

Estimation des déplacements causés par la surcharge océanique dans l'Ouest de la France à l'aide des réseaux GPS permanents

■ François FUND - Laurent MOREL - Antoine MOCQUET

MOTS-CLÉS

GPS, séries temporelles, délais troposphériques, surcharge océanique

L'Ouest de la France est soumis à des déplacements lithosphériques dont l'une des origines est la marée océanique. Les effets sont particulièrement importants dans le Finistère et dans la baie du Mont-Saint-Michel où les coefficients des marées sont parmi les plus élevés dans le monde. Ces déplacements périodiques, observés aussi bien dans la direction verticale qu'horizontale, affectent la lithosphère continentale sur de grandes longueurs d'onde. Les déplacements verticaux du sol peuvent atteindre des amplitudes de l'ordre de 2 cm au Mans et jusqu'à 10 cm à Brest. Aujourd'hui, le développement des réseaux GNSS temps réel permanents comme TERIA complète les réseaux permanents existants et représente un outil indispensable pour l'observation précise des déplacements d'origine crustale. La densité géographique de ces réseaux et la quantité des données enregistrées depuis leurs mises en place ont permis de réaliser une première évaluation scientifique précise de ces déplacements.

de 11 m lors des marées d'équinoxe de mars et septembre ! La figure 1 illustre les hauteurs de marnage dans la Manche ainsi que les déphasages horaires par rapport à l'heure de la marée à Brest.

Ces variations de hauteur d'eau, combinées à la réponse de la Terre solide soumise à une charge, ici d'origine océanique, donnent naissance au phénomène de surcharge océanique (le terme de charge océanique étant réservé à l'affaissement de la Terre solide causé par les masses d'eau "au repos"). En d'autres termes, les variations temporelles de la hauteur de la surface des océans modifient la charge des masses d'eau au niveau du plan-

L'effet de surcharge océanique dans l'Ouest de la France

Les potentiels gravitationnels régnant entre la Terre et le Soleil d'une part, et entre la Terre et la Lune d'autre part, perturbent la répartition des masses d'eau des océans. Ces potentiels perturbateurs sont à l'origine des marées océaniques. Les variations régulières de la surface des océans dépendent du lieu géographique et du contexte océanique local. La Manche représente un lieu privilégié pour les marées en raison de sa forme particulière et de la géométrie des littoraux de la Bretagne Nord et de la Basse-Normandie. Ainsi, dans la baie du Mont-Saint-Michel, les hauteurs de marnage (différence de hauteur d'eau entre haute et basse mer) sont parmi les plus élevées du monde avec près



Figure 1. Lignes cotidunales (même hauteur de marnage) et déphasages horaires par rapport à l'heure de la marée à Brest dans la Manche, d'après Simon (2007).

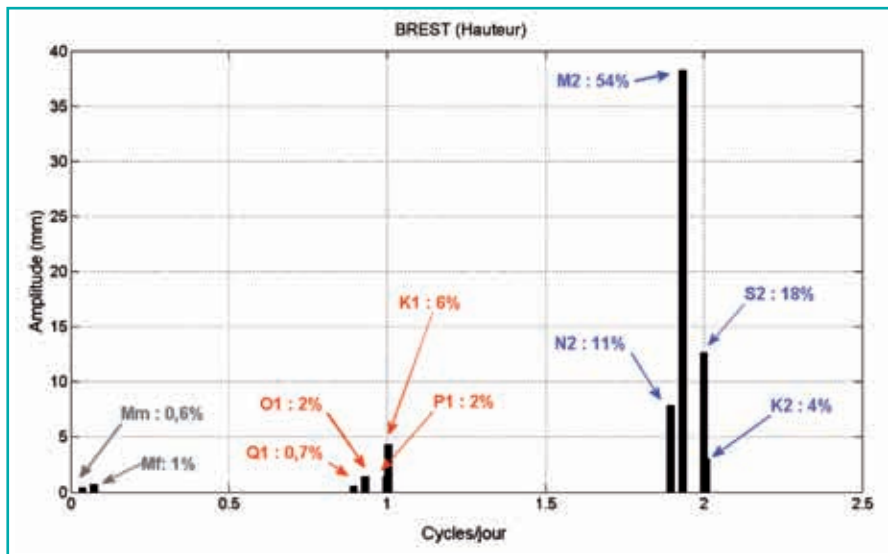


Figure 2. Amplitudes en mm et contribution en % des 11 ondes principales aux déplacements de hauteur de la zone de Brest dus à l'effet de surcharge océanique à Brest.

cher océanique et, par continuité, au niveau de la surface des terres émergées qui sont alors soumises à des déplacements.

Les potentiels perturbateurs sont fonction des caractéristiques orbitales (période, inclinaison, ascension droite du nœud ascendant...) des astres perturbateurs que sont la Lune et le Soleil (les autres planètes ayant un impact négligeable). Ainsi, il est d'usage de décomposer les effets de la marée océanique en différentes ondes représentatives des caractéristiques orbitales des astres perturbateurs. L'onde principale, responsable des mouvements de hauteur d'eau visibles depuis une plage, est liée à la période de révolution de la Lune autour de la Terre. Il s'agit de l'onde M2 ("M" pour Moon et "2" pour

sa fréquence semi-diurne). Par exemple, elle est responsable de près de 50% des hauteurs de marnage au port de Brest. Dix autres ondes contribuent avec M2 à environ 99% du marnage total, ce qui se répercute par l'effet de surcharge océanique sur la surface terrestre. La contribution respective de chacune de ces ondes aux déplacements de hauteur de la zone de Brest dus à l'effet de surcharge océanique, d'après le modèle de marée océanique FES2004 (Lyard et al, 2006), est présentée sur la figure 2. Les amplitudes des déplacements sont représentées en fonction de leur fréquence diurne.

Cependant, les paramètres géophysiques de la Terre et la configuration géométrique du littoral entraînent des variations spatiales des amplitudes des

déplacements. La figure 3 illustre les déplacements provoqués par l'onde M2 suivant les composantes locales Nord, Est et de hauteur, dans tout l'Ouest de la France, d'après le modèle FES2004. Les déplacements altimétriques possèdent des amplitudes de plusieurs cm alors que les déplacements planimétriques sont cinq fois plus faibles et de l'ordre du cm au maximum. Pour la composante Nord, les valeurs maximum sont localisées en Bretagne alors que pour la composante Est, elles sont localisées aux îles Jersey et Guernesey, ainsi que le long du littoral Atlantique entre les estuaires de la Loire et de la Garonne. Pour la composante de hauteur, les déplacements suivent un gradient orienté d'Est en Ouest.

En conséquence, les déplacements causés par la surcharge océanique, dans l'Ouest ne peuvent être négligés pour des applications géodésiques précises. Des modèles de surcharge comme FES2004 sont ainsi utilisés comme information *a priori* pour corriger les observations GPS et obtenir une position "stable". Cependant, le GPS peut servir *a contrario* d'outil géodésique pour observer et valider un modèle. Cela a déjà été réalisé dans le cadre d'une campagne multi-technique menée en 2004 (Llubes et al (2008), Melachroinos et al (2008) et Vergnolle et al (2008)). Cependant cette campagne d'une centaine de jours seulement localisée principalement sur la côte Nord de la Bretagne n'a pu qu'observer les premières ondes principales M2, S2, N2, K2, K1 et O1.

Grâce au développement du Réseau GNSS Permanent (RGP) et des réseaux temps réels TERIA, Orphéon et S@t-info, les observations par GPS de la surcharge océanique dans l'Ouest se sont étendues à la fois spatialement et temporellement. Chacune des ondes a pu être nettement mieux observée sur une surface géographique bien plus étendue. La figure 4 présente l'évolution du réseau de stations permanentes dans l'Ouest de 2006 à 2008. Toutes les stations présentes en 2008 ont été utilisées pour observer l'effet de surcharge océanique.

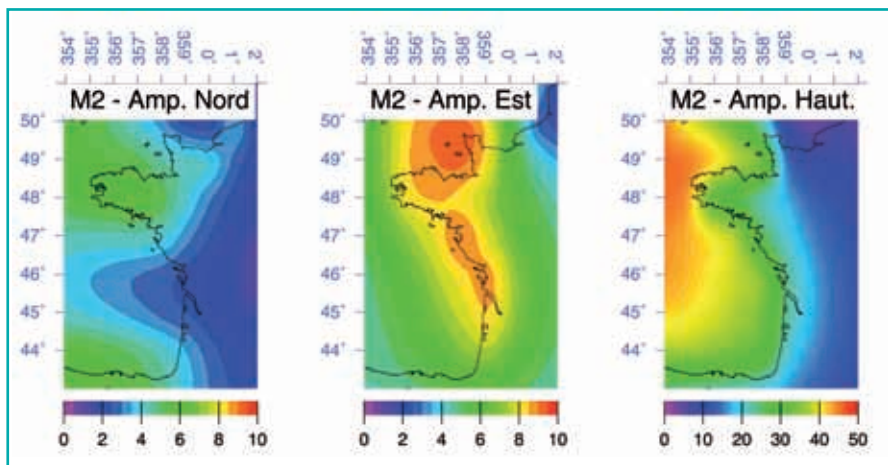


Figure 3. Amplitudes en mm des déplacements dus à la surcharge océanique causés par l'onde M2 dans l'Ouest de la France d'après le modèle FES2004.

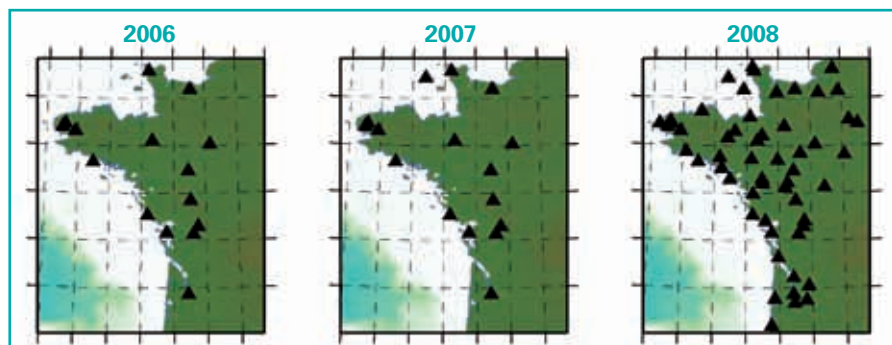


Figure 4. L'évolution du réseau de stations permanentes dans l'Ouest de 2006 à 2008.

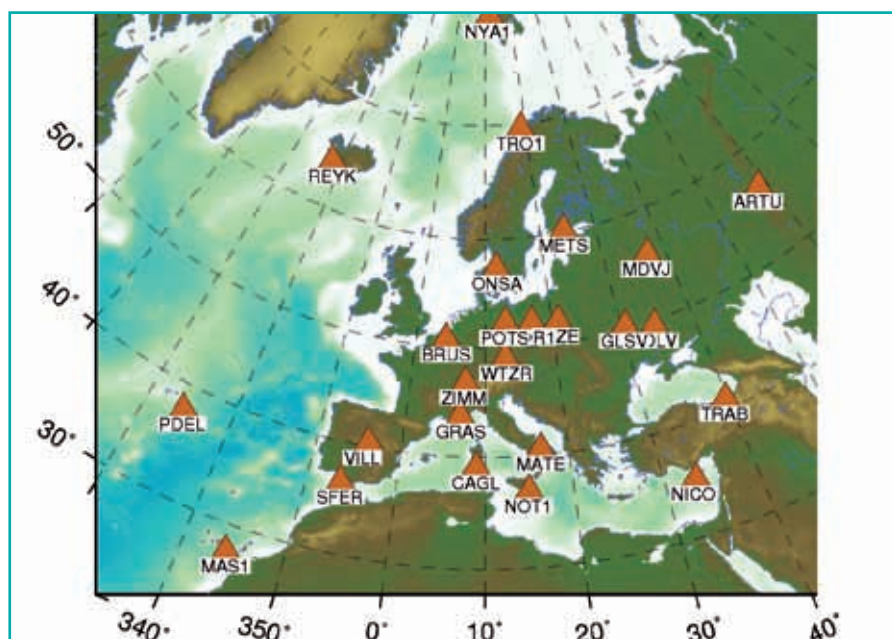


Figure 5. Le réseau de référence IGS utilisé pour rattacher le réseau de stations de l'Ouest de la France à l'ITRF.

Estimation par positionnement GPS

Les positions GPS des stations permanentes ont été calculées toutes les heures depuis la date de leur mise en place (automne 2007 à printemps 2008) et jusqu'à la fin de l'année 2008. Le logiciel GAMIT/GlobK (Herring et al, 2006) développé au MIT a été utilisé. Seules les stations ayant au moins 6 mois de données ont été retenues, soit 60 au total. Afin de rattacher ce réseau à un repère de référence géodésique stable (l'International Terrestrial Reference Frame 2005, ITRF 2005 ; Altamimi et al, 2007), un réseau européen de 25 stations de l'International GNSS Service, IGS ; Dow et al, 2005) a été utilisé (figure 5). A chaque calcul, seulement trois paramètres de translation ont été utilisés afin d'optimiser le ratta-

chement, et aucune pondération particulière n'a été employée lors de cette étape. Les observations GPS ont été corrigées de tous les déplacements hormis ceux causés par la surcharge océanique. Mais, les positions des stations du réseau de rattachement IGS ont été préalablement corrigées des effets de la surcharge avec le modèle FES2004 avant de procéder à l'estimation des paramètres de translation. Ceci dans le but de minimiser l'influence de la surcharge à l'échelle européenne au sein du réseau local de l'Ouest de la France. Les positions obtenues ont été uniquement comparées au modèle FES2004 car Melachroinos et al (2008) ont montré qu'il constitue le plus en adéquation aux déplacements de surcharge qui occurred dans l'Ouest.

Les séries temporelles ont fait l'objet d'une analyse spectrale afin d'évaluer

l'amplitude et le déphasage des ondes composant les déplacements observés. Dans un premier temps, les erreurs moyennes quadratiques (EMQ) des écarts entre les ondes observées avec les ondes prédites ont été calculées avec l'ensemble des 60 stations de l'Ouest. L'équation (1) présente la formule utilisée et les résultats pour les 10 premières ondes principales sont tracés sur la figure 6.

$$RMS_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (A_{i,GPS} \cos(\Phi_{i,GPS}) - A_{i,FES2004} \cos(\Phi_{i,FES2004}))^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

avec :

- $A_{i,GPS}$ et $\Phi_{i,GPS}$ l'amplitude et le déphasage de l'onde observés à partir des séries temporelles de positions GPS à la station i
- $A_{i,FES2004}$ et $\Phi_{i,FES2004}$ l'amplitude et le déphasage de l'onde d'après le modèle FES2004 à la station i

Les EMQ les plus élevées sont atteintes pour les ondes K1 et K2, et ce pour les trois directions Nord, Est et hauteur. Suivant la composante de hauteur, ils sont de l'ordre de 2 mm ce qui est cohérent avec les résultats de Melachroinos et al (2008) et Vergnolle et al (2008). Ceci est lié au phénomène de multitrajet dont la fréquence (égale à la période de révolution des satellites GPS) est extrêmement proche de celle de l'onde K1. Ce phénomène se propage alors à toutes les fréquences multiples d'un entier à la fréquence de K1, comme K2. Les autres EMQ importantes sont atteintes pour les ondes M2 et S2. Suivant la même composante de hauteur, ils sont de l'ordre du millimètre. Enfin, toutes les autres ondes présentent des EMQ de quelques dixièmes de millimètres. Il faut néanmoins souligner que les amplitudes de ces ondes dans l'Ouest sont du même ordre de grandeur, si bien que l'estimation de leurs amplitudes avec le GPS semble compromise, car elles sont en deçà de la précision des signaux de phase GPS (2 mm environ). Les valeurs des EMQ montrent seulement que les écarts ne sont pas biaisés et que le modèle semble correct dans l'Ouest, en moyenne sur l'ensemble du réseau.

Afin de mieux comprendre ces EMQ, trois exemples de cartes des écarts d'amplitude et de phase entre les ondes observées et prédites sont présentées



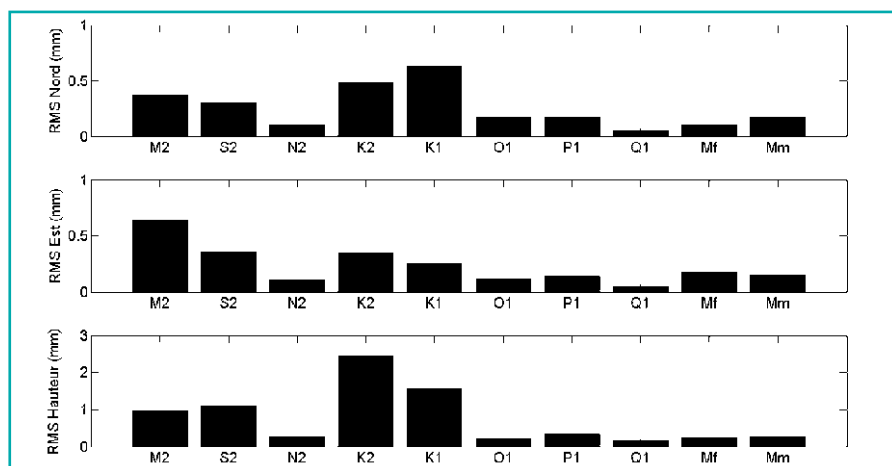


Figure 6. EMQ en mm des écarts entre les ondes observées par GPS avec les ondes prédites par le modèle FES2004. Calculs réalisés avec l'ensemble des 60 stations de l'Ouest.

sur les figures 7, 8 et 9. Il s'agit respectivement des ondes M2 et K1 suivant la composante de hauteur et l'onde O1 suivant la composante Nord.

La carte des résultats de K1 (figure 7) montre une absence de cohérence entre les résultats observés. Les écarts d'amplitudes et de déphasages observés

sont hétérogènes. Les effets de multitrajets sont en effet fonction de l'environnement local d'un site GPS, ce qui explique en partie cette hétérogénéité. L'évaluation des ondes K par GPS reste donc un problème majeur d'autant plus que ces ondes ont des amplitudes d'environ 3 à 5 mm suivant la hauteur.

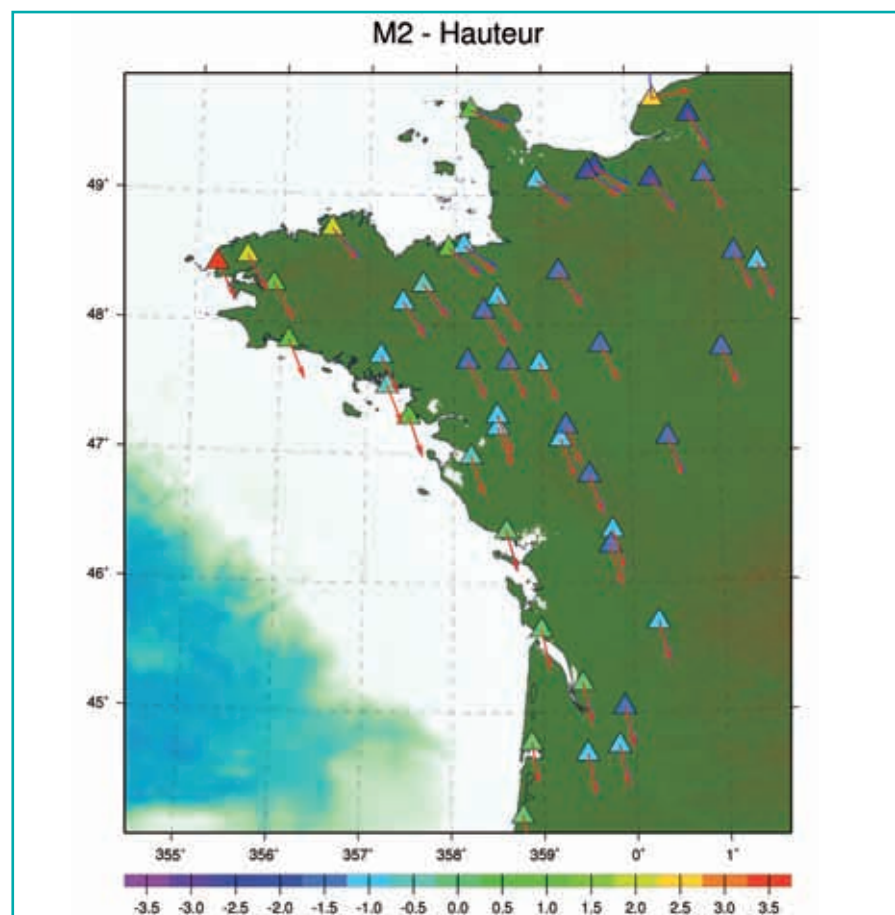


Figure 7. Ecart d'amplitudes en mm entre les observations et le modèle FES2004 (triangles), déphasages observés (flèches bleues) et déphasages prédits par FES2004 (flèches rouges). Résultats pour l'onde M2 suivant la composante de hauteur.

Les résultats de M2 (figure 8) présentent une excellente cohérence en termes de déphasage avec seulement quelques degrés. Par contre, les écarts d'amplitudes dépendent du lieu considéré avec un maximum localisé à la pointe du Finistère (2 à 4 mm). Sur les côtes de la Basse-Normandie, les écarts sont au contraire négatifs (-2 mm maximum), montrant que le modèle FES2004 surestime les amplitudes de l'onde M2. Les observations de l'onde M2 sur l'ensemble du reste du territoire sont cohérentes avec le modèle FES2004, à 1-2 mm près. Seule particularité, la façade Atlantique où les écarts d'amplitude sont quasi nuls, suggérant la qualité du modèle FES2004 sur cette frange du littoral. D'une manière générale, un gradient d'erreur orienté d'Est en Ouest est visible. Ce gradient est colinéaire au gradient des amplitudes décrites par le modèle (figure 3). Excepté en Basse-Normandie, les observations GPS suggèrent que le modèle sous-estime les amplitudes de l'onde M2, et ce en adéquation avec l'amplitude du phénomène. Plus l'amplitude du déplacement est forte et plus l'écart d'amplitude est élevé.

L'observation des ondes diurnes est plus délicate en raison de leur très faible amplitude dans la région. Cependant, les résultats GPS pour l'onde O1 (figure 9) révèlent une cohérence spatiale des déphasages. Les écarts de déphasage pour la composante Nord sont en quadrature avec les déphasages du modèle. Ce résultat est néanmoins à relativiser du fait de la difficulté à estimer des amplitudes si faibles. Ce résultat peut être dû à la mauvaise observation des amplitudes. Or il est d'autant plus difficile d'estimer la phase d'un signal que son amplitude est faible. Des recherches restent à mener dans ce sens. Il est nécessaire de valider ces observations dans le cadre d'un traitement GPS classique où les observations GPS sont corrigées de la surcharge océanique (Penna et al 2007).

Impacts des corrections troposphériques

Dans un précédent article sur les corrections troposphériques (XYZ

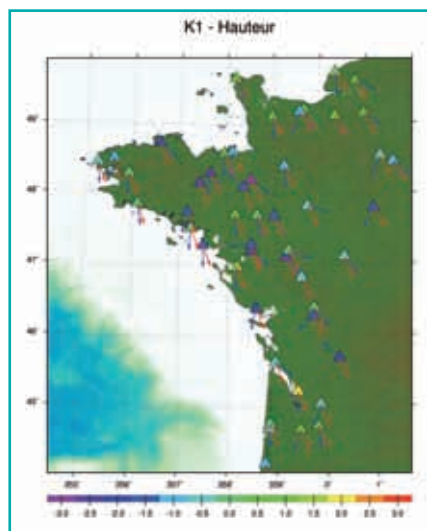


Figure 8. Idem que la figure 7 pour l'onde K1 suivant la composante de hauteur.

n°123), les impacts du choix du modèle troposphérique utilisé dans le traitement précis d'un réseau GPS ont été présentés. Ici, les Vienna Zenith Hydrostatic Delays (VZHD) et les Vienna Mapping Functions 1 (VMF1) ont été utilisés (Boehm et al, 2004 et 2006b) car ils traduisent les effets troposphériques avec une période de 6 h et permettent d'obtenir les plus faibles répétabilités sur les séries temporelles. Ils représentent donc les produits les plus réalistes existants.

Utiliser des modèles empiriques qui ne développent que les variations annuelles des paramètres troposphériques ne permet pas de tenir compte des variations diurnes, voire semi-diurnes des effets troposphériques. Le choix du modèle troposphérique et les impacts sur les estimations des ondes de surcharge ont été étudiés avec un sous-réseau de stations GPS de l'Ouest de la France (présentes en 2006, principalement les stations du RGP). Ces stations permettent d'observer les satellites GPS jusqu'à un angle d'élévation de 5°. Les stations des nouveaux réseaux permanents temps réel sont limitées à 10° (à cause des modèles de correction d'antenne) et les modèles troposphériques ne présentent pas de différences significatives jusqu'à cet angle. A l'aide de 6 ans de données (2003-2008), les différences entre la solution utilisant les modèles empiriques GPT et GMF (Boehm et al 2006a et 2007) et la solution utilisant les produits VZHD+VMF1

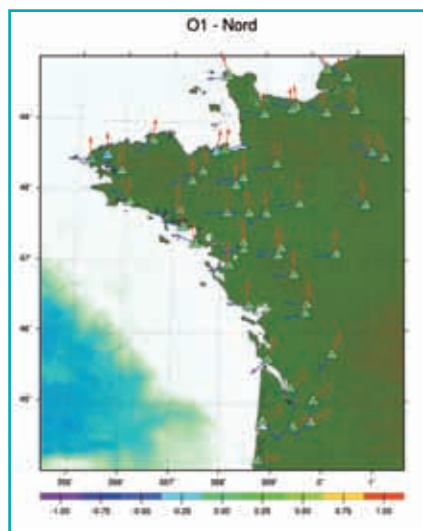


Figure 9. Idem que la figure 7 pour l'onde O1 suivant la composante Nord.

ont été évaluées. Les EMQ de ces écarts sont présentés sur la figure 10.

Des écarts de EMQ significatifs apparaissent pour les ondes "longues" Mf, Mm et SSA. Ces écarts sont les plus importants sur la composante de hauteur, à près de 0,5 mm. Ces ondes sont causées respectivement par la demi-période et la période complète de révolution de la Lune (~13 jours et ~27 jours) et la demi-période de révolution de la Terre autour du soleil (~182 jours). Ces résultats indiquent qu'au-delà du lissage des variations diurnes des effets troposphériques, GPT et GMF lissent aussi les variations météorologiques à l'échelle dite synoptique (période des événements climatiques, ~14 jours). Ils montrent également que

les amplitudes des variations semi-annuelles des paramètres troposphériques ne sont pas négligeables. Dans l'Ouest de la France, les amplitudes des termes semi-annuels contenues dans les séries de la composante hydrostatique de la VMF1 sont de 1 mm environ, en terme d'erreur sur l'estimation de la hauteur.

Le second résultat de cette étude est l'absence d'impact des modèles troposphériques sur les observations des ondes diurnes et semi-diurnes. Dans l'Ouest, les amplitudes contenues dans les séries des VZHD et des VMF1 sont en effet très faibles. Cependant ce résultat est propre à la région étudiée. Dans des régions plus continentales (centre de l'Afrique, Amérique du Nord, Australie...) les amplitudes des termes diurnes sont plus importants et devraient avoir un impact plus important sur l'observation des ondes hautes fréquences de la surcharge.

Conclusion

Les nouveaux réseaux GPS permanents permettent, de par leur densité, de réaliser des études scientifiques précises. Cette première application aux effets de la surcharge océanique a permis de confirmer des résultats d'autres études scientifiques et de les étendre à la quasi-totalité du spectre des déplacements. En effet, grâce à la quantité des données accumulées par ces réseaux, toutes les ondes

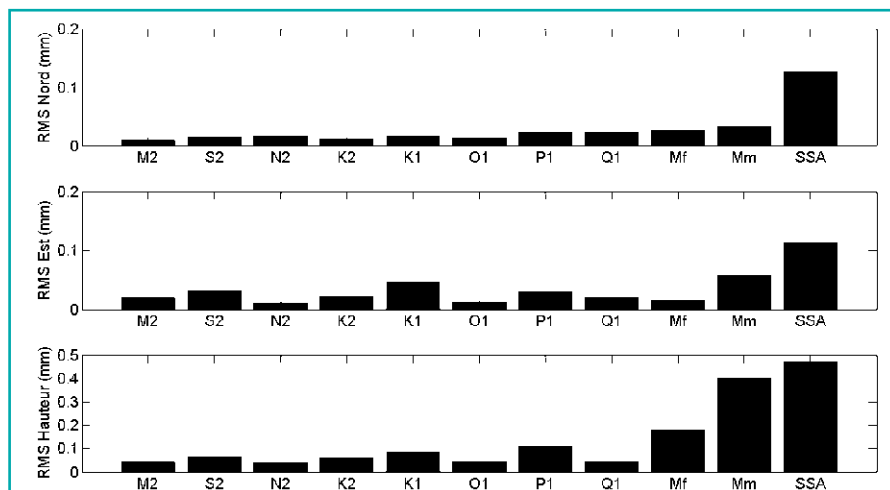


Figure 10. EMQ des écarts en mm entre la solution utilisant les modèles empiriques GPT et GMF et la solution utilisant les produits VZHD+VMF1.



principales diurnes et semi-diurnes ont pu être séparées et les déplacements à grande longueur d'onde causés par les périodes de révolution des orbites terrestres et lunaires ont pu être observés.

Les résultats indiquent que l'onde principale M2 reste globalement sous-estimée par le modèle FES2004 à hauteur de 2-4 mm sur la composante de hauteur dans la région du Finistère, zone où les déplacements occasionnés sont les plus importants. Pour les ondes diurnes, les observations présentent des biais de phase cohérents sur l'ensemble du réseau. Mais, ces résultats restent à valider et, pour réduire les phénomènes de multitrajets, des recherches doivent être menées afin d'optimiser l'observation des ondes K. A propos des ondes longues, le choix du modèle troposphérique n'est pas sans conséquence, et la qualité du modèle utilisé est un paramètre important pour l'observation de ces ondes. Les variations climatiques à l'échelle synoptique et à la période semi-annuelle sont en effet à considérer dans l'Ouest de la France. ●

Contacts

François FUND est ingénieur ESGT et a soutenu sa thèse en géophysique (spécialité géodésie) le 18 décembre 2009 à l'ESGT au Mans. Il mène actuellement des activités de recherche sur le Positionnement GPS Ponctuel Précis (PPP) à haute fréquence à l'observatoire Dynamique Terrestre et Planétaire de l'Observatoire Midi-Pyrénées à Toulouse (UMR 5562) dans le cadre d'un contrat CNES/INSU.
francois.fund@ntp.obs-mip.fr

Laurent MOREL est maître de conférence en géodésie à l'ESGT et chercheur du Laboratoire de Géodésie et Géomatique de l'ESGT (JE 2508).
laurent.morel@esgt.cnam.fr

Antoine MOCQUET est professeur et directeur de l'équipe de géophysique du Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de l'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Nantes (UMR 6112).
antoine.mocquet@univ-nantes.fr

Références

- ALTAMIMI, Z., X. COLLILIEUX, J. LEGRAND, B. GARAYT, C. BOUCHER (2007)** *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters*, J. Geophys. Res., 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- BOEHM, J. AND H. SCHUH (2004)** *Vienna mapping functions in VLBI analyses*, Geophys. Res. Lett., 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984.
- BOEHM, J., A. NIELL, P. TREGONING, H. SCHUH (2006a)** *Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data*, Geophys. Res. Lett., 33, L07304, doi: 10.1029/2005GL025546.
- BOEHM, J., B. WERL, H. SCHUH (2006B)** *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Center for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*, J. Geophys. Res., 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629.
- BOEHM, J., R. HEINKELMANN, H. SCHUH (2007)** *Short Note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications*, J. Geod., doi: 10.1007/s00190-007-0135-3.
- DOW J., R. NEILAN, G. GENDT (2005)** *The International GPS Service (IGS): celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade*, Adv Space Res 36(3):320-326. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125.
- HERRING, T.A., R.W. KING, S.C. MCKLUSKY (2006)** *Reference manual for the GAMIT GPS software*, release, 10.3., Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Boston, U.S.A., 182 pp.
- Muriel LLUBES, Nicolas FLORSCH, Jean-Paul BOY, Martine AMALVICT, Pascal BONNEFOND, Marie-Noëlle BOUIN, Stéphane DURAND, Marie-France ESNOUT, Pierre EXERTIER, Jacques HINDERER, Marie-Françoise LALANCETTE, Frédéric MASSON, Laurent MOREL, Joëlle NICOLAS, Mathilde VERGNOLLE, Guy WÖPPELMANN.** *Multi-technique monitoring of ocean tide loading in northern France*, C.R. Geoscience, Volume 340, pp 379-389, 2008.
- Florent LYARD, Fabien LEFEVRE, Thierry LETELLIER and Olivier FRANCIS (2006)** *Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004*. Ocean Dynamics, volume 56.

- MELACHROINOS A.E., R. BIANCALE, M. LLUBES, F. PEROSANZ, F. LYARD, M. VERGNOLLE, M.-N. BOUIN, F. MASSON, J. NICOLAS, L. MOREL, S. DURAND (2008)** *Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France*, J. Geod., doi: 10.1007/s00190-007-0185-6.
- PENNA N.T., M.A. KING, P. MOORE, D.A. LAVALLÉE (2007)** *GPS height time series: Short-period origins spur long-period signals*. J. Geophys. Res., 112, B02402, doi: 10.1029/2005JB004047.
- SIMON B. (2007)** *La marée: la marée océanique côtière*, Ed. Institut océanographique, Fondation Albert 1^{er}, prince de Monaco, 433 pp.
- VERGNOLLE M., M.-N. BOUIN, L. MOREL, F. MASSON, S. DURAND, J. NICOLAS, S.A. MELACHROINOS (2008)** *GPS estimates of ocean tide loading in NW-France: determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model*, Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03734.x.

ABSTRACT

Ocean Tide Loading displacements in the West of France are among the largest in the world. In order to contribute to the improvement of tidal models for GPS processing, we estimate ocean tides in this area with static GPS. Observations recorded over at least 1.5 years are used from ~60 stations with typical separation distances of 50-80 km. Previous studies showed the consistency of the FES2004 model of OTL displacements with GPS estimates of the main semi-diurnal tides in the North of Brittany. We extend this study over a larger spatial scale and investigate the 10 main tides. Thanks to the density of our network, local differences between OTL displacements observed by GPS and the FES2004 model derived OTL displacements are identified. Preliminary results about the impact of using current annual empirical tropospheric models instead of 6h-period data derived from ECMWF data and provided by TU Vienna are also presented.