

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) 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-Equateur,
3 - ORSTOM-Bondy, France,
6 - Mlle Fusil et M. Koukoui,
7 - M. Combeau,
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 hauptsächlichlichen 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

Las cenizas volcanicas han cubierto con pocas discontinuidades grandes superficies de las llanuras Pacificas y Amazonicas. El espesor de los depositos sucessivos es variable.

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

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

En clima más seco se formaría "halloysite" con aparicion muy tardia 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).

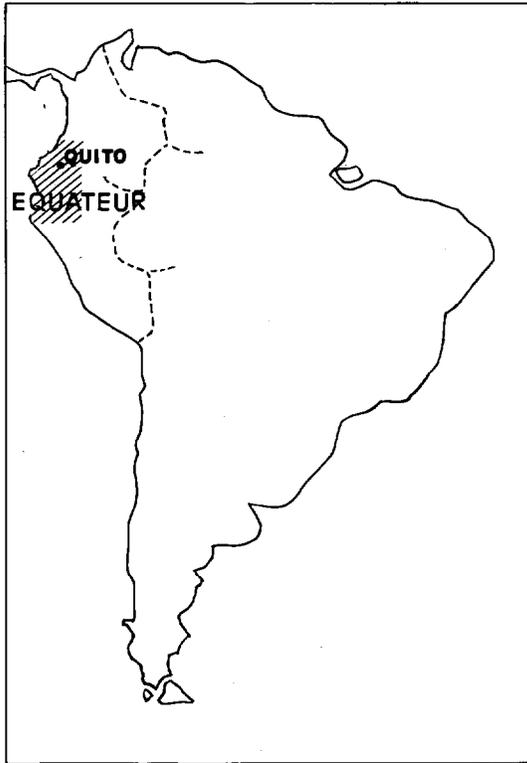
Toutefois, les pluies très abondantes à l'époque des prélèvements de sols, la profondeur des sondages limitée à 120 cm et l'impossibilité d'effectuer alors, sur place, les humidités, avaient empêché de mener cette étude comme il eut été nécessaire.

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'Elevage 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 e: 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.

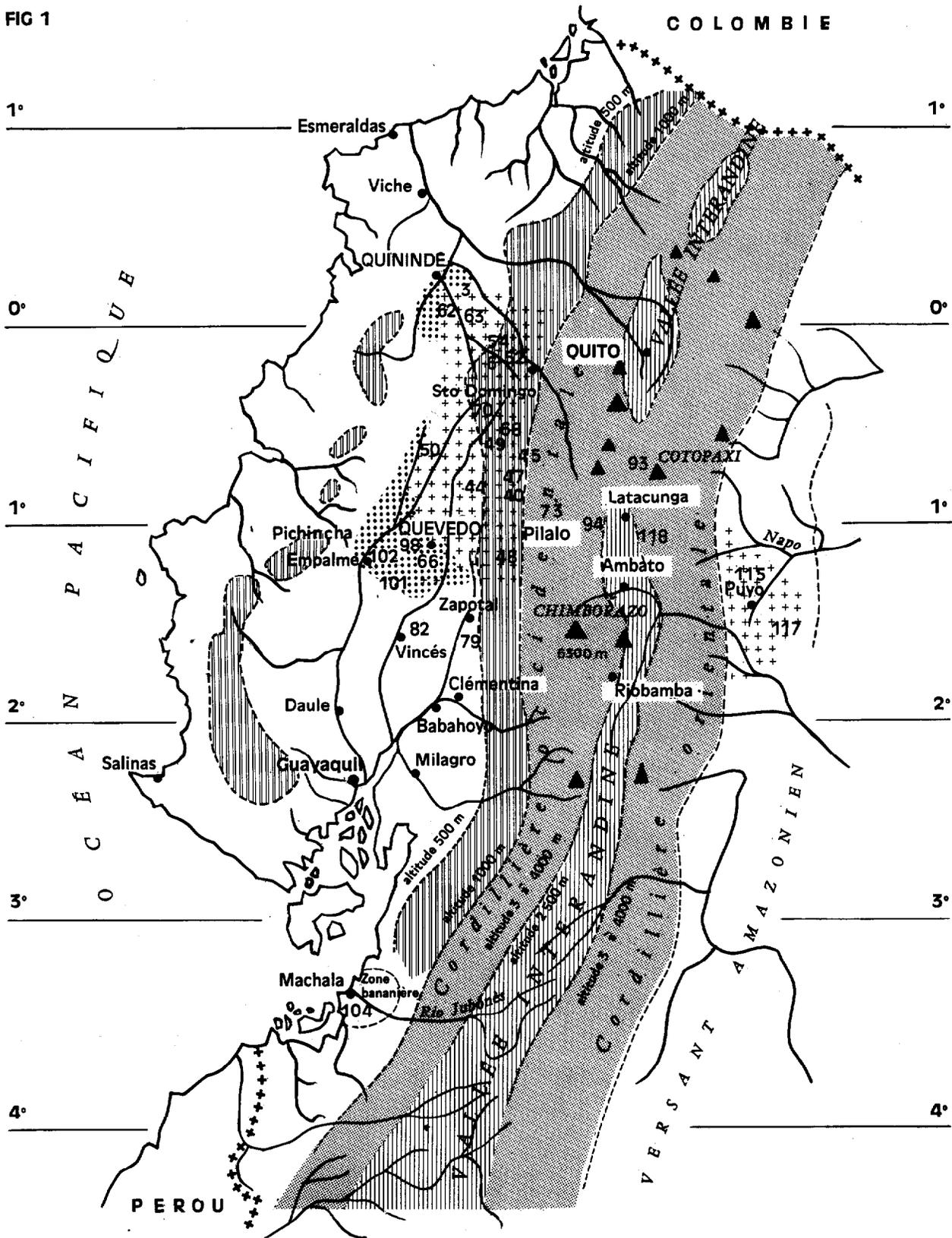
Figure 1 - Situation des profils

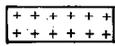
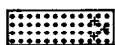
Figure 2 - Isohyètes

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

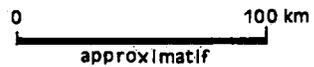
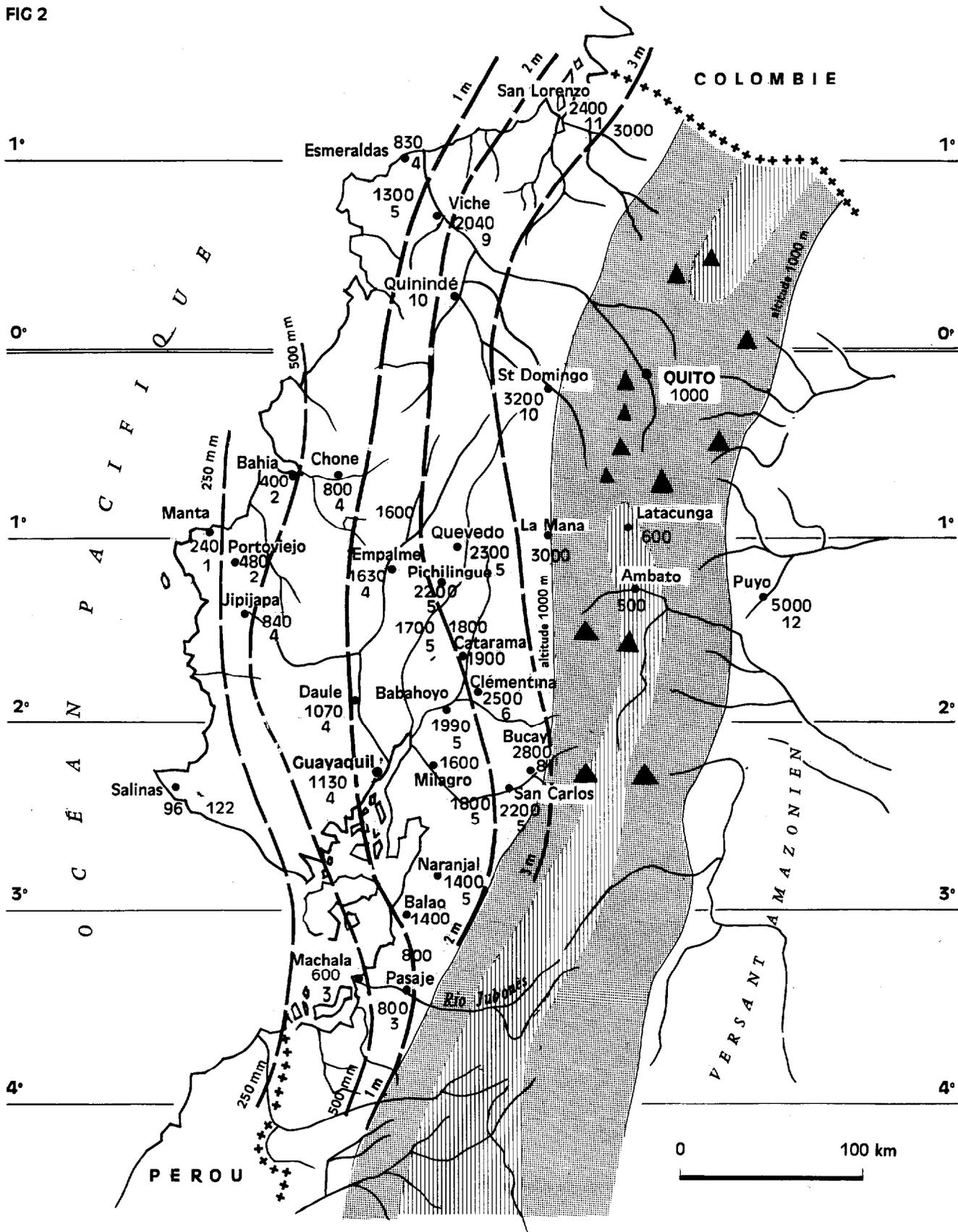


FIG 2



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. KOUKOUI pour les analyses thermiques différentielles sous la direction de M. PINTA, et, enfin, à M. P. SEGALLEN qui a bien voulu relire ce texte et nous faire part de ses remarques, dont il a été tenu compte.

2 - NATURE DES DÉPOTS 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). Étant 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 holoplagioclasiqes (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 ou 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 ou 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).

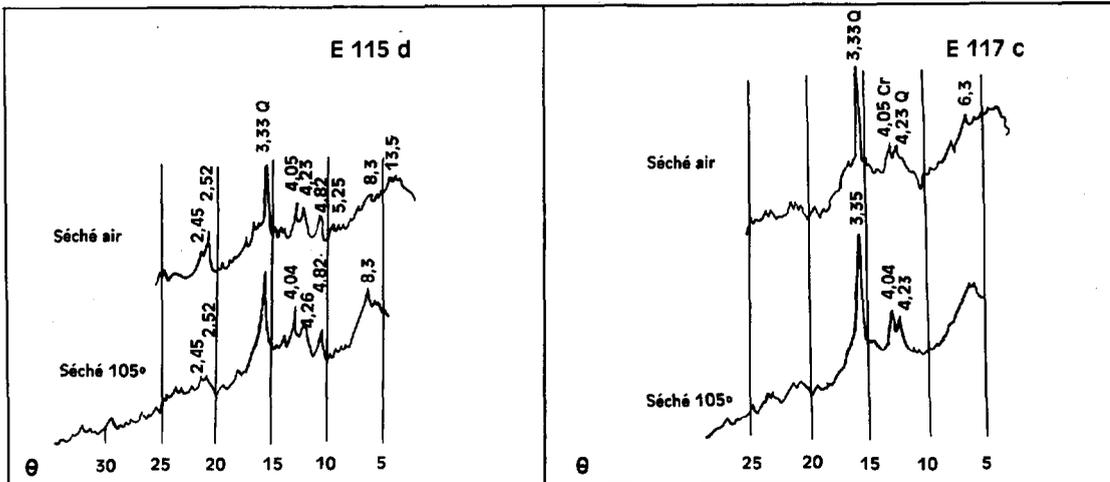


FIG 3

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 thalweg, 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.

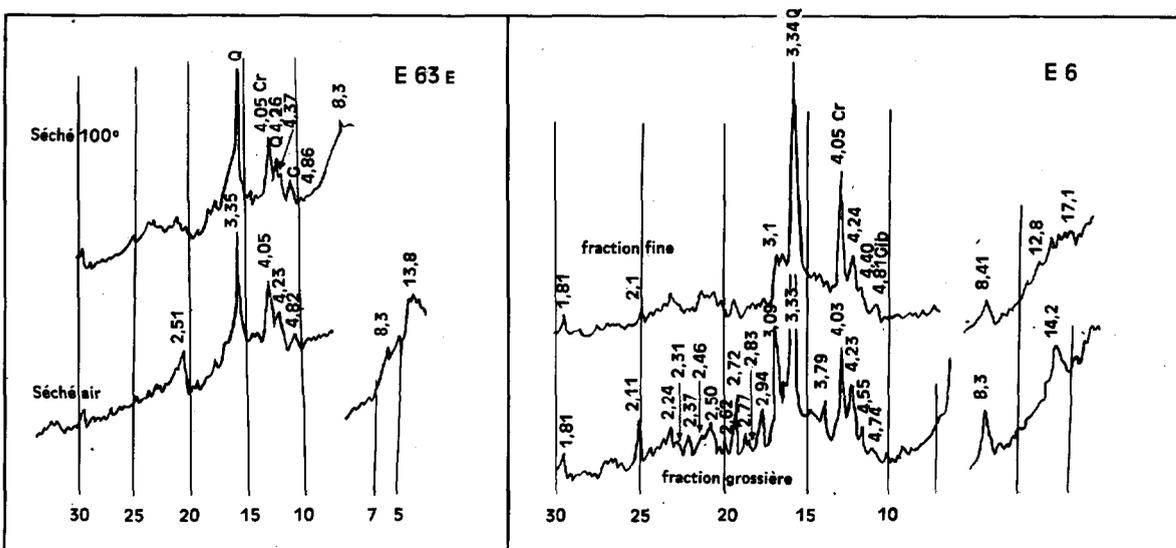


FIG 5

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.

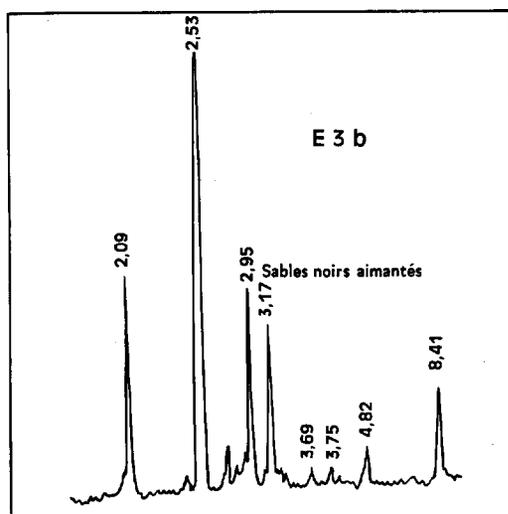


FIG 7

- 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.

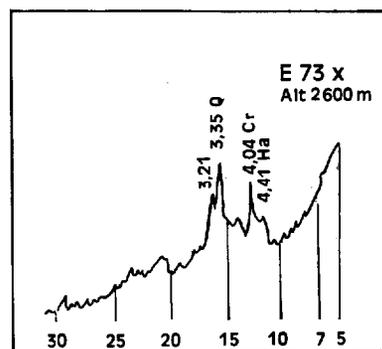


FIG 8

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 950°. 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.

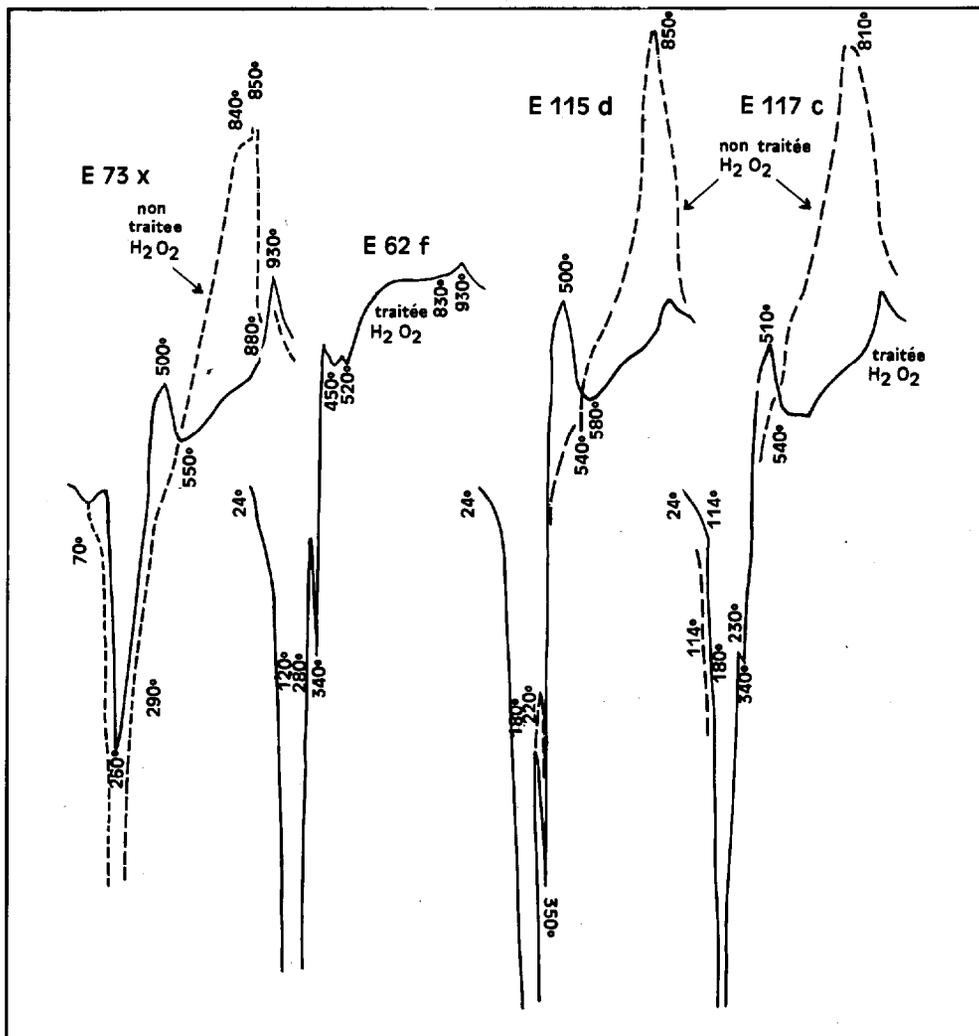


FIG 9

- *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).

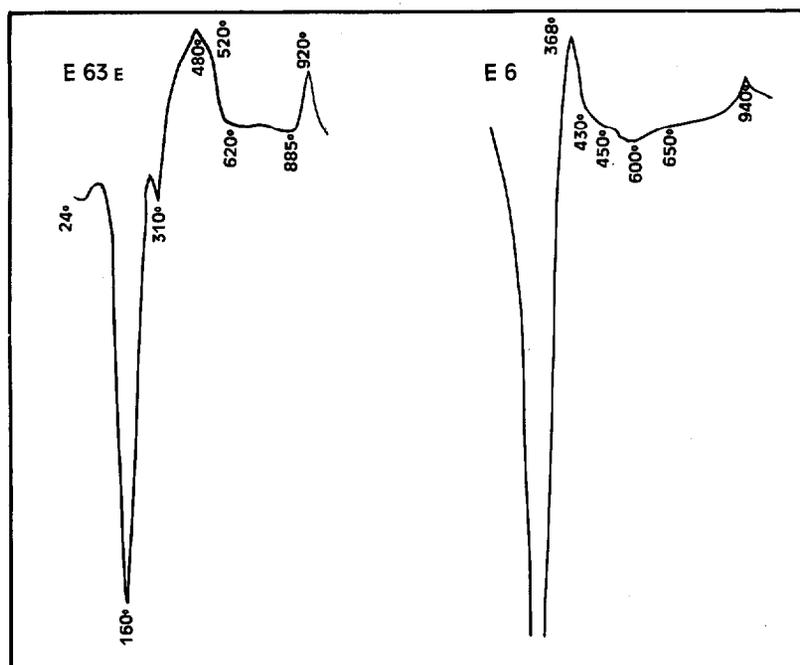
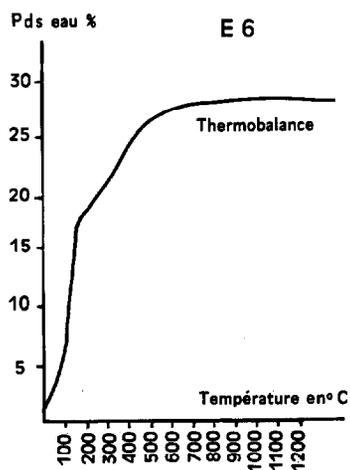


FIG 10

- 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

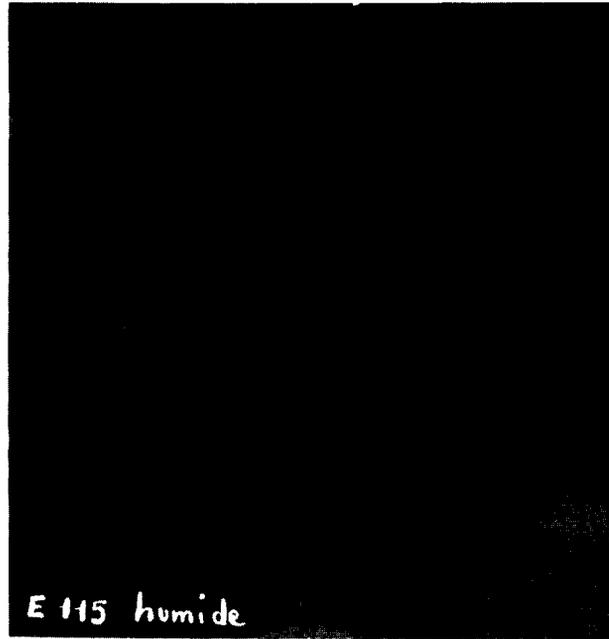
souvent mal définies, parfois décrites par certains auteurs (FRIPIAT et coll., 1962).

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.

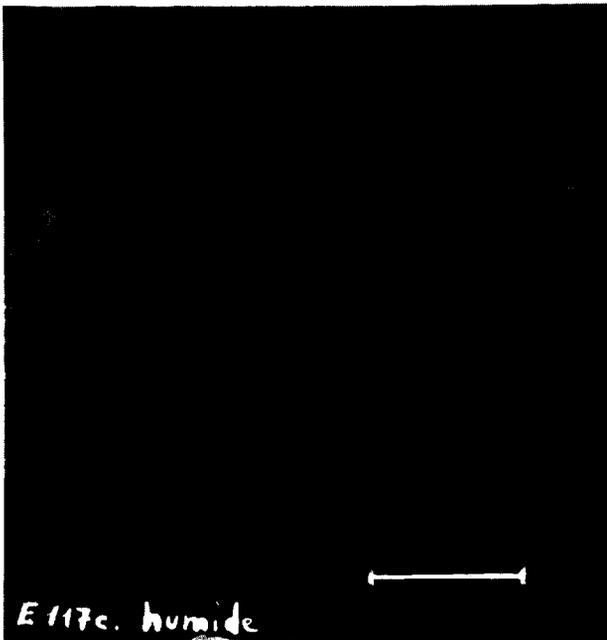
Le resserrement du réseau initial très lâche est bien en accord avec les propriétés d'absorption, considérables pour l'eau, et la dessiccation qui sera décrite plus loin.

Figure 12

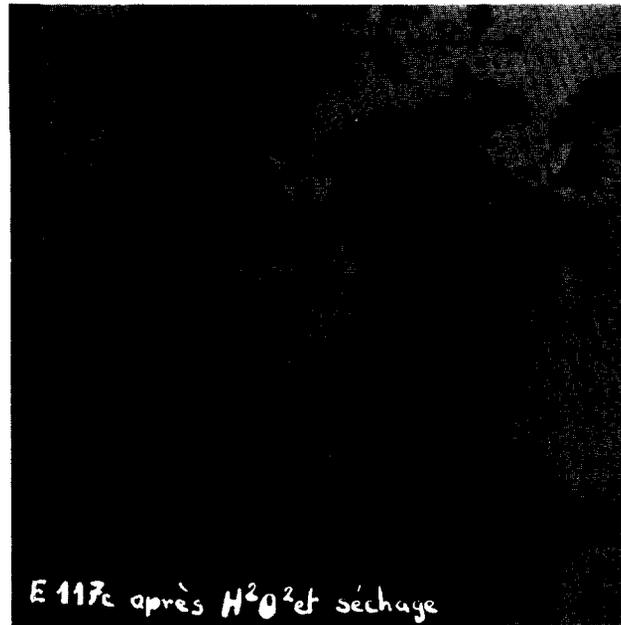
(clichés de l'Institut Agronomique de Louvain,
M. de KIMPE).



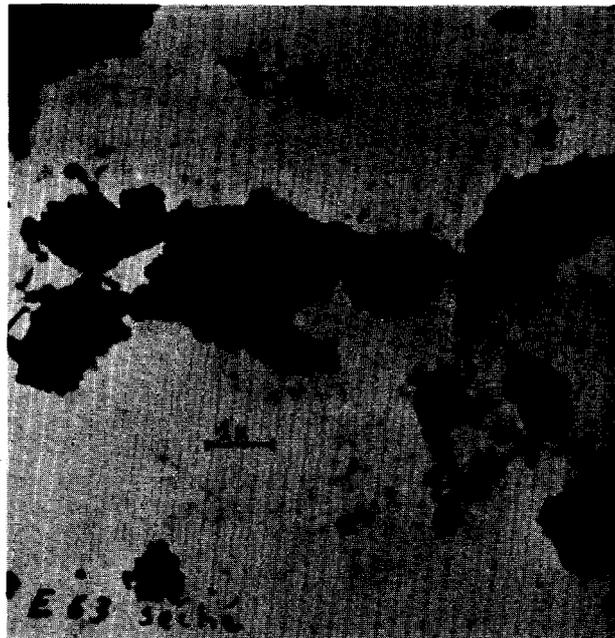
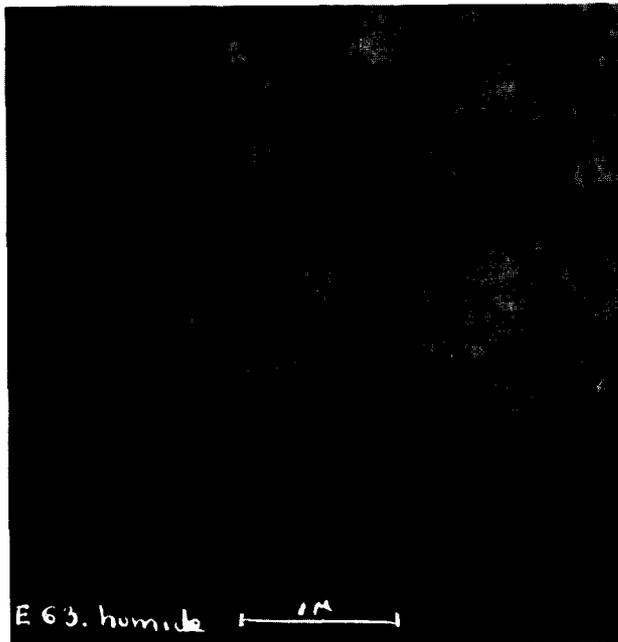
E. 115 Echantillon séché à l'air peu avant photographie.



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

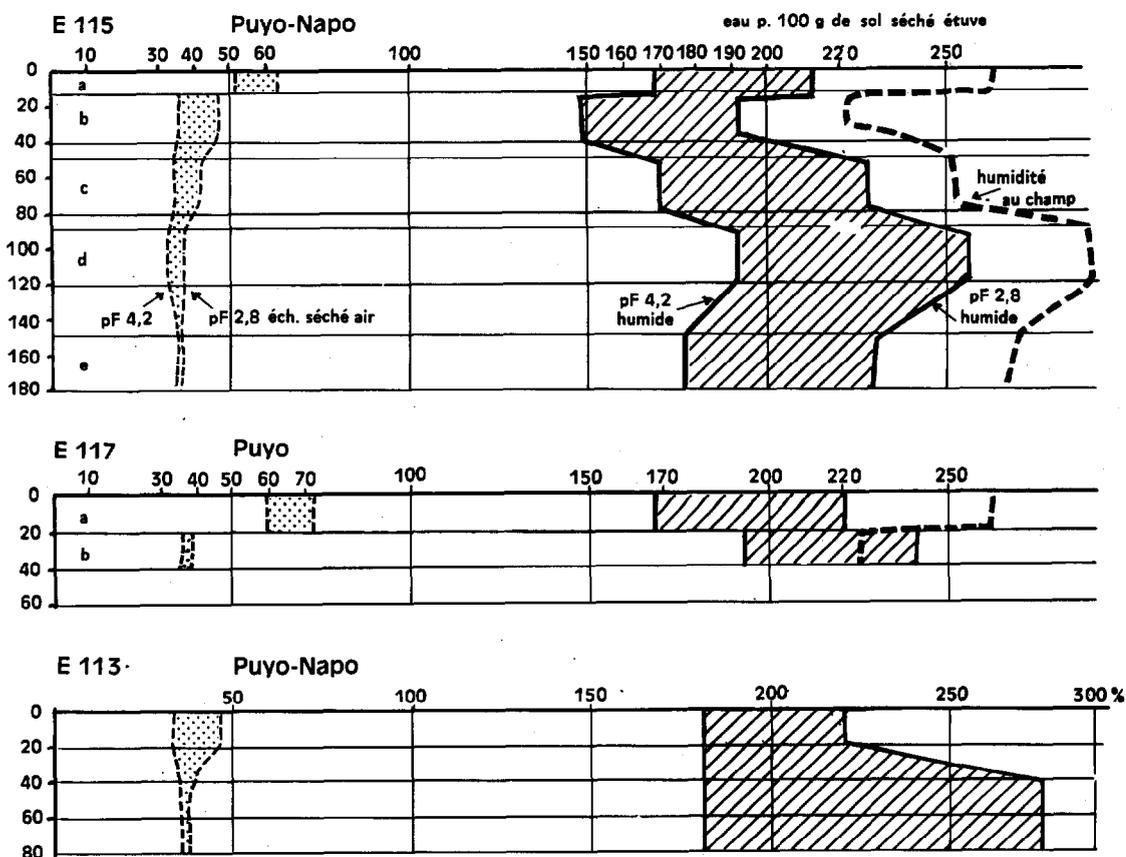
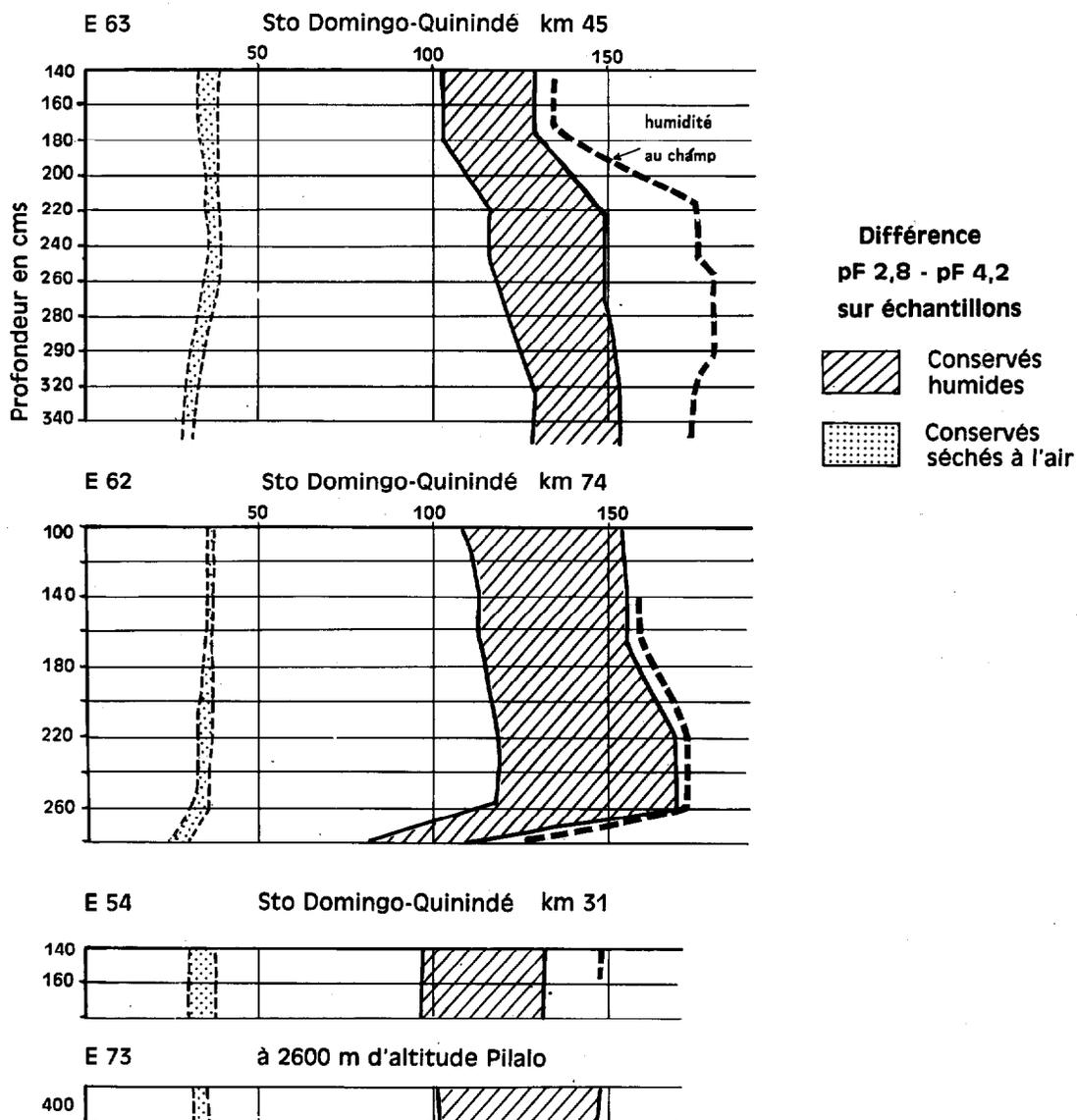


FIG 14 Horizons enfouis profonds du versant pacifique



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 ALLOPHANINIQUES

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'hallowite 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, quoique 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.

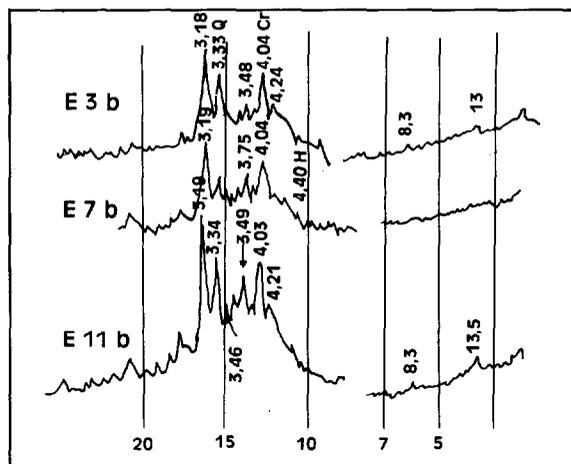
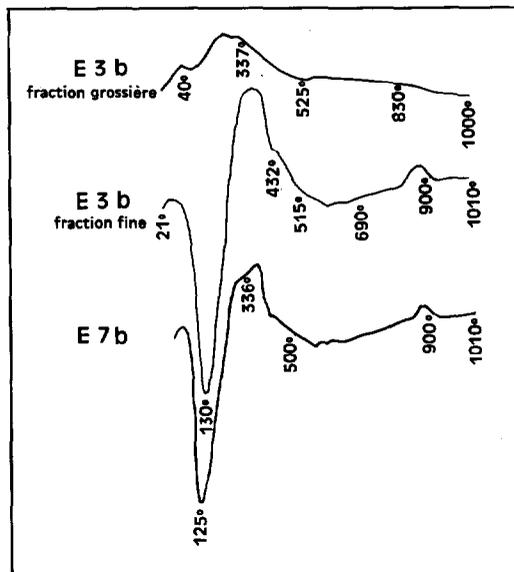


FIG 15



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 illusoire.

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 dessiccations 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.

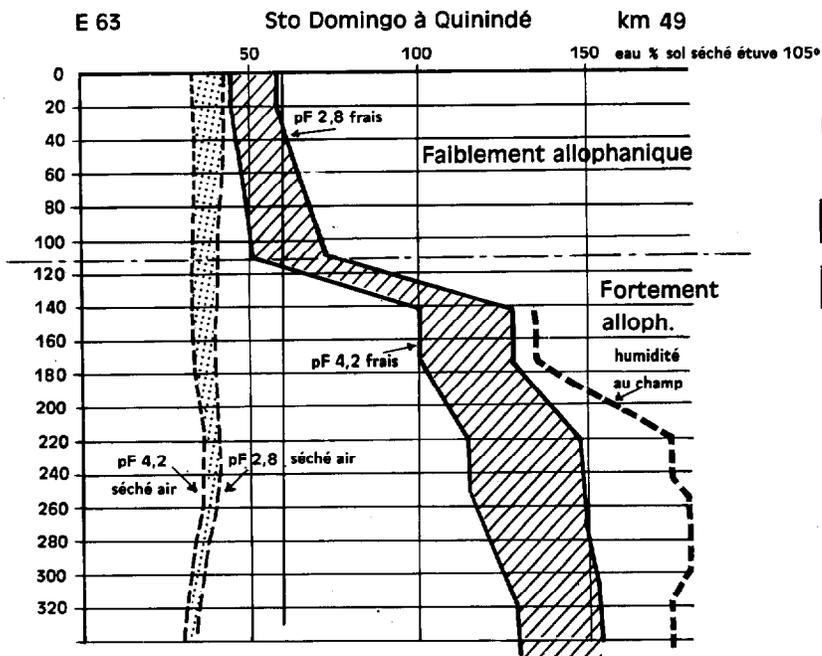
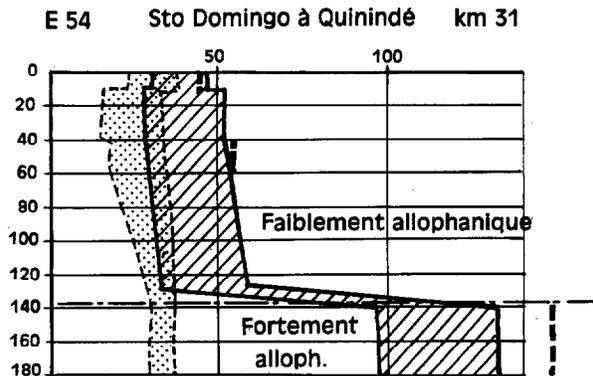
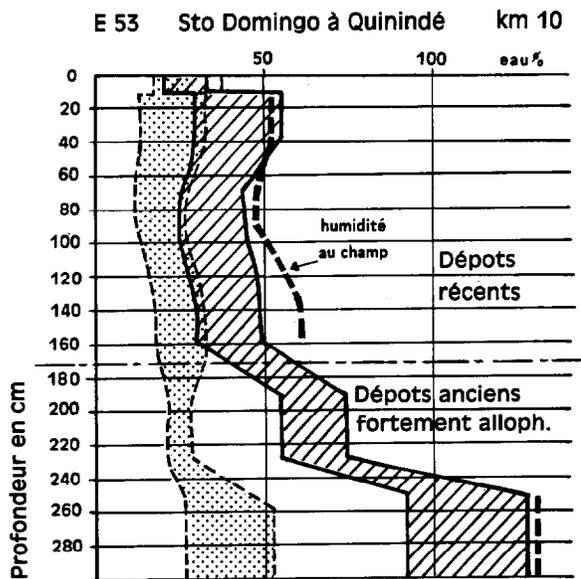
*

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.
séchée à l'air



Mesurée sur éch.
Conservé humide

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

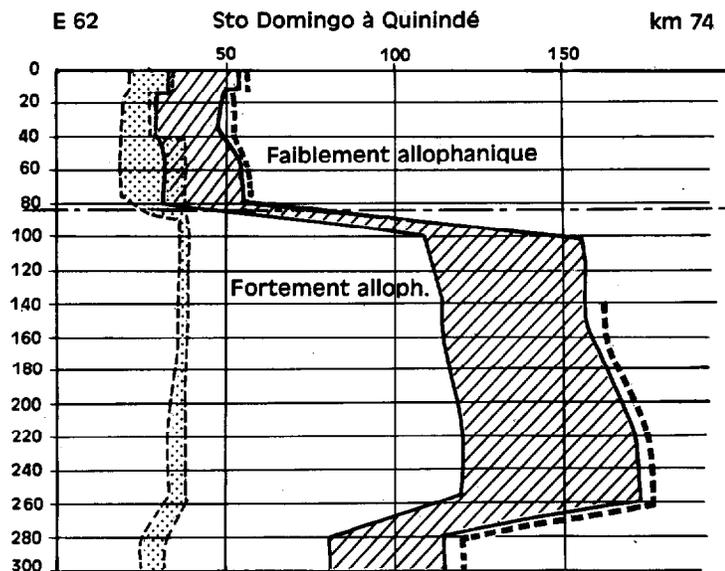
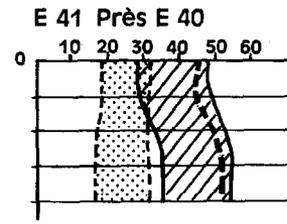
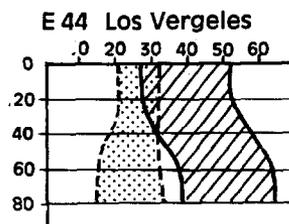
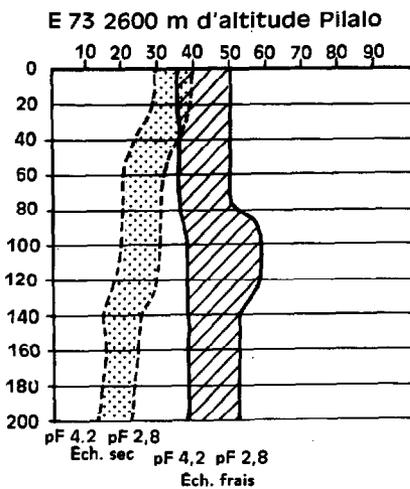
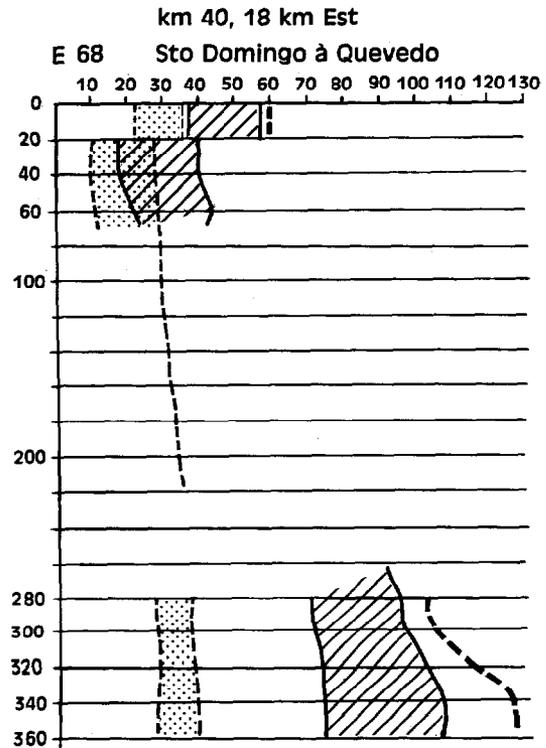
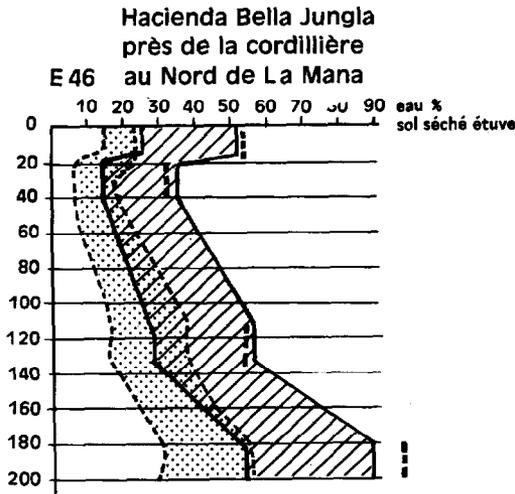
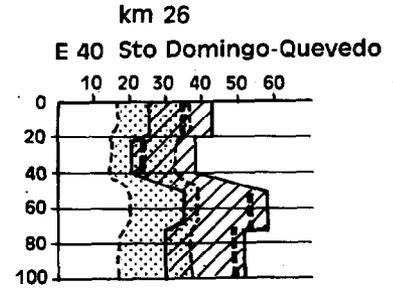
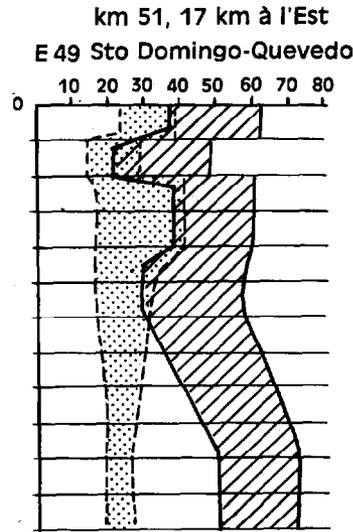
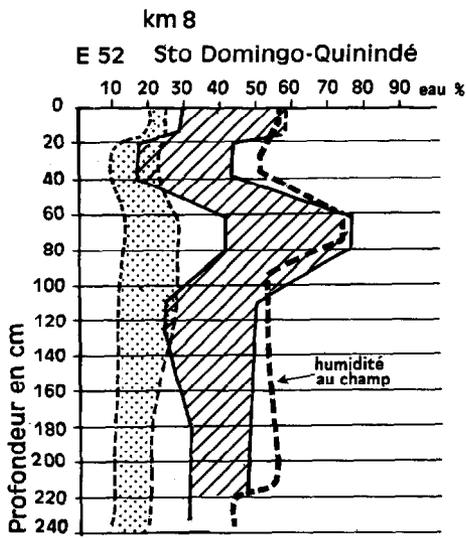


FIG 17

Soils faiblement allophaniques reposant
sur des sols fortement allophaniques



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

Mesurée sur échantillons séchés à l'air

Mesurée sur échantillons Conservés frais

Humidité au champ

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 frais	M.O. %	Sables > 50 micr.	Echantillons	T sec mé %	pF 2,8 frais	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 cendreuses 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 argilisé 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.

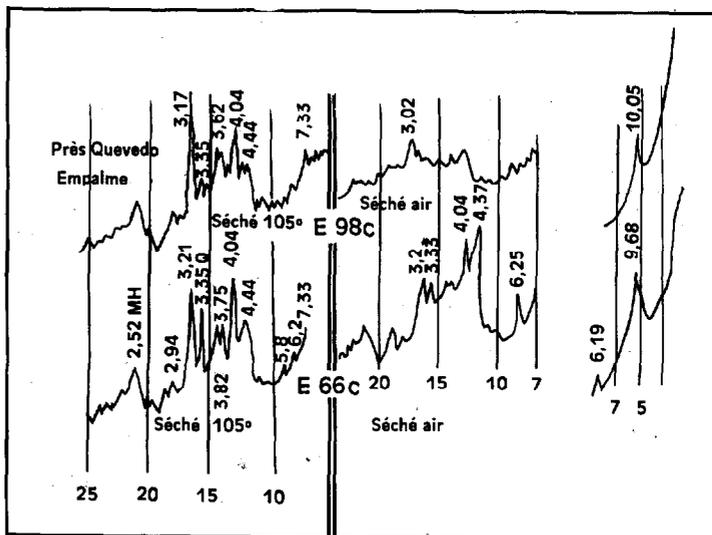


FIG 19

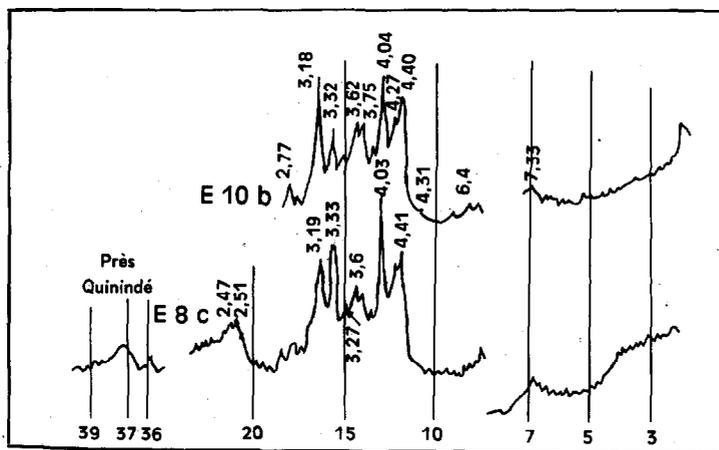


FIG 20

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 boémite (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.

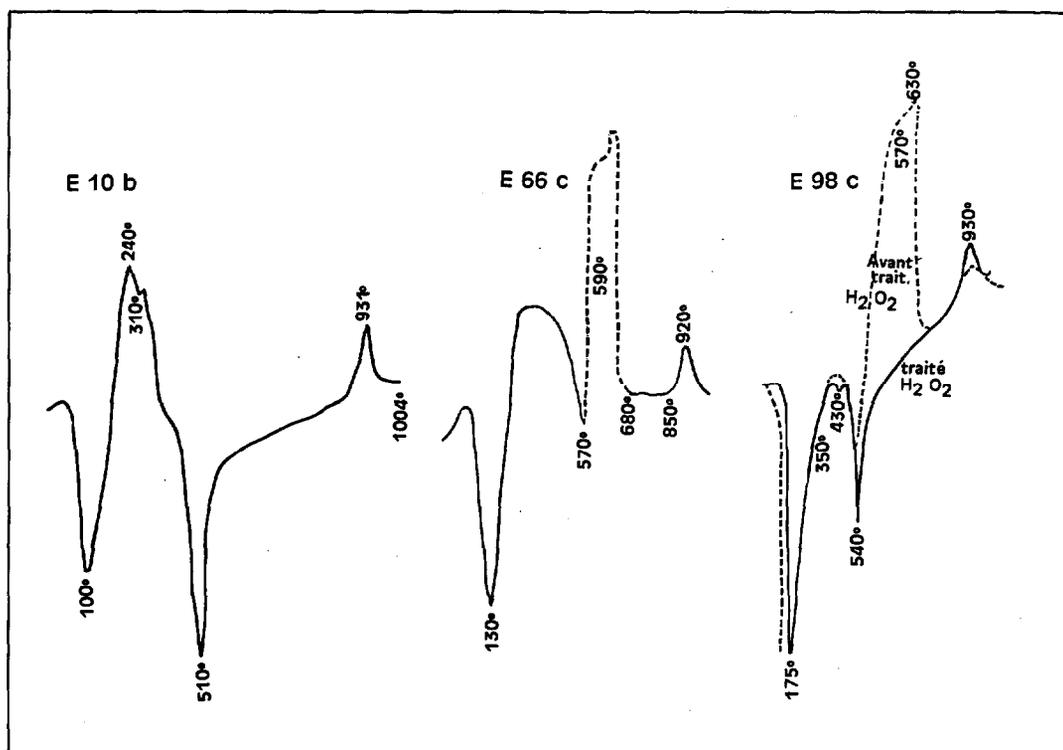


FIG 21

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'halloysite.

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 halloysite. 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'halloysite, 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.

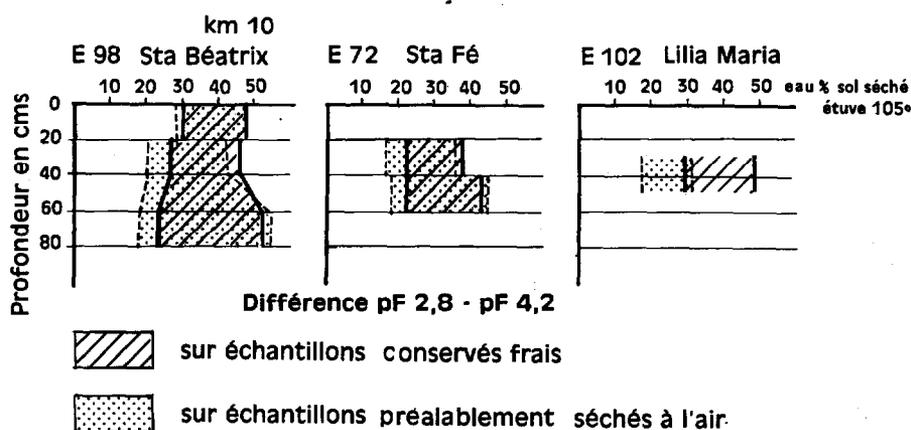


FIG 22

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 argilisés 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.

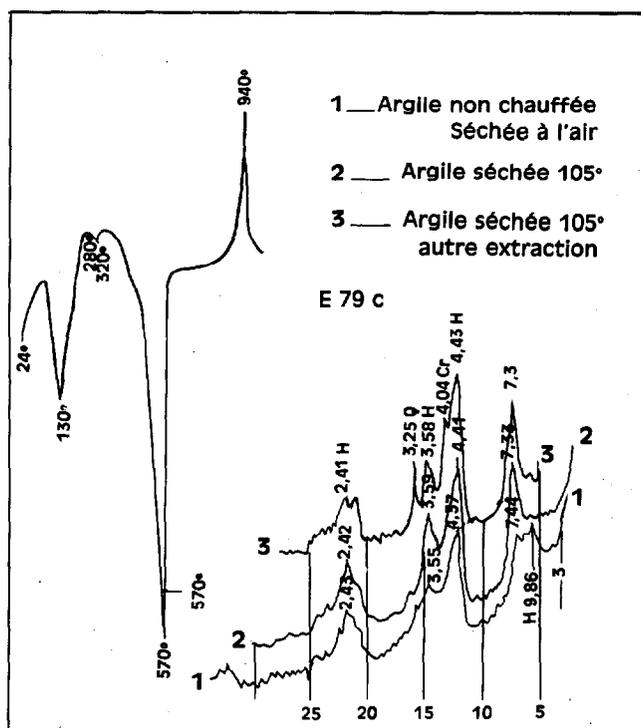


FIG 23

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

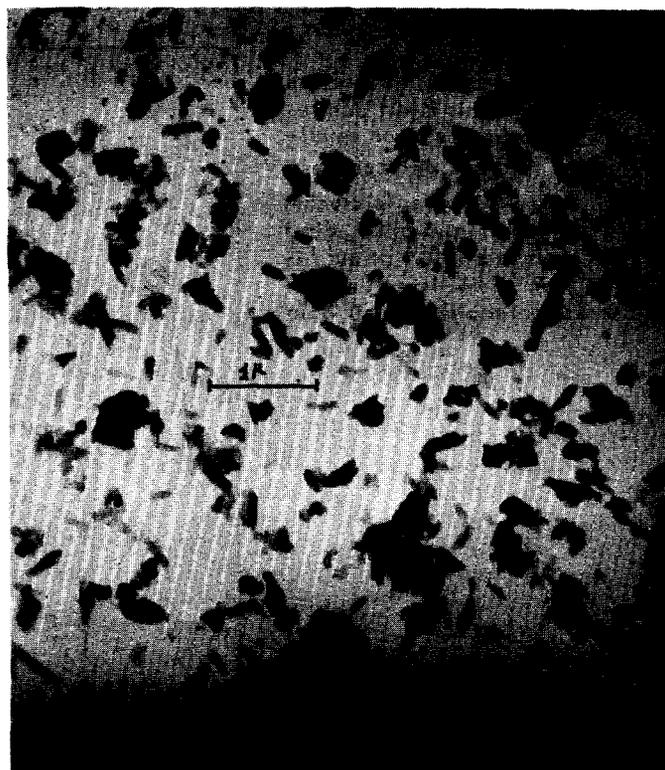


Figure 25

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. VIEILVOYE 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.