



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « Types de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et submersions marines historiques, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative aux données de mouvements verticaux du sol fait partie d'un catalogue de données visant à accompagner et comprendre la base de données relatives aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire, a été piloté par Médéric Gravelle (SONEL – UMR7266 LIENSs).

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Aurélie Maspataud (BRGM), Marcello de Michele (BRGM), Guy Wöppelmann (LIENSs) et Laurent Testut (LIENSs).

Les termes suivis d'un astérisque * sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

Résumé

Les mouvements verticaux qui affectent la surface terrestre, sur différentes échelles spatiales et temporelles, peut être significatifs dans l'étude de l'évolution long-terme du niveau de la mer issu d'observations marégraphiques. En effet, l'impact de mouvements verticaux du sol issus de différents processus géophysiques est perceptible dans les longues séries marégraphiques. C'est pourquoi il est important d'estimer précisément l'ampleur de ces mouvements verticaux du sol, pour bien isoler leur contribution dans la mesure du niveau de la mer. Les moyens d'acquisition de données, nombreux, sont documentés dans cette fiche et discutés en termes de traitements, d'incertitudes et de limites inhérentes à leur utilisation : technologie GNSS, altimétrie spatiale, marégraphie, interférométrie radar.



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Caractéristiques de la donnée

Définition

La surface terrestre peut être soumise à des **mouvements verticaux** se traduisant sur différentes échelles spatiales et temporelles. L'ampleur de ces mouvements verticaux allant de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres par an, leur contribution peut être significative dans l'étude de l'évolution long-terme du niveau de la mer issu d'observations marégraphiques (Figure 1) (voir *fiche « Mesure du niveau marin »*).

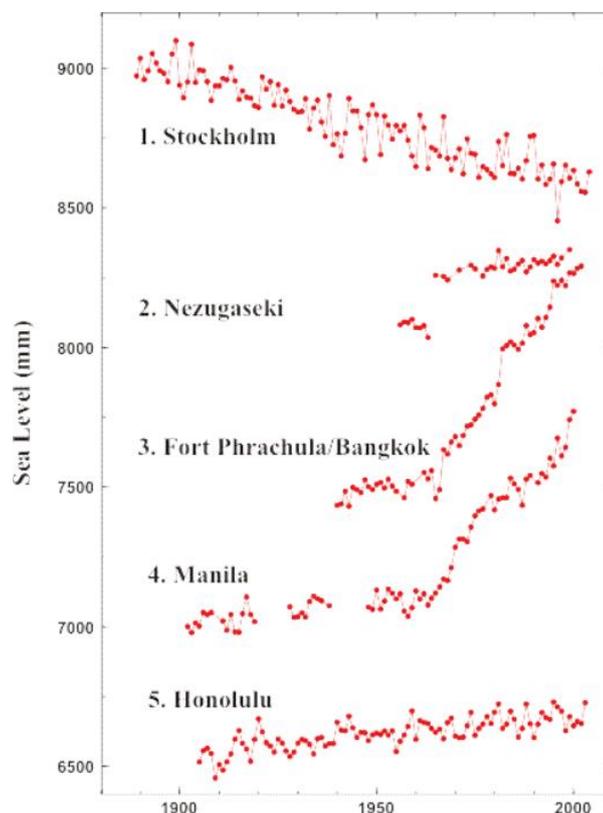


Figure 1 - Séries marégraphiques de moyennes annuelles du PSMSL impactées par des mouvements verticaux du sol issus de différents processus géophysiques (Source : PSMSL¹).

La Figure 1 illustre l'impact de mouvements verticaux du sol issus de différents processus géophysiques dans des séries longues de moyennes annuelles issues de la banque de données du **Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)***. On y observe par exemple que le marégraphe* de Stockholm enregistre une baisse du niveau de la mer : ici, le marégraphe se soulève en fait plus vite que la mer ne monte en raison du rebond post-glaciaire (GIA*, Whitehouse, 2018). A Bangkok et Manille, par exemple, la rupture de pente brutale du niveau marin est la manifestation de la **subsidence*** qui affecte le marégraphe suite à l'extraction d'eau souterraine.

¹ https://www.psmsl.org/train_and_info/geo_signals



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Pour connaître la réponse du niveau marin aux effets climatiques et océaniques, il est donc important d'estimer précisément les mouvements verticaux pour bien isoler leur contribution dans la mesure du niveau de la mer*.

Dans l'attente de modèles géophysiques des différents processus fournissant des prédictions au niveau des résultats de tendance des marégraphes, ces mouvements verticaux peuvent être estimés à partir d'observations issues de techniques spatiales : au début des années 1990, la technologie GPS (aujourd'hui élargie aux autres GNSS*) est identifiée comme étant la plus adaptée pour mesurer les mouvements verticaux terrestres avec une précision suffisante pour l'application à des études long-terme du niveau de la mer (Blewitt *et al*, 1992 ; Carter, 1994) (Figure 2).

Pour exprimer une tendance relative du niveau de la mer en une tendance corrigée du mouvement vertical du sol, il faut appliquer l'opération suivante :

$$T_{GEO} = T_{REL} + V_{GNSS} \quad [1]$$

Où T_{GEO} est la tendance géocentrique (corrigée du mouvement vertical du sol) du niveau de la mer (généralement exprimée en mm/an), T_{REL} est la tendance relative du niveau de la mer (généralement exprimée en mm/an) et V_{GNSS} est la vitesse verticale GNSS (généralement exprimée en mm/an).

Moyen(s) d'acquisition

Par GNSS

Par l'analyse et le traitement des signaux électromagnétiques reçus de satellites en orbite autour de la Terre, la technologie **GNSS (Global Navigation Satellite System)** permet la détermination de la position d'une antenne au sol dans un repère géocentrique. Une analyse des observations sur plusieurs années et une mise en référence dans le repère de référence terrestre international (ITRF) permet ensuite d'obtenir ce qu'on appelle des « vitesses » GNSS, des taux de déplacement annuel exprimés généralement en mm/an.

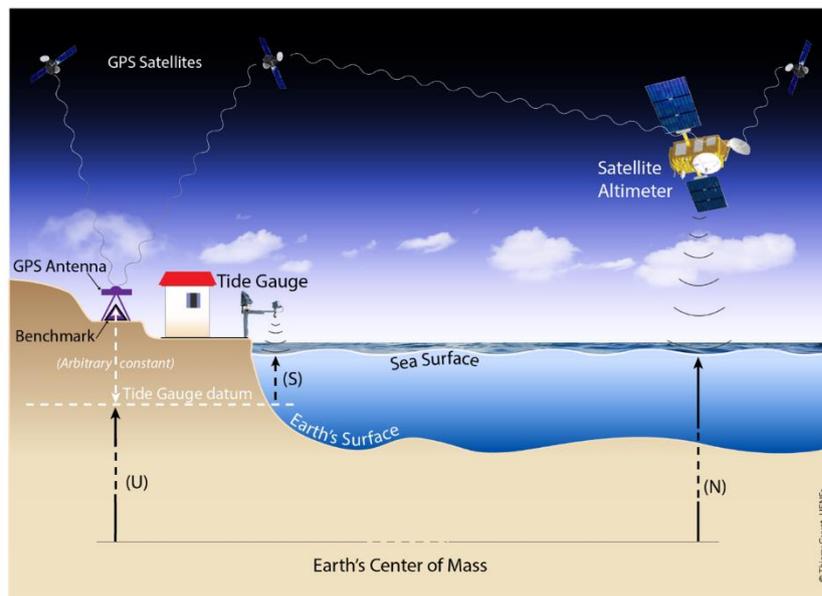


Figure 2 - Représentation schématique d'un site de mesure marégraphique (Crédits : Thierry Guyot, UMR7266 LIENSs).



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Dans ce contexte, le **Service National d'Observation SONEL** (www.sonel.org), centre de données GNSS du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS)*, a pour but de collecter, analyser et distribuer les observations de quelques 1000 stations GNSS proches de marégraphes. L'objectif de SONEL est également de fournir à la communauté scientifique des produits développés à partir de ces observations ou de leur combinaison, principalement des champs de vitesses verticales aux marégraphes.

Il existe plusieurs stratégies de traitement des observations GNSS (calcul en réseaux de station ou mesures non-différenciées (ex : PPP*), type de signaux traités, type de modèles/corrections, différentes constellations, etc.) ; c'est pourquoi SONEL s'attelle à distribuer les estimations d'un maximum de groupes internationaux (aujourd'hui celles issues de *La Rochelle Université*, du *Nevada Geodetic Laboratory (NGL)*, du *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA et de *GeoForschungsZentrum*) (Blewitt *et al.*, 2016 ; Heflin *et al.*, 2020 ; Deng *et al.*, 2015 ; Gravelle *et al.*, 2022) (Figure 3). Ces solutions sont aujourd'hui disponibles dans le système de référence terrestre international ITRF2014 ; une mise à jour de ces solutions exprimées dans le tout dernier repère, l'ITRF2020, sera effectuée prochainement.

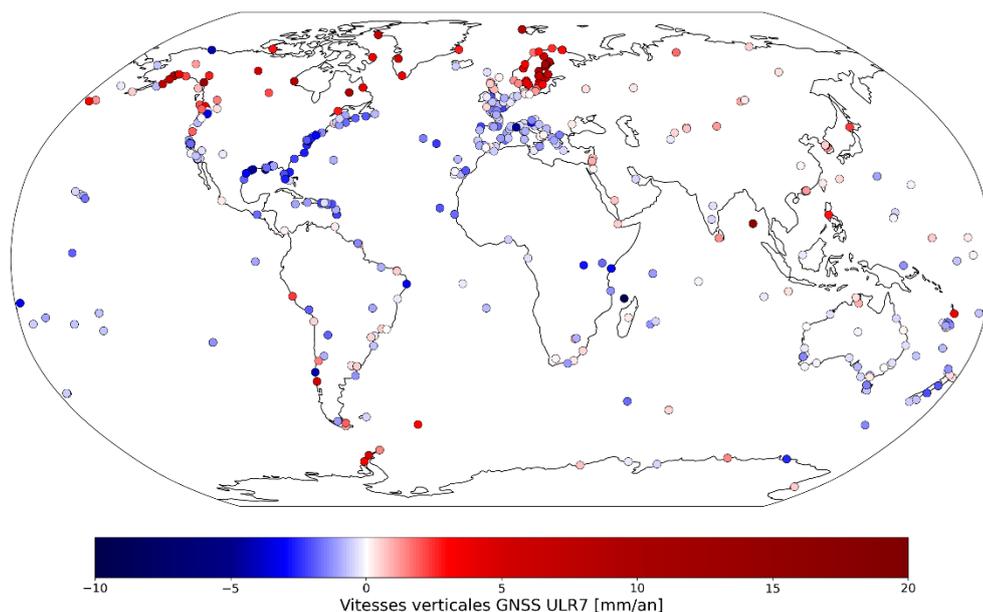


Figure 3 - Champ de vitesses verticales GNSS ULR7a.

A l'échelle européenne, des champs de vitesses GNSS sont calculés dans le cadre du projet EPOS (*European Plate Observing System*) et disponibles via le portail produits : <https://gnssproducts.epos.ubi.pt>. Aussi, depuis 2023, le portail national Form@ter a mis en place un outil de visualisation de produits géodésiques, le *GeodesyPlotter* (<https://www.poleterresolide.fr/geodesy-plotter>), où il est (pour l'instant) possible de visualiser les séries temporelles GNSS issues du projet SPOTGINS (<https://ac-gnss.pagelab.univ-lr.fr/spotgins/>) et du centre d'analyses EPOS de l'Université de Grenoble.

L'utilisateur qui souhaite connaître le mouvement vertical que subit un marégraphe peut alors mobiliser ces solutions GNSS, ou réaliser des combinaisons des différentes solutions disponibles.



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

C'est l'objet d'une étude publiée récemment (Hammond *et al.*, 2021) : à partir d'une triangulation de Delaunay sur le réseau GNSS calculé par le *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL) sur plus de 19 000 stations, une cartographie globale de mouvement vertical a été réalisée (Figure 4), et une estimation est fournie pour près de 2 400 enregistrements marégraphiques du PSMSL. Une valeur d'incertitude, basée sur la couverture spatiale et temporelle des données GNSS au site marégraphique, est aussi fournie (Figure 5).

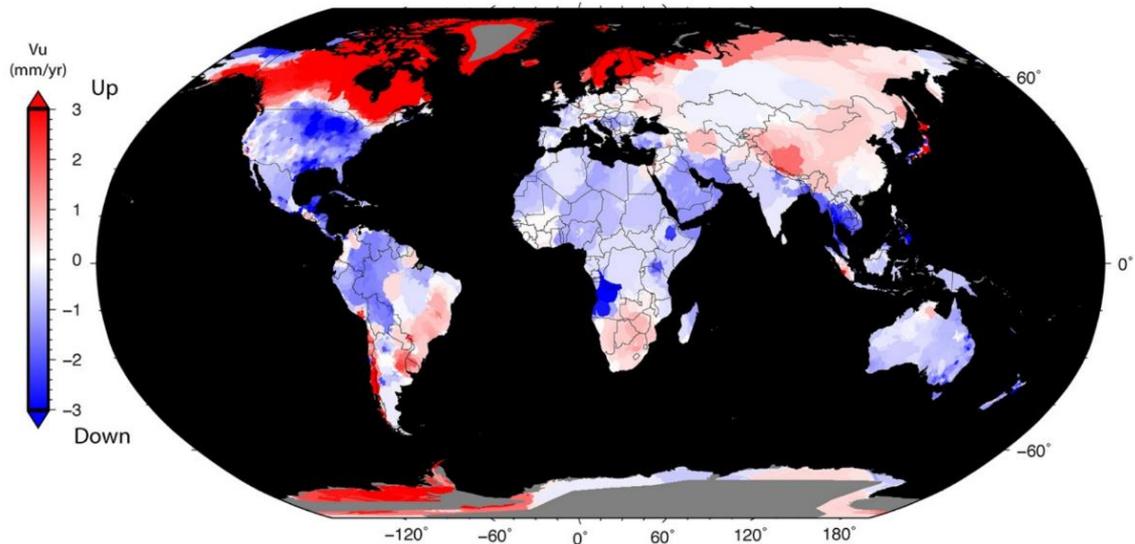


Figure 4 - Carte des mouvements verticaux réalisée par Hammond *et al.* (2021).

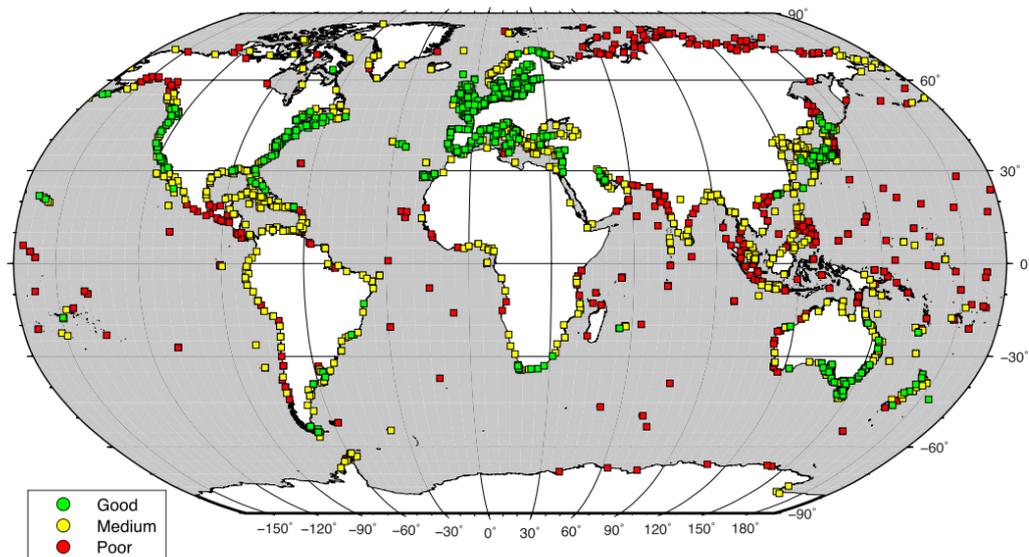


Figure 5 - Indicateur de qualité de l'estimation de mouvement vertical aux 2 357 enregistrements marégraphiques du PSMSL (Hammond *et al.*, 2021)



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Par altimétrie - marégraphie

D'après l'équation [1], le mouvement vertical de la surface terrestre peut s'écrire sous la forme :

$$V_{GNSS} = T_{GEO} - T_{REL}$$

La tendance géocentrique du niveau de la mer peut être obtenue à partir d'observations issues de **l'altimétrie satellitaire***, la tendance relative à partir des observations marégraphiques. Plusieurs études ont tenté d'élaborer des champs de vitesses verticales à partir de cette méthodologie basée sur la soustraction de ces deux grandeurs, en utilisant différents produits altimétriques, notamment Wöppelmann et Marcos (2016), dont les produits sont disponibles sur le portail SONEP² (Figure 6). Il faut noter cependant que ces estimations de vitesses verticales du sol se basent sur la différence entre l'altimétrie satellitaire et la marégraphie reposent sur des hypothèses océanographiques qui ne sont pas valides partout. Ces estimations sont donc moins précises (elles ne sont pas exactes non plus) que celles faites à l'aide du GNSS.



Figure 6 - Mouvements verticaux du sol issus de l'altimétrie - marégraphie (produit démonstratif diffusé par SONEP, voir détails dans Wöppelmann et Marcos, 2016).

Par interférométrie radar

Cette technologie est appelée « **InSAR** » pour **Interferometric Synthetic Aperture Radar***. Elle est basée sur la mesure de différence de phase (interférence) des ondes radar entre différents passages d'un satellite sur la même zone d'étude. La différence de phase étant proportionnelle aux changements de la distance entre le satellite et le sol, cette technique permet de cartographier les mouvements verticaux et horizontaux sur une zone choisie, avec une grande précision de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde employée par le satellite, pouvant atteindre le 1 mm/an sur des séries temporelles. Le grand avantage de la méthode InSAR réside dans le fait qu'il n'y a pas besoin d'installer d'antennes au sol : le signal est rétrodiffusé vers le satellite par des structures bâties ou bien des éléments naturels comme les rochers.

² <https://www.sonep.org/-Vertical-land-movements-.html?lang=en>



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

La mesure des mouvements issue de l'InSAR (voir *fiche « Référentiels verticaux »*) est relative à un point de référence à l'intérieur de la fauchée* radar : pour les applications où cela ne suffit pas, la technique est dépendante de la présence d'une station GNSS permanente qui fournira l'information de mouvement vertical absolu (géocentrique).

L'InSAR peut être très utile pour surveiller (établir) la stabilité locale d'un site marégraphique, éviter l'hypothèse de mouvement vertical différentiel entre un marégraphe et une station GNSS permanente à proximité. Comme le marégraphe lui-même peut agir comme un rétro diffuseur de l'onde radar, son mouvement propre peut être mesuré par InSAR.

Plusieurs études ont utilisé cette technique pour des applications sur le niveau de la mer, dont voici plusieurs exemples (liste non exhaustive) : Venise (Strozzi *et al.*, 2011) ; Alexandria d'Egypte (Woppelman *et al.*, 2013) ; Manille (Raucoules *et al.*, 2013 ; **Figure 7**) ; Dakar (Le Cozannet *et al.*, 2015) ; Brest (Poitevin *et al.*, 2019) ; Guadeloupe (Le Cozannet *et al.*, 2021) ; Corée (Palanisamy Vadivel *et al.*, 2021).

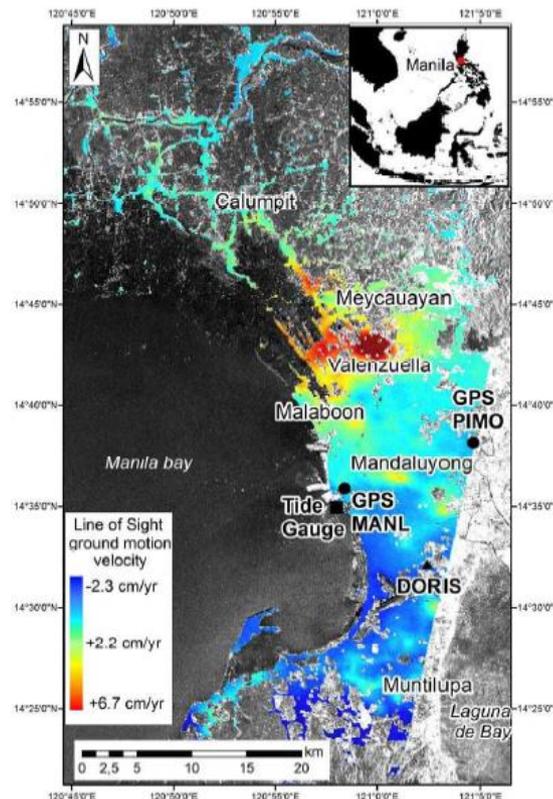


Figure 7 - Carte des mouvements verticaux à Manille, issue de mesures InSAR ERS 1-2 sur la période [1993-1998] (Raucoules *et al.*, 2013)

Traitements nécessaires

Les données satellitaires sont présentes dans les archives des différentes agences spatiales en charge des missions satellitaires SAR. Par exemple : la mission SENTINEL-1 du programme COPERNICUS de l'Union Européenne, pilotée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). La Mission PALSAR de l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA) peut aussi être citée.



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

A titre d'exemple de traitements effectués sur ces données, une fois les données SAR téléchargées, le BRGM met en œuvre une chaîne de traitement nommée GAMMA pour réaliser le calcul interférométrique entre deux ou plusieurs données SAR. Parfois, l'établissement applique également ses propres algorithmes ou méthodologies dits « maison ».

Depuis 2022, le programme COPERNICUS *Land Monitoring Service** a rendu public le service EGMS (*European Ground Motion Service*) : un service de mesures de déformation du sol à l'échelle européenne basée sur les méthodes InSAR en séries temporelles. Ce service est disponible en ligne³.

Incertitudes et limites

GNSS

Une limite majeure spécifique à la surveillance des marégraphes réside dans la disponibilité des stations GNSS installées spécifiquement pour la surveillance du marégraphe. En effet, beaucoup de stations GNSS répertoriées dans SONEL sont des stations que l'on peut qualifier d'« opportunistes », dans la mesure où elles ont été installées pour une autre application mais, étant situées à « proximité » du marégraphe (moins de 15km, critère arbitraire SONEL), elles sont utilisées pour les calculs de mouvements verticaux aux marégraphes. Il est important de noter que seulement 31 % des stations GNSS côtières identifiées dans SONEL sont distantes de moins d'un kilomètre du marégraphe (Figure 8).

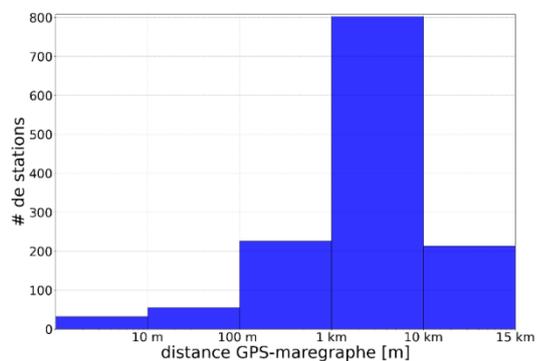


Figure 8 - Histogramme des distances entre stations GNSS et marégraphes dans SONEL.

Lorsqu'une vitesse GNSS est utilisée pour corriger une tendance marégraphe des mouvements verticaux, il est alors fait l'hypothèse que la station GNSS enregistre le même mouvement vertical auquel est soumis le marégraphe (voir *fiche « Référentiels verticaux »*). Cette hypothèse peut dans certains cas ne pas être vérifiée, comme dans le cas de Venise, par exemple, où des mesures d'interférométrie radar permettent de mettre en évidence des mouvements verticaux différentiels entre le marégraphe et la station GNSS située pourtant à seulement 3 km (Figure 9).

³ <https://egms.land.copernicus.eu/>



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

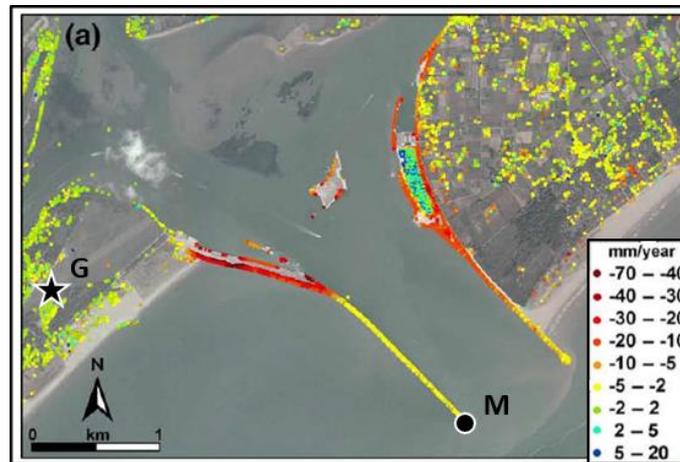


Figure 9 - Mouvements verticaux à Venise issues de mesures InSAR (adapté de Strozzi *et al.*, 2009). L'emplacement du marégraphe est représenté par le cercle noir, la station GNSS par l'étoile noire.

Une deuxième limite de l'utilisation des vitesses GNSS pour corriger des enregistrements marégraphiques de la tendance long-terme est l'hypothèse de linéarité. En effet, il est supposé :

- que la série temporelle a un comportement linéaire. Un contre-exemple est représenté dans la **Figure 10** avec la station GNSS TRNT située sur le volcan de Montserrat.

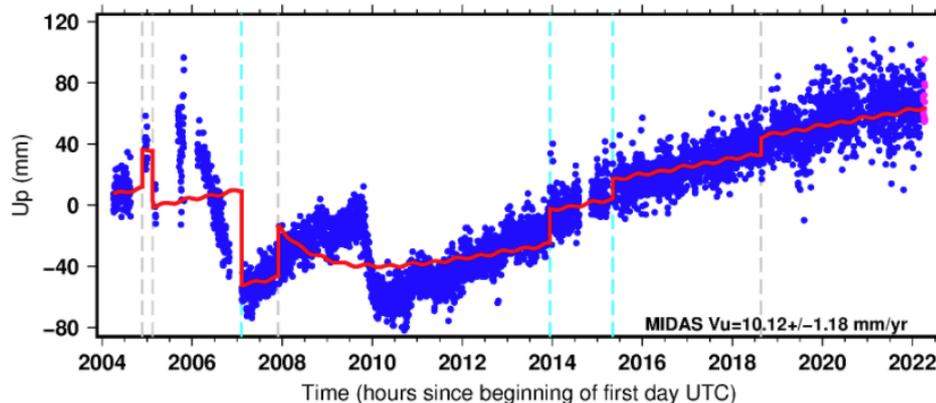


Figure 10 - Série temporelle verticale de la station GNSS TRNT (Source : NGL⁴).

- que le mouvement enregistré par la station GNSS sur la période GNSS (généralement à partir des années 2000) est stationnaire depuis que le marégraphe enregistre (parfois plusieurs décades). Le cas de Manille, où le marégraphe a commencé à subir une subsidence dans les années 1960 suite à des pompages dans les nappes phréatiques (Siringan et Ringor, 1998), illustre la nécessité d'utiliser les vitesses GNSS avec précaution (**Figure 11**).

⁴ <http://geodesy.unr.edu/tsplots/IGS14/IGS14/TimeSeries/TRNT.png>



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

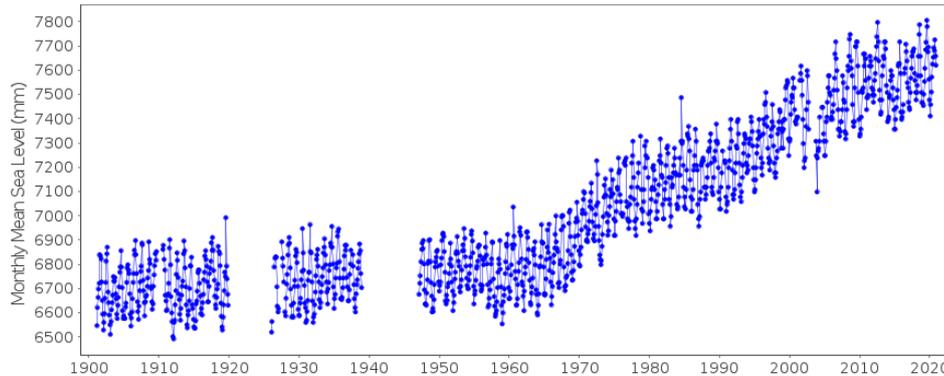


Figure 11 - Observations marégraphiques (moyennes mensuelles) à Manille (Source : PSMSL⁵).

Enfin, il est nécessaire de disposer d'enregistrements GNSS les plus longs possibles, sans discontinuités en position (et donc avec le moins de changement de matériel (antenne, récepteur) possible) pour avoir des incertitudes réalistes et suffisamment faibles pour être appliquées à des tendances long-terme du niveau de la mer (Santamaria-Gomez et Mémin, 2015).

InSAR

La mesure InSAR est effectuée en ligne de visée du satellite, visée oblique par rapport à la verticale, normalement entre 23° et 50° selon la mission satellitaire. La précision sur la mesure InSAR est directement proportionnelle au nombre des données SAR utilisé dans le calcul. Pour les séries temporelles, elle peut varier entre le mm/an dans un cas idéal, au cm/an dans les cas moins favorables. En outre, si le gradient du mouvement du sol dépasse la demi-longueur d'onde du radar, par pixel de l'image SAR, le signal InSAR est inexploitable. Une autre limite de cette technologie réside dans l'impossibilité de déterminer la nature du réflecteur : il peut s'agir du sommet d'un bâtiment, mais dans d'autres configurations géométriques ou passages du satellite il peut s'agir d'un étage de ce même bâtiment, ou autre...

Organisme(s) clés / en jeu

Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)*

Réseau permanent des stations de l'IGS*

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)*

Programme Copernicus Land Monitoring Service*

La Rochelle Université

BRGM

Nevada Geodetic Laboratory (NGL)

⁵ https://www.psmsl.org/data/obtaining/rlr.monthly.plots/145_high.png



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

*Jet Propulsion Laboratory, de la NASA*⁶

*GeoForschungsZentrum*⁷

Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

Cartographie interactive « *Vertical Land Movements* » sur le site SONEL : <https://www.sonel.org/-Vertical-land-movements->

Données *European Ground Motion Service* (EGMS) : <https://egms.land.copernicus.eu/>

International GNSS Service (IGS) : <https://network.igs.org/>

Autres usages de la donnée

L'élévation du niveau de la mer, liée au changement climatique, peut également être aggravée ou limitée localement par les mouvements verticaux du sol, qu'ils soient d'origine naturelle (tectonique, volcanique ; exemple récent de l'île de Mayotte) ou anthropogénique (extraction de fluides souterrains, tassements de terrain en lien avec l'aménagement ou les activités humaines, etc.). La subsidence, qui se traduit par un enfoncement du sol, est donc l'un des facteurs aggravants de l'élévation du niveau de la mer. Or les scénarios de niveau marin produits par le GIEC ne prennent pas en compte (ou peu précisément) les éventuelles subsidences locales. Lors de la réalisation de scénarios d'élévation locale du niveau de la mer, il est désormais recommandé d'effectuer une recherche des études potentiellement existantes et une analyse des données disponibles afin de déterminer si cette composante doit être prise en compte sur le territoire étudié. Les données mobilisables pour étudier localement les mouvements verticaux du sol peuvent être issues de séries temporelles de GNSS permanents, de la comparaison de campagnes de nivellement, de l'analyse par interférométrie radar satellitaire, de l'analyse de paléo-niveaux marins, etc. Localement, et lorsque des observations sont disponibles (notamment issues des GNSS permanents) des projections peuvent ainsi être effectuées en extrapolant, avec prudence, les taux mesurés sur la période considérée. Ces informations représentent un fort intérêt dans l'étude de la montée du niveau de la mer, sous l'effet du changement climatique, qui est susceptible d'accélérer les phénomènes d'érosion et de favoriser un recul du trait de côte par un envahissement progressif par la mer des zones basses du littoral (voir *fiche « Trait de côte et géomorphologie »*).

⁶ <https://www.jpl.nasa.gov/>

⁷ <https://www.gfz-potsdam.de/>



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Références clés

Blewitt G., Heflin M. B., Webb F. H., Lindqwister U. J., Malla R. P., 1992. Global coordinates with centimeter accuracy in the international terrestrial reference frame using GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 853–856, doi:10.1029/92GL00775.

Blewitt G., Altamimi Z., Davis J., Gross R., Kuo C.-Y., Lemoine F.G., Moore A.W., Neilan R.E., Plag H.-P., Rothacher M., Shum C.K., Sideris M.G., Schöne T., Tregoning P., Zerbini S., 2010. Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability, in: Understanding Sea-Level Rise and Variability. *John Wiley & Sons, Ltd*, pp. 256–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781444323276.ch9>

Blewitt G., Kreemer C., Hammond W.C., Gazeaux J., 2016. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 2054–2068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JB012552>

Carter W. E. (Ed.), 1994. *Report of the surrey workshop of the IAPSO tide gauge bench mark fixing committee*, Report of a meeting held 13–15 December 1993 at the Inst. of Oceanog. Sci., Deacon Lab., NOAA Tech. Rep., NOSOES0006.

Deng Z., Gendt G., Schöne T., 2016. Status of the IGS-TIGA Tide Gauge Data Reprocessing at GFZ, in: Rizos, C., Willis, P. (Eds.), IAG 150 Years. *Springer International Publishing, Cham*, pp. 33–40.

Gravelle M., Wöppelmann G., Gobron K., Altamimi Z., Guichard M., Herring T., Rebischung P., 2022. The ULR-repro3 GPS data reanalysis and its estimates of vertical land motion at tide gauges for sea level science, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 497–509, <https://doi.org/10.5194/essd-15-497-2023>.

Hammond W. C., Blewitt G., Kreemer C., Nerem R. S., 2021. GPS Imaging of global vertical land motion for studies of sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022355. <https://doi.org/10.1029/2021JB022355>

Heflin M., Donnellan A., Parker J., Lyzenga G., Moore A., Ludwig L.G., Rundle J., Wang J., Pierce M., 2020. Automated Estimation and Tools to Extract Positions, Velocities, Breaks, and Seasonal Terms From Daily GNSS Measurements: Illuminating Nonlinear Salton Trough Deformation. *Earth Sp. Sci.* 7, e2019EA000644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019EA000644>

Le Cozannet G., Idier D., de Michele M., Legendre Y., Moisan M., Pedreros R., ThiéblemontR., Spada, G., Raucoules D., de la Torre Y., 2021. Timescales of emergence of chronic flooding in the major economic center of Guadeloupe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 703–722. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-703-2021>

Le Cozannet G., Raucoules D., Wöppelmann G., Garcin M., Da Sylva S., Meyssignac B., Gravelle M., Lavigne F., 2015. Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal). *Environ. Res. Lett.* 10, 84016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084016>

Palanisamy Vadivel S.K., Kim D., Jung J., Cho Y.-K., Han K.-J., 2021. Monitoring the Vertical Land Motion of Tide Gauges and Its Impact on Relative Sea Level Changes in Korean Peninsula Using Sequential SBAS-InSAR Time-Series Analysis. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13010018>

Poitevin C., WöppelmannG., Raucoules, D., Le Cozannet G., Marcos M., Testut L., 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.035>



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Raucoules D., Le Cozannet G., Wöppelmann G., de Michele M., Gravelle M., Daag A., Marcos M., 2013. High nonlinear urban ground motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 observed by DInSAR: Implications for sea-level measurement. *Remote Sens. Environ.* 139, 386–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.021>

Roy K., Peltier W.R., 2018. Relative sea level in the Western Mediterranean basin: A regional test of the ICE-7G_NA (VM7) model and a constraint on late Holocene Antarctic deglaciation. *Quat. Sci. Rev.* 183, 76–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.12.021>

Santamaría-Gómez A., Mémin A., 2015. Geodetic secular velocity errors due to interannual surface loading deformation. *Geophys. J. Int.* 202, 763–767. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv190>

Siringan F.P., Ringor C.L., 1998. Changes in bathymetry and their implications for sediment, dispersal and rates of sedimentation in Manila Bay. *Science Diliman* 10(2), 12–26.

Strozzi T., Teatini P., Tosi L., 2009. TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. *Remote Sens. Environ.* 113, 2682–2688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.001>

Whitehouse P.L., 2018. Glacial isostatic adjustment modelling: historical perspectives, recent advances, and future directions. *Earth Surf. Dyn.* 6, 401–429. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-401-2018>

Wöppelmann G., Marcos M., 2016. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Rev. Geophys.* 54, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

Wöppelmann G., Le Cozannet G., de Michele M., Raucoules D., Cazenave, A., Garcin M., Hanson S., Marcos M., Santamaría-Gómez A., 2013. Is land subsidence increasing the exposure to sea level rise in Alexandria, Egypt?, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2953–2957, doi:10.1002/grl.50568.

Fiches en lien

Fiche « Référentiels verticaux »

Fiche « Mesure du niveau marin »

Fiche « Trait de côte et géomorphologie »



MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

