

pour le mouvement tectonique absolu de la plaque Pacifique

Un site test

Stéphane Calmant, Nicolas Bergeot, Marie-Noëlle Bouin

Résumé

Clipperton est une des rares îles situées sur la partie orientale de la plus grande plaque tectonique du Globe, la plaque Pacifique. À ce titre, elle constitue un site idéal pour tester la validité des modèles de rotation de la plaque. À l'occasion de la mission Passion 2001 dirigée par C. Jost avec le concours de la Marine nationale française, puis de l'expédition organisée par J.-L. Étienne à Clipperton de 2004 à 2005, nous avons instrumenté un site géodésique, d'acronyme CPTN, et réalisé des observations GPS sur ce site. Le résultat de ces observations, exprimé dans l'ITRF2000, indique une vitesse horizontale de l'île de 80,7 mm/an orientée N340.1, valeur très proche des différentes valeurs prédites par les modèles tectoniques. L'incertitude globale sur la mesure, de l'ordre de 7 mm/an, ne permet toutefois pas de discriminer entre ces différents modèles ou de mettre en évidence une éventuellement déformation de la plaque Pacifique. Une vitesse de -10,3 mm/an est obtenue pour la composante verticale. Une valeur aussi importante de subsidence devra absolument être confirmée par de nouvelles mesures avant toute tentative d'interprétation.

Abstract

Clipperton is one of the very few emerged lands located on the Eastern rim of the Pacific plate. Thus, it is a good candidate to test the validity of the various rotation poles of the Pacific plate. Taking opportunity of the expedition "Passion 2001" in Clipperton with the support of the French Navy and that one organized by J.-L. Etienne in 2004-2005, we have installed a geodetic mark on top the "rocher" and conducted two GPS sessions. Results are expressed in the ITRF2000 reference frame. We find a 80.7 mm/yr oriented N340.1 horizontal velocity. This value is very close to those predicted by the various models of plate rotation. The mean uncertainty on this horizontal component of the velocity vector is 7 mm/yr. This is too large to allow any discrimination between the models or to evidence any large scale deformation of the plate. A -10.3 mm/yr vertical velocity is also found. Such a large value probably results of some error in the antenna height value during the 2001 session. So, another session is required before any interpretation of this value is tempted.

INTRODUCTION

L'île de Clipperton est située sur la plaque Pacifique, à une vingtaine de kilomètres de la zone de fracture de Clipperton et environ 500 km de la dorsale Pacifique Est (Fig. 30 et Fig. 31). Cet édifice volcanique est encore mal connu. En particulier, l'origine de l'édifice est toujours débattue, d'autant qu'un âge précis et fiable n'est toujours pas disponible. Bellon & Maury (comm. pers.) ont obtenu une datation à $3,7 \pm 0,7$ Ma à partir de l'analyse de feldspaths d'un échantillon prélevé sur le "rocher". Mais cette valeur est sujette à caution (Maury comm. pers.). Trois hypothèses sur l'origine de l'édifice sont envisageables: volcanisme de point chaud, volcanisme de zone de fracture ou volcanisme exceptionnel à la dorsale. L'hypothèse de volcanisme lié à la zone de fracture en ferait un événement très particulier par son ampleur, ce type de volcanisme donnant plutôt des édifices de petite taille qui n'émergent pas. De plus, l'édifice n'est pas exactement sur la zone de fracture mais seulement à son voisinage. De même, le volcanisme de dorsale ne produit des édifices suffisamment gros pour émerger que dans le cas particulier d'une interaction

avec un point chaud. Sur la base d'un âge de 3,7 Ma, il ne pourrait pas s'agir de volcanisme à la dorsale puisque le plancher océanique environnant l'édifice est de 6,5 Ma (Fig. 31; Müller et al. 1997). Toutefois, l'échantillon prélevé sur le "rocher" pourrait correspondre à un épanchement tardif, non représentatif de l'âge de l'ensemble de

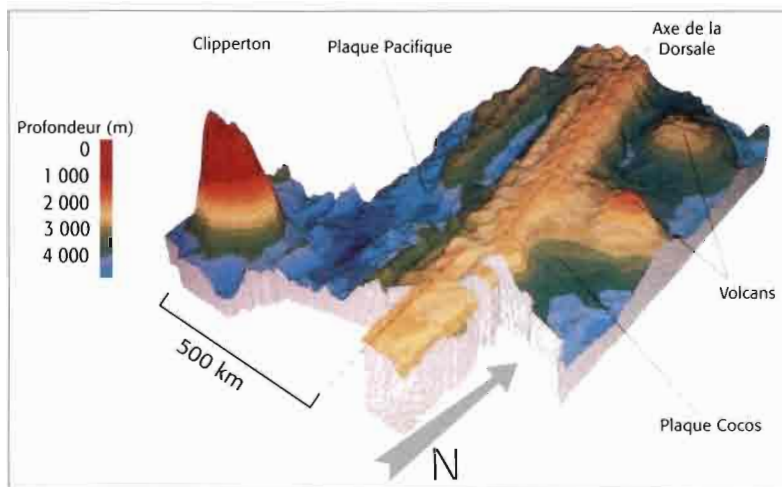


Figure 30: carte 3D du relief sous-marin autour de Clipperton (Document R. Hekinian, IFREMER).

3D map of the bathymetry in the vicinity of Clipperton Island (Document provided by R. Hekinian, IFREMER).

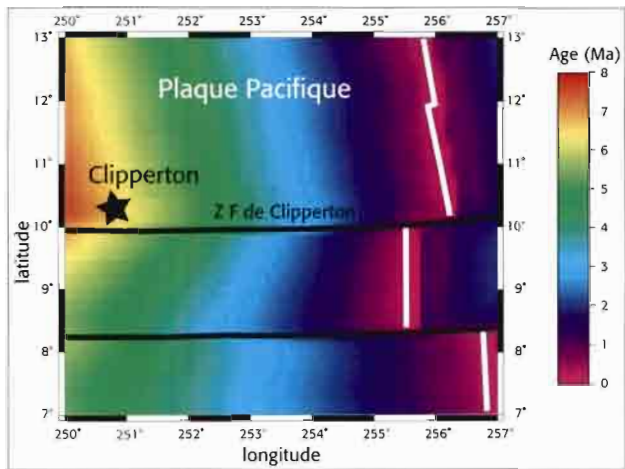


Figure 31 : localisation de l'île de Clipperton par rapport à la dorsale Pacifique Est et à la zone de Fracture de Clipperton. La dorsale Pacifique Est est schématisée en trait blanc. Les zones de fracture sont schématisées en trait noir. La position de l'île est indiquée par une étoile noire. Le code de couleur représente l'âge crustal d'après Müller *et al.* (1997).

*Location of Clipperton Island (marked by an asterisk), with respect to the East Pacific Rise (white band) and to the Clipperton Fracture Zone (black lines). The color code stands for the crustal age, from Müller *et al.* (1997).*

l'édifice. Reste l'hypothèse d'un volcan de point chaud. Elle reste la plus probable, sachant que l'édifice fait partie d'un petite chaîne volcanique (Manea *et al.* 2005) et que la géochimie des échantillons de roche prélevés sur le "rocher" est du type OIB (Oceanic Island Basalt), caractéristique du volcanisme de point chaud.

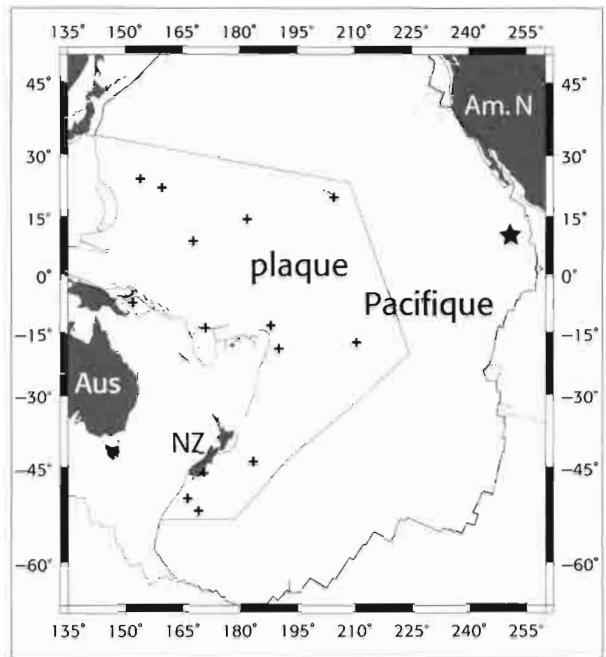


Figure 32 : carte de la plaque Pacifique et de ses frontières. Les croix correspondent aux sites GPS utilisés dans les différentes études pour calculer le pôle de rotation de la plaque Pacifique, et éventuellement les écarts locaux à un pôle moyen. La zone en grisé correspond à la partie de la plaque qui n'est pas échantillonnée par des mesures géodésiques. La position de l'île de Clipperton est indiquée par une étoile noire.

Map of the Pacific plate and its boundaries. Crosses mark the location of the GPS sites used in most studies to compute a rotation pole of the Pacific plate. The area in gray corresponds to the part of the Pacific plate that is not sampled by the GPS network. The star marks Clipperton Island.

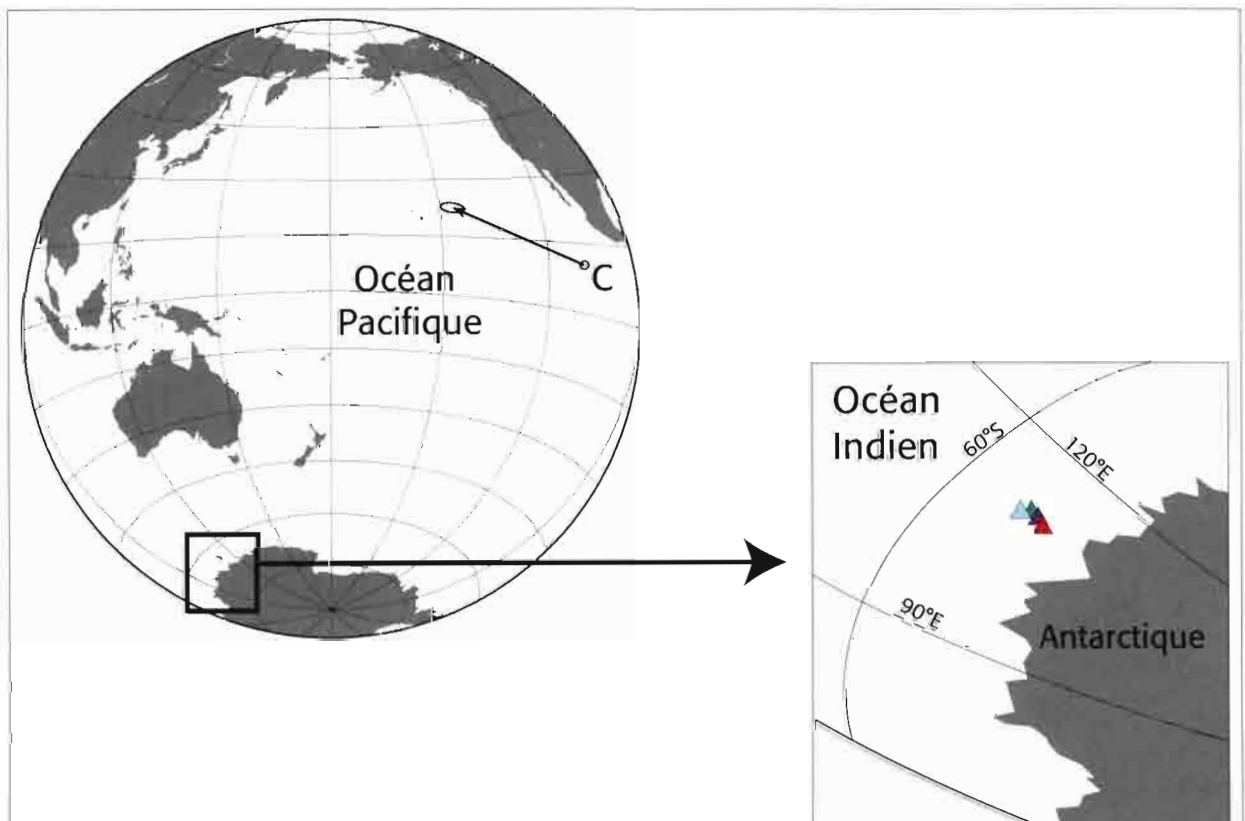


Figure 33 : position relative du pôle de rotation de la plaque Pacifique et de l'île de Clipperton (matérialisée par la lettre C). La flèche donne la direction du mouvement de l'île. L'encart en bas à droite montre la position du pôle selon différents modèles (en violet Beavan *et al.* 2002 ; en vert Calmant *et al.* 2002 ; en rouge ITRF2000 par Altamimi *et al.* 2002 ; en bleu cette étude).

*Relative positions of Clipperton Island (marked by the letter C) and the rotation pole of the Pacific Plate. The arrow indicates the orientation of the velocity vector. Location of the different rotation poles is shown in inset (in dark blue Beavan *et al.* 2002 ; in green Calmant *et al.* 2002 ; in red ITRF2000 by Altamimi *et al.* 2002 ; in light blue this study).*

La plaque Pacifique qui supporte l'île de Clipperton est la plus grande plaque (océanique) de la planète. Le système GPS a été utilisé dans un certain nombre d'études dans le but de déterminer le pôle de rotation de la plaque (Larson *et al.* 1997; Beavan *et al.* 2002; Calmant *et al.* 2003, parmi d'autres) ou pour tester la limite de la rigidité des plaques, un des principes fondamentaux de la théorie de la tectonique des plaques. Le problème essentiel auquel se heurtent toutes les études de géodésie portant sur la rigidité de la plaque Pacifique (Dong *et al.* 1998; Beavan *et al.* 2002; Tregoning 2002) est qu'il y a peu de sites potentiellement utilisables et de fait seulement une dizaine sont effectivement instrumentés, que ce soit par GPS (les plus nombreux) ou par d'autres systèmes géodésiques comme le système d'orbitographie DORIS ou des stations

Laser. Par exemple, moins d'une dizaine de sites sur la plaque Pacifique *sensu-stricto* participent au calcul de l'ITRF2000 (*International Terrestrial Reference Frame*) (Altamimi *et al.* 2002, voir aussi le site web de l'ITRF : itrf.ensg.ign.fr), une douzaine de sites ont été traités par Beavan *et al.* (2002), la moitié seulement par Calmant *et al.* (2003). Dans aucune de ces études les sites GPS utilisés échantillonnent complètement la plaque Pacifique, loin s'en faut. Environ la moitié de la plaque n'est pas échantillonnée, en particulier sa partie est (Fig. 32). Beavan *et al.* (2002) ont ainsi noté que Clipperton, de part sa situation à l'extrémité est de la plaque Pacifique, et donc au plus loin du pôle de rotation (Fig. 33), constituait un site particulier pour tester la validité des pôles de rotation prédisant le mouvement de la plaque Pacifique mais aussi l'hypothèse de la rigidité de la plaque.

LES MESURES GPS

Deux campagnes de mesures ont été réalisées. La première a été réalisée lors de la mission "Passion 2001" dirigée par C. Jost à l'occasion d'une mission de présence de la Marine nationale française. C'est à cette occasion qu'a été installé le site géodésique de référence, CPTN. Ce site est matérialisé par une tige d'acier inox scellée dans la roche basaltique sur un replat en hauteur du "rocher". Il est signalé par une plaque en cuivre. La première mesure a été réalisée avec un système bi-fréquence 24 canaux LEICA 399. L'antenne avait été disposée sur un trépied (Fig. 34A), centrée et nivelée, et la hauteur entre le centre de phase de l'antenne et le repère mesurée. La mesure a duré trois journées. La deuxième campagne de mesure a consisté à laisser un récepteur pendant la majeure partie de

l'expédition, soit du 16 janvier au 20 mars 2005. La mesure a été faite avec un récepteur TRIMBLE 5700 et une antenne Zephyr. Afin d'assurer une bonne stabilité de l'antenne pendant les trois mois de mesure en continu, l'antenne avait été vissée sur un mat pointé dans le repère et ancré au sol par trois chaînes (Fig. 34B). Les périodes d'observation sont résumées dans le tableau X.

Tableau X: récapitulatif des sessions d'observation GPS. Les jours sont donnés en "jour dans l'année" (de 1 à 365).
Summary of the GPS sessions. Days of observations are numbered in day-of-year (doy).

Session de février 2001	056-058
Session de janvier-mai 2005	016-079

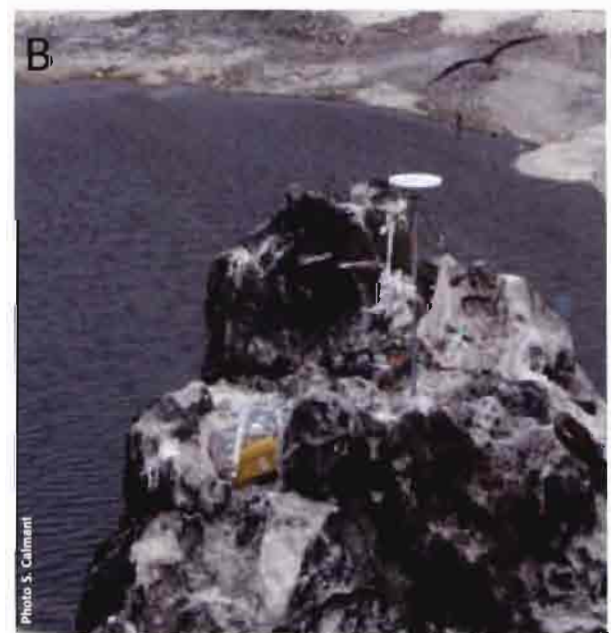


Figure 34 : observation du site GPS CPTN lors des sessions de 2001 (A) et 2005 (B). Noter le mat ancré dans la roche (B) sur lequel est vissée l'antenne, ceci permet une bonne stabilité de cette dernière à long terme et évite toute erreur de détermination de la hauteur d'antenne.

GPS observations during the 2001 (A) and 2005 (B) campaigns. Note the blue mast used in 2005 to fix the antenna (B). This device ensured long-term stability of the antenna position and avoided errors in antenna height.

LES CALCULS GPS

Les données GPS ont été traitées avec le logiciel GAMIT v10.1 (King & Bock 1999). Ce logiciel scientifique permet en particulier de corriger au mieux les perturbations de propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère et la troposphère. L'ionosphère étant un milieu dispersif (la vitesse de propagation dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique), il utilise la combinaison linéaire LC *ionosphere-free* des fréquences L1 et L2 afin de s'affranchir des problèmes liés au trajet de l'onde électromagnétique dans les différentes couches qui séparent le satellite du récepteur. La propagation dans la troposphère est corrigée à partir d'un modèle paramétré pour chaque station incluse dans le calcul. Les orbites utilisées et les corrections d'horloges des satellites sont celles délivrées par l'IGS (*International GNSS Service*; Beutler *et al.* 1999). Les marées solides, les surcharges océaniques (Bos & Scherneck 2005) et les marées polaires sont données par les modèles de l'IERS (*International Earth Rotation Service*). Les paramètres d'orientation de la terre que nous utilisons sont calculés par l'USNO (*United States Naval Observatory*). Le calcul des lignes de bases entre chaque station s'effectue en réseau libre (information a priori sur la position des stations de 50 cm) avant de procéder à une mise en référence.

La mise en référence sur ITRF est réalisée avec le logiciel CATREF (Altamimi *et al.* 2002) développé pour les réalisations successives de l'ITRS (*International Terrestrial Reference System*). La mise en référence consiste à mettre dans un système de référence unique et bien défini les jeux de coordonnées (positions) calculés précédemment à l'aide d'une transformation à sept paramètres (trois rotations, trois translations et un facteur d'échelle). À partir d'un ensemble de solutions journalières et des matrices de variance-covariance associées, une position et une vitesse pour chaque station sont déterminées pour

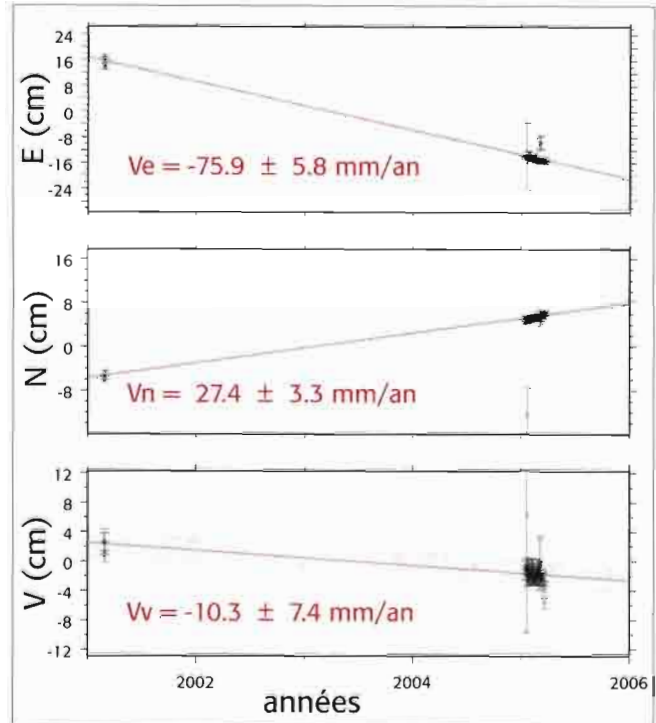


Figure 35 : régression linéaire sur les coordonnées est, nord et verticale du repère CPTN.

Linear regressions throughout the GPS daily solutions for the East, North, and Vertical components.

une époque donnée qui sera l'époque de référence de la combinaison et dans un repère combiné qui est celui de l'IGS00b (Ferland 2003).

In fine, la répétitivité moyenne sur la position des stations sur 10 jours est 2-3 mm pour la composante nord, 4 mm pour la composante est et 5-9 mm pour la composante verticale. Les positions ainsi obtenues pour le site de Clipperton CPTN sont présentées par composantes sur la figure 35. On peut noter qu'en effet, la dispersion sur la composante verticale est sensiblement plus importante que sur les deux autres composantes.

DISCUSSION

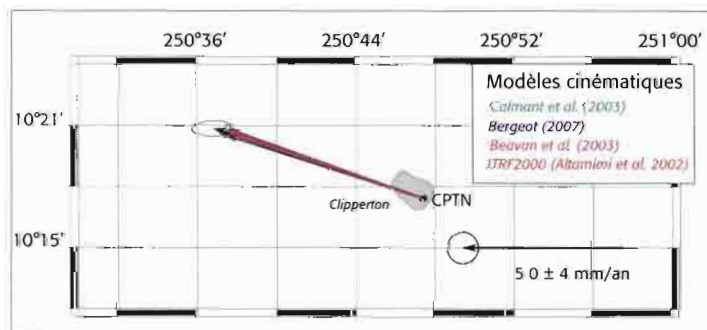


Figure 36: vecteurs de vitesse horizontale. En noir la vitesse horizontale donnée par les observations GPS. En couleur, les vitesses données par différents modèles selon le code de couleur donné en encart. À noter que les ellipses d'incertitude des vecteurs prédits sont très petites et ne sont pas reportées sur la figure.

Horizontal velocity vectors. Black arrow stands for the velocity vector deduced from the GPS observations. Other arrows stand for different plate rotation models (cf inset). Note that the uncertainty ellipses associated to velocities predicted by the models are small and not reported on the figure.

Les composantes du vecteur vitesse déduit des observations GPS sont données dans le tableau XI. La vitesse horizontale obtenue pour CPTN est de 80,7 mm/an orienté N340,1. Cette vitesse est très proche des vitesses prédites par les différents modèles (Fig. 36) et les écarts entre cette mesure de la vitesse à Clipperton et les prédictions des modèles ne sont pas significatifs au regard des incertitudes (Fig. 37). Les ellipses d'incertitude des vecteurs prédits sont très petites et ne sont pas reportées sur la figure. De fait, cette

Tableau XI : vecteur vitesse du site CPTN rapporté à l'ITRF2000. *Velocity vectors at CPTN with respect to ITRF 2000.*

Vest (mm)	Vnord (mm)	Vvert. (mm)
-75,9 ± 5,8	27,4 ± 3,3	-10,3 ± 7,4

incertitude globale est dominée par l'incertitude sur les mesures GPS. Les vecteurs de différences de vitesse entre valeur mesurée et valeurs prédites sont tous contenus dans les ellipses d'incertitude. Ainsi, notre mesure de la vitesse horizontale à Clipperton est en bon accord avec toutes les prédictions de modèles récents mais ne permet ni de discriminer parmi ces modèles ni de mettre en évidence une déformation notable de la plaque lithosphérique. Clairement, ces objectifs ne pourront être atteints qu'avec de nouvelles mesures, reprises sur plusieurs années, afin de réduire l'incertitude sur la détermination de la vitesse par le nombre de mesures et par la longueur de la série temporelle.

La vitesse verticale obtenue à l'issue de ces deux campagnes de mesures par GPS, $-10,3$ mm/an (Fig. 35), pose problème. Une telle vitesse de subsidence est peu réaliste dans ce contexte de volcanisme océanique intra-plaque. En contexte de volcanisme océanique intra-plaque, la subsidence peut avoir deux origines : la subsidence de la lithosphère du fait de son refroidissement progressif, et la déflexion visco-élastique de la lithosphère lors de la mise en place de l'édifice. Aucun de ces deux mécanismes ne conduit à des vitesses de subsidence supérieures à quelques millimètres par an. La valeur observée est donc soit erronée, soit relève d'un autre mécanisme. L'erreur la plus vraisemblable est une erreur sur la hauteur d'antenne relevée lors de la première campagne de mesure. Soit une erreur de lecture, bien que cette valeur ait fait l'objet de plusieurs vérifications indépendantes, soit une erreur de retranscription. Si cette

valeur devait être confirmée, il se pourrait alors que ce soit l'âge de l'île qui soit erroné. En effet, la morphologie de l'île, avec son anneau corallien, atteste bien d'une subsidence de l'île. Mais avec un tel taux de subsidence, l'île s'enfoncerait d'une centaine de mètre tous les 100 000 ans. Pour être encore émergée, cette île aurait donc tout au plus quelques centaines de milliers d'années. Il est donc nécessaire de confirmer cette valeur de subsidence par d'autres méthodes de mesure de vitesse verticale telles que des données de croissance des coraux. Des forages ont été effectués dans des coraux du platier externe de l'île par une équipe de l'IRD à l'occasion de cette expédition. De tels forages devraient apporter des éléments sur la vitesse de subsidence de l'île. Les résultats de ces forages, une nouvelle datation pour confirmer ou infirmer le seul âge actuellement disponible, ou enfin de nouvelles mesures GPS sont absolument nécessaires pour régler ce problème de la subsidence à Clipperton.

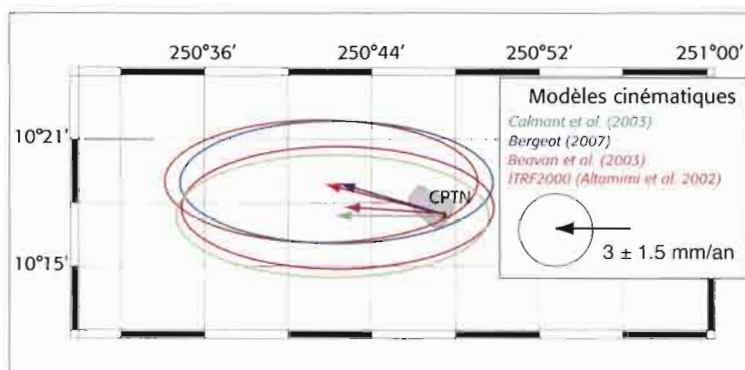


Figure 37 : écarts entre la vitesse mesurée par GPS et les vitesses prédites par les modèles.

Difference in site velocity between GPS measurements and plate model predictions.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient C. Jost et la Marine nationale qui ont permis la première campagne de mesure ainsi que J.-L. Laurent qui a réalisé la première mesure en 2001. Ils remercient aussi

chaleureusement tous les membres de l'expédition de 2005 qui ont aidé à cette opération de positionnement par GPS, en particulier le Dr F. Jean et C. Fresser.

ALTAMIMI Z., SILLARD P. & BOUCHER C. 2002. – ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 107(B10) : 2214-2232. (DOI 10.1029/2001JB000561).

BEAVAN J., TREGONING P., BEVIS M., KATO T. & MEETENS C. 2002. – Motion and rigidity of the Pacific Plate and implications for plate boundary deformation. *Journal of Geophysical Research* 107(B10) : 2261-2274. (DOI 10.1029/2001JB000282).

BERGEOT, N. 2007. – *Étude du cycle sismique du Vanuatu par GPS*. Thèse de Doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154, Paris, France, 158 p.

BEUTLER G., ROTHACHER M., SCHAEER S., SPRINGER T.-A., KOUBA J. & NEILAN R.-E. 1997. – The International GPS Service (IGS): An Interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences. *Advances in Space Research* 23(4) : 631-635.

BOS M.-S. & SCHERNECK H.-G. 2005. – The free ocean tide loading provider, URL http://www.oso.chalmers.se/_loading.

CALMANT S., PELLETIER B., LEBELLEGARD P., BEVIS M., TAYLOR F. & PHILLIPS D. 2003. – New insights on the New Hebrides subduction zone based on GPS results. *Journal of Geophysical Research* 108(B6) : 2319-2341. (DOI 10.1029/2001JB000644).

DONG D., HERRING T. & KING R. 1998. – Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial data. *Journal of Geodesy* 72 : 200-214.

FERLAND R. 2003. – IGS00 (v2) final, IGS Mail 4666, 29 October 2003.

KING R.-W. & BOCK Y. 1999. – *Documentation for the GAMIT GPS software analysis, release 9.9*. Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego.

LARSON K., FREYMUELLER J. & PHILIPSEN S. 1997. – Global plate velocities from the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research* 102(B5) : 9961-9981.



MANEA M., MANEA V., FERRARI L., KOSTOGLODOV V. & BANDY W. 2005. – Tectonic evolution of the tehuantepec Ridge. *Earth & Planetary Science Letters* 238: 64-77.

MÜLLER D.-T., ROEST W., ROYER J.-Y., GAHAGAN L. & SCLATER J. 1997. – Digital Isochrons of the World's Ocean floor. *Journal of Geophysical Research*

102(B2) : 3211-3214.

TREGONING P. 2002. – Plate kinematics in the western Pacific derived from geodetic observations. *Journal of Geophysical Research* 107(B1) : 2020. (DOI 10.1029/2001JB000406).

Calmant Stéphane, Bergeot N., Bouin M.N. (2009).

Un site test pour le mouvement tectonique absolu de la plaque Pacifique.

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

Paris (FRA) ; Marseille : MNHN ; IRD, (68), 55-60. (Patrimoines Naturels ; 68). ISBN 978-2-85653-612-4