

Signature des séismes dans le champ de pesanteur

■ Isabelle PANET - Michel DIAMENT - Valentin MIKHAILOV

Depuis 2002, la mission GRACE mesure les variations temporelles du champ de pesanteur à une résolution d'environ 400 km. Ces variations sont liées aux transferts de masses au sein du système Terre. Si elles sont dominées par l'effet des marées et du cycle de l'eau, elles résultent également des déformations et variations de densité causées par les séismes. Nous montrons ici l'apport de GRACE pour l'étude des grands séismes de Sumatra du 26 décembre 2004 et du 28 mars 2005. Une forte diminution de gravité a été observée en mer d'Andaman associée au séisme de fin 2004, suivie d'un rebond dans les années qui suivent. Combinées aux mesures GPS, ces observations mettent en évidence des phénomènes de relaxation visqueuse dans le manteau terrestre et de glissements post-sismiques, et contribuent à une meilleure compréhension du cycle sismique en zone de subduction.

MOTS-CLÉS

Gravimétrie spatiale, séismes

Variations temporelles du champ de pesanteur

Le champ de pesanteur terrestre est le reflet de la distribution des masses au sein du système Terre, depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides superficielles (atmosphère, océans, eaux polaires et continentales). Les masses n'étant pas fixes, le champ de pesanteur varie au cours du temps (Figure 1). Ces variations sont principalement liées aux effets de marées, mais elles sont aussi dues en grande partie au cycle de l'eau, qui s'accompagne de transferts de masses d'eau entre les différents réservoirs où celle-ci est stockée sous différentes formes (atmo-

sphère, océans, calottes polaires, hydrosphère continentale). Le champ varie enfin au cours du temps à cause des déformations de la Terre solide : relaxation visqueuse lente suite à la dernière déglaciation (rebond post-glaciaire), tectonique des plaques, et, plus localement, des variations de masses associées à l'activité magmatique des volcans et associées aux séismes, au moment de la rupture (co-sismique) ou après (post-sismique). Outre les variations du champ de pesanteur, ces transferts de masses s'accompagnent aussi de déformations verticales notables de la croûte terrestre, et impactent toutes les observables géodésiques.

Depuis 2002, les variations temporelles du champ de pesanteur sont mesurées avec une couverture spatiale globale et une résolution spatiale de l'ordre de 400 km par la mission gravimétrique GRACE. Le principe de mesure de GRACE est le suivant. Deux satellites distants d'environ 220 km se suivent sur une orbite basse, à environ 480 km d'altitude. L'orbite basse est choisie pour minimiser l'atténuation du champ avec l'altitude, mais elle implique de corriger les frottements atmosphériques qui sont plus intenses. La distance inter-satellite est mesurée avec une très grande précision, de l'ordre du micron, et les satellites sont positionnés par GPS. A cause des hétérogénéités de la répartition des masses, la gravité n'est pas la même sur chaque satellite, ce qui provoque des variations de la distance inter-satellite. C'est la mesure des variations de cette distance qui permet de reconstituer une image du champ. Tous les 15 jours environ, les satellites repassent au-dessus du même point, ce qui permet un suivi temporel.

Extraction de signaux liés aux séismes : exemple du séisme de Sumatra (26/12/2004)

Pour comprendre les séismes, les géophysiciens utilisent à la fois la sismologie et les mesures de déformation du sol vues par satellite (GPS, INSAR, corrélation optique). Les varia-

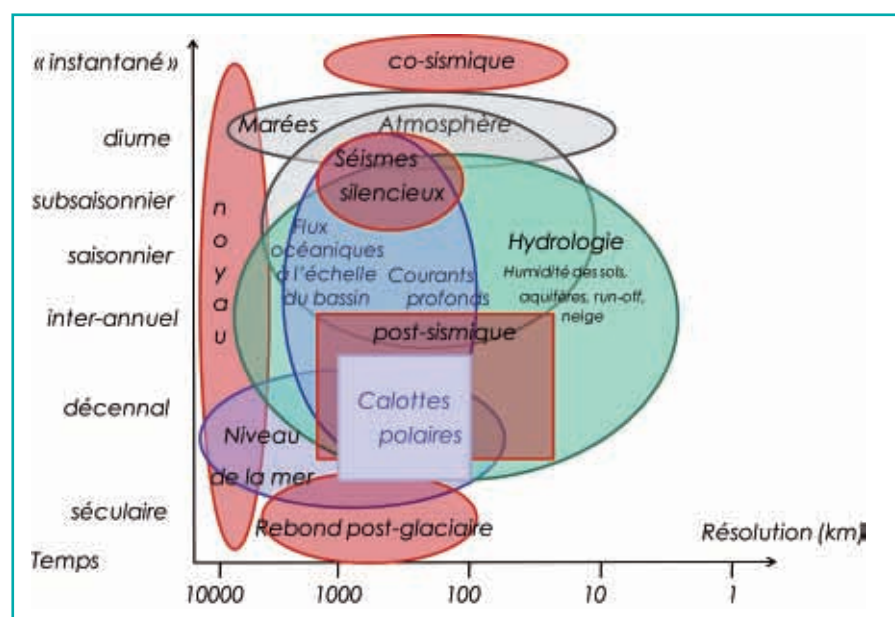


Figure 1. Les processus qui font varier le champ de pesanteur au cours du temps, à différentes échelles de temps et d'espace. Adapté d'après Rummel et al. (2003).

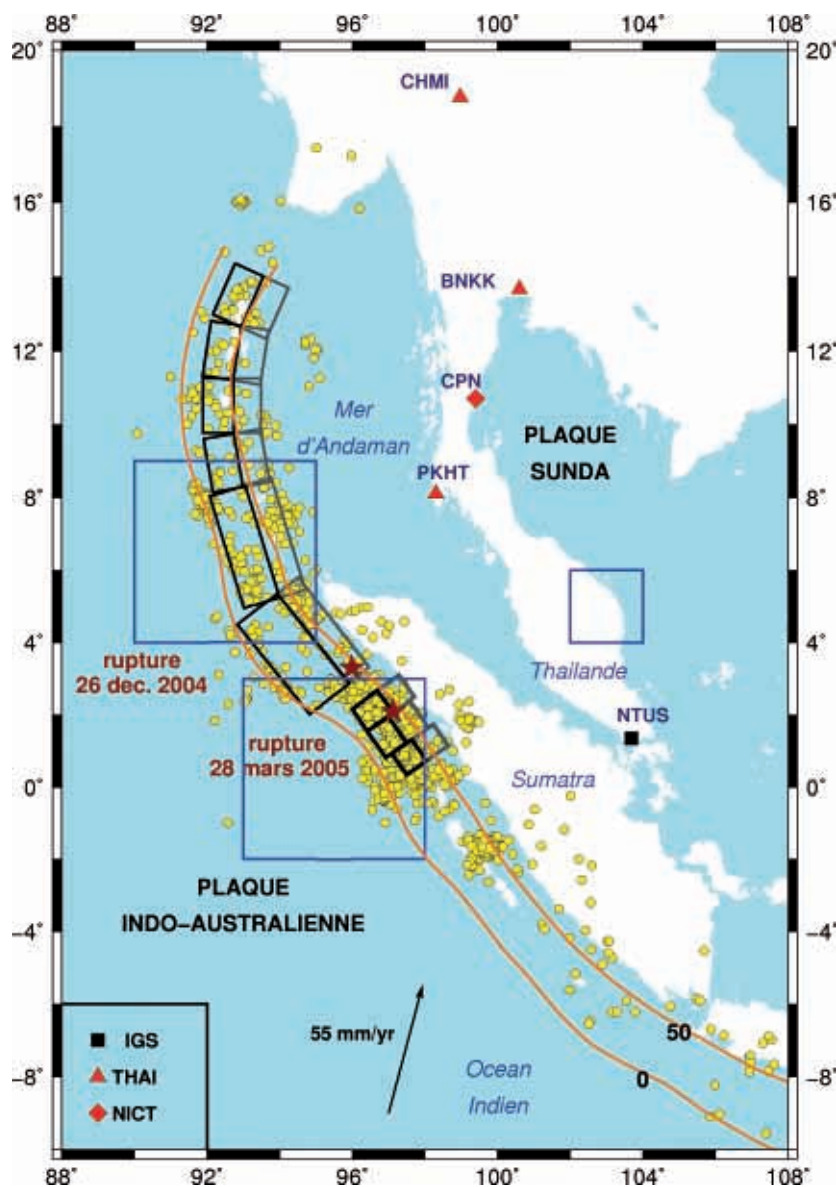
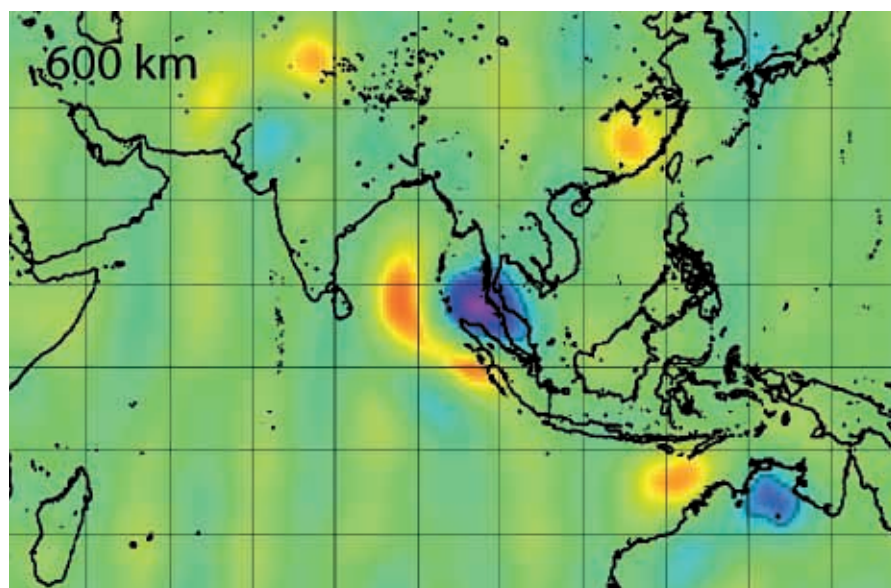


Figure 2. La subduction de Sumatra, affectée par les séismes de 2004 et 2005. Les étoiles indiquent les épicentres (Panet et al., 2010).



tions temporelles du champ causées par les séismes sont très petites, de l'ordre de 100 milliardièmes de g, mais la mission GRACE y est sensible ! Ces mesures sont d'un intérêt tout particulier, car les séismes les plus dévastateurs ont le plus souvent lieu sous la mer, là où les réseaux géodésiques et géophysiques sont les moins denses et couvrent le moins bien les zones affectées par les plus fortes déformations. L'apport original de la gravimétrie spatiale, qui en fait un complément idéal aux autres réseaux d'observation, est sa couverture homogène y compris en mer d'une part, et sa grande sensibilité aux processus à grande échelle, tels que la relaxation post-sismique affectant les profondeurs du manteau, d'autre part. La gravimétrie spatiale permet ainsi d'affiner la modélisation des grands séismes et de mieux comprendre le risque sismique dans des zones densément peuplées.

Les mesures de pesanteur intègrent néanmoins les variations de masses de toutes origines (Figure 1), et extraire le signal d'intérêt lié au cycle sismique nécessite une analyse fine des données. Les analyses en ondelettes s'avèrent très appropriées pour cela (pour plus d'informations sur cet outil, le lecteur pourra se reporter à l'article *Représentations en ondelettes du champ de pesanteur* de ce bulletin d'information sur les fonctions utilisées). Elles sont formées de l'ensemble des coefficients de corrélations entre les ondelettes analysantes et les données étudiées. Parce qu'elles permettent de filtrer les mesures à différentes échelles spatiales dans différentes zones, les analyses continues en ondelettes mettent en évidence des signaux cohérents dans différentes bandes spectrales et en différents lieux, ce qui permet de séparer des contributions superposées de caractéristiques spatio-spectrales différentes, comme peuvent l'être des variations de pesanteur d'origine sismique ou bien liées au cycle de l'eau.

Figure 3. Analyse en ondelettes à 600 km d'échelle des variations du géoïde entre les années 2004 et 2005, contenant le signal co-sismique. Coefficients adimensionnés (Panet et al. 2007).

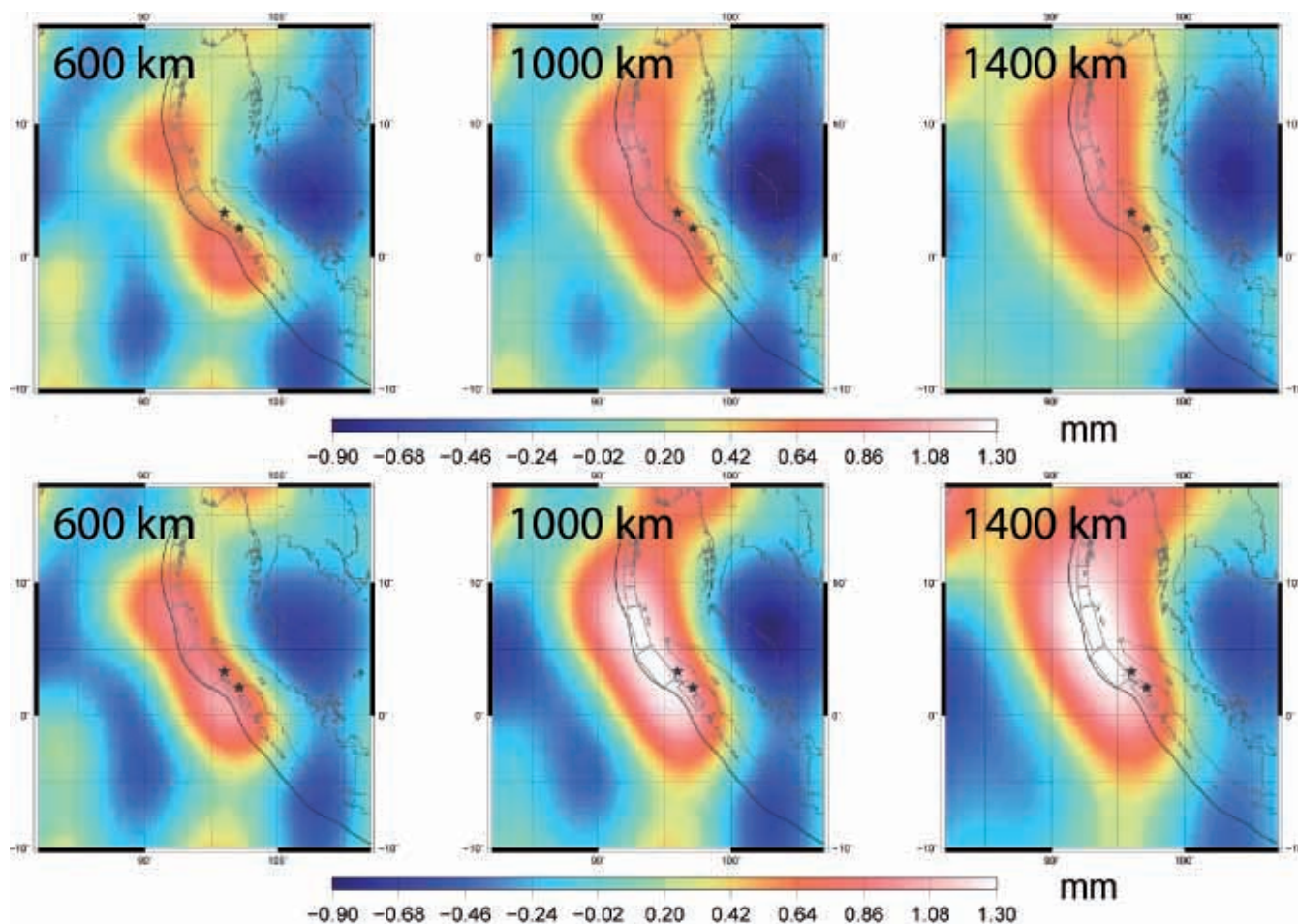


Figure 4. Analyses en ondelettes des variations du géoïde après les séismes de Sumatra de décembre 2004 et mars 2005, à échelles 600 km (gauche), 1000 km (milieu) et 1400 km (droite). Un géoïde de référence, qui contient les variations co-sismiques, a été soustrait pour isoler la variation post-sismique. Les trois figures du haut montrent la variation post-sismique jusqu'en mars 2006, et les trois figures du bas, jusqu'en septembre 2007 (Panet et al., 2010).



Des études préliminaires avaient montré la sensibilité de la gravimétrie spatiale aux grands séismes (Mikhailov et al., 2004). Un signal clair a ainsi été observé dans les données

GRACE suite aux séismes de Sumatra du 26 décembre 2004 (magnitude 9.2) et du 28 mars 2005 (magnitude 8.7). La Figure 2 présente la zone affectée par les séismes. L'analyse des données

GRACE avant et après le séisme a mis en évidence une forte déformation co-sismique au niveau de la mer d'Andaman, marquée par une diminution importante de la gravité (Han et

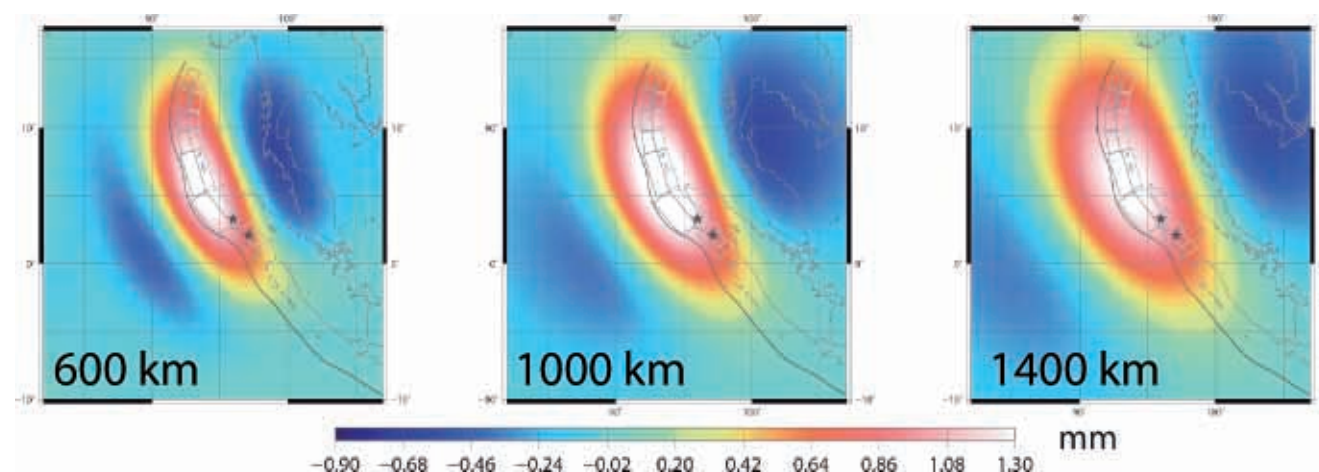


Figure 5. Analyses en ondelettes des variations post-sismiques du géoïde modélisées, aux échelles 600 km (gauche), 1000 km (milieu) et 1400 km (droite). Les trois figures montrent la variation post-sismique jusqu'en septembre 2007 (Panet et al., 2010). Le modèle contient une part de déformation visqueuse, et 75 cm de glissement en profondeur.



al., 2006), d'environ 15 μ Gals, que nous isolons très clairement dans les analyses en ondelettes, comme sur la Figure 3 (Panet et al., 2007; de Viron et al., 2008). Cette diminution de gravité est interprétée comme provenant d'une part de la variation de densité de la croûte terrestre, et d'autre part d'un affaissement du plancher océanique en mer d'Andaman.

Dans les années qui suivent le séisme, la Terre continue à se déformer, de plus en plus lentement. Une augmentation importante de la gravité est ainsi observée le long de la zone de subduction (Panet et al., 2007, 2010). Elle est principalement due à la relaxation visqueuse de la Terre après le séisme. L'analyse combinée des données GRACE avec les données GPS met en évidence un fort signal de relaxation sur toute la zone, comme illustré sur la Figure 4. Alors que les données GPS sont plus sensibles à la relaxation superficielle, les données GRACE enregistrent très précisément les déformations terrestres de tout le manteau supérieur, permettant ainsi d'apporter des contraintes sur sa rhéologie. De plus, les analyses en ondelettes permettent d'étudier le taux de relaxation à différentes échelles, pour les zones près de l'épicentre du séisme de décembre 2004, et de mars 2005. Cette information très riche permet de contraindre plus précisément les modèles de déformation, et, alliée aux mesures GPS, de montrer qu'il est nécessaire de combiner un processus petite échelle de glissement post-sismique à un processus grande échelle de relaxation visqueuse pour expliquer les observations à toutes les échelles. Les variations du géoïde résultant de ce modèle sont représentées en Figure 5 (Panet et al., 2010).

Conclusion

Les mesures des variations temporelles du champ de pesanteur sont sensibles à de nombreux transferts de masses, et, avec la mission GRACE, il a été possible de détecter les variations de pesanteur associées aux séismes de Sumatra de magnitude supérieure ou égale à 8.7. Les analyses multi-échelles ont consi-

dérablement facilité l'extraction des signaux sismiques dans les variations totales du champ, qui comprennent beaucoup d'autres effets de caractéristiques spatio-spectrales différentes. Elles s'avèrent aussi utiles pour contraindre précisément les modèles géophysiques co- et post-sismiques. L'apport de la gravimétrie spatiale en ce domaine est grand, car c'est une technique qui enregistre les transferts de masse dans les zones peu couvertes par les réseaux géodésiques et géophysiques de surface, notamment en mer. La mission GRACE, lancée en 2002 et initialement prévue jusqu'en 2007, devrait continuer ses mesures jusqu'en 2014. Ces données devraient se poursuivre grâce à de nouvelles missions que l'on espère plus précises encore, et sensibles à de plus petits séismes. ●

Cet article a été publié dans le Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN, n° 77 : Bilan de la recherche LAREG 2008-2010, pp 49-52, 2011/02, ISSN 0427 2218.

Remerciements

Nous remercions le CNES pour le soutien qu'il apporte à ces travaux à travers le comité TOSCA.

Contacts

Isabelle PANET

Institut Géographique National, Laboratoire LAREG, GRGS, Campus Spatial, F-77455 Marne-la-Vallée, France
isabelle.panet@ign.fr

Michel DIAMENT

Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154 CNRS, F-75013 Paris, France
diament@ipgp.fr

Valentin MIKHAILOV

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscou, Russie, aussi à l'Institut de Physique du Globe de Paris.
mikh@ifz.ru

Références

de Viron, O., I. Panet, W. Mikhailov, M. van Camp, M. Diament (2008). Retrieving earthquake signature in GRACE gravity solutions, *Geophysical Journal International*, 174(1), 14-20, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03807.x

Han, S.C., C.K. Shum, M. Bevis, C. Ji, C.-Y. Kuo (2006). *Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake*, *Science*, 313(5787), 658-662, doi:10.1126/science.1128661

Mikhailov, V., S. Tikhotsky, M. Diament, I. Panet, V. Ballu (2004). *Can tectonic processes be recovered from new satellite gravity data?*, *Earth and Planetary Science Letters*, 228, 281-297, doi:10.1016/j.epsl.2004.09.035

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*, 171(1), 177-190, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03525.x

Panet, I., Pollitz, F., Mikhailov, V., Diament, M., Banerjee, P., Grijalva, K. (2010). *Upper mantle rheology from GRACE and GPS post-seismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(Q06008), 20 pp., doi:10.1029/2009GC002905

Rummel et al. (2003). *Scientific objectives for future geopotential missions*. Technical note, version 6 from the ESA contract No:16668/02/NL/MM "Enabling observation techniques for future solid-Earth missions".

ABSTRACT

The GRACE satellite mission has been measuring the time variations of the Earth's gravity field since 2002, with a resolution around 400 km. These variations are linked to mass redistributions within the Earth's system. Although they are dominated by the effects of tides and of the water cycle, they also result from the deformations and density variations associated with earthquakes. Here we show the contribution of GRACE to study the Sumatra December 26th, 2004 and March 28th, 2005 great earthquakes. A large decrease of gravity has been observed in the Andaman Sea after the 2004 earthquake, followed by a gravity rebound during the next years. Combined with GPS measurements, these observations highlight viscous relaxation processes in the Earth's mantle and afterslip at depth, and contribute to a better understanding of the seismic cycle in subduction zones.