

Le paradoxe de l'élévation du niveau des mers au XX^e siècle

■ GUY WÖPPELMANN - MARTA MARCOS

L'article récemment publié par Hay et al. (2015) dans la prestigieuse revue Nature est l'occasion de revenir sur un paradoxe qui, depuis près de quinze ans, a stimulé la communauté scientifique intéressée par l'évolution du niveau des mers et le changement climatique.

D'aucuns pensaient ce paradoxe résolu. Qu'en est-il vraiment ? Notre article retrace brièvement l'origine du paradoxe et les difficultés rencontrées pour le résoudre. Il s'attarde sur l'importance de la géodésie spatiale et, en particulier, le besoin de disposer d'un repère de référence terrestre d'une précision et d'une stabilité encore à atteindre.

MOTS-CLÉS

Niveau de la mer, marégraphes, GPS, ITRF.

depuis l'échelle graduée. Depuis une dizaine d'années, les marégraphes radar remplacent les marégraphes plus traditionnels (mécaniques à flotteur). Les marégraphes radar se basent sur le principe de mesure de la durée de propagation aller-retour d'une onde électromagnétique (radar) émise vers le nadir par l'instrument situé au-dessus du plan d'eau et réfléchi par celui-ci. Ce principe est analogue à celui des satellites équipés d'altimètres radar, à la différence près (non négligeable) que l'instrument embarqué à bord du satellite se déplace à plusieurs kilomètres par seconde dans l'espace et à plusieurs centaines de kilomètres au-dessus de la surface marine. Leur mesure doit donc être complétée par un système d'orbitographie précis tel que le système français DORIS (<http://ids-doris.org/>). Avec le satellite franco-américain Topex/Poseidon (T/P), lancé en août 1992, la connaissance de l'orbite du satellite atteint enfin les performances requises pour produire des hauteurs d'eau avec une précision proche de celle des marégraphes (centimétrique).

Origine du paradoxe

Le paradoxe de l'élévation du niveau des mers au XX^e siècle trouve son origine dans le 3^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Il a été identifié comme tel (paradoxe ou énigme) par le célèbre océanographe W. Munk dans la revue de l'académie des sciences américaine, peu de temps après la parution du 3^e rapport du GIEC en 2001. Dans ce rapport, le bilan entre la somme des contributions climatiques à l'élévation du niveau des mers au cours du XX^e siècle (0,7 mm/an) et l'estimation indépendante issue des observations directes du niveau de la mer (1,5 mm/an) fait apparaître un facteur d'environ deux que W. Munk critique et juge peu satisfaisant, car il pose la question inquiétante de notre capacité à prévoir l'avenir. La Figure 1 reprend les différentes valeurs publiées dans les derniers rapports du GIEC. Elle fait aussi apparaître les différentes contributions à l'élévation du niveau des mers aux échelles globale et multi-décennale à séculaire. Parmi ces contributions, les causes principales sont la fonte des glaces continentales et leur transfert de masses d'eau vers les océans d'une part, et le réchauffement des océans et leur dilatation thermique d'autre part.

Mesures du niveau marin

Les deux principales méthodes de mesure du niveau de la mer sont les marégraphes et les satellites équipés d'altimètres radar (Figure 2). La première correspond aux instruments *in situ* ; le plus simple des instruments étant l'échelle graduée installée le long d'un quai. Les enregistrements de ce type les plus anciens, qui nous soient parvenus, remontent à la fin du XVII^e siècle (1679), à Brest (France). Bien entendu, les technologies de marégraphie ont considérablement évolué



Figure 1. Contributions à l'évolution du niveau des mers et estimation à partir des observations directes du niveau marin. Valeurs extraites des rapports du GIEC publiés en 2001, 2007 et 2013.

Les données fournies par les deux types de mesure du niveau de la mer présentent des caractéristiques spatio-temporelles distinctes. Certains parlent d'avantages et d'inconvénients, mais les avantages ou les inconvénients dépendent clairement de l'application visée. Considérons par exemple l'application qui vise à déterminer l'évolution du niveau des mers due aux contributions d'origine climatique et, par ailleurs, l'application qui vise à déterminer les impacts à la côte d'une élévation du niveau de la mer. Dans la première, l'information apportée par les marégraphes est ambiguë, car relative à la surface terrestre sur laquelle reposent les marégraphes (Figure 2). Ainsi, tout déplacement du support du marégraphe, par exemple une subsidence due à un processus de compaction de sédiments, se traduira par une élévation du niveau de la mer dans l'enregistrement du marégraphe, sans qu'il n'y ait pour autant lieu de l'interpréter comme une élévation du niveau de la mer due à une fonte de glaces. Dans ce cas, il est nécessaire de corriger les tendances du niveau de la mer relatives à la côte du déplacement de la surface terrestre affectant le marégraphe. Dans la seconde application, l'information apportée par l'altimètre radar du satellite est incomplète, car elle est par nature

(satellite en orbite) relative au centre des masses de la Terre (ou ce qui est équivalent à l'ellipsoïde dont l'origine est calé au centre des masses). Il est alors nécessaire de corriger les tendances géocentriques du niveau de la mer issues des satellites du déplacement de la surface terrestre afin de déterminer les risques réels de submersion le long d'une côte donnée.

Les géodésiens auront remarqué à juste titre que, dans les deux cas de figure (applications), l'évolution de la position précise de points à la côte est un point clé. Par ailleurs, il conviendra plutôt de retenir que les deux approches (*in situ* et spatiale) sont très complémentaires en raison de leur échantillonnage spatio-temporel. Par exemple, les marégraphes apportent une information géographique ponctuelle avec un échantillonnage temporel élevé (minute à horaire), alors que les satellites reviennent en un lieu donné tous les dix jours environ, après avoir couvert les océans du globe. Notons aussi que les marégraphes observent particulièrement bien les processus côtiers alors que la qualité des données des satellites actuels se dégrade considérablement à quelques kilomètres de la côte.

L'analyse des mesures des marégraphes a fait l'objet de nombreuses

études, indiquant une élévation du niveau des mers de 1,7 à 1,8 mm/an au cours du siècle passé (soit 17 à 18 cm en cent ans) avec des incertitudes typiques de l'ordre de 0,2 mm/an. En revanche, les estimations obtenues à partir des satellites équipés d'altimètres radar sont de l'ordre de $3,3 \pm 0,4$ mm/an (www.aviso.altimetry.fr), mais sur une période plus courte de quelque vingt ans. Les valeurs issues des deux sources d'observation sont cependant cohérentes sur la période commune, essentiellement depuis 1993, peu après la phase de validation de la mission T/P.

Le paradoxe résolu ?

Tout d'abord, deux remarques s'imposent. La première est que la fermeture du bilan (ou budget) entre la somme des contributions à l'évolution du niveau des mers et les observations directes par les instruments est plutôt satisfaisante sur les vingt dernières années (travaux d'A. Cazenave, LEGOS), correspondant à la période satellitaire. La deuxième est que les observations précises des satellites équipés d'altimètres radar sont récentes (depuis 1993) et de durée trop courte pour extraire une tendance séculaire fiable en raison des oscillations décennales et inter-décennales du niveau des mers dues aux nombreux couplages entre l'atmosphère et les océans, tels que l'oscillation Nord Atlantique (NAO) ou l'oscillation décennale Pacifique (PDO). Autrement dit, l'information temporelle contenue dans les tendances et reconstructions globales du niveau des mers publiées par les différentes études provient des marégraphes.

Dans certaines études, les données des satellites d'altimétrie radar sont également incorporées pour apporter une information sur les structures spatiales des tendances. Mais des travaux récents (B. Meyssignac, LEGOS) suggèrent que ces structures ne sont pas stationnaires et, par conséquent, leur extrapolation dans le passé est sujette à caution. Les marégraphes constituent donc aujourd'hui la seule source d'observation du niveau de la

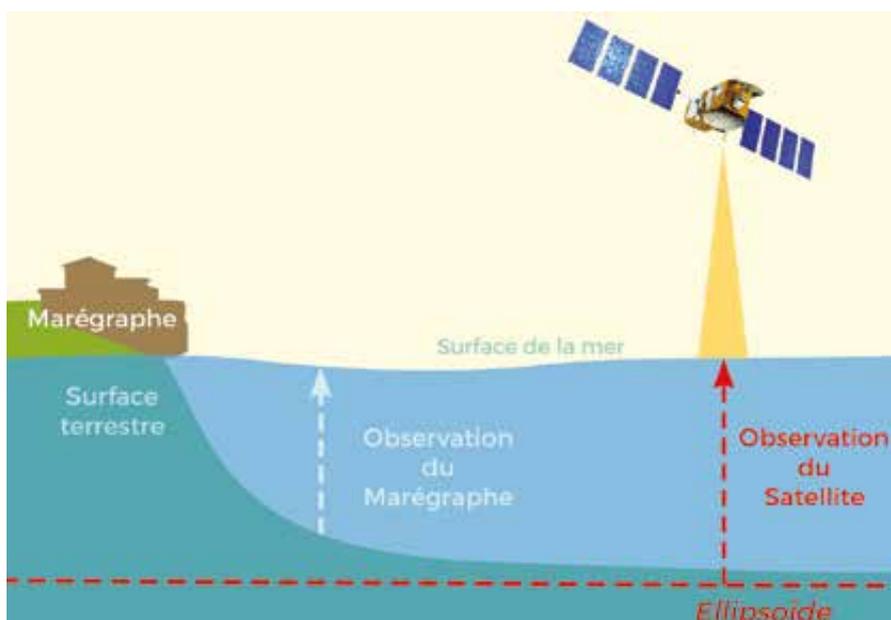


Figure 2. Observations de niveau marin issues de marégraphes (*in situ*) et d'altimètres radar embarqués sur satellite.

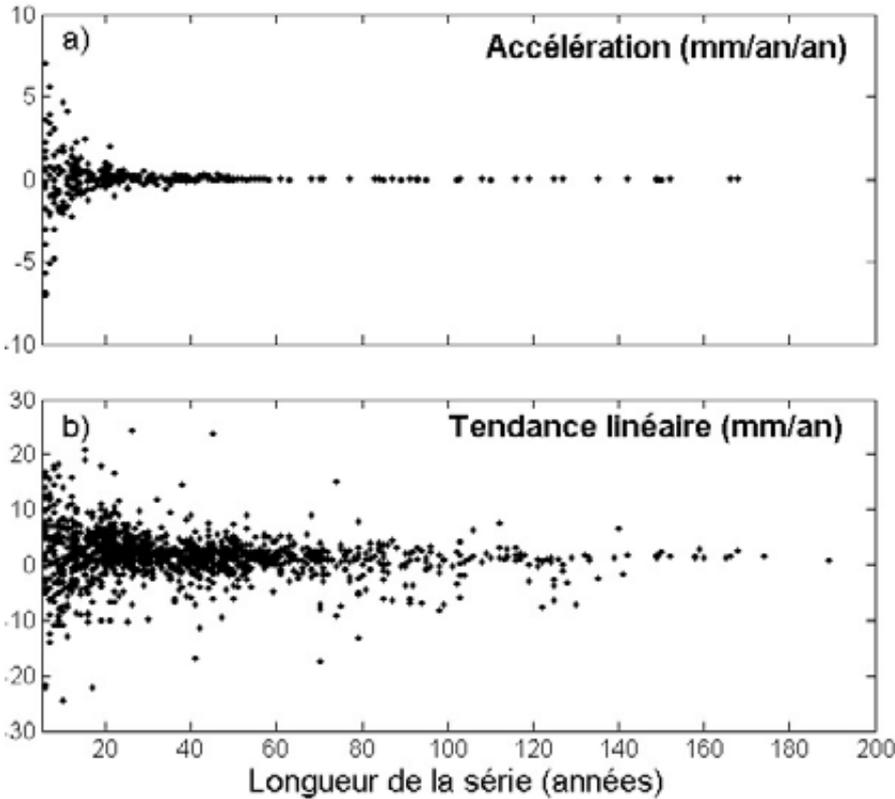


Figure 3. Tendances du niveau de la mer estimées à partir des données des marégraphes disponibles au PSMSL (accès le 6 mai 2015) en fonction de la longueur de la série temporelle : a) terme d'accélération et b) terme linéaire.

mer disponible pour décrire les variations passées du niveau des mers sur les échelles temporelles de plusieurs décennies, voire centaine d'années.

Au premier abord, les valeurs publiées dans le 4^e rapport du GIEC suggèrent qu'il n'y aurait plus de paradoxe (facteur deux entre les deux termes du budget). Cependant, une lecture attentive montre que l'écart entre les deux termes du budget global reste sensiblement le même (de l'ordre de 0,7 mm/an, *Figure 1*) avec 1,1 mm/an pour la somme des contributions à l'évolution du niveau des mers et 1,8 mm/an pour l'analyse des observations des marégraphes. Par conséquent, l'écart de quelque 0,7 mm/an constaté dans le 3^e rapport du GIEC est seulement décalé vers des valeurs plus élevées dans le 4^e rapport. Les progrès accomplis entre les deux rapports n'ont donc pas permis de réduire cet écart. D'ailleurs, il est difficile d'apprécier ces progrès à partir des synthèses du GIEC. D'une part, les contributions à l'évolution du niveau des mers ne sont pas distinguées de la même manière

(*Figure 1*). D'autre part, les durées et périodes considérées ne sont pas identiques d'une synthèse à l'autre : près de quarante ans distinguent les durées considérées dans les 3^e et 4^e rapports. Quelle serait d'ailleurs la durée minimale à considérer au regard des signaux climatiques recherchés (dilatation thermique des océans et fonte des glaces continentales) ?

Pour répondre à cette question, B. Douglas (NOAA) propose d'examiner le terme d'accélération (coefficient quadratique d'une régression) des séries temporelles des marégraphes en fonction de leur durée (*Figure 3a*). Ce terme est sensé capturer les signaux non linéaires, quelle que soit leur origine, en particulier les signaux décennaux ou inter-décennaux des couplages avec l'atmosphère lorsque la durée de l'enregistrement est courte. Il donne une indication des biais potentiels dans la détermination d'une tendance du niveau marin. L'hypothèse sous-jacente est la linéarité des signaux climatiques recherchés. La *Figure 3a* actualise l'exercice de B. Douglas

à partir de la banque de données du service international du niveau moyen de mer (PSMSL, www.psmsl.org), et suggère la même conclusion, à savoir de ne retenir que les séries d'une durée minimale de quelque 50 ans, imposée par l'incapacité à corriger avec des modèles précis les oscillations interannuelle et décennale. Cet exercice introduit une première difficulté rencontrée dans l'estimation de l'évolution du niveau des mers qu'il faut garder à l'esprit pour comprendre la fourchette des valeurs publiées et pouvoir interpréter les différences. Une tendance calculée sur vingt ans n'aura pas la même signification qu'une tendance calculée sur cent ans en présence d'oscillations décennales du niveau marin. En complément, il est intéressant de confirmer à partir des reconstructions de courbes globales du niveau des mers (www.psmsl.org/products/reconstructions/) que les résultats diffèrent d'au plus 0,2 mm/an lorsque des périodes différentes de plus de 50 ans sont considérées dans le XX^e siècle, par exemple de 50 ans, 60 ans ou 100 ans.

Une autre difficulté est l'échantillonnage spatial des données. En effet, la couverture géographique des marégraphes est d'autant plus réduite que l'on exige une durée minimale dans les séries. Par exemple, la *Figure 3* comprend 379 séries couvrant plus de 50 ans alors que leur nombre se réduit à 74 avec plus de 100 ans. Les scientifiques sont donc confrontés à un compromis entre durée minimale et couverture spatiale dans la sélection des données (*Figure 4*). A l'un des extrêmes, mentionnons les critères de choix de B. Douglas dans ses études de 1991 et de 1997, qui préconise la qualité des marégraphes et une durée d'au moins 60 ans. Il aboutit ainsi à quelque 25 marégraphes plus ou moins bien répartis globalement.

A ce titre, il est intéressant de noter que l'empreinte spatiale des processus climatiques dans le niveau de la mer se révèle d'autant plus étendue qu'ils présentent une signature temporelle de longue période. Entre parenthèses, remarquons que la *Figure 3b* indique une dispersion des tendances issues



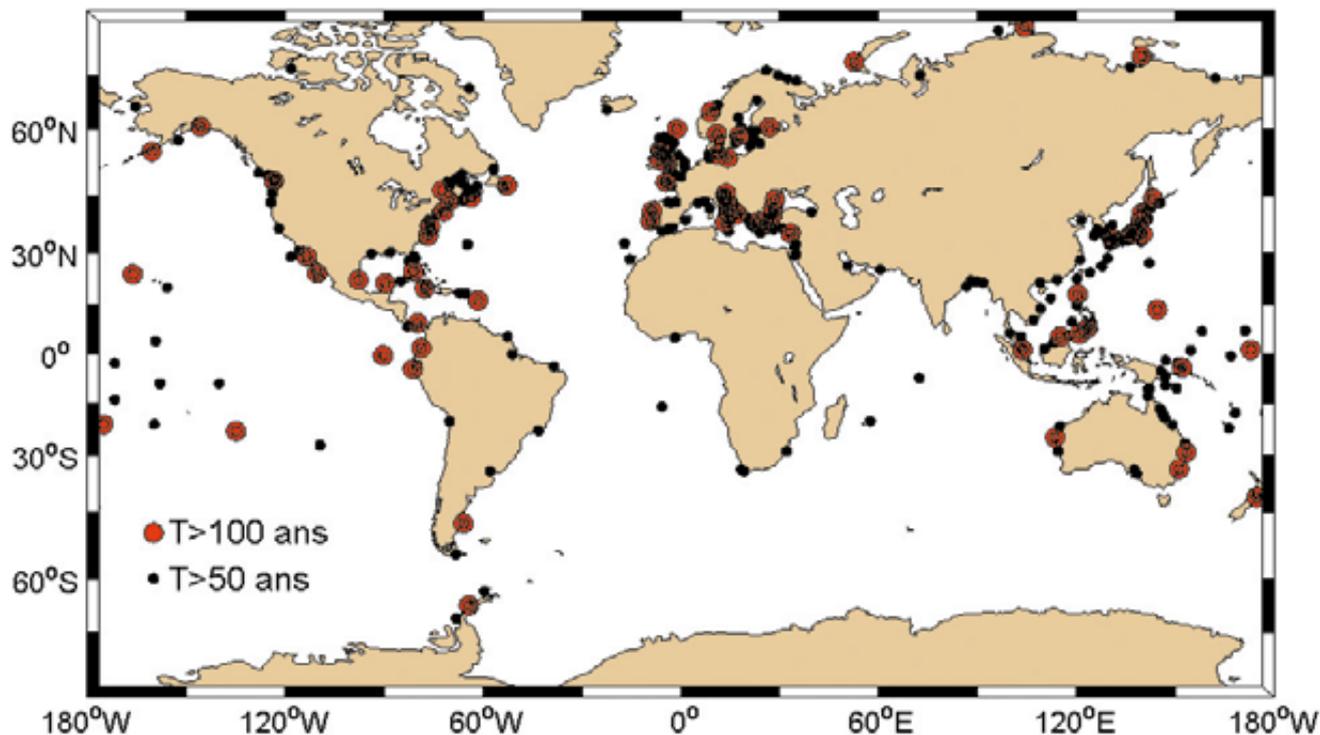


Figure 4. Distribution géographique des séries temporelles des marégraphes couvrant des durées de plus de 50 ans (cercles en noir) et 100 ans (en rouge). Cf. Figure 3.

des marégraphes de l'ordre de 5 mm/an et que celle-ci ne se réduit guère avec la durée des enregistrements. Nous verrons dans la section suivante que l'origine se trouve essentiellement dans des processus locaux affectant la stabilité verticale des marégraphes).

Tout en considérant les difficultés mentionnées ci-dessus, de nombreuses études ont été menées depuis le 4^e rapport du GIEC pour tenter de réduire les incertitudes associées aux composantes des termes du budget de l'évolution du niveau des mers (Figure 1), et par suite, de réduire l'écart entre contributions et observations dans ce budget. Parmi celles-ci, trois méritent que l'on s'y attarde (Domingues et al., 2008 ; Pokhrel et al., 2012 ; Hay et al., 2015). Les deux premières portent leurs efforts sur les causes (contributions), alors que la troisième étude se concentre dans l'analyse des observations (marégraphes). Toutes les trois sont publiées dans le journal Nature. La première (Domingues et al., 2008) revoit en particulier la contribution du réchauffement des océans profonds, qu'il est difficile à évaluer en raison du peu de mesures hydrographiques

(température, salinité) disponibles à des profondeurs supérieures à 700 mètres avant 1960. L'étude réussit une réévaluation de la somme des contributions à 1,5 mm/an et conclut en la fermeture du budget sur la période de 1961 à 2003 (aux barres d'erreur près) en se rapprochant de la valeur de 1,8 mm/an issue des marégraphes, rapportée dans le 4^e rapport du GIEC sur cette même période.

Dans la seconde étude (Pokhrel et al., 2012), les auteurs analysent la contribution des réservoirs d'eau liquide continentale. Il s'agit clairement de la contribution la moins bien connue jusque 2008, pour laquelle très peu de résultats étaient publiés dans la littérature spécialisée. Les synthèses du GIEC témoignent de cette ignorance dans les barres d'erreur associées dans le 3^e rapport, ou bien dans le choix délibéré d'omettre cette contribution dans le 4^e rapport (Figure 1). Notons qu'il s'agit d'une omission partielle, car la question est bien discutée, mais l'ampleur des incertitudes associées est si grande que toute estimation est jugée trop spéculative par le GIEC pour être affichée. Cette stratégie d'omission sera reconduite par la suite dans le

5^e rapport du GIEC pour d'autres contributions et/ou périodes considérées. Quant aux résultats, le bilan de Pokhrel et al. (2012) entre rétention et extraction d'eau continentale (essentiellement rétention par barrages et extraction d'eau souterraine avec retour dans les océans) donne une valeur de près de 0,8 mm/an. Les auteurs concluent alors à une résolution du paradoxe en ajoutant leur estimation à la somme des contributions du 4^e rapport du GIEC, qui omettait cette contribution (Figure 1), soit une somme actualisée de 1,9 mm/an à comparer à l'estimation de 1,8 mm/an issue des marégraphes.

Enfin, l'étude la plus récente (Hay et al., 2015) considère 622 marégraphes de la banque de données du PSMSL sur la période 1901 à 1990, et souligne l'existence d'un biais de quelque 0,4 mm/an dans l'estimation de la tendance du niveau des mers dû aux lacunes dans les séries temporelles d'observation. La méthode probabiliste employée permettrait d'obtenir une estimation affranchie de ce biais, de $1,2 \pm 0,2$ mm/an, et de proposer une nouvelle résolution du paradoxe en se comparant à la somme des



contributions de 1,1 mm/an fournie dans le 4^e rapport du GIEC (*Figure 1*). Une conséquence notable de leur résultat est l'accélération plus prononcée par rapport à celle de 3,3 mm/an sur les vingt dernières années, soit un accroissement de l'élévation de 2,1 mm/an depuis les années 1990 au lieu d'un accroissement de 1,4 mm/an si c'est la valeur de 1,8 mm/an du 4^e rapport du GIEC qui est utilisée dans la comparaison.

Si bien que les travaux mentionnés ci-dessus sont remarquables en termes d'originalité méthodologique et d'apport de nouvelles connaissances, le lecteur averti regrettera l'absence d'analyse critique et/ou de discussion dans les choix adoptés pour conclure à une résolution du paradoxe. Par exemple, Pokhrel et al. (2012) ajoutent leur estimation des eaux continentales (0,8 mm/an) à la somme des autres contributions publiées dans le 4^e rapport du GIEC (1,1 mm/an), alors que cette somme était actualisée à 1,5 mm/an

par Domingues et al. (2008). Dans le cas de Hay et al. (2015), les auteurs se réfèrent également à une somme des contributions de quelque 1,1 mm/an. Force est donc de constater que, suivant les choix adoptés, le paradoxe ne serait pas résolu. L'absence de discussion des choix est troublante. D'aucuns argumenteront que le paradoxe est plutôt secondaire devant les progrès originaux apportés par chacune de ces études, mais alors pourquoi mentionner le paradoxe (et sa résolution) alors que les journaux tels que *Nature* sont tyranniques dans le nombre de pages autorisés ?

La légitimité de l'énigme ne semble donc pas remise en question, mais sa résolution définitive l'est davantage, d'autant qu'il est intéressant de noter que ces études se limitent à corriger les déplacements verticaux de la surface terrestre aux marégraphes des seuls effets de l'ajustement glacio-isostatique (GIA). Pourtant, les processus géologiques à l'origine de ces déplacements sont nombreux.

Dans quelle mesure leur prise en compte serait pertinente dans la question qui nous intéresse ici, voire plus largement ? Comment et avec quelles performances ?

Déplacements verticaux aux marégraphes

Dans la *Figure 5* sont représentées les observations des marégraphes disposant d'enregistrements longs et de grande qualité (courbes de gauche) en trois régions différentes. Il s'agit de moyennes annuelles issues du PSMSL. Chacune des régions est connue pour être affectée par des processus géologiques pouvant causer des déplacements notables de la surface terrestre. Par exemple, le Nord de l'Europe et le Nord-ouest de l'Amérique sont des régions qui, lors du dernier maximum glaciaire, étaient couvertes d'énormes calottes de glace. Bien que disparues depuis plusieurs milliers d'années, l'intérieur de la Terre continue de se réajuster à la redistribution

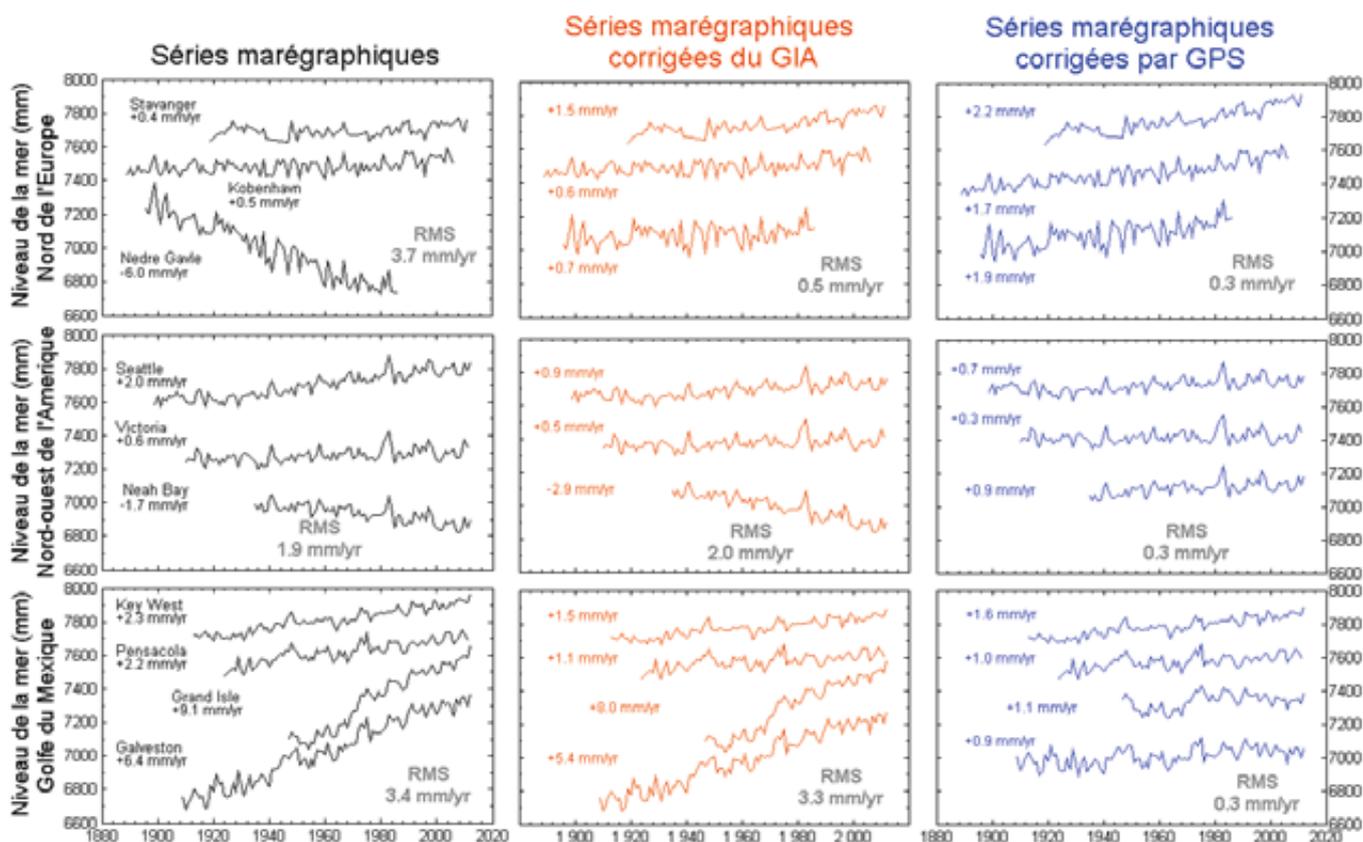


Figure 5. Variabilité géographique des tendances du niveau de la mer indiquées par des marégraphes dans trois régions du monde (courbes de gauche). Les panneaux de droite montrent les séries marégraphiques corrigées des vitesses GPS de stations placées à proximité ou (mieux) sur les marégraphes, alors qu'elles sont corrigées du modèle GIA de W. Peltier au centre.

des masses liées à leur fonte et la lithosphère témoigne de cet ajustement par un rebond postglaciaire qui peut atteindre le centimètre par an en certains endroits avec un gradient spatial important proche du centre de la calotte disparue. La variabilité des tendances des marégraphes affichée dans la *Figure 5* à l'intérieur de ces régions (écart-type ou RMS de 2 à 4 mm/an) est excessive au regard des seuls signaux climatiques et de l'extension relativement modeste de ces régions. L'application des vitesses issues du modèle de GIA (ICE-5G VM2) de W. Peltier réduit considérablement la variabilité des tendances (*Figure 5*, panneaux du centre) dans le Nord de l'Europe.

En revanche, dans le Nord-ouest de l'Amérique, l'absence de réduction dans la dispersion confirme que d'autres processus dominent ces régions, en particulier d'origine tectonique (région de subduction de Cascadia), et a fortiori dans le Golfe du Mexique, qui est éloigné des régions où se trouvaient les calottes de glace aujourd'hui disparues. Dans ce dernier cas, les processus locaux semblent prépondérants, par exemple associés à la compaction de sédiments et/ou à l'extraction de fluides souterrains (nappes phréatiques ou encore hydrocarbures dans le Texas). A ce titre, il est aussi intéressant de noter que nombre de géologues considèrent que les processus de subsidence sont plus fréquents à la côte. En outre, au niveau de précision visé ici, les géodésiens savent bien qu'aucune région ne peut vraiment être considérée stable à la surface terrestre.

L'alternative aux modèles est la mesure des déplacements des marégraphes dans un repère terrestre géocentrique stable et précis. Mais au niveau de précision requis par l'application (quelques fractions de millimètre par an), le souhait est plus facile à formuler qu'à réaliser : près de vingt ans de progrès ont en effet été nécessaires entre l'idée que la géodésie spatiale pouvait apporter une solution au problème et les premiers résultats effectifs obtenus à l'échelle globale. Parmi les techniques de géodésie spatiale le système améri-

cain GPS (*Global Positioning System*) s'est rapidement imposé en raison de la qualité des résultats, de son utilisation pratique et des coûts relativement raisonnables du matériel. D'abord déployé en mode campagne de quelques jours à quelques semaines, l'installation de stations permanentes est apparue rapidement indispensable pour espérer détecter des signaux aussi ténus sur la composante verticale du positionnement. De plus, tout changement de matériel, antenne ou récepteur, voire logiciel interne de récepteur, peut entraîner des sauts dans les séries de positions, et par conséquent des biais dans l'estimation des vitesses GPS. A défaut de s'en affranchir, une observation continue offre la possibilité de les détecter, de les comprendre, voire de les corriger ou de les prendre en compte dans le processus d'estimation des vitesses.

Un autre point qui s'est révélé critique est l'analyse des mesures GPS. Celle-ci est en effet particulièrement complexe pour déterminer les déplacements verticaux ténus du socle sur lequel reposent les marégraphes. La définition de la stratégie de calcul doit se faire avec soin. Elle doit prendre en compte tous les effets qui peuvent avoir un impact millimétrique sur la composante verticale du positionnement par GPS et les modéliser.

Cette composante est particulièrement sensible : une modélisation incorrecte, par exemple, du retard des signaux dans l'atmosphère, des variations de centre de phase des antennes ou des effets de charge de l'océan ou de l'atmosphère, de même qu'une réalisation imparfaite du repère terrestre, une mauvaise géométrie du réseau de stations, des incohérences dans les modèles de force appliqués aux satellites, ou encore dans les orbites des satellites avec le repère terrestre, se propagent de manière complexe, difficile à évaluer, dans la composante verticale des positions GPS, augmentant ainsi le niveau et la nature du bruit. Il s'ensuit des corrélations spatiales et des corrélations temporelles dans les séries de position, avec des biais potentiels importants dans les vitesses et dans les incertitudes estimées.

Les panneaux de droite de la *Figure 5* montrent les séries marégraphiques corrigées des vitesses GPS de stations placées à proximité ou (mieux) sur les marégraphes. Ces vitesses proviennent d'une réanalyse en réseau global de stations GPS sur la période 1995-2010 (SONEL, www.sonel.org). La dispersion observée dans les panneaux de gauche est remarquablement réduite dans les trois régions considérées (écart-type de 0,3 mm/an), autrement dit quel que soit le contexte géologique considéré.

Si les résultats de la *Figure 5* sont encourageants, l'objectif constitue encore un défi métrologique pour la géodésie, car les signaux recherchés sont ténus et imposent d'atteindre des incertitudes de quelques dixièmes de millimètres par an dans un repère terrestre géocentrique. Toutes les régions ne donnent pas des résultats aussi spectaculaires. D'une part, les marégraphes côtiers sont encore loin d'être équipés de stations GPS géodésiques permanentes. D'autre part, la définition de la stratégie d'analyse des mesures GPS doit se faire avec soin et peu de groupes dans le monde sont capables de produire des résultats semblables à ceux de la *Figure 5*. Une infrastructure de dimension mondiale est nécessaire, notamment pour la réanalyse des orbites des satellites et pour la réalisation précise du repère terrestre dans lequel les mouvements sont déterminés.

En France, une infrastructure de type observatoire de recherche se met en place pour apporter des éléments de réponse à la question des variations à long terme des composantes du niveau de la mer, à la côte et par rapport à celle-ci (SONEL, www.sonel.org). Elle contribue au programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS) qui se trouve sous l'égide de la Commission Océanographique Intergouvernementale de L'UNESCO et s'appuie sur le service international IGS (www.igs.org) en suivant de près les progrès réalisés dans la réalisation du repère de référence international (ITRF) au sein du service international de la rotation et des systèmes de référence terrestres (IERS, www.iers.org).

L'ITRF face au paradoxe

La *Figure 6* représente deux reconstructions du niveau de la mer dans lesquelles les données des marégraphes ont été corrigées par les vitesses GPS de la solution mentionnée ci-dessus, disponible dans SONEL. Selon Wöppelmann et al. (2014), la variabilité géographique des tendances des marégraphes corrigés par GPS suggère un groupement zonal (suivant la latitude) des régions dont les barycentres et tendances régionales du niveau de la mer sont indiqués dans la carte insérée dans la *Figure 6*. La cohérence spatiale entre les régions est en effet remarquable (écart-type de 0,2 mm/an) lorsqu'on groupe les régions plutôt vers l'hémisphère nord ou plutôt vers l'hémisphère sud, alors que les tendances de chacune des courbes sont respectivement de 2,0 mm/an (Nord) et de 1,1 mm/an (Sud). Cette différence statistiquement significative interpelle à plusieurs titres et, si elle s'avère réelle, introduit un éclairage nouveau à la question du paradoxe (fermeture du budget) car tout échantillonnage imparfait des hémisphères conduirait potentiellement à des valeurs globales entre 1 et 2 mm/an.

D'une part, il convient de souligner l'échec des auteurs à trouver une

explication physique à cette différence, aussi bien dans les champs de pression atmosphérique que dans les observations de température des océans, ou dans les empreintes de fonte de glace continentale prédite par les modèles à partir de scénarios réalistes de déglaciation au cours du XX^e siècle. Resterait-il des mécanismes encore à découvrir dans les circulations méridionales des océans ou de l'atmosphère ? A ce propos, il est intéressant de mentionner le constat fait par von Humboldt (1817) des températures significativement plus chaudes dans l'hémisphère nord, toujours confirmé depuis. Mais sa traduction en termes de niveau marin est loin d'être évidente et explicative.

D'autre part, les auteurs écartent un défaut dans la stratégie d'analyse, aussi bien dans la représentativité des océans par les marégraphes retenus, en réalisant des tests avec une série de modèles climatiques, que dans la stratégie d'analyse des mesures GPS. Leur solution GPS présente un accord remarquable (0,1 mm/an en moyenne) avec celle de M. King (Université de Tasmanie), développée avec une stratégie d'analyse différente (approche *Precise Point Positioning* ou PPP) au lieu des doubles différences.

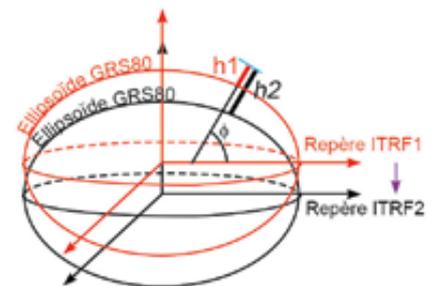


Figure 7. Impact d'une dérive de l'origine du repère terrestre sur la composante verticale du déplacement à la surface terrestre

Cependant, un élément commun mais externe à ces analyses des mesures GPS peut jouer un rôle majeur dans les résultats à l'échelle globale. Il s'agit de la réalisation du repère de référence terrestre, dont la meilleure réalisation possible est actuellement celle de l'ITRF. La *Figure 7* illustre comment une dérive de l'origine du repère suivant l'axe Z (pôles) impacterait les vitesses le long de la composante verticale. Selon les conclusions de la sous-commission 1,2 de l'Association Internationale de Géodésie (AIG) publiées en 2014, les erreurs dans la réalisation des paramètres physiques de l'ITRF sont de quelque 0,5 mm/an pour l'origine et de quelque 0,3 mm/an pour le facteur d'échelle. La propagation de ces erreurs pourrait ainsi expliquer une partie de la différence entre hémisphères, mais seulement 0,5 mm/an étant donné la distribution des stations considérées.

La difficulté de l'exercice à réaliser une évaluation juste d'un produit tel que l'ITRF mérite d'être mentionnée, car nous sommes aux limites métrologiques des outils disponibles. Les résultats présentés ici soulignent que la réalisation d'un repère géocentrique stable et précis constitue le facteur limitant dans cette application du niveau des mers qui se révèle exigeante en termes de métrologie. Il faudrait définir et réaliser les paramètres physiques du repère terrestre, origine et échelle, à mieux que 0,1 mm/an et 0,01 ppb/an, respectivement (1 ppb ou partie par billion étant équivalent à quelque 6 mm à la surface terrestre). Des progrès sont donc espérés dans ce domaine de la géodésie, en particulier

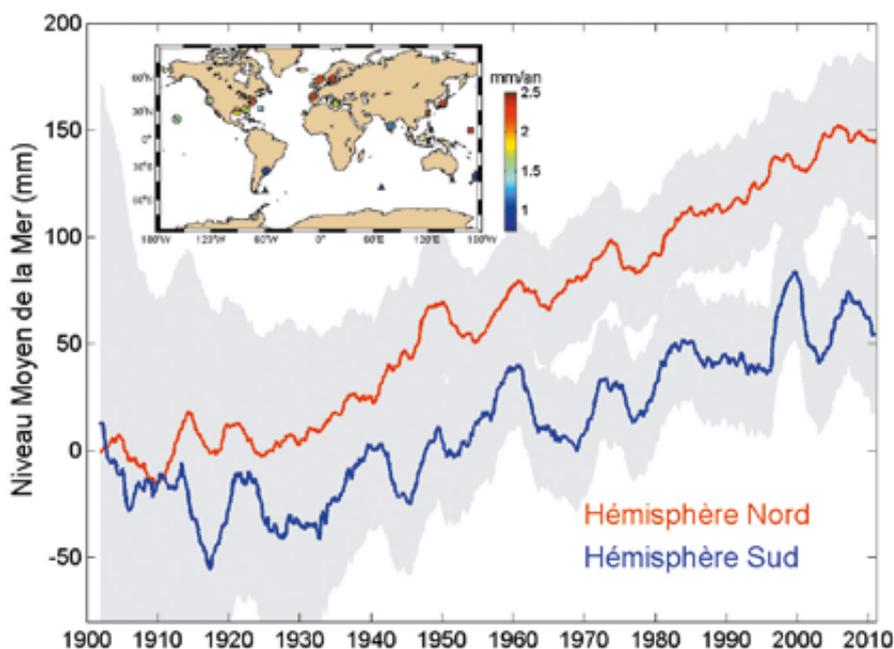


Figure 6. Courbes du niveau de la mer regroupant les régions des marégraphes situées plutôt dans l'hémisphère Nord ou plutôt dans l'hémisphère Sud.

