

# Évolution du modèle quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Équateur

## Première partie : le volcanisme pyroclastique récent

Alain WINCKELL<sup>(1)</sup>, Claude ZEBROWSKI<sup>(2)</sup>, Mireille DELAUNE<sup>(3)</sup>

---

**Résumé :** En Équateur plusieurs épisodes volcaniques se sont succédés du Plio-Pléistocène à l'actuel; les plus récents sont des retombées pyroclastiques aériennes parmi lesquelles on peut distinguer les cendres anciennes, fortement altérées et les cendres récentes, qui feront l'objet de cette étude.

Les retombées pyroclastiques des sept principaux volcans des cordillères occidentale (Cuicocha, Pichincha, Quilotoa), orientale (Cotopaxi, Tungurahua) ainsi que des flancs amazoniens des Andes (Reventador, Sangay) ont été analysées.

Les cendres émises par ces volcans présentent des cortèges minéralogiques différents, qui montrent une opposition entre volcans de la cordillère occidentale et volcans des versants orientaux et amazoniens.

Dans le premier groupe la hornblende ou l'association hornblende/hypersthène dominant.

Le second groupe est caractérisé par l'association augite/hypersthène à laquelle se joint accessoirement l'olivine.

Le zonage observé d'ouest en est en ce qui concerne les cortèges minéralogiques des projections suit la migration de l'activité volcanique, de la cordillère occidentale vers le flanc amazonien.

**Mots-clés :** Équateur - Volcanisme récent - Dépôts pyroclastiques - Minéraux lourds.

**Abstract: Quaternary evolution of the surface formations in the Ecuadorian Andes. First part: the recent pyroclastic volcanism.** In Ecuador several volcanic events succeed from the Pleistocene to the present time; the more recent are eolian pyroclastic deposits and two main formations were distinguished: the weathered ancient ashes and the recent ashes derived from volcanoes located in the western Cordillera (Cuicocha, Pichincha, Quilotoa), in the eastern Cordillera (Cotopaxi, Tungurahua) and on the Amazonian slopes (Reventador, Sangay).

Ashes produced by these volcanoes exhibit qualitative differences in the heavy mineral spectra and it is possible to discriminate the pyroclastic products emitted by the volcanoes of the western cordillera from those emitted by the volcanoes of the eastern cordillera.

Hornblende and the association hornblende/hypersthene dominate in the first group. The ashes of the volcanos in the eastern cordillera and the Amazonian slopes are more basic and dominated by the association hypersthene/augite and the presence of olivine.

The main spreading direction of the volcanic ashes is NE/SW, related to the direction of the alizes.

**Keywords:** Ecuador - Recent volcanism - Pyroclastic deposits - Heavy minerals.

---

(1) Orstom-Colef Project, 3166 old Heather Road, San Diego, CA 92211.7715 USA.

(2) Orstom, Quito.

(3) Orstom, centre Ile de France, 32 av. Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France.

## INTRODUCTION

Cette étude concerne l'évolution récente des modelés et des formations superficielles des Andes volcaniques du nord et du centre de l'Équateur, depuis 40 000 ans environ.

L'Équateur est un pays où l'empreinte du volcanisme est omniprésente, que ce soit par les formes qu'il a construites, ou par les formations qu'il a engendrées.

De nombreuses régions ont été ainsi profondément marquées par les épisodes volcaniques parmi lesquelles la Sierra Centrale fait figure de lieu privilégié avec son « Avenue des Volcans » (HUMBOLT, 1853), certains recouverts par un chapeau sommital de neiges et glaces permanentes et son importante couverture de produits pyroclastiques sur des dizaines de mètres d'épaisseur.

L'étude comporte deux volets :

la première partie est consacrée à l'étude de la couverture pyroclastique récente :

— les différents volcans susceptibles d'avoir émis ces produits,

— la caractérisation morphologique et minéralogique de leurs projections récentes,

— une caractérisation similaire des nappes de cendres ;

la seconde partie traitera plus spécifiquement de différents aspects de l'histoire paléo-géographique des Andes d'Équateur de façon à proposer une reconstitution des principales étapes de l'évolution du paléo-environnement quaternaire :

— périodes d'activité des différents volcans et mise en place de la couverture pyroclastique,

— corrélation avec les principaux événements paléo-géographiques : changements climatiques et glaciations, épisodes morphogénétiques et pédogénétiques,

— distinction entre cendres anciennes et récentes - le problème de la « cangahua ».

## APERÇU GÉNÉRAL SUR LE VOLCANISME EN ÉQUATEUR

### Historique du volcanisme

Les épisodes volcaniques les plus anciens sont contemporains de la première phase de construction de l'Équateur par une subduction et une accréation d'âge crétacé. Ils se localisent sur le flanc ouest de la cordillère des Andes et ils correspondent respectivement à un volcanisme basique sur un arc océanique (Formation Macuchi),

un arc continental (Formation Celica) et dans la cordillère côtière, à un morceau de croûte océanique (Formation Piñon) (FAUCHER et SAVOYAT, 1973 ; BALDOCK, 1982 ; DGGM-IGS, 1982 ; LEBRAT, 1985). Elles se composent principalement de basaltes, andésites et volcano-clastites.

L'activité volcanique se poursuit pendant tout le Tertiaire sur l'emplacement actuel des Andes où ses produits constituent le soubassement des Andes septentrionales et centrales. Il s'agit de niveaux volcaniques et volcano-sédimentaires acides et basiques des formations Sacapalca et Saraguro, composées d'andésites, pyroclastites et localement de faciès rhyolitiques, sur 2 000 m d'épaisseur environ.

Pendant le Néogène, le volcanisme se localise principalement sur les cordillères méridiennes individualisées où se forment les épaisses séries composées de laves andésitiques et de pyroclastites cimentées des formations Pisayambo ou Sicalpa qui constituent l'armature des cordillères de la partie centrale.

Mais les effets les plus spectaculaires résultent des épisodes les plus récents du Plio-Pléistocène à l'Actuel. Elles concernent trois grands types de formes et formations :

— un volcanisme acide, effusif a provoqué la mise en place d'épanchements et d'agglomérats acides, rhyodacitiques (Formation Tarqui, Plio-Pléistocène ?). Situés à plus de 3 500 - 4 000 m, ils constituent de vastes entablements qui donnent aux paramos de la Sierra centrale et méridionale leur aspect monotone caractéristique ;

— un volcanisme explosif, responsable de la construction des nombreux strato-volcans qui parsèment la Sierra équatorienne de la frontière colombienne jusqu'à la latitude du volcan Sangay. Les géologues ont schématiquement indiqué deux générations, la plus ancienne connue comme « Volcaniques Altar » du Pléistocène et la plus récente sous le terme de « Volcaniques Cotopaxi » d'âge quaternaire. Elles se composent essentiellement de laves et de pyroclastites de composition andésitique ;

— un remplissage des bassins interandins par sédimentation de produits volcaniques. Les premiers épisodes sont des sédiments détritiques, à faciès continental, lacustre à torrentiel (Formations Latacunga, Palmira, Chiche : tufs, conglomérats, volcano-clastites, ignimbrites, lahars, etc.) d'âge pléistocène. Les plus récents sont des retombées pyroclastiques aériennes quaternaires de cendres, lapillis et ponces fossilisant les reliefs sous-jacents, localement consolidées ou indurées sur place et connues sous le nom de formation Cangahua.

## Le volcanisme pyroclastique quaternaire : les principaux volcans récents

### Classification de Hall

Les volcans responsables des couvertures pyroclastiques appartiennent évidemment tous au Groupe Cotopaxi. Mais la réalité du volcanisme explosif récent, holocène, est plus complexe que le schéma exposé ci-dessus.

Un simple examen des édifices volcaniques de la Sierra fait en effet apparaître toutes les gradations entre des vieilles constructions très érodées comme celle des Puntas, où seul le regard du spécialiste peut détecter une origine volcanique, et celle du Sangay, volcan au cône parfait d'où s'échappent régulièrement projections et fumées.

Le premier essai de classification des volcans récents d'Équateur, réalisé par HALL (1977) a abouti à une distinction entre deux types d'activité :

— les volcans avec une activité actuelle ou historique au nombre de huit : Antizana, Cotopaxi, Pichincha (Guagua), Quilotoa, Reventador, Sangay, Sumaco, Tungurahua;

— les volcans éteints ou en état latent (depuis plusieurs siècles) parmi lesquels sont cités : Chiles, Cotacachi, Cuicocha, Pululahua, Atacazo, Corazón, Iliniza, Carihuayrazo et Chimborazo sur la cordillère occidentale; Imbabura, Mojanda, Ilaló, Paschocha et Rumiñahui dans la vallée interandine; Cayambe et Altar sur la cordillère orientale.

### Nos critères de sélection

Nos observations sont globalement en concordance avec les conclusions de cette étude. Mais alors que HALL (1977) s'est intéressé à tous les types d'activité recensés — coulées, projections, pyroclastites et fumerolles — notre approche est légèrement différente puisque nous n'avons pris en compte que les seuls volcans susceptibles d'avoir émis des couvertures pyroclastiques d'extension et épaisseur notables.

C'est pour cette raison que nous n'avons pas retenu le volcan Antizana, à propos duquel aucune émission récente et importante de pyroclastites n'a jamais été notée. Les seules marques d'activités récente à actuelle sont des fumerolles, internes à la caldera à proximité de la cime et surtout de coulées fissurales historiques de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle et localisées loin de l'édifice : flux de Antisanilla, Papallacta et Cuscungo et sans couverture de cendres (WOLF, 1892).

Cette sélection est basée sur trois critères fondamentaux :

— la morphologie du volcan; degré de conservation des modelés volcaniques originels ou au contraire importance des phénomènes d'érosion, glaciaires ou hydriques, postérieurs à sa construction;

— la présence à proximité d'importantes nappes pyroclastiques, dont l'épaisseur décroît proportionnellement à l'éloignement du centre d'émission. L'une des séquences les plus démonstratives à cet égard, est celle du Pichincha, dont la nappe de cendres s'étend sur plus de 110 km de distance. Son épaisseur atteint 510 cm à proximité du volcan vers Tandayapa, 300 cm vers Mindo, 200 cm à Los Bancos à mi-chemin et est encore de 80 cm à Quininde;

— une confirmation par les résultats des datations effectuées (voir deuxième partie).

Les résultats de la cartographie géomorphologique (WINCKELL, 1993) ont permis d'élaborer une classification basée sur l'âge présumé du volcan et ses aspects géomorphologiques actuels :

1 - édifices volcaniques très anciens, très érodés, en voie de destruction et difficilement identifiables. La plupart d'entre eux n'ont pas été représentés (ex. : Puntas);

2 - les volcans anciens, éteints : pitons, cheminées, necks et vestiges de cônes dont l'origine volcanique reste évidente (ex. : Cotacachi);

3 - les volcans d'âge intermédiaire, éteints, aux formes volcaniques bien conservées :

— cônes avec ou sans cratère (ex. : Iqualata),

— cônes égueulés à caldera (ex. : Chiles);

4 - les volcans actifs ou en sommeil :

— à activité volcanique historique et fumerollienne actuelle :

— cônes composites à calderas : Pichincha (Guagua),

— cônes tronqués à cratère ou caldera : Cuicocha, Quilotoa,

— cônes élancés et très bien conservés : Cotopaxi, Tungurahua Sumaco,

— à activité volcanique actuelle, cônes parfaits à cratères sommitaux : Reventador, Sangay.

Seuls les volcans du groupe 4 ont été étudiés (Fig. 1).

### Les nappes de cendres

Au Quaternaire l'activité volcanique a donné lieu à d'importantes émissions de pyroclastites, lesquelles, plus ou moins altérées, couvrent environ un tiers du pays (Fig. 1).

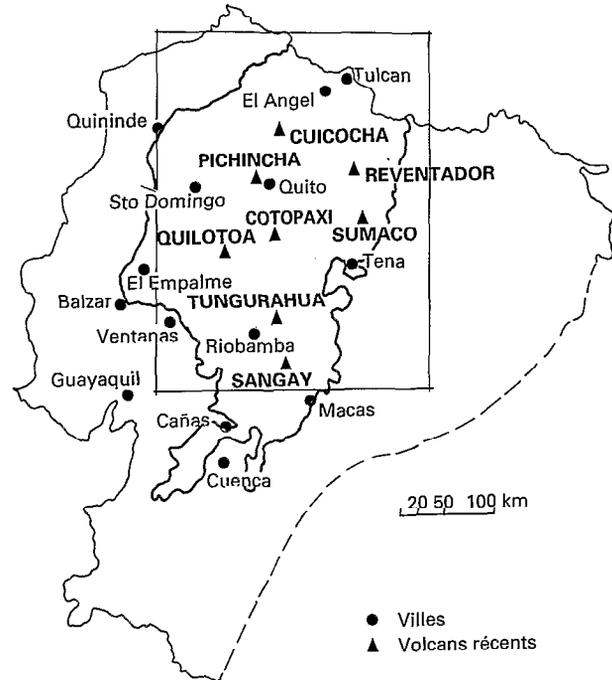
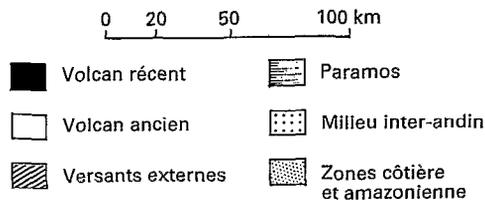
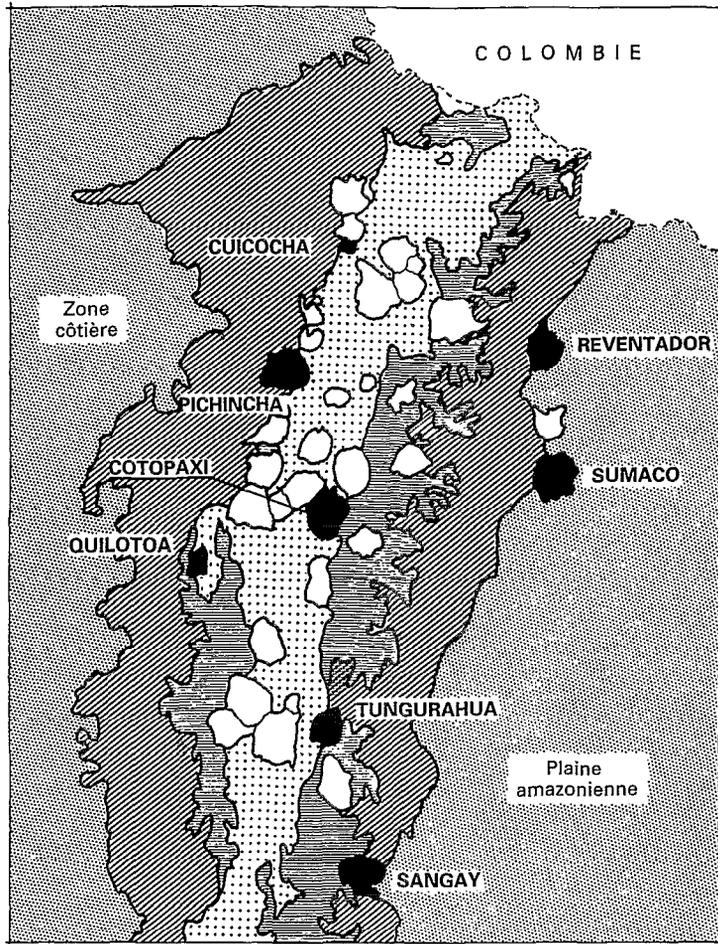


Fig. 1. — Localisation des volcans récents en Équateur. Location of the recent volcanoes in Ecuador.

C'est dans la région septentrionale de la Sierra, de Riobamba à Tulcan, c'est à dire dans la zone où les édifices volcaniques sont les plus nombreux, que les dépôts atteignent les plus grandes épaisseurs. L'alternance de couches de lapilli, peu ou pas altérés et d'horizons de sols, témoigne autant de l'hétérogénéité des émissions — aux phases plus grossières ont succédé des dépôts plus fins — que de leur succession dans le temps.

La couverture de pyroclastites, presque continue dans le nord, diminue au sud de Cañar. Les cendres, poussées par les vents du nord-nord-est, ont donné des dépôts dont l'épaisseur s'amincit parallèlement à l'éloignement des centres d'émissions. Ils couvrent encore tous les paramos situés de part et d'autre de Cuenca et quelques témoins ont été retrouvés au sud-est de Saraguro et même à Paccha (province de Loja).

Dans la région amazonienne, les dépôts de cendres ne s'observent que sur le haut piémont, de la frontière colombienne à Macas. Ils ne vont guère plus à l'est d'une ligne méridienne passant par Puyo et Tena.

Dans la région côtière la limite occidentale des dépôts, proche du pied de la Sierra dans le nord de la province d'Esmeraldas s'en éloigne notablement vers le sud puisqu'elle passe par Quininde, descend ensuite jusqu'à Balzar et ne rejoint le pied de la Sierra que vers Ventanas.

Les caractéristiques pédologiques des dépôts comme la morphologie des édifices volcaniques montrent qu'il est possible d'identifier deux générations de projections pyroclastiques :

— la première, que nous avons qualifiée de cendres anciennes, est aisément reconnaissable par son degré d'altération pédologique : sols ferrallitiques, andosols perhydratés, dans les régions humides ; sols fersiallitiques avec faciès indurés (cangahua) dans les régions sèches ;

— la seconde, appelée par opposition cendres récentes, se distingue aisément par son altération moindre : andosols sableux dans les régions humides, et dans les régions sèches, sols isohumiques voire peu évolués, dans lesquels la superposition des strates originelles est parfaitement reconnaissable.

## LES VOLCANS RÉCENTS ET LEURS DÉPÔTS

Parmi les huit volcans récents répertoriés (Cotopaxi, Pichincha, Tungurahua, Quilotoa, Cuicocha, Reventador, Sangay et Sumaco), nous avons échantillonné et étudié les dépôts de sept d'entre eux. Le Sumaco, isolé dans la forêt amazonienne et d'accès difficile, ne l'a pas été.

### Volcans de la Cordillère occidentale

Ils forment un alignement, orienté SSW-NNE, parallèle aux directions tectoniques côtières, héritées du Crétacé, de la côte et du versant andin occidental. Alors que le Cuicocha et le Pichincha se situent exactement au contact avec le bassin inter-andin, le Quilotoa occupe une situation originale, obstruant la vallée du rio Toachi située sur l'emplacement d'une faille méridienne à l'intérieur de la cordillère occidentale.

### Cuicocha (Cotacachi)

— Latitude nord 0° 18' ; longitude ouest 78° 22'

— Altitude : 3377 m, le lac est à 3064 m

— Dénivelée relative : de 100 à 200 m

Il est situé sur le flanc sud de l'ancien volcan érodé Cotacachi (4039 m) pour lequel il représente vraisemblablement une cheminée parasite terminale. Le Cuicocha apparaît comme un cratère d'explosion (interprétation plus vraisemblable qu'une caldera), situé au centre d'un petit cône tronqué de très faible dénivelée, occupé par un lac de forme ovale de 3,5 km d'est en ouest sur 2 km du nord au sud avec deux îlots constitués de montées de laves.

Ses versants externes en pente douce, disséqués longitudinalement sont très peu développés et se terminent à l'aplomb du lac par des falaises abruptes d'une centaine de mètres de dénivelée.

À l'exception des bords entourant le lac où affleurent les roches du soubassement (andésites du volcan Cotacachi) et les brèches volcaniques résultant du débouchage, tous les produits émis par le Cuicocha attestent une activité fortement explosive, unique (un flux pyroclastique ?) et probablement de courte durée, vraisemblablement contemporaine de la formation de la caldera par explosion et de composition dacitique à rhyo-dacitique (DGM 83, 1980).

Ils ont l'aspect d'un tuf blanchâtre cohérent, de type nuée ardente, formé de ponces, lapilli et cendres et contenant blocs et scories. Présents sur des secteurs relativement limités au voisinage du volcan, ils deviennent particulièrement abondants au sud et au sud-est où ils ont été remobilisés par un grand glaciais d'épandage colluvio-alluvial.

L'absence de cône résiduel et la présence du piémont à remaniement fluvial recouvert seulement de 1 m de projections récentes et montrant donc une succession incomplète, ne nous ont pas permis d'échantillonner les produits de ce volcan dans son voisinage immédiat. Par contre, une coupe (WZ7) située à 7 km au sud-ouest de la lagune de Cuicocha sur la route d'Otavallo à Selva Alegre à 3390 m d'altitude montre les dépôts éoliens originaires de ce volcan (Fig. 2).

Au-dessus du substratum rocheux, on distingue trois séries séparées par des niveaux humifères : — une première série (A), de 0 à 113 cm, est constituée par un sol noir humifère limono-sableux à la base duquel se trouve un horizon sableux. *La composition minéralogique est basique ;* — une deuxième série (B) de 113 à 310 cm est composée d'un sol enterré humifère dans sa partie

supérieure, puis jaune limono-sableux, se terminant par une couche de sable gris bleuté d'environ 1 m d'épaisseur. Leur minéralogie est très proche de celle des cendres sous-jacentes;

— une troisième série (C) correspond à des cendres anciennes à partir desquelles s'est développé un sol plus évolué que les précédents (andosol perhydraté). Ce sol de 2 m d'épaisseur, bien humifère sur le premier mètre, repose sur la roche érodée.

*Pichincha (Guagua)*

- Latitude sud 0° 11'; longitude ouest 78° 38'
- Altitude : 4782 m
- Dénivelée relative : 2200 m

Énorme massif de plus de 25 km de base, le Pichincha est un volcan à l'histoire complexe, qui se compose d'au moins deux édifices successifs accolés attestant une migration de l'activité vers l'ouest. À l'est, le Rucu Pichincha est un volcan aujourd'hui éteint, au sommet (4640 m) portant des traces de morphologie glaciaire, et découpé

en petites planèzes triangulaires pentues et entaillées de vallées en gorge qui dominent la ville de Quito.

Sur son flanc occidental, se dresse le Guagua Pichincha, édifice plus récent qui culmine à 4800 m. De forme globalement cônica, il a vraisemblablement été presque totalement détruit par une explosion et ne comporte plus qu'une partie d'une grande caldera dissymétrique en fer à cheval, ouverte vers le sud-est, de 4 km de diamètre (Guagua, phase 1). L'édifice ne subsiste plus que par ses parties orientale et nord-orientale, en forme de croissant.

Sur son plancher intérieur, vers 4000 m, s'est encastré un autre volcan récent (Guagua, phase 2), plus petit, qui culmine vers 4500 m, lui aussi partiellement détruit par une seconde caldera de 1,5 km de diamètre et dont il ne subsiste que le flanc sud. À l'intérieur, autour d'un dôme de lave situé près de l'extrémité occidentale se localise une importante activité fumerollienne avec dépôts de soufre, visibles aussi localement à la base du flanc de la caldera interne.

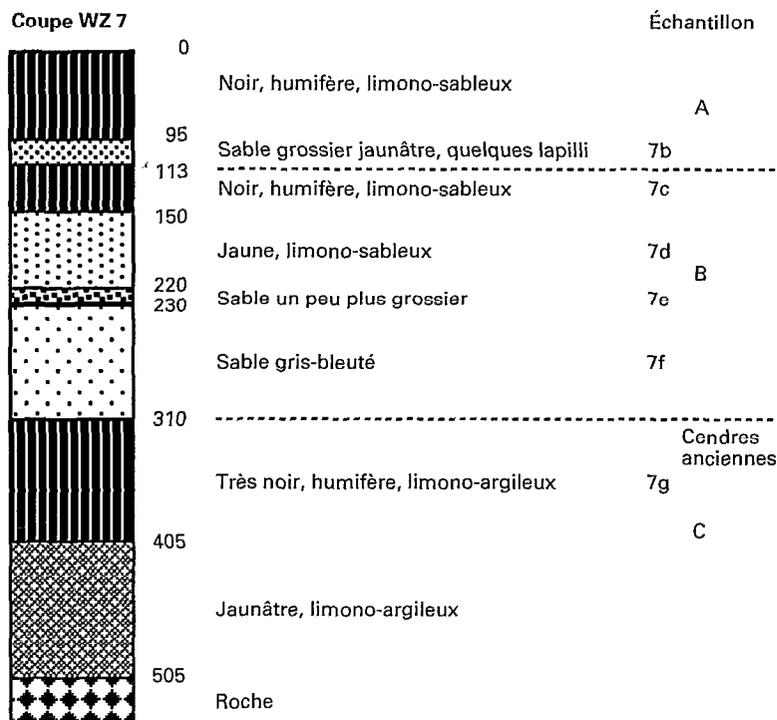
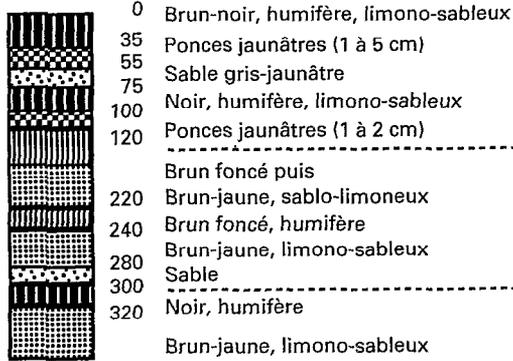


Fig. 2. — Description de la coupe WZ7; volcan Cuicocha.  
Profile of Cuicocha pyroclastic deposits.

Coupe WZ 27-28



Échantillon

27a	
27b	
27c	A
27e	
27f	
27g	
27i	B
28a	31a
28c	
28d	31b

Coupe WZ 31

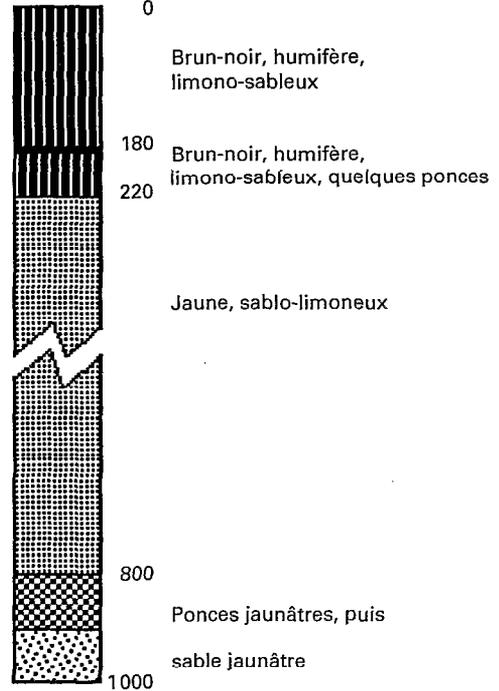


Fig. 3. — Description des coupes WZ 27, 28 et 31; volcan Pichincha. Profiles of Pichincha pyroclastic deposits.

Bien que les matériaux constitutifs des différents édifices comprennent laves et pyroclastites alternées, les traits morphologiques actuels de ces volcans attestent une importante activité explosive, de style proche du péléen, avec la projection de grandes quantités de scories, lapilli et cendres. Les laves sont des andésites porphyriques à plagioclases et pyroxènes, les dernières coulées sont des dacites à hornblendes (DGGM, 1978; DGGM 65, 1980).

Les dépôts à la base du Pichincha ont pu être observés au moyen de 2 coupes, l'une située à 300 m à l'est du volcan (coupes WZ 27 et 28), l'autre au col de la route de Quito à Lloa (coupe WZ 31) à 10 km au sud-est du volcan (Fig. 3).

Sur la première coupe les horizons de 0 à 120 cm (série A) correspondent à une alternance de cou-

ches humifères et de ponces jaunâtres centimétriques.

Puis de 120 à 300 cm (série B) un dépôt plus homogène sablo-limoneux à limono-sableux brun jaune interrompu par un horizon plus foncé humifère entre 220 à 240 cm.

À 300 cm un horizon humifère noir de 20 cm d'épaisseur fait transition avec de nouveau un horizon brun jaune limono-sableux (série C).

Sur la deuxième coupe la série A, précédemment décrite, riche en lapilli, est absente.

On a de 0 à 180 cm un horizon brun noir humifère qui correspond à la série B précédente. Puis de 180 à 800 cm un horizon très épais homogène jaune limono-sableux (série C) enrichi en ponces à sa partie supérieure.

Enfin, à 8 m de profondeur la série D débute par une couche de ponces jaunâtres centimétriques d'un mètre d'épaisseur suivie d'un sable jaunâtre très altéré.

### Quilotoa

- Latitude sud 0° 51'; longitude ouest 78° 54'
- Altitude : 3914 m, le lac est à 3500 m
- Dénivelée relative : 300 à 600 m

C'est une construction originale de petite dimension, avec un cône surbaissé presque parfait, à flancs au profil rectiligne mais fortement érodés par des ravins radiaux. Sa dénivelée est faible, car il s'élève à partir de reliefs sous-jacents situés entre 3200 m au nord et 3600 m au sud. Au centre se situe un cratère — vraisemblablement une caldera d'effondrement — qui a détruit la partie centrale de l'édifice, occupé par un lac circulaire de 2 km de diamètre.

Les projections sont d'extension très limitée et se composent quasi exclusivement de cendres sableuses, lapilli et ponces, à stratification nette qui constituent ses versants mais aussi le matériel

des niveaux de remplissage à remaniement fluviale qui entourent le volcan au sud, à l'est et au nord. Ces derniers sont recouverts par environ 50 cm de cendres éoliennes noirâtres. Quelques coulées de lave sont visibles au fond des entailles, au pied du versant nord : ce sont des dacites à plagioclases, hornblende, biotite et un peu de quartz (DGGM 67, 1980).

Sa période majeure d'activité n'est pas très récente, car ses flancs ont été recouverts, postérieurement à leur ravinement, par une couche de cendres récentes noirâtres d'épaisseur métrique. L'activité actuelle se limite à des dégagements de vapeurs au centre du lac et localement sur les parois internes de la caldera (?).

Sur le flanc nord du volcan, à 3 km de la lagune, sur la route de Sigchos à Zumbahua, la coupe WZ 39 permet de voir que les dépôts récents de ce volcan sont très homogènes. Il s'agit de dépôts dacitiques, sur 13 m de profondeur, essentiellement sableux avec peu ou pas de lapilli. Ils recouvrent un sol argilo-sableux, présentant un horizon humifère d'un mètre cinquante d'épaisseur, développé sur des cendres plus anciennes (Fig. 4).

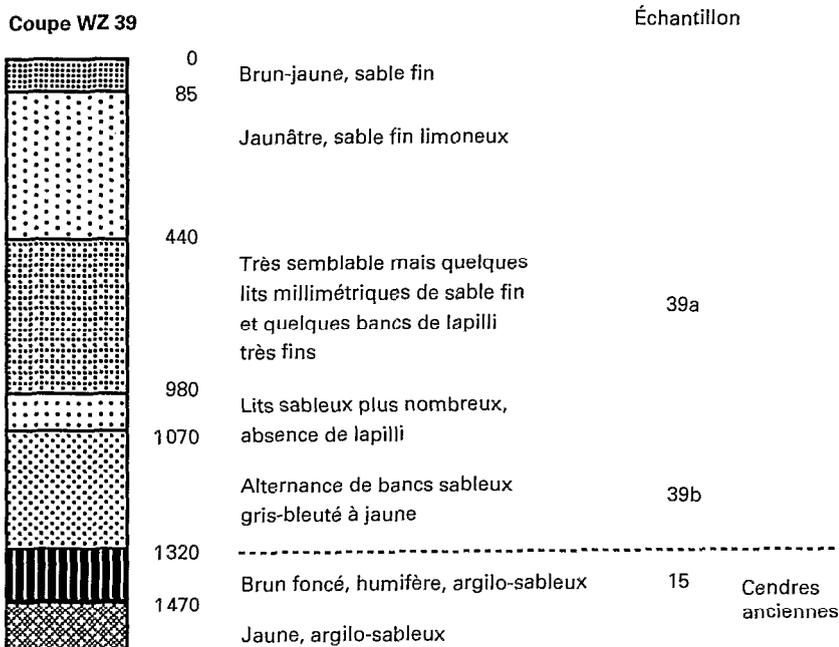


Fig. 4. — Description de la coupe WZ 39 sur les flancs du volcan Quilotoa. Profile of Quilotoa pyroclastic deposits.

## Volcans de la cordillère orientale

Ils pourraient aussi appartenir au bassin interandin, car ils sont situés sur le contact entre ce dernier et le versant interne de la cordillère andine orientale. Ils sont liés à l'existence de l'accident SSW-NNE, qui délimite le flanc occidental du graben interandin et se localisent souvent à l'intersection de directions secondaires, formant des alignements transversaux (Fig. 1).

### Cotopaxi

- Latitude sud 0° 41'; longitude ouest 78° 26'
- Altitude : 5 897 m
- Dénivelée relative : 2 800 m

Le Cotopaxi est le plus haut volcan actif du monde. C'est un magnifique édifice cône élancé, couvert d'une calotte de glaces permanentes au dessus de 4800 m.

Il possède des flancs rectilignes très pentus, profondément sculptés jusque dans les parties inférieures par de grandes vallées glaciaires radiales et composées d'une succession de couches décimétriques à métriques de scories, lapilli et cendres sableuses. Les coulées sont beaucoup moins abondantes. Son sommet est occupé par deux cratères emboîtés de forme circulaire, le plus grand de 800 m de diamètre.

Le Cotopaxi actuel est un strato-volcan, qui semble s'être édifié sur les restes d'un ancien édifice totalement détruit, vraisemblablement par explosions, et dont le Morurco ou Picacho au sud (4840 m) constituerait l'unique témoin.

Les produits émis se composent de laves andésitiques à dacitiques et d'une grande quantité de pyroclastites : agglomérats, brèches, scories, ponces et tufs. Les plus anciennes roches sont les plus siliceuses (70 % de SiO<sub>2</sub>) à augite, où l'hypersthène l'emporte sur l'augite (HRADECKA *et al.*, 1974).

Volcan historiquement actif, le Cotopaxi se caractérise par trois types de phénomènes :

- une grande extension des lahars en relation avec sa couverture neigeuse et glaciaire. Les écoulements boueux consécutifs ont recouvert, de façon parfois catastrophique, de grandes étendues dans les bassins de Quito et Latacunga en 1877 (WOLF, 1892);
- des éruptions explosives, accompagnées de grandes colonnes de gaz, fumées et de la projection d'une épaisse couverture de pyroclastites (nuées ardentes, scories, lapilli et cendres). La dernière période éruptive très active s'est produite

entre 1877 et 1904 (date des dernières coulées de lave connues);

- une activité fumerollienne, continue, localisée au sommet des deux cratères emboîtés.

Les dépôts pyroclastiques sont très épais à la base du volcan. De nombreuses coupes de plus de 10 m d'épaisseur peuvent être observées le long de la route de Quito à Latacunga. Les coupes WZ 10-WZ 11 situées à 20 km au nord-ouest du volcan montrent sur près de 7 m d'épaisseur une alternance de couches horizontales noires humifères sablo-limoneuses et de lapilli blanc jaunâtre de taille centimétrique (série A), (Fig. 5).

- Puis les couches, légèrement ondulées jusqu'à 10 m, sont moins humifères et plus sableuses (série B).

Enfin jusqu'à 13 m un horizon (série C), à la limite supérieure très ondulée, constitué de lapilli blanchâtres de diamètre inférieur à 1 cm termine cette séquence de dépôts de projections récentes. Celles-ci recouvrent un sol plus évolué argilo-limoneux, présentant un horizon humifère d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, développé à partir de projections plus anciennes.

### Tungurahua

- Latitude sud 1° 28'; longitude ouest 78° 27'
- Altitude : 5016 m
- Dénivelée relative : environ 3000 m

Le Tungurahua est aussi un jeune strato-volcan, constitué par un cône élancé localisé au sein de la Cordillère orientale et surplombant la ville de Baños.

Ses flancs montrent une zonation remarquable :

- des témoins de construction plus ancienne représentés par les petites planèzes triangulaires au sud de Baños ainsi que par les versants est et sud, profondément entaillés par les glaciers quaternaires. Ils se terminent sur le flanc sud-est de l'édifice actuel par un petit abrupt courbe (une « Somma ») qui culmine vers 4 300 m;
- sa moitié occidentale est un cône récent, emboîté dans la partie nord-occidentale de l'ancienne construction. Ses flancs rectilignes, en pente raide, descendant jusqu'à la vallée du rio Chambo, sont recouverts par d'épais dépôts de matériaux pyroclastiques fins (scories, ponces, lapilli et cendres).

L'édifice porte une calotte sommitale limitée de neiges et glaces, entourant un sommet complexe. Son cratère bien défini en entonnoir, mais excentré et égueulé vers le nord-ouest, est de forme circu-

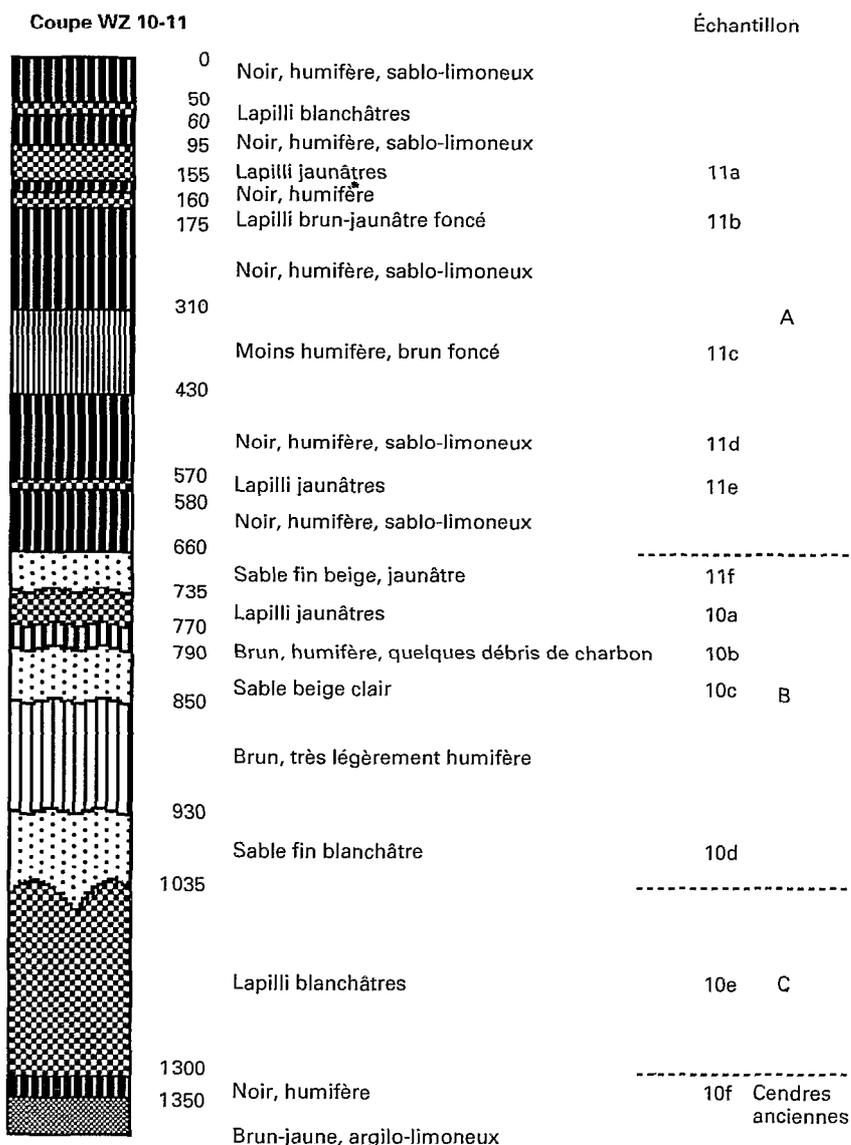


Fig. 5. — Description de la coupe WZ 10 - 11 dans les dépôts du volcan Cotopaxi.  
*Profile of Cotopaxi pyroclastic deposits.*

laire et accuse un diamètre d'environ 800-900 m. Il est le siège de la majorité des manifestations éruptives récentes.

Les laves les plus anciennes sont des andésites porphyriques à phénocristaux de plagioclasses, augite, hypersthène et olivine. Les plus récentes sont à prédominance basaltique avec phénocristaux de plagioclasses, hypersthène et olivine (DGGM 88, 1980).

Le Tungurahua présente une forte activité historique. Depuis 1850 au moins une dizaine de périodes d'activité ont été recensées. Les fortes explosions avec projection de grandes quantités de pyroclastites dominant, associées avec des nuées ardentes et secondairement de coulées de lave et lahars, bien représentées autour de Baños. La dernière, très importante, date de 1944. Le cratère est le siège de fumerolles actuelles.

À 10 km au sud-est du Tungurahua une coupe (WZ 34) située à 1 km après le pont de Puela sur la route de Baños à Riobamba montre les dépôts récents de ce volcan. Ils présentent une stratigraphie beaucoup plus homogène que les précédents (Fig. 6).

On distingue trois séries :

- une première série (A) de 0 à 190 cm est constituée principalement de sables gris noir;
- une seconde série (B) de 190 à 320 cm, toujours très sableuse, comporte de nombreux lits de lapilli intercalés avec des horizons de sables;
- une troisième série (C) jusqu'à 5 m de profondeur, est constituée par une alternance régulière de lits de lapilli et de sables.

### Volcans du flanc amazonien des Andes

Ils se situent au pied du versant andin oriental, métamorphique ou granitique, où ils se localisent le plus souvent sur des noeuds tectoniques qui jalonnent les accidents d'orientation SSW-NNE, par lesquels le flanc andin chevauche les terrains sédimentaires tertiaires amazoniens. Le Sangay, légèrement en retrait par rapport à cette disposi-

tion théorique, pourrait être situé sur un accident de même orientation, mais incorporé au versant andin.

### Reventador

- Latitude sud 0° 03'; longitude ouest 77° 40'
- Altitude : environ 3485 m
- Dénivelée relative : environ 1300 m

Il est situé à l'extrémité nord d'une importante ligne de fracture sur laquelle se localisent aussi le Sumaco et le Pan de Azucar.

Sa structure est complexe, et deux étapes de construction sont facilement visibles :

- un proto-Reventador de dimensions très supérieures à l'actuel est représenté par les restes d'une ancienne construction en forme de caldera en fer à cheval ouverte vers le sud-est;
- à l'intérieur, le Reventador actuel est un cône très élancé dont les pentes s'accroissent nettement vers le haut. Il est accolé au bord occidental externe de la caldera et présente de ce fait une dissymétrie très marquée.

Ses coulées successives empilées sont descendues jusqu'à obturer la gorge du rio Quijos, obstacle qu'il franchit en cascades impressionnantes.

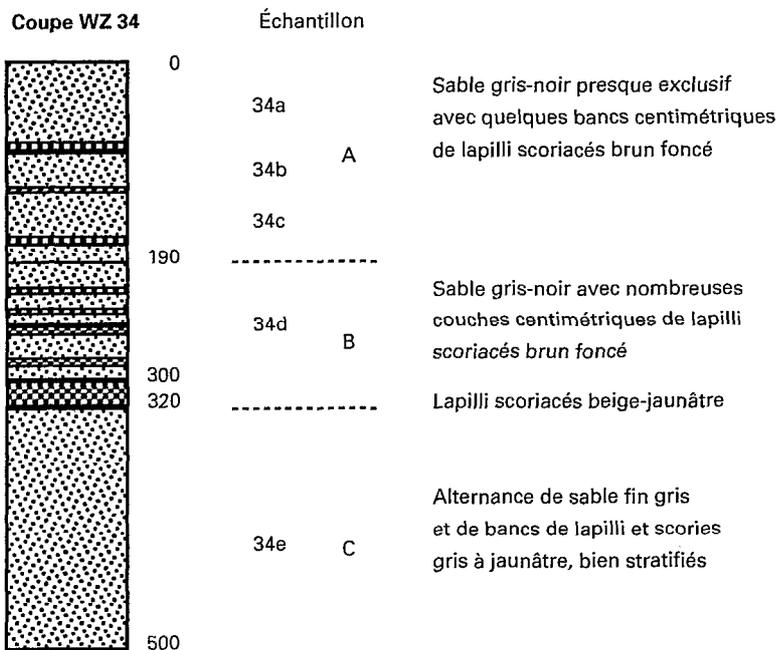


Fig. 6. — Dépôts récents (coupe WZ 34) du volcan Tungurahua.  
Pyroclastic deposits of the Tungurahua.

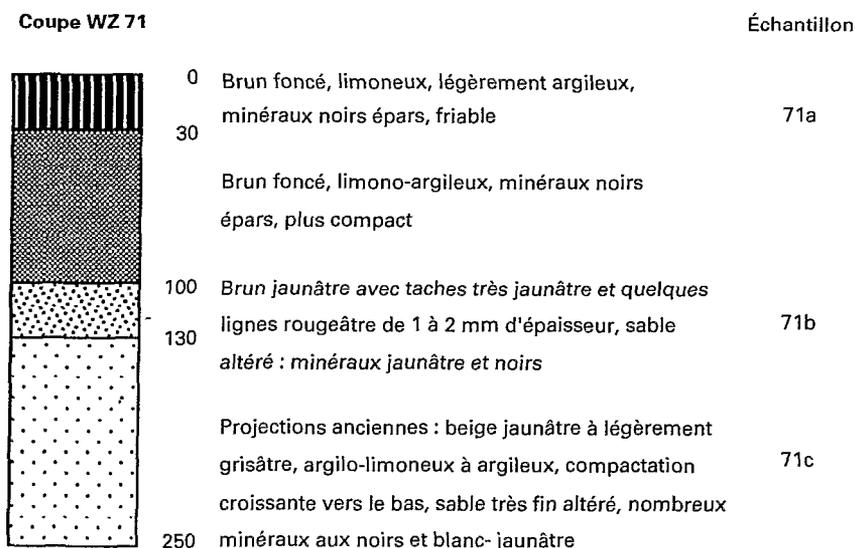


Fig. 7. — Description de la coupe WR 71 sur le flanc nord-est du volcan Reventador. Profile of the Reventador pyroclastic deposits.

Son activité actuelle (la dernière en 1976) est localisée au cône récent : projections, lahars et coulées à composition andésitique basaltique à olivine, augite, hypersthène, plagioclase et un peu de hornblende, sur la partie sommitale du versant oriental (PICHLER *et al.*, 1976).

Les émissions récentes sont très difficiles à échantillonner car ses abords sud-ouest, où la probabilité de rencontrer ses projections les plus épaisses et caractéristiques, sont situées sur le versant amazonien des Andes et donc pratiquement inaccessibles. Leur échantillonnage sur la cordillère orientale est aussi déconseillé, d'autres édifices volcaniques ayant participé à l'alimentation de cette couverture pyroclastique.

Nous avons donc choisi de les échantillonner sur ses abords nord-est, mais ici les conditions climatiques chaudes et humides entraînent une météorisation intense et rapide des projections transformées en horizons homogènes limono-argileux.

Une coupe (WR 71) localisée à 1340 m d'altitude sur le flanc nord-est du Reventador permet néanmoins de distinguer deux ensembles, l'un limoneux à limono-argileux, humifère en son sommet, est développé à partir de cendres récentes. Il surmonte un ensemble d'horizons nettement plus argileux provenant de cendres plus anciennes (Fig. 7).

### Sumaco

- Latitude sud 0° 33'; longitude ouest 77° 42'
- Altitude : 3900 m
- Dénivelée relative : environ 2800 m

Les produits émis sont des téphrites et basanites à augite, plagioclase, un peu d'olivine, de hornblende et des feldspathoïdes (haüyne et noséane). Le Sumaco semble être le plus basique des volcans d'Équateur; il est très mal connu.

### Sangay

- Latitude sud 02° 00'; longitude ouest 78° 21'
- Altitude : 5230 m
- Dénivelée relative : variable de 1700 m à l'ouest à 2700 m à l'est

Le Sangay est le plus méridional des volcans d'Équateur, situé au pied du versant andin oriental, où il apparaît comme un édifice « posé » sur les reliefs sous-jacents, façonnés par l'érosion glaciaire à l'ouest. C'est un superbe cône élancé à flancs rectilignes dissymétriques, prolongés vers l'est par de grands glacis-cônes d'épandage.

Le cône est unique, ce qui semble attester un édifice relativement jeune dont les phases de construction (trois au moins sont visibles sur photos aériennes) n'ont pas été séparées par des

périodes d'accalmie ou d'effondrement très marquées. Son sommet est occupé par trois petites bouches, d'où sortent en permanence fumerolles et projections, dessinant une petite calotte sommitale allongée vers le SW dans le manteau nival et provoquant des lahars sur le flanc nord.

Les pyroclastites sont très abondantes et quasi exclusives, à l'exception de quelques coulées de faible extension au voisinage du sommet. Ses laves sont des andésites basaltiques et andésites avec olivine, augite et hypersthène (HALL, 1977).

Il a été échantillonné (WR 120) à El Tingo, 3200 m en amont de la haute vallée du rio Cebadas, sur la génératrice principale des éruptions orientées W-SW (Fig. 8).

À une distance du volcan d'environ 25 à 30 km, un certain classement granulométrique s'est déjà réalisé et les dépôts apparaissent plus homogènes qu'ils ne le sont généralement au pied des édifices. Sur une hauteur de 4,5 m les coupes montrent une alternance de couches de :

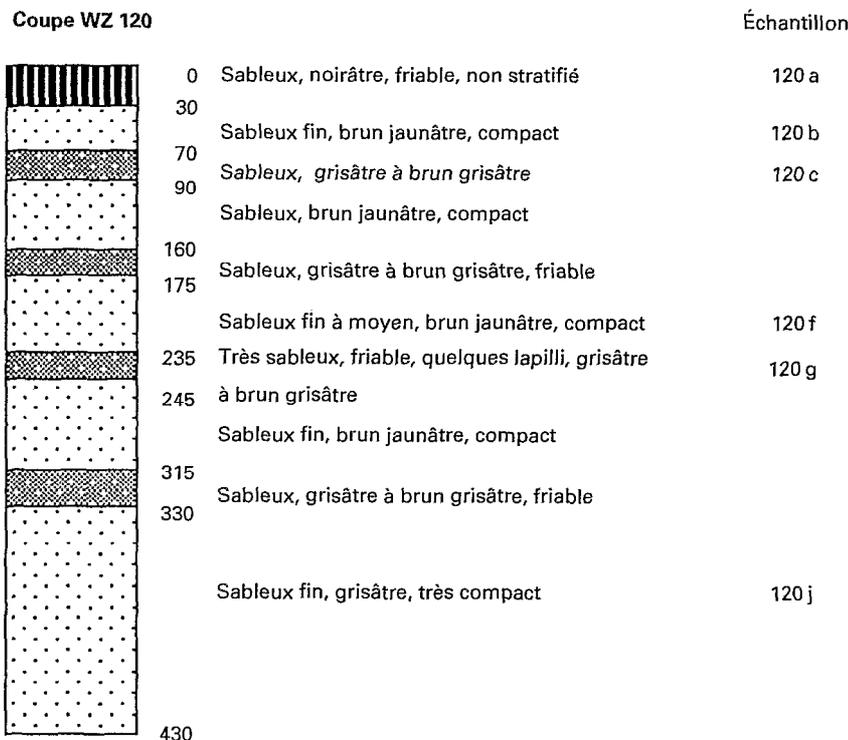
— sables fins à très fins, non stratifiés, localement assez compacts de couleur brune à grisâtre;  
— et des couches pulvérulentes de 10 à 20 cm, d'épaisseur, de sable fin de couleur grisâtre à brun grisâtre, au dessin sinueux et contenant quelques lapilli.

## ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES DÉPÔTS PYROCLASTIQUES

### Minéralogie comparée des volcans

On observe (Tabl. I et Fig. 9) plusieurs groupes d'associations minéralogiques qui marquent, entre autres, une opposition entre les volcans de la cordillère occidentale et ceux des versants orientaux et amazoniens.

Le premier est à hornblende dominante et caractérise le Cuicocha et le Quilotoa. Elle est quasi exclusive dans les produits du Quilotoa, tandis



Route de Quito à Lloa (coupe WZ 31) à 10 km au sud-est du volcan.

Fig. 8. — Description de la coupe WR 120 dans les cendres du volcan Sangay.  
*Profile of the Sangay pyroclastic deposits.*

TABLEAU I  
Minéralogie des dépôts des volcans étudiés  
*Mineralogy of the pyroclastic deposits on the volcanoes*

Échantillon	Olivine	Augite	Hypersthène	Hornblende	Biotite	Epidote	% pondéral
<b>CUJICOCHA</b>							
WZ 7							
b		2	2	83		13	29,60
d		14	10	75		1	22,51
f		6	6	88		+	31,32
h		5	24	69		2	20,28
i		4	13	82		1	19,54
WZ 8			3	96		1	21,28
WP 105							
a		2	5	90		3	15,45
Wp 106							
a		13	23	62		2	16,39
b		2	15	83			25,63
<b>PICHINCHA</b>							
WZ 27							
a		2	39	57		2	9,79
b	5	+	47	45		3	35,47
c	2	2	46	48		2	14,52
e	+		44	56		+	25,31
f	+	1	13	86			27,70
g		+	7	93		+	24,22
h		3	17	78		2	15,58
WZ 28							
a		+	3	96		1	20,25
b		+	6	94		+	40,55
c		6	42	51		1	7,15
d	1	6	27	66		+	17,17
WZ 31							
a		4	19	77			
b	+	11	47	41		1	23,50
c	+	10	40	48		2	17,93
d	+	19	40	39		2	7,89
e	+	+	10	89		1	21,39
f		1	13	86			18,23
<b>QUILOTOA</b>							
WZ 39							
a		+	1	96	+	3	7,81
b			+	98		2	9,62

TABLEAU I (suite)

Échantillon	Olivine	Augite	Hypersthène	Hornblende	Biotite	Epidote	% pondéral
<b>COTOPAXI</b>							
WZ 11							
a		31	68	1			36,24
b		40	60				29,03
c		30	70				17,48
d		24	75	1			14,28
e		49	51				47,98
f		22	69	8		1	1,81
WZ 10							
a		22	69	3	6		4,37
c		23	67	+	+	+	0,81
WZ 18							
b		33	64	3			2,42
c		29	65	6			15,25
d		44	56				28,52
e		28	62	10			25,48
f		12	61	27			20,33
WZ 19							
a	1	41	55				27,08
b		24	76				22,49
<b>TUNGURAHUA</b>							
WZ 34							
a	12	54	34				12,75
b	16	43	39	2			12,00
c	18	54	27			1	11,34
d	6	42	51	1			16,40
e	7	50	43				14,50
<b>REVENTADOR</b>							
WR 71							
a		10	37	53			16,36
b		1	15	84			14,29
c		21	26	53			56,42
WR 72							
b.		42	11	46		1	11,94
<b>SANGAY</b>							
WR 120							
a	33	45	22				11,69
b	12	61	22	2		3	10,36
c	3	62	25	2		8	10,68
f	4	56	33			7	8,33
g	10	46	44				7,51
j	8	36	55	1			9,44

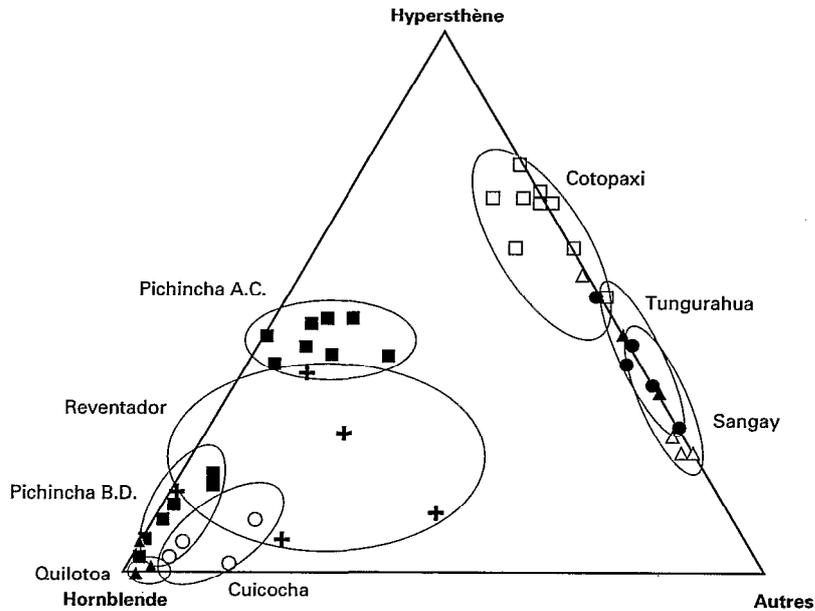


Fig. 9. — Associations minéralogiques des dépôts des volcans.  
*Mineralogical composition of the volcanoes.*

qu'elle est associée avec un peu d'augite et d'hypersthène dans ceux du Cuicocha. Cette association hornblende-hypersthène correspond à une composition magmatique dacitique (BARBERI *et al.*, 1988).

Le second, à l'opposé, se caractérise par des quantités de hornblende très faibles, voire nulles (c'est le cas du Cotopaxi, du Tungurahua et du Sangay) et une association augite-hypersthène d'un magma plus andésitique :

— le Cotopaxi montre une association hypersthène/ augite dominante avec un peu de biotites à certains niveaux. Par rapport aux cendres de la cordillère occidentale les dépôts du Cotopaxi sont plus homogènes. On relève toutefois des traces de hornblende et de biotite dans le niveau inférieur ce qui est en accord avec les analyses faites sur les laves ;

— le Tungurahua et le Sangay, à composition minéralogique homogène sur toute la hauteur de la coupe, se différencient nettement du précédent par une répartition plus équilibrée entre l'augite et l'hypersthène, mais surtout une quantité notable d'olivine, soit la composition d'une andésite basaltique.

Alors que pour les volcans précédents les différents horizons prélevés présentent des cortèges

minéralogiques relativement homogènes en dépit de leurs différences texturales, il n'en n'est pas de même pour le Reventador et le Pichincha.

Les compositions minéralogiques des échantillons provenant du Reventador présentent une plus grande dispersion des résultats. Tous sont à hornblende dominante associée à l'augite et l'hypersthène, mais certains présentent une composition intermédiaire entre un pôle hornblende et un pôle hypersthène, tandis que d'autres se rapprochent du pôle riche en hornblende (soit une association proche de celle des volcans occidentaux). L'augite, en proportion également variable, ne permet pas de les caractériser avec précision. Il est aussi possible que l'absence notée d'olivine, par comparaison avec les autres volcans du flanc amazonien, soit le résultat de la plus grande sensibilité de ce minéral à l'altération.

Le Pichincha se caractérise par une succession d'horizons avec une alternance verticale remarquable.

Les séries A et C ont une composition où la hornblende et l'hypersthène ont des teneurs sensiblement égales, avec de l'augite en quantité appréciable, relativement proches de celles du Reventador.

Les séries B et D ont une composition très proche des cendres à hornblende, dominante sur l'hypersthène et très peu d'augite, soit un cortège voisin de celui de ses coulées (composition citée par HALL, 1977) et proche de celle du Cuicocha.

Cette alternance pourrait être interprétée comme le résultat d'intercalations de dépôts riches en hornblendes issus de ce volcan avec des dépôts plus riches en hypersthènes provenant des volcans voisins. Elle est en fait due à une variation répétitive de la composition des émissions du Pichincha, comme le démontre l'étude de la répartition spatiale des nappes de cendres voisines.

Ces résultats concordent globalement avec ceux de nombreux auteurs dont COLMET-DAAGE *et al.* (1967 a et b, 1970, 1974) mais surtout SAUER (1965) qui note le caractère plus basique des émissions des volcans orientaux par rapport à celles des volcans occidentaux.

### Minéralogie comparée des nappes de cendres

La composition minéralogique d'un certain nombre d'échantillons représentatifs de cette couverture pyroclastique est donnée dans le tableau II et la figure 10. Nous y avons inclus quelques résultats (échantillons E) publiés par COLMET-DAAGE *et al.* (1967a et b, 1970, 1974).

On constate que la majorité des échantillons présente des cortèges qui permettent de les regrouper selon quatre ensembles comparables à ceux des volcans :

— le premier, riche en hornblende, regroupe les cendres du Cuicocha, du Quilotoa et des séries B et D du Pichincha. Ces associations minéralogiques sont celles des dacites ou andésites allant vers un pôle dacitique ;

— le second montre l'association hornblende-hypersthène typique des séries A et C du Pichincha et du Reventador ;

— le troisième (association hypersthène-augite) peut être rattaché au Cotopaxi ;

— enfin, le quatrième ensemble, regroupant peu d'échantillons, correspond aux minéralogies du Tungurahua et du Sangay (association augite-hypersthène avec apparition de l'olivine).

Trois échantillons (WZ 28, E 172b et ZW 32) s'éloignent quelque peu, par leur composition, de ces ensembles. Mais il faut tenir compte du fait que l'hypersthène s'altère plus vite que la hornblende et que la proportion de hornblende tend à augmenter par rapport à celle de l'hypersthène en fonction de la distance du volcan (JUVIGNE

et SHIPLEY, 1983). Dans les deux cas, le rapport hornblende/hypersthène augmente donc pour les échantillons éloignés du volcan, ce qui nous a conduit à rattacher ces échantillons aux ensembles légèrement plus riches en hypersthène, à proximité desquels ils se situent dans la figure 10.

En affectant à chaque ensemble un symbole différent on a indiqué sur la figure 10, les localisations des prélèvements et la délimitation des trois nappes de cendres à composition homogène.

Quelques remarques peuvent être formulées :

— les cendres émises par le Cotopaxi couvrent une surface particulièrement importante puisqu'elles vont au sud-ouest jusqu'à Bucay et à l'ouest jusqu'à Quevedo. Elles couvrent également les paramos de part et d'autre de Latacunga ainsi que ceux situés à l'ouest de Riobamba. On les retrouve recouvrant des émissions importantes du Tungurahua (profil E 264) mais sont elles mêmes recouvertes par des cendres originaires du Pichincha, riches en hornblende à l'ouest de Aloag (profil Z 544) ;

— le Quilotoa a donné lieu à une émission récente très peu étendue, puisqu'en dehors du cône volcanique et des remaniements fluviaux, riche en hornblende, tous les dépôts superficiels de cendres de son voisinage sont issus du Cotopaxi (tel WZ 40). Ce sont les mêmes couches peu épaisses que l'on retrouve reposant directement sur le substrat rapé par les glaciers ;

— bien que les dépôts de cendres à composition intermédiaire, hornblende-hypersthène, caractéristiques des volumes A et C du Pichincha et que l'on retrouve dans le bassin de Quito, puissent théoriquement être attribuées au Reventador, il nous apparaît plus vraisemblable de les assimiler à des émissions du Pichincha. On retrouve en effet des cendres présentant la même composition jusqu'à Quevedo et les dernières émissions (série A), au pied même du cône du Pichincha, ont en particulier une granulométrie trop grossière pour venir du Reventador ;

— la majeure partie des dépôts situés dans la zone côtière au nord de Quevedo pourrait provenir du Pichincha ou du Cuicocha. Leur cortège minéralogique, riche en hornblende permet en effet de les rattacher à l'un ou l'autre de ces volcans. Cependant d'après les aspects morphologiques du Cuicocha : volcan de petite taille dont les émissions ne fossilisent que les reliefs à faible distance, il paraît peu probable qu'il ait occasionné des éruptions de grande ampleur capables de recouvrir des surfaces étendues. Les cendres de la partie nord de la côte proviendraient donc plutôt du

TABLEAU II  
Minéralogie des échantillons prélevés sur les nappes de cendres  
*Mineralogical distribution of the pyroclastic deposits*

Échantillon	Olivine	Augite	Hypersthène	Hornblende	Biotite	Epidote	% pondéral
WZ 18							
a		50	46	4			7,64
b		37	61	2			15,25
c		29	66	5			28,52
d		44	56				25,48
e		26	64	10			20,33
f		13	60	27			21,40
WZ 32		19	60	21			3,10
WZ 40		40	54	6			8,59
WZ 501							
b	2	40	49	5		4	7,00
c		32	58	7		3	42,33
WZ 502							
b	4	26	58	8		4	15,02
d	1	28	64	4		3	44,99
WZ 504							
b		10	43	45		2	14,34
d		5	34	59		2	14,68
e		10	29	59		2	11,70
f		4	25	70		1	17,41
WZ 513							
b		33	62	4		1	11,74
d		21	63	10		6	12,25
WZ 515							
b	1	33	58	8			6,99
e		20	65	13		2	32,31
WZ 545							
a	+	23	64	11		2	16,81
b	1	19	63	17			15,87
E 165							
a		10	43	47			12,00
b		7	53	40			11,70
c		10	52	38			10,80
E 172							
a		6	87	7			11,20
b		11	76	13			10,40
E 226							
a	2	6	42	50			11,00
c		14	20	65		1	20,00
e		8	29	63			20,00
f		6	34	60			23,00
h		7	20	73			17,41
E 264	+	15	74	11			

TABLEAU II (suite)

Échantillon	Olivine	Augite	Hypersthène	Hornblende	Biotite	Epidote	% pondéral
WZ 3							
a		3	6	89		2	9,24
b				100			10,35
c				95	5		16,88
d		5	33	61		1	5,46
WZ 109							
a			5	95			27,95
b			1	99			35,50
c				100			19,93
d			2	98			35,22
Z 540							
b		4	27	67		2	16,39
d		4	16	80			18,29
Z 541							
a		4	22	74			23,56
b		2	28	70			22,56
c			8	91		1	23,61
e			21	78		1	27,07
f			26	74			14,20
Z 544							
b		2	4	94			13,27
d	1	26	60	11		2	14,99
E 53							
a			9	79		12	25,00
b			15	72		13	18,00
c		2	16	80		2	
e		9	9	77		5	21,00
g		2	23	75			29,00
E 62							
a			8	90		2	23,30
b			6	91		2	26,80
e		2	12	82		4	60,00
f			10	88		2	55,00
E 63							
c			14	80		6	5,30
e			16	77		7	3,50
E 209							
a		3	26	71			17,00
b		2	14	84			23,00
E 250							
a		4	9	87			

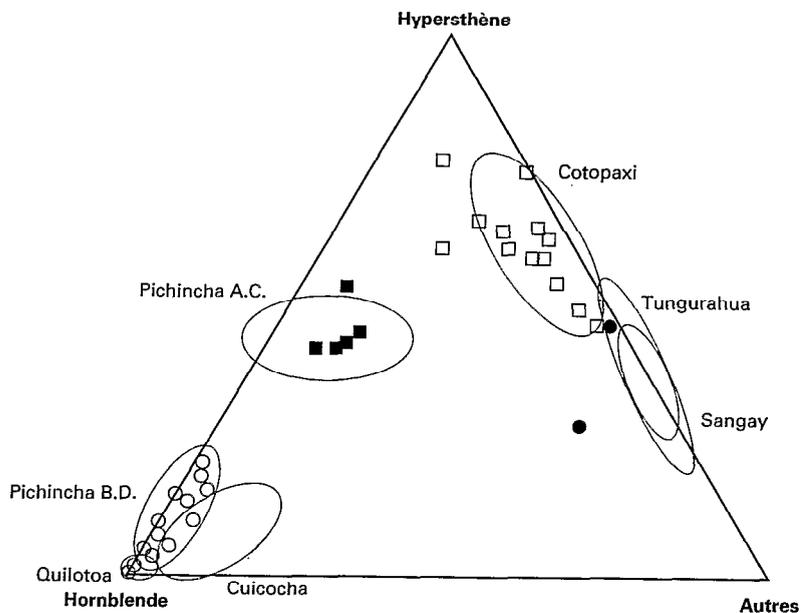


Fig. 10. — Associations minéralogiques des principales nappes de cendres (avec rappel de celles des volcans).  
 Mineralogical composition of the ashes deposits (the circle corresponds to the mineralogical composition of the volcanos).

Pichincha comme l'atteste d'ailleurs l'augmentation graduelle de leur épaisseur sur le transect Quininde - Pichincha.

## CONCLUSION

Les produits émis par le volcanisme pyroclastique quaternaire d'Équateur se composent de deux groupes distincts : les plus anciens proviennent des édifices aujourd'hui éteints et érodés, les plus récents ont été émis par huit volcans encore actifs. L'étude minéralogique des projections de ces derniers a mis en évidence quatre groupes différenciés d'ouest en est : à hornblende dominante,

à association hornblende-hypersthène, augite-hornblende-hypersthène et augite-hypersthène-olivine. Ce zonage se calque sur la migration reconnue de l'activité volcanique de la cordillère occidentale vers le flanc amazonien.

Trois cortèges minéralogiques ont pu ainsi être reconnus dans les nappes de cendres récentes qui recouvrent le centre de l'Équateur et les aires d'influence des volcans les ayant émises ont été délimitées.

Dans la seconde partie de cette étude seront plus spécialement étudiés les problèmes liés à la chronologie de ces événements et à l'évolution paléo-géographique quaternaire.

*Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 15 mars 1994.*

## BIBLIOGRAPHIE

- BALDOCK (J.W.), 1982. — *Geología del Ecuador, Boletín de la explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador, escala 1 : 1 000 000*. DGGM, Inst. og Geol. Sci. Quito, 70 p.
- BARBERI (F.), COLTELLI (M.), FERRARA (G.), INNOCENTI (F.), NAVARRO (J.M.), SANTACROCE (R.), 1988. — Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.*, 125 (1) : 1-14.
- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.), DELAUNE (M.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), MOREAU (B.), 1967 a. — Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques. Première partie : essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides. *Cah. Orstom, sér. Pédologie*, vol. 5 (1) : 3-38.
- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.), DELAUNE (M.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), MOREAU (B.), 1967 b. — Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques. Deuxième partie : conditions de formation et d'évolution. *Cah. Orstom, sér. Pédologie*, vol. 5 (4) : 353-392.
- COLMET-DAAGE (F.), de KIMPE (C.), DELAUNE (M.), SIEFFERMANN (M.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), FUSIL (G.), KOUKOU (M.), 1970. — Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques. Troisième partie : comparaison de l'évolution de quelques sols des régions tropicales chaudes et tempérées froides d'altitude. *Cah. Orstom, sér. Pédologie*, vol. 7 (4) : 495-560.
- COLMET-DAAGE (F.) et al., 1974. — *Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques. Quatrième partie : étude des sols du nord de l'Équateur et de quelques paramos*. Publ. Orstom, Antilles n° 78, 45 p.
- DGGM, 1978. — *Mapa geológico del Ecuador a escala 1 : 50 000, hoja 65NE : Nono, 65 SE : Quito*, Quito.
- DGGM, 1980. — *Mapa geológico del Ecuador a escala 1 : 100 000, hoja 65 : Quito, hoja 67 : Latacunga, hoja 83 : Otavalo, hoja 88 : Baños*, Quito.
- DGGM, IGS (coordinator BALDOCK J.W.), 1982. — *Mapa Geológico Nacional de la República del Ecuador, escala 1 : 1 000 000 (segunda aproximación)*. DGGM, Quito.
- FAUCHER (B.), SAVOYAT (E.), 1973. — Esquisse géologique des Andes d'Équateur - *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 2, vol. XV, fasc. 1-2 : 115-142.
- HALL (M.L.), 1977. — *El volcanismo en el Ecuador* - Quito, Biblioteca Ecuador, IPGH, 120 p.
- HRADECKY (L.), HRADECKY (P.), KRUTA (M.), LYSENKO (V.), MLCOCCH (B.), PAULO (A.), 1972. — *La exploración geológica del volcán Cotopaxi en el Ecuador*. Praga, Instituto Geológico Central, 56 p.
- HUMBOLDT (A. Von), 1853. — Geognostische und physikalische Beobachtungen über die Vulkane des Hochlandes von Quito. *Poggendorffs Ann. Phys. Chem.*, Bd. 40 und Bd. 44 : 161 - 193 et 139 - 219.
- JUVIGNE (E.) and SHIPLEY (S.), 1983. — Distribution of the heavy minerals in the downwind tephra lobe of the May 18, 1980 eruption of the Mount St. Helens (Washington, USA). *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 33 : 1-7.
- LEBRAT (M.), 1985. — *Caractérisation géochimique du volcanisme anté-orogénique de l'Occident Equatorien : implications géodynamiques*. Documents et travaux du C.G.G., Montpellier, n° 5, 118 p.
- PICHLER (H.), HORMANN (P.K.) and BRAUN (A.F.), 1976. — First petrologic data on lavas of the volcano El Reventador (Eastern Ecuador). *Münster Forsch. geol. Paläont.* H 38/39 : 129-141.
- SAUER (W.), 1965. — *Geología del Ecuador, Primera edición castellana* - Quito, 383 p., Editorial del Ministerio de Educación.
- WINCKELL (A.), coord., 1993. — *Los Paisajes Naturales del Ecuador, Estudio de Geografía Física*. Orstom-Cedig-IPGH. Quito (à paraître).
- WOLF (T.), 1892. — *Geografía y Geología del Ecuador - Segunda Edición*. Quito, 798 p. Editorial Casa de la Cultura Ecuatoriana.