

# du niveau de la mer et du lagon

## Variations

Laurent Testut, Gwénaële Jan, Antoine Guillot, Stéphane Calmant

### Résumé

Lors de l'expédition organisée par J.-L. Étienne sur l'atoll de Clipperton au début de l'année 2005 nous avons pu déployer deux capteurs de pression de fond à l'intérieur et à l'extérieur du lagon. L'analyse de quelques mois de mesures nous a permis de mettre en évidence l'absence de connexion significative entre les eaux du lagon et celles de l'océan. Ces données nous ont aussi permis de valider le modèle de marée globale FES2004 et de faire une première expérience de validation des données altimétriques dans la région. Ainsi l'atoll de Clipperton s'est révélé être un site d'un intérêt scientifique certain en termes d'étude du niveau de la mer. L'installation d'une station marégraphique permanente sera à prendre en compte dès que les conditions logistiques nécessaires à sa maintenance seront réunies.

### Abstract

*During the first semester of 2005, as part of the expedition to Clipperton organised by J.-L. Étienne, two bottom pressure gauges were installed inside the lagoon and in the open sea. The analysis of allows us to confirm the absence of connection between the lagoon and the open sea. Comparisons of the tidal signal with the FES2004 tidal model confirm the model in this region. A first experiment has been carried out to calibrate the satellite altimetry missions showing the good potential of this site in terms of calibration experiments. The possibility of installing a permanent tide gauge in Clipperton atoll should clearly be examined as soon as the logistical conditions allowing its maintenance are met.*

## INTRODUCTION

Notre participation à l'expédition Clipperton organisée par J.-L. Étienne a été motivée par l'intérêt que revêt cet endroit pour les études du niveau de la mer, élément indicateur fondamental des changements de notre environnement. De l'aménagement du littoral à l'étude des variations climatiques en passant par la validation des modèles de prévisions océaniques, son observation couvre des thématiques à la fois scientifiques et pratiques. La France a depuis toujours joué un rôle important dans l'étude du niveau marin tant dans sa composante instrumentale que théorique. En effet, des premières mesures marégraphiques précises effectuées par l'abbé J. Picard à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle à l'implication française dans les programmes d'altimétrie satellitaire Topex/Poseidon et Jason-1, du développement de la théorie des marées par P.-S. de Laplace au XVIII<sup>e</sup> siècle à la modélisation hydrodynamique globale de grande précision, la France s'est toujours investit avec succès. Elle possède à ce titre un fort potentiel marégraphique, notamment en raison de la présence de stations d'observation dans les océans Atlantique, Pacifique, Indien et Austral, qui nous permet d'avoir un réseau d'ampleur mondiale.

Un des objectifs de cette mission était aussi de déterminer la qualité du site d'un point de vue de l'altimétrie satellitaire. L'altimétrie, dont l'histoire a débuté dans les années soixante-dix aux États-Unis lorsque les satellites ont commencé à transmettre

de façon régulière des informations sur la physique et la dynamique des terres et des océans, a changé la vision des océans. En effet, les nouveaux outils d'observations permettent d'avoir une surveillance globale et continue des océans. Différentes missions altimétriques ont été organisées à partir du lancement de Topex/Poseidon, en 1992, qui fournissait des mesures de hauteur de mer quasi globale avec une répétitivité de 10 jours. Sa succession a été assurée par Jason-1, lancé en décembre 2001, afin d'améliorer la précision des mesures et d'assurer la continuité et la compatibilité des séries temporelles des mesures. D'autres satellites possèdent également un radar altimètre embarqué. C'est le cas de GFO (*Geosat Follow On*), satellite de la marine américaine, lancé le 10 février 1998, ainsi qu'ENVISAT (*Environmental Satellite*), satellite de l'ESA (*European Space Agency*), lancé le 1<sup>er</sup> mars 2002. Les techniques d'altimétrie spatiale appliquées à l'océanographie sont désormais opérationnelles et les performances atteintes actuellement sont concluantes. De plus, ces mesures sont complémentaires et indépendantes des mesures réalisées *in situ* au moyen de marégraphes par exemple. Afin de valider les données des altimètres, les agences spatiales en charge des missions altimétriques ont mis en place des plans de calibration/validation (CAL/VAL) dans le but de vérifier le radar altimètre et les corrections à apporter à la mesure brute. Un objectif de la calibration/validation consiste à estimer le biais et une éventuelle dérive du radar

altimètre afin de pouvoir corriger en conséquence les mesures du niveau de la mer. Une des méthodes pour estimer ce biais consiste à comparer les données du satellite aux observations locales *in situ* (Jan *et al.* 2004).

Il faut rappeler que le site de Clipperton est depuis plusieurs années inscrit au programme international d'observation du niveau de la mer GLOSS (*Global Sea Level Observing System*), coordonné par la COI (*Commission Océanographique Internationale*) de l'UNESCO et la JCOMM (*Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology*) de la WMO (*World Meteorological Organization*). Ce site, qui relève de la responsabilité de la France, n'a pas pu être à ce jour équipé, principalement en raison des difficultés d'accès sur le site et du besoin d'une logistique régulière. La présence d'une équipe scientifique et technique pendant plusieurs mois

sur l'atoll de Clipperton a été une bonne opportunité pour étudier la faisabilité de la création d'une station permanente de surveillance du niveau de la mer et pour mener à bien quelques études préliminaires à la fois en terme de comparaison avec l'altimétrie satellitaire et en termes de stabilité de l'atoll vis-à-vis des mouvements verticaux de la croûte terrestre, information indispensable pour l'obtention du niveau de la mer absolu.

Voici un bref rappel des objectifs que nous nous étions fixés :

- étude de la faisabilité de l'installation d'une station marégraphique permanente ;
- validation des modèles de marée globaux ;
- étude des relations de hauteur de mer entre le lagon et l'océan ;
- détermination préliminaire de la qualité du site du point de vue de la calibration altimétrique.

## LE DÉROULEMENT DE LA MISSION

Cette mission s'est déroulée en deux temps : S. Calmant du LEGOS (Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie spatiale) à Toulouse est parti lors de la première rotation scientifique début janvier pour installer l'ensemble des capteurs et effectuer les mesures GPS. A. Guillot à la Division Technique de l'INSU (Institut national des Sciences de l'Univers) à Brest a quant à lui participé à la dernière rotation scientifique en mars 2005 pour effectuer la récupération des instruments et prospector les futurs sites afin d'étudier la faisabilité de l'installation d'une station marégraphique permanente (Guillot & Calmant 2005).

La première rotation scientifique au mois de janvier nous a permis d'effectuer des mesures GPS à bord de la goélette *Rara Avis* et de faire des profils GPS à

travers et le long de certaines traces altimétriques. Une fois à terre, une station GPS alimentée par un panneau solaire a été installée sur le "rocher" pour la durée de la mission. Lors de cette première rotation deux capteurs de pressions de fond de type Aanderaa WLR7, l'un à l'intérieur du lagon, l'autre à l'extérieur ont été installés (Fig. 25, Fig. 26 et Tab. VI). Tant dans le lagon que sur le platier externe, les capteurs étaient insérés dans des cages métalliques elles-mêmes chevillées au substrat. Ce protocole d'installation a permis d'assurer le maintien des capteurs dans une position fixe tout au long des observations ainsi qu'une relève des capteurs (vidage des mémoires, rechargement des batteries) et une re-installation exactement dans la même position, permettant d'assurer une bonne continuité des séries temporelles

Tableau VI : récapitulatif des observations faites lors de la mission. Les principaux paramètres mesurés par les différents capteurs sont : pression de fond (**Pb**), pression atmosphérique (**Pa**), température de l'eau (**Tw**), température de l'air (**Ta**) et conductivité (**C**).

Summary of the observations made during the survey. The measured parameters are: bottom pressure (**Pb**), atmospheric pressure (**Pa**), water temperature (**Tw**), air temperature (**Ta**) and conductivity (**C**).

Paramètres	Instruments	Emplacement	Position	Période A	Période B
Coordonnées (lat., lon., H)	Trimble 5700 Antenne Zephir	À bord du bateau	Mobile		
Coordonnées (lat., lon., H)	Trimble 5700 Antenne Zephir	Le rocher	10° 17' 31,783" N 109° 12' 26,018" W		
Pb, Tw, C	Aanderaa WLR7 n°1594	Lagon	10° 17' 37,2" N 109° 12' 35,7" W	06/01/2005 20/02/2005	28/02/2005 22/03/2005
Pb, Tw, C	Aanderaa WLR7 n° 634	Mer	10° 17' 49,1" N 109° 13' 51,4" W	12/01/2005 26/02/2005	06/03/2005 22/03/2005
Pa	Station Vantage Pro	Camp de base			06/03/2005 20/03/2005
Pa, Ta	Station Vernier	Camp de base	10° 18' 00" N 109° 13' 48" W		21/03/2005 27/03/2005



Figure 25 : les deux points rouges indiquent les positions de mouillage du marégraphe côtier et du marégraphe du lagon.  
*The two red dots indicate the position of the lagoon pressure gauge and the open ocean pressure gauge.*



Figure 26 : installation par un plongeur de marégraphe à pression.  
*Installation of bottom pressure gauge at Clipperton.*

## L'ANALYSE DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES

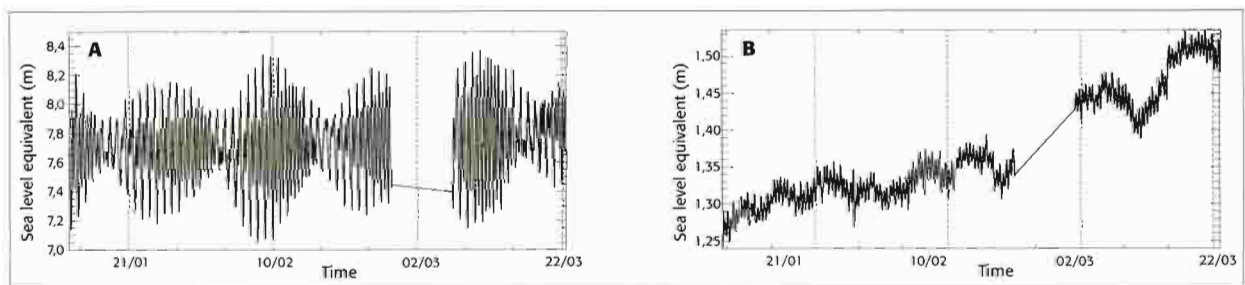


Figure 27 : niveau de la mer en mètres observé à Clipperton, en mer (A) et à l'intérieur du lagon (B), entre janvier et mars 2005.  
*Sea level observed at Clipperton during the expedition at sea (A) and in the lagoon (B), between January and March 2005.*

En parallèle à l'étude de faisabilité pour l'installation d'une station permanente, le déploiement des deux capteurs d'observations du niveau de la mer à Clipperton répondait à plusieurs objectifs scientifiques. Nous voulions d'une part connaître la marée océanique pour valider le modèle global de marée développé par notre équipe au LEGOS (Le Provost *et al.* 1998) et d'autre part mener une étude préliminaire de comparaison des hauteurs

d'eau *in situ* avec celles observées par les différentes missions altimétriques. Le fait de disposer de deux capteurs, dont un installé à l'intérieur du lagon, nous a aussi permis de faire une étude comparative des variations de hauteur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur de l'atoll (Fig. 27). Le niveau de la mer a été calculé à partir de la pression de fond fournie par les capteurs avec correction du baromètre inverse.

## LE NIVEAU DE LA MER À L'EXTÉRIEUR DE L'ATOLL

L'essentiel du signal de niveau de la mer à l'extérieur de l'atoll, c'est-à-dire en mer, est dû à la marée océanique (Fig. 27A). Le signal de marée est de type semi-diurne avec une forte inégalité diurne, l'amplitude pouvant dépasser les 50cm. Le tableau VII donne les amplitudes des huit composantes principales de la marée simulées par le modèle de marée FES2004 (Lyard *et al.* 2006), et celles observées à l'extérieur de l'atoll et dans le lagon. On remarquera le très bon accord entre le modèle et l'observation en mer (Fig. 28). En effet le modèle est capable de reproduire le signal de marée à Clipperton avec une très bonne précision (de l'ordre du centimètre). En dehors de son aspect scientifique la connaissance de la marée à Clipperton a été utile de manière pratique durant l'expédition. En effet nous avons fourni les prévisions de marée à partir du modèle pour

Tableau VII : amplitudes des ondes de marée en cm simulées par le modèle FES2004, observées en mer et dans le lagon.

*Tidal components in cm from the model and from observations at sea and in the lagoon.*

	M2	S2	K2	N2	K1	Q1	P1	O1
<b>FES2004</b>	20,3	12,7	3,9	5,7	10	1,8	3,3	8,6
<b>MER</b>	21,2	16	4,3	6,4	11,4	2,3	3,7	8,9
<b>LAGON</b>	0,1	1,3	0,3	0	0,2	0,2	0	0,2

toute la période de l'expédition. Celles-ci se sont avérées très utiles pour la planification des sorties en mer. La passe qui permettait au zodiac d'effectuer

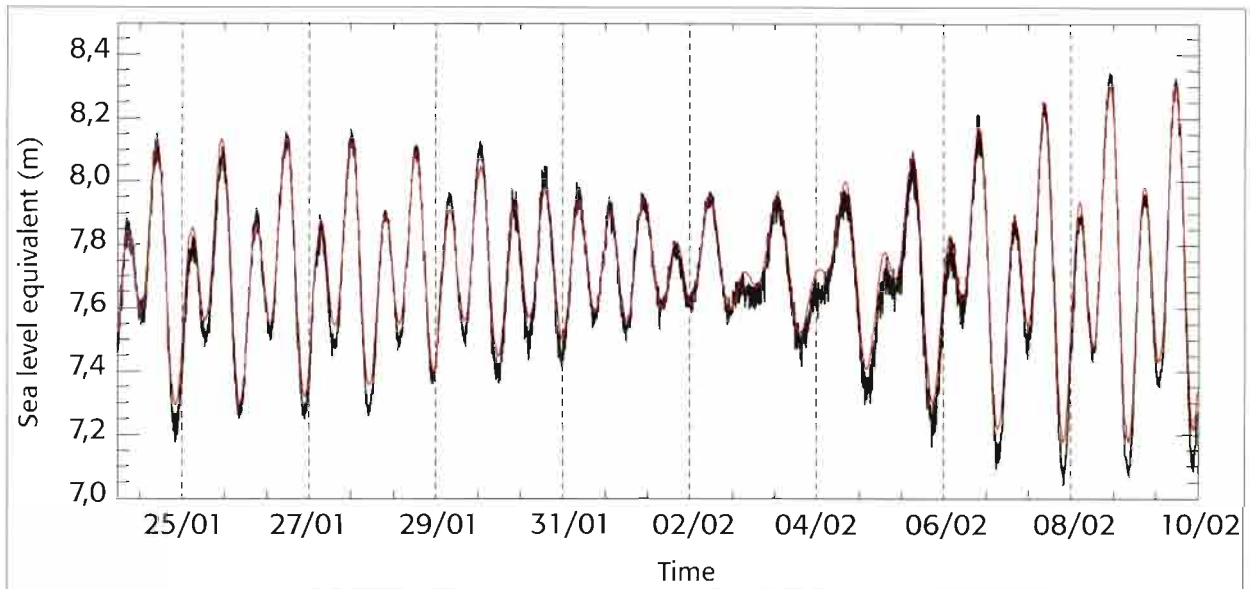


Figure 28: niveau de la mer observé (en noir) et modélisé (en rouge). / Sea level observed (black) and modelled (red).

les sorties en mer se situait en face de Port Jaouen ( $10^{\circ}17'30''\text{N}$ ,  $109^{\circ}13'17''\text{W}$ ) et ne pouvait être franchie à marée basse. Pour recalibrer le modèle par rapport au platier, voici ce que les marins sur place

ont pu noter: "très bon accord marée haute/marée basse; la limite  $-0,1\text{ m}$  du modèle correspond à  $0,5\text{ m}$  d'eau sur le platier en face de Port Jaouen. C'est la limite minimale pour le passage d'un zodiac".

### LE NIVEAU DE LA MER DANS LE LAGON

La seule observation de niveau de la mer dans le lagon portée à notre connaissance est celle qui a été faite à l'échelle de marée, entre avril et juillet 1967 lors de l'expédition Bougainville, rapportée par Niaussat (1978). Il avait été noté à l'époque que ce niveau était en relation étroite avec les précipitations et l'évaporation et qu'il était indépendant de la marée observée en mer. Nos observations montrent l'existence d'un phénomène périodique semi-diurne

à l'intérieur du lagon. Il s'agit en fait de variations de la pression de fond enregistrée par le capteur du lagon qui est la conséquence directe des variations semi-diurne de la pression atmosphérique. En effet l'eau dans le lagon ne pouvant pas s'échapper du fait de l'absence de communication avec l'extérieur, le niveau du lagon ne peut pas s'ajuster de manière hydrostatique (Fig. 29). Les variations du niveau de l'eau entre l'intérieur et l'extérieur du lagon ne

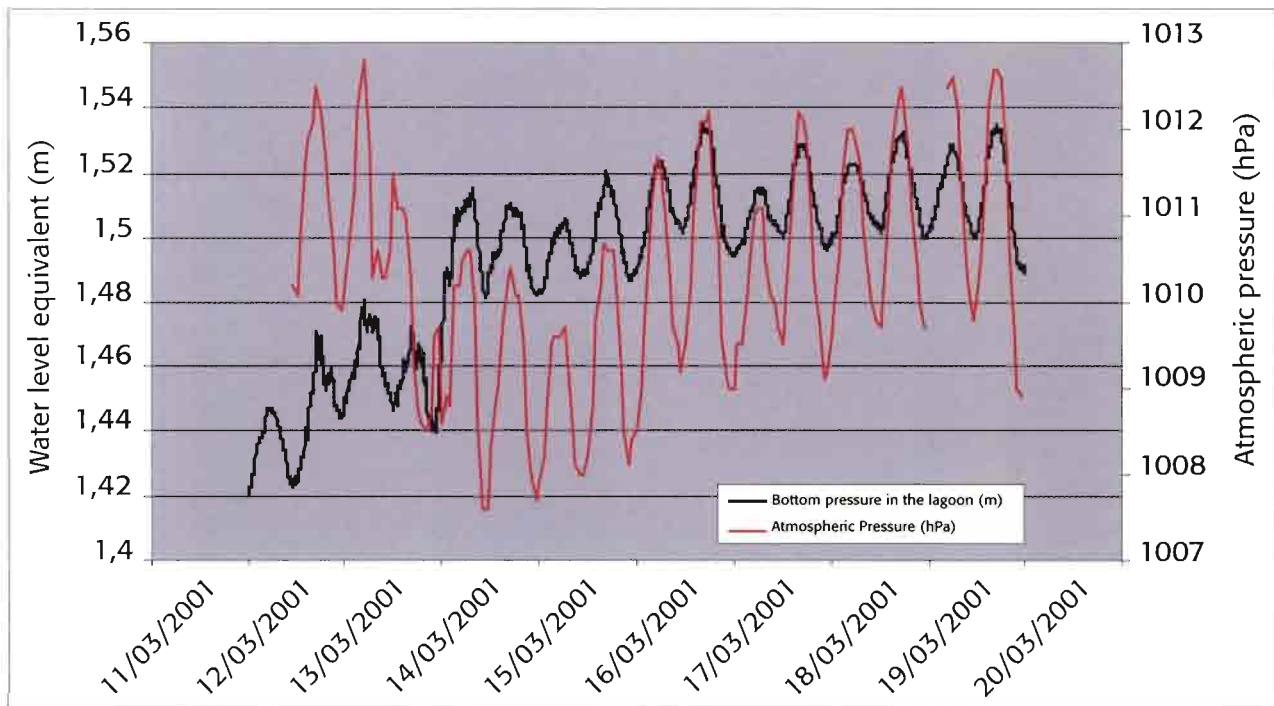


Figure 29: variation de la pression de fond dans le lagon (noir) et de la pression atmosphérique (rouge). / Bottom pressure (black) and barometric pressure in the lagoon (red).

montrent aucune corrélation, confirmant l'absence de communication entre ces deux masses d'eaux. On remarque dans la figure 29 un saut de la pression de fond

de presque 8 cm aux alentours du 15 mars. Celui-ci est dû à une variation de la hauteur d'eau du lagon à la suite de pluie intense (> 30 mm) à cette période.

## LA COMPARAISON AVEC L'ALTIMÉTRIE

Tableau VIII : principales caractéristiques des satellites altimétriques survolant Clipperton, et distance à l'atoll.  
*Principal characteristics of satellites and nearest distance to Clipperton.*

Satellite	Altitude (km)	Inclinaison (°)	Empreinte au sol (km)	Répétitivité (jours)	Distance/Clipperton (km)
Jason-1	1 300	66	2,2	9,916	5,402
GFO	880	107	1,5	17	1,635
ENVISAT	800	98	1,7	35	0,640

La situation de Clipperton pourrait permettre des études sur le biais de hauteur de mer des mesures altimétriques dans des conditions représentatives du plein océan (Bry *et al.* 2005). C'est-à-dire, dans des conditions non perturbées (ou moins) par la présence de la terre qui "pollue" le signal radar réfléchi du satellite. Pour "calibrer" un altimètre il est préférable d'utiliser un site survolé de manière assez proche par les satellites. La position de Clipperton est de ce point de vue très intéressante (Tab. VIII).

Par contre la principale difficulté de cette expérience est le court temps d'observations à Clipperton (trois mois). Cela correspond à cinq passages Jason-1, trois de GFO et deux de ENVISAT. Ce petit nombre de passages est insuffisant pour réaliser une étude stricte de calibration des altimètres. Il est requis de couvrir au minimum quatre mois de mesures. Cependant, cette expérience a servi à estimer la faisabilité du site en terme de calibration. Les résultats sont à interpréter

qualitativement mais déjà, nous pouvons constater que les biais calculés sont dans la barre d'erreur des mesures satellites (erreurs instruments et de corrections géophysiques du signal radar). Les écarts (biais) de mesures instantanées du niveau de la mer du satellite et du marégraphe par rapport à un niveau de référence ont été étudiés. Les hauteurs de mer, calculées par l'altimétrie, contiennent la contribution de la marée et celles des effets de la pression atmosphérique (Tab. IX).

À Clipperton, pour pouvoir calculer un biais absolu, il faut connaître la hauteur du point marégraphe par rapport à l'ellipsoïde de référence. Cette étude est en cours.

Tableau IX : biais de hauteur des altimètres.  
*Altimeter bias.*

D'après les études CAL/VAL	Jason-1	GFO	ENVISAT
Nombre de passages	5	3	2
Biais absolu	(0,10 ± 3) cm	(0,06 ± 6) cm	45,4 cm
Écart type	1,5 cm	4,6 cm	4 cm

## CONCLUSION

Le déploiement de deux marégraphes à capteurs de pression dans le lagon et en mer à Clipperton nous a permis de valider le modèle de marée global et de confirmer l'absence de communication entre le lagon et l'océan. En ce qui concerne la possibilité de l'installation d'une station marégraphique permanente à Clipperton, deux cas de figure s'offrent à nous :

- Si une base scientifique permanente est installée à Clipperton, alors il est envisageable d'installer une station marégraphique avec transmission des données en temps réel par satellite à proximité du camp de base situé dans la grande cocoteraie du Sud-Ouest de l'île.
- S'il n'y a pas de base scientifique il devient inenvisageable d'installer une station sans surveillance (dégradations à cause du vandalisme et des cyclones). Le marégraphe doit alors être déployé en autonome avec une mémoire

interne. Il pourrait être installé sur une grosse patate de corail étudiée et carottée pendant l'expédition dont la position est : 010° 17' 29" N, 109° 13' 30" W. Elle est située à 9 m de profondeur. Cette solution nécessite tout de même une visite régulière de l'atoll pour le changement du capteur et des batteries.

Concernant la calibration des altimètres satellitaires, les résultats obtenus pour Jason-1 et GFO sont cohérents. Il est maintenant nécessaire de connaître avec plus de précision et une plus grande résolution les variations du géoïde dans cette région ainsi que le rattachement du marégraphe à l'ellipsoïde de référence utilisé pour les satellites. Ceci permettra à terme de réaliser un rattachement absolu entre les mesures altimétriques et les marégraphes et de calculer des biais absolus de hauteur de mer. Cette étude sera menée dès que le traitement des données

de bouées GPS aura été effectué. La première étape d'étude d'étalonnage altimétrique à Clipperton est encourageante mais pas encore concluante. En effet, les séries temporelles courtes n'ont pas permis une quantification robuste des biais de hauteur de mer des satellites altimétriques. Pour poursuivre, il faudrait reproduire l'expérience sur du plus long

terme. Clipperton est cependant par sa situation géographique, un site d'intérêt pour la calibration des altimètres. Cependant il souffre à ce stade des mêmes réserves que celles énoncées pour l'installation d'une station marégraphique permanente, c'est-à-dire sa difficulté d'accès et l'absence de base scientifique permanente.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de l'opération, en particulier l'équipe de plongeurs de l'expédition, J.-L. Menou du centre IRD de Nouméa et C. Fresser qui

a effectué la relève des marégraphes, ainsi que Ph. Téchiné du LEGOS à Toulouse, pour l'exploitation des données marégraphiques.

BRY I., JAN G. & MÉNARD Y. 2005. – *Étude de faisabilité sur l'atoll de Clipperton*. Rapport de stage. Centre national d'études spatiales (CNES) / Noveltis, Toulouse, 87 p.

GUILLOT A. & CALMANT S. 2005. – *Rapport de mission Clipperton*. <http://www.legos.obs-mip.fr/fr/communications/rapports/>. (consulté en avril 2005).

JAN G., MÉNARD Y., FAILLOT M., LYARD F., JEANSOU E. & BONNEFOND P. 2004. – Offshore absolute calibration of space borne radar altimeters. *Marine Geodesy* 27(3 et 4) : 615-631.

LE PROVOST C., LYARD F., GENCO M.-L. & RABILLOUD F. 1998. – A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilation of a satellite altimeter-derived data set. *Journal of Geophysical Research* 103(C3) : 5513-5529.

LYARD F., LEFEVRE F., LETELLIER T. & FRANCIS O. 2006. – Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics* 56(5-6) : 394-415. (DOI 10.1007/s10236-006-0086-x).

NIAUSSAT P.-M. 1978. – *Le Lagon et l'atoll de Clipperton*. Académie des sciences d'Outre-Mer, Paris, 189 p. (Travaux et mémoires de l'académie des sciences d'Outre-Mer ; 8).

Testut L., Jan G., Guillot A., Calmant Stéphane. (2009).

Variations du niveau de la mer et du lagon.

In : Charpy Loïc (coord.). Clipperton : environnement et biodiversité d'un microcosme océanique.

Paris (FRA) ; Marseille : MNHN ; IRD, (68), 49-54. (Patrimoines Naturels ; 68). ISBN 978-2-85653-612-4