

Observation du niveau de la mer dans le cratère de Saint-Paul, Océan Indien

Laurent Testut¹, Belén Martin Miguez², Guy Wöppelmann³ et Valérie Ballu⁴.

Contexte

De longue date, les chercheurs impliqués dans la mesure du niveau de la mer se sont confrontés à l'adaptation des techniques de mesures (types de marégraphes⁵), à la dimension temps (de la mesure de marée à l'inter-annuel et à la cohérence historique), à la réduction des incertitudes de mesure de positionnement (apparition du GPS⁶) et de mesure de niveau et, plus récemment, du passage du ponctuel au spatial avec les mesures satellitaires. Sur tous ces points, des progrès réguliers ont été faits et les marges d'incertitude réduites. Mais le contrôle et le suivi des équipements et des mesures restent essentiels, à l'image, par exemple, de la longue histoire des contrôles du marégraphe de Marseille, mis en service en 1885.

L'étude de la variabilité à long terme du niveau de la mer est une question majeure aujourd'hui en raison de son lien avec le changement climatique et ses impacts sociaux-économiques (Church *et al.*, 2010). Des efforts importants sont entrepris de longue date pour mieux comprendre les mécanismes à l'origine de cette variabilité, mais la réponse reste complexe aux différentes échelles évoquées (Bindoff *et al.*, 2007). L'altimétrie radar embarquée sur satellite permet d'obtenir une vue globale de cette variabilité, mais reste limitée aux deux dernières décennies (Meysignac *et al.*, 2012). Les marégraphes constituent donc encore une source unique de mesures directes du niveau de la mer sur les échelles multi-décennales à séculaire, même si les enregistrements couvrant le siècle dernier et plus sont plutôt rares (Douglas, 2001). Par ailleurs, les séries temporelles longues se trouvent essentiellement le long des continents et l'information sur les processus au large est par conséquent limitée, en particulier dans l'hémisphère sud (Woodworth, 2006). Les considérations ci-dessus font de l'île Saint-Paul, isolée dans l'Océan Indien Sud, un site particulièrement intéressant pour les études du niveau de la mer.

Saint-Paul est une ancienne île volcanique située dans l'Océan Indien Sud (38°41'S, 77°31'E), appartenant aux Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). Elle fut découverte au XVI^e siècle et annexée par la France en 1843. Le cratère communique avec l'océan depuis l'effondrement d'une partie du volcan il y a quelques mil-

liers d'années (Photo 1). Avec l'île d'Amsterdam située à quelque 100 km au nord, Saint Paul représente une des rares terres émergées d'un vaste plateau volcanique sous-marin situé le long de la dorsale sud-est indienne (Doucet *et al.*, 2003). Les îles Saint-Paul et Amsterdam ont un climat océanique relativement doux influencé par l'anticyclone subtropical et les vents d'est connus sous le nom des quarantièmes rugissants. Dès 1874, l'île de Saint-Paul fut l'objet d'une expédition scientifique. Les mesures du niveau de la mer prises alors permirent le calcul d'un



Photo 1. Le cratère de Saint-Paul dans l'Océan Indien vu du ciel (cliché ©H. Pérau / Institut polaire français IPEV).



Photo 2. Niveau moyen de la mer gravé dans un rocher lors de l'expédition de 1874 (source : cliché et schéma de S. Loyer / Collecte Localisation Satellites).

1. LEGOS, UMR 5566, CNRS-CNES-IRD-UPS, Toulouse.

2. CETMAR, Vigo, Espagne.

3. LIENS, UMR 7266 CNRS, Université de La Rochelle

4. Idem 2.

5. On distingue les marégraphes de surface (à flotteur et à propagation d'ondes acoustiques ou radar) et les marégraphes de fond (à capteur de pression). Rappelons aussi qu'en France, la mise au point du 1er marégraphe (à flotteur, dans un puits dit de tranquillisation) est attribuée à l'ingénieur hydrographe Chazallon et remonte à 1842.

6. Global Positioning System.

niveau moyen de la mer qui fut gravé sur un rocher (Photo 2). Cette marque a été récemment redécouverte non loin de l'actuel observatoire du niveau marin et rattachée par nivellement au zéro hydrographique local (ci-après ZH). Cet article est une synthèse des résultats obtenus de l'analyse conjointe des données redécouvertes de 1874 et des données récentes du marégraphe moderne (Testut *et al.*, 2010).

Les observations historiques

Le suivi du transit de Vénus devant le Soleil, prévu le 9 décembre 1874 au milieu de l'été austral, était d'une importance majeure pour déterminer avec précision l'unité astronomique, c'est-à-dire la distance Soleil - Terre, dont dérivait les estimations de distance entre planètes du Système Solaire. Les îles des TAAF actuelles, principales terres émergées de l'Océan Indien entre 45 et 50 degrés de latitude sud, furent donc d'un intérêt particulier pour l'observation de ce transit, réalisée sous l'égide de l'Académie des Sciences française.

L'expédition de Saint-Paul, menée par Ernest Mouchez qui installa les instruments sur l'île en septembre 1874 (Fig. 1), demeura à Saint-Paul jusque début 1875. Une échelle de marée fut installée et des lectures du niveau de la mer furent enregistrées de manière continue toutes les demi-heures, du 6 octobre jusqu'au 31 décembre 1874. La valeur moyenne de ces mesures fut calculée sur place et reportée sur une marque gravée dans la pierre sur un rocher à proximité, fournissant ainsi un point de référence inestimable sur lequel s'appuyer pour apprécier l'évolution du niveau moyen de la mer en cette île. D'autres variables telles que la pression atmosphérique, l'humidité et la température de l'air furent également enregistrées. La marque gravée fut redécouverte en 1994, mais sa relation avec les données de niveau marin mentionnées par Mouchez (1878) ne fut établie que fin 2006 après l'étude historique entreprise par les auteurs. La marque fut ensuite rattachée par nivellement lors des visites de maintenance effectuées en 2006, 2007, 2008 et 2009.

Du rapport Mouchez (1878), nous avons numérisé les pleines et basses mers corrigées de l'effet de baromètre inverse par Mouchez, de même que les valeurs moyennes journalières de pression atmosphérique réduites au niveau moyen de la mer, disponibles sur l'ensemble de la même période du 6 octobre au 31 décembre 1874. Faute de disposer des valeurs originelles de niveau de la mer et de pression atmosphérique toutes les demi-heures, non retrouvées à ce jour, une copie tabulée toutes les heures d'octobre à novembre, issue des archives du SHOM⁷, a été utilisée.

Les observations récentes

La station de Saint-Paul fait partie du réseau de marégraphes ROSAME⁸, qui comporte 4 stations (Îles Kerguelen, St-Paul, Crozet et Dumont - d'Urville) et représente une des contributions françaises au programme GLOSS⁹ de la COI¹⁰ de l'UNESCO (COI, 2012), qui englobe aujourd'hui près de 300 stations à l'échelle mondiale. Le premier marégraphe à pression, immergé dans un puits de tranquillisation, fut installé à Saint-Paul en 1994. Les mesures ont démarré le 25 octobre 1994 et se sont poursuivies jusqu'à présent avec seulement quelques lacunes dues à des problèmes d'alimentation ou de transmission par satellite. Les marégraphes à pression, qui ont fourni la plupart des données disponibles à Saint-Paul, mesurent les variations de la pression totale au-dessus de leur capteur immergé, soit la pression de la colonne d'eau et de l'atmosphère. Ils sont également équipés d'un capteur de température, tandis qu'un capteur de pression atmosphérique ou baromètre est également installé dans un abri proche. La valeur du niveau de la mer est déduite de la différence des pressions du marégraphe et du baromètre en tenant compte des valeurs de la pesanteur locale et de la densité (COI, 2006). La densité s'obtient à partir de la température de l'eau et de la salinité, mais dans notre cas elle est supposée constante sur la plupart de l'enregistrement. Cette hypothèse induit des incertitudes de l'ordre du millimètre dans le calcul du niveau de la mer.

Depuis novembre 2008, la station est également équipée d'un marégraphe radar installé dans le même puits de tranquillisation. Malheureusement, seulement sept mois de données ont été collectés à cause d'une panne électronique entraînant la perte des données depuis juillet 2009. Le fait que les visites de maintenance à l'île Saint Paul n'aient lieu qu'une fois par an et sur quelques heures (aire internationale protégée), au cours d'une rotation logistique du navire Marion Dufresne, constitue un handicap sérieux pour faire face à un problème, même lorsqu'il est détecté.

La construction d'une série temporelle unique

Considérant la magnitude faible des signaux climatiques à long terme, de l'ordre du millimètre par an, un examen attentif des sources d'incertitude des données du niveau de la mer aux deux extrêmes de notre série chronologique s'impose. Trois sources d'erreur importantes ont été identifiées de longue date. La première est liée à la qualité intrinsèque des données fournies par les instruments, échelle de marée ou marégraphes. La secon-

7. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

8. Réseau Subantarctique et Antarctique du niveau de la Mer.

9. Global Sea Level Observing System.

10. Commission Océanographique Intergouvernementale.

de, fondamentale dans une perspective à long terme, est liée au rattachement des données à une même référence ou repère de hauteur, par exemple le zéro hydrographique (ZH). La troisième concerne la représentativité des moyennes obtenues sur des périodes courtes. Par exemple, dans quelle mesure les moyennes calculées sur quelques mois sont affectées par la variabilité saisonnière et inter-annuelle et par suite sont représentatives de périodes étendues (une ou deux décennies) ?

L'échelle de marée de 1874 se trouvait donc à l'intérieur du cratère, qui jouait le rôle d'un puits de tranquillisation naturel. Les contrôles menés sur les observations horaires ont montré la bonne qualité de ces données. En effet, l'écart type des résidus obtenus de la différence entre observations horaires et prédictions de marée sont du même ordre que ceux calculés sur des périodes équivalentes à partir des marégraphes modernes (environ 7 cm). De plus, les principaux constituants de la marée issus de l'analyse harmonique des données historiques sont cohérents avec ceux obtenus des données récentes. Basés sur ces éléments et notre expérience des lectures à l'échelle de marée, l'incertitude sur les données historiques est évaluée à 2 cm.

À la fin du XIX^e siècle, les techniques de nivellement étaient suffisamment développées pour supposer que les erreurs associées aux opérations qui ont conduit à graver la marque représentant le niveau moyen observé étaient inférieures au centimètre sur des courtes distances (centaine de mètres), d'autant que l'expédition comprenait des navigateurs et astronomes familiers avec ces techniques et qu'ils visaient les meilleures observations possibles. La forme de la marque, en revanche, soulève quelques difficultés. S'il est raisonnable de penser que la marque du niveau moyen de la mer (« Niv. Moy » *in* Photo 2) correspond à l'intersection des lignes horizontale et verticale, le point d'intersection est large de 1,9 cm. En s'appuyant sur l'écart-type des quatre opérations de nivellement effectuées entre 2006 et 2009, nous avons adopté une erreur de 2 cm dans le rattachement de cette marque historique au Zéro Hydrographie (ZH).

Depuis 2006, les visites de maintenance incluent des opérations dédiées au contrôle de la référence instrumentale du marégraphe et à un déplacement possible de son support lié à des mouvements épirogéniques. Des campagnes régulières de nivellement sont ainsi entreprises, de faible portée cependant. Une station GPS permanente vient désormais compléter ces opérations depuis fin 2012, mais il est encore tôt pour tirer une tendance fiable d'une série aussi courte. Par ailleurs, en novembre 2008, une bouée GPS fut déployée pendant deux jours à

proximité du marégraphe de manière à étalonner et définir précisément la référence du capteur radar. Ce type d'opération d'étalonnage *in situ* de marégraphes par bouée GPS est encore expérimental mais a déjà démontré son efficacité dans les îles Kerguelen (Martin Miguez *et al.* 2012). Des compléments d'étalonnage ont également été effectués en 2008 et 2009 avec des sondes lumineuses¹¹, confirmant les résultats fournis par les bouées GPS et montrant la stabilité de la référence instrumentale du marégraphe radar de Saint-Paul (Testut *et al.*, 2010).

Les variations saisonnières du niveau de la mer soulèvent la question de la représentativité des moyennes calculées sur une durée inférieure à l'année. C'est le cas du niveau moyen calculé en 1874 à partir de 90 jours de mesures, mais également celui des observations récentes du marégraphe radar qui portent sur sept mois entre décembre 2008 et juillet 2009. De la même manière, la variabilité interannuelle liée doit être considérée. Pour répondre à cette question d'échantillonnage temporel et apprécier l'incertitude associée, nous nous sommes appuyés sur l'analyse de moyennes mensuelles issues de l'altimétrie radar embarquée sur satellite entre 1994 et 2009. En effet, même si les observations des marégraphes à pression ne sont pas jugées de qualité suffisante pour le calcul de tendances fiables, elles ont permis de constater que le niveau de la mer observé par altimétrie radar embarquée sur satellite suit la même variabilité (coefficient de corrélation de 0,94). Nous avons alors déduit l'incertitude liée à l'échantillonnage temporel du calcul de l'écart-type des séries d'altimétrie radar moyennées sur N mois, avec N = 3 mois pour les données historiques et N = 7 mois pour les données récentes. Avec cette approche, nous obtenons une erreur de « représentativité » de 5,1 cm et 4,1 cm, respectivement.

Enfin, les deux résultats suivants ont permis de compléter le budget d'erreur. D'abord, nous avons pu établir que la valeur moyenne de la pression atmosphérique publiée dans le rapport de Rochefort (1878) ne diffère pas significativement (< 0,5 mbar) de la valeur moyenne obtenue à l'île Amsterdam pour les mêmes mois sur la période de 1950 à 2009 pour laquelle des données météorologiques sont disponibles. Ce résultat indique que les conditions météorologiques n'étaient pas anormales au cours de la période de trois mois historique. Ensuite, les tests effectués avec différentes valeurs de l'amplitude du cycle nodal de la marée (18,6 ans), qui peut affecter le calcul des niveaux moyens sur de courtes périodes, montrent que l'erreur induite sur la tendance du niveau de la mer à Saint-Paul peut être négligée dans notre cas (< 0,1 mm/an).

11. Appareils d'étalonnage de marégraphes classiques depuis des décennies.

Évolution du niveau de la mer et stabilité du volcan

Une fois les niveaux moyens estimés aux deux extrêmes de la série chronologique avec leurs incertitudes respectives, l'évolution du niveau marin sur les 135 dernières années peut être déduite simplement en calculant la différence des moyennes et en supposant que le changement était régulier et linéaire. La figure 1 montre une tendance du niveau de la mer relatif à la terre émergée de $-0,1 \pm 0,3$ mm/an. En d'autres termes, il n'en ressort pas d'évidence observationnelle d'un changement significatif du niveau marin relatif sur l'île Saint-Paul.

Si l'on souhaite interpréter les observations de niveau marin relatif dans un contexte de variations du niveau marin régional ou global, il est nécessaire de s'intéresser aux mouvements verticaux éventuels du support du marégraphe et de l'échelle de marée et donc au mouvement de l'île. Nous avons considéré deux sources possibles de déplacement vertical du sol : 1) un mouvement à grande échelle lié au rebond post-glaciaire et 2) des mouvements tectoniques ou volcaniques plus locaux qui peuvent être générés par la présence du plateau de Saint-

Paul/Amsterdam et de la dorsale Sud-Est Indienne.

Le modèle ICE-5G VM2 d'ajustement glacio-isostatique (GIA¹²) de Peltier (2004) prédit une subsidence à grande échelle de la croûte terrestre de 1,6 mm/an. L'effet total du GIA sur le niveau de la mer relatif est estimé à $+ 0,24$ mm/an en incluant la composante induite sur le géoïde. Les prédictions GIA et les observations de tendance relative du niveau de la mer sont donc cohérentes et du même ordre de grandeur.

Une activité volcanique est de nature à générer des mouvements du sol. Cependant, celle-ci est difficile à évaluer à Saint-Paul. La seule éruption enregistrée date de 1793 depuis une cheminée placée sur le bas du flanc sud-ouest¹³. Une activité géothermique existe mais localisée le long du bord du cratère et de sa baie. Un mouvement vertical, de l'ordre de quelques mm/an, associé à une intrusion magmatique (élévation) ou à une subsidence post-éruptive ne peut être écarté. Le volcan de Saint-Paul est situé à l'aplomb d'un point chaud sur le plateau de Saint-Paul/Amsterdam et à proximité de la dorsale Sud-Est Indienne. Aucune activité sismique à proximité immédiate du volcan de Saint-Paul n'a été enregistrée sur le réseau mondial depuis 1973 (USGS), cependant l'activité est régulière le long de la dorsale

et des zones de fracture qui la décalent. Au total, seulement une vingtaine de séismes de magnitude supérieure à 4 ont eu lieu dans un rayon de 100 km, mais aucun à moins d'une quarantaine de kilomètres. Le tremblement de terre le plus proche de l'île a effectivement eu lieu à environ 40 km (Mw5.1, 31/12/2003) et un séisme de magnitude Mw6.4 a eu lieu à environ 70 km le 16/11/1985.

Il apparaît donc que si le mouvement vertical de l'île de Saint-Paul est sans doute faible, il ne peut toutefois pas être ignoré et doit être quantifié. Une solution moderne pour estimer les mouvements verticaux affectant les marégraphe est l'utilisation du système GPS (Photos 3a et 3b). Mais pour l'instant, les campagnes GPS ponctuelles qui ont eu lieu sur l'île entre 2007 et 2012 ne permettent pas encore d'estimer de manière fiable une vitesse verticale.

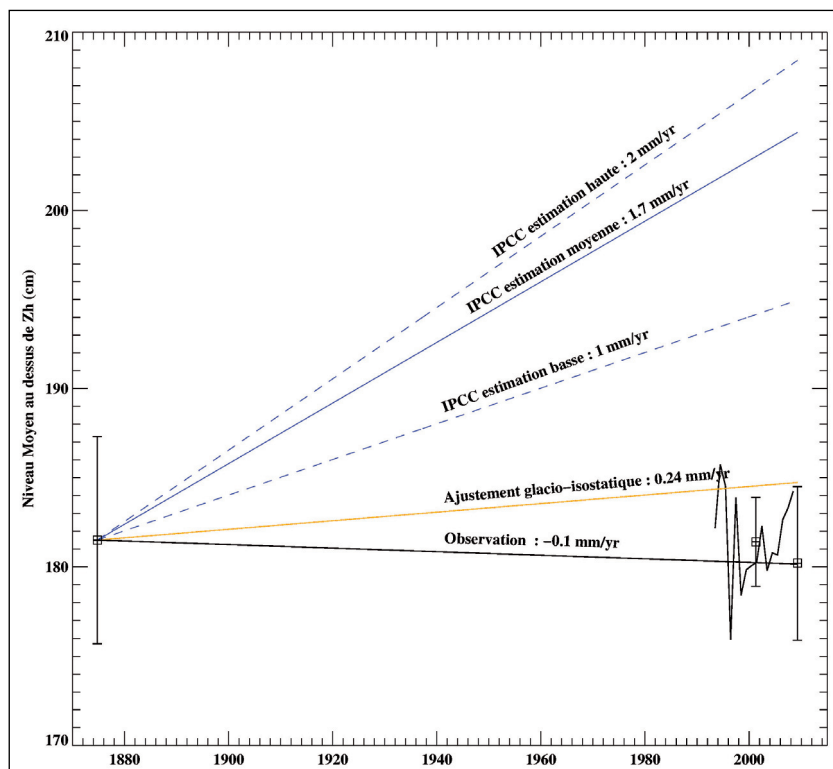


Figure 1. Évolution du niveau marin relatif aux observations historiques de 1874, en cm par rapport au zéro hydrographique (courbes et ligne en noir). Les lignes bleues indiquent les tendances de l'élévation du niveau moyen global des mers au cours du XX^e siècle (source : Bindoff et al., 2007). L'estimation de l'effet de l'ajustement glacio-isostatique de l'île et du niveau marin est indiqué en orange.

12. Glacial Isostatic Adjustment.

13. www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=0304-002



Photo 3a. Station marégraphique et l'antenne du GPS permanent (©CNRS-LEGOS). Au fond, la plage de galets est celle où fut installé l'observatoire astronomique par l'expédition d'E. Mouchez en 1874.



Photo 3b. L'observatoire marégraphique installé fin XIX^e (© IMCCE¹⁴).

Conclusions

Cet article correspond à une des rares études, tentant d'estimer la variation du niveau marin dans l'océan Austral en se basant sur l'analyse d'archives historiques (Hunter *et al.*, 2003 ; Woodworth *et al.*, 2010; Testut *et al.*, 2006; Watson *et al.*, 2010). Les références verticales des instruments et repères ont pu être connectées entre elles à l'aide de l'analyse de ces archives historiques, du nivelle-

ment de précision et de l'utilisation des moyens modernes que sont l'altimétrie satellitaire et la bouée GPS. Une attention particulière a été portée sur l'estimation des incertitudes pour proposer un budget d'erreur réaliste de la méthode. Un GPS permanent a été installé en 2012 et la station marégraphique de Saint-Paul va être mise à niveau fin 2013. L'observatoire de Saint-Paul, dont le début de la série chronologique a été repoussée à l'aide de cette étude de 135 années dans le passé apporte aujourd'hui une contrainte supplémentaire forte pour l'étude et l'analyse des variations du niveau marin, passé, présent et futur dans cette région du globe.

Compte tenu du manque d'observations géologiques et de mesures géophysiques, il nous est impossible de conclure sur la stabilité verticale de l'île. Cependant nous avons montré que le niveau relatif de la mer par rapport à la côte, n'avait sensiblement pas bougé lors des 135 dernières années. 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 XX^e siècle dans l'océan Indien à partir de l'analyse de leurs données.

Bibliographie

- Bindoff N.L. et al. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 385-432.
- Church J.A., Woodworth P.L., Aarup T. & Wilson. W.S. (2010). *Understanding sea-level rise and variability*. Wiley-Blackwell, 428 p.
- COI (2006). *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer*. Commission Océanographique Intergouvernementale, UNESCO, Manuels et guides, 14(4), 80 p.
- COI (2012). *The Global Sea Level Observing System Implementation Plan 2012*. Commission Océanographique Intergouvernementale, UNESCO, Technical Series, 100, 44 p.
- Doucet S., Giret A., Weis D. & Scoates J. (2003). Géologie des îles Amsterdam et Saint-Paul. *Géologues*, 137, 10-15.
- Douglas B.C. (2001). Sea level change in the era of the recording tide gauge. *Int. Geophys. Ser.*, 75, 37-64.
- Hunter J., Coleman R. & Pugh D. (2003). The sea level at Port Arthur, Tasmania, from 1841 to the present. *Geo-*

14. Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides.

- physical Research Letters, 30, 1401.
- Martin Miguez B., Testut L. & Wöppelmann G. (2012). Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy. *Scientia Marina*, 76, pages 221-228.
 - Meyssignac B. & Cazenave A. (2012). Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, 58, 96-109.
 - Mouchez E. (1878). Recueil de Mémoires, rapports et documents relatifs à l'observation du passage de Vénus sur le soleil du 9 Décembre 1874. Académie des Sciences, Paris, Mission de l'île Saint-Paul, Tome II, partie 1, 397-402.
 - 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.
 - Rochefort E. (1878). Recueil de Mémoires, rapports et documents relatifs à l'observation du passage de Vénus sur le soleil du 9 Décembre 1874. Académie des Sciences, Paris, Mission de l'île Saint Paul, Tome II, partie 2, 1-48.
 - Smithers S.G. & Woodroffe C.D. (2001). Coral microatolls and 20th century sea level in the Eastern Indian ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 191, 173-184.
 - Testut L., Wöppelmann G., Simon B. & Téchiné P (2006). The sea level at Port-aux-Français, Kerguelen Island, from 1949 to the present. *Ocean Dynamics*, 56, 464-473.
 - Testut L., Martin Miguez B., Wöppelmann G., Tiphaneau P., Pouvreau N. & Karpytchev M. (2010). Sea level at Saint Paul Island, southern Indian Ocean, from 1874 to the present. *Journal of Geophysical Research*, 115, C12028.
 - Woodworth P.L. (2006). Some important issues to do with long-term sea level change. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 364, 787-803.
 - Woodworth P.L., Pugh D. T. & Bingley R. M. (2010). Long term and recent changes in sea level in the Falkland Islands. *Journal of Geophysical Research*, 115, C09025.

Pour mémoire : articles publiés antérieurement dans "Géologues sur le thème du niveau de la mer :

- Wöppelmann G., 2001 : Mesures du niveau de la mer : limites actuelles des estimations des variations eustatiques récentes. "*Géologues*" n°129 (août 2001), 70-74.
- Gouriou T., Pouvreau N., Wöppelmann G., 2008 : Mesures du niveau de la mer en France : un patrimoine historique à fort potentiel scientifique. L'exemple du littoral charentais. "*Géologues*" n°158 (septembre 2008), 83-89.