

# Processus et aléas volcaniques en Équateur

Rapporteur scientifique  
Pablo Samaniego, IRD

Référente  
Ghislaine Thirion, IRD



COLLECTION **Chemins d'impacts**

[www.editions.ird.fr](http://www.editions.ird.fr)

## Processus et aléas volcaniques en Équateur

# Processus et aléas volcaniques en Équateur



Éruption du volcan Tungurahua en 1999. On observe une forte émission de cendres depuis le cratère.  
© IRD/M. Monzier

## L'équipe de l'étude

Rapporteur scientifique :

Pablo Samaniego, IRD, laboratoire Magmas et Volcans (LMV)

Référente :

Ghislaine Thirion, IRD, Mission évaluation et programmation de la recherche (MEPR)

Référents méthodologiques :

Florence Sylvestre, IRD, Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege)

Laurent Vidal, IRD, unité « Sciences économiques et sociales de la santé et traitement de l'information médicale » (Sesstim), représentant de l'IRD au Mali

**Étude réalisée entre 2018 et 2019**

**IRD**

Institut de recherche pour le développement

**Chemins d'impacts**

Marseille, 2023

# Note introductive

Coordination éditoriale  
IRD/Ghislain Thirion

Coordination production  
IRD Éditions

Préparation de copie  
Stéphanie Quillon (34)

Conception maquette  
Aline Lugand (30)

Mise en page  
Desk ([www.desk53.com.fr](http://www.desk53.com.fr))

Publication en libre accès selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0, consultable à l'adresse suivante : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>. Elle autorise toute diffusion de l'œuvre, sous réserve de mentionner les auteurs et les éditeurs et d'intégrer un lien vers la licence CC BY-NC-ND 4.0. Aucune modification n'est autorisée et l'œuvre doit être diffusée dans son intégralité. Aucune exploitation commerciale n'est autorisée.



© IRD, 2023

ISBN PDF : 978-2-7099-3012-3

L'IRD a engagé en 2017 un projet pilote destiné à identifier et analyser l'impact de ses recherches sur les sociétés des pays du Sud. La démarche retenue est fondée sur la réalisation d'études de cas *ex post*, c'est-à-dire « après les faits ».

Les études sélectionnées pour ce projet sont représentatives des grands domaines scientifiques de l'IRD, avec pour problématique de fond le développement durable et pour démarche une recherche en partenariat. Ces analyses d'impact se sont inspirées des démarches méthodologiques développées dans le domaine de la recherche agronomique par l'Inrae (Asirpa – Analyse des impacts de la recherche publique agronomique) et le Cirad (Impress – Impact of research in the South). Ces études ont été choisies pour les impacts avérés de recherches menées par l'IRD et ses partenaires, qui ont été rapportés par la communauté scientifique.

Dans ce cadre général, le travail d'enquête a consisté à identifier les différents acteurs et éléments en jeu, et à mettre en évidence les interactions qui ont contribué au cheminement allant de la recherche à un impact sociétal. Sont ainsi retracés le contexte, les contributions des acteurs à la réalisation de la recherche, les produits issus de la recherche, les acteurs qui ont créé les conditions d'appropriation et de transformation des résultats de la recherche et les impacts générés. Le « chemin d'impact » ainsi tracé et la « chronologie » qui lui est associée sont des instruments clés pour caractériser les réseaux d'acteurs et les processus qui conduisent à des impacts. Ceux-ci ont été catégorisés en grands domaines : politique ; institutionnel ; environnemental ; économique ; social, sanitaire, éducatif, culturel ; renforcement des capacités ; académique.

Chaque impact identifié et décrit a été documenté à partir d'entretiens avec les acteurs du chemin d'impact.

Pour en savoir plus sur la démarche mise en œuvre pour réaliser ces études, vous pouvez consulter le guide sur l'Analyse multidimensionnelle des impacts de la recherche et de ses innovations sur le développement des sociétés du Sud (Miriades) publié dans la collection *Chemins d'impacts*.

Merci à tous ceux qui ont contribué à resserrer les liens entre recherche et société et à mettre en lumière la diversité de ces apports réciproques.

**Mission d'évaluation et de programmation de la recherche**

# Sommaire

Note introductive.....	5
Résumé.....	8
Contexte.....	10
Contexte de la coopération scientifique.....	11
<b>Contributions des acteurs.....</b>	<b>15</b>
Les acteurs scientifiques : l'IG-EPN et l'IRD.....	15
Genèse de la collaboration en volcanologie entre l'IG-EPN et l'IRD.....	15
Thématiques de recherche.....	16
Compétences et ressources mobilisées par l'IG-EPN et l'IRD.....	16
Le réseau des « <i>vigías</i> » du Tungurahua.....	19
Les pouvoirs publics équatoriens.....	20
<b>Produits de la recherche.....</b>	<b>21</b>
Les publications académiques.....	21
L'évaluation des aléas volcaniques.....	22
Scénarios éruptifs et cartes d'aléas.....	22
Cartes de distribution des produits volcaniques.....	24

La structuration des équipes et activités de recherche sur le long terme.....	24
JEA « Évaluation du risque volcanique en Équateur par l'approche probabiliste » (2003-2007).....	24
LMI « Séismes et volcans dans les Andes du Nord » (Svan).....	25
La formation par la recherche et l'enseignement.....	26
<b>Circulation des connaissances et intermédiaires.....</b>	<b>31</b>
L'IG-EPN.....	31
L'IRD.....	32
Les pouvoirs publics.....	33
Les organisations non gouvernementales.....	34
Le réseau des « <i>vigías</i> » du Tungurahua.....	35
<b>Premiers impacts.....</b>	<b>37</b>
Le renforcement des capacités de recherche en volcanologie.....	37
Le renforcement du système national de prévention et de gestion des risques volcaniques.....	40
L'impact social.....	42
<b>Impacts étendus.....</b>	<b>45</b>
Le renforcement de capacités.....	45
Annexes.....	49
Entretiens réalisés.....	49
Documents cités.....	50
Liste des sigles.....	53

## Résumé

En 1994, l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale de Quito (IG-EPN) s'engagent dans un programme de recherche conjoint sur l'histoire éruptive de plusieurs volcans équatoriens. Ce projet marque le début d'une longue et riche collaboration scientifique qui s'est ancrée, dès l'origine, dans une forte proximité de terrain et construite au fil de deux décennies.

À partir de 1999, l'Équateur fait face à des crises volcaniques successives, dont certaines dans des zones densément peuplées de la vallée interandine. Cette réactivation des volcans amène les volcanologues de l'IRD et de l'IG-EPN à adapter leurs priorités scientifiques initiales pour intégrer les questions posées par ces éruptions et leur observation en temps réel. Ces recherches se développent et se structurent autour d'une jeune équipe associée (JEA) qui constituera à son tour le noyau d'un laboratoire mixte international (LMI). Cette dynamique de recherche s'est également nourrie d'un important investissement dans la formation à la recherche. Plusieurs jeunes chercheurs équatoriens se sont ainsi formés dans les universités françaises, notamment au sein de l'unité mixte de recherche (UMR) « Laboratoire Magmas et Volcans » à Clermont-Ferrand. Certains d'entre eux assurent à présent des fonctions d'animation ou de direction de la recherche au sein de l'IG-EPN.

Le volcan Tungurahua a occupé une place singulière dans ces travaux. Sa longue phase éruptive qui a duré une quinzaine d'années (1999-2016) a constitué une sorte de laboratoire pour les volcanologues de l'IG-EPN et l'IRD. Cette inscription dans la durée a également favorisé un rapprochement entre les scientifiques, les communautés (notamment à travers le réseau des « *vigías* » du Tungurahua)

vivant aux alentours du volcan et les pouvoirs publics. Ce rapprochement s'est également concrétisé autour d'un projet de formation des communautés du Tungurahua à vivre près d'un volcan en éruption porté par des organisations non gouvernementales, l'IG-EPN et l'IRD et financé sur fonds européens.

Outre la production de connaissances sur le volcanisme équatorien, les chercheurs de l'IG-EPN et de l'IRD ont développé un volet de recherche plus appliquée (élaboration de scénarios éruptifs, actualisation et création de nouvelles cartes d'aléas) pour répondre aux besoins des institutions équatoriennes chargées de la prévention des risques volcaniques. Ils se sont également attachés à informer les citoyens et les autorités publiques sur les phénomènes volcaniques et à les sensibiliser à une approche préventive de l'aléa.

Ces activités de recherche ont eu des impacts dans trois domaines :

- le renforcement des capacités de recherche équatorienne en volcanologie et l'essor d'une dynamique de recherche de haut niveau au sein de l'IG-EPN lequel bénéficie d'une solide notoriété en Équateur comme à l'international ;
- le développement d'une approche préventive de long terme dans les mesures et dispositifs mis en place par les autorités publiques en charge de la prévention et de la gestion des crises volcaniques ;
- l'appropriation des mesures de prévention et de gestion des crises volcaniques par les populations vivant près du Tungurahua ce qui a probablement contribué à limiter le nombre de victimes lors de la violente éruption du volcan en 2006.

Après une présentation du contexte dans lequel les activités de recherche se sont déroulées, cette étude présente les acteurs impliqués dans le processus de recherche et décrit leurs contributions respectives, les résultats de ces recherches, les intermédiaires impliqués dans la circulation de ces connaissances vers la société et les impacts qui ont été constatés.

Cette étude est documentée à partir d'entretiens avec différents acteurs (scientifiques, autorités publiques, « *vigías* » du Tungurahua) qui ont été parties prenantes de ce chemin d'impact.

## Contexte

L'Équateur compte au moins quatre-vingt volcans d'âge Quaternaire (moins de 2 millions d'années) répartis sur la cordillère des Andes. Ils dominent et enserrant une dépression orientée Nord-Sud, la vallée interandine, fortement urbanisée. Une vingtaine de ces volcans sont considérés comme actifs ou potentiellement actifs<sup>1</sup>, huit d'entre eux ayant connu au moins une éruption depuis la conquête espagnole au XVI<sup>e</sup> siècle (HALL *et al.*, 2008).

À partir de 1999, l'Équateur se trouve confronté aux réveils successifs de plusieurs de ces volcans dont trois proches de zones urbaines : le Guagua



Éruption du 28 mai 2010 du volcan Tungurahua. Actif entre 1999 et 2016, il a alterné pendant cette période des phases d'intense activité et des phases de repos.

© IRD/B. Bernard

Pichincha (en phase éruptive de 1999 à 2001), situé à une douzaine de kilomètres de Quito, le Tungurahua (en phase éruptive de 1999 à 2016) qui surplombe la ville de Baños, le El Reventador (depuis 2002, toujours en phase éruptive) et, plus récemment, le Cotopaxi (en phase éruptive d'août à décembre 2015) dont l'aire d'impact englobe de larges zones densément peuplées de la vallée interandine – Quito et sa banlieue au nord et la ville de Latacunga au sud. D'autres volcans

tels que le Cayambe et le Chiles-Cerro Negro ont donné récemment (2014-2016) des signes de réactivation.

Cet intense regain d'activité éruptive à la fin des années 1990 et pendant les deux dernières décennies a constitué une menace permanente pour les zones urbanisées et les communautés rurales qui vivent autour de ces volcans. À cet égard, le volcan Tungurahua est un cas emblématique : première expérience des populations et des autorités publiques équatoriennes d'une éruption volcanique de longue durée (une quinzaine d'années) à laquelle ils étaient peu ou pas préparés ; dynamismes éruptifs divers et variés caractérisés par l'alternance de phases de repos et d'éruptions dont certaines ont entraîné l'évacuation des habitants ; impacts de ces éruptions récurrentes sur la vie des populations, leur santé, leurs habitations, leurs moyens de subsistance (agriculture, élevage) et sur les infrastructures et équipements collectifs.

Face à ces crises volcaniques à répétition, les institutions chargées de la prévention et de la gestion des risques ainsi que les pouvoirs publics étaient demandeurs d'informations et d'outils pour la gestion des crises. Ils se sont tournés vers les scientifiques, en particulier les volcanologues de l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale de Quito (IG-EPN) avec lequel l'IRD entretenait une collaboration depuis les années 1990.

## Contexte de la coopération scientifique

Créé en 1983, l'IG-EPN est le principal établissement public de recherche équatorien pour l'évaluation et la surveillance des aléas sismiques et volcaniques. Il est également chargé par l'État d'une mission nationale d'évaluation et de surveillance des phénomènes telluriques (figure 1). Cette décision, intervenue en 2003, officialisait un travail continu depuis les années 1980, devenu permanent lors de l'apparition des premiers signes avant-coureurs de la réactivation des volcans en 1998 et l'alerte donnée par l'IG-EPN aux pouvoirs publics.

Les premiers projets de coopération de l'IRD en Équateur datent de 1974. Ils concernaient initialement des études agraires. Les champs thématiques se sont ensuite progressivement diversifiés (études urbaines avec la municipalité de Quito, sciences de la terre, hydrologie, océanographie, virologie, archéologie)<sup>2</sup>.

1. Un volcan est considéré comme potentiellement actif s'il a connu au moins une éruption pendant l'Holocène (environ les 12 000 dernières années).

2. *30 ans en Équateur*. Actes des séminaires et ateliers scientifiques, Quito 11-16/10/2004. IRD, éditeur Pierre Gondard, 2007 : 19.

Des études en sciences humaines et sociales ont également été conduites sur le risque lié aux catastrophes naturelles.

Dans le domaine des géosciences, l'IG-EPN est un partenaire avec lequel l'IRD entretient de longue date des relations étroites et continues. Les premières collaborations scientifiques entre l'IRD (Orstom jusqu'en 1999) et l'Institut de géophysique remontent au début des années 1990. Elles concernaient la sismologie et la néotectonique. À l'époque, l'Institut de géophysique était le seul institut équatorien à conduire de façon systématique des recherches en volcanologie et en sismologie.

En 1994, dans le prolongement de cette collaboration, une équipe de volcanologues de l'IRD monte un programme scientifique conjoint avec l'IG-EPN.

Plusieurs raisons ont amené les volcanologues de l'IRD à s'intéresser aux volcans équatoriens :

- le nombre et la diversité (structurale, géochimique) des volcans équatoriens ;
- la densité de la population autour des volcans, notamment dans la vallée interandine ;
- le nombre limité d'études scientifiques existant à l'époque sur les volcans équatoriens ;
- l'existence de l'IG-EPN qui regroupait une équipe de géologues et géophysiciens intéressés par une collaboration avec les chercheurs de l'IRD.

Le réveil des volcans conduira les chercheurs de l'IG-EPN et de l'IRD à faire significativement évoluer les priorités et les thématiques initiales de ce programme. Dans le même temps, des relations plus étroites se sont nouées entre les volcanologues, les pouvoirs publics locaux et les représentants des communautés, notamment dans la région du volcan Tungurahua où se crée un réseau de surveillance de l'activité de ce volcan constitué de bénévoles issus de ces communautés (réseau des « vigías » du Tungurahua).

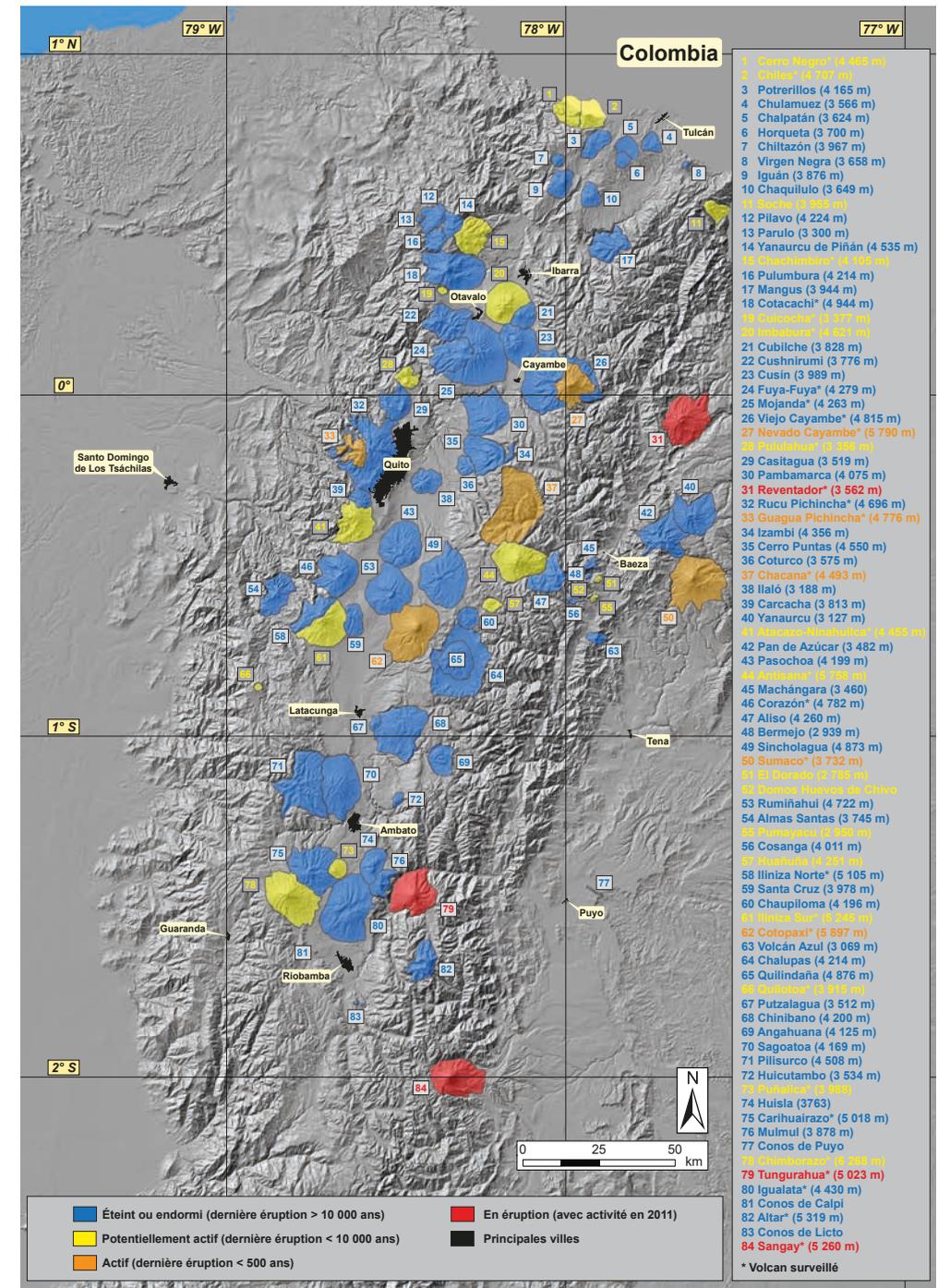


Figure 1  
Carte de l'arc volcanique équatorien (d'après Bernard et Andrade, 2011).  
Source des données volcanologiques : IG-EPN. Fonds de carte : modèle numérique du terrain (IRD/M. Souris).

# Contributions des acteurs

Ce chapitre présente les quatre principaux acteurs impliqués dans le processus de recherche, leur rôle ainsi que leurs apports respectifs à cette collaboration : l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale et l'IRD, pour le volet scientifique, ainsi que le réseau des « *vigías* » du volcan Tungurahua et les pouvoirs publics.

## Les acteurs scientifiques : l'IG-EPN et l'IRD

### Genèse de la collaboration en volcanologie entre l'IG-EPN et l'IRD

En 1994, une équipe de volcanologues de l'unité de recherche Géodynamique active, risques naturels (UR 06) intéressée par le volcanisme andin prend contact avec l'IG-EPN pour explorer la possibilité d'une collaboration scientifique. Ces premiers échanges aboutissent au montage d'un programme scientifique conjoint organisé initialement autour de deux axes : i) l'étude de la fréquence, la magnitude et la dynamique de l'activité éruptive ; ii) la genèse des magmas en contexte de subduction. Dans ce cadre, le rôle des chercheurs de l'IRD est de travailler sur quelques volcans choisis afin d'améliorer les connaissances de base du volcanisme équatorien, tout en formant de jeunes volcanologues. Ce programme est formalisé par une convention entre l'IRD et l'IG-EPN signée en 1994. Un premier volcanologue de l'équipe IRD est affecté cette même année à l'IG-EPN à Quito.

La réactivation des volcans Tungurahua et Guagua Pichincha, en 1999, amène les équipes de recherche IG-EPN et IRD à infléchir le programme scientifique pour l'adapter à ce nouveau contexte : l'observation de l'activité éruptive et l'étude systématique des produits éruptifs sont intégrées au programme, puis



Travail de terrain dans le cratère du volcan Guagua Pichincha, novembre 2018.  
© P. Samaniego

un volet de recherche plus appliquée (cartographie des aléas) est développé pour répondre aux besoins de l'IG-EPN qui se trouvait confronté aux questionnements des pouvoirs publics équatoriens.

### Thématiques de recherche

Deux critères ont présidé au choix des volcans identifiés dans ce programme : la fréquence éruptive et la vulnérabilité (présence des populations et infrastruc-

tures près des volcans). Aux volcans retenus initialement (Mojanda-Fuya Fuya, Sangay, Cayambe), et suite à la recrudescence de l'activité éruptive, ont été ajoutés, entre autres, le Tungurahua et le Guagua Pichincha. Ces deux volcans ont occupé une place centrale dans les travaux de recherche des années qui ont suivi.

L'étude du volcanisme équatorien portait sur quatre thèmes :

- la chronologie éruptive des principaux édifices de l'arc équatorien<sup>3</sup> ;
- l'évolution pétrologique à l'échelle régionale et locale<sup>4</sup> ;
- l'évaluation des aléas volcaniques<sup>5</sup> ;
- la caractérisation des dynamismes et le suivi des crises volcaniques<sup>6</sup>.

### Compétences et ressources mobilisées par l'IG-EPN et l'IRD

#### Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale

Sur le plan scientifique, l'IG-EPN a apporté une connaissance approfondie de la chronologie éruptive de plusieurs volcans actifs de l'arc équatorien. Il avait également défini le niveau d'activité de base des volcans potentiellement actifs permettant ainsi d'identifier les périodes d'agitation (*unrest*) volcanique. Il s'était appuyé pour cela sur un riche ensemble de données géophysiques (sismiques, géodésiques, etc.) recueillies via ses réseaux de surveillance.

3. Volcans concernés : Mojanda-Fuya Fuya, Cayambe, Sangay, Tungurahua, Guagua Pichincha, Ilinizas, Atacazo-Ninahuilca, Pululahua, Imbabura, Chimborazo, Carihuairazo-Puñalica, etc.

4. Volcans concernés : Cayambe, Mojanda-Fuya Fuya, Guagua Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Ilinizas, Sangay, Tungurahua, etc.

5. Volcans concernés : Cayambe, Tungurahua, Guagua Pichincha, Cotopaxi, etc.

6. Volcans concernés : Tungurahua, Guagua Pichincha, Cotopaxi, El Reventador.

L'IG-EPN disposait d'un réseau d'observatoires volcanologiques (Rovig) sur lequel se sont appuyés les travaux de recherche. Ce réseau, que l'Institut de géophysique a commencé à constituer à la fin des années 1970, a considérablement évolué dans les années 2000, avec l'appui financier du gouvernement équatorien et d'agences internationales<sup>7</sup>. Il assure une surveillance des volcans en continu et en temps réel, en particulier des volcans les plus actifs et les plus dangereux comme le Cotopaxi, le Tungurahua, le Guagua Pichincha ou El Reventador.

Par ailleurs, sur le plan institutionnel et opérationnel, l'IG-EPN connaissait très bien le système équatorien de prévention et de gestion du risque volcanique et ses acteurs locaux et nationaux.

L'équipe de recherche de l'IG-EPN, qui ne comptait que quelques membres en 1995, s'est significativement étoffée au cours des deux dernières décennies. L'équipe de volcanologie compte actuellement une vingtaine de membres, dont un tiers de chercheurs seniors. Quatre chercheurs IG-EPN ont obtenu leur doctorat dans le cadre des recherches en volcanologie menées avec l'IRD. Il faut ajouter à ces chercheurs, les personnels en charge des réseaux de surveillance ainsi que les jeunes chercheurs et étudiants qui ont travaillé à l'IG-EPN.

### Institut de recherche pour le développement

L'équipe de volcanologues IRD a été rattachée successivement à deux unités de recherche IRD : l'UR 06 Géodynamique active, risques naturels, citée plus haut, puis l'UR 31 Processus et aléas volcaniques. Cette dernière unité a intégré en 2004 l'UMR Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) avec laquelle elle collaborait déjà étroitement. L'UMR LMV associe l'Université Clermont-Auvergne (UCA), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'IRD.

### Connaissances scientifiques et expertise

Les volcanologues de l'IRD ont apporté une expertise dans les domaines de la reconstruction de l'histoire éruptive des édifices volcaniques ainsi que de l'évolution pétrologique et géochimique des magmas d'arc. Ils détenaient également un savoir-faire de terrain pour recueillir dans l'urgence des données quantitatives nécessaires à l'interprétation des phénomènes volcaniques pendant une crise. Cette expertise comprend : i) l'interprétation phénoménologique de l'activité volcanique ; ii) le prélèvement systématique des épaisseurs

7. United States Geological Survey (USGS) et Agence de coopération internationale du Japon (Jica), notamment.

de cendres et le calcul des cendres émises ; iii) l'échantillonnage des différents produits éruptifs (cendres, blocs dans les écoulements pyroclastiques, blocs de lave) et iv) l'analyse des caractéristiques géochimiques et pétrologiques des produits éruptifs.

Au fil des années, cinq chercheurs de l'IRD ont travaillé directement sur les volcans équatoriens, auxquels il faut ajouter au moins une dizaine de chercheurs du LMV. Pendant une quinzaine d'années (1995-2010), l'équipe a assuré une présence presque continue en Équateur sous forme d'expatriations (deux scientifiques affectés à l'IG-EPN sur pratiquement toute cette période, dont un enseignant-chercheur en accueil). Après une interruption entre 2011 et 2014, un chercheur a de nouveau été affecté à l'IG-EPN. Cinq volontaires civils internationaux (VCI) ont été également affectés à l'IG-EPN entre 1997 et 2015. À ces expatriations s'ajoutent de nombreuses missions de longue et courte durée.

#### Accès à des équipements et laboratoires français et européens

Grâce aux réseaux des chercheurs IRD, l'IG-EPN a eu un accès préférentiel à des laboratoires de haut niveau qui ont permis d'acquérir les données chimiques et physiques indispensables à l'étude des roches volcaniques prélevées sur le terrain. Parmi ces laboratoires, il convient de citer :

- le LMV à Clermont-Ferrand : analyses chimiques et isotopiques des roches et minéraux, analyses granulométriques et pétrophysiques ;
- le Laboratoire géosciences océan (LGO) à Brest : analyses chimiques des roches ;
- le laboratoire de géochronologie du Laboratoire géosciences Paris-Sud (Geops) à Orsay : datations radiométriques des roches ; auparavant ces datations étaient réalisées au laboratoire de géochronologie de l'université de Nice ;
- le laboratoire de radiométrie ( $^{14}\text{C}$ ) de l'université de Groningue (Pays-Bas) : datation par radiocarbone des échantillons organiques. Ces datations ont été faites aussi au Laboratoire de mesure du Carbone  $^{14}$  (LMC $^{14}$ ) à Gif-sur-Yvette.

#### Des financements pour la recherche

L'IRD a apporté des crédits sur le budget de fonctionnement de l'unité ainsi que des financements spécifiquement dédiés à la jeune équipe associée à l'IRD (2003-2007) et au laboratoire mixte international (depuis 2012) créés avec l'IG-EPN. Des crédits du LMV (Labex ClerVolc<sup>8</sup>, I-Site<sup>9</sup> Clermont 20-25) ont également été

8. Labex ClerVolc : Laboratoire d'excellence « Centre clermontois de recherche sur le volcanisme ».

9. I-Site : Initiatives science-innovation-territoires-économie, Programme investissements d'avenir (PIA).

mobilisés sur les projets de recherche. En matière de formation, des allocations de recherche ont été accordées par l'IRD pour la réalisation de doctorats<sup>10</sup>. Par ailleurs, l'IRD a également contribué financièrement à la copublication de cartes d'aléas et de livrets explicatifs sur les volcans destinés au grand public.

## Le réseau des « vigías » du Tungurahua

Le réseau des « vigías » du Tungurahua comporte actuellement une trentaine de membres, représentants des communautés qui vivent sur les flancs et à proximité du volcan (ville de Baños sur le versant nord, et d'autres villages des versants occidental et sud). Ce réseau, dont le noyau a vu le jour en 2000, constitue un élément d'appui important du dispositif de surveillance volcanologique de l'Observatoire du volcan Tungurahua (OVT), lequel fait partie du Rovig de l'IG-EPN<sup>11</sup>. Reliés en permanence à l'OVT par un système de radio, ces « vigías » participent à l'observation directe de l'activité du volcan, notamment sur les flancs occidental et sud qui ne sont pas visibles depuis l'OVT. Certains d'entre eux ont contribué activement à la collecte d'échantillons, notamment de cendres, ainsi qu'aux activités d'entretien du réseau de surveillance géophysique.



Observatoire du volcan Tungurahua (OVT) situé à une douzaine de kilomètres du sommet du volcan, 2005.  
© IRD/J.-P. Eissen

Membres bénévoles de la protection civile, et souvent des leaders de leur communauté, ils jouent également un rôle clé dans la diffusion des informations entre leur communauté et les scientifiques ou les pouvoirs publics ainsi que dans l'organisation des mesures de prévention et de gestion de crise.

10. « Allocations de recherche pour une thèse au Sud » (ARTS), anciennement « Bourses de thèse de l'IRD » (BSTD).

11. L'IG-EPN a fermé l'antenne locale de l'OVT en juin 2019. Le Tungurahua est suivi depuis le siège de l'IG-EPN à Quito auquel les vigías sont reliés par radio. Il reste l'un des volcans les mieux surveillés d'Équateur.

## Les pouvoirs publics équatoriens

Confrontés à la réactivation des volcans, les autorités et services publics (maires des villages concernés, protection civile locale, provinciale et régionale notamment) étaient très demandeurs d'une expertise scientifique pour évaluer les aléas volcaniques et surveiller l'activité des volcans afin d'organiser la prévention des crises et en assurer la gestion. C'est dans ce contexte que le gouvernement équatorien a attribué en 2003 à l'IG-EPN un budget permanent de fonctionnement. Plus tard, en 2010, la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt) lui a accordé un important appui financier dans le cadre d'un projet de recherche pour l'équipement de ses réseaux d'observatoires volcanologiques et sismiques.

## Produits de la recherche

Outre les publications académiques, les recherches menées conjointement par l'IG-EPN et l'IRD ont abouti à la production d'outils d'évaluation des aléas volcaniques (scénarios et cartes d'aléas volcaniques, cartes de distribution des produits volcaniques), favorisé une structuration de la recherche grâce à la création d'une jeune équipe associée à l'IRD puis d'un laboratoire mixte international et contribué à la formation de jeunes chercheurs.

## Les publications académiques

Depuis le début de leur coopération en volcanologie, en 1994, l'IG-EPN et l'IRD ont copublié plus de 60 articles dans des revues internationales à comité de lecture, ce qui représente 50 % de l'ensemble des publications de l'IG-EPN en volcanologie. Ce chiffre ne prend en compte que les articles cosignés par au moins un chercheur de l'IG-EPN et un chercheur de l'IRD.

La publication, en 2008, d'un volume spécial sur le volcanisme équatorien dans l'un des journaux de référence dans le domaine de la volcanologie (HALL *et al.*, 2008) marque une étape importante dans la production scientifique née de cette collaboration car elle a apporté une très importante visibilité internationale. Ce volume comprend 19 articles dont 10 directement issus du programme de recherche conjoint.

Les travaux concernant la chronologie éruptive et l'évolution pétrologique des principaux volcans étudiés ont donné lieu à des articles qui constituent, pour la plupart, les premières études scientifiques sur ces édifices. Ce travail de longue

haleine a permis de constituer une base de données géochimiques unique par le nombre d'analyses et par la couverture spatiale et temporelle des échantillons analysés. Cette base de données a permis la publication de quelques articles de synthèse à caractère régional (HIDALGO *et al.*, 2012 ; ANCELLIN *et al.*, 2017) qui représentent des références incontournables pour mieux comprendre la diversité des sources du magmatisme d'arc.

Par ailleurs, le paroxysme éruptif de 2006 du Tungurahua a été amplement étudié par l'équipe IG-EPN/IRD donnant lieu à une série d'articles à fort impact international (ex. : SAMANIEGO *et al.*, 2011 ; LE PENNEC *et al.*, 2012 ; EYCHENNE *et al.*, 2013 ; BERNARD *et al.*, 2016-b). Finalement, il convient de mentionner l'article de MERLHIOT *et al.* (2018) qui représente une étape importante dans le développement des thématiques proches des sciences humaines et sociales.

## L'évaluation des aléas volcaniques

### Scénarios éruptifs et cartes d'aléas

La carte d'aléas d'un volcan est une représentation cartographique des zones susceptibles d'être affectées par des phénomènes volcaniques (écoulements pyroclastiques, écoulements de débris – lahars –, coulées de lave, avalanches de débris, retombées de cendres). Elle est le fruit d'une étude approfondie de l'histoire éruptive du volcan qui permet de prévoir, à partir d'éléments d'éruptions passées, le type de phénomènes susceptibles de se produire, leur magnitude et leur probabilité/possibilité d'occurrence.

Dans les années 1980 et 1990, l'IG-EPN avait publié une première série de cartes d'aléas volcaniques pour les volcans les plus dangereux de l'arc équatorien. Sur la base des travaux conjoints de l'IRD et de l'IG-EPN, deux nouvelles versions de la carte d'aléas du Tungurahua (2002 et 2008) ont été publiées (figure 2), ainsi que la deuxième version de la carte d'aléas volcaniques pour les volcans Cotopaxi (2004) et Imbabura (2005). Ont également été publiées les premières cartes d'aléas pour les volcans Cayambe (2002) et El Reventador (2008).

La production de ces cartes, destinées aux autorités et aux populations, constitue un exercice délicat car l'étendue des zones menacées, leurs contours précis et la graduation des aléas peuvent comporter une part d'incertitude. Dès le début de leur collaboration les volcanologues de l'IRD se sont engagés dans la réalisation de ce type d'outils aux côtés de leurs partenaires.

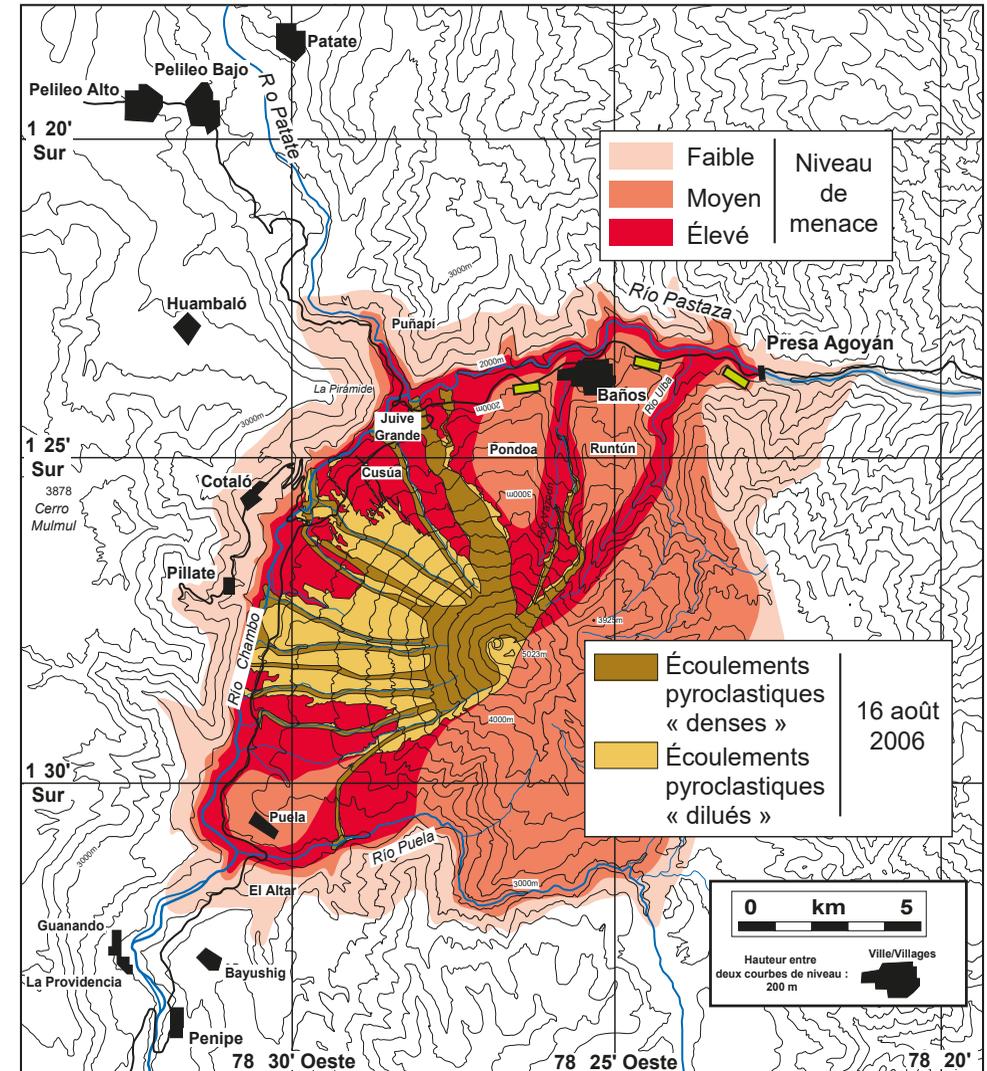


Figure 2  
Carte d'aléas volcaniques du Tungurahua.  
Représentation simplifiée de la carte des menaces du volcan Tungurahua (version du 2002), sur laquelle ont été indiquées les zones affectées par les écoulements pyroclastiques de 2006 (SAMANIEGO *et al.*, 2008). Les différentes tonalités de rouge (clair, intermédiaire, intense) correspondent à des niveaux de menace (faible, moyen, élevé), les tonalités de marron (clair, intense) représentent les dépôts de l'éruption de 2006 (déferlantes et écoulements pyroclastiques). Cette version de la carte des menaces du Tungurahua était la version officielle à l'époque de l'éruption.

## Cartes de distribution des produits volcaniques

Pendant les premières années d'activité du Tungurahua, le phénomène volcanique le plus fréquent fut l'émission de cendres et leur dépôt, notamment sur la partie occidentale du volcan.

Malgré son importance, le volume de cendres émises pendant les phases explosives d'une éruption était l'un des paramètres les moins bien contraints. Dans les années 2000-2001, les chercheurs de l'IRD et de l'IG-EPN ont adapté des méthodologies connues en volcanologie pour quantifier le volume des éruptions de faible volume (1-5 millions de m<sup>3</sup>). À partir de ces travaux, l'IG-EPN a conçu un dispositif peu coûteux, désormais utilisé en routine (réseau de « cenizómetros »), qui permet d'établir des cartes de distribution des cendres émises par les volcans (BERNARD *et al.*, 2016-a). Ces cartes, qui ne sont valides que pendant la phase éruptive concernée, sont utilisées par l'IG-EPN pour suivre et comprendre le déroulement des phases explosives du volcan. Elles peuvent être diffusées en version simplifiée aux décideurs publics à leur demande.

## La structuration des équipes et activités de recherche sur le long terme

L'équipe de volcanologie de l'IRD et de l'IG-EPN a utilisé au fil du temps les différents instruments de partenariat proposés par l'IRD pour structurer leurs activités scientifiques, nourrir et relancer la dynamique de recherche. En 2003, l'IRD et l'IG-EPN créent une jeune équipe associée à l'IRD. Cette JEAI formera le noyau dur du volet volcanologique du Laboratoire mixte international (LMI) IRD/IG-EPN mis en place en 2012. Certains des membres de la JEAI seront responsables/animateurs des différents axes de ce Laboratoire.

## JEAI « Évaluation du risque volcanique en Équateur par l'approche probabiliste » (2003-2007)

Dans le contexte de la réactivation des volcans, la création de cette JEAI répondait au besoin d'une évaluation plus pointue et quantitative des menaces volcaniques qui leur sont associées. Elle a ouvert un volet de recherche plus appliqué destiné à la modélisation numérique des écoulements volcaniques (nuées ardentes et lahars). Le Tungurahua était l'une de ses cibles de choix : l'étude de son activité explosive au cours des trois derniers millénaires a permis

de comprendre et de prévoir les éruptions des 14 juillet et 16 août 2006 au cours desquelles d'importantes nuées ardentes ont dévasté principalement les versants nord et occidental du volcan.

Au-delà de ces résultats scientifiques, la JEAI a contribué à : i) un renforcement de l'équipe de volcanologie de l'IG-EPN (constituée à l'époque de 9 membres permanents et temporaires) ; ii) une autonomie financière accrue (grâce au financement de la JEAI) ; iii) un renforcement des capacités, avec l'obtention d'un doctorat et d'un master ainsi que de trois mémoires de fin d'études de l'École polytechnique nationale ; iv) plus de visibilité internationale grâce aux publications internationales et à l'organisation d'un congrès international (Cities on Volcanoes 4, Quito, 2006).

## LMI « Séismes et volcans dans les Andes du Nord » (Svan)

En 2012, l'IRD et l'IG-EPN créent le LMI Svan pour un premier mandat de cinq ans (2012-2016), lequel a été renouvelé en 2017. Ce laboratoire, qui couvre l'ensemble de l'activité de l'IG-EPN, s'intéresse aux menaces sismiques et volcaniques dans les Andes du Nord, avec une extension à d'autres segments des Andes, notamment au Pérou. Il est le fruit de collaborations de recherche nouées et développées par l'IG-EPN et l'IRD depuis les années 1990 en volcanologie et en sismologie et témoigne de la maturité de cette coopération. Outre l'UMR LMV, pour la volcanologie, ce LMI associe deux autres UMR en cotutelle IRD pour les aspects sismologiques au sens large : le laboratoire Géoazur<sup>12</sup> à Nice et l'Institut des sciences de la Terre (ISTerre)<sup>13</sup> à Grenoble.

12. L'UMR Géoazur associe l'université Côte d'Azur, l'observatoire de la Côte d'Azur, le CNRS, et l'IRD.

13. L'UMR ISTerre associe l'université Grenoble-Alpes, l'université Savoie-Mont-Blanc, le CNRS, l'IRD et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Le LMI Svan a contribué à la structuration de la recherche et favorisé la pluridisciplinarité. Celle-ci s'est traduite par des collaborations entre volcanologues et sismologues et par une ouverture sur des collaborations avec des chercheurs en sciences humaines et sociales dans le contexte du Labex ClerVolc.<sup>14</sup>

Par ailleurs, le LMI a apporté son appui à l'IG-EPN dans la gestion de graves crises telluriques qui se sont produites en Équateur pendant les dernières années : le grand séisme de Pedernales (Mw 7.8, 16 avril 2016), la réactivation du volcan Cotopaxi (2015-2016) et les fréquentes éruptions des volcans Tungurahua et El Reventador.

## La formation par la recherche et l'enseignement

Inscrite dans la durée, la collaboration scientifique IRD/IG-EPN a permis de développer un important volet de formation par la recherche intégré aux projets. Cette activité de formation a commencé par l'encadrement de thèses d'ingénieurs géologues de l'EPN, puis de masters et de doctorats. Le cofinancement de bourses par l'IRD et la Senescyt constitue pour les jeunes chercheurs un engagement de retour en Équateur. En effet, la majorité des volcanologues de l'IG a été formée en France et notamment à l'université Clermont-Auvergne (université Blaise-Pascal jusqu'en 2016). Il faut souligner, qu'à ce jour, il n'y a pas d'école doctorale en sciences de la Terre en Équateur.

On recense ainsi : i) 9 thèses de doctorat soutenues entre 2001 et 2019 dont 4 thèses de doctorants équatoriens qui ont tous bénéficié d'une bourse de l'IRD et de la Senescyt ; une dixième thèse est actuellement en cours ; ii) 9 masters, dont 5 soutenus par des étudiants équatoriens ; iii) 10 mémoires de fin d'études d'ingénieurs de l'EPN.

Ces doctorats et masters s'inscrivent dans les différentes spécialités de la volcanologie : volcanologie physique, modélisation numérique, pétrologie des magmas d'arc.

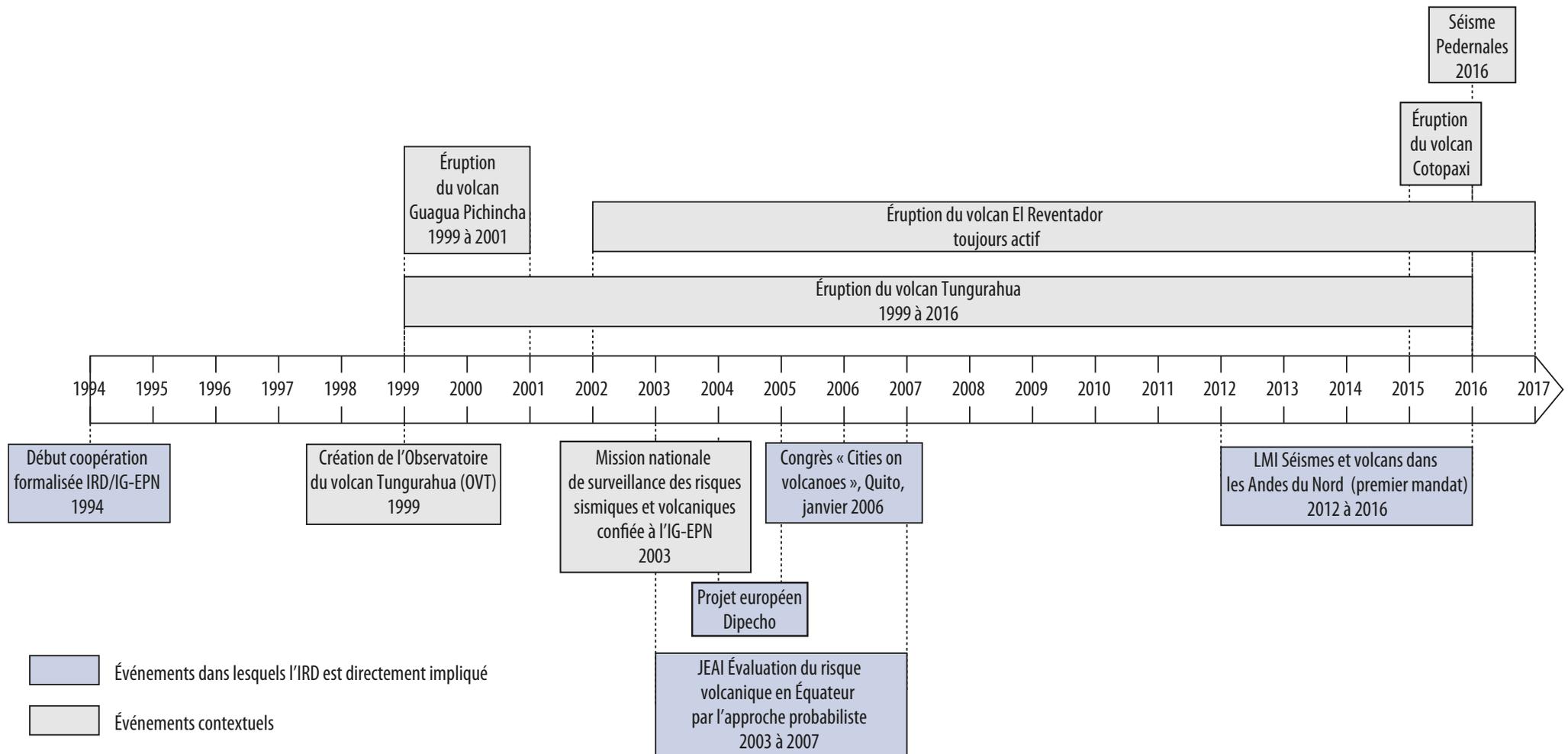
14. Deux thèses ont été ainsi coencadrées par un volcanologue IRD du LMV : l'une sur la perception des risques, l'incertitude et la prise de décision par les individus en situation de catastrophe naturelle liée au volcanisme (2016), l'autre sur l'impact économique des catastrophes naturelles (2018).

Les chercheurs de l'Institut de géophysique et de l'IRD ont également participé au master international Prefalc<sup>15</sup>, projet incluant d'autres universités françaises (Nice, Grenoble, Clermont-Ferrand) ainsi que l'EPN et l'université San-Marcos (Lima). Ce projet a été le précurseur d'un master en géosciences (options risques naturels) à l'EPN. Par ailleurs, les enseignants-chercheurs de l'IG-EPN (et parfois aussi de l'IRD) participent aux enseignements de l'EPN, notamment ceux de la formation d'ingénieur géologue.

15. Prefalc : Programme régional France-Amérique Latine-Caraïbes.

# Chronologie

## Processus et aléas volcaniques en Équateur



## Circulation des connaissances et intermédiaires

Ce chapitre s'intéresse aux acteurs « intermédiaires » qui ont contribué au cheminement des résultats de la recherche vers la société ainsi qu'aux moyens qu'ils ont mis en œuvre pour favoriser cette circulation des connaissances et créer les conditions de leur utilisation.

On constate que l'ensemble des acteurs qui ont été parties prenantes du processus de recherche (IG-EPN, IRD, pouvoirs publics, réseau des « *vigías* » du Tungurahua) ont également joué un rôle d'intermédiaire dans cette circulation des connaissances entre la sphère de la recherche et la société. Ces acteurs ont fait jouer leurs complémentarités et ont associé leurs actions pour favoriser la sensibilisation des pouvoirs publics et des citoyens à l'aléa volcanique et au développement d'une démarche préventive. Le projet Dipecho sur la formation des populations vivant près du volcan Tungurahua à la prévention et à la gestion du risque volcanique, auquel se sont associés l'IG-EPN et l'IRD, en est une illustration.

### L'IG-EPN

L'IG-EPN contribue largement à la circulation et à l'appropriation par les pouvoirs publics et la société civile des connaissances scientifiques sous différentes formes : mise à disposition de son expertise au service de l'aide à la décision publique ; actions de formation, de sensibilisation et d'information adaptées en fonction des publics auxquels il s'adresse.

Ainsi, au titre de sa mission nationale de surveillance et d'évaluation des aléas sismiques et volcaniques :

- i) il apporte son expertise au Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias<sup>16</sup>, dont il est l'interlocuteur de référence en matière volcanologique et sismique, et participe à des instances en lien avec les questions de prévention et de gestion des risques volcaniques et sismiques ;
- ii) il établit et met à disposition des pouvoirs publics des bulletins d'information quotidiens, hebdomadaires, mensuels et annuels sur l'activité des volcans en éruption ainsi que sur d'autres volcans actifs du territoire équatorien. Ces bulletins sont largement diffusés (autorités publiques, médias...) et accessibles sur son site internet ([www.igepn.edu.ec](http://www.igepn.edu.ec)), de même que les cartes d'aléas ;
- iii) il participe activement à la formation des « *vigías* » du Tungurahua et d'autres volcans équatoriens (Cotopaxi et Chiles-Cerro Negro) ;
- iv) acteur du système d'alerte précoce, il participe également à l'établissement des protocoles de communication et de prise de décision entre l'observatoire de l'IG-EPN et les autorités publiques en cas de crise éruptive.

Il répond aux sollicitations des pouvoirs publics, des médias, des populations concernées. Lors d'une crise volcanique (ou sismique), cet exercice peut s'avérer délicat et requiert un réel savoir-faire notamment en matière de communication des incertitudes intrinsèques aux phénomènes sismiques et volcaniques.

Parallèlement à ces activités, l'IG-EPN s'attache à informer les citoyens sur les phénomènes volcaniques et à les sensibiliser à une approche préventive. Il a réalisé de nombreux documents d'information sur les volcans équatoriens à destination du grand public. Il utilise divers supports : livrets, dépliants, vidéos, site web, et plus récemment les réseaux sociaux (Twitter, Facebook, Pinterest, Youtube). Ces documents sont en libre accès sur son site internet.

## L'IRD

Les chercheurs de l'IRD se sont investis, aux côtés de l'IG-EPN, dans des actions d'information et de sensibilisation de la société civile aux aléas volcaniques (conférences grand public, cafés scientifiques, participation à des réunions d'information auprès des populations, etc.).

16. Service national de gestion des risques et des urgences. Cf. paragraphe « Les pouvoirs publics » de ce chapitre.

Une part importante de ce travail a porté sur la publication d'une série de cinq livrets explicatifs des aléas volcaniques réalisés et copubliés par l'IRD et l'IG-EPN sur les volcans Tungurahua (2003, réédité en 2005), Cayambe (2004), Cotopaxi (2005), Antisana (2007), Atacazo, Ninahuilca et Pululahua (2008) (cf. : annexe 2). L'IG-EPN en a fait une large diffusion auprès des autorités et organisations susceptibles d'être intéressées (ministères, instituts publics, gouvernements locaux, mairies...).

Par ailleurs, les chercheurs de l'IRD ont contribué régulièrement (entre 1999 et 2007) aux tours de garde à l'observatoire du volcan Tungurahua (OVT) et, de manière plus espacée, jusqu'à 2010 au fur et à mesure que le nombre de volcanologues de l'IG a augmenté. Pendant ces tours de garde, les chercheurs de l'IRD réalisaient les mêmes activités scientifiques et de communication que les chercheurs de l'IG-EPN. Dans ce contexte, ils participaient à l'émission de radio hebdomadaire dédiée au volcan, aux réunions avec les autorités (représentants des ministères, des municipalités, élus, etc.) pour faire le point sur l'activité du volcan, aux réunions avec les habitants de la zone, avec la protection civile et répondaient à de fréquentes sollicitations des médias locaux et nationaux. Ils s'accordaient préalablement avec l'IG sur les éléments de langage en veillant à rester sur le terrain scientifique.

## Les pouvoirs publics

Les pouvoirs publics, qui doivent assurer la protection des citoyens et des biens et réduire leur vulnérabilité, sont à la fois demandeurs de l'expertise et des produits de la recherche et partie prenante de leur diffusion et adaptation.

Sur le plan institutionnel, l'État équatorien a réorganisé son système de prévention et de gestion des risques et inscrit les principes de cette réforme dans la constitution équatorienne de 2008. Auparavant placé sous la responsabilité du ministère de l'Intérieur, ce système est désormais décentralisé, et cadré par un principe de subsidiarité dans l'exercice de cette responsabilité entre les différents niveaux d'organisation régionale. La coordination nationale est assurée par le « Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias ».

Sur le plan opérationnel, les autorités et services publics – nationaux, régionaux, municipaux – décident, organisent et/ou coordonnent les dispositifs et actions de prévention et de gestion des risques volcaniques : information préventive et éducation des populations, prise en compte des risques dans l'aménagement du

territoire et l'urbanisme, réduction de la vulnérabilité, anticipation et gestion de la crise volcanique...

## Les organisations non gouvernementales

Dans la région du Tungurahua, l'IRD et l'IG-EPN ont été sollicités<sup>17</sup> par deux ONG (une américaine [CRS], une anglaise [Cafod]) et le diocèse d'Ambato, pour monter un projet dont l'objectif était de préparer les populations aux dangers d'habiter à proximité d'un volcan en activité<sup>18</sup> : « Comunidades afectadas por el Tungurahua : mitigando los riesgos de vivir cerca de un volcan activo<sup>19</sup> ». Ce projet, qui s'est déroulé entre 2004 et 2005, était financé par la Direction générale pour la protection civile et les opérations d'aide humanitaire européennes (Echo) de la Commission européenne, à travers son programme de prévention des risques et de préparation aux catastrophes (Dipecho). Il associait un volet scientifique – sous la responsabilité de l'IRD et de l'IG-EPN – et un volet humanitaire et social.



Élevage de poulets dont le toit s'est effondré sous le poids des cendres et des scories du volcan Tungurahua, 2006.

© IRD/Y. Repetto

L'objectif était de renforcer les capacités des communautés et des institutions situées dans la zone d'impact du volcan Tungurahua afin d'identifier et de proposer des mécanismes d'action communautaires destinés à « apprendre à vivre avec un volcan en activité », à socialiser les réponses à apporter aux éruptions volcaniques afin d'en réduire les impacts au travers d'actions de préparation, d'atténuation et de prévention. Ce projet visait également à rapprocher scientifiques et habitants de la zone affectée, à travers de

nombreux ateliers et réunions. Il a concerné 35 communautés de la province de Tungurahua (environ 18 000 personnes). L'IRD et l'IG-EPN ont également bénéficié de financements qui ont permis à l'IG de renforcer le dispositif de surveillance de l'observatoire (OVT). Ce projet a donné lieu à un bilan et à un film<sup>20</sup>.

## Le réseau des « vigías » du Tungurahua

Les membres du réseau de « vigías » du Tungurahua ont joué un rôle de relai et de diffusion de l'information entre les autorités, les scientifiques et les membres des communautés qui vivent autour du volcan Tungurahua. Ce point est évoqué plus spécifiquement au chapitre sur l'impact social.

17. Cette sollicitation s'est faite via l'IRD qui, en tant qu'organisme de recherche français, permettait de satisfaire l'une des conditions d'obtention d'un financement européen dans le cadre du programme Dipecho.

18. Catholic Agency for Overseas Development (Cafod, Grande-Bretagne), Catholic Relief Services (CRS, USA), ministère des Affaires sociales de la commission épiscopale (Caritas) de la Conférence épiscopale équatorienne (Cepas) et le diocèse d'Ambato.

19. Communautés affectées par le Tungurahua : réduire les risques encourus en vivant près d'un volcan actif.

20. 2005. Sistematización del proyecto « Comunidades afectadas por el Tungurahua : mitigando los riesgos de vivir cerca a un volcán activo » : articular lo científico y lo social para el desarrollo sostenible es un reto de la gestión del riesgo. Quito : Echo, Cafod, Conferencia Episcopal Ecuatoriana, Diócesis de Ambato, CRS, IG-EPN, IRD, 67 p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010037387>. Lien vers le film : [https://www.youtube.com/watch?v=qrij\\_ONz1Jg](https://www.youtube.com/watch?v=qrij_ONz1Jg).

## Premiers impacts

Les résultats de la collaboration scientifique entre l'IG-EPN et l'IRD ont contribué au renforcement des capacités de recherche équatorienne en volcanologie (impact en renforcement des capacités), au renforcement du système national de prévention et de gestion des risques (impact institutionnel), et à l'appropriation des mesures de prévention et de gestion des crises volcaniques par les populations vivant près du volcan Tungurahua (impact social).

### Le renforcement des capacités de recherche en volcanologie

Pendant les dernières décennies et probablement sous l'effet des crises volcaniques à répétition, l'IG-EPN a amélioré et développé notablement ses réseaux de surveillance volcanique et sismique. Ses effectifs en personnels scientifiques et techniques ont fortement augmenté (environ de 25 à 85 personnes entre la fin des années 1990 et 2016). Cette montée en puissance des moyens de l'IG-EPN a été rendue possible grâce à l'appui et aux moyens apportés par le gouvernement équatorien.

Dans le même temps, la part d'activité consacrée par l'IG-EPN à la recherche s'est significativement accrue de même que son niveau d'exigence scientifique. La collaboration scientifique entre l'IG-EPN et l'IRD, ancrée dans la durée et nourrie par une forte proximité de terrain, a contribué au développement de cette dynamique. Cette contribution a pris diverses formes : possibilité offerte aux jeunes volcanologues équatoriens d'obtenir un doctorat en France, développement

d'une culture de la publication scientifique, structuration conjointe d'un laboratoire mixte de recherche, par exemple.

L'IG-EPN a ainsi pu constituer une équipe pluridisciplinaire de volcanologues aux spécialités diversifiées : volcanologie physique, pétrogéochimie des produits volcaniques, modélisation analogique et numérique des processus volcaniques et de l'évaluation des aléas. Le nombre de chercheurs seniors (titulaires d'un doctorat) permanents est passé de un à cinq volcanologues entre 1999 et 2016. La plupart des nouveaux chercheurs ont été formés au LMV, dont l'actuelle directrice de l'Institut de géophysique et le responsable de l'équipe de volcanologie de l'IG-EPN.

L'organisation du quatrième congrès international « Cities on Volcanoes » en janvier 2006 à Quito, fut une étape importante pour l'IG-EPN. Ce congrès, qui rassemblait environ 400 volcanologues de tous les continents, a témoigné de la capacité de l'IG-EPN à organiser et accueillir un tel événement. Ce fut également l'occasion de mettre en lumière ses travaux de recherche et les avancées scientifiques dans la connaissance des volcans équatoriens. Dans le prolongement de ce congrès, les chercheurs de l'IG-EPN et l'IRD ont décidé de publier un numéro spécial du *Journal of Volcanology and Geothermal Research* sur le volcanisme équatorien paru en 2008 (cf. : chapitre « Publications académiques »).

L'étude de l'évolution des publications de l'IG-EPN dans le domaine de la volcanologie dans des revues à comité de lecture, dont celles copubliées avec l'IRD, montre une augmentation progressive de ces publications avec un pic en 2008 lié à la parution du numéro spécial du *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. La figure 3 illustre cette progression.

Ce graphique montre i) que le nombre de publications en volcanologie s'accroît avec le début du programme conjoint IG-EPN/IRD (vers 1996) ; ii) l'importance de la culture de la copublication au sein de ces projets ; iii) un taux de production scientifique constant pendant les vingt ans de coopération et iv) que la part des copublications est actuellement aux alentours de 50 % de l'ensemble des publications de l'IG-EPN en volcanologie.

Cette production académique associée à une expertise d'une trentaine d'années dans l'instrumentation des volcans, le recueil et la transmission des données en temps réel ainsi que la surveillance des volcans actifs, ont apporté à l'IG-EPN une solide notoriété scientifique, notamment à l'échelle de la région andine et de l'Amérique latine. Plusieurs indicateurs témoignent de cette reconnaissance :

augmentation de demandes de stages d'étudiants équatoriens et étrangers, capacité à mobiliser des capitaux auprès de bailleurs de fonds internationaux comme la Banque interaméricaine de développement (BID) et le programme européen Dipecho, expertises et formations réalisées dans des pays voisins. L'IG-EPN a également reçu le prix 2020 de l'Association internationale de volcanologie et de chimie de l'intérieur de la Terre (Iavcei) pour la surveillance des volcans et la gestion des crises.

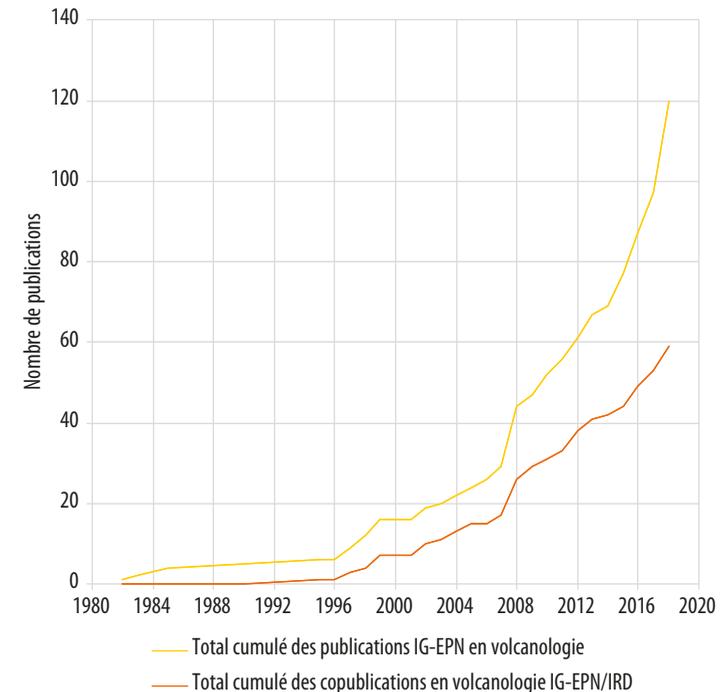


Figure 3  
Évolution du nombre de publications de l'IG-EPN en volcanologie depuis sa création.  
Source : IG-EPN<sup>21</sup>.

21. Artículos científicos en revistas con revisión por pares IG-EPN (document interne à l'IG-EPN).

## Le renforcement du système national de prévention et de gestion des risques volcaniques

Au fil des années, on observe une progression de l'approche préventive dans l'organisation du système équatorien de gestion du risque volcanique. Cette démarche a pu notamment s'appuyer sur les résultats des études de l'IG-EPN et de l'IRD concernant la caractérisation et l'évaluation de l'aléa volcanique. Connaissances que les volcanologues se sont attachés à rendre accessibles aux pouvoirs publics afin de mieux répondre à leurs besoins (cf. : chapitre précédent).

Les cartes d'aléas volcaniques sont un outil stratégique dans la construction d'une approche préventive. Leur exploitation requiert néanmoins une compétence technique de la part des utilisateurs. Ils doivent être à même d'en apprécier les limites et la part d'incertitude, d'autant que la définition des zones d'impact potentiel en cas d'éruption d'un volcan n'est pas neutre en termes d'aménagement du territoire et d'enjeux socioéconomiques.

Sur la base des cartes d'aléas, les autorités équatoriennes ont construit des protocoles pour l'évacuation des populations, l'identification de zones de sécurité, la définition de mesures sanitaires, la mise en place de systèmes d'alerte précoce. Parallèlement à ce dispositif de prévention et de gestion de crises volcaniques, des actions ont également été entreprises sur le long terme par les pouvoirs publics pour prendre en compte les aléas volcaniques dans l'aménagement du territoire et la sécurisation des équipements et infrastructures collectifs. Ces investissements s'inscrivent dans une perspective de développement des sociétés en Équateur.

À cet égard, l'expérience du dispositif de prévention et de gestion des risques mis en place autour du volcan Tungurahua est exemplaire. Elle a montré qu'une politique de gestion durable et à moyen et long terme est possible dans le contexte équatorien et que cela donne des résultats positifs.

On peut également citer l'exemple de Quito. La direction métropolitaine de gestion des risques de la ville de Quito s'est appuyée sur la carte d'aléas volcaniques du Cotopaxi (datant de 2004) et des travaux de modélisation plus récents réalisés par l'IG-EPN et l'IRD (2013) pour élaborer en 2015 un plan d'évacuation des zones susceptibles d'être touchées en cas d'éruption. Ces données ont également été intégrées dans la planification urbaine : la construction a été

interdite dans les zones identifiées à « haut risque ». Ces interdictions sont dans l'ensemble respectées sauf dans les secteurs d'habitat informel. À la suite de l'éruption du Cotopaxi, en 2015, l'IG-EPN a mis à jour la carte d'aléas volcaniques pour mieux répondre aux besoins des autorités. Cette nouvelle carte a été publiée en 2016.

Toujours en ce qui concerne le Cotopaxi, on peut évoquer l'étude sur les impacts des coulées de boue associées à une éruption explosive majeure du volcan<sup>22</sup>. Les résultats de ces travaux ont contribué, sur la base des recommandations de l'IG-EPN et de ses partenaires, à la décision de modifier le trajet de l'aqueduc qui alimente en eau la ville de Quito afin d'éviter sa destruction en cas d'éruption. Dans la même logique, l'IG-EPN et l'IRD ont fortement déconseillé la construction d'une usine de traitement des eaux à la sortie sud de la ville de Latacunga – projet financé par l'Agence française de développement (AFD) – également située dans une zone potentiellement affectée par des coulées de boue en cas d'éruption majeure du Cotopaxi. Ces exemples d'interactions entre scientifiques, bailleurs de fonds et autorités locales témoignent des retombées sur la société des résultats des recherches conduites et de l'expérience acquise au fil des années.

Toutefois, ces avancées dans la prévention et la prise en compte de l'aléa volcanique se manifestent davantage dans un contexte local qu'à l'échelle nationale, comme le montre la collaboration permanente entre l'IG-EPN et les différentes municipalités autour du volcan Tungurahua. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet état de fait dont :

- une formation et une préparation de la population au risque volcanique et sismique encore insuffisantes ;
- un équilibre parfois difficile à trouver entre les contraintes (sociales, économiques, pluralité des aléas) et les risques, on rejoint là la problématique du « risque acceptable » ;
- le coût des investissements à réaliser ;
- le manque de moyens à l'échelle locale, peu de villes équatoriennes disposent d'un service de gestion des risques doté des compétences techniques indispensables pour comprendre et utiliser les résultats scientifiques (notamment les cartes d'aléas) à des fins de gestion et de prévention des risques.

22. HALL M. L., MOTHES P., SAMANIEGO P., ANDRADE D., YEPES H., 2004 – Mapa Regional de los peligros potenciales del volcán Cotopaxi – Zona Sur. (Esc. 1/50 000). Édit. IG-EPN/IRD/IGM-Embajada de Alemania en Quito.

## L'impact social

La longue phase éruptive du volcan Tungurahua, entre 1999 et 2016, a constitué un laboratoire de recherche pour l'IG-EPN et l'IRD. Son inscription dans la durée, dans un contexte d'éruptions récurrentes et prolongées, a également favorisé le développement d'une collaboration entre les scientifiques, les pouvoirs publics (locaux et nationaux) et les populations concernées. Cette association a probablement contribué au développement d'une culture de gestion du risque (comme en témoignent les entretiens avec les « *vigías* »), à la compréhension et à l'appropriation par les populations du système de prévention et de gestion du risque volcanique<sup>23</sup>.

C'était là un véritable enjeu. Lors du début de l'activité éruptive en 1999, et dans la crainte d'un épisode paroxysmal, les habitants de la ville de Baños et des zones rurales autour du volcan, soit environ 25 000 personnes, avaient été évacués sur décision du président de la République en octobre 1999. Cette évacuation, qui a duré trois mois (jusqu'à début janvier 2000), a été vécue comme un traumatisme par les populations.

Après cette première phase de l'éruption, l'IG-EPN, qui avait par ailleurs besoin d'observateurs autour du volcan afin de recueillir des informations sur la phénoménologie de l'éruption, a collaboré à l'établissement d'un réseau d'observateurs (« *vigías* »). Cette idée a trouvé un écho dans les communautés. Celles-ci étaient en effet demandeuses d'informations sur le fonctionnement et l'activité du volcan et son évolution. Elles souhaitaient également être parties prenantes de l'élaboration et de la mise en place des mesures de prévention et de gestion du risque volcanique. Le réseau des « *vigías* » du Tungurahua est né de cette rencontre de deux besoins.

Une coopération étroite s'est progressivement tissée entre les « *vigías* » et les scientifiques qui ont assuré une présence permanente à l'OVT à partir de 1999. Elle s'est construite au travers des ateliers de formation, des réunions, des échanges informels, un langage partagé, un dispositif de communication commun (dispositif radio) avec au moins un rendez-vous quotidien de l'ensemble

23. On peut se reporter à ce sujet aux résultats d'une étude réalisée par une équipe de recherche du Royaume-Uni : ARMUJOS M. T., PHILLIPS J., WILKINSON E., BARCLAY J., HICKS A., PALACIOS P., MOTHES P., STONE J., 2017 — Adapting to changes in volcanic behaviour: Formal and informal interactions for enhanced risk management at Tungurahua Volcano, Ecuador. *Global Environmental Change*, 45: 217-226, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.002>; FEW R., ARMUJOS M. T., BARCLAY J., 2017 — Living with Volcan Tungurahua: The dynamics of vulnerability during prolonged volcanic activity. *Geoforum* 80: 72-81, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.01.006>.

du réseau et de l'OVT. Cette proximité a favorisé l'instauration d'une relation de confiance, une appréciation partagée de la menace associée à l'activité éruptive.

De leur côté, les « *vigías* » ont joué un rôle clé de relai et de diffusion de l'information entre les pouvoirs publics, la protection civile – dont ils étaient membres bénévoles –, les scientifiques et leurs communautés.

De sorte que lors de la violente éruption de 2006 (et celles qui lui ont succédé), les communautés étaient mieux organisées et mieux préparées qu'en 1999. La majorité des habitants étaient informés des modalités d'évacuation des zones à haut risque, un système d'alerte précoce avait été mis en place dans certaines communautés et des protocoles d'évacuation établis en concertation avec les populations. Six personnes sont mortes néanmoins lors de cette éruption, faute de n'avoir pas observé les consignes de sécurité. Rétrospectivement, le succès de la gestion de la crise volcanique associée à l'éruption paroxysmale de 2006 est le fruit de l'implication de l'IG-EPN et l'IRD dans l'étude et la surveillance du volcan, mais aussi des résultats du projet « *Comunidades afectadas por el Tungurahua : mitigando los riesgos de vivir cerca de un volcan activo* » évoqué au chapitre précédent (cf. : chapitre « Les organisations non gouvernementales »). Lors de cette éruption, il n'y a eu aucune victime à déplorer dans les communautés qui avaient participé à ce projet.

On observe, par ailleurs, une sensibilisation moins forte des habitants de la ville de Baños, pourtant classée pour partie en zone à haut risque. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence. D'une part, la perception du risque, dont le fait que la ville ait été peu impactée par les émissions de cendres à la différence des communautés rurales qui se trouvaient sur le flanc occidental. D'autre part, les différences socioéconomiques entre Baños, une population plutôt urbaine ayant le tourisme comme principale activité économique, et le secteur occidental, plutôt rural et dédié à l'agriculture et à l'élevage.

À noter qu'au-delà de la surveillance de l'activité volcanique et l'émission des alertes, les « *vigías* » utilisent également le dispositif radio du réseau pour d'autres types d'événements tels que les tremblements de terre, les glissements de terrain, les crues ou les accidents.

Le réseau des « *vigías* » du Tungurahua est reconnu comme une réussite et valorisé (articles de journaux, reconnaissance par les pouvoirs publics...). Ce modèle a été transposé à deux autres volcans équatoriens : le Cotopaxi et le Chiles-Cerro Negro situé à la frontière avec la Colombie. Cette initiative a également intéressé le Pérou (volcan Sabancaya) et la Colombie (volcan Galeras). Les membres du

réseau de « *vigías* » se sont déplacés pour partager leur expérience et leur savoir-faire auprès des communautés concernées, tant en Équateur qu'à l'étranger.

Parallèlement aux aspects liés à la prévention et à la gestion des risques volcaniques, un autre point a été évoqué lors des entretiens sur l'apport des scientifiques : l'accès direct à une information documentée sur les processus éruptifs du Tungurahua a pu apporter à certains un éclairage dans les choix d'adaptation de leur mode de vie ou de leurs moyens de subsistance (vente du bétail dès les signes avant-coureurs d'une émission de cendres, constitution de stock de fourrage, changement de culture au profit de cultures plus résistantes aux cendres, modernisation des pratiques agricoles, réorientation professionnelle...).

## Impacts étendus

Ce type d'impact est lié à une généralisation des impacts au-delà de l'espace géographique ou de l'objet initial.

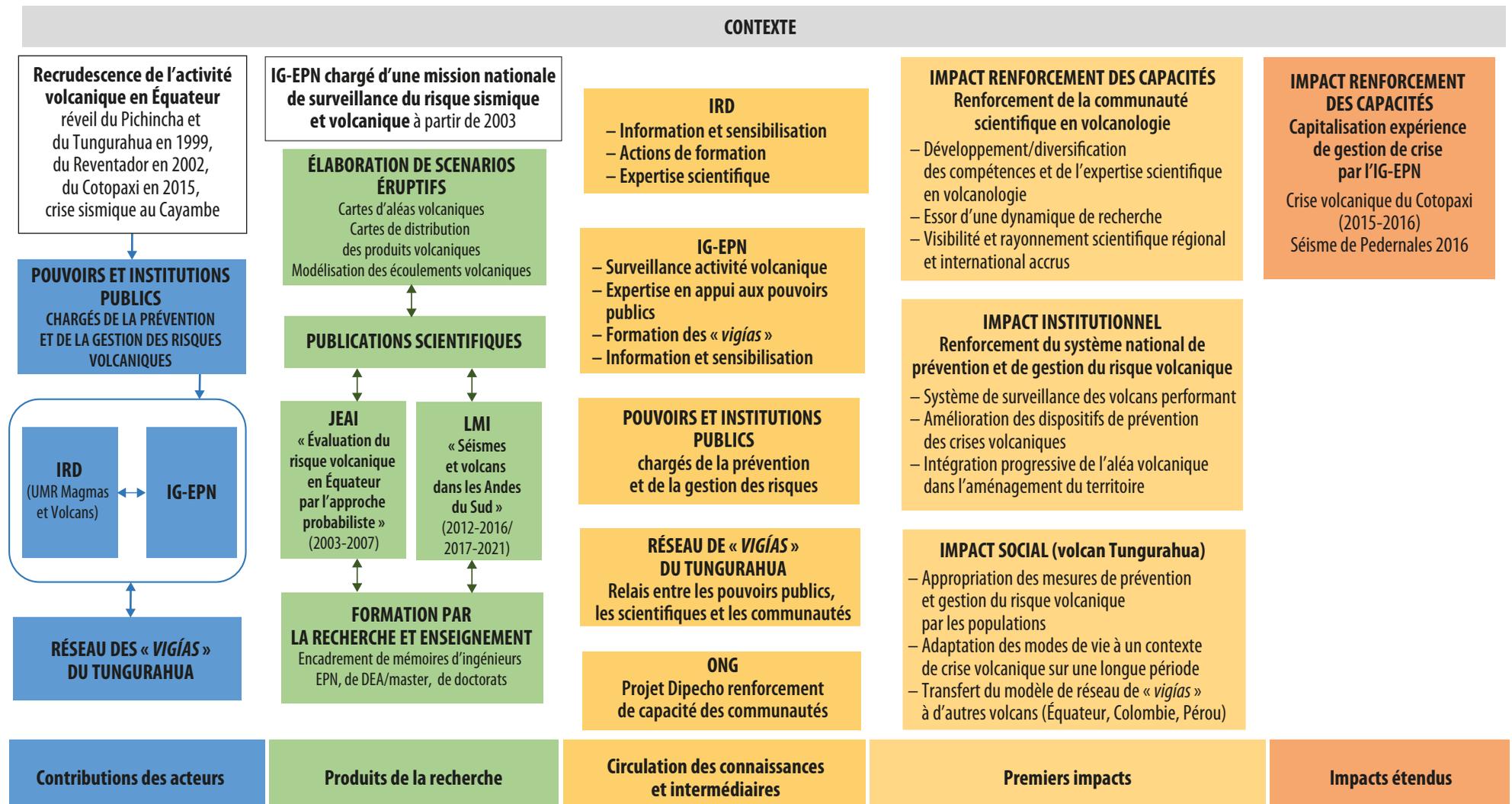
### Le renforcement de capacités

La capitalisation de l'expérience de l'IG-EPN dans la gestion de la crise volcanique du volcan Tungurahua (1999-2016) a contribué à une gestion efficace de la crise du volcan Cotopaxi (2015-2016), bien plus courte mais très complexe car celle-ci était susceptible d'affecter une part bien plus importante de la population de la vallée interandine (entre les banlieues de Quito au Nord et la ville de Latacunga au Sud). De surcroît, dans un pays comme l'Équateur, doté d'une organisation centralisée, une crise affectant la capitale, Quito, aurait de lourdes répercussions sur une large partie du pays.

Par ailleurs, cette expérience acquise par l'IG-EPN a probablement contribué à faciliter l'organisation du dispositif de gestion de crise au sein de l'IG lors du séisme qui a frappé la côte nord de l'Équateur en 2016, notamment la ville de Pedernales, et provoqué des centaines de morts. Bien qu'il s'agisse de phénomènes telluriques différents, les processus mis en œuvre en situation de crise présentent certaines caractéristiques communes : organisation de la surveillance et de la collecte des données scientifiques en urgence sur le terrain afin de comprendre et évaluer le phénomène et son évolution dans le temps, identification des zones affectées ou susceptibles de l'être, diffusion de l'information et expertise apportée aux autorités publiques, communication des incertitudes concernant les phénomènes telluriques avec les autorités et les médias, partage de l'activité de l'IG-EPN entre la gestion de la crise et les tâches régulièrement assurées par l'institut.

# Chemin d'impact

## Processus et aléas volcaniques en Équateur



# Annexes

## Entretiens réalisés

Alexandra	<b>Alvarado</b>	vice-présidente de l'École polytechnique nationale (EPN) de Quito, précédemment directrice de l'IG-EPN, Équateur
Silvana	<b>Hidalgo</b>	directrice de l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale, (IG-EPN) de Quito, Équateur
Jean-Luc	<b>Le Pennec</b>	représentant de l'IRD en Équateur, directeur de recherche au sein de l'UMR Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), Équateur
Jorge	<b>Ordóñez</b>	fonctionnaire de l'équipe technique, direction métropolitaine de gestion des risques, secrétariat de sécurité et gouvernabilité, municipalité de Quito, Équateur
Gustavo	<b>Padilla</b>	membre du réseau des « <i>vigías</i> » du Tungurahua, Équateur
Jorge	<b>Totoy</b>	membre du réseau des « <i>vigías</i> » du Tungurahua, Équateur

## Documents cités

### Publications académiques

ANCELLIN M.-A., SAMANIEGO P., VLASTÉLÍČ I., NAURET F., GANNOUN A., HIDALGO S., 2017 – Across-arc versus along-arc Sr-Nd-Pb isotope variations in the Ecuadorian volcanic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18: 1163-1188. doi: 10.1002/2016GC006679.

BERNARD, B., ANDRADE, D., 2011 – Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. Instituto Geofísico-Escuela Politécnica Nacional. Edición IRD-IG/EPN.

BERNARD B., BATTAGLIA J., PROAÑO A., HIDALGO S., VÁSCONEZ F., HERNANDEZ S., RUIZ M., 2016-a – Relationship between volcanic ash fallouts and seismic tremor: quantitative assessment of the 2015 eruptive period at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 78:80. doi: 10.1007/s00445-016-1077-5.

BERNARD J., EYCHENNE J., LE PENNEC J.-L., NARVÁEZ D., 2016-b – Mass budget partitioning during explosive eruptions: insights from the 2006 paroxysm of Tungurahua volcano, Ecuador. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 17: 3224-3240.

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.

HALL M. L., SAMANIEGO P., LE PENNEC J.-L., JOHNSON J. B., 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., GERBE M. C., MARTIN H., SAMANIEGO P., 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. doi: 10.1016/j.lithos.2011.11.019.

MERLHIOT G., MERMILLOD M., LE PENNEC J.-L., HIDALGO S., MONDILLON L., 2018 – Reducing uncertainty to promote appropriate decisions when facing hazardous phenomena at an active volcano. *Journal of Applied Social Psychology* 48:227-234.

LE PENNEC J.-L., RUIZ G. A., 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 of Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 217-218: 91-103.

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., LE PENNEC J.-L., BARBA D., HALL M.-L., ROBIN C., MOTHES P., YEPES H., 2008 – Mapa de los peligros potenciales del volcán Tungurahua. (Esc. 1/50 000), 3ra Edición, Edit. IG/EPN-IRD-IGM.

## Autres documents

30 ans en Équateur. Actes des séminaires et ateliers scientifiques. Quito 11-16/10/2004. 2007, IRD, éditeur Pierre Gondard.

JEA1 « Évaluation du risque volcanique en Équateur par l'approche probabiliste », dossier de candidature à l'appel à proposition 2003.

Projet de laboratoire mixte international Séismes et volcans dans les Andes du Nord, 2011-2014.

2005 – Sistematización del proyecto « Comunidades afectadas por el Tungurahua : mitigando los riesgos de vivir cerca a un volcán activo » : articular lo científico y lo social para el desarrollo sostenible es un reto de la gestión del riesgo. Quito : Echo, Cafod, Conferencia Episcopal Ecuatoriana, Diócesis de Ambato, CRS, IG-EPN, IRD, 67 p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010037387>. Et le film réalisé sur ce projet : [https://www.youtube.com/watch?v=qrij\\_ONZ1Jg](https://www.youtube.com/watch?v=qrij_ONZ1Jg).

### Exemples de livrets sur les volcans à destination du grand public :

– ANDRADE D., HALL M., MOTHES P., TRONCOSO L., EISSEN J.-P., SAMANIEGO P., EGRED J., RAMÓN P., RIVERO D., YEPES H., 2005 – *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Quito : Corporación Editora Nacional, (3), 147 p. (Los Peligros Volcánicos en el Ecuador ; 3). ISBN 9978-84-398-1. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010036189>.

– LE PENNEC J.-L., SAMANIEGO P., EISSEN J.-P., HALL M., MOLINA I., ROBIN C., MOTHES P., YEPES H., RAMÓN P., MONZIER M., EGRED J., 2005 – *Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua*. Quito : Corporación Editora Nacional, (1), 120 p. (Los Peligros Volcánicos en el Ecuador ; 1). ISBN 9978-84-402-3. [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers11-12/010036187.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-12/010036187.pdf).

– SAMANIEGO P., EISSEN J.-P., MONZIER M., ROBIN C., ALVARADO A., YEPES H., 2004 – *Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe*. Quito (ECU) ; Quito : IG-EPN ; IRD ; Corporación Editora Nacional, (2), 94 p. (Los Peligros Volcánicos en Ecuador ; 2). ISBN 9978-84-367-1. <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/38-los-peligros-volcanicos-asociados-con-el-cayambe>.

ARMIJOS M. T., PHILLIPS J., WILKINSON E., BARCLAY J., HICKS A., PALACIOS P., MOTHES P., STONE J., 2017 – Adapting to changes in volcanic behaviour: Formal and informal interactions for enhanced risk management at Tungurahua Volcano, Ecuador. *Global Environmental Change* 45: 217-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.002>.

FEW R., ARMIJOS M. T., BARCLAY J., 2017 – Living with Volcan Tungurahua: The dynamics of vulnerability during prolonged volcanic activity. *Geoforum* 80: 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.01.006>.

**Articles du journal équatorien *El Comercio* portant sur les éruptions du Tungurahua et du Cotopaxi, les réseaux de « vigías » du Tungurahua ou bien encore l'IG-EPN.**

## Liste des sigles

**AFD** : Agence française de développement

**ARTS** : Allocations de recherche pour une thèse au Sud

**Asirpa** : Analyse des impacts de la recherche publique agronomique

**BID** : Banque interaméricaine de développement

**BSTD** : Bourses de thèse de l'IRD

**Cafod** : Catholic Agency for Overseas Development

**Cepas** : Conférence épiscopale équatorienne

**Cerege** : Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement

**Cirad** : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

**CNRS** : Centre national de recherche scientifique

**CRS** : Catholic Relief Services

**Dipecho** : Programme de prévention des risques et de préparation aux catastrophes d'Echo, Commission européenne

**Echo** : Direction générale à l'aide humanitaire et à la protection civile (DG Echo) de la Commission européenne

**EPN** : École polytechnique nationale

**Geops** : Laboratoire géosciences Paris-Sud

**Iavcei** : International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior.

**Ifsttar** : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

**IG-EPN** : Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale

**Impress** : Impact of research in the South

**Inrae** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

**IRD** : Institut de recherche pour le développement

**I-Site** : Initiatives Science-innovation-territoires-économie, Programme investissements d'avenir (PIA)

**Isterre** : Institut des sciences de la Terre

**JEAI** : Jeune équipe associée à l'IRD

**Jica** : Agence de coopération internationale du Japon

**Labex ClerVolc** : Laboratoire d'excellence centre clermontois de recherche sur le volcanisme

**LGO** : Laboratoire géosciences océan

**LMC 14** : Laboratoire de mesure du Carbone 14

**LMI** : Laboratoire mixte international

**LMV** : Laboratoire Magmas et Volcans (UMR CNRS, IRD, universités Clermont-Auvergne et Jean-Monnet à Saint-Étienne)

**MEPR** : Mission évaluation et programmation de la recherche, IRD

**ONG** : Organisation non gouvernementale

**OVT** : Observatoire du Volcan Tungurahua

**Orstom** : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, ex IRD

**Prefalc** : Programme régional France-Amérique Latine-Caraïbes

**Rovig** : Réseau d'observatoires volcanologiques de l'IG-EPN

**Senescyt** : Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

**Sesstim** : Unité Sciences économiques et sociales de la santé et traitement de l'information médicale

**Svan** : Séismes et volcans dans les Andes du Nord (LMI)

**UCA** : Université Clermont-Auvergne

**UMR** : Unité mixte de recherche

**UR** : Unité de recherche

**USGS** : United States Geological Survey

**VCI** : Volontaire civil international



COLLECTION **Chemins d'impacts**

[www.editions.ird.fr](http://www.editions.ird.fr)