



Internal Geophysics

Evidence for a seismic activity mainly constituted of hybrid events at Cayambe volcano, Ecuador. Interpretation in a iced-domes volcano context

Bertrand Guillier*, Jean-Luc Chatelain

IRD–UMR 157, UJF, LGIT, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Received 12 July 2004; accepted after revision 6 March 2006

Available online 2 May 2006

Presented by Claude Jaupart

Abstract

The high activity level of Hybrid Events (HE) detected beneath the Cayambe volcano since 1989 has been more thoroughly investigated with data from a temporary array. The unusual HE spectral content allows separating a high-frequency signal riding on a low-frequency one, with a probable single source. HEs are interpreted as high frequency VT events, produced by the interaction between magmatic heat and an underground water system fed by thaw water from the summital glacier, which trigger simultaneous low-frequency fluid resonance in the highly fractured adjacent medium. Pure VTs are interpreted as ‘aborted’ HEs occurring probably in the oldest and coldest part of the volcano complex. *To cite this article: B. Guillier, J.-L. Chatelain, C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Mise en évidence d’une activité sismique essentiellement constituée d’événements hybrides au volcan Cayambe (Équateur). Interprétation dans le contexte d’un volcan englacé à dômes sommitaux. Une très forte activité sismique continue, de type longue période (LP), ayant été mise en évidence sous le volcan Cayambe depuis 1989, un réseau sismologique temporaire a été installé sur ce volcan afin de mieux étudier cette activité. L’étude de ces LP montre que ce sont en fait des séismes de type hybride (HE), dont le contenu spectral inhabituel peut être décomposé en une partie basse fréquence superposée à une partie haute fréquence ayant une source commune. Ces HE sont interprétés comme étant des séismes volcano-tectoniques (VT), provoqués par l’interaction entre la chaleur magmatique et les eaux de fonte du glacier sommital, déclenchant simultanément la résonance de fluides dans le milieu adjacent hautement fracturé. Les séismes VT purs sont interprétés comme des HE « avortés », sans doute localisés dans une partie plus ancienne et plus froide du volcan. *Pour citer cet article : B. Guillier, J.-L. Chatelain, C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Hybrid events; VT earthquakes; LP events; Volcano; Ecuador; Cayambe

Mots-clés : Séismes hybrides ; Volcano-tectonique ; Longue période ; Volcan ; Équateur ; Cayambe

* Corresponding author.

E-mail address: guillier@bondy.ird.fr (B. Guillier).

Version française abrégée

1. Introduction

Le volcan Cayambe, situé dans la cordillère orientale des Andes équatoriennes, est situé à proximité de la structure tectonique active de Chingual–La Sofia [7], à l'origine d'un des séismes les plus destructeurs d'Équateur de ces cinquante dernières années (le 6 mars 1987 ; $M_w = 6,9$), à 15 km au nord-est du Cayambe [25]. Ce grand volcan, de 24 km d'axe est–ouest et de 18 km d'axe nord–sud, culmine à 5790 m. Sa base se trouve vers 3000 m d'altitude. Il est constitué de deux édifices majeurs : (1) le Vieux Cayambe, d'âge supérieur à 250 000 ans, caractérisé par des dépôts allant des andésites basiques aux dacites et dont l'histoire se termine par la formation d'une caldera d'explosion ; (2) un édifice composite plus récent, le Nevado Cayambe, dont le développement récent est dominé par l'extrusion de dômes successifs de composition dacitique, disposés selon une orientation N120.

Cet édifice est recouvert par une chape glaciaire et neigeuse, dont le volume est estimé à $0,7 \text{ km}^3$ [17]. Alors qu'il a été longtemps considéré comme inactif, des études récentes ont démontré une forte activité du Nevado Cayambe au cours de l'Holocène supérieur [17, 22,23].

À cause de cette activité récente et des risques volcaniques associés (flux pyroclastiques, lahars, chutes de cendres) sur une zone peuplée et très importante économiquement, l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale de Quito a commencé dès 1989 la surveillance de cet édifice volcanique par l'installation d'une station télémétrée. Les enregistrements sur papier au « noir de fumée » ont montré une très forte activité régulière de séismes de type LP, contrairement à ce qui est observé sur de nombreux volcans, comme le Mammoth Mountain [11], le Kilauea [12], le mont Saint Helens [14] ou les îles Pavlof [16], où les LP se produisent en essaim. De novembre 1997 à mars 1998, une étude sismologique, utilisant cinq stations 1C du réseau portable de l'IRD et la station de surveillance de l'EPN (Fig. 1B), a montré que les séismes LP avaient un contenu spectral hybride (HE) selon le classement de Power et al. [19,20] et de Lahr et al. [13].

2. Caractéristiques des séismes et analyse spectrale

Deux types de séismes sont communément observés sur les volcans actifs : les séismes « volcano-tectoniques » (VT) et les séismes « longue période »

(LP). Les VT sont caractérisés par un contenu spectral haute fréquence allant jusqu'à 10 Hz et au-dessus [4,13], alors que les LP sont définis par un contenu monochromatique basse fréquence entre 0,5 et 6 Hz [4, 6,9,14]. Durant l'étude, 5404 séismes locaux ont été enregistrés, comprenant 146 VT et 5258 HE. L'analyse spectrale a été réalisée à l'aide du programme Pickev [8], en suivant la méthodologie explicitée par Cramer et McNutt [6]. Lors de cette analyse, nous avons fixé la fréquence coin des filtres basse et haute fréquence à 3,5 Hz, valeur basée sur le fait que 95% de l'énergie des LP du Cotopaxi est comprise entre 0 et 3,5 Hz [21].

2.1. Les séismes volcano-tectoniques

Ces séismes ont une coda variant de 7 à 15 s. Leurs principales caractéristiques sont (1) des arrivées des ondes P et des ondes S très claires et impulsives et (2) un maximum d'énergie libérée dans la gamme 6–10 Hz (Figs. 2A et 3A).

2.2. Les séismes hybrides

Le contenu fréquentiel inhabituel des séismes du Cayambe apparaît clairement lors de l'utilisation d'un filtre passe-bas, qui montre un signal basse fréquence monochromatique très proche des LP du Cotopaxi, et d'un filtre passe-haut, qui met en évidence un signal haute fréquence très proche des séismes VT observés sur le Cayambe ou le Cotopaxi (Fig. 2). Ce contenu spectral, qui suggère la superposition de deux événements, est observé sur une seule station et peut être dû à des effets de trajet et/ou de site. Ce doute est levé par le *stack* des spectres de vitesse de toutes les stations d'un même séisme [18] et par celui des formes d'onde (à partir du temps d'arrivée de l'onde P), qui démontre la consistance des formes d'onde en dessous et au-dessus de 3,5 Hz (Fig. 3). Nous pouvons en déduire que, dans le cas du Cayambe, les séismes LP sont des événements hybrides (HE) similaires à ceux qui sont mis en évidence par d'autres auteurs [6,13,19,20], plutôt que des LP tels que ceux produits par le Cotopaxi.

3. Discussion

Il est intéressant de comparer le cas du Cayambe à celui du Cotopaxi. Si les signatures fréquentielles des VT des deux édifices volcaniques sont similaires, celles des séismes LP sont très différentes. Sur le Cotopaxi, les LP ont un contenu spectral entre 0 et 3,5 Hz, avec un seul pic principal, généralement en dessous de 1 Hz [21], alors que, comme nous l'avons vu précédemment, les HE du Cayambe sont caractérisés par un contenu

spectral pouvant s'étendre jusqu'à 10 Hz, avec un ou plusieurs pics principaux compris entre 1 et 6,5 Hz.

Les LP se produisent en essaims, souvent corrélés à des intrusions magmatiques indiquant une éventuelle éruption sous de nombreux volcans [11,12,14,19,20]. Dans ces essaims, les LP dont le contenu spectral comprend des hautes fréquences sont une exception : seulement 2% à Mammoth Mountain, Californie [11], quelques exemples seulement au Redoubt, Alaska [19] sur une période de 5 j, et 1% de l'activité sous le mont Spurr [20] sur une période de cinq ans.

Dans le cas du Cayambe, on n'observe pas de LP pur et monochromatique, mais des séismes présentant un ou deux forts pics basse fréquence, systématiquement combinés avec une partie haute fréquence, très similaires à des événements hybrides. Les signaux basse et haute fréquence arrivent simultanément, ce qui suppose une source commune, spatiale et temporelle. En outre, on peut définitivement rejeter des effets liés à la propagation ou au site, car les séismes montrent, d'une part, une cohérence de forme d'onde sur une seule station ou sur une onde provenant du *stack* de toutes les stations, et, d'autre part, des spectres stables à la fois sur une station ou sur le *stack* des spectres. Finalement, cette analyse nous conduit à l'hypothèse selon laquelle les HE du Cayambe résultent de la superposition de deux événements différents, un de basse fréquence et un de haute fréquence. Cette hypothèse est étayée par : (1) la similitude entre la partie basse fréquence des HE du Cayambe et des LP du Cotopaxi, et (2) la similitude entre la partie haute fréquence de ces HE aux VT observés sur le Cayambe. Des observations similaires à Mammoth Mountain [6] ont conduit à interpréter les HE comme la combinaison de VT haute fréquence et la résonance basse fréquence de fluide dans des *cracks* adjacents, résonance elle-même déclenchée par ces VT. Un bon candidat comme générateur de HE sous le Cayambe est l'interaction entre la chaleur magmatique et des eaux souterraines, comme cela a déjà été proposé pour des LP superficiels [5,10,15] ou plus profonds [21]. En effet, la présence continue de HE impose une cause persistante, en accord avec l'alimentation du système des eaux souterraines par le glacier sommital comme au Cotopaxi [21]. Quant aux VT, le phénomène principal les générant serait le refroidissement progressif des intrusions magmatiques récemment mise en place dans l'édifice.

Au Cotopaxi, il a été proposé que les LP augmentent le stress et engendrent les VT dans une zone adjacente, phénomène qui serait produit par un large conduit magmatique dans un milieu peu fracturé [21]. Pour le Cayambe, la part haute fréquence des HE (proche de

celui d'un VT) reflète un milieu hautement fracturé et donc une répartition diffuse traduisant une forte hétérogénéité, tant thermique que structurale, des conduits magmatiques, ce qui est en accord avec la présence de dômes volcaniques, et non un conduit magmatique unique. Dans ce cadre, les VT du Cayambe peuvent être interprétés comme des HE « avortés » n'ayant pas pu induire une résonance de fluide.

4. Conclusion

Le haut niveau d'activité continu de type HE observé sous le Cayambe est vraisemblablement produit par la circulation de vapeur ou d'eau surchauffée, due à l'interaction entre la chaleur magmatique et le système phréatique dans les parties hautes du volcan, alimentée par les eaux de fonte du glacier sommital. Cette interaction produit des séismes de type VT haute fréquence, lesquels déclenchent simultanément la résonance basse fréquence de fluide dans le milieu adjacent hautement fracturé. Les VT purs seraient alors des HE ayant avorté du fait de l'absence de fluide à exciter dans leur environnement immédiat. Finalement, comme pour l'activité LP du Cotopaxi, les séismes HE du Cayambe ne peuvent être interprétés comme des précurseurs d'éruption.

1. Introduction

The Cayambe is a volcanic complex located in the Ecuadorian Eastern Cordillera. The 24 (EW)-by-18 (NS)-km base of the Cayambe complex is located at 3000 m of altitude, and its top culminates at an altitude of 5790 m. Its top is covered by glaciers with an estimated 0.7-km³ volume, descending to about 4600 m on its western flank and 4200 m on its eastern flank, with a thickness reaching 100 m at places [17]. This volcano is close to the active Chingual–La Sofia fault [7] where, in March 1987, occurred one of the most destructive earthquakes of the last fifty years in Ecuador, with a magnitude of 6.7, about 15 km northeast of the Cayambe [25].

The Cayambe volcano is divided into two volcanic structures [17,22,23]:

- (1) the Old Cayambe complex, older than 250 000 years, is characterized by deposits from basic andesite to dacitic lavas, the history of which ends by a caldera of explosion [22,23];
- (2) a more recent composite structure, the Nevado Cayambe, the main part of the present volcanic complex, is made by the extrusion of successive domes of dacitic composition [22,23]. These domes

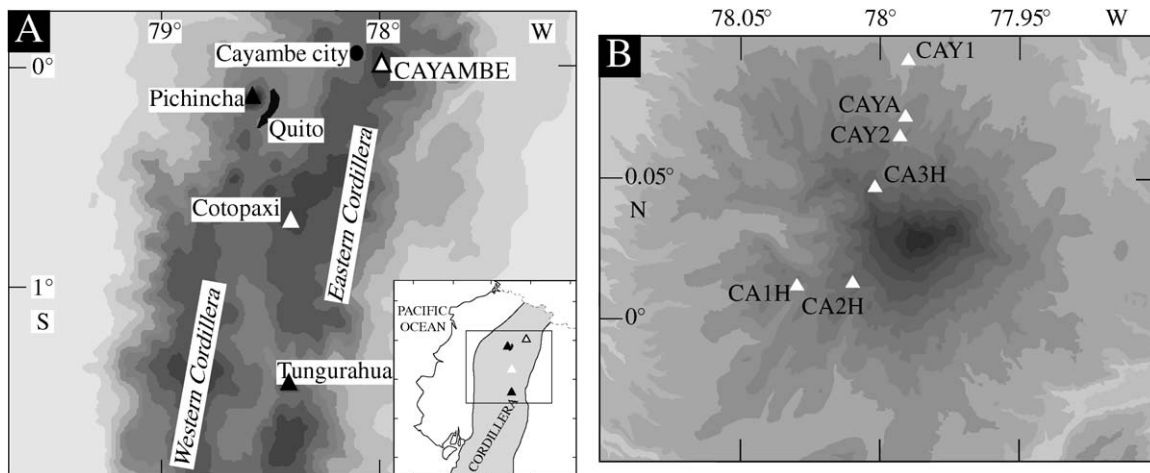


Fig. 1. (A) Map of the central Ecuadorian Andes. Contour interval is 500 m. The Cayambe volcano is represented by an open triangle with thick bordering lines. White triangle corresponds to the Cotopaxi volcano and black triangles to other major volcanoes. The shape of the city of Quito appears in black, and the location of Cayambe City is shown by a black circle. (B) Map showing the locations of the seismic stations used for this study. Contour interval is 100 m. The stations are represented by white triangles. CAYA is the station of the Ecuadorian permanent network.

Fig. 1. (A) Carte des Andes équatoriennes centrales (intervalle de contour de 500 m). Le Cayambe et le Cotopaxi sont représentés par des triangles blancs et les triangles noirs correspondent aux volcans majeurs de la zone et récemment actifs. Le contour de la ville de Quito apparaît en noir alors que la ville de Cayambe est symbolisée par un carré noir. (B) Carte montrant la localisation des stations utilisées pour cette étude. L'intervalle de contour est de 100 m. À cause des difficultés d'accès, les stations n'ont pas pu être distribuées de manière satisfaisante.

define an apparent west-to-east migration of the volcanic activity along a N120 orientation.

The Cayambe volcano was considered as inactive until recent works [17] showed that it is actually one of the most active volcanoes of the Ecuadorian Andes during the Upper Holocene. It has been concerned by more than 20 volcanic events in the last 4000 years, including four major ones in 910, 680–650, 380 and 250 BP [17,22,23]. The level of potential hazard associated to the Cayambe volcano (Fig. 1A) is high, as it is located about 50 km ENE of Quito City (1 200 000 inhabitants) and 30 km south of Ibarra City (30 000 inhabitants).

Continuous monitoring of a permanent station installed in 1989 by the 'Instituto Geofísico' (IG) of the 'Escuela Politécnica Nacional' of Quito revealed a steady long-period (LP) activity over time, contrary to what is observed for other volcanoes such as Mammoth Mountain [11], Kilauea [12], Mount St. Helens [14] or Pavlof Islands [16], where LP events occur in swarms. It was thus decided to conduct a temporary experiment in order to get more information about this LP activity. From November 1997 to March 1998, a five-station array was installed in addition to the permanent station (CAYA) of the Ecuadorian network (Fig. 1B). Due to the very hard conditions to access this area, it was impossible to get a satisfactory distribution of stations (Fig. 1B). Stations were installed at distances

ranging from 2.4 to 7.4 km from the crater. All stations were equipped with a one-component 1-Hz seismometer. During this 5-month experiment, 5404 local events have been recorded. Spectral analysis showed that what we believed to be LP events were in fact mixed-frequency events, which, following the terminology of Power et al. [19,20] and Lahr et al. [13], we will term as hybrid events (HE).

2. Events' characteristics and spectral analysis

Two types of events, volcano-tectonic (VT) and long-period (LP), are observed within the Cayambe structure, as often observed beneath volcanoes throughout the world. Usually, VTs are characterized by a high-frequency spectral content of up to 10 Hz and above (e.g., [4,13]) and are impossible to differentiate from classic tectonic earthquakes, while LPs are defined by a monochromatic low frequency content in the 0.5–5 Hz range for Chouet [4] and up to 6 Hz for Cramer and McNutt [6], Malone et al. [14] and Gil-Cruz and Chouet [9].

Data used for spectral analysis in this study come from records obtained at the six-station array described in the previous section. Spectral analyses were performed using the Pickev software from the SISMALP library [8]. The methodology used for the signal processing follows that of Cramer and McNutt [6] and will therefore not be described in details.

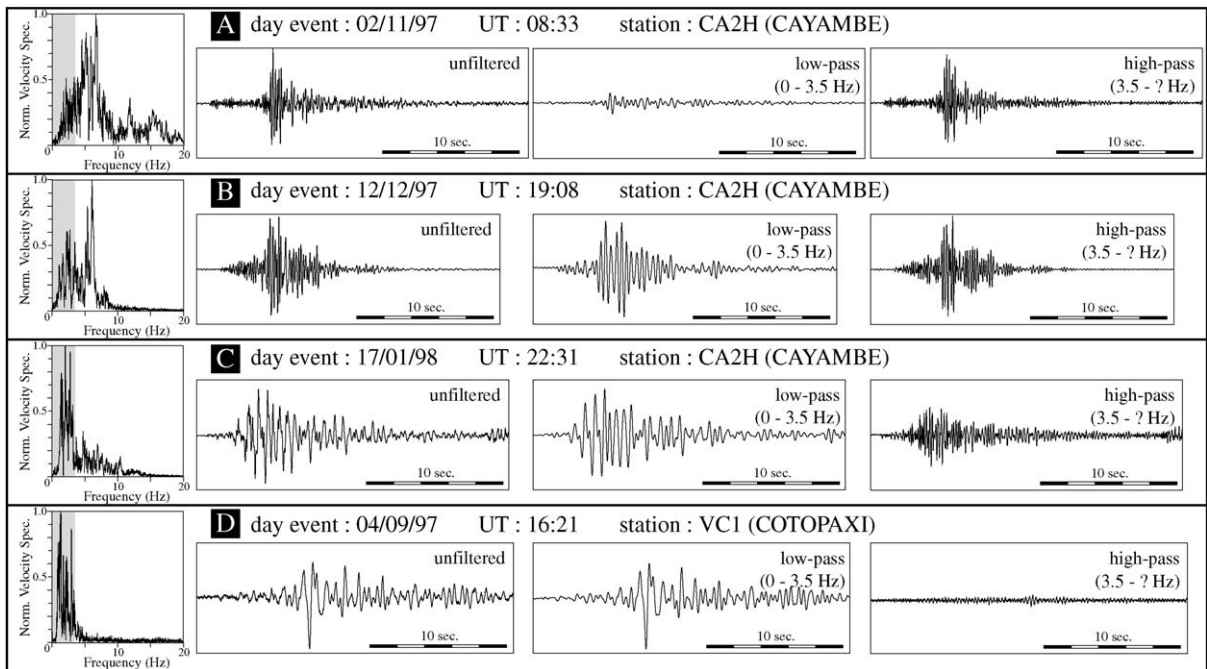


Fig. 2. Waveforms and spectral contents of a Cayambe volcano-tectonic event (VT) (A), two Cayambe hybrid events (HE) (B and C) and a long-period event (LP) from the Cotopaxi volcano (D). Cayambe events analysis has been performed using signal from a single station (CA2H, see location in Fig. 1B). Arrows indicate onsets of the P-waves. Frequency content below 3.5 Hz is overlaid by a greyed zone in the spectra to the left of the figure.

Fig. 2. Forme d'onde et contenu spectral d'un séisme volcano-tectonique (VT) du Cayambe (A), de deux séismes de type hybride (HE) du Cayambe (B et C) et d'un séisme longue période (LP) du Cotopaxi (D). Les analyses des séismes du Cayambe ont été réalisées sur la station CA2H (Fig. 1B).

2.1. Volcano-tectonic events

VTs have a short coda, varying from 7 to 15 s. Their main characteristics are: (1) very clear and impulsive P- and S-wave arrivals, and (2) little energy in the lower frequencies, below 3.5 Hz, and a number of high-amplitude peaks in the higher frequencies up to 15–20 Hz, with a maximum of energy release in the 6–10-Hz range (Figs. 2A and 3A). One hundred and forty-six VTs were detected during the five-month experiment.

2.2. Hybrid events

What was believed to be Cayambe LPs have the same overall characteristics as the Cotopaxi LPs described by Ruiz et al. [21]. In particular, they show a relatively clear and energetic wave less than 10 s after their onset. In the Cotopaxi case, it has been observed that the energy is concentrated in a low-frequency range below 3.5 Hz (Figs. 2D and 3D) [21]. The spectral contents of Cotopaxi LPs show very sharply peaked velocity spectra below 2 Hz (Figs. 2D and 3D), while the Cayambe events are rarely monochromatic, with a spectral con-

tent extending up to 6.5 Hz and smaller peaks also clearly apparent up to about 10 Hz (Fig. 2B and C). A possible explanation is that, in the Cotopaxi case, we are in the presence of pure LPs, while the Cayambe LPs are very similar to the mixed-frequency (hybrid) events described beneath Mammoth Mountain by Cramer and McNutt [6].

This interpretation is strengthened by the unusual frequency content that clearly appears when filtering the signal of Cayambe events, using both high-pass and low-pass filters at 3.5 Hz, which is the upper limit of the Cotopaxi LPs spectral content (Figs. 2D and 3D). The filtering allows discriminating a high-frequency signal with very clear P- and S-waves, from a more monotonic low-frequency signal, with a much more emergent onset, very similar to pure LP coda, like those observed at Cotopaxi. Onsets of the two filtered waveforms occur at the same time and their amplitude level is comparable, suggesting a same time origin for the two superimposed signals.

However, the superposition of two different waveforms (low- and high-frequency) from an analysis obtained with a single station could be due to path and/or site effects. Following the technique used by Pitt and

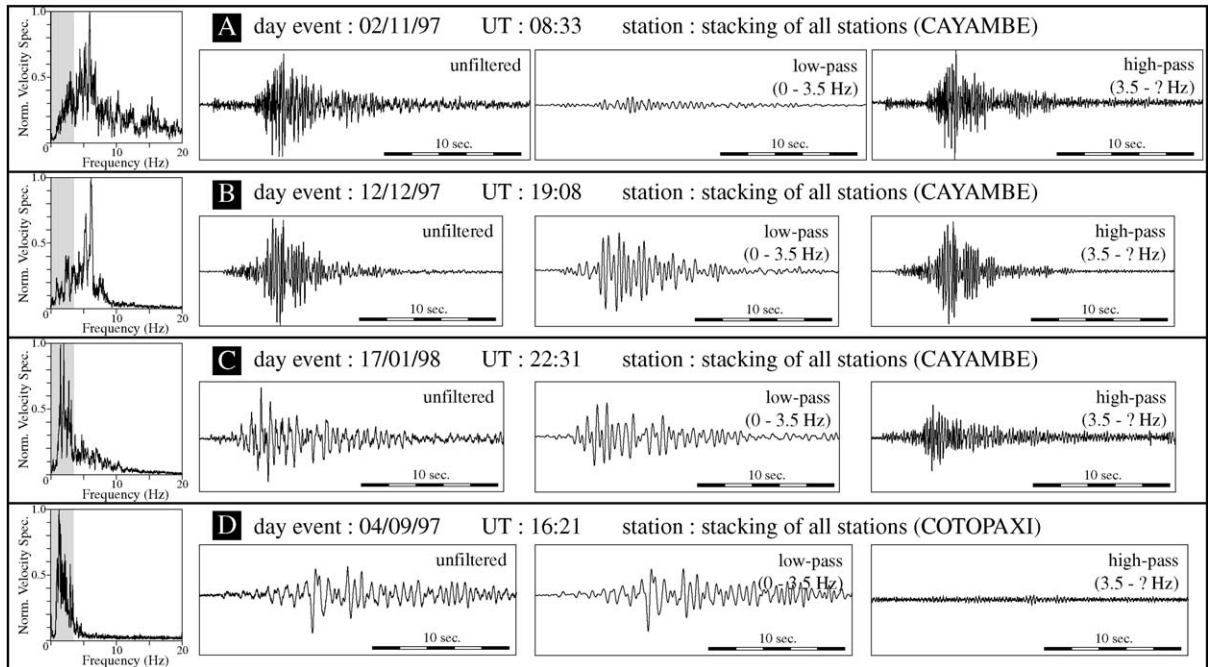


Fig. 3. Stacked waveforms and stacked spectra of a Cayambe volcano-tectonic event (VT) (A), two Cayambe hybrid events (HE) (B and C) and a long-period event (LP) from the Cotopaxi volcano (D). Waveforms have been first normalized and then stacked together taking the P-wave onset, indicated by arrows in Fig. 2, as the beginning of the stacking. Individual normalized spectra were first calculated, stacked together, and then normalized again. Same events as in Fig. 1. Frequency content below 3.5 Hz is overlaid by a grayed zone in the spectra to the left of the figure.

Fig. 3. Forme d'onde et contenu spectral *stackés* d'un séisme volcano-tectonique (VT) du Cayambe (A), de deux séismes de type hybride (HE) du Cayambe (B et C) et d'un séisme longue période (LP) du Cotopaxi (D). Les formes d'onde en chaque station ont d'abord été normalisées, puis *stackées* en prenant l'arrivée de l'onde P comme point de départ du *stack*. Les spectres de vitesse ont d'abord été normalisés en chaque station, puis *stackés* avant que le résultat soit de nouveau normalisé.

Hill [18], stacking the spectra from the records at all stations for the same event (Fig. 3A–C), which allows eliminating all unusual path effects, gives the same spectrum as at a single station (Fig. 2A–C). The same results are obtained on filtered stacked waveforms, which confirm the waveform consistency below and above 3.5 Hz. Consequently, the frequency content of the Cayambe events is due to the source and not to path-site effects.

We therefore considered that LPs from Cayambe are actually hybrid events (HE) similar to those described beneath Redoubt [13,19], Mammoth Mountain [6] and Mount Spurr [20].

3. Discussion

A steady high-level HE activity is observed beneath the Cayambe volcano, without periods of complete calmness, nor occurrence of swarms. Beneath other volcanoes, such as Mammoth Mountain [11], Kilauea [12], Mount St. Helens [14], Redoubt volcano [19] or Mount Spurr volcano [20], LPs occur in swarms, which are

usually linked to magma intrusion and often indicative of an impending eruption [4]. Chouet et al. [5] reached the conclusion that LPs were produced by the interaction between the crack walls and a shockwave in a fluid and that the best explanation was that of a magmatic reservoir ridged by a shallow hydrothermal system generating differential pressure. In the Cayambe case, the continuous production of HEs suggests that they are related to a steady process rather than to an episodic one, such as magma intrusion.

At Mammoth Mountain [11], Redoubt volcano [19] and Mount Spurr [20], some HE events have been reported within LP and/or VT swarms and are found to be the exception rather than the rule (2% at Mammoth Mountain, a few events in a five-day period at Redoubt and 1% at Mount Spurr over a three-year period).

According to Scandone and Malone [24], VTs are produced by stress relaxation due to a withdrawal of magma in the crust, while LPs are mainly interpreted as produced by resonance fluid-driven crack triggered by pressure disturbances in the fluid [1–3] and are often assimilated to eruption precursors associated with the

pressurization of volcanic edifices by ascendant fluids through cracks [4,9]. Moreover, the amount of high-frequency energy depends on the excitation mechanism, its position on the crack, the depth of the crack, the velocity structure of the medium [3].

A good candidate as a trigger of HEs beneath Cayambe is the interaction between magmatic heat and a ground water system. Such interpretation has been proposed for shallow LPs by Gil-Cruz et al. [10], Martinelli [15], Chouet et al. [5] as well as for deeper LPs beneath Cotopaxi by Ruiz et al. [21]. Moreover, the continuous occurrence of HEs beneath the Cayambe volcano implies that the groundwater system involved in this process has to be fed quite steadily, pleading for thaw water coming from the glacier covering a large portion of the top of the volcano, as in the Cotopaxi case [21]. However, no pure monochromatic LPs were detected beneath the Cayambe volcano: the events usually show one or two marked low-frequency peaks, and all of them show high-frequency riders. As both the high-frequency and low-frequency parts of HE events have the same P-wave onset, it is very likely that they have the same source, in both space and time. The same observations by Cramer and McNutt [6] led them to propose that such HEs are low-frequency fluid resonance events triggered by an adjacent VT event. The fact that HEs stacked spectra often present two or more peaks in the lower frequencies could be interpreted as a VT triggering several low-frequency events in adjacent cracks. From our analysis, propagation and/or site effects may definitively be discarded.

It is interesting to compare the Cayambe and Cotopaxi cases. While the signatures of the Cotopaxi and the Cayambe VTs are similar, the signatures of their LPs are very different. In the Cotopaxi case, LPs have a spectral content in the 0–3.5-Hz range, with a main pick below 2 Hz, while the Cayambe HEs are characterized by higher frequencies in the 0–10-Hz range, with a main pick between 1 and 6.5 Hz. At Cotopaxi, where VTs occur roughly in a half cylinder surrounding a column in which LPs occur, it has been proposed that the occurrence of LP increases stress on the surrounding zone thus provoking brittle failure associated with VT activity, traducing a large magma conduit, i.e. a low fractured medium [21]. To the contrary, the Cayambe HEs high-frequency contents reflect a highly fractured medium and hence a diffuse repartition traducing strong thermal and structural heterogeneities of magma conduits, in agreement with the presence of volcanic domes, and not a unique magmatic conduit. In this framework, the Cayambe VTs could therefore be interpreted as ‘aborted’ HEs, which cannot induce fluid resonance because

there are no fluid-filled cavities in the zone where they occur, due to the cool-off of this part of the volcano.

4. Conclusion

We propose that the high level of continuous HE activity observed beneath the Cayambe volcano is due to interaction between magmatic heat and an underground water system fed by thaw water from the summital glacier that produces VTs, which are triggering simultaneous LP fluid resonance in the adjacent highly fractured medium. Pure VTs are the result of the same process in the oldest part of the volcano where cool-off impairs the production of low-frequency signals. Finally, contrary to LP swarms observed beneath other volcanoes, the high-level and steady Cayambe HE activity, as the Cotopaxi LP activity, is not a precursory activity of an impending eruption.

Acknowledgements

We thank the technical staff from the ‘Instituto Geofísico’ of the ‘Escuela Politécnica Nacional’ of Quito and from IRD for their valuable work during the field operations. We thank the two anonymous reviewers who accepted to spend time for constructive criticisms. This study has been supported by the ‘Institut de recherche pour le développement’ (IRD, Paris, France). Save public research.

References

- [1] B.A. Chouet, Ground motion in the near field of a fluid-driven crack and its interpretation in the study of shallow volcanic tremor, *J. Geophys. Res.* 86 (1981) 5985–6016.
- [2] B.A. Chouet, Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor, *J. Geophys. Res.* 93 (1988) 4375–4400.
- [3] B.A. Chouet, A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in: P. Gasparini, R. Scarpa, K. Aki (Eds.), *Volcanic Seismology*, IAVCEI Proc. Volcanol., Springer-Verlag, Berlin, 1992, pp. 3133–3156.
- [4] B.A. Chouet, Long-period volcano seismicity: Its source and use in eruption forecasting, *Nature* 380 (1996) 309–316.
- [5] B.A. Chouet, R. Page, C. Stephens, J. Lahr, J. Power, Precursory swarm of long-period events at Redoubt Volcano (1989–1990), Alaska: their origin and use as a forecasting tool, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62 (1994) 95–136.
- [6] C.H. Cramer, S.R. McNutt, Spectral analysis of earthquakes in the 1989 Mammoth Mountain swarm near Long Valley, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87 (1997) 1454–1462.
- [7] F. Ego, M. Sébrier, H. Yepes, Is Cauca-Patia and Romeral fault system left or right-lateral?, *Geophys. Res. Lett.* 22 (1) (1995) 33–36.
- [8] J. Fréchet, F. Thouvenot, SISMALP Library: Seismic Data Acquisition and Processing, in: *Applications of Personal Computers*

- in Seismology, XXII ESC Gen. Ass., Geol. Survey of Catalunya, Barcelona, Spain, 1990, pp. 35–38.
- [9] F. Gil-Cruz, B.A. Chouet, Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 77 (1997) 121–158.
- [10] F. Gil-Cruz, H.J. Meyer, B.A. Chouet, D. Harlow, Observations of long-period events and tremor at Nevado del Ruiz Volcano 1985–1986, in: *Hawaii Symposium on How Volcanoes Work, Diamond Jubilee (1912–1987) Hawaiian Volcano Observatory, Hilo, Hawaii*, 1987, p. 90.
- [11] D.P. Hill, et al., The 1989 earthquake swarm beneath Mammoth Mountain, California: an initial look at the 4 May through 30 September activity, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80 (1990) 325–339.
- [12] R.Y. Koyanagi, B.A. Chouet, K. Aki, Origin of volcanic tremor in Hawaii, Part I: Data from the Hawaiian Volcano Observatory, 1969–1985, *U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.* 1350 (2) (1987) 1221–1258.
- [13] J. Lahr, B.A. Chouet, C. Stephens, J. Power, R. Page, Earthquake classification, location and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62 (1994) 137–151.
- [14] S.D. Malone, C. Boyco, C.S. Weaver, Seismic precursors to the Mount St. Helens eruptions in 1981 and 1982, *Science* 221 (1983) 1376–1378.
- [15] B. Martinelli, Analysis of seismic patterns observed at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia during August–September 1985, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 41 (1990) 297–314.
- [16] S.R. McNutt, Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions and volcanic tremor at Pavlof Volcano, Alaska, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76 (1986) 153–175.
- [17] M. Monzier, P. Samaniego, C. Robin, Le volcan Cayambe (Équateur) : Son activité au cours des 5000 dernières années et les menaces qui en résultent, *Bull. Inst. Fr. Ét. Andines* 25 (1996) 389–397.
- [18] A.M. Pitt, D.P. Hill, Long-period earthquakes in the Long Valley caldera region, eastern California, *Geophys. Res. Lett.* 21 (1994) 1679–1682.
- [19] J.A. Power, J.C. Lahr, R.A. Page, B.A. Chouet, C.D. Stephens, D.H. Harlow, T.L. Murray, J.N. Davies, Seismic evolution of the 1989–90 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 62 (1994) 69–94.
- [20] J.A. Power, A.D. Jolly, J.C. Nye, M.L. Harbin, A conceptual model of the Mount Spurr magmatic system from seismic and geochemical observations of the 1992 Crater Peak eruption sequence, *Bull. Volcanol.* 64 (2002) 206–218.
- [21] M. Ruiz, B. Guillier, J.-L. Chatelain, H. Yepes, M.L. Hall, P. Ramon, Possible causes for the seismic activity observed in Cotopaxi volcano, Ecuador, *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998) 2305–2308.
- [22] P. Samaniego, M. Monzier, C. Robin, M.L. Hall, Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador, *Bull. Volcanol.* 59 (1998) 451–459.
- [23] P. Samaniego, H. Martin, C. Robin, M. Monzier, J. Cotten, Temporal evolution of magmatism at Northern Volcanic Zone of the Andes: the geology and petrology of Cayambe volcanic complex (Ecuador), *J. Petrol.* 46 (11) (2005) 2225–2252.
- [24] R. Scandone, S.D. Malone, Magma supply, magma discharge and readjustment of the feeding system of Mount St. Helens during 1980, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 23 (1985) 239–262.
- [25] S.A. Sipkin, R.E. Needham, Moment-tensor solutions estimated using optical filter theory: global seismicity, 1984–1987, *Phys. Earth Planet. Inter.* 57 (1989) 233–259.