



Panorama pris depuis le flanc nord du volcan Cotopaxi.

Les réactivations en 1998 du volcan Pichincha dominant la ville de Quito, puis en 1999 du Tungurahua, suivies de l'éruption du Reventador en novembre 2002, ont quelque peu chamboulé le programme de recherche de volcanologie que l'IRD mène en collaboration avec le département de géophysique de l'École polytechnique nationale (EPN) de Quito. Les volcanologues de l'IRD au sein de l'UR163 *Laboratoire magmas et volcans (LMV)*¹ et ceux de la *Jeune Équipe Associée*, récemment créée à l'EPN, ont affiché un intérêt croissant pour l'étude de l'impact provoqué par ces éruptions sur l'environnement, pour la gestion du risque volcanique et pour l'amélioration de la prévention. Un intérêt d'autant plus justifié qu'en Équateur, l'urbanisation hâtive augmente considérablement les dangers à proximité des volcans actifs, tous fortement explosifs. La tenue en janvier 2006 à Quito du colloque international *Cities on Volcanoes*² est le meilleur témoignage de cette volonté commune.

1. Unité mixte associant l'IRD, l'université Blaise-Pascal et le CNRS.

2. Colloque patronné par l'IAVCEI et pour lequel le département de géophysique de l'EPN et l'IRD sont co-organisateurs.

Une jeune équipe

Les crises volcaniques des dernières années ont souligné le besoin de cartes de menaces de plus en plus précises. La mise en œuvre de nouvelles approches assurant une évaluation plus exhaustive et quantitative de ces menaces a été à l'origine de la constitution au département de géophysique de l'EPN d'une *Jeune Équipe Associée* à l'IRD (JEA) dirigée par Pablo Samaniego, premier docteur formé dans le cadre de la coopération avec l'IRD.

Le premier volet des recherches de cette jeune équipe concerne des études fondamentales : détermination précise de l'architecture des dépôts ; caractérisation des dynamismes éruptifs ; compréhension des modes de mise en place des écoulements pyroclastiques... En activité depuis six ans, le Tungurahua a été le premier volcan choisi pour de telles recherches. Les volcans Imbabura, Atacazo et Chimborazo compléteront, par la diversité de leurs dynamismes éruptifs, cette approche. Un second volet concerne l'application de méthodes probabilistes avec les modélisateurs du LMV, afin de réduire les incertitudes concernant l'évolution d'une activité volcanique. Les cibles sélectionnées sont les deux volcans les plus dangereux, le Tungurahua et le Cotopaxi. L'association avec l'UR163 favorisera aussi l'acquisition des données de terrain indispensables aux expérimentations et modélisations en laboratoire. L'étude de l'aléa le plus redoutable, la production de coulées de boue par les volcans englacés, est la tâche la plus urgente.



Petite éruption du Tungurahua, le 23 septembre 2002.

Un concentré de diversité

ors de la subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale, l'angle de plongement est un des principaux facteurs contrôlant la largeur de l'arc volcanique. Cet angle est fonction de divers paramètres : vitesse de convergence des plaques, état et nature des matériaux de la croûte océanique plongeante, structure du plancher océanique, qui peut comprendre une ride volcanique susceptible de modifier le régime thermique de l'ensemble, monts sous-marins pouvant ralentir le processus de subduction...

La « jeunesse » de la partie de la plaque Nazca s'enfonçant sous l'Équateur, et l'implication de la Ride de Carnegie dans la subduction contribuent à un angle faible, propice à un large étalement du volcanisme perpendiculairement à la fosse. Suivant la direction de l'arc, les volcans se répartissent selon deux alignements

majeurs, parallèles, correspondant aux deux cordillères qui composent les Andes équatoriennes, mais aussi dans la zone d'effondrement qui les sépare, le *Valle* interandin, et dans la zone arrière-arc, sur le versant amazonien. Les volcans les plus proches de la fosse, qui constituent l'arc frontal de la Cordillère occidentale, se situent à 80-100 km au-dessus du slab (croûte océanique subduite), alors que ceux de la Cordillère orientale et de l'arrière-arc sont à 130-150 km au-dessus de la plaque océanique.

Cette disposition, très complète comparée à celles existant dans d'autres parties des Andes, se traduit non seulement par un nombre important d'édifices (une soixantaine de grands volcans) mais aussi par une large diversité structurale et géochimique, aboutissant à deux principaux types d'édifices. Des strato-volcans, habituellement caractérisés par un cône sommital composé en majeure partie de coulées de laves et de dépôts pyroclastiques, s'opposent à des volcans d'activité essentiellement explosive, constitués par des laves visqueuses et des dômes. Des aléas et des cycles éruptifs très différents sont associés à ces deux grands types de volcans et leurs intermédiaires. La densité exceptionnelle d'édifices volcaniques et leur diversité font de l'arc équatorien la région au monde qui rassemble la plus grande variété de styles éruptifs et d'aléas, sur une surface aussi petite.

Ces caractéristiques et le fait qu'une équipe très active, dirigée par Minard Hall puis par Hugo Yepes, existait à l'*Instituto geofísico* au milieu des années 1990, ont incité les volcanologues de l'IRD à développer en Équateur un important programme de recherches, dont le succès est imputable à la forte synergie qui a résulté d'une collaboration exemplaire.

Les coulées de boue : aléa majeur des volcans d'Équateur

our nombre de volcans équatoriens, les interactions entre eau et magma influencent le déroulement des éruptions et l'intensité des explosions. Parfois un lac occupe le cratère (Cuicocha, Quilotoa). Dans d'autres cas, le sommet supporte une couverture neigeuse ou glaciaire (Cayambe, Cotopaxi, Antisana). La moindre éruption peut alors provoquer une débâcle sous forme de coulées boueuses. Ces dernières sont autant voire plus dévastatrices que les nuées ardentes, même si la quantité d'eau mobilisée n'atteint qu'une faible partie des réserves (10 à 20 %). Ce fut le cas lors de la catastrophe d'Armero en Colombie qui fit 24 000 victimes en 1985.

Le Cayambe, au sommet aplati formé par plusieurs dômes coalescents, et dont l'activité fumerolienne actuelle est presque imperceptible, est le type même d'édifice volcanique qui, en cas de mise sous pression pré-éruptive accompagnée d'une élé-



Un nuage de cendre au-dessus de la ville de Quito lors de l'éruption du Pichincha le 26 novembre 1999.

Des avalanches de débris

es avalanches de débris volcaniques se produisent lorsque le flanc d'un volcan s'effondre partiellement.

Le glissement, qui met brusquement en mouvement un large volume de matériaux, de l'ordre du km³ ou de plusieurs km³, sous forme d'un gigantesque écoulement de blocs plus ou moins broyés, est la plupart du temps accompagné d'une violente explosion due à la décompression simultanée du magma présent dans la partie haute de l'édifice (cryptodôme). Ce phénomène, heureusement peu fréquent, peut se produire plusieurs fois au cours de la construction d'un cône.

En Équateur, un lien étroit existe entre de tels événements et l'activité tectonique des Andes du Nord. « *La plupart des avalanches de débris ayant pour origine une discontinuité à l'intérieur du volcan, nous étudions les relations entre les glissements et les failles tectoniques qui affectent les édifices, ainsi que la répartition des autres zones de faiblesse*

visibles : discontinuités lithologiques, zones argileuses, réseaux de fractures... », explique Claude Robin, directeur de recherche à l'UR163. « *Le rôle de l'activité sismique, des circulations hydrothermales, de l'érosion et de l'activité magmatique doit être pris en compte pour étudier cet aléa, ainsi que des facteurs comme la nature et la structure du substratum, qui contrôlent la direction, la vitesse des avalanches* », poursuit-il. Ces recherches reposent sur des analyses morphologiques détaillées, un ample travail de terrain et des modélisations numériques et analogiques. « *Plus précisément, nous nous efforçons en ce moment de caractériser et de quantifier les rapports entre avalanches de débris et activité tectonique dans le bassin d'Ibarra (150 km au nord de Quito) à partir d'informations recueillies sur les dépôts d'avalanches passées et à partir de l'étude de la stabilité des édifices.* » Une telle démarche doit permettre de définir les effondrements potentiels qui menacent près de 200 000 personnes.



Cayambe, volcan à dôme englacé.



et des villes

Des volcans très explosifs

La définition de deux grands types de volcans (cônes à coulées de lave et dépôts cendres, ou dômes de laves visqueuses) est simplificatrice, car de nombreuses variantes existent. En particulier, sur le long terme, un même édifice peut évoluer d'un type à l'autre, une longue phase d'activité explosive, avec dômes sommitaux, pouvant par exemple succéder à la destruction d'un cône par un large effondrement sectoriel. Cependant, le modèle de volcan essentiellement constitué par des laves riches en silice est ici remarquable. « Les risques qui lui sont spécifiques et les avancées réalisées par notre équipe sur la connaissance des sources magmatiques permettent de considérer à part ce modèle », note Claude Robin. « Leur composition chimique étant liée à une importante participation, soit directe, soit indirecte, de la croûte océanique plongeant sous

la croûte continentale, ils ont tendance à se situer au front de l'arc volcanique. L'activité fortement explosive perdure tout au long ou pendant la quasi-totalité du développement des édifices. » Le Guagua Pichincha, l'Atacazo et le Pululahua, tous trois menaçant Quito et sa banlieue, sont de ce type. Dans ces volcans, la grande viscosité des laves est responsable d'un faible étalement. Il en résulte une structure massive aux pentes fortes, propice aux effondrements sectoriels. Du fait de cette forme et de l'absence d'activité apparente, le volcan Cayambe était considéré encore récemment comme endormi, voire éteint. Une étude très précise des dépôts accumulés dans une tourbière d'altitude et la datation des niveaux de tourbe ont révélé que trois périodes éruptives d'une durée de 700 ans en moyenne, séparées par des phases de repos de quelque 600 ans, se sont produites depuis 4 000 ans. Vingt-trois éruptions fortement explosives ont été dénombrées, engendrant des coulées pyroclastiques et des retombées de cendres et ponces. En moyenne, ce nombre équivaut à une éruption par

siècle, un peu plus si l'on ne considère que les périodes d'activité qui totalisent 21 siècles sur 4 000 ans. Le temps qui nous sépare de la dernière éruption (moins de deux siècles) n'est pas suffisant pour affirmer que la période d'activité est terminée. Des enregistrements ont par ailleurs révélé une importante activité sismique sous le sommet. L'activité en profondeur de ce volcan est au moins égale à celle d'édifices considérés très actifs, comme le Cotopaxi.

Recherche et prévention

De nombreuses déterminations d'âges au ^{14}C obtenues sur les produits d'éruption du Tungurahua ont conduit à revoir l'attribution de certains de ces produits à telle ou telle éruption. « Il a notamment fallu identifier à nouveau les secteurs affectés par les éruptions historiques et pré-historiques, en particulier les vallées peuplées empruntées par les nuées ardentes », explique Jean-Luc Le Pennec, chargé de recherche à l'IRD. « Mais des moyennes pondérées de plusieurs âges obtenus pour une même éruption permettent de présenter une reconstitution fiable de l'histoire éruptive du cône actif, qui remonte à 3 000 ans. » Ce volcan connaît une fréquence moyenne d'activité – événements explosifs « instantanés » importants et périodes d'activité discontinuée – de deux siècles. Dans le détail, trois cycles d'activité d'une durée de l'ordre du millénaire ont été identifiés, avec, au sein d'un même cycle, des éruptions de plus en plus rapprochées dans le temps. « La fréquence des éruptions violentes (nuées à 10-20 km de la source) est plus élevée qu'on ne le supposait », ajoute-t-il. Dans cette évolution, quelle peut être la place de l'éruption actuelle, qui n'a pas (encore ?) émis de nuées ardentes ? Au cours des opérations de surveillance, les flux de SO_2 et autres gaz émis ont été mesurés, une caméra a été installée au sud du volcan et un système de suivi quantitatif des émissions de matières solides a été développé, afin d'établir des pronostics en temps réel et d'informer le plus rapide-

ment possible les populations susceptibles d'être affectées par des chutes de cendre. Parallèlement, le volume global de téphras émis depuis 1999 a été estimé en utilisant des données satellitaires et des mesures régulières au sol, avec l'établissement de cartes évolutives. La complémentarité de ces méthodes permet d'évaluer le volume de cendres émises de novembre 1999 à décembre 2004 entre 40 et 50 millions de m^3 . Un volume du même ordre de grandeur que ceux de certaines éruptions explosives brèves – mais à nuées ardentes, donc fortement destructrices – de la période historique. Ceci pourrait expliquer la tendance à « l'essoufflement » de l'activité, observée depuis le début de 2004. L'acquisition de telles données et ces comparaisons sont capitales pour connaître l'évolution du volcan qui nous tient en haleine depuis maintenant cinq ans.



Front de la coulée pyroclastique du Reventador.

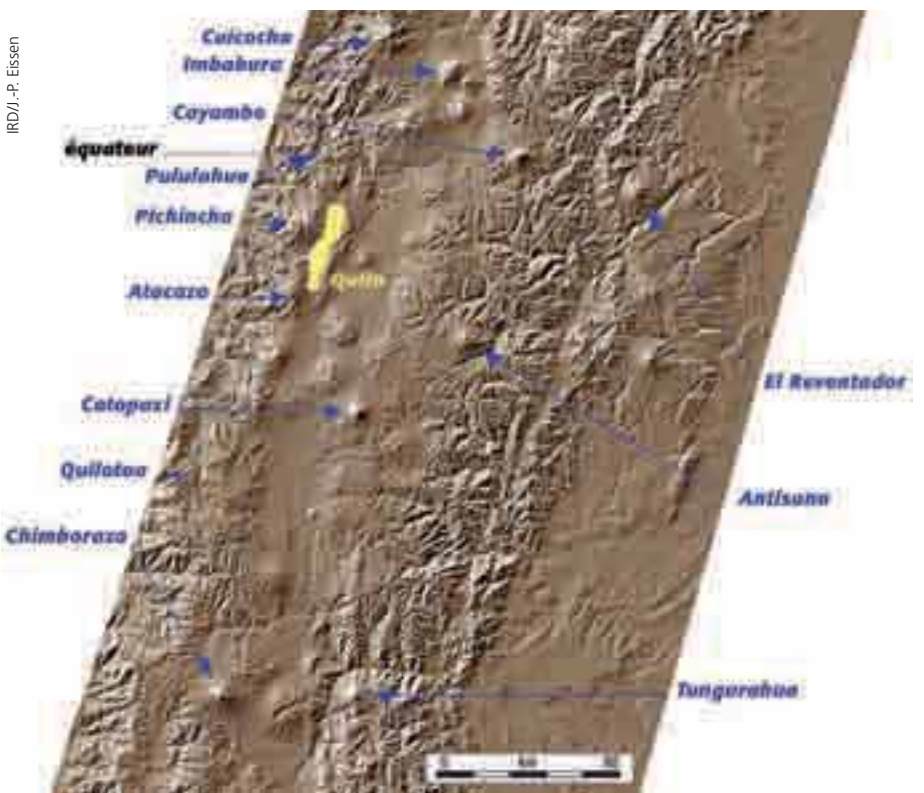
Le volcan Pichincha vu depuis Quito.



El Reventador et Tungurahua Les limites des prévisions

Après vingt-six années de sommeil, le volcan El Reventador s'est réveillé le 3 novembre 2002. L'éruption a été soudaine, avec une brusque émission de nuées ardentes de cendres et scories¹. Succédant à une accalmie de janvier 2003 à octobre 2004, des coulées de lave se sont produites au cours d'une nouvelle phase éruptive qui s'est poursuivie au premier semestre de 2005. Des cendres sont tombées sur Quito le 8 juin et l'avancée des coulées a suscité des inquiétudes pour l'oléoduc qui passe au pied du volcan.

Lors de la crise du Tungurahua débutée fin 1999, l'activité du volcan s'est d'abord maintenue à bas niveau pendant plus d'une année. À partir de 2001, des manifestations plus spectaculaires se sont produites : fortes émissions cendreuse, projections de lave plus fréquentes et plus intenses, accompagnées de « coups de canon » audibles à 20 km du volcan. Des périodes d'accalmie ont alterné avec ces phases éruptives. Bien que du même type, les deux volcans ont donc montré, au cours des deux années suivant leur réactivation, des comportements tout à fait différents. L'éruption du Reventador a débuté par la violente éjection d'une haute colonne éruptive, dense, et la formation de coulées pyroclastiques, sans signes annonciateurs évidents.



Principaux volcans d'équateur étudiés par l'IRD et cités dans ce dossier. Le fond correspond à une mosaïque d'images radar réalisée par J.-L. Froger (UR163)

Le Cayambe étant recouvert par une épaisse calotte de glace, la formation de lahars se dirigeant vers la plaine de la ville de Cayambe serait un réel danger en cas de reprise d'activité.

Cotopaxi Un glacier sous surveillance

Au Cotopaxi, les éruptions se produisent en moyenne une fois par siècle. Le sommet de ce volcan (5 897 m) est recouvert d'une chape de glace d'environ 14 km^2 . La dernière éruption de 1877 a produit, à partir de ce glacier, d'importantes coulées boueuses dont certaines, dirigées vers le sud, ont partiellement détruit la ville de Latacunga. Il y a environ 5 000 ans, un gigantesque lahar, développé à partir du Cotopaxi, a envoyé une grande partie du Valle interandin, aujourd'hui densément peuplé, avant d'atteindre l'océan Pacifique, à plus de 450 km de son lieu de formation.

Alors qu'aucune éruption n'a eu lieu depuis près de 130 ans, une augmentation de l'activité sismique de ce volcan avait été signalée dans les années 1990. Depuis fin 2001, une recrudescence de l'activité interne rend urgente l'évaluation du volume d'eau qui serait mobilisé lors d'une éruption. Au début 2004, l'UR032 *Great Ice* et l'UR163 *Laboratoire magmas et volcans*, avec leurs partenaires équatoriens (INAMHI, IG-EPN) et colombiens (INGEOMINAS), ont mesuré à l'aide d'un radar portable, entre 4 800 et 5 700 m d'altitude, l'épaisseur de la glace en une soixantaine de stations localisées par GPS différentiel. L'épaisseur

moyenne de glace mesurée est de 35 à 40 m, avec un maximum de 117 m, ce qui correspond à un volume compris entre 0,49 et 0,56 km^3 . « Ce résultat permettra d'affiner les modélisations numériques appliquées à ce cas particulier et de connaître, en cas d'éruption, la quantité exacte de glace mobilisée, donc l'importance de la menace qui pèse sur les habitants », rapporte Jean-Philippe Eissen, chargé de recherche à l'UMR163 qui a participé à cette opération. « Il permettra aussi d'améliorer la gestion des ressources en eau, car ce glacier représente une importante réserve ; enfin, c'est une donnée pour l'estimation de la vitesse de fonte du glacier du Cotopaxi, consécutive au réchauffement global. »



Mesure radar de l'épaisseur de glace sur le flanc nord du Cotopaxi.

Contacts

Claude Robin : crobin@cec.uchile.cl
Jean-Philippe Eissen : Jean-Philippe.Eissen@ird.fr
Jean-Luc Le Pennec : Jean-Luc.Le-Pennec@ird.fr
Pablo Samaniego : psamaniego@igepn.edu.ec
Anne Coudrain (UR032) : Anne.Coudrain@ird.fr