

F. COLMET D'ANGE ET AL.

Caractéristiques de quelques sols d'Equateur
 dérivés de cendres volcaniques
 parties 1 à 4



CENTRE DES ANTILLES

P 40 - 41 - 67 - 78

I/- / Caractéristiques de quelques sols d'Equateur /
dérivés de cendres volcaniques /

lère partie:
Essai de caractérisation des sols des régions
tropicales humides.

Cahier ORSTOM, Sér. Pédol., 1967, vol.V, n°1, 3-38

F.COLMET DAAGE
F.CUCALON
M.DELAUNE

J.GAUTHEYROU
M.GAUTHEYROU
B.MOREAU

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SOLS D'ÉQUATEUR DÉRIVÉS DE CENDRES VOLCANIQUES

1^{re} Partie :

Essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides

par

F. COLMET-DAAGE (1) F. CUCALON (2)¹ M. DELAUNE (3) J. et M. GAUTHEYROU (4) B. MOREAU (5)

Analyses par les laboratoires :

- du bureau des sols - ORSTOM-Antilles
- des Argiles (6), de Géologie, de Physique des Sols (7) - ORSTOM-France
- de physico-chimie minérale de l'Université de Louvain (8).

RÉSUMÉ

Les cendres volcaniques ont recouvert avec peu de discontinuité de vastes étendues des plaines Pacifique et Amazonienne. L'épaisseur des dépôts successifs est variable.

Les variations de la pluviométrie sont très importantes dans ces régions et influent fortement sur le sens et l'intensité d'évolution des sols qui en dérivent.

En climat constamment humide, un premier stade d'évolution est caractérisé par des sols à substances amorphes, d'abord très jeunes et peu hydratés, puis devenant très fortement hydratés, sans traces d'apparition d'argiles cristallines, mais parfois de la gibbsite.

En climat plus sec, l'halloysite se formerait avec apparition très tardive de la goethite.

Divers stades de "transition", entre ces deux formes d'évolution, sont rencontrés.

La première partie de ce travail est un essai de caractérisation des principaux sols ou, plus précisément, des niveaux les plus typiques qui permettent de les identifier.

Dans la deuxième partie, après avoir replacé les divers sols dans leur cadre naturel et examiné quelques variantes, on s'efforcera de dégager l'influence des divers facteurs sur l'évolution des sols.

La troisième partie comparera l'évolution des sols des hautes altitudes en régions tempérées ou froides et celle des sols des basses plaines tropicales chaudes.

1 et 4 - Bureau des Sols - ORSTOM-Antilles,
2 - D.N.B. et 5 - IFAC : IFEIA-Équateur,
3 - ORSTOM-Bondy, France,
6 - Mlle Fusil et M. Koukouï,
7 - M. Combeou,
8 - M. de Kimpe.

SUMMARY

The volcanic ashes have evenly covered large areas of the Pacific and Amazonic plains. The thickness of successive deposits varies.

The rainfall varies widely in these regions and its variations have a great influence on the orientation and the degree of the soil evolution.

In permanent rainy climate, the first stage of evolution is characterized by soils with amorph materials, first very young and little hydrated, then becoming heavily hydrated, without showing any trace of cristalline clays, but sometime gibbsite.

Under dryer climatic conditions hydrated halloysite may appear and much later goethite. Various stages of "transition" between these two forms of evolution may be found.

The first part of this study is a tentative research of the main characteristics of these soils, or rather of the most typical horizons which make their identification possible.

In the second part, after having replaced the main soils in their natural environment and having examined some of their variants, one endeavours to show the influence of various factors on the soils evolution.

The third part compares the evolutions of the temperate or cold highland soils with that of the warm tropical lowland soils.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vulkanischen Aschen haben mit wenigen Unterbrechungen die grossen Weiten der Pazifik- und Amazonasflächen bedeckt. Die aufeinanderfolgenden Ablagerungen haben verschiedene Dicke.

Die Niederschlagsmenge ist sehr veränderlich in diesen Gebieten und diese Veränderung beeinflusst sehr stark die Richtung und die Intensität der Bodenentwicklung.

In dauernd feuchtem Klima ist ein erstes Entwicklungsstadium charakterisiert durch Böden mit amorphen Substanzen. Die Böden sind zuerst sehr jung und wenig hydrathaltig und werden in der Folge sehr stark hydrathaltig, ohne Spuren vom Aufscheinen kristalliner Tone, hingegen manchmal von Gibbsite zu zeigen.

In trockenerem Klima formt sich das Halloysite mit einem viel späteren Aufscheinen von Goethite.

Man begegnet verschiedene Stadien von "Übergang" zwischen diesen beiden Entwicklungsformen.

Der erste Teil dieser Studie ist ein Versuch die hauptsächlichsten Böden, oder genauer, die Schichtungen der typischsten zu identifizieren.

Im zweiten Teil, nachdem die verschiedenen Böden in ihren natürlichen Rahmen zurückgeordnet und einige Varianten geprüft worden sind, wird man sich bemühen, den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Entwicklung der Böden herauszufolgern.

Der dritte Teil wird die Bodenentwicklung in grossen Höhen, temperierter oder kalter Gebiete mit dieser der niederen, tropischen und warmen Ebenen vergleichen.

RESUMEN

Los cenizas vulcanicas han cubierto con pocas discontinuidades grandes superficies de las llanuras Pacificas y Amazonicas. El espesor de los depositos sucesivos es variable.

Las variaciones de la pluviometria son muy importantes en esas regiones y influyen fuertemente la dirección y la intensidad de evolucion de los suelos derivados.

En clima de humedad constante un primer estadio de evolución esta caracterizado por suelos de substancias amorfas en primer lugar muy jóvenes y levemente hidratados, luego volviendose muy fuertemente hidratados sin trozas de aparición de arcillas cristalinas pero a veces de la "gibbsite".

En clima más seco se formaría "halloysite" con aparición muy tardía de la "goethite".

Varios estadios de "transición" se encuentran entre esas dos formas de evolución.

La primera parte de este trabajo es un ensayo de caracterización de los principales suelos o mas precisamente de los niveles los mas tipicos que permiten de identificarlos.

En la segunda parte, después volver a colocar los diversos suelos en su cuadro natural y examinar algunas variantes, se esforzara una de despejar la influencia de los diversos factores sobre la evolución de los suelos.

La tercera parte comparará la evolución de los suelos de altas altitudes en regiones templadas o frias y la de los suelos de las bajas llanuras tropicales cálidas.

PLAN

- 1 - Introduction
- 2 - Nature des dépôts aériens de cendres volcaniques
- 3 - Essai de caractérisation des sols à allophane et halloysites
 - 3.1 - Sols à allophane-andepts
 - 3.1.1 - Conditions de formation
 - 3.1.2 - Horizon caractéristique des sols fortement allophaniques
 - 3.1.3 - Horizon caractéristique des sols faiblement allophaniques
 - 3.2 - Sols à halloysite
 - 3.2.1 - Conditions de formation
 - 3.2.2 - Horizon caractéristique des sols de transition allophane-halloysite
 - 3.2.3 - Horizon caractéristique des sols argileux à halloysite. Sols bruns tropicaux et ferrisoliques.
- 4 - Conclusion

Au cours d'une courte mission effectuée en 1961, il avait été remarqué dans les plaines bananières d'Equateur, la présence de sols à allophane semblables à ceux des Antilles françaises (COLMET-DAAGE, 1962).

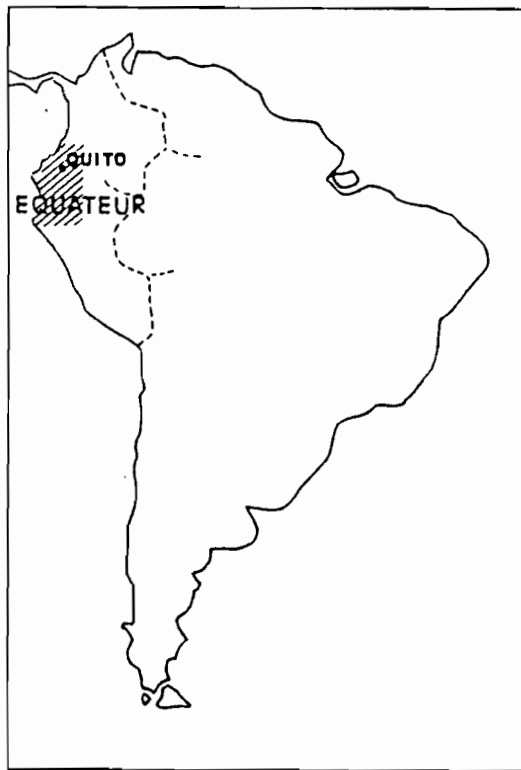
Toutefois, les pluies très abondantes à l'époque des prélèvements de sols, la profondeur des sondages limitée à 120 cm et l'impossibilité d'effectuer alors, sur place, les humidités, avaient empêché de mener cette étude comme il eut été nécessaire.

Le mois de novembre 1963 fut choisi pour effectuer une nouvelle mission (Mission Coopération Technique et Direction Nationale de la Banane organisée par l'Institut de Recherches Fruitières Outre-Mer). A cette époque, dans beaucoup de régions d'Equateur, les sols sont ressuyés après plusieurs mois sans pluies, conditions particulièrement propices à l'étude de la rétention pour l'eau des sols à allophane.

De nombreuses tranchées de 2 m de profondeur, prolongées par des sondages jusqu'à 4 m, ont été ouvertes, grâce aux moyens et au personnel mis à notre disposition par l'Institut de la Recherche Agronomique et d'Élevage d'Equateur, et el Instituto Franco-ecuatoriano de Investigaciones Agronomicas, association de la Direction Nationale de la Banane et de l'I.F.A.C. Les humidités et un certain nombre de déterminations ont été effectuées aussitôt au laboratoire de la station tropicale de l'I.N.I.A.P. à Pichilingue, aimablement prêté par l'Ingénieur LAENES. Les autres déterminations ont été effectuées dans les laboratoires du Bureau des Sols des Antilles (O.R.S.T.O.M.) en Guadeloupe, des S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M. en France, de l'Institut Agronomique de Louvain pour la microscopie électronique.

Les prospections ont essentiellement été localisées aux sols dérivés de cendres volcaniques de la zone bananière de Quevedo, Santo Domingo, Quinindé.

Quelques profils ont été relevés dans la Sierra et sur le versant amazonien (Puyo).



Localisation de la zone étudiée.

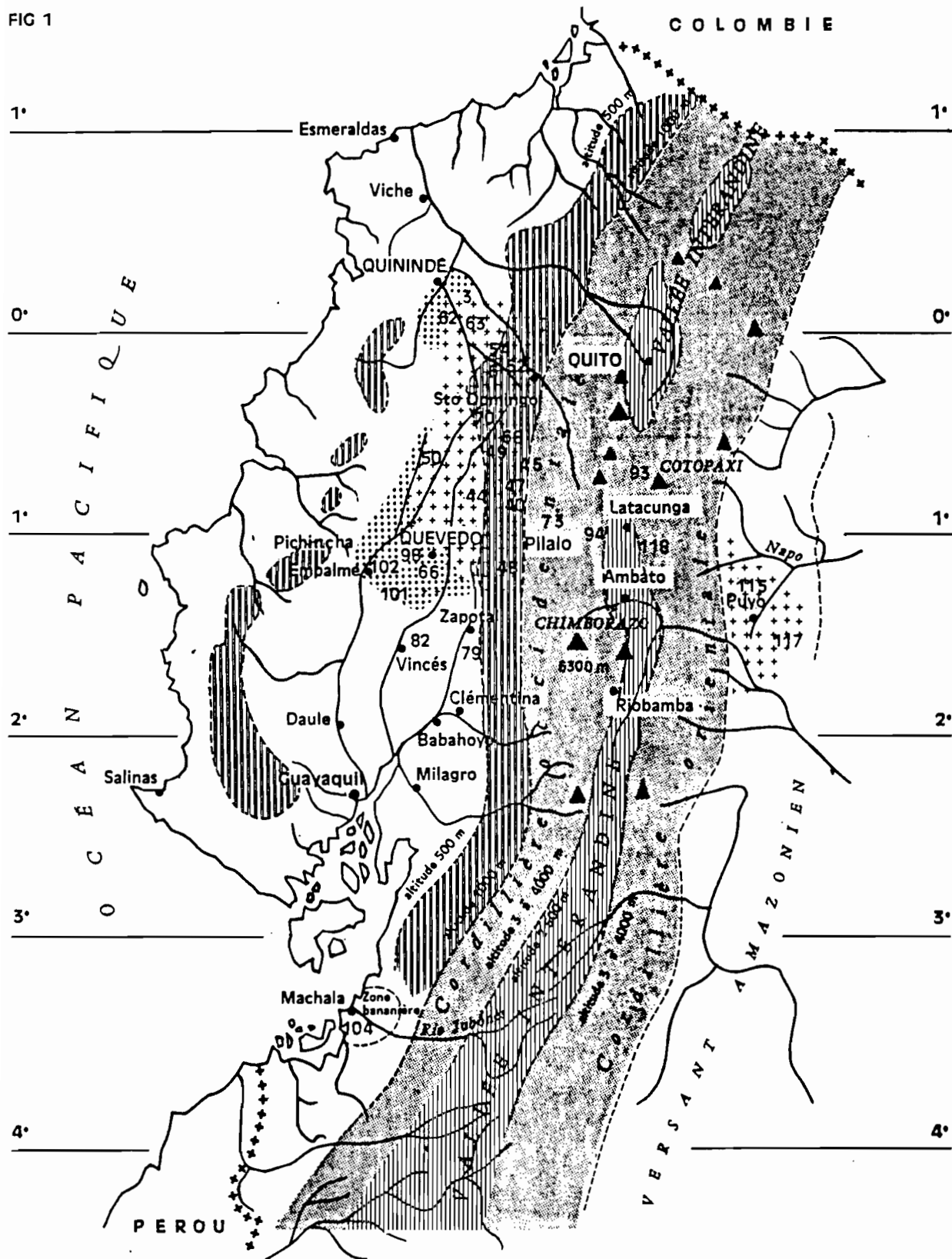
Figure 1 - Situation des profils

Figure 2 - Isohyètes

chiffres supérieurs : Pluviométrie annuelle en mm

chiffres inférieurs : Nombre de mois recevant plus de 100 mm.

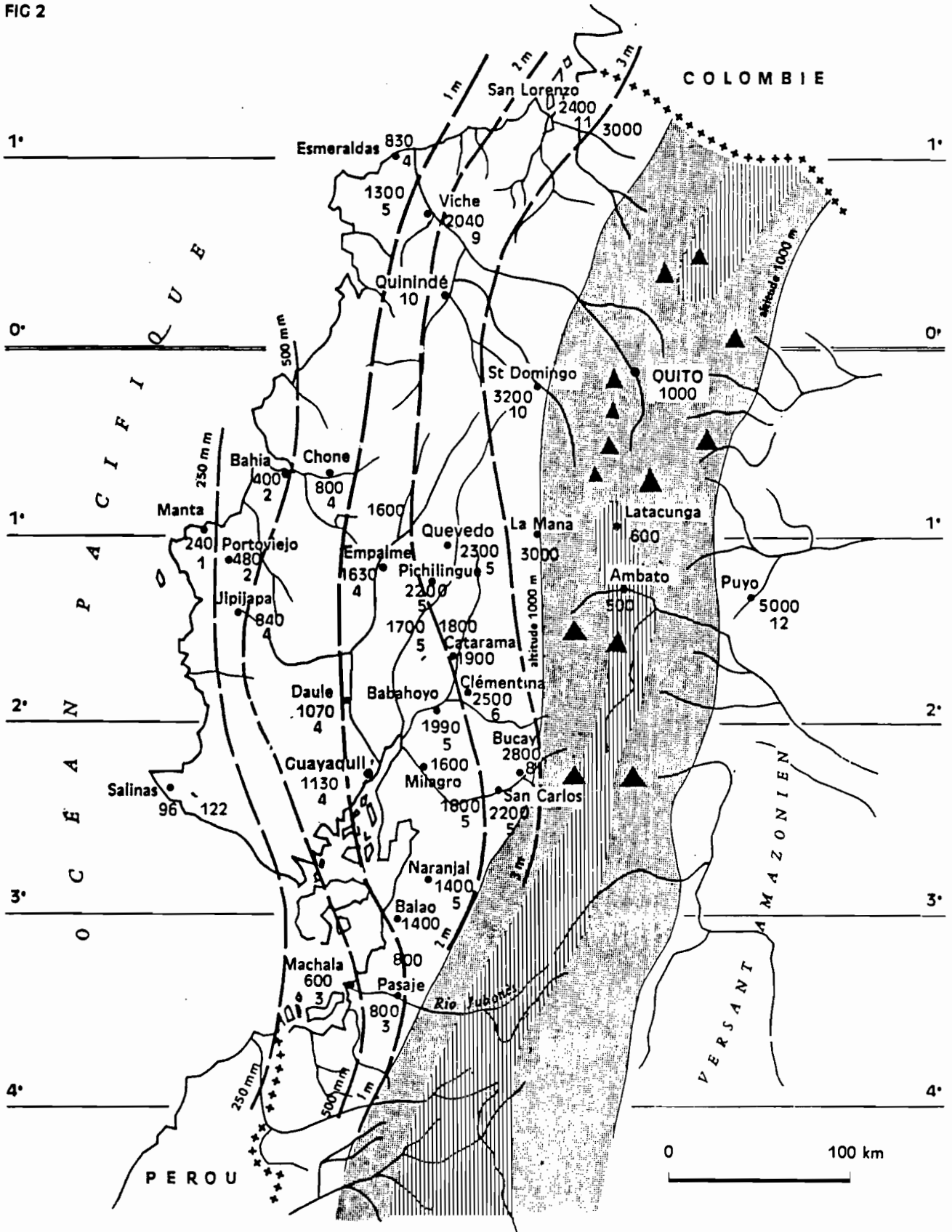
FIG 1



- Recouvrements de cendres en régions tropicales
- Allophanes de transition
- Volcans

0 100 km
approximatif

FIG 2



1 - INTRODUCTION Généralités sur l'Équateur

Entre le deuxième degré de latitude sud et le premier degré de latitude nord, la Cordillère des Andes est jalonnée de nombreux volcans dont certains dépassent 5 000 m d'altitude.

Les projections aériennes de cendres et de ponces andésitiques ou dacitiques sont très épaisses en bordure des volcans et dans la haute vallée inter-andine. Des fractions plus fines, souvent transportées par le vent, ont aussi recouvert de vastes superficies des contreforts et des plaines des versants tropicaux, amazoniens et pacifiques.

La grande région bananière et forestière de Quevedo-Santo Domingo-Quinindé, située entre 50 et 500 m d'altitude sur le **versant Pacifique** au pied de la Cordillère des Andes, a surtout retenu notre attention. Le climat est du type équatorial chaud et humide. La pluviométrie varie entre 2 et 3,5 m par an. L'ensoleillement est très réduit (1 000 h par an mesurées au Campbell), surtout en saison sèche. On distingue très nettement deux dépôts de cendres d'âges très différents superposés.

Sur le **versant amazonien** entre 200 et 1 000 m d'altitude, les dépôts de cendres semblent plus anciens. La pluviométrie est élevée (5 m par an) et constante toute l'année. C'est la grande forêt amazonienne.

En altitude, certains versants exposés aux vents dominants sont très humides et constamment dans les nuages. C'est le cas des versants Pacifique entre 1 000 et 2 800 m. Vers 2 600 m, la température moyenne mensuelle est constante toute l'année et voisine de 13°. Elle s'abaisse au-dessous de 10° vers 3 500 m avec des vents souvent très violents. Les neiges éternelles commencent vers 5 000 m.

Dans la **haute vallée inter-andine**, entre les deux chaînes montagneuses, certaines régions situées entre 2 600 et 3 000 m sont relativement bien arrosées (1 m par an) pour un climat tempéré. D'autres sont très sèches, quasi désertiques. Quelques profils seulement ont pu être examinés et analysés.

Dans un premier article, l'on s'efforcera, en débordant sensiblement le cadre de l'Équateur, de caractériser certains des principaux sols sur cendres des régions tropicales humides. Il sera fait parfois référence à des études effectuées sur des sols similaires des Antilles auxquels la plupart des critères retenus pourront s'appliquer également. Volontairement, seront laissées de côté certaines variantes, parfois importantes, pour conserver à cet essai de caractérisation une portée la plus générale possible.

Dans une deuxième partie, faisant l'objet d'un article distinct, on tentera de replacer les divers sols sur cendres d'Équateur dans leur milieu naturel, sans revenir sur les caractéristiques générales, mais en insistant sur les variantes principales, pour dégager les conditions de leur formation et de leur évolution.

Dans d'autres articles, seront examinés ainsi les sols similaires des Antilles françaises.

Nous adressons nos vifs remerciements à M. de KIMPE, du laboratoire de M. FRUPIAT à Louvain, pour les examens au microscope électronique, à Mlle G. FUSIL pour les déterminations aux Rayons X et à M. KOUKOUÏ pour les analyses thermiques différentielles sous la direction de M. PINTA, et, enfin, à M. P. SEGALEN qui a bien voulu relire ce texte et nous faire part de ses remarques, dont il a été tenu compte.

2 - NATURE DES DÉPÔTS AÉRIENS DE CENDRES VOLCANIQUES

2.1 - Méthodes d'études

La partie sableuse des sols (particules de diamètre supérieur à 35 microns) a été seule étudiée ici. Elle est divisée en deux fractions par séparation dans une liqueur lourde (bromoforme). On obtient ainsi :

- une "fraction légère" groupant les minéraux de densité inférieure à 2,89 ;
- une "fraction lourde" groupant les minéraux de densité supérieure.

La préparation, le montage et la détermination des minéraux ont été faits selon la méthode de S. DUPLÉIX (1958). Etant donné la composition très homogène des tufs et le peu d'espèces représentées, seule la fraction globale des sables, comprise entre 50 et 500 microns, a été prise en considération.

2.2 - Minéraux de la fraction légère

L'on trouve dans cette fraction : des feldspaths *plagioclases* (de basicité andésine/labrador) ; ils sont fréquemment zonés ; de la *sanidine* (feldspath potassique) rare, mise en évidence par coloration au cobaltinitrite de sodium ; des éclats et fragments de *verre* ; des *quartz bipyramidés* ; de l'*analcime* (zéolithe).

Les feldspaths forment 90 % de ces minéraux ; ils sont aisément identifiables, bien que présentant un début d'altération le long des clivages et des figures de corrosion. Le verre, d'indice inférieur à 1,54 (baume) montre parfois une différenciation en calcédoine ; c'est donc un verre siliceux. Dans certains profils, il existe des quartz bipyramidés, très limpides, de taille 0,2 à 0,3 mm. Il semble peu probable qu'ils soient d'origine primaire car ils ne montrent ni traces de corrosion magmatique, ni inclusions ; (d'après MILLOT 1964, dans le cas d'eaux naturelles très diluées et très propres, il peut y avoir croissance régulière de micro-cristaux de quartz).

Aux Antilles, de nombreux cristaux de quartz bipyramidés, non émoussés, de 1 à 2 mm, sont observés dans certaines formations ferrallitiques anciennes.

L'analcime est subautomorphe, souvent avec un "cœur" argileux. Sa formation est tardive, par action hydrothermale. Sa cristallisation par transformation de minéraux (feldspaths) avec apport de Na, ne paraît guère possible dans les conditions de lessivage intense et d'entraînement rapide en profondeur des cations. On la rencontre dans tous les profils, mais rarement en quantité importante.

2.3 - Minéraux de la fraction lourde

Ce sont, en proportions très variables : de l'*hypersthène*, de la *hornblende verte*, de l'*augite*, de la *hornblende brune*, des *épidotes* (pistachite, zoisite), de la *magnétite* (rare).

Les hypersthènes, faiblement pléochroïques, sont en prismes courts à terminaisons irrégulières ; ils ont souvent des inclusions liquides ou gazeuses. Les autres ferromagnésiens (augite, hornblende) ont des formes plus ou moins prismatiques ; leurs extrémités sont irrégulières. Les épidotes sont en grains. Souvent, tous ces minéraux sont bordés d'un mince feston de verre volcanique.

2.4 - Nature des cendres

La présence de quartz non exprimé (verre siliceux) empêche de rattacher ces cendres aux roches holoplagioclasiques (andésites) ; elles appartiennent au groupe des dacites. Ce sont, plus exactement, des hyalodacites (le préfixe hyalo exprimant la virtualité du quartz).

Les conditions physico-chimiques du refroidissement et la composition du magma déterminent la nature du minéral ferromagnésien essentiel de la roche. Il peut se former ainsi des dacites à hypersthène, à hornblende verte, à biotite (JUNG ; 1958).

Dans le cas où deux ferromagnésiens sont présents, on peut supposer qu'ils correspondent à deux phases de cristallisation différentes : par exemple, l'hypersthène, qui est un minéral de haute température, cristallise le premier, la hornblende verte, formée à basse température, correspond à une phase tardive de cristallisation.

La hornblende verte et l'hypersthène sont les principaux minéraux de la fraction lourde. Nous reviendrons en détail dans la deuxième partie sur les variations de la composition des dépôts.

3 - ESSAI DE CARACTÉRISATION DES SOLS

Remarque préliminaire

Par suite des discontinuités lithologiques fréquentes dues à des dépôts successifs d'âge analogue ou différent, de granulométrie variée, le profil est du type A (B) C. II (B) C. III (B) C. ... avec souvent des horizons humifères enterrés. Au lieu d'"horizon B", il faudrait plutôt parler d'horizon BC où l'accent devrait être mis, suivant la profondeur, tantôt sur B, tantôt sur C.

Il semble qu'au cours d'un même cycle éruptif ce soient d'abord des cendres grossières qui se déposent. Viennent ensuite les éléments plus fins et d'autant plus fins que la distance aux volcans et les transports par le vent sont importants. On conçoit donc que les phénomènes d'altération puissent avoir été plus au moins intenses dans un même profil, suivant qu'il s'agit de niveaux de cendres très fines, aisément altérables, ou plus grossières dont les éléments sont plus difficilement attaqués.

Les profils peuvent présenter de grandes variations dans la succession des horizons à de faibles distances. Un niveau déjà nettement altéré peut très bien être intercalé entre des niveaux plus grossiers à peine altérés. Un niveau ayant toutes les caractéristiques requises par la définition d'un type de sol peut avoir été recouvert par des formations beaucoup plus jeunes ne présentant aucune de ces caractéristiques. Il n'est donc guère possible de parler dans ces conditions de profils caractéristiques. Il paraît plus opportun de définir des horizons de diagnostic qui sont bien caractéristiques de chacun des principaux types de sols superposés.

3.1 - Sols à allophane

3.1.1 - CONDITIONS DE FORMATION

Il résulte des observations faites en Equateur et aux Antilles françaises, qu'en milieu très humide (pluviométrie annuelle de 2,5 à 3 m, ou davantage) et avec un excès d'eau important presque tout au long de l'année, l'altération des cendres volcaniques perméables aboutit, au moins dans un premier stade, à la formation de substances amorphes fortement hydratées et d'hydroxydes d'alumine.

Il semble, que dans ces conditions de lessivage intense du sol, accompagné de l'entraînement en grande profondeur des substances dissoutes, les néosynthèses des argiles, habituellement observées ailleurs, ne puissent se produire.

Les sols à allophane se rencontrent en Equateur sur le versant amazonien, où la pluviométrie est élevée (5 m) et constante au cours de l'année. Dans les régions très humides du versant Pacifique, les sols déjà fortement allophaniques, très hydratés, ont été le plus souvent recouverts par des dépôts plus récents, dans lesquels l'allophanisation est moins marquée.

3.1.2 - HORIZON CARACTÉRISTIQUE DES SOLS FORTEMENT ALLOPHANIQUES

3.1.2.1 - Morphologie

L'épaisseur est variable de quelques décimètres à plusieurs mètres. L'horizon est enserré dans des niveaux plus perméables.

La couleur du sol frais est beige jaune (10 YR 5/8 à 6/8, parfois 2,5 Y). Elle devient beaucoup plus claire lorsqu'on passe du sol humide au sol séché à l'air. Certains horizons deviennent ainsi parfois presque blanc-beige. Par séchage prolongé à l'air ou à l'étuve, la couleur peut virer au brun-rouille foncé. Il y a peu de variations de couleur entre le sol en place ou écrasé entre les doigts.

La texture apparente est celle d'un limon au toucher onctueux. La consistance du sol pressé entre les doigts est savonneuse. Il s'agirait de pseudo-limon.

La structure d'ensemble est diffuse, fondue. Le sol est peu dur, facilement pénétré par les outils avec, cependant, une certaine cohésion puisque les parois des tranchées et des talus ont peu tendance à s'ébouler (comme pour les sols ferrallitiques typiques). Les mottes se brisent et s'effritent très aisément dans la main en donnant une sous-structure fine de petits agrégats de 1 à 2 mm, peu anguleux et très stables. Il n'y a pas de revêtements nets sur les éléments de la structure et sur les agrégats, parfois seulement quelques films luisants incolores.

La perméabilité est très bonne : 5 à 10 cm/heure (MUNTZ) ou davantage.

On observe des débris d'altération beiges plus ou moins abondants. Ils s'écrasent entre les doigts laissant voir des petits minéraux noirs peu altérés : hypersthènes au hornblende.

Quelques débris plus grossiers, ponceux, sont parfois rencontrés. Ils s'écrasent entre les doigts en cédant beaucoup d'eau.

Dans certains horizons, des petites poupées beiges-blanches, pouvant atteindre plusieurs millimètres, aux formes variées, globuleuses ou en filaments dans les anciens trous de racines, sont, en fait, des amas durcis de gibbsite pure.

3.1.2.2 - Minéralogie

La dispersion de la fraction inférieure à 2 microns par les méthodes usuelles est impossible. Ce n'est qu'après des traitements successifs acides et alcalins qu'une dispersion très incomplète peut être obtenue, soit en milieu acide, soit en milieu basique (CO_3Na_2 - NaOH).

Par suite de la difficulté d'obtenir une fraction inférieure à 2 microns, suffisamment représentative du sol, sans faire subir au sol des traitements qui risquent de l'altérer, la plupart des examens minéralogiques (Rayons X, Analyse thermique différentielle) ont été effectués sur les flocons obtenus après un temps plus court de sédimentation. La comparaison sur quelques échantillons des résultats obtenus sur la fraction inférieure à 2 microns avec ceux de la fraction plus grossière, semble justifier cette façon de procéder.

a - Rayons X

L'examen aux Rayons X n'indique aucun des minéraux argileux usuels.

- Versant Amazonien - Le graphique 3 correspond à l'échantillon E 115 d (sommet de butte). Que l'échantillon ait été séché à l'air ou à l'étuve à 100°, on n'observe guère

que les raies du quartz et celles de la gibbsite (4,82 et 4,34 A° - 2,45 A°). Une raie à 4,05 A° est presque toujours visible dans les sols à allophane d'Equateur et des Antilles. Elle correspondrait à la cristobalite (GRIM, 1953).

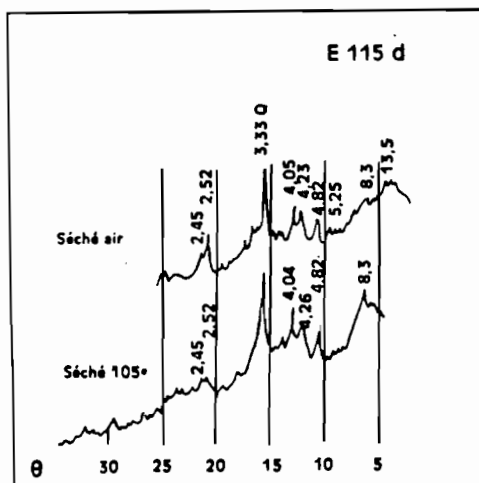


FIG 3

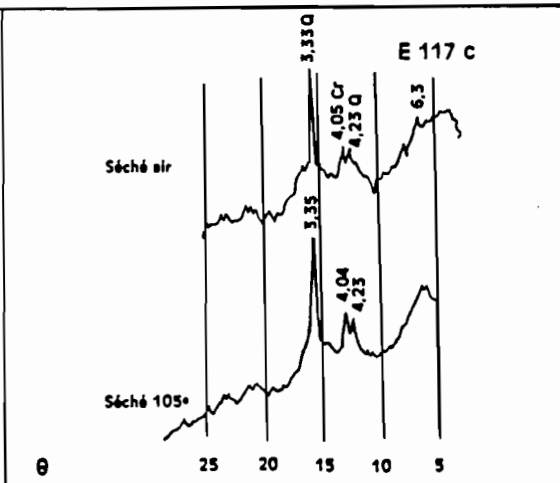


FIG 4

Un fond important existe entre 8 A° et 15 A°, comme dans beaucoup de substances amorphes. L'échantillon 117 c - figure 4 - prélevé à environ 30 km de E 115, mais dans une zone peu accidentée en bordure de tholweg, présente un spectre très voisin, mais sans les raies de la gibbsite.

Aucune modification des raies n'est observée après chauffage à 100° ou par traitement au glycérol.

- *Versant Pacifique* - L'échantillon E 63e (figure 5) est situé à 2,5 m de profondeur. Le spectre est très semblable à celui du graphique 3.

Il n'y a pratiquement pas de changement entre les échantillons séchés à l'air et à l'étuve. Des raies à 8,3 A°, et vers 13,8 A°, émergent d'un fond important.

La fraction fine de l'échantillon 6 (figure 6) présente aussi un spectre très voisin de ceux du graphique 3. Des raies à 8,3 et 14,2, bien visibles pour les fractions grossières, n'apparaissent guère dans la fraction très fine. YOSHINAGA et AOMINE (1955), sur les sols du Japon, constatent également la disparition de ces raies dans les fractions très fines.

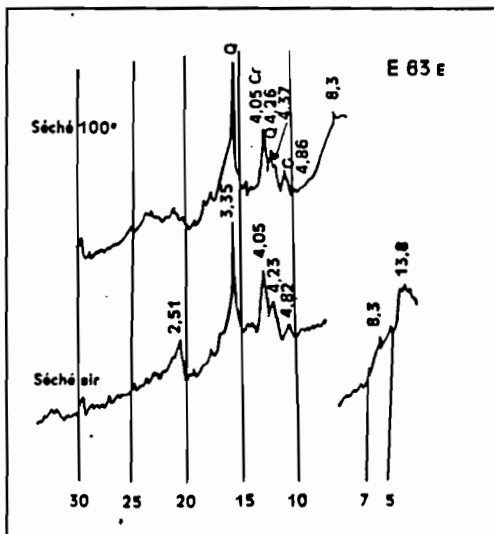


FIG 5

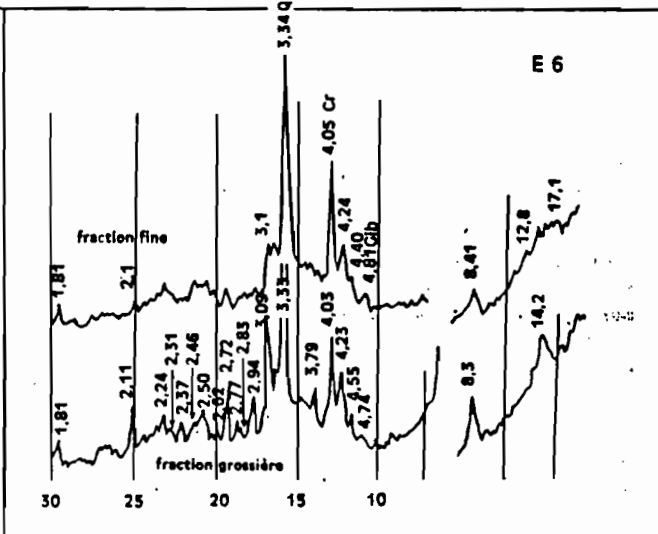


FIG 6

S'agit-il de l'Imogolite, minéral argileux décrit par YOSHINAGA et AOMINE au Japon ? Il est difficile de le dire. Les raies ne sont pas tout à fait les mêmes, et on peut se demander si

elles ne sont pas attribuables à des minéraux primaires. En effet, de même que la raie du quartz (3,33) est plus intense dans la fraction grossière que dans la fraction fine, de nombreuses raies, dues sans doute à des feldspaths, peu altérés, apparaissent également.

Le spectre obtenu sur les sables noirs aimantés de ces sols à allophane, montre une belle raie vers 8,4 Å (figure 7).

Pour E 6, le traitement au glycérol provoque un léger gonflement que l'on peut attribuer à la présence d'un peu de montmorillonite. Ce gonflement a rarement été observé ailleurs.

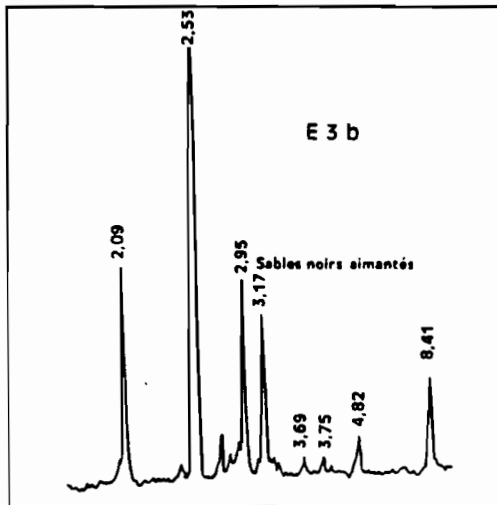


FIG 7

- A 2 600 m d'altitude - sur le versant Pacifique de la Cordillère, dans une région très humide, avec une température moyenne mensuelle de 14°C, très constante au cours de l'année, l'échantillon 73 X présente un spectre très voisin des précédents (figure 8). Il n'y a pas de gibbsite, mais un fond très important vers 14 Å°. L'aspect morphologique de cet échantillon est identique à celui des échantillons prélevés en régions tropicales chaudes. La formation des substances amorphes n'est donc pas sous la dépendance de la température.

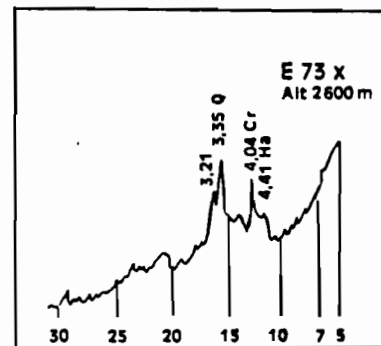


FIG 8

b - Analyses thermiques différentielles

L'examen montre sur tous les échantillons un très grand crochet endothermique qui débute à 140-150°, suivi d'un petit crochet exothermique vers 95°. Certains échantillons présentent également les crochets caractéristiques de la gibbsite.

Dans la plupart des échantillons, cependant, un fort crochet exothermique vers 300 à 400°, allant parfois jusqu'à 650° ou davantage, vient perturber les courbes. Dans la plupart des cas, il semble qu'il s'agisse de matières organiques, puisque des attaques répétées à l'eau oxygénée finissent par le faire régresser, voire disparaître. On pourrait penser à une forme particulièrement résistante de matière organique, plus ou moins étroitement associée aux substances allophaniques. La température d'apparition paraît d'ailleurs d'autant plus élevée que l'allophanisation est importante.

Sur certains échantillons où ce crochet semble difficile à faire disparaître complètement par les traitements à l'eau oxygénée, certains auteurs pensent que des hydroxydes en sont, en partie, responsables. Lorsque ce crochet est peu intense, l'allure de chauffe du four peut modifier son apparition. De tels crochets, à des températures ne dépassant pas 400° pour les montmorillonites et

500° pour les allophanes, après des traitements à la pipéridine, ont été signalés. Pour SUDO, des crochets exothermiques à 310 et 470° seraient caractéristiques des allophanes.

- *Versant Amazonien* - Les échantillons 115 d et 117 c (figure 9) présentent tous deux de forts crochets exothermiques vers 600-800°, qui disparaissent après des traitements à l'H₂O₂. L'échantillon 115 d est riche en gibbsite, l'échantillon 117 c n'en renferme que des traces. Un très petit crochet endothermique vers 540° indiquerait la présence de traces d'halloysite.

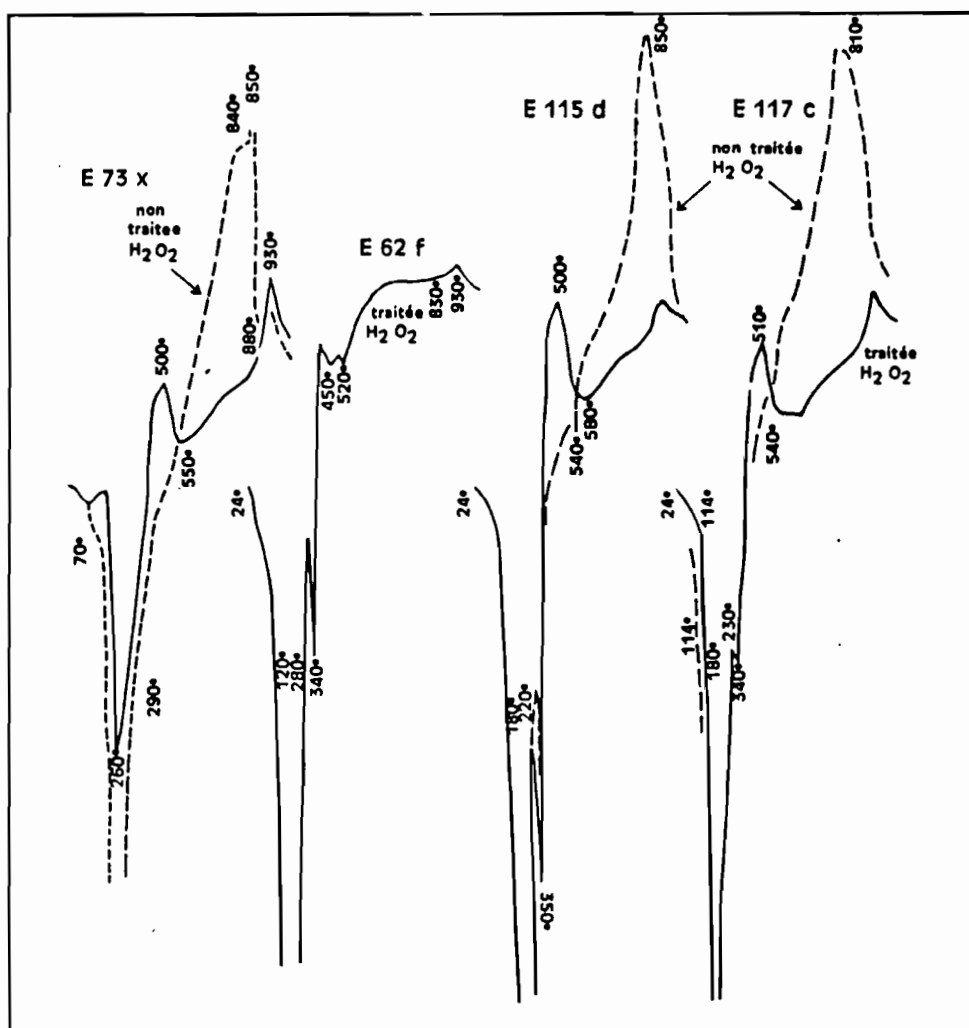


FIG 9

- *Versant Pacifique* - (échantillons de profondeur 2 à 3 m). L'échantillon 62 f (figure 9) donne, après traitement H₂O₂, le fort départ d'eau endothermique à 160°, le crochet de la gibbsite à 340°, un crochet à 450°, peut-être dû à la boehmite, un crochet à 520° correspondant à des traces d'halloysite, et, enfin, le crochet exothermique à 930°. E 63 et E 6 sont analogues, mais E 6 n'a pas de gibbsite (figure 10).

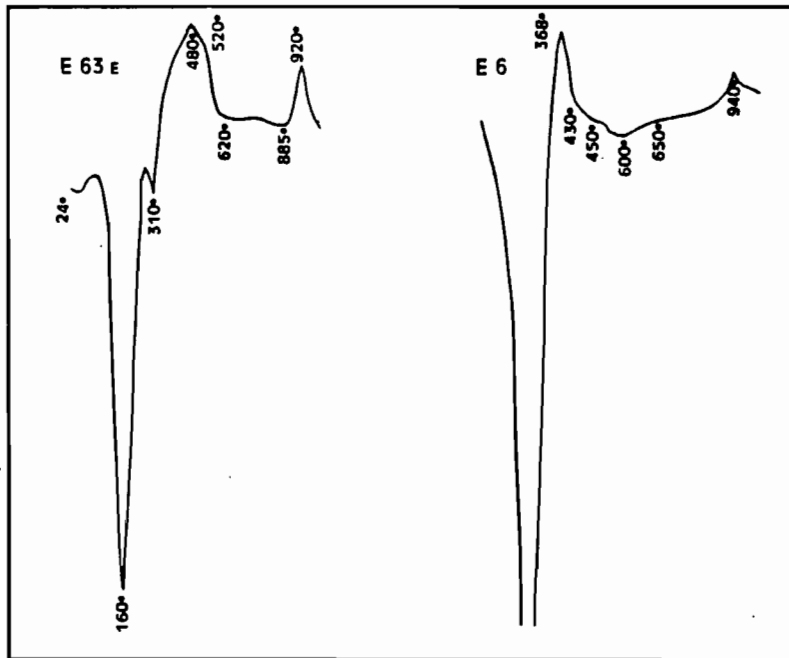
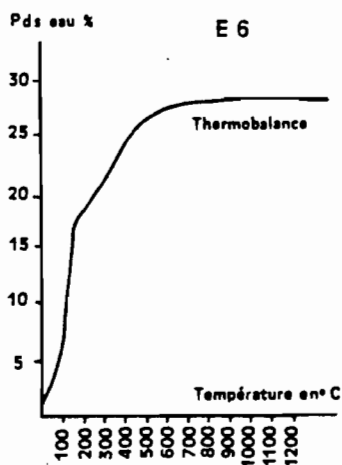


FIG 10

- A 2600 m d'altitude, en zone fraîche et humide. L'échantillon 73 x donne un graphique très semblable, mais le départ d'eau initial a lieu à plus haute température (160-250°). Il n'y a pas de gibbsite.

c - Thermobalance



La perte d'eau à la thermobalance est continue et régulière, atteignant 30 %, sur échantillon préalablement séché à 100°.

La figure 11 montre la courbe de perte de poids de l'échantillon E 6 du versant Pacifique.

Des courbes identiques ont été obtenues pour les échantillons de sol à allophane des Antilles.

FIG 11

d - Microscopie électronique

L'extraction a été faite sur échantillons conservés frais et traités à l'eau oxygénée, et l'examen sur des échantillons séchés depuis peu de temps à l'air, à la température ordinaire.

On observe de fins filaments abondants, formant un chevelu autour des particules aux formes

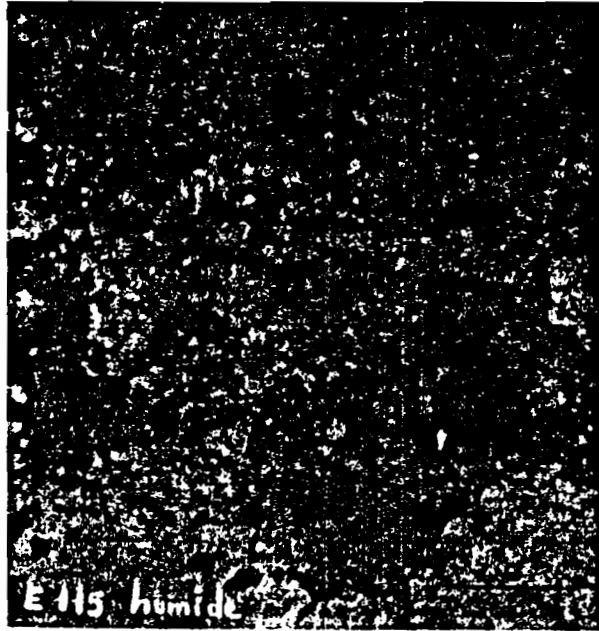
souvent mal définies, parfois décrites par certains auteurs (FRIPIAT et coll., 1962).

La figure 12 concerne les échantillons du versant amazonien (115 et 117) et du versant Pacifique (63) séchés à l'air. Après séchage à l'étuve, les échantillons 117 et 63 (figure 12) se prennent en une masse qu'il n'est plus possible de dissocier, même avec les ultra-sons.

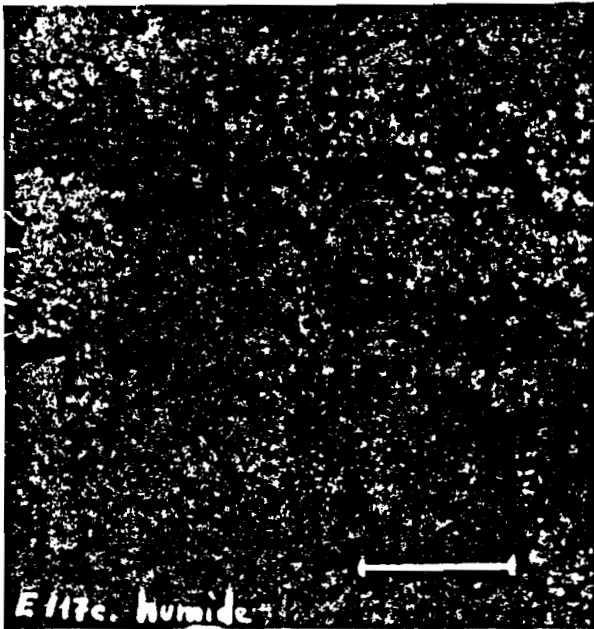
Le resserrement du réseau initial très lâche est bien en accord avec les propriétés d'absorption, considérables pour l'eau, et la dessiccation qui sera décrite plus loin.

Figure 12

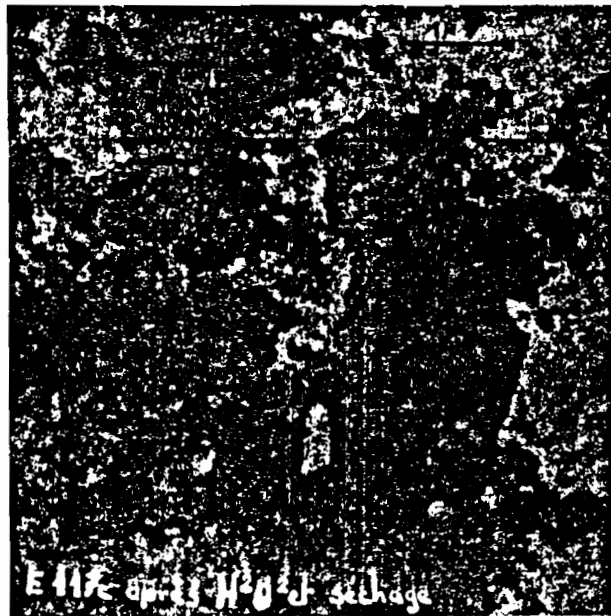
(clichés de l'Institut Agronomique de Louvain, M. de KIMPE).



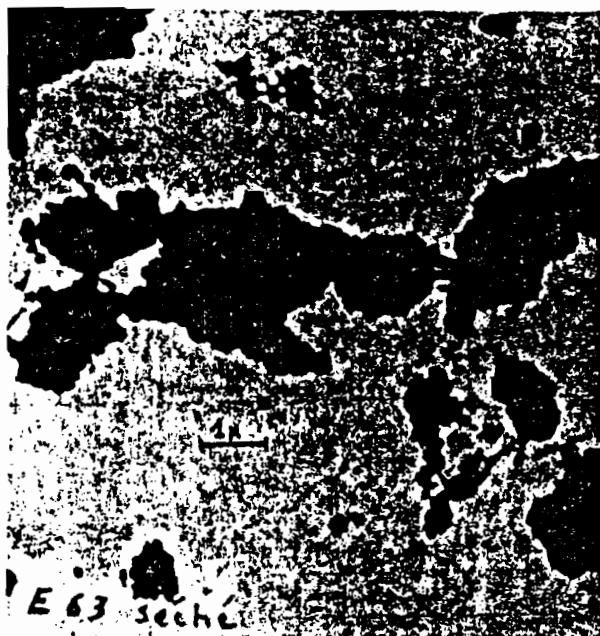
E.115 Echantillon séché à l'air peu avant photographie.



Echantillon 117 c (versant amazonien)
Conservé humide, traité à l' H_2O_2 , extrait sans séchage.
Séché à l'air juste avant observation.



Même échantillon, après séchage à l'étuve.



Echantillon E 63 (versant Pacifique)
 Conservé humide, traité à l' H_2O_2 , extrait sans séchage.
 Séché à l'air juste avant observation.

Même échantillon, après séchage à l'étuve.

3.1.2.3 - Granulométrie et sables

La dispersion est difficile et toujours incomplète. Les petits agrégats sont très stables et résistent aux agents dispersants usuels. Les prétraitements au benzène sont sans effet. Seuls des traitements acides et alcalins peuvent permettre une dispersion partielle, mais les sables restent encore souvent enrobés.

Si les données de l'analyse mécanique sont illusoire en ce qui concerne l'argile, les limons fins (2-20) et grossiers (20-50 microns), par contre la détermination des sables primaires, supérieurs à 50 microns, après des traitements aux acides et à la soude ou au carbonate de soude peu dilués, sur tamis, prête moins à contestation en dépit de certaines dissolutions possibles, car il est aisé de contrôler la disparition effective des agrégats. Le traitement acide donne parfois une gelée. La proportion des sables supérieurs à 50 microns ne dépasse pas 10 à 20%. Une forte fraction du sol est donc formée de particules très fines dont les dimensions ne sont pas déterminables.

La séparation des fractions lourdes et légères (entre 50 et 500 microns) révèle une proportion variable de ces fractions. Les minéraux lourds sont en général peu altérés, avec rarement plus de 10% de minéraux opaques : hornblende verte, hypersthène, augite, hornblende brune, épidote... Parmi les minéraux légers, ce sont les feldspaths calco-sodiques, du type andésine, qui dominent, dont une bonne proportion est déjà altérée. Le quartz est visible, mais représente rarement plus de 20% des minéraux légers. Les zéolithes (surtout l'analcime) sont presque toujours présents en petite quantité.

Nous reviendrons plus en détail sur les examens de ces sables et leur répartition géographique dans un prochain article.

3.1.2.4 - Rétention de l'eau

La caractéristique la plus importante des sols à allophane est leur capacité pour l'eau souvent considérable. L'humidité de l'échantillon bien ressuyé, après plusieurs jours ou plusieurs semaines sans pluies, et qui est alors bien friable entre les doigts, peut atteindre lorsqu'elle est

prise aussitôt après le prélèvement (ou sur des échantillons conservés en sacs plastiques) 100 à 200 % d'eau, parfois même davantage, pour 100 g de sol séché à l'étuve à 105°.

Ces valeurs sont considérablement plus élevées que celles obtenues sur des sols très argileux (70 à 80 % d'argile inférieure à 2 microns), renfermant une forte proportion d'argiles montmorillonitiques magnésiennes et sodiques. On ne dépasse guère 80 % dans les cas les plus favorables de libre expansion.

Cette forte humidité peut s'apprécier dans une certaine mesure sur le terrain, par l'onctuosité du sol et la consistance savonneuse entre les doigts, d'autant plus nettes que la teneur en eau est élevée. La cartographie des types et des sous-types de sols est rendue ainsi possible avec un nombre limité de déterminations au laboratoire.

La densité apparente du sol est généralement comprise entre 0,5 et 0,7, mais des valeurs aussi faibles que 0,3 ont déjà été rencontrées.

Les échantillons séchés plusieurs jours à l'air à la température ordinaire, puis réhumectés, ne peuvent réabsorber qu'une faible fraction de l'eau qu'ils contenaient initialement. Il y a donc dessiccation irréversible, bien que les échantillons séchés à l'air plusieurs mois et conservés aux Antilles, renferment souvent 20 à 30 g d'eau pour 100 g de sol séché étuve, valeurs voisines de celles de l'eau hygroscopique (l'atmosphère est presque saturée, au moins la nuit).

Le comportement des sols à allophane, vis-à-vis de l'eau, étant fort différent, suivant qu'il s'agit d'échantillons conservés dans l'état d'humidité originel ou séchés à l'air, les mesures des humidités pour différentes valeurs de pF ont donc été faites à la fois sur échantillons conservés frais et sur échantillons séchés à l'air, à la température ordinaire, ces deux séries étant réhumectées de la même façon. La friabilité des échantillons conservés frais, rend possible une telle façon de procéder qui ne pourrait être employée pour des sols argileux ordinaires humides non broyés.

La figure 13 concerne des profils du versant amazonien et des horizons profonds fortement allophaniques de profils du versant Pacifique. On voit les valeurs très élevées obtenues pour les

FIG 13 Versant amazonien

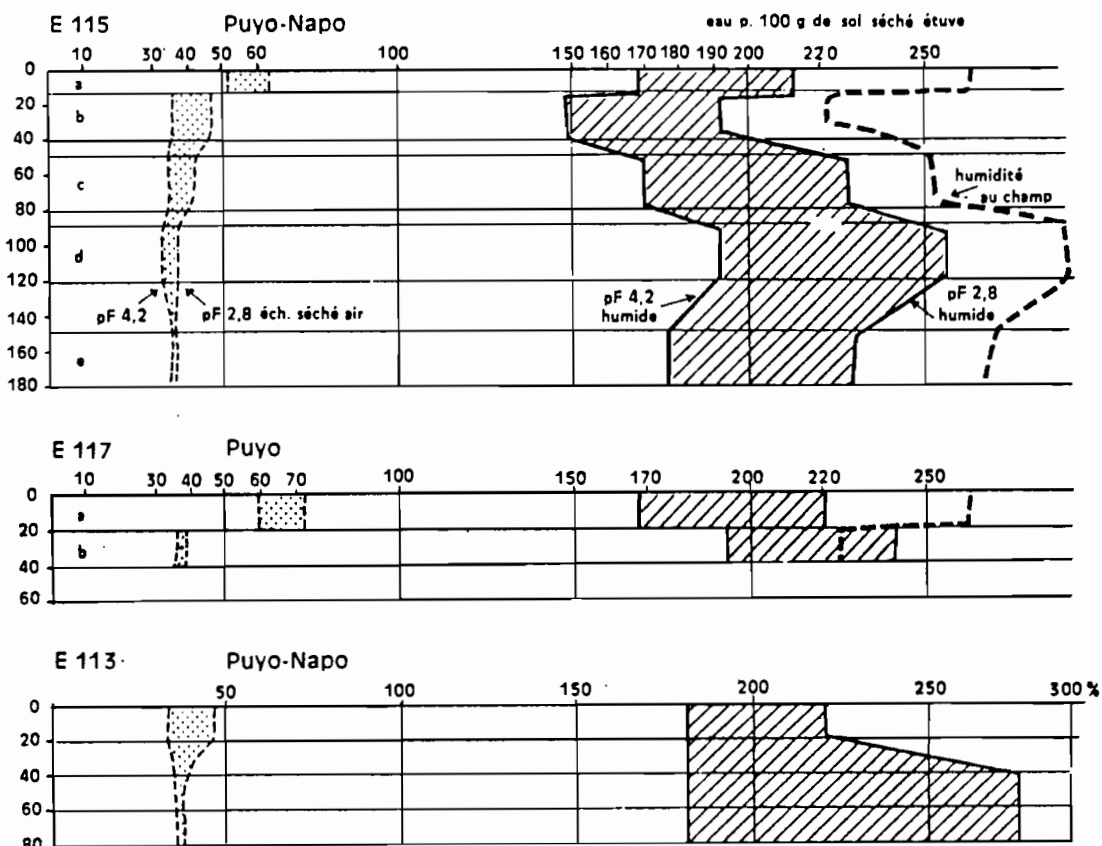
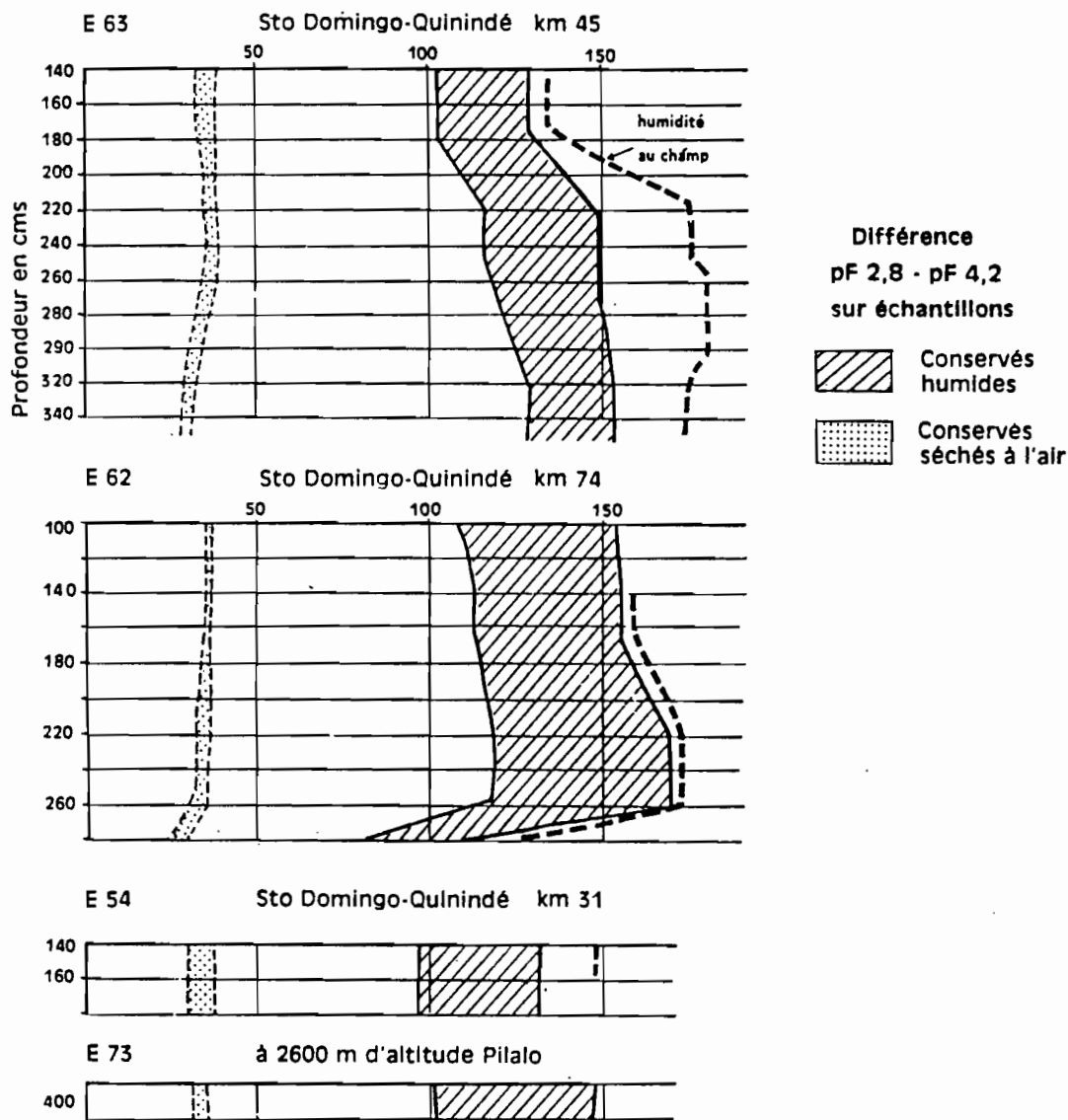


FIG 14 Horizons enfouis profonds du versant pacifique



pF 2,8 et 4,2 et les différences considérables observées, suivant que les mesures sont effectuées sur échantillons frais ou sur échantillons préalablement séchés à l'air.

L'examen des graphiques 13 et 14, surtout quand on les compare à ceux des sols faiblement allophaniques (figures 17 et 18) et des sols à halloysite (figure 22) montre que "l'eau utilisable", définie par la différence des humidités entre pF 2,8 et 4,2, est d'autant plus forte, mesurée sur échantillons frais, et d'autant plus faible, mesurée sur échantillons préalablement séchés à l'air, que le sol est fortement allophanique et moins riche en matières organiques. C'est particulièrement net pour le profil 115 (figure 13). Dans les horizons profonds, fortement allophaniques, cette "eau utile" mesurée sur les échantillons séchés à l'air est presque nulle, bien que l'humidité (à 105°) soit de l'ordre de 30%.

On remarque sur les graphiques de la figure 14, concernant des horizons de sols du versant Pacifique, que l'humidité des échantillons de sols, ressuyés au champ, après plusieurs jours, voire

même des semaines sans pluies, est souvent supérieure à celle trouvée pour pF 2,8 sur des échantillons frais (figure 14, profils 54-63-62). Cette remarque est plus difficilement applicable au profil 115 (figure 13) situé dans une région de pluies très fréquentes, mais l'écart très important et régulier autorise à penser qu'il en est aussi de même. L'humidité au pF 2,8 serait donc inférieure à l'humidité réelle au champ du sol ressuyé, et l'eau "utilisable" aurait donc des valeurs réelles encore supérieures aux 40 et 60 % pour 100 g de sol sec, trouvées pour certains échantillons et qui sont, pour des sols aussi légers, des chiffres considérables.

Quelques déterminations de pF 2,8 sur des échantillons frais, préalablement amenés à pF 4,2, puis réhumectés, indiqueraient que le phénomène est réversible entre ces limites de pF. La valeur du pF au-dessous de laquelle la dessiccation devient irréversible, n'a pas encore été déterminée.

a - Étude de l'irréversibilité de la dessiccation

Sur certains sols allophaniques des Antilles, très voisins, par leurs propriétés, de ceux qui sont représentés dans le graphique 13, la réhumectation d'échantillons séchés plusieurs mois à l'air, à la température ordinaire, a été étudiée. Les sols renfermaient encore 15 à 25 % d'eau. Les échantillons ont été mis en contact plus de trois mois avec un excès d'eau et les déterminations des pF effectués sur la terre encore humide. Le tableau 1 montre que les valeurs trouvées sont très voisines de celles obtenues sur ces mêmes échantillons séchés à l'air avant leur réhumectation et sont très éloignées de celles obtenues sur les échantillons n'ayant subi aucune dessiccation après prélèvement au champ. Ceci confirme bien l'irréversibilité de la dessiccation à l'air à la température ordinaire.

Cette dessiccation s'effectue avec une perte considérable de volume, les agrégats se prenant en petites masses dures brun foncé.

Tableau 1 - Irréversibilité de la dessiccation

Echantillons séchés à l'air plusieurs mois et réhumidifiés avec un excès d'eau pendant trois mois. pF mesurés sur échantillons humides (2).						
Comparaison avec les pF mesurés sur échantillons conservés frais après prélèvement au champ (3) et sur échantillons séchés à l'air quelques semaines après prélèvement (1).						
Echantillons	pF 4,2			pF 2,5		
	1	2	3	1	2	3
6103 a	29	26,4	38,7	47	59,4	69,6
b	36	26,6	70	43	42,8	100
c	32,6	24,8	67,7	42	42,4	107
d	28,9	26,1	71,4	35	37,4	100
6104 b	24	21	52	33	38,5	92
c	37	27	86	44	40,7	152
6106 b	30	25,4	72	38	41,4	115
c	44	32,8	87	46	46,8	148
6140 b	38	31,6	72	50	46,8	98
c	44	36,1	74	58	61,5	108
L 17 a	38	55,4	120	63	77,7	129
a	25	22,6	46	40,5	53,6	95
b	20	18,5	63	40	44,8	80
CA 4 a	36	43,2	131	46	68	167
b	22	26,1	77	34	42,7	119
c	22	31,6	140	30	30,9	155

b - Influence de la matière organique

Les rôles respectifs des matières organiques et des substances amorphes minérales dans ces phénomènes de rétention pour l'eau, sont à préciser. Il semble, comme nous l'avons déjà indiqué

à propos des forts crochets exothermiques vers 400 - 600° à l'analyse thermique différentielle, qui ne disparaissent que par des attaques prolongées à H₂O₂, que les allophanes et la matière organique peuvent former des complexes particuliers.

Peut-on attribuer une partie de ces propriétés considérables d'absorption pour l'eau à une forme particulière de la matière organique, due à son évolution dans les conditions d'humidité permanente, qui sont la raison d'être des substances minérales amorphes très hydratées ?

Il n'est pas possible de comparer ces conditions à celles qui président à la formation des tourbes, en milieu constamment inondé. En effet, la porosité pour l'air (elle s'observe bien sur le terrain) mesurée sur quelques échantillons d'Equateur et sur de nombreux échantillons analogues des Antilles, conserve toujours une certaine valeur, même lorsqu'il s'agit de sols très riches en eau (porosité pour l'eau = humidité au pF 2,5 mesuré sur échantillons frais x Densité apparente). On peut aussi faire remarquer que dans beaucoup de niveaux profonds de sols ferrallitiques à kaolinite, les conditions d'humidité sont très analogues. Elles sont même bien supérieures dans certains niveaux argilo-humiques, à hydromorphie permanente, sans que ces propriétés particulières d'absorption d'eau n'apparaissent.

Des échantillons de sols à allophane des Antilles, conservés frais, ont été attaqués, à plusieurs reprises, par l'eau oxygénée concentrée. Une autre fraction a subi les mêmes traitements, mais avec de l'eau pure. Les mesures des pF 4,2 et 2,5, ont été effectuées sur les échantillons humides, n'ayant subi aucune dessiccation à l'air.

On remarque (Tableau 2) que les valeurs restent très semblables pour pF 2,5, en dépit des variations que les dégagements gazeux de l'eau oxygénée ont pu apporter en provoquant une certaine séparation des sables et une désagrégation.

Tableau 2 - Influence de la matière organique

Comparaison d'échantillons frais traités à l'eau oxygénée (1) avec un témoin (2) traité exactement de la même façon, mais avec de l'eau. Moyennes de deux déterminations.				
Echantillons	pF 4,2		pF 2,5	
	1	2	1	2
La 1 b	112,5	92	134	136,5
La 8 c	57,6	68,2	85,9	85,9
La 22 b	81,6	84	120,4	126
La 24 c	59,6	87,5	112	120,4
La 27 c	111	95,2	126,8	125,7
La 28 b	65,7	70,8	97,4	100

N.B. - Aucune différence pour les pF 2,5.
Quelques différences en tous sens pour les pF 4,2 - à préciser par un nombre plus élevé d'échantillons.

Pour pF 4,2, les résultats sont plus variables, mais en plus ou en moins. C'est une détermination plus délicate et une notion confuse, puisque l'eau de constitution est susceptible de partir suivant le temps de passage à la presse. Bien que d'autres déterminations soient nécessaires, on peut penser que le rôle de la matière organique n'est pas très important.

Certains auteurs comme KYUMA et KAWAGUCHI signalent qu'au contact des allophanes, une polymérisation des polyphénols issus de la décomposition des matières organiques, peut donner naissance à des composés fortement liés à certains atomes des substances allophaniques.

Une meilleure connaissance des liaisons, substances amorphes minérales - substances organiques par des études aux infra-rouges, permettra de connaître, avec plus de précision, quels sont les rôles respectifs de chacune dans l'absorption d'eau considérable de ces sols. Dès à présent, il paraît à peu près certain que c'est aux substances minérales qu'il faut attribuer surtout ces propriétés si particulières.

3.1.2.5 - Capacité d'échange de bases

La capacité d'échange de bases du sol dépend :

- de la proportion de substances colloïdales minérales amorphes. Les teneurs en sables supérieurs à 50 microns peuvent seules nous donner, sur ce point, une indication.
- de l'intensité de l'hydratation des allophanes (absence de toute dessiccation).
- de l'état d'humidité du sol, du moins dans certains intervalles, au moment de la détermination.
- de la proportion de matière organique (échantillon de surface seulement).

Pour les échantillons fortement allophaniques de profondeur, renfermant de 10 à 20 g de sables supérieurs à 50 microns pour 100 g d'échantillon de sol séché à l'air et 2 à 3 % de matières organiques, la capacité totale d'échange déterminée sur échantillon séché à l'air avec l'acétate d'ammonium est de l'ordre de 30 mé. %.

Déterminée sur échantillons conservés dans un état voisin de leur humidité naturelle, la capacité d'échange est beaucoup plus élevée, parfois le double, comme l'indique le tableau 3 (les résultats ont été rapportés en % de sol séché étuve - échantillons d'Equateur et des Antilles). Pour certains échantillons, la capacité d'échange a été déterminée après séchage étuve à 60°, afin d'éliminer la plus grande partie de l'eau hygroscopique. Par séchage à 105°, ces échantillons ne renferment plus que 2 à 3 % d'eau, au lieu de 10 à 30 % pour les échantillons séchés à l'air. La capacité d'échange ne varie guère entre le sol séché à l'air ou à l'étuve.

La dessiccation du sol à l'air entraîne donc une diminution de la capacité d'échange, d'autant plus importante que le sol est plus fortement allophanique. Un réseau distendu, très hydraté, favorise vraisemblablement la fixation des cations en position interne.

Tableau 3

T en mé. p. 100 g de sol séché étuve (acétate ammonium) pF en eau p. 100 g de sol séché étuve								
Echantillons	T Echantill. sec. air	T Echantill. frais	pF 2,8 frais	Echantillons	T Echantill. sec 60°	T Echantill. sec air	T Echantill. frais	pF 2,5 frais
Equateur				Antilles				
115 a	52	76	214*	SM 4 c	25	31	46	178
b	39	56	192	d	29	30	44	166
d	33	72	255	CA 4 b	23	25	46	176
e	33	64	231	CA 11 b	17	20	37	119
117 a	52	82	226*	L 3 b	36	35	48	138
73 x	45	60	148	SM 3 c	28	34	46	153
63 E	54	57	-	d	23	23	40	105
113 a	43	80	220	SM 16 c	-	26	44	130
b	46	68	274					
111	40	88	222					
116	35	80						

* Horizon de surface très riche en matière organique - 10 %. Tous les autres échantillons sont des horizons de profondeur.

N.B. - L'humidité au pF 2,5 (ou à défaut du sol frais en place) est donnée à titre indicatif, car les déterminations de T ont été souvent effectuées sur des échantillons déjà nettement moins humides.

État de saturation en bases - pH

La somme des bases échangeables est variable, et liée au lessivage du sol, donc à l'importance de la pluviométrie. Il s'agit là d'un fait bien établi aux Antilles et dans le monde, pour les sols ferrallitiques friables à kaolinites. Toutefois, pour des pluviométries analogues, les sols à allophane ont généralement une somme de bases échangeables plus élevée (extraction sur échantillon séché à l'air) que pour les sols ferrallitiques.

Dans les régions très arrosées (3,5 à 4 m de pluviométrie annuelle) la teneur globale en bases échangeables est souvent très faible. Aux Antilles, dans les sols qui reçoivent beaucoup d'engrais (régions bananières) le potassium est très souvent le principal cation échangeable.

A la différence des zones plus sèches, où le magnésium reste fortement fixé dans le réseau de la montmorillonite, cet élément semble disparaître très rapidement. En dépit d'abondants minéraux ferro-magnésiens en voie d'altération, on ne trouve généralement que de très faibles teneurs en magnésium échangeable, et c'est le calcium qui est de loin le principal élément dans les sols non fertilisés.

Bien que l'état de saturation en bases soit souvent très faible : 5-10%, si on le rapporte à la capacité d'échange déterminée sur échantillon séché à l'air et encore bien plus faible si on prend la capacité d'échange déterminée sur échantillon frais, les pH sont parfois très anormalement élevés en comparaison de ceux que l'on obtiendrait pour des états de saturation semblables sur les sols ferrallitiques (tableau 4). Le pH semble d'autant plus élevé pour un même état de saturation en bases, que l'échantillon est fortement allophanique (proportion de substances amorphes et hydratation) et la teneur en matière organique plus faible. Cependant, lorsque le taux de bases échangeables devient négligeable dans les régions tout particulièrement arrosées, le pH peut descendre jusqu'à 4,5.

Tableau 4

Echantillons	$V = \frac{S}{T \text{ sec}}$	pH eau	pF 2,5 ou eau naturelle	
62 f	18	6,6	172	échantillons de profondeur fortement allophaniques du versant Pacifique
6	13	6,1	160	
53 f	13	6,0	148	
68 E	22	5,5	106	
73 x	7	5,9	148	échantillon de profondeur à 2600 m d'altitude
5017 c	1	5,6	140	échantillons similaires des Antilles
51018 c	8	5,7	140	
5054 E	2	5,6	131	

On pourrait multiplier les exemples. Des relations plus complexes portant sur de nombreux échantillons et faisant aussi intervenir le taux de matière organique devront être établies.

Contrairement aux sols ferrallitiques ou aux sols fersiallitiques des régions plus sèches et surtout aux sols à montmorillonite, le pH dans une solution de KCl normal est très voisin et parfois même un peu supérieur au pH déterminé dans l'eau.

3.1.3 - HORIZON CARACTÉRISTIQUE DES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANQUES

3.1.3.1 - Conditions de formation

Les conditions de formation sont les mêmes que pour les sols fortement allophaniques, mais les dépôts aériens de cendres sont plus récents, plus jeunes, et par conséquent, moins altérés. La proportion de substances allophaniques est moins importante et les sables plus abondants.

Dans quelques cas, le climat un peu moins humide peut ralentir la vitesse d'altération des minéraux, ou, par une dessiccation temporaire modérée, réduire l'état d'hydratation de certains niveaux supérieurs. Les caractéristiques des substances amorphes sont moins accusées, sans que la présence d'halloysite soit encore bien nette et que l'on puisse prévoir vraiment l'évolution ultérieure du sol.

3.1.3.2 - Morphologie

L'altération étant encore peu intense, on distingue mieux les nombreux niveaux successifs correspondant à différentes phases d'une même éruption ou à diverses éruptions échelonnées dans le temps avec, en ce cas, souvent des horizons humifères enterrés bien visibles.

Certains niveaux de cendres très grossières sont encore à peine altérés. De minces bandes de sables grossiers, constituées de minéraux noirs et blancs inaltérés, peut-être jadis remaniés localement par les ruissellements superficiels, sont ainsi observés. D'autres niveaux, quelque déjà plus fins et plus altérés sont encore très sableux. D'autres encore, correspondant à des particules beaucoup plus fines à l'origine, sont déjà nettement allophanisés, bien que les diverses caractéristiques d'onctuosité, etc., soient moins accentuées et moins évidentes que pour les sols fortement allophaniques précédemment décrits. Ces derniers niveaux, avec beaucoup plus de variabilité que pour les sols fortement allophaniques, sont les horizons de diagnostic.

L'épaisseur est variable mais dépasse rarement 1 m. Le plus souvent elle est comprise entre 30 et 60 cm. L'horizon est enserré dans des niveaux plus perméables.

La couleur est beige-grisâtre, devenant beaucoup plus claire en séchant. L'influence de la matière organique est ici beaucoup plus nette.

La texture apparente est celle d'un limon finement sableux, légèrement, mais nettement, onctueux et un peu savonneux entre les doigts.

La structure d'ensemble est fondue. Le sol est meuble, mais avec une certaine cohésion qui limite l'éboulement des faces de la tranchée, à la différence des horizons plus sableux, moins altérés. Il n'y a pas de mottes ni d'agrégats, mais le sol peut se tailler au couteau en conservant une certaine forme.

La perméabilité est très élevée.

Des particules sableuses un peu plus grossières, blanchâtres plus ou moins altérées et pouvant être écrasées entre les doigts, ainsi que d'abondants minéraux noirs peu altérés, sont bien visibles.

3.1.3.3 - Minéralogie

La dispersion à 2 microns étant difficile, les examens ont souvent été effectués sur des échantillons obtenus après un temps plus court de sédimentation en milieu légèrement acide.

a - Rayons X

Ils n'indiquent aucun des minéraux argileux usuels.

On retrouve sensiblement les mêmes raies que pour les sols fortement allophaniques, avec

On retrouve sensiblement les mêmes raies que pour les sols fortement allophaniques, avec quelques raies supplémentaires de feldspaths ou autres minéraux (figure 18).

La raie à 4,05 Å de la *crystoballite* est toujours bien visible ainsi que les raies du quartz.

Les raies à 8,3 et 13,5 Å, attribuables, peut-être, à l'"imogolite" sont visibles, mais très faibles.

On remarque aussi, pour l'échantillon 7 (figure 15) une légère raie à 4,40 Å qui pourrait être l'indice d'un début de formation d'*halloysite*. Ce profil, plus éloigné de la Cordillère des Andes, laisse déjà pressentir faiblement, par sa morphologie, les sols de transition à halloysite.

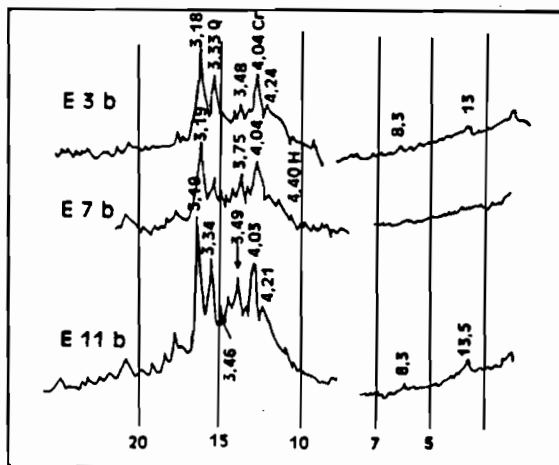
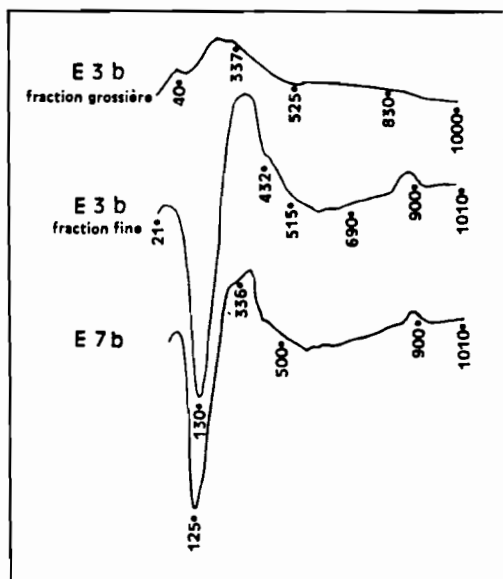


FIG 15



b - Analyse thermique différentielle

L'analyse thermique différentielle donne des courbes d'allure analogues à celles obtenues pour les échantillons fortement allophaniques, mais les crochets endothermiques sont beaucoup plus faibles (figure 16). Le départ d'eau semble aussi commencer à une température un peu plus basse : 125°.

Le crochet exothermique vers 350° peut difficilement être pris en considération. La figure 16 montre, pour l'échantillon 3, les courbes obtenues sur la fraction fine et la fraction plus grossière. Pour cette dernière, seul un soupçon de "crochet" exothermique de 200 à 340° apparaît.

FIG 16

3.1.3.4 - Granulométrie et sables

La dispersion par les méthodes usuelles est très difficile et incomplète. La plupart des déterminations (dispersion à l'hexamétaphosphate) donnent des résultats souvent analogues, mais quelque peu illusoirs.

Fraction inférieure à	2 microns	=	5 à 9 % ;
"	de 2 à 20 "	=	30 à 40 % ;
"	de 20 à 200 "	=	45 à 55 % ;
"	de 200 à 2000 "	=	2 à 8 % .

Comme la proportion des sables est souvent très importante, il est difficile de savoir si ces valeurs correspondent, dans certains cas, à une dispersion incomplète et dans d'autres à une faible teneur réelle de la fraction inférieure à 2 microns. Seule, la détermination sur tamis des fractions sableuses de 50 - 200 et 200 à 2000 microns peut être effectuée avec précision, après lavages avec des solutions acides et alcalines peu diluées. Les résultats obtenus par ces procédés énergiques sont parfois semblables à ceux de l'analyse granulométrique classique, mais très souvent aussi inférieurs

de moitié, voire même 10 ou 20 fois plus faibles. Même dans les cas où ces valeurs sont semblables, il n'est guère possible de dire que les chiffres trouvés pour les fractions plus fines inférieures à 50 microns sont correctes.

La teneur en sables supérieurs à 50 microns est nettement plus élevée que pour les horizons fortement allophaniques. Elle est comprise, le plus souvent, entre 40 et 50 g p. 100 g de sol séché air (au lieu de 10 à 20 %).

L'examen détaillé des fractions lourdes et légères (50 - 500 microns) n'indique pas un degré d'altération très sensiblement moindre que pour les sables des horizons fortement allophaniques. Il semble, dans ces derniers, que ce soit surtout l'altération des particules très fines inférieures à 50 microns et des verres volcaniques qui ait été plus intense.

Aux Antilles, où les sols fortement allophaniques sont souvent plus riches en gibbsite, des différences plus nettes apparaissent entre les sables des sols fortement allophaniques plus altérés, et ceux des sols encore jeunes et peu allophanisés. La variabilité à de très faibles distances dans un même profil, de la granulométrie originelle des sables, rend souvent délicate l'interprétation.

La composition minéralogique des sables est analogue à celle des sols fortement allophaniques, ou différente. Il s'agit de différences dans la composition du dépôt originel sur lesquelles nous reviendrons dans un prochain article (deuxième partie).

3.1.3.5 - Rétention de l'eau

On retrouve, mais très atténuées, les propriétés d'absorption d'eau des échantillons fortement allophaniques.

Dans les graphiques de la figure 17, ont été figurés à la fois, à titre de comparaison, les humidités correspondantes au pF 2,8 et 4,2, déterminés sur échantillons conservés frais ou séchés à l'air, de sols relativement récents et peu allophanisés, surmontant des horizons plus profonds, fortement allophanisés. Ils illustrent parfaitement les faits suivants :

- Il existe une différence entre les humidités des pF déterminés sur échantillons conservés frais ou préalablement séchés à l'air. Cette différence est beaucoup plus faible que pour les sols fortement allophaniques.
- L'eau "utile", définie par la différence des humidités entre pF 2,8 et pF 4,2, est plus élevée sur échantillons conservés frais que sur échantillons séchés à l'air.
- Par comparaison avec les sols fortement allophaniques, cette eau "utile" est plus faible pour les échantillons conservés frais et plus importante pour les échantillons séchés à l'air.

Cette capacité en "eau utile", plus élevée sur échantillons séchés à l'air dans les sols faiblement allophaniques que dans les sols fortement allophanisés, bien que les teneurs en sables soient plus importantes, est difficile à expliquer. Dans certains cas, elle pourrait être attribuée à des teneurs plus élevées en matières organiques, moins liées aux substances allophaniques amorphes, elles-mêmes moins abondantes et peut-être mieux organisées, sous l'influence de dessications temporaires modérées réduisant l'hydratation.

Le sol est aéré. La porosité pour l'air, en prenant pour le calcul de la porosité en eau l'humidité au pF 2,8 sur sol frais, est voisine de 15 à 20 % de sol séché étuve.

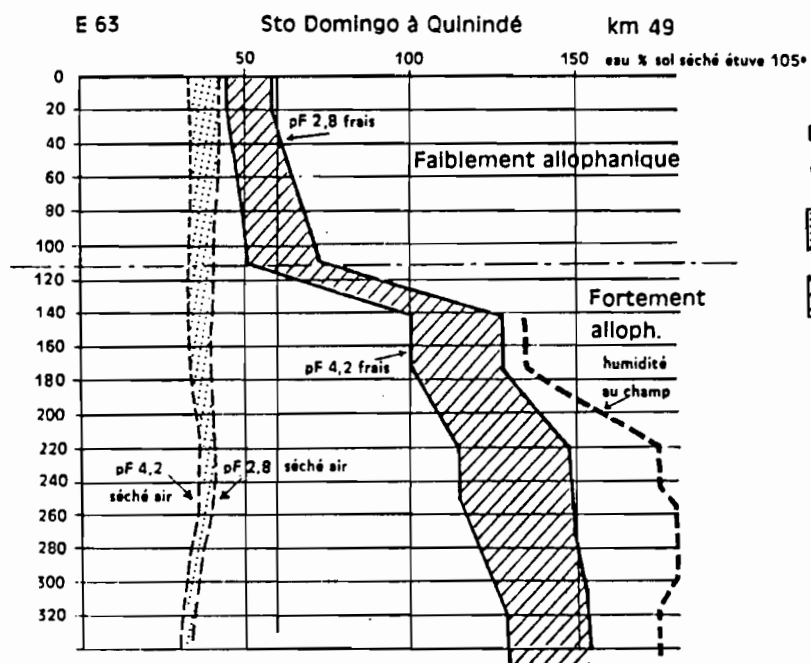
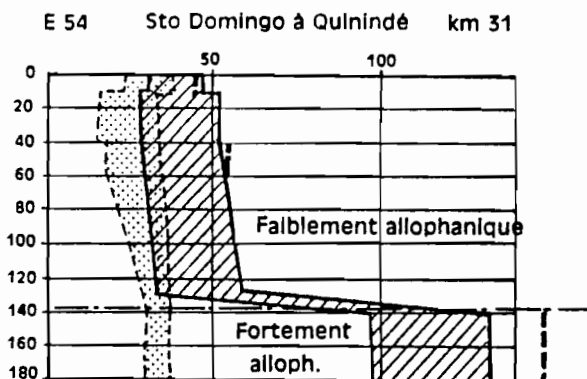
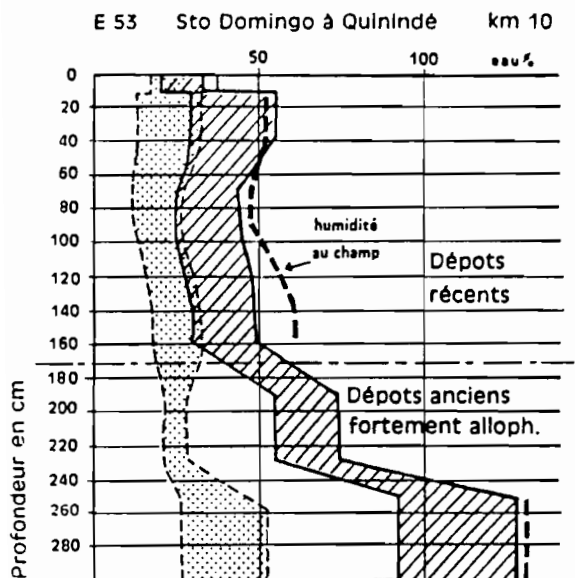
*

La figure 18 correspond à des sols peu allophanisés sur dépôts récents très épais, en bordure de la Cordillère.

On remarque que certains horizons - correspondant à des dépôts de cendre plus fins - sont plus fortement allophanisés que les horizons plus grossiers supérieurs ou inférieurs. Cela paraît particulièrement net pour les niveaux 50 - 80 cm des profils 40, 49 et 52.

Capacité d'échange de bases - pH

Elle dépend de la proportion de substances allophaniques et des teneurs en matières organiques. La matière organique a une influence plus importante que pour les sols fortement allopha-



Différence pF 2,8 - pF 4,2
ou "eau utile"

 Mesurée sur éch. séché à l'air

 Mesurée sur éch. Conservé humide

Humidités en eau
p 100 gr de sol séché
à l'étuve à 105°

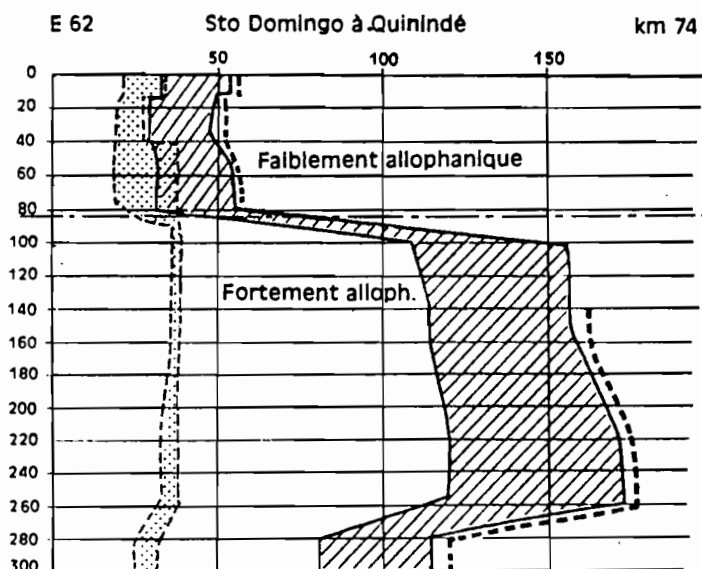
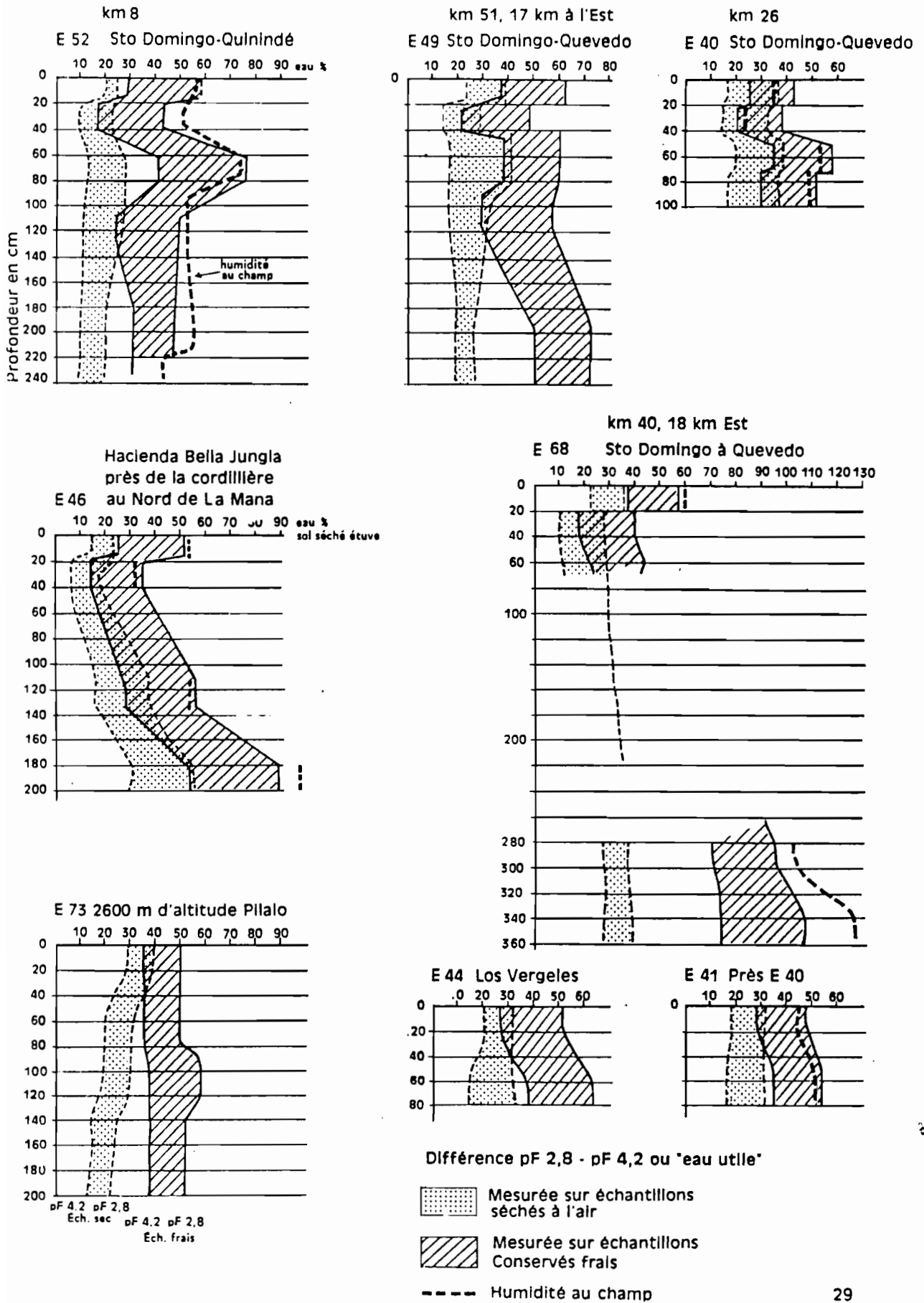


FIG 17 Sols faiblement allophaniques reposant sur des sols fortement allophaniques

FIG 18

Sols faiblement allophaniques



niques. Par contre (à défaut de résultats sur les sols d'Equateur, ceux des Antilles permettent de le penser), l'état d'humidité du sol n'intervient pas de façon sensible.

Le tableau 5 indique, pour deux profils, la capacité d'échange sur échantillons séchés à l'air, les humidités au pF 2,8, mesurées sur échantillons frais, les teneurs en matières organiques et la proportion de sables supérieurs à 50 microns. On remarque nettement que l'allophanisation semble avoir plus d'importance que les teneurs en matières organiques. Des relations établies sur de nombreux profils seraient nécessaires.

Tableau 5

Echantillons	T sec mé %	pF 2,8 frals	M.O. %	Sables > 50 micr.	Echantillons	T sec mé %	pF 2,8 frals	M.O. %	Sables > 50 micr.
E 52 a	20	57	8,3	53	E 49 a	28	62	7,1	28
b	12	42	2,2	55	b	18	48	2,9	37
d	19	75	3,0	34	c	25	61	2,7	36
e	14	49	1,6	-					

Comme pour les sols fortement allophaniques, les valeurs de pH sont relativement élevées pour des états de saturation faible - 10 à 20% - (T déterminé sur sol séché air) quand on les compare aux sols ferrallitiques. L'influence de la matière organique semble très importante. Le tableau 6 montre clairement que bien que l'état de la saturation décroisse en profondeur, ainsi que les teneurs en matières organiques, les pH, au contraire, augmentent. On peut remarquer dans le profil 46, un horizon enterré humifère, dans lequel le pH est nettement plus élevé que dans l'horizon humifère de surface, bien que les teneurs en matières organiques soient les mêmes. Ce serait donc, surtout, les horizons renfermant de la matière organique fraîche, dans lesquels l'activité microbienne est intense, qui seraient les plus acides.

Tableau 6

Echantillons	$V = \frac{S}{T} \%$	pH eau 1/2,5	M.O. %	eau pF 2,8 éch. frais %	Echantillons	$V = \frac{S}{T} \%$	pH	M.O. %	eau pF 2,8 éch. frais %
E 49 a ₁	14	5	7,1	62	53 a	30	5,6	11,5	32
b	12	5,6	2,9	48	b	10	5,6	3,6	55
c	10	6	2,7	61	c	9	5,9	1,7	43
E 50 a	15	5,5	6,4	-	46 a	20	5,4	6,7	53
b	13	5,9	2,9	-	b	17	5,7	1,9	35
c	12	6,4	2,5	47	e	16	6,1	6,7	-
E 52 a	22	5,2	8,2	57	f	11	6,3	1,9	57
b	18	5,1	2,2	41	g	10	6,2	1,4	90
d	6	5,6	3	75					
54 a	36	5,3	8,2	46	Sols des Antilles				
b	11	5,4	3,5	51	138 c	13	5,3	2,4	74
c	7	5,8	3,2	-	139 d	16	5,2	0,6	73
					140 d	32	5,1	2,2	50

3.2 - Sols à halloysite

3.2.1. - CONDITIONS DE FORMATION

Ils sont issus des formations volcaniques cendreuse analogues ou identiques à celles des sols à allophanes, mais en climat moins humide. La pluviométrie est moins importante : 1,8 à 2,5 m. La saison sèche et l'insolation (évapo-transpiration) sont souvent plus accentuées.

Le volume d'eau percolé annuellement dans le profil est moins grand que dans les sols à allophanes déjà décrits, et un déficit en eau apparaît très nettement certains mois. Le profil peut se dessécher sur une certaine épaisseur.

L'entraînement des substances dissoutes au cours de l'altération est moins intense, moins profond, souvent même arrêté à certains moments de l'année. Ces conditions semblent favorables à la néo-synthèse de l'halloysite.

L'altération des cendres volcaniques dans ces régions donnant naissance, dans le temps, à des sols de plus en plus riches en argiles et de moins en moins perméables, les nouveaux dépôts aériens plus récents, donc très perméables, viennent se déposer sur un niveau argillé ancien, peu perméable, facteur de ralentissement du drainage interne, favorable aussi aux néo-synthèses argileuses.

Les teneurs en argiles inférieures à 2 microns pouvant varier, suivant l'intensité de l'altération et l'ancienneté, de 10 % à plus de 60 %, les sols ont des aspects variés. Certains caractères cependant demeurent suffisamment stables pour qu'il soit possible de définir des horizons caractéristiques d'une part, pour les sols encore très jeunes et légers, formant transition vers les sols à allophanes d'autre part, pour les sols déjà évolués plus anciens et nettement argileux. Ces horizons caractéristiques peuvent représenter, parfois par suite de l'absence d'horizons morphologiquement bien différenciés - et c'est souvent une des caractéristiques de ces sols - l'ensemble du profil.

Ce sont surtout les critères morphologiques et minéralogiques qui permettent un diagnostic, car, par leurs propriétés physico-chimiques, ces sols peuvent se rattacher à bien d'autres : sols à pédon cambic, bruns eutrophes tropicaux ou bruns ferrisoliques.

3.2.2 - HORIZON CARACTÉRISTIQUE DES SOLS DE TRANSITION ALLOPHANE-HALLOYSITE

3.2.2.1 - Morphologie

L'épaisseur est variable, généralement comprise entre 0,5 et 1 m et la limite avec l'horizon supérieur, quand elle existe, très diffuse.

La couleur est très foncée, noire à brun-noir (10 YR 3/2), sur le sol ressuyé frais, devenant très foncée (2/2) sur le sol mouillé et beaucoup plus pâle sur le sol sec. Elle s'apparente, le plus souvent, à celle du niveau supérieur.

La texture apparente est celle d'un limon à sable fin, qui paraît parfois renfermer un peu d'argile. La structure d'ensemble est fondue. Le sol, parfois un peu dur à l'outil, sec, est très meuble humide. La cohésion des mottes sèches ou humides est très faible et le sol s'effrite très finement en particules sableuses, et parfois en petits agrégats peu stables. C'est souvent la seule différence nette avec le niveau superficiel plus agrégé par la matière organique, davantage grumeleux, et ressemblant à un excellent terreau de couche.

Il n'y a pas de revêtements visibles ; la perméabilité est excellente.

Les caractéristiques font donc souvent penser plutôt à un horizon A₁ profond ou à un A₁₂ qu'à un B₁.

3.2.2.2 - Minéralogie

La dispersion de la fraction argileuse par les méthodes usuelles n'est pas toujours complète et valable. L'extraction de particules inférieures à 2 microns est cependant, relativement aisée. Par analogie avec les allophanes, on a quelquefois opéré sur des fractions obtenues après des temps un peu plus courts de sédimentation.

a - Rayons X

Les raies vers $4,4 \text{ \AA}$ sont bien visibles, mais les raies vers $7,3 - 7,4 \text{ \AA}$ sont parfois très faibles (figures 19-20).

On remarque sur la figure 20 que les spectres de rayons X des échantillons (10-8) prélevés près de Quinindé, à l'extrême nord, et près de Empalme au sud, (figure 19) à plus de 200 km de distance, sont très semblables. Les raies sont plus ou moins intenses.

La raie à $4,04 \text{ \AA}$ de la cristobalite est toujours bien visible.

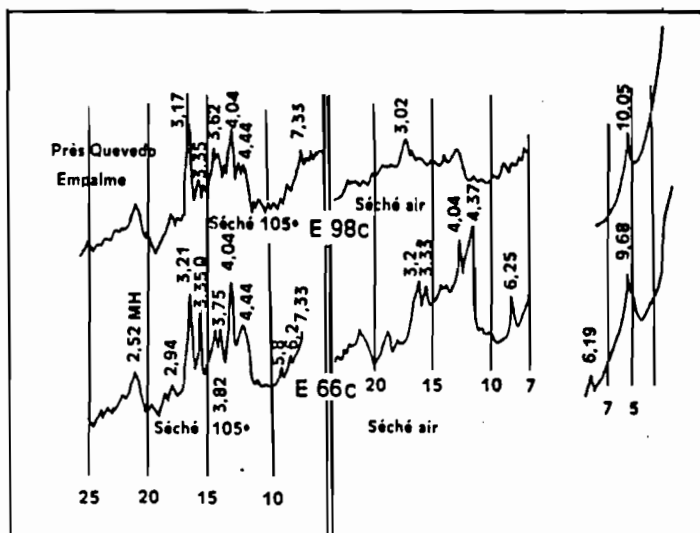


FIG 19

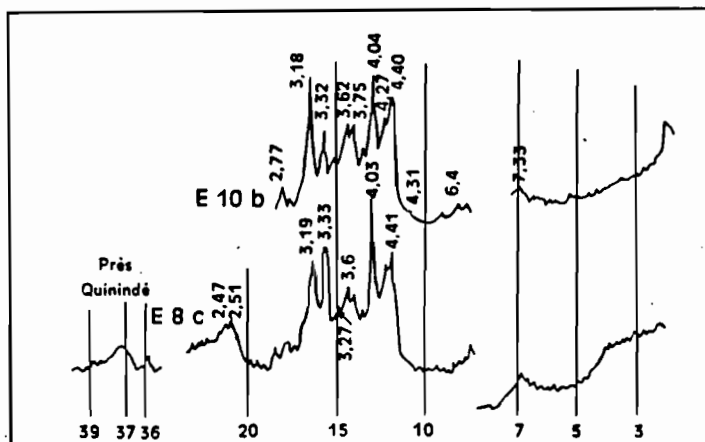


FIG 20

L'halloysite n'existe encore qu'en faible quantité. Le plus souvent on a opéré sur échantillons séchés à 100° et les raies à 10 Å ne sont pas apparues. Sur tous les sols des Antilles et d'Equateur, sur lesquels nous avons pu refaire l'extraction et opérer sur les échantillons frais non séchés à l'étuve, mais simplement séchés à l'air, la raie à 10 Å est très bien apparue, passant à 7,25 - 7,30 Å par chauffage à 100°. Sur des sols légers, très semblables, des Antilles, les tubes de l'halloysite apparaissent très nettement au microscope électronique.

Il y aurait donc, outre des substances amorphes, une petite quantité d'halloysite.

b - Analyses thermiques différentielles

La présence d'halloysite est particulièrement nette. Le crochet endothermique relativement important vers 130-170° (allophanes + halloysite) est suivi d'un crochet endothermique marqué vers 510-540°, et enfin du crochet exothermique vers 930°.

Un très léger crochet vers 300 - 350° serait parfois attribuable à la gibbsite ou à la goéthite et un soupçon de crochet vers 450°, peut-être lié à la boehmite (raie vers 6,2 Å, parfois visible aux rayons X).

En opérant comme aux Antilles sur davantage d'échantillons, on distinguerait mieux l'apparition de l'halloysite et son augmentation progressive : crochets à 510°, puis 540, puis 570° plus importants. Raie à 7,3 - 7,4 Å plus intense, et rejoignant en intensité la raie à 4,4 Å.

Il est vrai qu'aux Antilles les formations de surface sont déjà anciennes et plus altérées qu'en Equateur et les termes de passage y sont mieux représentés.

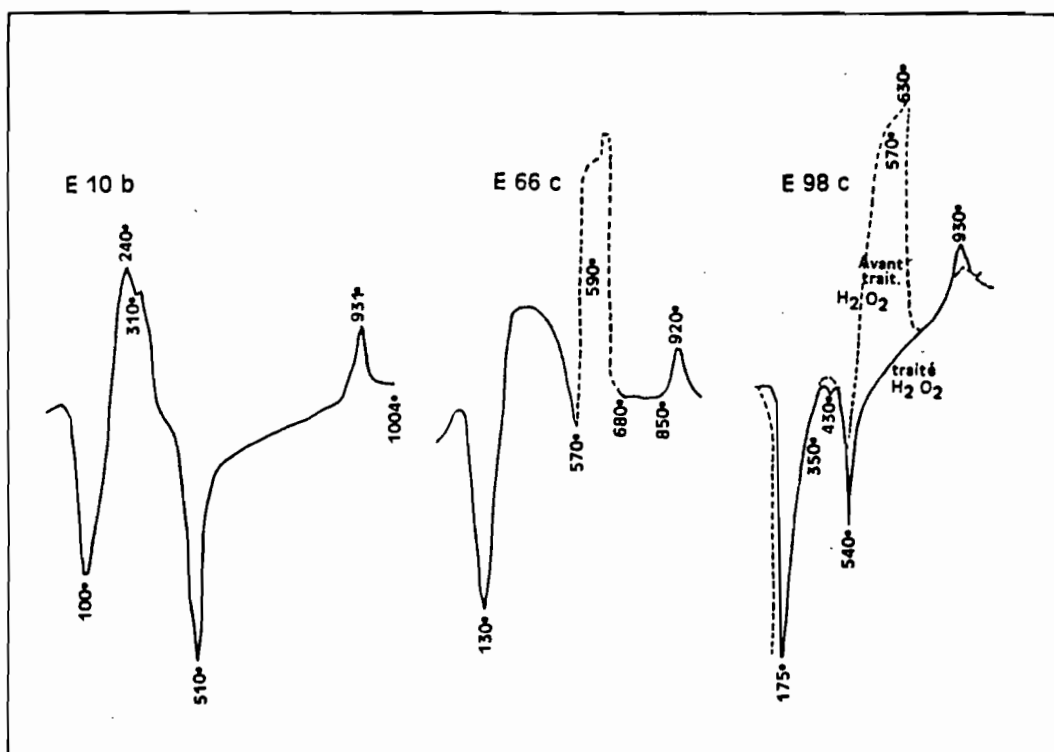


FIG 21

3.2.2.3 - Granulométrie et sables

L'analyse granulométrique n'est pas toujours possible et, surtout quand les teneurs en argiles inférieures à 2 microns ne dépassent pas 10 %, on ne sait pas si les valeurs sont exactes. Des

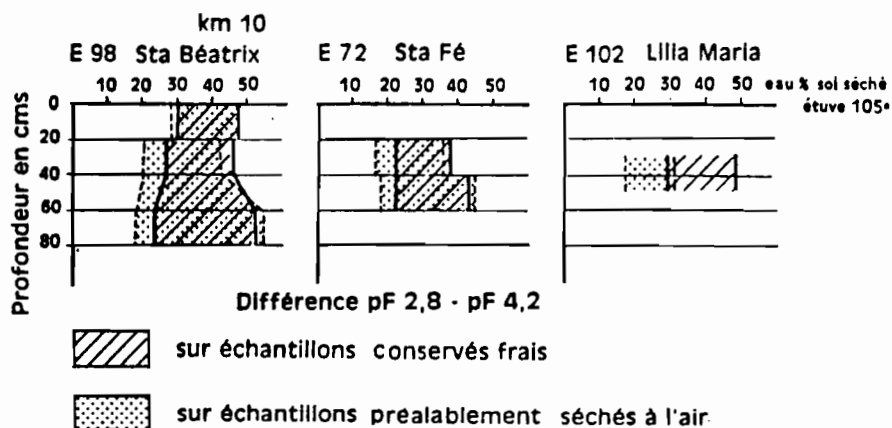
taux d'argile de 20% sont parfois rencontrés. Les fractions 2-20, 20-50 et 50-100 microns semblent très voisines l'une de l'autre et le sable grossier très faible.

Les minéraux lourds : hypersthène, hornblende, augite, .. semblent très peu altérés et presque tous transparents, comme dans les sols à allophanes. Les différences de composition - dominance d'hypersthène ou de hornblende verte - sont dues à des différences dans la composition des dépôts originels. Ce seraient donc les conditions climatiques, surtout la pluviométrie, plus que l'ancienneté, qui seraient la cause directe de la formation, soit des allophanes, soit de l'hallowysite.

3.2.2.4 - Rétention de l'eau

Les pF mesurés sur échantillons conservés frais ou séchés à l'air, sont très voisins, presque identiques. Ces sols se desséchant assez fortement certains mois de l'année, ce résultat pouvait être attendu. Cependant, la capacité en "eau utile" définie par la différence entre les humidités à pF 2,8 et pF 4,2 est importante, surtout en profondeur, atteignant 20 à 30%. Il y a donc, mesuré sur échantillons séchés à l'air, une très nette et forte augmentation de la capacité en "eau utile" (pF 2,8 - pF 4,2) quand on passe des sols fortement allophaniques aux sols faiblement allophaniques, puis aux sols de transition - sans d'ailleurs que les teneurs en matières organiques soient bien différentes, quoique souvent légèrement plus fortes. Cette forte capacité en eau pour des sols aussi sableux, se retrouve aussi aux Antilles, dans les sols du même type, et caractériserait le début du stade hallowysite. Est-elle due à une forme de matière organique, moins liée aux substances minérales, ou différente, par suite d'un meilleur état de saturation en bases ? C'est possible, mais en partie seulement, car cela n'explique pas l'augmentation en profondeur de l'eau utile, alors que les teneurs en matières organiques peuvent devenir deux à quatre fois plus faibles (figure 22). Une meilleure organisation des substances amorphes, comme l'indique la formation de l'hallowysite, en est sans doute la cause principale.

La capacité pour l'eau des sols en place, dans leur état d'humidité naturelle, est cependant inférieure à celle des sols allophaniques.



Les localités citées sont situées au sud de Quevedo

FIG 22

3.2.2.5 - Capacité d'échange de bases - pH

La capacité d'échange déterminée sur échantillon sec paraît beaucoup plus influencée par les teneurs en matières organiques que dans les sols faiblement allophaniques, mais moins que dans les sols alluviaux sableux. Elle est voisine de 20 mé.% pour des teneurs en matières organiques de 2 à 4% (30 mé.% en surface avec 9 à 12% de matières organiques). L'état de saturation en bases est voisin de 50% et le pH supérieur à 6, parfois voisin de 7.

3.2.3 - HORIZON CARACTÉRISTIQUE DES SOLS ARGILEUX A HALLOYSITE : SOLS BRUNS TROPICAUX ET BRUNS FERRISOLIQUES

3.2.3.1 - Morphologie

C'est un horizon B₁ dont la couleur reste très voisine de celle du niveau superficiel brun-rouille foncé (un peu plus rouille que la teinte 7,5 YR 3/2).

La texture apparente est argileuse. Le sol est non adhérent, un peu gras (halloysite).

La structure d'ensemble est fondue. Humide le sol est assez dur à l'outil et très dur sec. Les mottes du sol humide se brisent aisément ; parfois même, elles s'effritent en fins agrégats de 1 mm dans les profils les plus argillés et évolués.

Les faces de la structure sont luisantes, souvent très luisantes. Ecrasé entre les doigts, le sol prend une teinte plus terne et un peu plus claire. Il y a parfois de nets revêtements brunâtres manganiques et des petits pisolithes noirs, plus ou moins durcis. Les petits agrégats de la sous-structure peuvent avoir une tendance angulaire, surtout dans les profils plus évolués.

La porosité est généralement faible, sauf dans certains niveaux voisins de la surface ou dans les niveaux supérieurs des horizons enterrés sous des cendres plus récentes.

Ce sont donc des sols argileux qui s'opposent nettement par leur texture aux sols de transition, beaucoup plus jeunes et moins évolués. Aux Antilles, on passe des sols très jeunes à halloysite, aux sols argileux, par toute une gamme de sols correspondant à des stades intermédiaires. La teneur en argile augmente, l'aspect anguleux des agrégats également, les caractères de luisances et la macroporosité décroissent.

3.2.3.2 - Minéralogie

a - Rayons X

La raie à 10 Å de l'halloysite est bien nette sur les échantillons séchés à l'air à la température ordinaire. Elle passe à 7,3 Å après séchage à 100° (figure 23). Cette dernière raie est plus intense que dans les sols de transition et presque aussi importante que la raie vers 4,4 Å. Une large raie vers 2,4 - 2,5 Å remplace souvent, avec l'halloysite, les multiples raies de la kaolinite. La goéthite est peu visible, en partie masquée par une petite raie à 4,04 de cristobalite.

b - Analyse thermique différentielle

Le départ d'eau à 130° est moins intense que pour les sols de transition mais il est dangereux d'attacher trop d'importance à son amplitude, variable suivant le temps de séchage à l'étuve de l'échantillon. Par contre, le crochet endothermique est très important à 570°, ainsi que le crochet exothermique à 940°, ce qui indiquerait une argile bien cristallisée. Le petit crochet à 320° serait probablement dû à la goéthite.

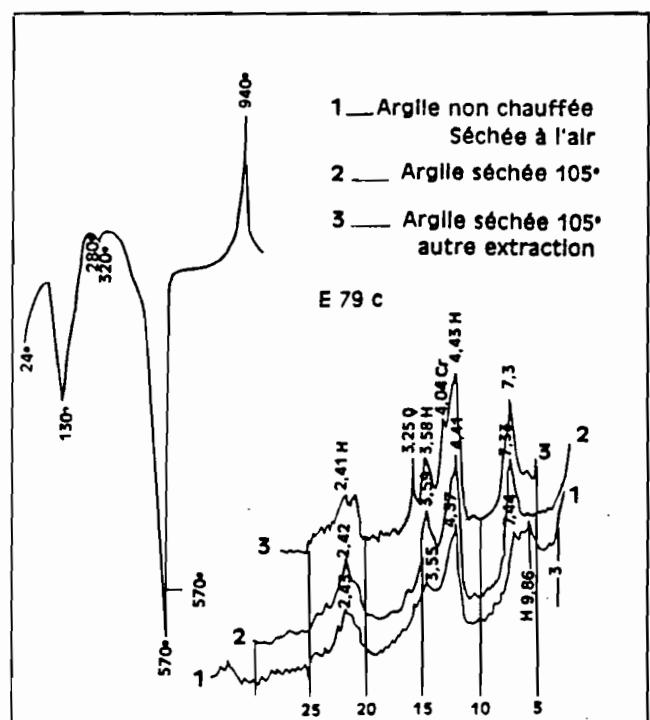


FIG 23

c - Microscopie électronique

L'aspect très caractéristique des petits tubes d'halloysite est bien visible avec quelques rares plaquettes (figure 24) et tout à fait analogue à celui des sols similaires des Antilles (figure 25 - Martinique).



Figure 24

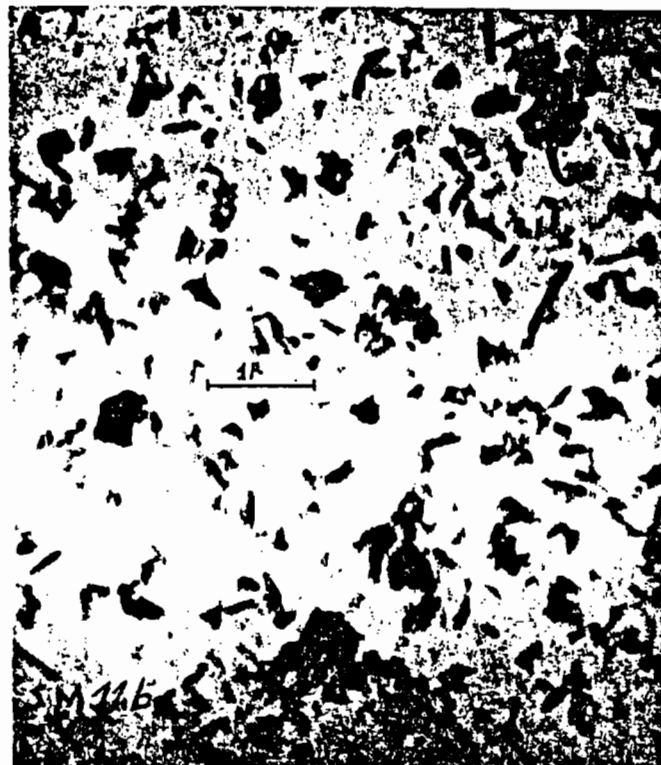


Figure 25

3.2.3.3 - Autres propriétés

La proportion d'argile peut être importante : 50 à 80 %. La capacité d'échange est de l'ordre de 20 mé. % vers 50 cm, avec 1 % de matière organique. Les pH compris entre 5,5 et 6,5.

Les humidités obtenues pour les valeurs de pF sur échantillons frais sont souvent inférieures à celles obtenues sur échantillon séché à l'air. Ceci tient à la préparation de l'échantillon frais, grossièrement émiétté entre les doigts alors que la terre séchée à 2 mm est broyée et contient des particules très fines et poudreuses.

Les sables renferment surtout de la hornblende verte, puis de l'hypersthène, quelques hornblendes brunes et épidote, des minéraux opaques et quelques zircons. La fraction légère comprend des feldspaths plagioclases, des quartz bipyramidés et du verre volcanique. La composition est donc identique à celle des autres échantillons bien que la proportion de sable soit faible et la teneur en argile vraie élevée.

4 - CONCLUSION

La distinction proposée entre sols à allophane et sols à halloysite repose donc surtout sur la présence de gels fortement hydratés pouvant se dessécher irréversiblement à l'air.

Il paraît difficile de lier le concept des sols à allophane à la simple présence de substances amorphes, qu'elles soient hydratées ou non, car en présence de quantités notables de montmorillonite ou d'halloysite, ces substances amorphes sont difficiles à déceler et cette définition resterait alors très imprécise.

La distinction coïncide sensiblement avec l'absence ou la présence d'halloysite, du moins en régions tropicales. Elle correspond à une modification des liaisons substances minérales - substances organiques qui se traduit très nettement sur le terrain par une accentuation de la coloration quand on passe des sols à allophane hydratés aux sols de transition à halloysite. Il serait intéressant de préciser aux infra-rouges la nature des liaisons entre ces substances amorphes et la matière organique. Est-ce à la matière organique ou à une meilleure organisation de la structure du minéral qu'il faut attribuer ces capacités de rétention pour l'eau plus élevées après séchage préalable à l'air dans les sols de transition allophane-halloysite que dans les sols à allophane.

La distinction entre sols fortement allophaniques et faiblement allophaniques est basée sur l'intensité de l'hydratation du sol en place. Bien que le facteur temps d'évolution semble être le principal responsable de ces variations, entraînant une augmentation de la proportion de substances amorphes, une diminution de la silice et une augmentation relative de l'alumine, il ne semble pas possible (c'est cependant souvent le cas) de rattacher les sols fortement allophaniques à des sols à bas rapport silice/alumine (1 à 1,5) et présentant de la gibbsite, et les sols faiblement allophaniques à des sols à hauts rapports silice/alumine (3). Certains sols encore très riches en silice soluble à la soude sont très hydratés.

Pour certains auteurs ayant étudié les substances amorphes de podzols des U.S.A., la similitude des spectres aux infra-rouges avec ceux de silicates de fer et de manganèse permettrait de dire qu'il s'agit de "solutions solides de silicates de fer et de manganèse". Dans le cas des cendres volcaniques, il s'agirait surtout de la silice et de l'alumine en proportions variables. Bien que les teneurs en fer libre extrait par la méthode DEB soient notables (4 à 8 % Fe_2O_3) dans les sols fortement allophaniques, et voisines des teneurs en fer total extrait aux acides bouillants, les formes cristallisées ne semblent pas être observées (la raie intense à 4,05 Å gêne souvent l'identification). L'étude aux infra-rouges permettrait certainement d'obtenir des précisions intéressantes bien que malheureusement il ne soit pas possible d'opérer sur des échantillons légèrement séchés.

N.B. - Ces études ont été effectuées avant que le laboratoire des Antilles ne soit équipé d'un désintégrateur à ultra-sons de 20 K C qui permet désormais une dispersion complète des sols allophanes après un nettoyage très efficace des sables sans traitements chimiques autres que la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée.

5 - BIBLIOGRAPHIE

- Altération (L') des roches et la formation des sols au Kivu (Rép. du Congo).*
par A. PECYROT, M.G. GASTUCHE, J. DELVIGNE, L. VIELVOYE et J.J. FRIPIAT -
1962 - Publ. I.N.E.A.C., sér. scient., n° 97, Bruxelles, 92 p.
- AOMINE (S.), YOSHINAGA (N.) - 1955 - Clay minerals of some well-drained volcanic ash soils in Japan. *Soil Sci.*, 79, 5, p.349-358.
- CHAMPION (J.) - 1959 - *Las bananeras en el Ecuador. Les bananeraies en Equateur.* ANBE-IFAC, Paris, 51 p.
- COLMET-DAAGE (F.) - 1962 - Etudes préliminaires des sols des régions bananières d'Equateur. *Fruits*, vol.17, n° 1, p.3-21.
- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.) - 1965 - Caractéristiques hydriques de certains sols des régions bananières d'Equateur. *Fruits*, vol.20, n° 1, p.19-23.
- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.) - 1965 - Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, III, 2, p.91-121.
- DABIN (B.) - 1964 - Etude de quelques formes de phosphore dans quelques sols des Antilles. Action sur l'alimentation phosphatée de la canne à sucre. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, II, 2, p.5-11.
- DEB (B.C.) - 1950 - The estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. *J. Soil Sci.*, 1, p.212-220.
- DeMUMBRUN (L.E.), CHESTERS (G.) - 1964 - Isolation and characterization of some soil allophanes. *Soil Sci. Soc. Proce.*, vol. 28, n° 3, p.355-359.
- D'HOORE (J.) - 1964 - Carte des sols de l'Afrique au 1/5 000 000 (Définitions révisées). *Sols afric.*, IX, 1, p.55-64.
- DUPLAIX (S.) - 1958 - *Détermination microscopique des minéraux des sables.* Ed. Libr. Polytechn. Ch.Béranger, Paris-Liège, VIII, 96 p.
- ELLIS (B.G.), MORLAND (M.M.) - 1963 - Heat of desorption ammonia and simple organic materials from bentonites. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27, 1, p.21-25.
- FISCHESSER (R.) - 1955 - *Données des principales espèces minérales.* J. et R. Sennac, Paris, 66 p.
- FREI (E.) - 1957 - Informe al gobierno del Ecuador sobre reconocimientos edafologicos exploratorios. F.A.O. Informe, n° 585, 35 p., multigr.
- GRIM (R.E.) - 1953 - *Clay mineralogy.* Mc Graw-Hill Book Co, XX, 384 p.
- JUNG (J.) - 1958 - *Précis de pétrographie.* Masson, Paris, 314 p.
- KELLER (W.D.) - 1952 - Analcime in the Popo Agie member of Chugwater formation. *Sedim. Petrology*, p.71-82.
- KYUMA (K.), KAWAGUCHI (K.) - 1964 - Oxidative changes of polyphenols as influenced by allophane. *Soil Sci. Soc. Am. Proce.*, 28, 3, p.371-374.
- MILLOT (G.) - 1964 - *Géologie des argiles.* Masson, Paris, 499 p.
- OADES (J.M.), TOWNSEND (W.N.) - 1962 - *The use of Piperidine as an aid to clay mineral identification.* Adelaide, South Australia, 63, p.2212-2215.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.) - 1962 - Allophane in some ando soils. *Soil Sci. and Plant Nutrition*, vol. 8, n° 2, p.6-13.
- U.S.D.A. Soil Survey staf. - 1960 - *Soil classification. A comprehensive system. 7th approximation.* U.S.D.A., Washington, 265 p.

II/-/ Caractéristiques de quelques sols d'Equateur /
dérivés de cendres volcaniques /

2ème partie

Conditions de formation et d'évolution

Cahier ORSTOM, Sér. Pédol., 1967, vol.V, n°4, 353-392

F. COLMET DAAGE
F. CUCALON
M. DELAUNE

J. GAUTHEYROU
M. GAUTHEYROU
B. MOREAU

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SOLS D'ÉQUATEUR DÉRIVÉS DE CENDRES VOLCANIQUES

Deuxième Partie

Conditions de formation et d'évolution

par

F. COLMET-DAAGE (1) F. CUCALON (2) M. DELAUNE (3) J. et M. GAUTHEYROU (4) B. MOREAU (5)

Avec le concours :

- du Laboratoire des Argiles de l'ORSTOM : G. FUSIL, M. KOUKOUI
- du Laboratoire de Physique des Sols de l'ORSTOM : A. COMBEAU
- du Laboratoire de Physico-Chimie Minérale de l'Université de Louvain : C. de KIMPE

RÉSUMÉ

Dans une première partie ont été définies les propriétés essentielles, morphologiques, minéralogiques et physico-chimiques, des horizons qui caractérisent les sols fortement allophaniques, les sols faiblement allophaniques, les sols de transition allophanes-halloysite et enfin les sols argileux brun-rouille à halloysite.

Dans cette deuxième partie, nous nous proposons, en faisant référence à ces niveaux caractéristiques, sans revenir en détail sur leurs propriétés, de replacer les principales variantes de ces sols dans leur milieu naturel, pour essayer de connaître les facteurs qui semblent avoir le plus d'importance pour leur formation et pour leur évolution.

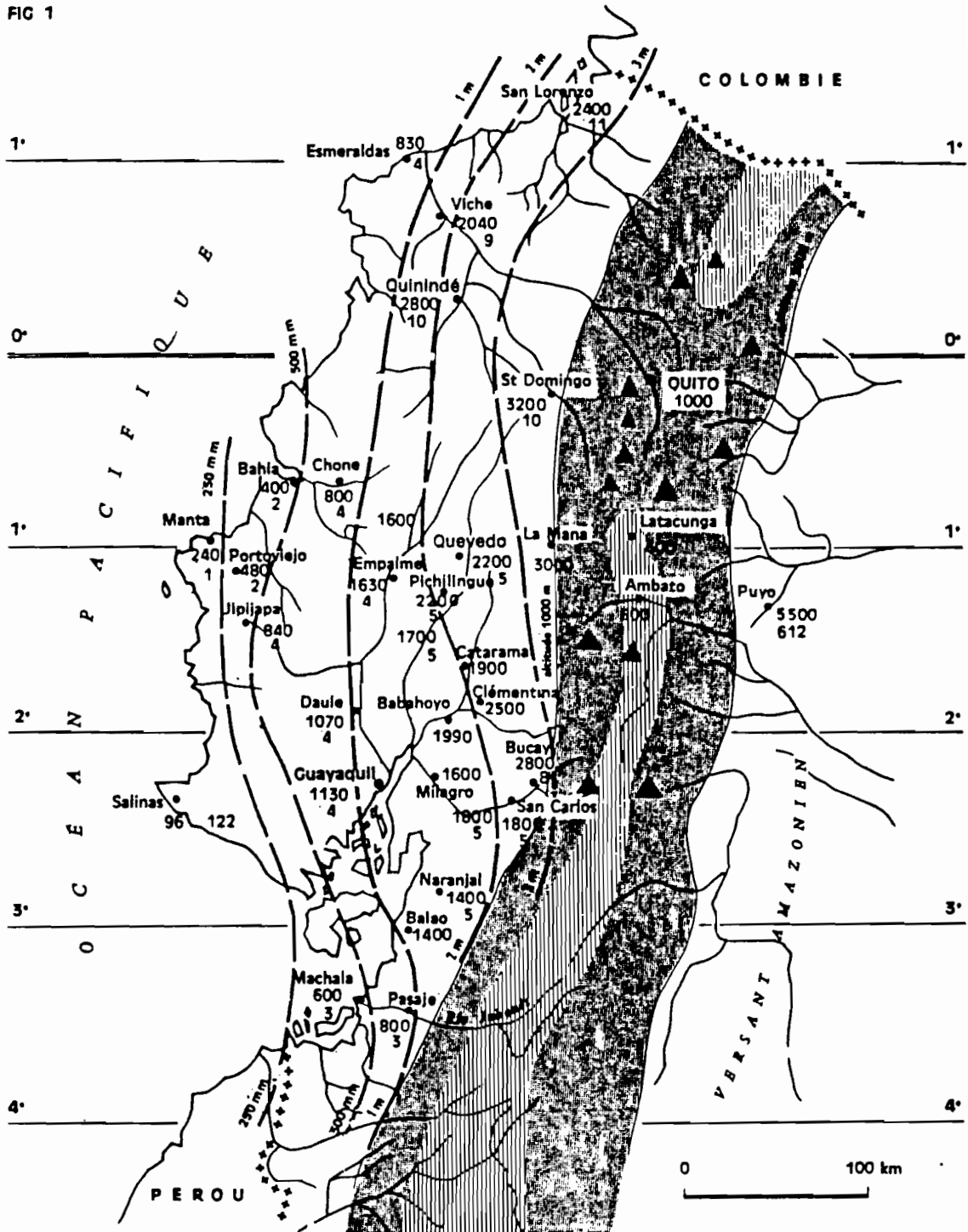
1 - Bureau des Sols - ORSTOM-Antilles,
2 - IFEIA-DNB - Equateur,
3 - Géologie - ORSTOM,
4 - Bureau des Sols - ORSTOM-Antilles,
5 - IFEIA-IFAC - Equateur.

PLAN

- 1 - INTRODUCTION - Généralités sur l'Equateur
- 2 - VARIATIONS DE LA COMPOSITION DES TUFFS AERIENS
- 3 - LES SOLS FORTEMENT ALLOPHANINIQUES
- 4 - LES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANINIQUES recouvrant des sols FORTEMENT ALLOPHANINIQUES
- 5 - LES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANINIQUES
- 6 - LES SOLS DE TRANSITION à ALLOPHANES - HALLOYSITE recouvrant des sols argileux brun-rouille à halloysite
- 7 - LES SOLS BRUN-ROUILLE à HALLOYSITE
- 8 - LES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANINIQUES recouvrant des sols FORTEMENT ALLOPHANINIQUES en altitude
- 9 - QUELQUES SOLS DES HAUTES ALTITUDES
 - 1 - Sols du paramon
 - 2 - Sols de la vallée interandine
- 10 - DISCUSSION
 - 1 - Conditions de formation
 - 2 - Place des sols dans les classifications
- 11 - CONCLUSION

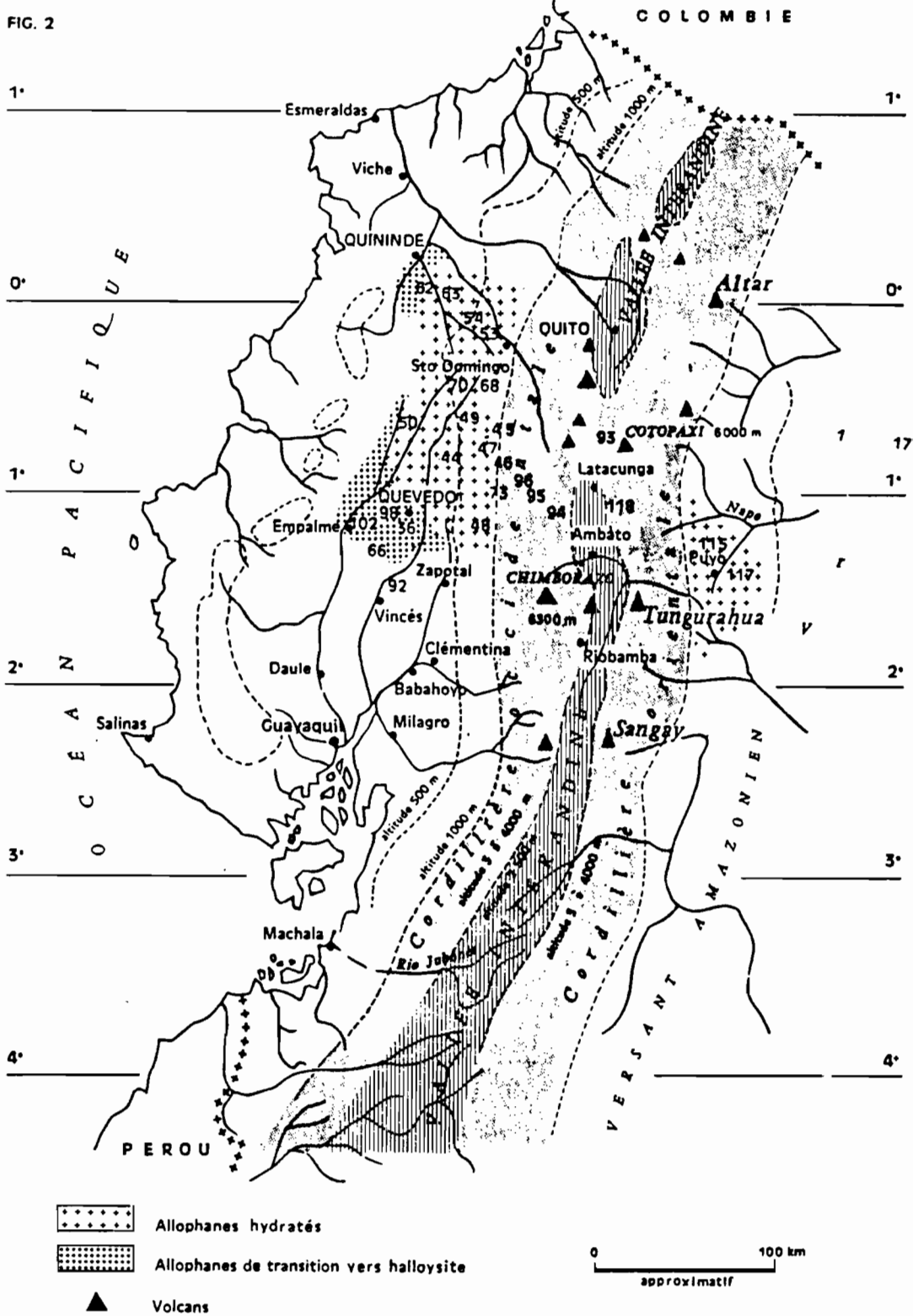
PLUVIOMETRIE ANNUELLE
 en millimètres et mois supérieurs à 100 mm

FIG 1



EMPLACEMENT DES PROFILS PRINCIPAUX CITES

FIG. 2



1 - INTRODUCTION - GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉQUATEUR

1.1 - Géomorphologie

1.1.1 - LA SIERRA

Entre le deuxième degré de latitude Sud et le premier degré de latitude Nord, la Cordillère des Andes est jalonnée de nombreux volcans, certains dépassant 5000 mètres d'altitude.

On distingue deux chaînes parallèles : les Cordillères Occidentale et Orientale qui enserrent une vallée de 30 à 40 km de largeur, la haute vallée interandine. Celle-ci a été compartimentée, par l'accumulation de matériaux volcaniques, en fosses ou "hoyas" indépendantes qui débouchent alternativement vers l'Atlantique ou le Pacifique.

La Cordillère Orientale ou Réal semble la plus ancienne. Elle est essentiellement constituée de roches métamorphiques précambriennes : micaschistes, gneiss, etc. sauf aux abords des volcans dont certains sont encore actifs.

La Cordillère Occidentale, plus récente, est formée de matériaux volcaniques avec quelques intercalations de sédiments marins crétacés surélevés.

Les deux Cordillères présentent d'énormes accumulations d'époques plus récentes, coulées, cendres ou lapilli, rejetées par les nombreux volcans situés le plus souvent en bordure de la haute vallée interandine.

Cette vallée, au Nord du deuxième parallèle Sud, est entièrement recouverte de ces matériaux généralement quaternaires : dépôts de cendres aériens, ou transportés par les fleuves, les glaciers, le vent, ou accumulés dans les lacs.

Au Sud du 2e parallèle, les édifices volcaniques récents disparaissent et les dépôts aériens meubles deviennent rares.

1.1.2 - LES VERSANTS PACIFIQUE ET AMAZONIEN

Les deux cordillères s'élèvent brutalement au-dessus des plaines côtière et amazonienne en formant une véritable muraille de 3000 à 4000 mètres de hauteur.

Si les projections aériennes de cendres et de ponces andésitiques, ou dacitiques, sont très épaisses aux abords des volcans et dans la haute vallée interandine, elles ont aussi recouvert, transportées par les vents ou les rivières, de vastes superficies des contreforts et des plaines tropicales pacifique et amazonienne.

1.1.2.1 - Plaine Amazonienne

L'altitude au pied même du versant très accidenté de la Sierra, est voisine de 900 m, mais s'abaisse très rapidement à 500 m ou même 300 m. A part quelques sédiments crétacés ou jurassiques situés au pied de la Cordillère, la plaine est formée d'épais sédiments tertiaires recouverts, par endroits, de cendres volcaniques quaternaires apportées par les vents ou les rivières.

1.1.2.2 - La plaine Pacifique

On peut distinguer plusieurs régions naturelles.

Au Nord de la ligne équinoxiale, les rivières descendent des Andes vers le Pacifique, à peu près perpendiculairement à la chaîne andine et à la côte.

Au Sud de cette ligne, une chaîne côtière peu élevée, ne dépassant pas 800 m d'altitude, s'étend en bordure de la côte, parallèlement aux Andes, et force les rivières à descendre du Nord au Sud vers le Golfe de Guayaquil, isolant une large pénéplaine plus ou moins bosselée par endroits et entaillée par les rivières, dans laquelle les dépôts aériens de cendres volcaniques occupent de vastes étendues propices à la culture de la banane (Quevedo - Santo Domingo).

Ces dépôts diminuent progressivement d'épaisseur à l'Ouest et au Sud, puis disparaissent, laissant apparaître, à l'Ouest, des formations tertiaires marines exondées, et au Sud, des formations alluviales, limoneuses et légères près des rivières ou aux abords de la Cordillère, argileuses dans les parties basses marécageuses.

1.2 - Orogénèse

Des travaux de SAUER (1957 et 1965) l'on ne retiendra que les manifestations du volcanisme qui ont fourni ces immenses dépôts de matériaux friables : cendres, tufs et ponces.

La Cordillère des Andes, à la fin du tertiaire, après des plissements et des aplanissements successifs, atteignait rarement l'altitude de 1500 m à 2500 m, lorsque des soulèvements de grande amplitude commencèrent au pléistocène.

Ces mouvements verticaux affectèrent les différentes parties du pays avec des intensités variées. Ils furent particulièrement importants au Nord du 2^e degré de latitude Sud.

L'inégalité du soulèvement entraîna la rupture des masses rocheuses dures, en failles de directions longitudinales et transversales qui ne modifièrent pas, cependant, la forme allongée des Andes. Les bordures centrales des deux cordillères se soulevèrent plus fortement que les versants externes, donnant naissance à la large et profonde dépression de la vallée interandine.

Les systèmes de failles transversales séparent des fosses ou "hoyas". Des ruptures longitudinales se produisirent aussi suivant l'axe médian des dépressions. C'est par ces points de plus faible résistance de l'écorce terrestre que le magma monta vers la surface pour réanimer l'activité volcanique, et c'est à ces endroits que surgirent aux différentes périodes du Quaternaire, mais surtout au Pléistocène, les volcans placés de part et d'autre de ce couloir central.

Quelques uns de ces volcans dépassent encore maintenant le niveau des neiges éternelles (4600 à 4800 m), le point culminant étant le volcan double du Chimborazo (6300 m).

Au cours du quaternaire, l'activité volcanique se déplaça progressivement de la Cordillère Occidentale vers la Cordillère Orientale où sont situés les volcans ayant donné lieu à des manifestations récentes : Cotopaxi, Tunguragua, Revendador, Sangay.

Le ralentissement de l'activité volcanique se traduirait, d'après SAUER, par une diminution de l'acidité du magma. On aurait d'abord des dacites, ou les andésites les plus acides, avec, généralement, une prédominance d'amphiboles, puis des andésites basiques plus riches en pyroxènes, dont les ultimes venues renfermeraient aussi de l'olivine. Les roches les plus basiques, comme les basaltes, n'apparaîtraient, dans la majorité des cas, que dans les toutes dernières périodes de l'activité volcanique.

Parfois, cependant, des volcans en voie d'extinction donnent au cours des dernières manifestations, des produits acides contrairement à la règle habituelle qui voudrait que ce fut une phase basique. Ces produits acides (dacitiques) seraient expulsés par quelques formidables explosions, si violentes que la plus grande partie du cône est alors rejetée dans l'atmosphère, laissant une vaste caldeira béante. Il peut y avoir aussi explosion de produits acides par de petits cratères latéraux.

1.3 - Sédimentation volcanique

Ces volcans, le plus souvent donc andésitiques ou dacitiques, donnent lieu, outre des coulées de laves, à des explosions qui projettent dans l'atmosphère d'énormes quantités de matériaux : bombes, lapilli, ponces et cendres.

Certains de ces matériaux, finement divisés et transportés par les vents, seraient, d'après SAUER, à l'origine de ce tuf consolidé nommé "Cangagua" qui rappelle le loess par ses caractères physiques, mais sans renfermer, cependant, au départ, de carbonate de calcium.

1.3.1 - HAUTE VALLÉE INTERANDINE

Il n'est pas possible, dans la haute vallée interandine, d'expliquer les processus très complexes de sédimentation dans cette période du quaternaire de soulèvements et d'effondrements très importants, car le volcanisme très intense et les glaciations y contribuèrent ensemble en mêlant simultanément les produits de leur action en recouvrements successifs très irréguliers.

Certains niveaux ont pu, cependant, être caractérisés, soit par leur origine géologique, soit par leur composition pétrographique, soit par des restes paléontologiques et servent de guides. On doit citer ainsi, tout particulièrement, les tufs de la cangagua éolienne des dernières périodes interglaciaires avec les "boules" durcies sphériques attribuées à un scarabée identifié.

Il semble que quatre grandes glaciations pléistocènes se soient produites, ayant abaissé le niveau des neiges éternelles de près de 1500 m, par rapport au niveau actuel. Les premières glaciations affectant des chaînes peu élevées, eurent peu d'effets, mais à la fin des dernières glaciations, les eaux courantes avaient déjà entaillé de profonds canyons aux parois verticales, dans les sédiments pléisto-pliocènes. Ces profondes vallées ne se retrouvent pas dans le Sud du pays où l'accumulation de matériaux volcaniques quaternaires a été beaucoup plus faible.

Dans les périodes post-glaciaires, une couverture peu épaisse de tuf éolien "cangagua" vint recouvrir les formations des dernières glaciations avec présence d'un niveau intermédiaire de couleur sombre qui serait, d'après SAUER, un sol fossile.

1.3.2 - PLAINES TROPICALES

Les dépôts de cendres des zones tropicales humides pacifique et amazonienne dateraient, d'après SAUER, de l'époque quaternaire. L'étude de leur mise en place et leur datation sont plus délicates par suite de l'altération intense que ces matériaux perméables ont déjà souvent subie. Comme nous le verrons plus loin, la composition et le degré d'altération des minéraux donnent quelques indications. Les gisements anthropologiques peuvent aussi être des guides précieux pour les formations les plus récentes.

Certains de ces sédiments volcaniques ont une origine au moins partiellement fluviale, et ont été arrachés aux immenses dépôts des hautes vallées. D'autres, en couches successives, d'aspect et d'épaisseur très semblables, à plusieurs dizaines de kilomètres de distance, recouvrent, en épousant toutes les ondulations du terrain, des formations plus anciennes. Ils proviennent d'une sédimentation aérienne de particules transportées au loin par les vents. Certains volcans (Renvendador, Sangay) envoient encore de nos jours, certaines années, de nouvelles petites couches de cendres.

1.4 - Climat

Deux facteurs très importants agissent ensemble sur la pluviométrie et rendent celle-ci excessivement variée en Equateur suivant les régions : intensité et répartition annuelle.

Le courant froid de Humboldt, après avoir longé les côtes du Chili et du Pérou, s'écarte de la côte et cesse progressivement de faire sentir son influence désertique, permettant une augmentation des précipitations du Sud au Nord. Si la frontière Péruvienne est, sur la côte, quasi-désertique, la frontière Colombienne est extrêmement arrosée toute l'année (5 m par an).

La barrière des Andes qui s'élève brutalement jusqu'à 3000 ou 4000 mètres au-dessus de la plaine côtière, provoque des courants ascendants, causes de chutes de pluies de plus en plus intenses à mesure qu'on s'en rapproche. Au-dessus de la ceinture nuageuse de 1500 à 2500 m, les nuages se dissipent et le climat est plus sec.

- COTE PACIFIQUE - Ces deux facteurs provoquent simultanément une augmentation des précipitations du Sud au Nord et de l'Ouest, sur la côte, vers les montagnes à l'Est. La durée de la saison sèche est plus réduite dans le Nord et à proximité de la Cordillère.

La carte ci-jointe indique quelques pluviométries annuelles exprimées en mm par an et le nombre de mois où celle-ci est supérieure à 100 mm.

A la latitude de Guayaquil, on passe de 100 mm sur la côte (Salinas) à 1200 mm à Guayaquil en 4 mois, et 2800 mm près de la Cordillère en 9 mois (Bucay).

Dans le Nord, la pluviométrie est déjà plus élevée sur la côte (800 mm à Esmeraldas) passant à 2000 mm en 9 mois à Viche, plus à l'intérieur, et 3300 mm à Santo Domingo en 10 mois.

Dans l'extrême Nord, il pleut beaucoup et toute l'année, même sur la côte (San Lorenzo sur la côte : 2400 mm en 11 mois, et 5 m et plus à l'intérieur des terres).

Au Nord de Guayaquil, on peut distinguer une saison chaude et relativement ensoleillée, correspondant à la saison des pluies, et une saison un peu plus fraîche, tempérée par l'influence du courant de Humboldt et l'enneigement pratiquement constant, durant toute la saison sèche de mai à décembre. Durant cette saison sèche, une fine bruine matinale provoque, dans bien des régions, un apport d'eau très appréciable, quoique non mesurable. Les températures moyennes mensuelles varient entre 21 et 25°. L'insolation est souvent faible et constituerait un facteur limitant pour bien des cultures : sucre pour la canne, densité de plantation et qualité pour la banane (700 à 1000 h/an au solarigraphe Campbell).

L'absence de vent, surtout en saison sèche, est un facteur très favorable à la banane et limite l'évapo-transpiration.

- VERSANT AMAZONIEN - Il est très arrosé par les formations nuageuses venues de l'immense plaine moite du bassin de l'Amazone. La pluviométrie annuelle atteint 3 à 5 mètres, bien répartie toute l'année, et la température est élevée.

- SIERRA - Dans la haute vallée interandine, certaines régions sont quasi-désertiques, d'autres suffisamment arrosées (1 m) pour permettre des cultures tempérées toute l'année. La température est constante toute l'année (moyenne mensuelle : 15° vers 2500 m, 10° vers 4000 mètres avec des minimas de 0°). Les neiges éternelles n'apparaissent qu'à 5000 mètres.

1.5 - Agriculture

Le versant amazonien est à peine exploité, et c'est sur le versant Pacifique que l'on trouve les principales cultures tropicales. A côté de la banane qui a connu depuis 10 ans une extension considérable et dont l'Equateur est de très loin le plus gros exportateur du monde, il faut citer le cacao en régression, la canne à sucre avec deux usines de 100.000 tonnes chacune, etc.

Dans la Sierra, c'est la gamme des cultures tempérées : blé, orge, maïs, pommes de terre, fruits, avec des pâturages de luzerne pour la production laitière (élevages de Holstein).

2 - VARIATIONS DE LA COMPOSITION DES TUFFS AÉRIENS

Les cendres sont dacitoides.

La fraction légère, souvent assez altérée, renferme des feldspaths plagioclases, (andésine/labrador), des verres, de l'analcime, des quartz bipyramidés et plus rarement de la sanidine. L'altération rend souvent leur identification difficile et les comptages illusoirs.

La composition de la fraction lourde est plus variée suivant les régions. Les minéraux sont dans l'ensemble peu altérés et aisément identifiables. C'est surtout cette fraction qui retiendra notre attention.

Les sables de quatorze profils ont été étudiés. Parmi ceux-ci, un profil provient du versant amazonien des Andes, deux de la vallée interandine, un du versant Pacifique vers 2600 m d'altitude et les autres de la plaine Pacifique de Quevedo - Santo Domingo - Quininde.

2.1 - Cordillère et versant Amazonien

On remarque sur la figure 3 que les sables sont riches en augite et en hypersthène et relativement pauvres en hornblende verte, alors que dans la plaine et le versant Pacifique, le pourcentage maximum d'augite rencontré, est de 10 %. Les éléments légers paraissent très altérés.

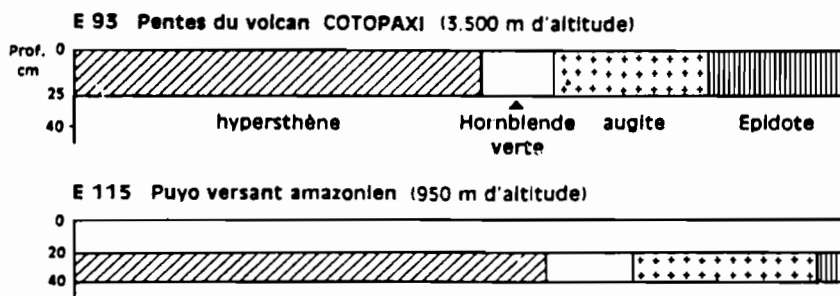


FIG. 3

2.2 - Versant et plaine Pacifique

La hornblende verte et l'hypersthène dominant largement. Mais leurs proportions respectives sont sujettes à des variations, soit dans un même profil, soit régionales.

2.2.1 - AU NORD (SANTO DOMINGO - VERS QUININDE) - La hornblende verte est de loin, le minéral principal de la fraction lourde (70 à 90 %) contre 8 à 20 % pour l'hypersthène et 2 à 6 % pour la hornblende brune, 0 à 8 % pour l'augite.

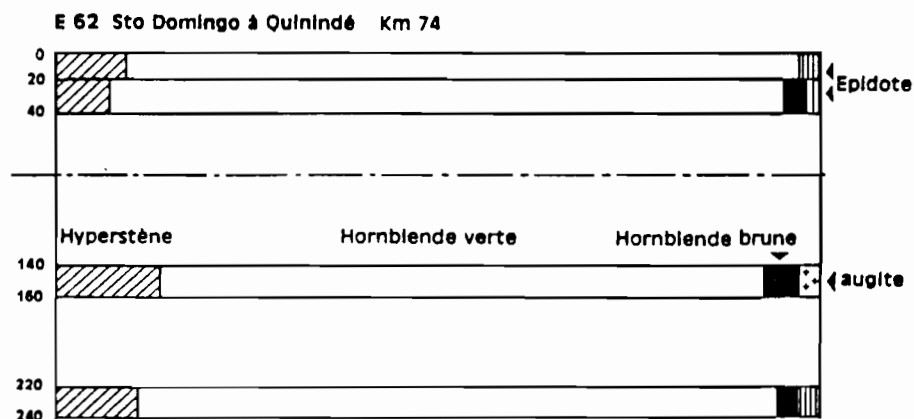


FIG. 4

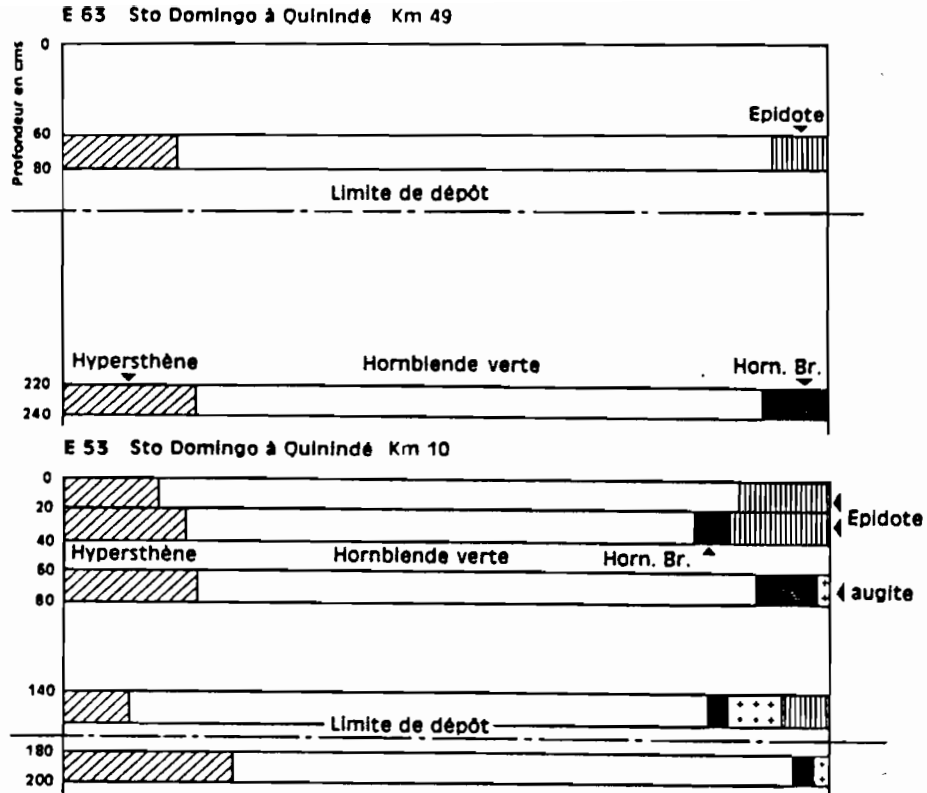


FIG. 4 (suite)

2.2.2 - AU CENTRE (ENTRE QUEVEDO ET SANTO DOMINGO), dans la partie centrale de la plaine bananière, la fig.5 montre clairement qu'il existe deux dépôts superposés :

- le dépôt supérieur récent a une composition voisine de ceux situés au Nord de Sto Domingo. La hornblende verte domine (70 à 80 %) avec une proportion faible d'hypersthène (4 à 14 %). Il n'y a pas d'augite.

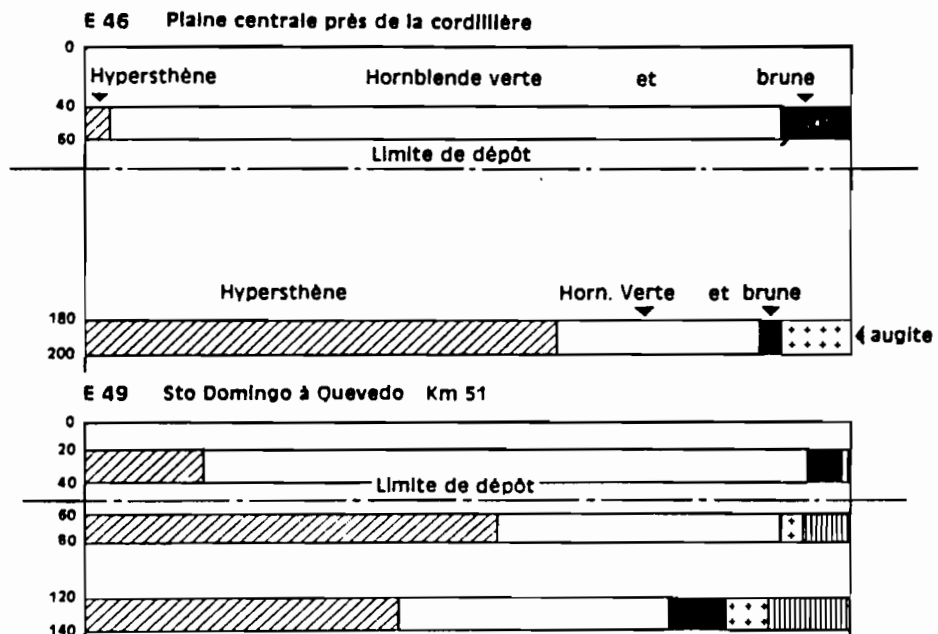


FIG. 5

- Le dépôt inférieur, plus ancien, renferme moins de hornblende verte (27 à 70 %) mais davantage d'hypersthène (22 à 60 %) avec présence fréquente d'augite en petite quantité, ceci étant d'autant plus net qu'on se rapproche de Quevedo.

Il semble donc, dans cette région centrale de la plaine Pacifique, qu'à un dépôt riche en hypersthène ait succédé un dépôt cendré plus pauvre en ce minéral et plus riche en hornblende verte.

Sur le versant des Andes, à la latitude de Quevedo, à 2700 m d'altitude, la composition des tufs des deux dépôts du profil 73 (fig.6) est voisine de celle des profils de la basse plaine (fig.5).

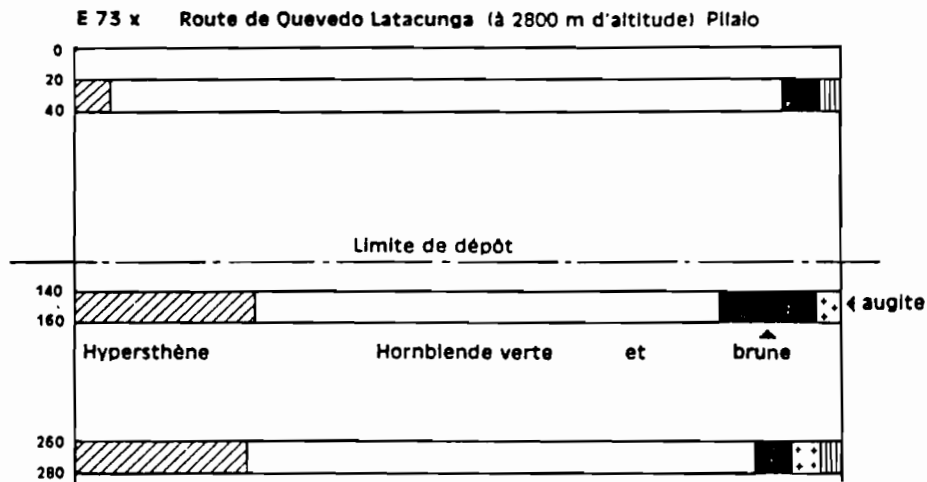


FIG. 6

2.2.3 - AU SUD (QUEVEDO VERS EMPALME), le dépôt récent est peu épais et déjà discontinu, recouvrant des formations argileuses à halloysite. La proportion de hornblende verte ne dépasse pas 50 % et celle d'hypersthène est assez élevée : 21 à 46 %, avec 6 à 8 % d'augite. Il aurait recouvert un autre dépôt peu épais, plus riche en hornblende.

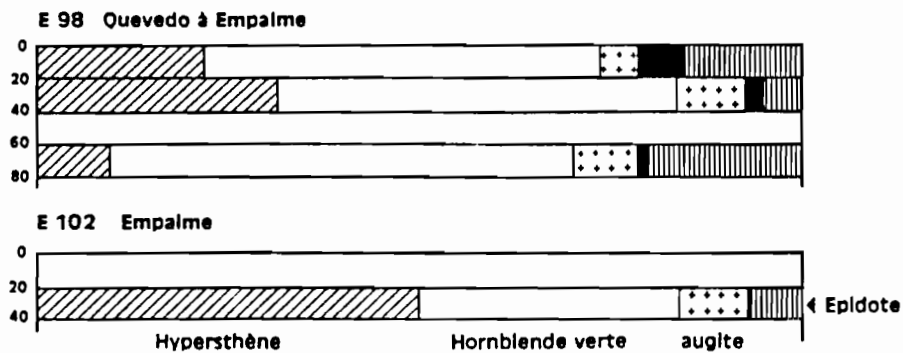


FIG. 7

2.2.4 - EN CONCLUSION, il est donc possible de distinguer trois faciès.

Faciès 1 - Ce sont les projections de tufs dacitiques à hypersthène et augite du versant amazonien et de certaines régions orientales de la haute vallée interandine (Volcan Cotopaxi, près de Quito, et paramon de Latacunga).

TABLEAU 1 - Examen des sables de 50 à 500 microns

Numéro du Profil	Minéraux lourds en % de m. transparents				Teneur		Minéraux légers (en % minéraux légers)					Longueur en mm	Sables totaux % Sol		
	Hypersthène	Hamblende		Augite	Epidote Zoisite	Ponderal m. lourds en % sables > 50 µ	Minér. Opakes en % m. lourds	Quartz	Feldspaths				Zéolithes Analcime	50 à 200 microns	200 à 2000 microns
		Verte	Brune						Calco- sodiques Andésine	Altérés	Potass. Sanidine				
Versant amazonien															
E 115 b	59	11	2	22	6	18	-								
Cordillère															
E 93	52	16		18	14	6	très noirs		100 % machurés				19	34	
Santa Domingo à Quinindí															
E 53 a	8	80			12	25	12	17	62	19		2		36	10
b	14	70	4		12	18	12	27	38	27		8		32	5
c	16	84	6	2		26		2	50	40	5	3		38	9
e	8	76	2	8	6	21		19	43	35		3		30	6
g	20	76		2		29	12	20	50	26		3		23	10
E 63 c															
	14	81			5	5,3			100				0,2 à 0,3	15	1
e	18	75	7			3,5			98				0,1 à 0,2	8	0,5
E 62 e															
	8	90			2	23		2	70	25		3		24	1
b	6	90	2		2	21		4	50	39		7		28	1
e	12	80	4	2		60	32	5	50	41		4		8	1
f	10	88	2			55	12	10	65	23		7		7	1
Zone centrale Santa Domingo Quevedo															
E 68 a	10	72	6		12	13		9	39	42		10			
d	22	70	2	4	2	13	28	8	43	36		13			
e	30	58	4		8	17	8	6	61	28		5			
E 49 b															
	14	80			6	11		9	57	34				33	4
c	50	28		2	10	15		8	48	42		2		32	4
e	38	40	6	6	10	13		14	44	34		8		33	4
E 41 b															
	3	78	10		9	4	11	10	88		2		0,4 à 0,6	34	3
e	24	66	7		3	10	20	10	90				0,25	19	2
E 46 b															
	4	86	10			10	13	38	56		8		0,5		
g	62	27	1	10		3	16	16	84				0,4 à 0,7	29	7
à 2600 mètres d'altitude Pilalo															
E 73 b	6	86	5		3	5	30	40	60				0,7 à 1,2	24	
e	24	60	11	5		3	16	33	67					24	9
x	23	60	7	7	2	2	10	6	94				0,4 à 0,7	8	4
Ouest															
E 50 (95)	31	56	9		4	8		18	82						
c	6	88	2		4	18		5	46	45	2		0,4 à 0,6		
d	8	80	2	2	8	13	24	25	23	40	2	10		15	2
Quevedo Empalma															
E 98 a	21	52	8	6	13	9		15	53	27		5			
b	34	52	2	8	4	14		11	50	37		2		27	1
c	10	60		8	16	10		9	50	40	4	1		22	0
E 102 b															
	46	40		8	6	12		6	50	41		3		25	0
Alluvions de Vincés															
E 80 b	8	56			12	5	24	60	39 + biotites		1		0,08 à 0,2		

Faciès 2 - Il s'agit de projections de tufs dacitiques à hypersthène et hornblende verte, en proportions assez voisines, localisées dans le Sud de la plaine Pacifique, vers Quevedo - Empalme et le pourtour Ouest à la limite externe des dépôts de cendres. Dans la partie centrale, on ne les observe plus qu'enfouis sous les tufs plus récents du faciès 3.

Faciès 3 - Ce sont des projections de tufs dacitiques à forte dominance de hornblende verte et faible proportion d'hypersthène que l'on trouve dans la partie centrale de la plaine, entre Quevedo et Santo Domingo, et dans toute la partie Nord de la plaine vers Santo Domingo et Quininde. Dans la région centrale de Quevedo-Santo Domingo, ces dépôts ne sont pas très épais et ont recouvert les projections plus anciennes à hypersthène du faciès 2. Les régions situées au Sud de Quevedo et à l'Ouest, auraient été épargnées.

3 - LES SOLS FORTEMENT ALLOPHANIQUES

(Hydrandepts et oxy-hydrandepts)

- (Versant Amazonien (Oriente) Puyo-Napo)

3.1 - Géomorphologie

C'est la zone de piedmont de 800 à 1000 m d'altitude, située au pied des hauts reliefs presque abrupts de la cordillère. Le relief est encore assez accidenté, formé de collines aux ondulations souvent serrées, parfois plus larges. L'altitude décroît progressivement vers l'Est et la vallée du Rio Napo, affluent de l'Amazone (300 m).

Toute la région autour du Puyo, semble avoir été recouverte par des dépôts de cendres à hypersthène et augite, mais le substratum argileux rouge est souvent visible à quelques mètres de profondeur dans les talus. En se rapprochant du Rio Napo, les cendres disparaissent et les sols ferrallitiques désaturés semblent s'être formés, en partie, sur des formations volcaniques anciennes, brèches ou coulées.

3.2 - Climat

La pluviométrie est élevée (5 m par an) et assez remarquablement constante au cours de l'année. Ces conditions sont particulièrement favorables à la formation des allophanes et au maintien de leurs propriétés d'absorption vis-à-vis de l'eau. Les sols ne sèchent pratiquement jamais. Le climat, chaud et humide, n'est pas tempéré par le courant froid de Humboldt, comme sur le versant Pacifique. Les formations nuageuses basses qui viennent de l'Amazonie, envahissent souvent ces premiers contreforts avant de s'élever sur les flancs de la montagne et de se dissiper plus haut en altitude. L'insolation et l'évapo-transpiration sont modérées.

3.3 - Végétation

La région est encore très peu cultivée et la forêt équatoriale domine largement. Quelques plantations de canne à sucre pour distillation directe et des pâturages clos, plantés pour l'élevage de bœufs à viande, semblent les seules spéculations agricoles importantes, donnant lieu à une commercialisation hors de la région.

3.4 - Les Sols (en annexe: Profil E 115)

Ce sont des sols auxquels l'humidité permanente, dès la surface, confère tous les caractères des horizons allophaniques (cf. 1re partie). L'humidité au champ - ou celle à pF 2,8 sur échantillon frais - dépasse 200 et parfois 250 d'eau pour 100 g de terre séchée à l'étuve, sur l'ensemble du profil.

En surface, le sol est noir, spongieux, très mou. Les teneurs en matière organique sont élevées : 10 % environ dans les 15 premiers cm, et attribuables à la forte humidité tout au long de l'année, sans qu'il y ait, cependant, engorgement.

Plus en profondeur, le sol devient jaune assez clair (10 YR 6/8), très savonneux, onctueux entre les doigts, et s'effritant aisément. Les teneurs en matière organique sont encore importantes (3 % vers 1 m) mais la coloration noire n'apparaît pas, ce qui fait penser à des liaisons particulières avec les substances minérales amorphes.

Les teneurs en bases échangeables ne sont pas négligeables, mais celles en magnésium et potassium sont très faibles. Le pH est très bas en surface (4, 5) et s'élève progressivement en profondeur.

La propriété la plus remarquable reste l'énorme capacité en eau "utile" mesurée sur échantillons frais (définie par la différence : pF 2,8 - pF 4,2), soit environ 50 à 60 pour 100 g de terre séchée à l'étuve, souvent davantage.

Il faut tenir compte, cependant, pour les résultats exprimés en poids de terre, de la densité apparente très faible du sol en place ressuyé, de l'ordre de 0,4 à 0,5. Exprimés en volume de terre, ces résultats sont donc inférieurs de moitié.

3.4.1 - NIVEAUX A MICRO-CONCRÉTIONS DE GIBBSITE

Certains profils ne renferment pas de gibbsite. D'autres (sommets ou rebords de collines) en contiennent des quantités notables. Dans ce dernier cas, on peut observer, parfois, de petites poupées blanchâtres, globuleuses, ou des bâtonnets de quelques millimètres de longueur, dans les trous des racines, qui sont constitués de gibbsite pure. Comme il s'agit de niveaux profonds et très humides de formations perméables, recouvrant en régions accidentées des formations anciennes moins perméables, l'écoulement des eaux a lieu surtout obliquement et on peut se demander si la gibbsite ne provient pas, en partie, d'alumine dissoute dans les horizons supérieurs et reprécipitée plus en profondeur (trous de racines).

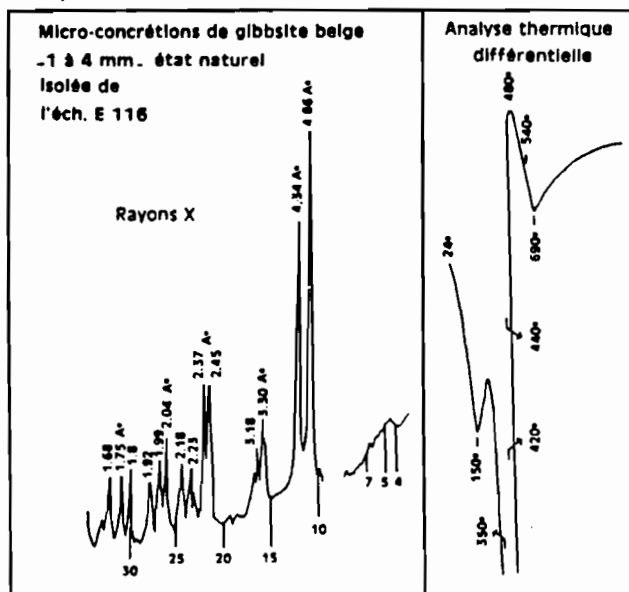
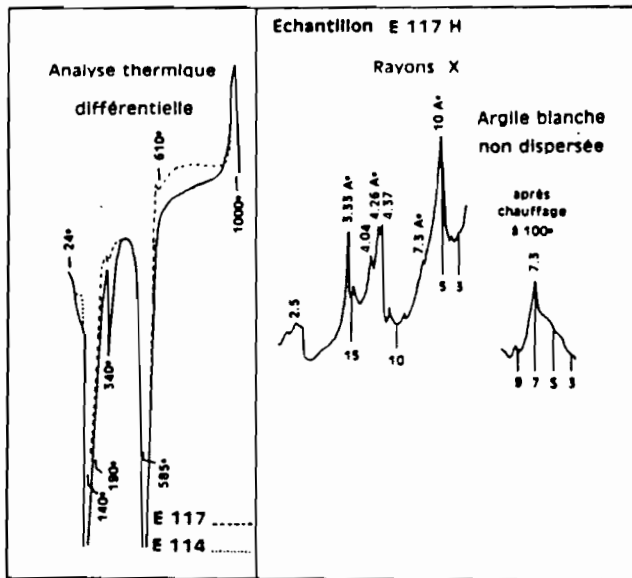


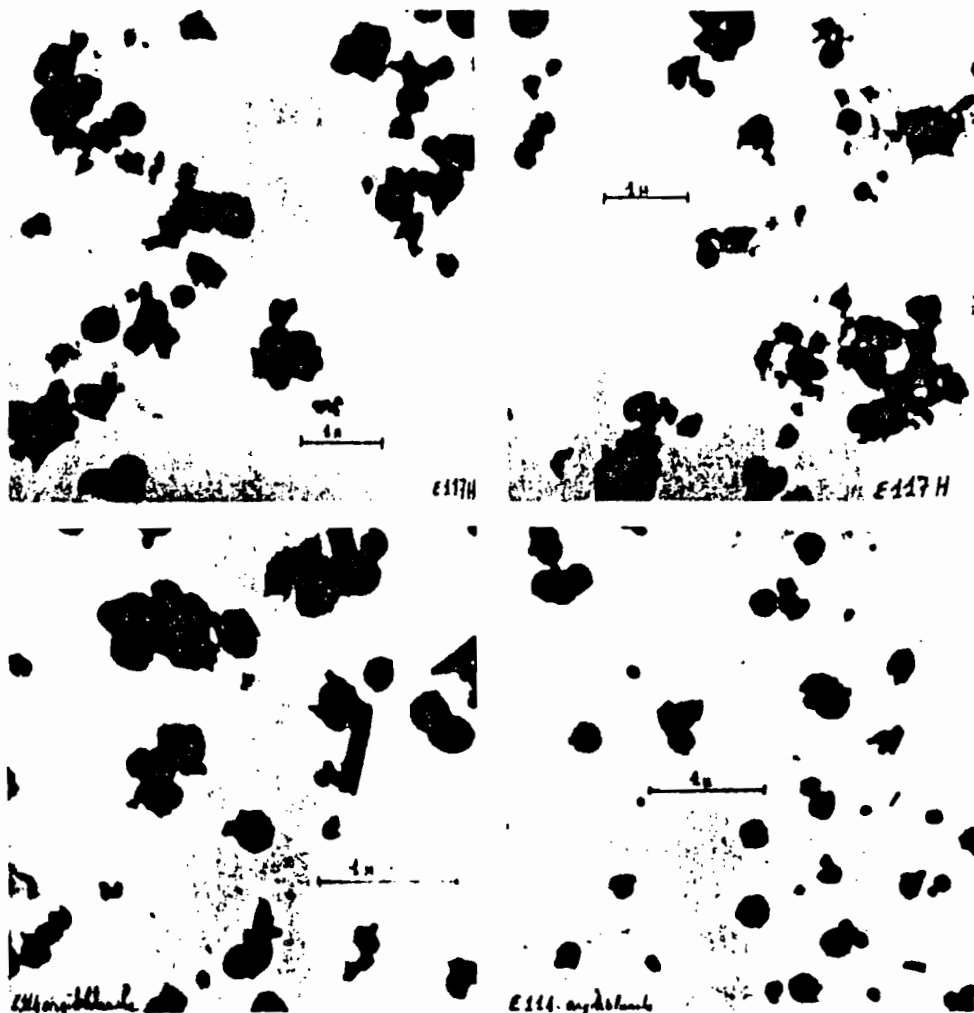
FIG. 8

3.4.2 - POCHEs D'ARGILE HALLOYSITE BLANCHE EN PROFONDEUR



Par places, en position basse, sous les sols allophaniques, dans des sites où le drainage interne est manifestement ralenti par les anciens sols argileux ferrallitiques sous-jacents, on a observé des poches d'argile blanche, un peu grasse, dont les raies très intenses à 10 \AA sur échantillon frais, passent à $7,23$ par séchage à 100° . Il s'agit donc d'hallowysite hydratée, mais l'aspect enroulé en tubes ne s'observe pas au microscope électronique (E 117h et E 114 - fig.9). L'analyse thermique différentielle montre un fort crochet endothermique à 140° suivi d'un crochet à 580° indiquant une argile bien cristallisée.

FIG. 9



3.4.3 - SOLS FERRALLITIQUES

Dans la même région, on trouve des sols ferrallitiques typiques à gibbsite et goethite. En se rapprochant du Rio Napo, vers 300 m d'altitude seulement, les sols deviennent plus rougeâtres et franchement argileux, quoique bien friables. La dispersion est aisée et les teneurs en argiles peuvent atteindre 40 à 60 %.

L'humidité du sol au champ, encore bien humide après des pluies, ne dépasse guère 50 %, ce qui distingue particulièrement bien ces sols des sols à allophanes voisins (250 %). Des débris de roches vertes basiques sont fréquents dès 1,5 m de profondeur et les sols en dérivent au moins partiellement.

Il semble que l'argile soit surtout constituée de gibbsite, d'un peu de goethite, et de substances amorphes, probablement des hydroxydes. La métahalloysite n'existe qu'en petite quantité (petite raie 7,2 Å) ; par contre, la raie à 4,34 Å est très intense. Une petite raie à 13,5 Å demeurant inchangée au glycérol, passe semble-t-il à 10 Å par chauffage à 500°. Il paraît encore difficile de préciser à quel minéral elle correspond.

Les teneurs en matière organique sont encore très importantes sous forêt : 9 % dans les 15 premiers cm. Les teneurs en phosphore total et en potassium échangeables sont très faibles, mais la somme des bases échangeables dépasse légèrement 2 mé p.100 g de sol. Il s'agit donc de sols ferrallitiques un peu moins pauvres que ceux de la plupart des régions de l'Amazonie (fig.22).

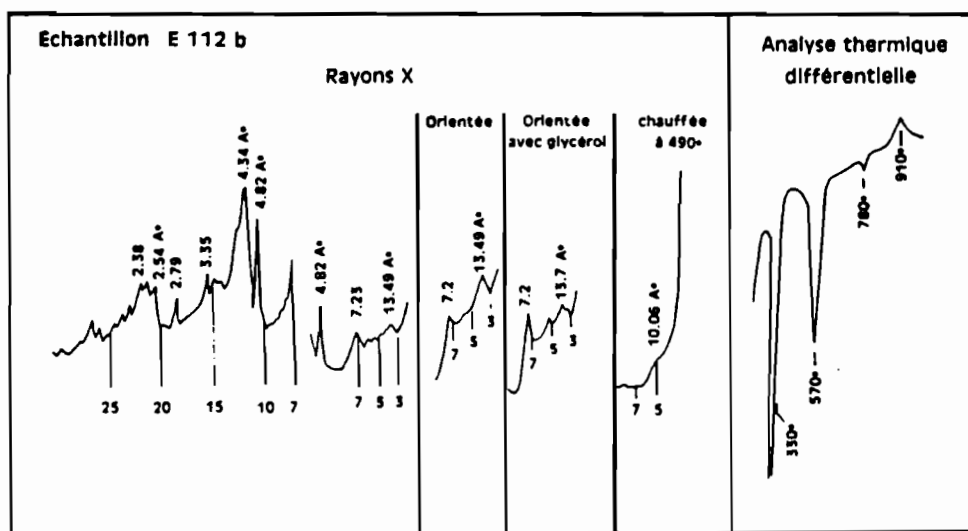


FIG. 10

4 - SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANIQUES RECOUVRANT DES SOLS FORTEMENT ALLOPHANIQUES

[Entic-hydrandepts Umbrandepts (C/N=10) Hydric-tropic-normandepts]	} recouvrant des Hydrandepts ou des oxyhydrandepts
--	--

(-Versant Pacifique - Zone Nord de Santo-Domingo à Quinindé-)

4.1 - Géomorphologie

Plus qu'une zone de piedmont, c'est une vaste pénéplaine qui s'étend depuis le départ des hauts versants très accidentés, jusqu'à la côte. Le relief est dans l'ensemble assez tourmenté, mais de nombreux plateaux d'étendue moyenne ou des collines aux pentes modérées, permettent une extension importante des cultures.

On distingue nettement deux dépôts de cendres, de composition analogue, à forte dominance de homblende verte (80 - 90 %), peu d'hypersthène et pas d'augite.

Le dépôt supérieur peu altéré, contenant encore peu de substances amorphes, est très épais en bordure des Andes et atteint plusieurs mètres entre Santo Domingo et la Cordillère. Il diminue progressivement d'épaisseur quand on se rapproche de la mer.

Le dépôt inférieur fortement allophanique apparaît de plus en plus près de la surface : des Andes vers la mer.

Au-delà de Quinindé, vers l'Océan, les projections de cendres disparaissent rapidement et les sols ferrallitiques, ou plutôt des ferrisols, sont issus de formations dures volcaniques anciennes.

4.2 - Climat

La pluviométrie est élevée près des Andes (3,2 m à Santo Domingo, à 700 m d'altitude), et assez bien répartie au cours de l'année, quoique la saison sèche soit nettement plus marquée que sur le versant amazonien. En se rapprochant de la côte, la pluviométrie décroît d'abord doucement jusqu'à Quinindé (100 km) puis, plus fortement jusqu'à Viche (à 150 km) où elle n'est plus annuellement que de 2 m. Sur la côte, à plus de 200 km de Santo Domingo, la pluviométrie ne dépasse pas 800 mm et toutes les bananeraies sont irriguées, sauf dans quelques vallées où une nappe existe en profondeur.

TABLEAU 2 - Variations de la pluviométrie depuis les Andes vers la mer

Zone bananière cendres volcaniques	Km	SANTO DOMINGO - 14 ans -												TOTAL
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	0	476	485	569	462	342	174	121	53	118	93	66	172	= 3130 mm
	100	QUININDE												2,5 à 3 m
Roches dures	150	VICHE												
		253	306	235	375	195	187	114	125	98	40	93	60	= 2036 mm
Sédimentaire bananeraies irriguées	250	ESMERALDAS sur la côte Pacifique												
		111	184	136	130	59	81	53	32	32	12	14	31	= 844 mm

La température est celle des régions tropicales chaudes, adoucie légèrement par l'altitude près de Santo Domingo (700 m) et de Juin à Novembre, par l'influence rafraîchissante légèrement sensible du courant froid de Humboldt.

4.3 - Végétation

Il y a peu d'années encore, toute cette région était à peine cultivée. Avec l'ouverture de nouvelles routes, la culture bananière a pris une large extension, mais reste encore localisée sur quelques kilomètres de largeur et parfois moins, le long des axes routiers. Partout ailleurs, c'est la grande forêt équatoriale, particulièrement riche en palmiers.

4.4 - Les Sols

Le plus souvent, on trouve deux ou trois sols superposés, correspondant à des dépôts de cendres relativement récents, recouvrant un sol fortement allophanique plus ancien.

La succession des horizons est alors la suivante :

- I - A 0 - 10 à 15 cm ; brun humifère - 10 YR 2/2 à 3/2 friable, grumeleux
 - B1C Sableux - encore bien humifère
 - B2C Vers 40-70 cm ; Horizon de diagnostic des sols faiblement allophaniques - finement limono-sableux (voir 1re partie)
 - B3C Avec des lentilles de cendres plus grossières inaltérées -
- II - Vers 70 à 100 cm
 - B1C Niveau humifère
 - B2C Avec parfois des lentilles de cendres peu altérées -
- III - Vers 120 à 180 cm
 - B1C 20 à 30 cm - Niveau humifère
 - B2C Horizon de diagnostic des sols fortement allophaniques pouvant atteindre plusieurs mètres - de coloration beige-jaune - 10 YR 5/8 à 6/8 (voir 1re partie)

Le dépôt III fortement allophanique contient généralement moins de sables de diamètre supérieur à 50 microns (15 à 20 %) que les dépôts supérieurs I et II (40 à 50 %).

Les teneurs en matière organique sont élevées en surface sous bananeraies non labourées : 7 à 9 % dans les 10 premiers cm et décroissent progressivement en profondeur, restant encore voisines de 3 % vers 1 m et 2 % vers 2 m de profondeur, dans l'horizon jaune fortement allophanique. Le rapport C/N voisin de 10 indique une matière organique bien humifiée. Il peut être plus élevé dans les horizons humifères enterrés.

L'humidité à pF 2,8 ne dépasse guère, mesurée sur échantillons conservés frais, 55 % dans les dépôts I et II, faiblement allophaniques. Elle dépasse 100 ou 150 % dans les dépôts profonds III, fortement allophaniques. L'eau "utile" définie par la différence pF 2,8 - pF 4,2, déterminée sur échantillon frais, posse ainsi de 15-20 % à 40-50 % de sol séché étuve. La densité apparente de l'ordre de 0,8 à 1 dans les dépôts I et II, s'abaisse à 0,4 ou 0,5 dans le dépôt III de profondeur.

Les teneurs en bases échangeables sont faibles, mais non négligeables. Elles sont toujours plus élevées en surface (3 à 6 mé), (bananeraies sur défriche de 2 à 6 ans) et augmentent assez régulièrement quand on s'éloigne des régions les plus humides (3,5 m de pluviométrie annuelle) vers les régions moins arrosées. Les teneurs en potassium échangeable, souvent négligeables dans les zones

très humides, deviennent alors nettement meilleures : 0,5 à 0,7 mé p.100. Les teneurs en phosphore total sont correctes en surface pour des sols non fertilisés, mais les teneurs en phosphore Truog sont faibles pour des sols encore jeunes et sans hydroxydes ; sensibles en surface, elles sont nulles plus en profondeur.

Tous ces résultats exprimés en p.100 g de terre séchée à l'air, devraient être rapportés au volume de sol. Légèrement inférieurs pour les horizons supérieurs, les chiffres devraient être divisés par 2 environ, en profondeur dans le dépôt III.

Bien que les teneurs en matière organique décroissent régulièrement en profondeur, la capacité totale d'échange sur échantillons séchés à l'air, augmente progressivement en profondeur et augmenterait encore beaucoup plus, déterminée sur échantillons frais (Ech. 63 e de profondeur : T sec = 27, T frais = 54). Bien que l'état de saturation en bases décroisse régulièrement en profondeur, le pH varie en sens inverse, passant de 5,5 à 6,2 - 6,5.

Qu'il s'agisse de la surface ou de la profondeur, la porosité pour l'air (avec pF 2,8) serait de l'ordre de 25 à 30 %.

4.5 - Aptitudes

On peut donc, en résumé, dire qu'il s'agit d'excellents sols, légers, aisés à travailler, perméables et cependant avec une bonne capacité pour l'eau en surface et surtout en profondeur, dans des niveaux profonds mais pénétrables par les racines. Une fertilisation phospho-potassique semble utile après quelques années de cultures sur défriches de forêt.

5 - SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANIQUES

[Entic-hydrandepts - ou - Umbrandepts (C/N=10) - ou - [hydric-tropic-normandepts]
[hydric-tropic-eutrandepts]

(-Versant Pacifique - zone centrale de Quevedo à Santo-Domingo-)

5.1 - Géomorphologie

C'est une vaste pénéplaine de 100 à 600 m d'altitude, coupée par les rivières qui descendent du Nord au Sud, vers le Golfe de Guayaquil. Le relief est assez fortement moutonné ou doucement vallonné. Plusieurs dépôts aériens, relativement récents et encore peu allophanisés, forment un ensemble très épais, surtout en bordure des Andes. Les dépôts plus anciens, fortement allophanisés, ne s'observent, en général, qu'à plus de 2,5 m de profondeur. Vers Quevedo, au Sud et à l'Ouest, ces dépôts s'amincissent progressivement.

Ces dépôts successifs peuvent avoir une composition différente. Des dépôts à dominance de hornblende verte et pauvres en hypersthène ont recouvert, dans la partie centrale, d'autres formations, dans lesquelles la proportion d'hypersthène est plus importante. Plus au Sud, le dépôt riche en hypersthène, n'a pas été recouvert.

Au Nord, vers Santo Domingo, on ne trouve plus que les dépôts riches en hornblende.

5.2 - Climat

La pluviométrie annuelle augmente sensiblement du Sud au Nord, passant de 2,5 m environ à Quevedo, avec 5 à 7 mois presque secs, à 3 m à Santo Domingo, avec moins de trois mois secs.

Elle augmente également quand on va d'Ouest en Est, et les précipitations sont plus fréquentes aux abords de la Cordillère.

TABLEAU 3 - Variations des précipitations annuelles du Sud vers le Nord

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PICHILINGUE (10 ans) : (Quevedo)	560	463	422	396	115	33	54	4	4	18	23	121	= 2224 mm
STO. DOMINGO (14 ans)	476	485	569	462	342	174	121	53	118	93	66	172	= 3131 mm = 264 jours

La température, de Juin à Novembre, est tempérée par l'influence du courant froid de Humboldt. Durant cette période "sèche", l'enneigement est constant, et l'ensoleillement très réduit et tardif dans la journée. Des brouillards matinaux apportent une humidité substantielle et souvent une fine brume.

La durée de l'ensoleillement annuel près de Quevedo, ne dépasse guère 800 heures, contre 1500 à Amboto dans la Sierra (2800 aux Antilles dans les plaines).

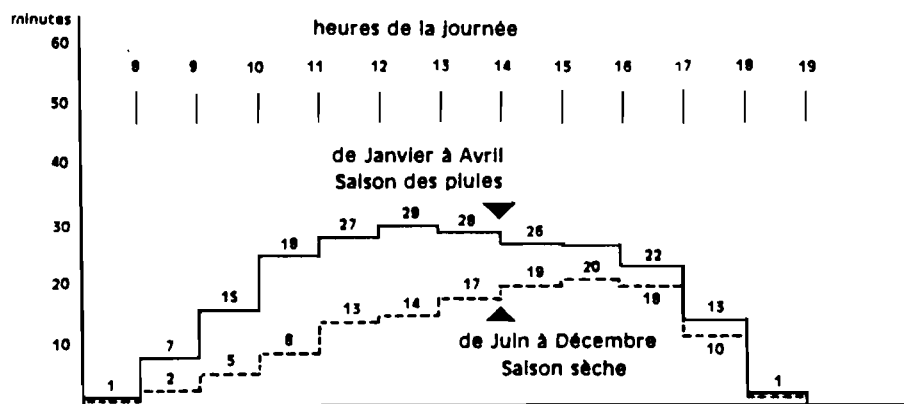


FIG. 11 Durée d'ensoleillement à Pichilingue (Quevedo) en minutes par heure

5.3 - Végétation

A l'origine, c'était la grande forêt équatoriale. De vastes zones ont été défrichées depuis 10 ans, surtout autour de Quevedo, et de part et d'autre de la route Quevedo-Santo Domingo, où le bananier a pris une large extension.

5.4 - Les Sols

On distinguera plusieurs régions :

5.4.1 - LES SOLS RELATIVEMENT LESSIVÉS EN BASES DES PARTIES NORD ET EST PRÈS DES ANDES (Régions de fortes pluviométrie)

[entic-hydrandepts ou hydric-tropic-normandepts ou Umbrandepts (C/N = 10)]

C'est la région de Santo Domingo, jusqu'à mi-distance au Sud, vers Quevedo et toute la zone voisine des Andes, jusqu'à la Mana, à la latitude de Quevedo. Il s'agit donc d'une région très humide, avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 3 m et une saison sèche modérée.

Les sols sont constitués de plusieurs dépôts successifs. Certains niveaux sont encore très peu altérés, mais d'autres niveaux, plus fins à l'origine, sont davantage allophanisés. L'un de ceux-ci se retrouve très fréquemment vers 50 - 80 cm de profondeur ; l'humidité au champ et les pF sur échantillons frais y sont nettement plus élevés (horizon de diagnostic de sols faiblement allophaniques).

Les horizons fortement allophanisés enfouis, s'observent rarement dans les tranchées de 2,5 m de profondeur, surtout quand on se rapproche de la Cordillère. On les remarque dans certains talus de route et, parfois aussi, dans des sites où le décapage de niveaux supérieurs permet leur apparition, à moins grande profondeur.

Les teneurs en matière organique sont élevées, de l'ordre de 7 % dans les 15 à 20 premiers cm. Elles décroissent en profondeur, mais peuvent se relever brusquement dans certains horizons humifères enterrés, vers 1 m, pour atteindre des valeurs parfois voisines de celles de la surface du sol. C'est une preuve supplémentaire de la jeunesse de ces dépôts. C'est généralement dans ce niveau enterré humifère, ou juste au-dessus, que l'on rencontre des débris de poteries... Le rapport C/N est voisin de 10 sur l'ensemble du profil et varie peu.

L'humidité au champ (au à pF 2,8 mesurée sur échantillons frais), est variable, bien entendu, suivant les niveaux et peut atteindre 70 % dans certains niveaux plus allophanisés des dépôts supérieurs, avec une eau "utile" (pF 2,8 - pF 4,2) de 20 à 30 %. Les déterminations faites sur échantillons conservés frais, sont nettement supérieures, souvent deux fois plus élevées que celles faites sur échantillons préalablement séchés à l'air. En profondeur, des humidités de 100 % ou davantage, sont rencontrées dans les horizons fortement allophaniques, très semblables à ceux du versant amazonien ou à ceux de profondeur de Santo Domingo - Quinindé.

Les teneurs en bases échangeables varient en fonction de l'intensité de l'altération et des teneurs en matière organique des horizons. Elles sont plus élevées en surface, puis décroissent pour reprendre des valeurs similaires en profondeur : 4 à 7 mé pour 100 g de sol. Les teneurs en potassium échangeable sont généralement très faibles. Par contre, les teneurs en phosphore total sont très correctes (150 à 200 mg p. 100), ainsi que celles en phosphore Truog (2 à 7 mg P₂O₅ p. 100) pour des sols qui ne reçoivent pas d'engrais. En l'absence d'hydroxydes, le P est peu fixé, mais on est souvent loin des 10 à 20 mgr de P₂O₅ Truog p. 100 que l'on rencontre aux Antilles, dans les bananeraies fertilisées, situées sur des sols similaires.

Voisins de 5,1 à 5,4 en surface, les pH augmentent régulièrement jusqu'à 6,0 à 6,2 en profondeur, bien que l'état de saturation en bases décroisse souvent, et ne dépasse que très rarement 30 ou 40 %. La capacité d'échange mesurée sur échantillon sec, n'est pas très élevée : 20 à 25 mé p. 100 et augmente en profondeur, passant à 30 ou 40 mé dans les horizons plus fortement allophaniques.

Aptitudes - Il s'agit de bons sols dans lesquels des fumures minérales potassiques sont à prévoir, après quelques années de défrichement. La rétention de l'eau est élevée pour des sols aussi perméables et aérés, et les racines peuvent descendre très en profondeur.

5.4.2 - LES SOLS PEU ACIDES ET PEU LESSIVÉS EN BASES DE LA PARTIE CENTRALE ENTRE QUEVEDO ET SANTO DOMINGO

[entic-hydrandepts ou hydric-tropic-eutrandepts ou Mollic-umbrandepts]

C'est la région située au Nord et au Nord-Est de Quevedo jusqu'au km 40 ou 50. La pluviométrie est un peu plus faible que dans la région précédente et la région plus ensoleillée.

Les sols ressemblent fortement aux précédents, mais ils sont nettement mieux saturés en bases, par suite d'un lessivage moins intense. Les teneurs en potasse échangeable et en phosphore Truog sont plus élevées, et les pH supérieurs à 6,0 dès la surface. Le degré d'allophanisation semble un peu moins poussé, surtout quand on se rapproche de Quevedo ou lorsqu'on va, au Nord de cette ville, d'Est en Ouest, vers les zones plus sèches de la côte.

L'eau "utile" (pF 2,8 - pF 4,2) est encore très satisfaisante, de l'ordre de 20 %, exprimée en poids de terre séchée à l'air. Elle est plus faible mesurée sur échantillons conservés frais que dans les sols situés plus au Nord et à l'Est, et plus forte, mesurée sur échantillons préalablement séchés à l'air. Cette eau "utile" est sensiblement la même, que les déterminations soient faites sur échantillons secs ou frais, bien que les valeurs de l'humidité pour un même pF soient différentes.

Au Nord-Ouest de Quevedo, on commence à voir apparaître en profondeur, vers 1,5 à 2 m, un sol enterré à argile brune à halloysite.

Aptitudes - Ce sont d'excellents sols à bananiers, dans lesquels la fumure phospho-potassique n'est probablement pas encore utile. Le profil est pénétrable par les racines sur une grande profondeur et le bananier y trouve d'importantes réserves en eau.

6 - SOLS DE TRANSITION A ALLOPHANES-HALLOYSITE sur sol argileux

brun rouille à halloysite.

[Sols bruns eutrophes tropicaux peu évolués sur sols bruns ou bruns ferrisoliques]

[Mollic-umbrandepts
Tropic-eutrandepts] sur Rhodochrults ?]

- Versant Pacifique - Région Sud et Ouest de Quevedo -

6.1 - Géomorphologie

Le relief est adouci, formé de plateaux doucement ondulés, entaillés par les rivières.

Les dépôts de cendres s'amincissent et disparaissent plus au Sud et à l'Ouest de Quevedo, peu au-delà d'Empalme. Dans toute cette région, un ancien sol argileux brun-rouille apparaît à une profondeur variant de 0,8 à 1,5 m. Des poteries sont très souvent rencontrées, juste au-dessus de ce niveau argileux. Par suite du décapage par l'érosion des dépôts de cendres récents, ce sol argileux affleure, en général, sur les pentes, en bordure des ravins.

Le dépôt à dominance de homblende verte, encore visible au Nord de Quevedo, disparaît et le dépôt à hypersthène-homblende recouvre toute la partie Sud et Ouest. Plus en profondeur, juste au-dessus du niveau argileux, on remarque un autre dépôt peu épais, riche en homblende, plus ancien.

6.2 - Climat

C'est une région plus sèche, où la pluviométrie annuelle ne dépasse guère 2 m à 2,5 m, avec 5 à 7 mois de sécheresse accentuée. L'ensoleillement est un peu meilleur, quoique encore faible (Pichilingue : 800 heures), et les bruines matinales, encore importantes, durent une partie de la saison sèche.

6.3 - Les Sols

Avec une nette gradation, des régions les plus humides vers les régions les plus sèches, du Nord au Sud et de l'Ouest en Est, les sols de transition à allophanes - halloysite se présentent sous des faciès légèrement différents. La tendance allophanique s'accroît vers les régions plus humides (horizons moins foncés, toucher plus onctueux, etc.), la tendance à halloysite vers les régions plus sèches (sols uniformément foncés, plus friables, à tendance particulière ou limono-argileuse).

A un horizon de 15-40 cm d'épaisseur, bien humifère, à structure finement grumeleuse, véritable terreau de châssis, succède un niveau finement sableux, de coloration foncée très voisine (10 YR 3/2).

Plus en profondeur, vers 80 ou 120 cm, on observe généralement un niveau de cendres plus grossier, peu altéré, de quelques centimètres d'épaisseur.

Ce premier sol correspondant à un dépôt relativement récent, recouvre, vers 1 m de profondeur, sans transition, brutalement, et en épousant toutes les ondulations du terrain, un ancien sol uniformément brun-rouille foncé, argileux, un peu gras, quoique non adhérent (halloysite). Dans les 30 premiers centimètres, ce sol enterré est très poreux (macropores de 1 à 2 mm ou davantage), puis il devient plus compact avec des faces très luisantes et quelques revêtements bruns foncés, manganiques ou autres. Quelques pisolithes ferro-manganiques peuvent être observés. Quoique, même humide, le sol soit difficilement pénétrable à l'outil, les mottes s'effritent assez bien. Sec, ce sol enterré est très dur.

Les teneurs en matière organique sont importantes : 6 à 9 % dans les 15 à 20 premiers centimètres, et souvent encore, 3 à 4 % vers 40 cm de profondeur, mais faibles dans le sol argileux enterré (inférieur à 1 %). Le C/N voisin de 10 indique une matière organique bien humifiée.

Les teneurs en bases échangeables sont importantes en surface : 12 à 15 mé pour 100 g, avec surtout du calcium et encore 6 à 8 mé en profondeur. La capacité totale d'échange paraît liée surtout à la matière organique et décroît en profondeur. Les pH sont rarement inférieurs à 6,5, et peuvent atteindre 7, bien que l'état de saturation en bases ne dépasse guère 60 %. Les teneurs en potassium échangeable sont généralement bonnes, souvent très élevées : 1,5 à 3 mé %. Les teneurs en phosphore total sont excellentes (300 à 400 mg P₂O₅ pour 100 g).

Les humidités aux pF 2,8 et 4,2, déterminées sur échantillons frais ou secs, sont les mêmes, et l'eau "utile" (pF 2,8 - pF 4,2) est importante pour des sols aussi légers : 20 % environ. La faible profondeur fréquente du sol (1 m) au-dessus du niveau argileux, peu pénétré par les racines, limite cependant, la valeur de l'eau utilisable pour l'ensemble du profil.

6.4 - Aptitudes

Ce sont d'excellents sols, remarquables par leur structure légère, faciles à travailler, aisément explorés par les racines et très riches chimiquement en potasse et phosphore. L'épaisseur, souvent limitée à 1 m, du sol léger bien exploré par les racines, rend, dans les régions périphériques où la saison sèche est plus marquée, les irrigations par aspersion indispensables durant plusieurs mois de l'année.

7 - SOLS BRUN - ROUILLE A HALLOYSITE

Intergrades entre bruns eutrophes et ferrisols - ou - sols bruns ferrisoliques - sols à évolution ferrallitique peu poussée.

(Rhodochrults ? - Rubrozemic latosols. E. FREI)

(- Régions au sud de Quevedo ou-delà des limites des dépôts de cendres récentes -)

7.1 - Géomorphologie

Le relief est constitué de collines aux pentes souvent accidentées. La roche mère paraît être constituée par des projections anciennes très altérées qui ont recouvert des brèches et des coulées andésitiques.

7.2 - Climat

La pluviométrie est voisine de 1,5 à 2 m par an, avec 4 à 7 mois de sécheresse au Sud de Quevedo. Elle augmente quand on se rapproche des Andes.

7.3 - Végétation

C'est encore souvent une forêt dense dans laquelle de nombreux défrichements ont jadis été effectués pour le bananier. Après quelques années de cultures, la plupart des plantations semblent avoir été abandonnées.

7.4 - Les Sols

Ce sont des sols argileux à halloysite hydratée et un peu de goethite, brun-rouille, identiques à ceux que l'on trouve aux Antilles.

En surface, sur 20 à 30 cm, le sol est argileux, mais très bien structuré, finement grumeleux, très foncé, bien que la teneur en matière organique ne dépasse guère 2 %.

L'analyse granulométrique de l'horizon A est identique à celle des niveaux supérieurs des sols argileux enterrés, situés dans les régions plus au Nord, ce qui confirme bien l'identité de ces formations.

Plus en profondeur, et jusqu'à plus de 1 m, la couleur demeure encore très foncée. Les faces des unités structurales sont très luisantes avec souvent des revêtements manganiques. Cet horizon est compact à l'outil, un peu gras (halloysite), mais les mottes s'effritent assez bien à l'état frais, en petits agrégats anguleux, ayant parfois une tendance vers le pseudo-sable. Sec, le sol est dur, mais peu fissuré.

La teneur en argile dans l'horizon B1 peut atteindre, dans les profils plus évolués, 80 %, avec un rapport limon/argile inférieur à 10.

La teneur en bases échangeables est relativement importante et semble peu varier dans le profil. Le pH est voisin de 5,5. Bien que les teneurs en sables soient faibles, la composition est identique à celle des dépôts à dominance de hornblende.

7.5 - Aptitudes

Ce sont de bonnes terres, mais de qualité bien inférieure aux sols légers qui les recouvrent plus au Nord. L'enracinement est moins profond et les réserves en eau trop faibles pour permettre, avec plusieurs mois de sécheresse, la culture du bananier. Une fertilisation phospho-potassique paraît nécessaire.

8 - SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANIQUES recouvrant des sols FORTEMENT ALLOPHANIQUES

Entic-hydrandepts)
Umbrandepts (C/N = 10)) sur des hydrandepts
Hydric tropic normandepts)

(- Versant Pacifique des Andes à 2800 m d'altitude - Pilalo -)

8.1 - Géomorphologie

Le versant des Andes est extrêmement occidenté, s'élevant très rapidement au-dessus de la plaine, jusqu'à plus de 4000 mètres. Des dépôts de cendres et de pances, lorsque les pentes ne sont pas trop fortes, recouvrent les formations rocheuses plus anciennes.

8.2 - Climat

C'est une région très humide, noyée une bonne partie de l'année dans le brouillard des nuages qui s'élèvent le long des parois de la montagne. La pluviométrie semble élevée, voisine de 2 m. La température est très constante au cours de l'année, avec une moyenne mensuelle de 12° (moyenne mensuelle maximum 17°, minimum 8°).

8.3 - Végétation

La forêt est relativement peu élevée, avec une abondante végétation hygrophile, coupée de quelques rares pâturages.

8.4 - Les Sols

Le profil est analogue à ceux de la plaine tropicale de Quevedo à Santo Domingo, situés près de la Cordillère.

On observe deux dépôts superposés, de plus de 2 m d'épaisseur. Le premier à dominance de homblende, le deuxième plus riche en hypersthène, avec une alternance de niveaux grossiers peu altérés et de niveaux déjà très nettement faiblement allophaniques.

Les teneurs en matière organique sont très semblables, ainsi que les autres propriétés, à celles des sols faiblement allophaniques des régions tropicales humides.

Plus en profondeur, dans les talus de route, on observe très bien un horizon jaune, tout à fait identique, par son aspect et ses propriétés, à l'horizon de diagnostic des sols fortement allophaniques très hydratés des régions tropicales d'Equateur et des Antilles. L'humidité à pF 2,8 dépasse 150 %,

mesurée sur échantillon frais ; l'eau "utile" (pF 2,8 - pF 4,2) atteint 45 % ; la capacité d'échange est élevée : 45 mé sur échantillon sec. Cet horizon renferme nettement moins de sables supérieurs à 50 microns (12 %) que les dépôts plus récents (30 à 40 %) qui le recouvrent.

L'évolution des sols sur cendres est donc la même dans les régions tropicales chaudes ou tempérées froides. L'excès d'eau et la perméabilité restent les deux principaux facteurs d'évolution.

Des minéraux fortement allophaniques enfouis (à plus de 100 % d'eau) ont encore été observés à plus de 3200 m d'altitude.

9 - QUELQUES SOLS DES HAUTES ALTITUDES

Peu de profils ont été analysés et il n'est donc pas encore possible de généraliser ces résultats.

9.1 - (Cryandepts - et -ou- Thapto-tropic-normandeps) Rankers d'altitudes

(- Paramon vers 3500 m d'altitude -)

Dans les hautes régions des Andes, vers 3500 à 4000 m d'altitude, de larges croupes ondulées portent des pâturages aux herbes rases, constamment jaunies par les gelées nocturnes et les vents très violents de la journée. La température moyenne ne dépasse guère 10°. La pluviométrie annuelle serait de l'ordre de 0,5 à 1 m et régulièrement distribuée. Sur ces croupes, des dépôts de cendres et de ponces de 1 à plusieurs mètres d'épaisseur, recouvrent des formations rocheuses dures. Qu'il s'agisse de la région de Pilalo à Pujili (Quevedo Latacunga), ou des pentes du Cotopaxi, près de Quito, ce sont des cendres à hypersthène et augite, avec peu de hornblende, de texture nettement plus grossière que dans les plaines tropicales.

Les 3 à 5 premiers centimètres du sol, sont surtout constitués d'un feutrage noir, très dense et très serré, de racines enchevêtrées. Plus en profondeur, le sol est fortement humifère, avec très peu d'argile, une texture grossière, sableuse, de moins en moins liée à la matière organique et plus particulaire. Très souvent, on observe un deuxième niveau enterré, plus épais (1 m parfois) et beaucoup plus noir que le premier : noir anthracite, luisant, à reflets bleutés. S'agit-il, comme le pense E. FREI (1957), d'une migration d'humus dispersé ou plus simplement du recouvrement d'un ancien sol, par un dépôt plus récent superficiel ? De tels horizons foncés - "spodiques" - existent aussi dans la vallée interandine et aux Antilles, dans des sols modérément acides.

Les teneurs en matière organique, après élimination des cinq premiers centimètres superficiels de chevelu radicaire sont importantes : 5 à 8 % de 5 à 25 cm de profondeur, avec des rapports C/N de 13 à 20. Les sols sont relativement bien saturés en bases : 50 %, et les pH modérément acides : 5,5. Le phosphore semble peu fixé et les teneurs en phosphore Truog correctes.

9.2 - Sols de la vallée interandine

Ces sols seront étudiés plus en détail dans un prochain article. Pour l'instant, deux profils sur cendres ont été retenus dans la haute vallée, vers 2800 m d'altitude, entre les deux cordillères : l'un à l'Ouest, l'autre à l'Est de Latacunga, dans des régions de cultures : blé, pommes de terre, luzerne.

La température moyenne mensuelle est très uniforme, proche de 13° toute l'année, avec des maxima moyens de 20° et des minima de 8°. La pluviométrie n'est pas très élevée, de l'ordre de 500 à 600 mm par an, mais assez bien répartie toute l'année.

BRUNIZEMS OU THAPTO TROPIC EUTRANDEPTS

Dans un profil situé en zone irrigable, l'horizon labouré de 25 cm, bien noir à l'état humide, mais beige très clair lorsqu'il est sec, sablo-limoneux, rendu finement gruméleux par la matière organique, recouvre un autre horizon de texture semblable, mais beaucoup plus noir, luisant, avec de petits agrégats anguleux, un peu durcis et de nombreux revêtements très foncés. Un tuf volcanique, brunâtre, assez dur, est visible vers 70 cm (Cangagua).

La fraction inférieure à 2 microns semble surtout formée de substances amorphes dispersables, dont la composition reste à préciser. On remarque la petite raie à 4,04 Å de la cristobalite, et un fond important vers 12-14 Å présentant un léger gonflement à 17 Å au glycérol (E 118a).

ANDEPTIC - HAPLUDENTS - USTROPEPTS

L'autre profil, situé dans une région très sèche, ne présente pas cet horizon profond plus noir. Il est plus épais et probablement remanié par les vents, comme en témoignent les petites dunes de bordure des champs. Il y aurait de la montmorillonite.

Les propriétés de ces sols sont analogues : 11 à 17 % d'argile, 22 à 33 % de limon fin et 20 % de limon grossier. Les pH sont un peu supérieurs à 6, pour un taux de saturation en bases de 60 %. Les teneurs en phosphore Truog sont importantes et représentent 12 et 20 % du phosphore total. Le C/N ne dépasserait pas 8 à 10 (E 94).

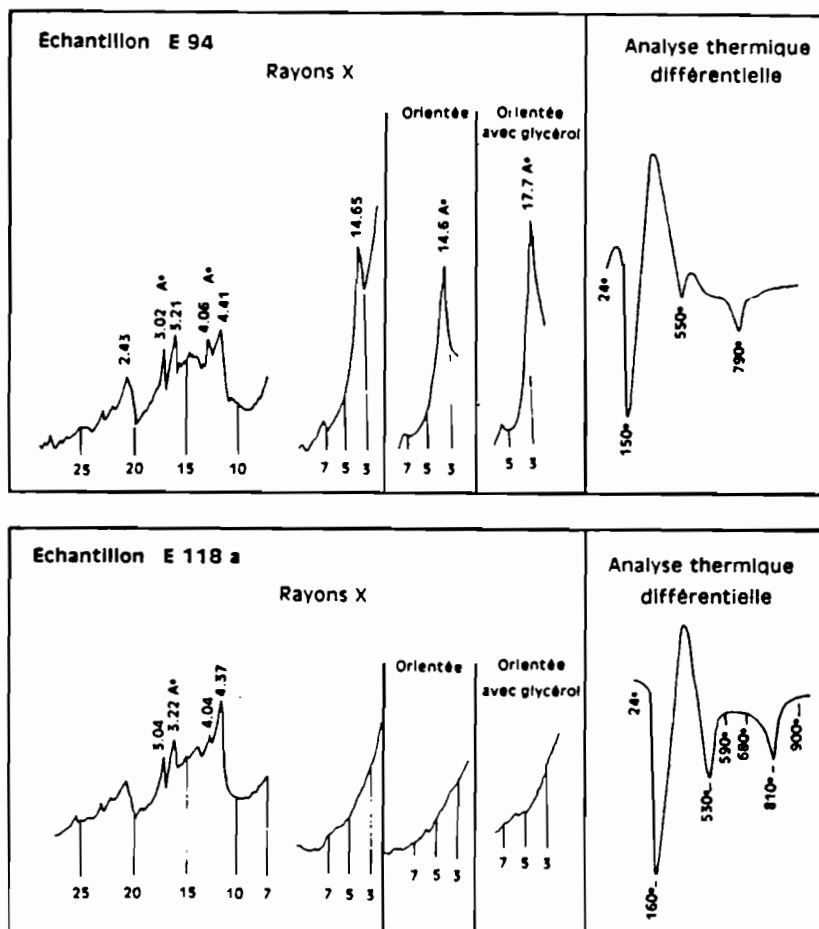


FIG. 12

10 - DISCUSSION

10.1 - Conditions de formation

Après avoir replacé les sols dans leurs conditions naturelles de formation, est-il maintenant possible de dégager les facteurs qui semblent présider à leur évolution ?

On examinera successivement l'influence de la nature et de l'âge du dépôt, de sa durée d'altération, puis de la pluviométrie, de la température et du drainage interne.

10.1.1 - INFLUENCE DE LA NATURE ET DE L'ÂGE DES FORMATIONS MÈRES

On a vu qu'il s'agissait de cendres dacitiques renfermant une proportion variable d'hypersthène, augite et hornblende verte.

Cette composition actuelle du dépôt, quantité de sables et proportions des minéraux, correspond-elle à son état original ou résulte-t-elle de modifications intervenues au cours des temps par une altération sélective des minéraux, entraînant la diminution plus rapide de certains d'entre eux et l'augmentation relative des autres ?

Dans une telle hypothèse, il serait donc possible de savoir, par le degré d'altération des sables, si les dépôts de compositions différentes, souvent superposés, proviennent d'éruptions très éloignées dans le temps.

10.1.1.1 - Teneur en sables supérieurs à 50 microns

L'analyse granulométrique des fractions supérieures à 50 microns après lavage des sables par des solutions acides et alcalines peu diluées, montre que les niveaux encore relativement peu évolués sont nettement plus riches en sables (30 à 40 % entre 50 et 200 microns) que les niveaux plus évolués, fortement allophaniques ou déjà argileux (8 à 10 % de sables entre 50 et 200 microns).

Bien que cette observation soit très nette et constante, la grande hétérogénéité des niveaux successifs, même dans un dépôt provenant du même cycle d'éruption, nécessiterait l'exécution systématique des déterminations pour tous les niveaux d'un même profil, au lieu des 6 ou 7 au maximum qui ont été retenues.

Si pour les sols argileux à halloysite, l'ancienneté par rapport aux sols de transition à halloysite encore peu évolués, ne fait pas de doute et explique la diminution des sables, le problème n'est pas aussi évident, bien que la conclusion soit vraisemblablement la même, pour les sols fortement et faiblement allophaniques. Les formations plus fines s'altèrent plus vite et une différence de granulométrie au départ, permettrait d'expliquer l'allophanisation plus poussée de certains horizons ou sols.

Aux Antilles, cependant, où les différences de granulométrie sont analogues à celles constatées en Equateur, on remarque, en général, une proportion plus importante de minéraux opaques parmi les minéraux lourds dans les sols fortement allophaniques par rapport aux sols faiblement allophaniques, ce qui peut laisser entendre qu'il s'agit de formations plus anciennes.

Il est difficile de conclure, mais il est certain que les variations de la granulométrie des sables ne semblent pouvoir influencer ou refléter que l'intensité de l'évolution, mais non le sens d'évolution (allophanes ou halloysites). Aux Antilles, on peut observer des sols fortement allophaniques dans des matériaux très grossiers (ponces).

10.1.1.2 - Altération sélective des minéraux

On n'envisagera pas ici les feldspaths plagioclases, assez rapidement détruits et transformés en produits argileux, amorphes ou substances dissoutes entraînées.

Existe-t-il une relation entre l'altération de l'hypersthène et de la hornblende verte ?

D'après les suites réactionnelles de BOWEN et GOLDISCH (BOWEN, 1928), les minéraux les derniers formés par différenciation magmatique sont les plus stables vis-à-vis des agents de l'altération météorique, tandis que les minéraux primaires, hâtivement cristallisés, sont les premiers atteints. L'hypersthène, minéral formé à haute température et cristallisant, de ce fait, avant la hornblende, serait donc moins stable que cette dernière.

L'altération d'un pyroxène se manifeste par la capture de molécules d'eau ; les chaînes simples se soudent deux par deux, avec fixation de OH. Le minéral passe alors à un stade hydroxylé et acquiert ainsi une structure d'amphibole. On connaît des exemples, dans des roches, de transformation de diopside (pyroxène monoclinique) en hornblende (amphibole monoclinique). Mais l'hypersthène est orthorhombique ; peut-il se transformer en hornblende monoclinique ? On n'observe pas ; d'autre part, dans les minéraux lourds, de termes de passage entre hypersthène et hornblende.

Si l'on considère, d'autre part, la façon dont l'altération progresse dans un minéral, on observe les faits suivants :

- dans un édifice cristallin, les premiers polyèdres dissous sont ceux de 8 à 12 sommets, centrés sur les cations Ca, Na et K ; puis les octaèdres occupés par les ions Al, Fe, Mg et, enfin, les très petits tétraèdres centrés sur Si et Al.

Les deux minéraux principaux en présence ont pour formules :

- Hornblende verte : $(\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}) \text{Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mg})_4 \text{Al} (\text{OH})_2 \text{Na}$
- Hypersthène : $(\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{Mg}, \text{Fe})_2$

Il faudrait donc tenir compte, dans l'altération de ces cendres, de deux phénomènes concomitants :

- La transformation de l'hypersthène en un minéral à structure d'amphibole (ce n'est qu'une hypothèse).
- L'hydrolyse rapide de la hornblende avec élimination des cations Ca et Na.

Les conditions climatiques, la pluviométrie importante et le drainage (tufs et cendres perméables) sont tels que l'hydrolyse des minéraux doit être rapide. En conséquence, la hornblende doit être très vite détruite par élimination des cations (Ca, Na).

Dans le cas où la seconde hypothèse serait retenue, il serait possible de dire qu'une partie de la hornblende a disparu par altération dans les horizons profonds, entraînant une augmentation relative du taux d'hypersthène. Ce serait l'inverse dans le premier cas.

Le problème apparaît encore assez complexe et nécessiterait des études plus poussées. Il est, en définitive, difficile de parler d'une altération préférentielle de l'un de ces minéraux. Bien que la dégradation de la hornblende paraisse devoir être plus aisée, ce fait ne paraît pas suffisamment établi pour qu'il soit possible, dans le cas étudié ici, d'en tenir compte pour différencier l'âge des formations.

10.1.1.3 - Relations entre les proportions actuelles des minéraux lourds et les types de sols

La composition minéralogique du dépôt ne semble pas, dans l'état actuel, être en relation avec l'intensité ou le sens d'évolution des sols.

Les sols fortement allophaniques du versant amazonien, avec ou sans gibbsite sont issus de formations à dominance d'hypersthène et d'augite. Ceux du versant Pacifique, proviennent, par contre, de formations à dominance de hornblende verte sans augite. L'évolution des sols est dans les deux cas identique. La loi de BOWEN serait applicable dans le premier cas, mais pas dans le second.

On peut remarquer qu'aux Antilles il existe des sols à allophanes tout à fait semblables à ceux d'Equateur, sur des formations beaucoup plus riches encore en hypersthène, qu'il y ait ou non présence de gibbsite. La gibbsite semble surtout se rencontrer dans les formations plus anciennes et plus évoluées. Des observations analogues n'ont pu être faites en Equateur.

L'étude des sols de transition allophane-halloysite a surtout concerné la région Sud (Quevedo) où les dépôts sont relativement plus riches en hypersthène que ceux dont sont issus les sols à allophanes situés plus au Nord.

En Martinique, les sols évoluant vers l'halloysite se rencontrent, au contraire, souvent sur des dépôts plus riches en hornblende que ceux qui évoluent vers les allophanes.

10.1.1.4 - Degré d'altération en climats différents

La détermination des formations d'après le degré d'altération des minéraux, se complique encore lorsqu'il s'agit de dépôts placés sous des conditions climatiques fort différentes, pouvant influencer les processus et la rapidité de l'altération. En région modérément arrosée, l'altération progresse moins vite que dans les régions très humides. Théoriquement, sur des formations de même âge, les sols de transition vers l'halloysite devraient avoir des sables moins altérés que les sols à allophanes situés en climat plus humide. C'est ce qui semble pouvoir être observé tant en Equateur qu'aux Antilles, où les sols de transition renferment, en général, peu ou pas de minéraux opaques.

Dans les formations de cendres grossières, particulières, très humifères des pentes du volcan Cotopaxi, à 50 km au Sud de Quito, vers 4000 m d'altitude, en climat froid (température moyenne mensuelle constante et inférieure à 10°), les feldspaths sont nettement plus corrodés, arrondis et la proportion d'opaque plus importante que dans la plaine Pacifique tropicale. Ils semblent plus altérés. Les dépôts de cendres des pentes du Cotopaxi seraient, contrairement aux apparences, plus anciens que ceux des versants pacifique et amazonien.

10.1.1.5 - Sites archéologiques

Un élément très favorable à la détermination de l'âge des formations et de leur mise en place respective est la présence, dans certains niveaux enfouis sous des dépôts issus de nouvelles éruptions, de vestiges de l'industrie humaine primitive : poteries, raclours de silice, etc.

Il est remarquable de constater que, dans près de la moitié des tranchées ouvertes dans la région de Quevedo - Santo-Domingo, dans des positions topographiques très variées et à plusieurs dizaines de kilomètres de distance, de tels vestiges ont été trouvés. Cette fréquence indiquerait une occupation très intense du sol avant ces cataclysmes.

Dans cette plaine, on observe souvent, vers 1 à 2 m de profondeur, des débris de poteries à la limite des deux formations à hornblende et à hypersthène, juste au-dessus de l'horizon humifère enterré. Le dépôt à hornblende n'aurait donc pas plus de quelques millénaires, en admettant qu'il s'agisse effectivement de vestiges enfouis naturellement sous les cendres, ce qui paraît probable, et non de vestiges funéraires.

Au Sud de Quevedo, près de la limite extrême des dépôts de cendres récentes, on retrouve encore ces poteries (et dans un profil en quantité considérable), juste au-dessus des sols argileux brun-rouille à halloysite, sous les sols de transition allophane-halloysite. Ce dépôt supérieur à hypersthène, qui évolue avec formation d'halloysite, ne serait donc pas très ancien. Son âge serait similaire de celui des dépôts situés plus au Nord qui évoluent vers les sols à allophane (sols faiblement allophaniques).

L'abondance de ces vestiges préhistoriques, identifiés par davantage de tranchées et le concours de spécialistes, permettrait certainement de préciser avec plus d'exactitude les âges respectifs de ces dépôts. L'examen au C14 permettrait peut être de fixer leur âge et de connaître ainsi, le temps nécessaire à la formation de substances amorphes ou d'halloysite en quantité notable, ou à l'apparition des premiers symptômes de l'altération sur les divers minéraux primaires.

L'âge des formations et la durée de l'altération ne seraient donc pas dans ce cas, et jusqu'à ce stade d'évolution, le facteur du sens de l'évolution.

10.1.2 - INFLUENCE DU CLIMAT (PLUVIOMÉTRIE)

Puisque l'âge et la nature des formations ne paraissent pas avoir une influence bien nette sur le sens d'évolution des sols, ce sont donc les variations de la pluviométrie (intensité annuelle et répartition) qui sont le facteur le plus important. Cette hypothèse a été suffisamment envisagée au cours d'un précédent article, pour qu'il soit nécessaire d'y insister. Ceci confirme certaines des observations faites sur les sols similaires des Antilles.

Dans les régions très humides, il semble que, si le milieu demeure constamment perméable en profondeur, les substances amorphes hydratées se maintiennent avec élimination progressive de la silice, et apparition et augmentation de la gibbsite. Le terme final serait une bauxite, avec parfois, en profondeur, dans les parties moins bien drainées, des poches d'halloysite.

La diminution de la silice ressort assez bien du tableau 4, bien que l'analyse triacide, dans le cas de forts résidus insolubles, non quartzueux, ne donne pas de résultats très valables, ni bien reproductibles (Sol total).

On remarque que le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (silice soluble dans la soude) est élevé (4,0) dans l'horizon faiblement allophanique récent de la plaine tropicale pacifique, mais beaucoup plus bas dans les horizons profonds fortement allophaniques (1,5), qu'il s'agisse des régions tropicales chaudes ou tempérées froides d'altitude (2800 m). Le rapport s'abaisse à 1 dans les sols fortement allophaniques de la plaine amazonienne, plus anciens et sous un climat plus humide. En Guadeloupe, des chiffres encore plus bas ont été trouvés et sont donnés à titre de comparaison.

Avec des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, voisins de 1,5, la gibbsite n'est pas toujours décelable, mais les raies de la cristoballite apparaissent encore très nettement aux rayons X. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des substances amorphes fortement allophaniques, débarrassées des sables et limons fins, serait donc très probablement inférieur à 1,5.

TABLEAU 4 - Extraction au triacide - Silice soluble dans la soude 2 % chaude (Sol total)

	Hor. faibl allophanique E 62b	Horizons fortement allophaniques très hydratés				
		Pacifique E 62f	tropical E 53h	2800 m E 73X	Amazonie E 115d	Guadeloupe CA 4b
SiO ₂	22,35	27,00	22,20	22,75	17,70	13,90
Al ₂ O ₃	9,50	30,50	24,90	25,00	29,00	37,50
Fe ₂ O ₃	4,20	9,25	6,00	7,25	8,50	13,00
Fe ₂ O ₃ DEB	1,50	5,3		5,20	6,70	9,20
TiO ₂	0,45	1,05	0,80	0,95	1,20	1,15
Résidu	52,85	13,80	31,30	26,05	18,35	11,25
P. au feu	7,85	16,55	13,05	17,10	24,50	22,80
Rapports moléculaires						
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4,00	1,50	1,52	1,54	1,04	0,63
SiO ₂ /R ₂ O ₃	3,12	1,25	1,31	1,30	0,87	0,51

(Analyses S.S.C. BONDY)

Les teneurs en Fer total et en fer libre sont généralement importantes. Cependant, la goethite est rarement décelable, alors que, pour des teneurs analogues en sols ferrallitiques, elle peut être aisément identifiée.

Si le drainage interne, vertical ou oblique, se ralentit dans le profil au cours de l'évolution, il pourrait y avoir formation d'halloysite, peut être en partie à partir de la silice libérée de nouvelles couches cendreuses, provenant de dépôts aériens plus récents, et ayant recouvert ces formations déjà fortement allitisées.

Dans les régions moins arrosées où la percolation de l'eau dans le sol est beaucoup moins intense, et les horizons supérieurs, certains mois de l'année, soumis à dessiccation, les substances amorphes peu hydratées se transforment en halloysite, donnant naissance à des sols bruns eutrophes. Si le climat est favorable à l'individualisation des hydroxydes, ceux-ci évolueraient ensuite en sols bruns ferrisoliques, puis ferrisols bruns et enfin en sols ferrallitiques friables. Signalons dans certains sols de transition vers l'halloysite, encore très jeunes, la présence de boehmite en quantité notable ; il est probable qu'il s'agit d'un stade transitoire.

10.1.2.1 - Drainage Interne

Certaines objections peuvent, cependant, être faites.

Dans les régions de sols faiblement allophaniques, le dépôt supérieur perméable repose sur des dépôts successifs plus anciens, faiblement ou fortement allophaniques, très perméables. Par contre, dans les zones moins arrosées, les dépôts correspondant aux sols de transition vers l'halloysite recouvrent fréquemment d'anciens sols argileux brun-rouille à halloysite. Il serait alors possible, dans ce cas, d'invoquer l'absence du drainage en profondeur, induisant la formation d'halloysite.

Certains profils de sols de transition ont cependant une forte épaisseur, parfois plus de 2 m et sont constitués de matériaux perméables, provenant quelquefois de plusieurs dépôts successifs, au-dessus du niveau argileux profond. Le passage, dans l'espace, vers les sols faiblement allophaniques sur niveaux profonds perméables, est progressif, en particulier en ce qui concerne le caractère foncé profond du sol. On peut aussi observer des sols fortement allophaniques sur des matériaux peu perméables, vers 2 m de profondeur, en général sur des versants très en pente.

S'il n'est donc pas étonnant que des niveaux argileux d'anciens sols existent souvent en profondeur dans ces régions, puisque c'est l'aboutissement normal de l'évolution climatique, il ne semble pas que la présence de ce facteur de ralentissement du drainage interne soit la cause essentielle du sens de l'évolution, bien que, incontestablement, sur les larges plateaux à drainage externe lent ou modéré, il y ait là un facteur pouvant accentuer les processus de formation de l'halloysite.

10.1.2.2 - Température

La température ne semble pas avoir une action bien nette sur la formation ou non des allophanes.

En altitude, vers 2800 m, dans une région très arrosée, à température moyenne mensuelle constante de 12°, on retrouve les niveaux faiblement allophaniques, au-dessus des niveaux fortement allophaniques, tout à fait identiques à ceux de la basse plaine. On remarque l'absence de gibbsite, du moins à cet endroit.

Plus en altitude, vers 3200 m, avec une température moyenne annuelle de 10° et une température du sol (à 50 cm) ne dépassant pas 14°, contre 26° en zone tropicale humide, on retrouve encore les niveaux fortement allophaniques à plus de 100 % d'eau en profondeur.

A ces altitudes, sauf en de rares endroits, le climat est généralement nettement plus sec, même en tenant compte de l'évapotranspiration plus faible, et les comparaisons sont plus difficiles. Le sens et l'intensité de l'évolution seraient davantage sous la dépendance de l'humidité que de la température. Si des sols de la haute vallée interandine, entre 2600 m et 3000 m d'altitude, ne semblent renfermer que des substances amorphes sans minéral argileux bien net, d'autres auraient déjà de la montmorillonite comme dans les régions sèches tropicales chaudes.

10.2 - Discussion sur la place des sols dans les classifications

10.2.1 - CLASSIFICATION FRANÇAISE EN ZONE TROPICALE (Aubert 1962)

Quelques difficultés apparaissent pour intégrer les sols issus de formations perméables dans la classification française.

Les sols très jeunes sur cendres, qui ne renferment encore que très peu d'allophanes ou d'halloysite, correspondent à la classe des sols peu évolués, sous-classe des sols peu évolués d'origine non climatique à pédo-climat permettant l'évolution du sol, et au groupe des sols d'apports. Certains sols de transition allophanes-halloysite pourraient déjà être placés dans le groupe des sols bruns eutrophes tropicaux de la classe des sols à humus évolué - sols ABC ou A (B) C ne présentant que peu d'hydroxydes libérés, - mais l'horizon B est encore peu marqué.

La classification devient plus délicate pour les sols fortement allophaniques. Ceux qui renferment beaucoup de gibbsite subissent une allitisation extrêmement intense, mais ceux qui en sont dépourvus et sont encore riches en silice présentent des caractères de sols peu évolués. Or, morphologiquement, ces sols sont très semblables et possèdent les mêmes propriétés de rétention très importante pour l'eau et autres caractères particuliers des sols à allophanes. Les hydroxydes de fer sont rarement décelables aux Rayons X et à l'analyse thermique différentielle et il est possible que le fer soit peu individualisé, faisant partie des substances amorphes allophaniques.

Pour ces raisons, il semble préférable de conserver groupés, comme dans la 7^e approximation de l'USDA, les sols où les cendres volcaniques dans les sables, ou les substances amorphes dans l'argile, sont dominantes.

10.2.2 - CLASSIFICATION UTILISÉE

La distinction qui a été faite entre les sols à allophanes, caractérisés par leurs propriétés d'absorption très importantes pour l'eau, et les sols à proportion variable de métahalloysite et de substances amorphes, mais ayant déjà perdu irréversiblement une partie de ces propriétés vis-à-vis de l'eau, permet de fixer une limite très précise entre ces deux ensembles, qui correspond à des caractères physico-chimiques, minéralogiques (absence ou présence de métahalloysite en quantité notable) et surtout morphologiques. Le concept des sols à allophanes pourrait être étendu à l'ensemble des sols renfermant des substances amorphes, mais il devient alors difficile de fixer des limites, surtout quand ces substances deviennent délicates à déceler, par exemple en présence de montmorillonite et d'halloysite. - (Sols de transition allophane - halloysite ..., et sols brun-rouille encore peu argileux).

Pour des formations d'âges voisins, la limite entre les facteurs climatiques, pluviométrie surtout, qui permettent l'apparition et le maintien de gels fortement hydratés, et ceux qui favorisent la formation d'halloysite, directement ou à partir de substances amorphes moins hydratées, est bien nette. Cela justifie la distinction proposée quel que soit le terme employé.

Le terme de sols ando n'a pas été retenu, faute de définitions précises.

10.2.3 - CLASSIFICATION USDA (7^e Approximation 1960, Smith 1965)

La plupart des sols issus de cendres volcaniques font partie, dans l'ordre des INCEPTISOLS définis par l'absence de pédon argilique et par une altération modérément poussée, du sous-ordre des ANDEPTS qui comprend les sols "ayant une dominance d'allophanes dans la fraction argileuse ou une dominance de cendres dans les sables".

Plus récemment, ce sous ordre a été défini par "un complexe d'échange ne donnant pas de raies aux rayons X ou à dominance de substances amorphes" et, soit avec une densité apparente inférieure à 0,9, soit plus de 60 % de cendres volcaniques, ponces ou autres matériaux pyroclastiques dans le sable fin et les fractions plus grossières.

10.2.3.1 - Sols fortement allophaniques

La définition du Grand groupe des HYDRANDEPTS leur convient très bien "gels séchant irréversiblement à l'air et se transformant en agrégats graveleux durs - pH KCl souvent voisin ou supérieur au pH eau". Ceux qui renferment de la gibbsite seraient des OXY-HYDRANDEPTS.

10.2.3.2 - Sols faiblement allophaniques

On pourrait parler d'ENTIC-HYDRANDEPTS, c'est-à-dire de sols ayant déjà certains caractères, mais très atténués, des hydrandepts, au moins dans certains niveaux, caractères qui vont s'accroître avec le temps.

Par l'ensemble du profil, il semble qu'il puisse s'agir aussi d'UMBRANDEPTS définis ainsi : "L'horizon de surface est épais, foncé, du type épipédon umbric ou mollic, et est associé ou non à un pédon cambic. Du fait des incertitudes concernant l'état de saturation en bases (variable suivant les méthodes) et de la dominance d'allophanes et de cendres considérée comme prépondérante, il n'est pas possible de dissocier épipédons umbric et mollic qui sont ici combinés. Des horizons A enterrés sont fréquents, séparés parfois par des lits de cendres plus grossières. Les teneurs en matière organique sont élevées et la densité apparente peut descendre jusqu'à 0,3".

Il faut remarquer que dans les régions tropicales humides, les sols bien drainés, à l'exclusion des quelques centimètres superficiels, ont rarement des C/N supérieurs à 10 ou 12, même lorsqu'ils sont acides et désaturés. Le C/N de 17 requis pour la définition de l'épipédon umbric, par ailleurs relativement épais, est peu fréquent. Cette "confusion" faite dans les UMBRANDEPTS, en dépit du nom, entre les épipédons umbric et mollic nous permet d'y inclure les sols faiblement allophaniques d'Équateur. Au motif "saturation en bases faible et imprécise" il faudrait ajouter "C/N relativement bas, 10 à 12", bien que les teneurs en matière organique soient élevées, les teneurs en cations bivalents souvent faibles (2 à 5 mé %) et le pH relativement acide, (5,0 à 5,8) en surface. À défaut de termes précis, il semble bon d'indiquer UMBRANDEPTS (C/N = 10) pour les distinguer nettement des orthic-umbrandepts à C/N élevé, supérieur à 17, probablement formés en climats plus froids.

Les sols faiblement allophaniques, mieux pourvus en bases (pH > 6, et 8 à 12 mé de bases échangeables), ainsi que les sols de transition allophanes-halloysite, seraient des MOLLIC-UMBRANDEPTS définis par "C/N = 10 à 12, un pH supérieur à 6, bien pourvus en Ca et K, mais état de saturation en bases variable, suivant les méthodes et analyses mécaniques sans signification" - Le caractère épipédon mollic, et matière organique formée en présence de cations divalents, l'emporte sur l'épipédon umbric en dépit d'un état de saturation incertain.

En résumé, les sols faiblement allophaniques peuvent être classés de deux façons :

- Si l'accent est mis principalement sur les caractères hydriques, il s'agit alors d'ENTIC-hydrandepts,

- Si les autres caractères du sol l'emportent, on doit alors distinguer les termes les plus acides, classés en Umbrandepts (C/N = 10) ou encore avec les plus récentes définitions en "hydric-tropic-normandepts" - (tropic signifiant déjà un C/N plus bas que celui des normandepts), et les termes peu acides, relativement bien saturés en bases, qui seraient des mollic-umbrandepts ou des hydric-tropic-eutrandepts (le terme tropic signifiant alors seulement ici une capacité d'échange un peu plus faible que pour les eutrandepts typiques).

10.2.3.3 - Sols de transition Allophanes-halloysite d'Équateur

Il ne paraît pas possible de les rattacher aux ochrandepts. Il y a trop de matière organique pour qu'il puisse s'agir d'un horizon ochric et la restriction "horizon A foncé, mais moins foncé que C" est difficile à appliquer du fait des niveaux successifs enterrés souvent peu épais. Le concept des ochrandepts semble s'appliquer à des sols, soit dont l'évolution argileuse est plus poussée, soit situés en régions plus sèches comme on en observe aux Antilles "Ceux constitués de cendres relativement peu altérée, brunâtre ou rougeâtre seraient des entic, ceux plus évolués et avec une proportion appréciable de kaolin des ultics, et ceux riches en hydroxydes des oxii".

Les ochrandepts seraient en somme les intermédiaires entre les sols de transition allophanes-halloysite d'Equateur, encore très jeunes, qui ont été décrits, et les sols argileux brun-rouille à halloysite, dont les plus argileux (60 à 80 %) n'en font déjà plus partie. C'est une gamme de sols bien représentée aux Antilles, mais qui n'a pas pu être observée en Equateur, bien qu'elle existe probablement par place. Les sols de transition allophanes halloysites seraient donc des tropic-eutrandepts pour la plupart, les teneurs en argiles identifiables aux rayons X étant encore le plus souvent faibles.

10.2.3.4 - Sols d'altitude - vallée interandine

On pourrait penser aux ochrandepts pour certains sols sur cendres, mais il faut faire remarquer que la couleur beige très clair sur sol sec devient beaucoup plus foncée sur sol humide.

Dans les régions relativement sèches, où les profils sont épais et uniformes, remaniés par le vent, l'érosion et la culture, on pourrait penser à des ANDEPTIC-HAPLUDENTS - grand groupe des USTENTS, de l'ordre des ENTISOLS - "sols sans horizons de diagnostic nettement différenciés, ne pouvant avoir ni mollic ni umbric épipédon, mais seulement un ochric. "L'absence d'horizons différenciés serait attribuable au manque de temps pour leur formation, le sol ayant pu être jadis un molisol ou un brunizem, érodé ou transformé par la culture". Dans son concept, l'orthic-hapludent est un sol à moins de 60 % de cendres ou d'allophanes. L'andepctic-hapludent est donc un intergrade.

Certains de ces sols pourraient être rattachés à des aridisols, d'autres, riches en carbonate de calcium secondaire, seraient des USTROPEPTS.

En régions plus humides, les sols présentent souvent des niveaux enterrés plus noirs qu'en surface à moins de 60 cm de profondeur. Ils sont exclus du groupe précédent et la restriction horizon A1 moins foncé que l'horizon C inapplicable dans presque tous les cas. Cet horizon plus noir qu'en surface est-il un horizon spodic "revêtements amorphes d'humus et d'allophanes, avec plus de 0,3 % de carbone pas de structure d'ensemble, C/N supérieur à 12 en sols vierges" ?

On ne saurait affirmer s'il s'agit d'un niveau fortement organique ayant peu évolué depuis son enfouissement, ou d'un niveau constitué au moins partiellement par des processus pédogénétiques. Certains sols des Antilles présentent aussi des horizons plus noirs en profondeur, en particulier ceux qui ont été affectés par les dernières éruptions de la montagne Pelée - 1902. En l'absence de données permettant de parler de niveau spodic, les termes mollic - Umbrandepts ou Umbrandepts semblent encore convenir au mieux, (sols peu acides). L'expression plus récente de "Thapto-tropic eutrandepts" tient compte des niveaux successifs à moins de 1 m de profondeur et des faibles variations annuelles de la température du sol.

10.2.3.5 - Sols du paramon

Au-dessus de 3500 m d'altitude, avec une température moyenne mensuelle inférieure à 10°, il pourrait s'agir de CRYANDEPTS "andepts de régions froides sans duripan, avec un umbric épipédon" c'est-à-dire, comme pour les cryumbrepts, bien que cela ne doit pas spécifier, "un horizon noir épais généralement peu saturé en bases et à rapport C/N élevé. Le C/N semble en effet atteindre 15 à 20. Un niveau plus noir, manifestement enfoui, est aussi observé le plus souvent. Si la température est jugée trop élevée (8 à 10°) pour que le rattachement aux Cryandepts soit possible, au-dessous de 4000 m d'altitude, il faudrait alors parler de Thapto-tropic-Nomandepts.

10.2.3.6 - A 2.500 m, les sols de la ceinture nuageuse humide mais fraîche (15°) seraient des Umbrandepts à C/N encore peu élevé ou "hydric-tropic-nomandepts" ou encore "des Entic-hydrandepts" recouvrant des Hydrandepts.

10.2.3.7 - Sols brun rouille, argileux à halloysite : Le grand groupe des RHODOCHRULTS de l'ordre des ULTISOLS, sols à horizon argilique avec quelques minéraux altérables, et un état de saturation inférieur à 35 %, décroissant en profondeur semble le mieux convenir. Les rhodochrults "présentent d'ailleurs d'étroites relations avec les oxisols, la distinction entre Ochric, mollic

et umbric épipédon a peu de signification dans les sols dont les horizons argiliques sont de couleur sombre, secs ou humides". Si les teneurs en matière organique peuvent être importantes en surface, elles sont faibles en profondeur bien que la couleur change peu". Toutefois, la conception du pédon argilique formé en partie par accumulation d'argile provenant de niveaux supérieurs est gênante, bien que, par ses caractères, l'horizon B de ces sols puisse s'y rattacher : teneur en argile de 50 % en surface et de 80 % en B, surfaces luisantes (mais il peut s'agir d'hydroxydes ...). C'est pourquoi ce terme de classification n'a pas été encore retenu. Les profils moins désaturés en régions plus sèches, avec augmentation des bases échangeables en profondeur, seraient des Rhodustalfs.

11 - CONCLUSION

La rapidité de l'altération des formations de cendres volcaniques, et les variations climatiques considérables à de faibles distances, permettent de constater, sur des formations de même âge et parfois très récentes, des sens d'évolution très nettement différents.

Si la proportion des divers minéraux primaires peut aider à déceler l'origine des dépôts et à comprendre leur mise en place successive dans le temps et dans l'espace, c'est l'intensité de la percolation de l'eau dans le sol qui semble surtout conditionner le sens de l'évolution.

Des comparaisons étroites pourraient être faites avec les observations de divers auteurs sur l'altération en laboratoire de certains minéraux, et l'évolution des produits d'altération de certains gels en milieux contrôlés : concentration, température, acidité (PEDRO, HENIN, FRIPIAT, et coll...), dont SEGALLEN (1965) a tenté de faire la synthèse pour les produits alumineux. Ces résultats expérimentaux étant souvent contradictoires, et les observations réalisées sur le terrain insuffisantes, une discussion semble prématurée.

Il suffit de quelques dizaines d'années à un niveau de cendres, si les conditions climatiques sont favorables, pour se transformer en un sol profond et productif. Sur les coulées et sur les brèches, ou autres formations dures, des périodes considérablement plus longues sont nécessaires pour obtenir des sols dont l'épaisseur soit suffisante pour permettre à certains caractères d'évolution de se manifester. Durant ces longues périodes, des apports extérieurs, voire des modifications de climat, peuvent se produire, rendant plus difficile l'étude des processus pédogénétiques.

Avril 1966

BIBLIOGRAPHIE

- ALTERATION (L') des roches et la formation des sols au Kivu - 1962 - par A. Pécrot, M.C. Gastuche, J. Delvigne, L. Vielvoye, et J.J. Fripiat. INEAC, sér. sci., n° 97, Bruxelles, 90 p.
- AUBERT (G.) - 1963 - La classification pédologique française, 1962. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 3, pp. 1-7.
- BOWEN (N.L.) - 1928 - The evolution of igneous rocks - Dover Publ., New-York.
- BRAMAO (D.L.), SIMONSON (R.W.) - 1956 - Rubrozem a proposed great soil group. Congr. Int. Sci. Soil. 6. 1956. Paris, vol. 1, E, pp. 25-30.
- COLMET-DAAGE (F.) - 1962 - Etudes préliminaires des sols des régions bananières d'Equateur. Fruits, vol. 77, n° 1, pp. 3-21.
- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.) - 1965 - Caractéristiques hydriques de certains sols des régions bananières d'Equateur. Fruits, vol. 20, n° 1, pp. 19-23.
- COLMET-DAAGE (F.), 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.
- D'HOORE (J.L.) - 1964 - La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000. CCTA. Publ. n°93. Lagos, 210 p, carte en 7 feuilles.
- FISCHESSER (R.) - 1959 - Données des principales espèces minérales. J. et R. Sennac, Paris, 683 p.
- FREI (E.) - 1957 - Informe al gobierno del Ecuador sobre reconocimiento edafologicos exploratorios - Informe FAO n° 585. Roma, 35 p. multigr.
- GRIM (R.E.) - 1953 - Clay mineralogy. Mac Graw-Hill Book Co, London, 384 p.
- PENA HERRERA (J.) - 1963 - Estudio de suelos de la zonas trigueras del Ecuador y su fertilidad. Bol. inform. Fac. Agron., Quito, vol. 1, n° 2, pp. 17-32.
- SAUER (W.) - 1965 - Géologie del Ecuador - Ed. Ministerio. Educ. Quito, 383 p.
- SEGALEN (P.) - 1965 - Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cah. ORSTOM, sér, Pédol., vol. III, 2, pp. 149-176.
- SMITH (G.D.) - 1965 - Lectures on soil classification, Pédologie, Gand, N° spécial, 4. 135 p.
- U.S.D.A. Soil survey staff. - 1960 - Soil classification. A comprehensive system, 7 th approximation, USDA, Washington, 265 p.
- VASCONEZ HERRERA (C.) - 1964 - Variaciones de la pluvialidad en la región occidental del Ecuador. Prim. sympos. nacion. recursos. natur. Guayaquil. 8 p. multigr.

PAYS : EQUATEUR

REGION : PUYO NAPO ORIENT

Altitude : 950 m environ

Roche Mère : Cendre volcanique - dépôts anciens

Pluviométrie : très humide, pluies constantes, (4 à 5 m par an) régulièrement toute l'année, nuages.

Modelé local : presque plat à l'endroit du profil, mais étroit plateau en sommet de colline, rebord de forte pente.

Drainage externe : rapide.

Végétation et cultures : forêt avec nombreux palmiers - En grande partie défrichée, pâturages plantés, cultures vivrières.

Lieu et paysage : région ondulée, collines peu élevées, en fortes pentes

km 18 - route PUYO-NAPO. Au sommet d'une colline, sommet en arête de 10 à 20 m de large, avec pentes raides ; quelques cultures de maïs entre les vieilles souches. Bon drainage en profondeur. Pas de nappes. Tranchée jusqu'à 60 cm puis sondage.

- 0 - 15 - très noir, très humifère, spongieux, savonneux entre les doigts, 10 YR 3/1, petites mottes peu cohérentes, s'effritant en agrégats, grumeleux, cohésion due à la matière organique, beaucoup de racines.
- 15 - 80 - plus clair, beige ; 10 YR 4/2 ; encore bien humifère ; très savonneux ; gels ; plastique, pas collant, cohésion faible, pas de structure d'ensemble, quelques pores, très humide, s'écrase bien entre les doigts.
- 80 - 90 - transition ; plus clair.
- 90 - 180 - jaune vif, 10 YR 6/8, très savonneux entre les doigts, s'effrite en pseudo-sable et petits agrégats, très peu de minéraux visibles au très fins, pas de structure d'ensemble, cohésion faible due aux gels, perméable, léger, très humide.

A 50 mètres

Dans le talus de la route, on voit l'allophane jaune clair, très savonneux, très léger, avec beaucoup de petits pores, peu de minéraux visibles. Echantillon 111 vers 2 m de profondeur (humidité naturelle 260 - T frais ; 80 mé par 100 g)

Micro-concrétions de gibbsite

Plus en profondeur on remarque des petites concrétions blanc-beige, peu dures, en lamelles de formes irrégulières (gibbsite pure). Concrétions de 2 à 4 mm, parfois en petites baguettes dans les anciens trous de racines.

Echantillons 116, vers 4 m de profondeur (humidité naturelle 286 - T frais 80 mé). On a extrait de cet échantillon quelques petites micro-concrétions qui ont été examinées aux rayons X et ATD.

Echelle	Profondeur en cm	Horizons	Humidité naturelle %	Sables % *		N mg p. 100 g	P205		
				50-200 µ	200-2000 µ		Total mg %	Truag mg %	
a	0 - 15	A ₁	263	8.6	0.6	1120	134	0.3	
b	20 - 40	A ₁	219	11.5	0.7	532	83	traces	
c	50 - 80	B ₁	251	11.6	1.5			0.1	
d	90 - 120	B ₂	296	6.5	0.7	285	73	0.1	
e	150 - 180	B ₂	278	3	0.6	199	24	0.1	
Numéros	Bases échangeables mé. p. 100 g sol					T échantillon séché air	V %	T sur échantillon frais en % sec étuvé	pH 1/2.5 eau
	Ca	Mg	K	Na	S				
a	1.65	0.60	0.25	0.23	2.73	45	6	76	4.5
b	1.20	0.15	0.08	0.16	1.59	33	5	56	5.2
c	2.40	0.30	0.08	0.24	3.02			69	5.7
d	5.85	0.75	0.13	0.46	7.19	29	2.5	72	5.8
e						29		64	5.6
Numéros 115	pF 4,2		Différence	pF 2,8		Différence	pF 2,8 - 4,2		
	Frais	Sec		Frais	Sec		Frais	Sec	
a	169	52.6	115	214	63.8	149	45	11.2	
b	148	36.1	112	192	47	145	43.5	10.9	
c	170	35.2	134	228	41.8	186	57.7	6.6	
d	192	33.2	159	255	36.2	219	63.5	3	
e	178	36.6	141	231	36.8	195	53.3	0.2	
111	236			242	30.6	211	5.7		
116	188			222	37.1	185			

* Sables après lavages aux acides et à la soude.

E 62 - SOL FAIBLEMENT ALLOPHANIQUE recouvrant un SOL FORTEMENT ALLOPHANIQUE

Umbrandept à C/N = 10, au Entic-hydrandept, recouvrant des hydrandeps

Hydric-tropic-normandept

(Versant Pacifique - Zone Nord de Santo-Domingo à Quinindé)

PROFIL N° E 62

DATE : Novembre 1963

PAYS : EQUATEUR

REGION : QUININDE

Altitude : 250 m environ

Température : 25° légèrement plus basse en saison sèche

Roche-Mère : Dépôts aériens de cendres volcaniques

Pluviométrie : voisine de 2,5 m de Janvier à Mai, surtout - quelques pluies en saison sèche et ensoleillement réduit.

Modelé local : légère pente, plutôt en sommet.

Drainage externe - Rapide.

Végétation et cultures : belles bananerales défrichées depuis 15 ans environ.

Lieu et paysage : route de Quinindé vers Santo-Domingo, à 16 km de Quinindé et 74 de Santo-Domingo - Zone moutonnée, pentes peu importantes.

- 0 - 10 bien humifère, très friable, structure très peu développée, mottes très peu cohérentes, terreau, à peine moueux (couleur : 10 YR 3/2 frais)
- 10 - 40 beige : 10 YR 5/4 frais et 3/3 humide, assez foncé, s'effrite bien en pseudo-sable - limon et sable blanc-beige, un peu cohérent, un peu allophanisé.
- 40 - 60 quelques noyaux de cendre fine grisâtre peu altérée.
- 60 - 80 plus foncé, humifère, friable, nombreux pores, limono-sableux : 10 YR 3/2 frais et 2/2 mouillé, donc très foncé.
- 80 - 300 allophane jeune très friable, sans structure, donnant un pseudo-sable, s'écrase entre les doigts, savonneux, peu de minéraux beige, petits minéraux noirs : 10 YR 5/8 frais et 5/6 mouillé.

Echantillon N°	Profondeur en cm	Horizon	Humidité nat. %	Argile %	Limon %	Sables 20-50 µ	Sables % 50-200 µ	200-2000 µ	Ma. Or. Cx 1,72 %	C g %	N mg %	C/N
a	0 - 15	I A	52	Dispersion incertaine et incomplète			24	1	6.14	3.57	370	9.7
b	20 - 40	BIC	50				28	1	3.13	1.82	173	10
d	65 - 80	II A	55				26	1	2.84	1.65	145	11.8
e	140 - 160	BC	160				8	1	2.13	1.24	106	11.5
f	230 - 260		175				1.84	1.07	80			

Numéros	Bases échangeables mé. p. 100 g sol					T	V %	P205		pH 1/2.5 eau
	Ca	Mg	K	Na	S			Total mg %	Truag mg %	
a	5.55	1.00	0.56	0.13	7.24	21	34	176	2.2	5.5
b	4.20	0.75	0.79	0.13	5.87	20	29	119	0.04	6.2
d	5.40	0.30	0.48	0.19	6.37	21	30	107	0.4	6.0
e	4.65	0.30	0.12	0.16	5.23	28	18		0.2	6.6
f	3.45	0.60	0.09	0.23	4.37	30	15		0.6	6.4

Numéros	Densité		Porosité		pF 4,2			pF 2,8			pF 2,8 - 4,2	
	Apparente	Réelle	Totale	Pour l'eau	Frais	Sec	Dif.	Frais	Sec	Dif.	Frais	Sec
a					31.9	21	10.9	52.2	34.5	17.7	20.3	13
b	0.83	2.53	67	40	28.9	17	11.9	48.5	28.5	20	19.6	11.5
d	0.79	2.50	69	43	31.6	19.1	12.5	54.9	38.5	16.4	23.3	19.4
e					113	38	69	158	37.7	120	44.3	3.7
f	0.45				120	32.7	87.5	172	37.2	134	50.7	4.5

Sol brun eutrophe tropical peu évolué, sur sol brun ou brun ferrallitique

DATE : Novembre 1963

Mallic-Umbrandept au Tropic-Eutrandept

PAYS : EQUATEUR

REGION : QUEVEDO

Altitude : 70 mètres

Rache Mère : Dépôt récent de cendre volcanique sur ancien sol

Pluviométrie : 10 ans - 560-463-422-396-115-33-54-4-14-18-23-121 = 2224 mm - Année la plus humide 3039 mm. La moins humide 1342 - Saison sèche de 6 mois avec ciel nuageux et rarement plus d'une heure de soleil par jour et température plus fraîche : 22° - Température : 25°.

Modèle local : pratiquement plat

Drainage externe : assez lent.

Végétation et cultures : Plateau de 800 m sur 300 m séparé par des ravines - Dans une plantation d'hévéas.

Lieu et paysage : sur le plateau dominant les terrasses alluviales - Station INIAP-Pichilingue - A 1000 m du Rio environ - Le manteau de cendre disparaît sur les pentes en bordure de la ravine où le sol argileux effleure.

I - Dépôt de cendre récent

- 0 - 2 litière végétale de feuille d'hévéa.
- 2 - 10 gris-noir foncé, humide : 10 YR 3/1 ; sec, gris plus clair, structure d'ensemble fondue, macroporosité forte, cohésion faible due seulement à la matière organique, quelques racines.
- 10 - 30 idem mais structure d'ensemble très peu stable, limon à sable fin paraissant un peu humide encore.
- 30 - 90 progressivement plus clair, plus jaune 10 YR 5/6, devenant très clair sec, très limoneux avec sable très fin, très doux au toucher, nombreux petits pores inférieurs à 1 mm. Pas de structure d'ensemble, mottes très légères, beaucoup de racines ; il semble que de 60 à 90 cm, le sol soit un peu plus foncé, ancien sol humifère.
- 90 - 100 plus clair, beige clair, très doux au toucher, pores plus nombreux, cendre moins altérée.
- II - 100-120 passage brutal à une argile brun-chocolat foncé ; le sol s'effrite relativement bien, cassure subangulaire, nombreux gros pores, peu luisant, un peu frais.
- 120 - 140 nettement compact, un peu gras mais pas adhésif, faces luisantes, plus anguleuses, plus brun rougeâtre foncé à chocolat, légèrement plus rouge ; 5 YR 3/3 à 3/2 ; cassure plus ferme et plus claire, difficilement pénétrable au doigt (halloysite).
- 140 - 160 un peu plus luisant, encore très foncé, quelques taches manganiques.
- 160 - 200 beaucoup plus claire marron : 5 YR 4/4 ; très anguleux, compact, faces très très luisantes, un peu lamellaire, quelques plaquettes ferromanganiques noirs durcis, un peu gras mais pas adhésif, compact mais s'effrite relativement bien et mieux qu'à 140 cm, moins de revêtements manganiques, beaucoup de racines d'hévéa entre 40 et 100. Encore quelques unes dans l'argile en profondeur.

Numéros	Profondeur en cm	Humidité naturelle % sol sec	Argile %	Limon %	Sables %			M.O %	pH	
					20 à 50 µ	50 à 200 µ	200 à 2000 µ			
a	0 - 30	31	7.5	25.5	22	33	1	6.7	6.9	
b	40 - 60	40						2.1	6.9	
c	65 - 85	36						2.8	6.8	
d	110 - 135	39	53.5	18	9	11	1.5	0.4	6.7	
e	180 - 200									
Numéros	Bases échangeables mé p. 100 g				S %	T mé %	V %	Densité apparente	P ₂ O ₅ mg p. 100	
	Ca	Mg	K	Na					Total	Truog
a	12.15	0.45	0.71	0.16	13.5	20	67	0.81	235	7.2
b	8.10	0.60	0.47	0.14	9.3	18	52	0.71	205	3.6
c								0.83		2.2
d	5.25	0.45	0.98	0.19	6.9	12	58	1.16	115	1.2

III/- / Caractéristiques de quelques sols d'Equateur /
dérivés de cendres volcaniques /

3ème partie

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

Cahier ORSTOM, Sér. Pédol., 1969, vol.VII, n°4, 495-560

F.COLMET DAAGE
C.KIMPE (de)
M.DELAUNE
G.SIEFFERMANN

J.GAUTHEYROU
M.GAUTHEYROU
G.FUSIL
M.KOUKOU

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'halloysite 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 hauptsächlichsten 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 debauten Böden der relativ feuchten Gegenden der interandinen Hochtäler ähneln sehr, durch die Gesamtheit ihrer Eigenschaften, denen der warmen Tropenzonen ; 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.

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 dacitoïdes.

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 « sialitique ». 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 sialitique, seraient les plus acides. Par contre, ceux situés plus au nord, dans des régions déjà dépassées par l'« onde sialitique » 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 crétacés 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 « sialitique » des produits (andésites, dacites) expulsés par les volcans de cette chaîne et les matériaux plus basiques, moins « contaminés »

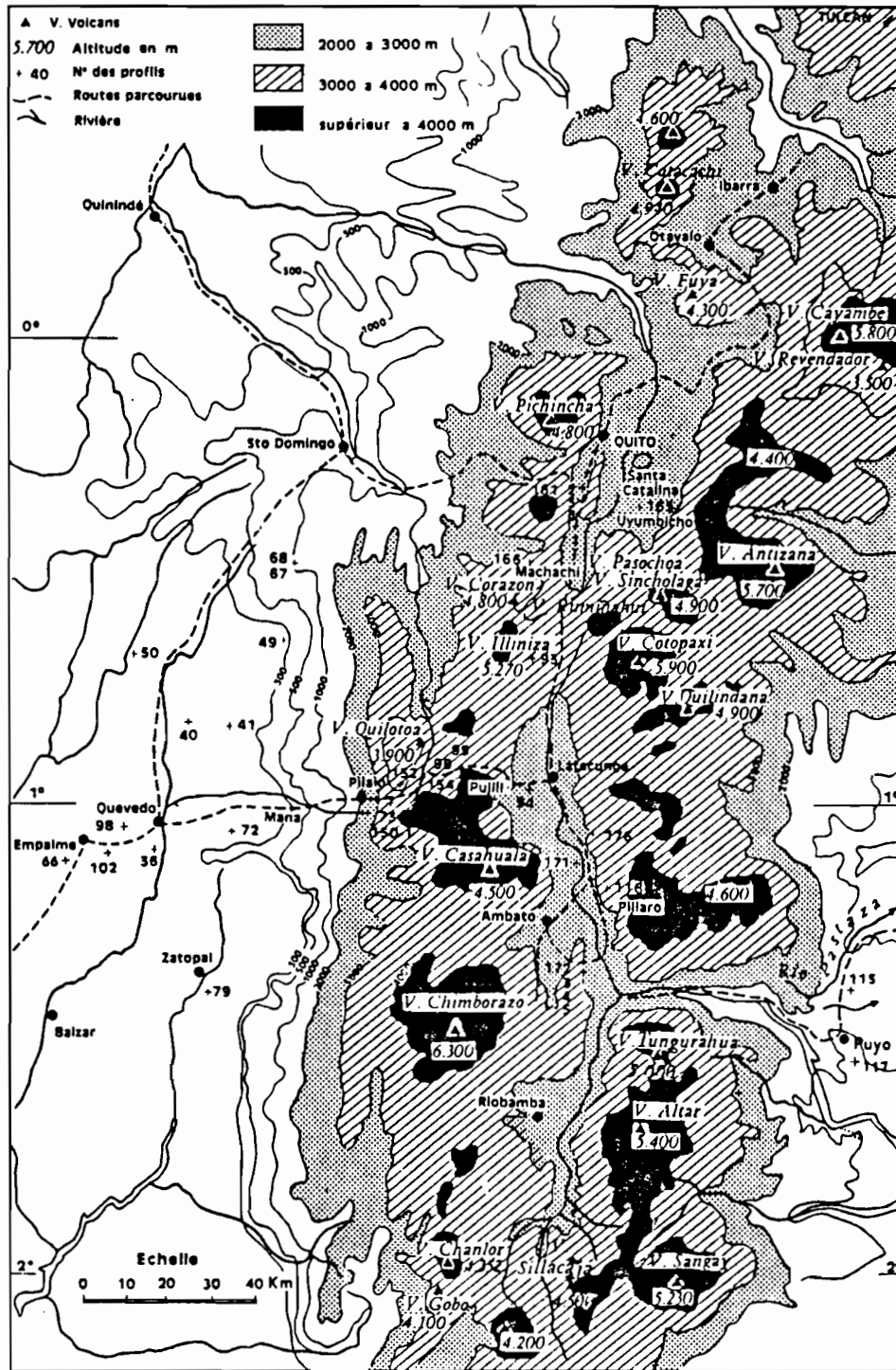


FIG. 2. — Altitudes

par le sial, plus directement issus 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 Revendador 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 I

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 2000 μ	Minéraux légers (pas de quartz)	Minéraux lourds				
					Pondéral % sables	Hypersthène	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 volcaniques	10,5	72	15	13	E 173
150	Limite brutale Cangagua. Cendre consolidée brune uniforme, dure au marteau. Blocs à tendance subangulaire avec revêtements 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					
					Pondéral % sables	Hypersthène	Augite	Hornblende		Epidote
0	Sable limoneux, poreux, humifère, terreau	27	7	90 % sont très altérés et indéterminables, plagioclases, 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 brunâtre 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 2 000 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 2 000 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							
—350—	Sableux, cendre noire			80 % des plagioclases sont altérés. Un peu de verre	11,3	67	12	21
—380—	Ponce pure pourrie							
—480—	Cendre fine, onctueux	20	28	Idem, mais moins de verre.	11,1	40	19	40
	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 allophanique	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 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 Quindé.

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 interandine, 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
Stoà Domingo	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'ennuage 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'ennuage 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.

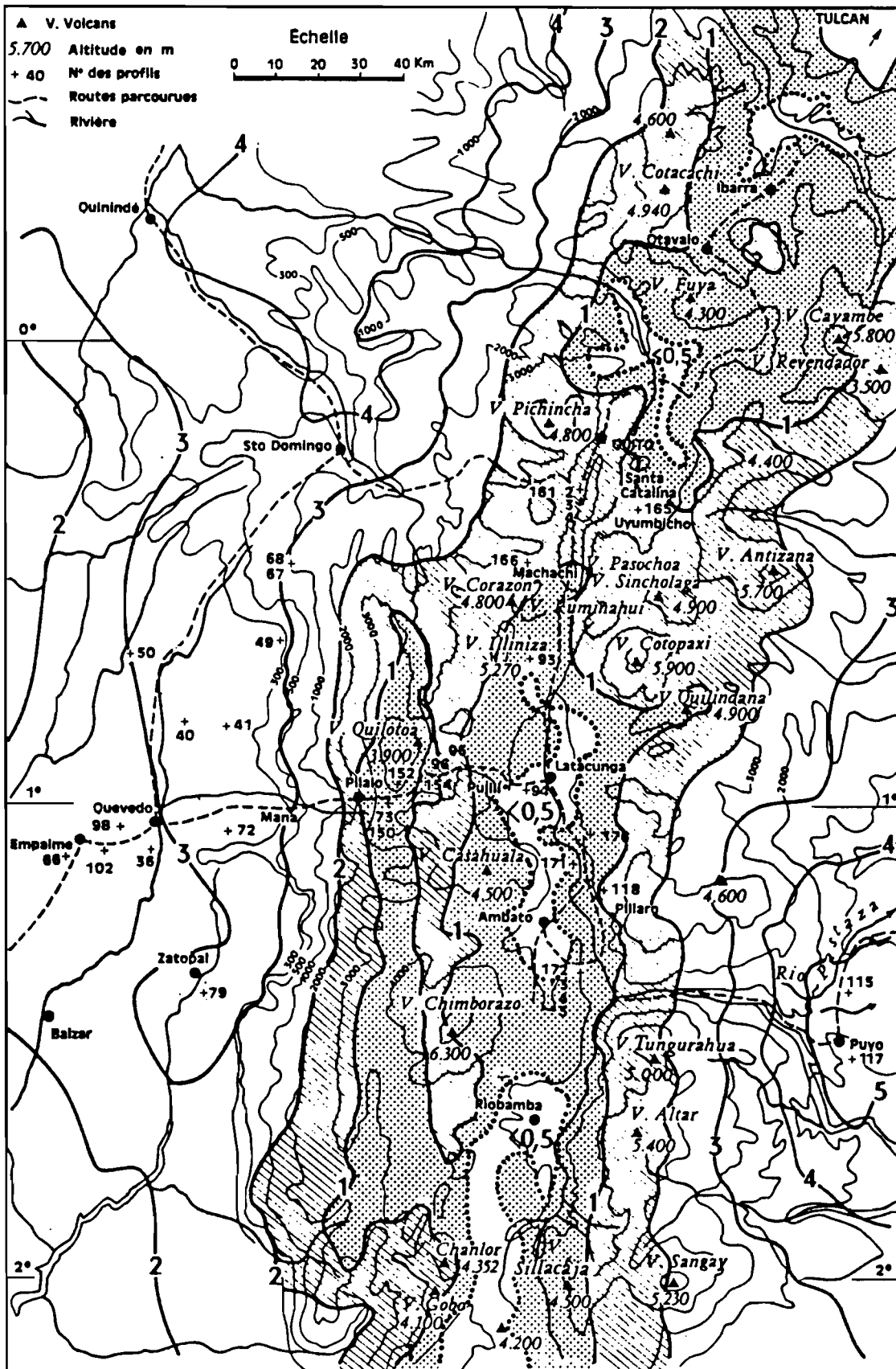


FIG. 3. — Isohyètes, en mètres de pluie par an.

TABLEAU 11

VARIATIONS DE LA PLUVIOMÉTRIE

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'accroît, 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	
90	Jaune, onctueux, s'effritant bien	25	18	162	53	25	39	16	
120									
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.

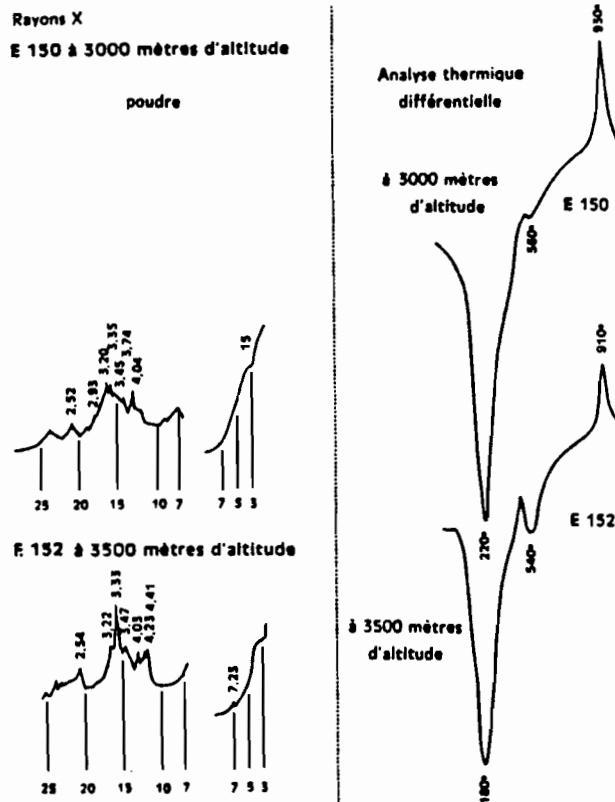


FIG. 4.

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).

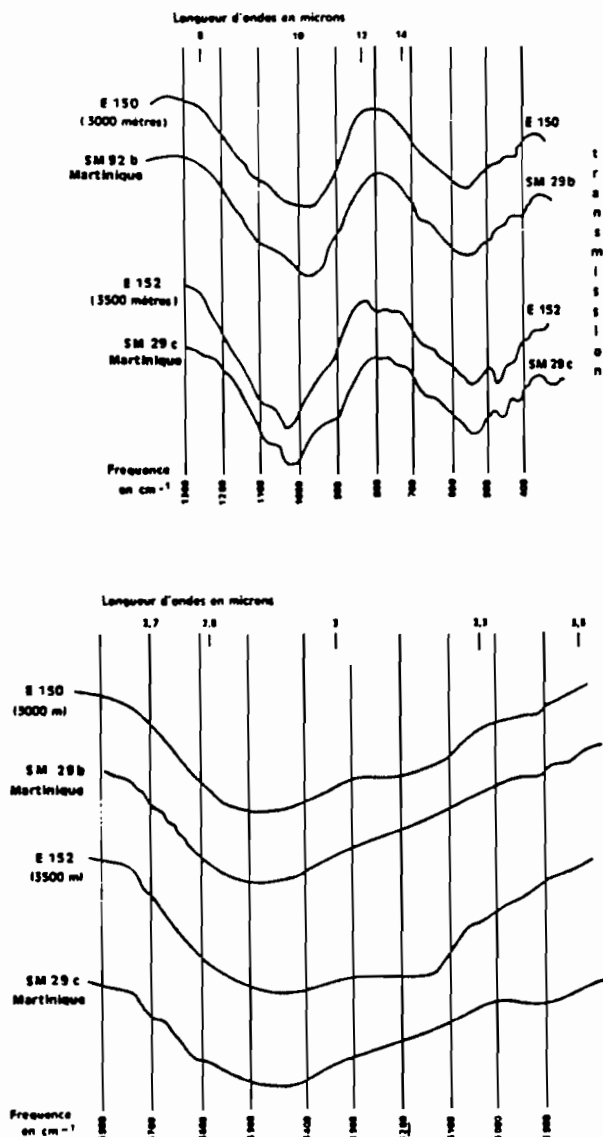


FIG. 5. — Spectrographie infrarouge (Perkins-Elmer).

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'halloysite (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
		50	60	79	71	3	47		
E 152	3 500	47	53	71	59	5	66		5,8
		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 71	79 80	97 97	84 84	4 4
Sol rouge à montmorillonite		44 45	47 47	49 48	44 47
Vetisol	47 46	51 50	54 62	67 70	70 70
Sol ferrallitique		24 24	24 22	30 32	21 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 HCl 6N 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 10 Å. 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).

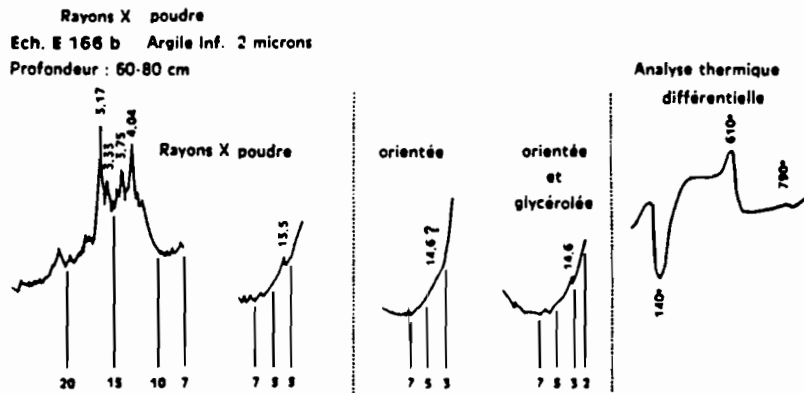


FIG. 6.

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 SEGALEN, 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	Fau 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.

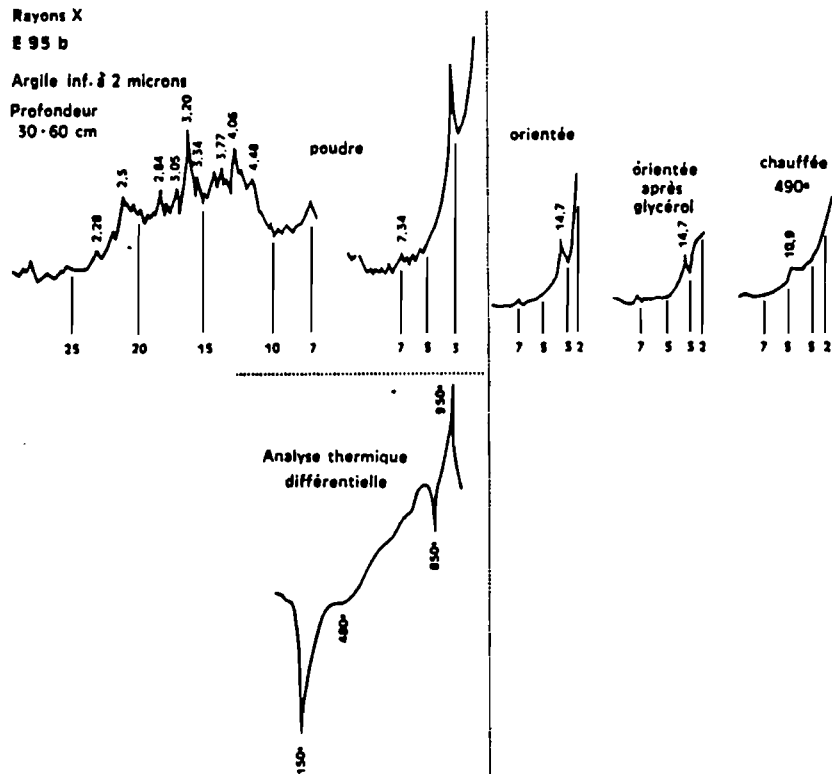


FIG. 7.

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.

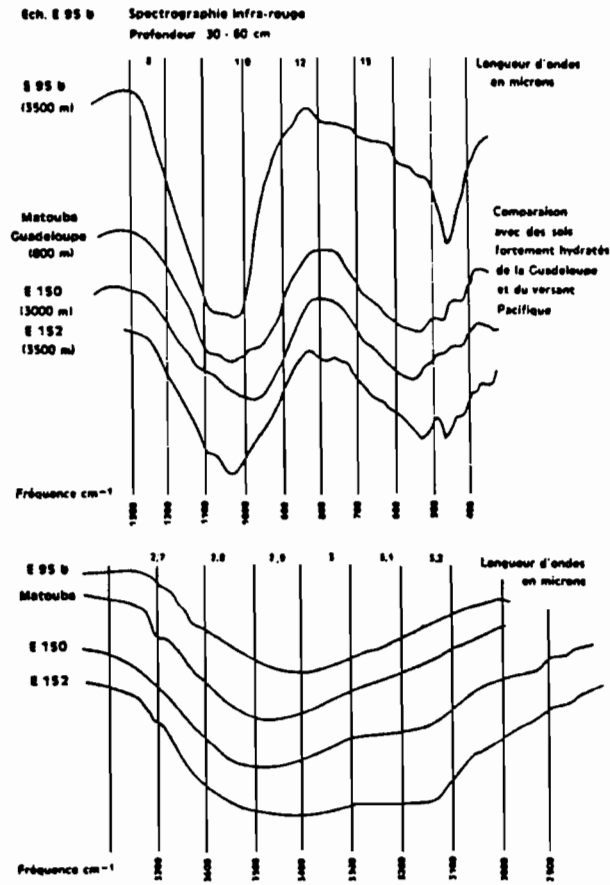


FIG. 8

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.

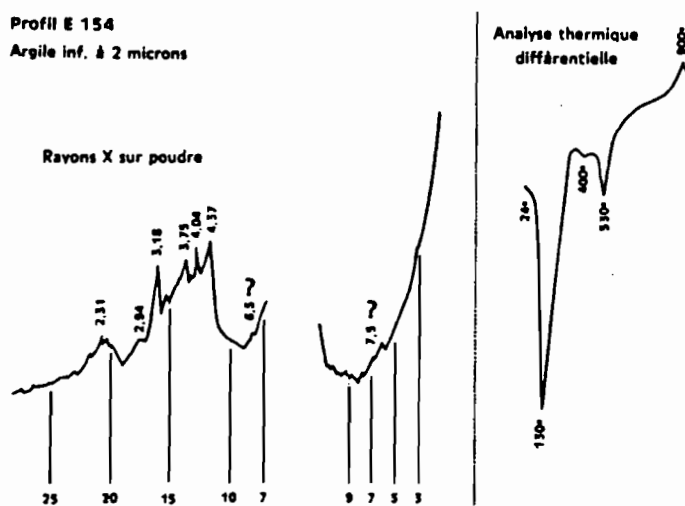


FIG. 9

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).

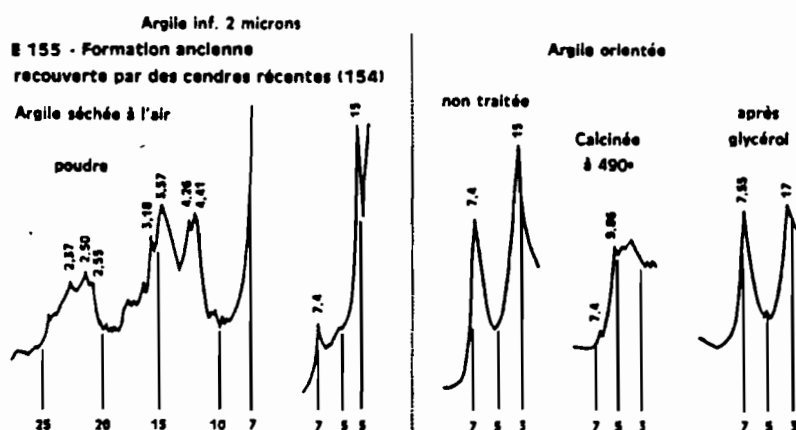


FIG. 10

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, décapant 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'hallowysite (raie à 10 \AA passant à $7,4 \text{ \AA}$ par chauffage à 100°) et de la métahallowysite (raie à $7,4 - 4,37 - 2,51 \text{ \AA}$), (fig. 11).

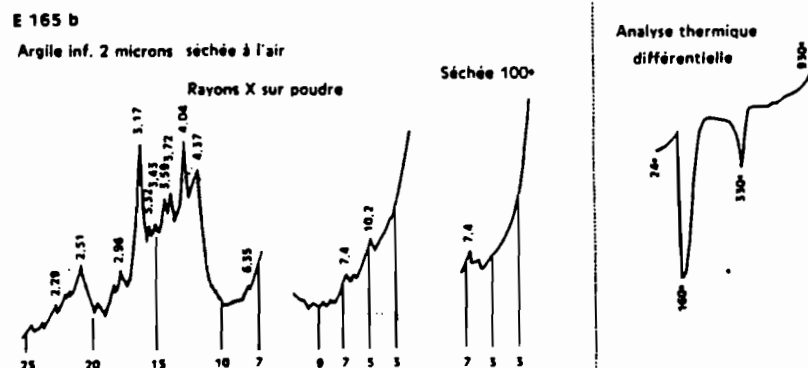


FIG. 11.

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'hallowysite.

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'hallowysite. Puisque le profil se dessèche certains mois de l'année, au moins à cette profondeur, il semble normal que la métahallowysite 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.

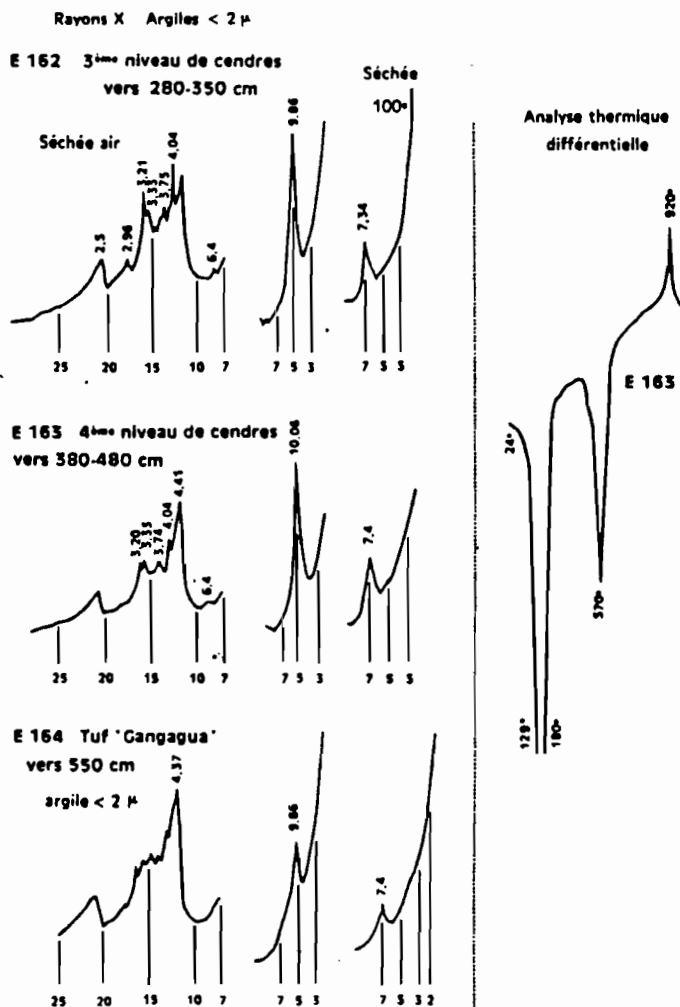


FIG. 12.

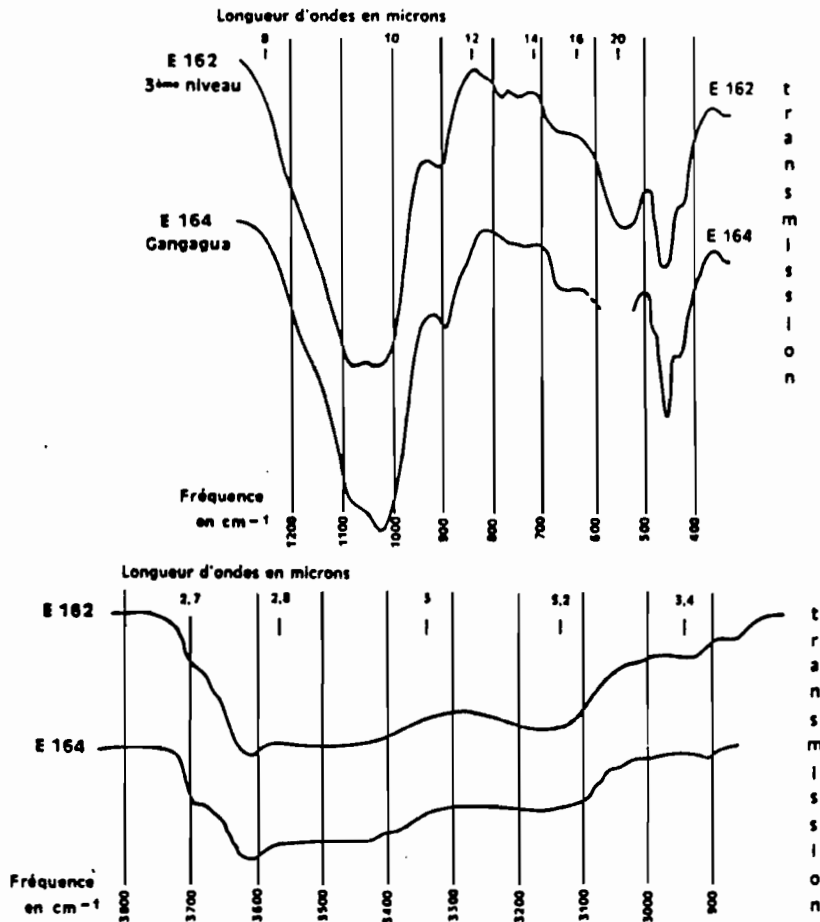


FIG. 13. — Spectrographie infrarouge

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 cendreux, 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		

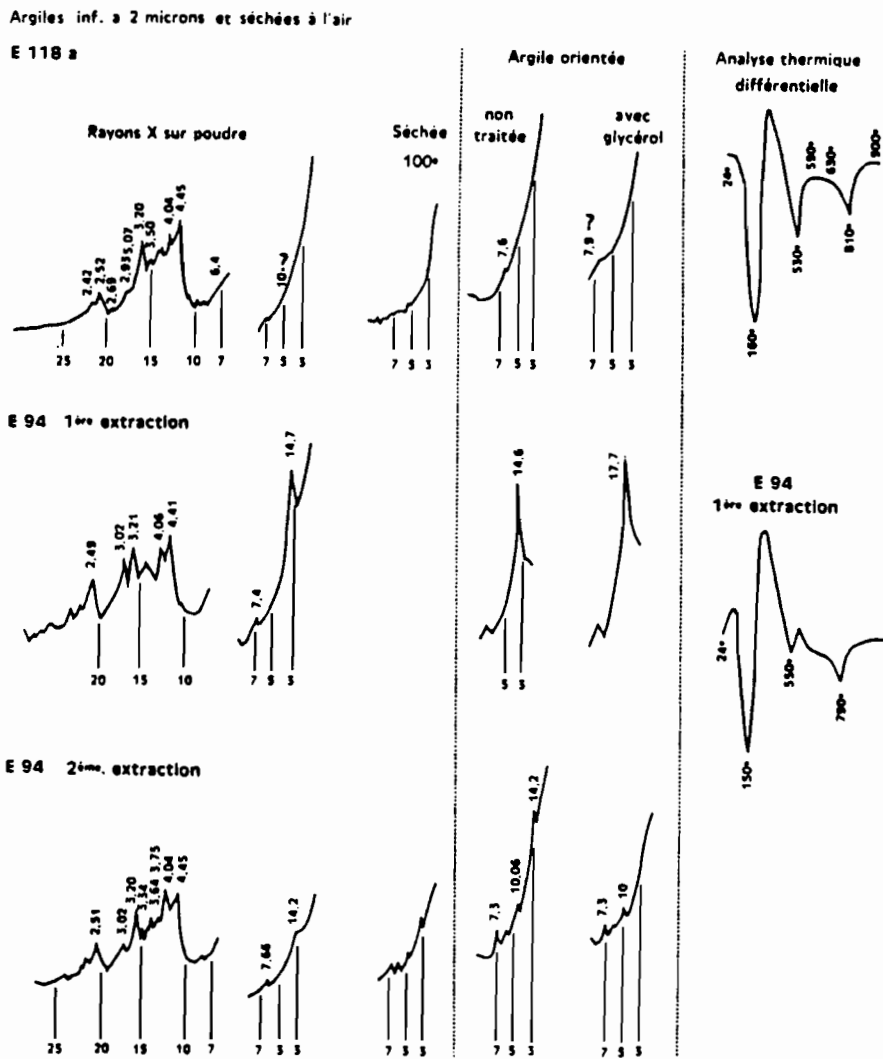


FIG. 14.

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 cendreaux 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 $\text{Al}^{\text{VI}}\text{-OH}$ 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_2O_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 cendres 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											3
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).

éch. E 177 près de E 94
Argile inf à 2 microns
séchée à l'air
Rayons X sur poudre



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.

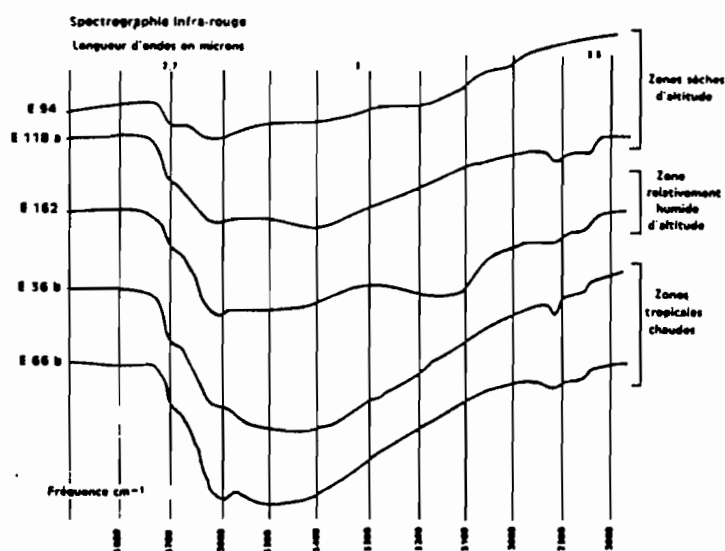


FIG. 16. — Spectrographie infrarouge

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.

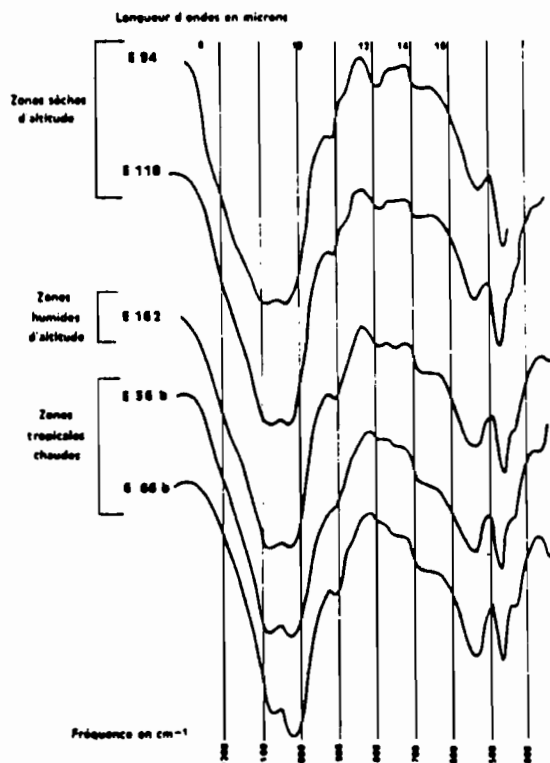


FIG. 17. — Spectrographie infrarouge (suite)

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.

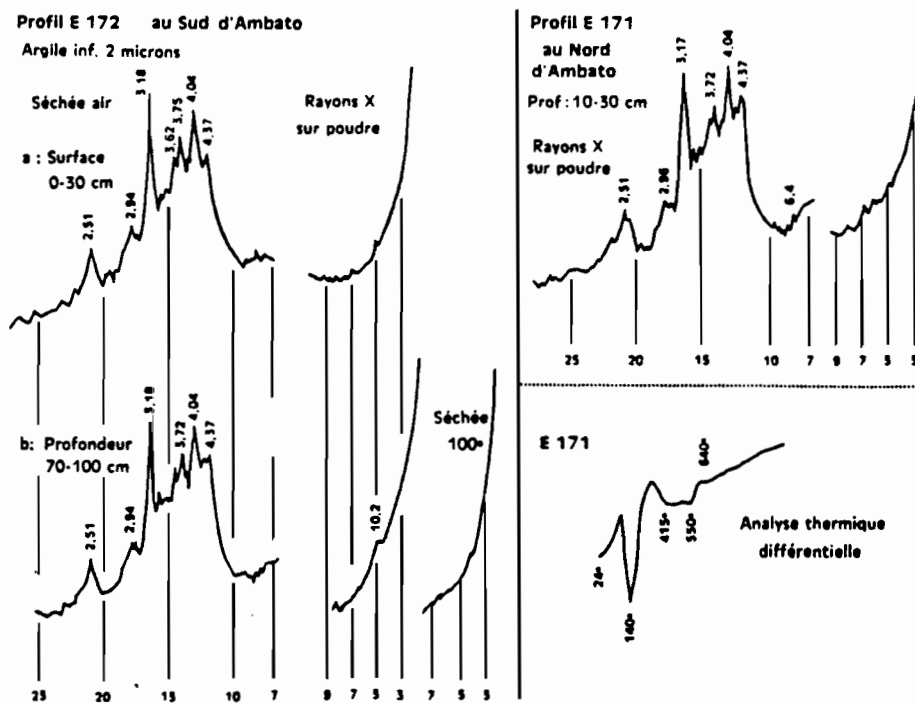


FIG. 18.

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. séchée 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).

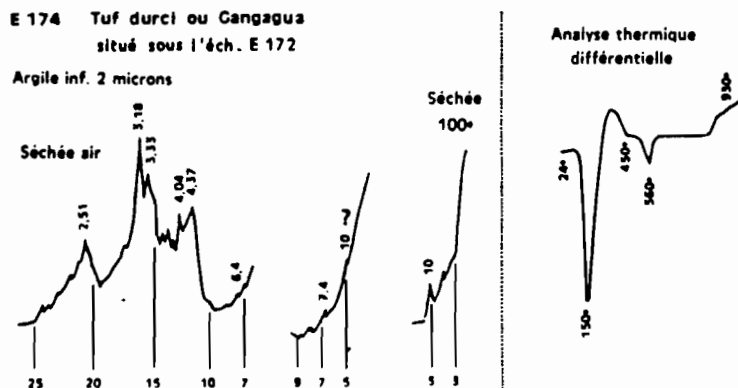


FIG. 19.

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°. Signa- lons aussi une petite raie à 6,4 Å, (fig. 20).

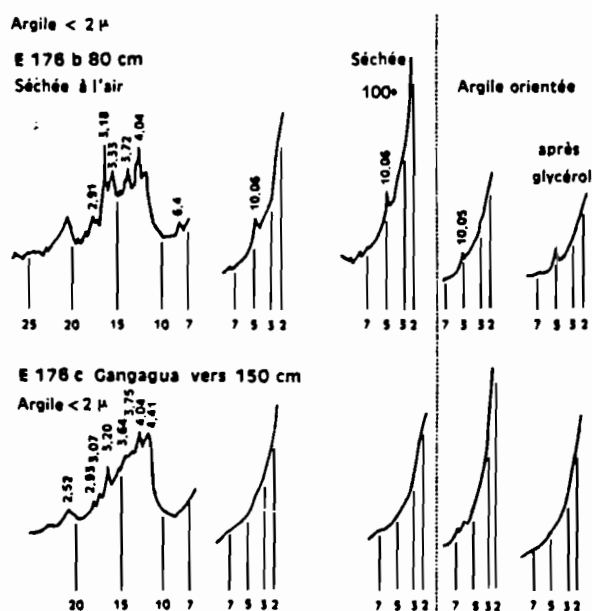


FIG. 20.

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).

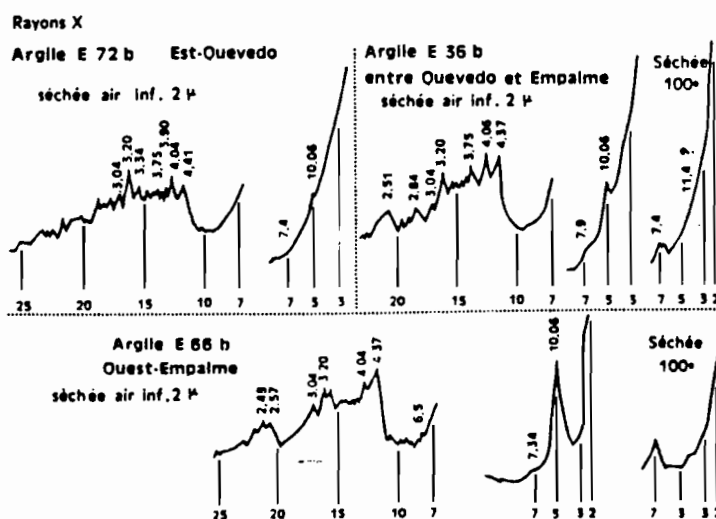


FIG. 21.

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).

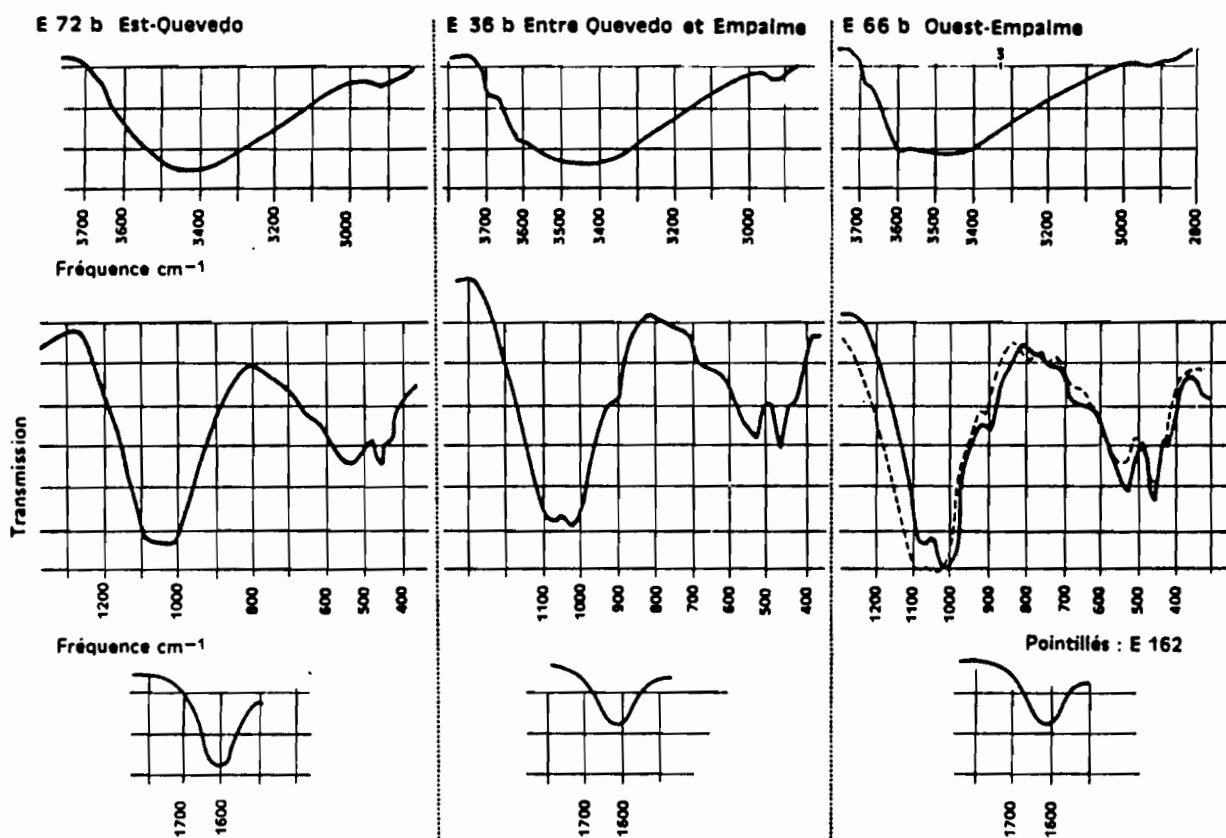


FIG 22. — Diagrammes infrarouge des argiles (vers les régions de plus en plus sèches)

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'hallowysite 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 (FIELDES, 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'hallowysite (planche III).

En dépit de la présence de tubes d'hallowysite 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 hallowysite 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_2O_2 (3)	après SEGALÉN (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 ferrallitisant), 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 différent-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.

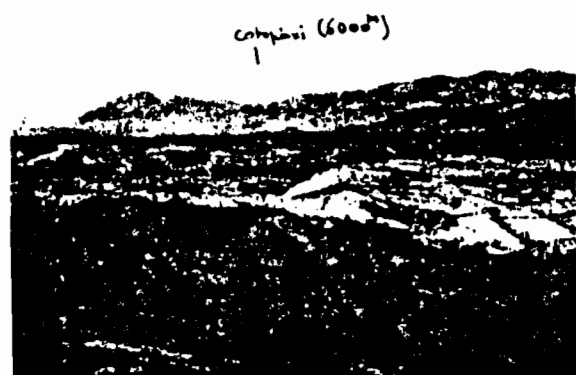


PHOTO 3. — Quelques aspects de la haute vallée interandine avec au fond la cordillère atlantique ou orientale, et le Cotopaxi. Photo prise du versant intérieur de la cordillère Pacifique.



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

PLANCHE II

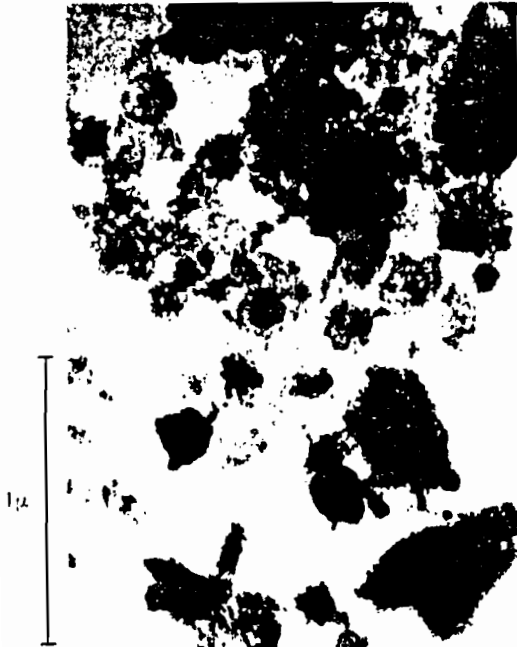


PHOTO 5. — E. 151. (2) (à 3 000 m d'altitude)
amas déchiquetés de fins glomérules avec
quelques rares fibres courtes.

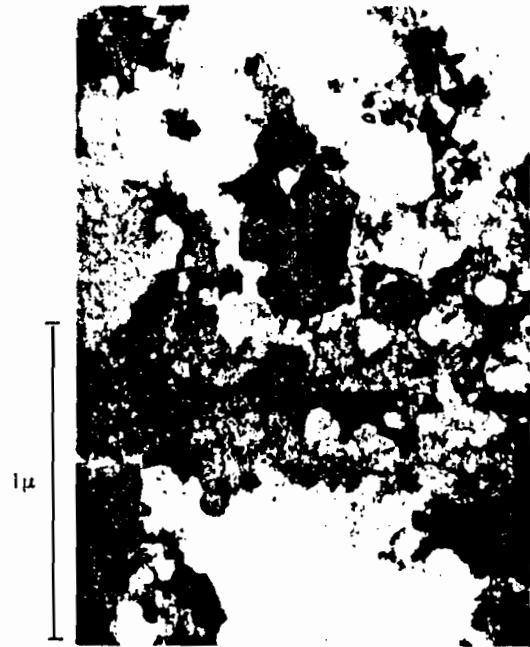


PHOTO 6. — E. 152. (3) (à 3 500 m d'altitude)
amas déchiquetés de fins glomérules avec des
fibrilles plus nettes.

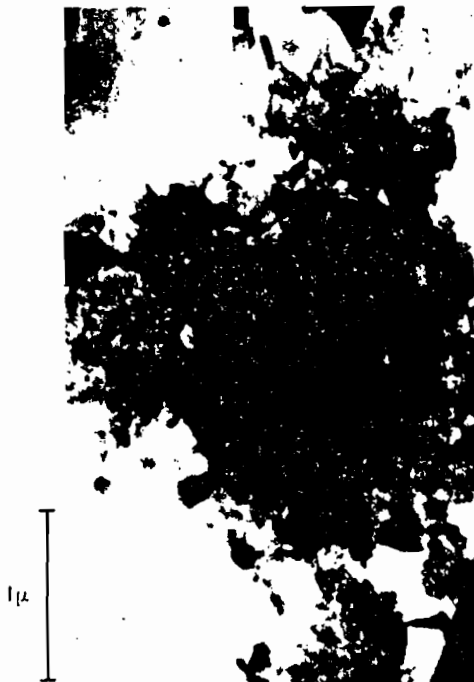


PHOTO 7. — E. 95. (7).

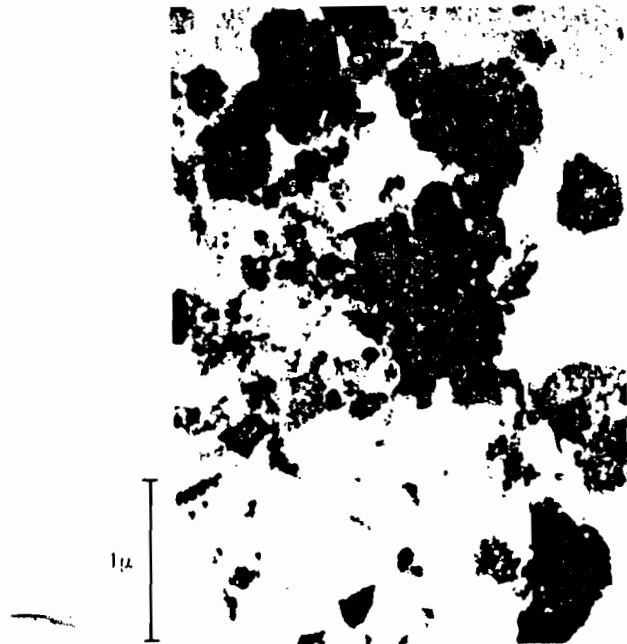


PHOTO 8. — E. 95. (6)

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

PLANCIE III

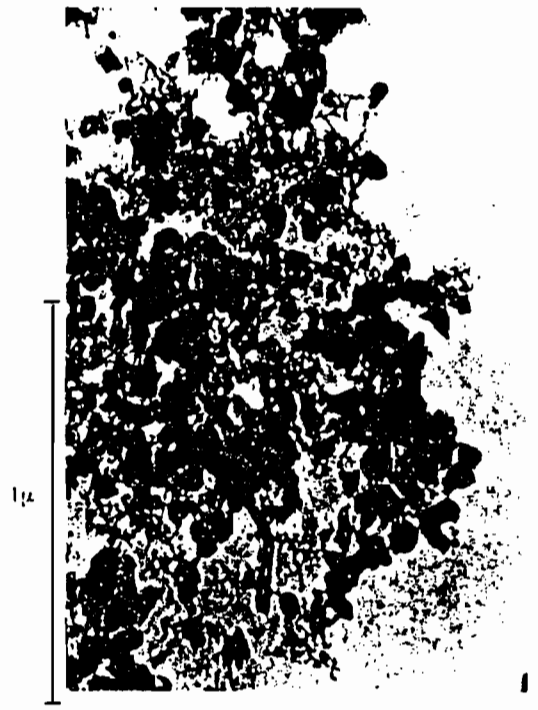


PHOTO 9. -- E. 162.15. Particules sphériques concentriques.

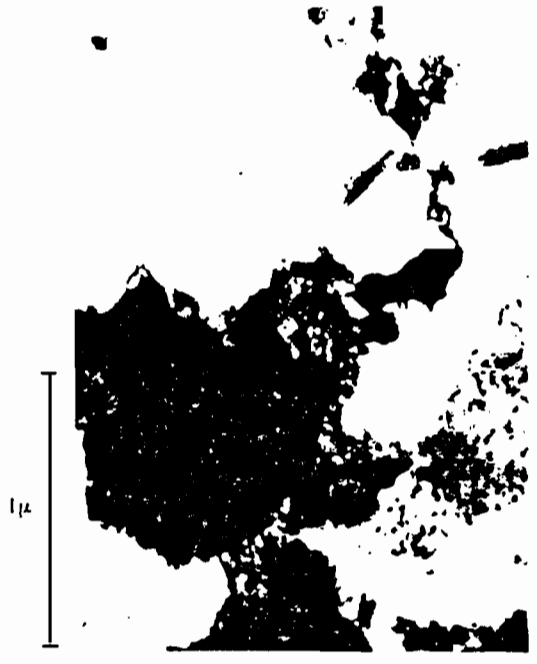


PHOTO 10. -- E. 72.6. (région sèche peu marquée). Amas diffus. Quelques rares ébauches de tubes.



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

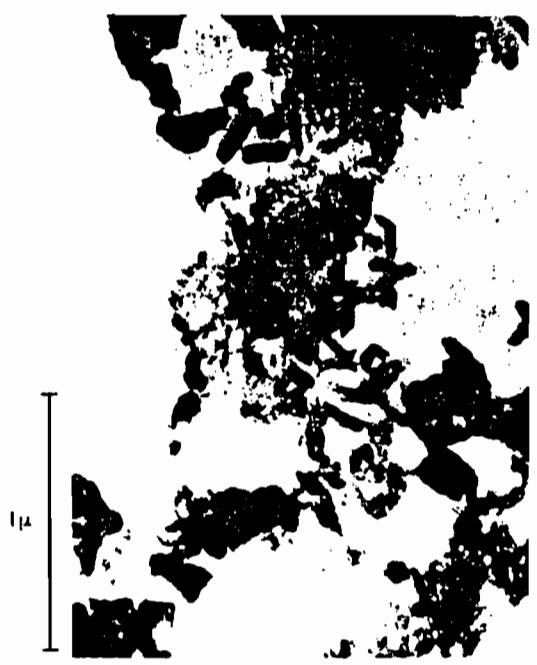


PHOTO 12. -- E. 66.3. Tubes d'halloysite et glomérules concentriques

BIBLIOGRAPHIE

- Anuario hidrológico, 1964. — Servicio Nacional de Meteorología e hidrología n° 2. Quito, Ecuador, 109 p.
- Anuario meteorológico, 1964. — Servicio Nacional de Meteorología e hidrología, 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.
- FIELDS (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand soils, Part II, Allophane and related mineral colloids, *N.Z. J. Sci. Technol.*, pp. 336-350.
- FIELDS (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.
- FISCHER (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 pedológico 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 geológico del ecuador, Ed. Univers., Quito, Ecuador, 70 p.
- SAUER (W.), 1965. — Geología del Ecuador. Ed. del Ministerio de Educacion, Quito, 383 p.
- SEGALAN (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.), TAKAHASHI (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.

IV/- / Caractéristiques de quelques sols d'Equateur /
dérivés de cendres volcaniques /

4ème partie:
Etude des sols du nord de l'Equateur et de quelques Paramons
ORSTOM-Antilles, 1973, 45 pp.

F. COLMET DAAGE
M. DELAUNE
J. TRICHET
C. KIMPE (de)

J. GAUTHEYROU
M. GAUTHEYROU
G. FUSIL
O. YEPEZ
N. ESPINOZA

P L A N

I - INTRODUCTION

II- REGION D'IBARRA

(Sols isohumiques brunifiés)

- 1)- Situation
- 2)- Géologie
- 3)- Climat
- 4)- Minéralogie des sables
 - a) Les cendres
 - b) Les cangagua
- 5)- Morphologie des sols
 - a) Les sols profonds, les sols peu profonds
- 6)- Propriétés
- 7)- Minéralogie des argiles
- 8)- Matières humiques

III - TRANSVERSALE DE QUITO A L'AMAZONIE

Des sols isohumiques aux sols à allophane perhydratés, sans gibbsite et avec gibbsite - Andosols perhydratés mélaniques ou non, dystriccryandepts et hydrandepts.

- 1)- Situation
- 2)- Géologie
- 3)- Minéralogie des sables
 - a) Genre - Cangagua
- 4)- Comparaison des sols des versants faisant face à la vallée interandine des cordillères Pacifique et Orientale à 3500 m d'altitude.
 - a) Morphologie des profils
 - b) Propriétés
 - c) Minéralogie des argiles, cendres, cangagua
- 5)- Col de la Cordillère Orientale à 4000 m d'altitude - Sols à allophane
 - a) Situation
 - b) Morphologie des profils
 - c) Propriétés
 - d) Minéralogie des argiles
- 6)- Versant amazonien - Sol à allophane
 - a) à 3000 m d'altitude : Papallacta
 - b) à 2000 m d'altitude : Baez
 - c) Comparaison avec les sols de Puyo à 1000m d'altitude

IV - PARAMONS D'AMBATO - RIOBAMBA

Dystric-cryandepts et dystrandeps

- 1)- Situation, climat
- 2)- Géologie
- 3)- Minéralogie des sables
- 4)- Paramon Chimborazo 3500m
- 5)- Paramon Riobamba 3750m et bordure du paramon de Riobamba 3400m
- 6)- Comparaison avec les sols de Iatacunga
- 7)- Conclusion

V - REGIONES D'EL ANGEL - SAN GABRIEL - Extrême Nord

Sols à allophane - andosols mélaniques - dystric-cryancepts et dystrandcepts

- 1)- Situation - climat
- 2)- Géologie
- 3)- Sols sur conchagua à 2800m d'altitude
- 4)- Paramon El Angel à 3500m d'altitude
- 5)- Sols à allophane de San Gabriel : 2900m d'altitude

VI - PASTO (Volcan Galeras) - JUD COLOMBIAN

Sols à allophane - andosols mélaniques ou dystric-cryancepts et dystrandcepts

- 1)- Situation
- 2)- Minéralogie des sables
- 3)- Sols à 3800 et 4100m d'altitude - Sols à allophane
- 4)- Sols à 3000 m d'altitude - Sols à halloysite

VII - COMPORTEMENT AU COURS DES DISSOLUTIONS SUCCESSIVES ACIDE-BASE DES SOLS A ALLOPHANE
DES PARAMONS ET DES SOLS A HALLOYSITE

- 1)- Sols à allophane du paramon
- 2)- Sols dans lesquels la présence d'halloysite est évidente et importante.
- 3)- Sols dans lesquels la présence d'halloysite est très probable en quantité notable.

VIII - CONCLUSION

CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SOLS D'EQUATEUR
DERIVES DE CENDRES VOLCANIQUES

4ème PARTIE

ETUDE DES SOLS DU NORD DE L'EQUATEUR ET DE QUELQUES PARAMONS

F. COLMET-DAAGE
J. et M. GAUTHEYROU
Centre ORSTOM des Antilles

M. DELAUNE
Laboratoire de Géologie - ORSTOM
Services scientifiques centraux

G. FUSIL
Laboratoire des Argiles - ORSTOM
Services scientifiques centraux

O. YEPEZ - N. ESPINOZA
Ministère de l'Agriculture
de l'Equateur à Quito

C. de KIMPE
Ministère de l'Agriculture
du Canada à Québec

M. TRICHET
Université d'Orléans

I - I N T R O D U C T I O N

Cette quatrième partie est surtout consacrée aux régions volcaniques d'altitude, situées au Nord et à l'Est de Quito et à l'étude de quelques sols des paramons d'Equateur et du Sud de la Colombie.

Les études de terrain ont été effectuées par Mr. F. COLMET-DAAGE, O. YEPEZ et N. ESPINOZA, en juin et septembre 1962, grâce à la très efficace collaboration matérielle du Ministère de l'Agriculture et de la mission F.O. à Quito.

Les analyses chimiques, les extractions des argiles et les sables, les traitements divers avant les examens minéralogiques des argiles, ont été réalisés par M. et J. GAUTHEYROU, au laboratoire du Centre ORSTOM des Antilles en Guadeloupe.

Les sables ont été examinés par Mme DELAUNE, au laboratoire de Géologie et la diffractométrie de rayons X, effectuée par G. FUSIL, au laboratoire des argiles des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy.

C. de Kimpe s'est chargé de la spectrographie dans l'infrarouge, à la station de recherches du Ministère de l'Agriculture du Canada à St Foy - Québec et TRICHET, de la microscopie électronique à Paris.

REMARQUE -

Il existe, dans une très large partie de la vallée interandine, de très épaisses formations volcaniques beiges brunes de cendres durcies, intercalées entre des couches de ponces. Ces formations dures sont appelées en Equateur ; Cangagua et correspondent aux Talpetate d'Amérique Centrale.

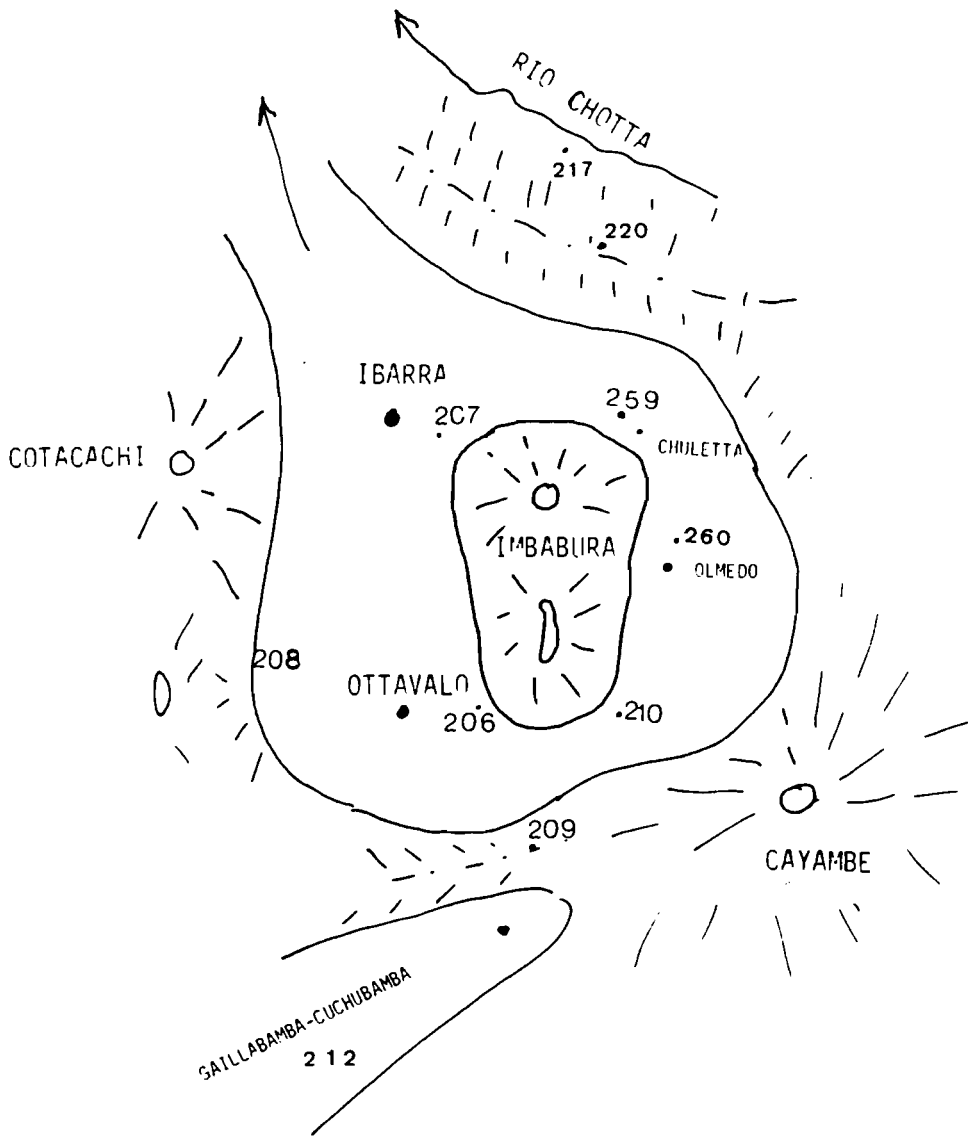
.../...

Nous conserverons le nom local pour désigner ces formations qui sont le plus souvent des tufs volcaniques, durcis aussitôt après l'éruption, par une légère cimentation siliceuse, sans que la présence de sols évolués ait été pour cela nécessaire.

Il pourrait s'agir aussi de duripan provenant d'anciens sols dont les horizons supérieurs ont été depuis érodés. Ces duripan peuvent, soit avoir été recouverts par des cendres plus récentes, soit s'être ameublés en surface par suite de l'action des plantes en donnant un sol sujet à une nouvelle évolution pédologique.

Il pourrait s'agir aussi dans certains cas de duripan en formation, car les conditions climatiques actuelles s'y prêtent bien dans beaucoup d'endroits.

Les termes "cangagua dure" ou "cangagua délitée" pourront donc avoir suivant les cas des significations pédologiques différentes. Lors de l'examen des profils "sur cangagua" il aurait fallu sonder profondément dans la cangagua dure, ce qui ne nous a pas été possible au cours de ces missions.



II - LES SOLS DE LA REGION D'OTTAVALO - IBARRA

- Sols isohumiques ou brunifiés -

1) - SITUATION -

Le bassin d'Ottavalo - Ibarra est situé à une centaine de kilomètres au Nord de Quito. C'est une dépression doucement inclinée d'Ottavalo (2500m d'altitude) vers Ibarra (2200m). Elle se prolonge par une série de terrasse d'altitude décroissante qui bordent au Nord-Ouest un affluent du Rio Chotta.

AU NORD, un massif sépare le bassin d'Ibarra de la très profonde entaille du Rio Chotta (1500m d'altitude).

AU SUD, le col qui permet l'accès à la vallée de Gallabamba n'est pas très élevé: 3000 m environ.

Plusieurs importants volcans encadrent ce bassin. Le Cotacachi à l'Ouest culmine à 4940m et ses flancs sont largement cultivés. L'Imbabura forme un important massif de 4630m d'altitude, mais qui ne fait pas, à proprement parler, partie de la cordillère orientale, puisqu'il est ceinturé au Nord et à l'Est par une vaste dépression cultivée, la vallée de Chuleta, qui la sépare au Sud Est de l'énorme volcan Cayambé (5800m d'altitude).

2) - GEOLOGIE -

D'après SAUER (1965), le volcan Cotacachi, aujourd'hui démantelé, aurait surtout éjecté des lavas de type andésite, avec en moindre proportion, des andésites à caractère basaltique, qui ont subi des modifications de leur composition.

L'Imbabura, par contre, a éjecté, au cours de sa vie, des pyroclastiques formant localement transition vers les andésites à amphiboles.

Le Cayambé, par contre, est caractérisé par la dominance des andésites à amphiboles et des matériaux moins basiques.

Les projections pyroclastiques récentes ne représentent cependant, qu'une partie du matériau mère des sols de ce bassin. D'épais sédiments volcaniques consolidés ou "cangagua" occupent de très importantes surfaces et beaucoup de sols peu profonds semblent provenir de l'ameublissement sur 50 cm à 80 cm de cette cangagua dure.

Ces cangagua sont localement recouvertes de cendres plus récentes qui se sont surtout maintenues en épaisseur notable dans les zones peu accidentées. Ce sont justement ces sols profonds et cultivés intensivement que nous avons recherchés pour nos prélèvements, en choisissant, de préférence, les sites en légère éminence pour éviter d'avoir des apports superficiels par ruissellement.

3) - CLIMAT -

La région est relativement bien arrosée, mais on ne dispose que de deux relevés à Ottavalo (700mm par an) et Ibarra (582mm) avec deux mois et demi écologiquement secs, d'après GAUSSEN.

La température moyenne mensuelle est constante toute l'année entre 14 et 16°C avec des maxima absolus de 22°-24° et des minima de 5 à 6°.

La vallée de Chuleta, sur le versant Est de l'Imbabura, plus proche de l'Amazonie, serait nettement plus humide (800 à 900 mm).

4) - MINÉRALOGIE DES SABLES -

Il faut distinguer les cendres et la cangagua. Cette distinction n'est pas toujours facile à faire, car les dépôts de cendres recouvrent le plus souvent, la cangagua. En profondeur, au-dessus de la cangagua encore dure, on ne sait pas très bien déterminer ce qui provient du recouvrement de cendre ou de la cangagua délitée,

a) - Les cendres -

La composition des sables est très homogène. La hornblende domine très largement constituant 70 à 90% des minéraux lourds. La proportion d'hypersthène ne dépasse guère 10 à 25% et l'augite est très peu représentée. Les minéraux lourds constituant environ 20 % des sables totaux de 50 à 500 microns. Dans les trois profils examinés, il semble qu'il y ait tendance à l'accroissement de la hornblende en profondeur et diminution corrélative de l'hypersthène, ce point est particulièrement sensible sur les pentes du Cotacachi où l'hypersthène disparaît dans l'horizon de profondeur particulièrement sableux.

Tableau : Minéraux lourds des sables de 50 à 500 microns

N° Profil	Profond. cm	Hypersthène	Augite	Hornblende	M.L % S
IBARRA - Nord IMBABURA - SAN ANTONIO					
E 207 b	40 - 60	22	1	77	21
c	120 - 140	19	2	79	20
COTACACHI - Vers la lagune CUICOCHA					
E 208 a	0 - 20	18	4	78	24
b	40 - 70	10	2	88	34
c	130	Trace	6	94	25
Col au Sud d'OTTAVALO - Panamerican					
E 209 a	0 - 20	26	3	71	17
b	50 - 80	14	2	84	23
c	(140) (cangagua)	(27)	(7)	(66)	(18)
Près d'OLMEDO à l'EST de l'IMBABURA					
E 260 a	0 - 20	26	2	72	
b	40 - 70	23	2	75	
c	80 -100	21	5	74	
d	(cangagua) (100-120)	26	8	66	
E 261 a	0 - 20	25	3	72	

Certains auteurs admettent que l'altération de l'hypersthène est plus rapide que celle de la hornblende, ce qui expliquerait la diminution, voire la disparition de l'hypersthène dans les horizons profonds les plus anciens. Il serait difficile

d'expliquer que dans les sols beaucoup plus évolués d'Equateur, il existe des horizons riches en hornblende, en recouvrement sur des horizons riches en hypersthène. Il semble donc que c'est plutôt dans la variation originelle de la composition du dépôt qu'il faut chercher l'explication de ces différences de composition.

b) - La Cangagua -

La composition minéralogique des cangagua est plus variable.

Il est nécessaire de distinguer:

- La cangagua superficielle que l'on trouve à la base des sols, et dont la tarière ou la pelle ne peut pénétrer que la partie supérieure déjà un peu ameublie.

De ce fait il peut y avoir mélange avec des cendres de recouvrement plus récentes.

- La cangagua dure prélevée plus en profondeur, et souvent intercalée en bancs d'épaisseur variable entre des couches de ponce.

Les cangagua superficielles, prélevées à la base des profils, au Sud du bassin ont une composition analogue à celle de la cendre de recouvrement avec dominance de la hornblende. Un échantillon de ces cangagua a été prélevé au Sud d'Ottavalo, un autre face au Cayambé sur l'ancienne route d'Ibarra par Chuletta.

Il y aurait un peu moins d'hornblende et un peu plus d'augite que dans la cendre de recouvrement.

Tableau : Minéraux lourds de l'horizon inférieur proche de la cangagua -

N° Echant.	Profondeur	Hypersthène	Augite	Hornblende	Olivine	ML % S
Au col au Sud d'Ottavalo						
209 c	120 - 140	27	7	66	0	18
Face au Cayambé ()						
210 b	50 - 60	23	8	69	0	13
Près d'OLMEDO						
E 260 d	100-120 cm	26	8	66	0	
Beaucoup plus au Sud à Cuchabamba						
212 b	30 - 60	33	11	55	0	(23)

L'échantillon 212 b prélevé beaucoup plus au Sud, un peu au Nord du Rio Gallabamba, montre déjà une différence sensible de composition avec une légère augmentation de l'hypersthène et de l'augite et décroissance de la hornblende.

Par contre, les cangagua dures prélevées en profondeur, soit au Nord, près du col entre Ibarra et le Chotta, soit au Sud près de Cayambé, ont une composition bien différente avec une proportion voisine de l'hypersthène, augite et hornblende et quelques olivines.

Tableau : Minéraux lourds des cangagua dures -

N° Echant.	Profondeur	Hypersthène	Augite	Hornblende	Olivine	ML % S
Au Nord d'Ibarra, col vers le Chotta						
220	vers 1 m	39	32	25	4	(17)
Au Sud du bassin, près du village de Cayambé						
221	plusieurs mètres	23	38	26	13	23

Il s'agirait donc de formations volcaniques plus anciennes, correspondant à des phases d'éruption nettement plus basiques, du type andésites à pyroxènes, alors que les cendres de recouvrement ou les cangagua superficielles correspondraient plutôt à des andésites ou dacites à hornblende.

5) - MORPHOLOGIE DES SOLS -

a) - Les sols profonds -

On ne les trouve que sur les plateaux protégés par l'érosion.

Presque tous les sols examinés ont une coloration brun noir à noir sur au moins 60 à 80 cm, parfois 150 cm - 10 YR 3/2 -

Jusqu'à 60 à 80 cm de profondeur environ, la texture apparente est celle d'un sable fin, doux au toucher, mais pulvérulent, sans cohésion et sans onctuosité.

Plus en profondeur, le sol reste sableux (208) ou devient un peu argileux, soit avec la même couleur, soit plus brunâtre.

On passe ensuite, à une profondeur variable : 80 cm, 1,5 m, à un tuf brunâtre ou un duripan très dur à sonder, qui est la cangagua. Au-dessus de ce tuf, existe fréquemment un niveau beaucoup plus noir, soit uniforme, soit en taches, conséquence d'un certain engorgement en eau temporaire en période de pluies.

Le plus souvent, l'horizon labouré a une coloration un peu plus claire 10 YR 3/2 ou 4/2, sur 20 à 30 cm, que l'horizon sous-jacent plus noir : 10 YR 3/1. S'agit-il de recouvrements plus récents, ou d'une transformation de la matière organique sous l'effet de la culture en surface ou de l'engorgement temporaire en profondeur?

b) - Les sols peu profonds -

Ce sont malheureusement les plus fréquents. Les sols sont moins foncés en surface et la cangagua apparaît dès 50 ou 60 cm de profondeur. On remarque une accentuation des taches noires, souvent luisantes, avec des reflets très noirs, brillants dans les 20 cm au-dessus de la cangagua déjà dure à sonder. Il existe parfois, en profondeur, sur 5 à 20 cm d'épaisseur, un horizon franchement très noir, presque uniformément, surtout dans les parties concaves et les bas de versants, là où l'engorgement est plus important ou durable.

Le passage à la cangagua est assez rapide. Elle est généralement de coloration brune jaunâtre : 10 YR 4/3 à 4/4. La partie encore relativement sondable paraît sablo-argileuse, un peu collante, difficile à tamiser à l'état humide. La cangagua paraît plus sableuse, mais le délitement des particules est peut-être incomplet. Les minéraux noirs sont bien visibles en plus ou moins grande abondance.

6) - PROPRIETES -

L'analyse granulométrique indique une grande constance dans la composition de ces sols, d'une part dans les horizons de surface et d'autre part, dans les horizons de profondeur similaires.

.../...

Tableau : Granulométrie des horizons de surface -

Situation	N° Echant.	Argile %	Limon		Sables %		M.O %
			2 - 20	20 - 50	50 - 200	200-2000	
OTTAVALO	206 a	13.3	22	9.1	41	13.8	2.8
IBARRA	207 a	14.5	25	9.7	37.4	13.3	2.3
COTACACHI	208 a	10.3	28.2	12.4	30.2	8.1	8.6
COLOTTAVALO	209 a	13.8	25.7	12.3	31.9	10.0	7.8
CAYAMBE (face)	210 a	12.7	23.8	11.3	39.9	12.4	2.4

En profondeur, juste au-dessus de la cangagua dure, il y a un peu plus d'argile, comme on pouvait le déduire des observations de terrain. La cangagua, face au Cayambé est nettement la plus argileuse.

Tableau : Granulométrie des horizons profonds au contact de la cangagua dure -

Situation	Profondeur .	Argile %	Limon %		Sables %		M.O %
			2 - 20	20 - 50	50-200	200-2000	
OTTAVALO	60-90	21.9	21.2	11.0	29.7	15.8	2.7
IBARRA	120-140	19.2	28.2	11.7	25.6	15.7	1.2
COLOTTAVALO	120-140	22.3	25.1	11.2	30.9	5.7	3.1
CAYAMBE(face)	60	38.7	31.5	7.4	17.5	4.9	1.0
Cangagua dure IBARRA		16.1	31.7	18.2	24.8	6.9	1.1

La cangagua dure prélevée au Nord d'Ibarra renferme 16 % d'argile et sa composition est très analogue à celle des cangagua superficielle.

Les humidités obtenues à pF 3 sur sol frais ou sur sol sec sont les mêmes. Ces sols sèchent une partie de l'année, surtout les horizons supérieurs et il est donc normal que par dessiccation à l'air, on ne puisse observer de déshydratation irréversible comme dans les sols à allophane des régions constamment humides d'Equateur. On constate, cependant, pour les humidités à pF 4,2, des valeurs souvent nettement plus basses lorsqu'on opère sur sol séché à l'air que sur le sol conservé humide. Cette différence est peu sensible en surface, mais souvent bien nette dans les horizons plus profonds. Pour le moment, nous ne donnons pas d'explications, mais ce point mérite d'être éclairci. A noter qu'au moment du prélèvement, l'humidité du sol était très voisine de celle mesurée pour le pF 3, sauf dans certains horizons profonds, gorgés d'eau, au-dessus de la cangagua.

.../...

La différence entre les humidités aux pF 3 et 4,2, correspond sensiblement à l'eau utilisable et est de 10 à 12 % en moyenne. L'eau utilisable serait plus importante : 20 %, ainsi que le pF en valeur absolue, dans les sols plus riches en matière organique d'altitude (208 - 209) : ce qui souligne l'utilité des mesures destinées à maintenir celle-ci ou à l'accroître. En profondeur cependant, à proximité de la cangagua, un peu argileuse, la rétention en eau est déjà assez élevée.

Les teneurs en matière organique sont de l'ordre de 2 à 4 % dans les 20 premiers centimètres, vers 2500m d'altitude, et plus élevées à 3000 m, atteignant 8 %. Mais, il s'agit d'un simple ordre de grandeur. Des teneurs de 1 à 3 % sont encore fréquentes vers 1 m de profondeur. Le rapport C/N varie peu : 10 à 12.

Tous ces sols sont relativement bien pourvus en cations échangeables (10 à 12 mé %) et dans l'ensemble peu acides, avec des pH eau voisins de 6. Les teneurs en cations échangeables sont sensiblement proportionnelles au taux d'argile, mais il y aurait des indices de décroissance sensibles dans les niveaux de surface, en particulier, du magnésium, sans doute par la culture, l'acidification due aux engrais.

Tous les sols examinés étaient très bien pourvus en phosphore.

7) - MINÉRALOGIE DES ARGILES -

Aucun de ces sols ne réagit avec le test FIELDS au fluorure de sodium. La présence de substances allophaniques riches en aluminium est donc à exclure. La densité apparente est voisine ou supérieure à 1.

Les fractions inférieures à 2 microns de tous ces sols, présentent une raie bien marquée à 4,45 Å, qui indique l'existence, en quantité notable, d'argile cristalline. Les autres raies vers 7, 10 ou 14 Å sont souvent peu visibles ou incertaines, de sorte qu'il est difficile, dans bien des cas, de préciser la nature exacte des argiles. Il s'agirait donc de substances mal cristallisées, dont l'identification est difficile.

Toutes les fractions inférieures à 2 microns montrent aussi des raies importantes à 4,04 et 3,21 Å qui correspondent à l'andésine ou au labrador, accompagnées des raies annexes suivantes, plus ou moins importantes ou apparentes : 6,4 - 3,75 - 3,65 ou 3,64 - 3,36 - 3,01 - 2,94 Å. Il y aurait aussi un peu de cristobalite (4,04 et 2,84). La hornblende est indiquée par la raie à 2,72 Å.

Examinons quelques profils en détail.

1) OTTAVALO : E 206

L'horizon de surface renferme des minéraux primaires en abondance dans la fraction argile (raies à 4,05 et 3,21 internes), ainsi qu'une notable proportion d'argile cristalline indiquée par les raies bien marquées à 4,45 et 2,52 Å. Par contre, les raies à 7,5, 10 et 13 sont peu marquées dans le diagramme de poudre. La raie à 7,5 est plus nette sur l'échantillon orienté et indiquerait la présence de métahalloysite,

.../...

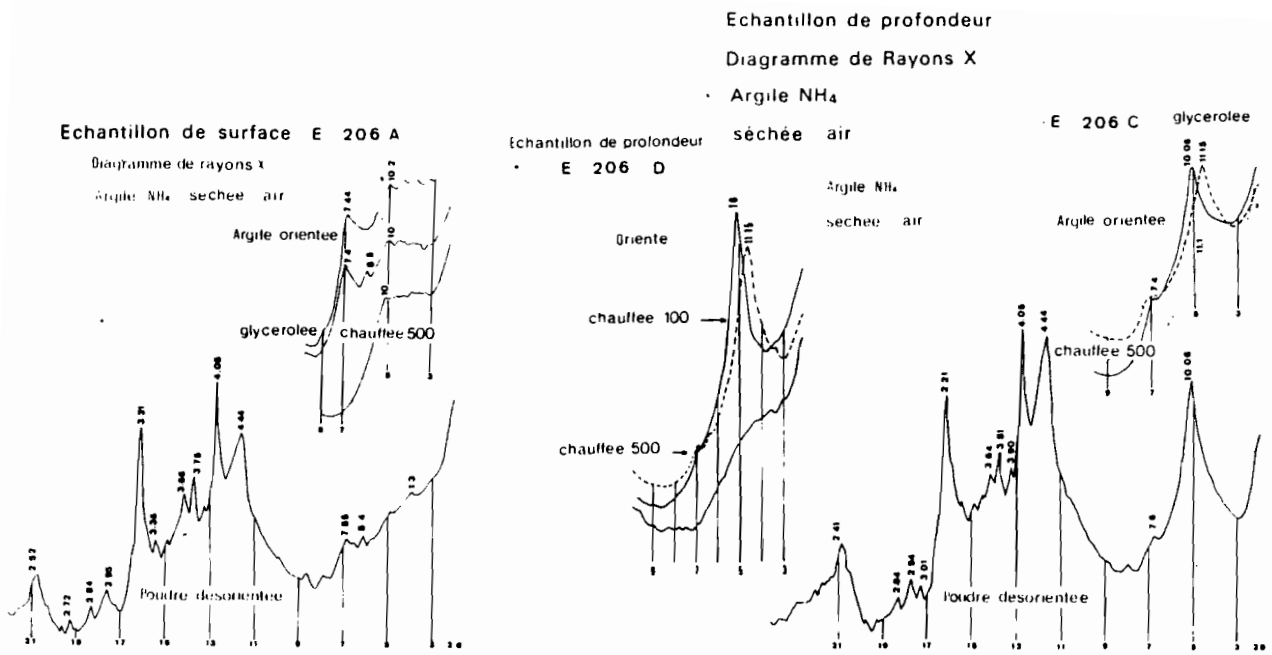


Figure OTTAVALO a: 0-20cm c: 60-90cm d: 90-100cm

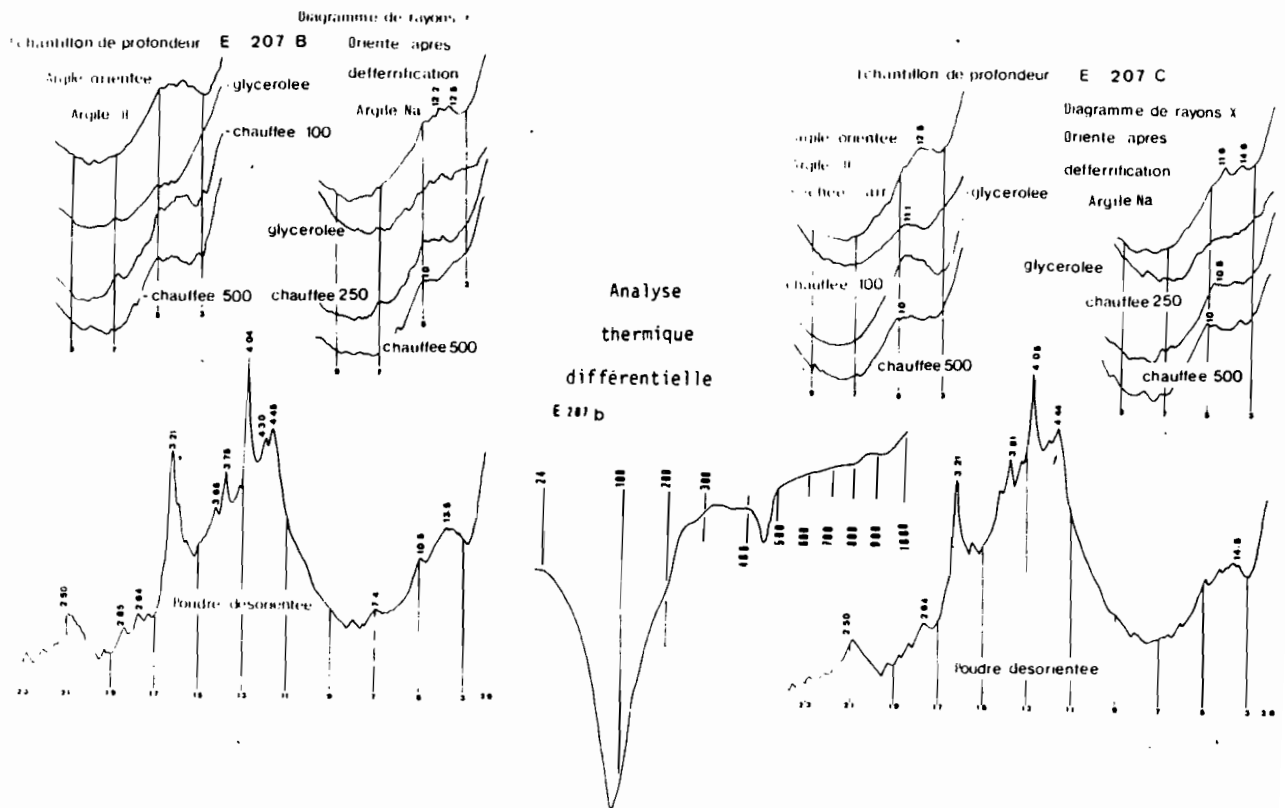


Figure IBARRA a: 0-20cm c: 120-140cm



E 203 c Cliché 5918 x 50.000



E 206 c Cliché 5915 x 65.000



E 216c Cliché 5917 x 75.000

Sols jeunes à halloysite glomérulaire
et tubulaire

clichés : TRICHET

sans doute une forme encore mal cristallisée, pour laquelle la raie vers 7 demeure très faible. Une raie peu nette à 10 semble inchangée au glycérol et par chauffage à 500° et l'existence de légères raies à 5 et 3,36 peut faire penser à un peu d'illite.

En profondeur, dans l'horizon un peu argileux, proche de la cangagua dure, c'est, par contre, une belle halloysite. La raie à 10 Å est intense, gonfle à 11,5 au glycérol, pour se rabattre à 7,5 Å à 100°. Une petite raie persiste à 11 Å à 500°, indiquant peut-être un peu d'interstratifié chlorite-vermiculite. Il y aurait un peu de métahalloysite. Les raies des minéraux primaires sont les mêmes qu'en surface.

Dans la cangagua dure, la raie à 10 Å est encore plus marquée, passe à 11,1 au glycérol et se rabat à 7,5 à 100°. Un léger fond persiste à 500° vers 13 Å, indiquant peut-être un peu de chlorite. Il n'y aurait pas de métahalloysite.

Le microscope électronique montre de très jolis enroulements concentriques, de 0,2 à 0,3 microns, analogues à ceux que nous avons déjà signalés dans les sols d'altitude d'Equateur et qui sont connus également dans divers sols volcaniques encore jeunes (SIEFFERMANN 1969, etc...) Ce faciès enroulé est accompagné de tubes courts et renflés qui caractérisent bien les halloysite encore jeunes.

2) - IBARRA - 207 -

On retrouve sensiblement les mêmes raies dues aux minéraux primaires de la cendre : plagioclases, cristobalite, hornblende. La raie à 4,4 est bien marquée, indiquant déjà un état avancé d'organisation de l'argile, mais il est difficile de caractériser celle-ci. Qu'il s'agisse des échantillons non traités saturés en NH_4^+ ou des échantillons défferrifiés saturés en sodium, les pics et leurs variations avec les traitements sont peu nets. Tout au plus, peut-on dire qu'une bande vers 12 - 14 Å passe à 10 Å par chauffage à 500°C et même déjà à 250°C. Le traitement au glycérol semble provoquer un affaissement de ces raies, mais on ne peut dire s'il y a eu gonflement.

L'analyse thermique n'indique guère la présence d'argiles cristallines en quantité notable. On remarque un fort départ d'eau à 100° suivi d'inflexions à 200° 270° - 350° et surtout 450°. Le crochet exothermique à 850° est très peu marqué.

Il s'agirait d'argile très mal cristallisée à comportement de vermiculite ?

3) - COTACACHI - 208 -

Les minéraux primaires sont abondants et en proportion analogue dans tout le profil : cristobalite, hornblende, probablement aussi un peu de quartz, mais la raie à 4,45 est importante dans tout le profil, indiquant la présence d'argile cristalline en quantité notable.

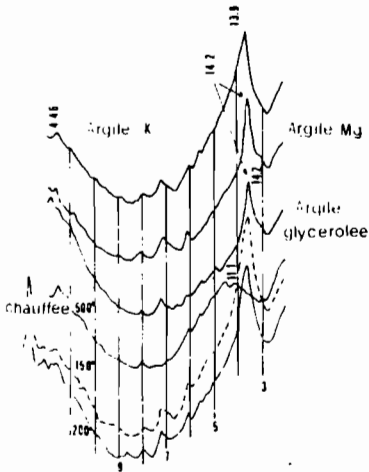
En surface, la raie à 14 est bien marquée, elle gonflerait très légèrement au glycérol, mais cela demeure incertain, et se rabat à 11-12 Å par chauffage à 500°. Ces résultats sont les mêmes sur échantillons non traités, défferrifiés, saturés en Na ou saturés en Mg. Par saturation en K, la raie à 14 demeure inchangée.

Sur échantillon défferrifié saturé en Mg la raie à 14 reste inchangée par chauffage à 150° ou 200° et commence à décroître à 12,8 à 250°. La défferrification permet un passage à 11,4 à 500° au lieu de 12,8 avant traitement.

L'analyse thermique n'indique que deux très petits crochets, endothermique à 480° et exothermique à 850°. Le départ d'eau à 100° est très important et suivi d'un autre départ à 200°. Un large crochet exothermique à 320° est sans doute dû à la matière organique résiduelle.

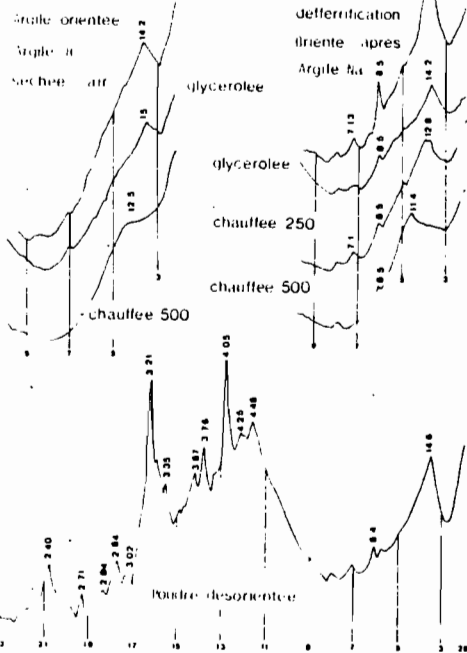
Echantillon de surface E 208 A

Diagramme de rayons X orienté



Echantillon de surface E 208 A

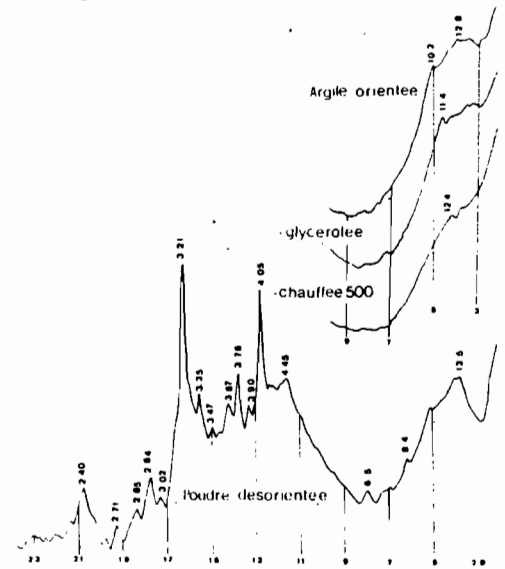
Diagramme de rayons X



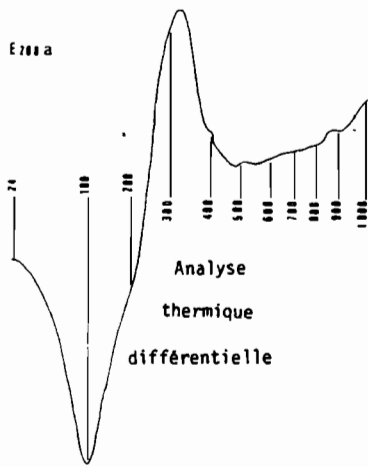
Echantillon de profondeur E 208 B

Diagramme de rayons X

Argile NH. séchée air



E 208 a

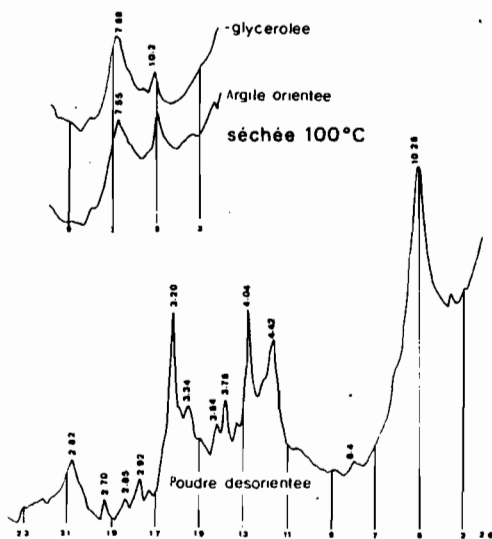


Analyse thermique différentielle

Echantillon de profondeur E 208 C

Diagramme de rayons X

Argile NH. séchée air



Echantillon de profondeur E 209 C

Diagramme de rayons X

Argile NH. séchée air

Argile orientée

Orienté apres

defferritication

Argile Na

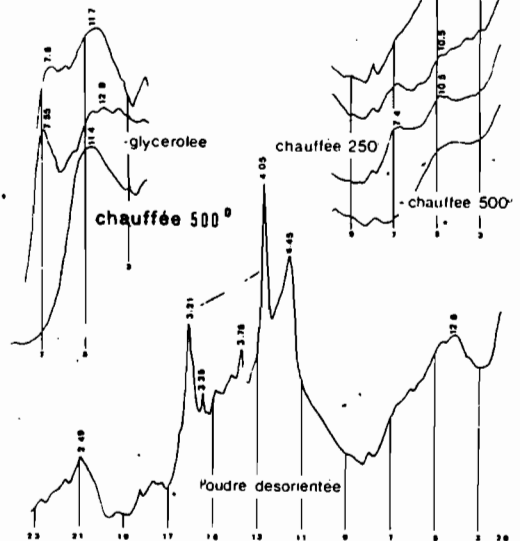


Figure COTACACHI a: 0-20cm b: 40-70cm c: 130cm

Figure COL OTTAVALO c: 120-140cm près Cangagua

Il pourrait donc y avoir une argile très mal cristallisée à comportement d'interstratifié chlorite-vermiculite, mais peut-être s'agit-il de montmorillonite alumineuse. Une petite raie à 8,5 Å pourrait être attribuée à la hornblende.

Plus en profondeur, la raie à 13,5 est moins nette et semble légèrement gonflée au glycérol, mais cela reste incertain, pour se rabattre à 12,4 à 500°. Une raie à 10,2 Å, passant à 11,4 Å au glycérol et disparaissant à 500°C, indiquerait un peu d'halloysite.

Tout en profondeur, par contre, dans l'horizon sableux, l'halloysite 10 Å est bien représentée. La raie à 10 Å est très intense et passe à 7,55 par séchage à 100°, avec persistance d'une petite raie à 10 Å. Il est difficile de faire des hypothèses sur l'origine de cette raie : Illite, palygorskite L'halloysite, en tout cas, domine très largement.

4) - COL D'OTTAVALO - E 209

Seul, l'échantillon de profondeur, au contact de la cangagua et provenant en partie de celle-ci, a été examiné.

La raie vers 12,8 est mal définie dans le spectre de poudre. Sur échantillon orienté, une raie vers 11,7 semble passer à 12,8 au glycérol, avec des incertitudes et se rabattre à 11,4 à 500°. Sur échantillon différencié et saturé en sodium, il ne resterait plus qu'une raie vers 10,5 Å, inchangée au glycérol et chauffage à 250° ou 500°.

Une raie à 7,5 - 7,9 Å apparaît nettement après séchage à l'air et indiquerait la présence d'halloysite. Mais, il est difficile de préciser la nature du minéral qui lui est associée. La défférenciation semble altérer ce minéral à 12,8 Å ou, s'il s'agit d'une vermiculite, permettre sa contraction. La présence d'illite ou de palygorskite ne peut être affirmée sans des études plus complètes.

5) - VERSANTS DE LA VALLEE DE CHULETTA - OLMEDO - CAYAMBE -

Cette vallée ceinture l'Imbabura au Nord et à l'Est. Les sols, sauf dans les parties basses, sont en général peu profonds, avec un horizon très noir de 10 à 30 cm d'épaisseur, juste au-dessus de la cangagua dure ou provenant de la fragmentation imparfaite de celle-ci.

Face au Cayambé (E 210) les sols sont très peu profonds et semblent avoir été recouverts par les cendres sur une faible épaisseur.

L'échantillon de surface présente des raies importantes à 4,43 et 2,52 Å, mais seulement de petites raies à 10,7 et 13,8 Å. Sur échantillon orienté, on ne voit qu'une raie à 10,2 stable au glycérol et à 500°. La défférenciation améliore ces raies. Le traitement prolongé au citrate, puis avec KCl ou MgCl² à 100°, provoquerait une dissolution de la substance, car des raies sont très atténuées. Seule, la raie à 10,2 à 500°, persiste avec netteté. Le traitement KCl aurait dû pourtant renforcer la raie à 10, s'il s'était agit d'illite.

Il paraît donc difficile de préciser la nature exacte de ce minéral à 10 Å, pauvrement cristallisé et relativement solubilisable.

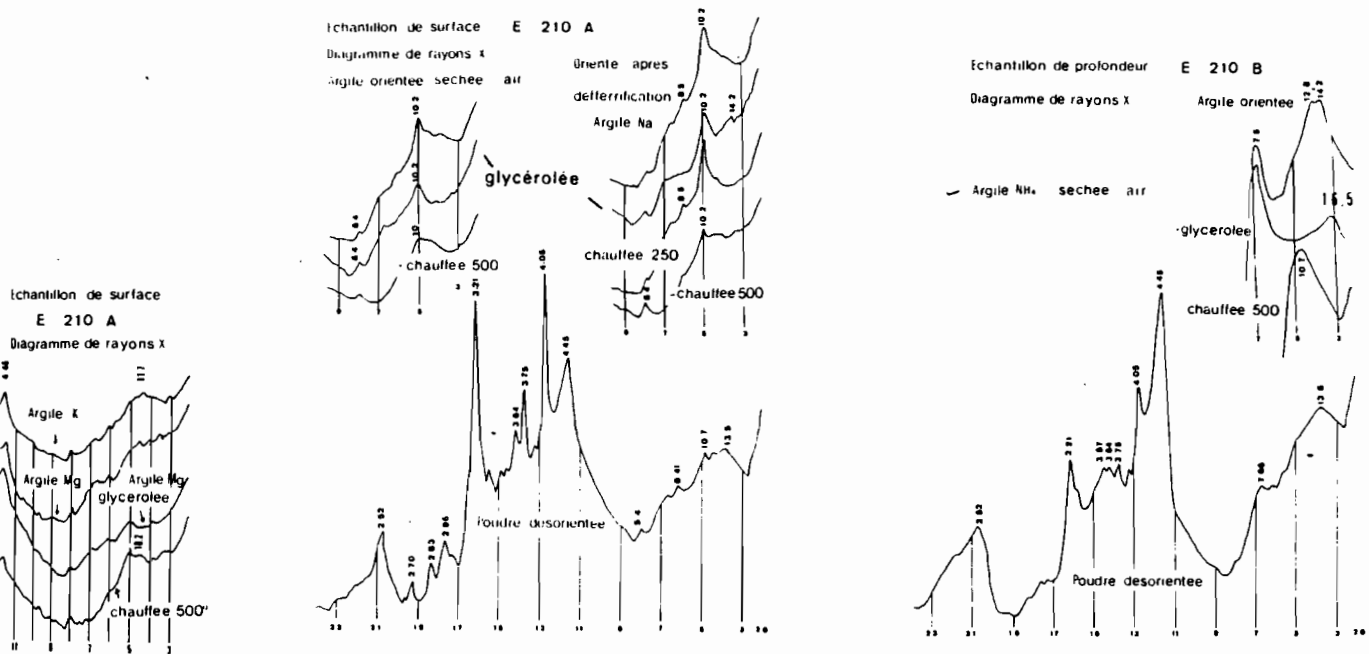


Figure CAYAMBE a: 0-10 b: 50-60cm

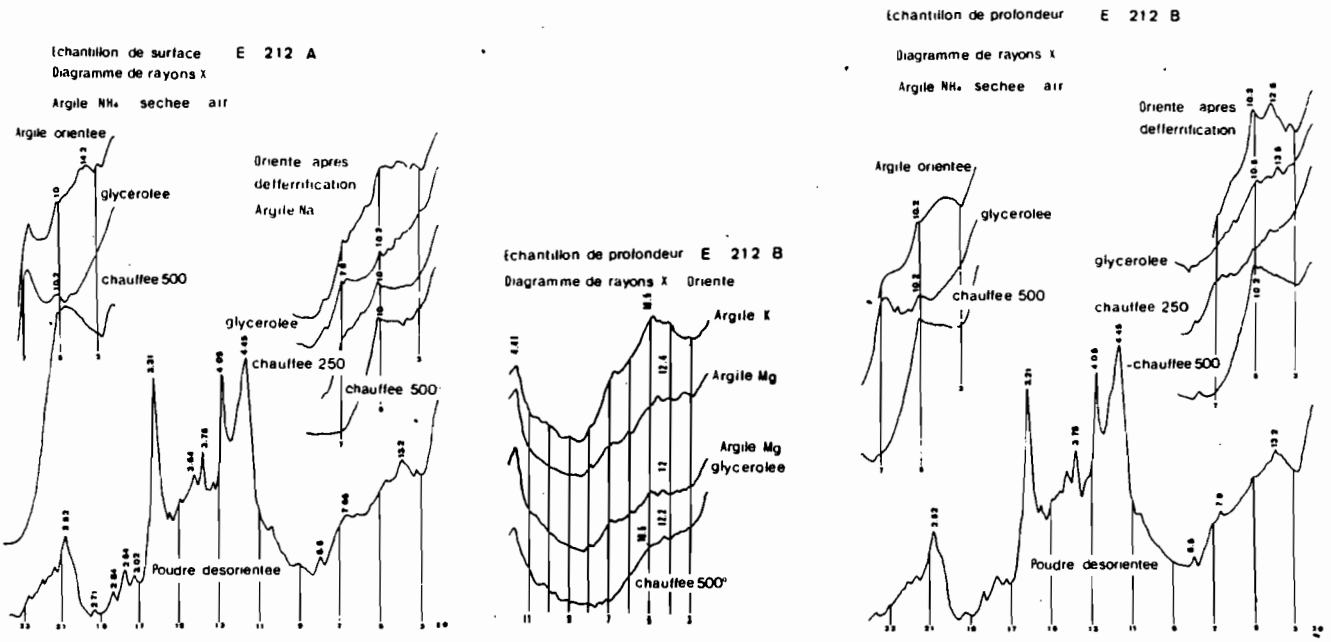


Figure GATLABAMBA-CUCHUBAMBA a: 0-20 b: 30-60 près Cangagua

Par contre, en profondeur, près de la cangagua, dans le sol déjà argilisé, on aurait de la montmorillonite, de l'halloysite et de la métahalloysite. La raie à 13,5 passerait à 16,5 Å au glycérol et se rabattrait à 10,7 Å à 500°. Il pourrait s'agir d'un interstratifié chlorite-montmorillonite, avec prédominance de montmorillonite. La raie à 7,6 est renforcée par séchage à 100° et disparaît à 500°C. Il y a nettement moins de minéraux primaires qu'en surface. La teneur élevée en bases échangeables : 29 mé % et, en particulier, en Mg : 12 mé, confirmerait la présence de montmorillonite.

A proximité d'OLMEDO (E 260), l'horizon de profondeur, qui est la cangagua déjà assez dure et argileuse, devrait renfermer de la montmorillonite comme l'indiquerait les fortes teneurs en bases échangeables (32 mé avec 14 de Mg), mais juste au-dessus, dans l'horizon nettement argilisé, il est difficile de mettre en évidence ce type d'argile aux rayons X. Une raie à 13,6 apparaît nettement dans le spectre poudre et la raie à 4,45 est bien prononcée. Après traitement au citrate à chaud, puis KCl ou Mg Cl² à 100° au bain-marie, cette raie n'apparaît guère dans l'échantillon orienté, ou orienté glycérolé. Elle se rabat à 10 par chauffage à 500°C, avec disparition d'une bande étalée vers 7 à 8 Å.

Il s'agirait donc d'une argile très mal cristallisée et aisément solubilisable, probablement métahalloysite et montmorillonite.

Par contre, à CHULETTA⁽¹⁵⁰⁾, dans l'horizon à revêtements noirâtre qui surmonte la cangagua dure, on observe l'halloysite 10 Å, mélangée à un peu de métahalloysite.

6) - CANGAGUA DURE DU COL AU NORD IBARRA VERS CHOTTA - E 220

Cette cangagua a été prélevée à 60 cm sous le sol même. Elle est très très dure, mais renferme, néanmoins, 16 % d'argile. Dans cette argile, la raie à 4,45 est très prononcée. Une petite raie à 7,4 s'accroît par chauffage à 100° et disparaît à 500°. Il y aurait, sans doute, de l'halloysite. Une raie à 13 Å dans le spectre de poudre est moins visible dans l'échantillon orienté et passerait à 10 à 500°. Une petite raie à 10 Å demeure inchangée dans tous les traitements.

Il y aurait donc de l'halloysite et des argiles à 10 et 14 Å qui pourraient être la vermiculite ou montmorillonite, et l'illite ou polygozskite, sans que cela puisse être précisé.

7) - POUDRE DU CHOTTA - E 217 -

Dans la descente vers le CHOTTA, presque en bas de la vallée à 1700m d'altitude, on observe des formations brunes très fines et pulvérulentes, alternant avec des ponces, qui reposent sans transition sur des matériaux rocheux. Cette poudre a, sans doute, une origine éolienne, la région étant quasi-désertique.

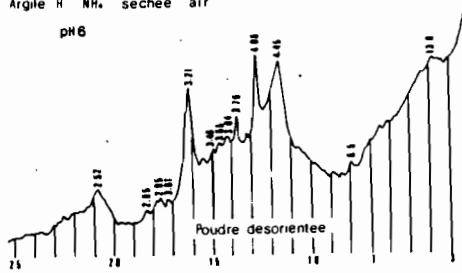
Le diagramme de rayons X montre essentiellement les raies des carbonates : 3,03 - 2,85 - 2,48 - 2,27 - 2,08 Å, la calcite, sans doute. Les raies à 3,21 et 4,04 des minéraux primaires sont assez nettes ainsi que la raie à 4,44 Å. Une petite raie à 10 Å et un renflement vers 14,5 sont également visibles.

Echantillon de profondeur E 260 C

Diagramme de rayons X

Argile H NH. sechee air

pH6



Echantillon de profondeur E 260 C

Diagramme de rayons X

Oriente apres deferrification

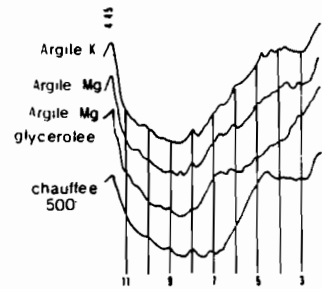


Figure OLMEDO 120cm contact Cangagua

Echantillon de profondeur E 259 B

Diagramme de rayons X

Argile NH. sechee air

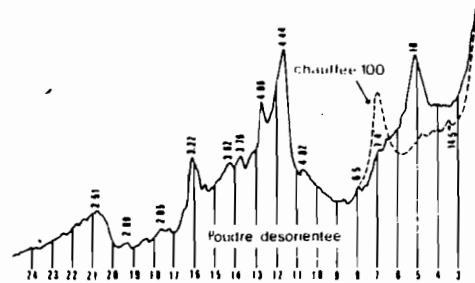


Figure CHULETTA b:30-35 au contact de la Cangagua

Echantillon de profondeur E 220

Diagramme de rayons X

Argile NH. sechee air

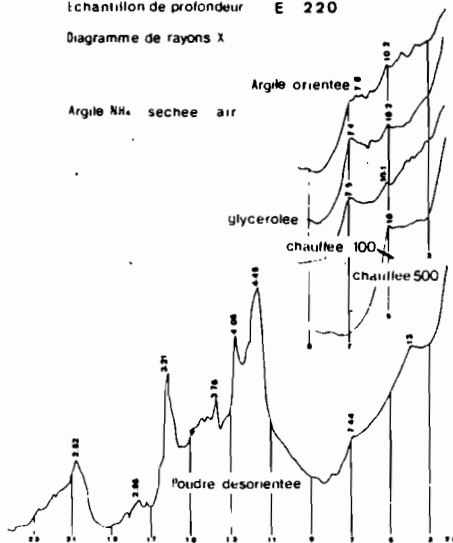


Figure Cangagua dure IBARRA VERS LE RIO CHOTTA

Echantillon de profondeur E 217

Diagramme de rayons X

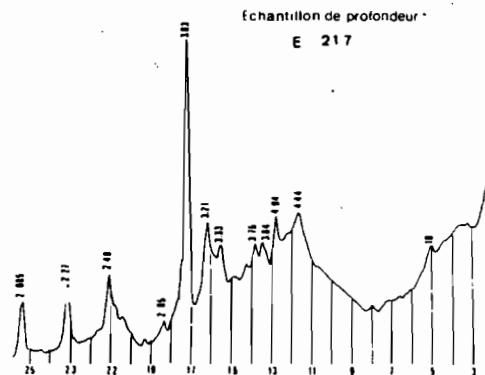


Figure poudre dans la vallée du Chotta

8) - LES MATIERES HUMIQUES -

Dans tous ces sols relativement jeunes, bien aérés et soumis, certains mois, à dessiccation, l'humification est relativement importante et les substances humiques extraites par le pyrophosphate représentent souvent 30 % de la matière organique totale. Les acides humiques l'emportent nettement sur les acides fulviques dans les régions les plus sèches du bassin (IBARRA - OTTAVALO). Le rapport étant d'environ 3. Par contre, plus en altitude, vers la lagune de CUICOCHA ou au col d'Ottavalo, les teneurs sont plus voisines l'une de l'autre, mais la proportion d'acide humique augmente beaucoup dans le niveau noirâtre luisant et profond, juste au-dessus de la cangagua dure.

Tableau : Matières humiques dans le bassin d'Ibarra-Ottavalo -

N° Echant.	Prof. en cm	C.Humus % C total	AH/AF	N° Ech.	Prof.cm	C.Humus %C Total	AH/AF
E 206 a	0 - 20	0.25	5	208 a	0 -20	0.3	1
b	40 - 60	0.25	3	b	40 -70	0.4	1.2
c	60 - 90	0.25	3				
207 a	0 - 20	0.3	3	209 a	0 -20	0.4	1.5
b	40 - 60	0.2	8	b	50 -80	0.5	2.0
				niveau noirâtre			
				c	120-140	0.7	7.0

Nous retrouverons ailleurs cette très large dominance des acides humiques, parfois même à l'exclusion des AF dans tous les horizons noirs situés juste au dessus de la cangagua.

9) - CONCLUSION -

Par l'ensemble de leurs propriétés, il paraît difficile de ranger ces sols parmi les sols à allophane. Ceux qui présentent les raies nettes et caractéristiques de l'halloysite se rangeraient dans les classes des sols isohumiques ou des mollisols: teneurs en M.O. constantes avec une forte proportion d'A.H.

On peut cependant hésiter pour les sols où l'argile paraît fort mal cristallisée difficile à définir, en dépit d'une raie notable à 4,45 Å indiquant déjà une certaine organisation. Pour certains ils pourraient se ranger parmi les Eutrandepts et former transition vers les sols à allophane des hauts paramons ennuagés, sans en avoir avec autant de netteté toutes les propriétés. Pour d'autres, l'absence de toute réaction au test FNa, les éliminerait de la classe des andosols. Il ne s'agirait pas de l'allophane tel qu'on le rencontre usuellement.

Si les caractères d'hydratation ne sont pas très marqués et ne peuvent être dans le cas de ces sols qu'un indice entaché de trop d'imprécision, il semble cependant que les variations de la capacité d'échange en fonction du pH permettent quelques distinctions.

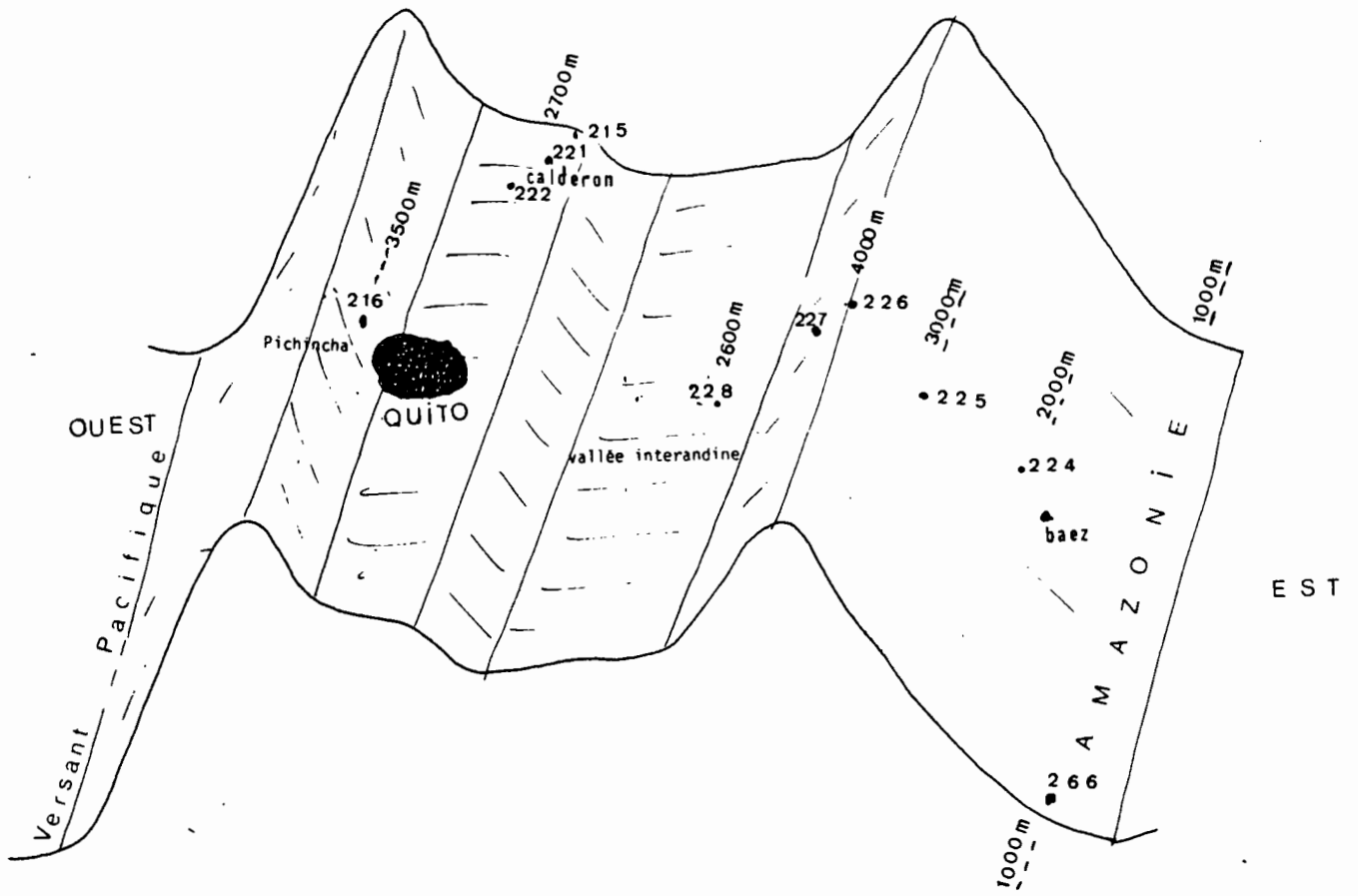
Le tableau montre que dans le cas du profil E 206 qui renferme de l'halloysite il n'y a pas de variations sensibles de la capacité d'échange en fonction du pH,

par contre les differences sont plus sensibles avec E 208, situé plus en altitude, et dans lequel les argiles paraissent pauvrement cristallisées.

Tableau: Variation de la capacité d'échange de cation à divers valeurs de pH en me %.

		pH 4	pH 7	pH 9	
E 206 Ottovalo	a	7,3	9,7	10,8	un peu d'halloysite
sol à halloysite	b	14,2	16,9	15,9	halloysite bien net
E 208 Cotacachi	a	12,7	18,7	22,8	} argiles mal cristallisées } difficile à définir
	b	8,3	11,3	15,9	

La distinction comme on le voit n'est guère facile à établir entre ces divers sols qui présentent un aspect et des propriétés voisines. La coupure en deux classes n'est peut-être pas justifiée et serait très probablement difficile à matérialiser dans la cartographie.



III - TRANSVERSALE OUEST-EST DE QUITO ET VERS L'AMAZONIE

Des sols isohumiques aux sols à allophane perhydratés sans et avec gibbsite

Les régions situées un peu au Sud de Quito ont été partiellement étudiées dans de précédents rapports, publiés en 1967 et 1969. Aussi, sans faire un rappel de ces données, nous nous contenterons de quelques comparaisons qui illustreront nos nouveaux résultats concernant les sols situés au Nord et à l'Est de Quito.

1) - SITUATION -

La ville de Quito est adossée à 2800 m d'altitude au volcan Pichincha de la cordillère Pacifique. A l'Est, en contrebas, s'étend la large vallée interandine qui est séparée au Nord des régions de Cayambé par la dépression du Rio Gallabamba et à l'Est, de l'Amazonie, par la cordillère Orientale qu'il faut franchir par un col à 4000 m d'altitude.

2) - GEOLOGIE (D'après SAUER - 1966)

Les volcans de la cordillère Pacifique auraient d'abord rejeté des andésites à pyroxènes, puis, par la suite, des andésites à amphiboles avec même pour l'Illiniza (5000m), des dacites. Ces volcans, aux dernières époques de leur activité, auraient donc eu une phase plus acide que dans les périodes antérieures.

Sur la cordillère Orientale, le Cotopaxi (5900m), aurait rejeté, par de formidables explosions, des andésites à pyroxènes et amphiboles, mais les épanchements du dernier siècle correspondent à des andésites plus basiques à pyroxènes et olivine. Les cendres récentes que nous avons examinées sur les flancs du Cotopaxi, renferment essentiellement de l'hypersthène avec de l'augite, à l'exclusion de la hornblende. Le volcan Antizana (5700m) qui borde l'Amazonie, serait encore plus basique, avec des andésites à pyroxènes et olivine, mais certaines bouches latérales ont rejeté des dacites à amphiboles. Rappelons que pour le Cayambé (5800m), au Nord, il y a dominance d'andésite à hornblende. Tout à fait en bordure de l'Amazonie, l'actif Revendador rejette de temps en temps des cendres basaltiques à olivine.

La composition des laves ou des produits pyroclastiques est donc assez hétérogène. D'un côté les volcans de la cordillère Pacifique et le Cayambé, au Nord, sur la cordillère Orientale, auraient émis des matériaux relativement riches en hornblende dans la dernière période de leur activité, d'un autre côté, ce serait l'inverse pour les volcans de la cordillère orientale et l'Antizana, le Cotopaxi, le Revendador, qui auraient, dans leurs dernières périodes d'activité, et encore actuellement, pour certains, rejeté des matériaux très basiques à pyroxènes et olivine. Bien que ce ne soit pas simple, il semble que l'on retrouve, cependant, dans la composition des sables des sols quelques indices qui correspondent assez bien à ces observations.

..../...

3) - MINÉRALOGIE DES SABLES -

a) - Les cendres -

On a montré (DELAUNE 1967-1969) qu'à l'exception des cendres et ponces qui recouvrent les flancs du Cotopaxi, la plupart des sols qui ont été observés entre Quito et Latacunga, contenaient, dans la fraction lourde des sables, une quantité sensiblement équivalente de hornblende et d'hypersthène avec une nette tendance à la prédominance de l'hypersthène. Cette sensible prédominance de l'hypersthène s'oppose à la très forte proportion de hornblende des cendres du bassin d'Ibarra, plus au Nord.

A Quito, (216) sur les pentes de la cordillère Pacifique (Pichincha 3600m) la hornblende l'emporte légèrement sur l'hypersthène. La cendre a donc une composition intermédiaire entre celle des régions situées plus au Nord et plus au Sud. Il semble qu'il y ait au un sensible accroissement de l'hypersthène en surface par rapport à l'horizon de profondeur au contact de la cangagua.

De l'autre côté de la vallée interandine, ²¹⁷ sur le versant de la cordillère orientale (3500m) et au col vers l'Amazonie (4000m), on observe également la prédominance sensible de la hornblende avec un très net enrichissement en hypersthène dans le niveau tout en surface, dont la proportion peut devenir très voisine de celle de la hornblende. On peut penser que ce dépôt plus récent, riche en hypersthène, correspond aux dernières périodes plus basiques de l'activité volcanique qui se poursuivent encore actuellement. Cette hypothèse est appuyée par la présence de l'olivine en petite quantité.

Les phases antérieures auraient été, sans doute, plus acides, comme semble l'indiquer la prédominance de la hornblende, mais pas autant, cependant, dans l'ensemble que plus au Nord dans le bassin d'Ibarra et vers Tulcan.

Sur le versant amazonien, les cendres paraissent nettement plus basiques, avec une quantité sensiblement équivalente d'hypersthène, augite, hornblende. Nous avons fait la même observation (DELAUNE 1967) plus au Sud et à plus basse altitude, près de Puyo. A noter la présence d'un peu d'olivine en surface, ce qui, dans ces sols évolués à allophane hydraté, est l'indice de dépôts relativement récents.

.../...

Tableau : Minéraux lourds des sables de Quito (cordillère Pacifique vers l'Amazonie)

Situation	Nº Echant.	Prof. en cm	Hyperst.	Augite	Hornbl.	Olivine	M.L % S
Cordillère Pacifique Pichincha 3500 m	216 a	0 - 20	39	6	55	0	17
	c	120 - 150	25	6	67	0	27
Cordillère orientale - 3500 m	227 a	0 - 20	45	13	42	+	10
	b	50 - 80	30	10	60	+	14
	c	100 - 150	36	9	55	0	11
Au col 4000 m	226 a	0 - 20	42	3	50	2	11
	c	60 - 90	20	14	65		20
	e	150 - 180	29	8	63		20
	f	180 - 210	34	6	60		23
	h	220	20	7	73		15
- à BAEZ 2000 m	224 a	0 - 30	32	28	39	1	18
	b	100	39	23	38		19
- PUYO 1000 m	118 b	20 - 40	59	22	13	épidote 6	18

versant amazonien

b) - Les cangagua -

La composition de la cangagua, soit superficielle (tuf ou duripan) dans l'horizon inférieur des sols, situé juste au-dessus du niveau durci, soit plus profonde, dure, prélevée dans les talus de route, est relativement constante de Quito à la cordillère orientale, ainsi que plus au Nord, de part et d'autre de la dépression du Gallabamba. La hornblende domine sensiblement, surtout sur le flanc de la cordillère pacifique.

Au Sud de Quito, par contre, nous avons trouvé (DELAUNE 1967) beaucoup plus d'hypersthènes dans les cangagua. Il y a donc une certaine relation avec les cendres superficielles.

Tableau : Minéraux lourds des cangagua superficielles ou profondes -

Situation	Type	Nº Echant.	Hypersth.	Augite	Hornblende	M.L % S	
Nord	Nord Gallabamba	Superficiel	212 b	33	11	55	23
	Sud Gallabamba	Très dure 60 cm	222	30	12	58	19
Ouest	Pichincha	1 m	216 c	25	6	67	27
	Près cordillère orientale 2800m	Profonde dure	228	36	19	44	
Est	Extrémité Est 3500 m	1 m	227 c	36	9	55	11
Sud	Quito Sta Catalina	Superficiel	164	60	14	24	24
	Latacunga	Dure	176 c	70	10	20	10

c) - Les sols -

Les différences d'altitude et de climat entraînent de grandes variations dans les sols.

4) - COMPARAISON DES SOLS DES VERSANTS FAISANT FACE A LA VALLEE INTERANDINE DES CORDILLIERES PACIFIQUE ET ORIENTALE A 3500m D'ALTITUDE -

Un profil a été relevé près de Quito, sur les pentes du volcan Pichincha et un autre près de la route allant au col de Baez sur la cordillère orientale, dans une position symétrique de l'autre côté de la vallée interandine.

a) - Aspect des profils -

Par leur morphologie, ces deux profils se ressemblent étroitement. Les sols sont brun-noir à noir : 10 YR 3/2 sur 80 cm, limono-sableux, devenant légèrement argileux en profondeur. De 80 à 150 cm, les sols sont nettement plus noirs : 10 YR 3/1 et un peu d'argile leur donne une consistance légèrement adhérente à l'état humide. On observe quelques taches brunes de cangagua, puis enfin la cangagua dure dans le profil de Quito, mais celle-ci semble peu consolidée sur la cordillère orientale, ou alors recouverte par une plus grande épaisseur de cendre.

b) - Propriétés -

Par certaines de leurs caractéristiques, ces sols se ressemblent : teneurs en bases échangeables de l'ordre de 16 à 20 mé %, pH eau voisin de 6. L'horizon de surface, près de Quito, doit, sans doute, ses teneurs élevées en calcium échangeable à l'influence de l'homme. Les humidités au pF 3 sont voisines, que la mesure soit faite sur sol conservé humide ou séché à l'air, mais les humidités au pF 4,2 sur sol séché à l'air sont un peu plus faibles, que celles mesurées sur sol conservé humide. La matière organique est bien humifiée en profondeur (50 à 70 %) et les acides humiques sont 4 fois plus abondants que les acides fulviques. Le niveau de surface du profil de la cordillère orientale est, cependant, beaucoup plus riche en M.O. que celui de Quito, mais il est possible que ce dernier ait été érodé. Ces différences de teneurs en matières organiques sont, en partie, responsables des variations de la densité apparente de l'horizon de surface : 0,7 contre 1,3.

Le tableau montre la comparaison des données analytiques concernant les horizons B1 et B2 ou B et IIB ?

Tableau : Comparaison des données analytiques -

	Profondeur	Ca	Mg	K	Na	S	pH	pF 3 Hum.	pF 3 sec	C humus % C Total	AH/AF
(Ouest)	60 - 90	10.2	3.3	2.34	0.24	16	6.4	34	31	0.7	3.5
Quito	120 -150	9.9	4.0	2.29	0.31	16	6.3	37	33	0.7	4.0
(Est)	50 - 80	10.5	4.1	0.47	0.31	15	5.6	37	36	0.6	4.0
	100 -150	12.9	6.9	1.1	0,38	21	6.4	36	36	0.6	4.0

c) - Nature des argiles -

1) Les sols -

En dépit de certaines analogies concernant la morphologie et les propriétés des sols, la nature des argiles paraît bien différente. Le test FNa ne donne aucune

.../...

coloration pour les deux profils.

Sur la cordillère Pacifique (E 216), tous les horizons, depuis la surface jusqu'à la cangagua dure, renferment essentiellement une belle halloysite 10 \AA , qui présente toutes les raies caractéristiques de cette argile. Par chauffage à 100° , la raie à 10 \AA passe à $7,5$ en diminuant d'intensité et la raie à $3,33 \text{ \AA}$ passe à $3,63 \text{ \AA}$. On remarque dans la fraction totale inférieure à 2 microns, la présence de minéraux primaires ($4,04, 3,75, 3,64, 3,21, 2,94, 2,77 \text{ \AA}$), mais toutes ces raies disparaissent dans la fraction très très fine de l'inférieur à 2 microns où les raies de l'halloysite sont renforcées. L'halloysite paraît mieux organisée en profondeur qu'en surface. Elle est cependant aisément solubilisée par la technique Ségalen acide-base.

Par contre, sur la cordillère orientale (E 227), les raies de l'halloysite à 10 ou 7 \AA n'apparaissent pas. Les minéraux primaires sont abondants dans les trois échantillons examinés, avec, cependant, une raie à $4,43 \text{ \AA}$ également bien marquée, indiquant la présence notable d'argiles cristallines.

En surface, une raie vers 13 \AA est bien nette. Elle demeure inchangée au glycérol sur échantillon orienté et se rabat à $12,1$ par chauffage à 250° , puis à 11 \AA à 500° C . Il pourrait s'agir d'un interstratifié chlorite-vermiculite, ou encore d'une montmorillonite alumineuse.

Plus en profondeur, cette raie est peu apparente, demeure également inchangée avec le glycérol et par chauffage à 100° et se rabat à 10 \AA à 500° . Ce serait plutôt une substance mal cristalline à comportement de vermiculite.

Tout en profondeur, le chauffage à 100° provoque un renforcement sensible de la raie à $7,5$, ce qui indiquerait l'existence d'un peu d'halloysite.

On doit signaler l'existence d'une raie effilée à $5,96 \text{ \AA}$, dans les deux horizons supérieurs, dont nous ignorons la cause exacte. Un lavage poussé à l'eau de l'argile ne la fait pas disparaître. Cette raie apparaît peu sur échantillon orienté. Elle n'existerait pas en profondeur.

2) - Les cangagua -

A l'Est de la vallée interandine, en bordure de la cordillère orientale, mais seulement à 2800m d'altitude, nous avons prélevé, à plusieurs mètres de profondeur, dans un grand talus de route, de la cangagua dure, brune, poreuse, encadrée dans des ponces : E.228. La fraction fine est une belle halloysite. La raie à 10 \AA gonfle à $11,5$ au glycérol et se rabat à $7,5$ par chauffage à 100° . La raie à $7,5$ disparaît à 500° , mais une petite raie à 10 persiste. La fraction argile examinée correspond à 10% de la cangagua, ce qui est notable pour un tuf durci aussi profond. Les minéraux primaires y sont peu abondants, ce qui souligne l'importance de l'halloysite.

Qu'il s'agisse donc de la cangagua du Pichincha, près de Quito, ou de celle-ci près de la cordillère orientale, de l'autre côté de la vallée, ou de celle que nous avons déjà observée à Santa Catalina au Sud de Quito, c'est donc très nettement l'halloysite qui est le minéral argileux essentiel.

.../...

l'échantillon de surface E 216 A
 Diagramme de rayons X
 Argile NH, séchée air

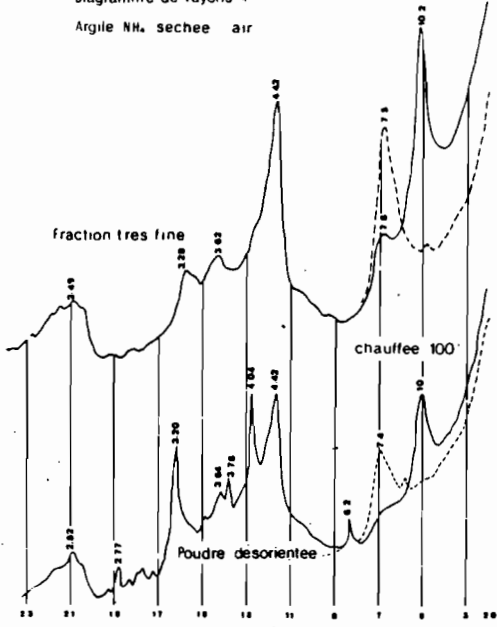
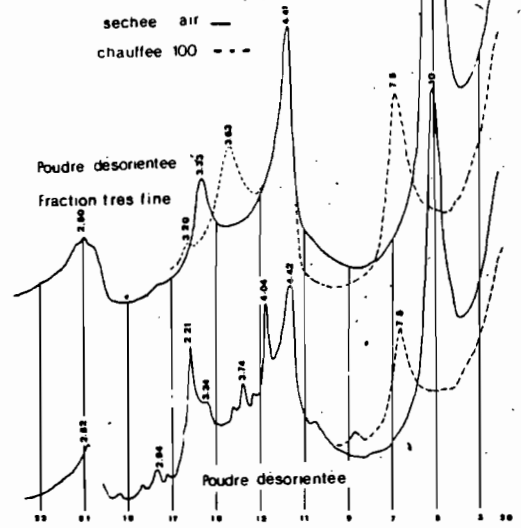


Diagramme de rayons X
 Argile NH,



Après 5 attaques acide/base

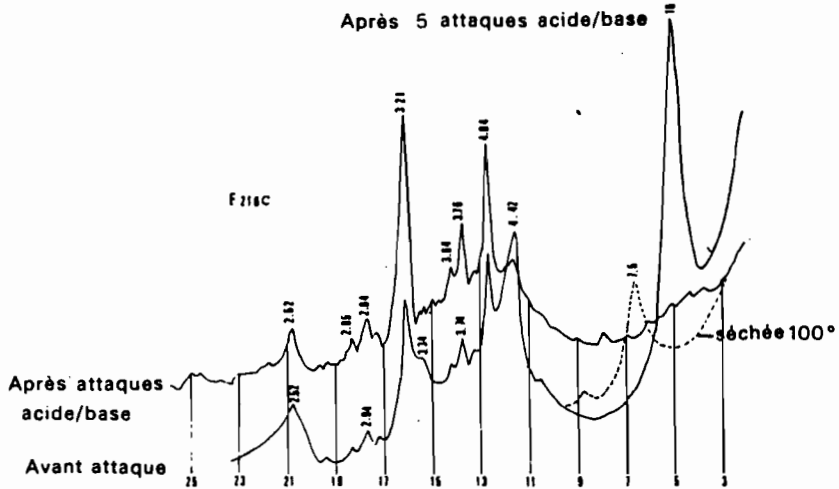


Figure Quito-Pichincha a:0-20 c:120-150 contact de la Cangagua

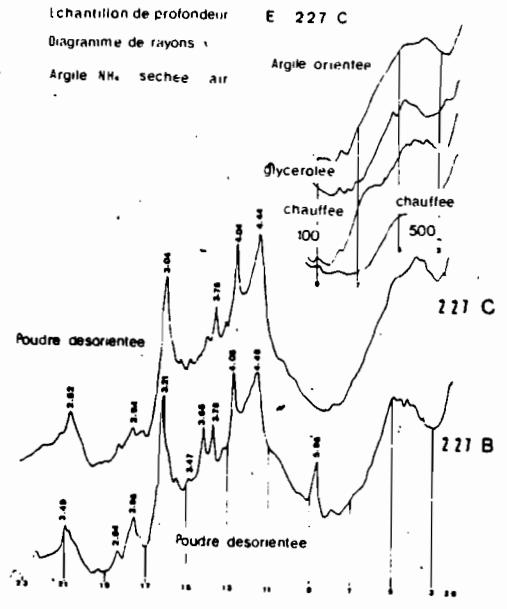
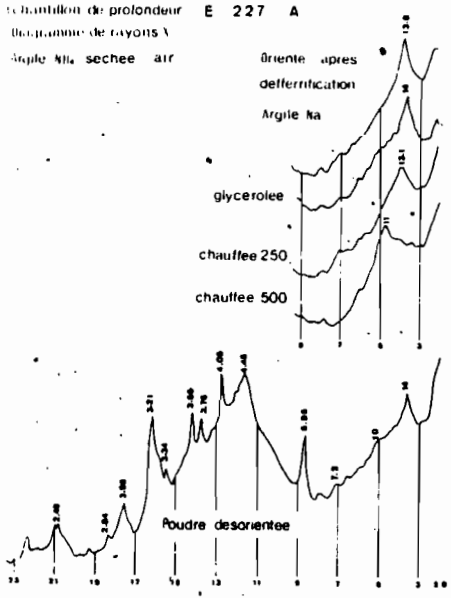


Figure En position symétrique de Quito par rapport à la vallée interandine sur la cordillère orientale a: 0-20cm c: 100-150cm

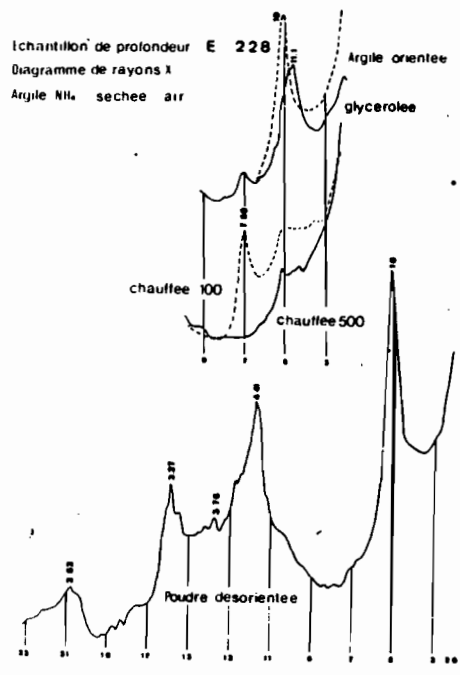


Figure Cangagua profonde intercalée dans des ponces

Par contre, dans trois faciès de cangagua (E 221 - E 222 - E 215), prélevés au Nord de Quito, près de Calderon, cangagua dure ou relativement pulvérulentes, l'halloysite apparaît de manière plus estompée et parfois même incertaine. Les échantillons orientés présentent une petite raie à 10 Å et 12-13 Å. La raie à 7,5 s'accroît nettement par séchage à 100°, dans au moins deux des échantillons, ce qui indiquerait la présence d'halloysite, mais une raie à 10 Å persiste. La raie à 7,5 disparaît au chauffage à 500° C, mais la raie à 10 Å demeure, parfois plus intense, parfois diminuée. Dans un échantillon de cangagua fine pulvérulente, proche de la surface (E 215), la différenciation permet de mieux distinguer la raie vers 13 Å, qui semble gonfler un peu au glycérol.

D'autres examens sont nécessaires pour connaître, outre l'halloysite, le type d'argile qui est présent : argiles micacées, vermiculites ou certaines formes de montmorillonite mal cristallisées, en mélange avec des substances amorphes, avec lesquelles il est sans doute difficile de tracer une limite précise.

CONCLUSION -

Pour les sols, de même que pour les cangagua, on peut rencontrer sans qu'aucun indice ne le laisse pressentir sur le terrain, soit une belle halloysite à 10 Å, soit des argiles très mal cristallisées à 10 ou 14 Å dont la nature exacte est difficile à préciser.

Dans le sol à halloysite, la capacité d'échange varie très peu avec le pH.

	pH 4	pH 7	pH 9
E 216 c	20,2	22,4	24,9

Comme pour la région d'Ibarra on peut se demander si une distinction en 2 classes de sols est cartographiquement possible et quelle serait sa justification pour l'utilisateur.

Echantillon de profondeur E 215
 Diagramme de rayons X

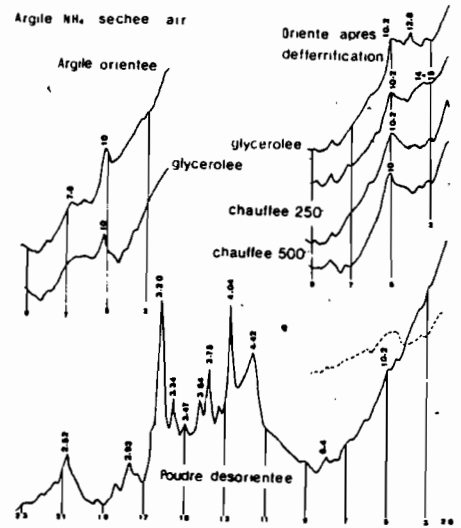


FIGURE: Cangagua peu dure Nord Calderon (Nord Quito)

Echantillon de profondeur E 221
 Diagramme de rayons X

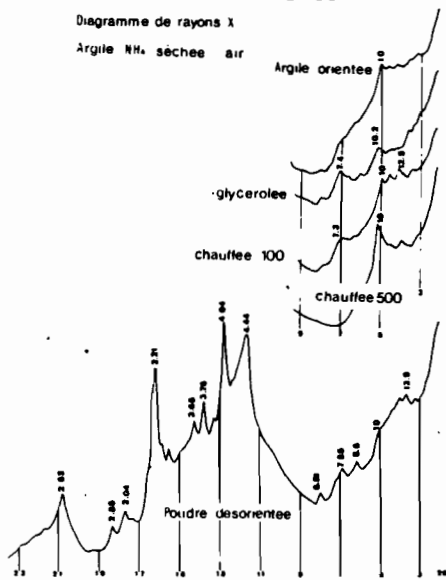


FIGURE: Cangagua dure Calderon (Nord Quito)

Echantillon de profondeur E 222
 Diagramme de rayons X

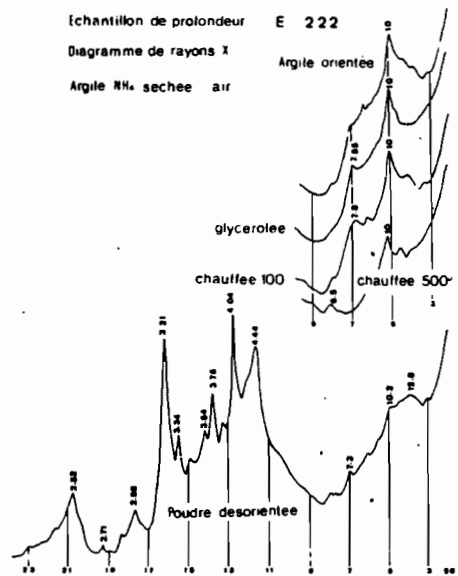


FIGURE: Cangagua dure Sud Calderon.

5)- COL DE LA CORDILLIERE ORIENTALE - 4000 m D'ALTITUDE -

a) - Situation - Climat

C'est une région inculte balayée par les vents violents et les nuages de l'Amazonie, qui grimpent le long du versant oriental. La température est peu élevée et constante toute l'année : 2 à 3° C, l'évapo-transpiration réduite et l'humidité du sol permanente.

b) - Morphologie du profil -

Le recouvrement de cendre présente plusieurs strates bien nettes, sur environ 2 à 3 m d'épaisseur, au-dessus des roches métamorphiques anciennes : gneiss, micachistes, etc... Ce recouvrement apparaît très régulier sur tous les talus de route.

Dans le profil observé, on constate 4 sols superposés, avec trois horizons particulièrement bien noirs. Le troisième niveau en profondeur vers 1,20 m, renferme plus de matière organique qu'en surface. Ces niveaux noirs sont séparés par des horizons brunâtres, avec parfois de minces bandes beiges claires, continues de 5 cm d'épaisseur.

Vers 2 m de profondeur, on passe à une argile blanchâtre mêlée à des débris de roches métamorphiques.

C'est donc le cryandept organo-mélanique, mais avec les caractéristiques des hydrandeps, ou sols perhydratés.

c) - Caractéristiques physico-chimiques -

Les teneurs en bases échangeables sont faibles et quasi-nulles en profondeur. Les teneurs en magnésium, en particulier, sont insignifiantes. Le pH est voisin de 5, mais comme dans beaucoup de sols à allophane, il se relève en profondeur à 5,7 dans l'horizon le plus désaturé. L'écart pH eau, pH KCl est faible.

La densité apparente est inférieure à 1, de l'ordre de 0,5 à 0,7 et le test FNa positif, avec un développement intense et quasi-instantané de la coloration, sauf dans l'hallyosite blanche de profondeur.

Les teneurs en matières organiques sont importantes, supérieures à 8 % jusqu'à 1m,80 de profondeur. Il n'y a guère de différences entre les horizons noirs ou brunâtres, sauf pour l'horizon très noir à 1,20m de profondeur (13 %). Cette matière organique paraît bien humifiée : 50 à 60 %. Le rapport AH/AF est voisin de 1, avec, cependant, un net avantage des AF, jusqu'à 1 m de profondeur, puis des AH plus en profondeur.

.../...

La rétention en eau est très élevée et présente une certaine relation avec les teneurs en matière organique. L'humidité au pF 3 sur sol humide, varie entre 75 et 110 % et diminue de plus de moitié si on opère sur sol séché à l'air. Il en est sensiblement de même pour l'humidité au pF 4,2. La matière organique et les substances amorphes allophaniques contribuent certainement toutes deux à cette importante rétention en eau, réduite irréversiblement par dessiccation à l'air. L'importance des substances allophaniques, en dépit des teneurs élevées en matières organiques, nécessite une dispersion en milieu acide de pH 2,5 à 5. Dans l'horizon jaune allophanique, vers 150 à 200 cm de profondeur, riche en scories et graviers de cendres, le pourcentage de la fraction inférieure à 2 microns atteint 18 %.

d) - Nature des argiles (E 226) -

A l'exception de l'halloysite blanche de profondeur, tous les horizons superposés noirs ou brunâtres foncé, semblent renfermer essentiellement des substances amorphes dans leur fraction fine. La raie à 4,45 qui indique la présence d'argile déjà organisée, est insignifiante comme d'ailleurs la raie à 2,52. Seules les raies des minéraux primaires à 3,21 et 4,04 Å sont bien marquées avec les raies annexes plus faibles 3,76 - 2,97, etc...

En surface, comme en profondeur, une petite raie vers 14 Å ne se détache du fond qu'après déferification. Il semble que cette raie gonfle très légèrement au glycéral, demeure à peu près inchangée par chauffage à 150 - 200 ou 250° et se rabat à 10 - 12 à 500°. Près de la surface du sol cette raie est nettement plus importante après traitement au KCl, qu'après traitement à Mg Cl², mais il n'y a pas de modification dans les horizons plus profonds (E 226 E). Ces traitements peuvent provoquer une atténuation des raies par dissolution de l'argile. Il s'agirait d'une argile à comportement de vermiculite, mais sans doute en quantité modérée et encore très mal cristallisée, proche des allophanes.

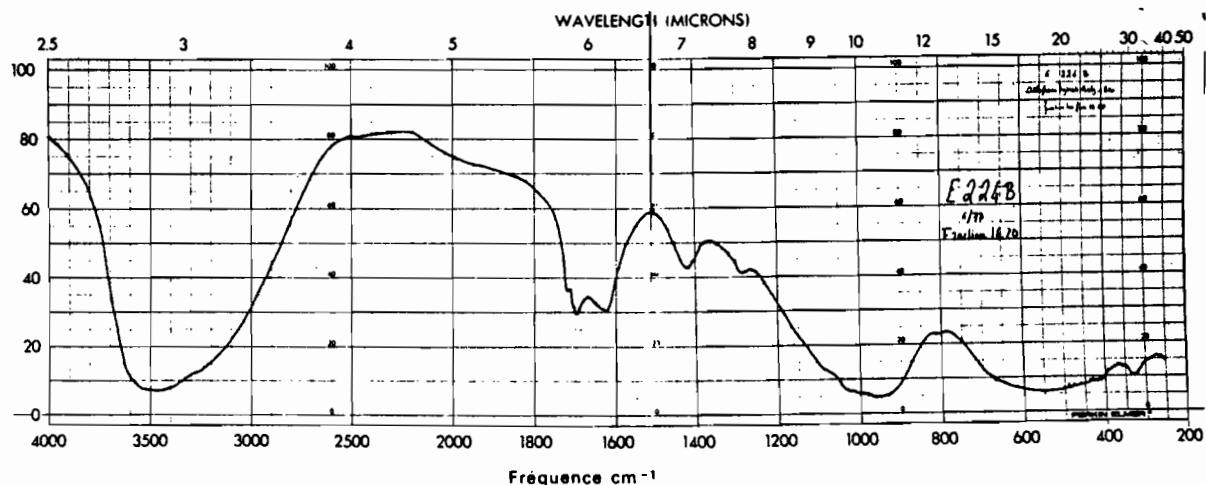
La spectrographie dans l'infrarouge permet de mieux saisir la nature de l'ensemble de la fraction fine et d'estimer la proportion relative des divers constituants en mélange. Le diagramme de la figure montre, dans la fraction très fine de l'argile, donc débarrassée des minéraux primaires, une substance essentiellement amorphe, tout à fait similaire aux spectres obtenus avec les sols à allophane hydratés. La bande SiO est importante à 950cm⁻¹, par suite de la déformation due aux Al^{IV}. Il n'y a pas de bandes à 800cm⁻¹, ni de doublets à 425-470cm⁻¹.

La forte absorption vers 3500cm⁻¹ n'est pas accompagnée de la moindre trace de crochets de l'halloysite entre 3600 et 3700cm⁻¹. L'absorption due à H₂O est, par contre, très intense entre 1600 et 1700cm⁻¹, avec deux maxima. La bande bien marquée à 1440cm⁻¹ n'est pas expliquée. Les argiles cristallines, sans doute d'ailleurs mal cristallisées, ne doivent donc représenter qu'un très faible pourcentage de la fraction très fine et elles n'existeraient que dans l'argile plus grossière, plus proche de 2 microns.

.../...

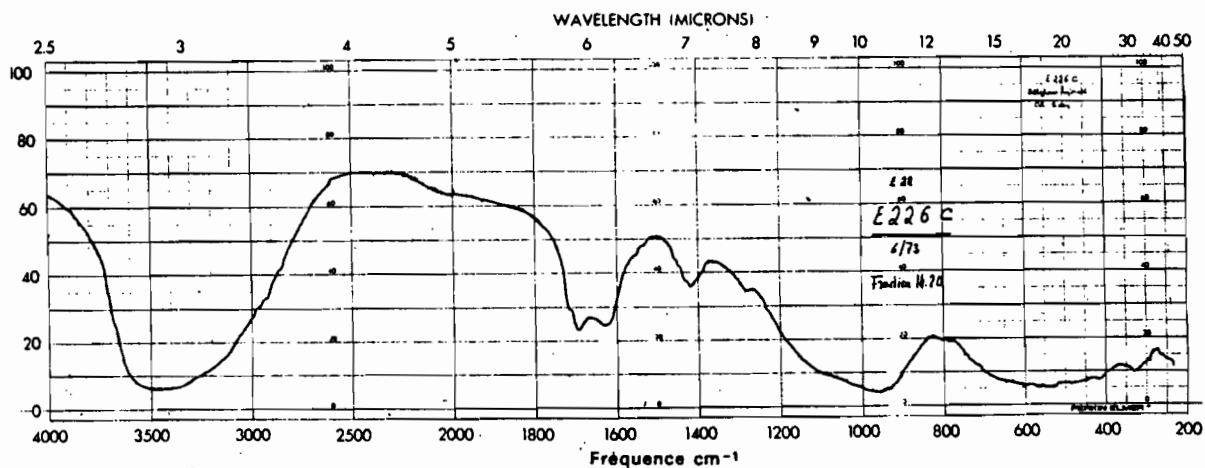
Diagramme d'absorption dans l'infra-rouge

Classe 4-5



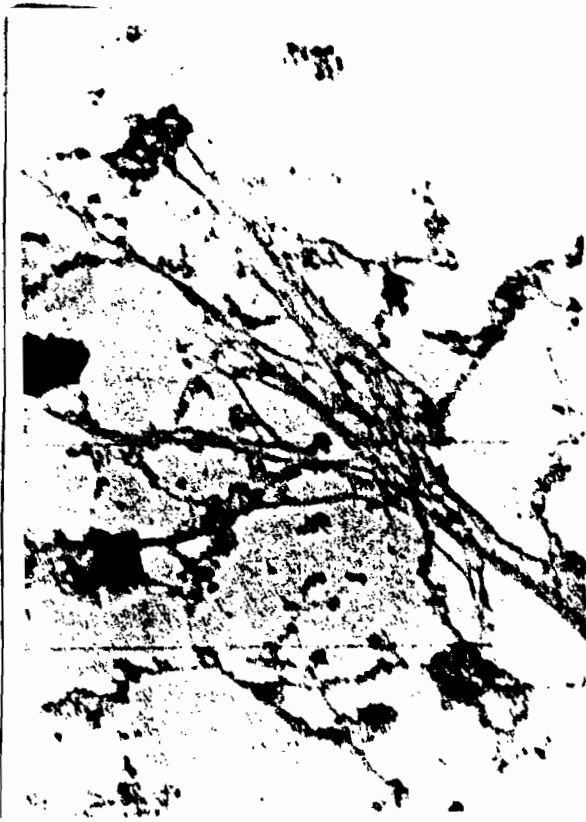
à 2000m d'altitude: allophane perhydraté

fraction très fine de l'inférieur à 2 microns



à 4000m d'altitude: allophane du Paramon

fraction très fine de l'inférieur à 2 microns



E 224 b Cliché 59I2 x 100.000

Sol à allophane perhydraté du
versant amazonien -BAEZ -
Altitude : 2000 m



E 226 c Cliché 59I3 x 65.000

Sol à allophane mélanique du
paramon à 4000 m d'altitude.

Clichés TRICHET

Le microscope électronique indique un enchevêtrement de fibres en abondance comme on en observe dans les sols à allophane hydratés d'Amazonie ou du Pacifique.

6) - LES SOLS A ALLOPHANE DU VERSANT AMAZONIEN -

Trois profils ont été examinés :

- l'un à 3000 mètres
- l'autre à 2000 mètres
- un troisième beaucoup plus au Sud, près de Puyo, pourra servir de référence comme sol à allophane hydraté.

a) - Pappallacta : 3000 mètres -

1) - Situation -

La vallée est très encaissée et le substratum rocheux métamorphique apparaît fréquemment en affleurement. Le manteau de cendre est peu épais et n'existe que sur les replats. Il n'y a pas de cangagua dans ces régions et la cendre repose directement sur la roche ou les matériaux anciens peu altérés. La région est ennuagée et constamment humide.

2) - Morphologie - Propriétés -

Le profil semble présenter deux dépôts successifs séparés par un lit de cendre fine beige clair, entre 50 et 60 cm de profondeur. La roche apparaît dès 90 cm.

La coloration noire est un peu moins noire qu'au col à 4000 m et limitée aux 15 premiers centimètres, qui renferment 15 % de M.O. Plus en profondeur, le sol est brun foncé : 10 YR 4/2 à 4/3, limoneux, onctueux, avec une consistance allophanique assez nette. La teneur en matière organique est encore de 5 % à 80 cm. Cette matière organique est bien humifiée : 40 % en surface, 50 % en profondeur. Les acides humiques l'emportent nettement sur les A.F en surface, mais les acides fulviques sont 2 à 4 fois plus abondants que les A.H. en profondeur. Le C/N ne dépasse pas 9 dans tout le profil alors qu'il atteignait 14 à 15 à 4000 m d'altitude.

A l'exception du niveau très organique de surface, les teneurs en bases échangeables sont faibles (3 mé).

Bien que le pourcentage d'argile soit peu élevé, la rétention est importante, 80 % en surface et 50 à 60 % en profondeur à pH 3, une large partie de cette eau semblant irréversiblement perdue par dessiccation à l'air.

3) - Minéralogie des argiles - E 225 -

Avec le test de FIELDS, la coloration se développe instantanément dans tous les niveaux de profondeur, mais demeure très faible en surface, sans doute par suite de l'importante teneur en matière organique. Peut-être s'agit-il aussi d'un recouvrement plus récent des cendres du Revendador, encore peu allophanisé (présence d'olivine).

.../...

A 40 cm et 80 cm, donc de part et d'autre de la mince couche claire de cendre fine, les diagrammes X sont sensiblement les mêmes. La raie à 4,48 Å est peu marquée, indiquant la présence de peu d'argiles cristallines, mais la raie à 13,5 Å est bien nette. Cette dernière raie semble très légèrement gonfler avec le glycérol. Elle demeure inchangée à 150° mais commence à décroître à 200° pour se rabattre à 12,5 Å à 250° et 10 Å par chauffage à 500°. Elle s'accroît fortement en restant à 13,1 par traitement au KCl, alors que le traitement à MgCl₂ la laisserait inchangée. Il pourrait s'agir d'un peu de montmorillonite ou de vermiculite. Les raies sont beaucoup mieux marquées dans le niveau supérieur que dans l'horizon profond qui renfermerait davantage d'allophane. C'est encore par l'ensemble des caractéristiques un sol à allophane.

b) - Eaux - 2000 mètres d'altitude -

A 2000 m d'altitude, la région semble nettement plus humide. C'est déjà la grande forêt amazonienne.

1) - Morphologie - Propriétés -

Les sols sont typiquement des hydrandepts de couleur foncée sur 50 cm environ, avec 15% de matière organique, puis jaune, limoneux, onctueux, bien savonneux, avec une cohésion allophanique très évidente et encore, cependant, 5 % de M.O, bien masquée donc par l'allophane.

La rétention en eau est élevée, plus de 100% à pF 3 sur sol humide et une large partie de cette eau, la moitié en surface, les 2/3 en profondeur, est perdue irréversiblement, par dessiccation à l'air.

Le test FIELDS FNa donne une coloration très vive et instantanée en profondeur, un peu plus lente à se développer en surface. La densité apparente est faible 0,5 en surface et profondeur. L'horizon de surface, sans doute plus récent, renferme 18% d'argile obtenue par dispersion ammoniacale et une teneur assez importante en bases échangeables (sol sous forêt). Par contre, l'horizon jaune allophanique de profondeur est très désaturé (2,5 mé) avec 50 % de fraction fine (< 2 microns, obtenue par dispersion en milieu acide à pH 2,5.

La matière organique est bien humifiée en surface (40 %), avec une quantité équivalente d'AH et d'AF. Par contre, dans l'horizon jaune allophanique, le taux d'humidification est plus faible : 0,2 et les acides fulviques sont 5 fois plus abondants que les acides humiques.

2) - Minéralogie des argiles - E 266 -

Les diagrammes de rayons X révèlent en surface, de petites raies peu développées à 4,44 et 2,54. On remarque aussi la présence d'une raie effilée à 14 Å qui demeure inchangée au glycérol, passe à 12,8 à 250°C et à 10-10,7 Å par chauffage à 500°. Il s'agirait d'un comportement de vermiculite. Les minéraux primaires sont bien représentés : 6,4 - 4,05 - 3,91 - 3,21 - 3,00

En profondeur, la raie à 14 est moins nette, reste inchangée au glycérol,

s'effondre un peu à 100° - 200° ou 250° et passe, en partie, à 10 Å à 500°. La raie à 14 diminue nettement l'intensité par traitement au KCl et semble passer, en partie, à 10. Il y aurait donc essentiellement des produits amorphes avec des particules primaires et une substance à comportement de vermiculite ou de montmorillonite alumineuse. La présence d'un peu de kaolinite est possible. En profondeur, la raie à 4,83 correspondrait à un peu de gibbsite et celle à 4,16 - 2,69, à la goéthite en petites quantités. L'analyse thermique différentielle vient confirmer ces résultats.

La spectrographie dans l'infrarouge a été effectuée sur la fraction fine de l'argile, donc débarrassée des particules primaires et peut-être aussi de la gibbsite. L'ensemble paraît amorphe avec fort peu de substances cristallines. La bande SiO absorbe fortement à 950 cm⁻¹, ce qui indique l'abondance des Al tétraédriques et un faible degré d'organisation des substances allophaniques. Il n'y a pas de bande à 800cm⁻¹, ce qui est en accord aussi avec la petite raie à 4,04 et la faible quantité d'argiles cristallines. Le doublet à 425 - 470cm⁻¹ n'est pas visible. Par contre, l'absorption est importante à 1630, 1690, 1725cm⁻¹ dans la bande attribuable à H₂O.

L'absorption est aussi très forte et uniforme entre 3000 et 3600cm⁻¹, mais sans trace de crochets des argiles kaoliniques ou de gibbsite. À noter un grand crochet non identifié à 1430cm⁻¹. Ce diagramme est tout à fait identique à celui qui a été obtenu à 4000 m d'altitude.

Le microscope électronique révèle un enchevêtrement de fibres ou de pseudo-fibres.

Ces sols à allophane perhydratés recouvrent en discordance des formations anciennes plus ou moins altérées précambiennes, de gneiss et micashistes.

c) - Sols à allophane perhydratés de la région de Puyo (1000 m d'altitude) -

1) - Morphologie - Propriétés -

Il a paru intéressant de comparer ce sol avec un autre examiné plus au Sud, à 1000 m d'altitude, dans une région nettement plus humide, recevant 5 m de pluviométrie annuelle.

Le sol est noir (10 YR 2/2), spongieux en surface sur 25 cm, avec 34% de M.O, puis beige en profondeur, jusqu'à 1 m, avec encore 18 % de M.O entre 25 et 40 cm. Sur 5 m d'épaisseur, le sol est ensuite jaune : 10 YR 5/6, bien que renfermant encore 6 % de M.O. à 2 m de profondeur et 4 % à 4 m. La matière organique est donc fortement masquée par l'allophane. Le sol est désaturé (3. à 4 mé de B.E), mais le pH, sauf en surface, est voisin de 5,8 et identique avec le KCl.

La quantité d'eau retenue par le sol est considérable : 230 % en surface et 300 % en profondeur. Cette eau est perdue pour les 5/6 irréversiblement après dessiccation à l'air. En volume, la quantité d'eau est moins élevée puisque la densité apparente est très faible, de l'ordre de 0,25 à 0,3.

2) - Minéralogie des argiles -

Le test FNa est positif et instantané, même en surface.

.../...

Echantillon de surface E 266 A

Diagramme de rayons X oriente

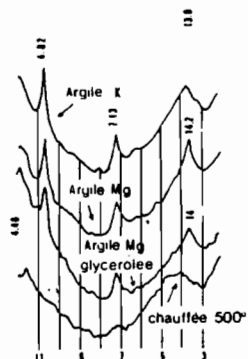
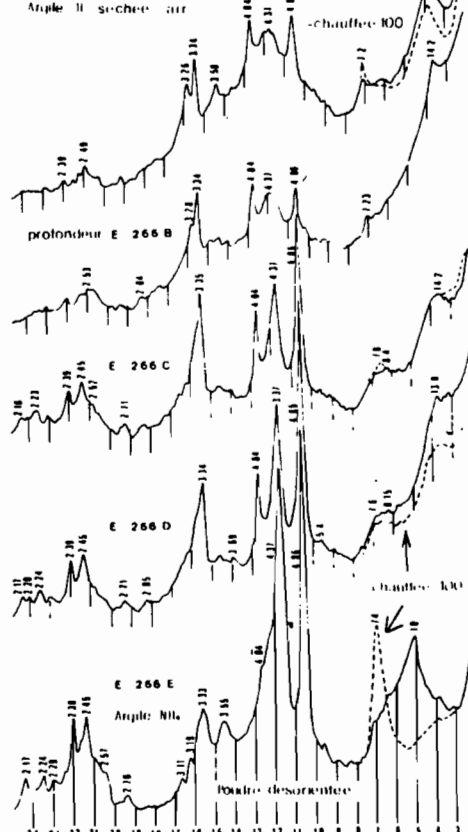


Diagramme de rayons X

Argile orientée
glycerolee
chauffée 500

Echantillon de surface E 266 A

Argile II séchée air



Echantillon de profondeur E 266 C

Diagramme de rayons X oriente

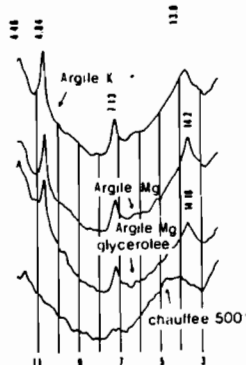


Figure à 1000m d'altitude près de Puyo

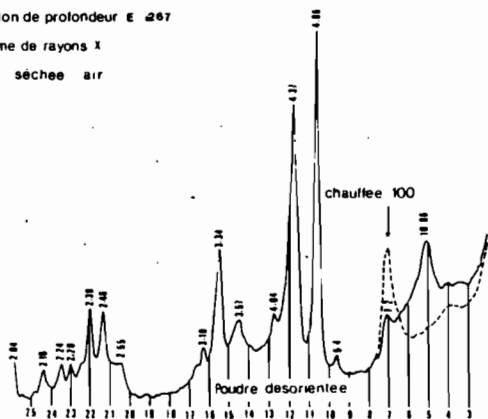
sol à allophane perhydraté à gibbsite hydrandépt

a/ a:0-20 b:25-40 c:200cm d:400cm e:6m argile enfouie

Echantillon de profondeur E 267

Diagramme de rayons X

Argile H séchée air

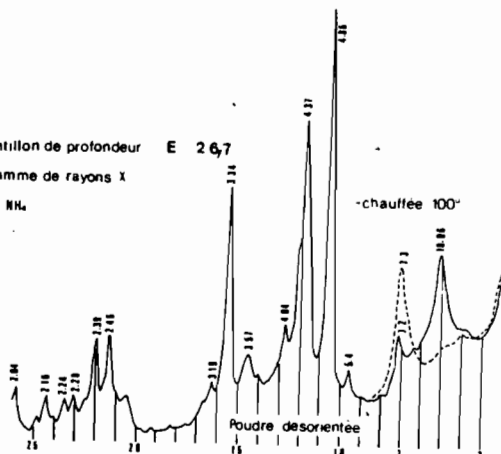


Echantillon de profondeur E 267

Diagramme de rayons X

Argile NH4

chauffée 100°



Les diagrammes de rayons X révèlent la présence de gibbsite dans tous les horizons, mais les teneurs s'accroissent beaucoup à 2 puis à 4 m de profondeur, pour être considérables à la base du recouvrement de cendre dans l'halloysite blanche au contact du matériau argileux sous jacent, d'origine granitique. C'est juste au-dessus de cette argile blanche que l'on peut observer quelques petites concrétions de gibbsite.

La raie à 4,45 est très peu marquée et celle à 4,37 est attribuable à la gibbsite.

Une petite raie à 7,2 semble légèrement renforcée par séchage à 100° et disparaît en grande partie à 500°.

Une raie à 14 Å apparaît dans tous les horizons, bien nette et effilée en surface, plus confuse en profondeur. Elle gonflerait très très légèrement au glycérol, pour se rabattre à 10-12 Å en diminuant d'intensité à 500°. La defférioration et les traitements au KCl ou MgCl² n'apportent guère d'indications nouvelles.

Il y aurait donc de l'allophane, de la gibbsite, une petite quantité de substance mal cristallisée, à comportement de vermiculite ou montmorillonite alumineuse, et un peu d'halloysite ou de kaolinite. Les minéraux primaires sont assez abondants, en particulier le quartz en profondeur.

A 6 m de profondeur, l'argile blanche, argilo-limoneuse, mêlée de graviers d'altération de toutes sortes, constitue un obstacle au drainage vertical. L'halloysite à 10 Å y est très bien caractérisée, avec une très importante quantité de gibbsite.

Un autre échantillon d'argile blanche plus homogène, sans graviers sur 50 à 80 cm d'épaisseur, a été prélevé à peu de distance, à la base d'un sol à allophane identique. Les diagrammes X sont les mêmes, avec beaucoup de gibbsite, que l'on examine l'argile dispersée en milieu acide, ou celle dispersée en milieu basique.

CONCLUSION

La totalité du versant amazonien des Andes, à cette latitude de Baez est donc très humide, soit par suite des pluies très abondantes à altitude basse et moyenne, soit par suite de l'ennuagelement des hauteurs balayées par les brouillards ascendants venus de l'amazonie.

On rencontre partout les sols à allophanes avec quelques variantes. Il semble que ce soit à 3000 m que l'évolution vers les argiles cristallines soit la plus nette sans doute par suite de conditions moins humides qu'à plus basse altitude ou dans les sommets.

IV - LES SOLS DES PARAMONS DU SUD - AMBATO-RIOBAMBA

1) - SITUATION - CLIMAT -

Les bassins d'Ambato et de Riobamba sont partiellement séparés par le versant du très important massif du Chimborazo (6300m) situé sur la cordillère Atlantique qui se prolonge au Sud par de hauts massifs de plus de 4000 mètres (col vers Guayaquil 3800 m).

A l'Est, la cordillère Orientale est jalonnée de nombreux volcans, dont deux encore actifs : le Tungurahua (5000 m) à la hauteur d'Ambato et le Sangay (5230 m) au Sud de Riobamba. L' Altar (5320 m) est situé entre les deux.

Ces bassins, enserrés dans de hauts versants, sont peu arrosés et reçoivent 400mm de pluviométrie annuelle, avec 2 à 4 mois secs. La température moyenne de 13° vers 2500m, s'abaisse à 6 ou 7° à 3500m d'altitude et est constante toute l'année. Les paramons paraissent nettement plus humides, sans doute par suite de précipitations un peu plus fortes et surtout d'un ennuagement important qui limite l'évaporation.

2) - GEOLOGIE - (D'après SAUER - 1965)

Le volcan Chimborazo démantelé a émis, autrefois, des andésites à pyroxènes et amphiboles, mais les volcans de la cordillère Orientale : Sangay, Altar, Tungurahua, ont rejeté et rejettent encore des matériaux plus basiques, des andésites à pyroxènes qui forment transition vers les basaltes, avec un peu d'olivine pour le Tungurahua et davantage pour le Sangay.

Il semble que ces indications permettent de penser qu'à une phase volcanique ancienne andésitique, avec pyroxènes et amphiboles, aurait succédé une phase récente plus basique à pyroxène-augite et un peu d'olivine. C'est, en fait, ce que l'on observe dans les sables.

3) - MINERALOGIE DES SABLES -

Dans une précédente étude (DELAUNE - 1967-1969), nous avons montré que la proportion d'hypersthène et de hornblende était sensiblement équivalente au Sud de Quito vers Latacunga et Ambato, mais que l'hypersthène l'emportait très nettement près d'Ambato et en Amazonie, avec fréquemment, accroissement de l'augite. Au Sud, riche en hypersthène, s'opposerait donc le Nord, riche en hornblende, avec une zone de transition où ces deux minéraux s'équilibreraient à peu près. Il y a bien sûr des exceptions comme les cendres du Cotopaxi, à dominance d'hypersthène et certaines formations anciennes de cangagua.

Nous avons complété et vérifié ces données par plusieurs autres examens de sables, plus au Sud de la zone précédemment étudiée.

.../...

1) Dans le paramon de Chimborazo, l'hypersthène représente 75% des minéraux lourds et est accompagné par l'augite et l'alivine avec seulement des traces de hornblende.

2) A l'Est d'Ambato, un vaste recouvrement, en plateau, de cendre à peine altérée, en bordure du Tungurahua, révèle une composition similaire, avec peu d'olivine. Sous ces cendres, on observe la cangagua dure qui est également riche en hypersthène avec un peu d'olivine.

3) Au Sud de Riobamba, en montant sur le paramon de la cordillère Pacifique, on observe des recouvrements peu épais de cendres riches en hypersthène et augite sur une cangagua de composition similaire. Plus en altitude la cangagua disparaît et fait place à un dépôt de cendre de plusieurs mètres d'épaisseur reposant directement sur le substratum rocheux.

Le tableau montre clairement les importantes teneurs en hypersthène dans tous les minéraux lourds des sols dérivés de cendres de ces régions : 70 à 80 % environ, avec fréquemment de l'augite, parfois un peu d'olivine. Une partie de ces cendres proviendraient du Tungurahua et du Sangay.

Les cangagua du Nord d'Ambato au Sud de Riobamba renferment davantage de hornblende et correspondraient à une phase antérieure du volcanisme plus acide, à andésites à pyroxènes et hornblende en quantité sensiblement équivalente. Dans le profil que nous avons examiné au Sud de Riobamba il y a très nettement eu en recouvrement de cendres plus basiques sur la cangagua.

Par contre près du Tungurahua, à l'Est d'Ambato la cangagua est plus basique, riche en hypersthène, augite avec un peu d'olivine.

4) PARAMON DE CHIMBORAZO - (Altitude 3540 m - E 264)

C'est la limite de la culture de la pomme de terre parmi les steppes herbacées à *Stipa Yehu* du paramon. Le sol est noir, finement sableux jusqu'à 1 m, plus grossier ensuite, très légèrement onctueux. Il s'agirait de cendres relativement récentes qui proviendraient, sans doute, du Tungurahua. Les teneurs en matière organique: 7 % en surface, de 0 à 20 et 2 % à 130 cm, sont plus faibles qu'à altitude semblable dans le paramon de El Angel au Nord du pays (22 % de 0 à 20 cm et encore 10 % à 1 m) et le C/N est nettement plus faible (12 contre 17 à El Angel). Les proportions D'AH et d'AF sont équivalentes.

Cette région paraît nettement plus sèche que celle d'El Angel. Les teneurs en bases échangeables sont, en conséquence, un peu plus élevées.

Les humidités au pF 3, mesurées sur échantillons conservés humides ou séchés à l'air, sont les mêmes. Ce qui indique un dessèchement temporaire du sol. La densité apparente est élevée, 1 en surface contre 0,5 à El Angel.

Tableau -

Variation des minéraux lourds des sols dérivés de cendres et de la cangagua du Nord d'Ambato au Sud de Riobamba

Situation	N° Profil	Profond.cm	Hyperst.	Augite	Hornbl.	Olivine	ML % S
<u>Sables 50-500µ des sols dérivés de cendres -</u>							
<u>Nord-Est Ambato</u> (Pilero)		0 - 20	71	10	18		10
<u>Est Ambato</u>		0 - 20	68	21	6	5	
		100	73	11	6	10	
<u>Sud Ambato</u> cendres scoriacées			70	28	2		
Sol - 1er dépôt		0 - 30	87	6	7		11
ponces		70	76	11	13		10
2è dépôt		100	72	15	10		10
Autre profil		0 - 20	52	10	6	32	
<u>Paramon Chimborazo</u>							
	264a	0 - 20	74	25	I	tr	I0
	b	40 - 80	46	34	2	I8	I2
	c	I20 - I50	55	I9	+	26	I6
<u>Sud de Riobamba</u> -sur la cangagua près du paramon							
	263a	0 - I5	59	28	II	2	I5
	b	20 - 25	65	23	I2	+	I6
- paramon	262a	0 - 20	77	I8	5	+	4
	b	50- 60	72	16	I2	+	I0
	cc	I20-I70	76	I4	I0	+	I6

Sables extraits de la cangagua dure ou superficielle -

<u>Nord-Est Ambato</u> Pilero		25 - 50	41	18	41		11
<u>Est Ambato</u>		100	(67)	(19)	(9)	(5)	
<u>Sud Ambato</u>		150	47	9	44		11
<u>Sud Riobamba</u>		100	46	19	35		I8

Sables extraits des sols à allophane perhydratés d'Amazonie avec gibbsite

- Latitude médiane d'Ambato - Riobamba -

Puyo	266 a	0 - 20	70	I8	I2	+	I3
	b	20 - 40	56	I4	25	4	20
	c	200	52	3	45		38
	d	400	69	-	3I		2
	e	600	44	9	27	andalousite I	épidote 2
						zircon I6	anastase I
							ML%S=3

Halloysite blanche à gibbsite: Très peu de minéraux, traces d'hypersthène et de hornblende. ML%S=2

Avec le test FNa de Fieldes, la coloration n'est obtenue qu'en profondeur et moins rapidement que dans le paramon de El Angel.

La fraction fine inférieure à 2 microns (E262) est peu abondante. La dispersion a lieu en milieu basique en surface, mais à pH 6 en profondeur. Le diagramme de rayons X montre l'abondance des minéraux primaires, plagioclases surtout, dont la plupart des raies sont bien visibles. Un renflement à 14 Å et à 4,44 se distingue mal du fond, dû aux amorphes et indiquerait une très faible quantité d'argile cristalline. Ce renflement à 14 est accentué par traitement au KCl, mais n'est guère modifiée dans l'échantillon saturé au Mg ni par chauffage à 150 °. Il s'estompe déjà à 200° et à 250° et passe à 11 Å à 500°.

Il s'agirait donc d'un cryandepts... Sol à allophane avec début de cristallisation d'argiles.

5) PARAMON AU SUD DE RIOBAMBA - 3720 m - E 262

L'altitude est un peu plus élevée et toutes les cultures disparaissent au dessus de 3600 m d'altitude. C'est une steppe herbacée, balayée par les vents et les nuages.

Le sol est très noir sur 40 cm, plus noir encore que dans le paramon de Chimborazo: 2,5 Y 2/0, luisant et la cendre plus fine, limoneuse, en peu onctueuse. La coloration est un peu moins foncée, mais encore brun noir, cependant, de 40 à 170 cm (10 YR 2/1).

Avec ses teneurs en matières organiques importantes et constantes sur 170 cm d'épaisseur (14 %) et un C/N élevé (15), ce sol se rapproche de celui que nous avons examiné dans le paramon d'El Angel. Il est, cependant, nettement moins désaturé en bases (9 mé % contre 15), la région étant très ennuagée, mais sans doute moins arrosée. Les matières humiques correspondent à la moitié de la M.O. totale et les AH l'emportent dans tout le profil sur les AF.

La rétention en eau est importante, atteignant 100 % à pF 3 sur sol humide et s'accroît en profondeur. Environ la moitié de cette eau est irréversiblement perdue par dessiccation à l'air. Le test de FIELDDES donne une coloration intense qui est, cependant, assez lente à apparaître en surface, bien que cet horizon ne soit pas plus organique qu'en profondeur.

En correspondance avec ces propriétés, le diagramme de rayon X montre une substance essentiellement amorphe avec des renflements incertains à 13-14 et 4,44. Les principales raies des minéraux primaires apparaissent également à 4,04, 3,21, 3,77 Å. C'est donc un distric-cryandept ou un andosol perhydraté mélanique, mais modérément

.../...

6) - SOLS SUR CANGAGUA A LA LIMITE DU PARAMON DE RIOBANBA (E 263)

La cangagua semble occuper d'immenses surfaces dans le bassin de Riobamba, mais disparaît brutalement vers 3400 m d'altitude, en montant vers le Chimborazo et 3600 m au Sud, pour faire place aux recouvrements épais de cendre qui reposent sur les matériaux anciens durs, volcaniques ou métamorphiques.

C'est ainsi qu'à 3400 m d'altitude, juste à la limite du paramon au Sud-Ouest de Riobamba, on voit très distinctement les recouvrements de cendres localisés dans les parties concaves des pentes ou les thalwegs, où ils peuvent atteindre 1 m d'épaisseur. Sur les parties convexes ou les replats, le dépôt de cendre semble avoir été découpé par l'érosion éolienne, laissant ainsi apparaître la cangagua à faible profondeur. Dans les paramon, plus humides, constamment ennuagés, la couverture herbacée permanente, aurait protégé le sol de l'érosion éolienne qui sévit fortement, au contraire, dans les régions plus sèches de plus faible altitude, et élimine probablement la cendre au fur et à mesure des apports successifs.

Sur cette cangagua, le profil est exactement le même que dans la plupart des régions similaires d'Equateur, qu'il s'agisse d'Ambato, Ibarra, ou San Gabriel, El Angel. Le sol est limoneux brun 10 YR 2/2, avec 3 % de matière organique dans les 20 premiers cms et repose à 30 cm sur la cangagua très dure, avec un mince horizon intermédiaire de 5 cm d'épaisseur, à revêtements très noirs 2,5 Y 2/1, bien que la teneur en matière organique ne soit que de 2 %. Cette matière organique est bien humifiée, environ 50%. Les AH sont 4 fois plus abondants que les AF en surface. Il n'y a plus d'AF en profondeur dans l'horizon très noir.

Au contact de la cangagua dure le sol renferme de l'argile nettement sensible au toucher et les teneurs en cations échangeables sont importantes : 28 mEq dont 12 de Mg, ce qui indique vraisemblablement la présence de montmorillonite. Le pH est voisin de 7. Les humidités correspondantes aux pF 3 et 4,2 sont les mêmes sur sol conservé humide ou sec.

Le test FNa de FIELDS ne donne pas de coloration. La présence d'argile cristalline en quantité importante est confirmée par l'intensité de la raie à 4,45 Å aux rayons X, ainsi que celle de la raie à 2,52 Å. Par contre, la raie à 13,5 Å n'est pas nette et apparaîtrait sans doute mieux après un traitement, de même que la raie à 7,9. Il ya donc probablement de l'hallowysite et de la montmorillonite mal cristallisée. L'analyse thermique différentielle montre un crochet endothermique à 450° et un autre exothermique à 800°.

Dans les classifications ces sols pourraient être rangés parmi les sols isohumiques ou les mollisols.

7) CONCLUSION

L'opposition est très prononcée, à peu de distance, entre les sols à allophane profondément noirs, des hautes altitudes et les sols peu profonds sur la cangagua dure à un peu plus faible altitude, qui renferment déjà une proportion notable d'argile cristalline, quoique encore pas très bien organisée.

Plus que l'altitude, c'est l'humidité permanente du sol, par suite de l'enneigement constant, et des faibles températures réduisant l'évapo-transpiration, qui seraient la cause de ce changement très brutal dans l'évolution des sols.

La différence de composition minéralogique des sables entre la cendre et la cangagua, montre bien qu'il s'agit de deux dépôts correspondant à deux périodes de volcanisme.

Il n'en est pas moins vrai que les facteurs actuels de la pédogénèse peuvent contribuer dans les cendres, à l'accumulation en profondeur de silice ou de carbonates dans les régions d'altitude modérément arrosées, donc à la formation de duripan appelés aussi cangagua, alors qu'à haute altitude, l'excès de drainage permet l'élimination de la silice dans les eaux de ruissellement, sans qu'il puisse y avoir formation de duripan.

Ces quelques profils montrent que cette région se prête bien à une étude plus détaillée du passage des sols à allophane d'altitude vers les sols moins évolués, ou ayant évolués différemment à un peu plus basse altitude, mais encore au-dessus de 3000 mètres.

A plus basse altitude, vers 2500-3000 m, les sols sont très sableux, peu organiques (0,8 % en surface, 0,5 à 1m), avec une très faible rétention pour l'eau (7 à 10 à pF 3, 2 à 5 à pF 4,2), mais des teneurs en bases échangeables relativement satisfaisantes: 3 à 5 mé %. Ce sont des sols peu évolués.

A noter, que les sables proches du Tungurahua sont si noirs par nature, que même avec moins de 1% de matière organique, le sol humide a un chroma de 0 à 1.

V - LE NORD DE L'EQUATEUR - EL ANGEL - SAN GABRIEL

1) - SITUATION - CLIMAT -

Cette région Nord forme un ensemble d'altitude élevé qui se poursuit au-delà de la frontière de Colombie et est séparé au Sud du bassin d'Ibarra, par la très profonde entaille du Rio Chotta (1500 m).

En quittant la vallée très sèche, sub-désertique du Chotta, on passe en altitude vers 2500-3000 m à des régions beaucoup mieux arrosées, qui reçoivent environ 900 mm de pluie par an, assez bien répartie, le diagramme ombrothermique de GAUSSEN n'indiquant aucun mois écologiquement sec. A 3000 m d'altitude, la température moyenne annuelle est constante et de 12° avec des minima absolus de 4 à 5° et des maxima de 19°, mais plus en altitude, à 3500 m, la température moyenne s'abaisse à 6 ou 7°, mais sans gelées pouvant affecter le sol.

2) - GEOLOGIE -

Les formations épaisses de cangagua sont très importantes sur les versants situés au Sud d'El Angel et San Gabriel vers la vallée du Chotta. L'érosion est intense et la cangagua dure affleure fréquemment en plaques stériles.

Au Nord d'El Angel, dans le paramon et au Nord de San Gabriel, la cangagua disparaît et d'épaisses couches de cendres alternant avec des ponces, souvent peu altérées, sont bien visibles. Ces cendres reposent sur les formations dures directement ou avec intercalation de formations fines anciennes, brunes, de plusieurs mètres d'épaisseur, peu argilisées.

Trois profils ont été examinés en détail :

3) - A 2800 m D'ALTITUDE ENTRE LE CHOTTA ET EL ANGEL (E 250) - Sol isohumique

C'est le profil très classique sur cangagua qui est représentatif d'une bonne partie des sols cultivés de ces régions.

Le sol labouré est brun noir sur 25 cm (M.O = 4 % - Densité apparente : 1,15) limoneux, légèrement argileux. La matière organique est bien humifiée (40%) avec deux à trois fois plus d'A.H. que d'A.F.

Au dessus de la cangagua dur à pénétrer vers 35 cm de profondeur, on trouve un horizon de 5 à 10 cm d'épaisseur, de couleur très noir, brillant, nettement plus noir qu'en surface - 7,5 YR 2/0 - bien que renfermant moins de matière organique 2%. Cette matière organique contient 8 fois plus d'AH que d'AF. Il s'agirait d'ailleurs de revêtements, car le sol écrasé dans les doigts, prend une teinte moins foncée, brun-noir. Il y a déjà quelques blocs durcis de cangagua à ce niveau. La cangagua paraît sablo-argileuse, assez collante à l'état humide.

Il y a une discordance entre l' horizon supérieur riche en hornblende, comme les cendres du paramon d'El Angel et la cangagua délitée plus riche en hypersthène.

Tableau

Variation des minéraux lourds des sols dérivés de cangagua au Nord du Rio Chotta. Région d'El Angel - San Gabriel.

Situation	No Profil	Profondeur cm	Hypersthène	Augite	Hornblende	Olivine	ML/S
Sud d'El Angel sur cangagua	E 250 a	0 - 20	19	2	79	-	12
	b	20 - 40	37	5	57	1	19
Nord El Angel paramon	E 252 a	0 - 20	21	1	78	-	2
	b	70 - 90	9	4	87	-	10
	c	110 - 120	5		94	1	17
	niveau de ponce intercalaire		+		100	+	21
	e	140 - 160	17	5	78	-	23
	253	180	26	6	67	1	
	255 allophane	250	32	10	58	-	
	256 cendre fine verdâtre	300	49	9	42	-	
San Gabriel	E 258 a	0 - 20	1	+	99		21
	1 ^{er} sol	50 - 70	8	1	91		17
	Ponces	70 - 200	0	+	100	bcp de biotites non comptés	26
	2 ^e sol enfoui	210 - 260	17	6	77		9
	3 ^e sol à halloysite	500 - 700	+		+++	très peu de minéraux	12

Ce sol sèche une partie de l'année, aussi les humidités aux pF 3 et 4,2 sont les mêmes sur sol conservé humide ou sur sol séché à l'air. Les teneurs en bases échangeables sont importantes: 15 mé en surface, 28 plus en profondeur, avec une proportion notable de Mg qui indiquerait la présence vraisemblable de montmorillonite.

La ressemblance d'aspect et des données analytiques avec celle d'un autre sol de cangagua, situé à 3400 m d'altitude, au Sud de Riobamba, à plusieurs centaines de kilomètres, est si frappante que nous avons reproduit les résultats à titre comparatif.

Tableau Comparaison de sols peu profonds sur cangagua d'El Angel et de Riobamba -

Profil en cm	Bases échangeables					pH		M.O.	C/N	pF		pF 4,2		Test FNa
	Ca	Mg	K	Na	S	eau	KCl			Frais	sec	Frais	sec	
El Angel - Altitude 2800m														
0 - 20	9.5	4.5	0.8	0.3	15.1	5.4	6.0	4	9.3	32	33	19	16	0
25 - 30	14.4	11.4	1.94	0.9	28.6	6.2	7.2	2.1	11.6	42	41	31	25	0
Riobamba à Altitude 3400 m.														
0 - 15	11.6	6.7	0.9	0.2	19	5.8	6.6	3.3	11.4	23	23	15	13	0
20 - 25	14	12.4	1.2	0.4	28	6.2	7.4	2.2	11.8	30	33	24	19	0

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE DES ANTILLES

Boîte Postale 81 Fort-de-France
Martinique

Téléphone n 71.28.72 à Fort-de-France

ERRATA -

EQUATEUR 4^{eme} partie Page :32

Inverser les résultats de pH eau et KCl

dos.

Les rayons X montrent une importante raie à 4,45 dans la cangagua superficielle délitée, qui indique la présence, en quantité notable, d'argile cristalline, mais il n'y a que des renflements à 7,6 et 13,8. Par chauffage à 100°, il y a un net accroissement de la raie à 7,6, ce qui indiquerait l'halloysite. Il est possible qu'après des traitements appropriés, la montmorillonite puisse être mise en évidence.

4) - PARAMON DE EL ANGEL : 3500 m D'ALTITUDE - Sol à allophane mélanique

C'est une région inculte, souvent ennuagée, avec une température moyenne de 6 à 7°C constante toute l'année. La végétation de *speletia hartwei* est très particulière et bien fournie, indiquant une humidité notable et constante.

Les sols sont limoneux, très noirs : 7,5 YR 2/0, brillant, sur 120 cm d'épaisseur, avec, semble-t-il, plusieurs dépôts successifs qui reposent sur une couche de ponce jaune presque inaltérée. Ces cendres ne sont donc pas très anciennes. Sous la ponce, on observe sur un à plusieurs mètres d'épaisseur, divers dépôts limoneux brunâtres, alternant avec des couches plus claires. Certaines de ces couches sont bien allophaniques, d'autres renferment nettement un peu d'argile.

Dans le premier mètre les minéraux lourds sont presque exclusivement constitués de hornblende avec un recouvrement de cendres un peu plus riche en hypersthène et de composition identique à celle du précédent profil examiné. En profondeur, dans les niveaux enfouis sous la ponce la proportion d'hypersthène s'accroît progressivement. Il y aurait donc eu une variation sensible de la composition des dépôts. (cf Tab: p.32)

Le premier dépôt noir de 1,2 mètre d'épaisseur est très riche en matière organique avec 22% de 0 à 20 cm et encore 10% à 1,2 m de profondeur. Le C/N est de 15 à 17. La matière organique est cependant bien humifiée (50% en surface et 70% en profondeur) et les A.H. l'emportent nettement sur les A.F. . Le sol est désaturé pauvre en bases échangeables, 6 mé en surface, moins de 2 en profondeur. La rétention pour l'eau est très importante et l'humidité au pF 3 atteint 130 % dans le premier mètre, plus de la moitié paraissant perdue irréversiblement par dessiccation à l'air, surtout en profondeur.

Le test FNa de FIELDS donne instantanément une coloration rouge pour tous les horizons, même en surface.

Dans le premier dépôt situé au-dessus de la ponce (E 252), les rayons X montrent une très petite raie à 4,49 qui contraste avec la raie importante et effilée à 14 Å. Cette raie à 14 sur échantillon orienté, demeure inchangée avec le glycérol et passe à 10 Å par chauffage à 500°, en restant bien marquée avec ainsi un comportement de vermiculite. La défférification d'un traitement au MgCl² n'apporte guère de modifi-

.../...

cations. Par contre, le traitement au KCl montre un fort accroissement de la raie à 14 qui devient très effilée.

Dans les dépôts enfouis sous la ponce et le sol noir, la raie à 14 est apparente, mais moins importante. La raie à 4,45 est très faible, mais paraît légèrement plus prononcée, avec également un léger accroissement de la raie à 7,4 par chauffage à 100°, plus net dans l'horizon brun, un peu argileux (E 252 E) que dans l'horizon franchement allophanique (E 255). Ce sont vraiment des différences très peu sensibles et, dans les deux cas, le diagramme correspond à un spectre d'amorphe accompagné de quelques minéraux primaires. L'analyse thermique différentielle confirme le caractère allophanique de ce sol.

La cristobalite est nettement plus abondante en surface qu'en profondeur.

Cette raie effilée à 14 Å en l'absence de raie marquée à 4,45 Å était aussi bien visible dans le sol noir au col de BAEZ à 4000 m d'altitude, sol à allophane perhydraté mélanique ou dystric-cryandepts comme celui-ci.

5) - AU NORD DE SAN GABRIEL - ALTITUDE 2900 m -

La cangagua qui couvre de vastes surfaces dans la région de San Gabriel, semble disparaître plus au Nord. D'épais dépôts de cendres alternent avec des ponces de façon bien régulière et constante sur de grandes distances. Ces cendres et ponces recouvrent, par endroits, une formation brune de plusieurs mètres d'épaisseur, fine, ne donnant pas la sensation d'argile au toucher, constituée de blocs se brisant aisément comme dans beaucoup de sols à allophane.

Le profil examiné dans une région de culture comporte, sur 70 cm d'épaisseur, un horizon noir, presque brillant, 5 Y 2/0, mais moins noir écrasé entre les doigts, donc avec des revêtements. Ce premier dépôt repose sur une couche de ponce pure de 1,3 m d'épaisseur, graveleuse, beige jaune, presque inaltérée, qui a recouvert un autre sol noir : 7,5 YR 2/0, limoneux, un peu argileux, mais doux entre les doigts.

La hornblende est très abondante dans ces projections surtout en surface et dans les ponces. Les ponces renferment en outre beaucoup de biotites, ce qui souligne le caractère acide du magma original.

Ces cendres et ponces recouvrent des projections plus grossières et d'anciens sols limoneux brunatres, beaucoup plus anciens puisque les minéraux primaires y sont rares, avec encore cependant prédominance de la hornblende. (cf Tab: p. 32)

Le dépôt supérieur est riche en matière organique : 17 % de 0 à 20 cm, et encore 12 % à 60 cm, avec une densité apparente de 0,8 et est bien pourvu en bases échangeables. Les humidités à pF 3 et 4,2 obtenues sur sol humide sont assez élevées (70 %) et une partie de cette eau semble perdue irréversiblement par dessiccation à l'air. Le test FNa donne une coloration instantanée à 60 cm de profondeur et dans la ponce, apparemment inaltérée pourtant, mais la coloration est longue à s'établir et peu intense tout en surface, dans l'horizon très organique. (AH/AF = 2)

Les rayons X (E 258b) indiquent un pic bien prononcé et effilé à 14,6 et une raie à 10 qui passe à 11,4 avec le glycérol et à 7,5 par chauffage à 100°, révélant ainsi la présence d'halloysite. La raie à 4,43 est bien nette, mais pas très importante, cependant. La raie à 14 reste inchangée avec le glycérol sur échantillon orienté

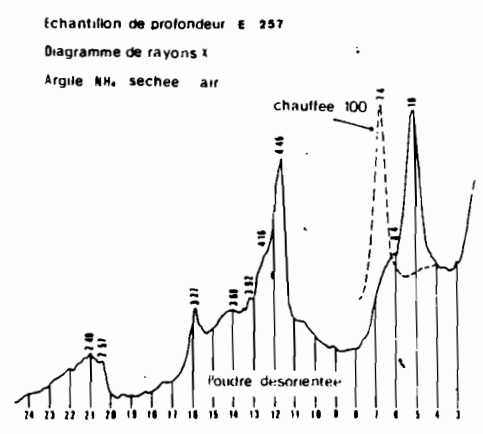
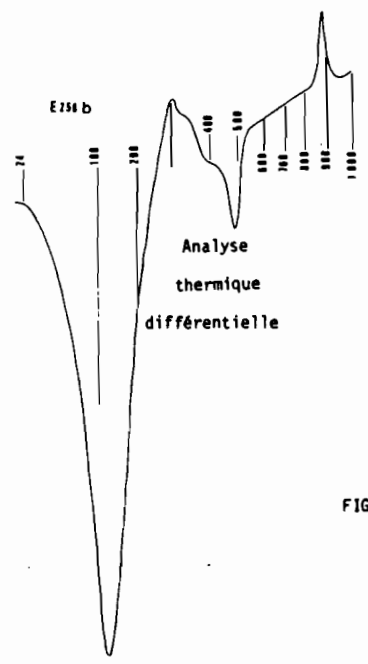
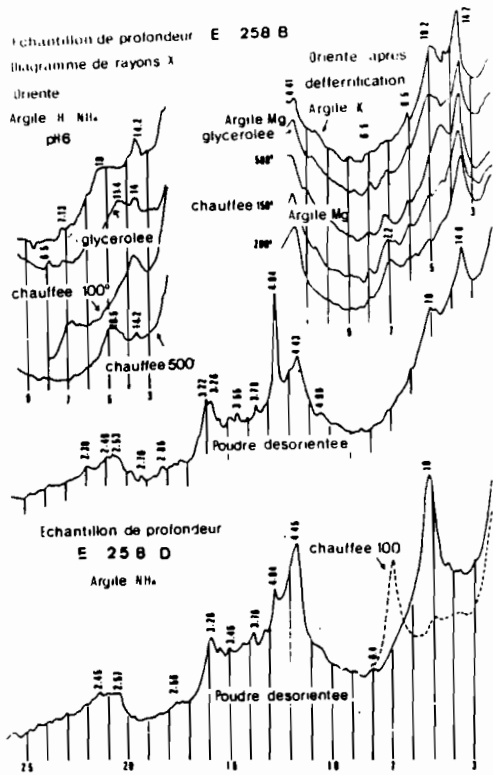


FIGURE: à proximité du Paramon San Gabriel
b: 1er sol: 50-70cm
d: 2ème sol: 250cm sol à halloysite hydraté
257 sol à halloysite hydraté enfoui

et par chauffage à 150° et 200° sur échantillon déffériorifié et saturé en Mg. Elle passe à 10,5 Å à 500° avec persistance d'une petite raie à 14 Å. Il pourrait s'agir d'argiles à comportement de vermiculite ou chlorite mais encore mal cristallisées ou en faibles proportions. Les raies de la cristobalite et des minéraux primaires sont bien visibles.

- Le dépôt enfoui dans les ponce (E 258A), également bien noir, mais paraissant un peu argileux, quoique encore très doux au toucher, a une composition bien différente de celle du dépôt supérieur. La fraction fine est constituée par une belle halloysite 10 Å. La rétention en eau est bien plus faible et il n'y a pas de différence entre les humidités à pF 3 mesurées sur sol conservé humide ou séché à l'air. Avec le test de FNa, on n'obtient aucune coloration. La teneur en matière organique de ce sol enfoui est le double de 4% et le C/N élevé : 19%. Cette matière organique est cependant bien humifiée (60%) et il a deux fois plus d'A.H. que d'A.F.

On doit noter les teneurs en bases échangeables assez importantes : 13 à 18 mé, de ce profil et les teneurs élevées en potassium échangeable (2 mé), peut-être dues d'ailleurs aux apports d'engrais potassiques sur les pommes de terre, mais la présence de minéraux potassiques dans les cendres serait à étudier.

L'horizon de surface posséderait donc les caractéristiques d'un sol à allophane mélanique, ou d'un dystrandept, faisant transition déjà vers les hydric-dystrandeps.

A peu de distance de ce profil, une profonde tranchée de route de 10 à 12m de hauteur, permettait d'apercevoir très nettement ce premier sol noir, l'épaisse couche de ponce, le deuxième sol noir enfoui, puis diverses strates de matériaux pyroclastiques variés, sur plusieurs mètres d'épaisseur et, enfoui à 8-10 m de profondeur, un sol de couleur brune, limoneux, d'apparence allophanique, beaucoup plus ancien avec très peu de minéraux lourds essentiellement la horblende. La rétention en eau est importante : 80 % au pF 3, 60 au pF 4,2, mais identique sur sol frais ou séché à l'air. La teneur en matière organique est très faible : 0,2 %, la teneur en bases échangeables modérée. Le test FNa ne donne pas de coloration. La fraction fine est constituée (E 257) d'une belle halloysite 10 Å avec une très belle raie à 10 et à 7,4 Å après dessiccation à 100°.

REMARQUE - Nous avons fréquemment observé aux Antilles, en Equateur, au Nicaragua, de très beaux diagrammes d'halloysite dans des sols qui, sur le terrain, présentent plutôt l'apparence des sols à allophane, avec une sensation d'argile faible ou incertaine.

Bien que relativement hydratés, on n'observe généralement pas de différence entre les humidités déterminées sur sol conservé humide ou séché à l'air. De plus, les valeurs obtenues pour le pF 4,2 sont relativement plus élevées sur sol séché à l'air qu'avec les allophanes..

Il semblerait qu'une meilleure organisation, que dans l'allophane, empêche l'effondrement du réseau par dessiccation à l'air. Cette forme d'halloysite présente généralement le faciès en auréoles concentriques au microscope électronique et se dissout très aisément dans les acides ou les bases fortes. Comme nous l'avons déjà signa-

lé (C.D 1972), le passage des sols à allophane aux sols à halloysite, correspond, en fait, fréquemment à ce faciès particulier d'halloysite hydraté et aisément solubilisable.

6 CONCLUSION

On peut observer, comme dans les régions du Sud déjà examinées, la même opposition entre les sols à allophane des paramons et lessols peu profonds, isohumiques ou mollisols, sur cangagua dure à plus basse altitude.

Entre San Gabriel et Tulcan, il semble cependant, que localement la cangagua disparaisse même en régions cultivées vers 2900 m d'altitude et que les sols dérivés d'épais dépôts de cendres et ponces occupent de vastes surfaces. La composition minéralogique des cendres est la même que dans le paramon de El Angel de part et d'autres de la première couche de ponce. A une dominance exclusive de la horblende au dessus des ponces, correspond un peu plus d'hypersthène sous la couche de ponce. L'origine de ces dépôts est donc probablement semblable. La présence de ces dépôts épais de cendres permet donc de suivre le passage des sols à allophane du paramon dans les hautes altitudes vers les sols renfermant déjà de l'halloysite, surtout en profondeur, ou des argiles mal cristallisées, dans des régions et à des altitudes où l'on trouve en général des sols sur cangagua.

L'absence de cangagua doit elle être attribuée à une pluviométrie et à un ennuagement plus accentués qu'ailleurs, empêchant sa formation ou favorisant son délitement, ou à un recouvrement par d'épaisses projections récentes cendreuses qui se seraient maintenues en place. Pour l'agriculture la différence est considérable.

VI - REGION DE PASTO - Colombie -

1) - SITUATION -

Nous nous sommes limités à trois profils sur les pentes du volcan GALERAS. L'un presque au sommet à 4100m d'altitude, l'autre à 3800 m dans les basses broussailles du paramon sub-alpin et le troisième vers 3000 m environ, dans des régions déjà cultivées.

2) - MINERALOGIE DES SABLES -

CALHOUN et LUNA(1972) ont montré pour 4 profils de cette région, la large dominance de la hornblende sur les pyroxènes. Deux échantillons d'un même profil qui correspondent à nettement deux dépôts distincts, ont été examinés. L'horizon supérieur renferme surtout de la hornblende, le niveau inférieur tout autant altéré, de l'hypersthène. On ne peut donc dire que l'altération entraîne une augmentation relative de la hornblende. Ces deux dépôts renferment autant d'argile : 42 % et ont tous deux la même capacité élevée de rétention pour l'eau: 70 %. Il s'agirait donc d'un premier dépôt riche en hypersthène, recouvert par un deuxième dépôt plus riche en hornblende, comme nous l'avons observé en Equateur. Près du cratère il ya davantage d'hypersthène:74 et d'augite :26 dans le sol limoneux intercalé dans des scories et des cendres graveleuses.

Echantillon	Profondeur	Hy	Au	Ho	Ol	ML % S
203 c	120 - 160	22	3	74	1	29
d	200 - 270	71	21	7	1	72

3) - MORPHOLOGIE DES PROFILS -

a) à 3800 et 4100 m

Ces deux profils des hautes altitudes se ressemblent étroitement. Tous deux sont constitués par une succession de dépôts grossiers, scoriacés, alternant avec des dépôts plus fins, déjà nettement allophaniques et de coloration beige jaune : 10 YR 4/2 ou brunâtre.

Les échantillons ont été prélevés dans les 20 premiers cms et dans un niveau limoneux de profondeur.

Les sols sont très décaturés en cation 1 à 2 mé, et renferment, vers 1 m de profondeur, dans les horizons limoneux jaune : 10 YR 5/6, encore 8 % de M.O qui est donc bien masquée par la matière organique. La rétention pour l'eau est importante : environ 100 % et les 2/3 de cette eau environ, sont perdus par dessiccation à l'air. Le rapport C/N est voisin de 15.

Les AF et les AH existent en proportion.. voisine en surface, mais les AF l'emportent nettement en profondeur. A noter que dans le profil situé à 4000 m, il y a eu sans doute un recouvrement récent de cendre, ce qui expliquerait la teneur plus faible

.../...

en M.O et l'absence de réponse au test FNa. Les horizons limoneux hydratés de profondeur colorent instantanément au test FIELDS au FNa.

b) - A 3000 m d'altitude -

A plus basse altitude, vers 3000 m, le sol est bien noir sur 80 cm, uniforme, limoneux, puis jaune très uniforme, bien friable, limoneux de 60 à 200 cm. Un horizon de ponce pourrie rougeâtre, marque la limite avec un autre sol enfoui plus profond, de coloration plus foncée. Cet horizon jaune se disperse en milieu acide et renferme déjà 40 % d'argile, bien qu'il n'y ait pas, sur le terrain, sensation d'argile. La rétention en eau est importante, mais les pH mesurés sur sol sec ou frais sont voisins. Les teneurs en cation échangeable sont plus élevées : 8 mé, qu'en altitude et avec un taux d'humidification de la M.O de 50 % en surface et une nette dominance des AH sur les AF.

4) MINÉRALOGIE DES ARGILES

a) - A 4000 m d'altitude - (E 201 b)

Les minéraux primaires sont abondants et disparaissent, en partie, dans l'argile très fine. La raie à 4,40 est faible mais nette, indiquant, outre les substances allopphaniques la présence d'un peu de substances cristallines. Après défférication, une raie à 9,5 et 12,8 est bien marquée. La raie à 12,8 gonfle à 17,7 au glycérol et se rabat à 10 à 500°, ce qui indique la présence de montmorillonite. La raie à 7,2 disparaît à 500° et correspondrait à la métahalloysite ou la kaolinite. La persistance de la raie à 10 Å peut indiquer une argile micacée ou une vermiculite. Le doute sur la raie à 4,90 (illite - gibbsite) devrait être levé par l'analyse thermique différentielle. Cette raie diminue nettement dans la fraction fine.

b) - A 3800 m d'altitude - (E 202 b)

Les spectres sont améliorés par la défférication. La raie à 14 reste inchangée avec le glycérol et passe à 12, puis à 10 à 250 et 500°C. La raie à 7,2 disparaît à 500°. Il y aurait un peu de vermiculite et de kaolinite ou halloysite. La raie à 4,86 Å est bien prononcée et l'ATD devrait indiquer s'il s'agit bien de gibbsite.

c) - A 3000 m d'altitude

En surface le Teste fields ne donne qu'une faible coloration. La raie à 4,41 Å est très bien marquée avec de petites raies à 13,1, 10,2 et 7,8 Å. Par chauffage à 100° la raie à 10 disparaît et la raie à 7 est renforcée indiquant l'halloysite, mais une petite raie à 13 Å persiste. Il y aurait un peu de gibbsite.

Dans l'horizon jaune de profondeur le test de FIELDS ne réagit presque pas. C'est l'halloysite hydratée dispersable en milieu acide et retenant une faible quantité d'eau avec une très belle raie à 10 Å.

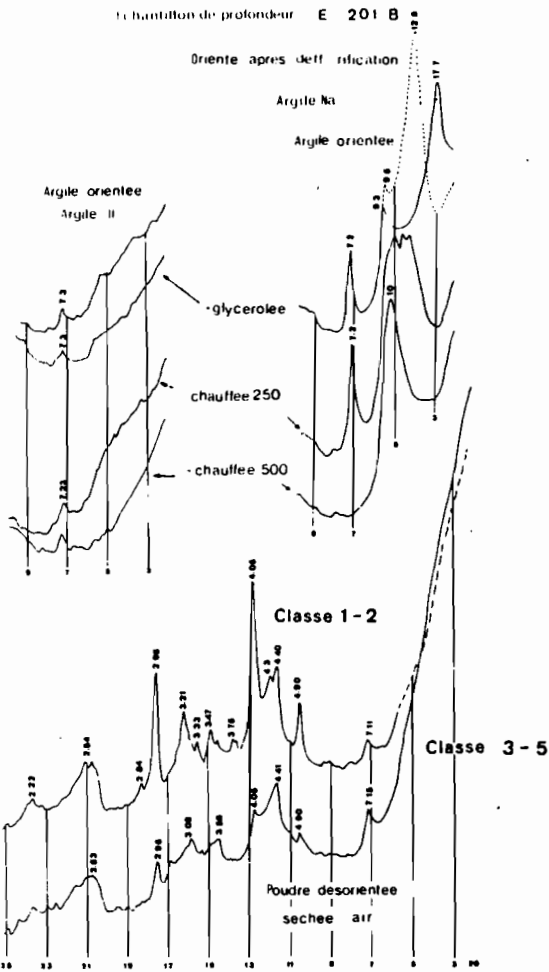


FIGURE: près du sommet volcan GALERAS 4100m
h: 70-90 cm

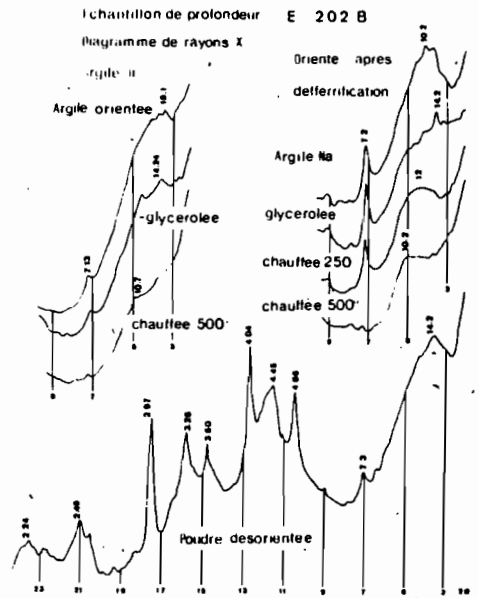


Figure à 3800m dans le Paramon du volcan GALERAS
h: 100cm

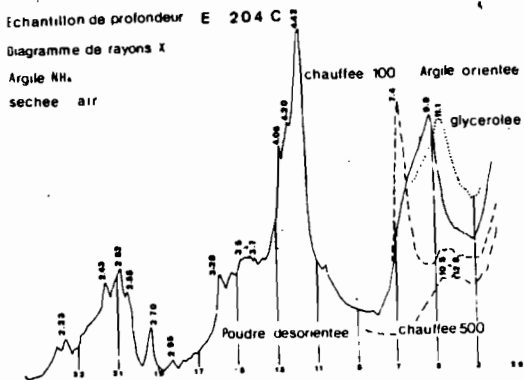
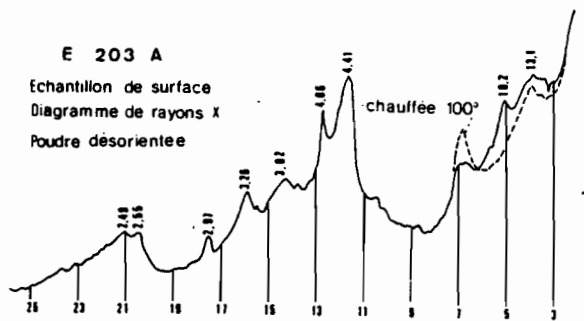


Figure sol rouge ferrallitique enfoui

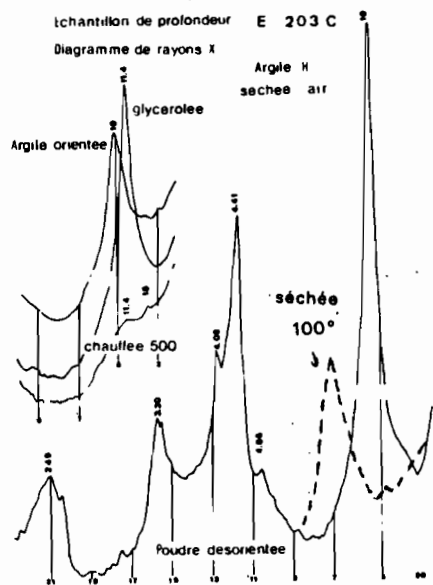


Figure à 3000m sur les pentes du volcan GALERAS près de PASTO
sol à halloysite hydratée

CONCLUSION

On observerait les successions suivantes:

- Près du cratère, dans des formations encore jeunes, intercalées dans des niveaux scoriacés inaltérés, il y aurait, outre les substances allophaniques et amorphes, présence d'un peu de montmorillonite et sans doute de vermiculite. L'existence de la gibbsite est à préciser, mais probable.

- A plus basse altitude, les substances allophaniques sont accompagnées par un minéral à 14 Å, probablement une vermiculite et la gibbsite est plus importante. Le sol serait un peu plus évolué.

- A 3000 m, enfin, c'est l'halloysite hydratée qui apparaît dans le très épais horizon jaune de profondeur et les substances allophaniques semblent absentes, bien que le sol en ait certaines des propriétés (dispersion en milieu acide, forte rétention pour l'eau). On peut penser que cette forme d'halloysite se dissout aisément dans les acides.

Les dépôts de cendres, de plusieurs mètres d'épaisseur, qui ont donné naissance à ces sols jaunes à halloysite, ont recouvert des sols rouges argileux, dérivés de formations volcaniques plus anciennes. Le passage d'une formation à l'autre est brutal, quelques centimètres. Dans ces sols, les minéraux lourds sont pour la plupart opaques. Le test FNa de FIELDS ne donne aucune coloration. L'argile de ces sols à tendance ferrallitique est une halloysite 10 Å (raie à 10 passant à 11 au glycérol et se rabattant à 7,4 à 100°C). (E 204)

On remarque aussi la goethite 4,16 - 2,70 et probablement l'hématite 3,67 et un peu de cristobalite 4,04 - 2,85.

En Guadeloupe, les sols rouges argileux, issus des formations anciennes, renferment aussi l'halloysite 10 Å dans les régions humides.

VII COMPORTEMENT AU COURS DES DISSOLUTIONS SUCCESSIVES ACIDE-BASE DES SOLS A ALLOPHANE
DES PARAMON ET DES SOLS A HALLOYSITE

La technique de dissolution successive mise au point par Ségalen (1968) avec l'acide chlorhydrique 6N à froid suivi de soude 0,5N à ébullition, permet une certaine estimation dynamique de la composition chimique des substances attaquées.

I- LES SOLS A ALLOPHANE DU PARAMON

Nous avons montré dans cette étude et dans de précédentes (1967 - 1970) que certains sols du paramon possédaient bien toutes les caractéristiques essentielles des sols à allophane, telles qu'on les observe dans les régions tropicales chaudes, avec cependant, comme caractères particuliers, cette coloration très noire "mélanique" des matières organiques des pays froids et une proportion relativement importante d'acides humiques.

On a choisi deux échantillons (sol entier inférieur à 2 mm), prélevés sur le versant humide Pacifique du paramon de PILALO-PUJILI (Cf. COLMET-DAAGE 1969).

Ce sont des horizons de profondeur, enfouis sous des formations plus récentes tous deux très hydratés (100%) et présentant une "Δ value" entre le pH 4 et 9 importante de la capacité d'échange de cation.

L'un (E 150), situé à 3000m d'altitude, sur le rebord du versant humide Pacifique, a une fraction fine inférieure à 2 microns, parfaitement amorphe aux rayons X et par spectrographie infrarouge, avec un maximum d'absorption à 950 cm^{-1} . Le départ d'aluminium et du fer est quasi total dès la première extraction.

L'autre (E 152) situé à 3500m d'altitude, dans une zone qui paraît un peu moins humide, plus ensoleillée, montre aux rayons X (petite raie à 4,45), à l'analyse thermique différentielle (léger crochet à 550°) et à la spectrographie infrarouge (absorption au-dessus de 1000 cm^{-1}) des indices d'une meilleure organisation du réseau, avec davantage d' Al^{VI} , bien que l'ensemble paraisse encore amorphe ou très mal cristallisée. Il ya un peu moins de silice et d'alumine dissoutes à la première extraction mais la dissolution semble se poursuivre plus progressivement ce qui serait l'indice d'un meilleur agencement du réseau.

En tenant compte de façon très approximative de l'eau liée aux substances allophaniques ou de la perte mesurée par pesée du culot résiduel, on peut estimer qu'environ la moitié du sol est dissout après 7 extractions, ce qui est considérable pour des sols riches en minéraux primaires, peu solubilisables, car il s'agit du sol entier.

Une partie de la silice dissoute proviendrait des particules primaires qui sont abondantes dans ces sols encore relativement jeunes. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des produits dissous par chaque extraction acide-base passe, en effet, de moins de 1 à la première extraction, à 5 dès la seconde extraction, puis s'élève encore davantage dans les extractions suivantes. Ce qui montre que la dissolution de l'alumine a pratiquement cessé, mais que celle de la silice se poursuit activement, à partir, sans doute d'autres substances du sol.

Si on s'en tient aux résultats des deux premières extractions, c'est-à-dire à l'achèvement de la dissolution importante de silice et pratiquement à la dissolution totale de l'alumine et du fer, on peut penser que la surcharge siliceuse provenant d'autres substances, n'est pas encore très importante. Dans ces conditions, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ obtenu est voisin de 1 à 1,3, donc analogue à celui des substances allophaniques usuellement rencontrées. Des résultats similaires sont obtenus en prenant les tangentes aux courbes après six attaques comme le préconise Ségalen en vue d'éliminer la surcharge due à une dissolution régulière des substances cristallines.

A titre de comparaison on a figuré également les courbes de dissolution correspondant à la fraction fine inférieure à 2 microns d'un sol à allophane perhydraté -un hydrandepts typique- prélevé à 2000 mètres d'altitude près de BAZZ. L'allure des courbes est similaire, mais l'allophane est nettement plus alumineux.

2) - SOLS DANS LESQUELS LA PRESENCE D'HALLOYSITE EST EVIDENTE ET IMPORTANTE -

Deux cas peuvent alors se présenter :

a) Le sol est encore fortement hydraté : 70 à 80 % d'eau et présente l'aspect et certaines des propriétés des sols à allophane. La dessiccation est cependant, pour l'essentiel, réversible et il n'y aurait donc pas d'effondrement du réseau par dessiccation à l'air, comme avec les sols à allophane perhydratés. La présence d'argile n'est guère sensible au toucher et les sols paraissent limoneux, doux, comme beaucoup de sols à allophane. Le test FNa est négatif.

Il s'agirait donc d'un faciès d'halloysite qui est aussi fréquemment rencontré en régions tropicales chaudes, dans les sols qui forment "transition" entre les sols à allophane et les sols déjà nettement argileux à halloysite. On en rencontre aux Antilles, Nicaragua, Jamaïque et dans les basses terres d'Amérique.

b) La présence d'argile sur le terrain est faiblement mais nettement perceptible au toucher. Les propriétés caractéristiques des sols à allophane ne sont guère apparentes. Il s'agit d'une halloysite encore jeune, qui se présente au microscope électronique, sous les formes d'auréoles concentriques qui ont été signalées dans diverses autres régions de monde (SIEFFERMANN au Cameroun, etc...). La raie à 10 Å est souvent importante, mais la raie à 7,5, après dessiccation, est peu prononcée.

La figure montre la dissolution très importante et similaire des échantillons E 258 d (San Gabriel) qui correspond au premiers cas et E 216 c -I62 qui correspondent au deuxième cas (fraction inférieure à 2 microns).

On voit que la dissolution est nettement plus progressive que dans le cas des sols à allophane. La dissolution de la silice est importante et se poursuit encore à la 5^e extraction bien que plus des 90 % de la substance aient été dissous. L'attaque commencerait par les couches octaédriques plus aisément solubilisables puis sur les couches tétraédriques, et les particules siliceuses qui entraînent une surcharge de silice et un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ voisin de 2,5 à 3.

Cette surcharge de silice est plus importante si on opère sur le sol entier (E 162 -près de Quito, E 102 à basse altitude Quévedo) que sur la fraction argile fine mais l'allure des courbes reste semblable. Figure

3) - SOLS DANS LESQUELS LA PRESENCE D'HALLOYSITE EST TRES PROBABLE EN QUANTITE NOTABLE

Il arrive fréquemment, en particulier dans certains sols qui viennent en recouvrement sur les cangagua, ou dans celles-ci, que la raie à 4,43 soit bien nette, soulignant l'importance des argiles cristallines, mais que la raie à 10 Å soit peu apparente, incertaine et le passage à 7 peu sensible.

L'ensemble des résultats montre qu'il s'agirait vraisemblablement d'une halloysite de cristallisation imparfaite.

Dans l'échantillon E 165 prélevé près de Quito on remarque peu de différence (sol entier 2mm) avec les sols précédents, mais le rapport $\text{SiO}^2 / \text{Al}^2\text{O}^3$ est plus élevé, atteignant 4, dès la première extraction, indiquant une surcharge siliceuse importante. Dans les extractions suivantes le rapport $\text{SiO}^2 / \text{Al}^2\text{O}^3$ n'atteint pas les hautes valeurs que nous avons constaté dans les sols à allophane. Ce serait donc l'indice d'une certaine organisation d'un réseau silico - alumineux. La capacité d'échange est fortement réduite après 2 attaques.

Par comparaison on a figuré les courbes de dissolution de l'échantillon E 166 b prélevé plus en altitude et formant déjà transition vers les sols à allophane du paramon sans en avoir encore l'ensemble des propriétés. La raie à 4.45 y est très faible avec une petite raie à 14. L'alumine est presque totalement dissoute dès la première extraction (sol entier). Le rapport $\text{SiO}^2 / \text{Al}^2\text{O}^3$ est voisin de 2 à la première extraction et s'élève beaucoup dans les suivantes.

En opérant sur des sols encore très peu évolués, régosoliques, la dissolution de l'alumine et de la silice est relativement régulière, avec un rapport $\text{SiO}^2 / \text{Al}^2\text{O}^3$ constant de 6 pour chacune des extractions. Les particules primaires, plagioclases etc.. non altérées y sont importantes, parfois dans un état de fine division et se dissolvent avec un rapport de cet ordre dans des conditions d'attaques similaires. Dans les sols à allophane, les très fines particules primaires aisément solubilisables ont déjà probablement disparues, et il ne reste plus que les plus grosses ou les minéraux les plus résistants à la dissolution. La dissolution de l'alumine cesse très vite. La silice dissoute par les dernières attaques proviendrait peut-être alors de la cristobalite ou des squelettes siliceux autour desquels commencent à s'organiser les couches octaédriques très rapidement solubilisées.

IX CONCLUSION

On a montré au cours de cette étude l'opposition très nette dans diverses régions d'Equateur entre:

d'une part des sols sur cendres, indiscutablement à allophane, de certains paramons ou des versants très humides des Andes.

d'autre part les sols des régions un peu plus basses et plus sèches dans lesquels la cangagua apparait généralement à profondeur variable.

Ces sols peuvent dériver du délitement de la cangagua, elle même, ou de cendres de recouvrement plus récentes. Il est aussi possible dans certains cas que la cangagua soit un véritable duripan de formation actuelle.

Dans certains de ces sols l'halloysite 10 \AA est identifié en quantité importante. Dans d'autres il y a une forte présomption pour que l'halloysite existe en plus grande quantité que les examens ne le laisse pressentir.

Dans d'autres sols encore on n'observe que des substances très mal cristallisées à $7 - 10$ ou 14 \AA qu'il est difficile de définir. La raie à $4,45$ est cependant généralement bien marquée indiquant déjà un certain agencement du réseau et des couches octaédriques.

Les sols renfermant de l'halloysite peuvent être rangés parmi les sols isohumiques ou mollisols, dont ils ont la plupart des propriétés. Par contre on peut hésiter pour les sols qui possèdent ces argiles mal cristallisées non identifiées avec certitude, entre les sols isohumiques ou mollisols et les eutrandspts. Ce point mériterait d'être étudié plus en détail en s'efforçant de voir s'il y a des différences sensibles entre les propriétés des sols pour justifier une telle séparation.

Dans quelques cas on a vu que certaines propriétés de sols à allophane pouvaient apparaître : par exemple les variations de la capacité d'échange de cations avec les pH, sans que les autres propriétés des sols à allophane soient sensibles. L'halloysite 10 \AA telle qu'on la définit par son diagramme de rayons X présente en effet de nombreux faciès dont certains confèrent, aux sols qui en sont constitués, des apparences et des propriétés très voisines de celles des sols à allophane.

Il est possible, en se basant sur la constitution minéralogique des argiles de distinguer trois ensembles : les sols à allophane, les sols à halloysite, les sols à substances mal cristallisées encore difficiles à définir. Dans chacun de ces ensembles cependant il y a divers faciès, divers types d'allophane, et surtout divers types d'halloysite ou de substances mal cristallisées de sorte qu'il peut y avoir chevauchement de certaines propriétés d'un ensemble sur l'autre. Il n'y a donc pas variation simultanée de toutes les propriétés des sols avec la composition minéralogique. De plus d'autres facteurs interviennent, comme la quantité de substances inférieurs à 2 microns présente, les teneurs en matières organiques et la nature de celles-ci.

Les examens de la fraction lourde des sables, complètent et confirment les résultats des études antérieures (Delaune 1967-69). La dominance de la hornblende dans le Nord du pays, celle de l'hyperstène dans le sud et sur le rebord amazonien des Andes, apparaissent avec beaucoup plus d'évidence encore, soulignant tout l'intérêt et la validité de cette technique pour l'étude de la mise en place des cendres volcaniques. Le problème des cangagua plus complexe n'a été qu'abordé.

L'importance des acides humiques en régions relativement sèches et des acides fulviques en zone humide est aussi bien confirmée. Toutefois les acides humiques semblent également se former et se maintenir dans certains horizons des sols très noirs mélaniques, à allophane des régions froides des paramon.

En région d'altitude modérément arrosée l'horizon "spodique" très très noir de profondeur situé juste au dessus de la cangagua dure ne renferme parfois exclusivement que des acides humiques.

Les substances minérales exceptionnellement actives qui résultent de l'altération dans les sols jeunes sur cendres, font que l'on attache, et à juste titre, moins d'importance à la matière organique que dans d'autres sols sableux d'origine non volcanique. Par contre dans les sols issus de dépôts très récents, où la cendre est encore inaltérée, le rôle des substances humiques est essentiel pour la fertilité des sols et l'étude de ces matières organiques y présentera un intérêt tout particulière.

Septembre 1973