

Habilitation à Diriger les Recherches

**Modélisation des surcharges induites
par les fluides superficiels**

Jean-Paul BOY

Physicien Adjoint à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre
Université Louis Pasteur, Strasbourg I

La thématique principale de mes activités de recherche consiste en l'étude des interactions entre la Terre solide et les différents fluides géophysiques de surface, c'est-à-dire l'atmosphère, les océans et les réservoirs d'eau continentale, au moyen des différents observables géodésiques. En effet, la circulation globale de ces différents fluides induit des redistributions de masses à la surface de la Terre, et donc des variations du champ de gravité et des déformations. La précision des différents observables géophysiques (déplacements en surface, variations de gravité mesurées en surface, variations du champ de pesanteur global, etc.) permet dorénavant des estimations précises des variations de masse en surface sur un large domaine temporel (périodes de quelques heures aux cycles saisonniers et au-delà) et spatial (longueurs d'onde de quelques kilomètres aux échelles continentales).

Même si l'étude des variations de gravité, mesurées par les gravimètres supraconducteurs, constitue la principale thématique de mes activités de recherche, mes différentes collaborations, notamment avec l'équipe de géodésie spatiale du NASA Goddard Space Flight Center, m'ont permis d'étendre mes champs d'intérêt aux autres observables géodésiques comme les variations temporelles du champ de pesanteur, dans le cadre de la mission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), ainsi qu'aux déplacements de surface.

De même, si mes travaux de thèse étaient principalement focalisés sur la contribution atmosphérique, la stabilité et la sensibilité des gravimètres supraconducteurs permettent l'étude des variations de gravité sur un large domaine spectral : périodes de quelques heures, comme les surcharges induites par les ondes de marées non-linéaires (Boy *et al.*, 2004), aux cycles saisonniers et annuels comme les contributions induites par les variations d'humidité du sol (Boy et Hinderer, 2006) ou par le mouvement du pôle de rotation (Loyer *et al.*, 1999).

Surcharges atmosphériques

L'atmosphère est très certainement le fluide géophysique le mieux modélisé, hormis peut-être les phénomènes les plus rapides (de périodes inférieures à, typiquement, une heure) et de très courtes longueurs d'onde horizontales (dizaine de kilomètres au plus). Le développement de modèles de prévision météorologique à moyen-terme, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, nous permet de disposer aujourd'hui, en quasi-temps réel, de champs globaux atmosphériques avec des pas de quelques heures (typiquement 3 ou 6 heures) et de quelques dizaines de kilomètres, permettant une estimation très précise des variations de la forme et du champ de pesanteur terrestre.

L'étude de la contribution des surcharges atmosphériques sur les variations de gravité mesurées

en surface par les différents gravimètres supraconducteurs a constitué le corps de mon travail de thèse. J'ai pu alors montrer qu'un calcul rigoureux des surcharges atmosphériques à partir des champs de pression surfacique permettait, systématiquement et significativement, une meilleure estimation de leurs effets induits par rapport aux corrections empiriques classiques (Boy, 2000; Boy *et al.*, 2002). Cette méthodologie a ensuite été appliquée avec succès à d'autres observables géodésiques comme les déplacements en surface mesurés par VLBI (Very Long Baseline Interferometry) (Petrov et Boy, 2004) et les mesures spatiales des variations temporelles du champ de pesanteur (Boy et Chao, 2005), ainsi qu'aux autres sources de surcharge (océans et hydrologie continentale).

Réponse des océans à la pression atmosphérique

La principale limitation des calculs des surcharges atmosphériques provient de l'estimation de la réponse, aux hautes fréquences (périodes inférieures à un mois), des océans aux variations de pression et des vents atmosphériques. La précision des observables géodésiques, et plus particulièrement des gravimètres supraconducteurs, et des missions de gravité spatiale, ne permet plus d'utiliser les approximations classiques :

- le *baromètre non-inversé* pour lequel on supposait que les variations de pression étaient intégralement transmises au fond des océans (la Terre se comportant comme s'il n'y avait pas d'océans en surface),
- le *baromètre inversé* pour lequel on supposait que les variations de pression étaient intégralement compensées par des variations statiques de hauteur d'eau.

Si le premier modèle ne peut être vérifié que pour des mers fermées, le second modèle, parce qu'il néglige toute dynamique, ne peut être valide aux courtes périodes (périodes inférieures à un mois). La nécessaire amélioration du traitement des données altimétriques ainsi que des missions de gravité spatiale a imposé de construire des modèles dynamiques, forcés, entre autre, par la pression atmosphérique (de Viron *et al.*, 2004).

Même s'il s'agit, en partie, de travaux en cours, je présente l'impact de cette modélisation sur certains observables géodésiques, principalement les variations de gravité en surface, mais également le champ de pesanteur terrestre et la rotation.

Marées océaniques

Les marées océaniques constituent certainement le phénomène le mieux connu et le plus étudié dans les océans. Depuis le lancement des satellites altimétriques, et notamment la mission franco-américaine Topex/Poseidon, la qualité des modélisations des marées a progressé très rapidement, tant au niveau de la résolution des équations hydrodynamiques que de l'assimilation des données altimétriques et marégraphiques. De plus, les marées océaniques sont de loin, avec l'atmosphère, la plus importante source de surcharges superficielles.

Les marées océaniques présentent un spectre plus complexe que les marées solides, en raison de la dynamique de la réponse des océans et de la complexité de la bathymétrie : si les marées zonales longue-période sont presque d'équilibre, ce n'est pas le cas des ondes principales diurnes et semi-diurnes. En outre, sur les différents plateaux continentaux, des ondes non-linéaires sont générées par interaction des ondes diurnes et semi-diurnes principales.

L'amplitude des surcharges de marées décroissant avec la distance aux côtes, une étude précise des surcharges impose de placer des instruments proches des côtes (GPS par exemple), ou bien de disposer d'instruments précis comme les gravimètres supraconducteurs. Par exemple, l'amplitude

des surcharges induites par les ondes non-linéaires n'atteint que quelques nanogals (10^{-11} m/s²) à quelques centaines de kilomètres des côtes ouest-européennes (Boy *et al.*, 2004).

L'extrême sensibilité des gravimètres supraconducteurs m'a permis d'étudier les contributions induites par les marées océaniques sur l'ensemble de leur domaine spectral, c'est-à-dire les marées longue période (Boy *et al.*, 2006), les marées diurnes et semi-diurnes (Boy *et al.*, 2003) et les marées non-linéaires (Boy *et al.*, 2004).

Surcharges hydrologiques

Après l'atmosphère et les océans, les variations d'hydrologie continentale constitue la dernière source importante de variations de déplacement, de gravité en surface (Boy et Hinderer, 2006) et du champ de pesanteur. L'objectif principal de la mission GRACE est d'ailleurs la détermination des variations temporelles des différents réservoirs d'eau continentale et des calottes glaciaires.

Nous présentons ici deux études consacrées aux effets des surcharges hydrologiques sur les variations de gravité, d'une part mesurées en surface par les gravimètres supraconducteurs, et d'autre part une expérience de validation/calibration de GRACE, menée en collaboration avec le groupe de géodésie spatiale du Goddard Space Flight Center.

Curriculum Vitae

Etat-Civil

Jean-Paul BOY

Né le 25 mai 1974 à Sainte Adresse (France)

Nationalité Française

Célibataire

Adresse professionnelle

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre

Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516 CNRS-ULP)

5, rue René Descartes

67084 Strasbourg Cedex, France.

Tel : 03 90 24 01 09 Fax : 03 90 24 02 91

Email : jpbboy@eost.u-strasbg.fr

Formation

- Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, soutenu le 29 novembre 2000. Effets des surcharges atmosphériques sur les variations de gravité et les déplacements de surface de la Terre, sous la direction de Jacques Hinderer.
Prix de thèse de l'ADRERUS en 2001
- Diplôme d'Ingénieur Géophysicien de l'Ecole et Observatoire de Physique du Globe, soutenu le 8 novembre 1996.
- DEA de Physique et Chimie de la Terre, à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, obtenu en juin 1996.

Expériences professionnelles

- Depuis Janvier 2004, Physicien-Adjoint à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, au sein de l'Equipe de Dynamique Globale.
- Septembre 2001 - Décembre 2003 : stage post-doctoral au NASA Goddard Space Flight Center (USA), au sein de l'équipe de Géodésie spatiale, et sous la direction de Benjamin F. Chao.
- Septembre 2000 - Août 2001 : ATER à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre.

Liste de publications

Revue à comité de lecture

1. Nicolas, J., J.-M. Nocquet, M. Van Camp, T. van Dam, **J.-P. Boy**, J. Hinderer, P. Gegout, E. Calais et M. Amalvict, Seasonal effect on vertical positioning by Satellite Laser Ranging and Global Positioning System and on Absolute Gravity at the OCA geodetic station, Grasse, France, *Geophysical Journal International*, accepté.
2. **Boy, J.-P.**, M. Llubes, R. Ray, J. Hinderer et N. Florsch, Validation of long-period oceanic tidal models with superconducting gravimeters, *Journal of Geodynamics*, **41**, 112–118, 2006.
3. **Boy, J.-P.**, et J. Hinderer, Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data, *Journal of Geodynamics*, **41**, 227–233, 2006.
4. **Boy, J.-P.**, R. Ray et J. Hinderer, Diurnal atmospheric tide and induced gravity variations, *Journal of Geodynamics*, **41**, 253–258, 2006.
5. Hinderer, J., O. Andersen, F. Lemoine, D. Crossley et **J.-P. Boy**, Seasonal changes in the European gravity field from GRACE : A comparison with superconducting gravimeters and hydrology model predictions, *Journal of Geodynamics*, **41**, 59–68, 2006.
6. Sato, T., **J.-P. Boy**, Y. Tamura, K. Matsumoto, K. Asari, H.-P. Plag et O. Francis, Gravity tide and seasonal gravity variation at Ny-Ålesund, Svalbard in Arctic, *Journal of Geodynamics*, **41**, 234–241, 2006.
7. **Boy, J.-P.**, et B. F. Chao, Precise evaluation of atmospheric loading effects on Earth's time-variable gravity field, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B08412, doi:10.1029/2002JB002333, 2005.
8. Crossley, D., J. Hinderer et **J.-P. Boy**, Time variation of the European gravity field from superconducting gravimeters, *Geophysical Journal International*, **161**, 257–264, 2005.
9. **Boy, J.-P.**, M. Llubes, R. Ray, J. Hinderer, N. Florsch, S. Rosat, F. Lyard et T. Letellier, Non-linear oceanic tides observed by superconducting gravimeters in Europe, *Journal of Geodynamics*, **38**, 391–405, 2004.
10. Crossley, D., J. Hinderer et **J.-P. Boy**, Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters, *Journal of Geodynamics*, **38**, 325–342, 2004.
11. Petrov, L., et **J.-P. Boy**, Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, *Journal of Geophysical Research*, **109**, B03405, doi:10.1029/2003JB002500, 2004.
12. Rosat, S., J. Hinderer, D. Crossley et **J.-P. Boy**, Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides, *Journal of Geodynamics*, **38**, 461–476, 2004.
13. de Viron, O., **J.-P. Boy** et H. Goosse, Geodetic effects of the ocean response to atmospheric forcing in an ocean general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, **109**, B03411, doi:10.1029/2003JB002837, 2004.
14. **Boy, J.-P.**, M. Llubes, J. Hinderer et N. Florsch, A comparison of tidal ocean loading models using superconducting gravimeter data, *Journal of Geophysical Research*, **108**, 2193, doi:10.1029/2002JB002050, 2003.
15. Chao, B. F., A. Y. Au, **J.-P. Boy** et C. M. Cox, Time-variable gravity signal of an anomalous redistribution of water mass in the extratropic Pacific during 1998–2002, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, doi:10.1029/2003GC000589, 2003.
16. **Boy, J.-P.**, et B. F. Chao, Time-variable gravity signal during the water impoundment of China's Three-Gorges Reservoir, *Geophysical Research Letters*, **29**, 2200, doi:10.1029/2002GL016457, 2002.

17. **Boy, J.-P.**, P. Gégout et J. Hinderer, Reduction of surface gravity data from global atmospheric pressure loading, *Geophysical Journal International*, **149**, 534–545, 2002.
18. Amalvict, M., J. Hinderer, **J.-P. Boy** et P. Gégout, A three year comparison between a superconducting gravimeter (GWR CO26) and an absolute gravimeter (FG56) in Strasbourg (France), *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 334–340, 2001.
19. **Boy, J.-P.**, P. Gégout et J. Hinderer, Gravity variations and global pressure loading, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 267–272, 2001.
20. Hinderer, J., **J.-P. Boy**, P. Gégout, P. Defraigne, F. Roosbeek et V. Dehant, Are the free core nutation parameters variable in time?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **117**, 37–49, 2000.
21. Loyer, S., J. Hinderer et **J.-P. Boy**, Determination of the gravimetric factor at the Chandler period from Earth orientation data and superconducting gravimetry observations, *Geophysical Journal International*, **136**, 1–7. 1999.
22. **Boy, J.-P.**, J. Hinderer et P. Gégout, Global atmospheric loading and gravity, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **109**, 161–177. 1998.

Autres revues

1. Crossley, D., J. Hinderer, **J.-P. Boy** et C. de Linage, Status of the GGP Satellite Project, *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, **142**, 11423–11432, 2006.
2. Hinderer, J., C. de Linage et **J.-P. Boy**, How to validate satellite-derived gravity observations with gravimeters on the ground?, *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, **142**, 11433–11442, 2006.
3. de Linage, C., J. Hinderer et **J.-P. Boy**, search on the gravity/height ratio induced by surface loading : theoretical investigation and numerical applications, *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, **142**, 11451–11460, 2006.
4. Hinderer, J., S. Rosat, D. Crossley, M. Amalvict, **J.-P. Boy** et P. Gégout, Influence of different processing methods on the retrieval of gravity signals from GGP data, *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, **135**, 10653–10668, 2002.
5. **Boy, J.-P.**, J. Hinderer, M. Amalvict et E. Calais, On the use of long records of superconducting and absolute gravity observations with special application to the Strasbourg station, France, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie (ECGS)*, **17**, 67–83, 2000.
6. Amalvict, M., J. Hinderer et **J.-P. Boy**, A comparative analysis between an absolute gravimeter (FG5-206) and a superconducting gravimeter (GWR CO26) in Strasbourg : new results on calibration and long-term gravity changes, *Bollettino di Geofisica, Teorica ed Applicata*, **40** (3-4), 519–525, 1999.
7. **Boy, J.-P.**, et J. Hinderer, Atmospheric pressure effects on gravity : local versus global corrections, *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, **131**, 10113–10127, 1999.
8. **Boy, J.-P.**, J. Hinderer et P. Gégout, The effect of atmospheric loading on gravity, *Proceedings of the 13th International Symposium on Earth Tides*, éditeurs B. Ducarme et P. Pâquet, Bruxelles, 439–446, 1998.
9. Hinderer, J., **J.-P. Boy**, et H. Legros, A 3000 day registration of the superconducting gravimeter GWR T005 in Strasbourg (France), *Proceedings of the 13th International Symposium on Earth Tides*, éditeurs B. Ducarme et P. Pâquet, Bruxelles, 439–446, 1998.

Contrats de financement

- 2006 CNES (Etude et Observation de la Terre : hydrologie continentale Géophysique interne, géodynamique et Géodésie)
Variation de pesanteur et déformation crustale induites par les charges superficielles hydrologiques ; comparaison gravimétrique sol-orbite et apport des données GPS.
100 K-Euros sur la période 2006-2011
- 2005 Groupe Mission MERCATOR / CORIOLIS
Variations de pesanteur, de la rotation et déformations induites par la circulation océanique.

Encadrement d'étudiants de second et troisième cycle

Thèse de doctorat

Encadrement :

- C. de Linage : *Mesures gravimétriques (sol, satellite) et positionnement géodésique : quel lien entre les variations de pesanteur et les mouvements verticaux ?*, thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, sous la direction de J. Hinderer (25 %).
- S. Rosat : *Variations temporelles de la gravité en relation avec la dynamique interne de la Terre - Apport des gravimètres supraconducteurs*, thèse de doctorat de 3ème cycle soutenu en mars 2004, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, sous la direction de J. Hinderer (10 %).

Rapporteur :

- D. García García : *Space Geodesy techniques applied to study the steric and eustatic sea level variations*, Université d'Alicante (Espagne), sous la direction de I. Vigo Aguiar et B. F. Chao. Rapporteur de thèse, soutenue le 19 juillet 2006.

Supervision de diplôme d'Ingénieur Géophysicien

- A. Deforges : *Contribution à une méthodologie de contrôle qualité en traitement sismique* (2006).
- D. Rocher : *Modélisation hydrogéologique du site nucléaire de St Laurent des Eaux* (2005).
- P. Lacroix : *Characterization of the Mauna Loa volcano (Hawaii) deformation using InSAR measurements of Radarsat* (2004).

Encadrement de Projets de Recherche

- I. Thollet : *Pluviométrie, recharge d'aquifère et effets de gravité* (2006).
- R. Valois : *Pluviométrie et stockage d'eau dans le sous-sol* (2006).
- B. Gauthier : *Effets de pression sur les enregistrements sismologiques ; analyse du bruit* (2006).
- A. Peyrefitte : *Observation du tsunami du 26 décembre 2004 par altimétrie* (2006).
- H. Mathieu et A. Mémin : *Etude du cyclone Katrina : couplage océan-atmosphère* (2006).