

LA MONTÉE DU NIVEAU DES OCÉANS PAR MARÉGRAPHIE ET GÉODÉSIE SPATIALE : CONTRIBUTIONS FRANÇAISES Á UNE PROBLÉMATIQUE MONDIALE

par Guy Wöppelmann ⁽¹⁾, Laurent Testut ⁽²⁾ et Ronan Créach ⁽³⁾

RÉSUMÉ

Les marégraphes enregistrent les variations de la hauteur du niveau de la mer par rapport à une référence locale attachée au socle sur lequel ils reposent à la côte. L'information contenue dans leurs enregistrements va donc bien au-delà du seul phénomène de la marée océanique. Ce constat explique l'intérêt porté à cette observation par de nombreuses communautés. Aujourd'hui, les marégraphes constituent la seule source d'observation directe disponible sur plusieurs décennies, voire centaines d'années, qui apporte une information précieuse pour décrire et comprendre les variations passées du niveau des océans, en particulier dans le contexte de réchauffement climatique planétaire. Dans cet article nous abordons l'estimation de la montée du niveau des océans sur le dernier siècle et les difficultés associées à cette estimation, en particulier liées à la question des mouvements verticaux du sol présents également dans les enregistrements marégraphiques. Une revue actualisée des différentes approches pour prendre en compte ces mouvements est proposée en soulignant les contributions françaises marquantes dans ce domaine et les dispositifs d'observation qui se mettent en place, en particulier le service d'observation SONEL (<http://www.sonel.org>), dont la composante géodésique GPS est appelée à jouer un rôle international.

ABSTRACT

Tide gauges measure sea level relative to a local reference point attached to the land upon which the gauges are grounded at the coast. Therefore, the information contained in the tide gauge records goes beyond the only ocean tide phenomenon. This explains the wide range of interest expressed by various communities for that type of observations. Today, tide gauges represent the only direct observation source of sea-level data available over decades to centuries, which provide invaluable information to describe and understand past sea level changes of the oceans, in particular within the context of global warming. In this paper, we examine the question of global sea level rise estimation over the past century and the difficulties raised by vertical land movements also present in the tide gauge records. An updated review of the different approaches to deal with these movements is provided, underlying the French contributions into this field and the observing infrastructures which are developed, in particular the SONEL observing service, whose geodetic GPS component is expected to play an international role.

(1) Université de la Rochelle - CNRS, UMR 6250 LIENSs, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France. (Email : gwoppelm@univ-lr.fr)

(2) LEGOS, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France. (Email : laurent.testut@legos.obs-mip.fr)

(3) SHOM, 13 rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France. (Email : creach@shom.fr)

1. INTRODUCTION

Les marégraphes enregistrent les variations de la hauteur du niveau de la mer par rapport à une référence locale attachée au socle sur lequel ils reposent à la côte. L'information contenue dans leurs enregistrements va bien au-delà du seul phénomène de la marée océanique. A ce titre, il convient de chercher l'étymologie du terme marégraphe dans le latin « mare » (mer) et le grec « graphein » (écrire). Quant à la définition proposée dans Simon (2007) : « Par son étymologie, le terme de marégraphie se rapporte à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en ont permis une meilleure connaissance », elle mérite d'être étendue aux autres phénomènes qui affectent le niveau de la mer, en particulier, les effets météorologiques de la pression atmosphérique ou du vent, les ondes de tempête, les tsunamis, les effets de couplage entre l'atmosphère et l'océan tel que le phénomène El Niño ou l'oscillation Nord Atlantique, les effets stériques dus aux changements de température ou de salinité, mais aussi les variations à long terme dues aux changements climatiques (fonte des glaces continentales, en particulier). Ce constat explique l'intérêt porté à cette observation par de nombreuses communautés : astronomes, hydrographes, géographes, géophysiciens, océanographes et climatologues.

Aujourd'hui, les marégraphes constituent la seule source d'observations directes disponible sur plusieurs décennies, voire centaines d'années, qui apporte une information précieuse pour décrire et comprendre les variations passées du niveau des océans. Les observations précises à partir des satellites sont relativement récentes (1992, Topex/Poseidon) et jugées de durée trop courte par certains pour déterminer une tendance séculaire ou une accélération significative du niveau des océans liée au réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre. Dans cet article nous examinons la question des variations générales et à long terme du niveau de la mer observées directement par l'Homme, depuis parfois près de trois cents ans (Pouvreau 2008), même si le cas de Brest est un cas tout à fait exceptionnel (Cartwright 1999). Dans cet article nous abordons plus particulièrement l'estimation de la montée du niveau des océans sur le dernier siècle et les difficultés associées à cette estimation, en particulier liées à la prise en compte des mouvements verticaux du sol présents dans les enregistrements marégraphiques.

2. LE CONTEXTE

2.1 « L'énigme du niveau de la mer » (W. Munk)

Selon les synthèses du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le niveau général de la mer s'est élevé de 10 à 25 centimètres au cours des cent dernières années avec une valeur centrale préférée correspondant à un taux moyen de $1,8 \pm 0,5$ mm/an (Bindoff *et al.* 2007). Dans le troisième rapport du GIEC, le bilan entre la somme des contributions climatiques à cette élévation et l'estimation faite à partir des observations directes fait apparaître un facteur deux, 0,7 mm/an *versus* 1,5 mm/an, respectivement. Munk (2002) soulève ainsi la question inquiétante de notre capacité à prévoir le futur si nous ne sommes pas capables d'expliquer le passé récent. Depuis, si ce facteur semble réduit dans le quatrième rapport du GIEC

(Bindoff *et al.* 2007), l'écart entre les deux valeurs reste de 0,7 mm/an (1,1 mm/an *versus* 1,8 mm/an). De nombreuses études ont été menées depuis ce quatrième rapport pour tenter de réduire les incertitudes dans la perspective de mieux prévoir les variations du niveau de la mer, et par suite mieux anticiper leurs conséquences, et mieux s'adapter aux changements à venir ou, du moins, moins mal.

2.2 Problématique et enjeux

D'où viennent les valeurs de 1,5 ou 1,8 mm/an de montée du niveau des océans sur le dernier siècle rapportées ci-dessus ? A partir de quelles données sont-elles issues ? Le dispositif de mesure disponible est-il bien adapté ? Comment sont analysées les observations ? N'y aurait-il pas des erreurs systématiques dans le dispositif de mesure ou dans les méthodes d'analyse qui expliqueraient les écarts observés entre les résultats des différentes études ? Quelles sont les limites et les difficultés associées à ces déterminations ? Et au prix de quelles hypothèses sont-elles obtenues ?

Par ailleurs, la surface des océans est sous la surveillance précise des altimètres radars embarqués sur satellite depuis le lancement du satellite franco-américain Topex/poseidon en 1992, puis de ces successeurs, la série Jason. Des hauteurs d'eau à quelques centimètres près sont obtenues de manière continue par rapport au centre des masses de la Terre. Les satellites équipés d'altimètres radar ont révolutionné l'océanographie en permettant enfin l'accès à l'océan du large, autrement plus difficile à observer par les mesures *in situ* des marégraphes, avec une couverture spatiale dense et une répétition des traces au sol régulière. L'analyse de ces mesures fait l'objet de nombreuses études qui indiquent une élévation du niveau des océans de quelque $3,3 \pm 0,4$ mm/an depuis 1993 (e.g., Cazenave & Llovel 2010). Dans quelle mesure cette valeur est-elle anormale ? Peut-on la relier à un changement climatique planétaire ? N'est-elle pas le résultat d'une oscillation incomplètement observée ? Que montrent les observations passées à plus long terme ?

Enfin, il est important de remarquer que si la détermination de la tendance du niveau global des océans se révèle un indicateur climatique important permettant de valider les modèles de réchauffement climatique et d'améliorer leurs prédictions, la question de son intérêt pratique se pose dans l'anticipation des conséquences, l'évaluation des risques et la définition de stratégies d'adaptation. Alors que le GIEC a jusqu'à présent surtout porté son attention sur l'estimation d'indicateurs de changement climatique à l'échelle planétaire (température moyenne de l'atmosphère, taux de dioxyde de carbone atmosphérique, niveau moyen des océans...), l'intérêt scientifique, économique et social se trouve dans les variations locales du niveau marin, lesquelles pourront s'écarter notablement de la moyenne globale. Les variations spatiales des tendances du niveau de la mer sont désormais reconnues. Les processus à l'origine de ces variations sont multiples : (i) dilatation thermique des couches superficielles des océans (e.g., Ishii *et al.* 2006) ; (ii) fonte des glaces continentales et effets gravitationnels associés à la redistribution des masses d'eau (e.g., Mitrovica *et al.* 2009) ; (iii) redistribution des champs de pression atmosphérique (e.g., Woodworth *et al.* 2010) ; (iv) mouvements verticaux du sol à la côte (e.g., Wöppelmann *et al.* 2007).

Ces questions relèvent d'une problématique vaste qui peut encore se décliner en de nombreuses questions particulières et techniques. Elles font l'objet de discussion dans la communauté scientifique, et de nombreux travaux sont en cours (Church *et al.* 2010). Nous présentons dans cet article une revue actualisée des résultats obtenus dans l'estimation de l'évolution récente du niveau des océans sur le dernier siècle à partir de l'analyse des mesures marégraphiques en soulignant la contribution des mesures GPS géodésiques localisées avec les marégraphes.

3. LES DIFFÉRENTES APPROCHES

3.1 Une hypothèse très critiquée

La mesure du niveau de la mer réalisée par un marégraphe à la côte est une mesure relative du niveau de la mer par rapport au socle sur lequel repose le marégraphe (Figure 1). Tout mouvement du support du marégraphe, par exemple une subsidence due à un processus de sédimentation ou bien à un tassement de la structure sur laquelle il s'appuie, se traduit dans l'enregistrement comme une élévation du niveau de la mer observé sans qu'il n'y ait pour autant lieu de l'interpréter comme une élévation du niveau de l'eau due à la fonte des glaces.

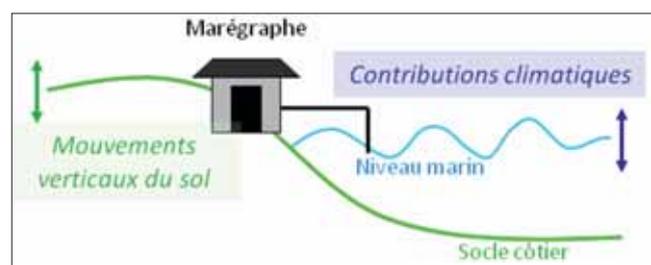


Figure 1 : La grandeur relative du niveau de la mer par rapport à la côte observée par un marégraphe.

Les processus géophysiques à l'origine de ces mouvements verticaux du sol sont nombreux (e.g., Emery & Aubrey 1991). Ils peuvent masquer le signal climatique associé à la fonte des glaces continentales et à la dilatation thermique des masses d'eau océaniques, qui sont deux indicateurs significatifs d'un réchauffement climatique planétaire, ou bien introduire une erreur systématique dans leur estimation.

Jusqu'au milieu des années 1980, l'approche pour estimer la montée du niveau des océans était d'analyser les séries temporelles marégraphiques de plus de dix ans et de supposer que les mouvements verticaux des marégraphes se compenseraient dans la moyenne, plus ou moins sophistiquée selon les auteurs (e.g., Gornitz *et al.* 1982). Cette hypothèse a soulevé de très nombreuses critiques (e.g., Barnett 1984 ; Pirazzoli 1986), d'autant plus importantes que le nombre de séries temporelles effectivement utiles dans un tel exercice s'avère considérablement réduit en raison des oscillations du niveau marin aux échelles interannuelles et décennales liées en particulier aux couplages entre l'atmosphère et les océans. Cette variabilité temporelle est difficile à caractériser et à modéliser, conduisant à ne retenir que les séries temporelles longues, typiquement de plus de quarante ans pour dégager des tendances séculaires (e.g., Douglas 1991). Par ailleurs, de nombreux géologues considèrent que les pro-

cessus de subsidence sont plus fréquents à la côte (e.g., Emery & Aubrey, 1991), et il ne suffirait pas d'écartier les sites connus pour être affectés par des forts mouvements verticaux. Au niveau de précision recherché, rien ne peut vraiment être considéré stable à la surface de la Terre.

3.2 La modélisation

Dès lors deux approches vont se mettre en place. La première consiste à modéliser les processus à l'origine des mouvements verticaux du sol, de façon à les prédire et à les corriger dans les enregistrements marégraphiques. Elle est toujours employée (e.g., Prandi *et al.* 2009). Malheureusement, seul l'ajustement glacio-isostatique (GIA) ou rebond postglaciaire dispose de modèles suffisamment élaborés pour apporter des résultats avec une précision suffisante pour être utiles dans l'application considérée (e.g., Peltier & Tushingham 1989). En effet, pour être utile la détermination de ces mouvements doit se faire avec une précision d'une fraction du signal recherché, qui est de l'ordre de quelques millimètres par an. A ce niveau de précision, les modèles de GIA présentent des limites qui sont associées aux incertitudes dans la connaissance des paramètres du modèle de Terre, par exemple le profil de viscosité dans le manteau ou bien l'épaisseur de la lithosphère, mais aussi dans l'histoire de déglaciation. De nombreuses études mettent en évidence des problèmes régionaux lors de comparaisons entre modèles de GIA (e.g., Woodworth 2003) ou avec des données indépendantes (e.g., Bouin & Wöppelmann 2010). Par ailleurs, la question reste posée pour les nombreux autres processus à l'origine de mouvements verticaux du sol pour lesquels il n'existe pas de modèles de qualité suffisante (e.g., Church *et al.* 2010).

3.3 La géodésie spatiale

L'alternative aux modèles est la mesure des mouvements verticaux des marégraphes dans un repère terrestre géocentrique stable et précis. Mais au niveau de précision requis par l'application, inférieur au millimètre par an, le souhait est plus facile à formuler qu'à réaliser : près de vingt ans de progrès seront en effet nécessaires entre l'idée que la géodésie spatiale pourrait apporter une solution (Carter *et al.* 1989) et les premiers résultats effectifs obtenus à l'échelle globale (Wöppelmann *et al.* 2007). Une limite importante est le repère géocentrique, dont il faudrait définir et réaliser les paramètres physiques, origine et échelle, à mieux que 0,1 mm/an et 0,01 ppb/an, respectivement (1 ppb, partie par billion, étant équivalent à quelques 6 mm à la surface de la Terre). La meilleure réalisation d'un repère géocentrique stable et précis, l'ITRF (e.g., Altamimi *et al.* 2007), reste encore le facteur limitant dans cette application exigeante en termes de métrologie (Collilieux & Wöppelmann 2011).

Parmi les techniques de géodésie spatiale le GPS s'est rapidement imposé en raison de la qualité de ses résultats, de son utilisation pratique et des coûts relativement raisonnables du matériel. D'abord déployé en mode campagne de quelques jours à quelques semaines (e.g., Ashkenazi *et al.* 1993 ; Zerbini *et al.* 1996), l'installation de stations permanentes est apparue rapidement indispensable pour espérer détecter des signaux aussi ténus sur la composante verticale du positionnement (Neilan *et al.* 1998). De plus, tout chan-

gement de matériel, antenne ou récepteur, voire logiciel interne, peut entraîner des sauts dans les séries de positions, et par conséquent des biais dans l'estimation des vitesses GPS (e.g., Bruyninx 2004). 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 en réseau de stations global. Cette dimension globale est indispensable dans le recalcul des orbites des satellites GPS, mais aussi dans une réalisation optimale du repère géocentrique. L'étude de cas réalisée par Legrand *et al.* (2010) sur le réseau européen montre des erreurs systématiques de plusieurs millimètres par an dans la composante verticale entre un traitement continental et un traitement global des mesures GPS. Les vitesses des solutions GPS régionales sont à considérer avec beaucoup de prudence dans l'interprétation de processus géophysiques de quelques millimètres par an sur la composante verticale.

A cet aspect global du traitement des mesures GPS s'est ajouté l'importance de réanalyser de manière cohérente l'ensemble des mesures GPS, passées et présentes, en appliquant rigoureusement la même stratégie (modèles, corrections, paramétrisation). L'objectif est de réduire les erreurs systématiques dans les produits GPS (coordonnées de station en particulier) induites par les changements dans un élément de la stratégie de traitement (Steigenberger *et al.* 2006). Une réanalyse complète des mesures GPS est nécessaire dès lors que l'utilisation d'un nouveau modèle ou d'une correction est reconnue pertinente. Le corollaire est le besoin de disposer de capacités de calcul adaptées au retraitement, en un temps raisonnable, de plus de dix ans de mesures de plusieurs centaines de stations GPS réparties mondialement, mais aussi de disposer d'un centre de données performant capable de gérer efficacement l'ensemble des observations et des informations contextuelles sur la manière dont les mesures sont acquises (matériel...).

Pour relever ces défis, des infrastructures de recherche et d'observation se sont développées de l'échelle internationale à l'échelle locale. A l'échelle internationale, les activités sont structurées depuis 1994 autour du service international IGS (Dow *et al.* 2009, <http://igs.org>) dont il est intéressant de noter l'évolution du sigle. Il a d'abord signifié : « *International GPS Service for geodynamics* », avant que le terme « *for geodynamics* » ne soit retiré, et que finalement « GPS » soit remplacé par GNSS. Cette évolution dans la désignation de l'IGS reflète l'évolution des champs d'application du système GPS, d'une part, et l'arrivée de nouvelles constellations de satellites, russe et européenne en particulier, d'autre part. C'est dans ce cadre international qu'est placé le projet TIGA (*GPS Tide GAUGE benchmark monitoring*) démarré en 2001. Ce projet a l'ambition de répondre aux besoins géodésiques décrits dans cet article et adressés formellement à l'IGS (Neilan *et al.* 1998) par la communauté scientifique du niveau de la mer organisée autour du programme mondial d'observation du niveau de la mer GLOSS de la commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco (Merrifield *et al.* 2009). Six centres d'analyses GPS participent au projet TIGA de l'IGS (Schoene *et al.* 2009), dont celui du consortium ULR décrit ci-après.

A l'échelle locale, des infrastructures de calcul importantes sont donc nécessaires pour réanalyser l'ensemble des mesures GPS dès qu'un élément de la stratégie d'analyse est modifié. A titre d'exemple, la puissance de calcul du centre d'analyses GPS du consortium ULR, dont nous présentons des résultats dans la section suivante, a considérablement évolué depuis 2008 avec l'acquisition d'un cluster Linux qui comprend aujourd'hui 392 cœurs de calcul. Il a permis de réduire de un an à trois semaines le traitement de dix ans de mesures d'un réseau global de quelque 300 stations GPS, ouvrant ainsi des possibilités d'expérimentation considérables. Cette évolution était aussi indispensable pour rester compétitifs dans le domaine très dynamique du spatial où les connaissances et méthodes progressent rapidement. Précisons enfin que le consortium ULR réunit aujourd'hui des chercheurs de l'IGN France, de l'IGN Espagne et du laboratoire LIENSs (CNRS – Université de la Rochelle). Il est connu dans l'IGS sous le nom de centre d'analyses ULR, car l'initiative vient de l'université de la Rochelle et l'infrastructure informatique matérielle et logicielle sur laquelle il s'appuie y est implantée.

4. LES SOLUTIONS GPS

4.1 Premiers résultats

Le centre d'analyses ULR fait figure de précurseur en France dans le traitement des mesures GPS en réseau global de plusieurs centaines de stations, et au niveau international dans la publication des premiers résultats à l'échelle globale pour la correction des mouvements verticaux des marégraphes (Wöppelmann *et al.* 2007). Quatre générations de solutions GPS se sont succédées dans le centre ULR. Chacune est caractérisée par le réseau de stations analysé (nombre de stations, géométrie des réseaux), par la période des mesures couverte (de plus en plus longue), par le repère terrestre dans lequel elle est exprimée (réalisation de l'ITRF), et par le choix des modèles, des corrections, de la paramétrisation et de la stratégie de combinaison et d'ajustement.

Une stratégie en réseau global avec des contraintes très lâches sur les positions des stations et sur les orbites, qui sont également ajustées, a prévalu dès l'origine du centre d'analyses ULR. Le principe sous-jacent est la réanalyse complète de l'ensemble des mesures dès lors qu'un élément de la stratégie est changé, et cela sans attendre la fin des traitements lorsque les capacités de calcul étaient limitées. Le traitement des observations GPS est en effet particulièrement complexe pour déterminer les mouvements verticaux tenus du sol sur lequel reposent les marégraphes (mouvements de l'ordre du mm/an). 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 logiciels utilisés dans les calculs de l'ULR sont GAMIT/GLOBK (Herring *et al.* 2008) et CATREF (Altamimi *et al.* 2007) pour le traitement des mesures GPS, d'une part, et la combinaison des solutions journalières, hebdomadaires et long terme, d'autre part. Les détails sont dans les publications associées, par ordre de solution, qui n'est pas celui de parution des articles en raison des délais des journaux : Wöppelmann *et al.* (2008a ; 2007 ; 2009) et Santamaria-Gomez *et al.* (2011). Les deux dernières solutions, désignées par ULR3 et ULR4 dans la table 1 (Wöppelmann *et al.* 2009 ; Santamaria-Gomez *et al.* 2011), prennent en compte la nature du bruit dans les séries temporelles de positions GPS avec le logiciel CATS (Williams 2008). Il permet d'estimer avec rigueur les erreurs sur les vitesses GPS selon le type de bruit et son niveau.

L'étude détaillée de Santamaria-Gomez *et al.* (2011) confirme la dominante de bruit de scintillation remarquée par d'autres études et explore différentes sources possibles à l'origine de ce bruit.

4.2 Application aux marégraphes

La figure 2 montre les performances des résultats GPS obtenus par le centre d'analyses ULR dans l'application visée de détermination des mouvements verticaux aux marégraphes pour les séparer des contributions climatiques dans les enregistrements marégraphiques. Les graphiques de droite illustrent la qualité de la correction GPS de la dernière solution ULR par rapport à celle du modèle ICE5G (VM2) de Peltier (2004) dans deux régions différentes.

Même dans une région dominée par l'effet du GIA, les vitesses GPS de la dernière solution ULR4 (Santamaria-Gomez *et al.* 2011) réduisent mieux la dispersion des tendances linéaires des séries de moyennes annuelles des marégraphes que les prédictions du modèle de GIA de Peltier (2004), prédictions qui sont encore très largement utilisées aujourd'hui (e.g., Prandi *et al.* 2009). Dans une région éloignée des zones autrefois couvertes par les calottes de glace du dernier maximum glaciaire (bas de la figure 2), les prédictions du modèle de Peltier (2004) sont pratiquement sans effet significatif, alors que les vitesses GPS capturent bien la dispersion observée dans le panel de gauche en réduisant l'écart-type des vitesses (RMS) de 2,0 à 0,2 mm/an.

Toutes les régions ne donnent pas des résultats aussi spectaculaires. Mais, de manière générale, le bilan est clairement

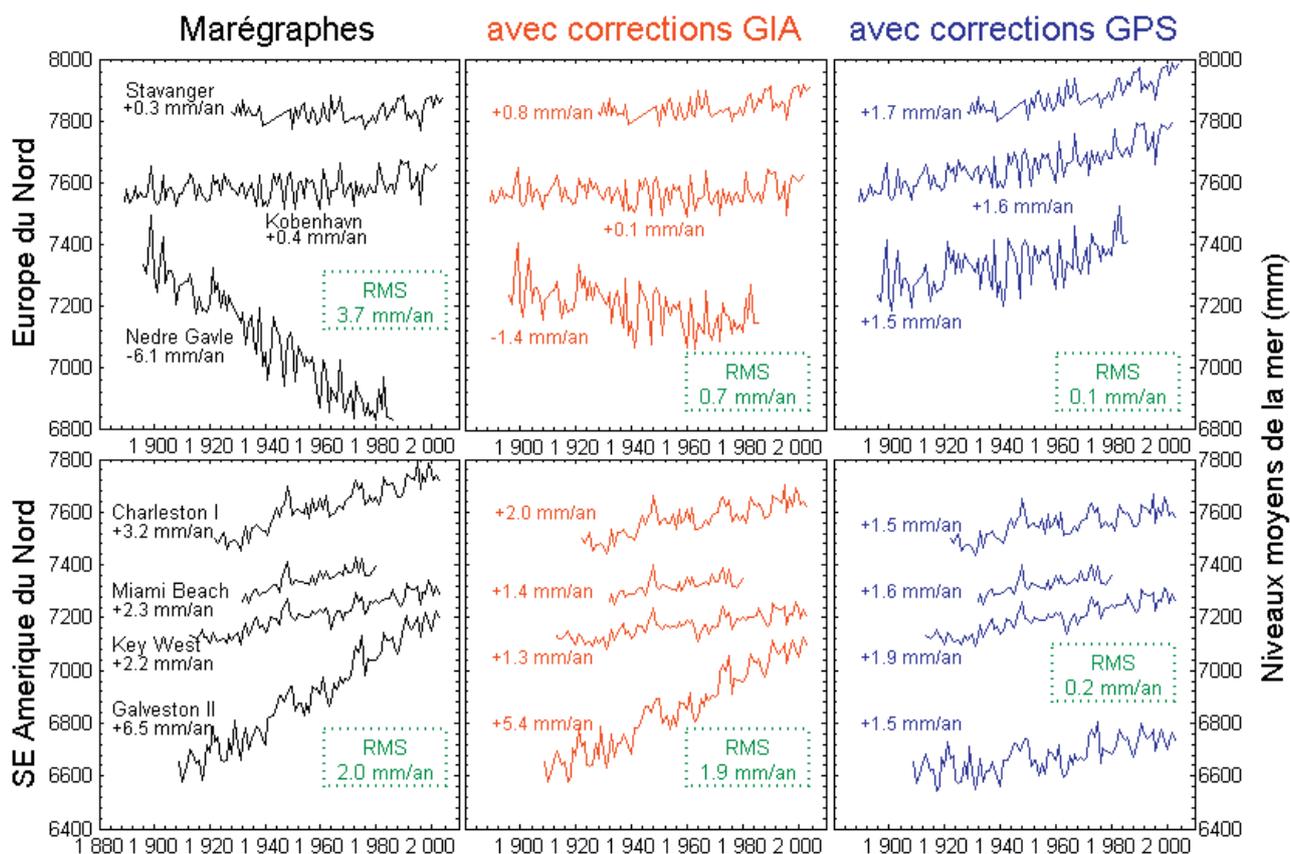


Figure 2 : Séries temporelles de valeurs moyennes annuelles issues de l'analyse des marégraphes : (gauche) sans corrections ; (milieu) corrigées des prédictions du modèle ICE5G (VM2) de Peltier (2004) ; et (droite) corrigées des résultats GPS de l'ULR exprimés dans le repère géocentrique ITRF2005 ; (haut) en Europe du Nord et (bas) Sud-est de l'Amérique du Nord. (Les unités sont en mm ; les RMS sont des écart-types des vitesses).

Solution	TG	TG-GIA	TG+GPS (mm/an)			
	-	Peltier (2004) ICE-5G VM4	ULR1 ITRF2000 1999.0-2005.7	ULR2 ITRF2000 1997.0-2006.9	ULR3 ITRF2005 1997.0-2006.9	ULR4 ITRF2005 1996.0-2009.0
Dispersion individuelles	2.05	1.49	1.15	1.06	0.98	0.59
Dispersion régionales	1.37	0.98	0.91	0.83	0.60	0.55
Elévation du niveau des océans		1.83 ± 0.21	1.31 ± 0.30	1.38 ± 0.28	1.61 ± 0.19	1.34 ± 0.12

Table 1 : Résultats des marégraphes (TG) sélectionnés suivant les critères de Douglas (2001) et corrigés ou pas des mouvements verticaux du sol, soit par le modèle GIA de Peltier (2004), soit par les vitesses GPS des quatre solutions produites par le consortium ULR (voir texte). Les unités sont en mm/an.

en faveur des corrections du champ de vitesses GPS du consortium ULR. La table 1 montre l'apport des solutions ULR au fur et à mesure des progrès réalisés dans l'analyse des mesures GPS en termes de réduction dans la dispersion des tendances linéaires individuelles des marégraphes (1^{ère} ligne) et des moyennes régionales de ces tendances (2^{ème} ligne). Les groupements en régions, de même que les critères de sélection des séries marégraphiques, suivent ceux de Douglas (2001).

A titre de comparaison, les deux premières colonnes donnent les dispersions des tendances sans correction et avec la correction du modèle de Peltier (2004).

L'objectif de l'exercice était de montrer que les analyses des mesures GPS en réseau de stations global menées avec soin et avec rigueur, en particulier dans la cohérence des modèles de corrections appliquées, et dans la stabilité de la réalisation du repère terrestre, ont atteint la maturité suffisante pour apporter des corrections aux tendances des marégraphes au moins aussi pertinentes que les prédictions issues des modèles GIA d'ajustement glacio-isostatiques. Il s'agissait aussi de stimuler la communauté et d'encourager l'installation de stations GPS aux marégraphes. Car l'exercice reste démonstratif. Le nombre de stations utilisées est limité : 27 stations marégraphe – GPS regroupées en dix régions. Ces nombres coïncident (par hasard) avec le nombre de stations utilisées par Douglas (2001), même si leur répartition géographique n'est pas identique.

La dernière ligne de la table 1 correspond à l'estimation de l'élévation du niveau des océans obtenue à partir de la moyenne des tendances régionales suivant l'approche de Douglas (2001). Il est intéressant de remarquer que, malgré des stations et des régions différentes, l'estimation corrigée du GIA correspond à la valeur publiée dans Douglas (2001), à savoir de $1,84 \pm 0,35$ mm/an. Cette remarque tend à montrer la robustesse de son approche, même si le propos n'est pas de la discuter ici.

Alors que les travaux de Domingues *et al.* (2008) relevaient la somme des contributions climatiques publiée par le GIEC (Bindoff *et al.* 2007) de 1,1 mm/an à 1,5 mm/an, ceux du consortium ULR réduisent la valeur issue des observations

de 1,8 mm/an à 1,3 mm/an (table 1, cf. l'énigme de Munk, section 2). Dans la table 1, les estimations de montée du niveau des océans obtenues à partir des différentes solutions GPS de l'ULR sont tout juste cohérentes dans les barres d'erreur fournies. Ces barres d'erreur ne tiennent pas compte des incertitudes associées à la réalisation du repère géocentrique. Collilieux & Wöppelmann (2011) montrent que leur prise en compte augmente la barre d'erreur de 0,2 à 0,7 mm/an dans le cas de la solution ULR3 étudiée par les auteurs, avec un géocentre connu à 1 mm/an près et un facteur d'échelle connu à 0,5 mm/an près.

Ces résultats soulignent que la limite principale se trouve aujourd'hui dans la réalisation du repère géocentrique. Des progrès sont donc attendus dans ce domaine de la géodésie. Deux hypothèses de travail dans l'approche GPS doivent être relevées dans cette application. La première est de supposer qu'il n'y a pas de mouvement local différentiel entre l'antenne GPS et le marégraphe. Cette hypothèse souligne l'importance d'inclure dans les rattachements des repères de marégraphe celui de l'antenne GPS pour s'en affranchir. Malheureusement, cela n'est souvent pas réalisé par les opérateurs des marégraphes, ou bien l'information est difficile d'accès.

La deuxième hypothèse est que le mouvement observé aujourd'hui par GPS peut être extrapolé dans le passé. La figure 3 inspirée de Douglas (2001) apporte une évidence indirecte de la linéarité des mouvements du sol aux marégraphes en calculant le terme quadratique de leurs séries temporelles. Elle montre que le terme quadratique de l'ajustement par moindres carrés n'est pas significativement différent de zéro dans la grande majorité des séries temporelles considérées de plus de 60 ans, suggérant que les processus océaniques ou épirogéniques sont linéaires en bonne première approximation. Il convient cependant de rester prudent devant cette hypothèse.

4.3 L'énigme de Brest et de Newlyn

Les séries chronologiques des marégraphes de Brest (France) et de Newlyn (Royaume-Uni) sont parmi les plus longues au monde disponibles au PSMML (Woodworth & Player 2003). Elles ont de ce fait été analysées en détail

dans de nombreuses études. La continuité de la série de Brest a été remise en question récemment. Douglas (2008) observe un écart systématique de l'ordre de 20 mm avant la destruction du marégraphe de Brest en 1944 en comparant la série à celle de Newlyn après ajustement des données des deux séries sur la période post-destruction de 1944 à nos jours.

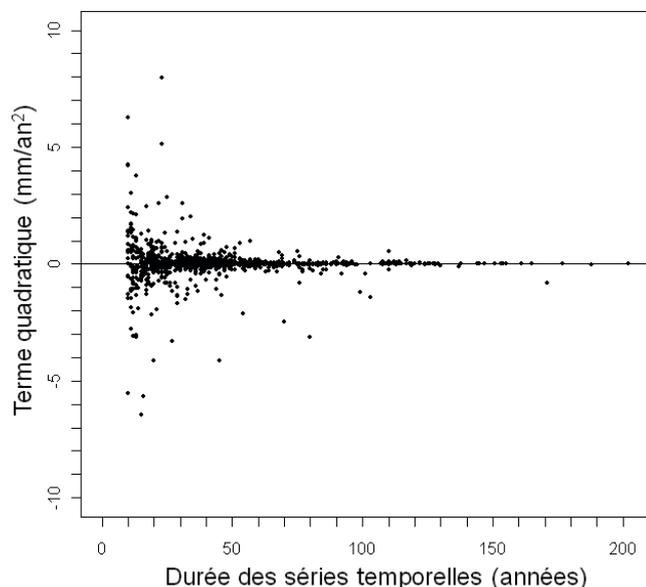


Figure 3 : Terme quadratique (accélération) des séries temporelles des marégraphes de la catégorie RLR du service international PSMSL (Woodworth & Player 2003) ; accès à la banque de données en janvier 2011 (communication personnelle M. Gravelle).

La figure 4 illustre l'approche de Douglas (2008), aisément reproductible. Elle s'appuie donc sur l'hypothèse que le signal océanique de basse fréquence est commun en raison de la proximité géographique des stations (210 km).

En supposant un problème dans la continuité de la référence des observations de Brest, Douglas (2008) les corrige de l'écart observé, et prétend ainsi résoudre la question de la différence des tendances linéaires des deux marégraphes sur le siècle passé, qui sont jugées significativement différentes, de 1,3 mm/an et 1,7 mm/an, respectivement à Brest et à Newlyn. Les barres d'erreur de la régression linéaire sont de l'ordre de 0,1 mm/an dans les deux cas.

Le travail publié dans Wöppelmann *et al.* (2008b) conclut cependant à la stabilité locale des deux repères principaux du marégraphe ayant survécu plus de cent ans. Cette conclusion s'appuie sur l'examen détaillé de six opérations de nivellement exécutées de part et d'autre de la destruction du marégraphe, entre 1889 et 1996. Les bombardements de 1944 ne peuvent donc être la cause d'un déplacement des repères, ni de la ville, jusque vingt kilomètres vers l'Est (distance couverte par l'étude de stabilité des repères de nivellement). Les repères ayant survécu, la référence des observations a également survécu, et l'installation d'un nouveau marégraphe avec des nouveaux repères a pu s'appuyer dessus. Un travail semblable de stabilité locale a été réalisé pour Newlyn par les collègues anglais avec des conclusions identiques (communication personnelle, S. Holgate).

Quelle est alors l'origine de la différence dans les tendances du niveau de la mer observées à Brest et à Newlyn ? L'énigme reste entière aujourd'hui. L'hypothèse d'un mouvement vertical différent est écartée pour l'instant. D'une part, les prédictions du modèle de GIA de Peltier (2004) donnent une valeur semblable de subsidence de l'ordre de -0,3 mm/an. D'autre part, les vitesses verticales GPS de la solution ULR4 (Santamaria-Gomez *et al.* 2011) indiquent également une subsidence semblable aux deux stations mais de l'ordre de l'ordre de -0,6 mm/an sur dix ans de mesures GPS démarrées vers la fin 1998 dans les deux cas.

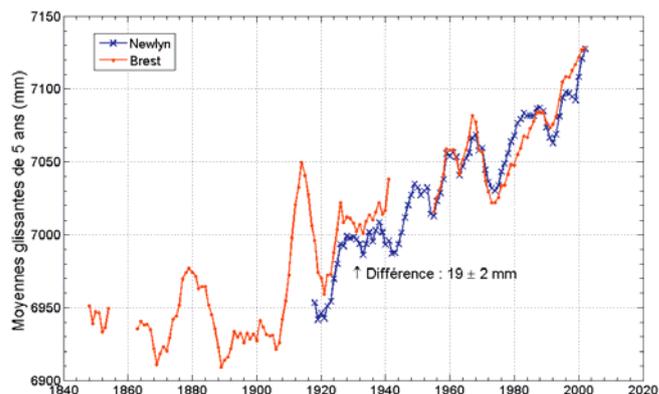


Figure 4 : Séries chronologiques de niveau de la mer des marégraphes de Brest (France) et de Newlyn (Newlyn) filtrées (moyenne glissante de cinq ans) et décalées arbitrairement de façon à ajuster les deux séries sur la période après 1944.

5. LE SERVICE D'OBSERVATION SONEL

Observer pour comprendre est une activité indispensable en sciences de la Terre (BDL 2009). La connaissance des variations climatiques du niveau de la mer n'échappe pas à cette logique qui vise à réduire les incertitudes et à développer des outils et des modèles utiles pour mieux décrire l'évolution passée et future, et par suite mieux anticiper les conséquences de cette évolution, et mieux s'adapter. La communauté internationale se structure dans ce domaine autour du programme mondial GLOSS de la COI/Unesco (section 3) initié en 1985 (Merrifield *et al.* 2009). En France, l'infrastructure SONEL (figure 5) se met en place avec des premières observations de marégraphes fournies à la communauté scientifique sur Internet en 2003. Développé par ses membres fondateurs, le SHOM et les laboratoires LEGOS et LIENSs, SONEL est labellisé depuis janvier 2011 par l'institut national des sciences de l'univers (INSU) du CNRS comme service d'observation.

SONEL vise à acquérir, traiter, archiver et distribuer des données du niveau marin observées par marégraphes (français) pour apporter des éléments objectifs de grande qualité métrologique par rapport à la côte et dans un repère géocentrique le plus stable et précis. L'infrastructure informatique de collectes, d'archivage, de gestion (base de données) et de diffusion se développe et se précise au fur et à mesure des moyens et des ressources, encore trop modestes malgré une reconnaissance récente comme service d'observation de l'INSU/CNRS.

SONEL est actuellement alimenté en observations marégraphiques par deux partenaires responsables de réseaux fran-

çais, le SHOM et le LEGOS, et en mesures GPS par plusieurs dizaines de partenaires responsables de réseaux structurés au sein du service international IGS, en particulier à travers le projet TIGA (Schoene *et al.* 2009). La composante marégraphique devrait se développer désormais dans un contexte favorable à l'extension des organismes producteurs d'observations marégraphiques qui est apporté par l'instruction permanente du Premier ministre du 20 avril 2010 (SGMER 2010). A ce titre, le SHOM met en place REFMAR (<http://refmar.shom.fr>) où les utilisateurs trouveront les mesures (brutes en temps réel, et contrôlées en temps différé) des marégraphes installés sur territoire français (Pouvreau 2010).

SONEL constitue ainsi un système distribué de données hétérogènes mais bien intégrées (figure 5), permettant aux utilisateurs un accès rapide et aisé aux différentes données grâce aux possibilités offertes par les technologies de communication Internet (www.sonel.org). Il s'appuie sur une excellence scientifique et technique reconnues de chacun des partenaires membres fondateurs : le SHOM pour la marégraphie ; le laboratoire LIENSs pour l'analyse des mesures GPS aux marégraphes ; le LEGOS pour la marégraphie en conditions extrêmes, en particulier. Cette

synergie de compétences et d'objectifs apporte des éléments solides de garantie d'aboutir à un dispositif d'observation et d'expérimentation performant et utile sur le long terme.

A travers SONEL, les utilisateurs peuvent facilement remonter à la source des mesures (marégraphiques ou géodésiques) pour mener leur propre analyse critique de celles-ci, ou bien exploiter les produits proposés. La figure 6 illustre une analyse réalisée à partir des moyennes annuelles de Brest disponibles sur SONEL. Celles-ci ont été calculées à partir de moyennes journalières issues du filtre de Doodson (d'autres filtres numériques sont proposés au choix de l'utilisateur, par exemple le filtre de Démerliac) en suivant rigoureusement les règles du PSMSL dans la prise en compte des lacunes de mesures, condition impérative d'ailleurs pour contribuer à cette banque de données internationale (Woodworth & Player 2003). Dans cet exemple d'utilisation, nous avons appliqué un filtrage par moyenne glissante aux valeurs annuelles (courbe lissée). Ce traitement souligne la variabilité basse fréquence qui peut introduire des erreurs systématiques dans le calcul d'une tendance linéaire à long terme sur une période courte. Par exemple, sur la période 1991-2009, la tendance est de 3,3 mm/an, en accord remarquable avec les résultats d'altimétrie satellitale (Cazenave &

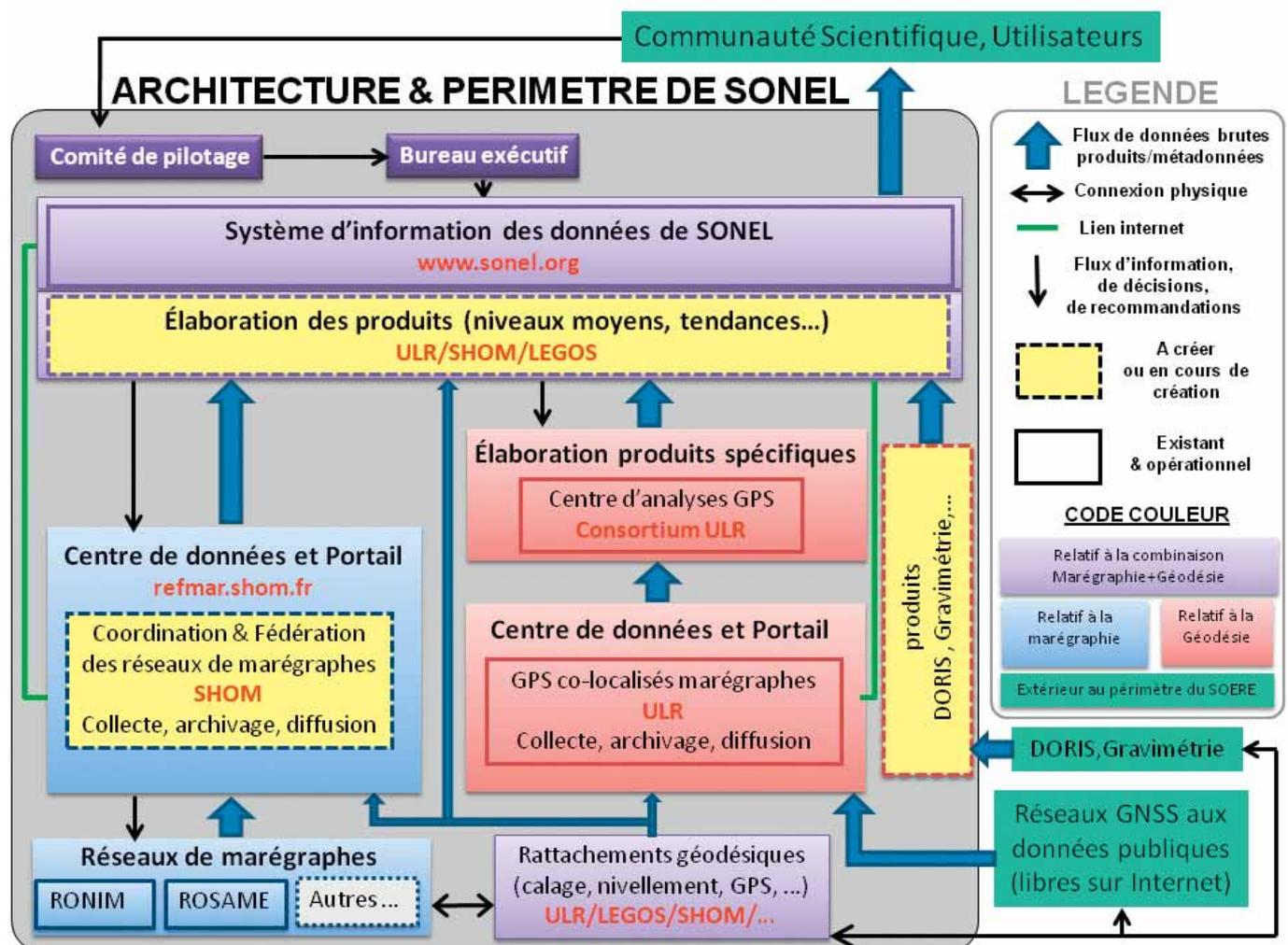


Figure 5 : Infrastructure d'observation SONEL. En traits pleins apparaissent les éléments existants et en développement, en pointillés ceux qui sont à construire ou en construction mais non opérationnels encore.

Llovel 2010). Mais elle est de 3,4 mm/an sur une même durée dans la période 1867-1885, et elle est de signe contraire (-3,0 mm/an) dans la période 1879-1897. D'où le débat sur l'origine de la montée du niveau des océans observée par les satellites, et l'importance des services d'observations *in situ* tels que SONEL.

De manière générale, il convient d'avoir une démarche critique sur les données utilisées. La précision et l'exactitude des mesures ne sont jamais acquises une fois pour toutes : un effort continu d'analyse et de contrôle des erreurs et des biais est indispensable. En particulier, l'évolution des techniques d'observation et des connaissances obligent à une révision critique et régulière des outils employés pour l'observation (Martin Miguez *et al.* 2008a). Des étalonnages et des comparaisons des produits et des données d'origines différentes sont essentiels, garantie de qualité et gage d'une utilisation ultérieure (Martin Miguez *et al.* 2008b). A ce titre, l'expérience récente avec les altimètres radar embarqués à bord des satellites est très instructive (Mitchum 1998). La détection des dérives instrumentales de l'ordre du millimètre par an s'est faite grâce à l'existence d'un réseau dense et bien contrôlé de marégraphes, soulignant l'importance de la démarche de comparaison et l'existence de dispositifs d'observation indépendants de nature différente.

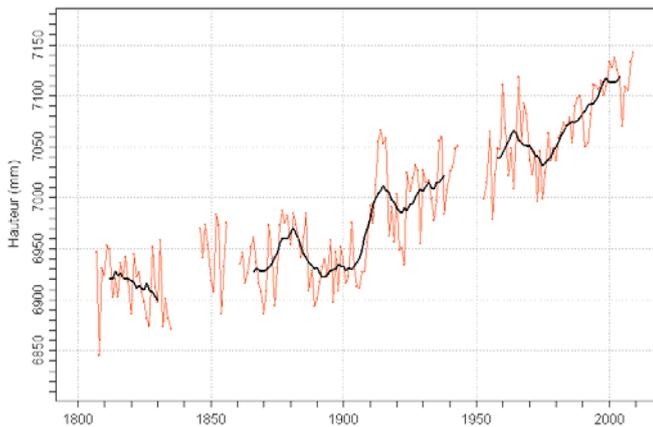


Figure 6 : Série de moyennes annuelles du marégraphe de Brest obtenues du service SONEL et auxquelles un filtrage par moyenne glissante de dix ans est appliqué (courbe lissée). L'origine des hauteurs est arbitraire.

Enfin, d'aucuns auront compris au cours de cet article que la composante GPS appliquée à la problématique de détection des variations climatiques enregistrées par les marégraphes a par nécessité une dimension mondiale (calcul de l'orbite des satellites GPS et réalisation du repère géocentrique avec une qualité suffisante). Elle comprend un centre de données et un centre d'analyses dans SONEL (figure 5). Le centre de données rassemble aujourd'hui les mesures GPS de près de 500 stations permanentes réparties dans le monde. Il s'agit de stations en co-localisation avec un marégraphe ou de stations dites de référence pour la réalisation du repère terrestre. Certaines remontent au début des années 1990 et le nombre de fichiers journaliers de mesures disponibles au format d'échange RINEX dépasse aujourd'hui le nombre de 1,5 millions. La reconnaissance acquise par cette composante mondiale de SONEL fait qu'elle est aujourd'hui sollicitée par le programme mondial GLOSS pour jouer un rôle à l'échelle internationale (communication personnelle, M. Merrifield).

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Si les résultats de la synergie de la marégraphie et de la géodésie spatiale sont encourageants, l'objectif constitue encore un défi pour la géodésie, car les contributions climatiques aux tendances du niveau de la mer enregistrées par les marégraphes sont (encore) ténues de l'ordre de 1 à 3 mm/an. Par ailleurs, la variabilité géographique des tendances du niveau de la mer fait désormais peu de doutes. Elle est prédite par les modèles de fonte des glaces continentales (e.g., Mitrovica *et al.* 2009) ou de dilatation thermique des océans (e.g., Ishii *et al.* 2006). Les résultats d'altimétrie radar embarquée sur satellite (Cazenave & Llovel 2010) observent effectivement une variabilité spatiale des tendances, mais sur une période courte de près de vingt ans. Leurs empreintes géographiques (*fingerprints*) ne correspondent pas à celles prédites par la fonte des glaces continentales. Par ailleurs, elles ne sont pas détectées par les observations *in situ* des marégraphes historiques (Douglas 2008).

Plusieurs explications peuvent être avancées, par exemple liées aux problèmes d'échantillonnage spatial des séries de marégraphie longues et aux mouvements verticaux des marégraphes. Les résultats présentés ici montrent que les séries corrigées par GPS des mouvements verticaux présentent une variabilité spatiale réduite (figure 2, table 1). Les simulations menées par Collilieux & Wöppelmann (2011) suggèrent une limite de l'ordre de 0,5 mm/an dans cette réduction liée en particulier aux limites actuelles dans la réalisation du repère géocentrique.

La question de la détection des empreintes géographiques liées à la fonte des glaces continentales est abordée par Douglas (2008) sans succès, mais l'auteur ne corrige que les mouvements des marégraphes liés à l'ajustement glacio-isostatique par des modèles de GIA qui comportent des erreurs associées, par exemple, aux incertitudes dans les paramètres de viscosité du manteau et dans l'historique de déglaciation (Bouin & Wöppelmann 2010). Qu'en est-il des autres mouvements du socle rocheux ? Qu'en sera-t-il avec le nouveau champ de vitesses GPS en cours d'extension par le consortium ULR avec les avancées réalisées dans le cadre de la thèse de Santamaria-Gomez (2010) ? (Extension dans la durée des observations effectuées depuis janvier 2009, et dans le nombre de stations dont les observations sont désormais disponibles dans SONEL).

Dans les perspectives, l'importance du sauvetage et de la numérisation des observations historiques du niveau de la mer doit être soulignée. Il s'agit d'une source unique de données de niveau de la mer, d'autant plus que le patrimoine français s'avère important en nombre de stations et en volume de données (Pouvreau 2008), et qu'il témoigne d'un passé révolu sur lequel on ne peut plus revenir (pour mesurer) mais qu'il est intéressant d'étudier pour comprendre les fluctuations présentes du niveau de la mer. A titre d'exemple, mentionnons le travail récent réalisé dans l'océan Indien où des observations historiques de niveau de la mer effectuées à Saint-Paul lors du passage de Vénus devant le Soleil en 1874 ont été retrouvées et rattachées aux observations modernes pour aboutir à la conclusion surprenante que le niveau relatif de la mer n'a pratiquement pas changé en 135 ans

à cet endroit (Testut et al. 2010). Aussi étonnant que ce résultat puisse paraître, il confirme celui de Smithers & Woodroffe (2001) obtenu dans l'océan Indien à partir de l'analyse de coraux dans des micro-atolls. Ces auteurs concluaient à une élévation du niveau de la mer ne pouvant excéder 0,35 mm/an au cours du 20^e siècle dans l'océan Indien à partir de l'analyse de leurs données.

Pour conclure sur les infrastructures d'observation, il est surprenant qu'une grandeur aussi fondamentale que le niveau de la mer reste négligée, surtout dans le contexte actuel de changement climatique et des efforts importants consacrés à cette observation à l'étranger et dans les programmes internationaux (Church et al. 2010). La mesure du niveau de la mer telle qu'elle est pratiquée par les marégraphes depuis parfois près de trois cent ans réunit tous les attributs d'une grandeur d'observatoire (BDL 2009). Une meilleure reconnaissance de SONEL par une labellisation d'ensemble de la structure, et par le soutien spécifique de certaines activités particulières via des moyens dédiés, apporteront une liaison, un cadre, une lisibilité, et une cohérence vis-à-vis de la problématique des variations à long terme du niveau de la mer qui font actuellement défaut à l'échelle nationale (au-delà de l'INSU et des laboratoires LEGOS et LIENSs), et nuisent à l'efficacité et (à terme) à l'image de la France dans les programmes internationaux relatifs à cette connaissance. Gageons que l'élan insufflé il y a quelques années par Christian Le Provost (1943-2004) dans ces dispositifs d'observation trouvera des résultats à la hauteur de ses espérances dans un avenir proche.

AVERTISSEMENT

Les travaux présentés ici sont une synthèse actualisée de résultats publiés dans la littérature spécialisée par le premier auteur et al. (voir bibliographie), et présentée récemment à l'occasion de séminaires et d'exposés invités de colloque, avec parfois des actes, entre novembre 2010 et mars 2011.

REMERCIEMENTS

Le premier auteur tient à remercier ses collègues partenaires dans l'aventure du consortium ULR (centre d'analyses de mesures GPS reconnu par le service international IGS), à savoir : M-N. Bouin, Z. Altamimi, A. Santamaria-Gomez, C. Letetrel, M. Guichard, P. Tiphaneau, X. Collilieux et M. Gravelle. Sont également remerciés B. Simon et C. Boucher à l'origine de l'idée de SONEL, mais également C. Le Visage, S. Allain et R. Le Roy au SHOM et N. Florsch, J-C. Maurin et J-C. Mercier à l'université de la Rochelle, pour la mise en œuvre pratique de SONEL, de même que tous les acteurs qui nous soutiennent et opérateurs qui l'alimentent en assurant le fonctionnement des stations à distance et sur le terrain. Enfin, la plupart des résultats présentés ici doivent beaucoup à l'enthousiasme et à l'élan insufflé par C. Le Provost (1943-2004), depuis le programme GLOSS dont il avait pris la direction en 2003 jusqu'à SONEL dont il a suivi et encouragé le développement.

BIBLIOGRAPHIE

ALTAMIMI Z., COLLILIEUX X., LEGRAND J., GARAYT B., BOUCHER C. (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).

ASHKENAZI V., BINGLEY R. & WHITMORE G. (1993). « Monitoring changes in mean-sea-level to millimetres using GPS ». *Geophys. Res. Lett.* (20: 1951-1954).

BARNETT T.P. (1984). « The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness ». *J. Geophys. Res.* (89 (C5):7980-7988).

BDL (2009). « Les Observatoires. Observer la Terre ». Bureau des longitudes (BDL), Ed. Hermann, Paris.

BINDOFF N. et al. (2007). « *Observations: Oceanic climate and sea level* ». In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. S Solomon et al.), Cambridge University Press.

BOUIN M-N. & WÖPPELMANN G. (2010). « Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation ». *Geophys. J. Int.* (180: 193-209).

BRUYNINX C. (2004). « The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists ». *Geoinformatics* (7: 32-35).

CARTER W.E., AUBREY D.G., BAKER T.F., BOUCHER C., LE PROVOST C., PUGH D.T., PELTIER W.R., ZUMBERGE M., RAPP R.H., SHUTZ R.E., EMERY K.O., ENFIELD D.B. (1989). « Geodetic fixing of tide gauge benchmarks ». *Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report*, WHOI-89-31.

CARTWRIGHT D.E. (1999). « Tides - a scientific history ». Cambridge University Press.

CAZENAVE A. & LLOVEL L. (2010). « Contemporary sea level rise ». *Ann. Rev. of Marine Science* (2: 145-173).

CHURCH J.A., WOODWORTH P.L., AARUP T. & WILSON W.S. (2010). « Understanding sea-level rise and variability ». Wiley-Blackwell.

COLLILIEUX X. & WÖPPELMANN G. (2011). « Global sea level rise and its relation to the terrestrial reference frame definition ». *J. of Geodesy* (85: 9-22).

DOMINGUES C.M., CHURCH J.A., WHITE N.J., GLECKER P.J., WIJFFELS S.E., BARKER P.M., & DUNN J.R. (2008). « Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise ». *Nature* (453: 1090-1093).

DOUGLAS B.C. (1991). « Global sea level rise ». *J. Geophys. Res.* (96 (C4): 6981-6992).

DOUGLAS B.C. (2001). « Sea level change in the era of the recording tide gauge ». In *Sea Level Rise : History and Consequences*, Int. Geophys. Ser., vol. 75: 37-64, chap.3, Academic Press, San Diego.

- DOUGLAS B.C. (2008). « Concerning evidence for fingerprints of glacial melting ». *Journal of Coastal Research* (24: 218-227).
- DOW J.M., NEILAN R.E. & RIZOS C. (2009). « The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems ». *J of Geodesy* (83:191-198).
- EMERY K.O. & AUBREY D.G. (1991). « Sea levels, land levels, and tide gauges ». Springer Verlag.
- ISHII M., KIMOTO M., SAKAMOTO K. & IWASAKI S.I. (2006). « Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses ». *Journal of Oceanography* (62: 155-170).
- GORNITZ V., LEBEDEFF S. & HANSEN J. (1982). « Global sea level trend in the past century ». *Science* (215: 1611-1614).
- HERRING T.A., KING R.W. & McCLUSKY S.C. (2008). « Introduction to GAMIT/GLOBK ». Report, Inst. of Technol, Cambridge, Massachusetts.
- LEGRAND J., BERGEOT N., BRUYNINX C., WÖPPELMANN G., BOUIN M.N. & ALTAMIMI Z. (2010). « Impact of regional reference frame definition on geodynamic interpretations ». *Journal of Geodynamics* (49: 116-122).
- MARTIN MIGUEZ B., LE ROY R. & WÖPPELMANN G. (2008a). « Coastal sea level observation with radar tide gauges: recent experiences so far in France ». *Journal of Coastal Research* (24: 61-68).
- MARTIN MIGUEZ B., TESTUT L. & WÖPPELMANN G. (2008b). « The van de Casteele test revisited: an efficient approach to tide gauge error characterization ». *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology* (25 (7): 1238-1244).
- MERRIFIELD et al. (2009). « The Global Sea Level Observing System (GLOSS) ». In *OceanObs'09*, Ocean Information for society: sustaining the benefits, organizing the potential, Community White Papers, 21-25 September 2009, Venice, Italy.
- MITCHUM G. (1998). « Monitoring the stability of satellite altimeters with tide gauges ». *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology* (15: 721-730).
- MITROVICA J.X., GOMEZ N. & CLARK P.U. (2009). « The sea-level fingerprint of West Antarctic collapse ». *Science* (323: 753).
- MUNK W. (2002). « Twentieth century sea level: an enigma ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (99: 6550-6555).
- NEILAN R., VAN SCOY P.A., WOODWORTH P.L. (1998). « GPS and tide gauge benchmark monitoring, and GPS altimeter calibration ». *Proceedings of the workshop on methods for monitoring sea level*, IGS and PSMSL, Jet Propulsion Laboratory, 17-18 March 1997.
- PELTIER W.R. (2004). « Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE ». *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (32: 111-149).
- PELTIER W.R. & TUSHINGHAM A.M. (1989). « Global sea level rise and the greenhouse effect: Might they be connected? ». *Science* (244: 806-810).
- PIRAZZOLI P.A. (1986). « Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide gauge records ». *Journal of Coastal Research* (SI 1: 1-26).
- POUVREAU N. (2008). « Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest ». Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, soutenue le 26 septembre 2008.
- POUVREAU N. (2010). « Vers une coordination de l'observation du niveau de la mer en France ». Actes des XIe Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010 (539-548).
- PRANDI P., CAZENAVE A. & BECKER M. (2009). « Is coastal mean sea level rising faster than the global mean? A comparison between tide gauges and satellite altimetry over 1993-2007 ». *Geophys. Res. Lett.* (36: L05602).
- SANTAMARIA-GOMEZ A. (2010). « Estimation des mouvements verticaux de l'écorce terrestre par GPS dans un repère géocentrique, dans le cadre du projet TIGA ». Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, soutenue le 11 octobre 2010.
- SANTAMARIA-GOMEZ A., BOUIN M.-N., COLLILIEUX X. & WÖPPELMANN G. (2011). « Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates ». *J. Geophys. Res.* (116: B01405).
- SCHÖNE T., SCHÖN N. & THALLER D. (2009). « IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): Scientific benefits ». *J. of Geodesy* (83: 249-261).
- SGMER (2010). « Instruction permanente du Premier ministre relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et à la diffusion des données en résultant ». Secrétariat Général de la Mer, Nr. 863, 20 avril 2010.
- SIMON B. (2007). « La marée océanique ». Collection Synthèse de l'Institut Océanographique, Paris.
- SMITHERS S.G. & WOODROFFE C.D. (2001). « Coral microatolls and 20th century sea level in the Eastern Indian ocean ». *Earth Planet. Sci. Lett.* (191: 173-184).
- STEIGENBERGER P., ROTHACHER M., DIETRICH R., FRITSCHÉ M., RÜLKE A. & VEY S. (2006). « Reprocessing of a global GPS network ». *J. Geophys. Res.* (111: B05402).
- TESTUT L., MARTIN MIGUEZ B., WÖPPELMANN G., TIPHA-NEAU P., POUVREAU N., & KARPYTCHÉV M. (2010). « The sea level at Saint-Paul, Southern Indian Ocean, from 1874 to the present ». *J. Geophys. Res.* (115: C12028).

WILLIAMS S.D.P. (2008). « CATS: GPS coordinate time series analysis software ». *GPS Solutions* (12: 147-153).

WOODWORTH P.L. (2003). « Some comments on the long sea level records from the Northern Mediterranean ». *Journal of Coastal Research* (19: 212-217).

WOODWORTH P.L. & PLAYER R. (2003). « The permanent service for mean sea level: An update to the 21st century ». *Journal of Coastal Research* (19: 287-295).

WOODWORTH P.L., POUVREAU N. & WÖPPELMANN G. (2010). « The gyre circulation of the North Atlantic and sea level at Brest ». *Ocean Science* (6: 185-190).

WÖPPELMANN G., MARTIN MIGUEZ B., BOUIN M-N. & ALTAMIMI Z. (2007). « Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide »” *Global & Planetary Change* (57: 396-406).

WÖPPELMANN G., BOUIN M.N. & ALTAMIMI Z. (2008a). « Terrestrial reference frame implementation in global GPS analysis at ULR consortium ». *Physics & Chemistry of the Earth* (33: 217-224).

WÖPPELMANN G., POUVREAU N., COULOMB A., SIMON B. & WOODWORTH P. (2008b). « Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record ». *Geophys. Res. Lett.* (35: L22605).

WÖPPELMANN G., LETETREL C., SANTAMARIA A., BOUIN M-N., COLLILIEUX X., ALTAMIMI Z., WILLIAMS S.D.P. & MARTIN MIGUEZ B. (2009). « Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame ». *Geophysical Research Letters*, (36: L12607).

ZERBINI S. et al. (1996). « Sea level in the Mediterranean: a first step towards separation of crustal movements and absolute sea-level variations ». *Global & Planetary Change* (14: 1-48).