

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SOLS D'ÉQUATEUR DÉRIVÉS DE CENDRES VOLCANIQUES

3^e partie

Comparaison de l'évolution de quelques sols des régions tropicales chaudes et tempérées froides d'altitude

F. COLMET-DAAGE* C. de KIMPE** M. DELAUNE*** G. SIEFFERMANN***
J. et M. GAUTHEYROU* G. FUSIL*** M. KOUKOUI***

RÉSUMÉ

Cette troisième partie est consacrée à l'étude des sols d'altitude d'Equateur et fait suite à un essai de caractérisation des sols sur cendres des régions tropicales chaudes (1^{re} partie) et à l'étude des facteurs responsables de la pédogenèse (2^e partie).*

L'examen minéralogique des sables précède une tentative d'explication de la mise en place de ces formations avec recherche des lieux d'émissions.

On retrouve à haute altitude, les sols à allophanes fortement hydratés, identiques à ceux des régions chaudes. Les sols du paramon, très organiques et ceux des zones arides n'ont par contre, pas d'équivalents en régions chaudes.

Les sols cultivés des régions relativement humides de la haute vallée interandine, sont très semblables, par l'ensemble de leurs propriétés, à ceux des zones chaudes tropicales qui, température et végétation exceptée, sont soumis à des conditions comparables d'évolution. Le fait que l'hallowysite dans les sols jeunes d'altitude ne semble pas apparaître sous forme de tubes, comme dans les sols des régions chaudes, n'est pas suffisant pour justifier une distinction pédologique.

Ces études sont étayées par des diffractogrammes de rayons X, des analyses thermiques différentielles, des spectrogrammes d'infrarouge, des clichés de microscopie électronique, les variations de la capacité d'échange de base après divers traitements, les pF, etc.

* Bureau des sols ORSTOM Antilles.

** Université de Louvain, Laboratoire du Professeur FRIPIAT - Belgique.

Station de recherches du ministère de l'Agriculture - Québec - Canada.

*** Lab. de géologie } S.S.C. - Bondy, France.

*** Lab. des argiles } S.S.C. - Bondy, France.

SUMMARY

This third part, concerning the study of soils situated on highlands in Ecuador, is a continuation of an attempt to characterize ash volcanic soils under warm tropical climate (first part) and of the factors governing their pedogenesis (second part).*

A mineralogical study of the sandy fraction will precede an attempt to explain the setting of these formations and the distribution of responsible volcanoes.

On highlands are found very hydrated allophanic soils similar to those described in warm tropical areas. But « Paramon » soils, very rich in organic matter, and soils of arid zone have no equivalent in warm areas.

The cultivated soils of the relatively humid andean high valley have all their characteristics similar to those of soils of warm tropical areas. They are subjected to comparable evolutive conditions, except for vegetation and temperature.

Halloysite does never appear in the form of tubular particle in the soils on highlands. But this does not seem sufficient to justify a pedological distinction.

These studies are supported with numerous results obtained by means of X-ray diffraction, differential thermal analysis, infra-red analysis, electron microscopy, and physico-chemical tests (variations in the values of base exchange capacity after different treatments, pF values, etc.).

ZUSAMMENFASSUNG

Diese analytische Studie des Hochlandböden von Equator folgt einem Identifizierungsversuch der Aschenböden der warmen Tropengebiete (1. Teil), und einer Studie des hauptsächlich bodenbildenden Faktoren dieser Gegen (2. Teil).

Nach mineralogischen Untersuchungen des Sandfraktionen versuchen man die Bildung der verschiedenen Aschenformationen, nach den respectiven Eruptionszentren zu kennzeichnen.

Die Allophanböden mit starkem Wassergehalt des Hochlandes gleichen sehr denen des tiefergelegenen wärmeren Gebiete. Die Boden des trockenen Zonen und die stark organischen « Paramonböden » finden sich hingegen nur in Höhenlagen.

Die bebauten Böden der relativ feuchten Gegenden der interandinen Hochtäler ähneln sehr, durch die Gesamtheit ihrer Eigenschaften, denen der warmen Tropenzone; Temperatur und Vegetation ausschliessend, sind die ähnlichen Entwicklungsbedingungen unterworfen.

Die Tatsache, dass das Halloysite des Hochlandböden nicht röhrenförmig erscheint, wie in den warmen Gebieten, ist nicht ausreichend, um eine pedologische Unterscheidung zu rechtfertigen.

Diese Studien sind unterstützt durch Röntgenprüfungen, thermische Analysen, Infrarotspektroskopien, Elektronenmikroskopien und physico-chemische Messungen (Austauschkapazität nach verschiedenen Behandlungen, pF, usw.).

* La première et la seconde partie de cette étude ont paru respectivement dans les Cahiers ORSTOM, série pédologie, vol. V, n° 1 et n° 4, 1967.

PLAN

1. INTRODUCTION

2. GÉOLOGIE

- 2.1. Généralités
- 2.2. Variation de la composition des produits rejetés
- 2.3. Nature minéralogique des sables
- 2.4. Conclusion

3. CLIMAT

- 3.1. Température
- 3.2. Pluviométrie

4. SOLS A ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS D'ALTITUDES

5. LES SOLS DES HAUTES ALTITUDES - PARAMON

6. LES SOLS DES RÉGIONS RELATIVEMENT HUMIDES DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE

7. LES SOLS DES RÉGIONS SÈCHES DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE

8. LES SOLS DES RÉGIONS ARIDES DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE

9. COMPARAISON DES SOLS DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE AVEC CEUX DES RÉGIONS CHAUDES TROPICALES DE BASSE ALTITUDE

10. CONCLUSION

1 - INTRODUCTION*

Dans une première partie, on a essayé de caractériser certains types de sols des régions tropicales chaudes. Dans une deuxième partie, ces sols ont été replacés dans leur milieu environnant, afin de pouvoir mieux dégager les facteurs qui influent sur leur formation et leur évolution.

Dans la troisième partie, on insistera surtout sur les sols des hautes altitudes, en établissant quelques comparaisons avec les sols des régions tropicales chaudes qui s'en rapprochent le plus.

Les études de terrain ont été complétées en août 1966, à l'occasion d'une mission due à l'initiative du Directeur Régional de l'IFAC et grâce à la collaboration de la Direction Nationale de la Banane, du ministère de l'Agriculture, de l'Université de Quito et, en particulier, de MM. les Ingénieurs F. CUCALON, F. DIAZ, FAUSTO MALDONADO, CACERES... dont les conseils sur le terrain nous furent une aide précieuse.

Les analyses chimiques ont été exécutées par J. et M. GAUTHEYROU au laboratoire du Centre ORSTOM des Antilles. Les examens des argiles, aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle, ont été faits par G. FUSIL et M. KOUKOUÏ au laboratoire de l'ORSTOM en France, sous la direction de M. PINTA. Les sables ont été examinés par M. DELAUNE au laboratoire de géologie de l'ORSTOM. C. DE KIMPE s'est chargé de la spectrographie infrarouge et de son interprétation à la Station de Recherches du Ministère de l'Agriculture du Canada à Québec et de certains examens au microscope électronique à l'Université de Louvain en Belgique. G. SIEFFERMANN a exécuté au laboratoire du Professeur MILLOT, à l'Université de Strasbourg, la plupart des clichés de microscopie électronique.

2 - GÉOLOGIE

2.1 - GÉNÉRALITÉS

Deux chaînes parallèles orientées nord/sud, jalonnées de nombreux volcans dont plusieurs dépassant 5 000 m d'altitude, enserrant la haute vallée interandine d'une largeur de 30 à 40 km. Cette haute vallée est séparée par l'accumulation des matériaux volcaniques en « fosses » indépendantes qui débouchent vers l'Atlantique ou le Pacifique.

Ces deux cordillères sont couvertes au nord du 2^e parallèle de latitude sud, de cendres et lapillis quaternaires. L'épaisseur des dépôts quaternaires est particulièrement importante dans les vallées où l'érosion et les glaciations anciennes ont creusé, dans ces matériaux peu consolidés, de très profonds ravins. Ces remaniements importants permettent difficilement d'expliquer les processus de sédimentation durant le quaternaire, pendant lequel l'activité volcanique se déplaça d'ailleurs de la chaîne occidentale vers la chaîne orientale. Seuls, quelques niveaux de tufs durcis, nommés « cangagua » ont été datés, grâce à la présence de boules sphériques attribuées à un scarabée identifié.

* Nos remerciements vont à MM. SÉGALEN et COMBEAU qui ont bien voulu relire ce texte et nous faire part de leurs observations.

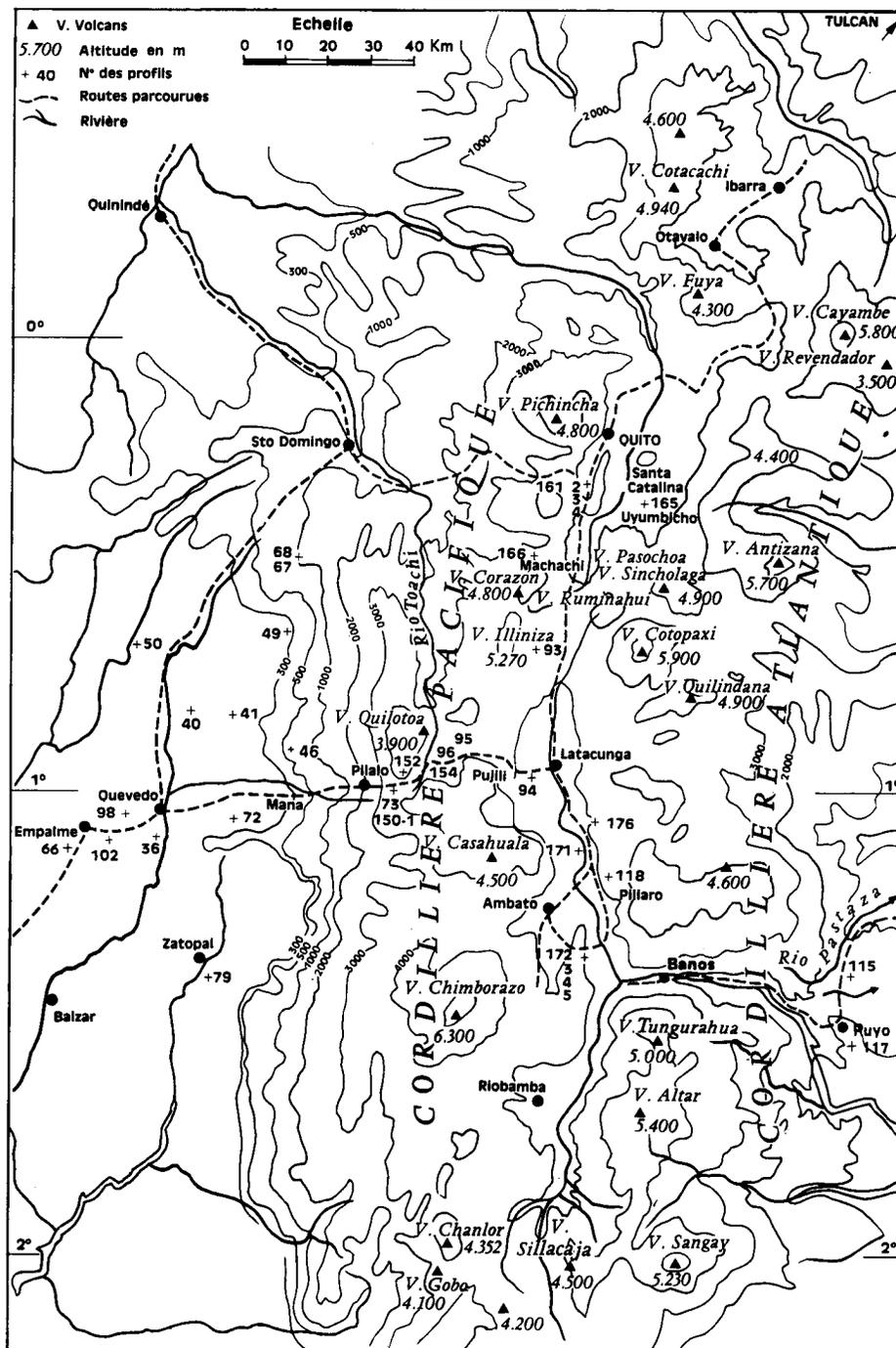


FIG. 1. — Situation des profils.

2.2 - VARIATION DE LA COMPOSITION DES PRODUITS REJETÉS

Quatre volcans ont donné lieu à des manifestations volcaniques récentes. Ils sont situés le long de la cordillère orientale, deux au sud : le Tungurahua et le Sangay, un autre au centre près de Quito : le Cotopaxi, le dernier au nord : le Revendador. Les deux volcans les plus éloignés, le Sangay et le Revendador, bordent la plaine amazonienne. Ils envoient encore, de temps en temps, de petites couches de cendres.

Les émissions les plus récentes de ces volcans ont nettement un caractère basique, alors que les immenses dépôts de cendres volcaniques qui ont recouvert les plaines pacifiques chaudes, ainsi qu'une grande partie de la vallée interandine, sont dacitoides.

Ce passage dans le temps des laves acides à des laves basiques, semble en contradiction avec les observations faites sur les volcans des Hawaï. La première phase connue des volcans hawaïens serait caractérisée par des laves très basiques, basaltes à olivine ou picritiques, qui s'étendent au loin, formant le bouclier classique de ces volcans. A la suite de la différenciation, par gravité dans la magma, des éléments les plus lourds, olivine et pyroxène, qui tendent à descendre et des éléments les plus légers, sanidine, etc. qui s'élèvent, les produits rejetés deviennent de plus en plus acides. Cette différenciation étant très lente, peu de volcans hawaïens en sont déjà au stade andésitique. (ROUTHIER - 1965)

Certains paramètres caractéristiques des volcans du Pacifique, en dépit de la variation de composition des produits rejetés au cours du temps, ont permis de distinguer la série intrapacifique, où les volcans émettent surtout des produits très basiques, plus rarement andésitiques. Ces produits basiques seraient issus du sima profond des océans. Une série circum-pacifique qui comprend certaines parties des îles indonésiennes et de la chaîne andine de l'Amérique du Sud, correspondrait à des émissions plus acides de type andésitiques.

A l'intérieur d'une ligne dite « andésitique », les volcans seraient donc de type basaltique pour la plupart, et à l'extérieur de cette ligne, de type andésitique. Pour RITTMANN (1953) et VENING MEINESZ (1950) qui ont étudié surtout les volcans de l'Insulinde, une boucle du Sial s'enfoncerait dans le sima profond, tout au long de cette ligne andésitique, nommée encore : ligne « siallitique ». Cette ligne se déplacerait du nord au sud dans l'axe indonésien, comme une onde d'orogénèse. En s'enfonçant dans le sima profond fluide, le sial est fondu, digéré par palingénèse et assimilé. Ce magma contaminé, enrichi en silice est à l'origine des produits plus acides, andésitiques ou dacitiques rejetés par les volcans. Les volcans situés sur le front d'avance de la ligne siallitique, seraient les plus acides. Par contre, ceux situés plus au nord, dans des régions déjà dépassées par l'« onde siallitique » redeviendraient plus basiques, la trace de la précédente boucle d'enfoncement du sial se résorbant progressivement et la contamination du sima par le sial diminuant, de ce fait, d'importance. (ROUTHIER - 1965)

Ces hypothèses sont, en partie, reprises par SAUER (1965) pour expliquer le passage dans les Andes d'Equateur du volcanisme de type andésitique ou dacitique de la chaîne pacifique au pléistocène, au volcanisme basique récent et actuel de la chaîne atlantique, face à l'Amazonie. La Cordillère Atlantique constituée de roches métamorphiques précambriennes (souvent recouvertes de matériaux volcaniques quaternaires) est beaucoup plus ancienne que la cordillère pacifique, constituée de matériaux volcaniques intercalés dans des sédiments marins créacés et tertiaires.

Pour SAUER, il y aurait eu, au contact du bouclier continental sud américain, par le jeu des frictions de l'écorce terrestre, glissement du sial sous ces masses dures et enfoncement jusqu'à des profondeurs où la fusion peut se produire. La palingénèse qui accompagne cet enfoncement oblique du sial se serait produite sous la cordillère pacifique, expliquant ainsi le caractère de type « siallitique » des produits (andésites, dacites) expulsés par les volcans de cette chaîne et les matériaux plus basiques, moins « contaminés »

par le sial, plus directement issu du sima profond, à travers de longues cheminées formées dans des fissures de volcans de la chaîne Atlantique, plus ancienne et mieux consolidée.

D'autres explications peuvent être données. C'est ainsi que dans l'hypothèse de la différenciation magmatique, il est possible qu'après avoir émis les laves acides, qui surnagent dans le magma, le réservoir se vide de haut en bas, donnant des laves de plus en plus basiques. De même, on explique l'apparition, souvent en discontinuité de magmas acides par effondrement du sial, qui constitue le toit du réservoir dans le magma basaltique fluide profond avec palingénèse, puis émission de laves acides contaminées.

Il peut arriver aussi qu'après une différenciation magmatique prononcée, la cheminée se bouche et qu'une formidable explosion ou des cratères latéraux, rejettent dans l'atmosphère les parois plus acides du cratère. D'énormes cratères béants témoignent que de telles explosions se sont vraisemblablement produites en Equateur. Signalons, au siècle dernier, l'explosion au Nicaragua du volcan Cosiguine qui perdit 1 000 m d'altitude.

Il semble, cependant, que si ces hypothèses peuvent expliquer certains « accidents » survenant au cours de l'activité d'un volcan, le phénomène plus général constaté en Equateur pour une série de volcans situés à des distances relativement éloignées, est mieux en relation avec les hypothèses de SAUER qui rejoignent celle d'une boucle sialitique dont le déplacement serait ici limité, à la différence de l'Insulinde, par les masses consolidées ou cratons du bouclier sud américain.

2.3 - NATURE MINÉRALOGIQUE DES SABLES

La fraction des sables supérieure à 35 microns a été étudiée (M. DELAUNE) selon les méthodes préconisées par S. DUPLAIX (1958). Etant donnée la composition homogène des cendres et le peu d'espèces représentées, seule la fraction 50 à 500 microns a été finalement retenue. La fraction légère renferme les minéraux de densités inférieures à celle d'une liqueur lourde (bromoforme) de densité 2,89 ; la fraction lourde comprend les minéraux ayant une densité supérieure.

Si, à notre connaissance très peu d'informations concernent les cendres des volcans d'Equateur, par contre la composition des laves des divers volcans a fait l'objet d'études antérieures et en particulier, de SAUER (1965).

Est-il possible de rattacher la composition des cendres à celle des laves des volcans environnants ? Cendres et laves doivent avoir sensiblement la même composition. En Martinique, d'après LACROIX, la composition des divers produits rejetés lors d'une éruption par le volcan, sous des formes variées : cendres, ponces, brèches... est très constante.

Le problème est rendu beaucoup plus complexe en Equateur par le grand nombre des centres d'émission. Les cendres qui recouvrent les piedmonts de certains volcans peuvent avoir, en fait, été rejetées par des volcans voisins, plus récemment actifs. En altitude, **l'érosion sur les pentes accentuées**, recouvertes d'une faible végétation, due au climat relativement sec, a entaillé de profonds ravins. On ne peut souvent savoir si telle succession de dépôts observée correspond bien à telle autre située à quelque distance. Dans les plaines tropicales, la sédimentation des cendres sur les plateaux ou les zones peu accidentées, a lieu sous forêt dense ; l'érosion est très faible et la succession des couches, comme nous l'avons vu dans la deuxième partie, est remarquablement constante, souvent à des dizaines de km de distance.

Lorsque les produits émis par divers volcans voisins viennent se superposer la composition doit, en principe, peu varier s'il s'agit d'éruptions sensiblement du même âge. Par contre, un volcan actif récent, peut avoir fort bien rejeté des produits basiques sur les flancs d'un ancien volcan de type andésitique acide

ou dacitique. De nos jours, les cendres des volcans Revendedor ou Sangay vont jusqu'à Quito et même parfois jusqu'à Guayaquil, mais en épaisseur relativement faible.

En dépit de ces restrictions, il est probable que des examens de sables plus nombreux que ceux que nous présentons ci-dessous, devraient pouvoir délimiter les grands secteurs de nature minéralogique sensiblement constante, sans qu'il soit toujours possible d'en indiquer l'origine.

2.3.1 - Région d'Ambato

Un profil a été observé à 4 km au sud d'Ambato, sur une pente régulière. On peut en donner la description schématique suivante : (cf. tableau 1).

TABLEAU 1

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES AU SUD D'AMBATO

Prof. cm	DESCRIPTION	Sables % sol		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE			Horn- blende	N° Echant.	
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds				
					Pondé- ral % sables	Hyper- sthène			Augite
0 — 30	Cendre très fine	39	36	90 % des sables sont altérés	11,2	87	6	7	E 172a
70 — 100	humifère Ponce beige pure	41	19		10,4	76	11	13	E 172b
105	Cendre très noire et très fine			Fins minéraux dont 80 % sont altérés. Quelques verres volca- niques	10,5	72	15	13	E 173
150	Limite brutale Cangagua. Cendre consolidée brune uni- forme, dure au mar- teau. Blocs à tendance subangulaire avec revê- tements et taches noires. Gros pores visibles			Altération modérément poussée. 50 % des plagioclases sont altérés	10,5	47	9	44	E 174

D'après SAUER (1965), les amphiboles seraient, en Equateur, les minéraux lourds les plus abondants dans les laves andésitiques les plus acides, tandis que les pyroxènes l'emporteraient dans les séries les plus basiques.

On observerait donc, dans ce profil, les manifestations d'un volcanisme récent basique, donnant des matériaux riches en hypersthènes, augite et pauvres en hornblende. Par contre, l'ancien sol enfoui ou tuf durci « cangagua » refléterait des manifestations anciennes plus acides, avec une proportion de hornblende verte et d'hypersthène très voisine.

La même succession s'observerait sur un vaste plateau en pente douce et intensément cultivé, au nord d'Ambato et du Rio Patate, près de Pillaro (cf. tableau 2).

TABLEAU 2

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES AU NORD D'AMBATO (Pillaro-Profil E 118)

Prof. cm	DESCRIPTION	Sables % sol		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE					N° Ech.	
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds					
					Pondé- ral % sables	Hyper- sthène	Augite	Horn- blende		Epi- dote
0	Sable limoneux, po- reux, humifère, terreau	27	7	90 % sont très altérés et indéterminables, pla- gioclases, rares verres	10	71	10	18	2	E 118a
25	Très noir avec blocs de cangagua anguleux et revêtements luisants	32	7	90 % sont altérés mais un peu moins qu'en surface	11	41	18	41	0	E 118b
50	Cangagua dure bru- nâtre à taches noires									

Le dépôt supérieur serait nettement plus basique, riche en hypersthène que le niveau sous-jacent, qui dérive en grande partie de la cangagua plus ou moins défoncée par les labours ou la désagrégation naturelle.

Est-il possible de savoir d'où proviennent ces dépôts de cendres ?

Le volcan Chimborazo, sur la cordillère Pacifique, le plus haut de l'équateur avec ses 6 300 m d'altitude, est un volcan démantelé sur lequel s'est greffé un volcan plus récent. La composition des laves est du type andésite à pyroxènes et amphiboles, avec des termes de passage vers les andésites, plus riches en amphiboles.

Les volcans situés sur la cordillère atlantique sont plus basiques. Ainsi, le volcan Sangay (5 230 m) a surtout émis des andésites basiques à pyroxènes et olivine. Son activité a été ininterrompue jusqu'au ter-

rible tremblement de terre de 1949. Les produits de ses dernières émissions s'apparentent aux basaltes feldspathiques, avec un contenu en silice dans la lave la plus récente, de seulement 51,4 %. Il est fort possible que les niveaux supérieurs des sols décrits ci-dessus, proviennent ou aient été contaminés par les cendres de ce volcan.

Plus au nord, le volcan Altar (5 320 m) est constitué de matériaux andésitiques à pyroxènes, faisant partiellement transition vers les basaltes. Une coulée de basalte vient confirmer cette observation.

Le volcan actif Tungurahua (5 020 m), le plus proche des profils observés, a eu de nombreuses éruptions aux époques historiques. Le cône est constitué d'andésite à pyroxènes, avec des très faibles teneurs en olivine. Une coulée est, cependant, l'indice d'une tendance à la transition vers les basaltes. La cheminée de ce volcan se serait formée dans une faille au travers des roches cristallines de la cordillère Atlantique qui ont été directement recouvertes par les produits pyroclastiques (SAUER).

Un niveau de cendres scoriacées très grossières, de 2 à 3 mm, avec des morceaux de 1 cm, a été observé à proximité de ce volcan et d'Ambato. Ces cendres scoriacées renferment surtout des pyroxènes. Le pourcentage des minéraux lourds dans les sables est important : 25 %. Parmi les minéraux lourds, l'hypersthène représente 70 %, l'augite 28 %, la hornblende verte 2 %. Les plagioclases des minéraux légers sont altérés à 50 % et il n'y a pas de quartz. Ces scories témoignent d'éruptions assez violentes et récentes.

Conclusion — Il est possible de penser que la composition minéralogique des cendres de ces deux profils correspond bien à l'évolution observée des volcans environnants. A un tuf ou sol fossile durci « cangagua », de nature relativement acide, qui dériverait d'émissions régulières des volcans de la cordillère Pacifique, auraient succédé les formations récentes, de type plus basique, des volcans actuels de la cordillère Atlantique.

2.3.2 - Région centrale Latacunga - Quito

Les observations sont parfois rendues plus délicates par la sécheresse ou l'aridité de certaines régions. L'érosion par le vent et le ruissellement sur ces terrains dénudés est extrêmement intense. L'éloignement des volcans actuellement les plus actifs contribue aussi à rendre les successions moins évidentes.

La composition minéralogique des cendres diffère nettement de celle des profils examinés plus au Sud. D'une façon générale, la hornblende est plus abondante, indiquant des matériaux moins basiques, mais les niveaux profonds sont au contraire plus riches en hypersthène.

2.3.2.1 - A mi-distance entre Ambato et Latacunga, la proportion de hornblende est déjà importante dans les niveaux de cendres très fine, qui recouvrent la cangagua des plateaux (profil E 171 - Tableau 3). Plus au Nord, la proportion de hornblende augmente encore, mais le niveau profond de cangagua renferme davantage d'hypersthène (Profil E 176 - Tableau 3).

2.3.2.2 - Au nord de Latacunga, sur les pentes du volcan Cotopaxi, vers 3 500 m d'altitude, la hornblende disparaît complètement. Sous les touffes d'herbes du paramon, ou prairie des hautes altitudes, le profil comporte 30 cm de cendres noires, assez grossières, puis plusieurs mètres de ponce blanche presque pure, avec des morceaux de 0,5 à 2 cm, dont certains bancs alternent, par endroits, avec des sols noirs cendreux enterrés. L'hypersthène et l'augite sont les minéraux lourds les plus abondants dans les cendres et les matériaux ponceux (Profil E 93 - Tableau 4).

Par leur texture et leur composition, ces projections sont très semblables à celles des pentes de la Montagne Pelée à la Martinique, où l'hypersthène représente souvent plus de 90 % des minéraux lourds.

TABLEAU 3

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES ENTRE LATACUNGA ET AMBATO

Prof. cm	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE				
		50 à 200 μ	200 à 2000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds			
					Pondéral (%) sable	Hypersthène	Augite	Hornblende verte
<i>PROFIL E 171. Km 19 de Latacunga vers Ambato</i>								
0	Sable sur niveau un peu limoneux.	34	19	Minéraux très fins, dont 80 % sont altérés	10	63	3	35
40	Très meuble							
<i>PROFIL E 176. Km 10 de Latacunga vers Ambato</i>								
0	Sable fin très meuble	44	36	60 % de minéraux altérés assez grands	11	50	6	44
50	Cendre brune très fine	41	13	Minéraux de taille moyenne peu altérés	8,4	43	8	49
130	Limite brutale avec croûtes calcaires, Cangagua, Cendre durcie			Minéraux fins 80 % sont en cours d'altération	10	70	10	20

TABLEAU 4

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES DANS LE PARAMON DE COTOPAXI

Profond. en cm	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES						
		50 à 200 μ	200 à 2000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds					
					Pondéral % sable	Hypersthène	Augite	Hornblende	Epidote	Divers
0	Cendre grossière noire	29	40	Feldspaths calcosodiques très altérés, bariolés	12	52	18	0	14	16
35	Ponce pure			Complètement altérés	4	76	24	traces		

2.3.2.3 - Entre le paramon du Cotopaxi et Quito, plus au Nord, on retrouve dans la vallée, des formations plus riches en hornblende.

Près d'Uyumbicho, sur une pente régulière cultivée du centre de la vallée, les sols sont profonds et uniformes, avec une proportion voisine d'hypersthène et de hornblende.

Les feldspaths sont nettement plus altérés en profondeur qu'en surface. S'agit-il de recouvrements par des apports plus récents ou simplement d'une altération plus poussée des minéraux en profondeur sous l'action d'une humidité plus constante dans ces niveaux tout au long de l'année (Tableau 5) ?

TABLEAU 5

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES AU SUD DE QUITO - UYUMBICHO - E 165

Profond. cm	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE				
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds			
					Pondéral % sables	Hyper- sthène	Augite	Horn- blende
0 40	Limono-sableux Meuble			90 % des feldspaths sont altérés, quelques verres	12	42	11	47
80	Plus foncé avec un peu d'argile	22	18	Altération plus pous- sée	11,7	53	7	40
120		21	21	Altération très pous- sée.	10,8	52	10	38

2.3.2.4 - Plus en altitude, mais à l'Ouest sur les pentes du volcan Corazon, la composition minéralogique des sables est sensiblement analogue dans le premier mètre. Vers 1 m de profondeur, la cendre devient beaucoup plus noire et la proportion d'hypersthène augmente très fortement.

Vers 130 cm, c'est la ponce grossière, beige clair, dont certains éléments atteignent 2 à 3 cm. Elle semble à peine altérée.

Vers 160 cm, on retrouve un niveau de cendre sableuse, puis un niveau plus noir au-dessus d'une nouvelle couche de ponce pure, beige-jaune clair.

La succession : cendre humifère, cendre très noire, ponce pure, etc. plusieurs fois répétée, semble la règle sur ces pentes (Profil E 166 - Tableau 6).

Ce changement de coloration et surtout de composition minéralogique permet de penser à une discontinuité dans la sédimentation. Il est certain que la composition du niveau profond, au-dessus de la ponce, se rapproche beaucoup des cendres noires du Cotopaxi. Y a-t-il eu modification de la composition des cendres en cours d'éruption d'un même volcan ? Y a-t-il eu recouvrement aérien par des cendres issues d'autres volcans plus acides et plus récents ? Y a-t-il eu seulement recouvrement par des cendres apportées par le ruissellement, ou le vent, à partir de formations plus anciennes, riches en hornblende, situées plus en altitude ? Il n'est pas facile de répondre encore à ces questions.

TABLEAU 6

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES DU PARAMON DU CORAZON - E 166

Profond. cm	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES				
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers	Minéraux lourds			
					Pondéral % sables	Hyper- sthène	Augite	Horn- blende
0	Cendre Sableuse			Altération très poussée - rares feldspaths non altérés	12	51	3	46
50		25	16	Altération encore plus poussée	11,5	34	7	59
100	Transition rapide Cendre très noire			Idem	12	74	12	14
130 160	Limite brutale Ponce pure grossière							

2.3.2.5 - Près de Quito, à Santa Catalina, on observe sur plusieurs mètres des alternances de cendres noires et de ponce beige-jaune clair. Ce n'est qu'en profondeur qu'apparaît la cangagua, brun foncé, très dure quoique relativement poreuse.

L'examen minéralogique montre l'alternance de niveaux plus ou moins riches en hypersthène (Tableau 7).

2.3.2.6 - DISCUSSION - RELATION ENTRE LA COMPOSITION DES SABLES ET CELLE DES LAVES DES VOLCANS ENVIRONNANTS

Les successions semblent plus complexes que dans la région d'Ambato. Rappelons que, dans cette région, des formations récentes à hypersthène issues des volcans proches, avaient recouvert des sols fossiles ou « cangagua », plus riches en hornblende.

Dans les plaines au sud et au nord du volcan Cotopaxi, entre Ambato et Quito, les cendres superficielles renferment une proportion sensiblement équivalente de hornblende et d'hypersthène, la cangagua profonde paraissant plus riche, par contre, en hypersthène, contrairement à ce qui fut observé au Sud d'Ambato.

Les cendres et les ponces grossières du paramon du Cotopaxi, qui sépare ces plaines, sont, au contraire, très riches en hypersthène et dépourvues de hornblende, ressemblant, en cela, aux émissions de texture et d'aspect analogue de la Montagne Pelée en Martinique.

Est-il possible, comme dans la région d'Ambato, de comparer la composition minéralogique des sables des profils observés, à celle des laves des principaux volcans environnants d'après SAUER (1965) ?

TABLEAU 7

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES AU SUD DE QUITO-SANTA CATALINA

Profond. cm	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES				
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers	Minéraux lourds			
					Pondéral % sables	Hyper- sthène	Augite	Horn- blende
280	Ponce pure, peu altérée							
	Sableux, cendre noire			80 % des plagioclases sont altérés. Un peu de verre	11,3	67	12	21
350	Ponce pure pourrie							
380	Cendre fine, onctueux	20	28	Idem, mais moins de verre.	11,1	40	19	40
480	Limite brutale Cangagua brun foncé, très dur.			Minéraux très petits, 85 % sont altérés.	9,4	60	14	24

2.3.2.6.1 - Volcans de la Cordillère Atlantique (SAUER)

Seul, le volcan Cotopaxi (5 900 m) est actif dans cette région. Après une série d'explosions anciennes, sans doute formidables, qui ont rejeté des matériaux andésitiques à amphiboles et pyroxènes, un nouveau cône se serait constitué. Plusieurs éruptions récentes (1854-1877) auraient déposé sur le versant occidental d'énormes masses de laves andésitiques basiques à pyroxène et olivine. La lave qui borde le flanc Sud-Ouest du cratère, serait une andésite à pyroxène. Les échantillons de laves un peu moins récentes, auraient une composition semblable. A des projections relativement riches en hornblende, auraient donc succédé dans les époques récentes, des matériaux riches en pyroxène, ce qui cadre bien avec les examens des sables.

Le volcan Quilindana (4 900 m) situé au sud-est du Cotopaxi, aurait émis surtout des andésites à pyroxènes.

Au nord du Cotopaxi, toujours sur la Cordillère Atlantique, les volcans Pasochoa et Ruminahui ont rejeté des laves et des cendres basaltiques, renfermant un peu d'olivine, mais l'andésite à pyroxène constitue la masse principale de ces volcans.

Près de ceux-ci, le volcan Sincholaga (4 900 m) présente des andésites qui, quoique à pyroxènes, renferment des teneurs relativement importantes en silice (59 %). On trouve, dans la caldeira, des débris à la fois dacitiques et basaltiques. Le cône du volcan Antizana (5 700 m), plus près de l'Amazonie, serait formé d'andésite à pyroxènes basiques avec olivine et hypersthène, tandis que des bouches latérales auraient émis des dacites à amphiboles.

A proximité de l'ancien volcan Cayambe (5 800 m), où prédominent les andésites à amphiboles et les dacites, le volcan Revendador (3 500 m), tout en bordure de la plaine amazonienne, est encore très

actif. Au cours de ses dernières éruptions de 1926, 1944 et 1960, il a rejeté des basaltes à olivine. Les cendres recueillies à Quito, lors de l'éruption de 1960, ont, d'après REIN cité par SAUER, la composition suivante, en % approximatif du volume :

Matériaux opaques (magnétite ? ou verre)	25 à 35 %
Verre basaltique avec microlites	45 à 55 %
Plagioclases	15 à 25 %
Olivine	3 à 7 %
Hornblende verte	1 %
Hornblende brune	0,1 %

Bien que les matériaux à pyroxènes semblent donc les plus abondamment rejetés par les volcans de cette partie de la Cordillère Atlantique, les andésites à amphiboles et les dacites apparaissent aussi. La composition moins constamment basique que pour les volcans au Sud d'Ambato, peut expliquer les variations observées dans la composition des sables.

2.3.2.6.2 - Volcans de la Cordillère Pacifique

Les quatre anciens volcans de la Cordillère Pacifique seraient surtout constitués d'andésite à pyroxènes. C'est le cas de l'Atacazo (4 500 m) où l'olivine est parfois rencontrée, mais aussi les amphiboles et, dans quelques zones, les dacites.

Auprès du Corazon (4 800 m), un petit volcan parasite aurait émis des andésites à pyroxènes, sans que les variétés à amphiboles apparaissent. Il ne serait donc guère possible d'y attribuer les horizons du profil E 166, observé sur les pentes même du paramon du Corazon.

Les aiguilles de l'Illiniza seraient les vestiges d'un volcan à andésite à pyroxène, avec des passages vers les andésites à amphiboles. Les phases ultimes auraient été dacitiques.

Le Guaguapichincha, qui domine Quito de ses 4 700 m, serait formé d'andésites à pyroxènes, qui ont été suivies par des andésites à amphiboles et pyroxènes de caractère plus acide.

La plupart de ces volcans de la Cordillère Pacifique sont donc de type plus acide, au moins dans leur phase terminale, que ceux de la Cordillère Atlantique. Ils sont tous éteints, à l'exception du Pichincha, d'où sortent quelques fumerolles.

A ces volcans pacifique, il faut ajouter le Quilotoa (3 900 m), situé le plus à l'Ouest, à la hauteur de Latacunga, près du Rio Toachi. Ce volcan se serait édifié à la fin du pléistocène, avec une dominance de laves et de cendres acides dacitiques à amphiboles et biotites. La gigantesque caldeira de 3 km de diamètre, laisse penser que l'activité finale de ce volcan a consisté en une gigantesque explosion qui projeta dans l'atmosphère la plus grande partie du cône. Les matériaux pyroclastiques rejetés sur les versants de la Cordillère, ne semblent pas très épais. Ils ont, sans doute, été entraînés par l'érosion dans les vallées. Le Rio Toachi coule ainsi au fond d'un impressionnant ravin. Il est aussi permis de penser que les cendres dacitoïdes à hornblende qui ont recouvert, de façon homogène, sur des dizaines de km de distance, une large partie de la plaine tropicale Pacifique de Quevedo - Sto Domingo - Quinindé, pourraient provenir de ce volcan et de volcans semblables.

C'est ainsi que, face au Pacifique, vers 2 800 m d'altitude, au-dessus de Pilalo, le niveau le plus récent d'un profil observé, renferme surtout de la hornblende (91 %), alors que les niveaux profonds sont plus riches en hypersthène (tableau 8).

C'est aussi la première fois qu'apparaît le quartz en quantité importante.

TABLEAU 8

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES A 2 800 M D'ALTITUDE SUR LE VERSANT PACIFIQUE

Profond.	DESCRIPTION	Sables		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SABLES					N° Echant.
		50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Minéraux légers		Minéraux lourds			
				Quartz	Plagio- clases	Hyper- sthène	Augite	Hornblende Verte et brune	
0	Cendre fine								
20	Cendre grossière			40	60	6	0	91	73 b
50	Cendre fine humifère allo- phanique	21 23	17 13						
120	Cendre jaune allophanique	24	17	33	67	23	0	70	73 c
220									
300	Allophane hydratée	8	4	6	94	24	4	67	73 x

On peut donc penser qu'à des matériaux riches en hypersthène, qui constituent la cangagua de Latuncaga et de Quito ou de certains niveaux inférieurs du Corazon, auraient succédé, peut-être à la suite de formidables explosions de volcans de la chaîne Pacifique, comme le Quilotoa, des formations superficielles plus riches en hornblende.

2.3.3 - Comparaison de la nature minéralogique des sables des régions tropicales et tempérées

On ne peut attribuer à une origine commune les dépôts riches en hornblende de la vallée interandine et ceux de la plaine tropicale Pacifique. Les premiers ne renferment pas de quartz, les seconds en contiennent de façon notable ou importante (cf. 2^e partie). Malheureusement, on ne possède pas d'indications sur la composition minéralogique des sables des sols situés au Nord de Quito.

Assez paradoxalement, au premier abord, les sables des sols dérivés de cendres de la plaine tropicale Pacifique seraient souvent très nettement moins altérés, moins bariolés, mieux identifiables, surtout en ce qui concerne les minéraux légers, que ceux de la haute vallée interandine. Rappelons aussi les débris anthropologiques très fréquemment rencontrés sur plus de 100 km de distance, vers 1 m de profondeur, juste au-dessus de l'horizon humifère d'un ancien sol enterré de la plaine tropicale Pacifique. Les épais dépôts riches en hornblende de la plaine de Quevedo - Sto Domingo - Quinindé n'auraient donc que quelques millénaires au plus.

Situés sous un climat bien moins agressif, les dépôts de cendres de la vallée interandine, comprenant les cendres et ponces du Cotopaxi, et les cendres noires qui recouvrent les diverses cangagua, seraient donc beaucoup plus anciens.

L'ancienneté relative des dépôts de la vallée interandine, comparée à ceux des plaines tropicales Pacifique, pourrait s'expliquer de plusieurs façons. On peut imaginer des volcans de la Cordillère Pacifique

ayant exclusivement rejeté, peut-être par de fortes explosions, leurs produits riches en amphiboles, vers les plaines tropicales du Pacifique. On peut aussi penser que les cendres déposées dans les régions modérément accidentées, sous forêts tropicales, restent en place. Sur les pentes dénudées de la haute vallée interandine, par contre, les cendres seraient rapidement décapées par les eaux et le vent, qui auraient mis à jour les dépôts beaucoup plus anciens actuellement observés. Cette dernière hypothèse est certainement applicable aux sols de la vallée interandine, qui reposent sur ce niveau durci ou cangagua, situé à faible profondeur. Elle est plus difficile à concevoir pour les dépôts successifs bien réguliers de cendres et de ponces comme ceux des pentes du Cotopaxi ou du Corazon. Même dans ce cas, il n'est cependant pas impossible que les dépôts actuellement les plus superficiels, aient été mis à nu à des époques relativement récentes. Or, dans ces matériaux perméables, l'altération peut se produire simultanément sur une épaisseur considérable. Les niveaux les plus profonds, les plus anciens et souvent les plus humides ont des chances d'être les plus altérés.

La meilleure façon de prouver la plus grande jeunesse des dépôts de la plaine tropicale Pacifique, liée à une nature dacitoïde, (avec quartz, hornblende et parfois sanidine) plus accentuée que dans la vallée interandine, serait de trouver les centres d'émissions.

Une étude plus serrée de la composition des cendres rejetées sur les flancs du paramon de la cordillère Pacifique, par des volcans comme le Quilotoa et d'autres aussi, sans doute, devrait aider à résoudre ce problème.

2.4 - CONCLUSION

Quelques lignes générales apparaissent déjà.

Le caractère résolument basique des émissions actuelles des volcans Tungurahua, Sangay et des anciens volcans du sud de la cordillère Atlantique, expliquerait la richesse en pyroxène des sables, non seulement dans cette région de la haute vallée interandine, mais aussi dans la plaine tropicale amazonienne, où les sols à allophanes hydratés renferment surtout, dans leur fraction sableuse, l'hypersthène et l'augite sans quartz. De même, dans la plaine tropicale Pacifique, sensiblement à la même latitude, les niveaux de cendre noire observés en discordance sur des formations volcaniques sédimentaires anciennes, sont riches en hypersthène (67 %) et en augite (23 %), mais pauvres en hornblende verte (10 %) et sans quartz (km 75 au nord de Guayaquil vers Quevedo).

Plus au Nord, vers Latacunga et Quito, la proportion de hornblende est plus importante et voisine de celle de l'hypersthène, dans les sables des sols de la haute vallée interandine. Seuls, les sols dérivés des cendres et ponces sur les pentes du Cotopaxi, ne renferment pas de hornblende. Une composition similaire est observée, mais avec quelques quartz, pour les sols tropicaux de la région de Quevedo, sur le même parallèle que Latacunga.

Rappelons que ce dépôt à hypersthène hornblende en proportion équivalente, est progressivement recouvert plus au Nord, dans la plaine tropicale vers Sto Domingo, par un dépôt à dominance de hornblende (cf. 2^e partie). Les cendres à amphiboles semblent avoir exclusivement recouvert, en dépôts successifs, toute la partie Nord de la plaine autour de Sto Domingo, jusqu'à Quinindé.

Cette augmentation très nette de la proportion de hornblende vers le Nord dans la plaine tropicale, peut être mise en parallèle avec le caractère moins basique des volcans de la région correspondante de Latacunga - Quito - Ibarra, dont certains, même sur la chaîne atlantique, auraient émis, à certaines époques, des matériaux andésitiques ou dacitiques riches en amphiboles, à la différence des volcans situés plus au Sud de cette même cordillère. Même le Cayambé aurait émis, jadis, des dacites quartzifères, renfermant jusqu'à 75 % de silice.

De plus nombreux examens des sables en divers points de la cordillère et de la haute vallée inter-andine, devraient permettre de mieux comprendre l'origine de ces dépôts riches en hornblende et souvent quartzifères de la plaine tropicale au nord du Quevedo.

3 - CLIMAT

3.1 - TEMPÉRATURE

Les variations de la température entre la Sierra et les versants Pacifique ou amazonien sont considérables. L'évapotranspiration présente donc de grandes différences, de sorte que la somme mensuelle ou annuelle des précipitations ne peut être valablement comparée que pour des altitudes similaires.

A chaque altitude, la température demeure pratiquement constante tout au long de l'année, comme le montre le tableau 9. C'est là une caractéristique des climats tropicaux d'altitude, dont il est tenu compte

TABLEAU 9

VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Stations	Altitude	Nbre années	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
<i>Température moyenne</i>															
Cotopaxi	3 560	1	8,7	8,6	8,4	7,5	8,1	6,8	6,5	6,8	7,1	7,1	7,1	7,3	6,9
Tulcan	3 000	20	10,9	11	11,2	11,4	11,3	10,7	10,1	10,1	10,6	11,2	11,3	11,3	10,9
Quito	2 870	70	13	13	12,9	13,0	13,1	13,0	12,9	13,1	13,2	12,9	12,8	13	13
Ambato	2 540	22	14,2	14,5	14,6	14,4	14,2	13,3	12,6	12,8	13,4	14,4	14,7	14,7	14
Banos	1 830	27	16,2	16,9	16,9	16,8	16,6	15,8	15,3	15,5	16,2	16,9	17,3	17,2	16,5
StoàDomingo	500	14	22,1	22,5	22,8	22,9	22,7	22,0	21,5	21,6	21,6	21,3	21,1	21,4	22,0
Guayaquil	6	17	26,2	26,2	26,6	26,7	26,1	24,9	24,1	24,2	24,5	24,6	25,1	26,2	25,4
Salinas (Océan Pacifique)	7	18	25,1	26,0	26,1	25,2	25,2	22,3	21,2	20,7	20,9	21,4	22,1	23,1	23,3
<i>Température moyenne minimale</i>															
Tulcan	3 000	20	6,5	6,7	7,1	7,2	7,2	6,3	5,6	5,5	5,4	6,8	6,8	6,7	6,5
Quito	2 870	70	7,9	8,2	8,4	8,4	8,1	7,4	6,6	6,7	7,1	8,3	7,6	7,9	7,7
Ambato	2 540	22	9,2	9,7	10	10,1	9,8	8,8	8,0	7,8	8,1	8,8	8,6	9,2	9,0
Banos	1 830	27	13,2	13,3	13,5	13,5	13,3	12,6	12,0	11,9	12,0	11,7	12,9	13,1	12,8
Sto Domingo	500	14	18,9	19,0	19,4	19,3	19,3	18,8	18,1	17,9	18,1	18,3	18,1	18,6	18,6
Guayaquil	6	17	22,1	22,1	22,4	22,3	21,6	20,7	20,0	19,3	19,7	20,0	20,1	21,5	21,0
<i>Température minimale absolue</i>															
Cotopaxi	3 560	1	En 1964 = 0°												
Tulcan	3 000	20	0,2	0,1	1,2	2,0	1,0	-0,3	0,0	-1,9	-0,8	0,5	-0,2	-3,6	
Quito	2 870	70	-0,2	1,2	1,1	3,2	1,5	1,9	0,0	1,1	1,5	-0,1	-0,2	0,6	
Ambato	2 540	22	0,1	2,5	4,2	1,8	0,6	0,0	-2,0	-2,0	0,4	1,0	-1,0	-0,6	
Banos	1 830	27	7,0	9,0	7,8	9,0	8,7	5,0	5,2	6,0	7,9	8,5	8,9	8,0	
Sto Domingo	500	14	16,5	15,5	16,5	15,0	14,4	15,0	14,0	13,0	13,0	14,0	14,0	15,3	
Guayaquil	6	17	17,5	17,0	16,8	17,0	14,5	17,4	16,8	16,5	14,0	16,5	18,3	17,8	

dans la 7^e approximation, pour la classification des sols de l'USDA. Cette constance est particulièrement nette dans les régions tempérées froides d'altitude.

La température moyenne passe de 6 à 8° vers 3 500 m d'altitude, à 11° vers 3 000 m et 13-14° vers 2 500 - 2 800 m, c'est-à-dire la majeure partie de la haute vallée interandine. Vers 1 800 m, la température est tempérée (16°) et devient tropicale chaude à 500 m (22°) et au niveau de la mer (25°).

A noter, dans la plaine tropicale Pacifique, une période plus fraîche de juin à novembre, surtout sensible en bordure de l'océan (Salinas), provoquée par le rapprochement de la côte en cette période de l'année, du courant froid de Humbolt. L'océan ne joue donc pas ici le rôle modérateur classique.

Plus importante encore que la température de l'air, mais liée à celle-ci, la température du sous-sol, à différentes profondeurs, est connue pour quelques stations d'altitude ou tropicales (tableau 10).

TABLEAU 10

VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE DU SOL

Stations	Altitude (m)	Profondeur (cm)	Température moy. an.	Temp. moy. du mois qui est la	
				+ faible	+ forte*
Izobamba	3 060	15	13,7	12,0	15,9
		30	14,3	13,1	15,8
		50	14,4	13,4	16,0
Quito	2 870	30	16,2	15,4	17,6
		50	16,7	15,8	18,0
Ambato	2 540	30	17,6	14,8	20,1
		50	18,2	15,7	20,5
Pichilingue Quevedo	73	15	26,5	24,3	28,5
		30	26,6	25,1	27,5
		50	26,7	25,3	27,5

* Les relevés étant effectués 3 fois par jour : 7 h, 13 h, 19 h, on a pris les chiffres pour l'ensemble de ces relevés moyens mensuels des valeurs les plus faibles ou des plus fortes.

A 2 870 m d'altitude (Quito), la température dans la couche humifère superficielle à 5 cm de profondeur, varie de 12° 4 le matin à 7 h, à 19° 2 vers 13 h et 18° 2 le soir à 19 h. A 30 cm de profondeur, la température varie très peu : de 16° 1 à 16° 4 et à 50 cm de 16° 7 à 16° 9, pour une température moyenne de l'air de 13°.

Dans la plaine tropicale, la température du sol à 15, 30 et 50 cm, reste comprise entre 26 et 28°, pour des températures moyennes de l'air de 25°. D'un mois à l'autre, les variations ne dépassent pas 2 °C.

Ces importantes différences de la température des sols suivant l'altitude, influent sur leur évolution, mais aussi bien en altitude que dans la zone chaude tropicale, il n'y a pas ces périodes de repos, de latence, des sols des climats tempérés ou froids, hors des tropiques, dues à des températures très basses.

3.2 - PLUVIOMÉTRIE

Les variations de la pluviométrie sont très importantes. Il est, cependant, difficile, du fait de la diminution de l'évapotranspiration en altitude, d'établir des comparaisons basées sur un total de précipitations mensuelles ou annuelles.

Les principales isohyètes sont indiquées sur la figure 3.

3.2.1 - Zone Pacifique chaude tropicale

La pluviométrie augmente nettement du sud vers le nord, passant à 4 m par an au nord de Sto Domingo. On doit, cependant faire remarquer que dans toutes ces régions, l'enneuagement est pratiquement constant durant toute la saison sèche, ce qui, lié à une température un peu plus fraîche, contribue à diminuer l'évapotranspiration. De plus, des précipitations occultes non mesurables, véritables petites pluies fines qui peuvent se prolonger tardivement dans la matinée, contribuent au maintien d'une végétation et de cultures tropicales là où, en d'autres régions de précipitations enregistrées analogues, des irrigations seraient nécessaires (fig. 3).

3.2.2 - Versant Pacifique des Andes

La pluviométrie semble augmenter fortement jusque vers 2 000 m, altitude où la nébulosité est constante. Plus en altitude, les relevés pluviométriques indiquent une nette diminution (Pillalo = 1 100 mm), mais l'enneuagement très important fausse sensiblement les indications qui peuvent être tirées sur le plan agronomique. De fait, la végétation de ces régions est de type tropical super-humide, ce qui confirme, comme nous le verrons, l'évolution du sol. Ce n'est bien souvent que vers 3 000 m, là où le relief s'adoucit et où les nuages en s'élevant sur le flanc de la montagne viennent à se dissiper dans l'atmosphère, que la végétation change brusquement, par suite du froid plus vif et d'une sécheresse plus accentuée, comme en témoignent les lambeaux de forêts humides qui subsistent encore dans les thalwegs en fortes pentes, face au Pacifique, là où les nuages persistent davantage.

3.2.3 - Paramon

Ce sont les prairies jaunies sur les sols très noirs des hautes altitudes.

Bien qu'aucun relevé pluviométrique ne soit disponible dans ces régions, on peut penser que la pluviométrie annuelle ne dépasse guère 1,0 à 1,5 m, ce qui, pour des régions froides de température moyenne mensuelle de l'ordre de 6 à 8° vers 3 500 m, est important. Les vents sont très violents, les gelées nocturnes fréquentes, mais l'ensoleillement semble beaucoup plus important que sur le versant Pacifique.

3.2.4 - Haute vallée interandine (2 200 à 3 000 m d'altitude)

Il faut distinguer les régions relativement arrosées où la pluviométrie dépasse 1 m par an et est assez bien répartie. C'est le cas, par exemple, pour la région de Quito. La campagne est, en général, verdoyante, mais les irrigations sont souvent utilisées pour les riches pâturages à luzernes ou trèfle et diverses cultures.

TABLEAU 11

VARIATIONS DE LA PLUVIOMETRIE

Stations	Altitude	Nombre années	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	TOTAL
<i>Régions d'altitude modérément arrosées</i>															
Quito	2 870	70	124 (17)	135 (17)	159 (20)	180 (22)	130 (19)	49 (11)	18 (6)	22 (6)	83 (13)	133 (19)	110 (16)	107 (16)	1 250 mm (182) j
Tulcan	2 977	21	69 (15)	71 (12)	84 (16)	100 (15)	83 (16)	44 (13)	20 (10)	26 (9)	34 (9)	100 (16)	99 (14)	83 (13)	813 mm (158) j
<i>Régions sèches d'altitude</i>															
Ambato	2 540	22	48 (14)	39 (12)	49 (15)	62 (15)	51 (14)	37 (13)	20 (11)	26 (11)	26 (10)	51 (12)	42 (11)	39 (12)	490 mm (150) j
Riobamba	2 750	17	25 (9)	39 (11)	48 (13)	56 (14)	34 (12)	28 (9)	9 (6)	15 (7)	23 (8)	48 (10)	30 (9)	26 (8)	381 mm (116) j
<i>Versant atlantique</i>															
Banos	1 830	27	77 (15)	69 (14)	95 (17)	145 (20)	168 (19)	218 (22)	187 (21)	182 (21)	145 (19)	109 (16)	68 (13)	70 (14)	1 533 mm (211) j
<i>Versant Pacifique des Andes</i>															
Pilalo	2 500	3	195	141	196	195	86	43	10	12	37	61	73	121	1 168 mm
<i>Plaine tropicale Pacifique</i>															
— <i>Régions arides de la côte Pacifique - EST</i>															
Salinas	7	18	19 (5)	49 (5)	54 (6)	19 (5)	1 (1)	2 (3)	1 (3)	1 (3)	2 (4)	3 (6)	1 (2)	2 (1)	154 mm (44) j
— <i>Régions sèches de la côte Pacifique - SUD</i>															
Guayaquil	6	17	201 (18)	276 (21)	240 (20)	168 (14)	32 (6)	6 (2)	6 (1)	1 (1)	0 (0)	2 (2)	1 (2)	22 (6)	955 mm (93) j
— <i>Régions centrales à saison sèche marquée - (Constamment nuageux avec précipitations occultes de juin à décembre)</i>															
Quevedo Pichilingue	70	17	513	482	421	399	128	43	36	7	11	23	22	113	2 200 mm
— <i>Régions Nord à saison sèche peu marquée</i>															
Sto Domingo	500	10	508	494	508	531	357	193	143	51	131	109	71	165	3 260 mm
<i>Plaine Amazonienne</i>															
Puyo	500	2	356	238	423	425	423	487	354	320	410	350	454	390	4 630 mm
Tena	527	11	227	256	397	375	417	509	359	333	333	315	282	290	4 092 mm

D'autres régions sont, au contraire, plus sèches. Les sols restent dénudés une partie de l'année et l'érosion éolienne est déjà active. L'irrigation est nécessaire pour beaucoup de cultures. La haie de cactus est déjà répandue. Il s'agirait schématiquement des régions comprises entre les isohyètes 0,5 et 1 m (fig. 3).

Certaines régions ont un aspect aride marqué. La pluviométrie est inférieure à 0,5 m et les cultures non irriguées ne sont possibles qu'à certaines époques de l'année. L'érosion éolienne et par ruissellement est très importante. On observe parfois des accumulations importantes de cendres fines le long des lignes de cactus bordant les champs, certaines pouvant même être recouvertes par de véritables dunes. Certains caractères des sols des régions arides, comme le concrétionnement calcaire ou des manifestations salines, apparaissent déjà.

4 - SOLS A ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS - HYDRANDEPTS - D'ALTITUDE

Vers 3 000 à 3 500 mètres d'altitude, face au Pacifique, à la limite de la forêt humide et des savanes herbacées du paramon, là où la pente s'atténuant, les nuages s'effilochent et disparaissent, on observe, sous plusieurs dépôts de cendres et ponces, des horizons qui présentent tous les caractères des sols allophaniques fortement hydratés. Le sol est beige, jaunâtre, onctueux, savonneux entre les doigts, sur parfois, semble-t-il, plusieurs dizaines de centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur. L'humidité du sol en place atteint 100 d'eau pour 100 de sol séché à l'étuve et elle est voisine de celle correspondant au pF 2,5 mesuré sur échantillon conservé frais (90).

Il s'agit de niveaux enterrés sous des formations de cendres et ponces plus récentes, encore peu altérées, et où l'allophanisation n'est que modérée.

De tels sols sont très fréquemment rencontrés sur les cendres volcaniques des régions tropicales chaudes et humides d'Equateur et des Antilles françaises. Ils se développent là où l'humidité constante du climat empêche toute dessiccation importante du sol. Ils disparaissent ainsi rapidement plus en altitude, lorsque la sécheresse s'accroissant, la forêt à fougères et épiphytes de type super-humide, fait place aux savanes du paramon vers 3 500 mètres d'altitude.

A altitude un peu plus basse, vers 2 800 m, sur les fortes pentes ennuagées couvertes de forêt à épiphytes et fougères de type super-humide, on observe très bien la succession des niveaux de cendres relativement récentes, mais déjà nettement allophanisées, venant recouvrir un horizon allophanique fortement hydraté, identique à celui signalé plus en altitude. La différence entre les pF mesurés sur échantillons conservés frais ou séchés à l'air est déjà sensible dans les niveaux de recouvrements plus récents et devient très importante dans les niveaux fortement hydratés de profondeur (tableau 12).

Avec l'altitude, l'humidité du niveau allophanique enfoui, fortement hydraté, diminue donc légèrement.

La comparaison des diagrammes de rayons X indique qu'en plus des substances amorphes, qui sont les constituants essentiels de la fraction fine de l'horizon à 3 000 m d'altitude, apparaît dans l'échantillon situé à 3 500 m, un peu d'argile cristalline (petite raie à 4,40 Å et esquisse d'une raie à 7,2 Å), (fig. 4).

L'analyse thermique différentielle indique aussi un crochet endothermique à 540°, nettement plus marqué vers 3 500 mètres.

L'examen par spectrographie infrarouge confirme le meilleur degré d'organisation dans le niveau à 3 500 m d'altitude que dans le niveau à 3 000 m qui est manifestement encore très amorphe, (fig. 5).

TABLEAU 12

pF DU PROFIL E 73 SUR LE VERSANT PACIFIQUE A 2 800 M D'ALTITUDE

Profondeur (cm)	DESCRIPTION	Sables		N (%)	pF 2,5 s/éch. conservés		pF 4,2 s/éch. conservés		
		50 200 μ	200 2 000 μ		frais	sec	frais	sec	
5	Cendre sableuse fine			588	51	41	37	30	Niveaux faiblement allophaniques relativement récents
20	Cendres sableuses plus grossières	34	2	243					
50	--- Limite brutale --- brun assez foncé	21	17	336	51	32	38	20	
70	Assez onctueux, minéraux noirs bien visibles	23	13	280	59	32	39	20	
120	Jaune, onctueux, s'effritant bien	25	18	162	53	25	39	16	
240									
300	Minéraux noirs, Jaune bien savonneux, allophane	8	4		148	36	103	32	Niveau allophanique fortement hydraté

TABLEAU 13

Humidité du niveau allophanique fortement hydraté de profondeur (eau p. 100 de sol séché à l'étuve)					
Altitude en mètres	Eau Naturelle	pF 2,5		pF 3	
		Détermination sur sol conservé frais			
Vers 2 800	150	148			
Vers 3 000	114	99		95	
	109	96		83	
Vers 3 500	101	90		79	

Le spectre correspondant à l'échantillon E 150, situé à 3 000 mètres d'altitude est très peu développé et le point le plus remarquable est le maximum d'absorption à 950 cm^{-1} observé pour la bande de valence Si-O. Cette fréquence assez basse traduit la forte perturbation engendrée dans le réseau silicique par la présence des atomes d'aluminium tétracoordonnés qui y sont inclus.

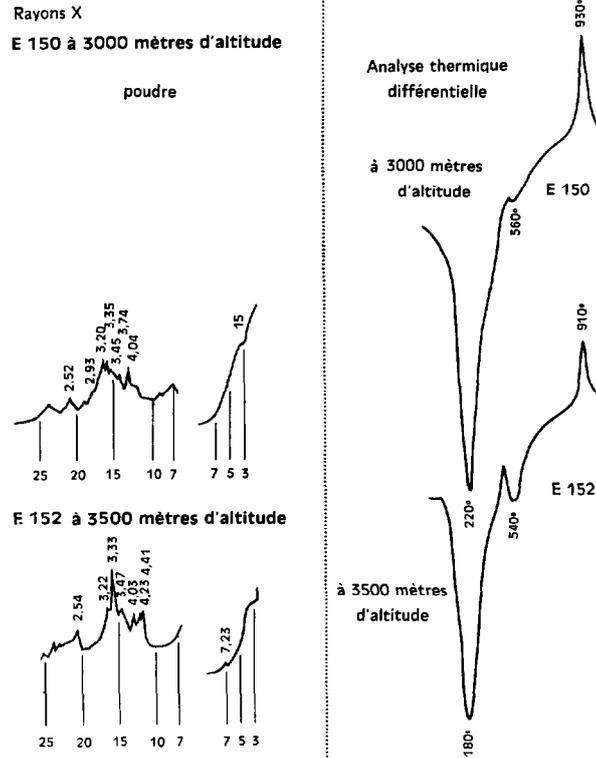


FIG. 4.

Par contre, le spectre correspondant à l'échantillon E 152 (prélevé à 3 500 m d'altitude) traduit une évolution beaucoup plus accentuée. Le maximum d'absorption de la bande Si-O s'est déplacé vers $1\,030\text{ cm}^{-1}$, reflétant la présence d'atomes d'aluminium hexacoordonnés et donc aussi la différenciation vers une couche octaédrique.

Cette définition en deux couches serait bien illustrée dans l'échantillon à 3 500 m d'altitude (E 152) :

— pour la couche silicique, par le développement déjà important de la composante à $1\,100\text{ cm}^{-1}$ de la bande de valence et par la présence bien marquée du doublet 470-440 attribué au réseau silicique.

— pour la couche aluminique, par la présence vers 910 cm^{-1} de la bande $\text{Al}^{\text{VI}}\text{-O-H}$ et d'une bande à 540 cm^{-1} attribuée à la vibration Si-O-Al (Al hexacoordonné) donc Al octaédrique.

Enfin, le complexe des bandes du réseau entre 750 et 550 cm^{-1} est mieux développé dans l'échantillon à 3 500 m d'altitude que dans l'échantillon plus amorphe à 3 000 m d'altitude.

Pour les bandes d'absorption dues aux groupes hydroxyles, on note, à 3 500 m d'altitude, un faible épaulement vers $3\,700\text{ cm}^{-1}$, indiquant la formation de l'hallowysite. Cet épaulement ne s'observe pas à 3 000 m d'altitude. Dans les deux échantillons, la bande d'absorption est très large de $3\,000$ à $3\,600\text{ cm}^{-1}$ et traduit l'abondance du matériel allophanique.

Pour faciliter des comparaisons, on a figuré à côté de ces diagrammes, ceux d'échantillons de Martinique, concernant deux horizons du même profil sur cendre, en région tropicale humide. L'échantillon du niveau supérieur (29 b) est encore très amorphe, mais celui de profondeur semble un peu mieux organisé (29 c).

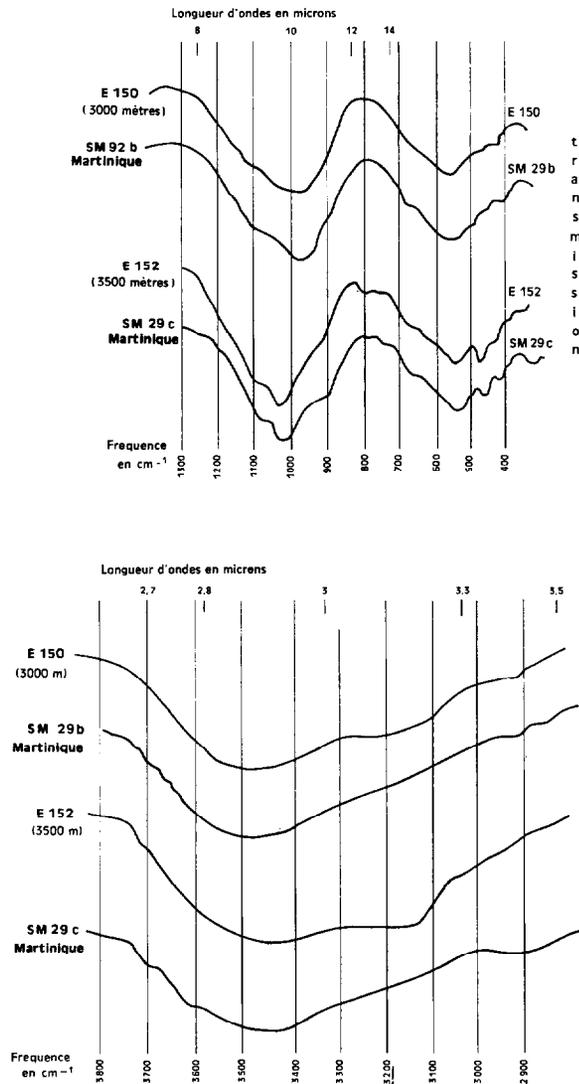


FIG. 5. — Spectrographie infrarouge (Perkins-Elmer).

Le microscope électronique montre pour ces échantillons des images assez analogues d'amas étirés sans structures, mais où l'aspect en filaments est moins net que dans d'autres échantillons d'allophanes hydratés de basses altitudes d'Equateur ou des Antilles. On ne peut guère parler d'organisation en plaques ou en tubes d'hallowite (planche II).

La capacité d'échange, déterminée sur échantillon conservé frais, est élevée et augmente nettement si la détermination, toujours avec l'acétate d'ammonium, est effectuée à pH 9, au lieu de pH 7. A pH 4, elle paraît un peu plus faible. Rappelons que pour la plupart des sols à kaolinite ou montmorillonite, il y a peu de variations entre des mesures faites à divers pH (tableau 14).

Lorsque les sols conservés humides sans séchage sont « déferrifiés » à l'hydrosulfite par la technique de JACKSON (1958), la capacité d'échange déterminée à pH 7 est nettement augmentée.

Par contre, si le sol toujours conservé frais est soumis à trois traitements successifs : acide/basique, selon la technique préconisée par SEGALEN (1966) pour la dissolution des amorphes, la capacité d'échange

TABLEAU 14

CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES APRÈS DIVERS TRAITEMENTS
(Déterminations effectuées sur le sol conservé humide) Résultats en % de sol séché à l'étuve.
Déterminations sur sol tamisé à 2 mm

Echant.	Altitude en mètres	T en mé p. 100 de sol sec			T en mé p. 100 sol sec trait. par les méthodes		Résidu après traitement SEGALEN	Eau de l'échant.	pH eau
		pH 4 (1)	pH 7 (2)	pH 9 (3)	JACKSON (4)	SEGALEN (5)			
E 151	3 000	46	58	76	70	3	44	environ 100 % du sol sec	6,0
E 152	3 500	50	60	79	71	3	47		5,8
		47	53	71	59	5	66		
		48	55	71	62	5	66		

COMPARAISON AVEC LES SOLS ANALOGUES DE MARTINIQUE EN ZONES TROPICALES CHAUDES

	T en mé p. 100 de sol sec			T en mé p. 100 sol sec après trait. par les méthodes	
	pH 4 (1)	pH 7 (2)	pH 9 (3)	JACKSON (4)	SEGALEN (5)
Allophane 150 m	70	79	97	84	4
	71	80	97	84	4
Sol rouge à montmorillonite.		44	47	49	44
		45	47	48	47
Vertisol	47	51	54	67	70
	46	50	62	70	70
Sol ferrallitique		24	24	30	21
		24	22	32	20

(1) avec l'acétate d'ammonium à pH 4

(2) idem à pH 7

(3) idem à pH 9

(4) après la technique JACKSON à l'hydrosulfite, et comme en (2)

(5) après 3 attaques successives avec HCl6N à froid, puis la soude 0,5 N, et comme en (2).

Pour les allophanes, les examens ont été effectués sur des échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats en % de sol séché à 105°.

devient négligeable. Rappelons que dans cette technique, le sol est attaqué à froid par de l'acide chlorhydrique 6 fois normal, suivi de soude 1/2 normale, l'opération ayant été reprise ici trois fois de suite.

En rapportant les résultats au sol séché à 105°, le résidu, après ce traitement acide/base, représente seulement 44 % du sol initial pour le niveau situé à 3 000 m, le plus riche en produits amorphes, et 66 % pour le niveau à 3 500 m, un peu mieux organisé.

L'élévation du pH, ou le traitement par la méthode JACKSON à l'hydrosulfite de sodium, provoque, vraisemblablement, de légères dissolutions du réseau, libérant des positions d'échanges et provoquant une augmentation sensible de la capacité d'échange de base.

Le traitement à froid par l'acide concentré et la soude est plus brutal et entraîne une dissolution presque totale des substances amorphes. La capacité totale d'échange de bases devient alors presque nulle dans ces sols riches en substances amorphes et ne renfermant que des traces d'argiles cristallines.

Par contre, dans les sols renfermant surtout de la montmorillonite bien cristallisée, comme les vertisols dérivés de matériaux volcaniques ou calcaires, ou certains sols rouges, le traitement acide-base ne paraît pas entraîner de dissolution sensible. Pour certains de ces échantillons, la capacité d'échange de bases peut être nettement plus élevée après le traitement, qui libère donc, cependant, des positions d'échange ou modifie l'écartement des feuillets.

CONCLUSION

Les sols allophaniques fortement hydratés, qu'ils soient formés en régions d'altitudes tempérées froides ou dans les basses plaines tropicales chaudes, sont donc très similaires. Une température de 6 à 8° n'est donc nullement un obstacle à la formation de ce type de sol et ce processus d'évolution n'est pas spécifique des régions tropicales chaudes humides.

L'humidité constante demeure le facteur essentiel de cette évolution. Une légère diminution de celle-ci plus en altitude, entraîne aussitôt un début d'organisation.

Une évolution semblable peut-elle se produire dans les régions tempérées froides hors des tropiques ? Cela semble a priori possible, mais l'effet du gel sur ces substances très hydratées est inconnu.

5 - LES SOLS DES HAUTES ALTITUDES. PRAIRIES DU PARAMON

Il s'agit de longues croupes ondulées ou des pentes régulières des volcans, vers 3 500 à 4 500 m d'altitude. La prairie à herbes jaunies est caractéristique du paramon (photos 1 et 2). La température moyenne varie suivant l'altitude de 6 à 10 °C et est constante tout au long de l'année. Des vents violents entraînent une importante érosion éolienne dans les quelques zones encore cultivées.

Peu d'indications précises sont disponibles sur ces régions déshéritées. La pluviométrie ne serait pas élevée. Les sols se dessèchent en surface, mais sur une épaisseur modérée et certainement très variable suivant les régions.

Des horizons superficiels très noirs, d'apparence presque tourbeuse, sont fréquemment observés en surface. En profondeur des niveaux encore plus noirs, d'apparence « spodiques », apparaissent presque systématiquement dans certaines régions.

Sur les pentes des volcans, l'épaisseur des cendres et ponces peut être considérable. Par contre, sur les croupes ondulées des cordillères, les dépôts aériens, en bandes très uniformes sur toutes les ondulations du terrain (photo 2) peuvent n'avoir que 2 à 3 m d'épaisseur sur les matériaux sédimentaires ou volcaniques durs anciens. Une « contamination » sur les pentes par ces matériaux très anciens, est donc parfois possible.

5.1 -

Sur les pentes du Corazon, près de Quito, on observe vers 3 500 m d'altitude, à la limite des cultures de pommes de terre et des prairies jaunies du paramon, une succession de niveaux de cendres séparés par des couches de ponces beiges grossières, peu ou pas altérées. Ces dépôts pourraient provenir soit du Cotopaxi, situé en face, soit plutôt d'un petit volcan plus récent que le Corazon, qui a surgi sur les flancs de celui-ci.

Les niveaux de cendres ont 0,5 à 1 m d'épaisseur. La texture est sableuse, mais avec une certaine cohésion. Sèche, la cendre est assez dure. La base de chaque niveau de cendre, juste au-dessus de la ponce, est très noire sur 20 cm d'épaisseur. S'agit-il d'un niveau enterré ? Le changement de constitution des sables permettrait de le penser (cf. paragraphe 2 324).

Le sol est acide et désaturé en bases. Il est bien pourvu en matière organiques à C/N modéré (13), nettement mieux humifiées en profondeur qu'en surface. Les proportions d'acides humiques et fulviques sont voisines en surface, mais les acides humiques l'emportent nettement en profondeur. Par rapport aux teneurs en matières organiques totales, l'ensemble des acides humiques et fulviques est beaucoup plus important en profondeur qu'en surface.

TABLEAU 15

PROFIL E 166

Profondeur cm	Bases échangeables mé %					T	V %	pH eau	M.O. %	C/N	Matières humiques C %			Argile %
	Ca	Mg	K	Na	S						Total	ac. humique	ac. fulvique	
0- 10	5,0	1,3	0,42	0,23	7	26	27	5,6	9,5	13,5	1,55	0,75	0,80	8
60- 80	0,9	0,1	0,08	0,19	1,4	20	7	5,5	5,4	13,2	1,46	0,87	0,59	
110-130	1,7	0,1	0,06	0,42	2,3	26	9	5,9	6,9	13,6				
Ponce														

L'examen aux rayons X ne révèle que des amorphes, avec peut-être une légère raie vers 14 Å, gonflant peu au glycérol. Un très léger renflement serait visible vers 10Å. Aucune raie n'apparaît vers 4,37 ou 4,45, comme c'est le cas lorsqu'un minéral est en formation. Il y aurait donc, surtout des amorphes et des minéraux primaires (3,17—4,04 = plagioclases) (3,33 quartz), la fraction fine étant encore fort peu organisée, (fig. 6).

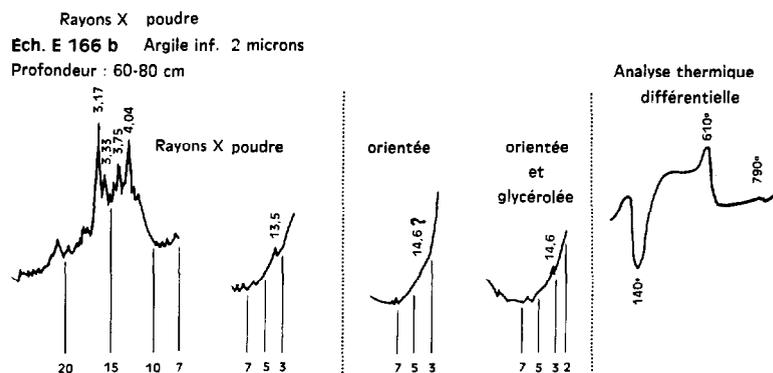


FIG. 6.

La part prépondérante des substances amorphes dans les phénomènes d'échange de bases est assez bien mise en évidence par les variations de la capacité d'échange après divers traitements.

Les valeurs obtenues à pH 9, avec l'acétate d'ammonium, au lieu de pH 7, sont légèrement supérieures (20 à 24 mé %). Après un traitement prolongé avec l'eau oxygénée, pour détruire la matière organique, la capacité d'échange de bases diminue un peu (16 mé) mais après le traitement acide-base préconisé par SEGALÉN, elle devient presque nulle (2 mé %) et une partie du sol initial est dissout.

L'interprétation des variations de la capacité d'échange après traitement à l'eau oxygénée est assez délicate en présence de substances amorphes. La diminution de la capacité d'échange que l'on peut attribuer à la destruction de la matière organique est en effet compensée, et parfois, dans les niveaux profonds, plus que largement, par une augmentation due à la libération de positions d'échange. Ces positions nouvelles d'échange résultent-elles du décapage des revêtements organiques, ou de certaines dissolutions dues aux variations de pH du milieu (eau oxygénée à pH = 3,5). Il est à noter que l'adjonction de quelques gouttes d'ammoniaque pour la destruction de l'eau oxygénée après traitement, entraîne une élévation de la capacité d'échange mesurée ensuite à pH 7 dans l'acétate d'ammonium.

5.2 -

Un autre profil d'apparence assez semblable a été observé à la même altitude, dans le paramon de Pujili-Toachi. Les dépôts de cendres, bien noirs, recouvrent sur 1,5 à 2 m d'épaisseur seulement, les anciennes formations sédimentaires ou volcaniques dures soulevées.

Les cinq centimètres superficiels sont constitués par le feutrage enchevêtré très noir des herbes du paramon.

De 5 à 25 cm de profondeur, c'est une cendre noire foncée 10 YR 2/2, rendue cohérente par la matière organique, d'aspect un peu tourbeux, et par les racines. Outre la cendre fine, on rencontre quelques sables grossiers de 0,5 mm (quartz ?).

De 25 à 80 cm, le sol est encore très foncé : 10 YR 3/2. Les mottes sont peu cohérentes, la texture plus particulière, quoique le sable soit encore un peu malléable, lié par la matière organique ou les produits amorphes. Il y a quelques lits plus grossiers hétérogènes.

Les résultats analytiques (tableau 16) sont très voisins de ceux du précédent profil. Notons ici la prédominance des acides fulviques sur les acides humiques, même en profondeur. La proportion relative de ces substances n'est donc pas un critère de différenciation absolu.

La densité apparente supérieure à 1 et l'humidité naturelle modérée du sol (quoique importante, pour un sable) traduisent un état de dessiccation temporaire à certains moments de l'année.

TABLEAU 16

(E 95)

Profondeur cm	Sables		Bases échangeables en mé %					T	V %	pH		Densité apparente	Eau naturelle % du sol sec
	50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Ca	Mg	K	Na	S			eau	KCl		
5-25	20	20	10,8	0,6	0,25	0,15	12	24	50	6,0	5,6	1,3	21
30-60	20	33								5,7	5,2	1,13	36

Profondeur	M.O. %	C/N	Matières humiques C %		
			Totales	Acide humique	Acide fulvique
5-25	13,5	16	1,52	0,57	0,94
30-60	5	11,5	0,67	0,29	0,39

Les rayons X indiquent, outre des produits amorphes et des minéraux primaires (3,20 Å — 4,06 Å = plagioclases), une importante raie à 14 Å, qui demeure inchangée après traitement au glycérol, et passe à 10 Å, mais devenant plus faible, par chauffage à 490°. Il pourrait s'agir d'une vermiculite ou d'une montmorillonite alumineuse. La présence d'un crochet exothermique marqué à 850° à l'analyse thermique différentielle vient appuyer ces hypothèses. Une raie à 7,34 Å est probablement due à la métahalloysite (fig. 7).

Dans le diagramme d'infrarouge, une large bande de 3 000 à 3 700 cm^{-1} est due à l'absorption par les OH du matériel allophanique, et indique surtout la présence de produits amorphes. Un léger épaulement, à 3 700 cm^{-1} , serait l'indice d'un début d'organisation. Cette partie du diagramme est donc très semblable à celle de l'échantillon fortement allophanique, avec un début d'organisation, observé à 3 500 mètres d'altitude sur le versant Pacifique, à la limite du paramon et à la même latitude.

Cette similitude est confirmée par la partie du diagramme correspondant aux vibrations de valence et du réseau. Le maximum d'absorption de la bande de valence Si - O est centré sur une fréquence supérieure à 1 000 cm^{-1} et indiquerait la présence d'Al hexacoordonnés, bien que la bande Al-O-H à 920 cm^{-1} ne soit pas visible. La bande due à la structure en anneaux des tétraèdres de silice est peu intense et simultanément le doublet 470-440 cm^{-1} du réseau silicique est absent, (fig. 8).

Les produits amorphes avec un début d'organisation, probablement de type montmorillonitique, comme dans le précédent profil, représentent donc l'ensemble de la fraction fine.

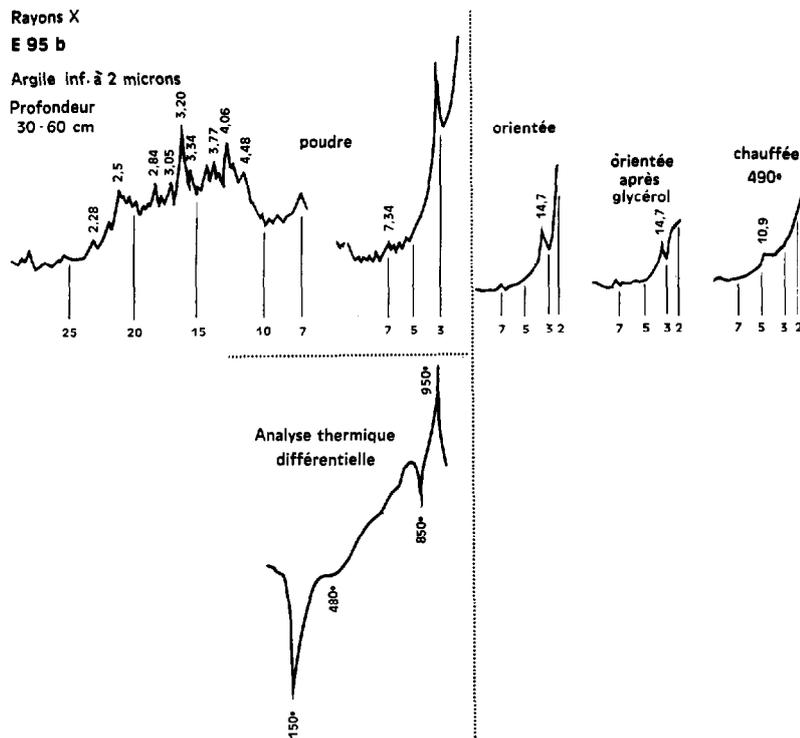


FIG. 7.

Le microscope électronique révèle quelques plaquettes aux contours irréguliers et mal définis et l'aspect filamenteux des échantillons fortement hydratés a disparu. Pl. 2, photos 7 et 8.

5.3 -

Dans la même région, certains profils présentent sous un premier niveau de cendres et ponces, un horizon de cendre très noire, beaucoup plus noir qu'en surface. Il s'agirait d'un ancien sol enfoui. Dans ce niveau plus noir profond, le C/N est plus élevé qu'en surface et les acides humiques l'emportent nettement sur les acides fulviques. Les autres résultats analytiques sont voisins de ceux des autres sols déjà examinés.

- 0 - 5 cm : Très noir, très humifère, feutrage dense des racines.
- 5 - 30 cm : Cendre brunâtre, 5 YR 4/2, devenant plus claire en séchant ; mottes peu cohérentes ; les sables de 0,5 mm sont abondants avec quelques graviers de 2 à 3 mm.
- 30 - 40 cm : Ponce beige clair, peu altérée grossière ; graviers.
- 40 - 100 cm : Limite brutale. La cendre est beaucoup plus noire qu'en surface, noir anthracite, plus noire que 5 Y 2/1, avec reflets bleutés. Le sable est plus grossier et rendu un peu cohérent par la matière organique ou des produits amorphes. Les feldspaths calcosodiques sont très altérés, arrondis, bariolés, couverts de taches noires.

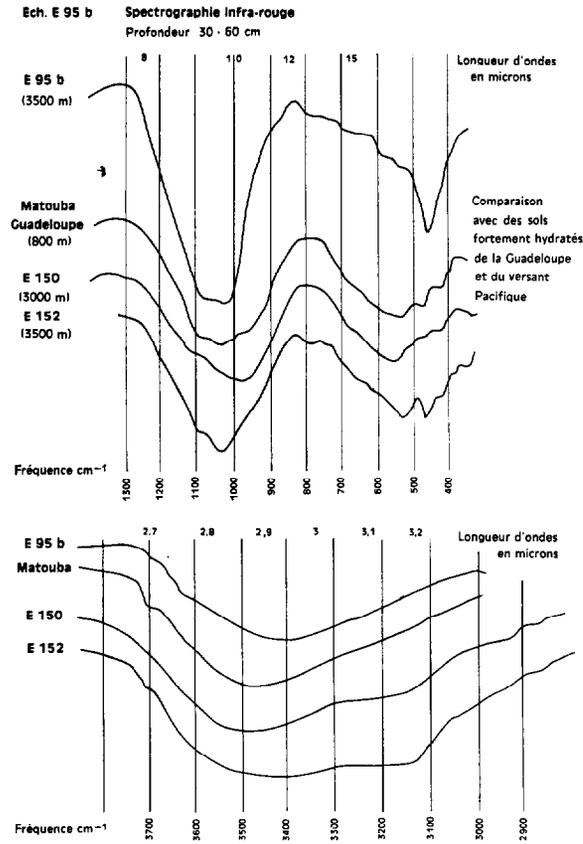


FIG. 8

TABLEAU 17

Profondeur cm	Sables		M.O. %	C/N	Matières humiques C %			Bases échangeables mé %					T	pH eau
	50 à 200 μ	200 à 2 000 μ			Totales	Acide humique	Acide fulvique	Ca	Mg	K	Na	S		
5-30	17	40	7,3	13				3,9	2	0,15	0,16	6,3	13	5,9
Ponce														
30-70	19	34	5,8	16	1,11	0,74	0,38	2,1	1,1	0,2	0,19	3,6	13	5,4

5.4 -

Les dépôts de cendres et ponces n'ont souvent qu'une épaisseur relativement modérée, 1,5 à 3 m, en recouvrement sur des formations plus anciennes, sédimentaires ou volcaniques dures, crétaées ou tertiaires. Il est donc possible, sur les pentes, dans les parties basses, que des mélanges puissent se produire et il est intéressant de comparer la nature des deux formations superposées.

5.4.1

Un échantillon a donc été prélevé à la partie supérieure du recouvrement de cendres et ponces, à proximité d'un petit thalweg. La cendre était sèche, labourée, avec une structure très particulière. La teneur en matière organique de 4 %, avec un C/N de 10, indiquerait qu'il s'agit probablement d'un sol déjà fortement érodé. La capacité d'échange passe de 16 mé %, mesurée à pH 7, à 20 à pH 9 ; le pH est voisin de 6. A noter que ce sol qui n'a jamais reçu d'engrais, est bien pourvu en P_2O_5 Truog (10 mg %).

Les rayons X révèlent surtout dans la fraction fine, des produits amorphes et des minéraux primaires (3,18 - 4,04 Å). L'importance de la raie à 4,37 Å, et un léger renflement vers 7,6 - 7,8, seraient l'indice probable d'un peu de métahalloysite, (fig. 9).

C'est donc un niveau bien classique du paramon.

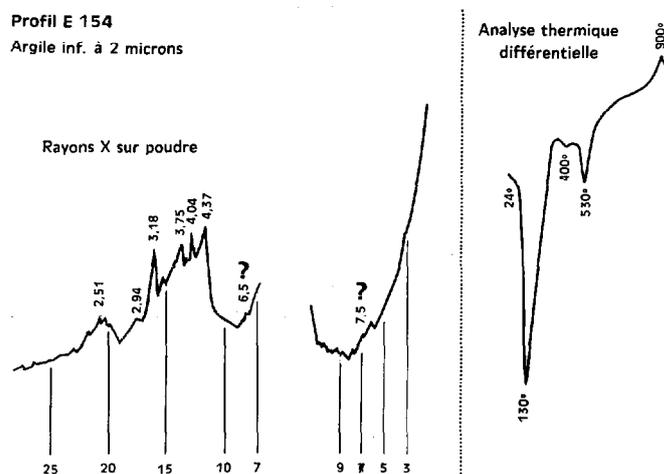


FIG. 9

5.4.2

La formation ancienne que recouvrent les cendres et ponces ressemble fortement aux argiles ou tufs argileux montmorillonitiques volcaniques des Antilles. Le matériau est encore dur. Ecrasé finement, il devient franchement adhérent. Les rayons X montrent une raie à 14,7 Å qui passe à 17 Å, après traitement

au glycérol et à 10 Å par chauffage à 490°, avec cependant persistance d'une raie vers 13 Å. Outre la montmorillonite, il y aurait donc un minéral à 14 Å, qui peut être une chlorite ou une montmorillonite alumineuse. Il est difficile de dire si la raie à 7,3 Å doit être attribuée au minéral à 14 Å ou, ce qui est plus probable, à de la métahalloysite, (fig. 10).

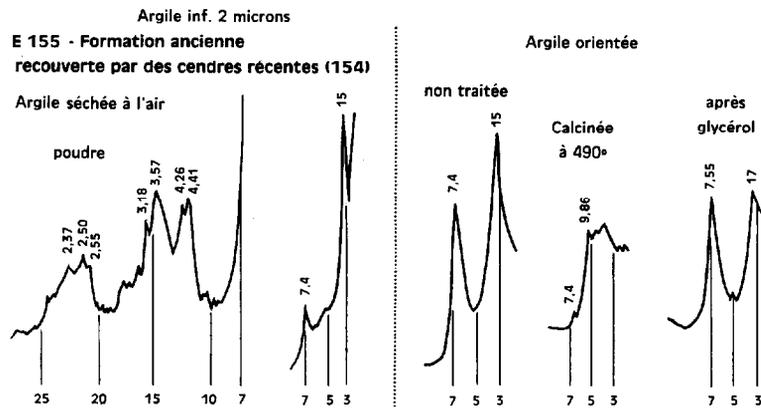


FIG. 10

Cette argile est-elle héritée de matériaux sédimentaires crétacés surélevés, ou est-elle néoformée sur des roches volcaniques dures ou des tufs ? Sous ce climat relativement sec, ce serait une évolution très vraisemblable sur des matériaux peu perméables.

5.5 -

Sur les contreforts du Cotopaxi, toujours vers la même altitude (3 500 m), les couches de cendres et surtout de ponces, semblent avoir une épaisseur considérable. La région est peu accidentée, les pentes douces et régulières.

Sous un chevelu de 3 cm de racines enchevêtrées, qui a été éliminé du prélèvement, la cendre est noire, très peu cohérente, particulaire, assez grossière, s'effritant aisément.

A 30 cm, on passe en quelques cm à la ponce pure beige clair, dont les éléments ont souvent 0,5 à 2 cm. Ce niveau ponceux aurait plusieurs mètres d'épaisseur.

Il s'agit donc d'un sol très peu épais. La fraction fine est encore très peu importante et la matière organique constitue l'élément de rétention essentiel du sol. Bien que la teneur en matière organique soit élevée (5 %), la capacité d'échange demeure très faible, ainsi que la capacité pour l'eau. Cela montre bien que les matériaux amorphes sont les principaux responsables de la capacité d'échange et de la rétention pour l'eau élevée des sols sur cendres d'altitude. En ce qui concerne la rétention pour l'eau, la finesse des particules joue aussi un rôle très important.

Le C/N est élevé (20) et les acides fulviques l'emportent sur les acides humiques.

TABLEAU 18

PROFIL E 93

Profond. cm	Sables		Bases échangeables mé%					T	pH eau	M.O. %	C/N	Matières humiques C %			pF*	
	50 à 200 μ	200 à 2 000 μ	Ca	Mg	K	Na	S					Totales	Acide humiq.	Acide fulv.	2,8	4,2
3-25	29	40	2,3	0,6	0,09	0,11	3,1	6	5,3	5,3	20	0,42	0,19	0,23	15	8

* Idem sur échantillon frais.

TABLEAU 19

MATIÈRES ORGANIQUES ET HUMIQUES.

Profondeur cm	M.O. %	C/N	Matières humiques C %			
			totales	Acides humiques	Acides fulviques	
<i>Sol des hautes altitudes sous prairies du paramon</i>						
3-25	5,3	20	0,42	0,19	0,23	Les acides fulviques et humiques sont en proportions voisines en surface. Les acides humiques dominent en profondeur.
5-25	13,5	16	1,52	0,57	0,94	
30-60	5,0	11,5	0,67	0,29	0,39	
0-10	9,5	13,5	1,55	0,75	0,80	
60-80	5,4	13,2	1,46	0,87	0,59	
50-70	5,8	16	1,11	0,74	0,38	
Niveau enfoui						
<i>Sols des régions tropicales chaudes humides d'Equateur</i>						
0-15	7,1	9,8	1,02	0,34	0,68	Les acides fulviques sont nettement plus importants que les acides humiques.
90-105	2,2	10,7	0,13	0,015	0,120	
0-15	6,7	11,6	1,08	0,30	0,78	
0-20	4,9	11	0,64	0,22	0,42	
0-15	8,3	13	1,09	0,35	0,74	
<i>Sols des régions tropicales humides des Antilles</i>						
CA 4a	13,2	13	3,39	1,20	2,20	Les acides fulviques sont largement dominants.
b	3,2		0,32	0,02	0,30	
CA 17a	10,1	10	0,72	0,24	0,48	
b			0,31	0,12	0,18	

5.6 - CONCLUSION

Les sols des hautes altitudes formés sous les prairies herbacées du paramon diffèrent donc considérablement des sols fortement allophaniques précédemment étudiés sur le versant Pacifique. Bien que mieux pourvus en matières organiques, en surface comme en profondeur, ils ne présentent ni la capacité en eau considérable, ni la capacité d'échange de bases très élevée de ceux-ci, qui semblent spécifiques des substances amorphes très hydratées.

C'est la richesse en matière organique qui caractérise essentiellement ces sols comme dans toutes les régions d'altitude. La fraction fine inférieure à 2 microns, demeure, en général, très faible, et semble encore surtout à l'état amorphe, comme l'indiquent les examens aux rayons X, à l'infrarouge, et les chutes brutales de la capacité d'échange après traitements aux acides.

Ces substances amorphes étant soumises à des périodes de dessiccation temporaire, ne présentent pas le caractère fortement hydraté des sols sur cendres ou des tourbes des régions humides. La capacité d'échange de bases est modérée et les sols souvent assez fortement désaturés.

Dans quelques sols, cependant, un minéral à 14 Å, probablement une montmorillonite alumineuse, serait nettement visible aux rayons X.

Acides humiques et fulviques sont généralement présents en altitude, en proportions voisines dans le niveau de surface. Plus en profondeur, la proportion d'acides humiques peut l'emporter nettement. Le C/N est généralement encore loin des valeurs signalées dans la 7^e approximation pour certains sols sur cendres. L'uniformité de la température tout au long de l'année, et l'absence de périodes de gel et d'engorgement prononcé par l'eau sur des niveaux gelés, en sont peut-être la cause.

Le tableau 19 compare les résultats obtenus pour les sols d'altitude d'Equateur, et ceux des plaines basses tropicales chaudes.

La proportion d'acides humiques est plus importante dans les sols d'altitude tandis que les acides fulviques dominent largement dans les régions basses chaudes et surtout dans les plus humides.

6 - SOLS DES RÉGIONS RELATIVEMENT HUMIDES DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE (2 200 à 3 000 m d'altitude)

Il est possible de faire une distinction entre les sols des régions relativement bien arrosées, qui peuvent recevoir jusqu'à 1 m ou 1,5 m de pluviométrie annuelle, assez bien répartie, et ceux des régions très sèches ou arides, où la pluviométrie demeure inférieure à 500 mm et est mal répartie au cours de l'année.

Par suite de l'érosion très active, découpant les pentes et accumulant les matériaux sur les replats, il est plus difficile de savoir si, même à peu de distance, les sols sont formés sur des dépôts de cendres et de ponces, d'aspect certes analogue, mais dont l'âge peut être soit voisin, soit très différent. A priori cependant, les sols qui dérivent de la désagrégation de la cangagua ou tuf durci, seraient plus anciens que ceux formés sur les cendres et ponces qui viennent généralement en recouvrement sur ces tufs, autant qu'on puisse l'observer.

6.1 -

Dans la région sud de Quito, de larges zones sont peu accidentées et cultivées. Les prairies à luzerne et trèfle irriguées, les cultures de blé avec deux récoltes annuelles, les pommes de terre, etc. donnent des rendements satisfaisants. La pluviométrie dépasserait 1 m par an, et serait assez bien répartie.

Le profil suivant, relevé près de Uyumbicho, serait très caractéristique des sols de ces régions.

- 0 - 50 cm : Limono-sableux, avec une structure peu stable meuble, quoiqu'il y ait cependant une nette cohésion. Les petites mottes subangulaires éclatent aisément dans les doigts, en passant du noir 10 YR 3/2 au brun foncé (10 YR 3/3). Il y aurait donc des revêtements. Il semble y avoir un peu d'argile dès 30 cm.
- 50 - 120 cm : Progressivement plus foncé, la limite étant très diffuse ; 10 YR 3/1 ; la couleur ne change pas sur le sol écrasé ; le sable paraît légèrement argileux, un peu onctueux, très légèrement adhérent, un peu malléable, quoique la cohésion soit très faible. Plus en profondeur, on rencontre très probablement la cangagua ou tuf durci brunâtre, qui affleure fréquemment sur les parties convexes du voisinage.

Le sol se desséchant durant certaines périodes de l'année, il n'a pas paru utile d'effectuer les analyses sur des échantillons frais, et la terre séchée à l'air a été utilisée. Le fait, cependant, que les plagioclases des sables soient plus altérés en profondeur qu'en surface, peut être attribué soit à une altération plus poussée en profondeur, conséquence d'une humidité plus constante, soit à des dépôts aériens plus jeunes venus en recouvrement.

L'état de saturation en bases est satisfaisant et le pH supérieur à 6,0.

Les acides humiques et fulviques sont en proportions voisines en surface, mais les acides humiques l'emportent nettement en profondeur, tout comme dans les sols du paramon plus en altitude (tableau 20). La proportion de matières humiques par rapport à la matière organique totale est très faible en profondeur.

La capacité d'échange est la même à pH 7, à pH 9 et après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée, sauf dans le niveau de surface pour ce dernier traitement. Par contre, après traitement acide-soude, elle devient très faible, soulignant l'importance des amorphes ou d'argiles aisément solubles.

Dans l'horizon 40-60 cm, la fraction fine inférieure à 2μ , renferme, outre des amorphes, et en quantité notable, de l'halloysite (raie à 10 \AA passant à $7,4 \text{ \AA}$ par chauffage à 100°) et de la métahalloysite (raie à $7,4 - 4,37 - 2,51 \text{ \AA}$), (fig. 11).

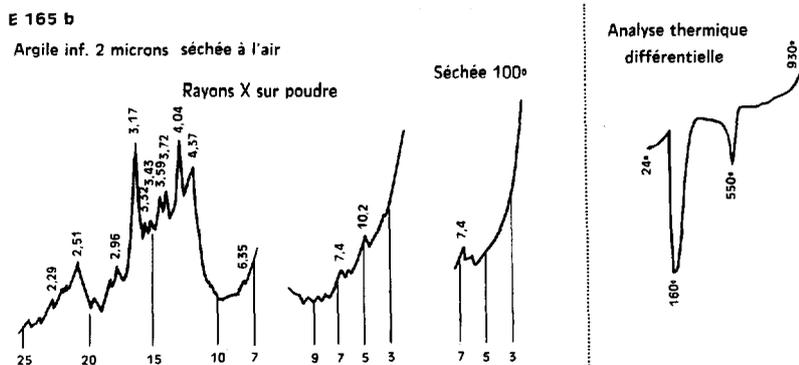


FIG. 11.

TABLEAU 20

ANALYSES PROFIL E 165

Prof. (cm)	Argile 2 μ	Limon 2-20 μ	Sables			Bases échangeables mé %					T	V (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Truog mg %	M.O. (%)	C/N
			20 50 μ	50 200 μ	200 2000 μ	Ca	Mg	K	Na	S						
0-30						9,1	5,8	0,56	0,19	15,7	22	71	6,1	11	5,8	10
40-60	12	27,5	16	22	18	5,5	3,4	0,30	0,34	9,6	17	56	6,4	18	1,9	10,6
80-120	11,2	25	15,3	22	20,6	7,4	3,6	0,45	0,47	11,9	17	70	6,8	18		

	Matières humiques C %		
	Totales	Acides humiques	Acides fulviques
0-30	0,43	0,21	0,21
40-60	0,25	0,15	0,10

T pH 7	T pH 9	T après traitement H ₂ O ₂	T après traitement SEGALEN
22	25	19	3
17	17	17	3

La raie à 4,37 Å est bien développée, mais celle à 3,50 Å est faible. La présence d'une raie unique et large à 2,51 Å et l'absence des doublets de la kaolinite, montre bien qu'il s'agit d'halloysite.

Les raies à 3,17 et 4,04 Å bien marquées sont attribuables à des minéraux primaires, plagioclases, etc. La petite raie à 6,35 est-elle due à la boehmite ? Cette raie est souvent rencontrée en altitude, mais il est difficile d'affirmer à quoi elle correspond exactement (fig. 11), probablement à des plagioclases.

L'altération des cendres donnerait donc des produits amorphes, avec début d'organisation de l'halloysite. Puisque le profil se dessèche certains mois de l'année, au moins à cette profondeur, il semble normal que la métahalloysite soit aussi observée.

L'examen au microscope électronique montre de toutes petites particules arrondies dont certaines paraissent nettement constituées d'éléments concentriques. Il ne s'agit donc pas des tubes plus ou moins bien formés, habituellement rencontrés pour les sols des régions chaudes tropicales qui présentent des diagrammes de rayons X similaires.

6.2 -

Un profil comportant plusieurs niveaux de cendres et ponces superposées en recouvrement sur un tuf durci ou cangagua, a été observé dans la même région. La régularité des couches de cendres de 0,5 à 1 m d'épaisseur, séparées par des niveaux ponceux, peu épais, mais souvent peu altérés, permet de penser qu'il s'agit de dépôts aériens successifs non remaniés.

Chaque couche de cendre noire est encore très sableuse, mais une structure à tendance angulaire peu développée et peu stable, se manifeste déjà. La cohésion demeure faible mais nette. Ecrasé entre les doigts, le sol paraît renfermer un peu d'argile. Il devient moins noir et davantage brunâtre-rouille, ce qui serait l'indice de revêtements sur les faces des éléments de la structure. Ce changement de couleur est peu sensible dans le niveau le plus profond.

Les premiers niveaux de ponces sont peu altérés et les morceaux encore durs. Le plus profond est déjà très pourri et les ponces beiges s'écrasent entre les doigts. S'agit-il d'un niveau beaucoup plus ancien ou plus humide, et pour cette raison plus altéré ?

Vers 5 m de profondeur, on passe brutalement à la cangagua ou tuf durci, qui semble très homogène sur plusieurs mètres d'épaisseur. La coloration brun-rouille foncé (10 YR 3/2) devient nettement plus claire (5/4) par dessiccation. De nombreux petits pores sont visibles. Même humides, les talus sont difficiles à attaquer au marteau. Mouillé, écrasé et pétri entre les doigts, le tuf semble nettement renfermer de l'argile.

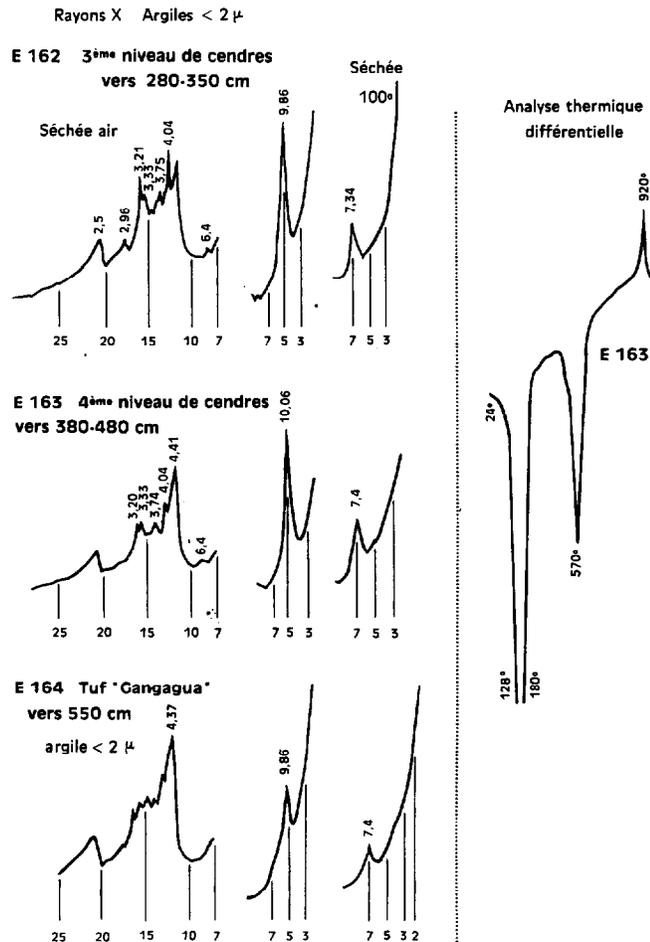


FIG. 12.

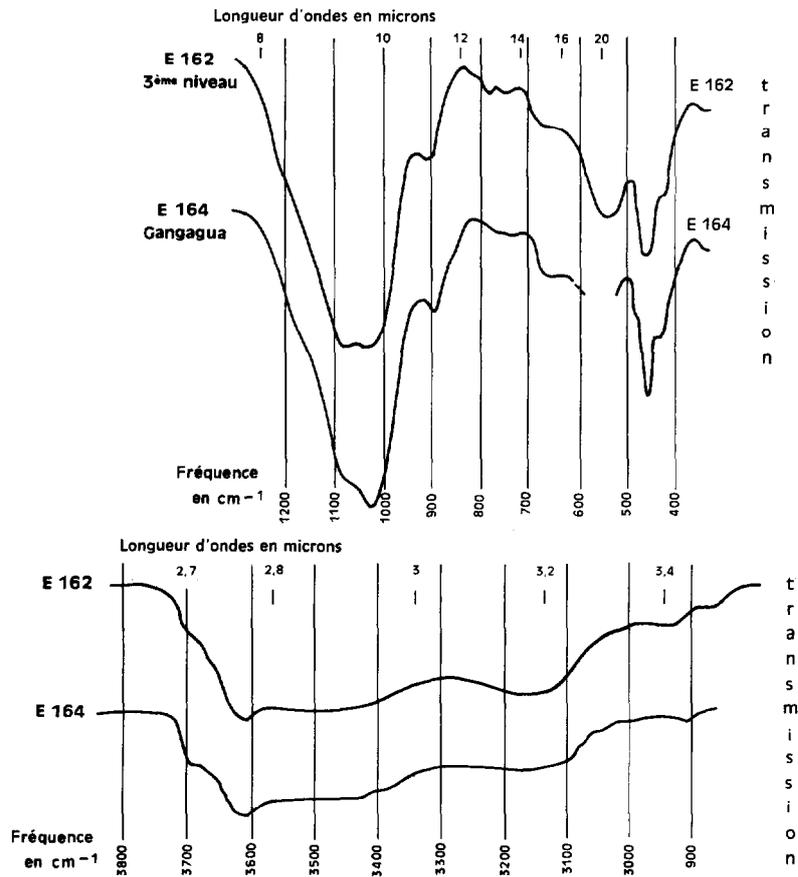


FIG. 13. — Spectrographie infrarouge

Dans les niveaux de cendres les plus profonds et dans la cangagua, les teneurs en bases échangeables sont de l'ordre de 10 à 15 mé % et les pH voisins de 6. Les teneurs importantes en matières organiques des niveaux cendreaux, indiquent bien qu'il s'agit d'anciens sols qui ont été successivement recouverts.

TABLEAU 21

	Profondeur (cm)	Bases échangeables mé %					T	V (%)	pH eau	M.O. (%)	C/N	Argile
		Ca	Mg	K	Na	S						
3 ^e niveau de cendre	280-350	8,9	1,9	1,15	0,26	12,2	34	36	5,8	7	16	4
4 ^e — — —	380-480	5,8	2,1	0,84	0,36	9,1	22	41	5,8	2,1	14	
Cangagua	550	6,5	6,6	1,6	0,96	15,5	24	64	6,1	1		

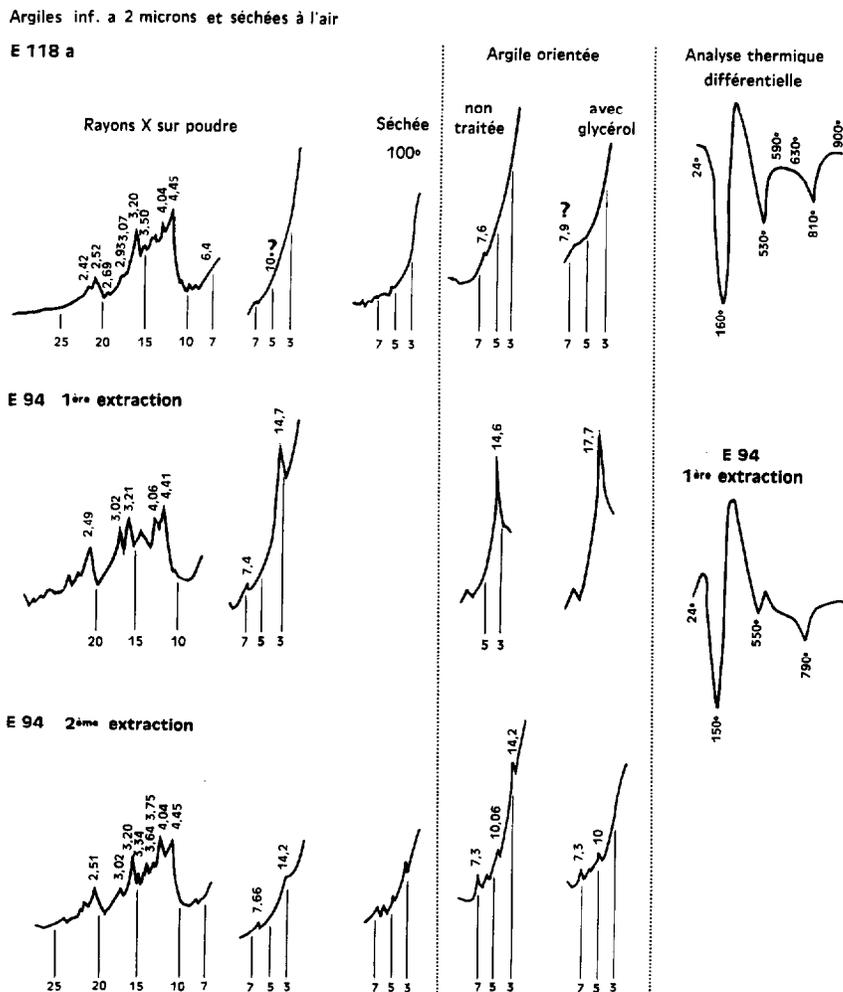


FIG. 14.

Pour ces mêmes niveaux, l'examen aux rayons X de la fraction inférieure à 2 microns, extraite sans chauffage, montre la présence d'une belle halloysite. La raie à 10 Å est importante et passe à 7,4 par chauffage à 100°, en restant très inférieure à la raie à 4,37, bien développée. Une raie unique et large existe à 2,51 Å, sans qu'aucune trace des doublets de la kaolinite n'apparaisse. La raie à 3,55, généralement bien développée dans la kaolinite, est absente. L'halloysite serait mieux cristallisée dans les niveaux cendres que dans la cangagua, (fig. 12).

Les raies de minéraux primaires 3,21, 4,04 et 3,33 Å s'atténuent nettement en profondeur et deviennent peu sensibles dans la cangagua. Cela confirme l'altération plus poussée des niveaux profonds où peu de particules fines primaires demeurent identifiables.

Signalons un début de raie à 6,4 Å qui pourrait être attribuable à la boehmite.

L'analyse thermique différentielle montre un départ d'eau exothermique vers 150°, suivi du crochet endothermique à 570° de l'halloysite, qui semble déjà s'amorcer lentement à plus basse température.

Les diagrammes de spectrographie par infrarouge indiquent nettement la présence de l'halloysite et confirment la meilleure cristallinité de l'halloysite dans le niveau de cendre que dans la cangagua.

Les deux bandes d'absorption des OH de l'halloysite vers 3 700 et 3 620 cm^{-1} sont bien nettes sans être cependant, très prononcées. Les deux échantillons présentent une importante bande d'absorption Si-O avec des composantes nettes et fines à des fréquences supérieures à 1 000 cm^{-1} . La bande de déformation Al^{VI}-OH est bien développée vers 910 cm^{-1} . La bande vers 800 cm^{-1} , attribuée à la structure en anneau des tétraèdres de silice est mieux visible, plus fine dans la 3^e niveau de cendre que dans la cangagua ce qui confirme la meilleure organisation du réseau de ce niveau. Le doublet Si-O à 470 et 440 cm^{-1} est bien découpé, indiquant une bonne séparation des couches tétraédriques et octaédriques. Ces divers éléments reflètent donc exactement le stade fortement évolué dans la cristallisation de ce matériau (Fig. 13).

L'examen au microscope électronique révèle de petites particules sphériques souvent concentriques de 0,1 micron. Ce ne sont pas les tubes de l'halloysite habituellement trouvés dans les sols des régions chaudes tropicales, présentant des diagrammes de rayons X, d'infrarouge, ou d'analyse thermique différentielle similaires (photo 9).

L'importance des produits amorphes ou d'argiles encore mal cristallisées aisément dissoutes est mise en évidence par la forte diminution de la capacité d'échange après traitement acide-soude. La légère augmentation de la capacité d'échange mesurée à pH 9, par rapport aux résultats observés à pH 7, suggère des substances encore relativement hydratées. Une évolution en milieu plus constamment humide que dans le précédent profil, est vraisemblable puisqu'il s'agit d'échantillons prélevés à plus de 2 m de profondeur et que la dessiccation est certainement moins accentuée à ce niveau que dans les deux échantillons de surface examinés précédemment (165).

TABLEAU 22

Ech. sol	(1) T pH 7	(2) T pH 9	(3) T après traitement H ₂ O ₂	(4) T après traitement SEGALEN
162	34	42	27	3
163	22	25	24	4
164	24	28	30	5

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7

(2) Idem, mais à pH 9

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1)

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6N et la soude 0,5 N à froid, puis détermination de T à pH 7.

6.3 - CONCLUSION

L'examen de ces deux profils indique donc que l'altération des cendres donne naissance, dans ces régions relativement arrosées, à des produits amorphes et à de l'halloysite, exactement comme dans toutes les régions tropicales chaudes, où le sol subit une certaine dessiccation pendant une période de l'année. La dessiccation, plus importante et plus complète dans les niveaux de surface, au moins certaines années, expliquerait la présence d'un peu de métahalloysite et le maintien, au contraire, de l'halloysite hydratée à quatre molécules d'eau sans traces de raie à 7 Å dans les niveaux profonds.

Le fait que l'halloysite semble mieux cristallisée (RX et IR) dans les niveaux cendreux que dans la cangagua, plus argileuse et plus ancienne, montre que les conditions de formation de cette argile y sont particulièrement favorables.

7 - SOLS DES RÉGIONS SÈCHES DE LA HAUTE VALLÉE INTÉRANDINE

Dans la plupart de ces régions, l'érosion est très active et le tuf ou cangagua apparaît souvent à faible profondeur. Il est probable que, sauf sur certains plateaux, les cendres et les ponces venues se déposer sur le tuf ont été balayées par le vent et les eaux. Il semble que bien des sols soient directement issus du tuf désagrégé en fine cendre en surface, par les agents atmosphériques et les labours. Le profil a, dans certaines régions, été transformé par les irrigations qui permettent localement de prolonger les cultures durant une grande partie de l'année.

7.1 -

Sur un vaste plateau irrigué en pente douce et très cultivé (Pillaro), on observe le profil suivant, vers 2 800 à 3 000 m d'altitude (E 118).

0 - 25 cm : Niveau labouré, brun noir à noir, 10 YR 3/2 humide, devenant presque blanc en séchant 6/2.

Le sol est très poreux. Les mottes ont une faible cohésion, s'émiettant en sable fin un peu agrégé par la matière organique.

25 - 50 cm : Beaucoup plus noir qu'en surface (plus noir que 2,5 YR 2/1). Les mottes sont luisantes, plus cohérentes, et se brisent en éléments anguleux paraissant un peu durcis. Ecrasé, le sol est moins noir, plus terne, brun noir. Il y aurait donc des revêtements.

50 cm : On passe au tuf dur, fragmenté, brisé en morceaux, beige brunâtre avec des taches noires. Ce tuf paraît un peu argileux.

Le sol semblerait dériver en partie de ce tuf durci. La présence dans le niveau de surface d'une proportion importante d'hypersthène, à la différence du niveau inférieur riche en hornblende, indiquerait un mince recouvrement de cendres (cf. paragraphe 31).

Un autre profil (E 94) a été aussi examiné près de Latacunga, dans une région intensément soumise à l'érosion éolienne, comme l'indiquent les accumulations dunaires sur les haies de cactus en bordure des champs. Les sols sont finement limono-sableux, très foncés à l'état humide, très clairs à l'état sec, paraissant renfermer un peu d'argile (photo 6).

Les résultats analytiques concernant ces deux profils sont analogues. La capacité d'échange est voisine de 20 mé % et le pH supérieur à 6 (tableau 23).

TABLEAU 23

Profil	Prof. (cm)	Argile < 2 μ	Limon 2-20	Sables			Bases échangeables mé %					T	V (%)	pH		M.O (%)	C/N
				20 50 μ	50 200 μ	200 2000 μ	Ca	Mg	K	Na	S			KCl	eau		
E 118	0-25	17	22	19	27	7	9	1,5	0,6	0,2	11	20	57	5,7	6,4	3,2	9,6
	25-50	7	22	21	32	7											
E 94	0-30	12	33	25	17	7	9	1,5	0,7	0,2	11	18	63	5,6	6,3	2,1	

Notons, de plus, que ces sols non fertilisés renferment d'appréciables quantités de phosphore Truog (18 à 20 mg P_2O_5 %).

Les rayons X et l'analyse thermique semblent indiquer la présence d'un peu de montmorillonite. Dans les deux échantillons, la raie à 4,45 Å est bien développée, ainsi d'ailleurs que les raies à 3,20 et 4,04 Å des plagioclases (andésine). La raie à 15-16 Å est faible dans E 94 et passe à 17,7 Å par traitement au glycérol. Dans l'échantillon E 118, ces raies sont très faibles et peuvent même dans certaines extractions demeurer insignifiantes.

Notons que d'une extraction à l'autre, des variations sensibles peuvent être observées. Les raies de la montmorillonite et le gonflement au glycérol peuvent être sensibles, quoique faibles, ou insignifiantes. La figure 14 montre ainsi les diagrammes obtenus sur deux extractions différentes du même échantillon E 94 (Analyse thermique différentielle et rayons X).

Un échantillon prélevé à proximité de E 94, mais sur les pentes remaniées par le vent et non dans le replat de la vallée, ne révèle aux rayons X que des produits amorphes et des minéraux primaires (E 177), (fig. 15).

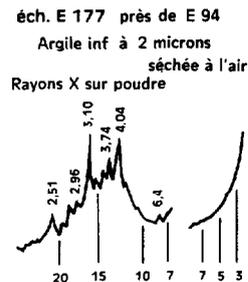


FIG. 15

Les spectres infrarouge indiquent, cependant, un état d'organisation relativement élevé. Les bandes d'absorption des hydroxydes à $3\ 700$ et $3\ 620\text{ cm}^{-1}$ sont peu accentuées mais bien visibles, plus faibles dans E 118 que dans E 94, (fig. 16 et 17).

Les bandes de valence Si-O entre $1\ 000$ et $1\ 100\text{ cm}^{-1}$ sont analogues avec des composantes nettes. La bande Al-OH (Al hexacoordonné) à 910 cm^{-1} est bien développée ainsi que les bandes $780\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ plus accentuées dans E 94. La bande Si-O-Al à 450 cm^{-1} est très bien définie.

A part le doublet $440\text{-}470\text{ cm}^{-1}$, moins prononcé, toute cette partie du diagramme est donc très comparable à celle des sols à halloysite des régions plus humides.

L'organisation du réseau serait nettement meilleure que dans les sols du paramon.

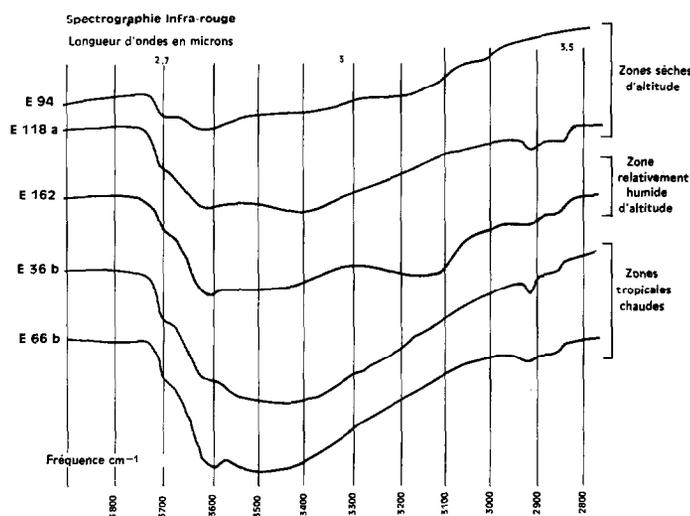


FIG. 16. — Spectrographie infrarouge

Il semblerait donc qu'en présence de produits amorphes, il y ait quelque difficulté à apprécier avec les rayons X les débuts d'organisation d'un réseau cristallin, qu'il s'agisse de montmorillonite ou d'halloysite. Nous avons vu que, d'une extraction à l'autre, l'importance des raies de la montmorillonite à $14\text{-}15\text{ \AA}$ et leur passage à 17 au glycérol, pouvaient varier très sensiblement.

L'infrarouge traduirait avec plus de sensibilité cette tendance à l'organisation sans qu'il soit aisé d'indiquer avec précision le type d'argile qui se forme. En effet, la seule région du spectre où il semble possible de trouver une différence pour identifier, soit la montmorillonite, soit l'halloysite, serait la bande des OH. Ce n'est cependant pas certain puisque la bande principale de la montmorillonite est située vers $3\ 620\text{ cm}^{-1}$ à un emplacement où l'halloysite montre aussi une bande d'absorption. Les spectres correspondant aux bandes de valence et du réseau sont assez comparables pour la kaolinite et la montmorillonite, ce qui ne peut surprendre, puisque les mêmes types structuraux s'y retrouvent.

Dans le cas présent, il semble que l'on ait affaire à de l'halloysite et de la montmorillonite, sans qu'il soit possible d'indiquer si l'apparition de ces deux types d'argile est simultanée ou si la montmorillonite précède l'halloysite.

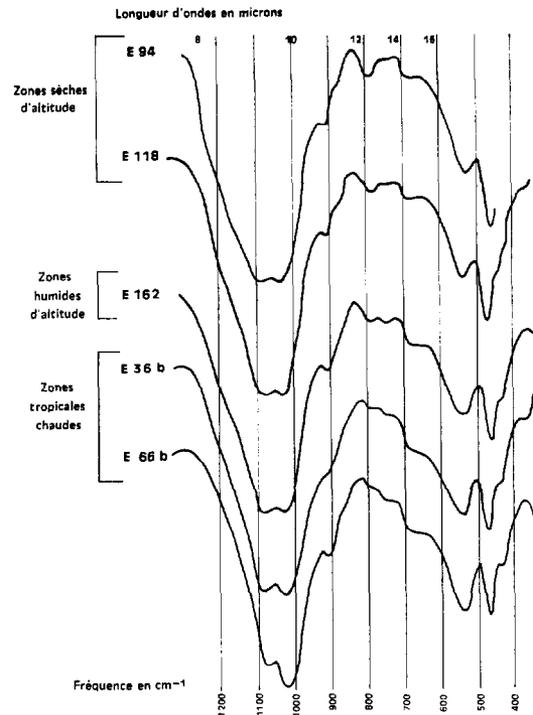


FIG. 17. — Spectrographie infrarouge (suite)

Le maintien d'une certaine valeur de la capacité d'échange après traitements acide-base, viendrait confirmer la présence d'un peu d'argiles cristallines, parmi les substances amorphes.

TABLEAU 24

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASE

Ech. sol	TNH ₄ à pH 7 (1)	TNH ₄ à pH 9 (2)	après traitement H ₂ O ₂ (3)	après traitement SEGALEN (4)
118 a	21	22	20	5
118 b	35	35	31	10

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7

(2) Idem, mais à pH 9

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1)

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6N et la soude 0,5 N à froid, puis détermination de T à pH 7.

7.2 -

Deux autres profils ont été examinés près d'Ambato, au nord et au sud, à une vingtaine de kilomètres l'un de l'autre, sur des plateaux à pente modérée. Il s'agit de cendres probablement assez récentes ou alors remaniées par le vent. Le sol est sableux, très fin, homogène sur environ un mètre, de coloration très foncée humide (10 YR 3/2 à 3/1), devenant très clair sec (5 Y 5/3 à 6/1). Il n'y a pas de cohésion et de sol sec s'éboule dans les trous de sondage ou les tranchées.

Les propriétés physico-chimiques sont très voisines. Ces régosols renfermeraient très peu d'argile et moins de 1 % de matière organique. Ils sont relativement bien saturés en bases et ont des pH voisins de 7. La capacité d'échange est faible. Les acides humiques l'emportent très nettement sur les acides fulviques (tableau 25).

TABLEAU 25

Profil	Prof. (cm)	Argile < 2 μ	Limon 2-20 μ	Sables			Bases échangeables mé %					T	V (%)	pH eau
				20 50 μ	50 200 μ	200 2000 μ	Ca	Mg	K	Na	S			
172	0-30	2	6,3	14,2	39	37	2,3	1,7	0,45	0,14	4	5	80	7,0
	70-100	2,7	15,3	19	42	19	4,1	2,1	0,60	0,36	7,1	9	80	7,6
171	0-30	5	18	21	34	19	5	1,7	0,54	0,38	7,6	10	76	7,4

Profil	Prof. (cm)	M.O (%)	C/N	Matières humiques C %			P ₂ O ₅ Truog
				Totales	Ac. humiques	Ac. fulviques	
172	0-30	0,62	8,1	0,069	0,056	0,013	6,5
	70-100	0,58	10				
171	0-30	0,56	11	0,078	0,051	0,027	7,1

Dans le profil 172, les rayons X indiquent un accroissement de l'halloysite de la surface vers la profondeur. A peine sensible en surface, la raie à 10 Å apparaît nettement en profondeur et disparaît par séchage à 100°. La raie à 4,37 est également plus accentuée en profondeur qu'en surface, alors que les autres raies, dues aux minéraux primaires, d'intensités identiques, sont l'indice d'extractions comparables (raies à 3,18 et 4,04 Å des plagioclases). Notons encore une petite raie à 6,4 Å, (fig. 18).

Dans l'échantillon prélevé au nord d'Ambato (E 171), la raie à 4,37 est bien développée, mais les raies à 7 et 10 Å ne sont pratiquement pas décelables. Il s'agirait donc de produits amorphes encore très peu organisés.

L'halloysite apparaît donc d'abord en profondeur dans les niveaux où l'humidité persiste davantage. La dessiccation complète des niveaux de surface durant plusieurs mois de l'année, ferait obstacle à l'apparition de l'argile. Il est également possible qu'il y ait entraînement en profondeur des produits formés.

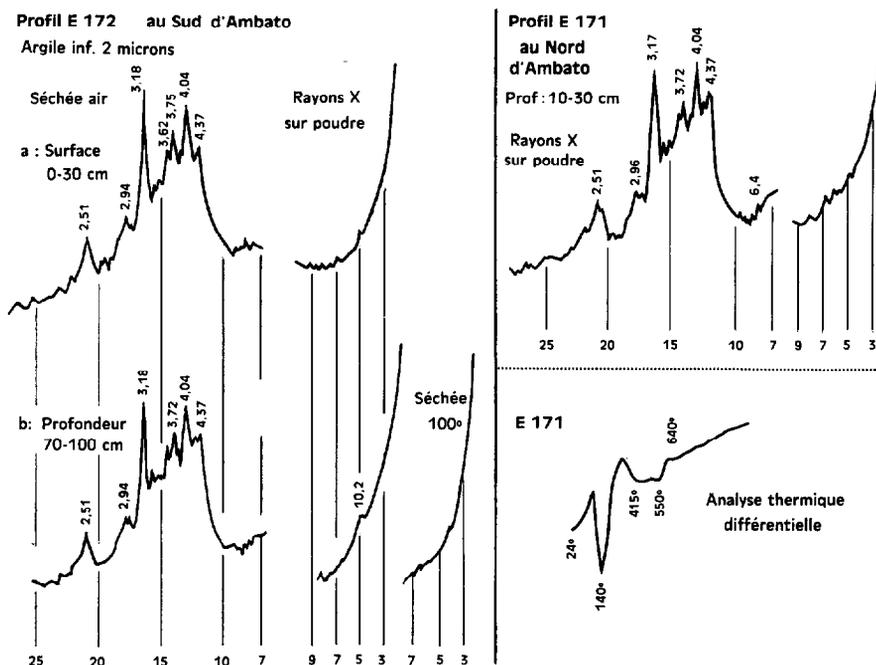


FIG. 18.

La détermination de la capacité d'échange de bases après divers traitements indiquerait que si l'halloysite est manifestement présente en petites quantités, les substances amorphes sont aussi présentes et en quantité peut-être plus importante, (tableau 26).

Aucune différence n'est observée dans les niveaux de surface, si la détermination est effectuée à pH 7 ou pH 9. Une très légère augmentation résulterait du traitement à l'eau oxygénée, mais, par contre, le traitement acide-base provoque une très forte diminution, bien que la dissolution du sol soit difficilement décelable.

7.3 -

Au sud d'Ambato, sous le niveau de cendres de plus de 1 m d'épaisseur, on rencontre une mince couche de ponces et un autre niveau de cendre noire de 0,5 m d'épaisseur avant de passer brutalement à une cendre durcie brune d'au moins deux mètres d'épaisseur, très uniforme. Ce matériau se brise assez difficilement en éléments de tendance subangulaire. De nombreux petits pores sont visibles. Il n'y a pas

TABLEAU 26

Ech. séché air	Capacité d'échange de base en mé %			
	à pH 7 (1)	à pH 9 (2)	après H ₂ O ₂ à pH 7 (3)	après traitement acide à pH 7 (4)
E 171	10	10	12	2,5
E 172	6	6	8	1,5

- (1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7
 (2) Idem, mais à pH 9
 (3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1)
 (4) Trois attaques successives avec HCl, 6N et la soude 0,5 N à froid, puis détermination de T à pH 7.

traces d'accumulation calcaire. Quelques taches noires font penser à des revêtements. On peut penser à une cangagua, mais de dureté relativement modérée.

Les rayons X révèlent la présence de produits amorphes, d'un peu de métahalloysite (faible raie à 7,4 Å) et de minéraux primaires (3,18-4,04 Å = plagioclases). Une petite raie à 10 Å persistant après chauffage à 100°, correspondrait à de l'illite ou à de fins micas. S'agit-il d'illite néoformée ou de fins micas résiduels préexistants dans la cendre ? (fig. 19).

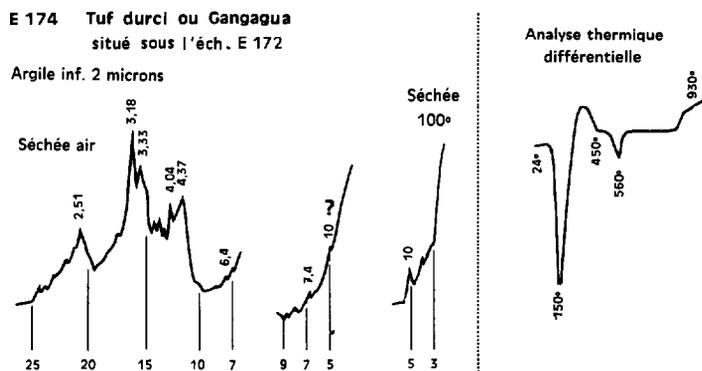


FIG. 19.

La constitution de ce matériau durci est donc très semblable à celle des niveaux supérieurs plus récents. Des conditions climatiques analogues ont donc régné durant sa formation.

7.4 - CONCLUSION

Les processus qui conduisent à l'apparition de l'halloysite sont donc loin d'être aussi nets que dans les sols des régions plus humides de la haute vallée interandine. La fraction fine est souvent très peu représentée et l'étude de ses constituants en est rendue plus difficile. Les substances amorphes semblent s'organiser avec des intermédiaires montmorillonitiques qu'il n'est pas toujours facile de déceler aux rayons X, bien que la spectrographie infrarouge indique nettement une organisation déjà avancée du réseau.

Les profils sont souvent peu épais au-dessus de la cangagua. Ils sèchent rapidement et sont plus ou moins remaniés par les vents en surface, conditions peu propices à l'altération des minéraux primaires, et à la formation et au maintien des fractions très fines. Lorsque les sols sont suffisamment profonds pour qu'une certaine humidité puisse se maintenir une bonne partie de l'année, l'halloysite hydratée semble nettement apparaître. On retrouve alors des conditions qui se rapprochent un peu de celles observées dans les régions plus humides d'altitude.

Il pourrait donc y avoir, dans les niveaux très sableux, organisation de l'halloysite au sein des substances amorphes, sans phase intermédiaire perceptible, comme dans les régions plus humides. Il peut aussi y avoir apparition de montmorillonite, et il est alors difficile de savoir si l'halloysite s'organise indépendamment ou dérive de cet intermédiaire montmorillonitique. L'halloysite ne semble pas présenter l'aspect en bâtonnets classique des régions tropicales chaudes.

8 - LES SOLS DES RÉGIONS ARIDES DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE

En l'absence de données pluviométriques précises pour chaque localité, il semble possible de faire rentrer dans cette catégorie tous les sols dans lesquels apparaît une accumulation calcaire. Les croûtes calcaires se forment généralement en profondeur dans le profil, à la limite des cendres et de la cangagua, ou tuf durci, peu perméable, là où les eaux résiduelles enrichies par la dissolution du calcium provenant des minéraux volcaniques finissent par disparaître, laissant ainsi le sol complètement sec pour plusieurs mois.

On conçoit que, dans ces conditions d'extrême sécheresse, les synthèses des argiles soient lentes.

Près de Latacunga, on observe ainsi sous 1,3 m de cendre fine, le niveau de cangagua très dur, dont la partie supérieure, sur 30 cm, est sillonnée de croûtes blanches plus ou moins continues, subhorizontales, de quelques millimètres d'épaisseur, faisant fortement effervescence à l'acide. Le fait que ces croûtes ne soient rencontrées qu'en surface du tuf, indique qu'elles résultent d'un processus pédologique récent, postérieur à la formation même de la cangagua.

L'examen aux rayons X de cette cangagua broyée, ne révèle que des produits amorphes et les diverses raies des feldspaths. La raie à 4,41 Å est marquée. Elle indiquerait un début d'organisation, mais aucune raie n'apparaît ni à 7 Å, ni à 10 Å. Un léger renflement à 14 Å ne semble rien donner avec le glycérol.

L'organisation du réseau serait encore confuse. Le tuf aurait peu évolué depuis sa formation. Ces résultats donnent à penser qu'il s'agit plutôt d'un tuf en place que d'un sol fossile.

Les niveaux de cendres meubles qui recouvrent ce tuf durci, ont une composition minéralogique des sables fort différente. Le hornblende et l'hypersthène sont en proportion voisine, tandis que l'hypersthène domine largement dans la cangagua.

Le niveau superficiel est assez grossier, mais le niveau 50-130 cm est constitué de sables fins brunâtres (2,5 Y 5/4 à l'état frais), devenant très clairs en séchant (7,2). Le niveau paraît un peu durci. Si la composition minéralogique des sables avait été la même, on aurait pu penser qu'il s'agissait de la cangagua ameublie.

Dans la fraction inférieure à 2 microns de ce niveau de cendre fine, les rayons X révèlent la présence de produits amorphes, de minéraux primaires (3,18 - 4,04 Å = plagioclases) et d'un peu d'illite ou mica. Une petite raie effilée à 10 Å demeure inchangée par traitement au glycérol ou chauffage à 490°. Signons aussi une petite raie à 6,4 Å, (fig. 20).

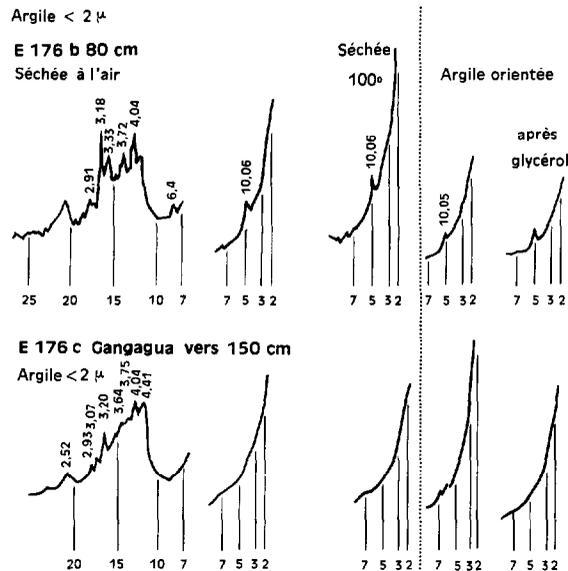


FIG. 20.

TABLEAU 27

Profil	Prof. (cm)	Argile < 2 μ (%)	Limon 2-20 μ (%)	Sables			Bases échangeables mé %					T	pH eau	P ₂ O ₅ Truog mg %	M.O. (%)	C/N
				20 50 μ	50 200 μ	200 2000 μ	Ca	Mg	K	Na	S					
176	0-30	3	5,8	9	44	36	3,3	2,0	0,45	0,26	6.	9	7,1	14	1,2	8,9
	80	3,3	20	21	40	13	(18)	3,7	1,04	0,5	6.	10	8,3	13	0,3	6,5

Ce niveau est déjà calcaire. Le taux de calcium extrait par l'acétate d'ammonium, supérieur à la valeur de la capacité d'échange, indiquerait un calcaire facilement soluble. Le pH est voisin de 8,3.

La présence de substances amorphes est confirmée par la diminution importante de la capacité d'échange de bases après le traitement acide-base, alors qu'elle demeure constante à pH 9 ou après traitement H_2O_2 . Elle passe ainsi de 18 mé % à 4 mé %, cette valeur non négligeable indiquant encore la présence d'un peu d'argile cristalline.

CONCLUSION

La présence de minéraux micacés peut surprendre bien qu'elle ait été souvent signalée par divers auteurs dans les sols sur cendres des volcans du Mexique. S'agit-il vraiment d'illite ou de très fins micas, résultant de la fragmentation des biotites qui entrent fréquemment dans la composition des cendres rejetées par les volcans. SAUER (1965) signale ainsi des formations de laves riches en biotites.

L'hypothèse d'une néoformation d'illite dans ces sols perméables en zone très sèche est-elle possible ? L'illite est très rarement observée sur les formations volcaniques.

Rappelons qu'une petite quantité d'illite avait été observée dans un niveau de cendre un peu durcie, rappelant une cangagua, au Sud d'Ambato. S'agirait-il d'un niveau analogue ? C'est possible, car la composition minéralogique des sables est identique.

Contrairement aux cendres consolidées des régions plus humides qui ne renferment que de l'halloysite, les dépôts de cendres brunâtres des régions sèches, peuvent donc contenir un peu d'illite ou de fins micas dont l'origine reste à préciser. On peut penser, pour le moment, à un héritage de la cendre originelle, plutôt qu'à une néoformation.

La cangagua dure et cimentée en surface par les croûtes calcaires aurait fort peu évolué depuis son dépôt et ne renfermerait que peu ou pas d'argiles cristallisées.

9 - COMPARAISON DES SOLS DE LA HAUTE VALLÉE INTERANDINE AVEC CEUX DES RÉGIONS CHAUDES TROPICALES DE BASSE ALTITUDE

On a déjà montré que des niveaux allophaniques fortement hydratés, tout à fait semblables à ceux des régions chaudes tropicales, pouvaient se former dans les climats tempérés froids d'altitude sous des températures moyennes de 6 à 8° C.

La comparaison des sols de la haute vallée interandine, presque tous soumis à une saison sèche importante entraînant une dessiccation assez profonde du sol, ne pourra donc être faite valablement qu'avec les sols des régions chaudes qui subissent aussi une certaine dessiccation. On laissera de côté les sols très humides où le caractère évolutif consiste en une hydratation de plus en plus marquée du sol qui accompagne, suite à l'altération des minéraux primaires, l'augmentation progressive des amorphes, et on s'attachera surtout aux sols dits de « transition allophanes-halloysite » où les produits amorphes subissent une certaine dessiccation et évoluent nettement vers l'halloysite.

On ne rencontre pas dans la zone tropicale chaude des sols sur cendres soumis à une sécheresse aussi accentuée que dans certaines des régions d'altitude. Les comparaisons concerneraient donc essentiel-

lement les sols cultivés des régions modérément humides de la haute vallée, recevant parfois 1 à 1,5 m de pluviométrie annuelle, assez bien répartie. On a vu que dans ces sols, les conditions semblaient très favorables à la formation de l'halloysite.

L'aspect des sols des régions chaudes est assez voisin de celui des régions d'altitude modérément humide. Sur un mètre environ, le sol est sableux, bien humifère, agrégé par la matière organique dans les 30 premiers centimètres, finement grumeleux. La structure devient plus particulière en profondeur et de nombreux pores sont visibles. La coloration, très foncée sur le sol humide (10 YR 2/2), devient très claire sur le sol sec.

Ces profils reposent, vers 1 m ou 1,5 m, sur un ancien sol argileux brun-rouille à halloysite, dont l'argilisation poussée, l'évolution à tendance ferrallitique est bien caractéristique des régions tropicales. Ce sol enfoui n'est pas comparable aux cangaguas des hautes altitudes. C'est un terme d'évolution qui ne semble pas exister en altitude et qu'on laissera donc de côté.

Les propriétés physico-chimiques de ces sols des régions chaudes, sont très voisines de celles des sols d'altitude : teneurs en bases échangeables, capacité d'échange, pH. Aucune différence sensible n'apparaît entre les mesures de pF sur échantillons conservés frais ou séchés à l'air (tableau 29).

Trois profils ont été comparés. Ils ont été choisis à quelques dizaines de kilomètres de distance, l'un dans une région à saison sèche encore peu marquée (E 72), un autre dans une région où la dessiccation du sol est plus accentuée (E 36) et enfin le dernier, dans une région où le sol se dessèche fortement certains mois de l'année, rendant l'irrigation nécessaire (Est Quevedo - Finca Santa Fé, à mi-distance de Quevedo et d'Empalme - au-delà d'Empalme).

Les rayons X montrent très bien, dans le niveau situé vers 40 cm, l'augmentation régulière de l'halloysite. A peine marquée dans l'échantillon E 72, la raie à 10 Å est déjà plus nette dans E 36, passant à 7,4 Å par séchage à 100°, et bien découpée dans E 66, dans la zone la plus sèche, passant aussi à 7,4 Å par chauffage à 100°. La raie à 4,37 augmente régulièrement d'intensité. Diverses raies de minéraux primaires sont également visibles. Un renflement vers 7,5 Å dans E 36 et E 66, indiquerait déjà la présence d'un peu de métahalloysite. En zone relativement arrosée, les amorphes sont donc encore très importants, tandis qu'en zone plus sèche, l'halloysite semble s'organiser davantage, (fig. 21).

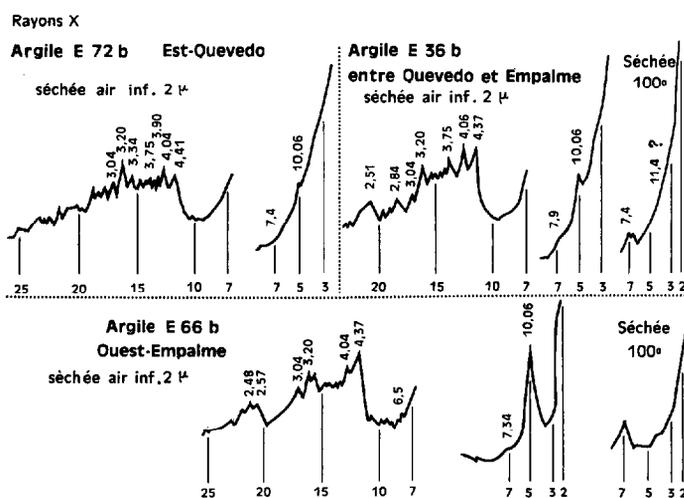


FIG. 21.

Les spectres d'infrarouge sont également très suggestifs. Dans la bande des OH, l'absorption importante entre $3\ 300$ et $3\ 700\text{ cm}^{-1}$, révèle la présence de produits amorphes. Les deux bandes d'absorption de l'hallowysite vers $3\ 700$ et $3\ 620\text{ cm}^{-1}$ sont très peu marquées pour E 72 en zone humide, mais deviennent nettement plus prononcées en zone plus sèche dans E 36 et surtout E 66, (fig. 22).

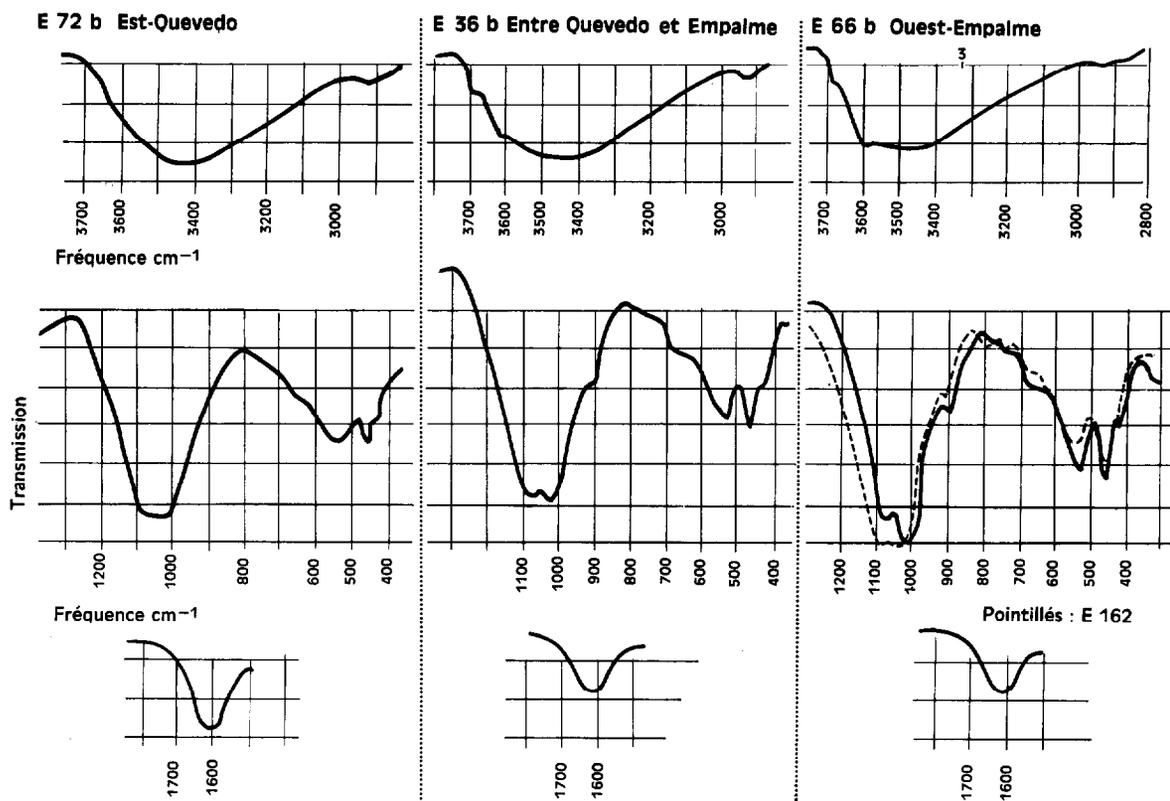


FIG 22. — Diagrammes infrarouge des argiles (vers les régions de plus en plus sèches)

On observe d'autre part, que la bande de déformation de la molécule d'eau vers $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ tend à diminuer d'intensité avec l'augmentation de la cristallinité. Il est possible d'en déduire que la condensation qui l'accompagne va de pair avec l'expulsion d'une quantité de plus en plus considérable de l'eau interstitielle habituellement retenue par les matériaux amorphes.

Dans la zone d'absorption de $1\ 000$ - $1\ 100\text{ cm}^{-1}$, on voit très nettement la différenciation et l'affinement des bandes d'absorption Si-O. La bande Al-OH (Al hexacoordonné) à 900 cm^{-1} est à peine discernable dans E 72 et s'accroît nettement dans E 36 et surtout E 66, signe d'une assez bonne organisation tétraédrique et octaédrique. L'épaulement Si-O-Al à 800 cm^{-1} est moins sensible que dans les sols d'altitude ; peut-être tout simplement parce que le meilleur développement de la bande de réseau Si-O-Al dans la région voisine la masque en partie. Les bandes Si-O-Al entre 500 et 750 cm^{-1} s'affinent davantage ainsi que les doublets Si-O à 540 - 570 cm^{-1} , signe d'une bonne séparation des couches tétraédriques et octaédriques.

Ces spectres indiquent donc une évolution de plus en plus nette vers l'halloysite quand la sécheresse s'accroît. Ils sont similaires à ceux obtenus pour les sols d'altitude placés dans des conditions de sécheresse et d'humidité voisines.

Le fait que la bande à 800 cm^{-1} Si-O-Al soit bien marquée dans les sols des hautes altitudes et à peine sensible dans les régions chaudes peut-il être interprété comme un excès de silice libre (FIELDER, 1955) à ne pas confondre avec de la silice amorphe ? Cette bande est la mieux marquée dans E 94, profil des régions les plus sèches d'altitude. Elle n'existe pas dans les sols sur cendres des régions tropicales chaudes des Antilles. L'absence de cette bande peut-elle, dans certains cas au moins, être considérée comme l'indice d'un début de ferrallitisation, processus de dégradation d'un réseau cristallin avec élimination active de la silice ?

Le microscope électronique confirme très bien ces observations.

L'échantillon E 72 situé en région à saison sèche encore peu marquée, présente des amas encore diffus parmi lesquels quelques ébauches de tubes apparaissent. Par contre, les échantillons situés en régions plus sèches montrent très distinctement les bâtonnets de l'halloysite (planche III).

En dépit de la présence de tubes d'halloysite relativement bien formés, on constate une chute importante de la capacité totale d'échange après traitement acide-base. S'agit-il d'amorphes ou d'une halloysite encore relativement mal cristallisée, à capacité d'échange élevée, dont le réseau peut aisément être détruit ? La netteté des tubes le laisserait supposer.

TABLEAU 28

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE APRÈS DIVERS TRAITEMENTS

Echantillon		pH 7 (1)	pH 9 (2)	après H ₂ O ₂ (3)	après SEGALIN (4)
<i>Sols des régions basses tropicales à saison sèche marquée</i>					
E 98	Surface	41	42	26	5
	Profondeur	28	32	34	4
E 102	Profondeur	35	37	34	3
<i>Sols des régions basses tropicales à saison sèche très peu marquée</i>					
46 b		9	12	14	2
49 b		16	21	18	3
41 c		25	33	31	2
40 c		23	30	28	4
<i>Sols d'altitudes - Vallée interandine</i>					
118 a	Surface	22	22	20	5
	Profondeur	36	36	32	10
162		38	42	27	4
115 a		22	25	24	4

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(4) Trois attaques successives avec HCl 6N et la soude 0,5 N à froid, puis détermination de T à pH 7.

La capacité d'échange de bases dans ces sols, demeure inchangée si elle est déterminée à pH 9 au lieu du pH 7. Après attaque à l'eau oxygénée, on n'observe de diminution que dans les niveaux de surface riches en matières organiques fraîches. Des résultats semblables sont obtenus sur les sols d'altitudes.

Sur les mêmes formations, mais en régions à saison sèche peu marquée, la capacité d'échange semble nettement augmenter à pH 9, mais demeure inchangée après traitement à l'eau oxygénée. Ces variations doivent être attribuées à la présence de produits amorphes hydratés, bien que les déterminations aient été exécutées sur échantillons séchés à l'air (tableau 28).

Matières humiques

On a montré qu'en altitude, dans les horizons supérieurs des sols, les acides humiques et fulviques existent en quantités équivalentes et qu'il y a une nette tendance à l'augmentation de la proportion des acides humiques dans les horizons profonds.

TABLEAU 29

MATIÈRES ORGANIQUES ET HUMIQUES

Profond. (cm)	M.O.	C/N	Matières humiques C %			
			Totales	Ac. humiques	Ac. fulviques	
<i>Sols des régions humides - Sols faiblement allophaniques</i>						
0-15	8,3	13	1,09	0,35	0,74	Sto Domingo
0-15	7,1	9,8	1,02	0,34	0,68	Quevedo-Sto Domingo
0-15	6,7	11,6	1,08	0,30	0,78	Nord la Mana
0-15	4,9	11,0	0,64	0,21	0,42	
<i>Sols de transition vers les zones sèches</i>						
0-20	8,8	11,8	0,6	0,25	0,35	Sud-Est Quevedo E 72
<i>Sols soumis à dessiccation - Sols de transition allophanes-halloysite</i>						
0-15	9	10,7	0,44	0,24	0,20	Quevedo-Empalme E 102
0-20	5,6	10	0,39	0,21	0,18	Ouest Empalme E 66
<i>Sols d'altitude de la haute vallée - Zone modérément humide</i>						
0-30	5,8	10	0,43	0,22	0,20	Uyumbicho E 165
<i>Sols d'altitude de la haute vallée - Zones sèches</i>						
0-30	1,0	11,5	0,08	0,051	0,027	Ambato
0-30	0,6	8,1	0,07	0,056	0,013	

Par contre, dans les sols des basses plaines tropicales humides et chaudes, les acides fulviques l'emportent largement (sols faiblement allophaniques). Lorsque dans ces plaines basses la saison sèche est mieux marquée et la pluviométrie totale moins importante, la proportion des acides humiques s'élève à nouveau et les teneurs peuvent atteindre celles des acides fulviques. Cet accroissement s'observe très bien sur le terrain.

On retrouve donc les caractéristiques des sols des régions d'altitude, soumis eux aussi à une période sèche marquée et à une dessiccation relative, et le fait que la température soit nettement inférieure, n'est peut-être qu'un facteur secondaire.

CONCLUSION

Qu'il s'agisse des sols fortement allophaniques ou des sols de transition allophanes-halloysite, c'est donc essentiellement le facteur humidité du sol qui, dans les premiers stades, influe sur l'évolution des sols sur cendres. La température elle-même n'a, semble-t-il, pas d'influence directe, mais seulement une action indirecte, par diminution de l'évapotranspiration, sur la nature des constituants colloïdaux minéraux ou organiques formés, et les propriétés physico-chimiques des sols.

Le maintien d'une certaine humidité dans le sol est sous la dépendance de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Dans ces régions tropicales chaudes, un calcul précis du bilan d'eau serait tout à fait illusoire du fait de l'abondance, durant la saison sèche, des fines pluies matinales ou « garaua », qui ne sont pas mesurables. Le degré de finesse des particules de certains niveaux de cendres joue un rôle important également dans la rétention en eau du sol.

Bien que les diagrammes de rayons X, d'infrarouge et d'analyse thermique différentielle indiquent de façon très analogue la formation de l'halloysite, l'aspect en tubes n'a, jusqu'ici, été observé que dans les régions chaudes tropicales de basse altitude.

10 - CONCLUSIONS

Tous les sols étudiés sont encore jeunes et relativement peu évolués, riches en minéraux primaires qui constituent l'essentiel du sol. Ils renferment dans leur fraction fine une importante proportion de substances amorphes ou mal cristallisées, difficiles d'ailleurs à bien caractériser.

Les sols à substances amorphes hydratées en *région constamment humide* présentent, outre ce caractère très significatif d'hydratation, une élévation sensible de la capacité d'échange, déjà importante à pH 7, lorsqu'elle est mesurée à pH 9 sur échantillons conservés humides. Après traitement acide, les valeurs de T deviennent négligeables. La spectrographie infrarouge, les rayons X, l'analyse thermique différentielle, le microscope électronique, confirment l'absence d'organisation.

La fraction fine des sols soumis à un *dessèchement temporaire* présente déjà en général, un début d'organisation. La capacité d'échange n'est pas sensiblement modifiée à pH 9, mais elle décroît beaucoup après le traitement acide-base, montrant ainsi l'importance des substances amorphes ou aisément solubles.

Certains échantillons paraissent être surtout à l'état amorphes. Dans d'autres, la spectrographie infrarouge, plus sensible que les rayons X, révèle déjà une organisation assez poussée. D'autres encore

présentent déjà les raies de l'halloysite aux rayons X, les crochets à l'analyse thermique différentielle, et les tubes au microscope électronique. Même dans les échantillons où les tubes sont relativement bien formés, on constate une chute de la capacité d'échange après les traitements acides. Existe-t-il des amorphes difficiles à mettre en évidence en présence des tubes de l'halloysite ? Ces tubes, plus ou moins bien formés, correspondent-ils à une forme d'halloysite facilement détruite par les acides ? Les bâtonnets de l'halloysite ne semblent pas exister en altitude en zone tempérée.

Dans les *régions sèches* d'altitude, le faible développement du profil, les remaniements par les vents, etc. rendent les études plus difficiles. La montmorillonite semble apparaître en même temps que l'halloysite, mais son existence même est difficile à établir. Les interprétations peuvent varier d'une extraction à l'autre, sans doute par suite des modifications apportées par les agents chimiques à ces argiles encore mal cristallisées. La spectrographie infrarouge indique cependant une organisation déjà poussée qui est loin d'être aussi perceptible avec les autres techniques utilisées.

Les méthodes utilisées confirment donc la similitude de beaucoup de sols des régions d'altitudes tempérées fraîches avec ceux des régions chaudes tropicales.

— C'est le cas des sols à allophanes hydratés où l'humidité est le facteur essentiel de formation, la température n'ayant pas d'influence sensible.

— La formation de l'halloysite à 10 Å en masses globulaires ou tubes est donc la règle dans tous les sols perméables sur cendres situés en climat humide, mais subissant une certaine dessiccation. Cette halloysite « jeune » pourrait être facilement attaquée par les acides, mais des études complémentaires sont sur ce point nécessaires. Jusqu'où peut-on parler de produits amorphes ? Quand faut-il parler d'halloysite ? Il semble que différentes formes transitoires ou des mélanges soient encore à distinguer.

— La montmorillonite apparaît dans les sols soumis à des dessiccations prolongées. On est encore, cependant, très loin en altitude des vertisols des régions tropicales chaudes et sèches. L'identification de la montmorillonite en présence d'halloysite et de produits amorphes est délicate, et la spectrographie infrarouge ne peut guère, sur ce point, être vraiment utile.

Il y a donc, en altitude comme en zone tropicale chaude, suivant les conditions climatiques agissant sur l'humidité des sols, maintien des substances hydratées, formation d'halloysite, ou formation d'halloysite et de montmorillonite.

L'halloysite apparaît-elle directement au sein des amorphes, ou dérive-t-elle d'un intermédiaire montmorillonitique, cette étape pouvant être très fugace dans les sols perméables des régions relativement humides ?

Le passage de la montmorillonite à l'halloysite présente deux possibilités. Qu'il en soit ainsi dans la nature demeure encore une supposition.

a. Il peut y avoir élimination d'une couche tétraédrique avec formation ainsi de kaolinite à deux couches : tétraédrique et octaédrique. De la silice libre pourrait, en ce cas, apparaître et son identification par spectrographie infrarouge serait possible. C'est peut-être le processus des régions sèches.

b. Il peut aussi se former une couche de type gibbsitique qui s'intercale entre les feuillets de la montmorillonite. On obtient un édifice avec deux couches tétraédriques et octaédriques, c'est-à-dire une kaolinite. Il n'y aurait pas alors apparition de silice libre. Une variante serait l'auto-aluminisation entre les feuillets, avec probablement apparition de silice libre pouvant être rapidement entraînée. C'est peut-être le processus des régions humides à climat ferrallitisant. Dans ces régions, en effet, les bandes d'absorption IR qui peuvent être attribuées à la silice libre (mais non amorphe) sont très faibles ou absentes, alors que dans les régions d'altitude à climat plus froid, elles sont souvent bien marquées. Cette bande à 800 cm^{-1} est spécifique de la silice, mais il est difficile de savoir le pourcentage qu'il faut attribuer à de la silice libre

éventuelle et à celle du réseau argileux. D'autres méthodes doivent venir en aide à la spectrographie infrarouge pour établir ces distinctions.

L'auto-aluminisation exige des pH très bas pour désaturer et acidifier la montmorillonite qui s'alumine alors spontanément. Après l'intercalation de feuillets gibbsitiques dans les couches de la montmorillonite, la transformation serait plus facile ; elle a été réalisée au laboratoire, en milieu acide, en un temps mesurable à la température de 175° (PONCELET et BRINDLEY, 1967). Les facteurs requis peuvent naturellement différer à l'échelle des temps pédologiques.

La notion de pH et d'état de saturation en bases est totalement perturbée avec les substances amorphes hydratées. Celles-ci peuvent présenter des pH élevés, compris entre 6 et 7, pour des taux de saturation insignifiants. De même, certains niveaux montmorillonitiques dérivés de formations volcaniques ont des pH extrêmement bas (3,5-4) pour des teneurs en bases échangeables considérables (40 à 60 mé %).

Il est donc également possible que l'halloysite puisse s'élaborer directement au sein des amorphes et que la montmorillonite ne soit alors qu'une phase parallèle, apparaissant là où il y a des points plus riches en bases permettant sa cristallisation, puis se dégradant là où l'acidité se développe et rend, par exemple, l'auto-aluminisation possible.

L'analogie des minéraux argileux formés en régions tropicales chaudes ou tempérées froides d'altitude pour des conditions d'humidité analogues, semble pouvoir être étendue aux substances humiques. Si, en effet, les acides fulviques l'emportent largement sur les acides humiques dans les régions chaudes humides (à climat ferrallisant), par contre, dans les sols soumis à dessiccation, les acides humiques et fulviques se retrouvent en proportions voisines en altitude comme en zone chaude.

Ce n'est vraiment qu'aux très hautes altitudes que des niveaux noirs très foncés, riches en substances humiques, apparaissent en profondeur. Cependant de tels niveaux moins foncés apparaissent aussi à basse altitude, mais leur étude n'a pas encore été entreprise.

Les processus qui conduisent à la formation de sols analogues en altitude, en zone fraîche et en zones basses chaudes, sont-ils identiques ou diffèrent-ils ? Les produits finaux élaborés paraissent les mêmes, la seule différence constatée étant l'aspect au microscope électronique de l'halloysite, qui se présente sous forme de tubes en régions tropicales chaudes et de fins glomérules en zones d'altitude tempérées. L'observation des stades intermédiaires de l'évolution est délicate, mais la spectrographie infrarouge, le microscope électronique et certaines techniques chimiques peuvent aider à les préciser.

Dans l'état actuel, il semble peu raisonnable de distinguer dans la classification les sols d'altitude et ceux des régions basses qui se ressemblent étroitement.

Etablir une distinction sur le plan agronomique semble cependant utile car la vocation agricole de ces sols est fort différente, les uns ne convenant qu'aux cultures tropicales, les autres aux productions des régions tempérées ou froides. A défaut de critères pédologiques concernant le sol lui-même, il est toutefois possible de retenir la distinction « différence de température », indépendamment de ses effets peu sensibles sur les sols et prise dans une optique essentiellement agronomique, comme c'est le cas dans la 7^e approximation USDA. Se baser sur des hypothèses d'évolution ultérieure à long terme, jusqu'à des stades qui ont peu de chance d'être jamais atteints ouvre la porte à trop de concessions et de facilités.

PLANCHE I



PHOTO 1. — Paramon du Cotopaxi à 3 500 d'altitude.



PHOTO 2. — Niveaux de cendres superposés et sols enfouis dans les prairies du paramon vers 3 500 m d'altitude, en recouvrement sur des formations volcaniques dures.

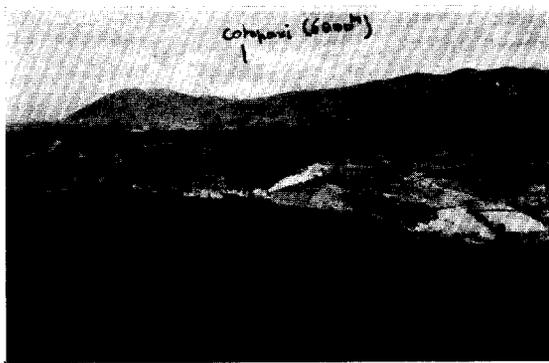


PHOTO 3. — Quelques aspects de la haute vallée interandine avec au fond la cordillère atlantique ou orientale et le Cotopaxi. Photo prise du versant intérieur de la cordillère Pacifique.



PHOTO 4. — Paysage de régions sèches. Profil E 94. Latacunga.

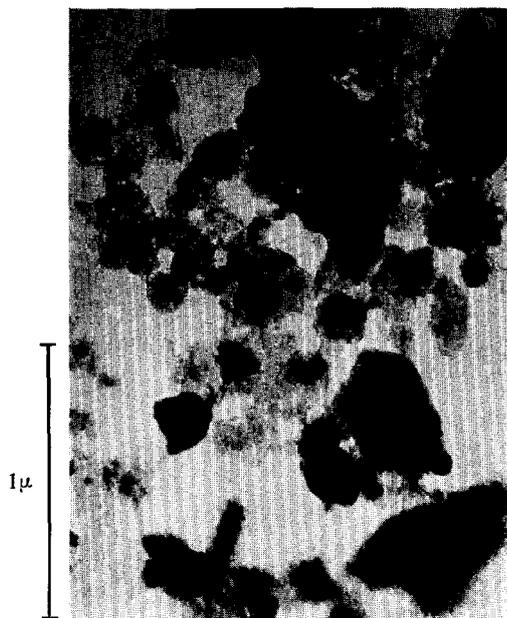


PHOTO 5. — E. 151. (2) (à 3 000 m d'altitude)
amas déchiquetés de fins glomérules avec
quelques rares fibres courtes.

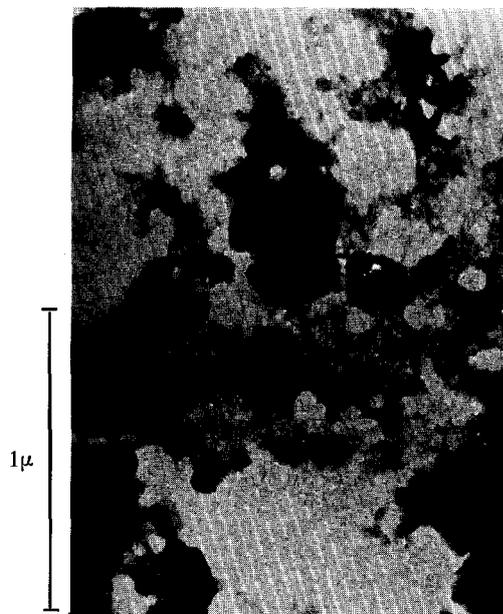


PHOTO 6. — E. 152. (3) (à 3 500 m d'altitude)
amas déchiquetés de fins glomérules avec des
fibrilles plus nettes.

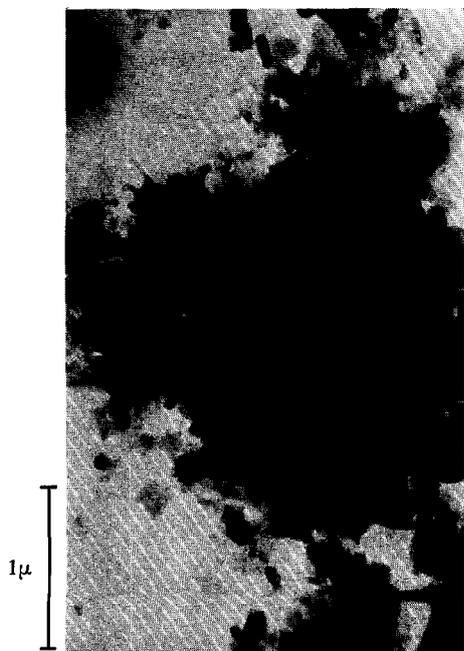


PHOTO 7. — E. 95. (7).

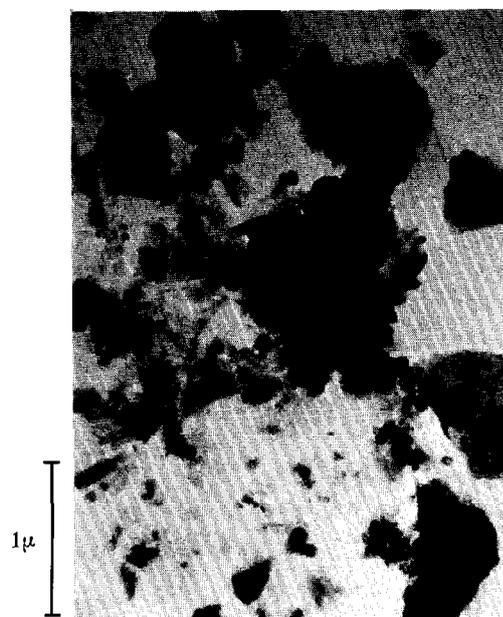


PHOTO 8. — E. 95. (6)

Le microscope électronique révèle quelques plaquettes aux contours irréguliers et mal définis, et l'aspect filamenteux des échantillons fortement hydratés a disparu.

PLANCHE III

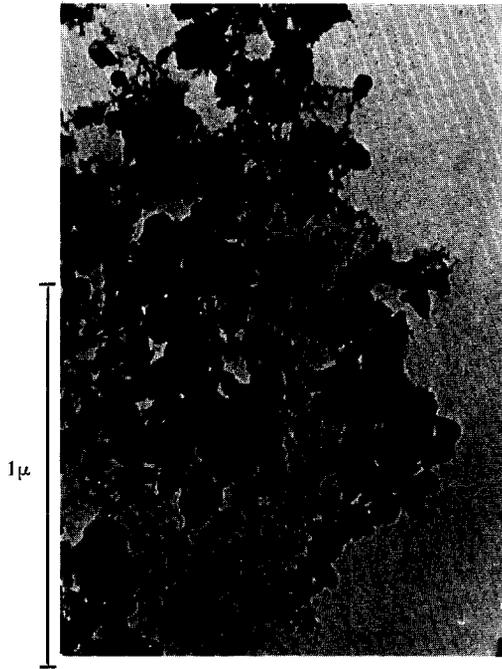


PHOTO 9. — E. 162.15. Particules sphériques concentriques.

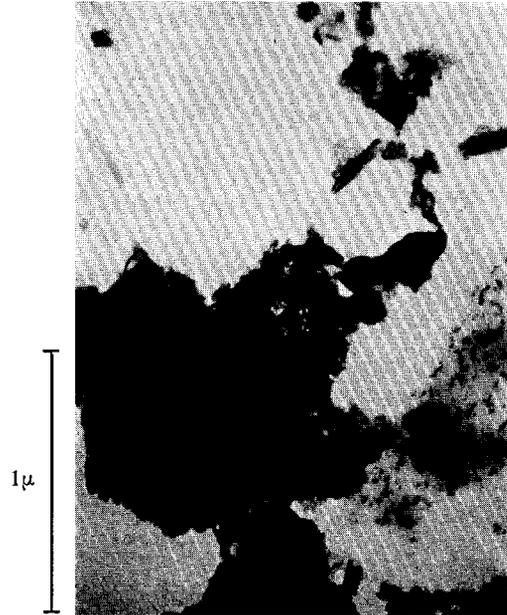


PHOTO 10. — E. 72.6. (région sèche peu marquée). Amas diffus. Quelques rares ébauches de tubes.

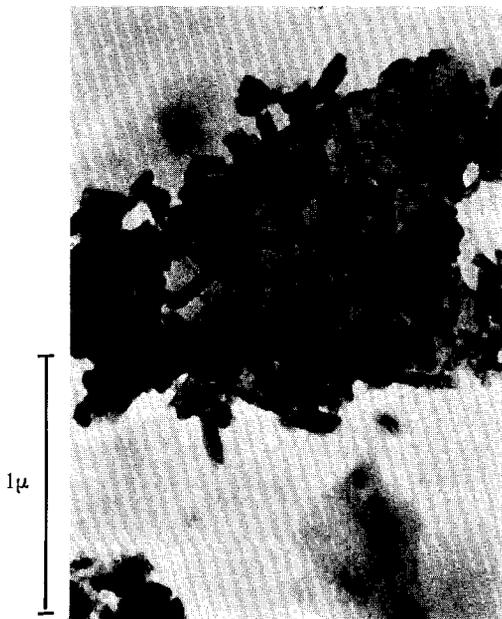


PHOTO 11. — E. 36.8. (région plus sèches) tubes d'halloysite déjà bien formés.

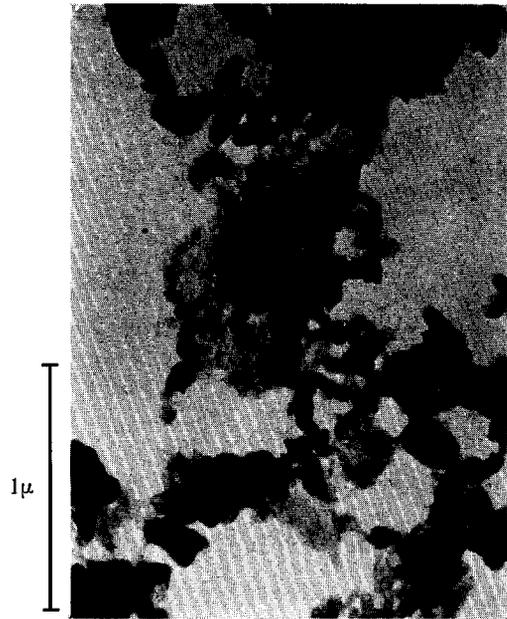


PHOTO 12. — E. 66.3. Tubes d'halloysite et glomérules concentriques

BIBLIOGRAPHIE

- Anuario hidrologico, 1964. — Servicio Nacional de Meteorología e hidrologia n° 2. Quito, Ecuador, 109 p.
- Anuario meteorológico, 1964. — Servicio Nacional de Meteorología e hidrologia, n° 4. Quito, Ecuador, 171 p.
- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1965. — Imogolite of imogo-layers in Kyushu, *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 11, n° 5, pp. 28-35.
- BROWN (G.), 1961. — The X ray identification and crystal structures of clay minerals. *Mineralogical Society*, London, 544 p.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1963. — Minéralogie des argiles. Masson, Paris, 354 p.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 2, pp. 91-121.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), DELAUNE (M.), CUCALON (F.) et al., 1967. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, fasc. 1, pp. 3-37 et fasc. 4, pp. 353-392.
- DUPLAIX (S.), 1958. — Détermination microscopique des minéraux des sables. Libr. Polytechn. Ch. Béranger, Paris, Liège, VIII, 96 p.
- FARMER (V.C.), RUSSEL (J.D.), 1966. — Infra-red absorption spectrometry in clays studies. *Nat. Conf. Clays and Clay minerals*, 15, Pittsburgh, pp. 121-141.
- FIELDES (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand soils, Part II, Allophane and related mineral colloids, *N.Z. J. Sci. Technol.*, pp. 336-350.
- FIELDES (M.), WALKER (I.K.), WILLIAMS (P.P.), 1956. — Clay mineralogy of New Zealand soils, part III, Infra-red absorption spectra of soil clays, *N.Z. J. Sci. Technol.*, pp. 31-43.
- FISCHESSE (R.), 1959. — Données des principales espèces minérales. J. et R. Sennac, Paris, 683 p.
- GRIM (E.R.), 1953. — Clay mineralogy. McGraw Hill, London, 384 p.
- HENDRICKS (D.M.), WHITTIG (L.D.), 1966. — Clay mineralogy of andesite saprolite, *Nat. Conf. clays and clay minerals*, 15, Pittsburgh, pp. 395-407.
- HERRERA (P.), 1963. — Estudio de suelos de la zonas trigueros del ecuador y su fertilidad. *Bol. Inform. Fac, Agron.*, Quito, vol. 1, n° 2, pp. 17-32.
- JACKSON (M.L.), 1962. — Interlayering of expansible layer silicates in soils by chemical weathering. *Nat. Conf. Clays and Clay minerals*, 11, Ottawa, pp. 29-46.
- KANNO (I.), ARIMURA (S.), 1967. — Dispersion of humic allophane soils with supersonic vibration, *Soil, Sci. Plant. Nutr.*, vol. 13, n° 6, pp. 165-170.
- LOMBANA (Abdon Cortes), 1966. — Estudio pedologico de la zona oriental del Iztaccihualt en suelos derivadas de rocas y cenizas volcanicas andesiticas, Chapingo, Mexico, 128 p. *multigr.*
- MEHRA (O.P.), JACKSON (M.L.), 1958. — Iron oxyde removal from soils and clays by a dithionite, citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Nat. Conf. Clays and Clay minerals*, 7, Washington, pp. 317-327.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 464 p.
- PONCELET (G.M.), BRINDLEY (G.W.), 1967. — Experimental formation of kaolonite from montmorillonite at low temperature. *Amer. Miner.*, 52, pp. 1161-1173.
- ROUTHIER (P.), 1965. — La formation des matériaux de l'écorce. Encyclopédie Française, le Ciel et la Terre, t. III, 2° part., sect. B, chap. III : pp. 3-38-9 à 3-44-11.
- SAUER (W.), 1957. — El mapa geologico del ecuador, Ed. Univers., Quito, Ecuador, 70 p.
- SAUER (W.), 1965. — Geologia del Ecuador. Ed. del Ministerio de Educacion, Quito, 383 p.
- SEGALÉN (P.), 1965. — Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 2, pp. 149-175 et fasc. 3, pp. 179-205.

- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-126.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968. — L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du centre Cameroun. *Bull. groupe fr., Argiles*, t. XX, pp. 25-38.
- SUDO (T.), TAKAHASI (H.), 1955. — Shapes of halloysite, particles in japanes clays. *Nat. Conf. Clays and Clay minerals*. 4, Pennsylvania state univ. pp. 67.79.
- USDA. Soil Survey Staf, 1960. — Soil Classification. A comprehensive system, 7th approximation. USDA, Washington, 265 p.
- VENING-MEINESZ (F.A.), 1950. — Earth's crust deformation in geosynclines KKL *nederl. Akad. Wetensch. Proc.*, vol. 53-27.
- YOSHINAGA (N.), YOTSUMOTO (H.), IBE (K.), 1968. — An electron microscopic study of soil allophane with an ordered structure. vol. 53, pp. 319-323.