

Objectifs scientifiques

pour une future mission de gravimétrie spatiale

Projet Microméga

Mars 2009

Coordination : Isabelle Panet

Rédacteurs principaux : Isabelle Panet, Guillaume Ramillien, Alix Lombard

Synthèse issue des travaux du Groupe Mission Microméga :

Richard Biancale (CNES/DTP)

Sylvain Bonvalot (IRD)

Michel Diament (IPGP)

Bernard Foulon (ONERA)

Steven Hosford (CNES)

André Laurens (CNES)

Marie-Françoise Lalancette (SHOM)

Guillaume Martelet (BRGM)

Isabelle Panet (IGN)

Guillaume Ramillien (CNRS)

Lettres de soutien de :

Georges Balmino, Richard Coleman, Reinhard Dietrich, Will Featherstone,
Andreas Güntner, Chris Hughes, Kurt Lambeck, Benoît Legrésy, Marie-Hélène Rio,
Johannes Riegger, Reiner Rummel, Daniel Shaddock, Paul Tregoning,
Bert Vermeersen, Philip Woodworth,
Michaël Sideris au nom de l'International Association of Geodesy (IAG),
C.K. Shum au nom du Space Missions Working Group of the IAG-GGOS.

Sommaire

Introduction	p 4
1 – Hydrologie	p 5
1.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
1.b – Performances requises	
1.c – Références	
1.d – Lettre de soutien : Johannes Riegger, Andreas Güntner	
2 – Cryosphère	p 13
2.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
2.b – Performances requises	
2.c – Références	
2.d – Lettre de soutien : Benoît Legrésy, Richard Coleman, Reinhard Dietrich	
3 – Circulation océanique	p 18
3.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
3.b – Performances requises	
3.c – Références	
3.d – Lettre de soutien : Marie-Hélène Rio, Chris Hughes	
4 – Niveau de la mer	p 23
4.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
4.b – Performances requises	
4.c – Références	
4.d – Lettre de soutien : Philip Woodworth, Marie-Hélène Rio, Chris Hughes	
5 – Terre solide	p 29
5.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
5.b – Performances requises	
5.c – Références	
5.d – Lettre de soutien : Bert Vermeersen	
6 – Géodésie	p 34
6.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques	
6.b – Performances requises	
6.c – Références	
6.d – Lettre de soutien : Georges Balmino, Reiner Rummel	
Conclusion et synthèse	p 38

Annexe 1 :	p 40
Lettre de soutien de Paul Tregoning, Kurt Lambeck, Will Featherstone & Daniel Shaddock	
Annexe 2	p 41
Lettre de soutien de l'International Association of Geodesy	
Annexe 3 :	p 42
Lettre de soutien du GGOS' Space Missions Working Group	
Annexe 4 :	p 44
Tableau de synthèse quantitative des besoins, réalisé par Sneeuw <i>et al.</i> (2005)	

Introduction

La Terre est un système riche et complexe, siège d'interactions permanentes entre ses nombreux constituants, à différentes échelles de temps et d'espace : le cycle de l'eau s'accompagne de transferts de masses dans les enveloppes fluides, de même que la circulation océanique ou la fonte des calottes polaires, le noyau est le siège de mouvements magnétohydrodynamiques, le manteau convecte sous des plaques tectoniques mobiles, la lithosphère se déforme en permanence, que ce soit extrêmement lentement, en réponse à la dernière déglaciation, ou beaucoup plus brutalement lors d'événement catastrophiques tels que les récents séismes de Sumatra. Reflet de la distribution des masses au sein de ce système, le champ de pesanteur terrestre est un moyen d'investigation de la structure et de la dynamique de notre planète et de ses couches fluides externes : atmosphère, océans, calottes polaires, hydrosphère. Les observations sur le champ de pesanteur contribuent ainsi à la compréhension de la vie de notre planète et de ses évolutions climatiques. A un moment où les bouleversements climatiques et la pression anthropique modifient profondément l'équilibre global, de telles observations sont essentielles.

Notre connaissance du champ de pesanteur à basse et moyenne résolution (environ 400 km) a été révolutionnée par le lancement sans précédent de missions satellitaires spécifiquement dédiées à la mesure du champ et de ses variations temporelles : les missions CHAMP (2000), GRACE (2002) et bientôt GOCE. Outre leur précision inégalée, la dimension temporelle et la couverture globale des données les rend particulièrement intéressantes et a ouvert des voies de recherche très prometteuses dans de nombreux domaines, comme le montrent les nombreux articles publiés. La mission GRACE, lancée en 2002 et dédiée à la mesure des variations temporelles du champ de pesanteur, a ainsi permis le suivi des transferts de masse à une résolution temporelle mensuelle ou décadaire, et une résolution spatiale de l'ordre de 400 km. Evolution des stocks d'eau continentale, fonte des calottes polaires, rebond post-glaciaire et viscosité du manteau terrestre : les nombreuses retombées scientifiques ont fait de cette mission un succès, qui excède largement sa durée de vie initiale de 5 ans puisqu'on estime aujourd'hui que GRACE devrait rester opérationnel jusqu'en 2010-2012. La mission GOCE devrait être lancée très prochainement et nous donner accès au champ statique à 100 km de résolution environ, à une précision inégalée aux moyennes longueurs d'ondes, de manière complémentaire à GRACE qui reste plus précis à grande longueur d'onde.

Pour de nombreuses applications scientifiques, la continuité des mesures de gravimétrie spatiale de type GRACE après 2012 est indispensable. L'objectif de ce projet est ainsi de développer une future mission de type GRACE Follow-On. Les objectifs scientifiques et performances requises pour les différentes disciplines sont détaillées ci-après. Cette synthèse s'appuie sur les travaux menés au sein du Groupe Mission Microméga, chargé d'étudier les scénarios possibles pour une future mission de type Grace Follow-On, intégrant divers aspects (scientifiques, techniques et coopérations possibles). Une série de lettres de soutien a été récemment collectée au sein des communautés internationales utilisatrices de données de gravimétrie spatiale, afin de ré-actualiser l'expression du besoin scientifique. Ces lettres montrent un fort soutien de la communauté internationale pour une future mission de gravimétrie spatiale, certains pays comme l'Australie montrant un intérêt très marqué pour s'engager dans une future mission. Enfin, ce travail s'appuie également sur des documents existants synthétisant les réflexions antérieures de la communauté internationale pour préparer l'après-GRACE/GOCE, suite aux workshops réalisés en 2003 et en 2007 sur l'avenir de la gravimétrie spatiale, notamment repris dans l'Annexe 4 de ce rapport.

1 – Hydrologie

1.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

Pour une meilleure compréhension des évolutions climatiques actuelles et avec de nombreux enjeux sociétaux, la surveillance continue et globale des stocks d'eau continentale est un objectif majeur de toute mission de type GRACE Follow-On. Toutefois, malgré l'importance cruciale de ce paramètre, le volume d'eau continentale reste très mal connu aux échelles globale et régionale, du fait de lacunes dans les observations et d'une absence de continuité dans le suivi (Lettenmaier & Famiglietti, 2006). Des réseaux locaux de surveillance existent, mais notre connaissance du volume d'eau continentale repose essentiellement sur les modèles hydrologiques globaux (Rodell *et al.*, 2004a), qui souffrent d'incertitudes importantes. Les mesures directes restent limitées, et les techniques d'imagerie par satellite ne donnent accès qu'aux variations des eaux de surface, qui en représentent qu'une fraction du contenu total en eau. La gravimétrie spatiale est tout particulièrement intéressante, parce qu'elle donne accès aux variations totales du contenu en eau (neige, glace, eaux de surface, humidité du sol, aquifères) au dessus des continents, et constitue donc une nouvelle et précieuse source d'information pour les hydrologues. De plus, les mesures de gravimétrie spatiale permettent aussi de fermer le bilan hydrique, qui relie les précipitations à l'évaporation/transpiration des plantes, l'écoulement des eaux et le stockage, menant ainsi à une estimation des flux d'évapotranspiration.

La démonstration des capacités de GRACE à détecter les signaux hydrologiques avec une précision suffisante a été faite, dans un premier temps, lors d'études avant le lancement de la mission (Rodell & Famiglietti, 1999, 2001, 2002). Depuis le lancement, de nombreux travaux ont montré l'intérêt de ces mesures pour le suivi des volumes d'eau continentaux (Wahr *et al.*, 2004, Ramillien *et al.*, 2004), pour quantifier les flux tels que l'évapo-transpiration (Rodell *et al.*, 2004b ; Ramillien *et al.*, 2006b), les précipitations moins l'évapotranspiration (Swenson & Wahr, 2006a, b) et le débit des principaux fleuves (Syed *et al.* 2005, 2007, 2008a, b), et pour estimer la variabilité spatio-temporelle du contenu en eau continental (Wahr *et al.*, 2004, Swenson & Milly, 2006, Schmidt *et al.*, 2006, Ramillien *et al.*, 2005, Chen *et al.*, 2005a, Tamisiea *et al.*, 2005, Tapley *et al.*, 2004b, Seo *et al.*, 2006, Syed *et al.*, 2008a, b). Dans ces travaux, des cartes du contenu en eau des sols et leurs variations temporelles sont calculées à partir des données GRACE et représentent des moyennes sur des zones d'environ 200 000 km² et plus.

En général, les estimations du volume d'eau continentale faites à partir des données GRACE (voir Fig. 1) sont en bon accord avec ceux qui se basent sur les modèles (Rodell *et al.*, 2004a, Syed *et al.*, 2005, Niu *et al.*, 2007a, b, Seo *et al.*, 2006). Combinées avec des mesures complémentaires d'eaux de surface et d'humidité des sols, les mesures de GRACE permettent de suivre les variations des eaux souterraines avec une précision raisonnable (Yeh *et al.*, 2006, Swenson *et al.*, 2008). Combinés avec d'autres techniques satellitaires comme l'imagerie, les géoïdes de GRACE ont permis d'étudier les mécanismes d'inondation saisonnière comme dans le Mékong (Frappart *et al.*, 2006b) et l'Amazone (Wilson *et al.*, 2007, Papa *et al.*, 2008). Une autre application est la détection de la sécheresse dans le bassin de Murray-Darling en Australie du Sud (voir Fig. 2). Enfin, les données GRACE peuvent être utilisées pour estimer les flux d'eau verticaux. Ainsi, les variations régionales d'évapo-transpiration sur le bassin du

Mississippi ont été estimés en combinant les données GRACE filtrées à 600 km avec les précipitations et les eaux de surface dans le bilan de masse d'eau (Rodell *et al.*, 2004a, Ramillien, 2006b). Les estimations des variations temporelles d'évapotranspiration estimées se sont avérées comparables avec celles issues des modèles (Swenson & Wahr, 2006a, b).

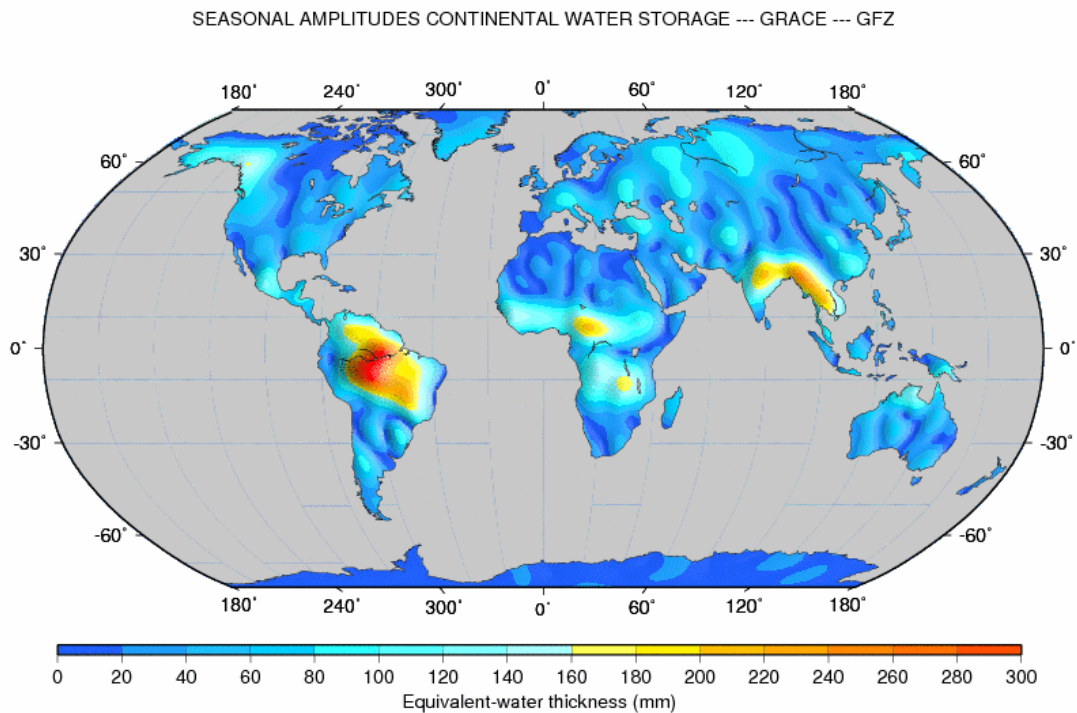


Fig. 1 : Variations saisonnières du contenu en eau continental estimée à partir des données GRACE, d'après Ramillien et al. (2003, 2008).

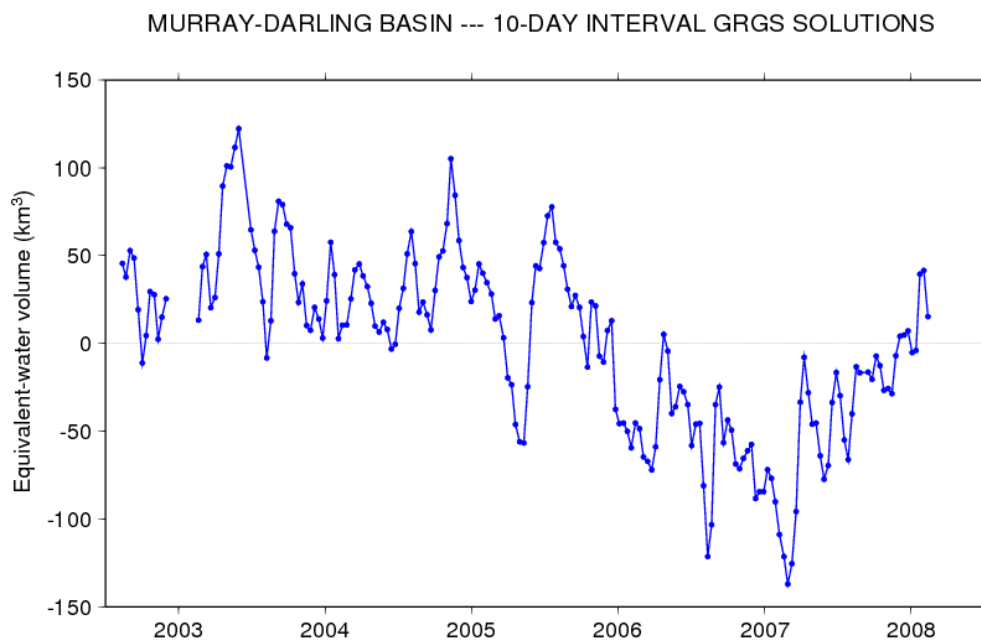


Fig. 2 : Série temporelle des variations de masse (exprimées en volume équivalent d'eau) dans le bassin de la Murray-Darling (Australie), et mettant en évidence l'accélération de la sécheresse (jusqu'en 2007). Bon accord avec les observations de terrain pour les variations inter-annuelles (source: Leblanc *et al.*, 2009).

1.b – Performances requises

- Importance de la continuité des observations d'une telle mission, qui va permettre un suivi continu des variations spatio-temporelles des stocks d'eau continentaux sur plusieurs années.
- Augmentation de la résolution spatiale des observations GRACE (aux les échelles plus fines 100-200 km sont accessibles les échanges de masses d'eau entre les sous-bassins).
- Amélioration de la précision des produits de niveaux 1 et 2 (en partie par réduction du niveau de bruit dans les données), qui par conséquent permettra de meilleures estimations des anomalies du stock d'eau.

1.c – Références

- Chen, J., M. Rodell, C. R. Wilson and J. S. Famiglietti, 2005a, Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14405, doi:10.1029/2005GL022964.
- Frappart F., K. Dominh, J. Lhermitte, G. Ramillien, A. Cazenave and T. LeTaon, 2006b, Water volume change in the lower Mekong basin from satellite altimetry and imagery data, *Geophys. J. Int.*, 167, 570-584.
- Leblanc M., P. Tregoning, G. Ramillien, S. O. Tweed and A. Fakes, 2009, Basin scaled integrated observations of the early 21st century multi-year drought in southeast Australia, *Water Resource Research*, 2008WR007333, in press.
- Lettenmaier, D. P. and J. S. Famiglietti, 2006, Water from on high, *Nature*, 444, 562-563.
- Niu G.-Y., Z.-L. Yang, R. E. Dickinson, L. E. Gulden, and H. Su, 2007a: Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data, *J. Geophys. Res.*, 112, D07103, doi:10.1029/2006JD007522
- Niu G.-Y., K.-W. Seo, Z.-L. Yang, C. Wilson, S. Hua, J. Chen and M. Rodell, 2007b, Retrieving snow mass from GRACE terrestrial water storage change with a land surface model, *GRL*, 34, L15704, doi: 1.1029/2007GL030413.
- Papa, F., Güntner, A., Frappart, F., Progent, C., Rossow, W.B. (2008). Variations of surface water extent and water storage in large river basins : A comparison of different global data sources. *Am. Geophys. Union* 35:L11401, doi:10.1029/2008GL033857.
- Ramillien G., A. Cazenave and O. Brunau, 2004, Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry, *Geophys. J. Int.*, 158, 3, 813-826.

- Ramillien G., F. Frappart, A. Cazenave and A. Güntner, 2005, Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids, *Earth and Plan. Sc. Lett.*, 235, 1-2, 283-301.
- Ramillien G., F. Frappart, A. Güntner, T. Ngo-Duc and A. Cazenave, 2006, Mapping time variations of evapotranspiration rate from GRACE satellite gravimetry, *Water Resources Res.*, 42, W10403, doi: 10.1029/2005WR004331.
- Ramillien G., J. S. Famiglietti and J. Wahr, 2008, Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review, *Surveys of Geophysics*, 29, 4-5, 361-374, doi: 10.1007/s10712-008-9048-9.
- Rodell M. and J. Famiglietti, 1999, Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field, *Water Resources Res.*, 35, 9, 2705-2723.
- Rodell M. and J. Famiglietti, 2001, An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), *Water Resources Res.*, 37, 5, 1327-1339.
- Rodell M. and J. S. Famiglietti, 2002, The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US, *J. of Hydrology*, 263, 1-4, 245-256.
- Rodell M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann and D. Toll, 2004a, The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of American Meteorological Society*, 85, 3, 381-394, doi: 10.1175/BAMS-85-3-381.
- Rodell M., J. S. Famiglietti, J. Chen, S. I. Seneviratne, P. Viterbo, S. Holl and C. R. Wilson, 2004b, Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observation, *GRL*, 31, L20504, doi: 10.1029/2004GL020873.
- Schmidt R., P. Schwintzer, F. Flechtner, C. Reigber, A. Güntner, P. Döll, G. Ramillien, A. Cazenave, S. Petrovic, H. Jochmann and J. Wunsch, 2006, GRACE observations of changes in continental water storage, *Global and Planetary Change*, 50, 1-2, 112-126, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.11.018.
- Seo, K.-W., C. R. Wilson, J. S. Famiglietti, J. L. Chen, and M. Rodell, 2006, Terrestrial water mass load changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), *Water Resour. Res.*, 42, W05417, doi:10.1029/2005WR004255.
- Swenson S. and P. C. D. Milly, 2006, Climate model biases in seasonality of continental water storage revealed by satellite gravimetry, *Water Resources Res.*, 42, 3.
- Swenson S. and J. Wahr, 2006a, Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravimetry measurements, *J. Hydrometeorology*, 7, 2, 252-270, doi: 10.1175/JHM478.1.

- Swenson, S., and J. Wahr, 2006b, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285.
- Swenson, S. C., P. J.-F. Yeh, J. Wahr and J. S. Famiglietti, 2006, A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16401, doi:10.1029/2006GL026962.
- Swenson, S., J. Famiglietti, J. Basara, and J. Wahr, 2008, Estimating profile soil moisture and groundwater variations using GRACE and Oklahoma Mesonet soil moisture data, *Water Resour. Res.*, 44, W01413, doi:10.1029/2007WR006057.
- Syed T., J. Famiglietti, J. Chen, M. Rodell, S. Seneviratne, P. Viterbo and C. Wilson, 2005, Total basin discharge for the Amazon and the Mississippi River basins from GRACE and a land-atmosphere water balance, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 24.
- Syed, T. H., J. S. Famiglietti, V. Zlotnicki, and M. Rodell, 2007, Contemporary estimates of Pan-Arctic freshwater discharge from GRACE and reanalysis, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19404, doi:10.1029/2007GL031254
- Syed, T. H., J. S. Famiglietti, M. Rodell, J. Chen, and C. R. Wilson, 2008a, Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS, *Water Resour. Res.*, 44, W02433, doi:10.1029/2006WR005779.
- Syed, T. H., J. S. Famiglietti and D. Chambers, 2008b, GRACE-based estimates of terrestrial freshwater discharge from basin to continental scales, in press, *J. Hydrometeorology*
- Tamisiea M. E., E. W. Leuliette, J. L. Davis and J. X. Mitrovica, 2005, Constraining hydrological and cryospheric mass flux in southeastern Alaska using space-based gravity measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 20.
- Tapley B., S. Bettadpur, J. Ries, P. Thompson and M. Watkins, 2004b, GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 5683, P3.
- Wahr J., S. Swenson, V. Zlotnicki and I. Velicogna, 2004, Time-variable gravity from GRACE: first results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 11, pp4.
- Wilson, M. D., P. D. Bates, D. Alsdorf, B. Forsberg, M. Horritt, J. Melack, F. Frappart and J. Famiglietti, 2007, Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally-flooded wetlands, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15404, doi:10.1029/2007GL030156.
- Yeh P. J. F., S. C. Swenson, J. S. Famiglietti and M. Rodell, 2006, Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment, *Water Resources Res.*, 42, W12203, doi: 10.1029/2006WR005374.

1.d – Lettres de soutien

Johannes Riegger, Institut für Wasserbau, Stuttgart University, Stuttgart, Germany.

Institute of Hydraulic Engineering · Chair of Hydrology and Geohydrology
University of Stuttgart · D-70550 Stuttgart · Germany

The opportunity for the measurement of mass changes on landmasses by GRACE means a quantum leap for hydrology. Gravitational observations of monthly changes in total water storage with a mass resolution of approx. 10-20mm allow for the first time to close the monthly water balance on large spatial scales. Thus GRACE measurements allow for :

- the direct determination of monthly actual evapotranspiration, which up until now can only be modelled on large scales, and thus an evaluation of hydrologic model approaches
- Investigations of the runoff – storage relationship for large and complex catchments
- the direct comparison with atmospheric moisture fluxes and thus an evaluation of atmospheric model approaches
- the determination of runoff from ungauged catchments with the use of moisture fluxes
- the determination of total runoff from land masses
- the determination of water storage trends and a comparison with atmospheric trends

Within our project *Direct Water Balance*, a joint project of Geodesy, Hydrology and Atmospheric Research within the Special Priority Programme “*Mass transports and mass distributions in the Earth System*” (SPP1257) funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, we are about to quantify the accuracy of present GRACE products and geodetic solution schemes on the basis of hydrologic data for catchments and times, for which the unknown actual evapotranspiration can be neglected and thus GRACE mass change rates can be directly compared with ground based measurements. Comparisons with water balances from atmospheric moisture flux allow an additional cross check with respect to data consistence. Beside specific hydrologic research objectives mentioned above, the aim of this project is also to utilize known hydrological mass signals to improve GRACE products and solution schemes. Other groups develop regional geodetic approaches and improvements in dealiasing schemes. We are convinced, that these efforts will lead to an improvement in general signal processing from which future missions will very much benefit.

With respect to hydrology we see the following necessities and priorities for GRACE Follow-On Missions:

1. The continuation of the current temporal gravity field monitoring by GRACE and an overlap of the future with the present mission is considered of highest importance. This is due to the necessity to obtain long time series for the proper determination of statistical characteristics and trends in hydrology. A sufficient overlap of measurements is important for the identification of instrument specific error characteristics.
2. Second highest priority is an improvement in spatial resolution and corresponding mass resolution, which is essential for an improved separation of climatic, physiographic and landuse impacts on actual evapotranspiration. This is inevitable for the understanding of large scale characteristics of actual evapotranspiration and the development of sophisticated modelling or regionalization approaches.
3. Of lowest priority temporal resolution is considered at the moment for hydrology as related hydrometeorological data are mainly available in monthly resolution.

We want to emphasize the extraordinary importance of temporal gravity field monitoring for the evaluation and improvement of hydrologic and atmospheric modelling approaches and the invaluable benefits from continuous GRACE Follow-On Missions for hydrology.

Dr. rer.nat. Johannes Riegger



11.03.2009

**Support for a GRACE Follow-On mission (CNES Micromega)
from the perspective of Continental Hydrology**

Continental water storage is a key component of the global water cycle, having an important control over water, energy and biogeochemical fluxes, and thus playing a major role in the Earth's climate system. In spite of their importance, spatial and temporal variations of continental water storage and other water balance components, in particular evapotranspiration, were largely unknown prior to the GRACE satellite mission because of the lack of comprehensive hydrological observing systems at regional and global scales. With GRACE, an unprecedented source of information to quantify spatio-temporal variations of the continental hydrological cycle became available. For the first time ever, water storage changes for large continental areas can be monitored with GRACE.

The about seven years of GRACE operation have clearly demonstrated its unique capacity to monitor water storage variations for selected regions and large river basins worldwide. Resolving the water balance equation, also other components of the water cycle such as evapotranspiration or river discharge could be quantified based on GRACE for large areas. In combination with complimentary observation data, GRACE gravity time series could resolve mass variations of individual storage compartments in continental hydrology, such as snow, surface water or groundwater storage in large aquifers. GRACE data were shown to be extremely useful as a constraint to validate and improve hydrological and land surface models. The main focus of hydrological GRACE applications up to now has been on resolving the dominant seasonal signal of water mass variations. In addition, gravity anomalies recorded by GRACE could also reveal the effect of hydro-meteorological extremes (floods and droughts) on continental water storage. However, significant analyzes of inter-annual variations and trends in the continental water cycle are still limited due to the short time period of GRACE data.

A global ground-based network for monitoring continental water storage and other components of the water cycle in a comprehensive way and with sufficient coverage and resolution will very likely not be realized in future. In fact, due to the complex nature of water storage as composed of various compartments such as snow, surface water and groundwater, only time-variable gravity data can capture *total* water storage variations in an integrative way. Thus, after the end of GRACE, a Follow-On mission will be the only source of information on continental water storage variations.

It is essential to quantify and understand these variations in water storage because they are of high importance for ecosystems, and for human water and food supply. Processes of environmental change including anthropogenic impacts may cause gradual changes in continental water fluxes and storage volumes and thus adversely affect water resources (e.g., withdrawal use of groundwater, land use changes like deforestation, drainage of wetlands). Climate change affects the water cycle (e.g., in terms of disappearance of permafrost and glaciers, changing frequencies of atmospheric circulation patterns and thus hydrological extremes, land surface-atmosphere feedback mechanisms including potential shifts of climate zones, sea level variations). Similarly, large-scale variations of the oceanic and atmospheric circulation patterns such as by the El-Niño-Southern Oscillation (ENSO) have marked effects on the continental hydrology at inter-annual time scales.

The experiences from GRACE show that a gravity satellite mission, in principle, is sensitive to the variations mentioned above. However, due to their inherent time scales, such inter-annual variations

and secular trends in the water cycle can only be reliably identified if the observation time series are long enough. This clearly calls for observation periods that exceed the GRACE lifetime and, thus, a GRACE Follow-On mission is an indispensable observing system. Only with a GRACE Follow-On mission the impact and persistence of these anomalies and trends including their spatio-temporal correlation structures can be revealed. In addition, such longer time series are mandatory to improve the prognostic capabilities of large-scale hydrological models by model evaluation, calibration, and data assimilation.

Optimum prospect towards a better understanding of water transport, storage and exchange processes within the hydrological cycle is expected from the combination of different observation data sets that simultaneously monitor total water storage and other components. This will give multiple constraints to individual components and thus reduce considerable uncertainties that still exist in quantifying the water cycle at regional up to global scales. To this end, a GRACE Follow-On mission should also be realized from the perspective of hydrology to fully explore this potential in view of other upcoming complementary satellite missions such as SWOT and SMOS that monitor individual storage compartments like surface water and soil moisture.

Potsdam, 19.02.2009

Andreas Güntner

2 – Cryosphère

2.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

Comprendre les évolutions des calottes glaciaires est indispensable pour l'étude du cycle de l'eau à l'échelle globale et les transferts entre les différents réservoirs (océans, calottes polaires, continents), pour mieux comprendre l'origine des variations du niveau de la mer et les évolutions de la circulation océanique, qui peut être affectée par un apport d'eau douce résultant de la fonte des calottes, et finalement, pour mieux comprendre les évolutions climatiques actuelles.

La mission GRACE s'avère extrêmement intéressante pour étudier le bilan de masse des calottes polaires. Elle a ainsi permis de quantifier la fonte des glaces en Antarctique (Velicogna & Wahr, 2006a, Ramillien *et al.*, 2006) et au Groënland (Velicogna & Wahr, 2006b ; Chen *et al.*, 2006a, Ramillien *et al.*, 2006). La Figure 3 montre ainsi les tendances obtenues à partir des géoïdes décennaires produits par le GRGS (Ramillien *et al.*, 2006). Velicogna & Wahr (2005, 2006b) ont mis en évidence une fonte de $-82 \pm 28 \text{ km}^3/\text{an}$ au Groënland, avec une accélération de la fonte au printemps 2004. Après correction de la contribution du rebond post-glaciaire, les variations de masses par bassin estimées avec la technique localisée des mascons est de $-101 \pm 16 \text{ km}^3/\text{an}$ (Luthcke *et al.*, 2006). Ce résultat est cohérent avec les estimations de Ramillien *et al.* (2006). Une valeur extrême de $-152 \pm 80 \text{ km}^3/\text{an}$ en Antarctique est trouvée par Velicogna & Wahr. Cette valeur provient cependant de la correction appliquée par les auteurs pour le rebond post-glaciaire, basée sur les modèles IJ05 (Ivins & James, 2005) et ICE-5G (Peltier, 2004). Lorsque ces corrections ne sont pas appliquées, le bilan de masse de l'Antarctique apparaît en effet proche de zéro. Ces résultats suggèrent qu'il n'est pas clair si l'Antarctique a perdu de la masse ou pas pendant la période d'observation de GRACE (Ramillien *et al.*, 2006), et soulignent l'importance de la séparation entre les signaux liés à la glace et ceux du rebond post-glaciaire, évoqués en section 2. Les modèles de rebond existants sont en effet trop peu précis, et doivent être améliorés, notamment grâce à la gravimétrie spatiale combinée avec d'autres techniques d'observations. Ainsi, une meilleure estimation des variations du volume de glace en Antarctique nécessite absolument de disposer de séries de mesures de type GRACE poursuivies sur de longues périodes (voir section 2).

A l'échelle régionale, les bilans de masse des glaciers d'Alaska du Sud ont été estimés, avec une perte de masse de $-101 \pm 22 \text{ km}^3/\text{an}$. On note un bon accord entre les estimations basées sur GRACE, et celles dérivées de l'altimétrie laser ($-96 \pm 35 \text{ km}^3/\text{an}$) sur la même région (Chen *et al.*, 2007). Après correction des effets du rebond post-glaciaire et des effets hydrologiques, les mêmes auteurs trouvent une perte de masse de $-27.9 \text{ km}^3/\text{an}$ en Patagonie, équivalent à -1.6 mm/an de variations d'épaisseur de glace (Chen *et al.*, 2007). Enfin, Chen *et al.* (2008) ont estimé des pertes de masse récentes de $-28.8 \pm 7.9 \text{ km}^3/\text{an}$, $-81 \pm 17 \text{ km}^3/\text{an}$ et $-16.7 \pm 9.7 \text{ km}^3/\text{an}$ dans la péninsule antarctique nord et le long des côtes, près des glaciers de Stancomb-Willis et Jutulstraumen dans le Queen Maud Land.

Ces résultats montrent les perspectives de missions de gravimétrie spatiale de type GRACE pour la glaciologie. De plus, outre les variations temporelles du champ, toute amélioration de

la connaissance du champ statique aux pôles permet une amélioration de la connaissance de la topographie à la base des glaces, qui constitue une conditions aux limites importante dans les modèles de flux de glace. Notons que l'amélioration ici est plutôt attendue par la future mission GOCE. De plus, la combinaison de données de champ statique avec des données géométriques issues de mesures radar permet de déterminer la densité et la compaction de la neige, qui ne sont actuellement connues que par des carottes localisées.

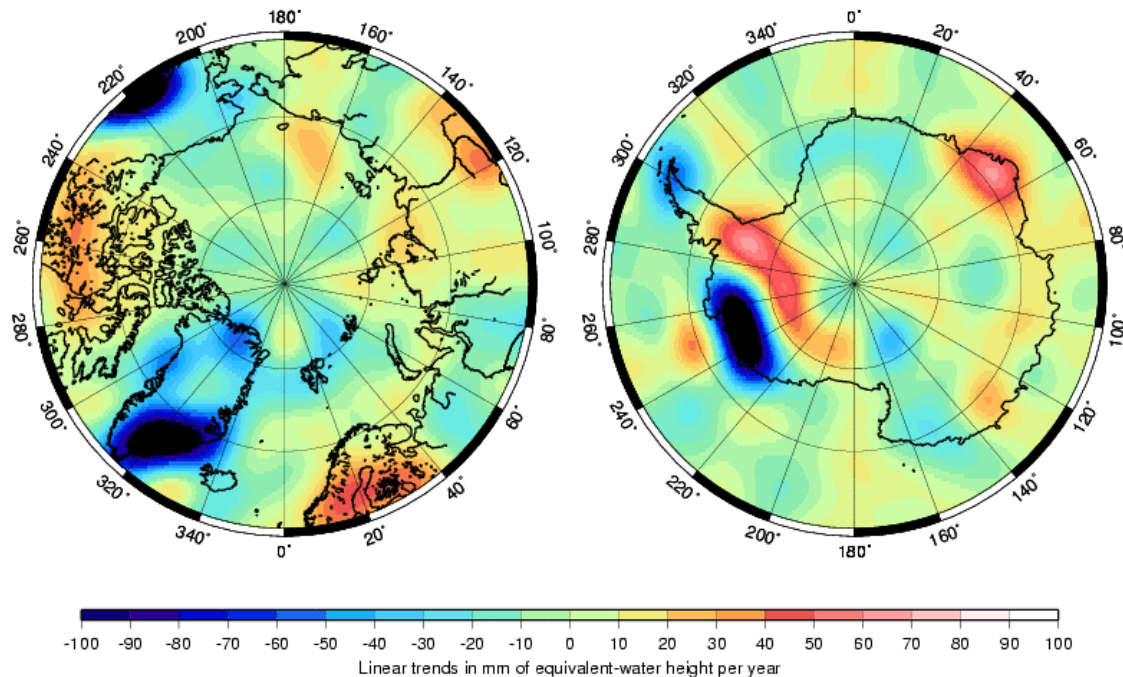


Fig. 3: Cartes de tendance des évolutions de la masse de glace aux pôles, réalisées à partir des géoides GRGS à 10 jours, pour la période 2002-2006. Ces cartes montrent des pertes de masse significatives au niveau des glaciers d'Alaska, du Groënland, de l'Antarctique Ouest et de la Péninsule Antarctique.

2.b – Performances requises

- Première priorité : continuité des mesures. Une augmentation de la précision serait également très bénéfique.
- Deuxième priorité : augmentation de la résolution spatiale (200 km de résolution minimum).

2.c – Références

- Chen J. L., C. R. Wilson, D. D. Blankenship and B. D. Tapley, 2006a, Antarctic mass rates from GRACE, GRL, 33, L11502, doi: 10.1029/2006GL026369.
- Chen J. L., C. R. Wilson, B. D. Tapley, D. D. Blankenship and E. R. Ivins, 2007, Patagonia ice field melting observed by Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), GRL, 34, L22501, doi: 10.1029/2007GL031871.

- Chen J. L., C. R. Wilson, B. D. Tapley, D. Blanckenship and D. Young, 2008, Antarctic regional ice loss rates from GRACE, *EPSL*, 266/1-2, 140-148, doi: 10.1016/j.epsl.2007.10.057.
- Ivins E. and T. S. James, 2005, Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment, *Antarc. Sci.*, 17, 541-553, doi: 10.1017/S0954102005002968.
- Luthcke S. B., H. J. Zwally, W. Abdalati, D. D. Rowlands, R. D. Ray, R. S. Nerem, F. G. Lemoine, J. J. McCarthy and D. S. Chinn, 2006, Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations, *Science*, 314, 1286-1289.
- Peltier, W.R., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice age Earth : the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 32, 111–149.
- Ramillien G., A. Lombard, A. Cazenave, E. Ivins, M. Llubes, F. Remy and R. Biancale, 2006, Interannual variations of ice sheets mass balance from GRACE and sea level, *Global and Planetary Change*, 53, 198-208.
- Velicogna, I., J. Wahr, E. Hanna, and P. Huybrechts (2005), Short term mass variability in Greenland, from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05501, doi:10.1029/2004GL021948.
- Velicogna, I., and J. Wahr (2005), Greenland mass balance from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18505, doi:10.1029/2005GL023955.
- Velicogna I. and J. Wahr, 2006a, Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica, *Science*, 311, 5768, 1754-1756.
- Velicogna I. and J. Wahr, 2006b, Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004, *Nature*, 443, 329-331, doi: 10.1038/nature05168.

2.d – Lettre de soutien

Benoît Legresy, LEGOS, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France
Richard Coleman, University of Tasmania, ACE-CRC, Hobart, Australia
Reinhard Dietrich, TU Dresden, Dresden, Germany.



March 2009

Pr. Reinhard Dietrich,
Pr. Richard Coleman, University of Tasmania, ACE-CRC, Hobart, Australia
Dr. HDR Benoît Legrésy, Chercheur CNRS, LEGOS, Toulouse, France

To whom it may concern

Subject : support to the Micromega study group initiative.

One important aspect of glaciology and geodesy concerns the mass balance of ice sheets and glaciers. This problem is crucial in terms of impact on the sea level as well as on the climate of polar regions. Antarctica and Greenland hold about 99% of the fresh water ice on earth, an equivalent of around 70m of sea level. The average mass that yearly goes in and out of these ice sheets represents about 8-10mm of sea level equivalent. Solving for their mass balance or imbalance is not an easy task. The balance is between the incoming precipitations/accumulation on the ice cap, outgoing ice through their grounding line. Three methods have proven to be useful in investigating the mass balance of ice sheets.

- 1) The flux difference between the measured ice flux across the grounding line using interferometry or satellite images to infer the surface velocity, which is then combined with estimates of ice thickness and atmospheric model output, model reanalysis fields or measurements of accumulation. This method, although powerful, includes errors in the atmospheric processes representation, velocity estimates, thickness knowledge, all of which have different error structure. The major drawback of this method is the need for integration of every single significant glacier, which is not always easy to achieve.
- 2) The volume change measurement from satellite altimetry. This method uses the time history of surface topography changes. Although this measurement technique is direct, it lacks continuity for laser measurements which are repeated only a few times since the launch of ICESAT in 2003. There is good continuity for radar altimeter measurements, with ERS1, ERS2 and ENVISAT missions extending from 1992 and such data should be continued with other polar radar altimetry missions. This method achieves a rather good global areal coverage with 35days sampling. However it lacks

coverage at latitudes higher than 82° and misses some of the steeper parts of the ice sheet near the coastal areas where significant mass balance changes are expected. The interpretation of change using this technique needs careful handling of the snowpack compaction effects which make the relation of volume to mass changes difficult to establish.

- 3) The mass change of the ice sheet can be directly sensed in the earth gravity field variations. This is what the Grace mission has been following since 2002. A number of studies have shown its usefulness in the field since it can directly estimate mass changes. However the interpretation in terms of ice mass changes is affected by leakage effects, or spreading of mass repartition changes in larger scales of the gravity field or its representation. This technique is also affected by the lack of knowledge of other component of the gravity field, the major unknown in polar regions being the intensity of isostasy.

From the recent decades of observations (the 3 above techniques), it appears that the mass balance of ice sheets show significant signals over a complex variety of time and space scales, with the seasonal and inter-annual scales being strong. Decadal scales can be anticipated as they are present in the climate system. In using short to long term mass balance surveys to understand the polar regions and their response to climate change, having at least three observation types (altimetry, gravity, surface velocity) combined is essential for appropriate interpretation of the mass balance of ice sheets. Therefore, for glaciology and geodesy, the most critical need is for long term continuity of the observing systems. It is of great interest to also increase the measurement accuracy, and their temporal and spatial sampling.

Therefore a mission, such as proposed by the Micromega mission group, which addresses the primary continuity goal and seeks to improve the accuracy and resolution of gravity measurements, would bring a major input to the polar scientific community in order to produce an improved understanding of the actual mass balance of these polar regions.

We therefore strongly support the Micromega initiative and encourage CNES to develop a sustained program for the future.

Pr. Reinhard Dietrich, University of Technology Dresden, Director of IPG, Germany
Pr. Richard Coleman, University of Tasmania, ACE-CRC, Hobart, Australia
Dr. HDR Benoît Legrésy, Chercheur CNRS, LEGOS, Toulouse, France

3 – Circulation océanique

3.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

Une meilleure connaissance de la circulation océanique comporte différents composantes : la topographie dynamique moyenne, d'une part, qui nécessite la connaissance du géoïde statique, et la circulation océanique, d'autre part, pour laquelle ce sont les variations temporelles du champ de pesanteur qui sont intéressantes.

Les géoïdes statiques de GRACE ont permis des améliorations considérables de la détermination de la topographie dynamique océanique moyenne (Tapley *et al.*, 2003 ; Vianna *et al.*, 2007 ; Castruccio *et al.*, 2006), et la résolution de GOCE - environ 100 km - devrait donner accès à la majeure partie du signal, avec une sensibilité plus marquée aux petites échelles. Suite à ces missions, il sera nécessaire de progresser en résolution spatiale, d'une part (afin de déterminer les courants côtiers), et d'améliorer la précision du champ statique à grande échelle, d'autre part, pour continuer à améliorer la connaissance de la topographie dynamique océanique moyenne.

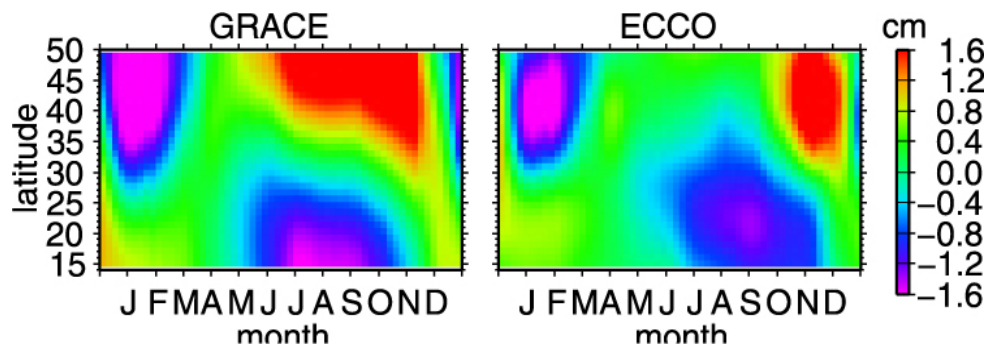


Fig. 4 : Variations saisonnières de la pression en fond de mer déduites des données GRACE (gauche) et du modèle ECCO (droite), à 1000 km de résolution (Bingham & Hughes, 2006).

D'autre part, GRACE donne accès aux variations temporelles des masses d'eau des océans, qui résultent d'une part des apports d'eau continentaux et des calottes polaires, produisant des variations du niveau de la mer discutées dans la section 6, et d'autre part de la variabilité régionale associée à la circulation océanique dynamique. Cette circulation océanique peut être étudiée par le biais des variations temporelles de la pression de fond de mer auxquelles GRACE donne accès, alors qu'il existe très peu de mesures *in-situ*. Elle met en jeu des composantes à grande échelle spatiale (1000-4000 km), dont la détermination nécessite de connaître le géoïde à une précision millimétrique à 1000 km de résolution (Hughes & Legrand, 2005), et des composantes aux échelles topographiques (20-200 km). A grande échelle spatiale, elle assure presque la moitié du transport de chaleur entre les pôles et l'équateur, à des échelles de temps inter-annuelles. Mieux comprendre cette circulation océanique permet ainsi de mieux comprendre le bilan global des échanges de chaleur. Cette information est cruciale, à un moment où l'Atlantique Nord est peut-être en train de changer de mode de circulation, avec un ralentissement possible lié à un apport accru d'eau douce issu des réservoirs polaire et continentaux dans le contexte du réchauffement climatique. Les résultats obtenus avec les données GRACE ont montré l'intérêt des mesures de ces mesures pour suivre les variations saisonnières à très grande échelle de la pression de fond de mer,

comme le montre la Fig. 4 (Kanzow *et al.*, 2005 ; Böning *et al.*, 2008 ; Bingham & Hughes, 2006 ; Ponte *et al.*, 2007), et ouvrent de nouvelles perspectives pour l'étude de la circulation dynamique à grande échelle.

Au delà des grandes échelles précédemment décrites, l'amélioration de notre connaissance de la circulation océanique nécessite d'atteindre les résolutions topographiques, à des précisions extrêmement élevées, et constitue à ce jour un objectif extrêmement ambitieux. Les courants associés aux transports profonds de masses sont en effet concentrés le long des zones de forte topographie et les signaux attendus sur le géoïde sont très faibles (Hughes & Legrand, 2005). Ainsi, l'apport d'une mission de type GRACE Follow-On en océanographie concerne plutôt la composante à grande échelle de la circulation océanique, la topographie dynamique océanique moyenne – et l'étude des variations du niveau de la mer, discutée en section 6.

3.b – Performances requises

- Continuité des mesures pour améliorer le champ statique et mieux comprendre la circulation océanique à grande échelle, en lien également avec les apports d'eau continentale et l'étude du niveau de la mer.

3.c – Références

- Bingham, R. J., and C. W. Hughes (2006), Observing seasonal bottom pressure variability in the North Pacific with GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08607, doi:10.1029/2005GL025489.
- Böning, C., R. Timmermann, A. Macrander, and J. Schröter (2008), A pattern-filtering method for the determination of ocean bottom pressure anomalies from GRACE solutions, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18611, doi:10.1029/2008GL034974.
- Castruccio, F., J. Verron, L. Gourdeau, J. M. Brankart, and P. Brasseur (2006), On the role of the GRACE mission in the joint assimilation of altimetric and TAO data in a tropical Pacific Ocean model, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14616, doi:10.1029/2006GL025823.
- Hughes, C. & Legrand, P. (2005). Future benefits of time-varying gravity missions to ocean circulation studies. *Earth, Moon and Planets*, 94, 73-81.
- Kanzow, T., F. Flechtner, A. Chave, R. Schmidt, P. Schwintzer, and U. Send (2005), Seasonal variation of ocean bottom pressure derived from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE): Local validation and global patterns, *J. Geophys. Res.*, 110, C09001, doi:10.1029/2004JC002772.
- Ponte, R. M., K. J. Quinn, C. Wunsch, and P. Heimbach (2007), A comparison of model and GRACE estimates of the large-scale seasonal cycle in ocean bottom pressure, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09603, doi:10.1029/2007GL029599.

- Tapley, B. D., D. P. Chambers, S. Bettadpur, and J. C. Ries (2003), Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid, *Geophys. Res. Lett.*, 30(22), 2163, doi:10.1029/2003GL018622.
- Vianna, M. L., V. V. Menezes, and D. P. Chambers (2007), A high resolution satellite-only GRACE-based mean dynamic topography of the South Atlantic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24604, doi:10.1029/2007GL031912.

3.d – Lettre de soutien

Marie-Hélène Rio, CLS, Ramonville Saint Agne, France

Chris Hughes, Proudman Oceanographic Laboratory, Liverpool, United Kingdom.

In the past 7 years, outstanding progress has been made in oceanography thanks to the high quality and the continuity over several years of the GRACE mission.

One major application of satellite gravity in oceanography is the computation of the ocean Mean Dynamic Topography (MDT). The MDT is the quantity that bridges the gap between altimetric measurements of sea level anomalies and the ocean absolute dynamic topography, from which ocean geostrophic currents are computed. It is a key component for the assimilation of altimetric Sea Level Anomalies into operational ocean forecasting systems as developed in the context of the GODAE and MyOcean projects. Taking into account precise MDT in those operational systems allows an improvement of the position and intensity of the surface currents, but also the structure of the ocean interior, leading to significant improvements in transport estimates, the monitoring of which is a key issue in the present context of climate change.

The MDT is obtained by removing the static geoid above a reference ellipsoid from an altimetric Mean Sea Surface (referenced to the same ellipsoid). However, if centimetric accuracy is sought, the spatial scales resolved by an altimetric Mean Sea Surface (20-50 km) are a lot shorter than the known geoid spatial scales and further filtering is needed.

The computation of MDT has been greatly improved thanks to the continuous exploitation of GRACE data. From the first static geoid models (EIGEN-GRACE01S and GGM01S in 2003, based respectively on 39 and 111 days of GRACE data) to the most recent ones (EIGEN-GL05S/C, GGM03S, ITG-GRACE 03 and others, based on more than 5 years of GRACE data), accumulated geoid error at 300 km has decreased from 2 cm to less than 0.5 cm, due to improved processing and increased data quantity.

Further improvement of the MDT estimate depends on the continuity of GRACE-type satellite mission for the following three reasons :

- ✓ The continuity of the GRACE mission, providing an increasing number of data **will allow further increases in the accuracy of the geoid and hence the ocean MDT.**
- ✓ In the coming years, the GOCE mission from ESA (launch on March, 16th 2009) will bring significant improvement in our knowledge of the geoid at scales shorter than 400km and down to 100km. However, at longer spatial scales the combination with GRACE data will still be needed to obtain the best possible geoid models. This means that **the continuous improvement of the static geoid at longer scales, based on GRACE-type satellite missions, is mandatory** as a complement to GOCE data
- ✓ The estimate of the static geoid also benefits from the estimation of the time variable component of the geoid that has been made available by the use of GRACE. The variable GRACE fields are now used to compute secular drifts as well as annual and semi-annual periodic terms that are then taken into account when computing the static field leading to improved estimates of the geoid. The continuity of the GRACE mission, providing a longer time series of the variable geoid component, will allow better estimates of the secular trend and periodic terms entering into the computation

of the static geoid, and **will therefore allow a further increase in the accuracy of the geoid and hence the ocean MDT.**

[...]

Another strand of information for ocean dynamics relates to the deep ocean circulation. At depths greater than 2000 m, there are very few ocean monitoring systems, and yet flows at these depths play an important role in ocean heat transport and the global meridional overturning circulation, as well as in long-term sequestration of carbon dioxide by the ocean. A GRACE-type mission is the only satellite technology capable of monitoring these depths. In combination with altimetry, it will be possible to measure slow changes in density as water moves from basin to basin. The principle has been demonstrated, with GRACE showing good agreement with ocean bottom pressures inferred from the combination of satellite altimetry and density measurements in the top 2000 m from the Argo float network. Large signals due to density change deeper than this are expected to appear on decadal timescales, and will show up as an increasing difference between pressures inferred from these different systems. These regions are not now, and never have been adequately monitored by in-situ measurements. Thus, **GRACE-type measurements are the only method by which we can monitor density changes in the deep ocean on decadal timescales, elucidating the operation of an important but hidden part of the climate system.**

4 – Niveau de la mer

4.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

L'une des conséquences les plus inquiétantes des évolutions climatiques actuelles est l'impact d'un réchauffement global sur les variations du niveau de la mer. Une augmentation du niveau de la mer peut en effet avoir des impacts socio-économiques considérables dans les zones côtières, comme le décrit le rapport IPCC (2007a). Le niveau moyen de la mer a ainsi augmenté d'environ 1.7 mm/an sur le siècle qui vient de s'écouler, avec une accélération forte observée par altimétrie spatiale sur les 15 dernières années, de l'ordre de 3,4 mm/an (Cazenave *et al.*, 2004 ; Willis *et al.*, 2008 ; Cazenave *et al.*, 2008), bien qu'il soit encore trop tôt pour déterminer s'il s'agit réellement d'une accélération sur le long terme ou simplement de la phase montante d'une oscillation décennale.

Les variations du niveau moyen de la mer proviennent de trois effets. A très long terme, elles sont liées aux effets du rebond post-glaciaire, qui, en modifiant la forme et le volume des bassins océaniques, provoque une baisse du niveau de la mer de l'ordre de 0.3 mm/an (Douglas & Peltier, 2002 ; Peltier *et al.*, 2009). En dehors de celà, elles sont liées aux changements de volume des eaux océaniques, qui comprennent une contribution stérique liée à la dilatation thermique, et une contribution massique liée aux échanges d'eau avec les réservoirs polaires (Groenland et Antarctique) et continentaux (glaciers de montagne et eaux continentales). Afin de mieux comprendre la réponse terrestre aux forçages anthropogéniques actuels, il est très important de pouvoir évaluer la part de chacune de ces composantes dans les évolutions du niveau de la mer, ce qui est loin d'être simple. En effet, l'incertitude dans les prédictions d'évolution du niveau de la mer sur le siècle à venir résultent de la difficulté d'attribuer la bonne amplitude à aux différentes contributions (IPCC, 2007b). La plus large incertitude vient en particulier de notre méconnaissance actuelle de la contribution future des calottes polaires à l'élévation du niveau de la mer, alors qu'elle est potentiellement la contribution la plus importante : des études récentes (Grinsted *et al.*, 2009; Pfeffer *et al.*, 2008) estiment que la fonte des glaces continentales (attribuée en partie à des instabilités dynamiques des calottes polaires) pourrait élever le niveau de la mer de l'ordre de 1 à 2 m à l'horizon 2100, contribution totalement sous-estimée par le GIEC (IPCC, 2007b) dans son dernier rapport.

Les mesures de type GRACE sont d'un grand intérêt pour l'étude du niveau de la mer, parce qu'elles permettent d'estimer et de séparer globalement, les différentes causes des variations du niveau moyen de la mer, ceci de manière directe ou indirecte :

- La contribution des bilans de masse du Groenland et de l'Antarctique peut ainsi être estimée globalement à l'échelle des calottes polaires, ainsi que les bilans de masse des plus grands glaciers (e.g. Alaska, Patagonie) (cf §4).
- Les mesures de type GRACE sont indispensables à une meilleure modélisation du rebond post-glaciaire (cf §2 et 4).
- La contribution des échanges d'eau entre océans et continents peut aussi être estimée, et ceci pour la première fois de manière globale (cf §3).
- Les variations de masse d'eau de l'océan (Nerem & Leuliette, 2003) peuvent également être déduites directement des mesures GRACE.

- Enfin, on peut combiner ces mesures de variations de masse de l'océan issues de GRACE avec les mesures de variations de hauteur d'eau totale, données par l'altimétrie satellitaire, ce qui permet – par simple différence « altimétrie moins GRACE » – de déterminer l'expansion thermique des océans indépendamment des mesures de température *in-situ* (Chambers, 2006 ; Lombard *et al.*, 2007).

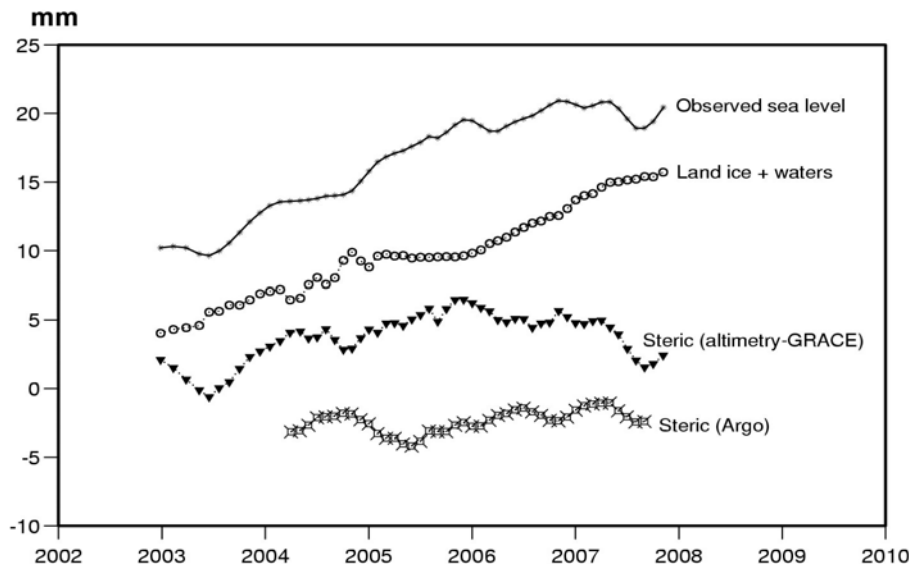


Fig.5 Variations du niveau de la mer, entre 2003 et 2008, observées par altimétrie spatiale (courbe du haut) ; contribution des glaces et eaux continentales (deuxième courbe) ; contribution stérique obtenue par différence « altimétrie moins GRACE » (troisième courbe) ; contribution stérique d'après Argo (courbe du bas). Source : Cazenave *et al.* (2008).

La gravimétrie spatiale contribue ainsi à améliorer grandement la compréhension de l'origine des variations du niveau de la mer (effets thermiques, variations de masses et rebond post-glaciaire) et à suivre l'impact du réchauffement climatique sur les évolutions du niveau de la mer. Ainsi, les observations de GRACE, combinées aux observations altimétriques de Jason-1 et *in-situ* du réseau ARGO, ont permis d'établir le nouveau bilan des contributions climatiques à l'élévation du niveau moyen de la mer pour les années récentes (cf. Fig 5 ; Cazenave *et al.*, 2008). Sur la période 2003-2008, le niveau de la mer s'est élevé à une vitesse de $2,5 \pm 0,4$ mm/an (valeur corrigée du rebond post-glaciaire), avec les contributions climatiques suivantes : une augmentation de la masse totale des océans (mesure directe de GRACE) équivalente à $+1,9 \pm 0,1$ mm/an, soit $\sim 75\%$ de l'élévation totale (comparée à la contribution de $\sim 40\%$ sur 1993-2003, cf. IPCC, 2007b) ; cette valeur est en accord avec la somme des contributions des apports d'eau douce des continents (mesures directes de GRACE : $+0,55 \pm 0,06$ mm/an pour l'Antarctique ; $+0,4 \pm 0,05$ mm/an pour le Groenland ; $+0,2 \pm 0,1$ mm/an pour les eaux continentales / mesures autres : fonte des glaciers de montagne : $+1,1 \pm 0,25$ mm/an) ; une dilatation thermique en « pause », équivalente à $+0,37 \pm 0,1$ mm/an soit $\sim 15\%$ de l'élévation totale, alors que c'était la contribution majeure ($\sim 50\%$) sur 1993-2003 (cf. IPCC, 2007b).

Les mesures de gravimétrie spatiale, en synergie avec d'autres mesures spatiales (e.g. altimétrie spatiale) et des mesures *in-situ*, ont donc beaucoup apporté à la compréhension des variations du niveau de la mer, et il est crucial de disposer de longues séries de mesures ininterrompues, après la fin de vie de GRACE, pour dégager clairement les tendances long terme. Une meilleure modélisation de l'élévation future du niveau de la mer passe inévitablement par l'utilisation des données de type GRACE, qui apportent non seulement

une meilleure connaissance des mécanismes mais aussi des contraintes indispensables aux modèles climatiques.

4.b – Performances requises

- Première priorité : Continuité des mesures. Une précision de l'ordre de 0.1 mm/an sur le géoïde est nécessaire.
- Deuxième priorité, indirecte : Augmentation de la résolution spatiale (cf §3 et 4) pour affiner les estimations des contributions des calottes polaires, glaciers de montagne et eaux continentales.

4.c – Références

- Cazenave, A., and R. S. Nerem (2004), Present-day sea level change: Observations and causes, *Rev. Geophys.*, 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- Cazenave, A., A. Lombard & W. Llovel (2008). Present-day sea level rise: A synthesis. *C. R. Geoscience*, doi:10.1016/j.crte.2008.07.008.
- Chambers, D. P. (2006), Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, 111, C03010, doi:10.1029/2005JC002914.
- Douglas, B.C. & Peltier, W.R. (2002). The puzzle of global sea-level rise. *Phys. Today*, 55 (3), 35-40.
- Grinsted, A. J.C. Moore & S. Jevrejeva (2009). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-008-0507-2.
- IPCC (2007a). Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, Eds, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- IPCC (2007b). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L., Eds, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 pp.
- Lombard, A., Garcia, D., Ramillien, G., Cazenave, A., Biancale, R., Lemoine, J-M., Flechtner, F., Schmidt, R. & Ishii, M. (2007). Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data, *Earth and Planetary Science Letters*, 254, 194-202, doi:10.1016/j.epsl.2006.11.035.
- Nerem, L.S. & Leuliette, E.W. (2003). Measuring the distribution of ocean mass using GRACE. *Space Sci. Rev.*, 108, 331-334.

- Pfeffer, W.T., J. T. Harper & S. O'Neel (2008). Kinematic constraints on glaciers contributions to 21st century sea level rise, *Science*, vol. 321, no. 5894, pp. 1340-1343, doi:10.1126/science.1159099.
- Peltier, W.R., R. Drummond & S. Lutchke, On the origins of Earth rotation anomalies: new insights on the basis of both “old” data and GRACE data, (2009) (submitted).
- Willis, J. K., D. P. Chambers, and R. S. Nerem (2008), Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales, *J. Geophys. Res.*, 113, C06015, doi:10.1029/2007JC004517.
- Woodworth, P.L. & Gregory, J.M. (2003). Benefits of GRACE and GOCE to sea level studies. *Space Sci. Rev.*, 108, 307-317.

4.d –Lettres de soutien : Sea Level Changes and a “GRACE Follow-On Study”

par Philip Woodworth, Proudman Oceanographic Laboratory, Liverpool, United Kingdom.

Sea level is rising but accounting for the rise is far from straightforward. Many factors contribute over different timescales and independent measurements of these factors are lacking. The main components include oceanic thermal expansion (of the entire water column, not just the upper layers), melting of the great ice sheets of Antarctica and Greenland, wastage from mountain glaciers, and transfer of terrestrial water to the ocean. Summaries of many other factors may be found in IPCC reports, for example.

One needs space gravity to monitor properly most of these main factors. From satellite altimetry and tide gauges in combination, one measures the sum of the thermal (‘steric’) and mass (sometimes called incorrectly ‘eustatic’, that term being more correctly applied to the total) contributions to sea level rise. The former can be derived from Argo-type hydrographic measurements (or at least will be when such devices can measure to the deepest parts of the ocean and under ice shelves), the latter from GRACE-type space gravity, and their sum must agree with the altimetry.

GRACE has shown that changes in gravity (mass) of the ice sheets and of extended glaciated areas (e.g. Alaska and Patagonia) can also be monitored from space, as can changes in terrestrial storage of individual hydrological basins. However, any future mission should be capable of monitoring at shorter spatial scales than GRACE. For example, one needs to be able to resolve adequately changes in west and east Greenland. Meanwhile, the main remaining factor, wastage from mountain glaciers (which at worst will be limited to several decimetres) should be capable of being monitored by other advanced forms of remote sensing (e.g. Cryosat type missions) and more extensive in-situ methods.

Solid earth processes can also be addressed through space gravity (e.g. tectonic changes in the gravity field), and are required to be understood in greater detail for space gravity if data are to be used for sea level studies (e.g. GIA corrections to ocean mass changes). Ongoing GRACE type missions must be considered together with definitive geoid measurements by GOCE type surveys at regular intervals, providing linkage of sea level and many geophysical parameters within a GGOS.

Monitoring of sea level and associated factors is important in itself but is of limited value if data cannot be used to improve parameterisations of processes within climate models, such that they can be used with greater predictive ability. Such improvements will be feasible only with the most complete and detailed data sets, including those provided by space gravity.

Finally, one can point to excellent summaries of each of the factors referred to above in an upcoming book published by Blackwells, following a conference in 2006 of many of the world’s leading sea level scientists held under WCRP auspices. The book contains a chapter on earth observation requirements present and future and stresses the importance of continued GRACE-type missions.

Marie-Hélène Rio, CLS, Ramonville Saint Agne, France

Chris Hughes, Proudman Oceanographic Laboratory, Liverpool, United Kingdom.

Another major application of GRACE data in oceanography has emerged in the context of climate change, and more specifically, the monitoring of Sea Level rise. Monitoring of sea level rise over the last decade has been made possible by the continuity and quality of altimetric missions. The analysis of continuous series of Sea Level Anomalies from the TOPEX mission (1992-2002) followed by the Topex Tandem (2002-2005) and the Jason series (2002-today) has led to the consensual mean sea level rise value of 3.3 mm /year over the last 15 years. Simultaneous measurement of altimetric sea level anomalies and time-dependent gravity information from GRACE has allowed for the first time a separation of the steric-induced Sea Level changes from the Sea Level changes due to modification in the Earth mass system distribution (glacier melting, river run-off...). In particular, recent studies based on GRACE and altimetric data have highlighted the increased contribution of ice mass loss to Sea Level rise since 2003. Besides the time evolution of mass-induced Sea Level changes, GRACE provides also the spatial distribution of the trend.

In order to monitor and further understand Sea Level rise, **a continuous time series of the time-dependent component of the geoid as provided by GRACE-type satellite missions is essential** .

5 – Terre solide

5.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

Les anomalies de la pesanteur sont le reflet de la structure interne terrestre, et leurs variations temporelles reflètent les transferts de masse associés à l'activité interne terrestre. Ces transferts se produisent à différentes échelles de temps et d'espace : variations séculaires à grande échelle spatiale associées au rebond post-glaciaire, ou à plus petite échelle spatiale en lien avec le cycle sismique et les mouvements tectoniques, variations brutales lors des séismes, et déformations post-sismiques sur des échelles de temps allant de quelques mois au séculaire.

La déformation visqueuse de notre planète en réponse à la dernière déglaciation produit une variation séculaire du géoïde de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres par an (Peltier, 2004; Ivins & James, 2005). Quantifier les variations du géoïde associées au rebond post-glaciaire permet alors de contraindre les modèles de viscosité du manteau terrestre. Velicogna & Wahr (2002a, 2002b) ont montré que la détection de variations du géoïde associées à ce rebond serait possible avec GRACE, mais qu'il est nécessaire de combiner les mesures GRACE avec d'autres types d'observations (GPS, mesures laser de type IceSAT, ...) pour pouvoir séparer ce signal de celui qui provient des variations d'épaisseur des calottes neigeuses. Une telle séparation est très délicate (Barletta & Bordoni, 2009), et nécessite de plus longues séries de mesures. En effet, seules des séries longues permettent de distinguer les variations séculaires associées au rebond post-glaciaire des variations inter-annuelles d'origine fluide. De plus, la précision nécessaire pour pouvoir discriminer entre différents modèles de viscosité dans le manteau, et de 0.01-0.001 mm/an sur le géoïde (Vermeersen, 2005). Une telle précision ne peut être obtenue que par l'analyse de séries longues. Enfin, une augmentation de la résolution spatiale serait également bénéfique. En effet, le rebond post-glaciaire produit un signal fort aux échelles supérieures à 500 km, alors que les variations de masse de glace sont notables à des échelles entre 50 et 500 km (Flury, 2005).

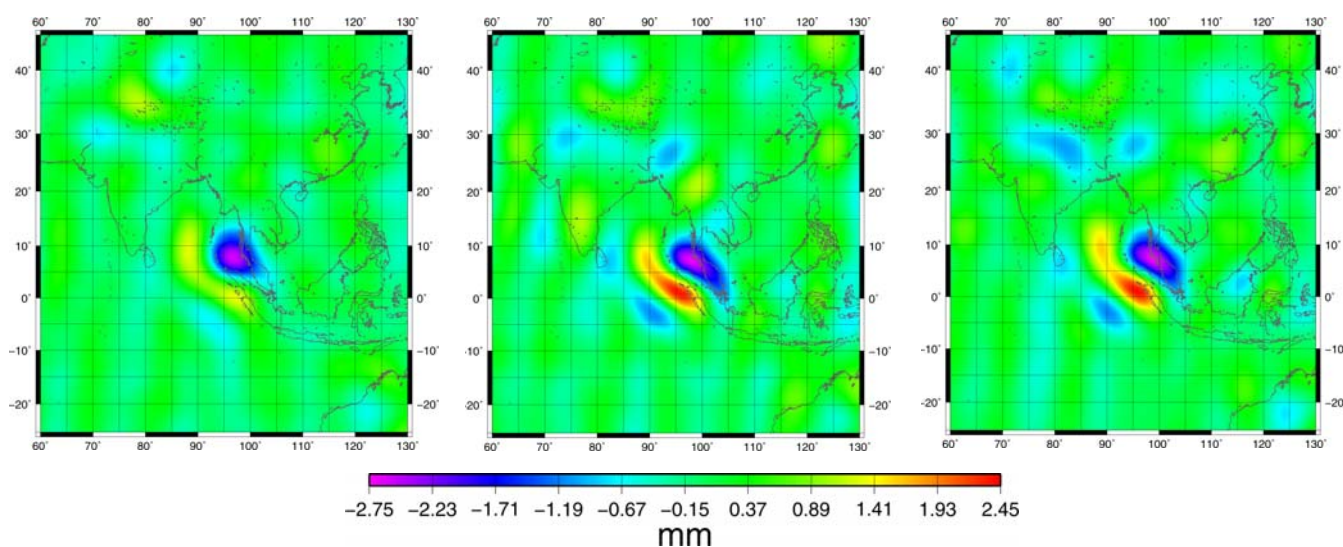


Fig. 6 : Variations du géoïde à 600 km d'échelle associées aux séismes de Sumatra, d'après Panet *et al.* (2008).

Gauche : période 2005/01-2005/06 ; milieu : période 2006/01-2006/06 ; droite : période 2007/01-2007/06.

Une autre application de GRACE concerne le suivi du cycle sismique dans les zones actives, et en particulier dans les zones de subduction. Les séismes de Sumatra, de décembre 2004 (Mw 9.2) mais aussi mars 2005 (Mw 8.7) ont ainsi produit une signature très claire dans les géoïdes de GRACE (voir Figure 6), aussi bien pour la variation co-sismique que pour la déformation post-sismique, comme l'ont montré de nombreuses études (voir par exemple Han *et al.*, 2006, Panet *et al.*, 2007, De Linage *et al.*, 2009). Pour une meilleure compréhension du cycle sismique dans les zones de subduction, où se produisent les séismes les plus dévastateurs mais pour lesquelles les zones épicentrales, en domaine océanique, ne sont que très partiellement couvertes par les réseaux géophysiques et géodésiques au sol, les données de gravimétrie spatiale sont d'un grand intérêt. Un gain en résolution spatiale permettrait d'étudier des séismes de magnitudes plus courantes (De Viron *et al.*, 2008). Par exemple, il faudrait atteindre la précision initialement prévue de GRACE pour caractériser des séismes de magnitude 8.2 et discriminer plus précisément différents modèles de rupture pour les grands séismes. Une mission 10 fois moins précise que cela, sur 5 ans, devrait permettre de détecter les accumulations de masse à long terme dans les zones tectoniquement actives (Mikhailov *et al.*, 2004). De telles applications, dédiées au suivi des mouvements tectoniques à long terme, nécessitent non seulement un gain de précision, mais aussi des séries de mesure longues et ininterrompues, car ces effets sont essentiellement séculaires.

Enfin, l'amélioration du champ statique résultant des mesures GRACE permet d'imager plus précisément la structure en densité, avec des applications réalisées à l'étude de l'origine du volcanisme intraplaque (Panet *et al.*, 2006) ou de la structure interne sous le Tibet (Shin *et al.*, 2009). L'amélioration de précision sur le champ statique à grande échelle apportée par les données GRACE a ainsi permis d'imager pour la première fois un panache mantellique sous Tahiti, complétant efficacement l'information de la tomographie sismique, souvent moins résolue. Avec la mission GOCE, le champ statique sera considérablement amélioré aux moyennes échelles, mais une mission de type GRACE reste plus précise à grande longueur d'onde, et ce d'autant plus que les séries de mesures sont longues. Ainsi, il est indispensable aussi pour la connaissance du champ statique de poursuivre les mesures de type GRACE, de manière complémentaire à GOCE.

5.b – Performances requises

- Première priorité : continuité des mesures pour déterminer les variations séculaires du géoïde dans les zones actives et affectées par le rebond post-glaciaire. Une augmentation de la précision serait également très bénéfique.
- Deuxième priorité : augmentation de la résolution spatiale (200 km de résolution minimum).
- Amélioration du champ statique (précision, résolution). Amélioration de précision à grande longueur d'onde, de manière complémentaire à GOCE.

5.c – Références

- Barletta, V. R., and A. Bordon (2009), Clearing observed PGR in GRACE data aimed at global viscosity inversion: Weighted Mass Trends technique, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02305, doi:10.1029/2008GL036429.

- De Linage, C., Rivera, L., Hinderer, J., Boy, J-P., Rogister, Y., Lambotte, S. & Biancale, R. (2009). Separation of coseismic and postseismic gravity changes for the 2004 Sumatra–Andaman earthquake from 4.6 yr of GRACE observations and modelling of the coseismic change by normal-modes summation. *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.04025.x
- De Viron, O., Panet, I., Mikhailov, V., van Camp, M., Diament, M. (2008) Retrieving earthquake signature in Grace gravity solutions, *Geophysical Journal International*, 174(1):14-20, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03807.x.
- Flury, J. (2005). Ice mass balance and ice dynamics from satellite gravity mission. *Earth, Moon and Planets*, 94, 83-91.
- Han, S.-C., Shum, C.K., Bevis, M., Ji, C. & Kuo, C.-Y. (2006). Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 313, 658–662.
- Ivins, E.R., James, T.S., 2005. Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment. *Antarct. Sci.* 17 (4), 541–553.
- Mikhailov V., Tikhotsky S., Diament M., Panet I., Ballu V. (2004). Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data ? *Earth and Planetary Science Letters*, 228, 281-297.
- Panet, I., Chambodut, A., Diament, M., Holschneider, M., Jamet, O. (2006). New insights on intra-plate volcanism in French Polynesia from wavelet analysis of GRACE, CHAMP and sea-surface data. *J. of Geophys. Res.*, 111, B9, B09403, doi10.1029/2005JB004141.
- Panet, I., Mikhailov, V., Diament, M., Pollitz, F., King, G., de Viron, O., Holschneider, M., Biancale, R. & Lemoine, J.-M. (2007). Co-seismic and post-seismic signatures of the Sumatra December 2004 and March 2005 earthquakes in GRACE satellite gravity. *Geophysical Journal International*, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03525.x.
- Panet, I., Mikhailov, V., Pollitz, F., Diament, M. (2008) Insights into the Sumatra December 2004 and March 2005 post-seismic signals from GRACE gravity variations. GRACE Science Team Meeting, 12-13 December 2008, San Francisco, USA.
- Peltier, W.R., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice age Earth : the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 32, 111–149.
- Shin, Y. H., C.-K. Shum, C. Braitenberg, S. M. Lee, H. Xu, K. S. Choi, J. H. Baek, and J. U. Park (2009), Three-dimensional fold structure of the Tibetan Moho from GRACE gravity data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01302, doi:10.1029/2008GL036068.
- Ramillien, G., Lombard, A., Cazenave, A., Ivins, E.R., Llubes, M., Remy, F., Biancale, R. (2006). Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. *Global and Planetary Change*, 53, 198-208.
- Velicogna, I., and J. Wahr (2002a), A method for separating Antarctic postglacial rebound and ice mass balance using future ICESat Geoscience Laser Altimeter System, Gravity

Recovery and Climate Experiment, and GPS satellite data, *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2263, doi:10.1029/2001JB000708.

- Velicogna, I., and J. Wahr (2002b), Postglacial rebound and Earth's viscosity structure from GRACE, *J. Geophys. Res.*, 107(B12), 2376, doi:10.1029/2001JB001735.
- Vermeersen, B.L.A. (2005). Challenges from solid Earth dynamics for satellite gravity field missions in the post-GOCE era. *Earth, Moon and Planets*, 94, 31-40.

5.d – Lettre de soutien

Bert Vermeersen, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

From the perspective of Solid Earth Geophysics I herewith I would like to give my full support for a GRACE Follow-On mission in general and for the Micromega mission concept in particular.

The GRACE mission has been flying for almost seven years now, and is expected to operate until 2012, thus largely exceeding its initial five years lifetime. It has allowed the continuous monitoring of mass transport within the Earth system at unprecedented spatial (400 km) and temporal (10 days to one month) resolutions. One of the most prominent results in Solid Earth geophysics has been the observation of temporal mass variations over Canada, Greenland, Fennoscandia and Antarctica that are generally accepted to be associated with present-day continental ice mass variations and ongoing glacial isostatic adjustment (GIA) due to Late-Pleistocene Ice Ages. Another outstanding and important observation has been the detection of temporal gravity and geoid changes following the 2004 Sumatra-Andaman earthquake.

These outstanding results from GRACE in understanding the mass transfers and associated physical phenomena have thus opened new perspectives on our understanding of global change and natural hazards. Still, many questions remain unanswered because the operational lifetime of the GRACE mission - though expected to be doubling its originally foreseen five years -, remains too short to discriminate between long-term periodic and truly secular effects.

GRACE data have settled the longstanding debate on whether one or two major ice domes existed during the Last Ice Age over Northern America: two ghost images as a result of ongoing GIA showed up in the gravity field solutions, indicating that the Laurentide Ice Sheet consisted of two major domes. Longer time series are expected to reveal higher-resolution details of not only these areas, but also others (Fennoscandia, for example). The temporal mass changes detected over Greenland, Antarctica and Alaska indicate present-day ice mass changes, but discriminating them from GIA-contributions and discriminating between long-term periodic and secular changes is one of the most vexing problems than can only be answered with longer time series and combinations with long-term measurements from e.g. altimetry missions like CryoSAT-2, which will be launched this year. Such extended time series are also in demand for determining post-seismic deformation following very large earthquakes as the aforementioned 2004 Sumatra-Andaman earthquake. Such long time-series would extend our knowledge about the rheology of the shallow Earth on decadal time scales, important for seismic risk studies. Finally, time variations in the gravity field induced by tectonic mechanisms as subduction of oceanic lithosphere and mountain building have remained hitherto below the detection level of GRACE. These are predicted to become detectable if longer (exceeding 10 years) time series would become available.

It is clear that in Solid Earth Geophysics and directly associated disciplines as Glaciology there is a need and strong scientific interest for long-term, continuous time series of gravity measurements that extend well beyond the lifetime expectancy of the GRACE mission.

Sincerely,

Dr. Bert L.A. Vermeersen
Associate Professor Astrodynamics & Satellite Systems
DEOS – TU Delft, Kluyverweg 1, 2629 HS Delft, The Netherlands
Ph. +31 15 2788272; FAX +31 15 2785322; Email L.L.A.Vermeersen@tudelft.nl

6 – Géodésie

6.a – Situation actuelle et objectifs scientifiques

Les applications en géodésie reposent essentiellement sur la connaissance du géoïde statique, qui est en effet la surface de référence des altitudes. Ainsi, l'unification des systèmes d'altitudes et le nivellement par GPS nécessitent la meilleure connaissance possible de cette équipotentielle. Une amélioration de la connaissance du champ statique est également utile pour la trajectographie très précise de certains satellites, notamment pour la constitution de systèmes de référence, et pour l'altimétrie des océans. Si la mission GRACE est avant tout dédiée au suivi des variations temporelles du champ de pesanteur terrestre, elle a aussi permis de raffiner et préciser considérablement notre connaissance du champ statique à grande et moyenne échelle. Avec l'allongement de la durée de la mission et l'augmentation associée du nombre de mesures disponibles, avec aussi l'amélioration progressive des méthodologies de traitement des mesures, des modèles de champ, non seulement variable dans le temps, mais aussi statique, de qualité sans cesse améliorée, sont ainsi produits par plusieurs équipes dans le monde (Biancale *et al.*, 2005 ; Förste *et al.*, 2005, 2008 ; Lemoine *et al.*, 2007 ; Luthke *et al.*, 2006 ; Mayer-Gürr *et al.*, 2006 ; Reigber *et al.*, 2005 ; Tapley *et al.*, 2004, 2005). La Figure 7 représente par exemple le modèle de champ statique GFZ/GRGS EIGEN-GL04C (Förste *et al.*, 2008).

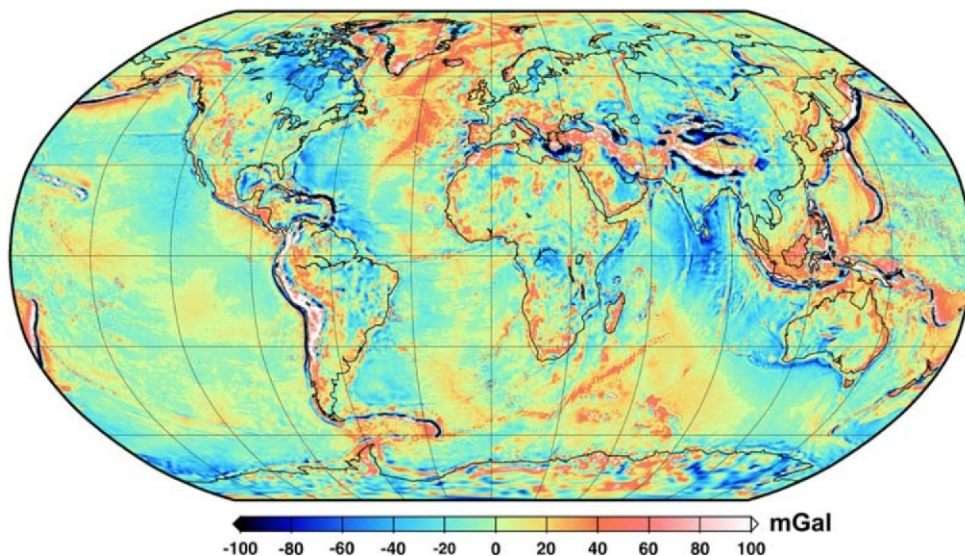


Fig. 7: Carte d'anomalies de pesanteur du modèle GFZ/GRGS EIGEN-GL04C (Förste *et al.*, 2008)

Les modèles de champ statique produits par la mission GRACE sont très utilisés en géodésie, en combinaison avec des jeux de données sol, pour calculer des géoïdes à haute résolution aussi bien locaux (voir par exemple une application sur les Etats Baltes de Ellmann, 2005) que globaux (voir par exemple le modèle global EGM 2008, d'une résolution de 9 km, calculé par Pavlis *et al.*, 2008). L'utilisation de données GRACE permet d'obtenir une précision absolue à grande et moyenne échelle que n'apportent pas les données sol, et peut mettre clairement en évidence les biais à grande échelle qui entâchent ces jeux de données, souvent d'origines variées. Ainsi, les données de gravimétrie spatiale permettent de valoriser et d'unifier l'extraordinaire volume de données de surface, et donc d'améliorer la connaissance

du champ de pesanteur à la surface terrestre et en particulier des géoïdes nationaux, très sensibles aux biais dans les données de surface.

Il faut également noter que, même si la géodésie bénéficie surtout des améliorations sur le champ statique, la maintenance des systèmes d'altitudes dans des régions affectées par de forts mouvements verticaux de la croûte terrestre nécessite le suivi des variations séculaires, d'origine tectonique, du géoïde. C'est le cas au Canada, en Scandinavie et en Antarctique, où les variations associées au rebond post-glaciaire peuvent atteindre 20 centimètres sur un siècle (Flury & Rummel, 2005).

6.b – Performances requises

- Augmentation de précision et de résolution spatiale du champ statique.
- Variations séculaires du géoïde et continuité des mesures

6.c - Références

- R. Biancale, J.-M. Lemoine, G. Balmino, S. Loyer, S. Bruinsma, F. Perosanz, J.-C. Marty, P. Gégout (2005) 3 years of decadal geoid variations from GRACE and LAGEOS data, CD-ROM, CNES/GRGS product, 2005.
- Ellmann, A. (2005). Two deterministic and three stochastic modifications of Stokes's formula: a case study for the Baltic countries, *Journal of Geodesy*, 79, 1-3.
- Flury, J. & Rummel, R. (2005). Future satellite gravimetry for geodesy. *Earth, Moon and Planet*, 94, 13-29.
- Förste C, Flechtner F, Schmidt R, Meyer U, Stubenvoll R, Barthelmes F, König R, Neumeyer H, Rothacher M, Reigber C, Biancale R, Bruinsma S, Lemoine JM, Raimondo JC (2005) A new high resolution global gravity field model derived from combination of GRACE and CHAMP mission and altimetry/gravimetry surface gravity data. Poster presentation, EGU General Assembly, April 24–29, 2005, Vienna.
- Förste, C., Schmidt, R., Stubenvoll, R., Flechtner, F., Meyer, U., König, R., Neumayer, H., Biancale, R., Lemoine, J.-M., Bruinsma, S., Loyer, S., Barthelmes, F. & Esselborn, S. (2008). The GeoForschungsZentrum Potsdam/Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale satellite-only and combined gravity field models: EIGEN-GL04S1 and EIGEN-GL04C, 82, 6, pp xx-xx.
- Lemoine, J.-M., Bruinsma, S., Loyer, S., Biancale, R., Marty, J.-C., Perosanz, F., Balmino, G., 2007. Temporal gravity field models inferred from GRACE data, *Advances in Space Research* 39 (2007) 1620-1629, doi:10.1016/j.asr.2007.03.062
- Luthcke, S. B., D. D. Rowlands, F. G. Lemoine, S. M. Klosko, D. Chinn, and J. J. McCarthy (2006), Monthly spherical harmonic gravity field solutions determined from GRACE inter-satellite range-rate data alone, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02402, doi:10.1029/2005GL024846.

- Mayer-Gürr T, Eicker A, Ilke KH (2006) Gravity field recovery from GRACE-SST data of short arcs. In: Flury J, Rummel R, Reigber C, Rothacher M, Boedecker G, Schreiber U (eds) *Observation of the Earth system from space*. Springer, Berlin, pp 131–148

- Pavlis, N. *et al.* (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 Presentation given at the 2008 European Geosciences Union General Assembly held in Vienna, Austria, April 13-18, 2008.

- Reigber, C., Schmidt, R., Flechtner, F., König, R., Meyer, U., Neumayer, K.-H. , Schwintzer, P., Zhu, S.Y. (2005). An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S, *Journal of Geodynamics* 39(1), pp 1-10.

- Tapley BD, Bettadpur S, Watkins M, Reigber C (2004) The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophys Res Lett* 31:L09607. doi: 10.1029/2004GL019920

- Tapley B, Ries J, Bettadpur S, Chambers D, Cheng M, Condi F, Gunter B, Kang Z, Nagel P, Pastor R, Pekker T, Poole S, Wang F (2005) GGM02 - An improved Earth gravity field model from GRACE. *J Geod* 79(8):467–478. doi: 10.1007/s00190-005-0480-z

6.d – Lettre de soutien : GRACE Follow-On initiative Micromega

*Georges Balmino, CNES/DTP, Toulouse, France,
Reiner Rummel, TU München, München, Germany*

GRACE is a gravimetric satellite mission launched in 2002. It is still in orbit with a projected lifetime till 2011. Its focus is on measuring the temporal variations of the Earth's gravity field. The mission is extraordinary successful. It yields for the first time a quantification of mass redistribution in the earth's system and opened completely new fields of research related to the global water cycle, melting ice shields, sea level variations, postglacial mass adjustment and many others. This adds important new information to global change research and to the understanding of the Earth as a system. GRACE also yielded a significant improvement in our knowledge of the mean gravity field, which is a real benefit for instance to global ocean steady state circulation studies.

This is the reason why already in spring 2007 fifty leaders in the field of satellite gravimetry met in Noordwijk, Netherlands for a two day workshop in order to discuss the possibilities for a continuation of a GRACE-type mission (www.iapg.bv.tum.de/mediadb/22769/22770/Koop_Rummel_Future_of_Satellite_Gravimetry_Noordwijk2007.pdf). In a unanimous vote a series of resolutions was adopted. Resolution 3a and 4 are quoted here:

- 3a In view of science achievements and the current performance of GRACE the participants of the workshop strongly support the idea of a GRACE follow-on mission based on the present configuration, with emphasis on the uninterrupted continuation of time series of global gravity changes. This should be short-term priority one.
- 4 Medium term priority should be focused on higher precision and higher resolution in space and time. This step requires (1) the reduction of the current level of aliasing (of high frequency phenomena, in particular tides, into the time series), (2) the elimination of systematic distortions (caused by the peculiar non-isotropic sensitivity of a single pair low-low SST), and (3) the improvement of the separability of the observed geophysical signals.

In order to understand the relationship of such a mission to GOCE, an ESA Earth Explorer mission to be launched in March 2009, it should be noted that GOCE will be measuring the static (not time varying) gravity field with very high spatial resolution. GOCE is therefore complementary to GRACE and to a GRACE follow-on mission.

A GRACE follow-on mission will again improve the modelling of the mean gravity field, mainly thanks to the longer data set which will be at our disposal (i.e. considering the combination of its data and results with those of GRACE and GOCE), with major applications in geodesy especially: (i) correction and unification of regional gravity measurements, then improvement of the surface gravity field; (ii) better regional geoid modelling, thanks to the above and thanks to the better long and medium wavelengths reference model. These will benefit the global height system for civil engineering, coastal height reference, sea level height monitoring, GNSS levelling.

We therefore very much appreciate and support the initiative Micromega of CNES and we hope it will lead to a continuation of the time series of Earth system measurements of the type currently delivered by GRACE which is needed so much.

Toulouse and Munich, 16 February 2009



Dr. Georges Balmino
Emeritus Scientist
CNES, Toulouse



Reiner Rummel
Professor and Director of the
Institute of Astronomical and Physical Geodesy
Technische Universität München

The signatories are initiators of the ESA mission GOCE. They were also initiating and supporting the above quoted workshop.

Conclusion

La mission GRACE a démontré l'importance de la gravimétrie spatiale à l'étude de l'environnement terrestre, par des observations originales et complémentaires à d'autres techniques de mesure. Les apports de cette mission sont considérables, dans un large panel de disciplines scientifiques. Evolution du niveau de la mer, suivi des réserves d'eau continentale et quantification des flux d'évapo-transpiration, évolution des calottes polaires, variations de la pression de fond de mer en lien avec la circulation océanique, suivi du cycle sismique, connaissance du champ statique... Ainsi, le soutien de la communauté internationale pour une future mission de gravimétrie spatiale est très fort, comme en témoignent les nombreuses lettres reçues, notamment la lettre des scientifiques australiens (en annexe 1), qui témoigne du grand intérêt de l'Australie pour une future mission.

Le besoin d'une mission du même type (Low-Low) mais améliorée est fondamental dans les disciplines dont l'objet est l'étude des transferts de masse à la surface de la Terre sur des échelles temporelles allant du mois à la décennie, comme le montre le Tableau 1 ci-après. Pour permettre des études plus fines, la future mission de gravimétrie spatiale devra apporter les améliorations suivantes :

- continuité dans le temps des observations afin de compléter celles déjà faite par GRACE,
- une meilleure résolution spatiale pour détecter des flux de masses à plus petite échelle spatiale (au moins 200 km),
- une meilleure précision sur les observations de niveau 1 (qualité des données et leur traitement) et donc les produits en aval.

Le besoin en continuité des mesures après la fin de vie de GRACE est absolument essentiel. Il est souligné dans toutes les disciplines, afin de faciliter la séparation entre variations séculaires et variations inter-annuelles et de dégager les grandes tendances, permettant une meilleure compréhension du cycle de l'eau global et des évolutions climatiques actuelles. La continuité de mesures a été également identifiée comme une première priorité lors du workshop sur l'avenir de la gravimétrie spatiale, qui s'est tenu en avril 2007 à l'ESA/ESTEC (Noordwijk, Pays Bas). Par exemple, cette continuité de mesures est indispensable pour identifier, au niveau des calottes polaires, les variations de masses liées à la fonte des glaces de celles dues au rebond post-glaciaire, que les modèles actuels ne permettent pas de modéliser avec une précision suffisante. Une identification plus claire du signal du rebond post-glaciaire, outre ses implications pour la connaissance de la viscosité du manteau terrestre, est un élément clé pour comprendre les évolutions du niveau de la mer.

La résolution temporelle actuelle semble suffisante, mais une augmentation de résolution spatiale serait très utile pour de nombreuses applications, par exemple pour des études à l'échelle du bassin versant en hydrologie. Elle contribuerait également à faciliter la séparation des signaux géophysiques, sur la base de leurs caractéristiques spécifiques.

Enfin, un gain en précision serait bénéfique pour toutes les disciplines, et contribuerait à faciliter la séparation des signaux, dont le champ de pesanteur donne une vision intégrée. L'annexe 4 détaille les besoins quantitatifs pour une mission post-GRACE-GOCE, établis par Sneeuw *et al.* (2005). Cette amélioration de précision passe par l'amélioration de la précision de la mesure, mais aussi et surtout par la réduction des phénomènes d'aliasing observés dans

Discipline	Besoin exprimé
• Géodésie	1) Augmentation de précision et de résolution spatiale sur le champ statique 2) Continuité des mesures (et aussi amélioration du champ statique grande longueur d'onde)
• Terre Solide	1) Continuité des mesures 2) Augmentation de résolution spatiale et de précision 3) Amélioration du champ statique (en termes de précision, résolution et aussi à grande longueur d'ondes, ce qui nécessite une continuité de mesures de type GRACE)
• Hydrologie	1) Continuité des mesures 2) Augmentation de résolution spatiale (100-200 km) 3) Augmentation de la précision
• Cryosphère	1) Continuité des mesures 2) Augmentation de résolution spatiale (100-200 km) et de précision
• Circulation océanique	1) Continuité des mesures 2) Amélioration du champ statique à grande longueur d'ondes (nécessite une continuité de mesures de type GRACE)
• Niveau de la mer	1) Continuité de mesures 2) Augmentation de résolution spatiale (100-200 km)

Tableau 1 : Synthèse des besoins scientifiques exprimés dans les sections précédentes

les géoides de GRACE, résultant de la variabilité très haute fréquence du champ de pesanteur qui est imparfaitement décrite par les modèles géophysiques. Ceci génère des artefacts longitudinaux dans les géoides mensuels et décennaires de GRACE, et constitue une limitation importante de GRACE. La réduction de ce phénomène d'aliasing doit absolument être considérée pour toute future mission de gravimétrie spatiale.

Annexe 1 : Australian Support for the Micromega <<GRACE Follow-on >> Study

Dr I. Panet
President, Micromega Study Group

15 February, 2009

Dear Madame Panet,

We would like express our strong support for a GRACE Follow-on mission. The scientific information and understanding that has resulted from the current GRACE mission has been outstanding and has built a foundation for the continued monitoring of how the Earth is changing as a result of our changing climate. The ability to observe temporal variations in the Earth's gravity field at monthly – and now sub-monthly – scales has been clearly demonstrated and has led to rapid advances in hydrological and oceanic studies in ways that were not previously possible. Examples of this are basin-scale estimates of total water storage variations as applied to, for example, drought in the Murray-Darling basin in Australia (Leblanc et al., 2009) and identification of the steric component of sea level rise from a combination of satellite altimetry and GRACE (e.g. Lombard et al., 2007).

GRACE has provided a means of observing changes in the Earth at spatial scales that were not previously possible. For hydrological applications, it is now possible to measure large-scale, integrated changes in water storage where previously only numerical hydrological models could provide such information. The new capability for observing changes in water resources is of great importance under a changing climate scenario, particularly for a country such as Australia.

The potential of GRACE data to measure changes in mass balance of polar regions was quickly realized, and many international research groups have now published estimates of the rate of melting of Antarctica and Greenland and their respective contributions to global sea level rise (e.g. Velicogna and Wahr, 2006; Luthcke et al., 2008). It is essential that such observation programmes continue if we are to understand global changes in continental ice and sea levels.

The response of the continents to melting of major ice sheets over the past 20,000 years causes a gravity variation that can be detected by GRACE. Separating these solid-Earth response signals from short-term accumulation/melting signals (and hydrologic signals) is critical in order to estimate accurately the contribution of the melting of continental ice to global sea level rise. However, this remains an unsolved problem, in particular in Antarctica where there are few observations available – apart from GRACE – to constrain the spatial pattern and magnitude of either signal source. Long-term monitoring of the gravity changes over continents is required to achieve this scientific objective.

Australian scientists have not been directly involved in the Science Team of the GRACE mission; however, we have made use of the GRACE products. Over \$1.2M has been invested by the Australian Research Council over the past 5 years for research projects utilising GRACE data for studies in the Australian region of continental hydrology, geoid determination and oceanographic signals. Such important climate-related studies require observations to continue in the future to, for example, continue monitoring the effect of increasing temperatures on Australia's water resources.

With experience in developing space-qualified laser metrology systems, Australia could possibly contribute to the technological development of a GRACE Follow-on mission. Such a system could supplement the K-band inter-satellite system on the current GRACE satellites, but with greater accuracy. We are interested to know what particular architecture is being proposed for GRACE Follow-on.

Yours sincerely,

Dr Paul Tregoning, Research School of Earth Sciences The Australian National University		Dr Daniel Shaddock Department of Quantum Science The Australian National University
Professor Kurt Lambeck Research School of Earth Sciences The Australian National University		Professor Will Featherstone Western Australia Centre for Geodesy Curtin University of Technology

Annexe 2 : Lettre de soutien de l'International Association of Geodesy



International Association of Geodesy

of the International Union of Geodesy and Geophysics



January 27, 2009

Mr. Steven Hosford
CNES / DSP
18 avenue Edouard Belin
31401 Toulouse Cedex 9
FRANCE

Re: Recommendation for a GRACE follow-on mission

Dear Mr. Hosford,

Since the launch of the CHAMP and GRACE gravity satellite missions, our knowledge of the Earth's gravity field and its temporal variations has improved tremendously. The GRACE mission has allowed the continuous monitoring of mass transport within the Earth system since 2002 at unprecedented spatial (400 km) and temporal (10 days to 1 month) resolution, and has led to a wealth of important scientific results in a wide range of disciplines.

Processes like the water cycle, the oceanic circulation, the ice cap shrinking, the lithospheric rebound following the last deglaciation, and catastrophic events such as the 2004 Sumatra earthquake produce mass transfers that modify the gravity field. Thanks to the GRACE data, significant advances have been made in the understanding of such processes and events. At a time when human activities contribute to changing our planet in a way that is difficult to assess given the complexity of interactions between processes, such information is crucial.

Therefore, and since dedicated gravity satellite missions have already proven their value, the International Association of Geodesy strongly supports the idea of a GRACE follow-on mission, with emphasis on the uninterrupted continuation of time-series measurements after GRACE's lifetime expires. We recommend a mission based on GRACE present-day configuration, or preferably a mission with improved performance in terms of spatial/temporal resolution and reduction of aliasing, which may involve formation flying or multi-satellite systems. IAG will be very pleased to provide input on the design and participate in simulation studies for such a mission.

Sincerely,

Prof. Michael G. Sideris

President, International Association of Geodesy

President
DR. MICHAEL G. SIDERIS
University of Calgary
2500 University Drive N.W.
Calgary
Alberta T2N 1N4 / Canada
Phone : +1-403-220-4985
Fax : +1-403-284-1980
E-mail: sideris@ucalgary.ca

Vice-President
DR. CHRIS RIZOS
University of New South Wales
School of Surveying &
Spatial Information Systems
Sydney NSW 2052 / Australia
Phone : +61-2-93854205
Fax : +61-2-93137493
E-mail: c.rizos@unsw.edu.au

Secretary General
DR. HERMANN DREWES
Deutsches Geodätisches
Forschungsinstitut (DGFI)
Alfons-Goppel-Str. 11
D-80539 München / Germany
Phone : +49-89-23031-1106
Fax : +49-89-23031-1240
E-mail: iag@dgfi.badw.de

Annexe 3 : Lettre de soutien du GGOS' Space Missions Working Group



INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY
GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM

February 6, 2009

Mr. Steven Hosford
CNES / DSP
18 avenue Edouard Belin
31401 Toulouse Cedex 9
France

Subject: Support letter for *The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Follow-on Satellite Mission*

Dear Mr. Hosford:

We are writing to strongly support the effort towards successful launching of space mission constituting the Follow-on mission to the currently operating NASA/DLR Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) twin-satellite mission. The Global Geodetic Observing System (GGOS, <http://www.ggos.org>) under the auspices of the International Association of Geodesy (IAG) supports scientific satellite missions such as GRACE and its follow-on missions to ensure a long-term and accurate measurement of Earth's temporal gravity field to address important scientific problems such as global climate-change and quantification of mass transport in Earth's water cycle.

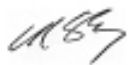
Specifically, we are writing on behalf of the GGOS' *Space Missions Working Group* (http://www.iag-ggos.org/wgs/satellite_missions) to strongly support the effort to realize the GRACE Follow-on mission. The current GRACE mission has extended well beyond its 5-year mission lifetime and is projected to operate through 2010. It is critically important to ensure the continuation of the GRACE observations with scenarios of follow-on missions.

The GRACE satellites are undoubtedly one of the most outstanding Earth satellite missions with unprecedented technological and scientific achievements. Since the launch of the GRACE satellite in March 2002, GRACE has achieved so far a factor of 100 improvement in Earth's mean gravity field, making the spaceborne gravity sensor the most accurate ever to measure climate change signals. The GRACE data so far have enabled improved confirmation of the Lens-Thirring effect using satellite laser ranging (SLR) to the Lageos-1/-2 satellites; allowed the first discovery of an asteroid induced Permian-Triassic crater under the Antarctica ice sheets; estimation of recent rapid Greenland ice melt, estimates of Antarctic mass balance and Alaskan glacier melt; enabled studies of large river basin hydrologic fluxes; observed ocean tides

underneath Antarctic ice shelves and improved ocean tide modeling; quantified ocean bottom pressure waves in the tropical Pacific, Antarctic Circumpolar Current transport variability, and global ocean mass variability; study of global mass variations along with GPS; the discovery of multidomal ancient ice structures in Laurentia and provided new constraints on Glacial Isostatic Adjustment and mantle convection; and, for the first time, observed coseismic deformation associated with the Sumatra-Andaman undersea earthquake. It is anticipated that the observations from GRACE and its Follow-on missions will produce an unprecedented, long-term geophysical time series to improve our understanding in global mass fluxes related to global climate-change.

We give our strongest possible support to international efforts toward the realization of a GRACE follow-on mission and to continue the critical Earth observations without interruptions.

On behalf of the Space Missions Working Group (SSWG), IAG-GGOS,



C.K. Shum

Chair, IAG-GGOS Space Missions Working Group
Professor of Geodetic Science & Distinguished University Scholar
School of Earth Sciences, The Ohio State University
125 S Oval Mall, 221B Mendenhall Lab, Columbus, Ohio 43210-1398, U.S.A.
T: 614-292-7118, ckshum@osu.edu

CC:

Professor Michael G. Sideris, IAG President, sideris@ucalgary.ca
IAG-GGOS, Dr. Markus Rothacher, Rothacher@gfz-potsdam.de,
Dr. Hans-Peter Plag, hpplag@unr.edu
Dr. Richard Biancale, CNES/GRGS, Richard.Biancale@cnes.fr
Dr. Frank Flechtner, GFZ Potsdam, flechtne@gfz-potsdam.de
Dr. Roland Pail, TU Graz, pail@geomatics.tu-graz.ac.at
Dr. Isabelle Panet, IGN, isabelle.panet@ign.fr

Annexe 4 : Besoins des différentes disciplines scientifiques en termes de précision et résolution sur le géoïde (Sneeuw, N., Flury, J. & Rummel, R., Science requirements on future missions and simulated mission scenarios, *Earth, Moon and Planets*, 2005, 94, 113-142).

114

NICO SNEEUW ET AL.

TABLE I
Synopsis of future science requirements in terms of geoid and gravity field knowledge

Science Area Theme	Required Resolution (km)	Main Periods	Required Accuracy Geoid or gravity	Comment
Solid Earth				
Glacial isostatic adjustment	> 500	10 000–100 000 y	1–10 $\mu\text{m/y}$	total geoid effect: 1–2 mm/y
Co-/post-seismic deformation, slow/silent earthquakes	regional	instantaneous—decadal	sub-mm	requires monitoring mission
Plate tectonics, mantle convection, volcanos	> 10	secular, instantaneous	< 1 mm/y	requires monitoring mission
Core motion (nutaton, Slichter), seismic normal modes	> 5000	10 s–18 y	1 nGal – 1 μGal	
Hydrology				
Snow, precipitation, ground water, dams, soil moisture, run-off, evapo-transpiration	10–5000	1 h–secular	0.5–1 mm monthly	high spatial resolution more important than accuracy
Ocean				
Mean flow: narrow currents, topographic control	20–50	quasi-static	5–10 mm	
Coastal currents along shelf edges	10–50	quasi-static	5–10 mm	
Interaction mean and eddy flow, ocean fronts position	10–100	quasi-static	5–10 mm	
Bathymetry	1–10	static		

Basin scale mass change, deep water formation	1000–5000	months – decades	10 mm	sea level, oscillations
Bottom currents	10–200	months – decades	0.1–1 mm	
Sea Level				
Global sea level change monitoring	> 2000	interannual, secular	0.1 mm/y	monitoring mission desired
Ice				
Ice mass balance	100–4000	seasonal – secular	<0.01 mm/y	monitoring mission desired
Bottom topography, ice compaction	20–50	quasi-static	0.01–0.1 mGal	
Geoid for sea ice thickness	10–100	static	100 mm	
Geodesy				
Precise heights for engineering, GNSS levelling, coastal height reference, sea level monitoring	20–50	static	5–20 mm	for some areas also geoid time variation
Inertial navigation	5–10	static	0.1 mGal, 0"1 deflection of vertical	combination with terrestrial data required
Atmosphere				
Planets				
				gravity field improvement may be interesting for future atmospheric modeling
				dedicated autonomous gravity field missions with very high spatial resolution