

# Processus et aléas volcaniques dans les pays en développement : apports des recherches partenariales de l'IRD au LMV

Jean-Luc LE PENNEC<sup>1-2</sup>, Claude ROBIN<sup>1</sup>, Olivier ROCHE<sup>1</sup>, Pablo SAMANIEGO<sup>1</sup>, Philipson BANI<sup>1</sup>, Julia EYCHENNE<sup>1</sup>, Julien BERNARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, CNRS - IRD - OPGC - Aubière, France.

<sup>2</sup>Représentation IRD Équateur, Alemania N32-188 y Guayanas, Quito, Équateur

## Résumé :

De nombreux pays en développement (PED) sont fortement impactés par les phénomènes volcaniques dangereux, mais ils manquent souvent de la connaissance et du matériel nécessaires pour appréhender au mieux les menaces éruptives. Afin de soutenir la production de connaissances, de déployer des instruments et expertises appropriées lors des crises, et pour former de nouveaux spécialistes des PED à l'analyse des aléas volcaniques, le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) a obtenu la tutelle de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-Orstom). La mission de l'IRD est de mener des recherches en partenariat sur les relations entre l'Homme et son environnement dans les pays intertropicaux. Ce chapitre présente l'activité du LMV-IRD dans les PED, en résumant les grands projets menés sur les chantiers sélectionnés. Il illustre plusieurs aboutissements concrets en termes de recherche volcanologique finalisée, d'appui à la gestion des crises, et de formation des jeunes cadres dans les pays partenaires.

## Abstract:

Many Developing Countries (DCs) are strongly affected by hazardous volcanic phenomena, but most of them lack the knowledge and equipment required to make adequate appraisal of the eruptive threat. In order to improve knowledge, to bring additional expertise and instruments, and to train new DC specialists on volcanic hazards, the Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) has obtained the tutorship of the Institut de Recherche pour le Développement (IRD, formerly ORSTOM). The aim of IRD is to conduct research with local counterparts on the relationship between humankind and its environment in intertropical countries. This chapter presents the activity of the LMV-IRD in DCs, through summarizing the main projects achieved in selected regions of the world. It illustrates a collection of results and outcomes in terms of applied volcanological research, support during crises management duties, and training of young experts in partner countries.



## 1 - Introduction

---

Le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) de l'université Clermont Auvergne (UCA, Clermont-Ferrand), en étroite collaboration avec l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont (OPGC), réalisent des recherches sur la genèse, l'évolution et l'éruption des magmas associés à différents types de contextes géodynamiques. Les objectifs fondamentaux de ces recherches sont d'une part de mieux comprendre les processus magmatiques depuis les zones sources des magmas en profondeur jusqu'à l'éruption en surface, et d'étudier les phénomènes liés à l'activité volcanique ou sub-volcanique (dynamismes effusifs, explosifs, ou passifs comme les fumerolles ou l'hydrothermalisme). Parallèlement, le LMV mène depuis de nombreuses années une coopération en volcanologie avec certains pays en développement (PED) de la zone intertropicale. Tout en apportant un appui technique approprié aux institutions partenaires (universités, instituts et observatoires, institutions publiques ou privées, autorités et décideurs politiques, populations etc.), cette coopération s'est avérée à plusieurs reprises pertinente, notamment pour anticiper les crises éruptives et les menacent qui en découlent.

Ce chapitre propose une brève synthèse du contexte historique et institutionnel des recherches volcanologiques menées conjointement par le LMV et l'OPGC d'une part, et des institutions de recherche et/ou enseignement de plusieurs pays en développement d'autre part. Ne pouvant prétendre à l'exhaustivité, il présente une sélection de thématiques et chantiers étudiés au cours des trois dernières décennies, et résume quelques résultats et expériences saillantes issus de ces travaux. Il offre ainsi une vue d'ensemble des problématiques et aboutissements des recherches sur les relations entre les volcans et les sociétés dans les PED partenaires.

### I-1. Les PED sont plus impactés par les catastrophes volcaniques

De nombreux volcans explosifs situés à l'aplomb des zones de subduction se situent dans des pays de la zone intertropicale, dont le niveau de développement est intermédiaire ou bas. Citons par exemple l'Indonésie, (environ 130 volcans géologiquement jeunes, de moins de 2 Ma), les Philippines, ou les pays des Andes (Chili, Pérou, Equateur, Colombie) et d'Amérique Centrale (Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala). Le registre des grandes catastrophes volcaniques de ces deux derniers siècles indique que la majorité d'entre elles s'est produite dans ces pays (Auker

et al., 2013). Par exemple on estime que la grande éruption de 1815 du Tambora en Indonésie a été la cause directe d'au moins 10000 victimes, et que des dizaines de milliers d'autres ont péri des suites de la famine et des épidémies (choléra, typhus) qui ont suivi l'événement volcanique, dont les effets ont été ressentis jusqu'en Europe. Dans le même pays, la célèbre éruption du Krakatoa en 1883 a provoqué un puissant tsunami tuant environ 36000 personnes. Toujours en Indonésie, l'éruption du volcan Kelut en 1919 a causé la vidange brutale du lac de cratère, déclenchant de volumineuses coulées de boue chaude qui ont recouvert une vaste région et ont dévasté la ville de Blitar, faisant plus de 5000 morts. Ces coulées de boue chargées de blocs de toutes tailles sont depuis décrites au niveau mondial sous le terme indonésien de « lahar ». Plus récemment, sur le continent américain, le Mexique a connu en 1982 l'éruption meurtrière du volcan El Chichón (1200 morts), alors que la Colombie a subi en 1985 la grande catastrophe d'Armero, où 25000 personnes ont péri dans les lahars provoqués par l'éruption du volcan Nevado del Ruiz. Citons enfin la puissante éruption du Pinatubo en juin 1991 aux Philippines, qui a tué environ 800 personnes et ravagé un large territoire au Nord de Manille sur l'île de Luzon. La France aussi garde en mémoire les crises volcaniques dans ses départements d'outre-mer, avec les 29000 décès liés aux nuées ardentes de la Montagne Pelée à la Martinique en 1902, et les 74000 personnes évacuées lors de la modeste éruption de la Soufrière de Guadeloupe en 1976. Au-delà de la mortalité et des évacuations volontaires ou forcées liées à ces catastrophes, il faut ajouter les destructions et nuisances plus ou moins graves et durables associées à l'activité volcanique, comme les dégâts causés par les nuées ardentes et coulées de boue (destructions d'habitations, de terrains, d'infrastructures publiques ou privées comme les routes, ponts, écoles, hôpitaux etc.), ainsi que ceux des retombées de cendres et pluies acides (effets sur la santé, l'agriculture et l'élevage, et le trafic aérien). Ces effets peuvent être ressentis à l'échelle locale, régionale, voire nationale ou internationale, et perdurer des semaines, des mois, ou des années.

Ce macabre rappel des désastres volcaniques récents souligne le fait que les PED des régions intertropicales ont été plus fortement frappés que les pays des régions tempérées, à plus haut niveau de développement. Dans ce contexte, le rôle des scientifiques, dont ceux du LMV-IRD, est de tenter de comprendre le *pourquoi* et le *comment* de ces catastrophes, en focalisant sur l'analyse des processus à l'origine de manifestations potentiellement meurtrières ou destructrices. Ces phénomènes dangereux sont qualifiés d'*aléas* ou *menaces* volcaniques : il s'agit des émanations gazeuses, parfois létales, des projections de blocs balistiques, des retombées de lapilli, de cendres, ou de pluies acides, des nuées ardentes (CDP : courants de

densité pyroclastiques au sens large), des avalanches de dômes ou de flancs de volcans, des coulées de boue associées à l'activité volcanique (fonte de glacier, fortes pluies sur cendres meubles etc.). Parallèlement, certaines populations sont plus exposées que d'autres aux dangers et nuisances volcaniques selon leurs niveaux d'éducation et leurs ressources économiques, et selon les aides que peuvent apporter les Etats ou d'autres entités (ONGs, institutions religieuses, réseaux familiaux ou autres etc.). Ces aspects sont décrits par une variable de *vulnérabilité* au sens large, faisant intervenir les dimensions psychologique (perception des menaces et réaction induite), économique (activités et infrastructures impactées, capacité d'adaptation et résilience etc.) et patrimoniale (valeur des biens et enjeux associés). Au final, il est commode de décrire le *risque volcanique* comme la combinaison des termes d'*aléa* et de *vulnérabilité*, ce qui implique des recherches et expertises réunissant les compétences des géoscientifiques et celles des spécialistes en sciences de l'Homme et de la société.

## **I-2. Historique et contexte institutionnel des recherches LMV-IRD dans les PED**

De nombreux projets de recherche sur les menaces volcaniques dans les PED ont été conduits au cours des années 1970 et 1980, notamment en Indonésie, au Mexique et en Colombie, dans le cadre des programmes de coopération du Ministère des Affaires Etrangères (MAE, aujourd'hui MAEDI, Ministère des Affaires Etrangères et du Développement International). Ces travaux se sont déployés sur la base d'une recherche en partenariat avec des institutions naissantes ou émergentes, avec un appui pour la surveillance lors des crises, et la formation de cadres de haut niveau (master et doctorat). Dans ces conditions, il devenait essentiel pour le laboratoire de volcanologie de l'université de Clermont-Ferrand de développer une haute expertise dans le domaine de l'étude des processus et des aléas volcaniques, surtout en contexte de volcanisme explosif associé aux zones de subduction.

Ce développement de compétences, principalement acquis dans ces trois pays au cours des années 80, s'est renforcé au début des années 1990 lorsque s'est développée une collaboration entre le LMV et l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, renommé en 1984 Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération). Cet organisme avait pour mission de contribuer au développement des sociétés des pays intertropicaux, notamment dans les anciennes colonies françaises des zones Afrique et Asie-Pacifique, en y conduisant de grands programmes de recherche. En 1998, l'ORSTOM est devenu Institut de Recherche pour le Développement (IRD), avec une profonde réorganisation de son mode de fonctionnement, désormais basé sur des représentations

de l'IRD dans les pays partenaires et une nouvelle segmentation des départements scientifiques. Dans ce cadre, l'équipe de volcanologie de l'IRD, chapeauté depuis 1992 par C. Robin, s'est rapprochée par convention du LMV pour conduire un programme de recherche sur les « processus et aléas volcaniques » dans des PED ciblés. Au début des années 2000, les unités IRD ont été intégrées dans les Unités Mixtes de Recherche (UMR) des universités françaises, et l'unité de volcanologie de l'IRD a rejoint en 2004 le LMV, ce dernier devenant naturellement la base métropolitaine pour les recherches menées par les volcanologues IRD. Parallèlement, l'évolution du mode de fonctionnement de l'IRD s'est poursuivi avec les institutions associées des PED, en structurant la coopération à l'aide d'*instruments de partenariat* qui sont à ce jour de trois types : les Jeunes Equipes Associées à l'IRD (JEA : petits groupes de chercheurs, ingénieurs, étudiants focalisés sur un thème d'étude précis, et destinés à former une entité de recherche pérenne), les Laboratoires Mixtes Internationaux (LMI : équipes étendues travaillant sur des thématiques prioritaires avec un important volet de formation), et les Programmes Pilotes Régionaux (PPR : vastes consortiums interdisciplinaires de recherche sur les grands défis liés aux questions de développement). Bien entendu, d'autres coopérations hors *instruments de partenariat* peuvent exister dans le cadre de projets divers, comme ceux financés par l'Agence Nationale de La Recherche (ANR), le CNRS, le MAEDI etc. Concrètement, les coopérations avec les institutions des pays partenaires sont généralement officialisées par des conventions cadres avec les universités et autres grands établissements, puis par des conventions spécifiques avec les laboratoires ou instituts spécialisés. La mise en place de ces conventions est coordonnée par les représentations de l'IRD dans les pays concernés, sous la supervision du siège de l'IRD à Marseille et des services homologues des organismes partenaires. Les représentations de l'IRD assurent également la mise à disposition de véhicules pour les recherches de terrain et d'autres activités d'animation et de gestion pour faciliter le travail dans les PED et valoriser les résultats de recherche et de formation au bénéfice des sociétés de ces pays.

## **II - Les grands thèmes et méthodes de recherche**

---

Au cours des trois dernières décennies, cinq thèmes principaux ont constitué l'essentiel des recherches abordées par l'IRD et ses partenaires dans les domaines du magmatisme et de la volcanologie.

### **II-1. Analyse géologique de l'évolution des volcans et des menaces associées**

Un premier thème consiste à évaluer les menaces à long, moyen et court termes sur la base d'études géologiques de volcans sélectionnés pour leur dangerosité, ou pour leur intérêt scientifique particulier (éruptions

remarquables, structures originales etc.). Il s'agit notamment d'estimer le plus précisément possible certains paramètres de l'équation de la menace volcanique, en focalisant sur la récurrence, la magnitude, et le style des éruptions passées. Déterminer la récurrence éruptive implique de dater les éruptions en examinant les archives historiques ou en utilisant les méthodes radiométriques (U-Pb, K-Ar, Ar-Ar, radiocarbone etc.), ce qui requiert de travailler avec divers laboratoires spécialisés dans ces techniques. Estimer la magnitude des éruptions passées nécessite d'établir des bilans de matière à partir des produits solides émis par les volcans. Pour les éruptions explosives cela revient à étudier les dépôts de retombées (dont l'épaisseur décroît exponentiellement avec la distance à la source) et les produits de courants de densité pyroclastiques (PDC). La magnitude des événements explosifs peut s'exprimer à l'aide de l'Indice d'Explosivité Volcanique (*volcanic explosivity index* ou VEI, Newhall et Self, 1982), fonction du volume brut de produits pyroclastiques, et compris dans une échelle de 1 à 9, ou en utilisant d'autres paramètres basés sur la masse. Cette analyse géologique des menaces exige de longs travaux, tant sur le terrain qu'au laboratoire : par exemple, la détermination du type (effusif-extrusif ou explosif, phréatique, phréato-magmatique, ou magmatique) et du style des éruptions (strombolien, subplinien, plinien, vulcanien, etc.) nécessitent des études détaillées faisant appel à la sédimentologie et lithologie des produits, aux analyses chimiques et texturales, etc. L'interprétation des produits permet de reconstituer les phases de construction et de destruction des édifices, et la délimitation des zones potentiellement menacées pour chaque type de phénomène. L'intégration de ces données, lorsqu'elles sont suffisamment nombreuses et précises, permet d'établir de véritables modèles de comportement fréquence-magnitude-style pour des volcans individuels, voire pour un groupe de volcans de comportements similaires.

L'approche géologique est complétée au laboratoire par les simulations analogiques et numériques des phénomènes volcaniques ou connexes (lahars), ce qui conduit à préciser la fréquence, l'extension, ou la typologie des menaces potentielles. Au final, l'ensemble de ces travaux permet d'élaborer des cartes d'aléas volcaniques délimitant les zones menacées et leur degré d'exposition. Elles sont très utilisées dans le milieu académique et par les institutions en charge de la gestion des risques, dans les PED comme ailleurs.

## II-2. Genèse et évolution des magmas

Le comportement éruptif des volcans, décisif quant à la menace sur les personnes et les biens, est en partie contrôlé par la composition des magmas. En effet, la rhéologie des magmas et la capacité de ces derniers à libérer les fluides responsables de leur ascension et de l'éruption dépendent de divers paramètres comme la composition du liquide magmatique, la teneur en cristaux du magma, ou le degré de vésicularité. La caractérisation

de cette rhéologie est extrêmement complexe car, par exemple, ce dernier paramètre contrôle lui-même les modalités de coalescence des bulles, le seuil de fragmentation, etc. Afin d'appréhender au mieux l'impact de ces mécanismes sur le type et la puissance des éruptions en gestation, il est donc fondamental de comprendre les processus de genèse et l'évolution précise de ces magmas au cours de leur différenciation. Dans ce domaine, les recherches conjointes du LMV-IRD et des partenaires des PED se fondent sur les analyses chimiques (éléments majeurs et en traces), isotopiques, et texturales des produits à partir d'un échantillonnage méticuleux réalisé sur le terrain (sélection de produits frais non altérés ou contaminés, représentatifs des différents stades et phases d'évolution). Le LMV dispose d'un parc instrumental particulièrement performant pour ce type de recherche nécessitant différentes techniques de mise en solutions et d'analyse, sur roche totale ou sur minéraux et verre (microsonde électronique). Des techniques au laser sont utilisées pour déterminer la concentration de certains éléments dans les minéraux ou même dans les inclusions fluides qu'ils renferment. D'autres études utilisent les isotopes de certains éléments (Sr, Nd, Pb, O, Re, Os, Li etc.), dont les fractionnements renseignent sur les mécanismes en jeu dès la formation du magma à grande profondeur, ainsi que dans les systèmes d'alimentation ou de stockage au sein de la croûte continentale (e.g. fractionnements isotopiques entre les minéraux et les liquides interstitiels). A partir des données analytiques obtenues, des modélisations aident à quantifier les paramètres régissant l'évolution des magmas et ainsi à mieux comprendre les processus pétrogénétiques. Parallèlement, des expériences de pétrologie expérimentale réalisées au LMV en conditions contrôlées permettent d'étudier des processus complexes pour des conditions variées de composition, de température, et de pression compatibles avec celles existant dans la croûte et le manteau supérieur.

### **II-3. Les structures et les écoulements volcaniques**

De nombreuses études réalisées par le LMV dans les PED concernent le rôle des structures et des écoulements volcaniques dans le développement de menaces particulières. Par exemple, des travaux s'attachent à connaître les relations entre la tectonique locale ou régionale et la construction ou la destruction des édifices volcaniques. En effet, la croissance et l'effondrement de nombreux volcans sont déterminés par des systèmes de failles, dont le rôle dans la localisation des événements, le déclenchement des glissements de flanc et la direction des avalanches de débris est important. L'examen de ces questions nécessite généralement des études détaillées de terrain, faisant par exemple intervenir des spécialistes de tectonique, et doit intégrer les résultats de simulations analogiques ou numériques en laboratoire (e.g. Paguican et al., 2012).

D'autres recherches s'adressent aux courants de densité pyroclastiques (CDP), qu'il s'agisse de courants denses (coulées pyroclastiques), ou dilués (déferlantes pyroclastiques). Deux approches principales sont utilisées. D'une part, l'étude détaillée des produits naturels est essentielle pour identifier les mécanismes mis en jeu (analyses granulométriques et texturales, lithologie des composants, etc.). D'autre part, la reproduction en laboratoire de ces écoulements granulaires permet de mettre en évidence les comportements spécifiques à certaines populations de grains (par exemple les plus grossiers, ou les plus lourds), et d'obtenir des lois d'échelle applicables aux cas naturels. Les rôles de la pente d'écoulement, de la vitesse de propagation, de la rugosité du substrat, de la distribution granulométrique et concentration en particules sont ainsi précisés. Une approche complémentaire consiste à simuler virtuellement les écoulements à l'aide d'outils numériques, en utilisant les équations de propagation de fluides dont la rhéologie et les paramètres d'écoulements (volume, masse, angle de friction etc.) sont fixés au départ. Ces différentes études sont pertinentes pour prévoir les zones potentiellement affectées par les CDP et avalanches de débris au cours de futures éruptions. Sur ce plan, le LMV est à la pointe au niveau mondial, et plusieurs études numériques ou expérimentales simulant des avalanches granulaires sont applicables à celles de volcans situés dans des pays en développement (e.g. Kelfoun et al., 2009 ; Valderrama et al., 2016).

## **II - 4. Etudes et appuis lors des crises volcaniques**

Les éruptions volcaniques constituent à la fois des menaces pour les personnes et les biens situés à proximité, et d'autres nuisances pour les populations plus éloignées (chutes de cendres, coulées de boue etc.) Pour l'OPGC comme pour le LMV et ses missions IRD, il s'agit donc d'apporter aux partenaires locaux l'expertise et le matériel disponible pour aider à l'identification de paramètres ou de faits précurseurs d'une phase paroxysmale lorsque l'activité éruptive a débuté. Afin d'affiner les scénarios d'évolution de l'activité, des stations de mesures statiques ou mobiles, temporaires ou permanentes sont installées, en complément des réseaux maintenus par les partenaires. Ces actions spécifiques produisent des données en temps courts en géophysique (sismologie volcanique, géodésie etc.), en géochimie des gaz (spectrométrie à distance de type DOAS, FTIR), en surveillance thermique (caméra UV) ou satellitaire (par exemple service HOTVOLC de l'OPGC).

## **II - 5. Vers l'intégration du terme de vulnérabilité**

Au-delà des études concernant les menaces à long, moyen et court termes, il est apparu de plus en plus nécessaire de prendre en compte la dimension

« vulnérabilité » dans l'analyse du risque volcanique. Il est en effet difficile d'appréhender ce risque en se limitant à l'aléa, car l'impact des phénomènes éruptifs sur la société résulte pour une large part du mode de vie, de l'habitat etc., globalement de la réaction des populations face à la menace. Ainsi, il est progressivement devenu évident que la volcanologie dans les PED ne pouvait pas se limiter à l'examen du facteur « aléas » mais devait inclure des recherches transverses avec les sciences humaines et sociales. Le développement de cet axe de recherche a pu se mettre en place à l'aide du grand projet de Laboratoire d'Excellence (labex) du programme d'Investissement d'Avenir du gouvernement français porté par le LMV. Ce labex nommé ClerVolc pour « centre Clermontois de recherche sur le volcanisme » met en synergie plusieurs laboratoires du pôle de recherche clermontois (voir Druitt, ce volume). Son activité se décline en sept grands thèmes de recherche, dont l'un est axé sur les impacts sociétaux des phénomènes volcaniques. Dans ce contexte, des projets spécifiques ont été déployés sur des cibles choisies. Citons par exemple des simulations numériques pour cartographier les zones inondables en cas de tsunamis dans les lacs de certaines caldéras du Kamchatka et de Grèce, ou les études de vulnérabilité du bâti face aux coulées de boues dans la ville d'Arequipa au pied du volcan Misti au Pérou.

### **III - Etudes sur la zone Asie-Pacifique**

---

#### **III - 1. Le volcanisme de l'archipel du Vanuatu et les menaces associées**

##### ***a) Le programme de recherche sur les grandes éruptions basaltiques : contexte et résultats***

A partir de 1990, un des principaux chantiers ciblés pour les recherches volcanologiques du LMV-IRD dans le Pacifique Ouest est l'archipel de Vanuatu, situé à proximité de la Nouvelle Calédonie, où se trouve un important centre de recherche de l'IRD (fig. 1). Ce programme, adossé à d'autres programmes géodynamiques que poursuivait l'IRD (alors Orstom) dans cette région, a débuté avec le détachement de deux années de C. Robin de l'UBP vers cet institut, initiant les relations étroites entre l'IRD et le LMV qui se pérennisèrent quelques années plus tard. Les recherches, en partenariat avec le *Department of Mines and Water Resources* (DMWR) du Vanuatu avaient trois objectifs : 1) la caractérisation du volcanisme, fortement explosif, parfois lié à l'éjection de grands volumes d'ignimbrites dans un contexte de magmas relativement peu différenciés ; 2) l'élaboration de modèles de développement des appareils volcaniques, en insistant sur le stade caldéra et les dynamismes éruptifs associés à ce stade ; 3) Les

relations entre ces développements et l'évolution magmatique globale de l'arc en fonction de sa position et de son évolution sismotectonique. Ces orientations devaient prendre en compte plusieurs facteurs propres à l'arc du Vanuatu : un taux exceptionnel de production de basaltes, comparé à d'autres arcs insulaires; une vitesse très élevée de convergence (9-12 cm/an); un environnement tectonique localement extensif permettant de violentes interactions eau/magma et une croûte relativement mince (15 à 20 km en moyenne), mais suffisamment épaisse pour permettre le piégeage de larges volumes de magmas à faible profondeur. Ces questions faisant appel à une bonne connaissance du contexte structural, l'équipe a dû intégrer des recherches à terre et en mer, les édifices émergés ne représentant que les stades récents d'une longue évolution. A cet effet, plusieurs campagnes en mer ont été menées de 1991 à 1994, en utilisant le navire océanographique de l'IRD, l'Alis.

Ces recherches ont montré qu'en domaine d'arc océanique, une longue activité effusive « calme » peut évoluer vers une activité explosive intense sous l'action de l'eau externe, remettant en cause l'idée reçue selon laquelle les types d'éruptions des volcans basaltiques sont toujours moins nombreux

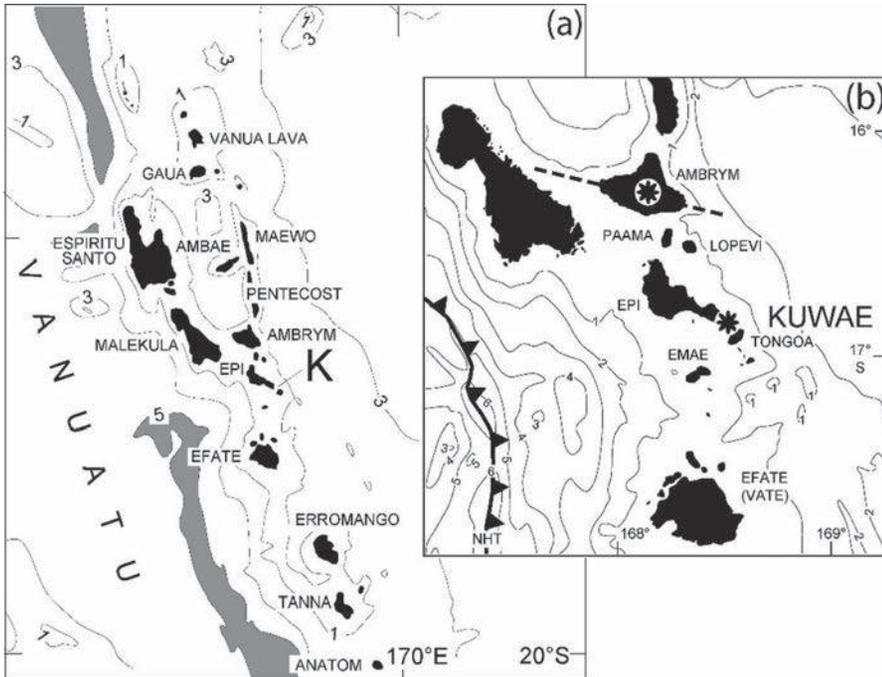


Figure 1 : (a) Carte de l'archipel du Vanuatu montrant, en noir, les principales îles. Les lignes isobathes sont indiquées avec les valeurs en km sous le niveau de la mer. La zone grisée se trouve sous l'isobathe 5 km et correspond à la fosse de subduction. K indique l'emplacement de la caldéra sous-marine de Kuwae. (b) Détail de la zone centrale de l'archipel. Les étoiles noires représentent les grandes caldères étudiées dans le programme et décrites dans le texte. La ligne avec triangles noirs schématise la zone de subduction et la ligne pointillée passant par Ambrym représente le système de failles (rift central) traversant l'île.

et d'intensité moins forte que ceux des volcans andésitiques. Dans le cas des volcans du Vanuatu, l'hydrovolcanisme atteint une importance inhabituelle puisqu'il est à l'origine de structures caldériques comparables, en superficie et volume, aux grandes caldères continentales. Le début du développement des appareils ressemble à celui des volcans hawaïens avec une activité relativement calme, effusive et régulière. Pendant ce stade, l'alimentation continue de la chambre et sa vidange épisodique vers le haut par l'intermédiaire de fractures et d'événements externes disposés sur les flancs n'autorisant pas une différenciation importante des magmas, et les édifices demeurent pour l'essentiel basaltiques. Toutefois, d'intenses interactions eau-magma interviennent régulièrement, provoquant l'émission rapide de plusieurs kilomètres cube de magma. Plusieurs exemples sont remarquables ; il y a environ 2000 ans, la caldéra d'Ambrym s'est formée en trois étapes (Robin et al., 1993) : 1) une vidange latérale de volumineux épanchements de basaltes à mégacristaux sur les flancs, responsables de la formation d'une proto-caldéra de dimensions « normales », comparable à celles des volcans hawaïens. 2) L'émission de produits pyroclastiques initie le cycle hydro-magmatique et produit la vidange de la partie supérieure différenciée de la chambre magmatique, très minoritaire en volume. Les parties sous-jacentes à ce toit sont ensuite évacuées sous forme de pyroclatites (écoulements et retombées) dont la pétrologie est identique à celle des laves émises latéralement. 3) Cette activité pyroclastique se poursuit, provoquant un élargissement progressif de la caldéra initiale jusqu'à ce que la dépression, entourée d'épais dépôts pyroclastiques recouvrant tous les flancs, atteigne 12 à 13 km de diamètre et prenne l'aspect d'un « super-maar » (fig. 2).

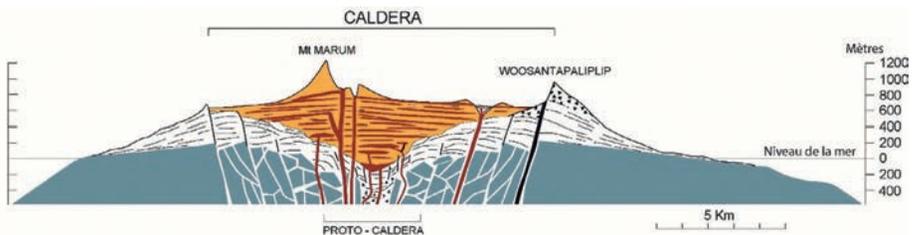


Figure 2 : Coupe nord-sud de l'île d'Ambrym montrant l'interprétation de la structure d'effondrement de la caldéra associée. La base gris-bleu correspond au soubassement volcanique anté-caldérique. Les produits lités blancs représentent les séquences pyroclastiques formées lors des étapes d'effondrement de la caldéra. Les produits en orangé et pourpre schématisent le remplissage intra-caldérique, principalement constitué par l'alternance de coulées de laves et de retombées pyroclastiques.

Les îles de Gaua au centre de l'archipel et Vanua Lava au Nord présentent des caldères comparables à celle d'Ambrym. Autour d'une caldéra de  $6 \times 8$  km, une épaisse séquence de dépôts de coulées pyroclastiques de composition basique, aux caractéristiques hydromagmatiques marquées, recouvre le cône lavique correspondant à l'île de Gaua (Robin et al., 1995). Dans la partie sud de l'arc, l'île de Tanna est elle aussi en grande partie recouverte

d'une épaisse série de pyroclastites ignimbritiques provenant d'écoulements dirigés d'Est en Ouest (Robin et al., 1994a). Des données bathymétriques sous-marines (campagne CALIS, Mai 1991) ont montré que la forme en croissant de Tanna correspond aux flancs ouest et sud d'un appareil de 40 km de diamètre dont les parties centrale et orientale sont actuellement sous la mer. Ce type d'édifice caractéristique de l'arc du Vanuatu, inconnu auparavant, a été rencontré depuis dans d'autres arcs (Aléoutiennes, Tonga, et Sud de l'arc chilien). Une des très rares caldéras à terre pouvant être comparée à ce type d'édifice est celle de Masaya au Nicaragua.

La dernière grande caldéra qui s'est formée au Vanuatu, Kuwae, correspond à un mécanisme d'effondrement plus « classique », lié à la mise en place d'ignimbrites dacitiques. Les éruptions hydro-magmatiques basiques y ont elles-aussi joué un rôle important, mais seulement au début, dans le déclenchement de l'éruption. Jusqu'au quinzième siècle, les îles d'Epi et Tongoa étaient réunies en une grande île appelée Kuwae. Aujourd'hui une vaste dépression bilobée, allongée Nord-Ouest/Sud-Est sur 12 kilomètres de long et 6 de large, sépare les deux îles. Le volcan actif Karua, qui émerge épisodiquement, occupe une large partie du plancher de cette dépression. Divers récits et légendes transmis oralement par les autochtones relatent le cataclysme à l'origine de cette caldéra qui aurait eu lieu, selon des enquêtes ethnologiques, 10 à 12 générations avant l'an 1900. Toutefois, cette éruption était inconnue des milieux volcanologiques. L'absence d'études volcanologiques détaillées n'avait pas permis d'évaluer l'importance exacte de cet événement ni d'en comprendre le déroulement. Les travaux réalisés par l'IRD à terre sur l'île de Tongoa et sur les îlots correspondant à des parties hautes du mur de la caldéra, ainsi que dans la caldéra, ont montré la structure bilobée de la dépression et précisent le déroulement du cataclysme en plusieurs phases successives, ayant abouti au double effondrement et à l'émission de 33 à 39 km<sup>3</sup> de magma DRE (Robin et al. 1994b). La comparaison des datations au radiocarbone et une anomalie en soufre et en chlore dans les glaces de l'Antarctique en 1452 et du Groenland en 1453 situent ce cataclysme en 1452-1453. Il s'agit d'un événement majeur de l'histoire récente de la Terre puisqu'il fait partie des huit plus importantes éruptions explosives des dix derniers millénaires, comparable en magnitude à celle de Santorin en Grèce (3600 ans BP Before Present, par convention 1950). C'est aussi la plus forte éruption de l'Ere Moderne ; une baisse des températures moyennes en Amérique du Nord et en Chine, déduite d'études dendrochronologiques, ainsi que des hivers particulièrement rigoureux en Europe montrent que cet événement a eu une répercussion climatique mondiale au moins jusqu'en 1460.

### *b) Etudes géochimiques*

Les relations entre la géochimie des laves et les aspects structuraux régionaux ont abouti à une synthèse magmatisme – volcanisme –

géodynamique. A l'échelle du Vanuatu, plusieurs lignées (basaltes à rapports La/Yb haut et La/Yb bas ; basaltes à rapport La/Yb bas et haute teneur en Sr ; andésites riches en Mg) ont été mises en évidence et leur origine discutée dans le contexte de subduction particulière qui prévaut aux Nouvelles Hébrides, une ride océanique, la Ride d'Entrecasteaux, étant impliquée dans la subduction (Picard et al., 1995; Monzier et al., 1997). Les grandes lignes d'évolution des magmas alimentant les volcans de l'arc ont été précisées, ainsi que l'importance des hétérogénéités de sources mantelliques sous l'arc. Sur ce dernier thème, une thèse de doctorat, qui utilise en partie les données géochimiques des années 90, a été soutenue à l'UBO de Brest dans le cadre d'un récent projet de l'ANR à Vanuatu (Baumais et al., 2016).

### *c) Zonéographie des aléas et instrumentation géophysique*

La plupart des édifices de l'arc de Vanuatu sont des volcans actifs avec parfois des éruptions très importantes. Par exemple, en 1913-14, de nombreuses coulées ont envahi la caldéra d'Ambrym, la débordant en plusieurs endroits, alors que des cônes adventifs se formaient aux extrémités de l'île selon la direction de failles Nord-ouest/Sud-Est. Dans le cadre du programme Volcanisme du Vanuatu, quatre cartes de zonéographie des aléas ont été publiées par l'UNDRO (Ambrym, Tanna, Aoba et Gaua). Parallèlement à ces études, le programme a permis l'instrumentation de quatre volcans, en vue de leur surveillance à distance, grâce à la transmission par satellite des données sur Port Vila (sismicité, mesures de flux de chaleur, températures des eaux et fumeroles). Des actions de surveillance menées dans le cadre de l'ANR et prolongées depuis dans le cadre des activités du LMV-IRD concernent le suivi et le bilan du dégazage des principaux volcans actifs de l'arc, notamment à Ambrym et Tanna (Bani et al., 2012).

## **III - 2. Le volcanisme d'Indonésie et son impact sur l'atmosphère**

### *a) Contexte institutionnel et thématiques abordées en Indonésie*

Le LMV a établi de longue date une coopération privilégiée avec l'Indonésie, pays qui compte environ 130 volcans actifs ou potentiellement actifs, parmi lesquels moins de 80 sont surveillés (fig. 3). Au cours des années 1980, de nombreux projets combinant des études géologiques et géophysiques chapeautés par le MAE ont été conduits dans ce pays, dans le cadre des activités du Centre de Recherches Volcanologiques (CRV Clermont-Ferrand). Cette coopération, établie en partenariat avec le *Volcanological Survey of Indonesia* (VSI, devenu depuis le Centre for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, CVGHM), a abouti à la formation de nombreux docteurs d'université indonésiens et français (voir la partie sur la formation dans ce volume), dont les travaux ont sensiblement amélioré les connaissances sur certains complexes volcaniques



Figure 3 : Deux volcans indonésiens très étudiés dans le cadre des recherches LMV au cours des années 80, puis dans le cadre du projet ANR « Domérapî ». A gauche le Mérapî, qui menace la ville de Yogyakarta et dont l'éruption de 2010 a tué 380 personnes et nécessité l'évacuation de 400000 autres. A droite le dôme d'andésite du volcan Kelut formé au cours de l'activité extrusive de 2007, suite à l'éruption explosive de 1991 (Bourdier et al., 1997), et qui a été volatilisé par l'éruption de 2014.

dangereux (e.g. Lamongan, Aubert et Dana, 1994 ; Tondano, Lécuyer et al., 1997, Mérapî, Camus et al., 2000, Le Pennec et al., 2001), ou sur certaines éruptions récentes (e.g. Galunggung 1982-83, Gerbe et al., 1992, Gourgaud et al, 2000; Anak Krakatoa, Camus et al., 1987). Ce partenariat de recherche, quelque peu essoufflé à la fin des années 1990, a été réactivé dans le cadre des programmes d'observation MEGAVOL (méthodes géophysiques appliquées à la surveillance des volcans indonésiens) et VELI (Volcanisme Explosif Laboratoire Indonésien). D'autres projets, notamment de type ANR (comme « Domérapî », 2012-17 ou « Laharisk », 2011-15), ont été conduits par des chercheurs du labex ClerVolc dans le cadre d'actions de surveillance et de développement technique, surtout au Mérapî (actions OPGC-LMV-IRD-LIMOS). Ces travaux récents ont été principalement conduits avec le CVGHM, mais aussi avec d'autres partenaires indonésiens dont l'institut de technologie de Bandung (ITB), ainsi que le BPPTK (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungapian, observatoire du Mérapî) et l'université de Gadjah Mada, tous deux situés à Yogyakarta.

En Indonésie comme ailleurs, la surveillance volcanologique était principalement fondée sur les méthodes géophysiques « classiques » (réseaux sismologiques, géodésiques, et inclinométriques). Depuis les années 2000, les routines des observatoires du pays se sont orientées vers le monitoring multi-paramètres, en associant les approches classiques aux mesures thermiques, acoustiques, géochimiques ou satellitaires. De ce fait, les observatoires ont pu accroître leur capacité à détecter les signaux précurseurs des éruptions, et suivre plus fidèlement l'évolution de l'activité magmatique. Dans ce contexte, des chercheurs du LMV-IRD et du CVGHM se sont focalisés sur le suivi des émanations gazeuses en analysant la composition et les flux d'éléments volatils. Cette approche, qui nécessite des outils de télédétection au sol de plus en plus sophistiqués, est devenue

incontournable pour la surveillance des volcans actifs en général. De 2012 à 2015 le LMV-IRD a conduit en étroite collaboration avec le CVGHM un vaste programme novateur de mesures de la composition et des flux de gaz associés à l'activité volcanique à l'échelle de l'archipel. L'objectif était d'une part d'identifier des signaux géochimiques ou de débits gazeux annonçant une activité éruptive, et d'autre part d'estimer l'impact de ces dégazages sur l'atmosphère et le climat mondial. Nous présentons ici quelques résultats concernant le second objectif.

### *b) Contribution du volcanisme indonésien au bilan mondial de SO<sub>2</sub>*

Seuls trois volcans de l'archipel avaient fait l'objet d'études antérieures concernant les taux de dégazage volcanique. Lors des campagnes effectuées dans le pays, ces taux ont pu être déterminés pour 38 édifices, soit la moitié des volcans surveillés (fig. 4). Les exhalaisons et panaches volcaniques transportent deux constituants principaux difficiles à identifier (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>). Pour cette raison, les travaux ont focalisé sur le flux de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), dont le fort pouvoir absorbant dans le spectre solaire et la faible concentration dans l'atmosphère offrent des conditions favorables de mesure. Les instruments utilisés sont le spectromètre ultraviolet (dit DOAS pour Differential Optical Absorption Spectroscopy) et la caméra d'acquisition dans l'ultraviolet (voir les détails techniques pour DOAS et caméra UV dans Galle et al., 2003 et Kantzas et al., 2010, respectivement). Ils sont déployés en simultanément ou alternativement selon la difficulté d'accès au site de mesure, et selon le type et l'intensité du dégazage.

Les résultats indiquent qu'au moins 13 volcans sont des sources importantes de dégazage (Bani et al., 2013, 2015), parmi lesquelles 9 sont quasiment inconnus de la communauté scientifique. Selon le bilan global d'Andres et Kasgnoc (1998), très utilisé dans les modèles climatiques, les volcans d'Indonésie ne contribueraient annuellement que pour 100 kt de



Figure 4 : Volcans actifs ou potentiellement actifs surveillés en Indonésie (triangles rouges) et volcans étudiés pour les mesures du taux de dégazage (encadrés en bleu).

SO<sub>2</sub>, soit seulement 0,8 % du SO<sub>2</sub> volcanique libéré dans l'atmosphère à l'échelle mondiale. Cette valeur peut surprendre compte tenu du nombre élevé de volcans actifs dans le pays. En fait, les résultats des campagnes effectuées par les chercheurs du LMV-IRD et du CVGHM suggèrent qu'environ 1000 à 2000 kt de SO<sub>2</sub> sont libérés chaque année dans l'atmosphère par les volcans indonésiens, ce qui représente 8 à 15 % du bilan mondial de SO<sub>2</sub> d'origine volcanique. Cette estimation doit être considérée comme minimale car certains volcans actifs n'ont pas été étudiés dans ce projet. Bien que préliminaire, ce bilan indique néanmoins que la contribution atmosphérique en éléments volatils d'origine magmatique a été largement sous-estimée pour l'Indonésie, ce qui implique une erreur non négligeable sur les modèles de changement climatique.

### **III - 3. Autres recherches sur la zone Asie-Pacifique et dans l'Océan Indien**

Sur la façade du Pacifique ouest, des travaux ont été conduits aux Philippines sur la géophysique de certains volcans, notamment au Taal (e.g. travaux en électromagnétisme, Zlotnicki et al., 2009) et sur les interactions entre la tectonique régionale, les structures volcaniques, et le climat (travaux de B. Van Wyk de Wries, avec l'université des Philippines et Phivolc à Manille, e.g. Paguican et al., 2012). Ces recherches ont aussi abouti à la formation de plusieurs jeunes chercheurs philippins sur diverses thématiques qui méritaient d'être approfondies aux Philippines. Bien que ces travaux aient peu impliqué les chercheurs IRD du LMV, ce pays mériterait d'être plus investi par le LMV-IRD dans les années à venir.

Mentionnons également que d'autres actions plus ponctuelles sur les aléas et les risques volcaniques sont menés dans l'Océan Indien, par exemple aux îles Comores, petit archipel et PED où le volcan effusif intra-plaque du Karthala menace d'inondations laviques les habitations et infrastructures présentes sur la zone côtière de l'île, notamment dans la capitale Moroni. Les recherches récentes ont par ailleurs révélé le caractère hautement explosif de certaines éruptions (2006, 1991, et surtout les éruptions plus anciennes du dix-neuvième siècle et du début du vingtième siècle), et conduisent à réapprécier les menaces sur cet édifice au comportement surprenant. Aux Comores, l'analyse de l'aléa volcanique est menée parallèlement à l'étude des vulnérabilités locales, apportant une vision intégrée du risque pour ce volcan bouclier (Bachelery et al., 2016 ; Morin et al., 2016).

## **IV - Etudes sur la zone Amérique Latine - Caraïbes**

---

Au milieu des années 1990, le programme de volcanologie de l'ORSTOM s'est orienté vers l'Amérique de Sud, où la subduction et l'orogénèse

andine s'accompagnent d'un magmatisme intense et d'un volcanisme explosif soutenu. Des conventions ont été progressivement mises en place à l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP) et à l'Institut de Géophysique de l'Ecole Polytechnique Nationale en Equateur (IG-EPN, Quito) à partir de 1994. Plus récemment des conventions ont été signées avec l'Institut de la Géologie, des Mines et de la Métallurgie (INGEMMET) du Pérou, ainsi qu'avec l'université de Concepción au Chili et l'université du Chili à Santiago entre 2000 et 2004. Cette période a vu l'accomplissement de recherches importantes associant du côté français l'ORSTOM-IRD au CNRS, à l'Institut d'Etudes Andines (IFEA), et à de nombreuses universités et laboratoires, dont le LMV. Dans ces programmes la volcanologie a généralement été adossée à d'autres disciplines géophysiques comme la sismologie, la gravimétrie ou la géodésie. Depuis les années 2000, la coopération LMV-IRD avec l'Amérique du Sud s'est principalement structurée autour de plusieurs types de projets. Citons d'une part les projets de durées limitées, comme celui de l'Union Européenne ECHO (European Community Humanitarian Office, 2004-05) en Equateur, et d'autre part les projets de durées intermédiaires, comme ECOS-Sud du MAE-MAEDI déployés au Chili (2000-2003 et 2011-14). Par ailleurs, l'IRD a soutenu la mise en place d'*instruments de partenariat* consolidés de type JEAI en Equateur (2003-07 à l'IG-EPN Quito) puis au Pérou (2011-15 à l'INGEMMET), et d'un Laboratoire Mixte International nommé « *séismes et volcans dans les Andes du Nord* » (LMI SVAN1, 2012-16, en cours de renouvellement SVAN2 jusqu'en 2021). Fort de dizaines de chercheurs et d'ingénieurs, ce LMI associe les recherches d'une équipe spécialisée en sismologie, géodésie et tectonique (UMR françaises de Geoazur à Nice et ISTerre à Grenoble et IG-EPN) à celles de l'équipe de volcanologie (principalement le LMV et l'IG-EPN), et aux activités des équipes de formation, d'appui technique, et d'administration. Un aboutissement majeur de ces différentes coopérations est d'avoir formé à haut niveau des jeunes chercheurs des pays andins, qui exercent aujourd'hui des responsabilités diverses en lien avec la mitigation des risques naturels en général, et volcaniques en particulier.

## **IV - 1. Le volcanisme de l'arc d'Equateur**

### ***a) Développement de la coopération en Equateur***

Un programme de coopération de l'ORSTOM été initié en Equateur en 1994 à l'Institut de Géophysique de l'Ecole Polytechnique Nationale d'Equateur (IG-EPN), avec pour objectif d'étudier les processus et les aléas sismiques et volcaniques dans le pays, où se développent des populations urbaine et rurale particulièrement vulnérables. Le programme de volcanologie décrit ci-dessous s'est construit en trois étapes. Le premier programme, mené dans le cadre de l'UR6 de l'ORSTOM, était conduit par C. Robin

(expatrié 1994-98), épaulé sur site par M. Monzier pour la pétro-géochimie (1995-2000), et J.-P. Métaxian (1995-98) pour la sismologie volcanique. Il s'agissait de placer les bases d'une coopération robuste et durable focalisée sur l'étude du magmatisme et des volcans des cordillères d'Equateur, pour améliorer les connaissances sur la typologie des volcans et des éruptions, afin de mieux apprécier les menaces associées. Cette coopération a été renforcée en 1999, lors du second programme correspondant au passage de l'ORSTOM à IRD, par la création de l'unité « processus et aléas volcaniques » de l'IRD, qui a rejoint en 2004 l'UMR Magmas et Volcans de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Pendant cette période, de nouvelles affectations en volcanologie ont eu lieu à l'IG-EPN (J.-P. Eissen, 2000-03 ; J.-L. Le Pennec, 2000-06 ; C. Robin, 2006-10 ; K. Kelfoun, 2007-10), avec la création d'une Jeune Equipe Associée à l'IRD (2003-07) dirigée par P. Samaniego, alors enseignant-chercheur à l'IG-EPN de Quito. Plusieurs volontaires civils (e.g. F. Desmulier, E. Bourdon, A. Vallée, B. Bernard, J. Bernard) et de nombreux étudiants équatoriens, français ou d'autres nationalités ont été ou sont pleinement impliqués dans les activités de recherche, en contribuant à la production scientifique, à la surveillance, et à la diffusion des nouvelles connaissances vers la société. Suite au succès de la JEAI de volcanologie, et après un projet d'Action Incitative à l'IRD (2008-10), la coopération s'est redéployée lors d'un troisième programme au sein d'un Laboratoire Mixte International de l'IRD, nommé « séismes et volcans dans les Andes du Nord » (LMI SVAN1, 2012-16, co-dirigé pour le LMV par J.-L. Le Pennec), qui fédère les recherches partenariales en sismologie, géodésie, tectonique, et volcanologie.

L'arc équatorien est exceptionnel par la densité de volcans qu'il héberge. En effet, on compte plus de 80 centres éruptifs concentrés sur 300 km du Nord au Sud, et sur une zone anormalement large de 30 à 160 km d'Ouest en Est (Hall et al., 2008 ; fig 5). Cette structure contraste avec les arcs volcaniques classiques caractérisés par un seul alignement d'édifices à l'aplomb de la subduction (cas de la Colombie et du Pérou). De plus, l'activité volcanique récente est particulièrement soutenue, avec au moins 14 volcans actifs au cours de l'Holocène, dont 5 au cours des vingt dernières années (Cotopaxi, El Reventador, Pichincha, Tungurahua, Sangay, sans compter les crises sismo-volcaniques aux Cayambe et Chiles Cerro-Negro). Une grande partie de la population équatorienne, que le niveau socio-économique rend particulièrement vulnérable, est rassemblée dans la région interandine, où on estime qu'environ 4 millions de personnes vivent à moins de 25 km d'un centre éruptif. Cette situation justifiait de conduire un ambitieux programme de recherche dans ce pays surexposé aux risques volcaniques. Les sections suivantes présentent les grands axes de recherche et quelques aboutissements des investigations conjointes du LMV-IRD et de l'IG-EPN menées au cours des deux décennies de recherche partenariale.

### ***b) Comportement éruptif des volcans de l'arc équatorien***

Afin d'identifier la nature et l'ampleur des menaces volcaniques dans les cordillères d'Equateur, le travail des chercheurs et étudiants du LMV-IRD et de l'IG-EPN a consisté à reconstruire l'activité passée de centres volcaniques sélectionnés, en donnant priorité à ceux qui se trouvent à proximité de zones urbaines ou densément peuplées. Dans cette approche, les travaux ont porté sur les stades d'évolution des stratovolcans en couplant les études géochronologiques aux bilans de matière (quantité de produits émis, taux de production magmatique) et à la typologie des éruptions passées. Citons par exemple les études au Pichincha (Robin et al., 2008, 2010), Cayambe (Samaniego et al., 1998), Tungurahua (Hall et al., 1999), Mojanda-Fuya Fuya (Robin et al., 2009), Chimborazo (Barba et al., 2008 ; Samaniego et al., 2012), Sangay (Monzier et al., 1999), Illinizas (Hidalgo et al., 2007), ou Pululahua (Andrade et al., 2004). Ces recherches ont abouti à un constat essentiel : les édifices de l'arc frontal, situés en gros le long de la cordillère occidentale, ont tendance à produire des éruptions peu fréquentes à l'échelle humaine, avec un temps de retour de l'ordre de centaines à milliers d'années, et des magnitudes relativement élevées (VEI de 4, 5 ou 6). Ces éruptions émettent généralement des magmas de compositions différenciées, dans la gamme des andésites acides et des dacites (60-66 %  $\text{SiO}_2$ ). Inversement, les volcans de la cordillère orientale se caractérisent par des éruptions nettement plus fréquentes, avec des récurrences de l'ordre de quelques décennies à quelques siècles, mais de magnitudes moins importantes avec des VEI entre 2 et 4, les événements de VEI 5 ou 6 étant exceptionnels. Les produits volcaniques de la cordillère orientale ont typiquement des compositions intermédiaires (55-58 %  $\text{SiO}_2$ ), voire plus basiques, les magmas acides (généralement dacitiques) étant plus rares. Les volcans moins connus de l'arrière-arc amazonien émettent des magmas plus alcalins (riches en K et Na), et leur comportement éruptif semble montrer une grande variabilité. Un second résultat majeur est que plusieurs volcans auparavant considérés comme éteints, sont en réalité des édifices potentiellement actifs qui nécessitent une surveillance instrumentale minimale. C'est notamment le cas des volcans Chimborazo, Cayambe, Imbabura et Chachimbiro (Samaniego et al., 1998, 2005 ; Barba et al., 2008 ; Le Pennec et al., 2011 ; Bernard et al., 2014).

D'autres études plus spécifiques ont focalisé sur les événements particuliers par leurs magnitudes (e.g. grandes éruptions explosives pliniennes), par leurs styles éruptifs (e.g. explosions latérales, avalanches particulières), ou par leur composition (e.g. éruptions à mélanges de magmas). Ainsi, ces recherches ont révélé la violence des éruptions explosives du Pichincha au cours de l'Holocène (Robin et al., 2008, 2010) et de l'Atacazo (Hidalgo et al., 2008), deux volcans qui menacent la capitale Quito. D'autres travaux ont souligné la taille exceptionnelle de certaines avalanches de débris, notamment au

Sangay (Monzier et al., 1999) et au Chimborazo (Bernard et al., 2008). De même, les produits de puissantes explosions latérales ont été découverts aux volcans Pichincha (Robin et al., 2010), Tungurahua (Le Pennec et al., 2013), Imbabura (Le Pennec et al. 2011), ainsi qu'au Chachimbiro (Bernard et al., 2014). Des éruptions de ce type seraient probablement catastrophiques de nos jours.

### *c) Genèse et évolution des magmas émis dans l'arc équatorien*

Les travaux susmentionnés indiquent qu'il existe un lien entre la composition des magmas émis et le comportement éruptif des volcans dans l'arc, avec une certaine dualité entre les cordillères ouest et est dont l'origine n'est pas entièrement comprise. Les travaux du LMV-IRD et de l'IG-EPN montrent que ces magmas proviennent de sources diverses et que leurs compositions évoluent sous l'effet des processus complexes de différenciation (Samaniego et al., 2002, 2005 ; Bourdon et al., 2002a, 2002b, 2004 ; Samaniego et al., 2010 ; Schiano et al., 2010; Hidalgo et al., 2012 ; Martin et al. 2014 ; Hall et al., 2016). Leur genèse commence vers 100-130 km de profondeur sous les cordillères volcaniques, là où interviennent des réactions et échanges entre la plaque océanique et le manteau supérieur. A cette profondeur, des mécanismes de déshydratation et de fusion partielle de la plaque océanique produisent un cocktail silicaté d'éléments chimiques puisés dans la plaque plongeante. La diffusion de ces liquides dans le coin de manteau sus-jacent et relativement chaud provoque des interactions métasomatiques qui accompagnent la fusion partielle du coin de manteau (fig. 6). Etant plus légers, les liquides produits par ces processus remontent au sein du coin de manteau et peuvent stagner à la base de la croûte lithosphérique, dont l'épaisseur sous les cordillères est de l'ordre de 60-65 km. Ces produits de fusion finissent par remonter au travers de la lithosphère continentale, au sein de laquelle ils subissent diverses transformations du fait du refroidissement et de la dépressurisation, ainsi que de la cristallisation progressive et des contaminations transmises par la croûte continentale encaissante. Les recherches du LMV-IRD et de l'IG-EPN ont ainsi montré que, au-delà des effets d'hétérogénéité des sources profondes, la diversité pétrochimique des produits émis en surface reflète des évolutions magmatiques dominées par des processus de cristallisation fractionnée, de contamination et d'assimilation crustale (Hidalgo et al., 2012). Dans certains cas, notamment dans la croûte supérieure, des recharges et mélanges de magmas peuvent survenir, surtout entre les termes de compositions andésitique et dacitique, et peuvent être décisifs dans le déclenchement de certaines éruptions explosives (Hall et al., 1999 ; Samaniego et al., 2011).

Les investigations pétro-géochimiques de la coopération LMV-IRD et IG-EPN montrent par ailleurs que la cordillère sous-marine « de Carnegie »

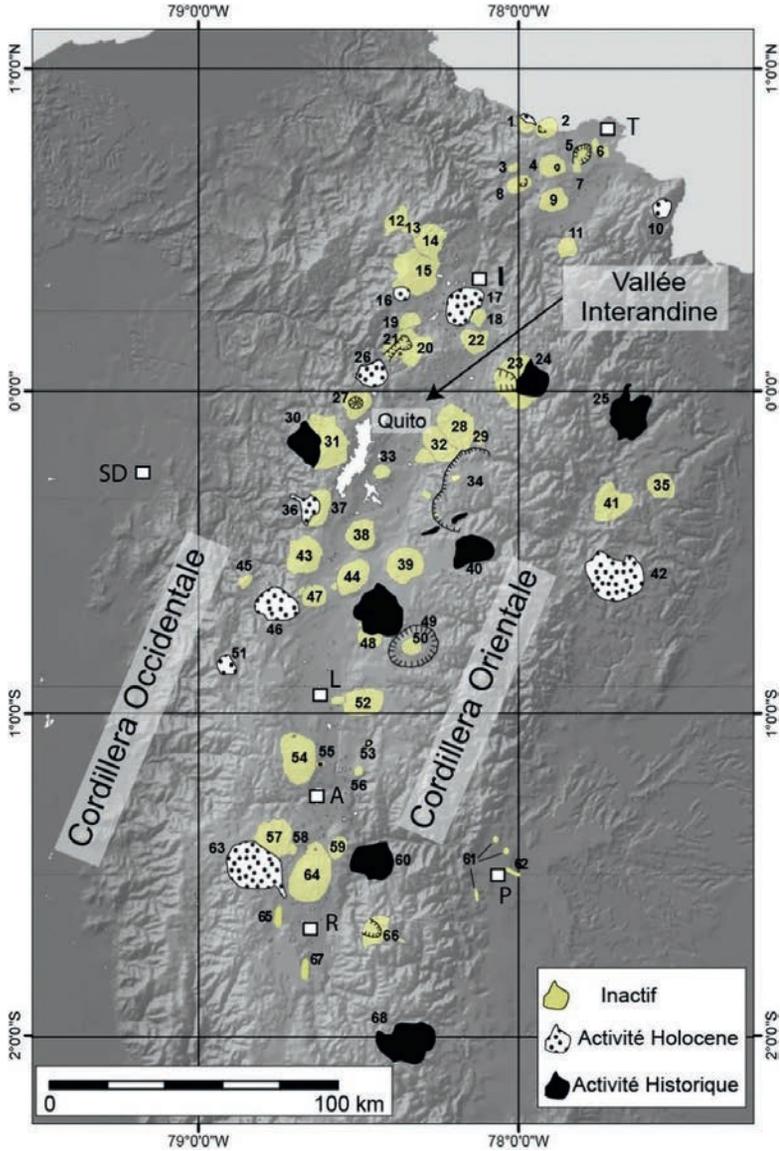


Figure 5 : Carte de l'arc volcanique équatorien montrant l'emplacement des deux grandes cordillères qui encadrent la vallée interandine (d'après Hall et al., 2008). (1) Cerro Negro de Mayasquer ; (2) Chiles ; (3) Chiltazón ; (4) Potrerillos ; (5) Chalpatán ; (6) Chulamuez ; (7) Horqueta ; (8) Iguán ; (9) Chaquilulo ; (10) Soche ; (11) Mangus ; (12) Pilavo ; (13) Yanaurcu de Piñan ; (14) Huanaguillaro ; (15) Cotacachi ; (16) Cuicocha ; (17) Imbabura ; (18) Cubilche ; (19) Cushnirumi ; (20) Mojanda ; (21) Fuya Fuya ; (22) Cusín ; (23) Viejo Cayambe ; (24) Nevado Cayambe ; (25) El Reventador ; (26) Pululahua ; (27) Casitagua ; (28) Pambamarca ; (29) Izambi ; (30) Guagua Pichincha ; (31) Rucu Pichincha ; (32) Puntas ; (33) Ilaló ; (34) Chacana ; (35) Yanaurcu ; (36) Ninahuilca ; (37) Atacazo ; (38) Pasochoa ; (39) Sincholagua ; (40) Antisana ; (41) Pan de Azucar ; (42) Sumaco ; (43) Corazón ; (44) Rumiñahui ; (45) Almas Santas ; (46) Ilinizas ; (47) Tres Marías ; (48) Cotopaxi ; (49) Chalupas ; (50) Quilindaña ; (51) Quilotoa ; (52) Chinibano ; (53) Angahuana ; (54) Sagoatoa ; (55) Larcapungo ; (56) Huicutambo ; (57) Carihuarazo ; (58) Puñalica ; (59) Huisla ; (60) Tungurahua ; (61) Mera ; (62) Puyo ; (63) Chimborazo ; (64) Igualata ; (65) Calpi ; (66) Altar ; (67) Tulabug ; (68) Sangay. Tulcán (T), Ibarra (I), Quito (Q), Latacunga (L), Ambato (A), Riobamba (R), Puyo (P), and Sto. Domingo (SD).

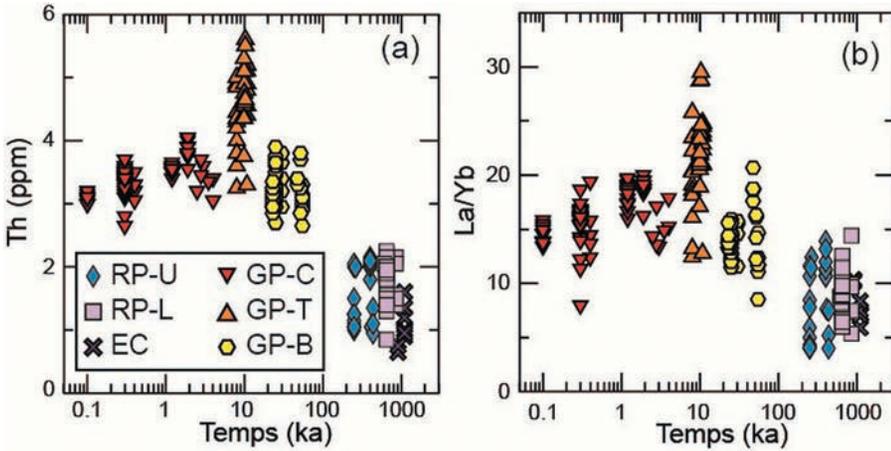


Figure 6 : Evolution de la teneur en Thorium (a) et du rapport Lantane sur Ytterbium (b) en fonction du temps (1 ka = 1000 ans) au cours du dernier million d'années dans les produits éruptifs du complexe volcanique Pichincha. L'histoire de ce complexe est divisée en trois stades d'édification nommés El Cinto (base ancienne érodée du complexe Pichincha), Rucu Pichincha (ancien stratovolcan inactif) et Guagua Pichincha (stratovolcan jeune constitué de trois unités, dont la plus récente correspond au volcan actuellement actif dit Guagua Pichincha-Cristal). Les variations géochimiques au cours du temps reflètent des changements du type de fluide issu de la plaque plongeante, depuis un fluide aqueux issu de la déshydratation de la plaque océanique (lors de l'édification du Rucu Pichincha) vers un liquide silicaté produit par des réactions de fusion partielle de la plaque (pendant le stade Guagua Pichincha). EC : El Cinto; RP-L : Rucu Pichincha Inférieur, RP-U : Rucu Pichincha supérieur ; GP-B : Guagua Pichincha basal ; GP-T : Guagua Pichincha-Toaza ; GP-C ; Guagua Pichincha-Cristal.

(plateau océanique étiré depuis le point chaud des Galápagos), supportée par la plaque océanique Nazca en subduction, a un impact mesurable sur la composition des magmas émis dans les cordillères de l'arc (Samaniego et al., 2002 ; Bourdon et al., 2003 ; Martin et al., 2014). Cet impact se traduit par un changement progressif de la composition chimique des magmas au cours du temps et a été interprété comme le résultat du changement du gradient géochimique le long du plan de Benioff en fonction de l'arrivée en subduction de la Cordillère de Carnegie. Cette évolution représente une caractéristique de l'arc équatorial et a été décrite sur plusieurs complexes volcaniques, tels que le Cayambe (Samaniego et al., 2002, 2005), Mojanda-Fuya Fuya (Robin et al., 2009), Pichincha (Samaniego et al., 2010), ou Atacazo (Hidalgo, 2007).

De plus, la zone d'enfoncement de la ride de Carnegie sous la plaque sud-américaine coïncide avec la région de haute concentration d'édifices volcaniques, ces derniers étant caractérisés par des taux d'émission de produits volcaniques particulièrement élevés (Martin et al., 2014). Aussi, la subduction de la ride de Carnegie pourrait expliquer la surproductivité magmatique et la densité remarquable de volcans jeunes dans le pays. Ce processus de subduction d'un plateau océanique identifié en Equateur

a récemment permis de proposer de nouvelles hypothèses sur les grands mécanismes de croissance des continents à l'échelle de l'histoire de la Terre (Martin et al., 2014).

***d) Etude des crises volcaniques pour l'aide aux diagnostics éruptifs***

La réactivation des volcans Pichincha (1999-2001), du Tungurahua (1999-en cours), ou du Reventador (2002-en cours), a conduit le LMV-IRD et l'IG-EPN à orienter une part importante des activités conjointes de recherche et surveillance sur le suivi des crises éruptives dans le pays. Dans ce domaine, les activités comprennent les séjours réguliers à l'observatoire du volcan Tungurahua (OVT), et les travaux et réunions de suivi de crise à l'IG Quito, où sont surveillés les volcans de l'arc continental et des Galápagos. L'objectif est de contribuer à l'analyse de l'activité éruptive, d'aider à l'interprétation des phénomènes, et de participer avec l'IG-EPN à l'élaboration de scénarios d'évolution de l'activité utiles aux autorités en charge de la gestion des risques et aux populations locales.

Par exemple, nous avons pu montrer les effets de réalimentations magmatiques profondes sur le déclenchement brutal des éruptions (ex : El Reventador 2002) ainsi que l'importance de la sursaturation en fluides dans les magmas plus riches en silice, comme dans les dacites du Pichincha en 1999 (García-Aristizabal et al., 2007). Nous avons aussi analysé très en détail les modalités d'éruption du Tungurahua, en montrant par exemple les liens étroits entre production de SO<sub>2</sub> et sismicité, qui ont permis de mieux comprendre les modalités de dégazage permanent puis intermittent du Tungurahua (Hidalgo et al., 2015). Les recherches ont également révélé l'effet de recharge magmatique profonde en système ouvert sur le déclenchement du paroxysme d'août 2006 (Samaniego et al., 2011). L'étude des produits pyroclastiques de cet événement a permis d'obtenir des bilans de matière extrêmement précis qui indiquent que la moitié de la masse des produits juvéniles a été évacuée par les courants de densité pyroclastiques, alors que l'autre moitié a été dispersée dans le panache subplinien de l'éruption (Eychenne et Le Pennec, 2012 ; Eychenne et al., 2012, 2013, Bernard et al., 2016). Les processus de fractionnement des différentes populations de particules observées dans les dépôts de retombée comme dans les produits de CDP, et leur impact sur la granulométrie et la distribution des masses ont pu être déterminés avec une précision inégalée (Eychenne et Le Pennec, 2012, Bernard et al., 2014 ; Bernard et Le Pennec, 2016). Des travaux complémentaires sur d'autres phases éruptives ont établi un lien entre la cristallinité des cendres du Tungurahua et le taux d'émission éruptif (Wright et al., 2012), et indiquent que la forme des grains de cendres juvéniles est corrélée au style éruptif (Leibrandt et Le Pennec, 2015). Nous avons aussi pu montrer que l'impact de ces cendres sur les communautés avoisinantes est lié à la saisonnalité (Le Pennec et al., 2012). Les cendres

fines émises par l'activité explosive ont un impact particulièrement fort sur les communautés et certaines activités économiques (agriculture, trafic aérien), si bien que nos recherches actuelles cherchent à mieux comprendre leur comportement en termes de fragmentation, transport, agrégation, et sédimentation. Pour ces études, nous explorons de nouvelles approches en combinant les données des systèmes d'observations satellitaires HOTVOLC de l'OPGC et GOES (voir les articles de Labazuy et Gouhier, ce volume), qui détectent les cendres fines des panaches volcaniques, avec les résultats des modèles numériques de dispersion et sédimentation de téphras (NAME du VAAC Londres, ou FALL3D etc.). Ces recherches pourraient permettre d'effectuer un traçage du parcours des particules les plus petites, ainsi que la détermination de leur taux de déplétion atmosphérique, et ainsi d'anticiper leur dispersion sur les différents secteurs géographiques (cf. postdoctorat IRD de J. Eychenne). On entrevoit dans cette démarche la possibilité de prédire l'impact des cendres émises par certains événements éruptifs à forts degrés de fragmentation (e.g. production élevée de fines des éruptions à fort Indice d'Explosivité Volcanique, ou de styles phréato-magmatiques, e.g. Cotopaxi 2015 décrit ci-dessous, ou El Reventador 2002).

En 2015 la réactivation du volcan Cotopaxi, situé à 45 km au Sud de Quito, a mis en alerte l'IG-EPN et les autorités équatoriennes (fig. 7). Ce volcan est connu pour produire de grandes retombées de téphras et des coulées de boue capables de dévaster les vallées avoisinantes vers Quito au Nord et Latacunga au Sud. Après une éruption modeste d'août à novembre 2015, le volcan est retourné à une activité fumerolienne intense sans phase violente. Les travaux en cours sur cette éruption cherchent à préciser l'origine et la dynamique de l'éruption (Gaunt et al., 2016), et à déceler les possibles précurseurs d'une activation plus puissante à court ou moyen termes.



Figure 7 : Après des décennies de sommeil le volcan Cotopaxi, situé à 50 km au Sud-Est de Quito, s'est réveillé en émettant des panaches de gaz et de cendres. Ces dernières ont contribué, au-delà des effets du changement climatique, à la fonte partielle du glacier sommital, avec formations de petites coulées de boue. Photos prises en 2015, le 29 septembre (gauche) et le 9 octobre (droite).

## IV - 2. La province volcanique du Sud du Pérou

La volcanologie Orstom-IRD s'est développée au Pérou depuis 1995 en partenariat avec l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP) et l'Institut de Géologie, des Mines et de Métallurgie (INGEMMET), ainsi qu'avec plusieurs universités (San Agustín, San Marcos etc.). Un ambitieux programme d'analyse des risques volcaniques associés aux édifices du Sud du pays a été conduit dans le cadre de l'UR6 de l'ORSTOM (1995-99, expatriation de J.-C. Thouret à Lima). L'accent avait d'une part été mis sur l'étude des grandes éruptions récentes et historiques (dont la puissante activité plinienne du volcan Huaynaputina en février 1600, Thouret et al., 1997, 1999) et sur l'analyse des aléas associés aux principaux stratovolcans situés à proximité des zones urbaines et rurales vulnérables du pays. Des travaux approfondis ont ainsi été menés avec des chercheurs et étudiants péruviens sur des édifices comme le Misti, qui menace Arequipa, seconde ville du pays avec un million d'habitants (Thouret et al., 2001 ; Rivera et al., 2017), ou l'Ubinas, dont les éruptions répétées impactent la région rurale du Sud de la province d'Arequipa (Rivera et al., 2014). De plus, des études géophysiques ont contribué à mieux comprendre la structure des édifices volcaniques (dont le Misti, Finizola et al., 2004) et à caractériser l'activité des volcans actifs dans le pays (Ubinas, e.g. travaux de J.P. Métaxian en sismologie volcanique). Plus récemment, la JÉAI VIP (*Volcanism in Peru*, 2012-15), dirigée par M. Rivera de l'INGEMMET, ex-doctorant du LMV, boursier de l'IRD, et co-encadrée par P. Samaniego (chercheur IRD-LMV expatrié à Lima 2010-14), a développé une activité fructueuse, tant en recherche qu'en formation. Cette JÉAI a identifié de nouveaux volcans potentiellement actifs dans le pays (dont le Tutupaca, voir la fig. 8, et le Yucamane, tous deux proches de la bourgade de Candarave, Samaniego et al., 2015), a analysé les mécanismes associés à certaines éruptions remarquables de ces édifices (Valderrama et al., 2016), et a produit de nouvelles cartes d'aléas autour de certains volcans actifs, notamment pour le Sabancaya (carte de menace publiée en 2013, Samaniego et al., 2016). Ce dernier volcan est en éruption depuis novembre 2016, avec des retombées de cendres dans les zones rurales du canyon du Rio Colca et de la bourgade de Chivay. La thèse de P. Valderrama de l'INGEMMET (boursier de l'IRD) menée au LMV a permis de mieux comprendre les mécanismes de mise en place des avalanches de débris volcaniques et a montré en particulier que celles-ci pouvaient se comporter comme des écoulements granulaires. Parallèlement, des projets conduits dans le cadre du labex ClerVolc ont appliqué des techniques innovantes pour qualifier la vulnérabilité du bâti face aux coulées de débris dans les ravins qui traversent la ville d'Arequipa (e.g. coulées de boue meurtrières de 2013, Ettinger et al., 2015).

Aujourd'hui, les recherches volcanologiques se poursuivent avec ce pays dans le cadre du LMI « Séismes et Volcans dans les Andes du

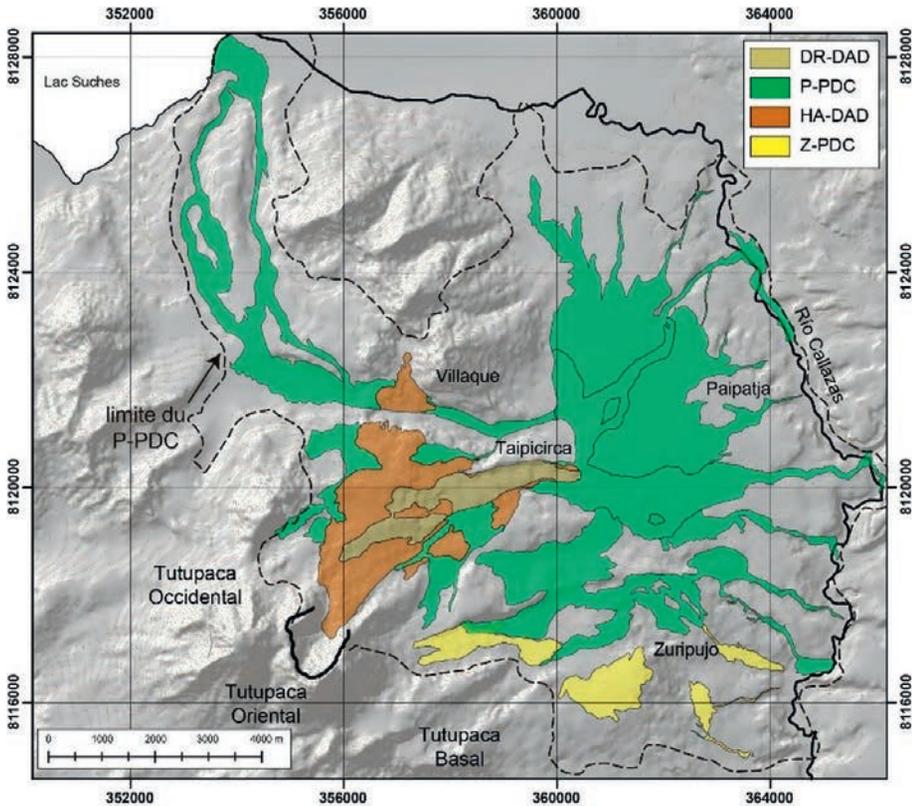


Figure 8 : Carte géologique simplifiée des produits éruptifs associés à l'éruption historique (âge  $^{14}\text{C}$  :  $218 \pm 14$  BP) du volcan Tutupaca au Sud du Pérou (d'après Samaniego et al., 2015). Z-PDC : Dépôts des écoulements pyroclastiques de Zuripujo ; HA-DAD : Dépôts de l'avalanche de débris, faciès hydrothermalisés ; P-PDC : Dépôts des écoulements pyroclastiques de Paipatja ; DR-DAD : Dépôts de l'avalanche de débris, faciès de dôme. La ligne pointillée correspond à la limite reconstituée (avant érosion) du courant pyroclastique de densité de Paipatja. Ces dépôts sont associés spatialement et temporellement et témoignent d'une puissante éruption explosive synchrone de l'effondrement du versant nord-est du volcan Tutupaca. Cette éruption est l'une des plus importantes ayant eu lieu au Pérou pendant l'époque coloniale et correspond à l'avalanche de débris la plus récente à l'échelle de toute la chaîne Andine.

Nord (SVAN) », en association avec d'autres projets ponctuels. Cela conduit à soutenir le programme d'analyse des aléas volcaniques d'INGEMMET dans le Nord de la chaîne (e.g. volcans Sara Sara et Coropuna), à mener de nouvelles études sur les structures volcaniques à potentiel économique (e.g. caldéra d'Incahuasi), à suivre l'activité de certains volcans (e.g. Ubinas depuis 2012 ; Sabancaya depuis 2013), et à maintenir une intense activité de formation d'étudiants péruviens en France et dans le cadre d'échanges Sud-Sud entre le Pérou et l'Equateur. De fait, les thématiques volcanologiques abordées dans le cadre du LMI SVAN à Quito sont très comparables à certains projets conduits au Pérou comme Huayruro (porté par A. Finizola de l'IPGP et université de La Réunion), centré sur l'analyse des causes de l'éruption du Huaynaputina en l'an 1600, et ses conséquences au plan humain.

### **IV - 3. Les provinces volcaniques du Nord et du Sud du Chili**

Avec environ quatre-vingt-dix volcans actifs ou potentiellement actifs, le Chili est le pays ayant le plus grand nombre de volcans quaternaires au monde après l'Indonésie. Bien qu'il s'agisse d'un pays sub-développé, et non d'un PED, la volcanologie chilienne a longtemps souffert d'un manque d'expertise et d'instruments de surveillance pour mener à bien l'étude et le suivi des volcans de l'arc. Plusieurs universités et instituts français avaient conduit diverses investigations sur le volcanisme du Chili au cours des années 1980-90, mais la coopération LMV-IRD avec ce pays s'est surtout développée depuis l'an 2000, d'abord dans le cadre d'un Programme ECOS Sud, puis avec l'expatriation en 2004-06 de C. Robin IRD-LMV pour l'étude des aléas, et de J.-L. Froger UPB-LMV pour l'interférométrie radar, notamment sur le complexe actif de Lastarria – Cordon del Azufre (Froger et al., 2007). Les recherches incitatives sur les volcans du Sud du pays ont constitué l'ossature d'une collaboration entre le LMV-IRD, les universités du Chili et de Concepción, et le SERNAGEOMIN chilien (deux doctorats en cotutelle UBP/université du Chile soutenus en 2009). Cette coopération a été renforcée dans le cadre de missions longues dédiées à l'étude expérimentale des écoulements granulaires à l'université du Chili (O. Roche, IRD-LMV). D'autres missions dans le Nord du pays ont concentré sur la morphologie des dépôts d'écoulements pyroclastiques de 1993 du volcan Lascar, ainsi que sur la sismologie volcanique et le dégazage du même volcan (notamment avec l'université d'Atacama).

Ainsi, à la suite du programme Vanuatu des années 1990, les chercheurs LMV-IRD ont souhaité poursuivre les recherches pour mieux comprendre le déclenchement d'éruptions ignimbritiques basiques de fortes magnitudes sur des volcans d'arc continental. Les édifices andésito-basaltiques du Sud du Chili présentent de telles éruptions au cours de leur développement, et les projets se sont intéressés aux mécanismes de déclenchement des éruptions, de mise en place des écoulements pyroclastiques qui les composent, ainsi qu'au timing de ces événements cataclysmiques (Lhomar et al., 2007 ; 2012 ; Silva et al., 2010). Ces travaux avaient pour but de préciser un aléa volcanique majeur dans l'espace et dans le temps, et de conduire à une meilleure évaluation du risque à proximité des volcans concernés. Les volcans Villarica et Llaima, tous deux englacés et très actifs, ont été choisis pour cibles. Leur comportement éruptif postglaciaire comprend des événements explosifs de grande magnitude associés à la formation de caldéras. Au Villarrica, les formations ignimbritiques « Lican » et « Pucón » se sont respectivement mises en place il y a ~13800 et 3900 ans BP. Des ignimbrites basiques comparables sont reconnues au Llaima (Formation « Curacautín » datée vers 13500 et 12600 ans BP) ainsi qu'au Mocho-Chosueno. Les résultats mettent l'accent sur la richesse en fluide des magmas

associés à ces éruptions, et sur le rôle des interactions hydro-magmatiques dans l'accentuation du caractère explosif de ces événements particuliers. L'importance de la couverture glaciaire sur la dynamique éruptive et sur les conditions de mise en place des écoulements pyroclastiques semble une caractéristique commune à plusieurs édifices du Sud du Chili, avec implications pour les menaces qu'ils représentent.

Parallèlement, un programme de recherche en partenariat avec le département d'ingénierie civile de l'université du Chili à Santiago (avec Y. Niño et A. Tamburrino) a focalisé sur la dynamique des écoulements granulaires étudiés par des méthodes expérimentales. Ce programme a permis d'étudier les mécanismes de mise en place des écoulements gaz-particules utilisés en laboratoire comme analogues des écoulements pyroclastiques. Ces écoulements ont la particularité d'avoir une pression de gaz interstitiel qui permet de réduire la friction entre les particules et ainsi d'accroître considérablement la distance de parcours par rapport aux écoulements dits « secs » (sans pression de gaz). Les expériences de laboratoire ont montré que de tels écoulements biphasés se comportent comme des fluides purs newtoniens malgré une concentration en particules quasi maximale (Roche et al., 2008), et que la décroissance de pression de gaz au cours de la mise en place obéit à une loi de diffusion (Roche et al., 2010 ; Roche, 2012 ; Montserrat et al., 2012 ; 2016). Les travaux expérimentaux ont été complétés par des modèles d'écoulements biphasés mis au point au cours d'une thèse en cotutelle (Meruane et al. 2010). Les études les plus récentes ont porté sur les mécanismes d'érosion par les écoulements pyroclastiques et ont conduit à définir un modèle pour calculer des vitesses de propagation à partir de la taille des blocs entraînés du substrat (voir fig. 9, Roche et al., 2013 ; Roche, 2015). Le paramètre vitesse est essentiel car il permet de valider des modèles numériques utilisés pour simuler des éruptions et leurs conséquences. Notons que le modèle d'érosion a été appliqué aux éruptions de grand volume (dizaines ou centaines de km<sup>3</sup> bruts, dites « super-éruptions », Roche et al., 2016).

Enfin, un projet européen incitatif porté par le LMV et cogéré par l'IRD et la CONICYT (agence de financement de la recherche du Chili),

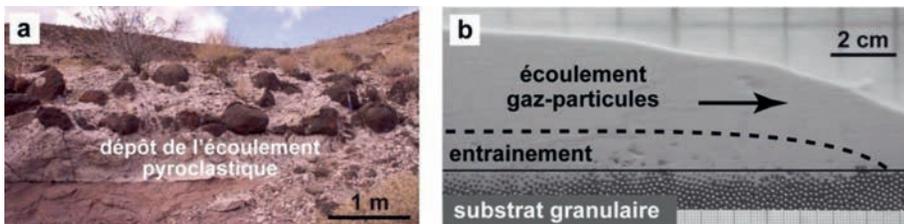


Figure 9 : (a) Dépôt d'écoulement pyroclastique contenant des blocs (> 50 cm) du substrat entraînés. (b) Expérience d'écoulement air-particules sur un substrat granulaire. Notez les particules du substrat dans la zone d'entraînement basale. Modifié d'après Roche et al. (2013, 2016).

ambitionne de rassembler en volcanologie les acteurs de recherche des principales institutions andines avec plusieurs laboratoires européens, principalement le LMV-IRD et les universités de Bristol et de Munich, ainsi que l'institut volcanologique de Pise (projet VIMESEA porté par O. Roche, LMV-IRD : *Volcanism and its impact on environnement and society : combined forces from Europe and Andean countries*). Cette collaboration a notamment permis de lancer le programme de recherche sur l'éruption du volcan Calbuco décrite ci-dessous.

En avril 2015 s'est produite au volcan Calbuco l'éruption la plus puissante de toute la dernière décennie pour toutes les Amériques (pas de victime mais des évacuations et des dégâts considérables). Trois semaines après l'éruption, des chercheurs du LMV-IRD et du département de géologie de l'université du Chili ont effectué une mission de crise sur ce volcan, afin d'identifier l'origine de cet événement soudain dont les signaux précurseurs n'ont été enregistrés que trois heures avant la première explosion. Les résultats montrent que l'éruption VEI 4 a brutalement vidangé une partie d'un réservoir magmatique en cours de refroidissement et de cristallisation, avec un modeste apport de magma plus chaud d'origine plus profonde (Castruccio et al., 2016). Les signatures granulométrique et morphométrique des lapilli et cendres produits lors de la phase paroxysmale, qui a duré neuf heures, témoignent de deux explosions distinctes aux dynamismes et processus de fragmentation différents. Ces travaux ont contribué à renforcer les échanges entre l'IRD-LMV et l'université du Chili (cf. séjours de deux chercheurs chiliens au LMV en 2016).

#### **IV - 4. Autres chantiers sur la zone Amérique Latine - Caraïbes**

Les cordillères de Colombie sont la prolongation septentrionale des Andes d'Equateur, mais la chaîne volcanique y est nettement plus étroite, avec une seule lignée d'édifices. La Colombie a été frappée par plusieurs catastrophes volcaniques significatives, dont celle d'Armero en 1985 (coulées de boue du Nevado del Ruiz), qui a marqué l'émergence progressive de la volcanologie dans ce pays. Des travaux réalisés par le LMV au cours des années 1980 ont permis d'identifier les menaces associés à certains stratovolcans de l'arc (e.g. Nevado del Tolima et Cerro Machín, Thouret et al., 1995), et de mieux saisir les causes de la catastrophe d'Armero. Par la suite, les conditions politiques ont considérablement réduit les interactions avec ce pays de grand intérêt volcanologique. Toutefois, de récents échanges avec le Service Géologique Colombien (SGC, suite d'INGEOMINAS) et l'université Los Andes de Bogotá laissent entrevoir, notamment dans le cadre du LMI SVAN basé à Quito, de nouvelles actions de recherche avec ce pays prometteur.

D'autres recherches du laboratoire de volcanologie de l'université de Clermont-Ferrand ont été conduites depuis plus de trois décennies au

Mexique. En effet, de nombreux travaux avaient d'une part été menés avant le rattachement de l'IRD au LMV. Ces recherches avaient focalisé sur les grands stratovolcans de l'arc mexicain, surtout le Popocatépetl, le Colima, et le Pico de Orizaba (Hoskuldsson et Robin, 1991). Les résultats ont montré la cyclicité de comportement de certains édifices, le rôle des mélanges de magmas dans la dynamique de certaines éruptions, conduisant à proposer des modèles intégrés de comportements éruptifs à moyen terme (Robin et al., 1994). Des recherches connexes ont été conduites sur certaines caldéras pour examiner le potentiel géothermique associé (e.g. Los Azufres, Pradal et Robin, 1994). Plus récemment, des travaux associant l'OPGC, le LMV et l'IRD, ainsi que le CENAPRED Mexicain et l'université Autonome du Mexique (UNAM) ont concerné la surveillance du Popocatépetl, situé à proximité de la capitale Mexico, en installant un radar doppler expérimental pour caractériser les émissions de cendre du volcan, qui s'est réveillé en 1994 et reste actif depuis (travaux de F. Donnadiou, CNAP-LMV).

Dans le secteur des Caraïbes, le LMV et l'IRD s'intéressent aussi au volcanisme explosif des Antilles françaises où la Soufrière de la Guadeloupe et la Montagne Pelée de la Martinique exercent des menaces importantes sur les populations locales. Des recherches très détaillées, surtout à la Martinique, avaient impliqué de nombreux chercheurs du LMV dans les années 1980 (e.g. Boudon et Gourgaud, 1989, volume spécial du *Journal of Volcanology et Geothermal Research*). Aujourd'hui, un nouveau projet ANR nommé RAVEX (*Développement d'une approche intégrée pour la réduction des Risques Associés au Volcanisme EXplosif, de la recherche sur l'aléa aux outils de gestion de crise : le cas de la Martinique, 2016-20*) associe le LMV-IRD à d'autres laboratoires français pour mieux comprendre les éruptions explosives de la Montagne Pelée, et leurs effets potentiels sur les secteurs urbanisés de l'île. Ce projet propose des approches numériques et expérimentales pour évaluer les conditions d'effondrement de colonnes éruptives et la formation des écoulements pyroclastiques, en considérant en aval l'impact sur la formation éventuelle de tsunamis. Il focalise de plus sur les questions de vulnérabilité et de gestion de risques volcaniques évoquées ci-dessous.

## **V - Relier la volcanologie aux sciences de l'Homme et de la société dans les PED**

---

Les recherches présentées plus haut dans ce chapitre indiquent que l'activité du LMV-IRD s'est concentrée sur le terme « menace » de l'équation du risque volcanique. Cependant, il est progressivement apparu que la prise en compte de ce seul paramètre était largement insuffisante. En effet, dans un contexte d'accroissement généralisé des populations et des infrastructures connexes dans les PED, il devenait incontournable d'intégrer la dimension sociétale et la notion de vulnérabilité dans les approches du LMV-IRD.

Cette démarche consistant à promouvoir les recherches interdisciplinaires et intersectorielles entre géosciences et sciences humaines et sociales est encouragée par l'ANR, par le labex ClerVolc (via son programme 7), et surtout par l'IRD (via son nouveau plan d'orientation stratégique 2016-30).

Des initiatives de ce type avaient été lancées auparavant dans le cadre des programmes LMV-IRD et IG-EPN en Equateur, à l'occasion de certains travaux qui sollicitaient des historiens et des archéologues américanistes, venant de l'IRD, du CNRS ou des universités d'Equateur. Par exemple, les recherches effectuées dans les archives coloniales des pays andins et d'Espagne ont mis à jour des documents précieux qui offrent des informations de grande valeur sur l'activité historique de certains volcans des Andes. Citons au Pérou les témoignages écrits concernant l'éruption de 1600 du Huaynaputina (Thouret et al., 2002) ou sur une éruption du début du dix-neuvième siècle dont la source a été identifiée récemment au Tutupaca (Samaniego et al., 2015), ou encore les correspondances et peintures naïves décrivant les premières éruptions historiques du Tungurahua en Equateur (Le Pennec et al., 2008, 2016). Citons aussi la découverte du plus ancien désastre volcanique connu à ce jour dans les Andes et dans toutes les Amériques (Le Pennec et al., 2013). L'événement s'est produit au volcan Tungurahua et a été daté au  $^{14}\text{C}$  vers 1100 ans calendaires avant le Christ. Il a été caractérisé par un grand glissement du flanc ouest de l'édifice, accompagné par une déferlante vélocité chargée de cendres et lapilli, qui s'est propagée dans les vallées comme sur les reliefs avoisinants. Des tessons de céramique trouvés dans les dépôts (fig. 10 gauche) attestent la présence de peuplements de la culture « Formative » dans la région (civilisation précolombienne présente en gros entre 4000 et 300 ans avant le Christ en Equateur). Plusieurs chercheurs du LMV-IRD travaillent actuellement sur une éruption plus récente au Pérou, en collaboration avec l'INGEMMET, l'IGP et d'autres institutions sur le projet Huayruro porté par A. Finizola (IPGP et univ. La Réunion), et dédié aux études archéologique et géophysique des cités ensevelies lors de la puissante éruption de 1600 du Huaynaputina.

Des études récentes du labex ClerVolc, en partenariat avec le Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive (LAPSCO) de l'université Clermont-Auvergne, ont été dédiées à la perception des menaces naturelles et volcaniques, en utilisant une approche neurocognitive. L'étude consistait à examiner les différentes décisions prises par des individus placés en contexte de menace d'origine volcanique, en analysant les réactions quasi-spontanées des personnes exposées. A partir des informations obtenues, l'idée est d'améliorer la prise de décision lors des situations d'urgence volcanique, en reconsidérant la façon de formuler les messages d'alerte pour obtenir une réaction appropriée des populations menacées. L'étude a été appliquée aux



Figure 10 : A gauche : les dépôts de l'activité volcanique passée peuvent contenir des éléments et artefacts d'intérêt archéologique qui aident à comprendre les liens entre les volcans et les sociétés anciennes. Par exemple, ce fragment de bol a été retrouvé en 2016 dans les produits du volcan Tungurahua, et correspond aux céramiques de l'occupation d'âge probablement Formatif qui a été dévastée lors de la grande éruption VEI5 du volcan, vers 1100 ans avant le Christ. A droite : des membres de la petite communauté rurale de Choglontus (en 2014), vivant en zone rouge sur des produits de nuées ardentes historiques au pied sud-est du Tungurahua (5023 m), visible en arrière-plan. Victor Zumba (personne au premier plan à droite) est aussi un « vigile » qui transmet régulièrement par radio ses observations de l'activité vers l'Observatoire Volcanologique du Tungurahua (OVT). Les membres de cette communauté ont participé aux enquêtes décrites dans le texte concernant les études de psychologie et d'économie menées dans le cadre du labex ClerVolc et du LMI SVAN. Pour les remercier, un T-shirt leur a été offert au logo de ClerVolc (visible sur ce cliché).

communautés qui vivent à proximité du volcan Tungurahua (fig. 10 droite), dont les crises éruptives répétées offrent des conditions intéressantes pour mener l'étude. Cette dernière a surtout porté sur la dimension d'incertitude, très présente en contexte de crise, et qui génère des émotions capables d'influencer négativement la prise de décision des personnes menacées. En effet, l'incertitude liée à certaines situations de crise peut provoquer des réactions de peur et entraîner d'autres mécanismes émotionnels destinés à gérer les conséquences de ces situations, ce qui se traduit par certaines décisions d'urgence parfois maladroites des individus. Les résultats ont montré qu'une diminution de l'incertitude des conséquences dans l'information transmise à la population pouvait améliorer certaines prises de décision, surtout dans les situations où la crise met en jeu le domicile ou des dilemmes moraux. Enfin, cette recherche a également abouti à l'élaboration

d'une base de photographies (Natural Disasters Picture System, NDPS) permettant d'étudier les réactions humaines face aux principales menaces naturelles (volcans, séismes, tornades etc.).

Toujours dans le cas du Tungurahua, un autre projet mené en partenariat avec des économistes du développement au CERDI (Centre d'Etudes et de Recherches en Développement International, université Clermont-Auvergne) vise à quantifier l'impact économique des éruptions volcaniques sur les individus, les ménages, et les communautés proches du volcan. Adossée au LMI SVAN de Quito, cette recherche s'effectue dans le cadre d'un projet de la Région Auvergne et de deux labex (ClerVolc, et IDGM+, Initiative pour le Développement et la Gouvernance Mondiale). Depuis la reprise d'activité en 1999, les habitants vivant autour de ce volcan ont été confrontés à des évacuations volontaires ou forcées de durées variables, et à des chocs économiques conduisant parfois à des décisions de migrations temporaires ou définitives. L'activité du volcan s'est de fait traduite par des effets importants sur la santé de certains individus, et a provoqué des dommages aux habitations, aux routes et voies d'accès aux terrains, aux cultures, au bétail, etc. Sur la base d'enquêtes détaillées préparées au CERDI et conduites par une entreprise privée de sondage de Quito, l'étude cherche à analyser les adaptations économiques mises en place par les personnes, les familles et les communautés, pour faire face à toutes ces perturbations. Les résultats, en cours de traitement, permettront de formuler des recommandations pour diminuer l'impact économique négatif des éruptions volcaniques sur les populations rurales dans les PED (gestion de l'épargne si elle existe, gestion des investissements et des éventuels produits d'assurance, conseils pour la diversification des activités économiques, pour minimiser les risques de bascule vers la grande pauvreté etc.). D'autres projets sur les instabilités économiques négatives ou positives provoquées par l'activité volcanique sont à l'étude (tourisme, agriculture, trafic aérien etc.), notamment dans le cadre de la candidature I-Site CAP 20-25 du pôle clermontois au programme d'Investissement d'Avenir du gouvernement français.

De même, le projet déjà mentionné de l'ANR RAVEX sur le volcanisme explosif de la Martinique s'intéresse aux implications sociétales des recherches menées en amont, comme les études numériques et expérimentales sur la mobilité des écoulements pyroclastiques et la possible formation de tsunamis associés. Il s'agit d'une part de produire de nouvelles cartes d'exposition aux différents types de menaces volcaniques directes ou indirectes (i.e. incluant les lahars et les tsunamis), et d'autre part, assurer le transfert des nouvelles connaissances vers les responsables et les acteurs de la réduction du risque, ainsi que vers la population elle-même. Cela requière de bien connaître le tissu de partenaires engagés dans la gestion préventive

et la réduction des risques naturels à la Martinique, et d'examiner la nature et l'efficacité de leurs interactions, surtout en cas d'alerte. En outre, il s'agit d'appréhender, au sein de la population et des organismes et autorités publiques, la perception des menaces exercées par des phénomènes qui ne se sont plus produits depuis plusieurs générations. Sur la base de ces recherches, le projet prévoit d'émettre des propositions pour améliorer les circuits et mécanismes de réponses aux situations de crises volcaniques sur l'île et dans l'archipel des Petites Antilles.

## VI - Conclusion

---

Les recherches volcanologiques, au LMV ou ailleurs, ont toujours été motivées par les questions de dangers et risques associés aux phénomènes éruptifs. Parallèlement, les données d'épidémiologie recueillies après un désastre volcanique indiquent que les PED de la zone intertropicale péripacifique, déjà très exposés aux éruptions, sont aussi les plus vulnérables, du fait de facteurs socio-économiques défavorables. Au cours des années 1970-90, l'activité de recherche et d'observation du LMV et de l'OPGC de l'université de Clermont-Ferrand s'est graduellement engagée sur ce thème complexe. L'approche qui consiste à travailler en partenariat avec des institutions de ces PED et à former des cadres spécialisés en volcanologie est rapidement apparue comme la plus appropriée. L'expertise consiste à co-construire des projets d'intérêt commun au LMV et à ses partenaires pour améliorer la compréhension des processus volcaniques et des risques associés, sur le long et moyen termes, ou en contexte de crise. Ce type de coopération implique des échanges réguliers pour mener à bien les projets, et peut nécessiter des missions longues, voire des expatriations, pour ancrer le partenariat sur des programmes ambitieux et pérennes.

Ainsi, les actions initiales conduites dans les années 1980-90, souvent sous la tutelle du MAE, ont produit des résultats de premier plan avec des partenaires des PED alors dépourvus d'équipements et d'expertise. Toutefois, ces projets ont parfois révélé certaines limites parce qu'ils n'avaient pas été conçus sur le long terme, seule durée compatible avec une recherche de qualité dans les PED. Les évolutions institutionnelles de l'ORSTOM (devenu en 1984 établissement public à caractère scientifique et technologique, EPST, puis IRD en 1999), et la création d'une équipe de volcanologie en son sein ont été deux étapes essentielles de la structuration de la recherche volcanologique pour et avec les PED. Parallèlement, les transformations opérées à l'université Blaise Pascal ont conduit à un renforcement marqué de la thématique de volcanologie, avec la formation

du laboratoire Magmas et Volcans en 1994. La mise en synergie des compétences scientifiques de l'IRD et du LMV, adossées au parc analytique performant du laboratoire, s'est concrétisée en réunissant l'équipe de volcanologie de l'IRD à l'unité de recherche Magmas et Volcans en 2004. C'est cette combinaison qui a permis de fonder une recherche partenariale pérenne, modernisée, et plus équitable avec les PED, en utilisant notamment les nouveaux instruments de l'IRD comme les JEA1 ou le LMI SVAN, ou d'autres programmes d'investissement d'avenir comme le labex ClerVolc, et prochainement l'I-SITE CAP 20-25. De plus, les institutions des PED sont désormais en mesure de porter et financer des projets de plus en plus ambitieux, qu'il est possible d'articuler avec les programmes LMV-IRD.

Dans un paysage institutionnel et géopolitique en constante évolution, ce chapitre montre que cette structure a abouti à des coopérations durables et fructueuses, avec une production scientifique soutenue, et à l'élévation de nombreux jeunes chercheurs des PED au niveau de la recherche volcanologique internationale. Le résultat majeur de ces coopérations est d'avoir contribué à faire progresser de manière très substantielle la connaissance des volcans des PED, de leurs comportements et des menaces qu'ils exercent. L'identification de volcans potentiellement actifs, l'estimation des récurrences et magnitudes éruptives, la détermination des types et styles d'éruption sont autant d'informations précieuses pour établir des documents cartographiques de menaces, mais aussi pour déployer les réseaux de surveillance adaptés. De plus, ces recherches participent à l'amélioration de la compréhension des processus qui gouvernent les phénomènes magmatiques et volcaniques à différentes échelles: modalités de la subduction, formation des liquides magmatiques profonds, processus de transfert et stockage des magmas, conditions pré-éruptives et de fragmentation (avec possibles interactions eau-magma), mécanismes de transport et de sédimentation des produits de panaches volcaniques ou de nuées ardentes, relations volcano-tectoniques, surveillance instrumentale de la sismicité, des gaz, des déformations, des produits solides etc. Au final, les résultats des recherches LMV-IRD dans les PED renouvèlent profondément la vision du volcanisme dans les principaux pays partenaires, et posent de nouvelles bases pour une appréciation éclairée des menaces et risques volcaniques. Compte tenu de ces résultats, les efforts pour associer les études de vulnérabilité et les analyses de l'impact sociétal des éruptions devront se poursuivre. Dans le contexte d'accroissement démographique accéléré des PED, accompagné d'une expansion urbaine soutenue sur et à proximité des volcans dangereux, ces connaissances nouvelles aideront à la gestion modernisée des futurs événements volcaniques et contribueront dans leur domaine à atteindre les objectifs du développement durable ciblés par l'Organisation des Nations Unies pour la période 2015-2030.

## Remerciements

Cette note est dédiée à la mémoire de deux collègues de l'IRD, Michel Monzier, décédé en mission à Quito en septembre 2004, et Jean-Philippe Eissen, décédé à Clermont-Ferrand en mars 2007. Tous deux ont été des acteurs essentiels de la volcanologie de l'ORSTOM puis de l'IRD, notamment au LMV, et l'apport de leurs expertises dans le Pacifique Sud et les Andes a été considérable. Elle est également dédiée à Pierre Vincent, Professeur de l'UBP disparu en avril 2014, et Guy Camus, Maître de conférences de l'UBP décédé en juin 2000. Pierre et Guy avaient très tôt formulé l'idée que le LMV avait vocation à constituer un pôle privilégié pour la recherche et la formation de cadres en volcanologie au bénéfice des PED. Nous tenons également à exprimer notre plus sincère gratitude à l'ensemble des nombreux personnels des universités et instituts partenaires impliqués dans les activités de coopération en volcanologie avec l'IRD et le LMV. Nos remerciements vont aussi vers A. Gourgaud pour sa relecture du texte, ainsi que vers P. Bachèlery et G. Delcampo pour leur patiente coordination éditoriale de l'ouvrage.

## Références bibliographiques

---

- Andrade D., Eissen J.-P., Bourdon E., Monzier M., Beate B., Hidalgo S., (2004). Diferencias petrográficas y geoquímicas en las lavas del Complejo Volcanico Pululahuá. *Investigaciones en Geociencias (EPN, Quito)*, 1, 3-56.
- Andres R.-J., Kasgnoc A.-D. (1998). A time-average inventory of subaerial volcanic sulfur emissions. *Journal of Geophysical Research*, 103, 25251-25261.
- Aubert M., Dana I.-N. (1994). Interpretation of the self-potential (SP) radial profiles in volcanology. Possibilities of the SP method for the monitoring of the active volcanoes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1652, 113-122.
- Auker M.-R., Sparks R.S.J., Siebert L., Croweller H.-S., Ewert J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 2 (2).
- Bachèlery P., Morin J., Villeneuve N., Soulé H., Nassor H. Radadi Ali A. (2016). Structure and Eruptive History of Karthala Volcano. In: *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean* (Editeurs : P. Bachèlery, J.-F. Lenat, A. Di Muro, L. Michon, *Série Active Volcanoes of the World*), pp 345-366. Doi: 10.1007/978-3-642-31395-0\_22.
- Bani P., Normier A., Bacri C., Allard P., Gunawan H., Hendrasto M., Surono, Tsanev V. (2015). First evaluation of Anak Krakatau volcanic degassing into the atmosphere. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302, 237-241. doi : 10.1016/j.jvolgeores.2015.07.008.
- Bani P., Oppenheimer C., Allard P., Shinohara H., Tsanev V., Carn S., Lardy M., Garaebiti E. (2012). First estimate of volcanic SO<sub>2</sub> budget for Vanuatu island arc. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 211-212, 36-46. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.10.005.
- Bani P., Surono, Hendrasto M., Gunawan H., Primulyana S. (2013). Sulfur dioxide emissions from Papandayan and Bromo, two Indonesian volcanoes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2399-2407.

Barba D., Robin C., Samaniego P., Eissen J.-P. (2008). Recurrent Pyroclastic flows at Chimborazo Volcano, between ~8000 and ~1000 yr BP. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 27-35. Doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.004.

Beaumais A., Bertrand H., Chazot G., Dosso L., Robin C. (2016). Temporal magma source changes at Gaua volcano, Vanuatu island arc. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 322, 30-47. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.026

Bernard B., Hidalgo S., Robin C., Beate B., Quijozaca J. (2014). The 3640-3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology* 76, 849-869. Doi 10.1007/s00445-014-0849-z.

Bernard B., van Wyk de Vries B., Barba D., Leyrit H., Robin C., Alcaraz S., Samaniego P. (2008). The Chimborazo sector collapse and debris avalanche: deposit characteristics as evidence of emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 36-43.

Bernard J., Eychenne J., Le Pennec J.-L., Narvaez D. (2016). Mass budget partitioning during explosive eruptions: insights from the 2006 paroxysm of Tungurahua volcano, Ecuador. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, doi: 10.1002/2016GC006431.

Bernard J., Kelfoun K., Le Pennec J.-L., Vallejo Vargas S. (2014). Pyroclastic flow erosion and bulking processes: comparing field-based vs. modeling results at Tungurahua volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 76, 858, doi: 10.1007/s00445-014-0858-y.

Bernard J., Le Pennec J.-L. (2016). The milling factory: Componentry-dependent fragmentation and fines production in pyroclastic flows. *Geology*, 44: 907-910. doi:10.1130/G38198.1.

Boubon G., Gourgaud A. (1989). Mount Pelée. *Journal of volcanology and geothermal research*, numéro spécial, 38 (1-2), 1-213.

Bourdier J.-L., Pratomo I., Thouret J.-C., Boudon G., Vincent P.-M. (1997). Observations, stratigraphy and eruptive processes of the 1990 eruption of Kelut volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 78 (3-4), 181-203.

Bourdon E., Eissen J.-P., Gutscher M.-A., Monzier M., Hall M.-L., Cotten J., 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth Planetary Science Letters* 205, 123-138.

Bourdon E., Eissen J.-P., Gutscher M.-A., Monzier M., Samaniego P., Robin C., Bollinger C., Cotten J. (2002a). Slab melting and slab melt metasomatism in the Northern Andean Volcanic Zone: adakites and high-Mg andesites from Pichincha volcano (Ecuador). *Bulletin de la Société Géologique de France* 173, 195-206.

Bourdon E., Eissen J.-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J., Hall M.-L. (2002b). Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology* 43, 199-217.

Camus G., Gourgaud A., Mossand-Berthommier P.-C., Vincent P.-M. (2000). Merapi (Central Java, Indonesia): An outline of the structural and magmatological evolution, with a special emphasis to the major pyroclastic events. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 139-163.

Camus G., Gourgaud G., Vincent P., 1987. Petrologic evolution of Krakatau (Indonesia): Implications for a future activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 299-316.

Castruccio A., Clavero J., Segura A., Samaniego P., Roche O., Le Pennec J.-L., Drogue B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78, 62, doi: 10.1007/s00445-00016-01058-00448.

Ettinger S., Mounaud L., Magill C., Yao-Lafourcade A.-F., Thouret J.-C., Manville V., Negulescu C., Zuccaro G., De Gregorio D., Nardone S., Uchuchoque J.A.L., Arguedas A., Macedo L., Llerena N.-M. (2015). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563-581, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.017.

Eychenne J., Le Pennec J.-L. (2012). Sigmoidal particle density distribution in a subplinian scoria fall deposit. *Bulletin of Volcanology* 74, 2243-2249. Doi: 10.1007/s00445-012-0671-4.

Eychenne J., Le Pennec J.-L., Ramón P., Yepes H. (2013). Dynamics of explosive paroxysms at open-vent andesitic systems: High-resolution mass distribution analyses of the 2006 Tungurahua fall deposit (Ecuador): *Earth and Planetary Science Letters* 361, 343-355, doi:10.1016/j.epsl.2012.11.002.

Eychenne J., Le Pennec J.-L., Troncoso L., Gouhier M., Nedelec J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grainsize distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74: 187-205. Doi: 10.1007/s00445-011-0517-5.

Finizola A., Lénat J.-F., Macedo O., Ramos D., Thouret J.-C., Sortino F. (2004). Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135 (4), 343-360.

Froger J.-L., Remy D., Bonvalot S., Legrand D. (2007). Two scales of inflation at Lastarria-Cordon del Azufre volcanic complex, central Andes, revealed from ASAR-ENVISAT interferometric data. *Earth and Planetary Science Letters*, 255 (1-2), 148-163.

Galle B., Oppenheimer C., Geyer A., McGonigle A.J.S., Edmonds M., and Horrock L.-A. (2003). A miniaturised UV spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: A new tool for volcano surveillance, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 119, 241-254.

García-Aristizabal A., Kumagai H., Samaniego P., Mothes P., Yepes M., Monzier M. (2007). Seismic, petrologic and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 161 (4), 333-351. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.007.

Gaunt H.-E., Bernard B., Hidalgo S., Proaño A., Wright H., Mothes P., Criollo E., Kueppers U. (2016). Juvenile magma recognition and eruptive dynamics inferred from the analysis of ash time series: The 2015 reawakening of Cotopaxi volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.10.013.

Gerbe M.-C., Gourgaud A., Sigmarsson O., Harmon R., Joron J.-L. (1992). Mineralogical and geochemical evolution of the 1982-1983 Galunggung eruption (Indonesia). *Bulletin of Volcanology* (1992) 54, 284, doi: 10.1007/BF00301483.

Gourgaud A., Thouret J.-C., Bourdier J.-L. (2000). Stratigraphy and textural characteristics of the 1982-83 tephra of Galunggung volcano (Indonesia): implications for volcanic hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104 (1-4), 169-186.

Hall M.-L., Mothes P., Samaniego P., Militzer A., Beate B., Ramón P., Robin C. (2017). Antisana volcano: A representative andesitic volcano of the eastern cordillera of Ecuador: Petrography, chemistry, tephra and glacial stratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences*, 73, 50-64. Doi: 10.1016/j.jsames.2016.11.005

Hall M.-L., Robin C., Beate B., Mothes P., Monzier M., (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91, 1-21.

Hall M.-L., Samaniego P., Le Pennec J.-L., Johnson J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to Present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 1-6. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012.

Hidalgo S., Battaglia J., Arellano S., Steele A., Bernard B., Bourquin J., Galle B., Arrais S., Vázquez F. (2015). SO<sub>2</sub> degassing at Tungurahua volcano (Ecuador) between 2007 and 2013: Transition from continuous to episodic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 1-14.

Hidalgo S., Gerbe M.-C., Martin H., Samaniego, Bourdon E. (2012). Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr-Nd-O isotopes. *Lithos*, 132-133, 180-192.

- Hidalgo S., Monzier M., Almeida E., Chazot G., Eissen J.-P., van der Plicht J., Hall M.-L. (2008). Late Pleistocene and Holocene activity of Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 16-26.
- Hidalgo S., Monzier M., Martin H., Chazot G., Eissen J.-P., Cotten J. (2007). Adakitic magmas in the Ecuadorian volcanic front: petrogenesis of the Iliniza Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159 (4), 366-392.
- Hidalgo S., Monzier M., Martin H., Chazot G., Eissen J.-P., Cotten J. (2007). Adakitic magmas in the Ecuadorian Volcanic Front: Petrogenesis of the Iliniza Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159, 366-392.
- Hoskuldsson A., Robin C. (1993). Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, Eastern Mexico. *Bulletin of Volcanology* 55, 571-587.
- Kantzas E.-P., McGonigle A.J.S., Tamburello G., Aiuppa A., Bryant R.-G. (2010). Protocols for UV camera volcanic SO<sub>2</sub> measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194, 55-60.
- Kelfoun K., Samaniego P., Palacios P., Barba D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 71: 1057. Doi : 10.1007/s00445-009-0286-6.
- Le Pennec J.-L., de Saulieu G., Samaniego P., Jaya D., Gailler L. (2013). A devastating Plinian eruption at Tungurahua volcano reveals Formative occupation at ca 1100 cal BC in Central Ecuador. *Radiocarbon*, 55, 1199-1214.
- Le Pennec J.-L., Hermitte D., Dana I., Pezard P., Coulon P., Cochemé J.-J., Mulyadi E., Ollagnier F., Revest C., (2001). Electrical conductivity and pore-space topology of Merapi lavas: implications for the degassing of porphyritic andesite magmas. *Geophysical Research Letters*, 28, p. 4283-4286.
- Le Pennec J.-L., Ramón P., Robin C., Almeida E. (2016). Combining historical and 14C data to assess pyroclastic density current hazards in Baños city near Tungurahua volcano (Ecuador). *Quaternary International*, 394, 98-114, doi: 10.1016/j.quaint.2015.06.052.
- Le Pennec J.-L., Ruiz G., Ramón P., Palacios E., Mothes P., Yepes H., (2012). Impact of tephra falls on Andean communities: the influences of eruption size and weather conditions during the 1999-2001 activity at Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 217-218, 91-103.
- Le Pennec J.-L., Ruiz G.-A., Eissen J.-P., Hall M.-L., Fornari M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206, 121-135, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.06.002.
- Le Pennec J.-L., Jaya D., Samaniego P., Ramón P., Moreno S., Egred J., van der Plicht J. (2008). The AD 1300-1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 70-81. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.019.
- Lécuyer F., Bellier O., Gourgaud A., Vincent P.-M. (1997). Tectonique active du Nord-Est de Sulawesi (Indonésie) et contrôle structural de la caldeira de Tondano. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 325 (8), 607-613. Doi:10.1016/S1251-8050(97)89462-1.
- Leibrandt S., Le Pennec J.-L. (2015). Towards fast and routine analyses of volcanic ash morphometry for eruption surveillance applications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297, 11-27, doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.03.014.
- Lohmar S., Parada M., Gutiérrez F., Robin C., Gerbe M.-C. (2012). Mineralogical and numerical approaches to establish the pre-eruptive conditions of the mafic Licán Ignimbrite, Villarrica Volcano (Chilean Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 235-236, 55-69.

Lohmar S., Robin C., Gourgaud A., Clavero J., Parada M.-A., Moreno H., Ersoy O., López-Escob-L., Naranjo J.-A. (2007). Evidence of magma–water interaction during the 13,800 years BP explosive cycle of the Licán ignimbrite, Villarrica volcano (Southern Chile). *Revista Geológica de Chile* 34 (2), 233-247.

Martin H., Moyen J.-F., Guitreau M., Blichert-Toft J., Le Pennec J.-L. (2014). Why Archaean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones. *Lithos*, 198-199, 1-13, doi:10.1016/j.lithos.2014.02.017.

Meruane C., Tamburrino A., Roche O. (2010). On the role of the ambient fluid on gravitational granular flow dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 648, 381-404, doi: 10.1017/S0022112009993181.

Montserrat S., Tamburrino A., Roche O., Niño Y. (2012). Pore fluid pressure diffusion in defluidizing granular columns. *Journal of Geophysical Research—Earth Surface*, 117, F02034, doi: 10.1029/2011JF002164.

Montserrat S., Tamburrino A., Roche O., Niño Y., Ihle C.F. (2016). Enhanced run-out of dam-break granular flows caused by initial fluidization and initial material expansion. *Granular Matter* 18(1), 1-9, doi: 10.1007/s10035-016-0604-6.

Monzier M., Robin C., Eissen J.-P., Cotten J. (1997). Geochemistry vs seismo-tectonics along the volcanic New Hebrides Central Chain (Southwest Pacific). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 78, 1-29.

Monzier M., Robin C., Samaniego P., Hall M.-L., Cotten J., Mothes P., Arnaud N., (1999). Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 90, 49-79.

Monzier M., Robin C., Samaniego P., Hall M.-L., Cotten J., Mothes P., Arnaud N. (1999). Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 90, 49-79.

Morin J., Bachèlery P., Soulé H., Nassor H. (2016). Volcanic Risk and Crisis Management on Grande Comore Island. In: *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean* (Editeurs: P Bachèlery JF Lenat, A Di Muro, L Michon, Série Active Volcanoes of the World), pp 403-442. Doi: 10.1007/978-3-642-31395-0\_25.

Newhall C.-G., Self S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, 87: 1231-1238.

Paguican E.M.R., van Wyk de Vries B., Lagmay A.M.F. (2012). Volcano-tectonic controls and emplacement kinematics of the Iriga debris avalanches (Philippines). *Bulletin of Volcanology* 74, 2067. Doi:10.1007/s00445-012-0652-7

Picard C., Monzier M., Eissen J.-P., Robin C. (1995). Concomitant evolution of tectonic environment and magma-geochemistry, Ambrym volcano (Vanuatu - New Hebrides arc). In "Volcanism associated with extension at Consuming Plate Margins" *Journal of the Geological Society of London*, special publication 81, 135-154.

Pradal E., Robin C. (1994). Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 63 (3-4), 201-215.

Rivera M., Thouret J.-C., Samaniego P., Le Pennec J.-L. (2014). The 2006–2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270, 122-114. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.11.010.

Rivera M., Martin H., Le Pennec J.-L., Thouret J.-C., Gourgaud A., Gerbe M.-C. (2017). Petro-geochemical constraints on the temporal evolution of magmas erupted by El Misti volcano (Peru). *Lithos* 268-271: 240-259 doi:10.1016/j.lithos.2016.11.009.

Robin C. (1994). Les strato-volcans andésitiques. In *Le Volcanisme* (ouvrage collectif sous la direction de Jean-Louis Bourdier), série Manuels et Méthodes n° 25, Editions du BRGM, p 211-221.

Robin C., Eissen J.-P., Monzier M. (1993). Giant tuff cone and 12 Km-wide associated caldera at Ambrym (New Hebrides Arc). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55, 225-238.

Robin C., Eissen J.-P., Monzier M. (1994a). Ignimbrites of basaltic andesite and andesite compositions from Tanna, New Hebrides Arc. *Bulletin of Volcanology* 56, 10-22.

Robin C., Eissen J.-P., Monzier M. (1995). Mafic pyroclastic flows at Santa Maria (Gaua) Volcano, Vanuatu : the caldera formation problem in mainly mafic island arc volcanoes. *Terra Nova* 7, 436-443.

Robin C., Eissen J.-P., Samaniego P., Martin H., Hall M., Cotten J. (2009). Evolution of the late Pleistocene Mojanda-Fuya Fuya volcanic complex (Ecuador), by progressive adakitic involvement in mantle magma sources. *Bulletin of Volcanology* 71, 233. Doi: 10.1007/s00445-008-0219-9.

Robin C., Hall M., Jimenez M., Monzier M., Escobar P. (1997). Mojanda volcanic complex (Ecuador): development of two adjacent contemporaneous volcanoes with contrasting eruptive styles and magmatic suites. *Journal of South American Earth Sciences* 10, 345-359.

Robin C., Monzier M., Eissen J.-P. (1994b). The formation of the mid-fifteenth century Kuwae caldera (Vanuatu) by a hydroclastic and subsequent ignimbritic eruption. *Bulletin of Volcanology* 56, 170-183.

Robin C., Samaniego P., Le Pennec J.-L., Fornari M., Mothes P., Van der Plicht J. (2010). New radiometric and petrological constraints on the evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 72, 1109-1129, doi: 10.1007/s00445-010-0389-0.

Robin C., Samaniego P., Le Pennec J.-L., Mothes P., van der Plicht J (2008). Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 7-15.

Roche O. (2012). Depositional processes and gas pore pressure in pyroclastic flows: an experimental perspective. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1807-1820, doi: 10.1007/s00445-012-0639-4.

Roche O. (2015). Nature and velocity of pyroclastic density currents inferred from models of entrainment of substrate lithic clasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 418, 115-125, doi : 10.1016/j.epsl.2015.03.001.

Roche O., Buesch D.-C., Valentine G.-A. (2016). Slow-moving and far-travelled dense pyroclastic flows during the Peach Spring super-eruption. *Nature Communications*, 7, 10890, doi: 10.1038/ncomms10890.

Roche O., Montserrat S., Niño Y., Tamburrino A. (2008). Experimental observations of water-like behavior of initially fluidized, unsteady dense granular flows and their relevance for the propagation of pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 113, B12203, doi: 10.1029/2008JB005664.

Roche O., Montserrat S., Niño Y., Tamburrino A. (2010). Pore fluid pressure and internal kinematics of gravitational laboratory air-particle flows: insights into the emplacement dynamics of pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 115, B09206, doi: 10.1029/2009JB007133.

Roche O., Niño Y., Mangeney A., Brand B., Pollock N., Valentine G. (2013). Dynamic pore pressure variations induce substrate erosion by pyroclastic flows. *Geology*, 41, 1107-1110, doi: 10.1130/G34668.1.

Samaniego P., Barba D., Robin C., Fornari M., Bernard B. (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and hazardous compound volcano of the Northern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 221-222, 33-51. Doi : 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.014.

Samaniego P., Le Pennec J.-L., Robin C., Hidalgo S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199, 69-84. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010.

Samaniego P., Martin H., Monzier M., Robin C., Fornari M., Eissen J.-P., Cotten J. (2005). Temporal evolution of magmatism at Northern Volcanic Zone of the Andes: The geology and petrology of Cayambe volcanic complex (Ecuador). *Journal of Petrology* 46, 2225-2252. Doi:10.1093/ptrology/egi053.

Samaniego P., Martin H., Robin C., Monzier M. (2002). Transition from classical calc-alkalic to adakitic magmatism in the Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology* 30, 967-970.

Samaniego P., Monzier M., Robin C., Hall M.-L. (1998). Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 59, 451-459.

Samaniego P., Rivera M., Mariño J., Guillou H., Liorzou C., Zerathe S., Delgado R., Valderrama P., Scao V. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323, 110-128, doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.04.038.

Samaniego P., Robin C., Chazot G., Bourdon E., Cotten J. (2010). Evolving metasomatic agent in the Northern Andean subduction zone, deduced from magma composition of the long-lived Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Doi: 10.1007/s00410-009-0475-5.

Samaniego P., Valderrama P., Mariño J., Van Wyk De Vries B., Roche O., Manrique N., Chedeville C., Fidel L., Malnati J. (2015). The historical ( $218 \pm 14$  aAP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology* 77, 51, doi: 10.1007/s00445-015-0937-8.

Schiano P., Monzier M., Eissen J.-P., Martin H., Koga K.-T. (2010). Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160, 297. Doi: 10.1007/s00410-009-0478-2.

Silva Parejas C., Druitt T.-H., Robin C., Moreno H., Naranjo J.-A. (2010). The Holocene Pucón eruption of Volcán Villarrica, Chile: deposit architecture and eruption chronology. *Bulletin of Volcanology*, 72 (6), 677-692. Doi: 10.1007/s00445-010-0348-9.

Thouret J.-C., Cantagrel J.-M., Robin C., Murcia A., Salinas R., Cepeda H. (1995). Quaternary eruptive history and hazard-zone model at Nevado del Tolima and Cerro Machin volcanoes, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 66 (1-4) 397-426.

Thouret J.-C., Davila J., Eissen J.-P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina, AD1600, southern Peru. *Geology* 27, 435-438.

Thouret J.-C., Davila J., Rivera M., Gourgau A., Eissen J.-P., Le Pennec J.-L., Juvigné E. (1997). L'éruption explosive de 1600 au Huaynaputina (Pérou), la plus volumineuse de l'histoire dans les Andes centrales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 325, 931-938.

Thouret J.-C., Finizola A., Fornari M., Legeley-Padovani A., Suni J., Frechen M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 113 (12), 1593-1610.

Thouret J.-C., Juvigné E., Gourgau A., Boivin P., Dávila J. (2002). Reconstruction of the AD 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115 (3-4), 529-570.

Valderrama P., Roche O., Samaniego P., Van Wyk De Vries B., Bernard K., Mariño J. (2016). Dynamic implications of ridges on a debris avalanche deposit at Tutupaca volcano (southern Peru). *Bulletin of Volcanology* 78, 14, doi: 10.1007/s00445-016-1011-x.

Wright H.M.N., Cashman K.-V., Mothes P.-A., Hall M.-L., Ruiz G.-A., Le Pennec J.-L. (2012). Estimating rates of decompression from textures of erupted ash particles produced by 1999-2006 eruptions of Tungurahua volcano Ecuador. *Geology*, 40, 619-622. Doi:10.1130/G32948.1.

Zlotnicki J., Sasai Y., Toutain J.-P., Villacorte E.-U., Bernard A., Sabit J.-P., Gordon J.-M. Jr, Corpuz E.-G., Harada M., Punongbayan J.-T., Hase H., Nagao T. (2009). Combined electromagnetic, geochemical and thermal surveys of Taal volcano (Philippines) during the period 2005-2006. *Bulletin of Volcanology* 71, 29. Doi: 10.1007/s00445-008-0205-2.

L'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, souvent mieux connu sous son « petit nom » d'OPGC, est l'héritier direct de l'Observatoire Météorologique du puy de Dôme, inauguré en 1876 par Emile Alluard, et de la Chaire de Géologie de l'Université de Clermont-Ferrand, créée vers 1860 par Henri Lecoq. Parmi les anciens directeurs de l'Observatoire ou titulaires de la Chaire, on trouve le météorologue Henri Dessens, le géologue Philippe Glangeaud et surtout, à la frontière des deux disciplines, Bernard Brunhes, qui a découvert en 1905 les inversions du champ magnétique terrestre. La configuration actuelle de l'OPGC date de 1985, lorsque l'OPGC est devenu l'un des tous premiers Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) du CNRS, et quand ont été agrégés à l'Observatoire les laboratoires de météorologie et de géologie de l'Université Blaise Pascal.

Aujourd'hui composante de l'Université Clermont Auvergne, l'OPGC conserve de son histoire ce double regard sur les sciences géologiques et la physique de l'atmosphère, en intégrant les activités des laboratoires de recherche que sont le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) et le Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP), et en portant les formations en sciences de la Terre, de l'atmosphère et du climat.

L'Alliance Universitaire d'Auvergne a proposé de présenter l'intimité de l'OPGC à travers deux numéros. Dans le volume 1, sont abordés l'histoire de l'OPGC depuis ses origines à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ainsi que l'évolution des idées dans les domaines propres à l'OPGC jusqu'aux concepts actuels. La seconde partie du volume est dédiée à la présentation des services d'observation de la Terre dont l'OPGC a la responsabilité, depuis la station météorologique du puy de Dôme jusqu'aux systèmes de surveillance des volcans, en passant par le réseau sismologique de l'Auvergne. Le volume 2 présente quelques axes emblématiques des recherches menées dans les deux laboratoires de l'OPGC. Si ces recherches portent toutes sur le système Terre dans son ensemble, elles montrent également leur grande diversité. Les instruments nationaux en appui à la recherche sont ensuite présentés, ainsi que les recherches effectuées dans les pays du Sud sous le label IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Enfin, le volume se termine par une brève présentation des formations universitaires proposées par l'OPGC dans le cadre de l'Université Clermont Auvergne.

Les chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs de l'OPGC, ainsi que des spécialistes d'autres organismes dressent ici un état des lieux de la recherche actuelle sur les volcans et la Terre interne, ou sur la dynamique et la chimie de l'atmosphère terrestre. L'évolution de ces recherches au cours des dernières décennies est expliquée, de même que les techniques de pointe conduisant à une meilleure connaissance et un meilleur suivi des éruptions volcaniques ou de l'évolution du climat.



**Patrick Bachelery** est professeur au Laboratoire Magmas et Volcans. Après trente années passées à l'Université de La Réunion et à l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, il assure depuis 2011 la direction de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand. Spécialiste des volcans basaltiques en domaine océanique, il enseigne également aux étudiants auvergnats les subtilités de la pétrologie magmatique.



**Didier Laporte** dirige le Laboratoire Magmas et Volcans depuis janvier 2017. Il est directeur de recherche au CNRS et sa spécialité est l'étude des processus magmatiques par l'expérimentation haute pression - haute température : genèse des magmas dans la croûte continentale profonde ou dans le manteau supérieur ; ascension des magmas dans les conduits volcaniques.



**Joël Van Baelen** est directeur de recherche au CNRS et est actuellement le directeur du Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP). Après une thèse et un séjour post-doctoral au National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, Joël Van Baelen a développé son expertise dans les techniques de télédétection actives et passives de l'atmosphère. Recruté au CNRS en 1992, il a intégré le Centre de Recherches Météorologiques de Météo France à Toulouse avant de rejoindre le LaMP en 2004 pour développer l'étude des précipitations orographiques et urbaines à l'aide de radars multi-fréquences.



**Pierre Schiano** est professeur au Laboratoire Magmas et Volcans de l'Université Clermont Auvergne. Directeur du LabEx ClerVolc depuis 2011, il a aussi été directeur du Laboratoire Magmas et Volcans de 2007 à 2017. Ses travaux ont pour but d'identifier directement la composition des magmas primaires issus de la fusion du manteau terrestre, d'étudier leurs modalités de genèse et de préciser la nature de leurs sources profondes.

# DES VOLCANS AUX NUAGES

L'Observatoire  
de Physique du Globe  
de Clermont-Ferrand

Volume 2

## REVUE D'Auvergne

Publication de la Société des Amis de l'Université de Clermont Auvergne. Alliance Universitaire d'Auvergne.  
Siège social : Rectorat-Chancellerie de l'Université. 3, avenue Vercingétorix F-63000 Clermont-Ferrand.

## BUREAU DU CONSEIL D'ADMINISTRATION

Anciens Présidents : M. Pierre Pochet (1973-1984) †. Henri Peuchot (1984-1997) †

Président : Jean-Paul Fanget

Vice-Président : Bernard Decorps

Secrétaire Général : Olivier Bonnet

Directeur de la Revue d'Auvergne et responsable de la publication : Jean-Paul Fanget

Trésorier : Marie-Thérèse Gotorbe, adjoint : Jean Blanchon

Gestionnaire de la Revue d'Auvergne : André Gotorbe

Commissaire aux comptes : Michel Troquet

## MEMBRES D'HONNEUR

M. le Préfet de la Région Auvergne-Rhône-Alpes

M. le Président du Conseil régional Auvergne-Rhône-Alpes

M. le Maire de Clermont-Ferrand

M. le Président de Clermont Communauté

M. le Président du Conseil Economique et Social Régional Auvergne-Rhône-Alpes

Madame le Recteur de l'Académie de Clermont-Ferrand - Chancelier des Universités

Monsieur le Président de l'Université de Clermont Auvergne

## Des volcans aux nuages - Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand

Millésime 2017 1-2. Tome 131 - Numéro 622-623 - ISSN 1269-8946.

Photo de couverture : Nadège Montoux

## Tables générales 1884-2000. Liste des publications 2001-2016. Achat de numéros séparés

• Les **Tables Générales 1884-2000** de la **Revue d'Auvergne** sont disponibles au prix de 23 euros TTC franco.

• Une **liste des publications 2001-2016** peut être adressée sur simple demande auprès du gestionnaire de la revue (préférer l'envoi numérique) : M. André Gotorbe, 31 route du Mont-Dore - Theix F-63122 Saint-Genès-Champanelle. Tél. 04 73 87 00 08 (international 0034...) ou 06 08 60 71 01 (international 00336...) - Fax 07 73 87 00 07 (international 00337...). Courriel : andre.gotorbe@wanadoo.fr

• **Vente au numéro et achat de numéros séparés.** Les volumes de la **Revue d'Auvergne** sont en vente commerciale dans les principales librairies de Clermont-Ferrand et de la région Auvergne. Volume simple 20 €, volume double 30 €. On peut aussi se procurer les volumes récents et anciens directement à l'association : (Alliance Universitaire d'Auvergne) auprès du gestionnaire de la publication : André Gotorbe (coordonnées ci-dessus). Prix spécial pour les abonnés et sociétaires sur demande.

• Tarif des abonnements : année 2017

### ► France

1 - Individuel / (personnes physiques)	Ordinaire	45 €
	Etudiant	23 €
	Soutien	à partir de 80 €
2 - Institutionnel (personnes physiques)	Abonnement direct	70 €
	Abonnement par société de service	90 €
	Soutien	à partir de 100 €

### ► Europe

1 - Individuel / (personnes physiques)	Ordinaire	50 €
	Etudiant	30 €
	Soutien	à partir de 90 €
2 - Institutionnel (personnes physiques)	Abonnement direct	85 €
	Abonnement par société de service	100 €
	Soutien	à partir de 120 €

### ► Autres pays.

1 - Individuel (personnes physiques)	Ordinaire	70 €
	Etudiant	35 €
	Soutien	à partir de 100 €
2 - Institutionnel (personnes physiques)	Abonnement direct	105 €
	Abonnement par société de service	135 €
	Soutien	à partir de 130 €

Tous les règlements [abonnement, achat de numéros] seront libellés à l'ordre de la Société des Amis des Universités, [CCP Clermont-Ferrand 11.490.W]. Ils doivent être adressés à M. André Gotorbe.

• **L'abonnement assure le service des numéros du millésime de référence.**

La Revue d'Auvergne bénéficie du concours  
du Conseil Régional Auvergne - Rhône-Alpes.

## Auvergne – Rhône-Alpes

La ville de Clermont-Ferrand soutient par convention « l'action de développement et de diffusion de la culture scientifique et technique » de la **Revue d'Auvergne**.



L'Alliance Universitaire, Société des Amis de l'Université de Clermont Auvergne n'entend pas prendre la responsabilité des travaux ou mémoires insérés dans ses publications. Les faits, opinions ou théories qui peuvent y être émises sont de la seule responsabilité de leurs auteurs qui – de convention expresse – en assument toutes les charges et conséquences intellectuelles matérielles, juridiques et morales.