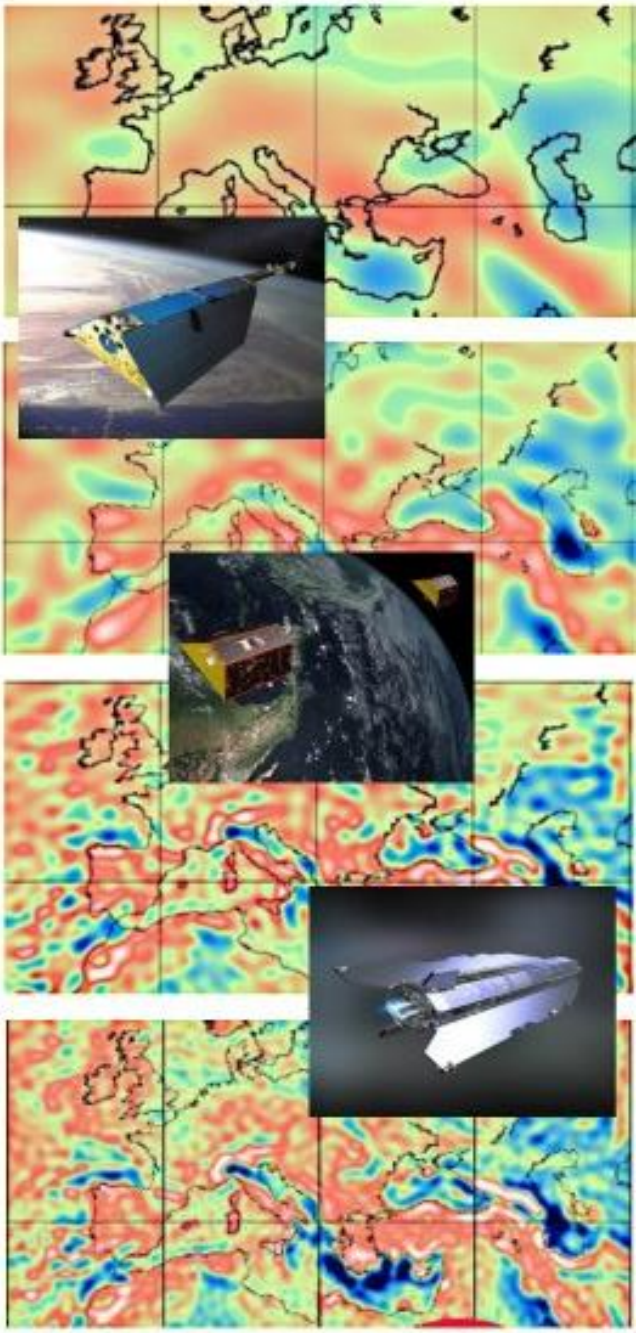
Collection du Bureau des longitudes

Volume 10

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Fascicule 2



Contribution française aux modèles globaux de potentiel terrestre

Georges Balmino

Collection du Bureau des longitudes - Volume 10

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Fascicule 2

Contribution française aux modèles globaux de potentiel terrestre

Georges Balmino

Bureau des longitudes

© Bureau des longitudes, 2021

ISBN : 978-2-491688-07-3
ISSN : 2724-8372

Préface

2019 a vu la célébration du centenaire de plusieurs unions internationales créées en 1919 suite à l'établissement d'un Conseil international de recherches scientifiques lors d'une conférence tenue à Bruxelles du 18 au 28 juillet 1919. Ce fut alors l'occasion de rappeler le rôle éminent de la France dans ces unions, et plus spécifiquement celui du Bureau des longitudes dans trois d'entre elles, en l'occurrence l'Union astronomique internationale (UAI), l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) et l'Union radioscientifique internationale (URSI).

Plus spécifiquement encore, ce fut l'occasion de constater que la géodésie en fut un exemple important mais souvent méconnu.

Dans ce contexte, nous avons ainsi souhaités publier dans la collection du Bureau des longitudes un ensemble de fascicules illustrant le thème *100 ans de géodésie française (1919-2019).*

Un premier fascicule est paru récemment sur la télémétrie laser sur satellites, par François Barlier et moi-même.

J'ai donc le plaisir de voir publier le second rédigé promptement par Georges Balmino sur les modèles globaux de champ de pesanteur terrestre.

Claude Boucher
Membre du Bureau des longitudes
Président de la Commission sur les infrastructures géodésiques

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Contribution française aux modèles globaux de potentiel terrestre

Georges Balmino

Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale
C.N.E.S. et O.M.P., Toulouse

Résumé

Nous retraçons les travaux des équipes de géodésie spatiale françaises sur la détermination du champ de gravitation terrestre, essentiellement par les méthodes satellitaires globales, depuis la fin des années soixante. Outre la réussite de la communauté nationale dans ce domaine c'est un exemple remarquable de coopération franco-allemande sur le long terme, avec des résultats notables s'étalant sur cinq décennies, des missions originales, et des perspectives de la poursuite de ces recherches pour contribuer à la surveillance de notre planète.

Labor omnia vincit improbus[1]
(Géorgiques, Virgile, Livre 1)

[1] *Un travail acharné vient à bout de tout.*

Introduction

L'observation de la Terre depuis l'espace a révolutionné notre vision de sa surface, de ses composantes solides et fluides (océans, atmosphères, glaces), mais aussi de son intérieur grâce à la mesure de son champ de gravitation à partir de l'analyse des perturbations orbitales des satellites artificiels, tout d'abord suivies depuis le sol, ensuite d'observations inter-satellites, puis de mesures nouvelles par des instruments spécifiques à bord. La France a très tôt démarré des recherches dans ce domaine (*Kovalevsky & Barlier*, 2010) en couvrant la plupart des aspects : méthodes, développements instrumentaux, grands logiciels de traitement, et ce par des équipes de plusieurs organismes, fédérées autour de cette thématique et au sein du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS).

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 ainsi que le résume la figure 1. La gravité, ou pesanteur, en un point de la Terre est la somme de l'attraction gravitationnelle (newtonienne) et de l'accélération centrifuge, toutes deux dérivant de potentiels. Dans la suite nous utilisons, par abus de langage, le terme *potentiel* pour désigner le seul potentiel de gravitation.

Un modèle global de potentiel est le plus souvent représenté par une série (tronquée) d'harmoniques sphériques, fonctions à deux indices (le degré et l'ordre) multipliées par les coefficients harmoniques (à deux indices également) qu'il faut déterminer; le degré de troncature, L, correspond à sa résolution spatiale, égale à 20 000 km /L, et l'on parle de modèle (L,L). Des modèles locaux, souvent à haute résolution, peuvent être calculés à partir de données gravimétriques (mesures, ou valeurs dérivées de l'altimétrie spatiale des océans) et exprimés en termes de hauteur du géoïde, ou d'anomalies de gravité, parfois d'autres fonctionnelles. Les variations temporelles du potentiel global, suivies depuis presque deux décennies, sont données par des modèles en harmoniques sphériques calculés à un certain intervalle de temps (un mois, ou moins).

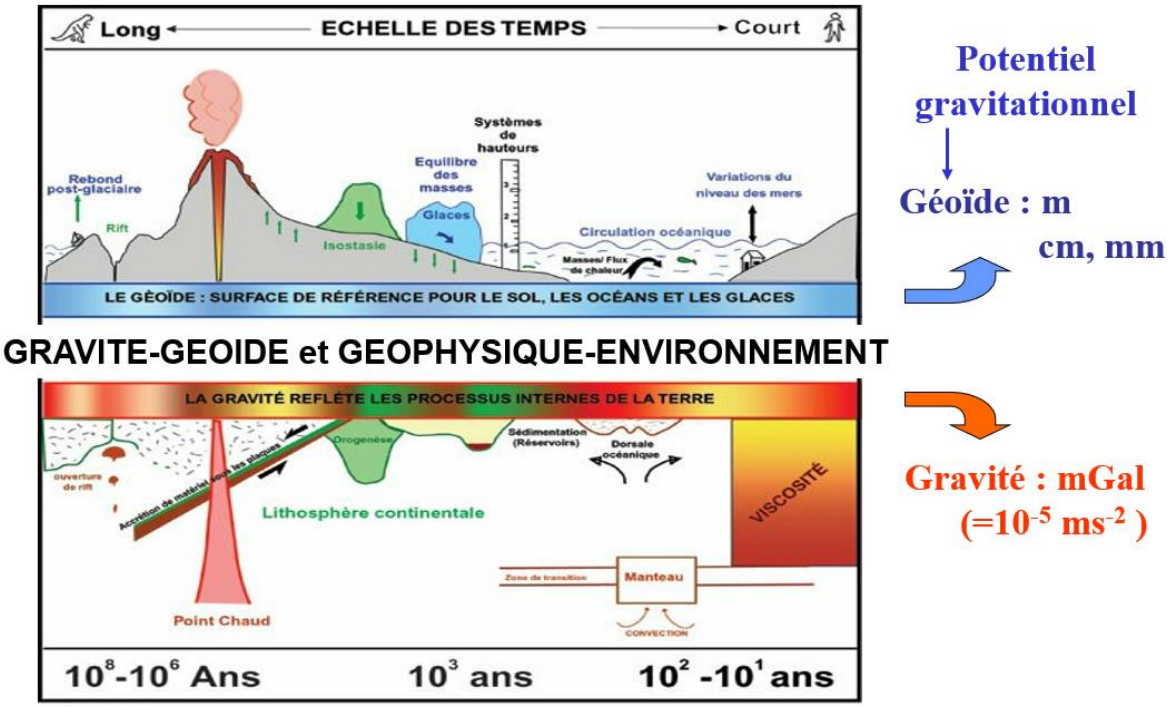


Fig. 1. *Le champ de gravité de la Terre permet d'accéder à nombre de phénomènes liés à la forme, à la structure de surface et de l'intérieur de notre planète, et à leur évolution dans le temps. Le géoïde est une surface équipotentielle du potentiel de gravité (gravitation + centrifuge), sa forme est mesurée par rapport à un ellipsoïde de référence. Les variations de gravité (pesanteur) sont exprimées en milligal.*

La géodésie spatiale a été une vraie révolution pour la connaissance de la forme de la Terre, de ses mouvements (*Barlier & Lefebvre*, 2001) 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, ce que l'on a appelé "la force de la dynamique". Ceci sous réserve, bien sûr, de satisfaire un certain nombre de conditions : (1) observer des satellites d'altitude la plus basse possible pour bénéficier de perturbations orbitales maximales (leur décroissance est quasi exponentielle avec l'altitude), étant limités *in fine* par l'atmosphère terrestre complexe et dont les effets sont délicats à modéliser; (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 (quasi polaires de préférence mais pas

uniquement – par exemple à cause des phénomènes de résonance), 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. La figure 2 est un synoptique des techniques spatiales d'observation utilisées pour la cartographie du potentiel ; nous y reviendrons au cours de cet article. La France s'est particulièrement illustrée dans la télémétrie laser (*Barlier & Boucher*, 2020), le système DORIS développé par le CNES (*Balmino et al*., 2021), 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 : CHAMP, GRACE, GOCE.

Une caractéristique importante de la détermination des modèles de potentiel pendant longtemps fut que l'on devait inclure dans le calcul, du fait de leur connaissance limitée, les positions des stations d'observation, les coefficients harmoniques de certaines ondes de marées océaniques, des paramètres pour mieux tenir compte des forces de surface, etc. Aujourd'hui, seuls quelques paramètres empiriques sont conjointement ajustés pour palier à certaines faiblesses de modélisation. La méthodologie générale a été décrite dans de nombreux articles et ouvrages (par exemple *Balmino*, 2020).

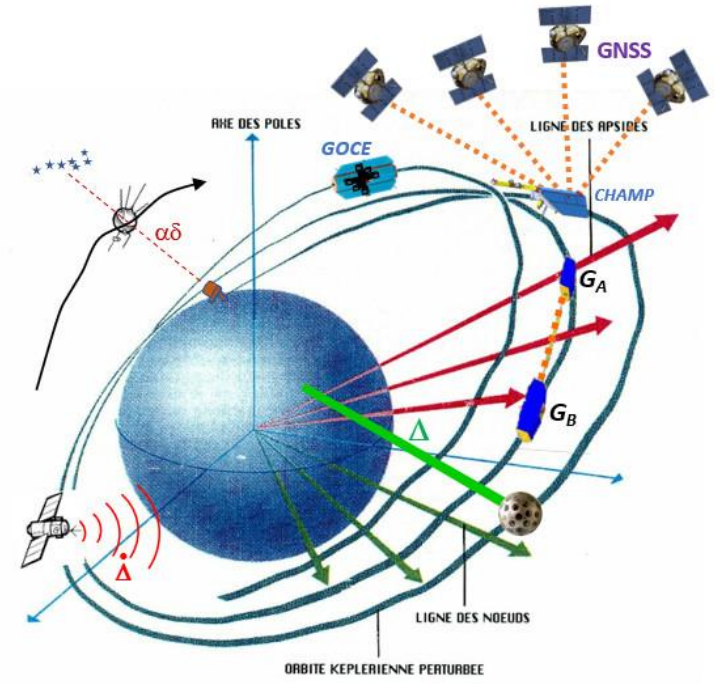


Fig. 2. *Les techniques d'observation utilisées en géodésie spatiale, particulièrement pour la détermination du potentiel terrestre.* ($\alpha\delta$) : *photographie du satellite sur fond d'étoiles;* Δ *: télémétrie laser;* $\dot{\Delta}$: *mesure Doppler (descendante, ou ascendante : système* DORIS*);* GNSS *: mesures de distance et de vitesse depuis une constellation de satellites de navigation de haute altitude;* CHAMP *: satellite dédié, d'altitude basse;* G_A, G_B *: satellites bas, co-orbitant, mesurant leur vitesse relative (missions GRACE et GRACE-FollowOn);* GOCE *: satellite d'altitude très basse, muni d'un gradiomètre. Des détails sont donnés ci-après.*

Bien entendu, les modèles ainsi calculés à partir des seules mesures spatiales, dénommés "*solutions satellites*", ont une résolution ρ limitée par l'altitude des trajectoires observées (ρ est de l'ordre de l'altitude, au mieux, en partie du fait de la loi de Kaula qui a établi la décroissance des harmoniques du potentiel terrestre en ~$10^{-5}/L^2$) ; les premières solutions avaient une résolution spatiale maximum de 2000 km. 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 (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 jusqu'à des résolutions globales de 1° (L = 180), puis de 0,5° (L = 360), et aujourd'hui 5' (L = 2160), 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, spécifiques, contrairement à la plupart des précédentes – la géodésie spatiale avait profité de l'observation nécessaire des trajectoires de satellites qui avaient de fait d'autres objectifs.

Le contexte des débuts : 1957-1969

Alors que le premier satellite artificiel venait d'être lancé (Sputnik 1, 4 octobre 1957) la connaissance du champ de gravité global de la Terre était, vue de nos jours, très élémentaire. Les premiers résultats (figure 3), obtenus à partir d'anomalies de gravité de couverture très limitée, concrétisaient des efforts entrepris dès 1950 par l'université de l'état d'Ohio aux USA. Seul le géoïde sur l'hémisphère nord avait été déterminé à cette date, et sa précision estimée à 10-20 m.

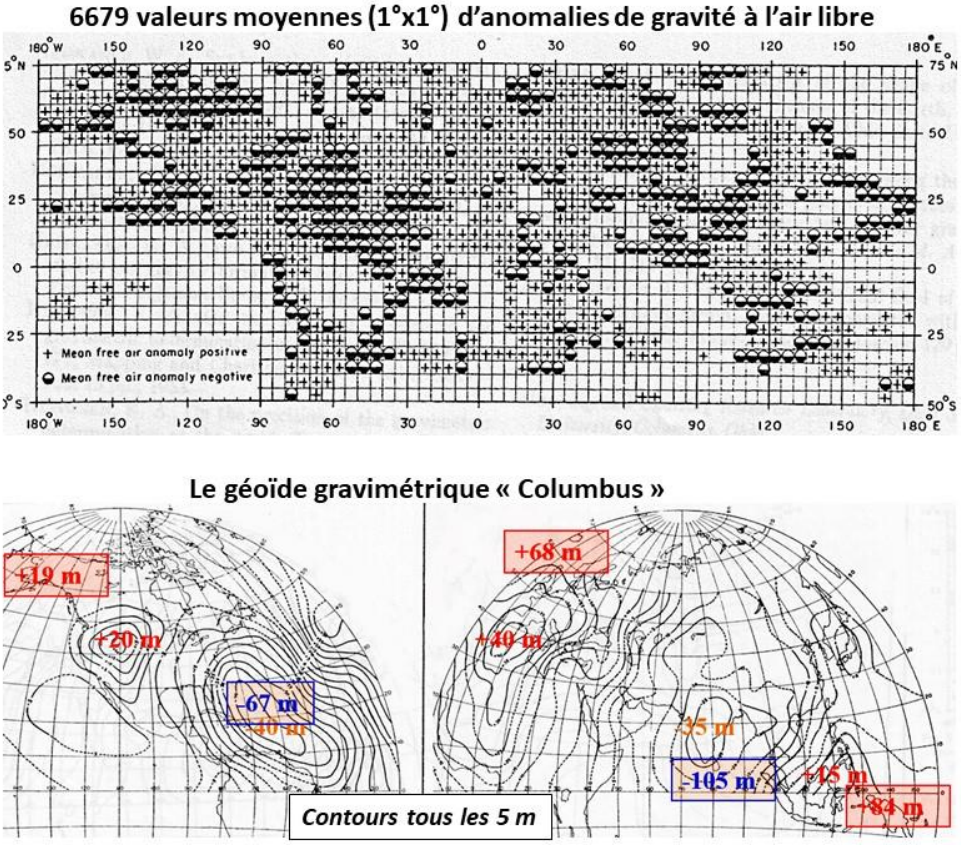


Fig. 3. *Les premiers résultats du World Wide Gravity Project : compilation d'anomalies de gravité moyennes 1°x1°, et géoïde sur l'hémisphère nord (Heiskanen,* 1957*).*

C'est alors que plusieurs organismes américains, ayant besoin d'améliorer la connaissance des forces intervenant dans le calcul des trajectoires de satellites qu'ils lançaient et utilisaient, entreprirent la détermination de modèles du potentiel terrestre – et des coordonnées des stations d'observation. Certains instituts, comme le Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO – aujourd'hui Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), développèrent même une stratégie sur plusieurs années avec un véritable objectif scientifique. La précision des observations était alors faible : 2" à 5" pour les mesures optiques (avec les caméras Baker-Nunn), 5 à 10 m pour celles de télémétrie laser (surtout des mesures françaises - elles devaient rapidement s'améliorer), 2 à 4 mm/s pour les mesures de vitesse par effet Doppler (pour le système Transit).

La table 1 résume les caractéristiques des premiers modèles ainsi calculés, auxquels il faut adjoindre le démarrage d'activités dans ce domaine au Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA en 1968, qui allait produire les modèles GEM1-GEM2 (solutions *satellites* et *combinée*, respectivement) en 1972.

Table 1. Les premiers modèles globaux

nom du modèle	**date**	**organisme**	**[degré, ordre] max. des harmoniques**
NWL5E-6	1965	Naval Weapons Lab.	**[7, 6]**
APL 3-5	1966	Applied Physics Lab.	**[8, 8]**
SAO SE 1	1966	Smithsonian Astrophys. Obs.	**[8, 8]**
SAO SE 2	1969	Smithsonian Astrophys. Obs.	**[16,16]**

Ces solutions incluaient aussi quelques harmoniques de degrés plus élevés, d'ordre entre 12 et 15 pour rendre compte des perturbations de résonances de certaines orbites. Toutes étaient des solutions satellites, sauf la Standard Earth 2 (SAO SE 2) qui fut le premier modèle combinant des données gravimétriques (*Gaposhkin & Lambeck,* 1969). Pour des références complètes sur tous les modèles produits depuis le début de l'ère spatiale, on se reportera au site de l'ICGEM (International Centre for Global Earth Models) du GFZ (GeoForschungsZentrum, Allemagne) : http://icgem.gfz-potsdam.de/. Le géoïde du modèle SAO SE 2 est représenté sur la figure 4, sa précision est de 5 à 10 m (aux longueurs d'onde représentées).

La communauté internationale prend alors conscience de la puissance des méthodes spatiales. Lors d'un colloque fondateur et visionnaire à Williamstown (*Kaula*, 1969), des scientifiques – essentiellement américains, mais aussi français, établissent une feuille de route des applications possibles en géophysique de la Terre solide, océanographie, glaciologie, géodynamique (incluant les mouvements et toutes variations temporelles), ainsi que des approches et des techniques pour y parvenir.

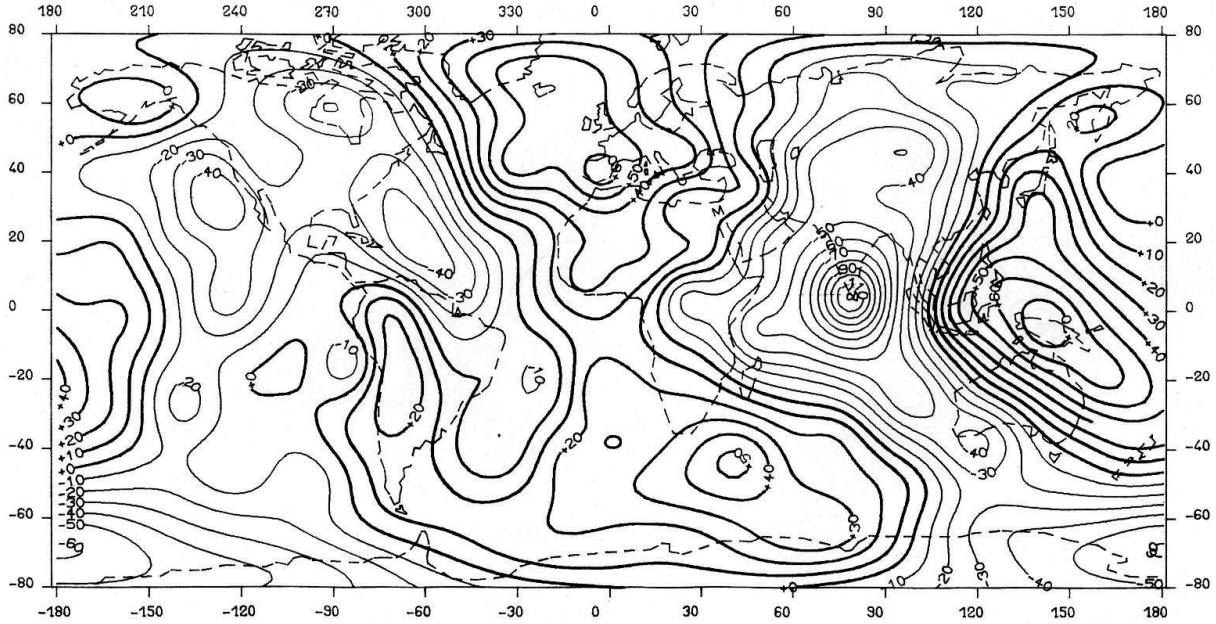


Fig. 4. *Le géoïde du modèle SAO Standard Earth 2; précision de 5 à 10 m. Hauteurs par rapport à l'ellipsoïde de référence de demi-grand axe = 6378,155 km , d'aplatissement = 1/298,255 .*

A cette époque la France, avec le CNES, le Bureau des Longitudes (son Service des Calculs), les observatoires de Paris et Meudon, avait déjà développé des compétences en mécanique céleste appliquée aux satellites artificiels (ce que l'on a appelé la *mécanique spatiale*), certes pour les besoins opérationnels du CNES mais aussi dans un but scientifique : possibilité de construire un système de référence terrestre homogène, étude des forces perturbatrices sur les trajectoires et amélioration de notre connaissance de la Terre et de l'environnement (*Kovalevsky & Barlier*, 2010). Le développement des premières stations de télémétrie laser, les lancements en 1967 des satellites Diadème 1 et Diadème 2 (nommés aussi D1C et D1D, respectivement) munis de rétro-réflecteurs et qui allaient permettre en quelques mois d'effectuer plus de 70 000 mesures de distance à partir de trois sites déployés à des fins géodésiques (*Barlier & Boucher*, ibid.), placèrent la France en très bonne position au niveau international, permettant des échanges de données, de connaissances et de personnes avec plusieurs organismes, initialisant ainsi des coopérations à long terme en particulier avec l'Allemagne pour ce qui concerne la modélisation du potentiel.

L'ère des modèles franco-allemands GRIM : 1969-2001

Comment la coopération a commencé

Les calculs d'orbite et de positions des stations s'effectuent en France avec des logiciels basés sur la théorie analytique de Brouwer augmentée de termes empiriques (en particulier pour représenter les effets du frottement) : LIDO (Laser-Interférométrie-Doppler-Optique) au CNES (avec J.C. Blaive, B. Lago, M. Lefebvre, J.C. Piéplu et d'autres), CODIOR (COrrection DIfférentielle d'Orbite) à l'observatoire de Meudon et au Bureau des Longitudes (avec F. Barlier, J. Kovalevsky, B. Morando). En outre la Division Mathématique du CNES (alors à Brétigny-sur-Orge) poursuit depuis 1967, avec J.C. Chassaing, B. Moynot et A. Roumiguier, le développement de nombreux outils en vue de réaliser un logiciel utilisant l'intégration numérique, donc beaucoup plus précis car pouvant *a priori* prendre en compte toutes les forces agissant sur un satellite ; ce sera GIN (Géodésie par Intégration Numérique) au sein du Département de Calcul d'Orbites - créé début 1970. Pendant ce temps, G. Balmino de retour du SAO (U.S.A.) où il avait traité les données de la campagne Diadème, travaille à l'Observatoire de Meudon sur les représentations et la détermination du potentiel, et en Allemagne à l'IAPG (*Institute for Astronomy and Physical Geodesy* de l'Université Technique de Munich, TUM) l'équipe de M. Schneider - avec C. Reigber, applique une méthode semi-analytique originale au calcul des harmoniques de résonance. 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 contacts avec J. Kovalevsky et F. Barlier.

Avec le lancement du satellite PEOLE fin 1970 (pour tester la collecte de données des futurs ballons-sondes du programme EOLE, mais ayant aussi un objectif géodésique), avec la décision d'organiser une campagne mondiale : ISAGEX (*International Satellite Geodesy Experiment*), et avec la création du GRGS le 17 février 1971 (par le CNES, le Bureau des Longitudes, l'Observatoire de Paris et l'Institut Géographique National), la France montre sa volonté de s'affirmer dans l'utilisation des satellites pour la géodésie. La campagne ISAGEX est conduite par G. Brachet de fin 1970 à 1972; elle associe à la France une quinzaine de pays (dont les USA, l'URSS) et est un succès. Le logiciel GIN ayant progressé et étant adapté au traitement des données ainsi collectées (directionnelles – sur fond d'étoiles, et de télémétrie laser), le CNES accepte dès 1971 qu'il soit utilisé par les Allemands (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. C. Reigber fait alors un séjour (1971) à l'Observatoire de Meudon et au CNES pour achever de mettre au point sa méthode et la transmettre à X. Berger qui travaillait dans le même domaine.

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. Alors que des travaux sur l'amélioration des harmoniques zonaux - par une méthode analytique classique, s'achèvent (*Cazenave et al*., 1972), 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 et finalise avec les données d'ISAGEX le calcul des harmoniques de résonance d'ordre 13 (*Reigber & Balmino*, 1974). 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 où l'excellence et l'amitié rendirent possible ce qui semblait parfois hors de portée.

Les modèles GRIM

Le nom provient de **GR**GS et de **I**APG **M**unich - 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) – fig. 5, combinant les données de 20 satellites et 38 stations avec 1638 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.

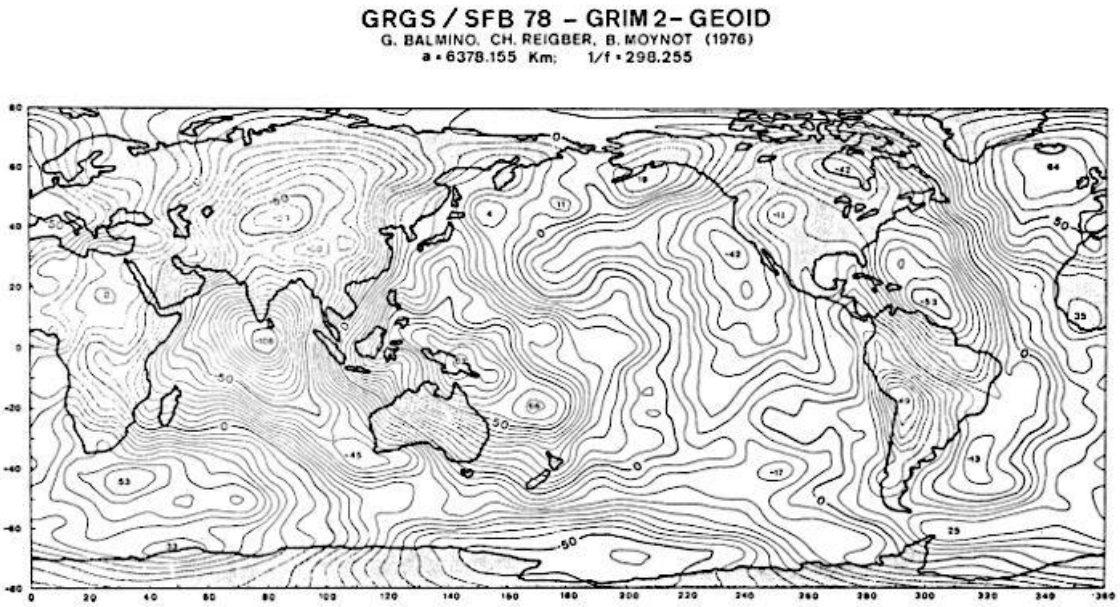


Fig. 5. *Le géoïde du modèle GRIM 2, 1976. Sa précision est estimée à 1 à 3 m suivant la longueur d'onde. L'erreur cumulée, calculée plus tard avec les modèles des années 2005-2020, est de 5 m environ.*

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). Grâce à la station américaine de réception hébergée aux îles Kerguelen, les Français sont les premiers à calculer un géoïde de précision - et surtout de résolution inégalée, avec les données de GEOS 3 sur l'Océan Indien (*Balmino et al*., 1979). A cette époque, le Bureau Gravimétrique International est transféré de l'IPGP (Institut de Physique du Globe, Paris) au GRGS dans l'équipe toulousaine sous la direction de G. Balmino; ceci donne un accès direct à la base de données gravimétriques mondiales édifiée depuis la création du BGI (1951), et donne 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 (*Balmino*, 2000). S'ensuivent trois modèles (36,36) 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 (table 2).

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.

Table 2. Les modèles GRIM 3, solutions combinées (36,36). GRIM 3B prend en compte plus d'observations satellites; GRIM 3L1 plus d'observations laser de Lageos 1.

Modèle	**Année**	**Nombre de satellites**	**Nombre de stations**	**Données de surface 1°x 1° g(mes.)/g(altim.)**	**Réf.**
GRIM3	1981	22	95	25001/27916	*Reigber, Balmino et al.*, 1983
GRIM 3B	1983	22	109	18504/38345	*Reigber, Balmino et al.*, 1985a
GRIM 3L1	1984	21	109	15987/34645	*Reigber, Balmino et al.*, 1985b

Le DGFI développe alors un nouveau logiciel de géodésie spatiale (DOGS : *DGFI Orbit and Geodetic parameter estimation Software*) ; DOGS et GIN seront régulièrement comparés au fur et à mesure de leur évolution.

A partir des années 1980 on assiste à des progrès notables dans la précision (σ) des données satellites :

- télémétrie Laser : $\sigma \approx$ 1cm,
- naissance du système Doris (qui volera sur SPOT2 en 1990, sur TOPEX en 1992), avec des mesures de vitesse de niveau $\sigma \approx$ 0.3 mm/s,
- altimétrie radar (sur les océans) : $\sigma \approx$ 10 cm (1 m à 30 cm auparavant),
- GPS : $\sigma \approx$ 1 cm à 2 cm sur TOPEX (puis $\approx$ 5 mm sur CHAMP).

Cela nécessite une révision profonde des logiciels de traitement, par exemple pour une prise en compte rigoureuse de la relativité générale (ainsi qu'existante dans le logiciel JEEP spécialisé dans la géodésie planétaire – développé par G. Balmino depuis 1976), pour une représentation complète des effets de marées océaniques ainsi que la possibilité de déterminer les paramètres de leurs modèles (une première tentative, limitée, avait eu lieu plusieurs années auparavant, *Lambeck et al.*, 1974). 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 sont incluses à partir de 1991, ce qui permet un réel progrès en résolution et précision grâce en particulier à la densité du réseau des stations du système. De plus, la NASA lance le satellite laser dédié LAGEOS 2 en 1992 et le CNES lance à son tour le satellite STELLA en 1993 (semblable à STARLETTE), complétant une panoplie de cibles 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 (*Makedonskii et al*., 1994), à une validation systématique des mesures gravimétriques anciennes (*Lemoine F. et al.*, 1998), 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 l'appui de compagnies pétrolières : en Afrique (*Fairhead et al*., 1989), en Amérique du sud (*Green et al*., 1991), en Asie du sud-est (*Manton et al*., 1993), en Europe (*Green et al*., 1994), auxquels participe le BGI. L'altimétrie des océans s'amplifie aussi spectaculairement au cours de cette période : 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) lancé en 1992. A Toulouse le BGI, l'équipe GRGS-CNES et CLS (Collecte-Localisation-Satellites) ont acquis depuis plusieurs années l'expertise de traitement de ces données pour leur transformation en anomalies de gravité (*Balmino et al*., 1987 ; *BGI and CLS*, 1999), contribuant à certains des modèles GRIM combinés.

La table 3 résume les caractéristiques des modèles GRIM calculés entre 1990 et 2001. 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 de traiter simultanément les constellations de satellites, en incorporant aussi toutes les fonctionnalités de la géodésie planétaire[2] qui étaient dans le logiciel JEEP (*Marty et al.* 2018). 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 – voir chapitre suivant.

[2] Il n'y a que trois autres logiciels dans le monde ayant toutes ces fonctionnalités.

Table 3. 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

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.

La figure 6 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.

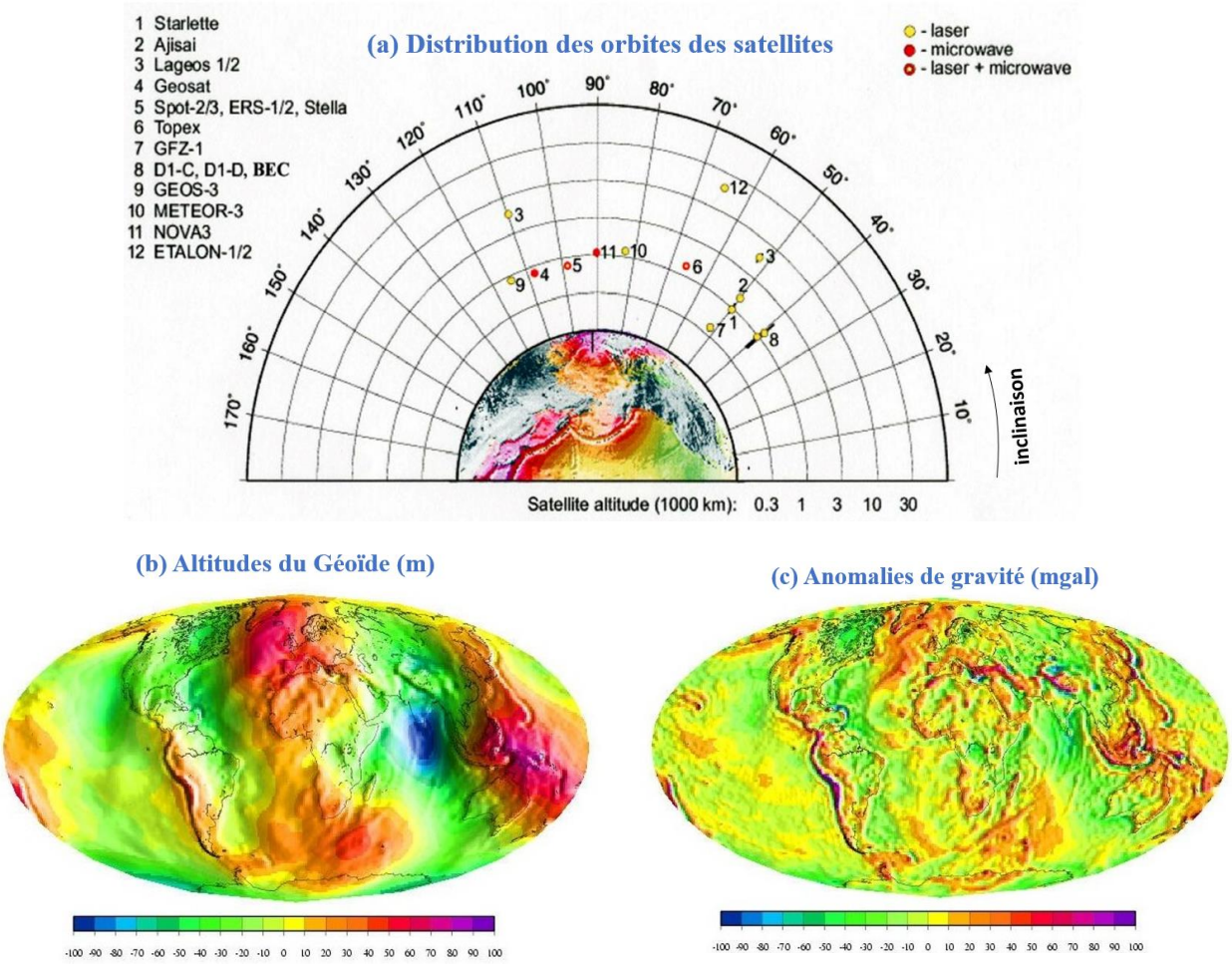


Fig. 6. *Le modèle GRIM 5-C1, obtenu après 30 ans d'observations de satellites, combinées à des mesures de pesanteur et des valeurs de la gravité sur les océans déduites de données altimétriques. Sa précision aux demi-longueurs d'onde 400 km / 170 km (résolution ultime) est estimée à 0.3 m / 0.5 m pour le géoïde, et à 1.5 mGal / 5.5 mGal pour le champ de gravité.*

Les trois missions de la décennie 2000-2010

Les limitations des techniques satellitaires classiques avaient été identifiées depuis longtemps. Les exigences scientifiques avaient été formulées au colloque de Williamstown précité 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 illustrés sur la figure 7; leur mise en œuvre, rendue possible grâce à des progrès technologiques importants (dont le GPS et l'accélérométrie ultrasensible), a conduit à trois missions révolutionnaires dans ce domaine : CHAMP, GRACE et GOCE.

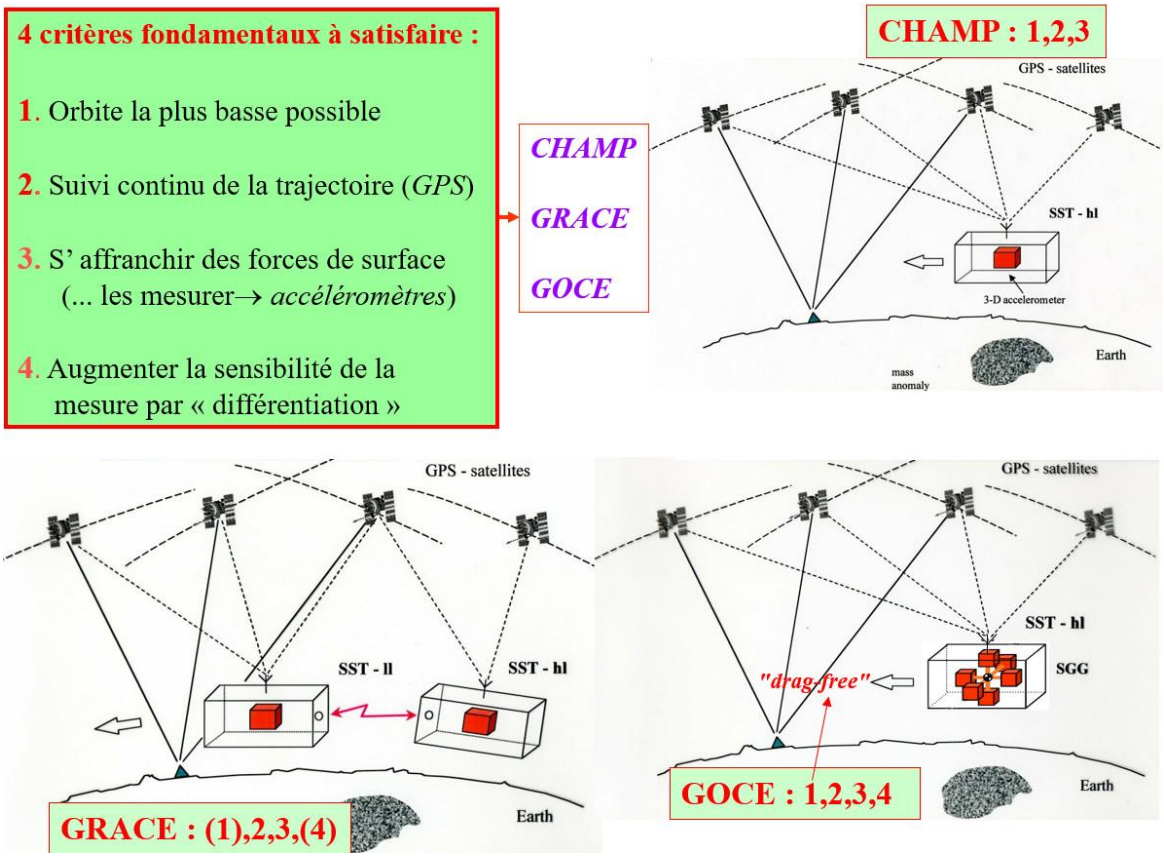


Fig. 7. *Les systèmes spatiaux possibles pour cartographier le champ de gravité à haute résolution; les critères 1 et 2 doivent en outre être associés à une couverture spatiale complète de la Terre. CHAMP concrétise l'approche "SST high-low" (poursuite de satellite par satellite en configuration haut-bas); GRACE est une approche "SST low-low" (deux satellites bas – ici coorbitant); le système de mesure de GOCE est un gradiomètre embarqué. Les cubes représentent des accéléromètres (un dans chaque satellite, six dans le cas de GOCE).*

Ceci a pris plus de trente ans, entre les concepts, les nombreuses analyses de missions et simulations (*Balmino et Perosanz*, 1995 ; *Balmino et al*., 1999), les propositions aux agences spatiales (et les nombreux échecs), et le début de leur réalisation, un long chemin ponctué d'évènements dont les principaux sont résumés dans la table 4.

Table 4. Synopsis des évènements ayant conduit aux missions spatiales de cartographie du potentiel

1967	R.L. Forward: "Generation and Detection of Dynamic Gravitational-Gradient Fields & Proposal for a **Lunar Gravity Gradiometer on Apollo 19**". ***L'instrument fut construit***
1969	**Williamstown meeting**, *Williamstown, Mass., USA.*
1972	"Earth and Ocean Physics Applications Programme", *vol.II, NASA.*
1974	"La Géodynamique Spatiale", Summer School, *Lannion*, *France*.
1977	Visite de G. Balmino aux **3 concepteurs de gradiomètres US** : R. Forward (Hughes Aircraft), E. Metzger (J. Hopkins Univ.), H.J. Paik (Maryland Univ.).
1978	**SONG** meeting, ESA, *Elmau*, *Allemagne*. "**SLALOM** Mission-System Definition - proposal to ESA of a satellite-to-satellite tracking gravity mission". C. Reigber & G. Balmino. "Proposal to ESA for a **gradiometer on board the POLO lunar mission**", G. Balmino & A. Bernard.
1979	"Applications of a Dedicated Gravitational Satellite Mission, US Nat. Ac. of Science", report to NASA.
1980	Présentation (G. Balmino) d'un pré-projet de gradiométrie spatiale à R.L. Forward, Hughes Aircraft, *Glendale, Calif., USA*.
1981	**GRADIO** (gradiométrie par satellite), G. Balmino, F. Barlier, A. Bernard, C. Bouzat, A. Riviere, J.J. Runavot. Proposition au CNES. Séminaire de prospective, *Les Arcs, France.*
1984	Geopotential Research Mission (**GRM**), Univ. of MD, Proposal to NASA.
1986	SESAME meeting, ESA. GRADIO devient un projet européen sous le nom d' **ARISTOTELES**, *Ising am Chiemsee, Allemagne.* Présentation de GRADIO à NASA gravity workshop (G. Balmino), *US Air Force Academy*, *Colorado Springs, Co., USA*.
1987	"Study of Satellite-to-Satellite Tracking Gravity Missions", C. Reigber, G. Balmino. *Final Report, ESTEC/ESA*. Servira en partie à la préparation de **CHAMP et GRACE** ESA-NASA meeting on cooperation on geopotential research, ARISTOTELES *vs.* GRM***.*** *Matera, Italie.* ***Pas d'accord***
1988	Establishment of ESA Gradiometry Working Group, under the **Earth-Observation Programme of ESA.**

1989 Italian Workshop on the European Solid-Earth Mission ARISTOTELES, *Trevi, Italie.*

Création du consortium **CIGAR** (G. Balmino) pour ARISTOTELES.

ARISTOTELES/CIGAR-1 study, ESA.

1990 ARISTOTELES/CIGAR-2 study, ESA

1991 The Solid Earth Mission ARISTOTELES*,* ESA Workshop*, Anacapri*, *Italie*.

"ARISTOTELES final report", *ESA & Alenia Space.* ***Abandon d' ARISTOTELES***

1992 "Mapping the Earth gravity field", in *A Strategy for Earth Observation from Space*, *blue report*, *ESA-ESSC*.

1993 STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle), ESA Study on gradiometer based instrument. "Application of STEP to Geodesy" presented at STEP Workshop. *Pise, Italie.*

1994 **CHAMP** Phase A, à GFZ et DARA (DLR) ; début de phase B.

1995 "Preparation for a new gravity mission" (G. Balmino). CIGAR-3 study. *ESA-ESTEC*

Gravimetry Mission and Systems, Pre-Phase-A, *Dornier*. *Friedrichshafen, Allemagne*.

Début des études de mission **GRACE** à NASA/JPL, GFZ, DLR, CSR.

GOCE proposal, G. Balmino. *1st ESA User Consultation Meeting*. *Grenade, Espagne*.

1996 9 candidats; pré-sélection de 4. **GOCE classée n° 1**

Fin de CHAMP Phase B. ***Décision de mission CHAMP***

1997 GRACE : 1ère mission du programme ESSP de NASA ***Décision de mission GRACE***

1999 Sélection de la 1ère "core mission" du programme Earth Explorer. *2nd ESA User Consultation Meeting*, *Grenade, Espagne.* ***Sélection de GOCE***

2000 Création du **European GOCE Gravity Consortium : EGGC** (G. Balmino)

Deviendra HPF (High level Processing Facility).

CHAMP (2000-2010)

Parmi les systèmes possibles illustrés 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 (**CHA**llenging **M**inisatellite **P**ayload). Le développement de ce projet, sa réalisation rapide et son exploitation restent un exemple remarquable de rigueur, d'efficacité et de succès grâce en particulier à un management en circuit court sous la maîtrise d'oeuvre du GFZ et pilotée par C. Reigber. 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, avant de plonger et de se consumer dans l'atmosphère). L'inclinaison orbitale (87°,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. 10^{-9} ms^{-2}) **construit par l'ONERA et fourni par le CNES**, ainsi qu'un rétro-réflecteur laser du GFZ. Le récepteur GPS fonctionnait aussi en mode occultation pour mesurer les caractéristiques de l'atmosphère et de l'ionosphère. Pour le champ magnétique deux magnétomètres l'un vectoriel (*fluxgate*), l'autre scalaire (*Overhauser*), placés sur un long bras (fig. 8), furent fournis respectivement par l'université technique du Danemark (DUT) et le Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information (**LETI, France**). Enfin une sonde de Langmuir et un senseur ionique, fournis par l'US Air Force Research Laboratory (AFRL), permettaient la mesure des ions et du champ électrique. 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).

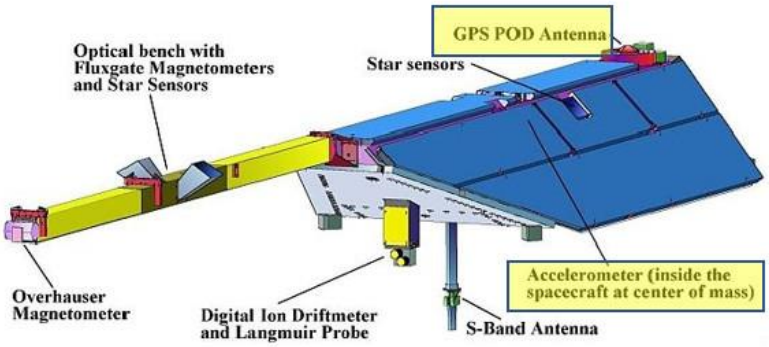


Fig. 8. *Le satellite CHAMP et ses principaux instruments de mesure.*

Les équipes du CNES 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) requirent des développements rapides supplémentaires qui permirent *in fine* l'exploitation optimale des données. Après seulement un an le gain en précision (modèle EIGEN 1S) sur les modèles de potentiel s'avéra remarquable (*Reigber et al*., 2002, 2003). 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 ; nous y reviendrons avec les résultats de la mission GRACE.

Les modèles successifs, EIGEN 2 (*Reigber et al*., 2003), puis EIGEN 3S (*Reigber et al*., 2004) qui incluait des variations temporelles pour les grandes longueurs d'onde du potentiel, gagnèrent encore en qualité – figure 9.

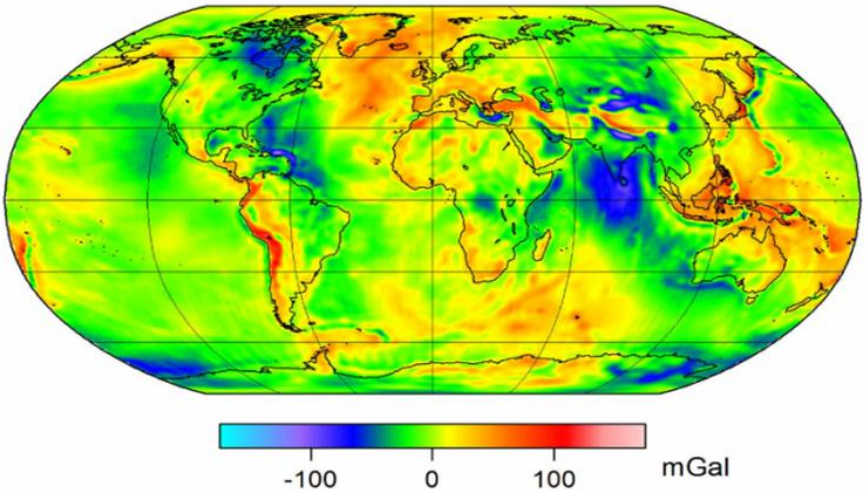


Fig. 9. *Anomalies de gravité du modèle EIGEN 2, déterminé avec 860 jours de données de CHAMP.*

Afin d'améliorer certaines méthodes de traitement (également en vue de la mission suivante GRACE) R. Biancale – qui en maîtrisait la plupart, fut détaché au GFZ en 2002 pour renforcer et gagner en efficacité dans notre coopération, optimiser certains aspects algorithmiques des logiciels GINS et EPOS, et participer aux calculs des modèles en cours. Ces efforts allaient bénéficier à GRACE dès son avènement.

GRACE (2002-2017)

Le principe de GRACE, deux satellites co-orbitant sur une orbite basse et quasi polaire et mesurant leur distance ou vitesse relative, avait été décrit par Wolff (1969), repris et étudié au CNES (projet DIABOLO; *Balmino*, 1972), proposé aux U.S.A. à la NASA par deux fois : projets GRAVSAT (*Fischell et al.*, 1978) puis GRM (*Keating et al*., 1986). Une variante (projet SLALOM) avait aussi été présentée à l'ESA (*Reigber*, 1978) sans succès. 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 CHAMP continuait à progresser en phase B 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 **E**xperiment***)***. Celle-ci fut acceptée rapidement (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. 10) embarqua un récepteur GPS Black-Jack (comme pour CHAMP), un accéléromètre Super-STAR (de classe 10^{-10} ms^{-2}) fabriqué par l'ONERA (*Touboul et al.,* 1999) **mais non fourni par la France malheureusement**. Les équipes françaises étaient prêtes à participer (*Balmino*, 2002) mais cela allait les mettre en difficulté pour l'accès rapide aux données – malgré l'accord général de coopération GFZ-GRGS. L'instrument principal, KBR (K band radar), de précision 0.1 µm/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'ingéniérie.

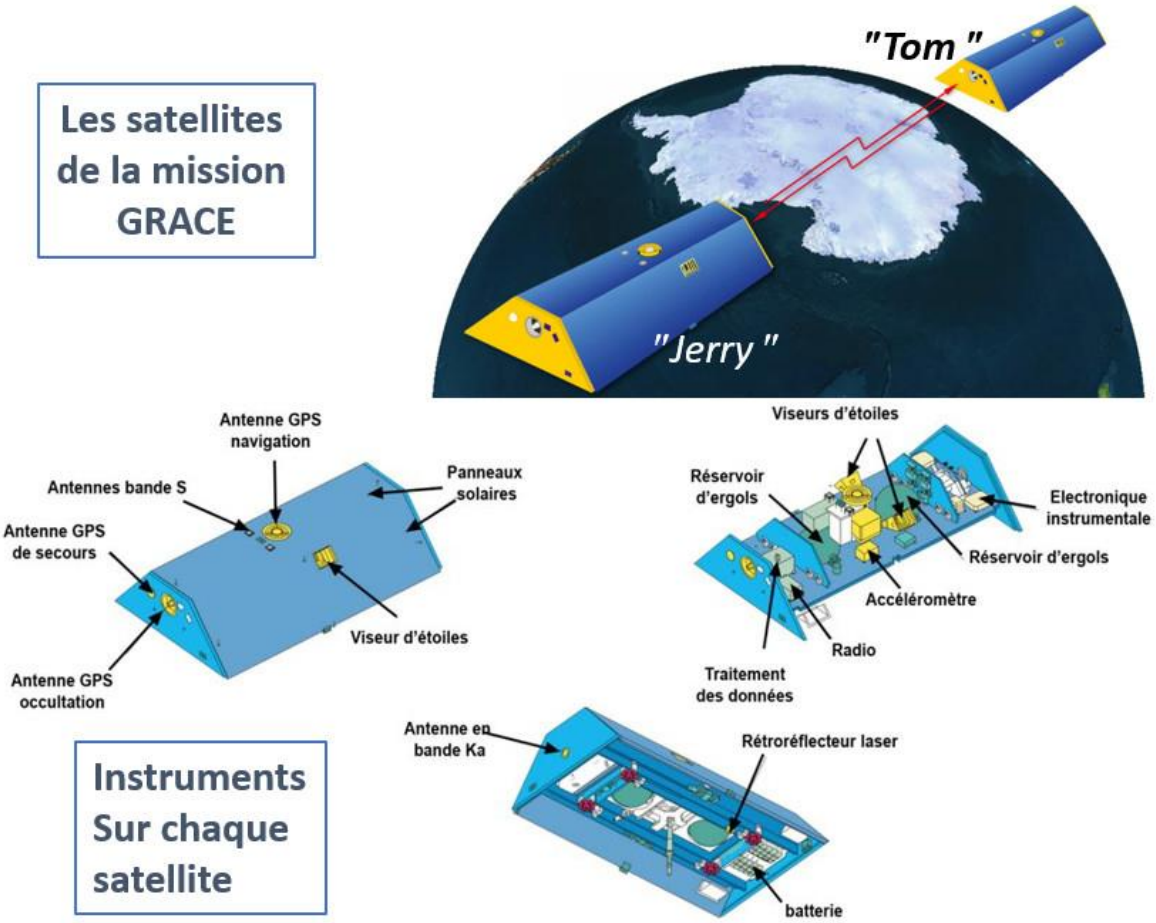


Fig. 10. *Les satellites (appelés Tom et Jerry) de la mission GRACE et leurs instruments.*

Les résultats scientifiques de cette mission 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.

L'équipe du GRGS au CNES, dans le cadre de la coopération avec l'Allemagne, a poursuivi la détermination de modèles moyens (statiques), mais aussi a calculé des solutions mensuelles, ainsi que tous les dix jours, à partir des mesures de la mission mais aussi (une caractéristique de nos séries de solutions) en les combinant avec les données (de télémétrie laser) des satellites LAGEOS.

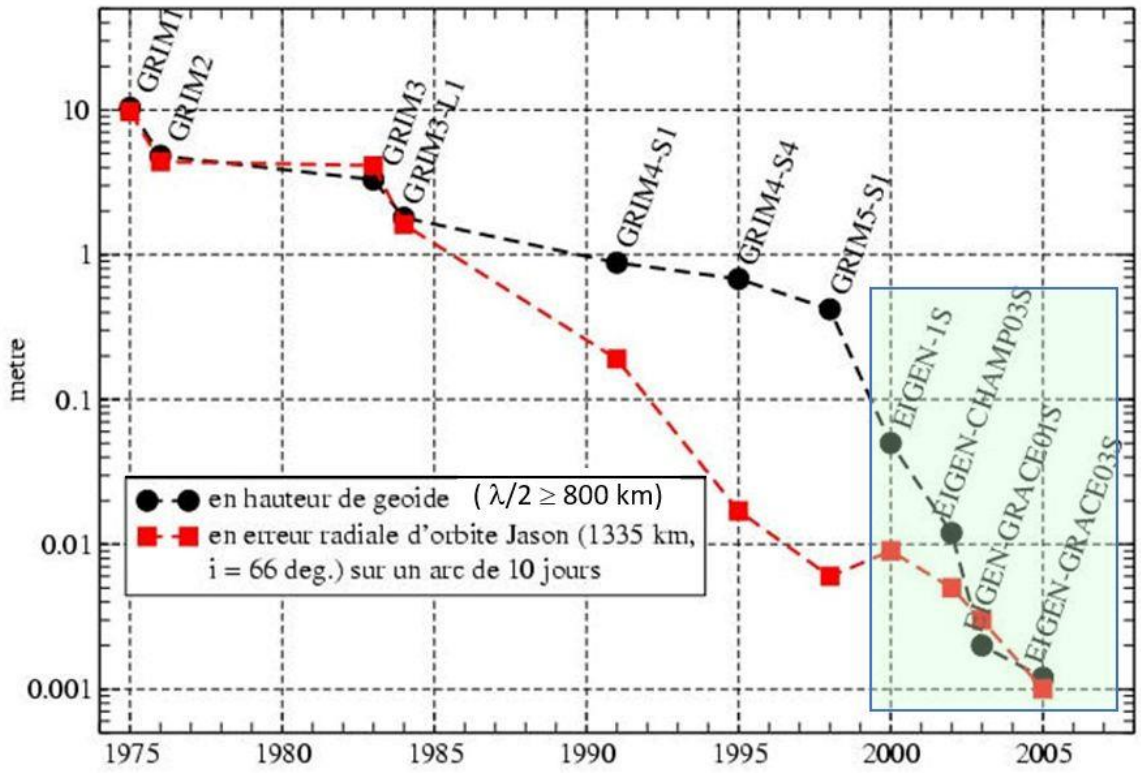


Figure 11. *Evolution sur trente ans de la précision estimée des modèles de potentiel : hauteur du géoïde (grandes et moyennes longueurs d'onde : degré ≤ 25) et connaissance radiale de l'orbite d'un satellite altimétrique.*

Les modèles moyens ont fait un bon fantastique en précision aux grandes et moyennes longueurs d'onde. La figure 11 montre le gain obtenu en trente ans sur la connaissance du géoïde ainsi que la réduction de l'erreur radiale d'orbite d'un satellite altimétrique typique (Jason). Un ordre de grandeur avait déjà été gagné avec CHAMP – modèles EIGEN1S (*Reigber et al*., 2002, *ibid*.) et EIGEN 3S, aussi dénommé EIGEN-CHAMP 3S (*Reigber et al*., 2004, *ibid*.), un autre ordre de grandeur fut atteint avec GRACE, avec le calcul de nouveaux modèles au CSR (à Austin, avec B. Tapley) et au GFZ (par exemple EIGEN-GRACE 2S, *Reigber et al*., 2005).

Au début la contribution du GRGS ne pouvait être officielle pour la raison rappelée précédemment, 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 telles que EIGEN-GL04S1 (*Förste et al.*, 2006), et combinées (avec données gravimétriques et altimétriques) : EIGEN-GL05C (*Förste et al.*, 2008. D'autres modèles, avec les données de CHAMP et de GRACE, furent aussi calculés, par exemple EIGEN-CG01C (*Reigber et al*., 2006).

A l'instar de nombreuses équipes dans le monde l'effort fut porté au CNES-GRGS sur les modèles temporels - solutions mensuelles ou décadaires (*Bruinsma et al.*, 2010a) pour lesquels une méthode de résolution-filtrage couplés fut développée afin de réduire les erreurs sectorielles inhérentes à la géométrie orbitale de la mission et au système de mesure, et ce en essayant de minimiser l'effet d'écrêtage des signaux. Plusieurs séries ("*release*") furent produites (voir par exemple *Lemoine et al.*, 2019). La figure 12 montre la qualité des solutions (sélectionnées ici pour faire apparaître les pics saisonniers) de la série CNES-RL 05 (*Bourgogne et Lemoine*, 2020).

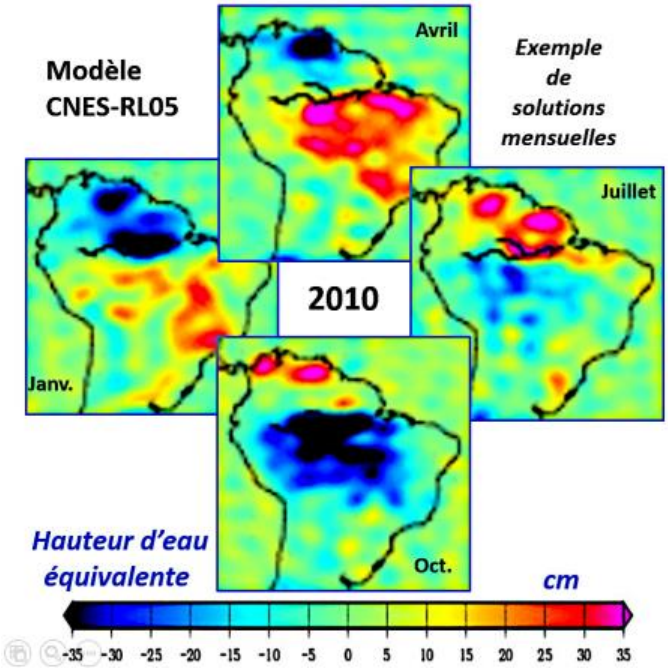


Figure 12. *Exemple de changements temporels du champ de gravité (ici représentés en variations équivalentes de hauteur d'eau). Solution CNES-RL 05.*

GRACE fut suivie de la mission GRACE-Follow On (lancée en 2018) dont il sera question dans la dernière partie.

GOCE (2009-2013)

La gradiométrie spatiale est une technique qui avait été envisagée il y a longtemps (cf. table 4), 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 (*Touboul et al*., 1999b), 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* en 1981, qui conduisit à l'étude du projet GRADIO (*Balmino et al*., 1984), 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, GOCE[3] (**G**ravity and steady-state **O**cean **C**irculation **E**xplorer) qui fut présélectionné en 1996, puis choisi en tant que première mission du programme *Earth Explorer* trois ans plus tard (*ESA*, 1999). Voir *Rummel et al*., 2002 et *Johannessen et al*., 2003, pour une description détaillée du projet. 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 mGal (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. 13) 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 E = 10^{-9} s^{-2}) dans une bande passante 0.005 Hz-0.1 Hz.

[3] *Nom choisi en écho à WOCE (World Ocean Circulation Experiment)*

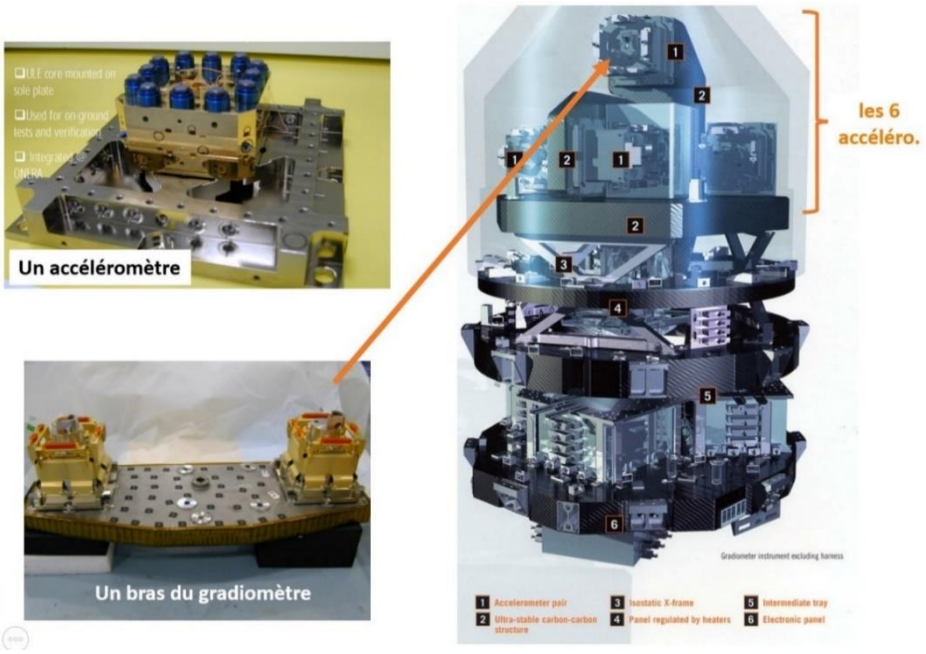


Figure 13. *Gradiomètre de GOCE* : u*n accéléromètre; un bras du gradiomètre; l'instrument complet (ESA & ONERA)..*

Les autres instruments sont un récepteur GPS (GRAS) de l'ESA et un réflecteur laser pour la détermination d'orbite précise (niveau ~ 1 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 de 1100 kg, 5 m de long (fig. 14) et couvert de panneaux solaires, fut mis sur une orbite héliosynchrone (inclinaison ~ 96.7°), quasi circulaire et d'altitude moyenne 250 km, par une fusée russe (Rokot) le 17 mars 2009. L'altitude fut baissée à 235 km la dernière année de la mission (à partir d'août 2012) offrant une sensibilité accrue au champ de gravité. Le satellite fonctionna normalement jusqu'au 21 octobre 2013 (jusqu'à 225 km d'altitude) et, la réserve de xénon étant épuisée, se consuma le 11 novembre dans l'atmosphère.

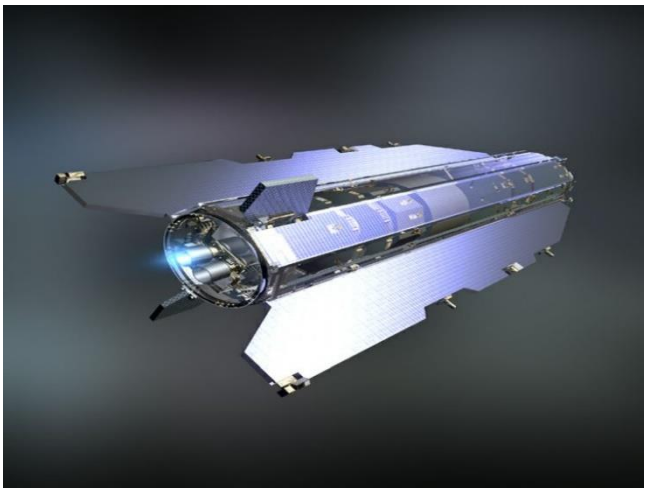


Figure 14. *Le satellite GOCE*

In fine les caractéristiques des accéléromètres et la configuration orbitale impliquèrent que les composantes *xx*, *yy*, *zz* et *xz* du tenseur gradient de gravité furent les mieux mesurées (*x* : le long de l'orbite, *y* : normal à l'orbite, *z* : radial). 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 (cf. *Balmino*, 2006). Cet effort fut conduit au niveau européen par un consortium, EGGC (**E**uropean **G**OCE **G**ravity **C**onsortium) 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 (*Balmino*, 2001). EGGC devint la "**H**igh level **P**rocessing **F**acility" (HPF) en 2004, sous le leadership de R. Rummel à partir de 2006 ; 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 (celles de GRACE jusqu'à L = 130 dans les dernières solutions) pour obtenir la meilleure description possible du champ moyen, ce qui fut fait - les données laser des satellites LAGEOS 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 LAGEOS, 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, alors que d'autres équipes du consortium avaient adopté une approche fréquentielle, soit temporelle (méthode "*time-wise*") soit spatiale (méthode "*space-wise*"). Citons les solutions GOCE-DIR1 (jusqu'à L = 240) obtenu avec le premier cycle (60 jours) de données - (*Bruinsma et al*., 2010b), suivi de GOCE-DIR2 (L = 240). A partir de GOCE-DIR3, GRACE et LAGEOS 1,2 contribuent aux modèles. Viennent ensuite GOCE-DIR4 (L = 260 ; *Bruinsma et al*., 2013) et GOCE-DIR5 (L = 300 ; *Bruinsma et al*., 2014). Un modèle combiné avec les données de surface, EIGEN6-C4 (L= 2190) fut aussi élaboré (*Förste et al*., 2014). Enfin, et suite à un retraitement particulier qui permit de réduire considérablement l'erreur qui affectait la composante *yy* du gradient de gravité (au voisinage des pôles géomagnétiques), le modèle GOCE-DIR6 fut déterminé (*Förste et al*., 2019) : outre 85 mois de données GRACE (de 2007 à 2014) il inclut 16 ans (2002-2018) de données laser des satellites LAGEOS 1, 2 et STARLETTE, STELLA, AJISAI, plus 6 ans du satellite LARES, pour renforcer la détermination des harmoniques jusqu'à L = 5.

La qualité de GOCE-DIR6, dernier modèle GFZ-CNES/GRGS, démontre que la mission GOCE a pleinement atteint ses objectifs. A titre d'exemple la figure 15 montre la finesse de notre connaissance de la circulation océanique globale obtenue en soustrayant le géoïde GOCE-DIR6 de la surface moyenne océanique déterminée par l'altimétrie satellitaire.

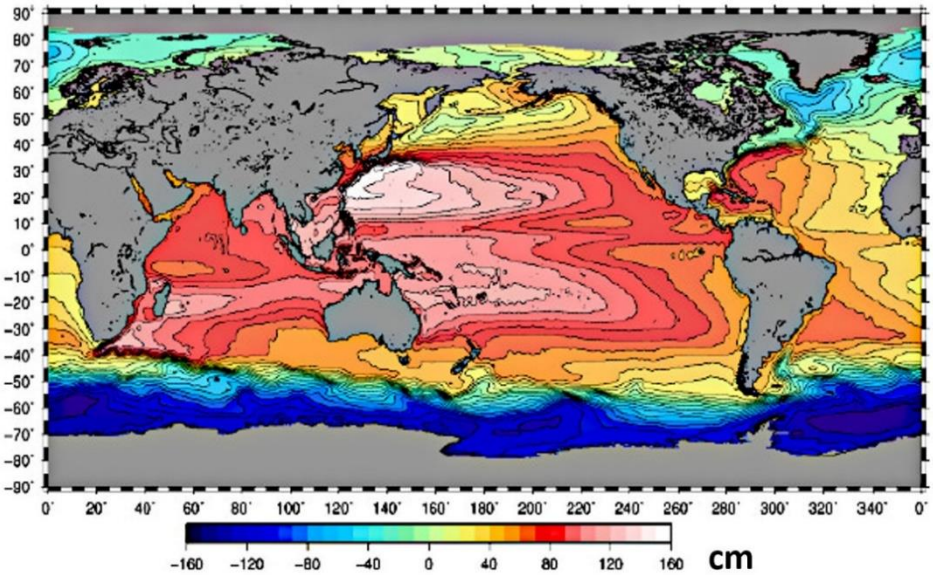


Figure 15. *La topographie océanique moyenne (caractérise la circulation moyenne) obtenue à partir de l'altimétrie satellitaire (surface moyenne MSS CNES-CLS 11) et du géoïde GOCE-DIR6.*

Les progrès apportés par les trois missions CHAMP, GRACE, GOCE sont considérables. Une simple comparaison visuelle (fig. 16) permet d'en apprécier la teneur. Outre le gain en résolution, la précision des anomalies de gravité atteint 1 mGal à 100 km, ce qui était le but à atteindre.

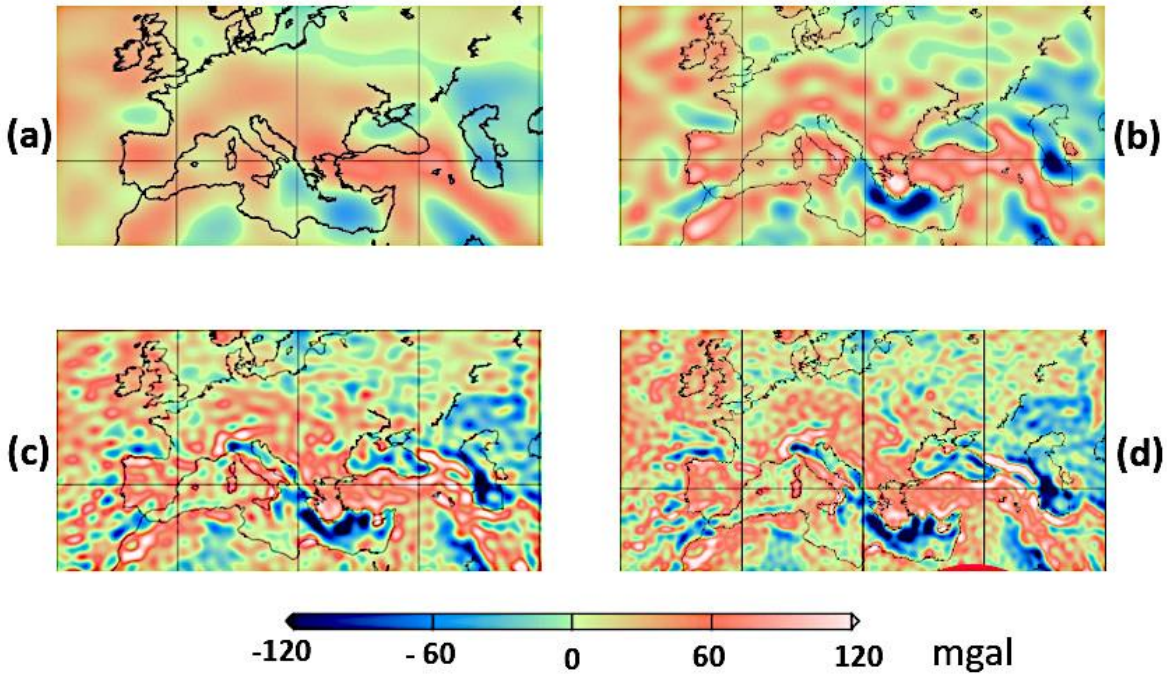


Figure 16. *Les progrès des modèles statiques franco-allemands suite aux missions de gravité dédiées, en termes d'anomalies de gravité (à l'air libre).* ***(a)*** *GRIM5-S1 : 31 satellites (1967-1999) , résolution ~800 km;* ***(b)*** *CHAMP (2000-2009), résolution ~300km ;* ***(c)*** *GRACE (2002-2014),résolution ~150 km ;* ***(d)*** *GOCE (2009-2013), plus GRACE (2002-2014), plus six satellites "laser" (2002-2018), résolution ~80 km (modèle GOCE-DIR6).*

La gravimétrie spatiale en marche

Malgré les avancées que nous venons de décrire, il faut poursuivre dans la détermination de modèles de potentiel. Il est clair que le suivi des variations temporelles, qui ont des impacts sociétaux indubitables, doit être poursuivi, ce qui nécessite de mettre sur pied une filière de missions similaires à GRACE et si possible plus précises. La connaissance du champ statique lui aussi doit être améliorée, par exemple pour gagner dans l'exactitude des modèles de la circulation océanique moyenne au regard de l'altimétrie océanique et de sa résolution très fine ; pour l'étude également - et en particulier, des zônes côtières. La finesse de ce que l'on peut obtenir par satellite restera sans doute limitée – ne serait-ce qu'à cause de la forte atténuation des effets de la gravitation avec l'altitude, mais l'on peut encore espérer progresser (en résolution surtout), sans oublier de faire appel aux mesures aéroportées pour lesquelles de nouveaux développements techniques sont en cours. Enfin la complexité des méthodes d'analyse nécessite de plus en plus un partage des savoirs, des algorithmes, afin de garantir la justesse des résultats et en établissant et fournissant les meilleurs modèles ; c'est le but de COST-G (voir ci-après).

Grace Follow-on

On a vu naître, avec GRACE, une nouvelle discipline (que l'on pourrait appeler l'*hydrologie spatiale*[4] – en référence à l'altimétrie satellitaire), dont les impacts sociétaux planétaires sont évidemment très grands. C'est pourquoi une nouvelle mission, GRACE-FO (Follow On), a été lancée par la NASA en 2018 après la fin de GRACE (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. Cette mission 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 : **L**aser **R**anging **I**nterferometer, 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 ne fonctionne pas, obligeant à transférer approximativement la valeur des forces de surface mesurées sur l'autre satellite (à ~200 km de distance et à ~30 secondes en temps) par une modélisation forcément moins précise qu'une mesure directe. Néanmoins les performances de GRACE-FO s'avèrent être équivalentes à celles de son prédécesseur – pour l'instant (fig. 17).

[4] en incluant la glaciologie et le niveau moyen des mers

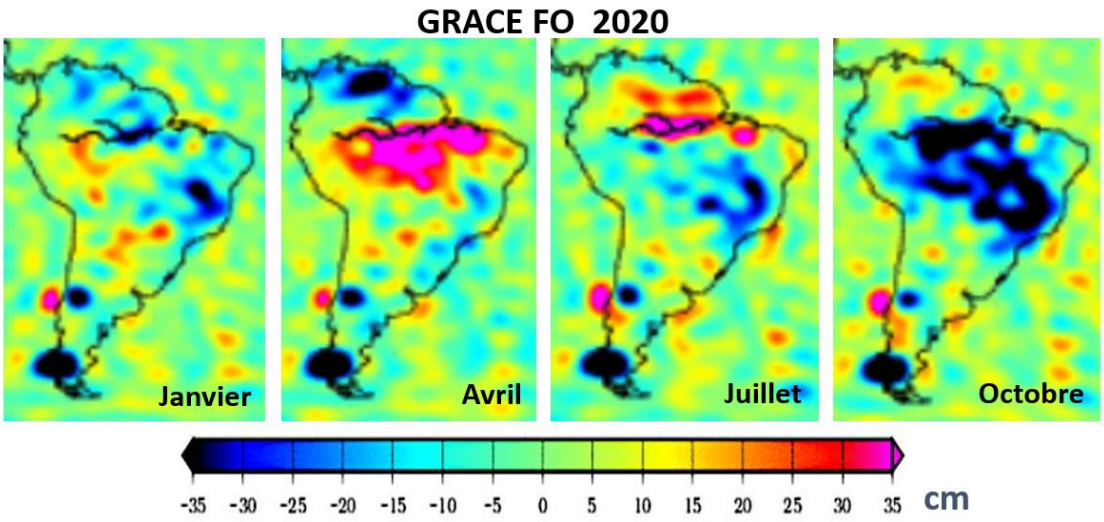


Figure 17. C*hangements temporels du champ de gravité, mesurés par GRACE-FO, en variations équivalentes de hauteur d'eau* (*Bourgogne et Lemoine*, ibid.)

EGSIEM et COST G

En prolongement des missions GRACE et GRACE-FO et dans le cadre du programme Horizon 2020 – Recherche et Innovation de l'Union Européenne, fut établi en 2015 le projet EGSIEM (***E**uropean **G**ravity **S**ervice for **I**mproved **E**mergency **M**anagement*), dont l'objectif était de poser les bases d'un service pour : (i) la fourniture des meilleurs modèles de champ variable de gravité en combinant les solutions – ou directement les équations, des modèles produits par diverses équipes (*Meyer et al*., 2019) ; (ii) la cartographie et si possible la prévision (en temps réel ou peu différé) des évènements hydrologiques extrêmes (*Jäggi et al*., 2019). Ce projet, qui se termina en 2017, associa huit centres : l'Institut d'Astronomie de l'Université de Berne (Suisse) – qui pilota le projet, le GFZ, le DLR et l'Université Leibnitz de Hanovre (Allemagne), l'Université Technique de Graz (Autriche), l'Université du Luxembourg, et en France le CNES-GRGS et Géode & Cie – prédécesseur de Stellar Space Studies. Du côté français, en plus d'être un des centres d'analyse du projet et d'élaborer un outil sophistiqué d'évaluation graphique des résultats, il s'agissait de fournir régulièrement des systèmes d' équations et de solutions à Berne pour le calcul des modèles combinés ; en outre la proposition de valider les solutions en utilisant l'altimétrie fut retenue, un point important pour le projet suivant.

COST-G (***Co**mbination **S**ervice for **T**ime-variable **G**ravity fields*) fut créé en 2019 à la suite de EGSIEM (*Jäggi et al*., 2020), sous l'égide de l'AIG (Association Internationale de Géodésie) ; c'est une nouvelle composante de l'IGFS (International Gravity Field Service). Aux participants précités s'ajoutèrent l'Université Technique de Dresde et ISSI (International Space Science Institute, Berne). COST-G est piloté par un Bureau Central (à Berne), a cinq centres d'analyse (dont le groupe français) plus deux au niveau partenaires (NASA/JPL et CSR). **Le GFZ et le CNES-GRGS ont le rôle important de centres de validation**. D'autres équipes se sont joint à COST-G, toutes de Chine : Huazhong University of Science and Technology (HUST), l'Université de Tongji, l'Université de Wuhan, la Southern University of Science and Technology (SUSTech) et l' Institute of Geology and Geophysics – Chinese Ac. Of Sc. (IGG-CAS); leurs ambitions sont grandes, à la hauteur des moyens que leur pays consacre dans ce domaine (lancement d'une mission similaire à GRACE en 2021, une autre prévue en 2025). Après avoir comparé dans le détail les méthodes et logiciels employés par les équipes européennes (*Lasser et al*., 2020) COST-G a entrepris la production systématique des solutions mensuelles combinées pour GRACE (*Meyer et al*., 2020) et GRACE-FO (*Meyer et al*., 2021). Ce service perdurera vraisemblablement avec les missions suivantes.

Futures missions

Le plus important à nos yeux, pour des objectifs sociétaux mais aussi scientifiques, est de poursuivre le suivi des variations temporelles du champ de gravité sans interruption, donc d'avoir un programme (comme celui de l'altimétrie spatiale), multinational sans doute, assurant cette continuité. C'est ce que l'on a étudié à plusieurs reprises dès les débuts de la mission GRACE lorsque l'on a réalisé la puissance de cette technique. Par exemple, dès 2010, une proposition, E.MOTION (**E**arth System **M**ass **T**ransp**o**r**t** Miss**ion**), fut faite d'une mission à deux satellites quasi co-orbitant en configuration pendulaire – dont l'avantage aurait été de fournir une information non plus dans le seul sens de l'orbite mais aussi transversalement, et donc de réduire les erreurs sectorielles des modèles (*Panet et al*., 2012). Ceci ne fut pas concrétisé mais servit en partie à une étude suivante, NGGM (**N**ext **G**eneration **G**ravity **M**ission) que l'ESA démarra en 2015 (*Haagmans et al*., 2020). Parallèlement NASA/JPL envisageait une suite à GRACE-FO, ce qui fut conforté par le "Earth Science Decadal Survey Report" de l'Académie des Sciences américaine qui sélectionna en 2018 le thème des transferts de masses comme étant l'un des cinq objectifs majeurs de la décennie suivante ; d'où le programme "Mass Change", un nouveau projet MC-DO (**M**ass **C**hange **D**esignated **O**bservable) et un rapprochement NASA-ESA pour élaborer une proposition en commun. Du côté français en 2019 un nouveau projet, présenté au séminaire de prospective du CNES, a vu le jour : MARVEL (**M**ass **A**nd **R**eference **V**ariations for **E**arth **L**ookout), lequel se démarquait en proposant, avec un ensemble de satellites bas et de moyenne (ou haute) altitude, des mesures de distance (par chronométrie laser) à forte composante radiale pour réduire les erreurs dans la cartographie du champ de gravité mais aussi pour améliorer la connaissance du système de référence terrestre ; ce dernier objectif a dû être abandonné au fur et à mesure des études effectuées et des possibilités de réalisation. Depuis 2020 la NASA, l'ESA, le DLR et le CNES étudient comment faire une mission suite à GRACE-FO, en améliorant les performances, et deux scénarios (fig. 18) sont actuellement privilégiés, pour des raisons de faisabilité et de budget : le premier consiste en deux couples de satellites co-orbitants, dans des plans d'inclinaisons différentes (configuration dite de "Bender"), avec une liaison type GRACE-FO (radar et interféromètre laser) ; le second garde un seul couple mais ajoute un troisième satellite effectuant des mesures de distance sur l'un des premiers (par *chronométrie* laser, de précision 1 µm, ou 0.1 µm/s) dans un mouvement relatif oscillant par rapport aux deux autres (configuration dite "pendulaire"). Dans les deux cas, chaque satellite a un récepteur GPS, des senseurs d'étoiles, un accéléromètre (de sensibilité accrue par rapport aux Super-STAR de GRACE et GRACE-FO), et les orbites sont très basses (altitude ~320 km) nécessitant un système "drag free".

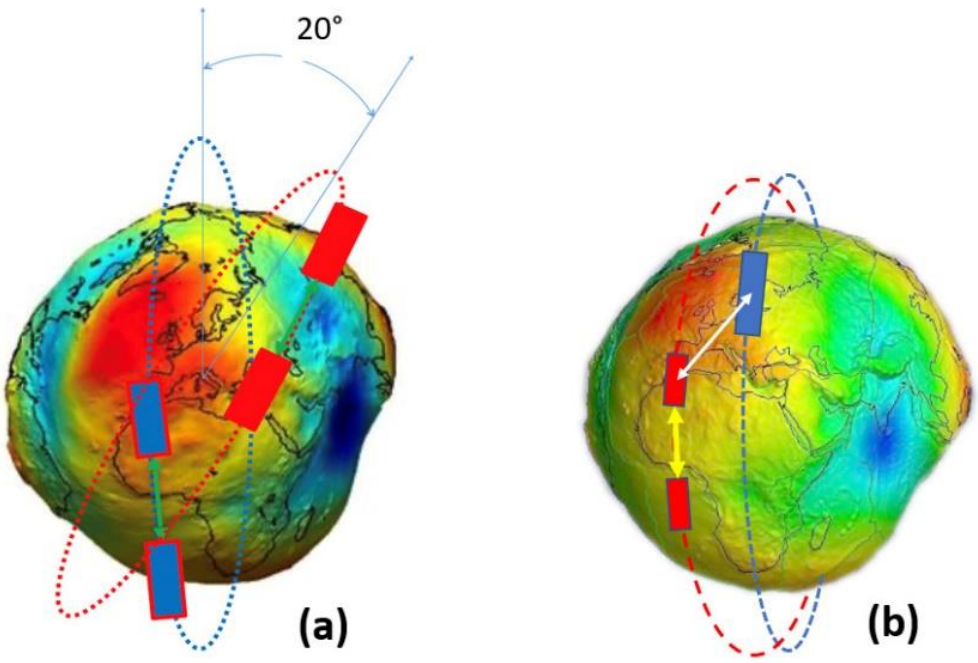


Figure 18. *Scénarios possibles pour une future mission MC-NGGM.* **(a)** *: configuration type "Bender" avec deux couples de satellites,* **(b)** *: 3 satellites, dont l'un en configuration pendulaire.*

Les deux options d'une telle mission (provisoirement dénommée MC-NGGM) sont à peu près équivalentes et permettraient un gain d'un facteur 10 en précision par rapport à GRACE et une résolution de 150 km. Une coopération entre les agences spatiales précitées est évidemment souhaitable – et sera sans doute indispensable.

A l'échelle globale la connaissance du champ moyen ira aussi s'améliorant avec les nouvelles missions et l'accumulation de données sur un grand nombre d'années, mais restera limitée en résolution à celle qui a été obtenue avec GOCE. Pour progresser il faut envisager une autre mission sur orbite polaire la plus basse possible (en 1984 – cf. table 4, le projet GRM envisageait 200 km !), disposant d'instruments encore plus performants que GOCE. Des études et développements de gradiomètres à atomes froids sont en cours dans le monde, en particulier à l'ONERA (Douch et al., 2018). Une mission de quelques mois seulement pourrait être suffisante compte tenu de la connaissance des variations temporelles par ailleurs.

A l'échelle régionale et en particulier dans les zones côtières, montagneuses, ou difficiles d'accès - pour lesquelles les mesures gravimétriques sont peu nombreuses ou insuffisamment précises, on peut espérer des progrès en gravimétrie aéroportée, avec les instruments existants certes, mais aussi avec de nouveaux senseurs, par exemple des gradiomètres électrostatiques ; citons encore l'ONERA avec une version planaire (GREMLIT) qui pourrait évoluer en un senseur 3D (*Douch*, 2015).

Conclusion

J'ai passé en revue l'histoire des contributions de la France à la détermination des modèles globaux du champ de gravité de la Terre. Cette histoire se confond sur nombre de points avec celle du GRGS soutenu en particulier par le CNES, avec celle de ses acteurs également. Nos activités se sont articulées depuis le début, et jusqu'à aujourd'hui avec les missions dédiées, autour d'une coopération franco-allemande qui n'a jamais faibli et qui reste un exemple de rapprochement exceptionnel entre des équipes européennes, même si l'évolution historique et économique a entraîné une certaine prédominance de nos collègues outre-Rhin dans ce domaine. Notre discipline est en plein essor : la qualité des modèles actuels, leur utilisation dans presque toutes les géosciences - en particulier les variations temporelles de gravité qui reflètent tous les transferts de masse aux échelles planétaire à régionale, font qu'ils sont incontournables, maintenant et à long terme, pour comprendre des phénomènes aux implications parfois dramatiques.

Les efforts consentis ont été importants, que ce soit dans les satellites (lancés par le CNES), les instruments conçus et fournis pour différentes missions spatiales (accéléromètres de l'ONERA en particulier), campagnes d'observation, ou le développement et le maintien de grands logiciels, ainsi que les traitements de données en augmentation exponentielle. A mon gré les ressources humaines attribuées sont malheureusement insuffisantes au vu de la croissance de l'activité. Le vieillissement d'une frange des acteurs, les experts, fait craindre - s'ils ne sont pas remplacés et renforcés rapidement, une perte de cette tranche de savoir en France. Si c'est inéluctable espérons que ceci soit compensé à l'intérieur de l'Europe, mais je souhaiterais que nous retrouvions une position à la hauteur de celle qui fût la nôtre au siècle dernier.

G. Balmino
(*21-01-2021*)
(*rev. 26-01-2021*)

Références

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

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 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 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 G., C. Brossier, A. Cazenave, K. Dominh, F. Nouel, N. Valès, *Detailed Geoid in the Kerguelen Islands Area Determined from Geos 3 Altimeter Data*. J. Geophys. Res., 84, B8, pp. 3827-3831, 1979.

Balmino G., D. Letoquart, F. Barlier, M. Ducasse, A. Bernard, B. Sacleux, C. Bouzat, J.J. Runavot, X. Le Pichon, M. Souriau, *Le projet GRADIO et la détermination à haute résolution du géopotentiel.* Bull. Géod., vol. 58, n°2, pp. 151-179, 1984.

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 G., F. Perosanz, *Comparison of geopotential recovery capabilities of some future satellite missions*. Gravity and Geoid, Sünkel & Marson Ed., Springer Verlag, pp. 403-412, 1995.

Balmino G., R. Sabadini, C. Tscherning and P. Woodworth, *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Mission*. ESA publication SP-1196, pp. 1-77, 1996.

Balmino G., F. Perosanz, R. Rummel, N. Sneeuw and H. Sünkel, *CHAMP, GRACE and GOCE : Mission concepts and simulations*. Proceedings, 2nd Joint Meeting of the IGC and IGeC commissions, Trieste, Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 40, n. 3-4, pp. 309-319, 1999.

Balmino G., R. Rummel, P. Visser and P. Woodworth, *Gravity field and steady state ocean circulation mission.* Report for mission selection, ESA publication SP-1233 (1), pp. 1-217, 1999.

Balmino G., *The Bureau Gravimetrique International* (*BGI) : from 1979 to 1999*. Bulletin d'Information du Bureau Gravimétrique International, n° 85, pp. 31-58, 2000.

Balmino G., *The European Goce Gravity Consortium (EGG-C)*. ESA Proceedings "International Goce User Workshop", ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas, 23-24 April 2001, WPP-188, pp. 7-12, 2001.

Balmino G., *Gravity field recovery from GRACE: unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis method*. ISSI workshop, Bern, 2002. Space Science Reviews, Kluwer Ac. Pub., 108, pp. 47-54, 2003.

Balmino G., *Filtrage d'équations linéaires par blocs*. Rapport technique CNES/DCT/SI/GS, 11-11-2004 ; rev. 2006.

Balmino G., *Gravity Methods, Satellites*. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, H.K. Gupta, Ed., 2nd edition, 11 p., 2020.

Balmino G., P. Exertier, J.M. Lemoine et F. Pérosanz, *40 ans de géodésie spatiale au CNES.* XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie, 2021.

Barlier F. et C. Boucher, *La télémétrie laser en France*. Dans "100 ans de géodésie en France", Fascicule 1, Bureau des Longitudes, 2020.

Barlier F. and M. Lefebvre, *A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences.* In "The Century of Space Sciences", J. Bleeker, J. Geiss, M. Huber, eds. Kluwer Academic Publishers, NL, pp. 1623-1651, 2001.

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

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 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. Konig, 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.

Boudon Y., F.Barlier, A.Bernard, R.Juillerat, A.M.Mainguy 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.

Bourgogne S. et J.M. Lemoine, *GRACE - modèles du GRGS* : **http://thegraceplotter.com/, 2020.**

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, 2010a.

Bruinsma S., J.C. Marty, G. Balmino, R. Biancale, C. Förste, H. Neumayer, *GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical method*. Proceedings of "3.rd Living Planet Symposium", ESA, Vol. SP 686, Bergen, 8 p., 2010b.

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 S., C. Förste, O. Abrikosov, J.M. Lemoine, J.C. Marty, S.Mulet, M.H. Rio, S. Bonvalot, *ESA's satellite-only gravity field model via the direct approach based on all GOCE data*. Geophysical Res. Letters, Vol 41, No. 21, pp. 7508-7514, (*GOCE-DIR5*), 2014.

Cazenave A., F. Forestier, F. Nouel and J.L. Piéplu, *Improvements of zonal harmonics using observations of low inclination satellites, DIAL, SAS and PEOLE*. Geophysical Monograph Series AGU, Vol. 15, "The Use of Artificial Satellites for Geodesy", 1972.

Douch K., *Gradiomètre planaire aéroporté pour l'étude de la gravité en zones littorales.* Thèse, Publication scientifique ONERA, Université Sorbonne Paris Cité, 2015.

Douch K., H. Wu, C. Schubert, J. Müller, F. Pereira Dos Santos. *Simulation-based evaluation of a cold atom interferometry gradiometer concept for gravity field recovery*. Advances in Space Research, Vol. 61, 5, pp. 1307-1323, 2018.

ESA, *Space Oceanography, Navigation and Geodynamics* (*SONG*). Workshop, Schloss Elmau, Germany, Report ESA-SP-137, 1978.

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

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.

Fischell R.E., and V.L. Pisacane, *A drag-free low-low satellite system for improved gravity field measurements*. Proceedings of the 9th GEOP Conference, Reports of the Department of Geodetic Science and Surveying, Report 280, Ohio State University, Columbus, 1978.

Förste C., F. Flechtner, R. Schmidt, R. König, U. Meyer, R. Stubenvoll, M. Rothacher, F. Barthelmes, K.H. Neumayer, R. Biancale, S.L. Bruinsma, J.M. Lemoine*, A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface gravity data*. Poster presented at EGU General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02-07 April 2006, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 03462, 2006, Vienna, Austria, 2006.

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.

Förste C., S.L. Bruinsma, R. Shako, J.C. Marty, F. Flechtner, O. Abrikosov, C. Dahle, J.M. Lemoine, H.K. Neumayer, R. Biancale, F. Barthelmes, R. König, G. Balmino*, EIGEN-6 - A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-3242-2, EGU General Assembly, 2011.

Förste C., S.L. Bruinsma, O. Abrikosov, J.M. Lemoine, J.C. Marty, F. Fletchner, G. Balmino, F. Barthelmes, R. Biancale, *EIGEN-6c4 The latest combined global gravity field model including GOCE data, up to degree and order 2190, of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*. GFZ Data Services, doi 10.5880/ICGEM.2015.1, 2014.

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.

Gaposchkin E.M. and K. Lambeck, *Smithsonian Standard Earth (II)*. SAO S.R. Vol. 315, Cambridge, Mass., 1970.

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 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 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.

Haagmans R., C. Siemes, L. Massotti, O. Carraz, P. Silvestrin, *ESA's next-generation gravity mission concepts.* Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali 31 (Suppl 1), Springer Ed., pp. 15–25, 2020.

Heiskanen W.A., *The Columbus geoid*. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 38, No. 6, 1957.

Jäggi A., M. Weigelt, F. Flechtner, A. Güntner, T. Mayer-Gürr, S. Martinis, S.L. Bruinsma, J. Flury, S. Bourgogne, H. Steffen, U. Meyer, Y. Jean, A. Sušnik, A. Grahsl, D. Arnold, K. Cann-Guthauser, R. Dach, Z Li, Q Chen, T. van Dam, C. Gruber, L. Poropat, B. Gouweleeuw, A. Kvas, B. Klinger, J.M. Lemoine, R. Biancale, H. Zwenzner, T. Bandikova, A. Shabanloui, *European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM)—from concept to implementation*. Geophysical Journal International, Volume 218, Issue 3, pp. 1572–1590, 2019.

Jäggi A., U. Meyer, M. Lasser, B. Jenny, T. Lopez, F. Flechtner, C. Dahle, C. Förste, T. Mayer-Gürr, A. Kvas, J.M. Lemoine, S. Bourgogne, M. Weigelt, A. Groh. *International Combination Service for Time-Variable Gravity Fields (COST-G).* In: . International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg, pp.1-9, 2020.

Johannessen J. A., G. Balmino, C. LeProvost, R. Rummel, R. Sabadini, H. Sünkel, C.C. Tscherning, P. Visser, P. Woodworth, C.W. Hughes, P. LeGrand, N. Sneeuw, F. Perosanz, M. Aguirre-Martinez, H. Rebhan, M.R. Drinkwater. *The European gravity field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission: its impact on geophysics*, Surveys in Geophysics 24, pp. 339–386, 2003.

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., NASA, 1969.

Keating, T., P. Taylor, W. Kahn, F. Lerch: *Geopotential Research Mission*, Science, Engineering and Program Summary, NASA Technical Memorandum 86240, 1986.

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

Lambeck K., A. Cazenave and G. Balmino, *Solid Earth and Ocean Tides Estimated from Satellite Orbit Analysis*, Rev. of Geophysics and Space Physics, vol. 2, n°3, pp. 421-434, 1974.

Lasser M., U. Meyer, A. Jäggi, T. Mayer-Gürr, A. Kvas, K.H. Neumayer, C. Dahle, F. Flechtner, J.M. Lemoine, I. Koch, M. Weigelt, J. Flury, *Benchmark data for verifying background model implementations in orbit and gravity field determination software.* Adv. Geosci., 55, pp. 1-11, 2020.

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.

Lemoine J.M., S.L. Bruinsma, S. Loyer, R. Biancale, J.C. Marty, F. Perosanz, G. Balmino, *Temporal gravity field models inferred from GRACE data*. Adv Space Res, doi: 101016/j.asr.2007.03.062, 2007.

Lemoine J.M., R. Biancale, F. Reinquin, S. Bourgogne, P. Gégout, *CNES/GRGS RL04 Earth gravity field models, from GRACE and SLR data*. DOI: https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.010, 2019.

Lemoine J.M., M. Mandea, B. Meyssignac, A. Blazquez, L. Lopes, J. Michaud, G. Balmino, S. Bourgogne, E. Samain, V. Costes, S.L. Bruinsma, and the MARVEL scientific team, *MARVEL mission proposal: The latest update*. Présentation AGU, Déc. 2020.

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 D.C. and Fairhead J.D., *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 J.C., R. Biancale, J.M. Lemoine, F. Perosanz, J. Laurent-Varin, *Algorithmic documentation of the GINS software*, CNES doc., https://www5.obs-mip.fr/wp-content-omp/uploads/sites/28/2020/05/GINS_Algo.pdf, 2018.

Meyer U., Y. Jean, A. Kvas, C. Dahle, J.M Lemoine, A. Jäggi, *Combination of GRACE monthly gravity fields on the normal equation level*. Journal of Geodesy, 93: pp.1645–1658, 2019.

Meyer U., A. Jäggi, C. Dahle, F. Flechtner, A. Kvas, S. Behzadpour, T. Mayer-Gürr, J.M. Lemoine, S. Bourgogne, *International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G), Monthly GRACE Series*. DOI : https://doi.org/10.5880/ICGEM.COST-G.001, 2020.

Meyer U., M. Lasser, A. Jäggi, C. Dahle, F. Flechtner, A. Kvas, S. Behzadpour, T. Mayer-Gürr, J.M. Lemoine, I. Koch, J. Flury, S. Bourgogne, *International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G) Monthly GRACE-FO Series*. DOI : https://doi.org/10.5880/ICGEM. COST-G.002, 2021.

Panet I., J. Flury, R. Biancale, T. Gruber, J. Johannessen, M. R. van den Broeke, T. van Dam, P. Gegout, C. W. Hughes, G. Ramillien, I. Sasgen, L. Seoane, M. Thomas, *Earth System Mass Transport Mission (e.motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space*. Surveys in Geophysics, volume 34, Springer Ed., pp. 141–163, 2013.

Reigber C. and G. Balmino, *13th-Order Harmonics in the Geopotential from an Analysis of Four Resonant Satellites*. Space Research XV, pp. 53-57, 1974.

Reigber C., *Improvements of the gravity field from satellite techniques as proposed to the European Space Agency*. Proc. 9th GEOP Conference, Oct. 2-5, 1978, Dept. of Geodetic Science, Report No. 280, The Ohio State Univ., Columbus, pp.221-232, 1978.

Reigber C., G. Balmino, H. Müller, B. Moynot, *The GRIM 3 Earth Gravity Field Model*. Manuscripta Geodaetica, 8, pp. 93-138, 1983.

Reigber C., G. Balmino, H. Müller, W. Bosch, B. Moynot, *GRIM 3 Geopotential Model Improvements (GRIM3B).* Proceedings, Int. Symp. on Space Techniques for Geodynamics, Sopron, Hungary, 1985a.

Reigber C., G. Balmino, H. Müller, W. Bosch, B. Moynot, *GRIM 3 Gravity Model Improvement Using Lageos (GRIM 3-L1)*. J. Geophys. Res., vol. 90, n°B11, pp. 9285-9299, 1985b.

Reigber C., G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. Konig, 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.

Reigber C., G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. Konig, S. Loyer, K.H. Neumayer, J.C. Marty, F. Barthelmes, F. Perosanz, S.Y. Zhu, *Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from CHAMP*. Space Science Reviews, Kluwer Ac. Pub., 108, pp. 55-66, 2003.

Reigber C., P. Schwintzer, K.H. Neumayer, F. Barthelmes, R. Konig, C. Forste, G. Balmino, R. Biancale, J.M. Lemoine, S. Loyer, S.L. Bruinsma, F. Perosanz, T. Fayard, *The CHAMP-only Earth gravity field model EIGEN 2*. Adv. Space Res., Vol. 31, n° 8, pp. 1883-1888, 2003.

Reigber C., H. Jochmann, J. Wunsch, S. Petrovic, P. Schwintzer, F. Barthelmes, K.H. Neumayer, R. König, C. Förste, G. Balmino, R. Biancale, J.M. Lemoine, S. Loyer, F. Perosanz, *EIGEN 3S : Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP, in Earth Observation with CHAMP ; Results from Three Years in Orbit*. C. Reigber et al. Ed., Proceedings, Springer Verlag, p. 25-30, 2004.

Reigber C., R. Schmidt, F. Flechtner, R. König, U. Meyer, K.H. Neumayer, P. Schwintzer, S.Y. Zhu, *An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S*. Journal of Geodynamics, Vol 39, No. 1, p. 1-10, 2005.

Reigber C., P. Schwintzer, R. Stubenvoll, R. Schmidt, F. Flechtner, U. Meyer, R. König, K.H. Neumayer, C. Förste, F. Barthelmes, S.Y. Zhu, G. Balmino, R. Biancale, J.M. Lemoine, H. Meixner, J.C. Raimondo, *A high resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE satellite missions and surface data : EIGEN-CG01C*. Scientific Technical Report STR0607, GFZ, Potsdam, 2006.

Rummel R., G. Balmino, J. Johannessen, P. Visser, P. Woodworth*, Dedicated gravity field missions-principles and aims.* Journal of Geodynamics 33, pp. 3-20, 2002.

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*. DGFI, Abt. I (DFG), München, 1991.

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 Vermessungswessen, Vol. 117, p. 227-247, 1992.

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, 1993

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.

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 P., B. Foulon, E. Willemenot, *Electrostatic space accelerometers for present and future missions*, Acta Astronautica Vol. 45, No. 10, pp. 605 - 617, 1999a.

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.

Wolff M., *Direct Measurements of the Earth's Gravitational Potential Using a Satellite Pair*, Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 22, pp. 5295-5300, 1969.

Woodworth P.L., J. Johannessen, P. Le Grand, C. Le Provost, G. Balmino, R. Rummel, R. Sabadini, H. Sünkel, C.C. Tscherning, P. Visser, *Towards the Definitive Space Gravity Mission*, International WOCE Newsletter, N° 33, pp. 37-40, 1998.

ISBN : 978-2-491688-07-3
ISSN : 2724-8372