

Projet ANR-06-CATT-002

ARC VANUATU

Programme CATTELL 2006

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	ARC VANUATU
Titre du projet	Dynamique éruptive et cycle sismique dans l'arc du Vanuatu
Coordinateur du projet (société/organisme)	UMR Géoazur
Période du projet (date de début – date de fin)	2007 - 2010
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Bernard PELLETIER
Téléphone	00 687 26 07 72
Adresse électronique	bernard.pelletier@ird.fr
Date de rédaction	14/03/2011

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	UMR Géoazur UMR IPGP UMR LMV UMR SIS2M (ex LPS CNRS-CEA) MVGD (ex geohazards au DGMWR) Vanuatu
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Eruptions volcaniques et séismes dans l'arc de Vanuatu

Dynamique du dégazage et cyclicité éruptive, accumulation et relaxation des contraintes, relation entre cycle sismique et genèse de reliefs. Quels sont les mécanismes conduisant au déclenchement de panaches éruptifs et de forts séismes en contexte de convergence ? Peut-on identifier d'éventuels signaux précurseurs pour aider à la prévision à ces catastrophes ? Afin de mieux répondre à ces questions deux secteurs de la zone de subduction de Vanuatu ont été sélectionnés: 1) le volcan Yasur, dans la partie sud de l'arc, est un cône très actif de type strombolien, localisé sur le bord d'une caldera récente et affectée par une forte résurgence. C'est un site idéal pour une étude multidisciplinaire des processus magmatique et tectonique contrôlant les cycles éruptifs des volcans à caldera. 2) La partie centrale de l'arc se caractérise par un fort couplage entre les plaques, un raccourcissement arrière et intra arc, de forts soulèvements sur le long terme avec de grandes îles en avant et en arrière de la ligne volcanique active et d'énormes appareils volcaniques dont les volcans Lopevi, Ambrym, Aoba et Gaua, générateurs de panaches éruptifs, parfois explosifs et caractérisés par de grandes calderas. Cette partie centrale de l'arc est un site unique pour étudier le cycle sismique et le rôle des gaz et des magmas dans les éruptions.

De nombreux travaux coordonnés et multidisciplinaires. Différentes méthodes géophysiques (sismologie à terre et en mer, géodésie, marégraphie, gravimétrie, mesures acoustiques et électriques), géochimiques et pétrologiques (études des gaz et des dépôts par spectrométrie, inclusions vitreuses et déséquilibres isotopiques) et géologiques (néotectonique, imagerie satellitaire, utilisation des coraux) ont été mises en œuvre pour répondre aux objectifs du projet. Outre les nombreuses missions temporaires d'analyse in situ et de prélèvement des gaz et particules, de mesures géophysiques et géologiques, le programme a été marqué par de lourdes missions d'installation de stations à enregistrement continu. Au total 52 stations sismologiques, 8 récepteurs GPS et 3 stations acoustiques ont été installées et suivies sur de nombreux mois, voire 1 an et plus (une partie d'entre elles est encore en fonctionnement), ce qui représente un effort considérable sur l'arc du Vanuatu.

Le projet a notamment permis de quantifier pour la première fois les budgets de dégazage et des systèmes d'alimentations de deux volcans majeurs du Vanuatu (Yasur et Ambrym), de localiser des sources sismiques et d'aborder la structure du Yasur. L'analyse des laves et des fluides permet de tracer les sources des magmas et l'évolution de leur composition en relation avec le contexte tectonique et l'évolution structurale des volcans. Les données de sismologie, géodésie et de néotectonique obtenues conjointement sur la partie centrale de l'arc permettent de renseigner les zones de blocage ou de glissement et de quantifier les mouvements co et inter-sismiques.

Le projet de recherche fondamentale (avec des retombées pour la surveillance) a été réalisé en partenariat avec le service des risques géologiques du Département de la Géologie, des Mines et des Ressources en Eau de Vanuatu (maintenant département de la météorologie et des risques naturels) et le service topographique du Département des Terres de Vanuatu. Coordonné par l'IRD-UMR Géoazur il réunit des personnels du CEA, CNRS, IRD, IPGP, Météo France et des Universités, notamment des UMRs Géoazur, IPG de Paris, Magmas et Volcans de Clermont-ferrand, ISTerre de Grenoble-Chambery, LPS de Saclay (maintenant IPGP). Des collègues italiens de l'INGV de Pise et de l'université de Palerme participent également pour l'étude des gaz, ainsi que des collègues australiens de l'ANU pour l'étude des coraux. Le projet a commencé en septembre 2007 et s'est terminé fin 2010. Il a bénéficié d'une aide ANR de 600 000 € dont 92 000 euros de salaire pour un post doctorant, pour un coût global de l'ordre de 4 500 000 €. Des financements complémentaires en fonctionnement sont notamment venus de l'IRD via l'UMR Géosciences Azur (150 000 euros) et du Fonds Pacifique via l'Ambassade de France au Vanuatu (80 000 Euros).

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Volcanic eruptions and earthquakes in the Vanuatu arc

Dynamics of degassing and cyclicity of eruptions, stress accumulation and relaxation, relationship between seismic cycle and relief building. The program concerns strombolian to plinian basaltic eruptions and large earthquakes in converging zones, the ultimate goal being to better understand the mechanisms behind these destructive events and to identify precursors. Two sections of the Vanuatu arc, each in a different geodynamic setting, have been selected. 1) The permanently active and easily access Yasur volcano in the southern section of the arc is an ideal site for a multidisciplinary study of the eruptive cyclicity. With its resurgent dome and associated hydrothermal system, it also offers the opportunity to study the processes controlling dome resurgence in calderas. 2) The second is the central section of the arc and Ambrym and Lopevi volcanos. This section of the arc, sitting at the level of asperities that are entering into subduction, is characterized by a strong coupling at the trench, back-arc and intra-arc shortening, strong vertical uplift, high earthquake recurrence rate, and enormous explosive volcanos that have created cataclysmic hydro-magmatic eruptions. The active Ambrym and Lopevi volcanoes generate strong eruptive plumes and are choice sites for studying gas accumulation and the source mechanisms for strong plume eruptions, to better understand precursory phenomena and forecast eruptions.

Numerous intergrated and multidisciplinary works. Various methods, which combine geophysics, geochemistry, petrology and geology, have been applied: near- and far-field acoustic,, seismic, geodetic, electric, electromagnetic and gravimetric measurements, chemical composition and mass flux measurements of gas emissions, studies of dissolved volatiles (glassy intrusions) and isotope series fractionation in lavas, geochemical analysis of volcanic products and crystals, neotectonics, satellite imagery, use of corals for determination of eruption/seismic chronology and vertical motion. In additio to numerous field campaigns for in situ measurements, sampling and observations, a large number of geophysical stations (52 sismometers , 8 GPS receivers and 5 microbarometers) was deployed during the project (some are still fonctionning), which represents a great amount of scientific effort on the Vanuatu arc.

For the first time the budgets of magma degassing and the structure, plumbing and feeding systems of two main volcanoes of the arc (Yasur and Ambrym) have been addressed. Ambrym is one of the strongest sources on the earth for gases and trace metals. Extensive sampling and analyses of lavas and hot spring waters along the whole arc allow to identify different magmatic sources and to address the evolution in space and time of the magma compositions in relationship with the tectonic setting and structural evolutions of volcanoes. Seismic, geodetic and neotectonic data collected on the central part of the arc allow to better understand the zones of ruptures and the buildup and relaxation of stress throughout the seismic cycle.

The project (mid 2007 to 2010) is a multidisciplinary research program, undertaken in collaboration with the Geohazard Section of the Department of Geology, Mines and Water Resources (now Vanuatu Meteorology and Geohazards Department) and the Topography Service of the Land and Survey Department of Vanuatu. On the french side, it is coordinated by IRD-UMR Géoazur an unites scientists from several institutions (CEA, CNRS, IPGP, IRD, Météo France, Universities), the main partners being Géoazur Nice-Nouméa, IPG Paris, LMV Clermont-Ferrand, ISTERRE Grenoble-Chambery, LPS Saclay (now at IPGP). Italian colleagues from INGV Pisa and Palermo University also participate in the gas studies, as well as Australian ones from ANU on coral studies. The project get 600 000 Euros of operating budget from the French National Agency for Research, including 92 000 euros for a two-years post doc salary, for a full cost of about 4 500 000 euros. Complementary operating budgets were given by IRD through UMR Géoazur and the French Pacific Funds through the French Embassy in Port Vila, Vanuatu.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

La compréhension des mécanismes à l'origine des éruptions volcaniques et des forts séismes en contexte de subduction, l'étude des relations entre dynamique de la subduction et cycles éruptif et sismique, et la recherche de signaux pour aider à la prévision de tels aléas destructeurs requièrent de s'intéresser, en priorité, à des zones convergentes à déformation très rapide, à événements fréquents, mais aussi favorables aux datations et à la quantification des processus.

L'arc du Vanuatu répondant à ces critères a été choisi et deux secteurs de l'arc, ayant des géodynamiques différentes, ont été sélectionnés pour le projet: 1) le volcan Yasur, dans la partie sud de l'arc, est un cône actif à activité strombolienne permanente, localisé sur le bord d'une caldeira récente affectée par une intense résurgence (Yenkahe horst) ; 2 la partie centrale de l'arc se caractérise par un fort couplage au niveau de la subduction, un raccourcissement arrière et intra arc, de forts soulèvements sur le long terme avec de grandes îles en avant et en arrière de la ligne volcanique active. Celle-ci est marquée par d'énormes appareils volcaniques dont les volcans Lopevi, Ambrym, Aoba et Gaua, générateurs de panaches éruptifs, parfois explosifs et caractérisés par de grandes calderas.

Différentes méthodes géophysiques (sismologie à terre et en mer, géodésie, marégraphie, gravimétrie, mesures acoustiques et électriques), géochimiques et pétrologiques (études des gaz et des dépôts par spectrométrie, inclusions vitreuses et déséquilibres isotopiques) et géologiques (néotectonique, imagerie satellitaire, utilisation des coraux) ont été mises en œuvre pour répondre aux objectifs du projet.

Outre les nombreuses missions temporaires d'analyse in situ et de prélèvement des gaz et particules, de mesures géophysiques et géologiques, le programme a été marqué par de lourdes missions d'installation de stations à enregistrement continu. Au total 52 stations sismologiques, 8 récepteurs GPS et 3 stations acoustiques ont été installées et suivies sur de nombreux mois, voire 1 an et plus (une partie d'entre elles sont encore en fonctionnement). Ceci représente un effort scientifique considérable sur l'arc du Vanuatu.

Le projet a notamment permis de quantifier pour la première fois les budgets de dégazage et des systèmes d'alimentations de deux volcans majeurs du Vanuatu (Yasur et Ambrym), de localiser des sources sismiques et d'aborder la structure du Yasur. Un échantillonnage assez complet des laves et des fluides de l'arc permet de tracer les sources des magmas et l'évolution de leur composition en relation avec le contexte tectonique et l'évolution structurale des volcans. Par ailleurs les données de sismologie, géodésie et de néotectonique obtenues conjointement sur la partie centrale de l'arc permettent de renseigner les zones de blocage ou de glissement et de quantifier les mouvements co et inter-sismiques.

Ce projet multidisciplinaire (2007-2010) réunit de nombreux partenaires français (IRD, CNRS, IPGP, OPGC, CEA, Universités). Il été réalisé en collaboration avec le service des risques géologiques et le service topographique du Vanuatu. Le coût de fonctionnement de ce programme (hors salaire) a été principalement assuré par l'ANR dans le cadre de l'appel d'offres Catastrophes telluriques et tsunamis (600000 Euros). Des financements complémentaires en fonctionnement ont été obtenus de l'IRD via l'UMR Géosciences Azur (150 000 euros) et du Fonds Pacifique via l'Ambassade de France au Vanuatu (80 000 Euros).

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Le projet a pour objectifs la compréhension des mécanismes à l'origine des éruptions volcaniques (dynamique du dégazage et cyclicité éruptive, formation de panaches) et des forts séismes (modalités de l'accumulation et relaxation des contraintes, relation entre cycle sismique et genèse de reliefs) en contexte de subduction, et la recherche de signaux pour aider à la prévision de tels aléas destructeurs. La marge convergente du Vanuatu, jeune et très active, présente des conditions très favorables à l'observation, la quantification et la compréhension des processus. Les mouvements actuels y sont exceptionnellement élevés, de 10 à 17 cm/an pour le taux de convergence et jusqu'à 7 cm/an pour les mouvements verticaux. Les séismes sont fréquents : un séisme de magnitude ≥ 7 s'y produit en moyenne par an. L'activité des volcans, liée à des magmas riches en eau, est fortement explosive. Les éruptions sont fréquentes, voire quasi permanentes, et peuvent générer panaches et colonnes éruptives. De plus, la présence de formations coralliennes fournit un outil de datation remarquable pour appréhender la chronologie et la cyclicité des événements tectoniques et volcaniques.

Les équipes françaises, notamment l'IRD et l'IPGP s'intéressent depuis de nombreuses années à la zone de subduction du Vanuatu. Ces dernières années, les recherches ont notamment porté sur l'étude des gaz volcaniques et sur les mouvements verticaux actuels des îles par géodésie. Les mesures dans les panaches des volcans ont permis d'estimer que, lors des périodes d'intense dégazage, le volcan d'Ambrym présente une des plus fortes sources d'émission de dioxyde de soufre (SO_2) de la planète. Le flux moyen de SO_2 libéré par les quatre principaux volcans actifs de l'archipel représente entre 10 et 20% du flux total de l'ensemble des volcans du globe. Par ailleurs, le traitement des mesures géodésiques par GPS recueillies depuis une dizaine d'années sur de nombreux sites a permis, outre de préciser les mouvements horizontaux, d'estimer les mouvements verticaux instantanés. Ces données sont fondamentales pour modéliser l'accumulation des contraintes et la géométrie des futures zones potentielles de rupture sismique.

Deux secteurs de l'arc, à situation géodynamique différente, ont été sélectionnés pour le projet.

1) La partie centrale de l'arc et les volcans Ambrym et Lopévi. Cette portion d'arc, situé en face d'aspérités entrant en subduction, est caractérisée par un fort couplage à la fosse, des raccourcissements arrière-arc et intra-arc, de forts soulèvements, un taux de récurrence sismique élevé et d'énormes appareils explosifs qui ont engendré des éruptions hydro-magmatiques cataclysmales. La présence d'îles à l'avant et en arrière de l'arc actif et d'un haut fond, proche de la surface et de la fosse, sur la plaque plongeante offre une opportunité exceptionnelle pour étudier la sismicité et la géométrie de l'interface de subduction et des zones sismogènes et mesurer l'accumulation des contraintes sur une coupe complète de la marge. Les édifices actifs d'Ambrym et du Lopévi produisent notamment de forts panaches éruptifs et sont des sites de choix pour comprendre les modèles d'accumulation de gaz et les mécanismes à l'origine des éruptions à forts panaches, afin d'en évaluer les phénomènes précurseurs

2) Le volcan Yasur dans la partie sud de l'arc. Les fortes fluctuations de l'intensité éruptive font de ce volcan, facile d'accès et en activité permanente, un site privilégié pour une étude multi-disciplinaire sur la cyclicité éruptive. Il offre aussi, avec son dôme résurgent et système hydrothermal associé, l'opportunité d'étudier les processus qui contrôlent la résurgence de dômes dans les caldeiras.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Les approches et méthodes suivantes -géophysique, géochimique, pétrologique et géologique- ont été réalisées lors du projet :

- mesures acoustiques en champ proche et lointain, pour quantifier la dynamique du dégazage (pression, volume, flux) et comprendre les mécanismes à l'origine des différents types d'activité, dans un objectif de surveillance et de prévision ;

- mesures de la composition chimique (FTIR) et du flux massique des émissions gazeuses (FTIR, acoustique en champ proche, radar), des teneurs et évolution des composants volatils dissous dans les magmas (inclusions vitreuses), et du fractionnement des séries isotopiques de l'Uranium pour étudier la dynamique et les bilans de dégazage magmatique ;
- analyses géochimiques des produits volcaniques et des cristaux pour étudier la composition des magmas, les temps de résidence dans les réservoirs et la cyclicité éruptive ;
- mesures électriques, électromagnétiques et gravimétriques, couplées à de la cartographie et au bilan des émanations de CO₂ pour l'étude du système hydrothermal du Yasur-dôme du Yenkahe;
- mesures sismologiques pour l'étude des structures (réservoir et conduit, interface de subduction, plaque chevauchante) et de la distribution de la sismicité;
- mesures géodésiques continues sur les édifices et à travers la marge, afin de déterminer les déformations lors des pulsations volcaniques et du cycle sismique (accumulation et relaxation des contraintes) et de mettre en évidence d'éventuelles déformations transitoires et signaux précurseurs;
- utilisation des coraux afin d'établir la chronologie des éruptions pour préciser les cycles éruptifs, de déterminer les mouvements verticaux inter, co et post sismique, et d'identifier la segmentation de la marge et les zones potentielles de rupture.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Les résultats obtenus à diverses échelles, celle de l'édifice volcanique, d'un segment de l'arc et de l'arc, ont des implications sur le fonctionnement et donc la surveillance des volcans, sur la genèse de magmas sous-saturés primitifs en domaine d'arc, sur le cycle sismique et le rôle des mouvements tectoniques et du changement global dans la variation relative du niveau de la mer.

Le complexe Siwi-Yasur à Tanna. Les mesures acoustiques enregistrées sur le volcan Yasur (10/2004 à 7/2006 puis depuis 08/2007) indiquent de fortes variations de l'activité éruptive (soudaines phases de recrudescence alternant avec périodes d'évolution plus lente), liées à la quantité variable de bulles de gaz dans le conduit (Zielinski et al., 2008, 2009, in prep). D'après ces mesures, le flux de gaz, surpressurisé à l'émergence, varie entre 500 m³/s et 2200 m³/s. Les mesures DOAS du flux de SO₂ combinées à l'analyse complète des gaz en 2007-2008, permettent de déterminer un flux moyen de 700 m³/s. Les données obtenues par radar Doppler et radiomètres infrarouges (09/2008) indiquent une vitesse initiale maximum de 430 km/h et une masse de 30 à 60 tonnes pour les produits éjectés (0.1-0.2 m de diamètre) lors des plus violentes explosions. L'activité sismique du volcan, suivie pendant un an (02/2008-01/2009) avec un réseau dense de stations (jusqu'à 10 capteurs large bande et 12 antennes), est caractérisée par différentes classes de signaux (Battaglia et al., 2008, 2009): des milliers de signaux superficiels quotidiens liés aux explosions, des signaux longue période plus profonds et précurseurs (10-15 sec.) des explosions, et des signaux très longue période (3 sec.). Un fort séisme (M = 7.3) le 9 avril 2008, localisé à 80 km du volcan, a provoqué un changement brutal et persistant de certains de ces signaux, suggérant une modification morphologique significative du conduit volcanique. La technique d'antenne sismique permet un suivi temporel de l'activité sismique (Perrier et al., 2010, soumis): la majorité des explosions est localisée entre 150 et 400 m sous le cratère Sud et les la localisation des événements LP, généralement vers 800-900 m sous le flanc sud-est du volcan, évolue dans le temps. Un étude sur les corrélations entre les enregistrements acoustiques, radar et sismiques est en cours. En ce qui concerne la structure, les données des antennes ont également permis d'obtenir un modèle de vitesse de la partie superficielle du complexe (Perrier et al, soumis). Une campagne multidisciplinaire sur la structure (tomographie 2D de résistivité électrique, polarisation spontanée, CO₂ et température du sol, gravimétrie) a été réalisée en juillet 2008 sur l'ensemble de la caldeira et du bloc résurgent Yenkahe-Yasur (Chaput et al., 2009); les résultats indiquent la présence d'un système hydrothermal actif mais relativement scellé (températures élevées mais très grande altération des roches, faibles valeurs de résistivité et d'émanation de CO₂) avec un risque élevé de glissement des flancs. Les données ne suggèrent pas la présence d'un corps magmatique intrusif sous le bloc résurgent du Yenkahe (anomalie gravimétrique négative). Cependant, l'étude détaillée des émissions gazeuses et des produits solides (roches totales et inclusions vitreuses) anciens et actuels (ignimbrite

Siwi et volcan Yasur) de ce complexe volcanique (Métrich et al., 2008, 2009, 2011; Allard et al., 2008, 2011, en prép.) démontrent une alimentation par un même basalte parent depuis 2 Ma qui se différencie en magma trachyandésitique par cristallisation fractionnée (50%) entre 4-5 km de profondeur et la surface, pour former un large réservoir relativement superficiel. Le flux total de gaz magmatique émis par le volcan Yasur est de 15000 tonnes/jour, dont 13500 t/j d'H₂O, 700 t/j de SO₂ et 165 t/j de HCl, impliquant un taux moyen d'alimentation en basalte de 0.05 km³/an. L'accumulation de magma trachyandésitique dégazé en 1000 ans sous la caldera de Siwi permet largement d'expliquer la résurgence cumulée (2.8 km³) et la déformation annuelle (15cm/an) du horst du Yenkahe.

Le volcan Ambrym. Les enregistrements acoustiques et la géochimie des basaltes et des gaz suggèrent que les deux cônes actifs de Marum et Benbow, séparés de 3 km et situés dans l'immense caldera du sommet de l'île, sont alimentés par un réservoir unique (Vergnolle et al., 2010 ; Allard et al., 2009). Les données acoustiques indiquent un flux de gaz de 2000 à 4000 m³/s, des phases d'activité violente mensuelles au Marum, et des signaux précurseurs quelques jours avant les explosions majeures (Bani et al., soumis). L'activité sismique, enregistrée par 6 capteurs large bande et 4 antennes pendant 3 mois (10-2008 à 01-2009), se caractérise par un trémor très intense et permanent, provenant principalement du Benbow, et des signaux basse fréquence (30 sec) liés aux fortes explosions du Marum. Les mesures des émissions gazeuses (Allard et al., 2008, 2009, en soumission) démontrent qu'Ambrym est un des plus gros émetteurs de la planète en gaz et métaux dans l'atmosphère: en effet Ambrym produit entre 10 et 20% des émissions volcaniques annuelles de H₂O, CO₂, SO₂, HBr et ²¹⁰Pb, et 5 à 8% des émissions de Cu, As, Sn et ²¹⁰Po. D'après les teneurs pré-éruptives en H₂O et CO₂ du magma, le toit du réservoir serait à une profondeur de ~3.6 km. Le volume de magma qui alimente ce dégazage est d'environ 10⁶ m³/jour, soit 0.36 km³/an, ce qui suggère la présence d'un très large réservoir. Des études sur les volatils et les textures des dépôts sont également menées pour comprendre les mécanismes des éruptions pliniennes basaltiques d'Ambrym.

Le volcan Lopévi. Aucune éruption ne s'est produite depuis l'installation de la station sismo-acoustique en mars 2009. Des roches différenciées (SiO₂ > 65%) ont été découvertes pour la première fois sur le Lopévi alors que toutes les éruptions historiques sont basaltiques. Ceci montre l'existence d'une période durant laquelle le Lopévi a émis des roches très acides avant d'acquiescer une activité essentiellement basaltique. Cette évolution est à prendre en considération dans une évaluation des risques potentiels posés par les futures éruptions du volcan.

Origine et évolution des magmas dans l'arc et traçage des sources mantéliques. Un échantillonnage de Tanna, Lopévi, Paama, Ambrym, Aoba, et Gaua a permis de compléter l'échantillonnage antérieur. Les analyses géochimiques et isotopiques des laves et des eaux sur les différents édifices mettent en évidence d'importantes variations dans le temps et dans l'espace de la composition des magmas et de leurs sources, en relation avec l'évolution structurale des volcans et notamment la formation de calderas. Les dépôts récents du Lopévi (volcan sans caldera) sont par exemple issus d'un manteau plus enrichi que les dépôts anciens. Le volcanisme récent de Gaua est plus pauvre en K₂O et en éléments incompatibles mais plus radiogénique en Sr que le volcanisme pré-caldera. La composition de la source des magmas est marquée, du Nord au Sud de l'arc, par une augmentation des rapports isotopiques en Pb et une diminution des rapports isotopiques de Nd ainsi que des teneurs en éléments incompatibles, probablement influencée par de la subduction de la ride d'Entrecasteaux. Le rapport isotopique de l'hélium ³He/⁴He mesuré pour la première fois dans de nombreux échantillons fluides (eaux, gaz) et solides (olivines) de l'arc, depuis Tanna au sud jusqu'à Gaua, est très variable (de 4.5 R_a à Efate à 10.1 R_a à Ambrym) et indique des sources mantéliques différentes (Jean-Baptiste et al., 2009, et en prép.). En particulier, le haut rapport à Ambrym (nord) démontre une influence géochimique du hot spot fidjien, en accord avec l'influx de manteau 'indien' sous la partie centrale de l'arc.

Déformation et cycle sismique de la partie centrale de l'arc. Un réseau de 8 stations GPS permanentes (installées à partir de fin 2007) sur l'ensemble de la partie centrale de l'arc et un réseau de 20 stations sismologiques large bande (04/2008 – 02/2009) déployé sur un segment du domaine avant arc et complété par 10 stations sous-marines (05-11/2009) permettent de suivre les déformations et de caractériser les zones séismogéniques interplaques et intracrustales (Ballu et al., 2009 ; Crawford

et al., 2009). Le réseau géodésique s'étend aussi en mer où les déformations verticales sont suivies sur les bancs Wusi et Sabine à l'ouest de l'arc par un réseau de trois capteurs de pression. Les mesures de pression fond de mer sont combinées avec les données de hauteur de la mer acquises par altimétrie satellitaire ou par GPS cinématique embarqué lors de campagnes à la mer (10/2007, 04/2009 et 06/2010) (Ballu et al., 2009, Bouin et al., 2009). La quasi-totalité des autres sites GPS de l'archipel a été remesurée, ce qui a permis de caractériser les mouvements co et postsismiques associés aux principaux événements. Les données ont notamment permis de mettre en lumière l'importance de la prise en compte des mouvements verticaux sur la variation relative du niveau marin et de ses effets sur les populations (Ballu et al., soumis). Afin d'aborder le cycle sismique, un volet néotectonique a été mené le long des côtes, pour estimer la segmentation et les mouvements verticaux anciens et actuels à partir de l'analyse des morphologies côtières, l'âge des terrasses récifales les plus basses et la morphologie des colonies coralliennes vivantes. Les résultats indiquent une surrection au SW Mallicolo associée au séismes de 1994, des subsidences intersismiques suite aux soulèvements cosismiques des séismes de 1965 au NW Mallicolo et de 1999 à l'Est Ambrym, et une stabilité et/ou légère subsidence le long des côtes de Maewo et Pentecôte. De nombreux échantillons de coraux prélevés dans les récifs soulevés sont en cours de datation et permettront de connaître les taux des mouvements verticaux et d'apporter des informations sur les zones de ruptures potentielles.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats sont en partie exploités et de nombreux articles sont soumis et en cours de publication. Plusieurs thèses ont également en cours et de nombreuses données sont encore à exploiter.

C.6 DISCUSSION

La quasi totalité des opérations prévues a été réalisée et l'ensemble des objectifs initiaux ont pu être (ou seront) atteints dans la mesure où un grand nombre de données sont encore en cours d'analyse. Des aspects non prévus ont été réalisés ; ils concernent l'origine des sources mantelliques des magmas le long de l'arc par l'étude des produits à l'échelle de l'arc actuel (les objectifs ayant été élargis notamment vers le nord de l'arc, aux volcans Aoba et Gaua) et par l'étude du rapport isotopique de l'hélium dans les eaux, gaz et olivines depuis Tanna au sud jusqu'à Gaua au nord. Pour l'opération « étude de la cyclicité des éruptions par utilisation des éléments traces dans les coraux », les résultats obtenus actuellement soulèvent des questions insoupçonnées sur la cause et le mécanisme de modification de structure et de géochimie de coraux vivants (calcitisation importante). A noter la poursuite de l'acquisition des stations acoustiques et géodésiques mises en place lors du projet et de stations sismologiques installées vers la fin du projet, afin de capitaliser l'acquis pour la compréhension des cycles sismiques et volcaniques qui nécessitent un investissement long terme. Les résultats du projet apporteront une contribution significative à l'étude de cet arc et aux processus associés aux zones convergentes. Ils ont des implications intéressantes pour la surveillance volcanique.

C.7 CONCLUSIONS

Le projet a représenté un effort considérable sur l'arc du Vanuatu. De nombreux travaux multidisciplinaires et coordonnés y ont été réalisés pour la première fois. Une étude sur deux volcans majeurs Vanuatu (Yasur et Ambrym) a permis de quantifier les budgets de dégazage et des systèmes d'alimentations du Yasur et d'Ambrym, de localiser les sources sismiques et d'aborder la structure du Yasur. Un échantillonnage assez complet des laves et des eaux de l'arc permet de tracer les sources des magmas et l'évolution de leur composition en relation avec le contexte tectonique et l'évolution structurale des volcans. Par ailleurs les données de sismologie, géodésie et de néotectonique obtenues conjointement sur la partie centrale de l'arc permettent de renseigner les zones de blocage ou de glissement, et la quantification des mouvements co et inter-sismiques.

D LISTE DES LIVRABLES

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	18	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	35	
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation	1	
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	5
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Articles dans revues

Allard P., A. Aiuppa, P. Bani, A. Bertagnini, N. Métrich, P-J. Gauthier, F. Parello, H. Shinohara, G. Sawyer, E. Bagnato, E. Garaebiti, C. Mariet (2011) Atmospheric input and magma degassing budget of major, trace and radioactive volatile species from Ambrym basaltic volcano, Vanuatu Arc. En soumission à *Geochimica Cosmochimica Acta*.

- Allard P., A. Aiuppa, P.-J. Gauthier, F. Parello, P. Bani, E. Bagnato, C. Mariet, E. Garaebiti (2011) Degassing of stable and radioactive volatile elements from basaltic trachyandesite at Yasur volcano, Vanuatu arc. En soumission à *Chemical Geology*.
- Allard P., M. Burton and G. Sawyer (2011) FTIR spectroscopic sensing of basaltic lava lake degassing at Ambrym volcano, Vanuatu arc. *Earth and Planetary Science Letters*, en soumission.
- Allard P., M. Burton, Sawyer G. and Bani P. (2011) Dynamics and source depth of Strombolian explosions tracked with OP-FTIR remote sensing at Yasur volcano (Vanuatu). En préparation pour *J. Volcanology Geothermal Research*.
- Bani P., S. Vergnolle, C. Zielinski, A. Le Pichon, M. Lardy, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman and E. Garaebiti, Probing the magma plumbing of Ambrym volcano by a triangular acoustic network, soumis 2010.
- Ballu V., M.-N. Bouin, P. Siméoni, W. Crawford, S. Calmant, J.-M. Boré, T. Kanas et B. Pelletier, Comparing the role of absolute sea level rise and vertical tectonic motions in coastal flooding, Torres islands (Vanuatu), soumis à Proc. Nat. Acad. Sci., février 2011.
- Ballu V, Bouin M.-N, Calmant S, Folcher E, Bore JM, Ammann J, Pot O, Diament M, Pelletier B., 2009, Absolute seafloor vertical positioning using combined pressure gauge and kinematic GPS data *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0345-y, 2009.
- Bouin M.-N, Ballu V, Calmant S, Pelletier B, 2009, Improving resolution and accuracy of Mean Sea Surface from kinematic GPS, Vanuatu Subduction Zone. *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/S00190-009-0320-7.
- Bouin M.-N, Ballu V, Calmant S, Pelletier B, Ammann J, Bore J.-M, Folcher E, 2009, Methodology of kinematic GPS experiment for local sea surface mapping, Vanuatu. *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/S00190-009-0338-x.
- Jean-Baptiste P., P. Allard, P. Bani, E. Fourné, N. Métrich, B. Pelletier, E. Garaebiti (2011) Helium isotope tracking of the mantle sources of Vanuatu island arc volcanism. En préparation pour *Earth Planetary Science Letter*.
- Gauthier P.-J., P. Allard, A. Aiuppa, P. Jean-Baptiste, F. Parello (2011) Geochemistry of hydrothermal fluids in Siwi caldera, Tanna island (Vanuatu arc). En préparation pour *Journal of Volcanology & Geothermal Research*.
- Métrich N., P. Allard, A. Aiuppa, P. Bani, A. Bertagnini, H. Shinohara, F. Parello, A. Di Muro, E. Garaebiti, O. Belhadj, D. Massare (2011) Magma and volatile supply to post-collapse renewed volcanism and block resurgence in Siwi caldera (Tanna island, Vanuatu arc). *Journal of Petrology* (en cours de révision).
- Pelletier B., Allard P., Aiuppa A., Battaglia J., Bani P., Bertagnini A., Burton J., Donnadiou F. Finizola A., Gallois F., Garaebiti E., Gauthier P.J., Jean-Baptiste P., Lardy M., Lenat J.-F., Le Pichon A., Metaxian J.-P., Nakedau D., Métrich N., Ponceau D., Vergnolle S., Zielinski C., 2009 – Etude du volcan Yasur dans le cadre du programme « Arc Vanuatu » 2007-2009. *LAVE*, 138, 8-11.
- Perrier L., Métaixian J.-P., Battaglia J., Garaebiti E. (2011) Locating sources of explosion quakes and long-period events using a seismic triangulation method at Yasur volcano, Vanuatu. Submitted to *J. Geophys. Res.*
- Perrier L., Métaixian J.-P., Battaglia J., Garaebiti E. (2011) Estimation of the near surface velocity structure at Yasur volcano, Vanuatu. Submitted to *Journal of Volcanology and Geothermal Research*
- Sorbadère, F., Schiano, P., Métrich, N. And Garaebiti, E., Insights on the origin of primitive silica-undersaturated arc magmas of Aoba volcano (Vanuatu arc), *Contrib. Mineral. Petrol*, in press.
- Zielinski C., S. Vergnolle, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, M. Frogneux, P. Herry, S. Todman and E. Garaebiti, Close listening of a permanently degassing volcano : Yasur volcano (Vanuatu), in prep. 2010.
- Zielinski C., S. Vergnolle, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, M. Frogneux, P. Herry, S. Todman and E. Garaebiti, Long-term fluctuations of the gas volume at Yasur volcano (Vanuatu), in prep. 2010.

Zielinski C., S. Vergnolle, P. Bani, A. Le Pichon, M. Lardy, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman and E. Garaebiti, Long-term evolution of the gas volume at Ambrym volcano (Vanuatu) deduced from a triangular acoustic network, in prep. 2010.

Communications

- Allard P., Aiuppa A., Bani P., Parello P., Shinohara H., Gauthier P-J., Bagnato M., Bertagnini A., Métrich N. (2008) Magma-derived Volatile Emissions from Ambrym and Yasur Volcanoes (Vanuatu Arc). IAVCEI Gen. Assembly, Reykjavik, Iceland, 17-23 August 2008, 513 (invited talk).
- Allard P., A. Aiuppa, P. Bani, N. Métrich, A. Bertagnini, P-J. Gauthier, F. Parello, G. Sawyer, H. Shinohara, E. Bagnato, C. Mariet, E. Garaebiti and B. Pelletier (2009) Ambrym basaltic volcano (Vanuatu Arc): volatile fluxes, magma degassing rate and chamber depth. *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meeting Suppl., Abstract V24C-04, 12-17 December 2009, San Francisco, USA.
- Bani P, S. Vergnolle, C. Zielinski, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « Probing the magma plumbing of Ambrym volcano by a triangular acoustic network, 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700. Talk.
- Bani P, S. Vergnolle, C. Zielinski, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « Probing the magma plumbing of Ambrym volcano by a triangular acoustic network, EUG conference, 2-7 May 2009, Wien, Austria.
- Ballu, V., Bouin, MN., Bonnefond, P., Calmant, S., Peltier, A., Crawford, W., Pelletier, B., Bergeot, N., Diament, M., Using seafloor pressure gauges and satellite altimetry data to constrain deformation models in a partially locked subduction zone, Central Vanuatu, AGU Fall meeting, San Francisco, 2009.
- Ballu, V., Bouin, MN, Calmant, S., Pelletier, B., Bergeot, N., Peltier, A., Kalsale, M., Kanas, T., Willy, JC., Koroka, P., Crawford, W., Garaebiti, E., Todman, S., Cuevard, J., Worwor, A., Jimmykone, S., Nakedau, D. and Diament, M., A land and seafloor geodesy experiment in Vanuatu to study the seismic cycle in a partially locked subduction zone. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 6-7.
- Crawford W.C., Regnier M., Nakedau D., Pelletier B., Ballu V., 2009 – A detailed study of seismicity beneath the central Vanuatu archipelago. AGU Fall meeting December 2009, San Francisco.
- Crawford W.C., Regnier M., Nakedau D., Pelletier B., Garaebiti E., Cevuard J., 2009 - The ARC-VANUATU study of seismicity beneath Santo and Mallicolo Islands. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 19.
- Crawford W.C., Pelletier B., Jimmykone S., Regnier M., Garaebiti E., Nakedau D., Cevuard J., Worwor A., 2009 - The Port Vila, Vanuatu seismological network. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 18-19.
- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, D. Legrand, E. Garaebiti, D. Nakedau (2008), Preliminary Insights Into the Seismicity Related to the Strombolian Explosions of Yasur Volcano (Vanuatu), AGU fall meeting, San Francisco, Poster.
- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, D. Legrand, E. Garaebiti, D. Nakedau (2008), Preliminary Insights Into a Continuous Seismic Data Set Recorded in 2008 at Yasur Volcano (Vanuatu), ESC workshop in Leon, Nicaragua, Talk.
- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, E. Garaebiti (2009), Coda wave interferometry at Yasur volcano (Vanuatu): temporal variations induced by a M=7.3 subduction earthquake, AGU fall meeting, San Francisco, Poster.

- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, E. Garaebiti (2009), Preliminary results from seismic experiments around Yasur (Tanna island) and Marum and Benbow volcanoes (Ambrym island), 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, Poster.
- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, E. Garaebiti (2009), Influence of a M=7.3 regional earthquake on the explosion quakes and LP events of Yasur volcano (Vanuatu), ESC workshop in Pico Island, Azores, Talk.
- Battaglia, J., J.-P. Métaixian, D. Legrand, L. Perrier, E. Garaebiti, D. Nakedau (2009), Influence of a M=7.3 earthquake on the activity of Yasur volcano (Vanuatu), EGU Meeting 2009, Vienna, Austria, Poster.
- Beumais, A., Chazot, G., Bertrand, H., Dosso, L., Gueguen, B. and Robin, C., Crustal contamination and mantle source variations in an intra-oceanic arc : geochemistry of the Lopevi volcano lavas, Vanuatu, SW Pacific, Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU meeting 2011.
- Bouin, MN, Ballu, V., Calmant, S., Boré, JM., Folcher, E., Ammann, J., Towards seafloor geodesy using GPS and satellite altimetry in Wusi Bank, Santo Island, Vanuatu, 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700.
- Chaput, M., Dumont, S., Lénat, J-F., Finizola, A., Gailler, L., Barde Cabusson, S., Byrdina, S., Menny, P., Peltier, A., Colonge, J., Douillet, G., Letort, J., Bachèlery, P., Nakedau, D. and E. Garaebiti. Structure and Hydrothermal System of Yasur volcano (Vanuatu) inferred from Gravimetry, Electric Resistivity Tomography, Time Domain Electro-Magnetism, Self-Potential, subsurface Temperature and soil CO₂ concentration. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, Poster.
- Crawford W. C., M. Regnier, D. Nakedau, B. Pelletier and V. S. Ballu, A Detailed Study of Seismicity Beneath the Central Vanuatu Archipelago, AGU Fall Meeting, 2009.
- Crawford W.C., Regnier M., Nakedau D., Pelletier B., Garaebiti E., Cevuard J., 2009 - The ARC-VANUATU study of seismicity beneath Santo and Mallicolo Islands. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 19. Talk.
- Crawford W.C., Pelletier B., Jimmykone S., Regnier M., Garaebiti E., Nakedau D., Cevuard J., Worwor A., 2009 - The Port Vila, Vanuatu seismological network. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 18-19. Talk.
- Donnadieu F., 2009. Quantifying the dynamics of Yasur volcano explosive activity : preliminary results from Doppler radar measurements. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700. Poster.
- Jean-Baptiste P., P. Allard, P. Bani, E. Garaebiti, B. Pelletier, E. Fourré, N.Métrich (2009) Highly variable helium isotope ratios in the Vanuatu volcanic arc. *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meeting Suppl., Abstract T21A-1774, 12-17 December 2009, San Francisco, USA.
- Métrich N., A. Bertagnini, E. Garaebiti, O. Belhadj, D. Edouard, A. Di Muro, M. Mercier (2008) First assessment of volatiles dissolved in magma feeding Yasur activity (Vanuatu Arc). *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meeting Suppl., Abstract V21B-2098, 14-19 December 2008, San Francisco, USA
- Métrich N., P. Allard, A. Aiuppa, P. Bani, A. Bertagnini, H. Shinohara, F. Parello, A. Di Muro, E. Garaebiti, O. Belhadj (2010) Magma and volatile supply to post-collapse renewed volcanism and block resurgence in Siwi caldera (Tanna island, Vanuatu arc). Abstract V52C-02, AGU Fall meeting, 12-17 December 2010, San Francisco, USA.
- Pelletier B. et 45 others, 2009 - The "Arc Vanuatu" program: state of work and preliminary results. 26th STAR Session held in conjunction with SOPAC 38th Session, Port Vila, Vanuatu 21-29 October 2009. SOPAC Miscellaneous Report 700, 41-44.

- Pelletier B. et al., 2010 – Arc Vanuatu : dynamique éruptive et cycle sismique dans l'arc du Vanuatu. Colloque de bilan et de l'avancement des programmes ANR CATELL et RISKINAT, 28-31mars 2010, ENS Lyon.
- Perrier L., Métaxian J.-P., Battaglia J., Garaebiti E. (2010) Locating sources of volcanic explosions and study of the structure at Yasur volcano, Vanuatu. EGU Meeting, Vienna, abstract EGU2010-11832.
- Perrier L., Métaxian J.-P., Battaglia J., Garaebiti E. (2010) Locating sources of explosion quakes and long-period events at Yasur volcano, Vanuatu. ESC "Earthquakes and Volcanoes" annual workshop.
- Perrier L., Métaxian J.-P., Battaglia J., Garaebiti E. (2010) Locating sources of explosion quakes and long-period events at Yasur volcano, Vanuatu. AGU Fall Meeting, abstract #V33C-2402.
- Sorbadère, P. Schiano, N. Métrich (2010) Origin of Primitive Silica-Undersaturated Arc Magmas: Evidence from olivine-hosted melt inclusions from Aoba Volcano (Vanuatu Arc). AGU Fall meeting 12-17 December 2010, San Francisco, USA.
- Vergnolle S., Bani P, C. Zielinski, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « Probing the magma plumbing of Ambrym volcano by a triangular acoustic network, International conference, Atlantic conference on Eyajallajokull and aviation, 15-16 Sept 2010, Keflavik, Iceland.
- Zielinski C., S. Vergnolle, P. Bani, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « The potential of continuous near-field recording of infrasound produced by volcanoes in Vanuatu for probing the the state of the atmosphere», conference of the Acoustical Society of America, July 2008, Paris, France.
- Zielinski C., S. Vergnolle, P. Bani, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « The potential of continuous near-field recording of infrasound produced by volcanoes in Vanuatu for probing the the state of the atmosphere», IAVCEI conference, August 2008, Reykavik, Iceland.
- Zielinski C., S. Vergnolle, P. Bani, M. Lardy, A. Le Pichon, D. Ponceau, F. Gallois, P. Herry, S. Todman, E. Garaebiti, « The potential of continuous near-field recording of infrasound produced by volcanoes in Vanuatu for probing the the state of the atmosphere», EUG conference, 2-7 May 2009, Wien, Austria.

Rapports de Master

- Barberio Franck, 2010. Localisation de sources de trémor provenant de deux cratères éruptifs. Rapport de Master, Université de Grenoble, INP-ENSE3, pp. 29
- Baronian V., 2009. Traçages des sources mantéliques de l'arc du Vanuatu par les isotopes de l'hélium : fluides hydrothermaux et cristaux d'olivine. Rapport de Master 2, Univ. Paris XI, Orsay, pp 48.
- Beaumais A. (2009) Evolution géochimique de l'ignimbrite de Siwi (Tanna, Vanuatu). Rapport Master 2, Univ. Paris XI, Orsay, pp 36.
- Chaput, M., 2009. Etude du système hydrothermal du complexe Yasur-Bloc résurgent du Yenkahe (Ile de Tanna, Vanuatu). Approche multidisciplinaire. Mémoire de Master 2 Recherche, Laboratoire "Magmas et Volcans", Géosciences Réunion. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 53p.
- Dumont, S., 2009. Etude de la dynamique et de la Structure du système "Caldera de Siwi-Dôme de Yenkahe-volcan Yasur" (Vanuatu) par une approche gravimétrique. Mémoire de Master 2 Recherche, Laboratoire "Magmas et Volcans", Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 46p.
- Edouard D. (2008) Evolution géochimique et dégazage des magmas du Yasur (Tanna, Vanuatu). Rapport Master 2, Université Paris XI, Orsay, pp 34.
- Gueguen, B., Genèse des magmas d'arcs : exemple du volcan Lopévi (Vanuatu, SW Pacifique), Rapport de Master 1, Brest, 2009.

- Poujol, A., 2010. La déformation extensive des édifices volcaniques en contexte de subduction spontanée-Application à l'île de Tanna (arc des Nouvelles-Hébrides). Mémoire de Master 2 Recherche, Laboratoire "Magmas et Volcans", Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 54p.
- Soares-Pereira Caroline (2010) Calibration de traceurs géochimiques de la température de l'eau au sein de coraux actuels du Vanuatu, Sud-ouest Pacifique. Master 1 SDUEE Océanographie et Environnements Marins, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Direction : Guy Cabioch, Florence Le Cornec & Claire E. Lazareth.
- Sorbadère, F., 2008. Pétrogenèse des basaltes de l'île d'Aoba (arc insulaire du Vanuatu) : Etude des éléments majeurs et volatils des inclusions magmatiques primaires préservées dans les phénocristaux d'olivines, Rapport de Master 1, Clermont-Ferrand, 2008.
- Sorbadère F. (2009) Apport des inclusions magmatiques primaires à l'identification de la source et du mode de genèse des magmas d'Aoba (Arc du Vanuatu). Rapport Master 2, Univ. Blaise Pascal, Clermont Ferrand pp 50.

Thèse en cours

- Zielinski C., Dynamique éruptive des volcans du Vanuatu grâce à leur suivi acoustique, thèse soutenue prévue en juillet 2011. IPGP
- Perrier L., Analyses des données des antennes sismologiques sur le volcan Yasur. Thèse prévue en octobre 2011. ISTerre.
- Beaumais A. Données isotopiques Sr-Nd-Pb-Hf des produits magmatiques des volcans, 2012. LMV- Univ. Brest
- Baillard C., Etude sismologique de la zone avant arc de la partie centrale de l'arc de Vanuatu (Santo-Mallicolo), 2012-2013. IPGP.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Nouveaux projets et partenariat consolidé avec le « Vanuatu Meteorology and Geohazards Department » :

- installation d'un réseau sismologique à Vanuatu en fin de projet (2010) (IRD Géoazur-IPGP),
- construction d'une nouvelle station sismologique internationale GEOSCOPE à Santo Vanuatu (construction fin 2010 – installation 2011) (Géoscope-IPGP-Géoazur),
- Mise en place d'un réseau sismologique Vanuatu/Nouvelle-Calédonie – mise à disposition des données des stations pour localisation rapide en temps réel des séismes (IRD Géoazur),
- nouveau programme sur la structure et la surveillance du Yasur (IPGP),
- nouveau programme proposé sur l'impact du dégazage du volcan Ambrym sur la fertilisation de l'océan (LOCEAN-LEGOS-LOPB-LMV-Vanuatu).

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Philipson BANI	H	philipson.bani@ird.fr	27/02/2011	PHD	France	ATER	IPGP et CNRS P. Allard : Part 4 S. Vergnolle : Part 2	Post doc Post Doc	12 12	31/01/2009 31/01/2010	CDI	EPST IRD	Chercheur	OUI	OUI

Aide pour le remplissage

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).

Annexe : résultats par opération

A.1.2 - Volet volcanologie, opération acoustique

Leader : partenaire 2 (IPGP) + CEA ; autres partenaires : 1 (IRD) et 5 (Vanuatu)

Sylvie Vergnolle (IPGP), Christelle Zielinski (IPGP) et Philipson Bani (maintenant IRD-LMV), Alexis Le Pichon (CEA), Michel Lardy et Francis Gallois (IRD), Sylvain Todman, Worwor Athanase et Esline Garaebiti (Géohazards Vanuatu)

Le bilan de la partie concernant les mesures acoustiques et axée sur la quantification du dégazage éruptif de 3 volcans actifs de l'arc du Vanuatu est très positif. Nous avons enregistré et analysé la pression acoustique émise par les volcans Yasur, Lopévi et Ambrym pendant 25 mois (sur 31 mois de mesures), 21 mois (sur 21) et 20 mois (sur 27). Neuf autres mois d'enregistrement en continu sur chacun des 3 volcans sont encore en cours de dépouillement. A partir de la puissance acoustique, nous en avons déduit le volume de gaz émis par bandes de fréquence pendant ces période. Nous avons quantifié le flux de gaz émis par Ambrym et le Yasur, 2000-4000 m³/s et 500-2000 m³/s, respectivement. Aucune éruption ne s'est produite sur le Lopévi pendant cette période. Nous avons mis en évidence des fluctuations du volume de gaz émis ; elles ont des temps de récurrence de plusieurs jours sur le Yasur et sur Ambrym pendant certaines périodes, et peuvent aller jusqu'à 8 mois en continu sur Ambrym. Ce temps de récurrence semble être une caractéristique des systèmes ouverts.

L'implantation d'un mini-réseau acoustique sur Ambrym a permis de mettre en évidence que l'activité volcanique se manifeste simultanément dans les deux édifices, Marum et Benbow, pourtant distants de plus de 3 km. Nous proposons que ces 2 édifices soient alimentés par un seul réservoir magmatique, de grande taille (> 6 km dans l'axe Marum-Benbow) et relativement profond (> 6 km). Nous avons mis en évidence que bien qu'en système ouvert, le cratère de Marum présente tous les quelques mois des phases courtes de recrudescence d'activité plus violente, marquée par l'existence de phases stromboliennes. Nous avons aussi observé des signaux précurseurs lors de la phase strombolienne d'octobre 2008, environ une semaine avant le paroxysme de l'activité.

Sur le Yasur, nous avons mis en évidence un nouveau régime de dégazage, encore jamais observé sur un volcan, caractérisé par une série de train d'explosions identiques, régulièrement espacées et très rapprochées (jusqu'à une explosion toutes les quelques 10 s). Nous avons aussi analysé l'effet d'un séisme proche (M 7.2) sur l'activité éruptive de Yasur, mais nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet marqué de ce séisme sur le dégazage.

Nous avons commencé l'étude de la relation qu'il pourrait exister entre puissance acoustique et sismique dans différentes bandes de fréquence sur nos longues séries temporelles obtenues sur Ambrym, Yasur et Lopévi. Nous mettons au point une méthode permettant d'enlever automatiquement les séismes pour faire cette comparaison sur nos données pluri-annuelles.

A.1.3 - Volet volcanologie, opération sismologie

Leader : partenaires 3 (LMV) et 1 (IRD-ISTerre) ; autre partenaire : 5 (Vanuatu)

Jean Battaglia CNRS-LMV ; Jean-Philippe Métaxian, IRD-ISTerre Chambéry ; Laurence Perrier, Chambéry ; Esline Garaebiti, et David Nakedau, (géohazards Vanuatu)

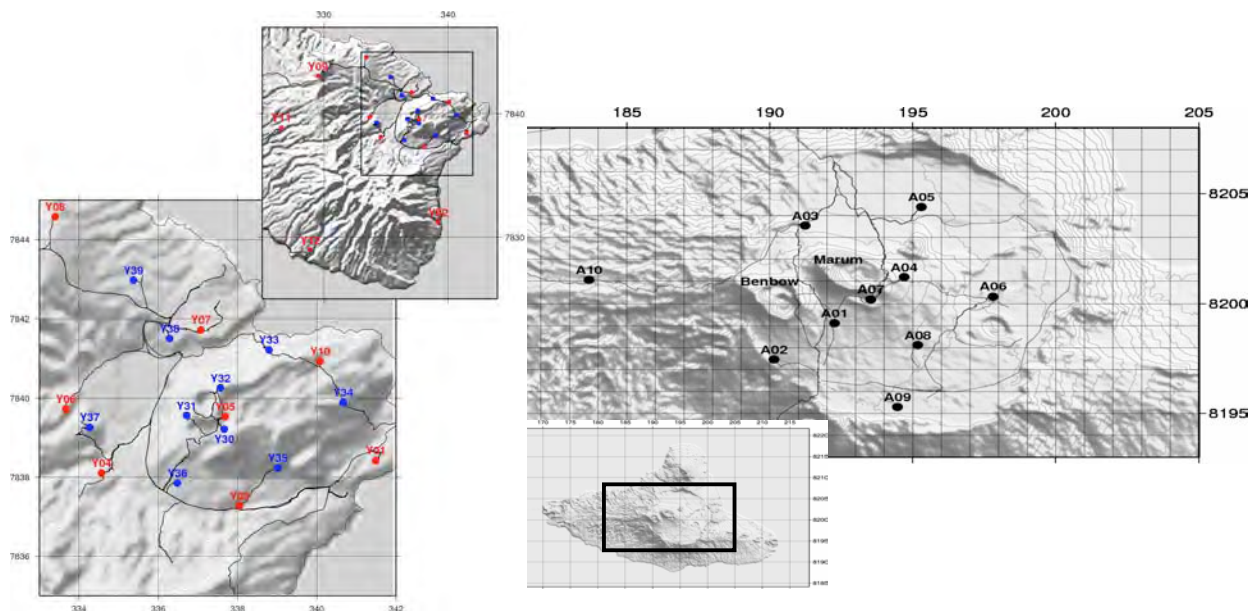
Le projet comportait l'installation de réseaux sismiques temporaires denses autour des volcans Yasur et de l'île d'Ambrym. Pour se faire, des stations sismiques ont été empruntées auprès des parcs d'instruments nationaux de Grenoble. Ainsi 12 antennes sismiques, chacune composée de 7 capteurs courte période (1 capteur 3-composantes et 6 capteurs 1-composante) ont été empruntées auprès du parc IHR (Imagerie Haute Résolution) et 10 stations large bande auprès du réseau Risc. Les 12 antennes ont été expédiées au Vanuatu en décembre 2007 et les 10 stations large bande en avril 2008. Il est à noter que ces dix dernières stations ont malheureusement été livrées avec près de 5 mois de retard.

Le matériel a tout d'abord été installé sur le Yasur (les 12 antennes sismiques en janvier 2008 puis les 10 stations large bande en mai 2008) pour former à un réseau final comportant 22 stations

autour du volcan (Figure). Il s'agit du plus dense réseau installé à ce jour sur ce volcan et l'intense activité strombolienne que nous avons ainsi pu enregistrer nous a permis de recueillir un jeu de données très riche dont l'analyse est encore en cours.

A la fin du mois de septembre 2008, 10 des stations du Yasur ont été démontées puis expédiées sur l'île d'Ambrym et installées fin octobre. A Ambrym, la logistique pour l'installation du réseau a été beaucoup plus lourde que pour le Yasur dans la mesure où aucune route ne permet d'accéder au sommet du volcan. Nous avons donc du recourir à des porteurs pour faire monter 800 kg de matériel dans la caldeira, y installer un campement et les stations ont dû être installées à pied dans des conditions climatiques parfois très difficiles. Malgré des problèmes techniques liés aux conditions difficiles, ce réseau nous a permis d'enregistrer une activité intense incluant en particulier plusieurs explosions du volcan Marum et un très fort trémor permanent.

Enfin, les deux réseaux ont été démontés du 15 janvier au 20 février 2009 et l'ensemble des stations a été expédié en France. Suite à cette installation temporaire deux stations sismologiques permanentes ont été installées en collaboration avec les autres partenaires du programme (IPGP, CEA, IRD, Vanuatu) sur les sites des mesures acoustiques, une à Ambrym et une au Yasur.

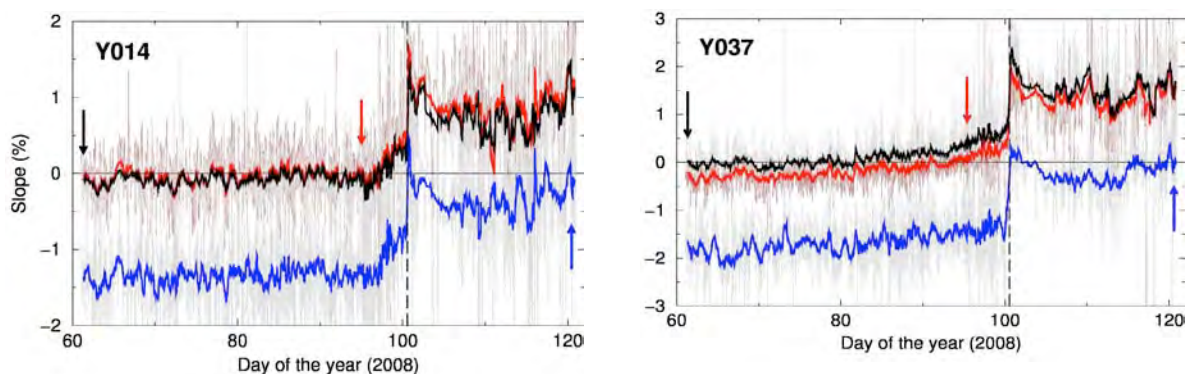


Carte des réseaux sismiques temporaires installés autour du volcan Yasur sur l'île de Tanna (à gauche : en rouge : antennes/capteur courtes périodes ; en bleu : capteur large bande) et sur l'île d'Ambrym (à droite).

Au total cette opération nous a permis de recueillir plus d'un an d'enregistrements sur le volcan Yasur et 3 mois de données à Ambrym. Grâce aux missions de longue durée (notamment IRD) effectuées (6 mois puis 2 mois pour J. Battaglia, et 2 mois pour J-P Métaxian) nous avons pu doubler la durée de l'installation sur le terrain par rapport à ce qui était initialement prévu dans le projet. Cela nous a permis d'obtenir des jeux de données uniques faisant un total de plus de 1.2 TB que nous exploitons actuellement. Les objectifs recherchés avec les données acquises étaient principalement: une meilleure compréhension de la plomberie des volcans, l'étude de leurs structures et de leurs dynamiques éruptives, une comparaison des techniques de localisation par les antennes et par les amplitudes (Battaglia et Aki, 2003) mais aussi de multiples comparaisons pluridisciplinaires avec les mesures de gaz, acoustique et radar.

Les analyses entamées sur les données du Yasur font apparaître des résultats très intéressants. Le réseau a enregistré des centaines de milliers de signaux transitoires qui sont liés à l'activité strombolienne. La classification de événements montre que cette sismicité inclut de nombreuses familles de signaux d'explosions similaires mais aussi des familles d'évènements Longue Période liés à des

processus plus profonds. Ces derniers semblent être des précurseurs à court terme des explosions. Leur étude devrait nous apporter des informations importantes sur la dynamique éruptive. L'étude des familles de signaux d'explosions indique qu'il existe des modes d'oscillations préférentiels des conduits volcaniques en réponse aux explosions stromboliennes. L'occurrence d'un large séisme de subduction ($M=7.3$) à 80 km du volcan semble avoir affecté ces modes en changeant les familles actives. Ceci nous a fourni un exemple novateur d'interaction entre les séismes tectoniques et les volcans. Enfin les techniques de « coda wave interferometry » (Poupinet et al., 1984 ; Snieder et al., 2002) appliquées à l'étude des familles d'explosions et d'évènement LP apportent des informations nouvelles sur les changements engendrés par le séisme distal sur la sismicité volcanique. En comparant les formes d'ondes pour des milliers de signaux LP enregistrés avant et après le séisme, il apparaît que le séisme distal a causé une baisse de la vitesse du milieu (Figure), maximale au niveau du volcan et qui décroît avec la distance en s'éloignant de l'édifice. L'ensemble de ces résultats a déjà donné lieu à plusieurs communications lors de conférences et colloques et des articles sont en cours de rédaction.



Comparaison aux stations/composantes Y014 et Y037 entre 3 LP de référence et 3600 évènements enregistrés avant et après un large séisme $M=7.3$ (ligne pointillée verticale) Les courbes montrant la pente du délais croissant entre les LP comparés font apparaître un saut au moment du séisme distal suivi par une relaxation.

Une étudiante (Laurence Perrier) effectuée par ailleurs sous la direction de Jean-Philippe Métaxian une thèse à Chambéry sur les données du Yasur principalement basées sur les techniques d'antennes. Suite à ces travaux un premier article soumis porte sur la localisation des sources sismiques grâce aux techniques d'antenne. Une seconde étude sur l'étude de la structure du volcan à partir de méthodes d'analyse du bruit sismique. Les résultats montrent une analogie entre le modèle de vitesse déterminé sous chaque antenne et la géologie. L'interpolation spatiale des modèles de vitesse déterminés en chaque point on permis d'obtenir un modèle 3D du volcan.

Enfin concernant toujours le Yasur des travaux ont été entamés avec Franck Donnadiou (LMV) dans le cadre du stage d'une étudiante (Dorianne Tailpied) pour corréliser les enregistrements radar avec les enregistrements sismiques.

En ce qui concernant les données d'Ambrym, des travaux effectués pour localiser les sources du très intense trémor permanent enregistré par notre réseau indiquent qu'il est possible de distinguer l'activité des cratères Marum et Benbow grâce aux techniques d'antenne.

A.1.4 - Volet volcanologie, partie dynamique et budget des processus de dégazage magmatique aux volcans Yasur et Ambrym

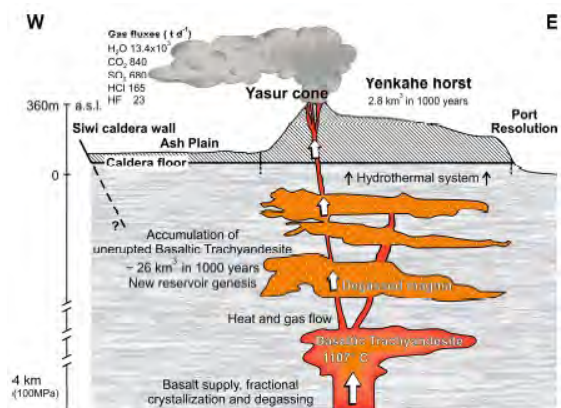
Leader : partenaire 4 (LPS-UMR9956, devenu SIS2M-UMR3299 au 01/01/2010. Autres partenaires : 3 (LMV), 5 (Vanuatu), LSCE et italiens

P. Allard, N. Métrich, O. Belhadj, P. Bani, plus autres partenaires et collaborateurs: P-J. Gauthier, P. Schiano, F. Sorbadère (LMV, Clermont-Ferrand), A. Aiuppa, F. Parello (Univ. Palerme, Italie), A. Bertagnini, M. Burton (INGV-Pise, Italie), P. Jean-Baptiste (LSCE, Saclay), E. Garaebiti (Geohazards, Vanuatu)

Notre objectif était l'étude pluridisciplinaire des dégazages magmatiques et, donc, des systèmes d'alimentation des volcans Yasur et Ambrym, en activité éruptive continue mais encore très peu étudiés. Pour ce faire, nous avons couplé l'analyse pétrologique et géochimique des produits solides des deux volcans (roches totales et inclusions vitreuses, éléments majeurs et en traces, contenu en volatils dissous, plusieurs centaines d'analyses) avec des mesures de composition chimique et flux massique de leurs émissions gazeuses (mesures in situ et par spectroscopies UV et FTIR, sol et aéroportées, plusieurs milliers de spectres). Cette étude a bénéficié du post-doc d'un an de P. Bani et d'actions conjointes du projet ANR CATT-Volgaspec. Les résultats obtenus à partir de 3 campagnes de terrain (2007-2010) et des analyses en laboratoire (par microsondes électronique, nucléaire et Raman, thermométrie optique, ICP-MS, chromatographie ionique, spectrométrie alpha et beta) sont entièrement novateurs et nous ont permis d'atteindre pleinement notre objectif. De plus, nous avons pu élargir nos investigations à d'autres volcans de l'arc du Vanuatu (Aoba, Gaua). Nos principaux résultats sont résumés ci-dessous.

(a) Première quantification du système d'alimentation magmatique du complexe Yasur-Siwi (Tanna)

L'étude conjointe des produits solides anciens et actuels de ce complexe (ignimbrite de Siwi, produits explosifs du Yasur depuis 1400 ans) et de ses émissions gazeuses nous permet de démontrer (Métrich et al., 2008, 2009, 2011; Allard et al., 2008, 2011 et en prép.): (i) son alimentation, depuis au moins 2 millions d'années, par un même basalte parent, relativement anhydre, qui se différencie en magma trachyandésitique par 50% de cristallisation fractionnée; (ii) un dégazage continu, partiellement ouvert du magma trachyandésitique ($1107 \pm 15^\circ\text{C}$) entre 5-4 km de profondeur et la surface, associé à un flux de chaleur intense (10^9 watts); (iii) un flux total de 15×10^3 tonnes/jour de gaz magmatique (97 mol% d' H_2O) émis par le Yasur, dont ~ 700 tonnes/jour de SO_2 et 165 tonnes/jour de HCl, qui, normé aux teneurs pré-éruptives en soufre et chlore dissous, implique un taux moyen d'alimentation en basalte de $0.05 \text{ km}^3/\text{an}$; enfin, (iv) l'accumulation de 26 km^3 de magma trachyandésitique dégazé en 1000 ans sous la caldera de Siwi, qui suffirait amplement à expliquer la résurgence cumulée (2.8 km^3) du horst du Yenkahe dans le même temps (Figure 1, ci-contre).



(b) Ambrym : un émetteur volcanique majeur de gaz et métaux dans l'Atmosphère

Nous produisons le premier spectre complet des émissions gazeuses et particulaires de ce volcan basaltique très actif, ainsi que les toutes premières données sur les volatils dissous dans son magma, son taux d'alimentation, et la profondeur probable de son réservoir. Nous démontrons que : (i) Ambrym produit entre 10 et 20% des émissions volcaniques annuelles de H_2O , CO_2 , SO_2 , HBr et ^{210}Po , et 5 à 8% des émissions de Cu, As, Sn et ^{210}Po (Figure 2). C'est donc est un émetteur volcanique majeur, qui doit désormais être pris en compte dans les inventaires globaux mais aussi au niveau local (impact chimique sur les écosystèmes et la population); (ii) Les deux centres actifs du volcan, Benbow et Marum, sont alimentés par un même réservoir (composition chimique similaire de leurs gaz) dont le toit, d'après les teneurs en H_2O et CO_2 du magma, serait à $\sim 3.6 \text{ km}$ sous la caldera (en accord avec les estimations sismiques de Legrand et al., 1995); et, (iii) Le dégazage intense du volcan est dû à un transfert volatil différentiel dans ses conduits mais aussi à un taux d'alimentation élevé en basalte ($\sim 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$ ou $0.36 \text{ km}^3/\text{an}$), qui suggère l'existence d'un réservoir de très large dimension en profondeur (Allard et al., 2008, 2009, et en soumission).

Species	Mean flux (±15-25%) tons.day ⁻¹	% of global volcanism *
SO ₂	7600	15
H ₂ O	2.0E+5	
CO ₂	2.0E+4	16
HCl	710	6.0
HF	180	13
Br	7.4	22
Sn	1.0	
Cu	0.7	6.0
Se	0.28	26
As	0.24	4.6
Zn	0.12	1.1
Tl	0.12	2.7
Pb	0.08	2.7

Figure 2 : Flux volatils et contribution globale du volcan Ambrym.

(c) Origine des magmas sous-saturés primitifs dans l'arc du Vanuatu et traçage des sources mantéliques par les isotopes de l'hélium

Les magmas sous-saturés (basaltes picritiques, ankaramites) émis dans l'arc du Vanuatu ont été échantillonnés dans les îles d'Ambrym, Ambae et Gaua, pour caractériser leur origine (éléments majeurs et traces, volatils dissous en inclusions des olivines magnésiennes). Les résultats déjà obtenus démontrent une origine cumulative des laves et produits pyroclastiques picritiques de Aoba (Sorbadère et al., 2010, et en révision). Cette étude, en cours (thèse de F. Sorbadère au LMV, mission 2010 financée par l'INSU), apportera des contraintes plus générales sur la genèse des magmas sous-saturés en domaine d'arc et la variabilité de leur contenu initial en halogènes.

Le rapport isotopique de l'hélium a été mesuré pour la première fois dans de nombreux échantillons fluides (eaux, gaz) et solides (olivines) de l'arc du Vanuatu, depuis Tanna au sud jusqu'à Gaua. Les résultats obtenus révèlent une remarquable variabilité du rapport ³He/⁴He le long de l'arc (de 4.5 R_a à Efate à 10.1 R_a à Ambrym) et, donc, des sources mantéliques différentes (Jean-Baptiste et al., 2009, et en prép.). En particulier, le haut rapport à Ambrym (nord) démontre une influence géochimique du hot spot fidjien, en accord avec l'influx de manteau 'indien' sous la partie centrale de l'arc.

A.2.1- Volet volcanologie, opération pétro-géochimie des magmas et temps de residence

Leader : partenaire 3 (LMV). Autres partenaires : Universités Brest et Lyon

Gilles Chazot (LVM, maintenant Univ Brest), Hervé Bertrand (Univ Lyon), Claude Robin (LMV)

Objectifs initiaux et réalisations

Les objectifs principaux de la partie pétro-géochimie du projet étaient centrés sur l'étude temporelle des magmas de deux édifices volcaniques principaux, Ambrym et Lopévi, ainsi que sur l'étude des inclusions magmatiques présentes dans les olivines des laves les plus primitives des îles de la partie centrale de l'arc volcanique. Devant l'intérêt de la thématique scientifique de l'étude globale du magmatisme de l'arc du Vanuatu, nous avons considérablement élargi nos objectifs pour étudier aussi le volcanisme de Santa Maria, et pour aborder l'évolution spatiale des magmas le long de l'intégralité de l'arc volcanique, en liaison avec la tectonique globale de la région.

Pour mener à bien ce projet, deux thèses ont débuté en septembre 2009, l'une à l'université de Brest et l'autre à l'université de Clermont-Ferrand.

Approche scientifique

Un échantillonnage de plusieurs îles avait été effectué par des chercheurs de l'IRD avant le début de ce projet. Deux missions de terrain ont permis de compléter l'échantillonnage sur les îles d'Ambrym, de Lopévi, de Paama et de Tanna. Plus de 200 échantillons ont été analysés par ICP-AES et ICP-MS pour les éléments majeurs et les éléments traces. Parmi ces échantillons, plus de 50 ont été analysés pour leur composition isotopique en Sr, Nd, Pb et Hf. Pour ce faire, une méthode de traitement chimique des échantillons a été mise au point afin de déterminer tous les rapports isotopiques sur une même attaque de roche. D'autres analyses sont encore en cours pour compléter cette sélection. Une chronologie relative du volcanisme a été établie sur le terrain afin de pouvoir localiser au mieux les échantillons dans l'évolution temporelle des édifices volcaniques.

Pour Ambrym, Lopévi et Santa Maria, les données sont utilisées pour étudier l'évolution de la composition des magmas au cours du temps sur chacun de ces édifices volcaniques. Ambrym et Santa Maria sont caractérisés par la présence d'une grande caldeira, partiellement comblée par un volcanisme plus récent et encore actif. Ces deux édifices ont émis des laves différenciées. Au contraire, Lopévi ne possède pas de caldeira et n'émet que des roches basiques à faiblement différenciées. L'objectif est donc d'observer l'évolution de la composition des magmas en relation avec l'évolution structurale des volcans, et notamment la formation des caldeiras.

Ces mêmes données sont aussi remises dans le contexte de l'arc du Vanuatu et complétées par les données chimiques et isotopiques provenant d'autres îles (données en cours d'acquisition) pour étudier l'évolution spatiale de la source des magmas le long de l'axe nord-sud de l'arc volcanique. Le but est

notamment d'évaluer le rôle joué par la subduction de la ride d'Entrecasteaux sur la composition du manteau et les conditions de genèse des magmas.

Pour les inclusions magmatiques, les échantillons les moins différenciés des îles d'Ambrym, de Santa Maria et d'Aoba ont été utilisés afin de séparer les olivines les plus primitives contenant des inclusions. Ces inclusions ont été analysées par microsonde électronique pour les éléments majeurs, par sonde ionique pour les éléments traces et par spectroscopie raman pour la détermination des teneurs en eau. Les compositions obtenues sont comparées à la composition des laves des différentes îles et utilisées pour reconstituer la composition chimique et minéralogique de la source dans le manteau.

Résultats

Les données géochimiques, tant sur les laves que sur les inclusions vitreuses sont encore en cours d'acquisition puisque les deux thèses n'ont commencé qu'en 2009. Néanmoins, des résultats sont disponibles et permettent de répondre à certaines des questions posées dans le projet.

Sur Lopévi, nous avons découvert des roches différenciées alors que toutes les éruptions historiques ont été basaltiques. Les magmas évoluent par cristallisation fractionnée dans une chambre magmatique superficielle où ils subissent de la contamination. Des résultats récents tendaient à montrer que ces magmas étaient contaminés par la croûte océanique sous-jacente. Nous montrons que cette contamination met en jeu des roches différenciées ($\text{SiO}_2 > 65\%$) inconnues jusqu'alors sur Lopévi. Ceci montre l'existence d'une période durant laquelle le Lopévi a émis des roches très acides avant d'acquiescer une activité essentiellement basaltique. Ces données seront à prendre en considération dans une évaluation des risques potentiels posés par les futures éruptions du volcan.

De plus, des différences de composition en éléments traces montrent une évolution entre les roches anciennes et les laves les plus récentes de Lopévi. Ces différences montrent une évolution des conditions de genèse des magmas dans le manteau, ainsi que des variations de compositions de la source des magmas. Cette évolution sera à mettre en perspective avec les observations faites sur les autres volcans de l'arc.

L'histoire de l'île de Santa Maria est marquée par la mise en place d'une caldeira puis d'un volcanisme à l'intérieur de cette caldeira. Les données géochimiques montrent des différences de composition de la source des magmas entre le volcanisme pré-caldeira et le volcanisme récent. Les laves récentes sont plus pauvres en K_2O et en éléments incompatibles mais plus radiogéniques en Sr. Ces données confirment l'hétérogénéité du manteau sous l'arc volcanique du Vanuatu, mais indiquent surtout une influence de l'évolution de l'édifice volcanique en surface sur la formation des magmas dans le manteau.

L'ensemble des données géochimiques acquises à ce jour indique une évolution N-S de la composition de la source des magmas le long de l'arc volcanique. Cette évolution se traduit par une augmentation des rapports isotopiques en Pb et une diminution des rapports isotopiques de Nd ainsi que des teneurs en éléments incompatibles. Cette évolution marque l'influence de la subduction de la ride d'Entrecasteaux au niveau des îles du centre de l'arc mais doit encore être complétée par des données géochimiques sur les îles les plus au nord (Vanua Lava) et plus au sud (Tanna, Matthew et Hunter).

L'étude des inclusions magmatiques d'Aoba a mis en évidence la présence de trois populations de liquides primitifs calco-alkalins sous-saturés en silice, qui se distinguent sur la base de leurs concentrations en éléments en traces. Seules les inclusions magmatiques avec des teneurs intermédiaires en LILE peuvent être considérées comme représentatives des magmas parentaux des laves hôtes. Les deux autres populations d'inclusions sont plus riches ou au contraire plus pauvres en LILE. Ces populations reflètent donc un processus de mélange à plusieurs étapes entre des liquides de péridotites de haute pression et des liquides issus de la fusion de lithologies enrichies en clinopyroxène et contenant ou pas de l'amphibole.

Une étude plus générale sur l'origine des magmas sous-saturés présents en domaine de subduction a aussi été conduite à partir de données de la littérature sur les inclusions magmatiques et de nouvelles analyses d'inclusions en provenance d'Ambrym, de Santa Maria et Aoba, mais aussi du Galunggung (Java) et d'Alicudi (arc éolien). Les résultats soulignent le rôle de l'amphibole dans la genèse de ces liquides ainsi que les participations respectives des lithologies péridotitiques et pyroxénitiques.

A.2.2 Volet volcanologie, opération cyclicité des éruptions par l'utilisation des éléments traces dans les coraux

*Leader : partenaire 1 (IRD) ; autre partenaire : australiens
Guy Cabioch (IRD-LOCEAN), Alibert C. et Eggins S. (ANU)*

Lors des récentes éruptions du volcan Lopévi, certaines des îles adjacentes à ce volcan ont reçu jusqu'à un mètre de cendres. Dans ce contexte, le premier objectif de cette opération était de tester sur la période moderne et historique si le signal géochimique enregistré dans les coraux massifs (marqueurs de températures de surface de la mer, Sr et U et de la fertilisation des eaux, Mn, P, Fe et Ba) pouvait être relié à des éruptions volcaniques connues. Après validation de la méthode, il était prévu des analyses sur des coraux anciens et multiséculaires.

Afin d'établir la fiabilité de la méthode, deux ranches de coraux *Porites* vivants ont été échantillonnés sur l'île d'Epi et analysés. Ces deux coraux ont été prélevés sur des récifs frangeants au nord-est et au nord-ouest de l'île, située au sud des volcans actifs de Lopevi et Ambrym et à l'ouest de volcans sous-marins (volcans nord Epi).

Des différences majeures ont été observées dans les coraux provenant des deux sites. Dans celui du nord-ouest, la structure est conservée et les mesures de géochimie indiquent que les reconstitutions de température de surface de la mer sont conformes aux températures escomptées. Dans le corail vivant provenant du nord-est de l'île, des particularités dans sa structure même ont été observées ainsi que des mesures géochimiques non conformes. Le squelette corallien immédiatement sous la partie vivante contient jusqu'à 20% de calcite non magnésienne sur une période de 4 ans, alors que la partie basse en contient de l'ordre de 1,5 à 2%. La présence d'une telle calcite reflète des modifications de structure et de minéralogie liées à l'environnement. A noter que le site de prélèvement est éloigné de toutes embouchures de rivière, la présence d'eau douce pouvant expliquer de telles modifications. De plus, cette partie du squelette contient de fins liserés noirâtres qui après analyse se sont avérés ne pas être de la matière organique mais présentant des traces de silice. Des éruptions volcaniques aériennes et / ou sous-marines pourraient être à l'origine de tels dépôts. Des mesures de paléo-pH (analyse du bore dans le corail) sont également en cours pour tenter de déterminer la cause et les mécanismes de la calcitisation du squelette corallien sous la partie moderne vivante.

A ce jour, rien de tel n'a été observé. Il s'agit en effet d'une modification du squelette, d'une dissolution partielle et d'une calcitisation de celui-ci. A signaler que la calcitisation n'affecte pas les cavités intrasquelettiques (pores coralliens). Cette modification de structure s'accompagne de modification géochimique. La recherche de causes et de mécanismes pouvant expliquer ces modifications (liaison avec l'activité volcanique locale ?) est toujours en cours.

A3 - Volet volcanologie, opération structure du Yenkahe-Yasur

*Leader : partenaire 3 (LMV Clermont Ferrand) ; autres partenaires : 2 (IPGP) et 5 (Vanuatu)
Jean-François Lénat (LMV), Antony Finizola (IPGP)*

Un ensemble de données géophysiques a été acquis sur le terrain en juillet 2008 (tomographie 2D de résistivité électrique, polarisation spontanée, CO₂ et température du sol, gravimétrie), complété par des observations géologiques et de l'imagerie satellitale (VIS, PIR, TIR et INSAR). Les interprétations préliminaires ont été menées dans la cadre de 3 Masters, et une thèse commencera en septembre 2011.

La caldera de Siwi correspond à une anomalie gravimétrique négative qui traduit la présence d'un remplissage de densité inférieure à celle de son substratum. Aucun corps intrusif dense de grande ampleur, pouvant expliquer la résurgence du dôme, n'est mis en évidence. Par contre, un système hydrothermal, identifié par des faibles valeurs de résistivité, des anomalies thermiques et CO₂, est mis en évidence. Son toit se situe à environ 150m sous la surface du bloc résurgent et il s'étend localement jusqu'en surface par l'intermédiaire de failles. La faible résistivité et les observations en surface suggèrent une intense argilisation du milieu, conduisant à un scellage (diminution de perméabilité). Ceci explique la faiblesse du dégazage diffus et des anomalies thermiques observées sur le dôme, à l'exception de zones de failles et de l'évent du Yasur. L'altération hydrothermale des roches dans l'édifice engendre un risque d'étalement gravitaire ou de glissement du dôme, pouvant s'accompagner d'explosions hydrothermales.

L'interprétation des données acquises n'est pas totalement finalisée et des données complémentaires vont être acquises. De plus, un volet concernant l'influence de la tectonique régionale et gravitaire sur la caldera de Siwi et le dôme du Yenkahe a été entrepris.

B1 - Volet tectonique, opération sismologie

Leader : partenaires 1 (IRD géoazur) et 2 (IPGP). Autre partenaire : 5 Vanuatu

Wayne Crawford (CNRS-IRD Géoazur-IPGP), Marc Régnier et Y. Hello (IRD-Géoazur), David Nakedau, Janvion Cuevard et Sophie Jimmykone (Geohazards Vanuatu)

Le financement de cette partie sismologie ne permettait pas l'acquisition de sismomètres et systèmes d'enregistrement. Nous avons donc emprunté 20 stations « large bande » du parc national français. Chaque station consistait en un sismomètre Guralp CMG-40 (bande passante de 60 secondes à 50 Hz), un système de numérisation/stockage Taurus (Nanometrics) et deux panneaux solaires avec régulateurs. A ce réseau terrestre, ont été ajoutés 10 sismomètres fond de mer de l'IRD contenant, eux aussi, des sismomètres Guralp CMG-40 et dont le déploiement a été financé par l'IRD/GeoAzur, l'IPGP et l'IRD (2 missions en mer du N.O Alis). Le réseau devait être déployé pendant 6 mois, de mai à novembre 2008, sur deux blocs sismotectoniques identifiés par leur mouvements verticaux et les séismes historiques [Taylor et al., 1987, JGR].

Les stations terrestres, déployées en avril-mai 2008 (mission de 30 jours pour repérer et préparer les sites, puis installer les stations) ont été visitées tous les 2 mois pendant des missions de 2 semaines pour récupérer les données et vérifier leur fonctionnement jusqu'à fin février 2009. Les sismomètres fond de mer ont été déployés du 17 au 22 mai 2008 et récupérés fin novembre 2008. Les derniers n'ont fonctionné que 2-3 mois sur les 6 mois prévus et la plupart des données des sismomètres sont inexploitable (problème de câblage). Heureusement, les hydrophones ont fonctionné et nous ont permis de pointer les séismes. Les stations terrestres, elles aussi, ont eu des problèmes de câblage, les faisant fonctionner en mode courte période (bande passante 1 seconde à 50 Hz). Heureusement, après l'identification de ce problème en novembre 2008, le parc français nous a donné les informations pour mettre les sismomètres en mode normal et a prolongé le prêt pour 4 mois supplémentaires jusqu'en fin février 2009. A la fin du déploiement temporaire, 5 stations LB Guralp (financement IRD et Fonds pacifique) ont été installées sur Santo et Mallicolo sur les meilleurs sites et selon la meilleure géométrie possible.



Les sismomètres terrestres (en rouge) et fond de mer (en bleu)

Résultats

Toutes les données des stations ont été extraites et mises dans une base de données unifiée. Il n'y a pas eu de séisme majeur. Mais plus de 13000 séismes ont été enregistrés pendant les dix mois de l'expérience, soit plus de 40 événements/jour. 2000 sont situés sous le réseau et 5000 à moins d'une ouverture du réseau. La plupart des séismes se situent sur la limite interplaque, mais il y a aussi de nombreux événements intraplaques. Plusieurs essais ont été identifiés, y compris au moins un au niveau de la zone de collision entre le guyot d'Entrecasteaux et la plaque « Pacifique » portant les îles de Vanuatu.

Notre premier objectif est de localiser et cataloguer tous les séismes identifiés. Une thèse (Christian Baillard) a commencé en septembre 2010. Avec un tel nombre de stations et de séismes, un pointage automatique s'impose, mais les logiciels « classiques » ne se sont pas révélés assez performants. 1000 séismes pointés manuellement sont utilisés pour tester un nouvel algorithme de pointage automatique. Le travail comprendra ensuite: 1) une étude tomographique de la structure de vitesse sous les îles, 2) la localisation précise de l'interplaque et l'identification des aspérités topographiques (par exemple, des monts sous-marins en subduction) et physiques (des trous de sismicité indiquant un blocage ou glissement libre), 3) une étude de la structure de l'interplaque, et 4) une étude de la sismicité et des failles dans la croûte au-dessus de l'interplaque jusqu'à la surface.

Ces études vont notamment indiquer la géométrie de la subduction actuelle et les zones éventuelles de blocage ou de glissement libre qui pourraient être validés/identifiés par les données géodésiques récoltées simultanément sur la même zone. Les premières localisations indiquent que l'interface entre les plaques se situe seulement à quelques km sous la surface sous l'ouest de l'île de Santo et la plaque Australienne ne commence à « plonger » sous l'arc du Vanuatu qu'à 80 km de distance de la limite superficielle entre les plaques.

B2 - Volet tectonique, opération géodésie

Leader : partenaires 1 (IRD Géoazur) et 2 (IPGP). Autres partenaires : 5 (Vanuatu) et météo-France Valérie Ballu (CNRS-IRD Géoazur-IPGP), Marie-Noelle Bouin (Météo-Shom Brest), Tony Kanas, Jean-Claude Willy, et Philippe Koroka (Service topo Vanuatu)

La compréhension du cycle sismique, même lorsque celui-ci est relativement court comme au Vanuatu, nécessite un investissement à long terme. L'ANR ARC-Vanuatu a permis de poursuivre et intensifier sensiblement les efforts menés en GPS dans la région depuis les années 1990. La quasi-totalité des points du réseau vanuatais (près de 40 sites différents) ont été remesurés au moins une fois pendant la durée du projet (Figure 1). Seuls 4 sites n'ont pas pu être réoccupés, deux car les points avaient disparu (ANIW sur Aniwa et SHRK sur Santo) et deux par manque de temps (FTNV sur Futuna et DILB sur Erromango), le déplacement vers ces îles étant particulièrement coûteux en temps. Ces deux derniers points sont au programme de la mission planifiée en juillet 2011. La remesure du réseau va nous permettre d'améliorer l'estimation des vitesses inter-sismiques tout le long de l'archipel, et en particulier d'améliorer l'estimation de la composante verticale, qui est toujours la plus délicate en GPS. Les calculs GPS, ainsi que la combinaison des positions journalières et leur mise en référence dans l'ITRF, sont en phase d'achèvement et la modélisation suivra ensuite.

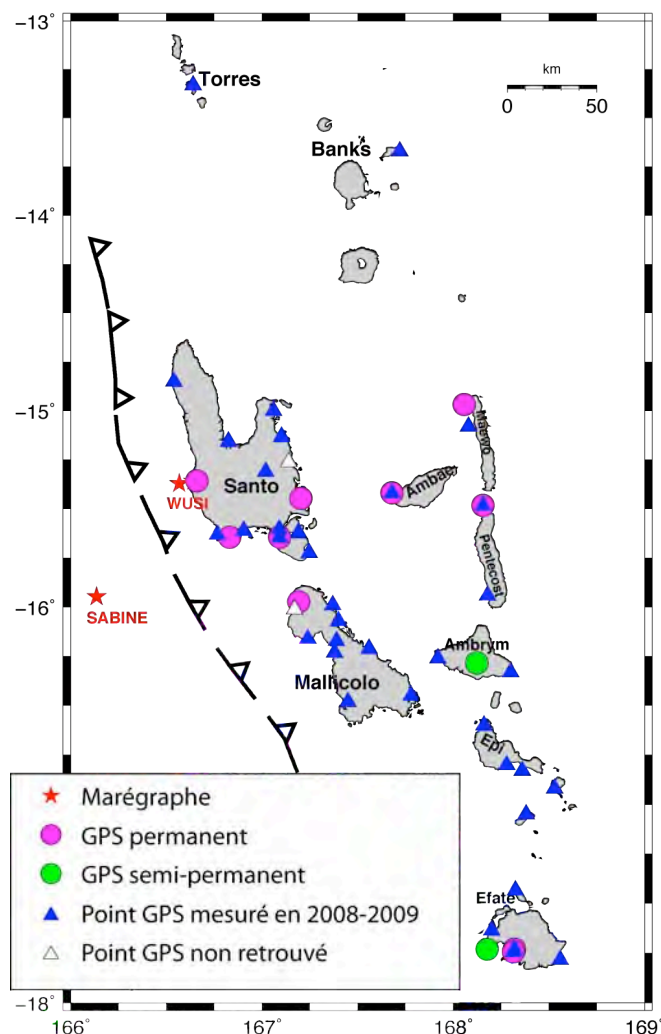


Figure 1 : Réseau géodésique du Vanuatu (zones centre à nord). Tous les points de cette zone qui ont pu être retrouvés ont été remesurés au moins une fois au cours du projet.

Parallèlement à la quantification du champ de vitesses inter-sismiques sur l'ensemble de l'archipel, un des points forts de notre activité dans le cadre de l'ANR a été l'installation de 8 stations d'enregistrement continu dans la zone centrale de l'archipel. Compte tenu de l'infrastructure existant et

des conditions de terrain, les stations sont autonomes et les données stockées sur place. Des missions régulières sont nécessaires pour contrôler le fonctionnement des stations et récupérer les données. L'objectif de ces enregistrements continus était notamment de détecter la présence de phénomènes transitoires et d'éventuels séismes lents. Aucun événement majeur n'a été identifié pour l'instant, mais les données sont toujours en cours d'analyse. Une partie du travail et en particulier l'analyse des relations déformation de surface/activité sismique sera effectuée dans le cadre du travail de thèse de Christian Baillard (thèse à l'IPGP démarrée en octobre 2010, sur l'analyse des données sismologiques et géodésiques acquises).

Notre présence sur place (dans le cadre d'une expatriation IRD) a été particulièrement bénéfique pour acquérir un grand nombre de données, notamment en réponse à des événements sismiques ou volcaniques ponctuels. Les déplacements co-sismiques des séismes ayant eu lieu depuis 2008 ont été estimés et la déformation a été modélisée avec un modèle élastique simple afin d'en déduire les failles qui ont bougé (tableau 1). Par ailleurs, suite à la crise du volcan Ambrym en 2009, nous avons établi un petit réseau de répétition au sommet et installé une station GPS semi-permanente dont les données pourront permettre une collaboration plus étroite avec les partenaires volcanologues du projet sur les variations temporelles de l'activité du volcan.

Lieu du séisme	Estimation du mouvement co-sismique (dans l'ITRF2005)			Vitesse intersismique estimée (par rapport à l'ITRF2005)
	Site 1	Site 2	Site 3	
SW bay (Mallicolo) 6.4/6.3 - Mars 2008	SWBY N: -7.8 cm E: -21.5 cm U: +6.2 cm			N: 3.9 cm / an E : 0.03 cm/an U: -0.2 cm/an
Maewo 6.4- Nov 2008	MAWO N:3.4 cm E: 1.6 cm U: -2 cm	MAEW N: 3.4 cm E: 9.3cm U: -2.6 cm		N: 3.1 cm / an E : -2.4 cm/an U: -0.5 cm/an
Tongoa 5.7 May 2009	TGOA N: -5.3 cm E: + 9.9 cm U: -3.6 cm			N: 2 cm/an E: -5.4 cm/an U: -0.6 cm/an
Efate 6.3- June 2009	VILA N: -0.3 cm E: -1.8 cm U: -0.2 cm	VANU N: -0.3 cm E: -2.0 cm U: -0.2 cm	DVIL N: 0.5 cm E: -4 cm U: -0.8 cm	N: 1 cm/an E: -5.8 cm/an U: -0.3 cm/an
Torres 7.8/7.6/7.4 - Oct. 2009	TORR N: -13 cm E: -11 cm U: +19 cm			N: 2.9 cm/an E: -3.2 cm/an U: -0.9 cm/an

Tableau 1 : Estimation du mouvement co-sismique des séismes ayant eu lieu en 2008 et 2009.

Durant la période du projet ANR, aucun événement sismique majeur n'a eu lieu dans la région centrale que nous avons choisie d'instrumenter plus particulièrement (en géodésie et sismologie). En revanche, il y a eu une crise sismique intense dans la région des Torres, au nord, avec 3 séismes majeurs (7.6, 7.8 et 7.4) en 70 minutes. Nous avons pu acquérir des données sur la déformation co-sismique et post-sismique liée à cette crise, dès le lendemain du choc principal (Figure 2). Un article soumis porte sur les mouvements verticaux qui ont affecté les îles des Torres et leurs effets sur les variations relatives du niveau marin dans ces îles, par comparaison avec les variations liées à la montée absolue du niveau marin (Ballu et al., soumis PNAS).



Figure 2a : GPS installé moins de 24h après le début de la crise sismique des Torres en octobre 2009 (nord du Vanuatu).

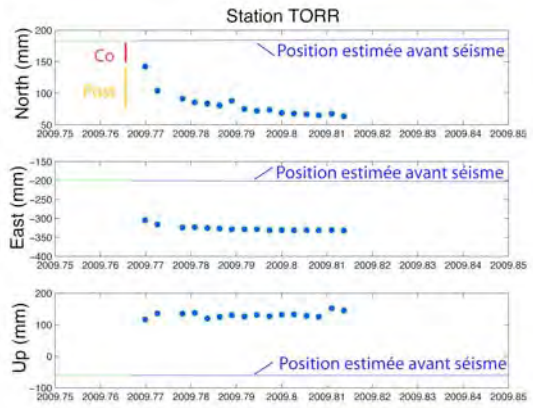


Figure 2b : Mouvements co-sismiques et post-sismiques estimés pour la station TORR sur l'île de Loh aux Torres. Une mesure effectuée en avril 2009 permet d'avoir une estimation de la position avant la crise sismique.

Dans le cadre du projet ANR, dans la continuité de ce qui avait été initié auparavant (Ballu *et al.*, 2009 ; Bouin *et al.*, 2009a et 2009b), nous avons également mené deux campagnes en mer sur le thème de la géodésie (Geodeva3 et Geodeva4) afin d'effectuer la relève des marégraphes en place (actuellement 3 marégraphes) et des mesures GPS cinématiques de la hauteur de la mer à l'aplomb de ces marégraphes (figure 3). Voir <http://www.ird.fr/toute-l-actualite/science-en-direct/campagne-geodeva-4>. Les données sont toujours en cours d'analyse, en complément de données altimétriques. La combinaison des données marégraphiques, altimétriques et GPS de surface devraient nous permettre d'estimer le mouvement vertical du fond sous-marin en deux points distincts, l'un situé sur la plaque plongeante et l'autre sur la plaque chevauchante, à l'ouest de l'île de Santo. L'objectif de ces mesures en mer, en complément de celles effectuées à terre, est d'obtenir un profil de la déformation verticale perpendiculairement à la limite de plaques. Ces données sont cruciales pour localiser la zone de blocage à l'interface entre les plaques convergentes.



Figure 3a : Mesure de hauteur de la surface de l'eau par GPS cinématique. 2 bouées GPS et le navire N/O Alis enregistrent en même temps, à proximité du marégraphe. La différence de hauteur liée à la distance entre les différentes plateformes de mesure, non négligeable dans une zone où le gradient du géoïde est fort, sera corrigée en utilisant un modèle de géoïde.

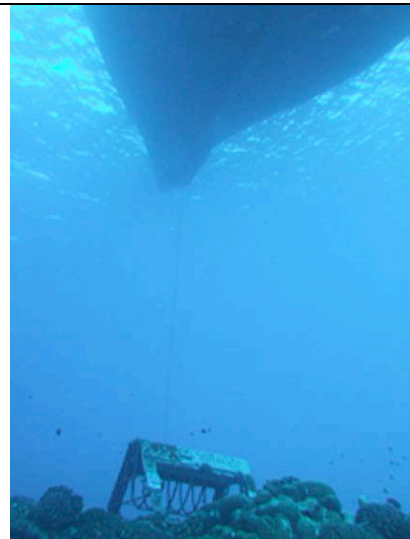


Figure 3b : Mesure GPS à l'aplomb du marégraphe de Banc Sabine avec le N/O Alis. Mai 2010, campagne GEODEVA4.

B3 - Volet tectonique, opération mouvements verticaux/coraux

Leader : partenaire 1 (IRD) + Vanuatu

Bernard Pelletier (IRD-Géoazur), Guy Cabioch (IRD-LOCEAN), Serge Andrefouet (IRD-Coréus)

La morphologie côtière, l'âge des terrasses récifales les plus basses et la morphologie des colonies coralliennes vivantes ont été étudiés le long des côtes des îles de la partie centrale de l'arc afin d'estimer la segmentation de la marge, les mouvements verticaux anciens et actuels et l'aléa sismique. Les images satellitaires Landsat et Quickbird et des photos aériennes ont d'abord été utilisées pour identifier les variations morphologiques longitudinales et définir les caractéristiques morphologiques des récifs et des pentes récifales des différents segments. Ensuite des segments de côte ont été visités lors de huit missions de terrain en 2008 et 2009 pour effectuer des mesures et un échantillonnage.

Les résultats indiquent une surrection au SW Mallicolo associée au séismes de 1994, des subsidences intersismiques suite aux soulèvements cosismiques des séismes de 1965 au NW Mallicolo et de 1999 à l'Est Ambrym, et une stabilité et/ou légère subsidence le long des côtes de Maewo et Pentecote. De nombreux échantillons de coraux prélevés dans les récifs soulevés sont en cours de datation et permettront de connaître les taux des mouvements verticaux et d'apporter des informations sur les zones de ruptures potentielles.