

Le volcan Mojanda (Equateur) : deux appareils contemporains aux dynamismes éruptifs, développements et caractères géochimiques différents

Claude Robin, Michel Monzier, Minard Hall et Jean-Philippe Eissen

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a,
p. 1111 à 1118,
1995

Résumé Deux centres volcaniques majeurs (Mojanda et Fuya Fuya) constituent ce qui était considéré comme le Volcan Mojanda. Après la construction de volcans de base essentiellement laviques, les développements et dynamismes éruptifs de ces deux appareils contemporains diffèrent. Au Mojanda, un nouveau cône est formé par des coulées et des tephra basiques. Au Fuya-Fuya, l'activité est constamment en relation avec un magmatisme acide : deux cycles commençant chacun par une éruption plinienne cataclysmale rhyolitique et se poursuivant par une activité de dômes y sont remarquables. Ils sont suivis par un gigantesque événement de type St Helens, dont la caldera d'avalanche est ensuite occupée par un dernier complexe de dômes, encore actif à l'Holocène. Ces deux types de développement sont en relation avec deux lignées magmatiques aux signatures géochimiques différentes.

Mots-clés : Volcanisme, Equateur, Dynamismes éruptifs, Éruptions pliniennes, Phréatomagmatisme, Lignées magmatiques.

C.R. et M.M. : Mission ORSTOM, UR 14;
Apartado 17-11-6596,
Quito, Equateur;
E-mail : robin@orstom.ecx.ec
monzier@orstom.ec x.ec

C.R., M.M. et M.H. :
Instituto Geofísico, EPN,
Apartado 17-01-2759,
Quito, Equateur;

J.-P.E. : ORSTOM, UR 14, BP n° 70,
29280 Plouzané Cedex, France.
E-mail : eissen@orstom.fr

Abstract **Mojanda Volcano (Ecuador) : two contemporaneous volcanoes with distinct eruptive dynamics, development and geochemical characteristics**

Two major closely associated volcanic centres (Mojanda and Fuya Fuya) comprise what was previously considered as Mojanda volcano. After the building of two basal edifices, these centres developed different histories and eruptive styles. At Mojanda, following a caldera collapse stage, a new cone, consisting mainly of basic andesitic tephra grew over the remnants of Mojanda I. At Fuya Fuya, explosive activity related to siliceous magmas was dominant. Two eruptive cycles began with cataclysmal rhyolitic Plinian eruptions and ended with dacitic dome formation. A voluminous sector collapse followed whose avalanche caldera then became occupied by the last dome complex, still active during the Holocene. The distinct types of development shown by Mojanda and Fuya Fuya volcanoes are related to two geochemically different magmatic suites.

Keywords: Volcanism, Ecuador, Eruptive dynamics, Plinian eruptions, Phreatomagmatism, Magmatic suites.

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: Bx 13608 Ex : 1

**Abridged
English
Version**

INTRODUCTION

LITTLE information (Sauer, 1971; Hall, 1977) is available about Volcan Mojanda, located 50 km Northeast of Quito (fig. 1). It was previously thought to be a

single volcano, truncated by a small summit caldera. Recent fieldwork ⁽¹⁾ shows that this edifice consists of two major contemporaneous volcanoes, Mojanda s.s. and Fuya Fuya, that have had distinctive histories and show different eruptive styles.

Note

présentée par
Jean Aubouin.

remise le 29 mars 1995,
acceptée après révision
le 25 septembre 1995.



STRUCTURE AND MORPHOLOGY

The volcanic complex is 26 km in diameter and rises to a maximum elevation of 4,263 m from its base at 3,000 m to the east, 2,700 m to the north, 2,400 m to the south and 2,200 m to the west (fig. 2). The steep interior walls of the summit caldera, now occupied by the Laguna Grande de Mojanda (LGM, fig. 2), form a crest line with peaks between 3,900 and 4,260 m elevation along its north, east and south sides. Westwards, the caldera wall is breached and in its place is a complex of dacitic lavas and domes, the highest of which is Fuya Fuya Peak (4,263 m). While the older domes appear to be glaciated, the youngest domes, Cerros Panecillo and Colangal, have kept their original dome morphology, suggesting that the dome complex was still active until the Early Holocene.

COMPARISON OF DEVELOPMENTS AND ERUPTIVE DYNAMICS

Mojanda I and Fuya Fuya I : two distinct effusive basal volcanoes

Thick sequences of andesitic and siliceous andesitic lava-flows and breccias (56-63% SiO₂) comprise the lower part of the volcanic complex. The projected orientation and convergence of the basal lava flows suggest the existence of two volcanic centres, located only 4 km apart. Here, the name Mojanda is restricted to the eastern centre, whereas the western edifice is called Fuya Fuya. Due to a large subsequent sector collapse which affected Fuya Fuya volcano, the remnants of Fuya Fuya I are poorly preserved. Around the summit of Mojanda, the truncation of the lava flows from the basal edifice between 3,800 and 4,000 m suggests the former presence of a caldera, 5 km in diameter (fig. 2). The eruption of a 20-30 m thick sequence of dacitic pumice flows and ashfall deposits (SiO₂=65%), which covers the north flank of the complex, is related to this caldera whose collapse terminates the basal stage of activity. Northwestwards, Cushnirumi Peak and other hills represent the remnants of a third, older volcano, greatly destroyed by an avalanche and dissected by erosion.

Mojanda II : a basic andesite cone with dominant phreatomagmatic dynamics

A new stratocone was subsequently built over the remnants of Mojanda I. Mojanda II consists of mafic andesitic lava flows (55-56% SiO₂) and basaltic andesitic to andesitic tephra, the latter having an average thickness of about 400 m. Quenched vitric clasts are abundant in the tephra series. Scoria pyroclastic flow deposits (56-58% SiO₂) found on the SE flank also suggest eruptive episodes in an open-conduit regime and dense blocks in these deposits imply the emplacement and destruction of andesitic domes in the summit area. A 30 m thick sequence of Plinian and phreato-Plinian deposits (ash and lapilli beds of basaltic andesite and andesite), well represented in the Jerusalem stratigraphic section (fig. 3), represents the last activity of Mojanda II. Its eruption is responsible for the formation of the small summit caldera (LGM, fig. 2).

Fuya Fuya II : a long period of explosive acid volcanism

This stage began with the extrusion of a series of viscous lava flows and domes emplaced in Fuya Fuya's centre. On the outer southern slopes, a 63 m thick sequence of block and ash flow deposits, block-rich lahars and Plinian tephra (ashfall and pumice beds), appears to be constantly related to acid magmatism (fig. 3). Fragments of fractured domes, often collapsed "en masse", are found in the subsequent avalanche deposit of Fuya Fuya II, confirming that domes existed in the summit area. Seven phases of dome activity occurred (D1 to D7, fig. 3), in the course of two long magmatic and volcanic cycles whose differentiated products attained rhyolitic compositions (70-71% SiO₂). Especially important are the large volumes of pumice erupted during two cataclysmal Plinian eruptions, at the beginning of each cycle (R1 and R2 beds, fig. 3). A large Mount St Helens collapse event was responsible for the loss of the western parts of both Fuya Fuya II and Mojanda II cones, thus ending the history of Fuya Fuya II (see the avalanche caldera, fig. 2).

Fuya Fuya III : post-avalanche domes

A new complex consisting of viscous lava flows and domes built up in the avalanche cal-

dera carved into Fuya Fuya II. Its eruptive activity is mainly represented by pyroclastic deposits directed to the west by the drainage and prevailing winds. Unglaciated Colangal and Panecillo domes are the last extrusions of this complex.

DISCUSSION : PROBLEMS RAISED BY THE EXISTENCE OF TWO DISTINCT GEOCHEMICAL SERIES

Despite their proximity and contemporaneous formation, both volcanic centres have a distinct geochemistry. The most primitive magmas from both centres are distinctive, based upon major and trace element chemistry. Those from Mojanda have higher TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , P_2O_5 and lower SiO_2 , Na_2O and K_2O contents than those from Fuya Fuya (fig. 4). The two differentiation

suites emphasize these differences even though both plot within the Medium-K field defined by Gill (1981).

Nevertheless, some arguments suggest that both volcanoes are related in their development, as well as magmatic evolution. For example, the older rhyolitic Plinian episode in Fuya Fuya (R1 bed, fig. 3), which is contemporaneous with the andesitic phase of Mojanda II, contains both juvenile andesitic and rhyolitic magmas. The construction of Mojanda II corresponds to a period of intrusion of mantle-derived mafic magma that apparently co-existed with the more siliceous body under the Fuya Fuya centre, and probably had a bearing upon Fuya Fuya's activity, development and sector collapse. This will constitute the working hypothesis for the geochemical study still in progress.

INTRODUCTION

Situé à 50 km au NE de Quito, le Mojanda ($00^{\circ}08'N$; $78^{\circ}16'W$; fig. 1) est l'un des plus volumineux volcans d'Equateur. Seules quelques informations très générales (Sauer, 1971; Hall, 1977) ont été publiées sur cet appareil, jusqu'à présent considéré comme un volcan composite, tronqué vers 4 000 m par une petite caldera (caldera de la Laguna Grande de Mojanda: LGM sur la figure 2). De récentes recherches de terrain ⁽¹⁾ montrent qu'il s'agit en fait d'un complexe constitué par deux centres volcaniques, dont les développements contemporains divergent après l'édification de deux volcans de base. Bien que ces deux centres soient très proches l'un de l'autre, leurs lignées géochimiques ont des caractéristiques différentes. Cet article expose les grandes lignes de l'évolution du complexe et présente les deux suites magmatiques, en soulevant quelques questions relatives aux données géochimiques.

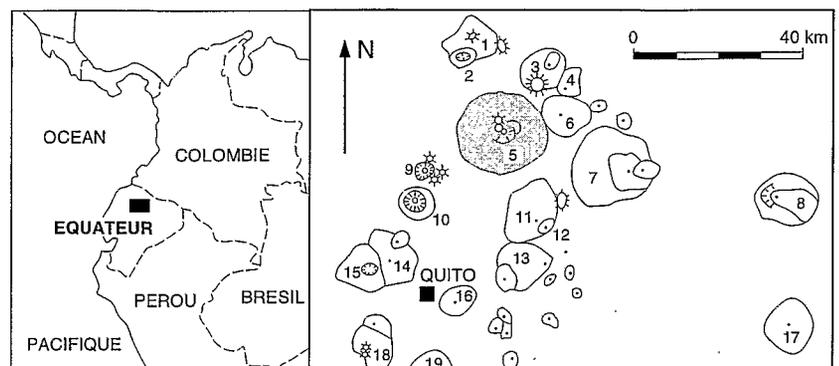
STRUCTURE ET MORPHOLOGIE : EXISTENCE DE DEUX CENTRES ÉRUPTIFS

La base du complexe du Mojanda se situe vers 3 000 m à l'Est, 2 700 m au Nord,

2 400 m au Sud et 2 200 m à l'Ouest. La partie supérieure, accidentée, présente de nombreux sommets et une caldera de 2,2 km (N-S) sur 2,8 km (E-W) occupée par un lac, la Laguna Grande de Mojanda (alt. 3 720 m; fig. 2). Au Nord, à l'Est et au Sud, les parois de cette caldera sont abruptes et les reliefs qui la bordent constituent une demi-couronne de crêtes et de pics culminant entre 3 900 et 4 260 m. Vers l'intérieur et vers l'extérieur, la morphologie de ces reliefs atteste une érosion glaciaire assez prononcée. A l'Ouest du lac, la

Fig. 1 Localisation du complexe volcanique Mojanda dans le Nord de l'Equateur.

Location of the Mojanda volcanic complex in northern Ecuador.



- | | | | | |
|--------------|---------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1. COTAGACHI | 5. MOJANDA | 9. PULULAGUA | 13. PUNTAS | 17. PAN DE AZUCAR |
| 2. CUICOCHA | 6. CUSIN | 10. CASITAGUA | 14. RUGU PICHINCHA | 18. ATACAZO |
| 3. IMBABURA | 7. CAYAMBE | 11. PAMBA MARCA | 15. GUAGUA PICHINCHA | 19. PASOCHOA |
| 4. CUBILCHE | 8. REVENTADOR | 12. IZAMBI | 16. ILALO | |

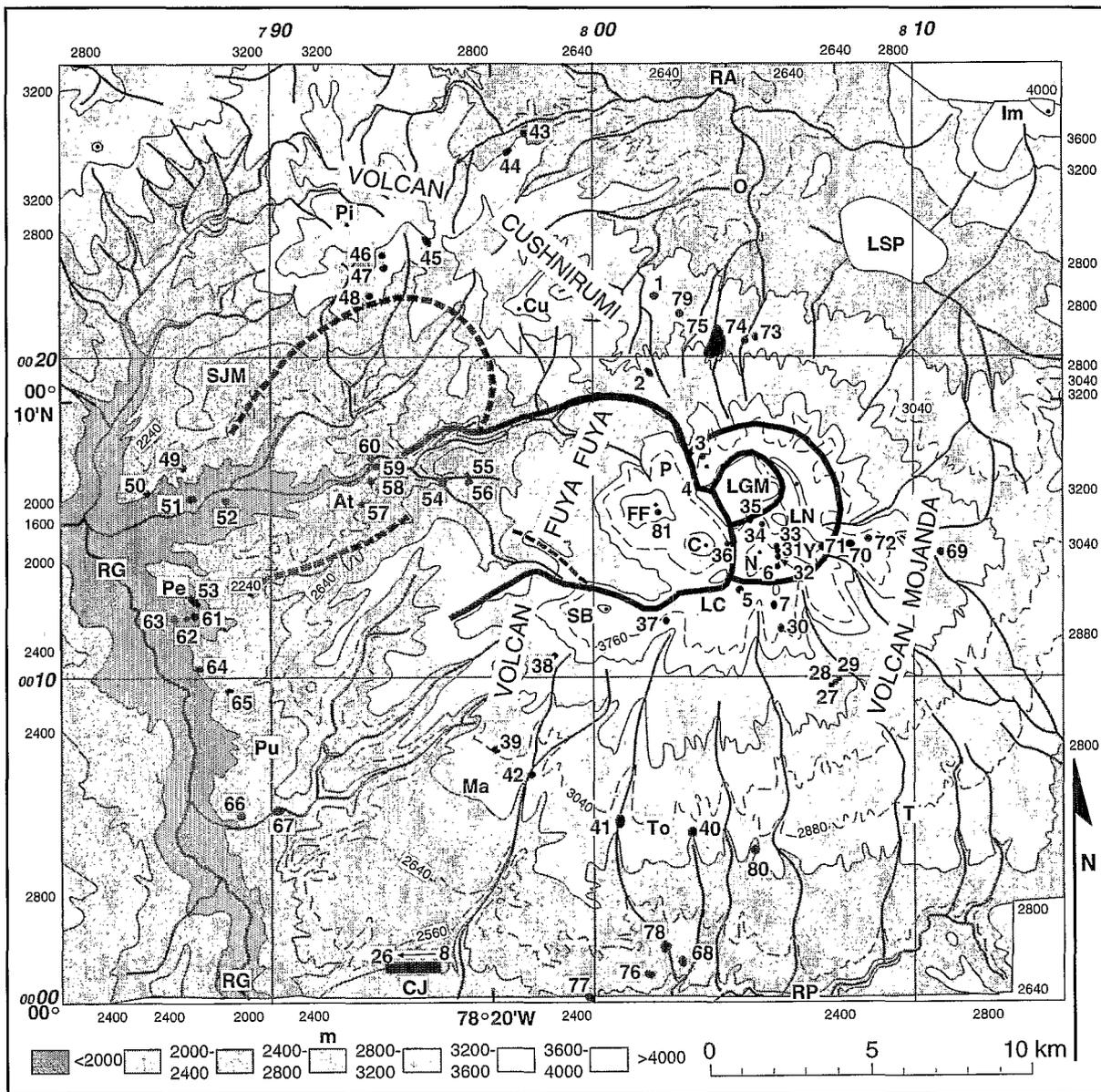


Fig. 2 Légende page suivante.

Caption on following page.

limite de la caldera se perd, laissant la place à un vaste complexe de dômes et dômes-coulées, culminant à 4 263 m au Cerro Fuya Fuya. Contrairement aux extrusions les plus anciennes de ce complexe, présentant de nombreuses formes d'érosion glaciaire, les Cerros Panecillo et Colangal (fig. 2) ont conservé leur morphologie originelle de dôme, ce qui suppose une activité postérieure à la dernière glaciation.

La disposition, les pendages et les convergences vers deux points d'émission des cou-

lées constituant le soubassement, s'accordent avec l'existence de deux volcans de base, essentiellement effusifs, et un faible allongement du massif suivant une direction E-W. Ci-dessous, l'usage du nom Mojanda est restreint au volcan situé le plus à l'Est, et nous nommons Fuya Fuya celui de l'Ouest (fig. 2). A 10 km au NW de la Laguna Mojanda, la crête du Cushnirumi (3 776 m) est la relique d'un troisième volcan, plus ancien (du Quaternaire inférieur ?) démantelé par une caldera d'avalanche et l'érosion.

La dépression formée par cette avalanche a facilité l'écroulement vers l'Ouest du Fuya Fuya au cours d'un gigantesque événement de type Mont Saint Helens.

Dès la formation des volcans de base, les deux centres volcaniques ont occupé leur position actuelle, à seulement 4 km de distance l'un de l'autre. Le Cushnirumi, le Fuya Fuya et le Mojanda s'alignent avec le Cayambe et le Reventador (fig. 1).

COMPARAISON DES DÉVELOPPEMENTS ET DES DYNAMISMES ÉRUPTIFS

Mojanda I et Fuya-Fuya I : deux volcans de base effusifs distincts

Ces deux volcans de base sont constitués par d'épaisses coulées d'andésites, d'andésites acides (56 à 63% de SiO₂) et de brèches.

Leur construction s'est probablement poursuivie sur plusieurs centaines de milliers d'années. Le Fuya Fuya I ayant été en grande partie détruit par un écroulement sectoriel (cf. ci-dessous), il est peu visible au premier abord sur le terrain. A l'Est de la caldera LGM, un ensemble de sommets arrondis entre 3 800 et 4 000 m d'altitude, disposés en demi-cercle, marque l'intersection des coulées de base du Mojanda I et des planèzes qu'elles forment. Ces reliefs suggèrent l'existence d'une caldera ancienne dont le rebord aurait été amplement érodé. D'après la position de cette limite et les pendages des coulées, cette caldera se rattache plutôt au volcan Mojanda I qu'au Fuya Fuya I. Si une structure identique a existé pour ce dernier, aucune trace n'en subsiste, vu l'ampleur de la caldera d'avalanche qui l'a en majeure partie démantelé (fig. 2). D'épaisses coulées de

Fig. 2 Schéma morpho-structural du complexe volcanique Mojanda; les limites des calderas apparaissent en gras. Hydrographie / hydrography: LGM = Laguna Grande de Mojanda; LC = Laguna Chica; LN = Laguna Negra; LSP = Laguna de San Pablo; RG = Rio Guayllabamba; RP = Rio Pisque; RA = Rio Ambi. Villes et villages / towns and villages: O = Otavalo; SJM = San Jose de Minas; At = Atahualpa; Pe = Perucho; Pu = Puellarro; Ma = Malchingui; To = Tocachi; T = Tabacundo. Principaux sommets / main summits: FF = dôme du Fuya Fuya; C = dôme du Colangai; P = dôme du Panecillo; SB = San Bartolo; N = Cerro Negro; Y = Yanaurcu; Cu = Cerro Cushnirumi; Pi = Cerro Piruto; Im = volcan Imbabura. CJ = coupe de Jerusalem / Jerusalem stratigraphic section (fig. 3).

Morphostructural sketch map of the Mojanda volcanic complex; heavy lines correspond to caldera rims.

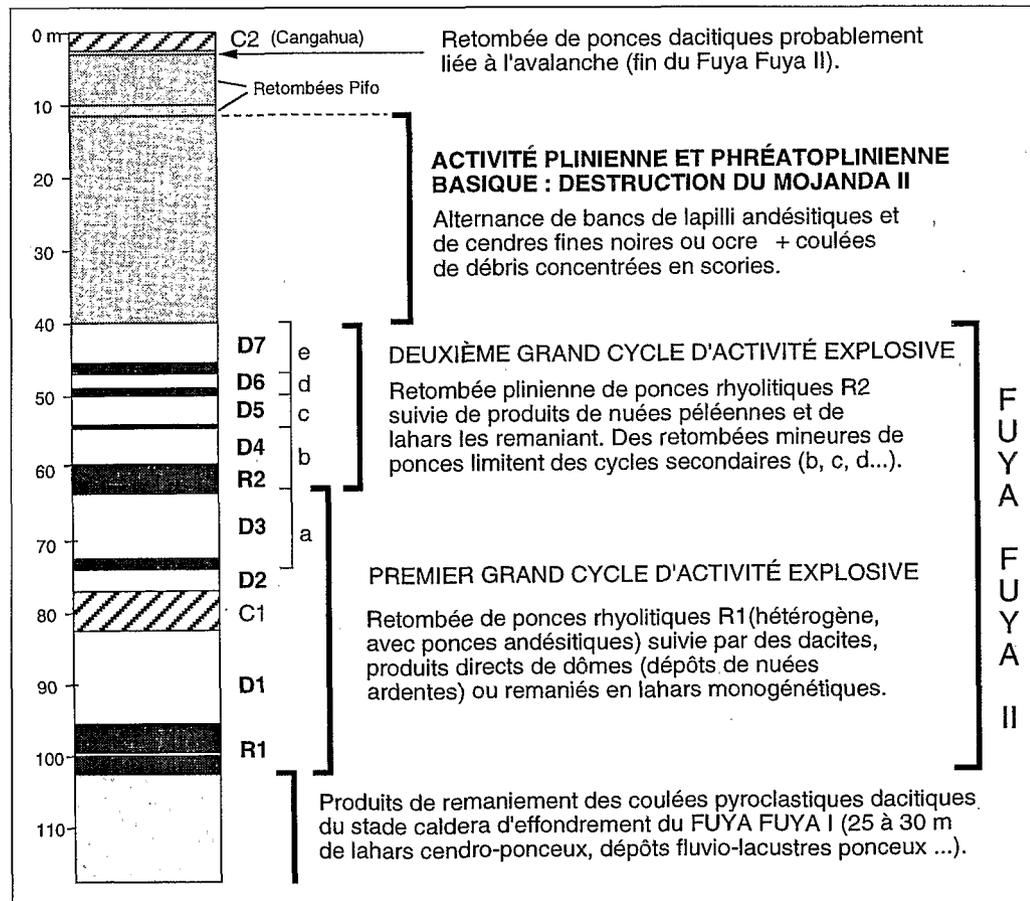


Fig. 3 Coupe de Jerusalem. Jerusalem stratigraphic section.

ponces et de retombées dacitiques (20 à 30 m) nappent le versant nord en direction d'Otavales et certaines pentes du flanc NE du complexe. Ces ponces sont très probablement associées à la structure calderique qui correspond au stade terminal du volcan Mojanda I, et de façon plus hypothétique à la fin d'activité du volcan de base Fuya Fuya I. L'âge de ces pyroclastites est relativement ancien en accord avec le résultat de l'analyse d'un bois carbonisé prélevé dans les coulées de ponces (> 35 000 ans) et leur position sous d'épaisses formations cendreuses localement nommées Cangahua.

Mojanda II : un cône d'andésites basiques à dynamismes phréatomagmatiques dominants

Le nouvel appareil construit sur les restes du Mojanda I est, au début de son existence, un strato-cône à coulées d'andésites basiques (55-56% SiO₂, à phénocristaux de diopside). Sur le versant SE, une séquence de coulées pyroclastiques à scories et bombes andésitiques (SiO₂ = 56-58%) montre que cette phase de construction a compris des épisodes explosifs à cheminée ouverte. Des blocs juvéniles denses dans ces dépôts indiquent aussi la présence épisodique de dômes andésitiques dans la région sommitale. Toutefois, les principaux reliefs entourant la lagune étant constitués de brèches d'andésites basiques riches en débris vitreux (Formation du Cerro Negro : 400 m d'épaisseur moyenne), les dynamismes du Mojanda II apparaissent dans l'ensemble conditionnés par des interactions entre eau/glace et magmas basiques. Le développement de ce cône se termine par une série d'éruptions pliniennes et phréatopliniennes andésitiques, responsables du dépôt, à 15 km au SE, d'une séquence pyroclastique de 30 m d'épaisseur. Celle-ci est constituée par des alternances de lits de lapilli et de cendres, de bancs massifs de cendres très fines et de coulées de débris riches en scories (fig. 3). Nous associons la formation de la caldera LGM à cette série d'éruptions. Le fond et les bords de cette caldera sont parcourus par des dykes d'andésite basique, de direction NNW-SSE.

Le Fuya-Fuya II : volcanisme acide fortement explosif

La construction du Fuya Fuya II débute avec des coulées de faible extension et des dômes occupant la région sommitale. Sept phases d'activité de dômes peuvent être observées dans une épaisse séquence (63 m) de dépôts de coulées pyroclastiques à blocs homogènes et de lahars remaniant ces coulées, au SE du Cerro San Bartolo (D1 à D7, coupe de Jerusalem; fig. 3). La présence de nombreux dômes, parfois glissés en masse, et de panneaux essentiellement constitués de dacites porphyriques ou vitreuses dans les dépôts d'avalanche est aussi révélatrice de la grande quantité de dômes ayant existé dans la zone sommitale du Fuya Fuya II avant sa destruction par un événement de type Mont St Helens. Pendant cette période, par deux fois, un temps de repos a été suffisamment important pour permettre la différenciation des magmas jusqu'aux rhyolites (70-71% SiO₂) et l'émission d'un fort volume de ponces, au cours de deux éruptions pliniennes cataclysmales (épisodes R1 et R2, fig. 3). Ces éruptions, probablement liées à l'ouverture de calderas secondaires, débute deux cycles d'activité explosive, qui se poursuivent par la mise en place et l'activité de nouveaux dômes dacitiques : phases D1 à D3 et D4 à D7, suivant R1 et R2, respectivement. Des épisodes pliniens de volumes moins importants s'intercalent dans cette séquence (fig. 3).

L'histoire du Fuya-Fuya II s'achève avec l'événement de type St Helens responsable de l'écroulement du secteur ouest du volcan et de l'effondrement total du complexe sommital de dômes. Cette avalanche emporte avec elle la partie ouest des brèches et coulées d'andésites basiques appartenant au Mojanda II. La limite de la caldera d'avalanche relative à cet événement (fig. 2) est encore bien visible dans la topographie.

Le Fuya-Fuya III : dômes post-avalanche

Le complexe de coulées visqueuses et de dômes de dacites et rhyolites occupant

actuellement la caldera d'avalanche s'est installé au cours des dernières dizaines de milliers d'années. Son activité est principalement représentée par des produits de dômes dirigés vers l'Ouest par la caldera, et emboîtés dans les dépôts érodés de l'avalanche. Les dômes Colangal et Panecillo, exempts d'érosion glaciaire, sont les deux derniers représentants du Fuya-Fuya III.

DISCUSSION : PROBLÈMES SOULEVÉS PAR L'EXISTENCE DE DEUX LIGNÉES GÉOCHIMIQUES

Le Mojanda est donc un complexe volcanique formé par deux appareils contemporains : 1. Le volcan Mojanda s.s. : son centre se situe à l'aplomb de la Laguna Grande de Mojanda et son évolution comprend deux cônes successifs dont l'histoire se termine à chaque fois par la formation d'une caldera. Le plus récent de ces cônes est caractérisé

par un volcanisme basique et des produits d'origine phréatomagmatique. 2. Le centre du deuxième volcan, le Fuya Fuya, se situe à environ 4 km à l'Ouest du premier. L'activité de cet appareil a été dominée par des dynamismes explosifs en relation avec un magmatisme constamment acide. Le Fuya Fuya a été en grande partie emporté par une avalanche, dont la caldera est actuellement occupée par un dernier complexe de dômes. La présence, dans l'avalanche, de produits proximaux du Mojanda II et des retombées liées à la formation de sa caldera sommitale (caldera LGM) permet d'affirmer sans ambiguïté que l'écroulement du Fuya Fuya II s'est produit après la formation de cette caldera, ce qui s'accorde avec la stratigraphie globale révélée par la coupe de Jerusalem. Un troisième appareil plus ancien, le Cushnirumi, se situe au NW du complexe. Ce volcan a lui aussi été affecté par une avalanche qui a détruit son versant sud, la dépression ainsi formée ayant favorisé le départ vers l'Ouest

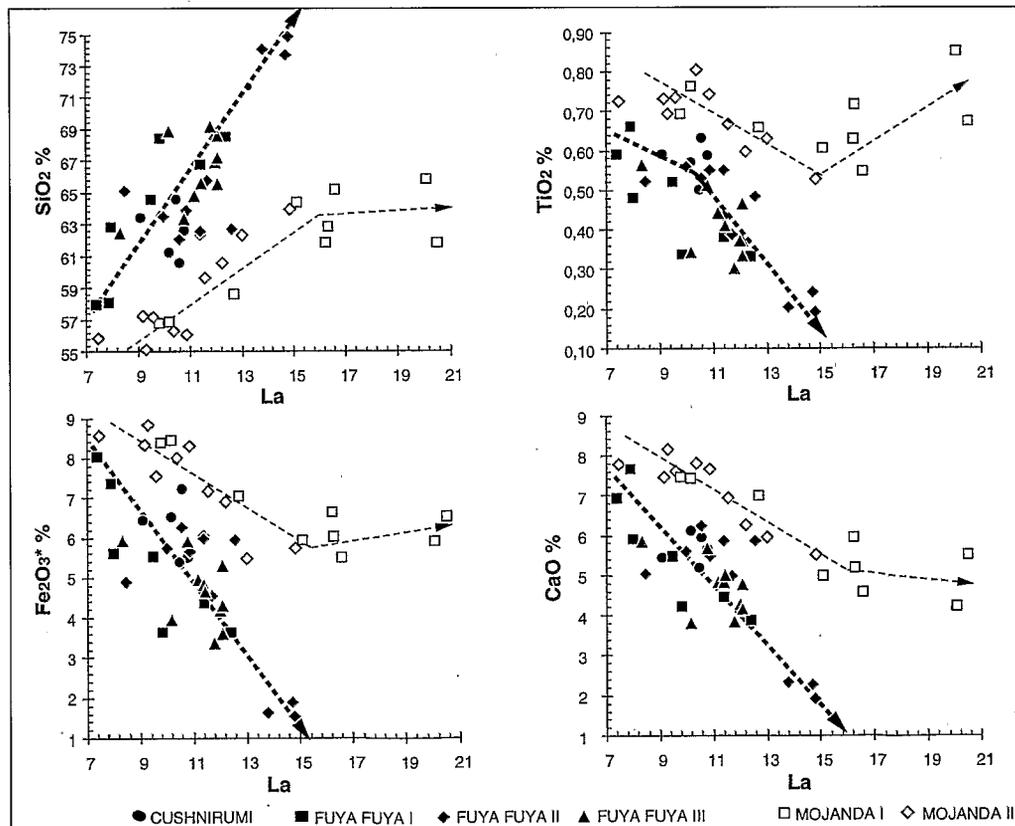


Fig. 4 Diagrammes SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3^* et CaO (poids %) en fonction de La (ppm). Analyses recalculées en base anhydre et normalisées à 100% (analyses roche totale faites à l'UBO à Brest par ICP-AES, analyste Jo Cotten).

SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3^* et CaO (weight %) vs La (ppm) diagrams. Analyses recalculated on an anhydrous basis and normalized to 100%.

de l'avalanche beaucoup plus récente du Fuya Fuya II.

53 analyses ont été réalisées sur l'ensemble du complexe Mojanda-Fuya Fuya. Cette étude géochimique en cours fera l'objet d'un article ultérieur, notre propos se limitant ici à montrer les différences géochimiques existant entre les deux volcans, bien qu'ils soient contemporains et très proches l'un de l'autre. En l'absence de contamination crustale, montrée par des spectres de terres rares cohérents entre les échantillons d'une même lignée, le lanthane est utilisé comme indice de différenciation (fig. 4). Les compositions (éléments majeurs et traces) des magmas les plus primitifs des deux centres sont légèrement, mais distinctement, différentes. Les magmas les plus basiques du Mojanda ont des teneurs en TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , P_2O_5 supérieures et des teneurs en SiO_2 , Na_2O , K_2O inférieures à celles des magmas les moins différenciés du Fuya Fuya. La différenciation magmatique accentue ces écarts, bien que les deux lignées restent dans les limites du champ moyennement potassique défini par Gill (1981).

Malgré les différences existant sur les plans des dynamismes éruptifs et de la géochimie, les évolutions relatives aux deux appareils semblent liées. La construction du Mojanda II correspond à une période de réalimentation du réservoir sous ce volcan

par du magma profond, révélée par une nouvelle série d'andésites basiques, des mélanges magmatiques dans les coulées pyroclastiques à scories et les filons basiques recoupant le cône. Cette évolution n'est probablement pas restée sans conséquences sur le développement du Fuya Fuya, connecté pour sa part à un réservoir de magmas différenciés. Trois observations viennent conforter cette hypothèse : 1. Dès le début de la période Fuya Fuya II, les ponces de l'épisode R1 (fig. 3) exposent deux magmas juvéniles, andésitique (61% SiO_2) et rhyolitique (70-71% SiO_2); 2. L'événement de type St Helens qui termine l'histoire du Fuya Fuya II intervient peu de temps après la série d'éruptions phréatomagmatiques andésitiques du Mojanda II. La déstabilisation du Fuya Fuya II pourrait donc être liée à l'éruption cataclysmale responsable de la formation de la caldera LGM du Mojanda, d'autant que 3 des magmas hétérogènes (64-69% SiO_2) ont été reconnus dans des coulées pyroclastiques du Fuya Fuya III. Dans ce cas, la réactivation du Fuya Fuya lors de l'épisode R1 et sa déstabilisation ultérieure seraient directement liées à la phase de réalimentation du Mojanda, une partie du magma profond atteignant à deux reprises aux moins le réservoir du Fuya Fuya. Ces données constituent une hypothèse de travail pour l'étude géochimique en cours.

(¹) Convention spécifique de coopération technique et scientifique entre l'ORSTOM (UR 14, Programme Volcanologie et Risques Volcaniques) et la Escuela Politécnica Nacional de Quito (Instituto Geofísico de l'EPN).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GILL, J. B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg New York, 390 p.
HALL, M.L., 1977. *Publ. del IPGH*, Seccion Nacional del Ecuador, 119 p.

- SAUER, W., 1971. *Geologie von Ecuador*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 316 p.