

Apport de la gravimétrie absolue à l'estimation du niveau des mers

■ Marie-Françoise LEQUENTREC-LALANCETTE

La mesure et l'étude de la variation du niveau de la mer en zone côtière sont un enjeu scientifique et sociétal majeur. Les mesures marégraphiques montrent des tendances de quelques millimètres par an et doivent être associées à des mesures géodésiques permettant de séparer le signal du niveau de la mer du mouvement vertical continental. Il a été montré que le couplage de mesures GNSS et de gravimétrie absolue améliore la compréhension des signaux marégraphiques. Cet article décrit la méthodologie de mise en œuvre des mesures absolues ainsi que les résultats majeurs obtenus par des équipes internationales. Un bilan des mesures réalisées sur certains marégraphes métropolitains est décrit, ainsi que les perspectives nationales sur l'apport de la technologie quantique (gravimètre à atomes froids et géodésie chronométrique).

MOTS-CLÉS

Niveau de la mer, marégraphie, gravimétrie absolue, GNSS, marégraphe, pesanteur

Introduction

Le champ de pesanteur ou "la pesanteur" est un paramètre essentiel pour la compréhension de la physique de la Terre ainsi que de ses interactions avec les masses externes. Il intéresse à la fois les géodésiens pour la détermination de la forme de la Terre, les géophysiciens ainsi que les hydrologues pour la connaissance de la répartition des masses du sous-sol et en particulier des bilans de transfert de masses d'eau. En outre, les variations temporelles de la pesanteur de faible amplitude dues à l'hydrologie, l'atmosphère, l'océan sont de mieux en mieux étudiées pour deux raisons :

- la mission satellitaire GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), lancée en mars 2002, a montré des résultats exceptionnels (Wahr et al., 2004 ; Andersen and Hinderer, 2005 ; Frappart and Ramillien, 2018) avec la réalisation de modèles hydrologiques continentaux très précis ;
- la commercialisation des capteurs gravimétriques absolus à partir des années 90 pouvant atteindre des précisions de l'ordre de 10^{-8} m/s² soit 1 μ Gal (Niebauer et al., 1995 ;

Faller, 2002 ; Van Camp et al., 2005 ; Hinderer et al., 1991).

L'intérêt de mesures gravimétriques précises proches d'un site marégraphique a été démontré dans les années 90. Le rapport fondateur fut celui rédigé sous l'égide de l'Association internationale pour la physique des océans (IAPSO) qui présentait les recommandations sur les techniques de géodésie à mettre en œuvre aux marégraphes. Il était préconisé d'instrumenter les sites, en particulier par des techniques de géodésie géométrique GNSS et aussi par des mesures intégratives de gravimétrie (Carter et al., 1989).

La variation du niveau de la mer observée aux marégraphes est comprise entre 1 et 2 mm/an sur des durées d'observation supérieures à la centaine d'années (Wöppelmann et Marcos, 2016). Les amplitudes des mouvements verticaux sont à peu près du même ordre de grandeur, ce qui complexifie la séparation des signaux. Il est nécessaire d'observer très précisément les tendances du mouvement vertical côtier.

Sous l'impulsion de la COI (Commission océanographique intergouvernementale

de l'UNESCO), des observations satellitaires du mouvement du sol (GPS, puis GNSS) ont été associées quasi systématiquement aux sites marégraphiques d'intérêt (IOC, 1999 ; Poitevin et al., 2019), construisant ainsi des réseaux de stations permanentes d'observations satellitaires (CGPS ; Carter et al., 1994). En France, la plupart des sites marégraphiques instrumentés par le Shom dans le cadre du réseau RONIM (Réseau d'observation du niveau de la mer), sont désormais équipés d'une station permanente GNSS incluse dans le Réseau GNSS permanent (RGP) intégré à SONEL (www.sonel.org) dans le cadre du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS).

Il est maintenant admis que selon les protocoles de calcul GNSS développés dans les équipes scientifiques et l'influence d'effets environnementaux mal corrigés comme les effets troposphériques (Wöppelmann et Marcos, 2016 ; Teferle et al., 2009), les solutions GNSS peuvent différer pour un même observatoire. La mesure de gravimétrie absolue présente alors un intérêt en tant qu'observable indépendant, car les variations du champ de pesanteur intègrent l'ensemble des variations de masses, dont le mouvement vertical. L'océan, l'hydrosphère et la Terre solide sont autant de sources potentielles de variations de la pesanteur terrestre (Lambert et al., 2006). Les mesures gravimétriques sont aussi indépendantes du système de référence terrestre, contrairement au GNSS (Mazzoti et al., 2007 ; Collilieux et Wöppelmann, 2011 ; Ophaug et al., 2016) .

La problématique en gravimétrie est la suivante : il s'agit d'estimer des tendances de variations de la pesanteur de l'ordre de 10^{-8} m/s² soit 1 μ Gal : un déplacement vertical de 1 mm induisant une variation de pesanteur



de 0,2 μGal (Williams et al., 2001 ; Van Camp et al., 2005 ; De Linage et al., 2007).

Les gravimètres répondant aux spécifications de mesures sont les gravimètres balistiques développés par la société *Microg Solutions*. Ce sont les instruments de terrain (c'est-à-dire transportables) les plus précis pour ce type d'application (Niebauer et al., 1995 ; Faller, 2002).

Les mesures de gravimétrie absolue n'ont pas été systématisées aussi rapidement que le GNSS à cause de la complexité de leur mise en œuvre, notamment instrumentale et logistique. En effet, ces capteurs ne peuvent être opérés en mode automatique et la fatigue mécanique de certains composants implique une contrainte forte sur une acquisition permanente des mesures en station (Van Camp et al., 2005). Les différentes observations côtières en gravimétrie absolue consistent à revisiter régulièrement des points remarquables.

Effet environnemental	Correction	Source
Pression atmosphérique	Normalisation de l'observable à une pression nominale pour chaque station.	Mesure sur site de la pression atmosphérique et correction avec un facteur : 0,3 $\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (Boy et al., 1998)
Mouvement du pôle	Accélération centrifuge qui varie en fonction de la distance entre la station et l'axe de rotation de la Terre.	Coordonnées calculées par l'IERS (<i>Earth Rotation and Reference Systems Service</i>) et mises en ligne sur le site du constructeur : Microg solutions (Petit et al., 2010)
Correction de la marée terrestre	Attraction luni-solaire.	Modèle ETGTAB intégré à g9 (Wenzel et al., 2022).
Surcharge océanique	Attraction générée par le mouvement des masses d'eau.	Modèles mondiaux ou calculés à partir de données de station.

Table 1. Effets environnementaux majeurs pris en compte dans le calcul de la pesanteur absolue.

La mesure FG5

La mesure est basée sur le principe de la chute libre d'une masse d'épreuve dans une enceinte à vide mesurée par

interférométrie laser (figure 1). Dans le cas des gravimètres FG5, la masse consiste en un réflecteur en coin de cube formant un des bras de l'interféromètre et une horloge atomique

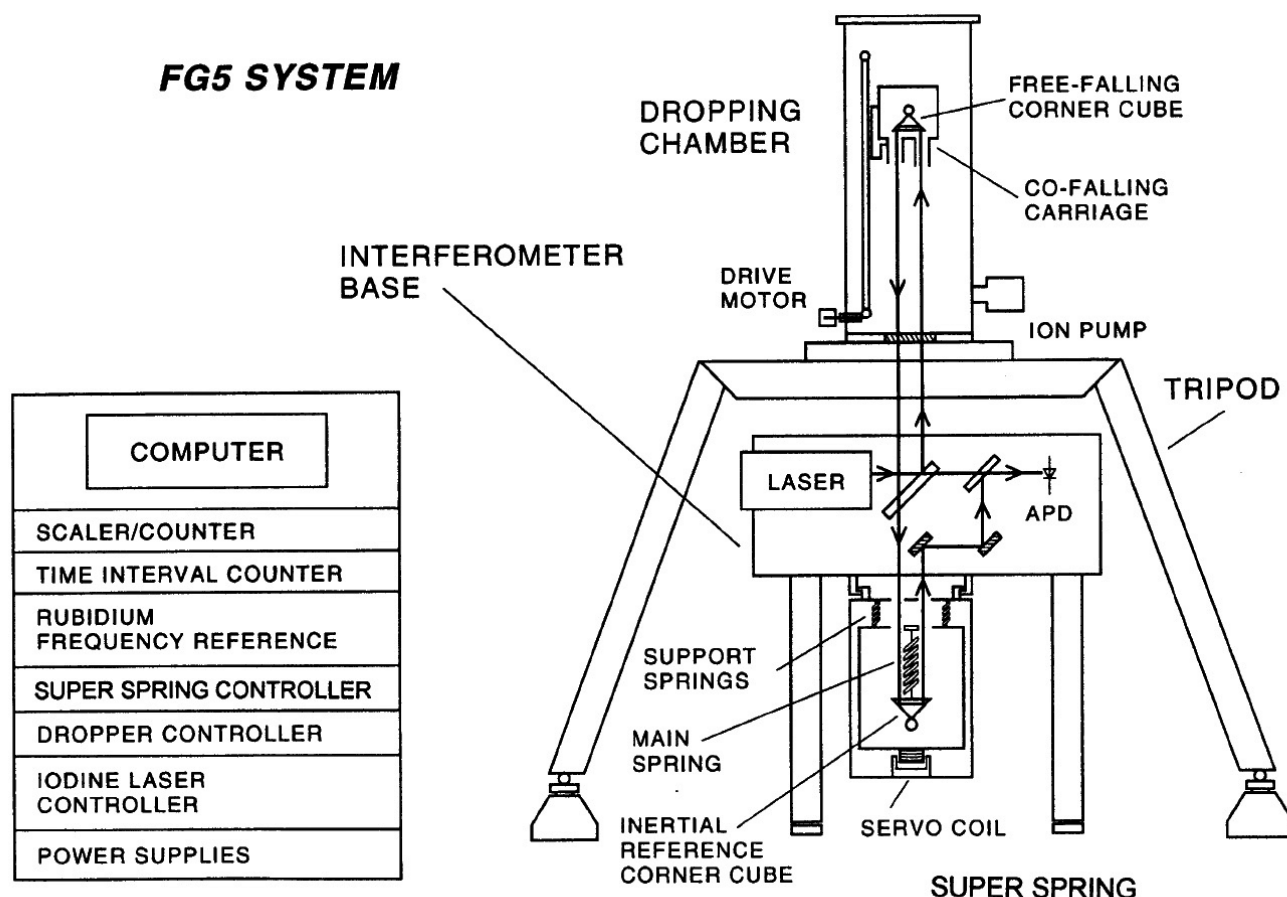


Figure 1. Principe du gravimètre absolu FG5 (Niebauer et al., 1995).



au rubidium permettant d'obtenir le temps et la distance et d'estimer l'accélération. La pesanteur est ainsi calculée à partir de l'équation du mouvement de Newton (Niebauer et al., 1995). Le système est aussi équipé d'un *Super Spring* (sismomètre longue période) pour filtrer une partie du bruit, comme l'effet de la houle à proximité des côtes (Williams et al., 2001). La pesanteur moyenne est obtenue en tenant compte du gradient vertical local, qu'il est donc nécessaire de calculer avant la mise en place du gravimètre absolu en station.

Les mesures sont généralement réalisées sur plusieurs jours à raison d'une série (*set*) par heure. Le traitement des mesures est effectué à l'aide du logiciel g9 développé par le constructeur. Ce logiciel permet, outre de régler les paramètres d'acquisition, de prendre en compte certains effets environnementaux.

L'estimation de l'erreur est calculée en combinant les erreurs instrumentales et l'erreur statistique du nombre de chutes, ainsi que l'erreur de mesure du gradient vertical (Niebauer, 1995 ; Williams, 2001 ; Ophaug et al., 2016). Pour cette dernière, il est ainsi recommandé que les mesures soient recalculées à une hauteur moyenne correspondant à la position dans la chambre de chute pour laquelle la mesure est le moins influencée par l'incertitude du gradient. Les données sont alors corrigées des effets environnementaux majeurs (*table 1*). Localement ces modèles sont perfectibles et il est ainsi recommandé de compléter les observations avec des mesures gravimétriques relatives précises en station permanente (gravimètre supraconducteur ou autre) pour améliorer les modèles locaux (Van Camp et al., 2005). C'est ce qui a été fait pour la station de Brest (*figure 2*).

Aucun capteur n'est plus précis qu'un gravimètre balistique FG5, l'estimation de l'exactitude de la mesure en devient complexe. Des campagnes d'intercomparaison sont donc réalisées régulièrement pour estimer les biais entre les différents capteurs existants (voir par exemple, Francis et al., 2005 ; Jiang et al., 2011). La

problématique de telles campagnes est de définir un protocole de mesure adapté, sachant que la difficulté est la prise en compte des variations temporelles de la pesanteur aux différents points de mesures (De Viron et al., 2011).

On notera qu'une des recommandations pour la réalisation de mesures de haute précision est finalement de n'utiliser qu'un seul capteur FG5 pour un observatoire (Van Camp et al., 2005).

Résultats majeurs à l'international

L'estimation du mouvement vertical sur les sites marégraphiques doit se faire avec une précision telle qu'il faudrait une durée d'observation d'un FG5 comprise entre 14 et 24 ans avec une mesure par an pour estimer une variation de pesanteur avec une précision de $0,1 \mu\text{Gal/an}$ soit $0,5 \text{ mm/an}$ (Van Camp et al., 2005). Avec les limites instrumentales précédemment évoquées, ceci nécessite de bien contraindre les effets environnementaux sur la mesure gravimétrique.

En mer Adriatique, une série de campagnes d'observation a été initiée en 1998, couplant plusieurs méthodes géodésiques dont l'acquisition GNSS et un gravimètre absolu sur des sites marégraphiques à raison de 15 mesures absolues sur sept ans (Zerbini et al., 2017). Les auteurs utilisent un gravimètre relatif supraconducteur en parallèle pour estimer les variations temporelles entre chaque visite. Ils démontrent ainsi l'influence de la composante océanique interannuel sur les mesures gravimétriques côtières. Ce point est aussi mentionné par (Lambert et al., 2006) qui souligne l'importance du signal interannuel dans les mesures gravimétriques à environ une période de sept ans, à prendre en compte pour ne pas biaiser les interprétations sur les tendances à long terme.

Dans le Pacifique Nord-Est, à l'ouest de la zone de subduction Cascadia, la surrection crustale (soulèvement progressif d'une portion de l'écorce terrestre) a été étudiée en combinant

les données GNSS et de gravimétrie absolue à des sites marégraphiques (Mazzoti et al., 2007). Les auteurs montrent dans ce cas la nécessité de modéliser plus précisément les effets géodynamiques impactant la valeur de la pesanteur dans ce contexte de zone subduction, pour isoler la composante due au mouvement vertical.

Au Royaume-Uni, des mesures absolues ont été réalisées avec un gravimètre FG5 sur trois marégraphes en Cornouaille, en Écosse et aux Îles Shetlands (Williams et al., 2001). Deux stations, Lerwick et Newlyn, ont été conservées pour une détermination de la hausse du niveau de la mer dans les îles britanniques. Une campagne de mesures par an y a été faite sur une durée totale de neuf ans entre 1995 et 2004. Les auteurs montrent l'apport non négligeable des mesures de pesanteur en complément du GNSS. Les solutions du CGPS sont systématiquement biaisées par rapport aux analyses gravimétriques ou géologiques (Teferle et al., 2009). Une des raisons avancées par les auteurs est le rattachement à l'ITRF2000 dont le centre de masse déterminé par les données des stations laser diffère de celui du système régional CGPS et du centre de masse terrestre. Dans ce cas, la gravimétrie absolue est un moyen de quantifier et corriger les biais du CGPS. La hausse du niveau de la mer dans les îles britanniques est ainsi estimée entre $0,6 \text{ mm/an}$ et $1,9 \text{ mm/an}$ suivant les stations CGPS choisies pour le calcul. Ce résultat est encore entaché d'erreurs par manque d'échantillonnage et devrait être amélioré au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données GNSS et de gravimétrie absolue.

Les projets nationaux

En France, les expérimentations de gravimétrie absolue aux sites marégraphiques ont été rendues possible par l'acquisition de deux capteurs FG5 de la société Microg solutions par la communauté scientifique française à partir de 1997 (FG5#206 et FG5#228). Le premier, opéré par l'EOST (École et observatoire des sciences de la Terre de



Figure 2. Station gravimétrique Brest-Shom.

Strasbourg) et le deuxième, opéré par l'équipe de Géosciences de l'université de Montpellier.

En 1998, une station gravimétrique a été créée sur le site du Shom à Brest, à quelques kilomètres du marégraphe et de la station permanente RGP (figure 2).

Les premières années d'observation à Brest ont permis de réaliser des études complètes de la surcharge océanique (Llubes et al., 2001 ; Vey et al., 2002 ; Llubes et al., 2008) et d'appréhender les effets environnementaux liés à la proximité de l'océan. Le mouvement des masses d'eau lié à la marée océanique génère une flexure de la croûte et induit une redistribution des masses océaniques dans les zones littorales. Cela peut affecter la valeur de la pesanteur de quelques dizaines de μGal . Il a été montré la parfaite cohérence entre le signal de marée et le signal gravimétrique. À la pointe de la Bretagne, les amplitudes de marée peuvent être



Figure 3. Mesures de gravimétrie absolue avec un FG5 au marégraphe de Marseille.



fortes et le signal de surcharge océanique local est d'environ 16 % plus fort que celui prédit par les modèles (Llubes et al., 2001). Un gravimètre relatif CG3M a ainsi été mis en station permanente entre 2003 et 2004 pour modéliser plus précisément l'effet de cette surcharge afin de corriger la mesure absolue.

Puis, des mesures périodiques ont été mises en place et pour chaque campagne à partir de 2001, un protocole identique a été suivi, comprenant un set par heure consistant en une centaine de chutes espacées de 10 secondes. Il a été important de prévoir ces mesures pendant au moins 48 h selon les conditions atmosphériques pour obtenir un signal exploitable. En effet, le bruit résiduel océanique et barométrique est très fort après filtrage et correction dans les conditions de tempêtes saisonnières.

Un total de 19 campagnes de mesures a été réalisé depuis 1998. Les données de gravimétrie absolue sont en cours de publication.

En parallèle, des points étaient réalisés aux marégraphes de Marseille (*figure 3*) et, plus récemment, depuis 2006, près du marégraphe de La Rochelle et à l'île d'Aix. La périodicité de revisite de ces points est encore trop faible pour une interprétation statistique acceptable.

Perspectives

À l'avenir, le développement de la gravimétrie quantique, éliminant l'aspect mécanique de la chute libre d'un coin de cube, permettra de réaliser des mesures en continu. Cette technologie est déjà mature pour des capteurs absolus de terrain en mer (Bidel et al., 2018), en aéroporté (Bidel et al., 2023) et à terre (Ménoret et al., 2018 ; Vu et al., 2023). Elle devra être testée sur les sites marégraphiques déjà instrumentés.

À plus long terme, l'utilisation d'horloges atomiques transportables, reliées par fibres optiques, permettra d'avoir accès au potentiel de pesanteur (Delva et al., 2019 ; Lion et al., 2017) : c'est le domaine de la géodésie chronométrique. En France, plusieurs initiatives sont en cours : le projet Equipex T-REFIMEVE (Réseau fibré métrologique à vocation européenne ; <https://www.refimeve.fr>),

coordonné par l'Université Sorbonne Paris-Nord et piloté par le Laboratoire de physique des lasers (LPL) et le SYRTE. Ce réseau permet le transfert longue distance d'une fréquence optique ultra stable sur un réseau internet. Il devrait être abouti en 2029 pour la ligne Paris Brest. En parallèle, se développe un projet de réalisation d'une horloge atomique portable. L'ANR ROYMAGE (hoRloge Optique à Ytterbium Mobile Appliquée à l'exploration GÉodésique) devra aboutir d'ici quelques années à la réalisation d'une horloge transportable pouvant être déployée le long du réseau (Lisdat, et al., 2016 ; Rahmouni et al., 2023).

Conclusions

Les mesures balistiques de gravimétrie absolue sont des compléments essentiels aux mesures géométriques de types GNSS pour une meilleure estimation des mouvements verticaux en zone côtière. Ces mesures ne sont pas reliées à un système de référence et intègrent l'ensemble des variations des masses. C'est aussi leur point faible, car il faut modéliser les effets gravimétriques de l'environnement aux stations marégraphiques sachant que les zones côtières sont le siège d'échanges hydrologique, atmosphérique et géodynamique important. La mise en œuvre des mesures reste le point dur dans le maintien d'un observatoire permanent. Les expériences nationales aux sites marégraphiques sont en cours de publication pour Brest et devront être poursuivies aussi pour les trois sites complémentaires (Marseille, La Rochelle, Île d'Aix) pour mieux estimer la hausse relative du niveau de la mer sur les zones côtières métropolitaines. Enfin, les nouvelles technologies quantiques permettront, à terme, d'améliorer l'estimation des mouvements verticaux. ●

Contact

Marie-Françoise Lequentrec-Lalancette
lalancette@shom.fr
Géophysicienne, ex-directrice Recherche et Innovation du Shom - chercheuse associée UMR 6538 Geo-Océan - membre correspondante du Bureau des Longitudes

Références

- Andersen, O. B., Hinderer, J., 2005 : *Global inter-annual gravity changes from GRACE: Early results*, Geophysical Research Letter, vol. 32, L01402, doi:10.1029/2004GL020948
- Bidel, Y. et al., 2018 : *Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry*. Nat Commun 9, 627 . <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03040-2>
- Bidel, Y. et al., 2023 : *Airborne absolute gravimetry with a quantum sensor, comparison with classical technologies*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB025921. <https://doi.org/10.1029/2022JB025921>
- Boy, J.-P., Hinderer, J., Gegout, P., 1998 : *Global atmospheric loading land gravity*. Phys. Earth Planet. Int. 109, 161-177
- Cantin E. et al, 2021 : New J. Phys. 23 053027 DOI 10.1088/1367-2630/abe79e
- Carter, W.E., et al., 1989 : *Geodetic fixing of tide gauge bench marks*, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, WHO-89-31, 44 p.
- Carter, W. E. (Ed.), 1994 : *Report of the survey workshop of the IAPSO tide gauge benchmark fixing committee*, Report of a meeting held 13-15 December 1993 at the Inst. of Oceanog. Sci., Deacon Lab., NOAA Tech. Rep., NOSOES0006.
- Collilieux, X., Wöppelmann, G., 2011 : *Global sea-level rise and its relation to the terrestrial reference frame*. J Geod 85, 9-22 . <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0412-4>
- De Linage, C., Hinderer, J., Rogister, Y., 2007 : *A search for the ratio between gravity variation and vertical displacement due to a surface load*, Geophys. J. Int., 171, 986-994, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03613.x.
- Delva, P., Denker, H., Lion, G., 2019 : *Chronometric Geodesy: Methods and Applications*. In: Puetzfeld, D., Lämmerzahl, C. (eds) Relativistic Geodesy. Fundamental Theories of Physics, vol 196. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11500-5_2
- De Viron, O., Van Camp M., Francis, O., 2011 : *Revisiting absolute gravimeter intercomparisons*. Metrologia, Institute of Physics, 48, pp.290-298.
- Faller, J.E., 2002 : *Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances*, Metrologia, 39(5), 425-428.



- Francis, O., et al., 2010 : *Results of the European Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2007*, in International Association of Geodesy Symposia, 135, 31-35. DOI: 10.1007/978-3-642-10634-7_5 DOI: 10.1007/3-540-26932-0_47
- Francis O., et al., 2005 : *Results of the International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003*, in International Association of Geodesy Symposia Gravity, Geoid and Space Missions GGSM 2004, Vol. 129 (XVI) ed C Jekeli, L Bastos and J Fernandes (Springer-Verlag), pp. 272-275
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). *Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review*. Remote Sensing, 10(6), 829.
- Hinderer, J., et al., 1991 : *On the calibration of a superconducting gravimeter using absolute gravity measurements*, Geophys. J. Int., 106, 491-497.
- IOC, 2012 : *Global Sea-Level Observing System (GLOSS), Implementation Plan*, IOC Tech. Ser., Vol. 100, 41 p.
- IOC : *Manual on sea-level measurement and interpretation*, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides No. 14, Volumes I-III (1985, 1994, 1999).
- Jiang, Z., et al., 2011 : *Final report on the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG 2005)*, Metrologia, 48, 246-260.
- Lambert A., Courtier N., James T.S., 2006 : *Long-Term monitoring by absolute gravimetry: Tides to postglacial rebound*, Journal of Geodynamics, 41, 307-317.
- Larson, K. M., Van Dam, T., 2000 : *Measuring postglacial rebound with GPS and absolute gravity*, Geophys. Res. Lett., 27(23), 3925-3928.
- Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., et al., 2016 : *A clock network for geodesy and fundamental science*. Nat Commun 7, 12443, <https://doi.org/10.1038/ncomms12443>
- Llubes, M., et al., 2001 : *Gravimetric observation of oceanic surges: first experiments in Brittany*, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa 332, 77-82.
- Llubes, M., et al., 2008 : *Multi-technique monitoring of ocean tide loading in northern France*. Comptes Rendus Geoscience, 340(6), 379-389.
- Lion, G., Panet, I., Wolf, P., et al., 2017 : *Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clock comparisons*. J Geod 91, 597-611. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0986-6>
- Mazzotti, S., et al., 2007 : *Crustal uplift and sea level rise in northern Cascadia from GPS, absolute gravity, and tide gauge data*, Geophys. Res. Lett., 34, L15306, doi: 10.1029/2007GL030283.
- Ménoret, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., et al., 2018 : *Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter*. Sci Rep 8, 12300. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30608-1>.
- Niebauer, T. M., Sasegawa, G.S., Faller, J.E., Hilt, R., and Klopping, F., 1995 : *A new generation of absolute gravimeters*, Metrologia, 32, 159-180.
- Ophaug V., et al., 2016 : *Absolute gravity observations in Norway (1993-2014) for glacial isostatic adjustment studies: The influence of gravitational loading effects on secular gravity trends*, Journal of Geodynamics 102, 83-94.
- Petit, G., Luzum, B.E., 2010 : *IERS Conventions, Tech. rep. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)*, Frankfurt am Main, tech. Note 36, 179 p.
- Poitevin, C. et al., 2019 : *Vertical land motion and relative sea level changes along the coastline of Brest (France) from combined space-borne geodetic methods*, Remote Sens. Environ., 222, 275-285, doi:10.1016/j.rse.2018.12.035.
- Rahmouni, F., et al., 2023 : *An Yb transportable clock connected to the REFIMEVE fiber network for chronometric geodesy (No. EGU23-8745)*. Copernicus Meetings.
- Teferle, F. N., et al., 2009 : *Crustal motions in Great Britain : evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data*, Geophys. J. Int., 178, 23-46, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04185.x.
- Van Camp, M., Williams, S. D. P., Francis, O., 2005 : *Uncertainty of absolute gravity measurements*, J. Geophys. Res., 110, B05406, doi:10.1029/2004JB003497.
- Vey, S., et al., 2002 : *GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates: a case study in Brittany, France*, Journal of Geodesy, 76(8), 419-427.
- Vu, D.T., et al., 2023 : *Potential of cold-atom airborne gravimetry to improve coastal gravity field and quasigeoid modeling* : Soumis au Journal of Geodesy.
- Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., Velicogna, I., 2004 : *Time-variable gravity from GRACE: First results*, Geophysical Research Letters, vo. 31, L11501 doi:10.1029/2004GL019779.
- Wenzel, H-G., Forbriger, T., Wziontek, H., et al., 2022 : *Eterna-Programs for tidal analysis and prediction*.
- Williams, S.D.P, Baker, T.F., Jeffries, G., 2001 : *Absolute gravity measurements at UK tides gauges*, Geophysical Research Letters, 28, 12, 2317-2320.
- Wöppelman, G., Pouvreau, N., Coulomb, A., Simon B., Woodworth P. L., 2008 : *Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record*. Geophysical Research Letters, 35, L22605, doi:10.1029/2008GL035783.
- Wöppelmann, G., Marcos M., 2016 : *Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability*. Reviews of Geophysics 54.1 (2016) 64-92.
- Zerbini, S., et al., 2017 : *Sea-Level Change in the Northern Mediterranean Sea from Long-Period Tide Gauge Time Series*, Earth Science Reviews, 167, pp. 72-87.

ABSTRACT

Measuring and studying sea level variations in coastal areas is a major scientific and social challenge. Tide gauge measurements show trends of a few millimeters per year and must be combined with geodetic measurements to correct the oceanic signal for continental vertical movement. The coupling of GNSS and absolute gravity measurements has been shown to improve understanding of tide gauge signals. This article describes the methodology used to implement absolute measurements, as well as the major results obtained by international teams. An overview of measurements carried out on french tide gauges is given, as well as national outlooks on the contribution of quantum technology (cold atom gravimeter and chronometric geodesy).