

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. KOUKOU
- 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.

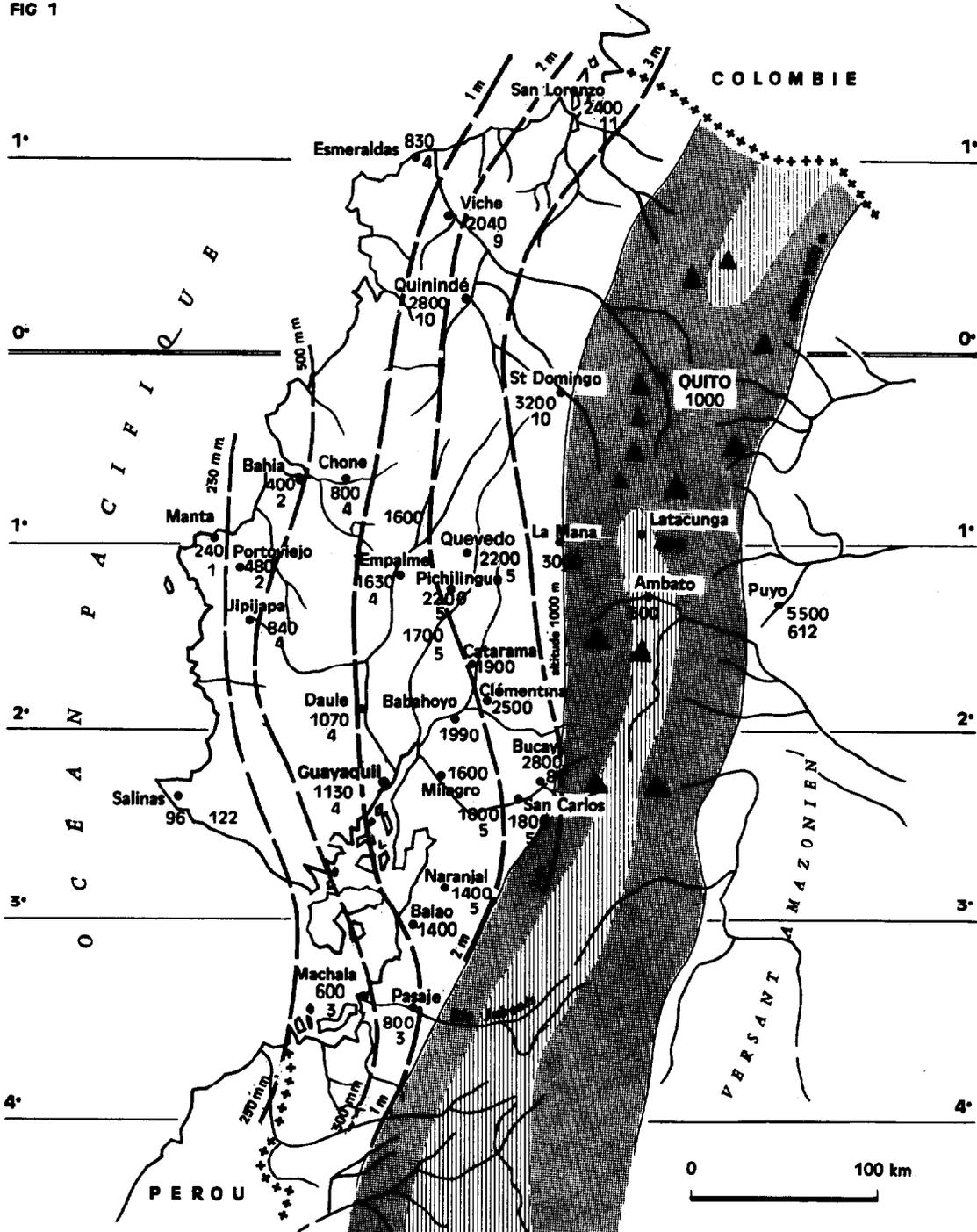
1 - Bureau des Sols - ORSTOM-Antilles,
2 - IFEIA-DNB - Equateur,
3 - Géologie - ORSTOM,
4 - Bureau des Sols - ORSTOM-Antilles,
5 - IFEIA-IFAC - Equateur.

PLAN

- 1 - INTRODUCTION - Généralités sur l'Equateur
- 2 - VARIATIONS DE LA COMPOSITION DES TUF AERIENS
- 3 - LES SOLS FORTEMENT ALLOPHANQUES
- 4 - LES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANQUES recouvrant des sols FORTEMENT ALLOPHANQUES
- 5 - LES SOLS FAIBLEMENT ALLOPHANQUES
- 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 ALLOPHANQUES recouvrant des sols FORTEMENT ALLOPHANQUES 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

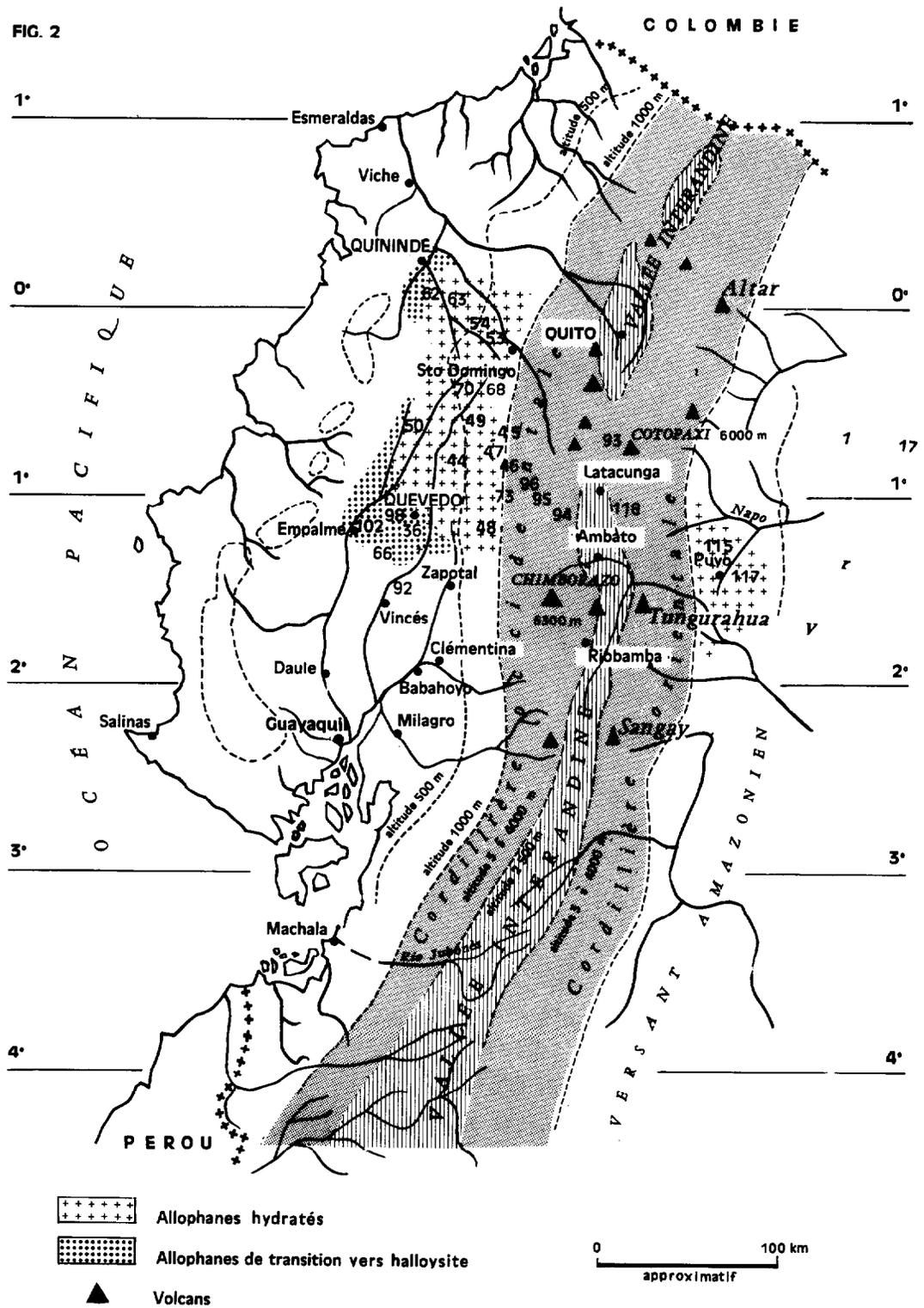
PLUVIOMETRIE ANNUELLE
 en millimètres et mois supérieurs à 100 mm

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 enserrant 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 meublés 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 2e 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, donnèrent lieu, outre des coulées de laves, à des explosions qui projetèrent 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'ennuage 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 TUFES 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.

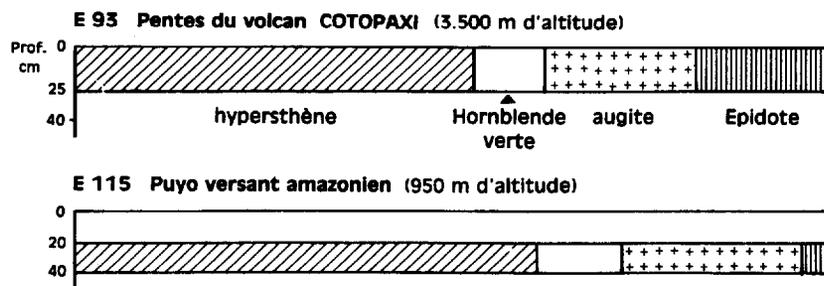


FIG. 3

2.2 - Versant et plaine Pacifique

La hornblende verte et l'hypersthène dominent 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.

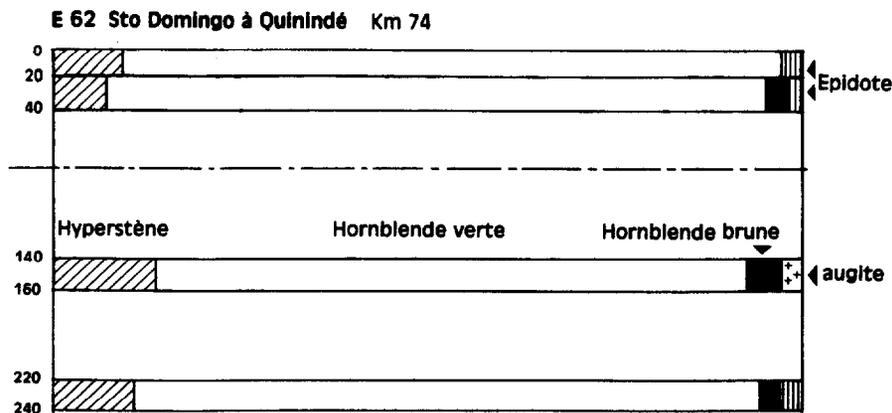


FIG. 4

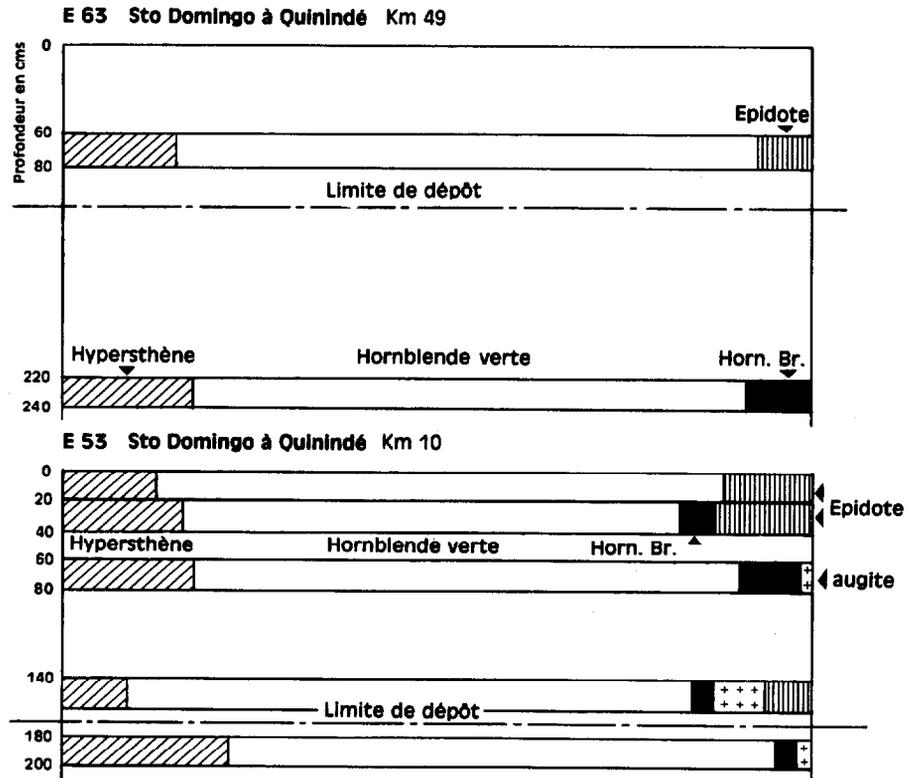


FIG. 4 (suite)

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.

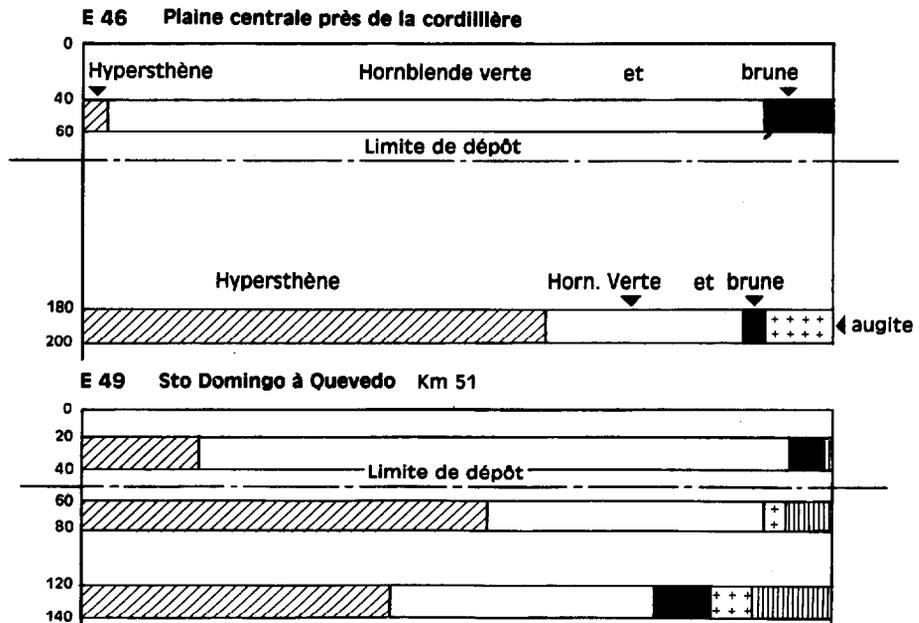


FIG. 5

- 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 cendreuse 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).

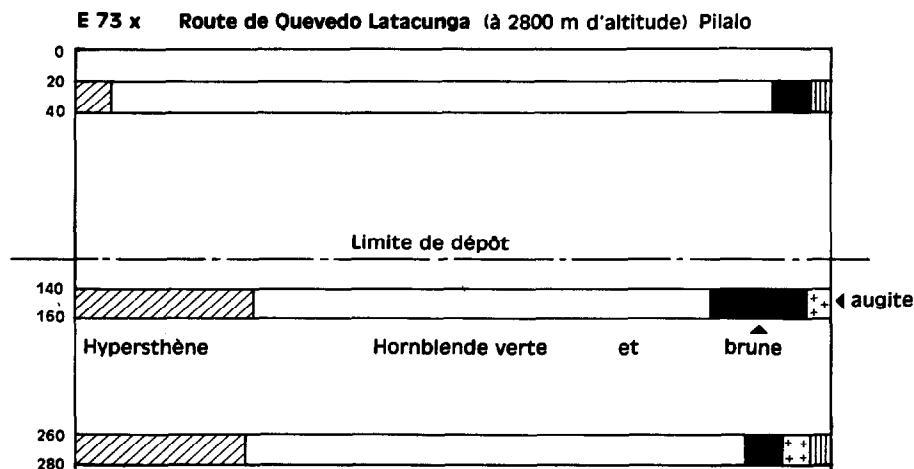


FIG. 6

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.

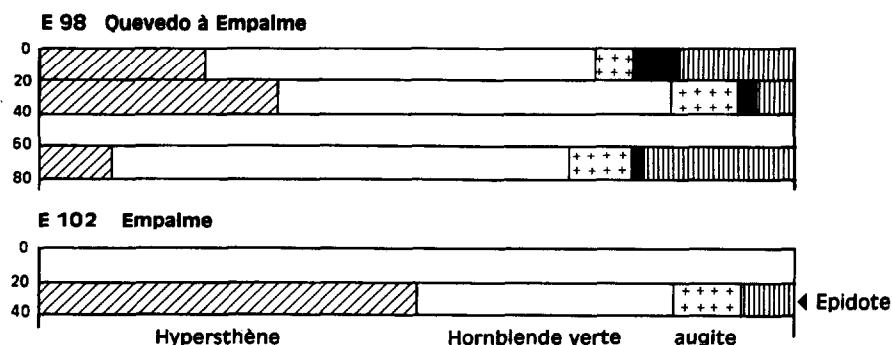


FIG. 7

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	Homblende		Augite	Epidote Zoisite	Ponderal m. lourds en % sables > 50 µ	Minér. Opaques 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	
Santo Domingo à Quinindé															
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 a	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 Santo 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 Pilato															
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 Empalme															
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 Vincès															
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 Quinde. 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).

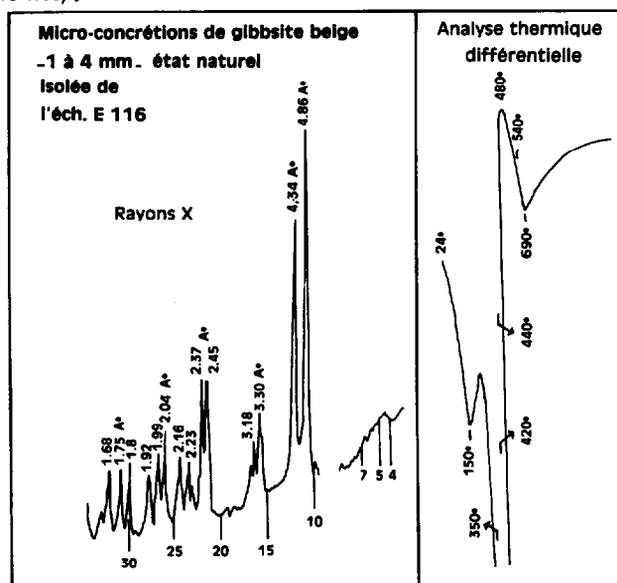
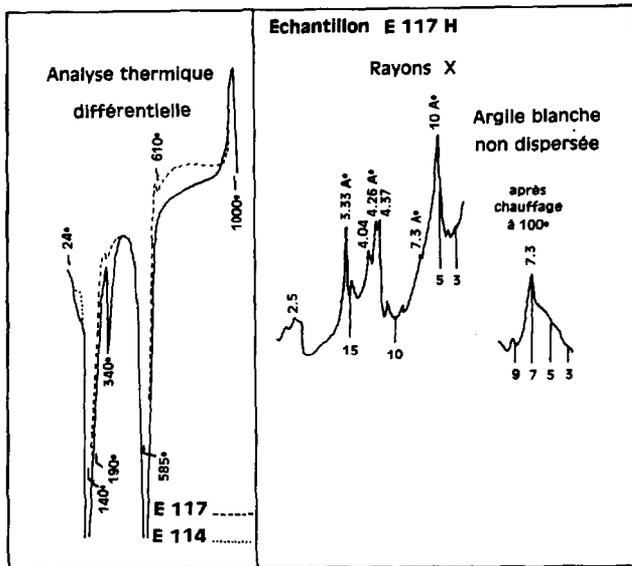


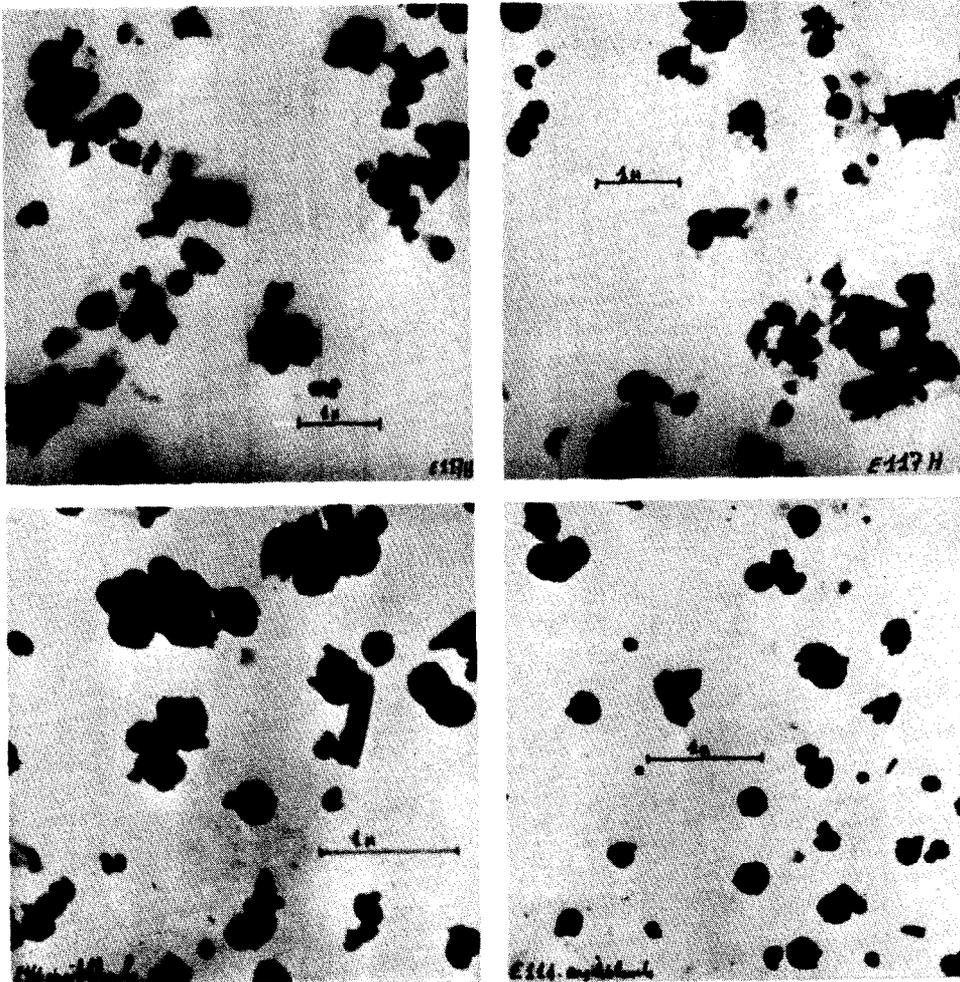
FIG. 8

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 $7,23 \text{ \AA}$ par séchage à 100° . Il s'agit donc d'halloysite hydratée, mais l'aspect enroulé en tubes ne s'observe pas au microscope électronique (E117h 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 métalloysite n'existe qu'en petite quantité (petite raie $7,2 \text{ \AA}$) ; par contre, la raie à $4,34 \text{ \AA}$ est très intense. Une petite raie à $13,5 \text{ \AA}$ demeurant inchangée au glycérol, passe semble-t-il à 10 \AA 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).

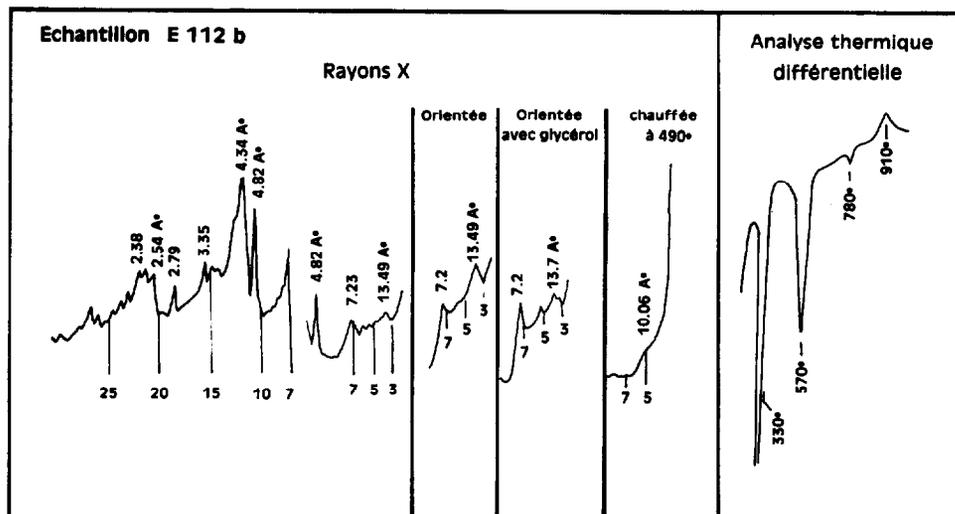


FIG. 10

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	= 3130mm
	100	QUININDE												2,5 à 3 m
Roches dures	150	VICHE												
		253	306	235	375	195	187	114	125	98	40	93	60	= 2036mm.
Sédimentaire bananeraies irriguées	250	ESMERALDAS sur la côte Pacifique												
		111	184	136	130	59	81	53	32	32	12	14	31	= 844mm

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, passe 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'enneuagement est constant, et l'ensoleillement très réduit et tardif dans la journée. Des brouillards matinaux apportent une humidité substantielle et souvent une fine bruine.

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

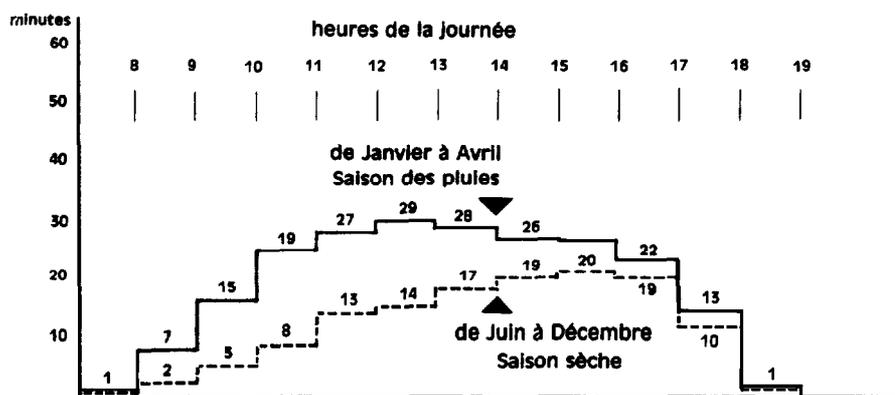


FIG. 11 Durée d'ensoleillement à Pichilingue (Quevedo) en minutes par heure

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 (ou 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 au-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 accidenté, s'élevant très rapidement au-dessus de la plaine, jusqu'à plus de 4000 mètres. Des dépôts de cendres et de ponces, 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 - (Cryandeps - 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 maximas moyens de 20° et des minimas 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 grumeleux 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).

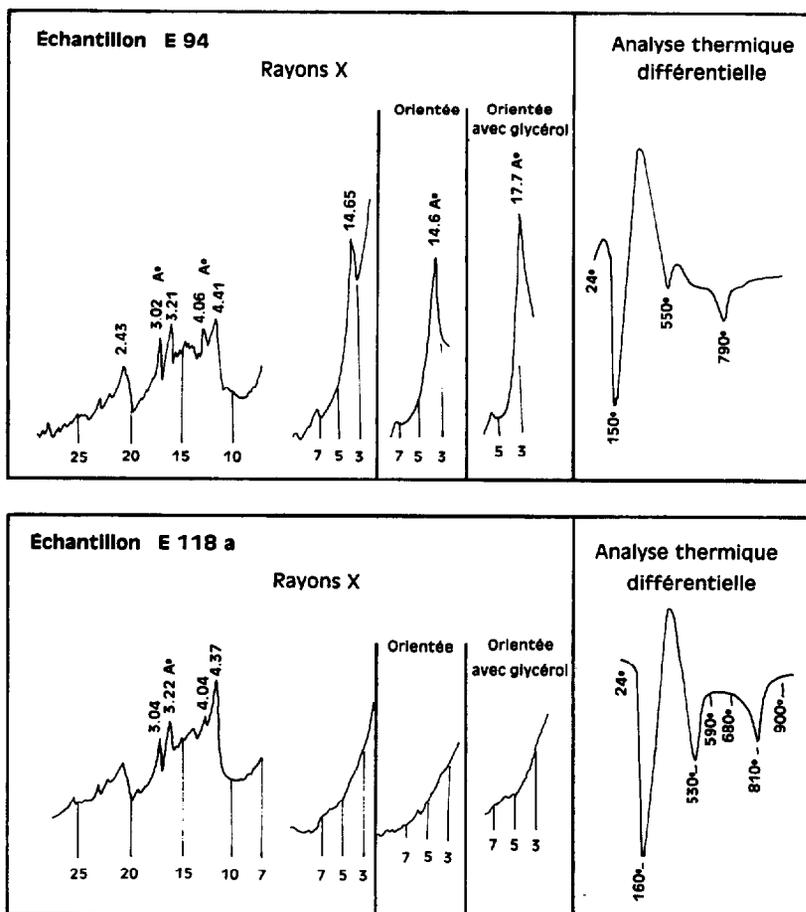


FIG. 12

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'AGE DES FORMATIONS MÈRES

On a vu qu'il s'agissait de cendres dacitoides 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, racloirs 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 quartzeux, 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 tropical E 62f	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_2O_3	9,50	30,50	24,90	25,00	29,00	37,50
Fe_2O_3	4,20	9,25	6,00	7,25	8,50	13,00
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{DEB}$	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						
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,00	1,50	1,52	1,54	1,04	0,63
$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$	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 cendreuse, 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 7e 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 (7e 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 oxi-".

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-HAPLUDEPTS - 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'andepitic-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 spécifié, "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-Normandepts.

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-normandepts" 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 SEGALIN (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 fente.

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 ou 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 %	Truog 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 étuve	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.

Umbrandépt à C/N = 10, ou Entic-hydrandépt, recouvrant des hydrandépts

DATE : Novembre 1963

Hydric-tropic-normandépt

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

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.

Modèle local : légère pente, plutôt en sommet.

Drainage externe - Rapide.

Végétation et cultures : belles bananeraie défrichée 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 motteux (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 jaune très friable, sans structure, donnant un pseudo-sable, s'écrase entre les doigts, savonneux, peu de minéraux beiges, 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
		Ca	Mg	K	Na	S	Total mg %		Truog mg %			
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 %	Truog 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

E 36 - SOL DE TRANSITION ALLOPHANE-HALLOYSITE sur SOL ARGILEUX BRUN-ROUILLE a HALLOYSITE

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

Mollic-Umbrandept ou Tropic-Eurandept

PROFIL N° E 36 Tranchée

DATE : Novembre 1963

PAYS : EQUATEUR

REGION : QUEVEDO

Altitude : 70 mètres

Roche 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°.

Modelé 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 affleure.

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 terne et plus claire, difficilement pénétrable au couteau (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 pisolithes 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