameters deduced from Starlette laser ranging, *Sci. Ser. A*, 25 (10), *Eng. Trans.*, 1090-1098, 1982.

[Hess, Bailey, Le Poncin-Lafitte 2015] Hess A., Bailey, Q.G., Le Poncin-Lafitte, C. et al. (2015). Testing Lorentz symmetry with planetary orbital dynamics. *Phys. Rev. D* 92(6), 064049.

[Hess, Hestroffer, Le Poncin-Lafitte 2015] Hess A., Hestroffer, D., Le Poncin-Lafitte, C., and David P. (2015). Tests of gravitation with Gaia observations of Solar System Objects. arXiv: 1509.06868 [gr-qc].

[Huang et al 2016] Huang Y J, Fujieda M, Takiguchi H, Tseng W H and Tsao H W, "Stability improvement of an operational two-way satellite time and frequency transfer system", *Metrologia* 53 881–90, 2016.

[International Altimetry Team 2021] International Altimetry Team (2021) Altimetry for the future: Building on 25 years of progress. *Adv. in Space Res.*, 68(2), 319-363

[Jackson et al 2020] Jackson, D.R., Bruinsma, S., et al. (2020) The Space Weather Atmosphere Models and Indices (SWAMI) Project: Overview and First Results, *J. Space Weather Space Clim.*, doi: <https://doi.org/10.1051/swsc/2020019>.

[Kahan et al 2021] Kahan D.S., W.M. Folkner , D.R. Buccino , V. Dehant , S. Le Maistre , A. Rivoldini , T. Van Hoolst , M. Yseboodt , J.C. Marty, *Mars precession rate determined from radiometric tracking of the InSight Lander*, *Planetary and Space Science*; <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105208>, 2021.

[Kaula 1969] 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.

[Kirchner et al 1993] Kirchner D., Ressler H., Grudler P., Baumont F., Lewandowski W. , Hanson W., Klepczynski W., and Urich P. (1993). Comparison of GPS and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km, *Metrologia*, 30, 183-192.

[Klioner et al 2022] S. A. Klioner, L. Lindegren, F. Mignard, J. Hernandez, M. Ramos-Lerate, U. Bastian, A. Bombrun, D. Hobbs, U. Lammers, D. Michalik, and et al., 2022, Gaia Early Data Release 3. The celestial reference frame (Gaia-CRF3). *A&A* 667, A148.

[Kovalevsky, Barlier 2010] Kovalevsky J. et F. Barlier, *Les débuts de la géodésie spatiale en France*. XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie, n° 125, 2010.

[Kovalevsky, Mueller 1981] Kovalevsky, J., Mueller, I.I., 1981, Comments on Conventional Terrestrial and Quasi-Inertial Reference Systems. Gaposchkin and Kolaczek eds., Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics, D. Reidel, Dordrecht.

[Kovalevsky, Mueller, Kolaczek 1989] Kovalevsky, J., Mueller, I.I., Kolaczek, B., 1989, Reference frames in astronomy and geophysics, Kluwer Acad. Press.

[Kovalevsky et al 1997] Kovalevsky, J., Lindegren, L., Perryman, M. A. C., Hemenway, P. D., Johnston et al., 1997, The HIPPARCOS catalogue as a realisation of the extragalactic reference system, *A&A* 323, 620-633.

[Lala, Barlier, Oyharcabal 1978] Lala, P., F. Barlier and G. Oyharcabal, *Interpretation of the D5B satellite measurements and the new model of the Earth's albedo*. Bull. Astron. Csechosl, 29, 238-243, 1978.

[Lambeck, Cazenave 1976] Lambeck K. & Cazenave A., Variations à long terme de la durée du jour et changements climatiques, *Geophys. JR Astr. Soc.* 46, 555-573, 1976.

[Lambeck, Cazenave 1977] Lambeck K., Cazenave A., Le taux de rotation variable de la Terre: une discussion de certaines causes et conséquences météorologiques et océaniques, *Phil. Trans. Soc. Lond. A.* , 284, 495-506, 1977.

[Lambert, Gontier 2009] Lambert, S., Gontier, A.-M., 2009, On radio source selection to define a stable celestial frame, *A&A* 493, 1, pp.317-323.

[Laurent-Varin, Jurado 2015] Laurent-Varin J., E. Jurado, La mission Rosetta et le calcul de la gravité, XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie, N°142, 2015.

[Lejba, Schillak, Wnuck 2007] Lejba, P., Schillak, S., Wnuck, E., Determination of orbits and SLR stations coordinates on the basis laser observations of the satellites Starlette and Stella, *Advanced Space Research*, 40 (1) pp 143-149, 2007.

[Lemoine et al 1998] 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, *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*. NASA T/P-1998-206861, 1998.

[Lemondé et al 1999] Lemondé, P., Laurent, P., Simon, E., Santarelli, G., Clairon, A., Salomon, C., ... & Petit, G. (1999). Test of a space cold atom clock prototype in the absence of gravity. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(2), 512-515.

[Le Poncin-Lafitte, Hess, Lambert 2016] Le Poncin-Lafitte C, Hess, A., and Lambert, S. (2016). Lorentz symmetry and very long baseline interferometry. *Phys. Rev. D* 94, 125030.

[Levallois 1988] 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

[Lewandowski et al 1993] Lewandowski W., Petit, G., Baumont, F., Gaignebet, J., Grudler, P., Veillet, C., ... & Wiant, J. (1993, December). Comparison of LASSO and GPS time transfers. In *Proceedings of the 25th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting* (pp. 357-366).

[Lion et al 2017] Lion G., Panet, I., Wolf, P., Guerlin, C., Bize, S., & Delva, P. (2017). Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clock comparisons. *Journal of Geodesy*, 91(6), 597-611.

[Ma et al 1998] Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., Fey, A. L., Gontier, A.-M., Jacobs et al., 1998, The International Celestial Reference Frame as realized by Very Long Baseline Interferometry, *AJ* 116(1), 516-546, doi: 10.1086/300408.

[Mainguy 1984] Mainguy A-M, *Proposition d'un principe de mesure absolue du bilan radiatif basé sur l'accélérométrie spatiale. Démonstration de sa faisabilité à l'aide des résultats de l'expérience Castor/Cactus*. thèse, Université de Paris VI, le 8 novembre 1984

[Makedonskii et al 1994] Makedonskii E.L., G. Balmino, V.F. Galazin, M.G. Kogan, M.K. McNutt, J.D. Fairhead, *Gravity field over the Former Soviet Union mapped*. *EOS*, Vol. 75, n° 40, pp. 463-464, 1994.

[Manton, Fairhead 1993] Manton D.C. and J.D. Fairhead, *The South East Asia Gravity Project, Petroleum Exploration in Papua New Guinea*. In: Petroleum Exploration and Development in Papua New Guinea. Proceedings of the 2nd PNG Petroleum Convention, Port Moresby, G.J. & Z. Carman ed. ,1993.

[Marty et al 2009] 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.

[Matthews, Herring, Buffett 2002] Mathews, P. M., Herring, T. A., & Buffett, B. A. 2002, Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior. J. Geophys. Res. 107, B4, 10.1029/2001JB000165.

[Ma et al 2018] Ménoret, V., P. Vermeulen, N. Le Moigne, S. Bonvalot, P. Bouyer, A. Landragin, B. Desruelle, *Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter*. Nature Scientific Report, 8, 12300. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30608-1>, 2018.

[Metivier, Altamimi, Touby 2020] Métivier, L., Altamimi, Z., Touby, H., 2020, Past and present ITRF solutions from geophysical perspectives, Advances in Space Research, 65, 12, 2711-2722.

[Mignard, Froeschle 2000] Mignard, F. and Froeschle, M., 2000, Global and local bias in the FK5 from the Hipparcos data, A&A 354, 732-739

[Mignard et al 2007] Mignard F., Cellino, A., Muinonen, K., Tanga, P., Delbo, M., Dell'Oro, A., ... & Virtanen, J. (2007). The Gaia mission: Expected applications to asteroid science. *Earth, Moon, and Planets*, 101, 97-125.

[Muller-Wodarg et al 2016] Müller-Wodarg I.C.F., S. Bruinsma, J.C. Marty, H. Svedhem, *In situ observations of waves in Venus's polar lower thermosphere with Venus Express aerobraking*, Nature Physics, Volume 12, Issue 8, pp. 767-771, 2016.

[Nordtvedt 1968] Nordtvedt K. (1968). Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory. *Phys. Rev.* 169 (1017).

[Olgiati et al 1995] Olgiati A., G. Balmino, M. Sarrailh and C.M. Green, *Gravity anomalies from satellite altimetry : comparison between computation via geoid heights and via deflections of the vertical*, Bulletin Géodésique, 69, pp. 252-260, 1995.

[Ortega Molina, 1988] Ortega Molina A., "Participation à la reconstruction des trajectoires des ballons de Vénus de la mission Vega par interférométrie différentielle à très grande base (Delta VLBI) ", Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1988.

[Pavlis et al 2012] Pavlis N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, J.K. Factor, *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*, J. Geophys. Res., Vol. 117, B04406, 2012.

[Pearlman et al 2019] Pearlman, M., Arnold, D., Davis, M., Barlier, F., Biancale, R., Vasiliev, V., ... & , M. (2019). *Laser geodetic satellites: a high-accuracy scientific tool*. Journal of Geodesy, 93(11), 2181-2194.

[Pereira Dos Santos, Bonvalot 2016] Pereira Dos Santos, F. and S. Bonvalot, *Cold Atom Absolute Gravimetry*. In : Grafarend Ed., Encyclopedia of Geodesy. Springer. 2016

[Petit, 1989] Petit G., Boucher C., Lestrade J-F., "First direct geodetic link between Europe, Africa and South America with a multi station VLBI array", Bull. Géod. 63, 331-341, 1989.

[Petit, 1990] Petit, G., Fayard, T., Lestrade, J-F., "A method to enhance the cross correlation of millisecond-pulsar VLBI data: observations of PSR1937+214", Astron. Astrophys. 231, 581, 1990.

[Petit, Wolf 1993] Petit G. & Wolf P. (1993). Relativistic theory for picosecond time transfer in the vicinity of the Earth. In Proceedings of the 25th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, December 1993, (pp. 205-216).

[Petit, 1994] Petit G., "Observations VLBI des pulsars millisecondes pour le raccordement des systèmes de référence célestes et la stabilité des échelles de temps", Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1994.

[Petit, 1995] Petit G., Fayard T., Lestrade J-F., "High precision timing of the millisecond pulsar 1937+21 by autocorrelation of VLBI data", *Astron. Astrophys.* **303**, L17, 1995.

[Petit, 2000] Petit, G., 2000, Report of the BIPM/IAU Joint Committee on relativity for space-time reference systems and metrology, in Proc. of IAU Colloquium 180, edited by Johnston K.,J., D.D. McCarthy, B.J. Luzum and G.H.Kaplan, USNO, 275-282.

[Petit, Luzum 2010] G. Petit and B. Luzum (eds.), IERS Conventions 2010, IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179, ISBN 3-89888-989-6.

[Preston, 1986] Preston R.A, Hildebrand C.E, Purcell G.H. et al., "Determination of Venus winds by ground-based radio tracking of the VEGA balloons", Science 231, 1414, 1986.

[Principe, 2011] Principe F., Bacci G., Giannetti F., Luise M., "Software-Defined Radio Technologies for GNSS Receivers: A Tutorial Approach to a Simple Design and Implementation", International Journal of Navigation and Observation, Article ID 979815,

[Pihan-Le Bars et al 2019] Pihan-Le Bars H., Guerlin, C., Hees, A., Peaucelle, R., Tasson, J. D., Bailey, Q. G., ... & Wolf, P. (2019). New test of Lorentz invariance using the MICROSCOPE space mission. *Physical Review Letters*, 123(23), 231102.

[Prusti et al 2016] Prusti T., De Bruijne, J. H. J., Brown, A. G., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., ... & Navascués, D. B. (2016). The GAIA mission. *Astronomy & Astrophysics*, 595, A1.

[Rakotoary 1986] Rakotoary J.C., *Géoiide gravimétrique sur Madagascar*, 12th IGC meeting, Toulouse, Proceedings in BGI Bulletin N° 60, 1986.

[Rebai, 1992] Rebaï N., "Traitement de la campagne européenne de VLBI Mobile 1989 - Contribution a un nouveau réseau géodésique de surveillance géodynamique Europe-Afrique au niveau de la méditerranée occidentale", Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1992.

[Reigber et al 2002] Reigber C., G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. König, S. Loyer, K.H. Neumayer, J.C. Marty, F. Barthelmes, F. Perosanz, S.Y. Zhu, *A high-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S)*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, N° 14, 10,1029/2002GL015064, 2002.

[Reynaud, Jaekel 2008] Reynaud S. & Jaekel M.-T. (2008). Tests of general relativity in the solar system, arXiv:0801.3407 {gr-qc}.

[Rogers, 1983] Rogers A.E et al., "Very-Long-Baseline Radio Interferometry: The Mark III System for Geodesy, Astrometry, and Aperture Synthesis" *Science*, 219, 51, 1983.

[Rosenblatt et al 2021] Rosenblatt P., C. Dumoulin, J.C. Marty, A. Genova, *Determination of Venus' interior structure with EnVision*, *Remote Sensing* (in press), 2021.

[Rougeaux, 2000] Rougeaux B., Petit G., Fayard T., Davoust E., "A survey for fast and dispersed millisecond pulsars", *Exper. Astron.*, 10, 473-485, 2000.

[Rüdiger et al 2001] Rüdiger A., Brillet, A., Danzmann, K., Giazotto, A., & Hough, J. (2001). Gravitational wave detection by laser interferometry—on earth and in space. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IV-Physics*, 2(9), 1331-1341.

[Sagdeev, 1986] Sagdeev R.Z., Linkin V.M., Blamont J.E., Preston R.A., "The VEGA Venus balloons experiment", *Science* 231, 1407, 1986.

[Sagdeev, 1992] Sagdeev R.Z. et al., "Differential VLBI measurements of the Venus atmosphere dynamics by balloons: VEGA project", *Astron. Astrophys.* 254, 387, 1992.

[Salomon, Veillet 1996] Salomon C. & Veillet, C. (1996). Aces: Atomic clock ensemble in space. *Space Station Utilisation*, Vol. 385, p. 295.

[Salomon et al 2001] Salomon C., Dimarcq, N., Abgrall, M., Clairon, A., Laurent, P., Lemonde, P., ... & Feltham, S. (2001). Cold atoms in space and atomic clocks: ACES. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Séries IV-Physics*, 2(9), 1313-1330.

[Sarrailh, Balmino, Doublet 1997] Sarrailh M., G. Balmino, D. Doublet, *The Arctic and Antarctic oceans gravity field from ERS1 altimetric data*, « Geoid and Marine Geodesy », Segawa et al. (eds), Proceedings, I.A.G. Symposia, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Vol. 117, pp. 437-444, 1997.

[Schutz et al 1989] Schutz, B.E., M.K. Cheng, C.K. Shum, R.J. Eanes and B.D. Tapley, *Analysis of Earth rotation from Starlette*, *J. Geophys. Res.* , 94(B8),10167-10174, 1989.

[Schutz et al 1993] Schutz, B.E., M.K. Cheng, R.J. Eanes, C.K. Shum and B.D. Tapley, Geodynamic results from Starlette orbit analysis. In: D.E. Smith and D.L. Turcotte, Editors, *Contributions of Space Geodesy and Geodynamics: Earth Dynamics*, Geodyn. Ser.vol. 24, AGU, Washington, DC (1993), pp. 175–190, 1993.

[Schwintzer et al 1991] Schwintzer P., C. Reigber, F.H. Massmann, W. Barth, J.C. Raimondo, M. Gerstl, H. Li, R. Biancale, G. Balmino, B. Moynot, J.M. Lemoine, J.C. Marty, Y. Boudon, F. Barlier, *A new earth gravity field model in support of ERS-1 and SPOT-2 : GRIM4-S1/C1*. DGF, Abt. I (DFG), München, 1991.

[Schwintzer et al 1992] Schwintzer P., C. Reigber, W. Barth, F.H. Massmann, J.C. Raimondo, M. Gerstl, A. Bode, H. Li, R. Biancale, G. Balmino, B. Moynot, J.M. Lemoine, J.C. Marty, F. Barlier, Y. Boudon, *GRIM4 Globale Erdschwerefeldmodelle (GRIM4-S2 und C2)*. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 117, p. 227-247, 1992.

[Schwintzer et al 1993] Schwintzer P., C. Reigber, A. Bode, Z. Chen, F.H. Massmann, J.C. Raimondo, J.M. Lemoine, G. Balmino, R. Biancale, B. Moynot, J.C. Marty, F. Barlier, Y. Boudon, *Improvement of*

GRIM4 Earth Gravity Models Using Geosat Altimeter and SPOT-2 and ERS-1 Tracking Data. doi: [10.1007/978-3-642-78149-0_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-78149-0_20), 1993

[Schwintzer et al 1997] Schwintzer P., C. Reigber, A. Bode, Z. Kang, S.Y. Zhu, F.-H. Massmann, J.C. Raimondo, R. Biancale, G. Balmino, J.M. Lemoine, B. Moynot, J.C. Marty, F. Barlier, Y. Boudon, *Long-wavelength global gravity field models : GRIM4-S4, GRIM4-C4*. Journal of Geodesy, Vol. 71, pp. 189-208, 1997.

[Sekido, 2021] Sekido M et al., “A broadband VLBI system using transportable stations for geodesy and metrology - An alternative approach to the VGOS concept”, J. Geodesy, 95, 41, 2021.

[Seoane et al 2009] Seoane, L., Nastula J., Bizouard, C, Gambis, D., 2009, The use of gravimetric data from GRACE mission in the understanding of polar motion variations, Geophys. J. Int. (2009) 178, 614–622.

[Siddle et al 2020] Siddle A.G., I.C.F. Mueller-Wodarg, S. Bruinsma, J.C. Marty, *Density structures in the martian lower thermosphere as inferred by Trace Gas Orbiter accelerometer measurements*, Icarus, 10.1016, 2020.

[Smith et al 1999] Smith D.E., W.L. Sjogren, G.L. Tyler, G. Balmino, F.G. Lemoine and A.S. Konopliv, The gravity field of Mars: results from Mars Global Surveyor, Science, Vol. 286, pp. 94-97, 1999.

[Soffel et al 2003] Soffel M., Klioner, S. A., Petit, G., Wolf, P., Kopeikin, S. M., Bretagnon, P., ... & Xu, C. (2003). The IAU 2000 resolutions for astrometry, celestial mechanics, and metrology in the relativistic framework: explanatory supplement. The Astronomical Journal, 126(6), 2687.

[Souchay, Kinoshita 1997] Souchay J., Kinoshita, H. : Corrections and new developments in rigid-Earth nutation theory. II. Influence of second-order geopotential and direct planetary e_ect. A&A,318:639–652, Feb 1997.

[Souchay et al 1999] Souchay, J. Loysel, B., Kinoshita H., Folgueira M., 1999, Corrections and new developments in rigid earth nutation theory. III. Final tables “REN-2000” including crossed-nutation and spin-orbit coupling effects. A&AS 135:111–131.

[Stephens, Campbell, Vendre Haar 1981] Stephens G.L., G.C. Campbell and T.H. Vendre Haar, Earth Radiation Budgets, J.G.R. 86, C10 9737-9760 , October ,1981.

[Storz et al 2005] Storz, M.F., B.R. Bowman, M.J.I. Branson, S.J. Casali, and W.K. Tobiska (2005) High accuracy satellite drag model (HASDM), *Adv. Space Res.*, 36, 2497–2505, DOI: 10.1016/j.asr.2004.02.020.

[Tasson 2016] Tasson J. D. (2016). The Standard-Model Extension and Gravitational Tests. *Symmetry*. 8. 10.3390/sym8110111.

[Teyssandier 2005] Teyssandier P. (2005). Theories of gravity and experimental tests in the post-newtonian limit. In *Gravitation, Geometry and Relativistic Physics: Proceedings of the “Journées Relativistes” Held at Aussois, France, May 2–5, 1984*. Lecture Notes in Physics 212, (pp. 154-173). Springer Berlin Heidelberg.

[Touboul et al 2001] Touboul P., Rodrigues, M., Métris, G., & Tatry, B. (2001). MICROSCOPE, testing the equivalence principle in space. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IV-Physics*, 2(9), 1271-1286.

[Touboul, Metris, Rodrigues 2017] Touboul, P., Métris, G., Rodrigues, M. et al. (2017). MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle. *Phys. Rev. Lett.* 119:231101.

[Touboul et al 2022] Touboul, P., Métris, G., Rodrigues, M., Bergé, J., Robert, A., Baghi, Q., ... & Visser, P. (2022). MICROSCOPE Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle. *Physical review letters*, 129(12), 121102.

[Touboul, Foulon, Willemenot 1996] Touboul P., B. Foulon, E. Willemenot, *Electrostatic space accelerometers for present and future missions*. 47th International Astronautical Congress Beijing, IAF-96 -J.1.02, 1996.

[Touboul, Foulon, Willemenot 1999] Touboul P., B. Foulon, E. Willemenot, *Electrostatic space accelerometers for present and future missions*, *Acta Astronautica* Vol. 45, No. 10, pp. 605 - 617, 1999a.

[Touboul et al 1999] Touboul P., E. Willemenot, B. Foulon, V. Josselin, *Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: synergy and evolution*, *Bolletino Geof. Teor. Appl.* 40, 3-4, pp.321-327, 1999b.

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

[Vallenari et al 2023] A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, and et al., 2023, Gaia Data Release 3. Summary of the contents and survey properties, *A&A* 674, A1.

[Viswanathan et al 2018] Viswanathan V., *Fienga, A., Minazzoli, O Bernus, L , Laskar, J. and Gastineau, M. (2018)*. The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 476(2), 1877–1888.

[Vu, Bruinsma, Bonvalot, 2019] Vu D. T., S. Bruinsma, S. Bonvalot. *A high-resolution gravimetric quasigeoid model for Vietnam*. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 65, 2019.

[Wagner et al 2012] Wagner T.A., Schlamminger, S., Gundlach, J. H. and Adelberger, E. G. (2012). Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Class. Quantum Grav.*, 29(18), 184002.

[Wilkins 1988] Wilkins G.A. (1988), Review of the achievements of project MERIT for the intercomparison of techniques for monitoring the rotation of the Earth, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics (Proc. IAU Symp. 128)*, A.K. Babcock et G.A. Wilkins, éd., p. 227-232, Kluwer.

[Will, Nordtvedt, 1972] Will C.M. and Nordtvedt, K. Jr. (1972). Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. I. Preferred-Frame Theories and an Extended PPN Formalism. *The Astrophysical Journal*. 177: 757.

[Willis et al 1989] Willis P., R. Biancale, C. Boucher, A. Cazenave, M. Dorrer, M. Kasser, F. Nouel, *The DORIS system: Overview and plans*, 5th International Geodetic Symposium on satellite positioning, Las Cruces, USA, Mars 1989

[Wolf, Petit 1995] Wolf P. & Petit, G. (1995). Relativistic theory for clock syntonization and the realization of geocentric coordinate times. *Astronomy and Astrophysics*, 304, 653.

[Wolf, Petit 1997] Wolf P. & Petit, G. (1997). Satellite test of special relativity using the global positioning system. *Physical Review A*, 56(6), 4405.

[Wziontek et al 2021] Wziontek H., S. Bonvalot, R. Falk, G. Gabalda, J. Mäkinen, V. Palinkas, L. Vitushkin, *Status of the International Gravity Reference System and Frame*. *Journal of Geodesy*, 95:7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>, 2021

[Zahorec et al 2021] Zahorec P., J. Papčo, R. Pašteka, M. Bielik, S. **Bonvalot**, C. Braitenberg, J. Ebbing, G. Gabriel, A. Gosar, A. Grand, H.-J. Götze, G. Hetényi, N. Holzrichter, E. Kissling, U. Marti, B. Meurers, J. Mrlina, A. Pastorutti, C. Salaün, M. Scarponi, J. Sebera, L. Seoane, P. Skiba, E. Szűcs, M. Varga, *The first pan-Alpine gravity database, a modern compilation that crosses frontiers*. *Earth System Science Data*, 13, 2165-2209. <https://essd.copernicus.org/articles/13/2165/2021/>, 2021.

[Zerhouni, Capitaine 2009] Zerhouni, Z., Capitaine, N., 2009, Celestial pole offsets from lunar laser ranging and comparison with VLBI, *A&A* 507, 1687–1695

[Zuber et al 2000] Zuber M.T., S.C. Solomon, R.J. Phillips, D.E. Smith, G.L. Tyler, O. Aharonson, G. Balmino, W.B. Banerdt, J.W. Head, C.L. Johnson, F.G. Lemoine, P.J. McGovern, G.A. Neumann, D.D. Rowlands, S. Zhong, *Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity*, *Science*, Vol. 287, pp. 1788-1792, 2000

7. Contributeurs

1. Le GRGS 1971-2021 (GB JPB NC CB FB)
2. Contributions aux missions spatiales du CNES
 - 2.1 Missions géodésiques et accélérométriques (FB AMM PE)
 - 2.2 Missions altimétriques (AC CB PW)
 - 2.3 DORIS sur SPOT-2 (CB AC PW)
 - 2.4 VLBI pour Ballons de Venus (GP LB)
 - 2.5 Missions de gravimétrie spatiales, rôle de l'accélérométrie (GB SBr)
 - 2.6 Géodésie planétaire pour missions d'exploration planétaire (GB)
 - 2.7 Modèles de densité de la haute atmosphère et orbitographie spatiale (FB SBr)
 - 2.8 Missions astrométriques (Hipparcos, Gaia) (FM)
- 3 Contributions aux projets de coopération internationale bi- ou multi-latérale
 - 3.1 Laser satellite et lunaire , ILRS (FB FD PE)
 - 3.2 Doppler, TRAPOL, MEDOC, DORIS et IDS (CB NC JML PW LS)
 - 3.3 GNSS et IGS (FP CB PW)
 - 3.4 VLBI et IVS (PC GP)
 - 3.5 Gravimétrie et BGI (GB SB)
 - 3.6 Coopération franco-allemande sur les modèles globaux de potentiel (GB)
 - 3.7 Marégraphie et PSMSL (GW AC MFL)
 - 3.8 Systèmes célestes, terrestres, rotation de la Terre, BIH et IERS (NC CB ZA FD CBi)
 - 3.9 Temps Frequence et physique fondamentale (GM ND)
 - 3.10 Observatoires géodésiques fondamentaux (CB JPBa FB ZA MM)
 - 3.11 Services internationaux (FD NC CB ZA GW SB CBi)
- 4 Ecoles d'été et séminaires (JPB)
- 5 Conclusions : perspectives. (MM JPB)

Zuheir Altamimi (ZA)
Georges Balmino (GB)
François Barlier (FB)
Jean-Pierre Barriot (JPBa)
Christian Bizouard (CBi)
Sylvain Bonvalot (SB)
Loic Boloh (LB)
Claude Boucher (CB)
Jean-Paul Boy (JPB)
Sean Bruinsma (SBr)
Nicole Capitaine (NC)
Anny Cazenave (AC)
Patrick Charlot (PC)
Florent Deleflie (FD)
Noel Dimarcq (ND)
Pierre Exertier (PE)
Marie-Françoise Lalancette (MFL)
Jean-Michel Lemoine (JML)
Anne-Marie Mainguy (AMM)
Mioara Manda (MM)
Gilles Metris (GM)
François Mignard (FM)
Felix Perosanz (FP)
Gerard Petit (GP)
Laurent Soudarin (LS)
Pascal Willis (PW)
Guy Woppelmann (GW)

ISBN : 978-2-491688-09-7

ISSN : 2724-8372