

Surrections cosismiques et subsidence intersismique enregistrées par des coraux à Mallicolo (Vanuatu, Pacifique sud-ouest)

Cosismic uplifts and interseismic subsidence recorded in corals at Malekula (Vanuatu, southwest Pacific)

Stéphane Calmant^{a*}, Guy Cabioch^{a,b}, Marc Regnier^a, Robert Pillet^{a,b}, Bernard Pelletier^{a,b}

^a Centre IRD de Nouméa, BP A5, 98848 Nouméa, Nouvelle Calédonie, France

^b UMR Géosciences Azur 6526

(Reçu le 1^{er} février 1999, accepté après révision le 3 avril 1999)

Abstract — Evidence of successive periods of uplift and subsidence is present on the western coast of Malekula Island, Vanuatu, in the southwest Pacific. These vertical motions are recorded in coral growth. Corals grew on the outer rim of an ancient reef flat uplifted by the 1965 earthquake and afterwards eroded by sea waves. The occurrence of corals on this reef flat implies that it had been submerged since 1965. The whole unit is now uplifted following the 1994 earthquake. This timing of events suggests that the last submersion of the reef flat resulted from the accumulation of the strain, the relaxation of which caused the 1994 earthquake. Vertical displacements modelled using a dislocation model partly agree with this interpretation, suggesting that some aseismic motions might have occurred. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Vanuatu / vertical motions / coseismic and interseismic motion / corals and flat reef

Résumé — Une alternance de phases de surrection et de subsidence est mise en évidence sur la côte ouest de l'île de Mallicolo, Vanuatu, Pacifique sud-ouest. Cette observation a été déduite de l'examen de coraux nécrosés en bordure de côte. Ces colonies se sont développées sur un ancien platier, auparavant soulevé et érodé. Ce platier a été réimmergé, puisqu'il y a eu croissance de la colonie. L'ensemble a été de nouveau soulevé et est actuellement émergé. Cette chronologie des événements est liée aux phases successives d'accumulation et de relaxation des contraintes, associées aux deux derniers grands séismes ayant affecté l'île en août 1965 et en juillet 1994. Les simulations réalisées à partir de mécanismes focaux publiés pour le séisme de 1994 prédisent des mouvements verticaux de polarité concordante, mais d'amplitude deux à trois fois moindre, suggérant une contribution asismique au mouvement. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Vanuatu / mouvements verticaux / mouvements cosismiques et intersismiques / coraux et platiers coralliens

Note présentée par Jean Aubouin.

* Correspondance et tirés à part.
calmant@noumea.ird.nc



Fonds Documentaire IRD
Cote : B* 123293 Ex : 1

C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences
1999. 328, 711-716

711

no 10

Abridged version

Introduction

In southwest Pacific, the convergence between the Pacific plate and the Australia plate is accommodated along the New Hebrides and Tonga subduction zones between which the North Fiji and Lau back-arc basin open (*figure 1*). Convergence is as high as $12 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$ along the New Hebrides trench (Calmant et al., 1995; Taylor et al., 1995). In the central part of the New Hebrides Island arc which overrides the subducting Australia plate, large earthquakes with noticeable vertical movement of the islands accompany the convergence (Benoit and Dubois, 1971; Ebel, 1980; Jouannic et al., 1980; Taylor et al., 1980, 1982, 1987; Calmant et al., 1997). These co-seismic uplifts are super-imposed on a long-term uplift of the islands. The latter has been attributed either to the d'Entrecasteaux Ridge which enters the trench (Collot et al., 1985) or to the elastic unbending of the subducted lithosphere due to the detachment of the deep slab (Chatelain et al., 1992). The last two major events, in August 1965 and July 1994 twice uplifted the coral reef flat at Leviamp, northwest of Malekula (*figure 2*). The major event of the 1965 seismic crisis reached a magnitude of 7.5. Field data observed in the 1970s by Taylor et al. (1980) yielded vertical motion of 1 m in northwest Malekula. More recently, the 1994 event (*figure 2*) also generated vertical motions of several decimetres at Malekula. Co-seismic displacements modelled using the Centroid Moment Tensor (CMT) published by Harvard (Dziewonski et al., 1981) and a dislocation model (Okada, 1985) agree rather well with downward motion observed by GPS on the southeast coast of Malekula (Calmant et al., 1997).

Field observations

On a reef, the corals are distributed from the reef flat at the top to a few tens of metres depth along the reef slope. Any uplift of the reef would lead to the death of the corals exposed. The transition between dead and living parts enables the amount of uplift to be quantified. We observed such a scheme at Leviamp, on the northwest coast of Malekula (*figure 3*). There, an old abraded reef flat slightly inclined seaward is covered with numerous 10- to 15-cm-high favids, recently emerged and dead.

Discussion

These observations enable us to propose (*figure 4*) that the reef flat, previously uplifted in 1965 (Benoit and Dubois, 1971;

Taylor et al., 1980) underwent a transient subsidence before it was uplifted again in 1994. This subsidence could result from the accumulation of the strain subsequently released seismically in 1994. Indeed, it is not likely to result from post-seismic subsidence following the 1965 event since post-seismic motions decrease with time, whereas this one increased. Taylor et al. (1980) report uplift observations in the middle of the 1970s, that is about a decade after the earthquake occurred. Lastly, the favids are at most 15 years old given that they grow at about 0.8 to $1 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$. Thus, their young age and their globular shape which denotes that their growth was not limited vertically both argue for a late subsidence which increased recently. Such a scheme is consistent with deformations generated by accumulating strain. Calmant et al. (1997) simulated the co-seismic and the inter-seismic deformations related to the 1994 event using a dislocation model (Okada, 1985) and the published CMT. CMT-derived vertical motions agreed well with GPS observations at Lamap, southeast of Malekula (*figure 2*). They also qualitatively agree with observations at Leviamp, where an uplift of about 5 cm is obtained when about 15 cm are observed.

Agreement between modelled and observed deformations can be improved by changing either the epicentre or the focal mechanism of the earthquake. The CMT appears to be particularly well constrained. In particular, the location of the epicentre does not significantly differ from one estimate to another (NEIC, CMTS, IRD regional network). Accordingly, the disagreement in amplitude of the vertical motion cannot be recovered by realistic changes in the values of the parameters which characterize the mechanism of the event. Then, we suggest that this discrepancy might come from unmodelled effects (departures from elastic half space) in this context of highly heterogeneous media, or, more presumably, from post-seismic motion, as it has been observed in many other cases.

Conclusion

Corals appear to be valuable tools for completing geodetic data to be compared to modelled co-seismic deformations. In the particular case described in this paper, the corals also provide useful information on the inter-seismic strain accumulation, in a similar way to the river deposits depicted by Kelsey et al. (1998) in the Cascadia subduction zone. From the discrepancy between the amount of observed and CMT-derived uplifts, it is proposed that some post-seismic motion also occurred.

1. Introduction

Le Pacifique sud-ouest est caractérisé par la présence de deux subductions à polarité inverse, la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides et celle de Tonga, entre lesquelles s'ouvrent les bassins marginaux Nord-Fidjien et de Lau (figure 1). La convergence aux Nouvelles-Hébrides est de 10 à 12 $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ (Taylor et al., 1995 ; Calmant et al., 1995). Le long de la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides, l'archipel du même nom, qui chevauche la plaque australienne en subduction, est soumis, dans sa partie centrale, à de très importants mouvements verticaux (Jouannic et al., 1980 ; Taylor et al., 1980). Ces mouvements verticaux sont attribués à la présence d'une ride asismique sur la plaque plongeante, la ride d'Entrecasteaux (Collot et al., 1985), ou à un rebond élastique de la lithosphère subductée, consécutif à un détachement de la partie profonde du *slab* (Châtelain et al., 1992). La morphologie de ces îles résulte ainsi de la superposition d'une surrection sur le long terme à des mouvements co-sismiques, comme en témoignent les deux dernières crises sismiques majeures à Mallicolo, en août 1965 et juillet 1994 (Benoît et Dubois, 1971 ; Ebel, 1980 ; Jouannic et al., 1980 ; Taylor et al., 1980, 1982, 1987 ; Calmant et al., 1997). Le séisme majeur de la crise sismique d'août 1965 a atteint une magnitude de 7,5. Taylor et al. (1980) ont obtenu un ajustement satisfaisant entre les observations de soulèvement du récif réalisées entre 1976 et 1979 et les valeurs de déplacements modélisées pour un chevauchement avec 5,3 m de glissement et un épicentre localisé entre les îles Santo et Mallicolo (figure 2), à 22 km de profondeur. À Leviamp (figure 2), Taylor et al. (1980) ont observé une surrection de l'ordre du mètre. Le séisme de 1994, dont le foyer a été localisé à proximité de la côte sud de Mallicolo, a eu un mouvement principalement transformant (figure 2). Une subsidence d'une vingtaine de centimètres a été observée à un site GPS (*Global Positioning System*) dans le Sud-Est de l'île (Calmant et al., 1997).

2. Observations de terrain

La partie nord-ouest de Mallicolo présente des terrasses récifales, étagées depuis le niveau marin actuel jusqu'à plusieurs centaines de mètres d'altitude (Jouannic et al., 1980, 1982). Ces terrasses témoignent d'une surrection continue, depuis le Pléistocène supérieur au moins. Dans un récif, les organismes coralliens se repartissent de la surface du récif à quelques dizaines de mètres de profondeur. Toute surrection se traduira par la nécrose de la partie de la colonie nouvellement émergée, la partie demeurant sous le niveau de la mer continuant à vivre et à croître. Les platiers coralliens présentent une déclivité naturelle de 5° environ, orientée vers le large. Une surrection du platier ne se traduit donc pas forcément par une marche d'escalier, mais aussi par une avancée de la côte lorsque le platier est suffisamment développé. Ainsi, lors d'un séisme avec une surrection significative, la transition entre parties vivantes et parties nécrosées d'une colonie

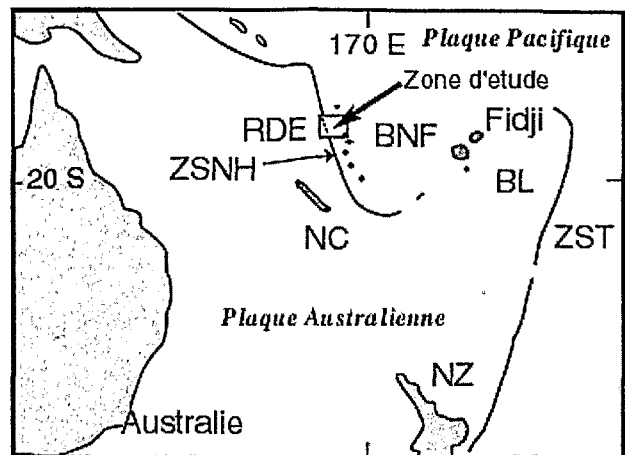


Figure 1. Carte du Pacifique sud-ouest. La flèche indique la position de l'île de Mallicolo, Vanuatu, au sein de la zone d'étude marquée par le rectangle. La ligne noire discontinue souligne la limite orientale de la plaque Australienne. NC : Nouvelle Calédonie ; NZ : Nouvelle Zélande ; BNF : bassin Nord-Fidjien ; BL : bassin de Lau ; ZSNH : zone de subduction des Nouvelles-Hébrides ; ZST : zone de subduction de Tonga ; RDE : ride d'Entrecasteaux.

Map of the southwest Pacific. The arrow points toward the location of Malekula Island, Vanuatu, within the study area, marked by the rectangle. The black line stands for the limits of the Australian plate. NC: New Caledonia; NZ: New Zealand; BNF: North Fiji Basin; BL: Lau Basin; ZSNH: New Hebrides Subduction Zone; ZST: Tonga Subduction Zone, RDE: D'Entrecasteaux Ridge.

permet d'établir avec précision l'amplitude de la surrection. C'est ce que nous avons observé (figure 3) sur le site de Leviamp, sur la côte nord-ouest de Mallicolo (figure 2). Un platier récifal arasé, en légère pente vers la mer, est parsemé de nombreuses petites colonies de faviidés de 10 à 15 cm de haut, émergées et nécrosées.

3. Discussion

L'observation de terrain (figure 3) nous permet d'établir une chronologie des mouvements verticaux à Leviamp, depuis le séisme de 1965 (figure 4). Le platier arasé correspond au récif soulevé lors de ce séisme (Benoît et Dubois, 1971 ; Taylor et al., 1980). L'existence même de la colonie corallienne de faviidés sur ce platier impose qu'il ait été immergé, et donc soumis à une phase de subsidence transitoire. L'immersion du platier ne semble pas liée à une phase de subsidence post-sismique qui aurait fait suite au séisme de 1965. En effet, les subsidences post-sismiques sont des mouvements amortis : rapides au début et s'atténuant avec le temps. Or, les observations de terrain de hauteur de surrection faites par Taylor et al. (1980) datent des années 70, soit près d'une décennie après le séisme. De plus, étant donné leur taille, ces coraux, dont la vitesse de croissance varie entre 0,8 et 1 $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$, ont tout au plus une quinzaine d'années d'existence. Ils n'ont donc pas commencé à croître immédiatement après le séisme de 1965. En revanche, l'âge récent très probable des coraux, ainsi que leur morphologie, montrent qu'ils ont crû librement dans toutes les directions

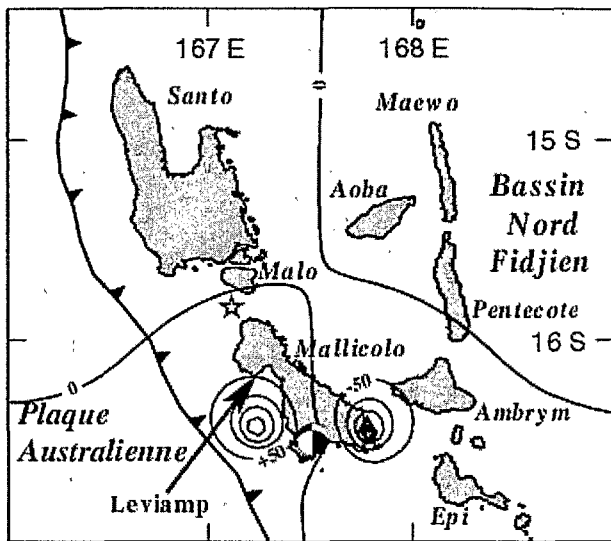


Figure 2. Carte de la partie centrale de l'archipel des Nouvelles-Hébrides, Vanuatu. Les isolignes correspondent aux déplacements cosismiques et sont dérivés d'un modèle de dislocation appliqué au CMT publié pour le séisme de 1994. L'intervalle est de 50 mm. L'étoile entre Santo et Mallicolo indique la position approximative de l'épicentre du séisme de 1965. La flèche indique la position de Leviamp, où le platier soulevé de la figure 3 a été photographié. Le triangle au sud-est de Mallicolo indique la position du site GPS où la subsidence cosismique a été enregistrée à la suite du séisme de 1994.

Map of the Central New Hebrides archipelago. Isolines (every 50 mm) stand for CMT-derived co-seismic displacements for the 1994 event. The star north of Malekula indicates the approximate location of the 1965 earthquake. The arrow points to Leviamp where the uplifted reef flat is observed. The triangle in the southwest of Malekula marks the emplacement of the GPS site where subsidence related to the 1994 event has been recorded.

et indiquent que l'immersion s'est plus vraisemblablement accélérée avec le temps et non ralentie. Un tel mécanisme est compatible avec une modélisation d'accumulation de contraintes liées au séisme de 1994. Calmant et al. (1997) ont simulé l'accumulation des contraintes et les déplacements cosismiques liés à ce séisme à partir d'un modèle de dislocation (Okada, 1985). Un bon accord entre observations GPS et déplacements cosismiques modélisés avait été trouvé à Lamap, au sud-est de Mallicolo (figure 2), moyennant une hypothèse d'épicentre moins profond que les valeurs CMTS (*Centroid Moment Tensor Solution*) publiées. Cependant, si cette même simulation donne, au niveau de Léviamp, une subsidence inter-sismique et un saut cosismique dont la polarité s'accorde bien avec l'interprétation proposée pour l'évolution du platier, l'amplitude est de l'ordre de 5 cm seulement.

L'accord entre observations et modélisations peut être amélioré, soit en déplaçant la position du séisme, soit en modifiant son mécanisme. Le coefficient f_{cld} mesure l'écart d'un mécanisme à un double couple (Frohlich et Apperson, 1992). Il varie de 0 pour un pur *double couple* à 0,5. Des valeurs faibles et très proches, 0,144 et 0,114, ont été publiées respectivement par Harvard et l'USGS pour ce mécanisme. La composante *non double couple*



Figure 3. Photographie de la partie externe du platier soulevé de Leviamp, prise en décembre 1997. Le platier (1) fut émergé une première fois à la suite du séisme de 1965. L'érosion du platier est beaucoup plus prononcée que celle des colonies de coraux (2), émergées depuis 1994 seulement. La taille des coraux, dont la vitesse de croissance est de l'ordre de 0,8 à 1 cm·an⁻¹, indique que la période d'immersion intermédiaire a duré une dizaine d'années au moins. De même, leur forme globulaire indique une croissance comparable dans toutes les directions, et donc une vitesse de subsidence au moins égale à la vitesse de croissance. La chronologie des mouvements verticaux est donc la suivante : 1) soulèvement cosismique en août 1965, 2) érosion et abrasion du platier pendant une quinzaine d'années, 3) subsidence rapide entraînant une ré-immersion du platier et la croissance des coraux, 4) soulèvement cosismique en juillet 1994, suivi d'une éventuelle contribution post-sismique.

Photograph of the outer rim of the uplifted reef flat at Leviamp (December 1997). The reef flat (1) was first emerged by the 1965 event. The erosion of the reef flat, much more pronounced than that of the coral colonies (2) which emerged only 3 years before the photograph was taken, suggests that the emersion lasted for some ten years at least. The size of the corals indicates that the reef flat remained immersed for fifteen years at most since these corals grow at about 0.8 to 1 cm·yr⁻¹. Their globular shape indicates that the growth was similar in all directions and thus that the subsidence rate was fast, about same as the growth rate. Chronology was thus: 1) co-seismic uplift in August, 1965, 2) erosion for some fifteen years, 3) fast subsidence, immersion and growth of the corals, 4) co-seismic uplift in July 1994, presumably followed by post seismic motion.

du CMT apparaît donc assez réduite et la solution *double couple* raisonnablement bien déterminée. Ceci indiquerait, en particulier, que la rupture a probablement eu lieu sur un plan de faille unique (Wallace, 1985). De même, le glissement ou le pendage ne diffèrent que de 15° d'une solution à l'autre et le moment sismique varie de 5,1·10¹⁹

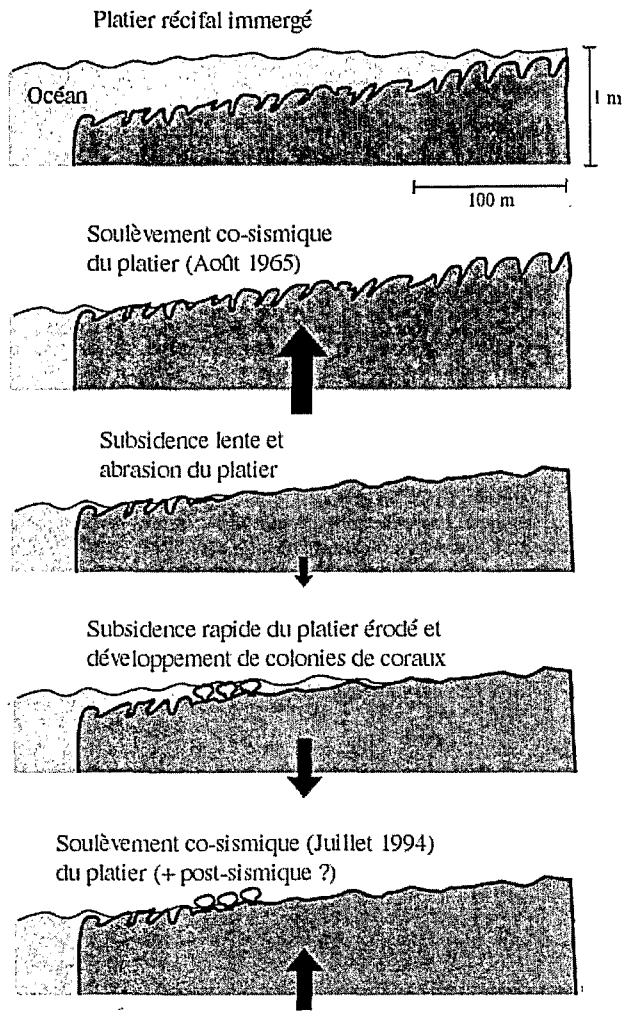


Figure 4. Schéma des phases successives de surrection et subsidence entre 1965 et 1994 et évolution morphologique du platier associée.

Scheme of the successive vertical movements undergone by the reef flat at Leviamp between 1965 and 1994.

(USGS), $6,6 \cdot 10^{19}$ (Harvard) à 10^{20} N·m (LDG, PPT), soit un facteur 2 environ. Cette analyse des CMTS montre que le tenseur des moments et le moment sismique sont suffisamment bien résolus pour qu'un mécanisme différent ne puisse pas être envisagé pour expliquer les déplacements cosismiques observés à Leviamp. Les différentes localisations d'épicentre publiées (NEIC, CMTS, réseau régional IRD) sont quasi identiques, ce qui suggère que cette localisation est bien contrainte. La profondeur du séisme sem-

ble être le paramètre le moins bien compris. Elle varie entre 36 km pour la profondeur des premiers mouvements calculée à partir des temps relatifs pP-P et 25 km pour la profondeur « centroïde » donnée par Harvard, avec une erreur de plus ou moins 1 km pour chaque détermination. Cet écart sur la profondeur indique très certainement une progression de la rupture depuis l'hypocentre, lieu de l'initiation de la rupture, vers la surface. Le maximum de glissement sur le plan de faille pourrait avoir eu lieu vers 18 km de profondeur, valeur qui permet le meilleur ajustement des mesures géodésiques en surface (Calmant et al., 1997). Cependant, aucune des simulations réalisées pour l'ensemble des profondeurs possibles n'a conduit à des déplacements verticaux décimétriques à Leviamp. Le foyer du séisme principal est dans la plaque plongeante, comme l'indiquent les profondeurs « premiers mouvements » et centroïdes et la répartition des répliques. Deux hypothèses peuvent alors être formulées pour expliquer l'écart entre déplacements observés et modélisés : cet écart provient donc, soit d'une inadéquation entre le modèle utilisé (demi-espace élastique homogène) et le contexte tectonique (le milieu où se sont accumulées les contraintes est particulièrement hétérogène, puisqu'il inclut, entre autres, un contact entre une lithosphère océanique subduite et la croûte d'un arc insulaire), soit plus vraisemblablement d'une contribution asismique à la relaxation des contraintes ; la surrection observée serait alors la somme d'une contribution co-sismique de 5 cm environ et d'une contribution post-sismique de 5 à 10 cm.

4. Conclusion

La croissance et la nécrose de colonies coralliennes sont utilisées pour évaluer l'amplitude de soulèvements co-sismiques et en déduire la phase de déformation qui a précédé la relaxation sismique des contraintes, voire une contribution post-sismique. Ce type d'observations permet ainsi de compléter notablement les mesures géodésiques relatives au cycle d'accumulation et de relaxation des contraintes tectoniques, de façon comparable aux dépôts fluviatiles utilisés par Kelsey et al. (1998) au niveau de la zone de subduction des Cascades. Une prospection systématique de la côte nord de Mallicolo, du pourtour de Malo et de la côte sud de Santo (figure 2) sera réalisée en 1999 pour établir une cartographie détaillée des mouvements verticaux associés au séisme de 1994 et réaliser ainsi une comparaison complète entre les déplacements verticaux simulés et observés.

Remerciements. Ce travail a bénéficié du soutien financier du PNRN (Programme national sur les risques naturels). Les auteurs remercient tout particulièrement J.-L. Laurent pour son travail de terrain à Mallicolo. Contribution UMR Géosciences Azur N° 234.

5. Références

- Benoît. M. et Dubois J. 1971. The earthquake swarnn in the New Hebrides Archipelago, August 1965. Recent crustal Movements, *Roy. Soc. NZ Bull.*, 9, 141-148
- Calmant S., Lebellegard P., Taylor F.W., Bevi M., Maillard D., Recy J. et Bonneau J. 1995. Geodetic measurements of convergence across the New Hebrides subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 19, 2573-2576
- Calmant S., Pelletier B., Pillet R., Regnier M., Lebellegard P., Maillard D., Taylor F., Bevis M. et Recy J. 1997. Interseismic and coseismic motions in GPS series related to the Ms 7.3 July 13, 1994, Malekula earthquake, central New Hebrides subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 23, 3077-3080
- Châtelain J.-L., Molnar P., Prévot R. et Isacks B. 1992. Detachment of part of the downgoing slab and uplift of the New Hebrides (Vanuatu) islands, *Geophys. Res. Lett.* 19 (14), 1507-1510
- Collot J-Y, Daniel J. et Burne R.V. 1985. Recent tectonics associated with the subduction/collision of the d'Entrecasteaux zone in the central New Hebrides, *Tectonophysics*, 112, 325-356
- Dziewonski A.M., Chou T.A. et Woodhouse J.H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852
- Ebel J.E. 1980. Source processes of the 1965 New Hebrides Islands earthquakes inferred from teleseismic waveforms, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 63, 381-403
- Frohlich C. et Apperson K.D. 1991. Earthquake focal mechanisms, moment tensors and the consistency of seismic activity near plate boundaries, *Tectonics*, 11, 2, 279-296
- Jouannic C., Taylor F.W., Bloom A.L. et Bernat M. 1980. Late Quaternary uplift history from emerged reef terraces on Santo and Malekula, Central New hebrides island arc, in : *Symp. on Petroleum potential in island arcs, small basins, submerged margins and related areas*, Suva, Fidji, 1979, UN/ESCAP, CCOP/SOPAC, Tech. Bull. 3, 91-108
- Jouannic C.F. Taylor et Bloom A. 1980. Sur la surrection et la déformation d'un arc jeune: l'arc des Nouvelles-Hébrides, in : *Contribution à l'étude géodynamique du Sud-Ouest Pacifique*, Équipe de géologie-géophysique du centre Orstom de Nouméa, Travaux et Documents de l'Orstom, 147, 223-246
- Kelsey H.R.C. et Hemphill-Haley A. 1998. Response of a small Oregon estuary to coseismic and postseismic uplift in the past 300 years, *Geology*, 26, 231-234
- Okada Y. 1985. Surface displacement due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 75, 4, 1135-1154
- Taylor F., Isacks B., Jouannic C., Bloom A. et Dubois J. 1980. Coseismic and Quaternary Vertical Movements, Santo and Malekula Islands, New Hebrides island Arc, *J. Geophys. Res.*, 85, 5367-5381
- Taylor F., Frohlich C., Lecolle J. et Strecker L.M. 1987. Analysis of partially emerged corals and reef terraces in the central Vanuatu arc: comparison of contemporary coseismic and nonseismic with Quaternary vertical movements, *J. Geophys. Res.*, 92, 4905-4933
- Taylor F., Bevis M., Schutz B., Kuang D., Recy J., Calmant S., Charley D., Regnier M., Perrin B., Jackson M. et Reichenfeld C. 1995. Geodetic measurements of convergence at the New Hebrides island arc indicate arc fragmentation caused by an impinging aseismic ridge, *Geology*, 23, 1011-1014
- Taylor F., Jouannic C., Gilpin X. et Bloom C. 1982. Coral colonies as monitors of change in sea level of the land and sea: application to vertical tectonism, *Proc. Fourth Int. Coral Reef Symp.*, 1, 485-492
- Wallace T.C. 1985. A reexamination of the moment tensor solutions of the 1980 Mammoth Lakes earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 90, 11171-11176