

# Le séisme d'Ambrym–Pentecôte (Vanuatu) du 26 novembre 1999 (Mw : 7,5) : données préliminaires sur la sismicité, le tsunami et les déplacements associés

DON FRAB

Bernard Pelletier<sup>a\*</sup>, Marc Régnier<sup>a</sup>, Stéphane Calmant<sup>a</sup>, Robert Pillet<sup>b</sup>, Guy Cabioch<sup>a</sup>, Yves Lagabrielle<sup>a</sup>, Jean-Michel Bore<sup>c</sup>, Jean-Philippe Caminade<sup>c</sup>, Pierre Lebellegard<sup>a</sup>, Ioan Christopher<sup>d</sup>, Stanley Temakon<sup>d</sup>

<sup>a</sup> UMR 6526 Géosciences Azur, laboratoire de géologie–géophysique du centre IRD de Nouméa, 98848 Nouméa, Nouvelle-Calédonie

<sup>b</sup> UMR 6526 Géosciences Azur, Sophia Antipolis, France

<sup>c</sup> IRD Port-Vila, Vanuatu

<sup>d</sup> Département de la géologie, des mines et des ressources en eau, Port-Vila, Vanuatu

Reçu le 28 février 2000 ; accepté le 22 mai 2000

Présenté par Jean Aubouin

**Abstract – The Mw 7.5 November 26, 1999, Ambrym–Pentecost (Vanuatu) earthquake: preliminary data on seismicity, associated tsunami and crustal motions.** The November 26, 1999, Ambrym–Pentecost thrust-fault earthquake is the largest known earthquake to have occurred in the back-arc compressive belt of the central part of the Vanuatu subduction zone. We report here the first data recorded by our local seismic and geodetic networks together with field observations collected on Pentecost and Ambrym in December 1999. The epicentre was located at the northern tip of Ambrym island (16.11° S, 168.13° E) at a depth of 18.75 km. Distribution of aftershocks recorded during the first nine hours already delineates a north–south trending, 100-km-long by 25-km-wide zone, from the south of Ambrym (16.5° S) up to the northern part of Pentecost (15.5° S), compatible with the magnitude of the main shock. The easternmost part of Ambrym has been significantly uplifted. A white fringe of dead red algae indicates that the coseismic uplift which is around 1 m at the eastern tip of the island vanishes rapidly westward. Re-observation of the West Ambrym GPS site indicates a 35-cm eastward and 5-cm northward motion. These vertical and horizontal displacements in Ambrym can be explained by a large slip motion (4.5 m) along a shallow (0–15 km) west-dipping thrust fault plane trending north–south and emerging east of Ambrym and Pentecost islands. Tide gauge data on Efate (160 km away from the epicentre) and field observations relative to the associated tsunami favour a landslide contribution instead of a purely seismic origin. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

seismicity / tsunami / vertical motions / red algae / coral / GPS / Vanuatu

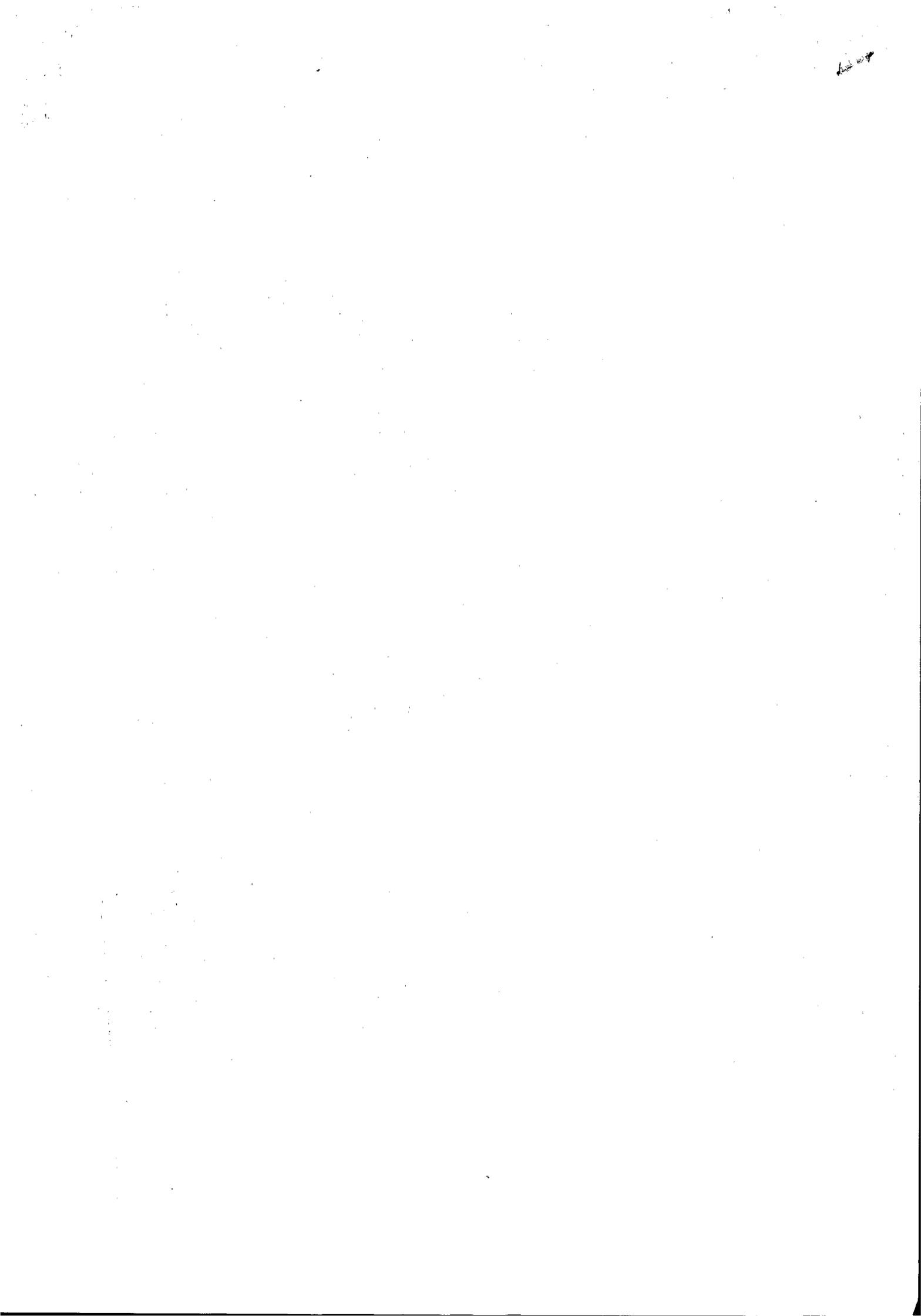
**Résumé –** Le séisme d'Ambrym–Pentecôte du 26 novembre 1999 est le plus fort séisme enregistré et connu historiquement sur la zone de compression arrière-arc de la partie centrale de la zone de subduction de Vanuatu. Nous reportons dans cette note les premières données sur cet événement, collectées sur le terrain en décembre 1999 et recueillies grâce aux réseaux sismologique et géodésique que nous maintenons à Vanuatu. Le séisme est localisé à la pointe nord d'Ambrym (16,11°S, 168,13°E) à 18,75 km de profondeur. Les

Fonds Documentaire IRD

Cote : Bx 23205 Ex : 1

\* Correspondance et tirés à part : Bernard.Pelletier@noumea.ird.nc.





répliques enregistrées dans les neuf heures qui ont suivi se répartissent sur une bande nord-sud d'environ 100 km sur 25 km, depuis le Sud d'Ambrym (16,5°S) jusqu'à la partie nord de Pentecôte (15,6°S). La partie la plus orientale de l'île d'Ambrym a été fortement soulevée, ainsi que l'attestent la mort de colonies coralliennes et le développement, sur le bord de côte, d'une bande blanche résultant de la dessiccation des algues rouges encroûtantes. Le soulèvement cosmique d'environ 1 m à la pointe orientale de l'île décroît rapidement vers l'ouest. La réoccupation du site GPS, à l'extrémité ouest d'Ambrym, indique un mouvement horizontal de 35 cm vers l'est et de 5 cm vers le nord. Les déplacements verticaux et horizontaux mesurés à Ambrym sont compatibles avec un fort glissement chevauchant (4,5 m) sur une faille superficielle (0–15 km) nord-sud, pentée vers l'ouest et émergeant à l'est des îles d'Ambrym et de Pentecôte. Les observations relatives au raz de marée associé au séisme, peu compatibles avec une origine purement sismique, suggèrent une origine plutôt gravitaire. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sismicité / tsunami / mouvements verticaux / algue rouge / coraux / GPS / Vanuatu

## Abridged version

### 1. Introduction

On 26 November 1999, at 13:21 GMT, the central part of Vanuatu, and especially the islands of Ambrym and Pentecost, experienced a large earthquake of magnitude  $M_s$  7.5, followed by a tsunami, that killed 10 people, caused important damage to buildings and structures (churches, schools, markets, water tanks) and triggered numerous landslides.

The central part of the Vanuatu arc (*figure 1*), the structure of which is heavily perturbed by the subduction of the d'Entrecasteaux ridge, is characterized by a system, across strike, of two island belts bracketing a deep intra-arc basin crossed along strike by the active volcanic arc [2]. Seismicity and neotectonic studies show a surrection of islands of both western and eastern belts [10], active shallow seismic zones in both fore-arc and back-arc with large magnitude earthquakes in the fore-arc zone [5] and back-arc shortening [4]. GPS data indicate a comparatively slow convergence rate at the plate boundary for the central segment of Vanuatu arc (4–5  $\text{cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  at Santo-Malekula while it is up to 10  $\text{cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  at Vate [1, 11]). This implies the existence of an intra-arc right-lateral strike-slip fault zone to connect fore-arc and back-arc, and a convergence rate along the back-arc thrust zone similar to that along the trench [1, 7, 11]. The large destructive event of 26 November 1999 occurred precisely in the southern end of this back-arc thrust zone (*figure 1*).

### 2. Seismicity

The main shock was located between Ambrym and Epi islands by USGS (16.43° S, 168.23° E, 33 km) and to the northeast of Ambrym by Harvard (CMTS location at 16.02° S, 168.33° E, 20 km). It was located by the IRD network in Vanuatu (8 stations) at the northern tip of Ambrym island (16.11° S, 168.13° E, 18.75 km, the closest station on Ambrym is only 25 km away) (*figure 2*). The islands most severely damaged by the seismic

sequence were Ambrym (eastern and northeastern parts) and Pentecost (the whole southern part) where intensity was felt up to 7 or 8 on the Mercalli scale. Sixty aftershocks, six of which had magnitudes between 5 and 6, were locally recorded in the following nine hours after the main shock. The epicenters spread in a north-south trending strip pattern, 100 km long by 25 km wide, from the south of Ambrym (16.5° S) up to the northern part of Pentecost (15.5° S) where the largest aftershock ( $M_s$  5.9 at 22:03) occurred. The size of this aftershock zone is compatible with the seismic moment found by Harvard for the main shock, allowing already an identification of the rupture zone.

The focal mechanism solution published by Harvard indicates a thrust motion. Considering the tectonics of central Vanuatu and the previous shallow seismicity, the plane striking N191° and gently dipping to the west (28°) is interpreted to be the fault plane. This event is the largest known earthquake, and therefore recorded, that occurred along the 350-km-long back-arc thrust zone stretching from 13.20° S to 16.40° S. A large thrust earthquake ( $M_w$  6.5) took place on 22 August 1999 in the same area between the Pentecost and Maewo islands, and earlier that year, a small seismic sequence ( $M_s$  6, 5.4 and 5, from 14 to 26 February) also occurred, right north of the aftershock zone of the 26 November earthquake (*figure 1*). The intense seismic activity along the back-arc zone is quite comparable with what is observed in the fore-arc domain (Santo-Malekula), where large earthquakes occurred and are expected. Together with the results of the geodetical surveys carried out these past years, it confirms that the back-arc thrust zone is a major fault system in the tectonics of the central part of the Vanuatu arc.

### 3. Tsunami

The worst hit area by the tsunami was Martelli bay at the southern tip of Pentecost island (5 deaths, village destroyed except the church) (*figure 3a*). Eyewitnesses reported a withdrawal of the sea (200 m) then a succession of three waves. Water penetrated almost 1 km into

the bay and the inundation height was 6–7 m. Along the southwest coast of Pentecost the water height was 1–2 m. In eastern Ambrym, the wave height was estimated at 3–4 m along the northern coast and 1–2 m along the southern coast. An inundation of 7–8 m, probably due to site effects as in the Martelli bay, occurred at the mouth of the river south of Pamal at the eastern tip of Ambrym (*figure 3b*). The tsunami was also documented on the coast of Epi (1–2 m) and the east coast of Malekula (a 50-tonne ship sank). It was recorded in the tidal gauge of Efate at a distance of 160 km, where several sea-level oscillations began at 14:00 GMT, half an hour after the main shock (maximum amplitude of 1.2 m with positive of 0.5 m at 14:30 GMT).

Due to fact that the event occurred at midnight, the arrival time of the tsunami and its relationship with the main shock reported by the few eyewitnesses are confused. On Efate, the arrival of the wave train was significantly delayed with respect to the origin time of the main shock, suggesting that the source was a seismic-triggered submarine landslide rather than seafloor deformation, like the Papua New Guinea destructive tsunami [3, 9]. Multibeam mapping of the area by the R.V. *L'Atalante* in March 2000 [8] reveals some landslides southeast of Ambrym and in the channel between Ambrym and Pentecost. These data will greatly help to model the tsunami and to address the problem of its source.

#### 4. Coseismic displacements

Evidence of significant coseismic vertical motion has been observed on the easternmost part of Ambrym.

Dead coral heads on a reef flat near Ulei indicate at least 50 cm of uplift (*figure 3c*). Also a white fringe resulting from the dessication of red algae developed along the rocky coast (*figure 3d*), as was previously observed in Chile after the Antofagasta earthquake [6]. The uplift decreases rapidly westward from 1–1.2 m to nil 3 km west of the eastern tip of the island (*figure 4*). Further west, a lack of evidence of uplift or evidence of subsidence have been observed on both northern and southern coasts. The high gradient of vertical motion indicates that the rupture zone is shallow under the eastern part of the island.

The GPS local network in the central Vanuatu islands (around 20 sites) is being re-occupied. The closest site of the epicenter, at West Ambrym, has been re-observed in the week following the quake. Coseismic displacement at this site is 35 cm eastward and 5 cm northward, vertical motion being small enough to be ignored.

Vertical and horizontal coseismic displacements observed in Ambrym can be explained by a large slip motion (4.5 m) along a shallow (0–15 km) west-dipping thrust fault plane striking north-south and emerging east of Ambrym and Pentecost islands. Both the size of the aftershocks zone and the first-motion depth of the main shock, determined with the local network, are in accordance with this preliminary interpretation of the ruptured area. However a precise model for the source of this destructive event will be obtained after a body wave form analysis of the main shock and the study of the complete aftershocks sequence and the coseismic displacements at the GPS sites of the whole central Vanuatu archipelago.

## 1. Introduction

Dans la nuit du 26 au 27 novembre 1999, à 0h21 locale (13h21 le 26 novembre 1999 TU), les îles centrales de Vanuatu, et plus particulièrement celles d'Ambrym et de Pentecôte, ont été fortement ébranlées par un séisme superficiel de magnitude 7,5, puis frappées sévèrement par un tsunami, provoquant la mort de dix personnes, de très nombreux glissements de terrain et d'importants dommages aux maisons et ouvrages (églises, écoles, réservoirs d'eau...).

La partie centrale de l'arc de Vanuatu (*figure 1*), dont la structure est fortement perturbée par la subduction de la ride d'Entrecasteaux, portée par la plaque australienne, est caractérisée par l'absence de fosse, la présence de grandes îles en avant (Santo, Mallicolo) et en arrière de l'arc actif (Maéwo, Pentecôte), ainsi que par la présence d'un profond bassin intra-arc, le bassin d'Aoba, traversé par de gros appareils volcaniques actifs [2]. Les données de néotectonique et de sismicité indiquent une surrection des îles avant et arrière-arc [10];

des zones de sismicité superficielle en avant et en arrière de l'arc, avec des séismes de forte magnitude (entre 7 et 7,5) dans la zone avant-arc [5] et un raccourcissement arrière-arc [4]. Les récentes données de mesure GPS indiquent une faible vitesse de convergence à la fosse au niveau du bloc central (4–5 cm·an<sup>-1</sup> à Santo-Mallicolo), comparativement au bloc situé plus au sud (10 cm·an<sup>-1</sup> à Vaté) [1, 11], et suggèrent la présence d'une zone de décrochement intra-arc dextre, d'environ 5 cm·an<sup>-1</sup>, raccordant l'avant- et l'arrière-arc, ainsi qu'une vitesse de convergence équivalente à celle de la fosse le long de la zone de chevauchement arrière-arc [1, 7, 11]. C'est précisément sur la partie sud de cette zone de chevauchement arrière-arc qu'a eu lieu le fort séisme destructeur du 26 novembre 1999.

Cette note a pour objet de présenter les premières données sur cet événement, collectées lors de missions décembre 1999 dans les zones les plus concernées (la partie sud de l'île de Pentecôte et la partie est de l'île d'Ambrym) et recueillies grâce aux réseaux sismologique et géodésique que nous maintenons à Vanuatu.

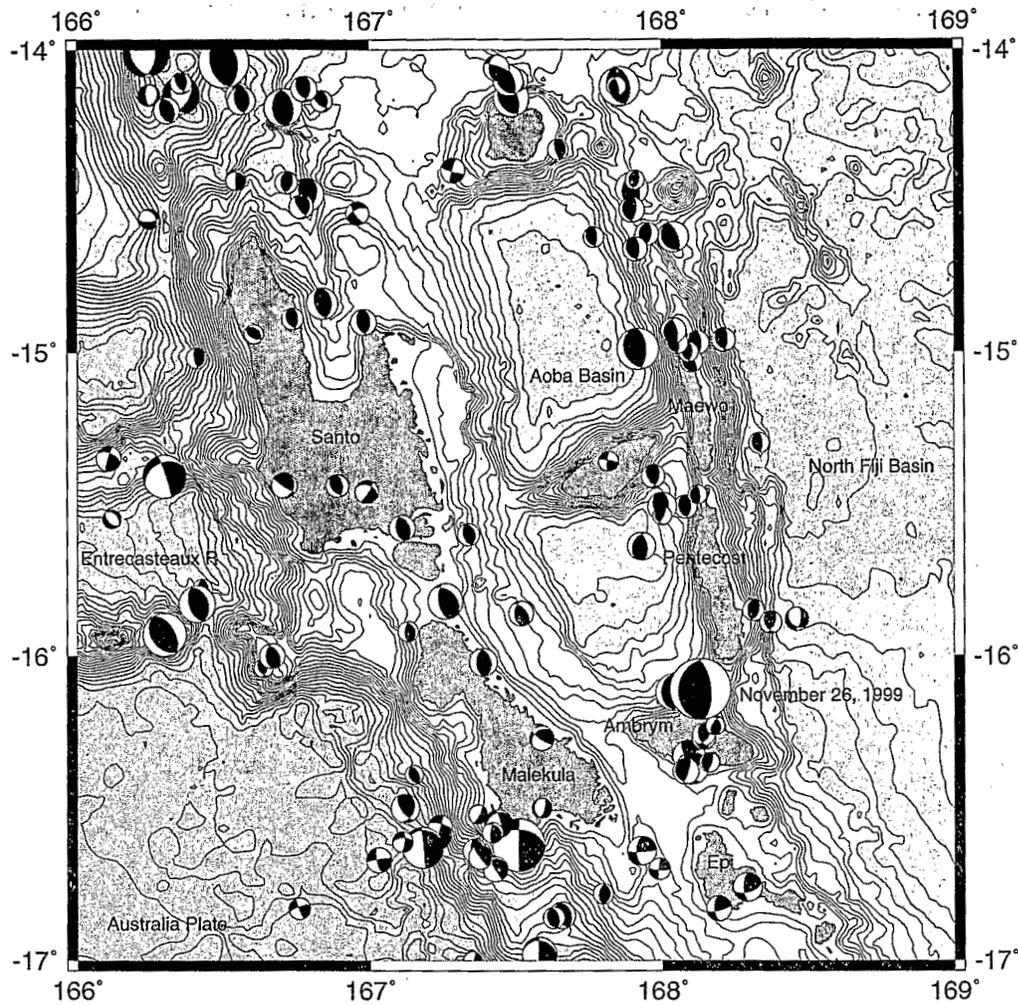


Figure 1. Carte bathymétrique de la partie centrale de l'arc de Vanuatu; et mécanisme au foyer des séismes superficiels (janvier 1976–juin 1999).

Figure 1. Bathymetric map of the central part of Vanuatu arc and focal mechanism solutions for shallow earthquakes of the period 01/1976–06/1999.

## 2. Données de sismicité

Le choc principal ( $M_s$  7,1,  $M_w$  7,5 à 13h21 TU le 26 novembre 1999) a été localisé au sud d'Ambrym par l'USGS (vers Paama–Lopevi, entre Ambrym et Epi, à  $16,43^\circ\text{S}$ ,  $168,23^\circ\text{E}$ , 33 km de profondeur) et au nord-est d'Ambrym par Harvard (à l'est de la pointe sud de Pentecôte à  $16,02^\circ\text{S}$ ,  $168,33^\circ\text{E}$ , 20 km de profondeur). Il est localisé par le réseau IRD au Vanuatu (huit stations), à la pointe nord d'Ambrym ( $16,11^\circ\text{S}$ ,  $168,13^\circ\text{E}$ , 18,75 km) (figure 2). Les îles les plus sévèrement touchées par cette crise (victimes, dégâts importants aux structures et très nombreux glissements de terrain) sont la partie est et nord-est d'Ambrym, et surtout le Sud et le Centre de Pentecôte, où l'intensité sur l'échelle de Mercalli est estimée entre 7 et 8. Une soixantaine de répliques significatives, dont six de magnitude comprise entre 5 et 6, ont été enregistrées par le réseau dans les neuf heures qui ont suivi le choc principal (figure 2). Elles se répartissent sur une bande nord-sud d'environ 25 km de large et 100 km de long, depuis le Sud d'Ambrym ( $16,5^\circ\text{S}$ ) jusqu'à la partie nord de Pentecôte ( $15,6^\circ\text{S}$ ), où est survenue la plus forte des répliques ( $M_w$  5,9) à

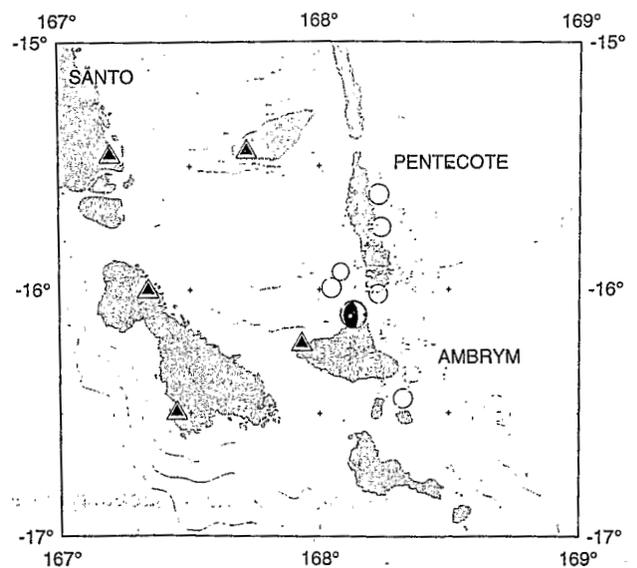


Figure 2. Carte de localisation du séisme principal et des répliques enregistrées dans les neuf premières heures par le réseau local IRD.

Figure 2. Location map of the main shock and aftershocks recorded by the IRD local network during the first nine hours after the shock.

22h03. La dimension de cette zone de répliques est compatible avec le moment sismique publié par Harvard pour le choc principal, soulignant ainsi déjà la zone de rupture.

Le mécanisme au foyer publié par Harvard indique un mouvement chevauchant. Compte tenu du cadre tectonique et de la sismicité superficielle antérieure de cette région, le plan orienté N191° et faiblement incliné à J'ouest (28°) est interprété comme le plan de rupture. Il s'agit du plus fort séisme enregistré et connu historiquement sur la zone de compression arrière-arc de la partie centrale de l'arc du Vanuatu, qui s'étend sur environ 350 km, de 13°20'S à 16°40'S. Il est à noter qu'un fort séisme compressif a déjà eu lieu le 22 août 1999 dans cette région à l'ouest du chenal, entre les îles de Pentecôte et d'Ambrym (Mw 6,5 à 16,12°E, 168,04°E, 33 km) et qu'une petite crise sismique est survenue en février 1999 entre Maewo, Pentecôte et Aoba (séismes de magnitude 6,0, 5,4 et 5,0 les 14, 15 et 26 février 1999 à 15,5°S, 168°E, 10 km), juste au nord de la zone de répliques (figure 1). Ce très fort séisme du 26 novembre 1999, d'une magnitude égale à celle des événements se produisant généralement dans le domaine avant-arc (Santo-Mallicolo), confirme, en accord avec l'interprétation des récentes données géodésiques GPS, que la zone de convergence arrière-arc est un élément essentiel de la tectonique active de la partie centrale de l'arc du Vanuatu.

### 3. Données sur le tsunami

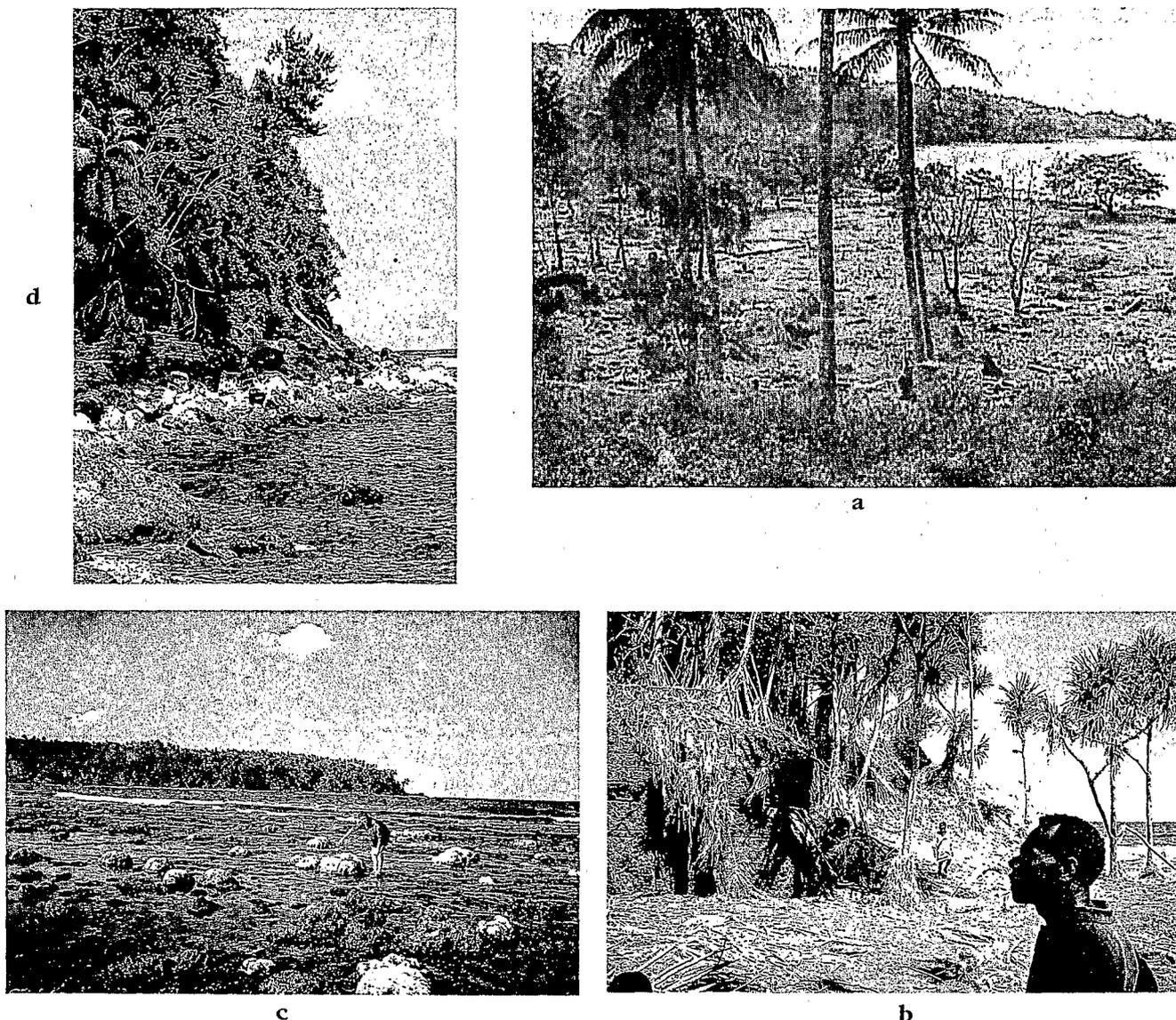
La zone la plus touchée par le tsunami a été la baie Martelli (cinq morts, village rasé, sauf l'église) à l'extrémité sud de l'île de Pentecôte (figure 3a). Les témoignages font état d'un retrait important (200 m) de la mer, puis de l'arrivée de trois vagues majeures. L'eau a pénétré dans la baie sur presque 1 km. La hauteur de la vague a été estimée à 6–7 m. Plus à l'ouest, sur la côte ouest de l'île de Pentecôte, elle n'est plus que de 1 à 2 m. Les observations indiquent une variation très rapide de la hauteur du raz de marée, visiblement due à des effets de site. Dans la partie est d'Ambrym, la vague a été estimée à 1–2 m de hauteur sur la côte sud et à 3–4 m sur la côte nord-est. Une hauteur de 7–8 m a été mesurée dans l'embouchure de la rivière au sud du village de Pamal, à l'extrémité est de l'île (figure 3b). Cette valeur extrême semble être due à la forme de la côte (éperon rocheux ESE–WSW), qui a servi de guide à la vague pour pénétrer largement (plusieurs centaines de mètres) dans la rivière. Par ailleurs, un fort retrait de la mer, puis de nombreuses oscillations de 1 à 2 m, ont été signalés au nord-ouest d'Epi (Baie Lamén); ainsi que sur la côte est de Mallicolo (un bateau de 50 tonnes a été coulé dans la baie de Tisman). Le marégraphe situé sur l'île de Vaté, à 160 km de la zone épicertrale, enregistra plusieurs oscillations de la mer à partir de 14h00 TU le 26 novembre, soit une demi-heure après le choc

principal (amplitude maximum de 1,2 m, avec positif de 0,5 m à 14h30).

L'événement ayant eu lieu en pleine nuit, les témoignages sont assez imprécis sur l'heure d'arrivée du tsunami et sa relation avec le choc principal. Au marégraphe de Vaté, l'heure d'arrivée du tsunami apparaît bien trop tardive relativement à l'heure du choc principal, ce qui suggère une origine gravitaire, comme dans le cas du tsunami de Papouasie-Nouvelle-Guinée du 17 juillet 1998 [3, 9]. Une cartographie de la zone par sondeur multifaisceaux, réalisée début mars 2000 par le N.O. *L'Atalante* [8], révèle des glissements au large de la pointe sud-est d'Ambrym et dans le chenal entre les îles d'Ambrym et de Pentecôte. Ces données aideront à l'étude de la modélisation du tsunami et permettront d'apporter des éléments de réponse quant à la source, liée directement à la déformation co-sismique ou à un ou plusieurs glissements sous-marins induits par le séisme.

### 4. Données sur les mouvements co-sismiques

Compte tenu des premières localisation et modélisation du séisme et des premières informations recueillies sur place, il est rapidement apparu que la partie est d'Ambrym était peut-être la seule portion de côte ayant subi un soulèvement co-sismique significatif, les parties sud de Pentecôte et centre Ambrym ayant subsidé. Une mission a donc été réalisée à Ambrym (du 11 au 14 décembre, soit deux semaines après le séisme) pour mesurer l'ampleur des mouvements verticaux. Diverses observations ont permis de confirmer une forte surrection de la partie la plus orientale de l'île. Au sud-est d'Ulei, près de l'extrémité est de l'île, un platier habituellement sous l'eau, sauf à grande marée basse, est maintenant quasiment tout le temps émergé, sauf à marée haute. Les coraux sur ce platier sont maintenant morts, suite à une trop grande exposition au soleil. La taille des colonies coralliennes indique un soulèvement d'au moins 50 cm (figure 3c). Par ailleurs, une bande blanche résultant de la dessiccation des algues rouges encroûtantes (figure 3d) est visible sur tous les éperons rocheux de la côte la plus orientale de l'île. Une telle nécrose avait déjà été observée suite au séisme d'Antofagasta du 30 juillet 1995 au Chili [6]. La hauteur de cette frange a permis de mesurer les soulèvements en différents endroits (figure 4). Le soulèvement décroît rapidement vers l'ouest depuis 1–1,2 m (région de Ulei-Pamal), jusqu'à s'annuler à 3 km de la pointe est de l'île (région d'Utas). Plus à l'ouest, une absence de surrection et des indices de subsidence ont été observés, aussi bien sur les côtes sud que nord de la partie orientale de l'île. Un survol en avion à basse altitude le long de la côte a permis de confirmer et de cartographier la disparition de la bande blanche sur les côtes sud et nord. Le fort gradient des mouvements verticaux suggère que la zone de



**Figure 3.** a. Vue de la baie Martelli, Sud Pentecôte, touchée par le tsunami. b. Marque du raz de marée à l'embouchure de la rivière au sud de Pamal, Est Ambrym. c. Colonies coralliennes mortes sur le platier soulevé à Ulei, Est Ambrym. d. Soulèvement cosismique (environ 1 m) souligné par la frange blanche due à la dessiccation des algues rouges le long de la côte à Ulei, Est Ambrym.

**Figure 3.** a. View of the Martelli bay, South Pentecost, hit by the tsunami. b. Mark of the tsunami at the mouth of the river south of Pamal village, East Ambrym. c. Dead coral heads on the uplifted flat reef at Ulei, East Ambrym. d. Coseismic uplift (around 1 m) indicated by the white fringe of dead red algae along the coast at Ulei, East Ambrym.

rupture est proche et superficielle, sous la partie orientale de l'île.

Parallèlement aux observations de terrain, l'ensemble du réseau GPS régional, soit une vingtaine de sites, a été ré-occupé dès que possible. Le site GPS le plus proche de la zone épacentrale (site de Craig Cove à la pointe ouest d'Ambrym) a été ré-observé dans la semaine qui a suivi le séisme. Le déplacement cosismique à ce site est d'environ 35 cm vers l'est et de 5 cm vers le nord, le déplacement vertical étant négligeable.

Les déplacements cosismiques, verticaux et horizontaux, mesurés à Ambrym sont compatibles avec un fort

glissement chevauchant (4,5 m) sur une faille superficielle (0–15 km) orientée nord-sud, pentée vers l'ouest et émergant à l'est des îles d'Ambrym et de Pentecôte. Cette géométrie de faille est en accord avec l'étendue de la zone de répliques et la profondeur hypocentrale premier mouvement obtenue avec les données du réseau local. Cependant, un modèle plus précis de la rupture ne sera obtenu qu'après une analyse sismologique complète de cette crise et un calcul des déplacements cosismiques aux différents sites GPS de l'ensemble des îles centrales de Vanuatu. Par ailleurs, un marquage de la frange soulevée et la création d'un site

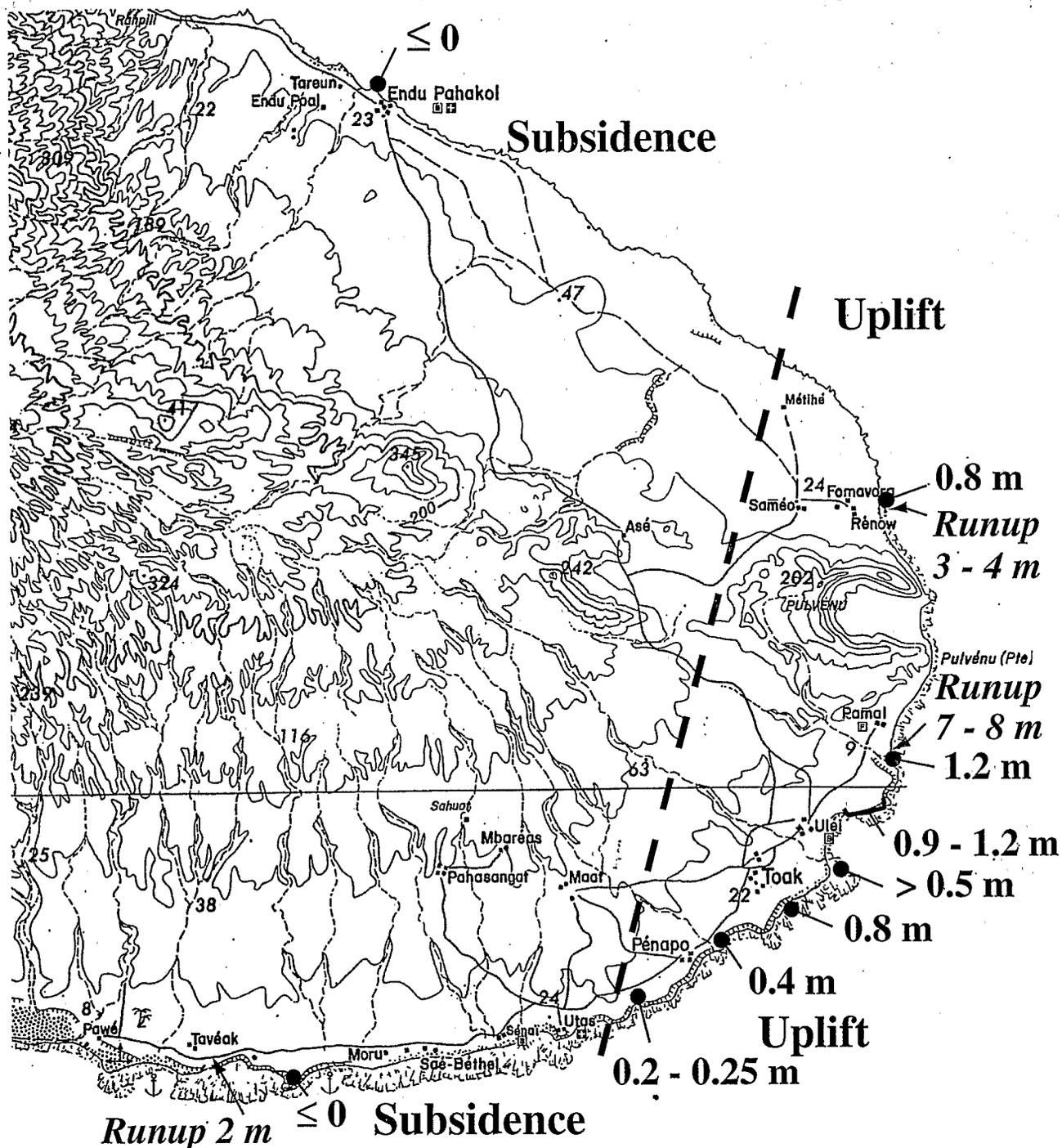


Figure 4. Mesures des mouvements verticaux et observations liées au tsunami dans la partie orientale d’Ambrym.

Figure 4. Measurements of vertical motions and tsunami runup heights observed in east Ambrym.

GPS ont été réalisés à la pointe est d’Ambrym, dans le but de suivre d’éventuelles déformations postsismiques.

### Références

[1] Calmant S., Lebellegard P., Taylor F.W., Bevis M., Maillard D., Recy J., Bonneau J., Geodetic measurements of convergence across the New Hebrides subduction zone, *Geophys. Res. Lett.* 22 (1995) 2573–2576.

[2] Collot J.Y., Daniel J., Burne R.V., Recent tectonics associated with the subduction/collision of the d’Entrecasteaux zone in the Central New Hebrides, *Tectonophysics* 112 (1985) 325–356.

[3] Kawata Y., et al., Tsunami in Papua New Guinea was as intense as first thought, *Eos Trans. AGU* 80 (1990) 101 et 104–105.

[4] Louat R., Pelletier B., Seismotectonics and present-day relative plate motion in the New Hebrides arc-North Fiji basin region, *Tectonophysics* 167 (1989) 41–55.

[5] Louat R., Hamburger M., Monzier M., Shallow and intermediate depth seismicity in the New Hebrides arc: constraints on the subduc-

tion process, in : Greene H.G., Wong F.L. (éds), *Geology and Offshore Resources of Pacific Islands Arcs–Vanuatu Region*, Circum-Pac. Council. Energy and Miner. Resour., Earth Sci. Ser., Houston, Texas, 8, 1988, pp. 279–286.

[6] Ortlieb L., Barrientos S., Guzman N., Coseismic coastal uplift and coralline algae record in northern Chile: the 1995 Antofagasta earthquake case, *Quater. Sci. Rev.* 15 (1996) 949–960.

[7] Pelletier B., Calmant S., Pillot R., Current tectonics of the Tonga–New Hebrides region, *Earth Planet. Sci. Lett.* 164 (1998) 263–276.

[8] Pelletier B., Lagabrielle Y., Benoît M., Boda M., Cabioch G., Calmant S., Garel E., Guivel C., Perrier J., Campagne Alaufi N.O. *L'Atalante 29 février–17 mars 2000, rapport de missions, sciences de la Terre, géologie–géophysique, centre IRD de Nouméa*, 2000.

[9] Tappin D.R., et al., Sediment slump likely caused 1998 Papua New Guinea tsunami, *Eos Trans. AGU* 8 (1) (1999) 329 et 334–340.

[10] Taylor F.W., Frolich C., Lecolle J., Strecker M., 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 (1987) 4905–4933.

[11] Taylor F.W., Bevis M., Schutz B., Kuang D., Recy J., Calmant S., Charley D., Régnier M., Perin B., Jackson M., Reichenfeld C., Geodetic measurements of convergence at the New Hebrides island arc indicate arc fragmentation caused by an impinging aseismic ridge, *Geology* 23 (1995) 1011–1014.

