

# Les laves calco-alkalines et à caractère adakitique du volcan Antisana (Équateur) : hypothèse pétrogénétique

*Adakitic and calc-alkaline lavas of Antisana volcano (Ecuador): petrogenetic hypothesis*

Erwan Bourdon<sup>a</sup>, Jean-Philippe Eissen<sup>b\*</sup>, Joseph Cotten<sup>c</sup>, Michel Monzier<sup>d</sup>, Claude Robin<sup>d</sup>, Minard L. Hall<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Université de Bretagne occidentale et centre IRD de Bretagne, BP 70, 29280 Plouzané cedex, France

<sup>b</sup> IRD, centre de Bretagne, BP 70, 29280 Plouzané cedex, France

<sup>c</sup> Département des sciences de la Terre, UMR-CNRS 6538, université de Bretagne occidentale, BP 809, 29285 Brest cedex, France

<sup>d</sup> IRD, Apartado postal 17-11-6596, Quito, Équateur

<sup>e</sup> Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Apartado postal 17-01-2759, Quito, Équateur

(Reçu le 24 juin 1998, accepté après révision le 8 février 1999).

**Abstract** — Volcanic rocks from Antisana volcano (Ecuador) show a clear enrichment in Sr, Nb, Ti and P relative to normal calc-alkaline rocks. Furthermore, some of them show low heavy rare earth and Y concentrations, a feature of typical adakites. However, as the *P-T* conditions for adakite genesis are not appropriate beneath the volcano, we propose that these rocks are derived from the partial melting of an hydrated mantle, previously and heterogeneously metasomatised by adakitic magmas at shallower depth. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

**calc-alkaline lavas / metasomatism / mantle / subduction / Nb / adakite / volcano / Ecuador / Andes**

**Résumé** — L'étude des laves du volcan Antisana (Équateur) révèle la présence de laves calco-alkalines, enrichies en Sr, Nb, Ti et P par rapport à des laves calco-alkalines normales. Certaines laves montrent également un appauvrissement net en terres rares lourdes, typique des adakites. Cependant, les conditions nécessaires à la genèse d'adakites n'étant pas réunies sous l'Antisana, nous proposons que ces roches à caractère adakitique soient issues de la fusion partielle d'un manteau hydraté, préalablement métagénésé de façon hétérogène par des liquides adakitiques issus de la plaque plongeante. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris).

**laves calco-alkalines / métagénésé / manteau / subduction / Nb / adakites / volcan / Équateur / Andes**

## Abridged version

### Introduction

In Ecuador, the subduction of the Nazca plate under the South American margin is responsible for important Plio-

Quaternary volcanic activity. The large, massive and icecapped Antisana stratovolcano (alt. 5 753 m) belongs to this volcanism and is located in the eastern cordillera of Ecuador, 60 km southeast of Quito.

Note présentée par Jean Aubouin.

\* Correspondance et tirés à part.  
eissen@ird.fr



Fonds Documentaire ORSTOM  
Cote : 6\*18088 Ex : 1

Despite possible historic activity (Humboldt, 1807; Hall and Mothes, 1994), this volcano had almost not been studied except for a brief geochemical study (Barragan, 1994). A sampling reconnaissance was undertaken on the flanks of Antisana giving the first representative set of samples of this edifice (*figure 1b*).

## Geology and Petrology

Antisana volcano consists of two structural parts: the southeast two-thirds of the volcano constitute the older one, and the north-west third of the volcano includes the recent cone and several Holocene lava flows. Sampled rocks are massive lava flows, welded ignimbrites, pyroclastic rocks and partially sub-glacial breccias. The two historic andesitic lava flows of Potrerillos and Antisanilla (*figure 1a*) have been included in this study.

Studied rocks encompass Al-rich basic andesites, calcalkaline K-rich and adakite-like lavas (*figure 2a*).

Five Mg-poor andesite (LMG) have been sampled on the southern flank and display high  $Al_2O_3$  ( $> 17\%$ , *figure 2b*),  $TiO_2$  ( $> 0.95\%$ ) and Sr concentrations. But their MgO (2.4–3.6%) and Ni ( $< 22$  ppm, *figure 2c*) concentrations are low for such 'basic' rocks. Seventeen basic to acid, medium to high-K, andesites (AAD) come from the old part of the volcano (*figure 2a*) and have low Y and HREE (*figure 2d*) concentrations with La/Yb and Sr/Y ratios typical of adakites (*figure 3*; Defant and Drummond, 1990). The last group is composed of high-K acid andesites and dacites (CAK) and displays geochemical characteristics intermediate between adakites and normal calc-alkaline rocks (*figure 3*). Historical AAD lava flows of Potrerillos and Antisanilla and Holocene CAK lava flows on Antisana northwest flank suggest a petrogenetic link between both magmatic types.

## Geochemical characteristics

Adakites are intermediate to acid rocks characterized by high  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  and Sr contents and low concentrations in Y and heavy rare earth elements (Defant and Drummond, 1990). They are thought to be generated by direct partial melting of the subducted slab when the latter is young and hot enough (See Maury et al., 1996, for a review).

Spidergrams of Antisana representative rocks are compared to adakites (*figure 4*) from Zamboanga arc, Philippines (Sajona et al., 1996). AAD group shows HREE, Y depletion and Sr content similar to those of adakites, but Antisana lavas are more enriched in incompatible elements. CAK group presents spidergrams slightly enriched relative to AAD, and heavy rare earth elements and Y concentrations more similar to calcalkaline rocks, although they lie in the limit adopted for adakite definition ( $Yb < 1.8$  ppm; *figure 2d*). All Antisana rocks display anomalous enrichments in Nb, P and Ti, pointing out the existence of a Nb-rich source component under this volcano. This is not surprising, knowing the nearby eastward Sumaco alkaline volcano.

## Petrogenetic hypothesis

All Antisana rocks display, to various degrees, an adakitic signature.

The slab summit beneath Antisana volcano is too deep ( $\geq 140$  km) to be in  $P$ - $T$  conditions necessary for adakite genesis (Defant and Drummond, 1990; Peacock et al., 1994). But as Antisana rocks do display adakite characteristics, we propose that they were generated by partial melting of an enriched mantle formerly metasomatized by adakitic liquids in shallower conditions than those proposed in other situations (Kepezinskhas et al., 1996; Sajona et al., 1996). This model would necessitate partial melting of the slab in forearc position. Elevated thermal flux of the Nazca plate allows us to envision slab melting under the northern Andes but not extensively. Adakitic magmas would then be totally consumed in metasomatic processes with the mantle, without being emplaced at the surface, as proposed by Maury et al. (1998) for the North-Luzon Arc.

Partial melting of the mantle is necessary to explain the presence of rocks with low silica contents ( $\leq 54\%$ ) that cannot be derived from the subducting oceanic crust with consistent partial melting degrees.

In the AAD source, heavy rare earth elements and Y concentrations are low because adakite metasomatose diluted them. Moreover, metasomatic garnet presence in the source, due to interaction between silicate liquids and peridotitic mantle (Wyllie and Sekine, 1989), would explain these low concentrations. High concentrations in incompatible elements indicate that hydrous phases are not stable any more and dehydration reactions of these would be responsible for the partial melting at appropriate depth (Tatsumi, 1989). High Sr concentrations show that no mineral retains this element (derived from the slab) in the mantle. Metasomatism by adakitic liquids would also explain the presence of a Nb-enriched source as this element is soluble in silicate liquids (Kesson and Ringwood, 1989), but not in hydrated fluids (Tatsumi, 1989).

LMG group is composed of rocks that resemble the High-Al basalts described elsewhere (Sisson and Groove, 1993). Their extended trace elements diagrams are close to those of some andesites from the AAD group and modelling shows that they could be derived from AAD group by preferential fractional crystallization of 10% of an olivine-pyroxene assemblage.

CAK group displays the more intermediate chemical characteristics between true adakites and normal arc rocks (*figure 3*). But, they are also characterized by a relative enrichment in Nb. These rocks should then be also derived from the melting of a mantle metasomatized by adakitic liquids. One should admit that the metasomatose of the mantle wedge by slab melts should give a very heterogeneous mantle (Bau and Knittel, 1993) whose posterior melting would give magmas with slightly differing geochemical characteristics.

## Conclusion

These first results obtained on the Antisana rocks show a large geochemical diversity and the presence of a Nb-rich component in this subduction environment. Despite the complex processes involved in the magma petrogenesis, it appears that it is not the mere result of dehydration of the subducting plate and that the melting of the slab must be involved in their genesis.

## 1. Introduction

En Équateur (figure 1), la subduction de la plaque Nazca sous la marge sud-américaine donne naissance à un volcanisme plio-quadernaire très important, dont fait partie le volcan Antisana. Ce dernier est situé dans la cordillère orientale d'Équateur, à 60 km au sud-est de Quito (figure 1a). Édifié sur un plateau dont l'altitude varie entre

3 000 à 4 000 m, il s'agit d'un des plus imposants strato-volcans équatoriens, dont le sommet (altitude : 5 753 m) est recouvert d'une calotte glaciaire de 26 km<sup>2</sup>, qui descend jusque vers 4 800 m d'altitude.

Malgré son activité historique probable (Humboldt, 1807 ; Hall et Mothes, 1994) et la proximité de grands ouvrages (oléoduc trans-équatorien ; retenue d'alimentation en eau de Quito en construction), ce volcan n'a

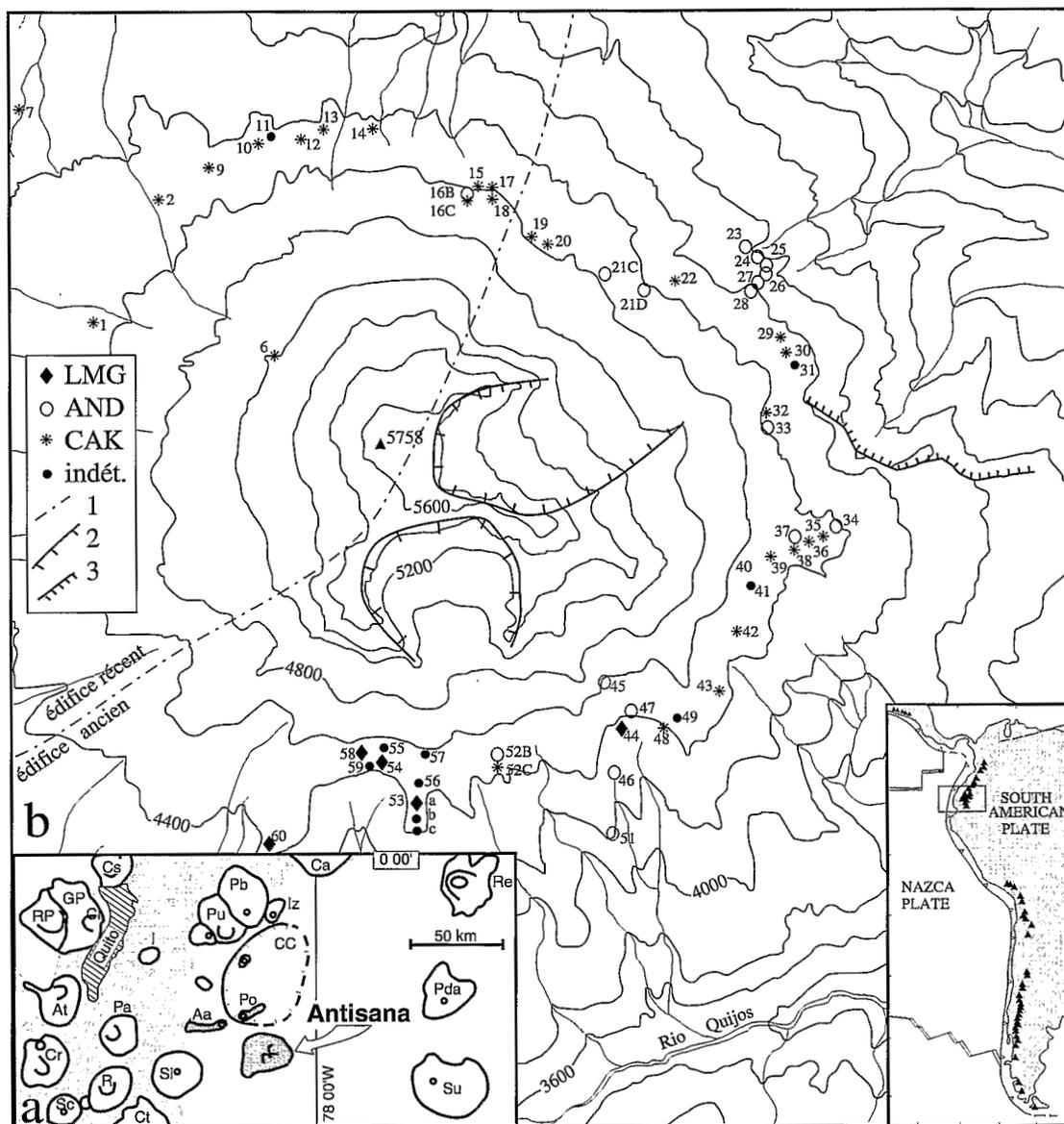


Figure 1. Encart. Localisation de la zone volcanique nord des Andes. a. Localisation du volcan Antisana (Aa = coulée de l'Antisanilla ; At = Atacazo ; Ca = Cayambe ; CC = caldeira de Chacana ; Cr = Corazon ; Ca = Casitagua ; Ct = Cotopaxi ; GP = Guagua Pinchincha ; I = Ilalo ; Iz = Irazu ; Pa = Paschoa ; Pb = Pambamarca ; Pda = Pan de Azucar ; Po = coulée de Potrerillos ; Pu = Pululagua ; Re = Reventador ; RP = Rucu Pinchincha ; Ru = Ruminahui ; SC = Santa Cruz ; Si = Sincholagua ; Su = Sumaco). b. Carte d'échantillonnage ; LMG : andésites pauvres en magnésium ; AAD : groupe des andésites ; CAK : laves calco-alcalines potassiques ; 1 : caldera d'effondrement présentant un surcreusement glaciaire ; 2 : falaise ; 3 : séparation schématisée entre le double édifice ancien à l'ESE et le volcan plus récent au nord-ouest.

a. Location of the Antisana volcano. b. Sampling map ; LMG : Low Magnesium andesites ; AAD : Andesites group ; CAK : potassic calco-alkaline lavas ; 1 : collapse caldera with a glacial overdigging ; 2 : cliff ; 3 : schematic separation between the double old edifice towards the ESE and the recent volcano towards the northwest.

pratiquement pas été étudié jusqu'ici, en dehors d'une reconnaissance géochimique succincte (Barragan, 1994). Une campagne de prélèvements entreprise sur les flancs de l'Antisana a permis de constituer un échantillonnage représentatif de cet édifice (figure 1b).

## 2. Géologie et pétrologie

Le volcan Antisana comprend deux ensembles : au nord-ouest, un cône très récent, à pente régulière, recouvert d'un empilement de coulées morphologiquement très récentes et probablement holocènes ; au sud-est, une partie plus ancienne, formée de deux édifices coalescents, dont les parties sommitales sont effondrées. Les deux caldeiras correspondantes ont, de plus, été fortement érodées par leur ancienne couverture glaciaire, leur fond étant recouvert de dépôts morainiques.

Les échantillons, prélevés entre 4 200 et 4 800 m, proviennent de coulées de laves massives, de dépôts ignimbritiques soudés et de brèches pyroclastiques, d'origine pour partie sous-glaciaire. Deux coulées historiques d'an-

désites (Potrerillos, 1773 et Antisanilla, 1760), issues de points de sortie adventifs de l'Antisana (figure 1a), sont également incluses dans cette étude.

Les laves échantillonnées sont extrêmement diverses : andésites basiques riches en alumine, andésites et dacites calco-alcalines potassiques et andésites à caractère adakitique (figure 2a).

Cinq andésites riches en aluminium et pauvres en magnésium (LMG) proviennent du flanc sud du volcan. Ces roches se caractérisent par de fortes concentrations en  $Al_2O_3$  ( $> 17\%$  ; figure 2b), en  $TiO_2$  ( $> 0,95\%$ ) et en Sr. Par contre, leurs concentrations en MgO (2,4–3,6 %) et Ni ( $< 22$  ppm ; figure 2c) sont particulièrement faibles et les rapprochent des *low-MgO high-alumina basalts* (HAB) décrits dans plusieurs arcs insulaires (Sisson et Grove, 1993).

Dix-sept andésites basiques à acides (figure 2a), moyennement à fortement potassiques, ont été prélevées au niveau de la partie ancienne du volcan. Elles présentent de faibles concentrations en Y et en terres rares lourdes (figure 2d ; Yb  $< 1,1$  ppm) et des rapports La/Yb et Sr/Y élevés (figure 3a ; respectivement  $> 20$  et  $> 50$ ), considé-

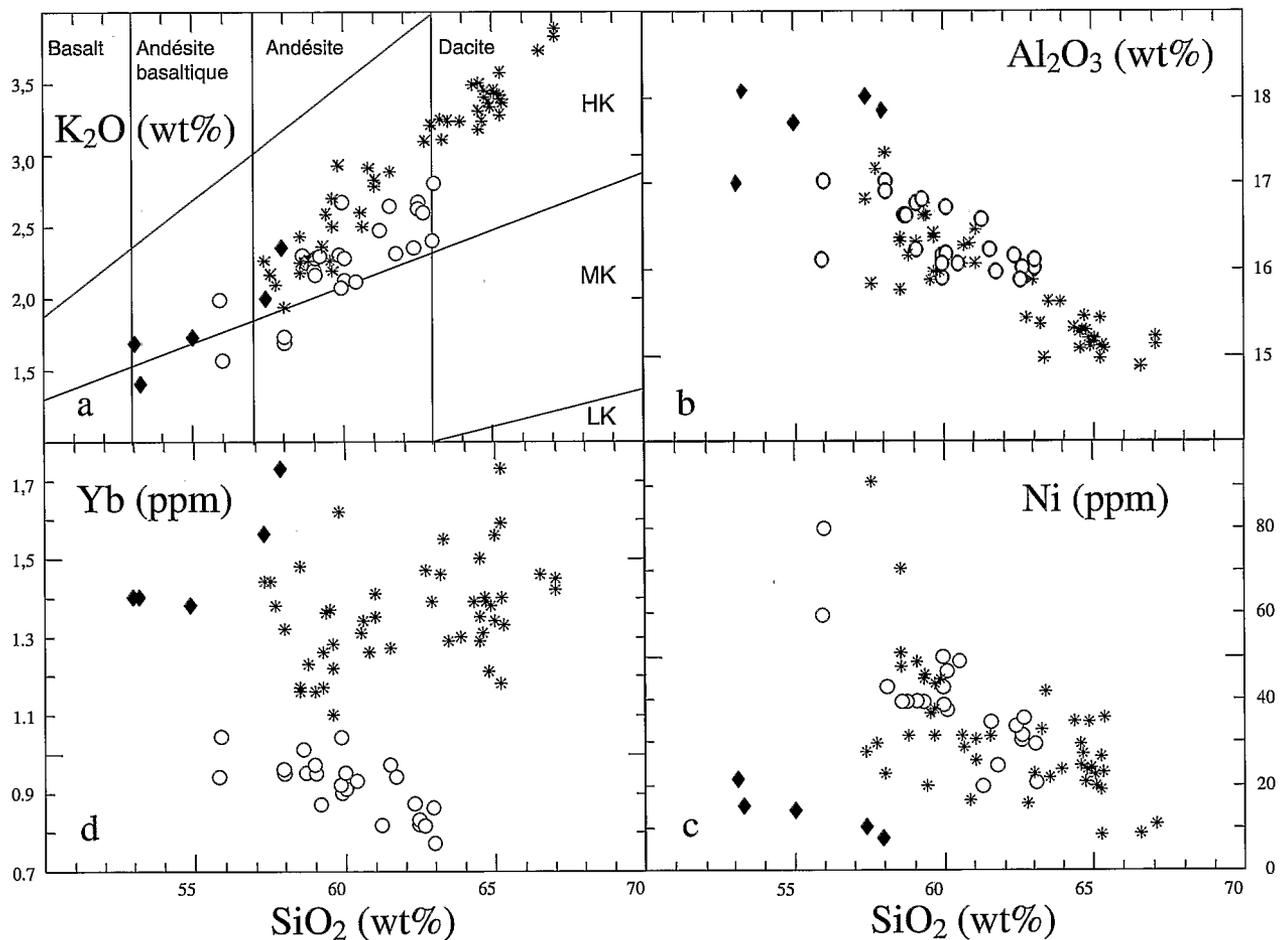


Figure 2. a. Diagramme  $K_2O$  (%)– $SiO_2$  (%). b. Diagramme  $Al_2O_3$  (%)– $SiO_2$  (%). c. Diagramme Ni (ppm)– $SiO_2$  (%). d. Diagramme Yb (ppm)– $SiO_2$  (%). Symboles identiques à ceux de la figure 1b.

a. Diagram  $K_2O$  (%)– $SiO_2$  (%). b. Diagram  $Al_2O_3$  (%)– $SiO_2$  (%). c. Diagram Ni (ppm)– $SiO_2$  (%). d. Diagram Yb (ppm)– $SiO_2$  (%). Same symbols as in figure 1b.

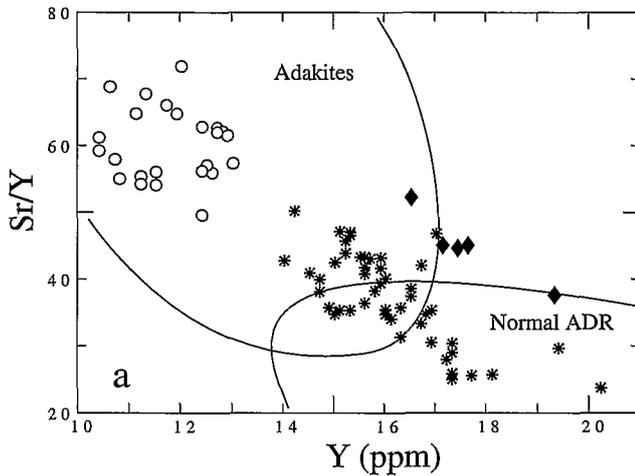


Figure 3. Diagramme Sr/Y versus Y (champs des adakites et des andésites, dacites et rhyolites calco-alkalines, d'après Defant et Drummond, 1990).

Diagram Sr/Y–Y (adakites and calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites fields, after Defant and Drummond, 1990).

rés comme typiques des adakites (Defant et Drummond, 1990). Elles se distinguent néanmoins de ces dernières par de fortes concentrations en  $K_2O$ , Rb et Ba. Nous les considérerons comme des andésites d'affinité adakitique (AAD).

Le dernier ensemble correspond à des andésites acides et des dacites calco-alkalines fortement potassiques (CAK), dont certaines présentent des caractéristiques chimiques intermédiaires entre les adakites et les roches calco-alkalines normales (figure 3). Elles se distinguent du groupe précédent par des teneurs en  $K_2O$  légèrement supérieures à taux de silice équivalent, ainsi que des concentrations en terres rares lourdes plus élevées (figure 2d ;  $Yb > 1,1$  ppm).

L'âge holocène présumé des coulées récentes de type CAK du flanc nord-ouest du volcan et l'affinité adakitique des coulées de Potrerillos et de l'Antisanilla suggèrent une mise en place concomitante de ces deux groupes, permettant d'envisager des liens pétrogénétiques entre eux.

### 3. Particularités géochimiques

Les adakites sont des roches intermédiaires à acides, caractérisées par de fortes concentrations en  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  et Sr, ainsi que des teneurs très faibles en terres rares lourdes et Y (Defant et Drummond, 1990). Leurs caractéristiques géochimiques suggèrent qu'elles sont directement issues de la fusion partielle de la croûte océanique subductante, dans des contextes de subduction favorables de croûte océanique jeune (donc encore chaude), de débuts de subduction ou de subductions rapides et obliques (Maury et al. 1996).

Les spectres multi-éléments de roches représentatives du volcan Antisana sont comparés (figure 4) avec des adakites de l'arc de Zamboanga, Philippines (Sajona et al., 1996). L'appauvrissement en terres rares lourdes et en Y

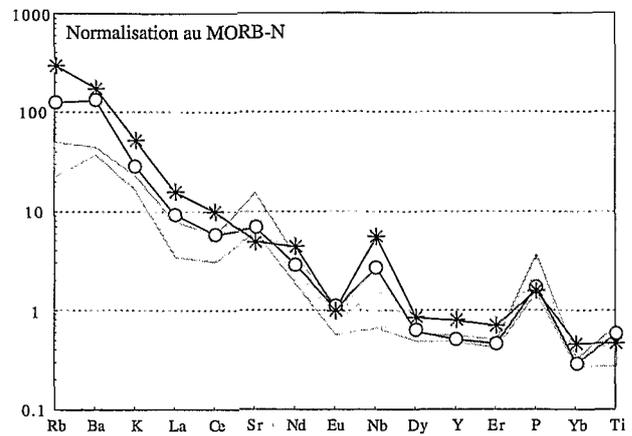


Figure 4. Spectres multiélémentaires normés au MORB-N (Sun et McDonough, 1989) de deux laves représentatives de l'Antisana. Champ grisé : adakites de Zamboanga (Sajona et al. 1996). Les éléments sont placés de la gauche vers la droite, par ordre d'enrichissement décroissant mis en évidence dans les enclaves métasomatisées de l'île de Batan, Philippines (Maury et al., 1992). Symboles identiques à ceux de la figure 1b.

MORB-N normalized spidergrams (Sun and McDonough, 1989) of two representative lavas from Antisana volcano. Stippled field: Zamboanga adakites (Sajona et al., 1996). Elements are arranged from left to right according to decreasing enrichments displayed in metasomatized mantle xenoliths from Batan Island, Philippines (Maury et al. 1992). Same symbols as figure 1b.

des AAD est similaire à celui observé aux Philippines. Cependant, les laves de l'Antisana sont globalement plus enrichies en éléments très incompatibles et se rapprochent en cela des laves calco-alkalines normales. En conséquence, bien que les concentrations en Sr des laves de l'Antisana ne soient pas plus élevées que celles des éléments voisins, elles sont tout de même proches de celles des adakites. Les CAK présentent des spectres d'éléments en traces légèrement plus enrichis que ceux des AAD, mais surtout des concentrations en terres rares lourdes et Y plus proches de celles des roches calco-alkalines typiques, bien que toujours en deçà de la limite adoptée pour définir les adakites (figure 2d ;  $Yb < 1,8$  ppm ; Defant et Drummond, 1990).

Les deux groupes de laves montrent de forts enrichissements en Nb, P et Ti. Ces enrichissements sont susceptibles de traduire la présence d'un composant de type alcalin sous le volcan Antisana. La présence d'une telle composante n'est pas surprenante, si l'on considère la proximité du Sumaco (environ 100 km à l'est), seul volcan équatorien émettant actuellement des laves alcalines.

### 4. Hypothèse pétrogénétique

Toutes les roches de l'Antisana (depuis les andésites pauvres en magnésium jusqu'aux dacites calco-alkalines potassiques) présentent, à des degrés divers, une signature adakitique. Cette signature est discrète dans les CAK, mais très typique dans les AAD, bien que ces dernières diffèrent des véritables adakites par des teneurs en incompatibles

plus élevées. Le groupe CAK présente, quant à lui, une signature très enrichie, avec également des caractéristiques adakitiques ( $1,1 < Yb < 1,8$  ppm).

Les conditions de formation des magmas adakitiques correspondent à des pressions d'environ 2 GPa, compatibles avec des profondeurs de 70 à 80 km. Or, le sommet estimé de la plaque plongeante est nettement trop profond sous le volcan Antisana (= 140 km) pour être dans les conditions thermodynamiques nécessaires à la genèse des adakites (Defant et Drummond, 1990 ; Peacock et al., 1994).

Compte tenu de la signature adakitique nette des roches de l'Antisana, nous envisageons l'hypothèse qu'elles soient issues d'un manteau « métasomatisé » par des magmas adakitiques et qui a été entraîné à plus grande profondeur.

L'application de ce modèle implique la fusion partielle d'une portion relativement faible de plaque plongeante à plus faible profondeur, en position avant-arc. La plaque Nazca, qui subducte sous l'Équateur, est âgée de 12 à 20 Ma au niveau de la fosse. De plus, le flux de chaleur élevé de l'ensemble du bassin de Panama (Van Andel et al., 1971) est rehaussé par le passage du linéament des Galápagos. La fusion du *slab* avant sa déshydratation devient ainsi possible sous les Andes du Nord, vers 80 km de profondeur, mais probablement sans que les conditions soient réunies pour que ce phénomène ait lieu à grande échelle. Les liquides seraient totalement impliqués dans des réactions de métasomatose dans le manteau, comme cela a été proposé par Maury et al. (1998) pour l'arc Nord-Luzon, en donnant naissance notamment à des minéraux hydroxylés (Kepezhinskis et al., 1996).

Cette hypothèse permet de rendre compte des principales caractéristiques des roches de l'Antisana. Ainsi, il est nécessaire d'envisager la fusion du manteau, pour expliquer la présence de laves à caractéristiques adakitiques et pauvres en silice ( $SiO_2 < 54\%$ ), qui ne peuvent pas être issues de la fusion de la croûte océanique à des degrés de fusion partielle « raisonnables ».

Dans la source des AAD, les teneurs en terres rares lourdes et Y sont faibles, puisque la métasomatose par les magmas adakitiques a dilué les concentrations en ces éléments du coin de manteau. La présence de grenat métasomatique dans la source, due à l'interaction des liquides silicatés avec le manteau péridotitique (Sekine et Wyllie, 1982 ; Carroll et Wyllie, 1989), peut également expliquer les faibles teneurs en terres rares lourdes et en Y. Les concentrations, très élevées, en éléments incompatibles et, en particulier, en alcalins, indiquent qu'au moins une partie des minéraux hydroxylés a participé à la fusion. Des réactions de déshydratation les impliquant pourraient être directement responsables du déclenchement de la fusion partielle, à une profondeur adéquate (Tatsumi, 1989). Les fortes concentrations en Sr indiquent

qu'aucune phase présente dans le manteau ne retient cet élément, issu de la plaque plongeante. La métasomatose par des liquides adakitiques permet aussi d'expliquer l'enrichissement en Nb, puisque cet élément est soluble dans les liquides silicatés (Kesson et Ringwood, 1989), contrairement aux fluides aqueux (Tatsumi, 1989).

Le groupe LMG se caractérise par des laves relativement basiques proches des *high-alumina basalts* (HAB). Leurs spectres d'éléments en traces ressemblent fortement à ceux de certaines andésites du groupe AAD. Sisson et Groove (1993) ont montré que les HAB peuvent être issus d'un magma plus magnésien, par cristallisation fractionnée d'un assemblage à dominante de pyroxène et d'olivine, d'où le plagioclase est exclu. La nucléation de ce dernier est inhibée par les fortes concentrations en eau dans ces magmas. Un calcul simple montre qu'il suffit de rajouter moins de 10 % d'un assemblage de cpx-opx-ol pour ramener les concentrations en MgO de ces laves au niveau de celles du groupe AAD, sans modifier significativement les concentrations en autres éléments majeurs (sauf  $Al_2O_3$ ) ou en éléments en traces (sauf les éléments compatibles). Les groupes LMG et AAD représenteraient donc une seule et même lignée, dont une partie (LMG) a subi une cristallisation fractionnée préférentielle.

La genèse des laves calco-alcalines potassiques est moins claire, puisque ces laves possèdent des caractéristiques chimiques intermédiaires entre les véritables adakites et les roches d'arc normales (figure 3). Cependant, elles sont aussi caractérisées par un enrichissement relatif en Nb par rapport aux laves calco-alcalines normales. Ces roches pourraient être issues également de la fusion d'un manteau métasomatisé par des liquides adakitiques. On peut en effet penser que la métasomatose du manteau par des liquides issus de la fusion de la croûte subductante donne naissance à un manteau très hétérogène (Bau et Knittel, 1993), dont la fusion engendrerait des magmas avec des caractéristiques géochimiques sensiblement différentes.

## 5. Conclusion

Ces premiers résultats sur les roches de l'Antisana mettent en évidence la présence, sous ce volcan, d'une composante enrichie en Nb, inhabituelle en contexte de subduction. L'extrême diversité des laves échantillonnées en ce point précis des Andes du Nord montre la complexité des processus pétrogénétiques de cette partie de l'arc insulaire qui court le long de l'Amérique du Sud. Il apparaît néanmoins clairement que l'apport de la plaque plongeante ne se limite pas à une simple déshydratation mobilisant les éléments solubles dans les fluides aqueux et que la fusion de la croûte océanique plongeante doit être prise en compte dans la genèse des laves de l'Antisana.

**Remerciements.** Ce travail a été entièrement financé par l'UR 6 de l'IRD (Institut de recherche pour le développement, ex-Orstom), dans le cadre du programme d'étude de l'aléa et d'aide à la gestion des risques naturels. Nous remercions R. Maury et H. Martin, pour leurs commentaires constructifs des versions préliminaires de cette note, ainsi qu'un relecteur anonyme pour ses remarques pertinentes.

## 6. Références

- Barragan R.T. 1994. A petrological transect in the northern Andes, *Master of Sciences*, University of Idaho, 111 p.
- Bau M. et Knittel U. 1993. Significance of slab-derived partial melts and aqueous fluids for the genesis of tholeiitic and calc-alkaline island-arc basalts: evidence from Mt. Arayat, Philippines, *Chem. Geol.*, 105, 233–251
- Carroll M.J. et Wyllie P.J. 1989. Experimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 15 kbar, implications for assimilation and differentiation processes near the crust-mantle boundary, *J. Petrol.*, 30, 1351–1382
- Defant M.J. et Drummond M.S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere, *Nature*, 247, 662–665
- Hall M.L. et Mothes P. 1994. Historia del volcan Antisana, in : *Terceras Jornadas en Ciencias de la Tierra*, EPN, 16–19 novembre 1994, Quito, Équateur
- Humboldt A. 1807. *Voyages aux régions équinoxiales du Nouveau Continent faits en 1799, 1800, 1801, 1802, 1803, 1804 par Alexandre de Humboldt et Aimé Bonpland*, 1807, Paris.
- Kepezhinskas P.K., Defant M.J. et Drummond M.S. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1217–1229
- Kesson S.E. et Ringwood A.E. 1989. Slab-mantle interactions. 1. Sheared and refertilized garnet peridotite xenoliths: samples of Wadati-Benioff zones ?, *Chem. Geol.*, 78, 83–96
- Maury R.-C., Defant M.-J. et Joron J.-L. 1992. Metasomatism of the sub-arc mantle inferred from trace elements in Philippine xenoliths, *Nature*, 360, 661–663
- Maury R.-C., Sajona F.-G., Pubellier M., Bellon H., et Defant M.-J. 1996. Fusion de la croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes : l'exemple de Mindanao (Philippines), *Bull. Soc. géol. France*, 167, 5, 579–595
- Maury R.-C., Defant M.-J., Bellon H., Jacques D., Joron J.-L., McDermott F. et Vidal P. 1998. Temporal geochemical trends in northern Luzon arc lavas (Philippines): implications on metasomatic processes in the island arc mantle, *Bull. Soc. géol. France*, 169, 1, 69–80
- Peacock S.M., Rushmer T. et Thompson A.B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121, 227–244
- Sajona F.G., Maury R.C., Bellon H., Cotten J. et Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene Island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines), *J. Petrol.*, 37(3), 693–726
- Sekine T. et Wyllie P.J. 1982. Experimental simulation of mantle hybridization in subduction zones, *J. Geol.*, 91, 511–528
- Sisson T.W. et Grove T.L. 1993. Temperatures and H<sub>2</sub>O contents of low-MgO high-alumina basalts, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 113, 167–184
- Sun S. et McDonough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes, in : Saunders A.D. et Norry M.J. (éds), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special publication, 42, 313–345
- Tatsumi Y. 1989. Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 94, 4697–4707
- Van Andel T.H., Heath G.R., Malfait B.T., Heinrichs D.F. et Ewing J.I. 1971. Tectonics of the Panama Basin, Eastern Equatorial Pacific, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 1489–1508

