

Observations sur la présence de sols ferrallitiques dérivés de matériaux volcaniques aux Iles Canaries

Paul QUANTIN*, M.L. TEJEDOR SALGUERO**
et E. FERNANDEZ CALDAS**

* *Servires Scientifiques Centraux de l'ORSTOM,
70-74 route d'Aulnay, 93140, Bondy*

** *Centro de Edafologia y Biologia aplicada,
CSIC, Santa-Cruz de Tenerife (I. Canaries)*

RÉSUMÉ

Dans la zone climatique perhumide des îles Canaries et sur des roches volcaniques plio-pléistocènes, des sols complexes et insolites ont été observés. Ceux-ci présentent en profondeur des altérations anciennes, très poussées, dont les caractéristiques rappellent celles des sols ferrallitiques (Ultisols), et en surface un sol humifère proche des andosols désaturés (Dystrandeps).

Les auteurs exposent successivement les conditions écologiques de formation de ces sols, puis leurs caractéristiques morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques. Ils tentent ensuite une interprétation des faits et ils proposent une classification de ces sols dans les systèmes français et américains. En conclusion, ils font l'hypothèse que les altérations anciennes se sont probablement produites en climat plus chaud et plus humide; cependant, ils remarquent que la ferrallitisation peut se poursuivre encore actuellement, mais d'une manière discrète, dans les andosols, en produisant notamment de la gibbsite.

SUMMARY

OBSERVATIONS ABOUT THE PRESENCE OF FERRALLITIC SOILS DERIVED FROM VOLCANIC MATERIALS IN THE CANARY ISLANDS

In the perhumid climate belt of the Canary Islands and on plio-pleistocenic rocks, some unusual complex, soils have been observed. These soils show : firstly in the depth, a very advanced weathering process, the characteristics of which look like those of Ferrallitic Soils (Ultisols), secondly at the top, a humiferous soil, such as unsaturated Andosols (Dystrandeps).

The authors deal successively with the ecological conditions, then their morphological, physico-chemical and mineralogical characteristics. Afterwards, they attempt to do an interpretation of data and to propose a classification of these soils in the french and american Systems. In conclusion, they propose the hypothesis that the old alteration products have been probably processed in wetter and warmer climatic conditions than at the present time; however, they remark that the ferrallitization can proceed still now, but discreetly, in the Andosols, especially by the processing of some gibbsite.

SOMMAIRE

Introduction

1. CARACTÉRISTIQUES ÉCOLOGIQUES

- 1.1. Climat
- 1.2. Géologie
- 1.3. Végétation

2. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

- 2.1. Morphologie
- 2.2. Caractéristiques physico-chimiques
 - 2.2.1. Méthodes analytiques
 - 2.2.2. Matière organique
 - 2.2.3. Complexe d'échange, pH
 - 2.2.4. Analyse chimique totale
 - 2.2.5. Produits amorphes
 - 2.2.6. Granulométrie

2.3. Minéralogie

- 2.3.1. Fraction sableuse
- 2.3.2. Fraction argileuse

3. INTERPRÉTATION

4. CLASSIFICATION

Conclusion

Bibliographie

INTRODUCTION

Dans les îles Canaries Occidentales (Tenerife, Gomera, La Palma) on note la présence de sols semblables aux sols ferrallitiques. Ces sols sont localisés dans des zones d'altitude moyenne comprise entre 800 m et 1 500 m, sur le versant Nord des îles, dans la région actuelle des andosols, mais sur des roches volcaniques plus anciennes (basaltes plio-pléistocènes).

Ces sols ne peuvent être observés en surface que lorsque les phénomènes d'érosion sont très intenses. Ils se trouvent en général fossilisés sous des andosols ou des sols bruns andiques, et ils sont formés sur des matériaux basaltiques anciens. Cependant on peut aussi observer des profils complets, montrant un rajeunissement andique superficiel peu important, dans des régions au relief peu accusé.

La présence simultanée de sols ferrallitiques et d'andosols dans la même région, caractérisée par une genèse actuelle d'andosols sur les matériaux les plus récents, nous permet de formuler des hypothèses sur la genèse des sols ferrallitiques sur matériaux plus anciens.

Dans ce travail, nous nous proposerons d'étudier les propriétés de ces sols ferrallitiques afin de les caractériser et de comprendre les conditions écologiques qui ont contribué à leur formation.

1. CARACTÉRISTIQUES ÉCOLOGIQUES

1.1. Climat

Le climat des îles Canaries est déterminé par différents facteurs qui ne permettent pas de parler en toute rigueur d'un climat général de l'archipel, mais plutôt de plusieurs zones climatiques bien définies.

Ces facteurs sont représentés par : (a) la circulation des vents alizés, (b) l'orographie, (c) le courant marin froid septentrional des Canaries et (d) l'existence d'une zone d'inversion thermique à 1 500 m d'altitude approximativement.

Ce dernier facteur est dû à la décomposition en deux courants du contre-alizé équatorial (Kunkel 1976). L'orientation des systèmes montagneux détermine l'existence de deux zones climatiques parfaitement différenciées : la région Nord qui reçoit l'humidité transportée par les alizés, et la région Sud, opposée à ces vents, à caractéristiques plus arides.

Dans la région Nord, la présence des vents alizés affecte directement ou indirectement les valeurs de température et d'humidité relative jusqu'à une altitude d'environ 1 500 m (zone d'inversion thermique) et une couche de nuages se forme entre les altitudes 500 et 1 500 m, s'élevant occasionnellement jusqu'à 1 800 m.

Comme nous pouvons le noter, cette couche de nuages est située précisément dans les régions où apparaissent les andosols et les sols ferrallitiques. À l'intérieur de cette zone nuageuse, le climat le plus humide correspond à la zone de la forêt hygrophile, dite « Laurisilva », tandis que le plus sec correspond à la forêt de Pins.

Dans cette zone de condensation, la pluviométrie oscille approximativement entre 600 et 1 000 m, mais nous devons tenir compte aussi de l'importance des précipitations latérales (et occultes) provoquées par la condensation dans cette zone de brumes.

Comme on ne dispose pas de mesures précises sur ces condensations les opinions sont très partagées. Certains auteurs (Ceballos, Ortuño, 1951) enregistrent des précipitations latérales supérieures au triple des précipitations verticales normales dans la zone de Laurisilva, ce qui supposerait une augmentation de plus de 3 000 mm par an, tandis que d'autres auteurs (Kammer, 1972) considèrent que ces apports sont moins importants et représentent seulement 300 mm dans cette même zone.

De toute manière, quand on considère les valeurs pluviométriques il convient de tenir compte des précipitations latérales. Il serait utile de réaliser une étude systématique, permettant d'établir avec suffisamment de précision l'importance de ces précipitations.

Le tableau I indique les caractéristiques climatiques d'une station météorologique (Aguamansa) située dans la région de nuages à une altitude de 1 200 m, et la figure 1 représente le diagramme ombrothermique.

TABLEAU I

Données climatiques, Station de Aguamansa

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Température moyenne	11,1	10,3	19,1	9,7	14,6	13,3	19,7	18,6	16,7	15,0	11,0	12,5	13,5
Evapotranspiration	3,7	3,3	3,8	3,8	7,4	6,5	10,4	6,8	7,3	6,3	3,8	4,2	67,4
Précipitations, moyenne (cm) ..	8,4	10,1	9,5	7,6	2,7	0,8	0	0	3,3	4,6	26,4	20,0	93,4
Réserve	10,0	10,0	10,0	10,0	5,3	—	—	—	—	—	10,0	10,0	
Evaporation réelle	3,7	3,3	3,8	3,8	2,7	0,8	—	—	3,3	4,6	3,8	4,2	34,1

1.2. Géologie

Les sols peuvent se former sur des matériaux volcaniques acides et basiques : phonolites ou basaltes. Le tableau II indique la composition chimique de ces matériaux. Mais, les basaltes prédominent largement, les cendres « phonolitiques » contribuant plutôt à une pollution superficielle et récente du matériau original des sols.

Les sols ferrallitiques se trouvent dans les régions géologiquement les plus anciennes, Anaga, Teno (Tenerife) et le Mont du Cedro (Gomera), leur âge étant compris entre 4 et 15 millions d'années (Abdel-Monem, Watkins, Gast, 1972). Ils apparaissent aussi à la Esperanza, sur les montagnes de Sta Ursula et La Victoria à Tenerife et dans la région septentrionale de l'île de La Palma, régions qui se sont formées au Quaternaire ancien (Pléistocène). Ils dérivent presque tous de basaltes.

TABLEAU II

Analyse chimique de roches volcaniques de Tenerife

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO %	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Basaltes	Lim. inf.	41	8	4	4	6	12	1	0,2	2
	Lim. sup.	48	18	8	9	10	16	3	0,8	4
Phonolites	Lim. inf.	57	16	1,5	1,5	1	1	6	4	0,5
	Lim. sup.	64	20	3	2	2	2	7	5,5	1

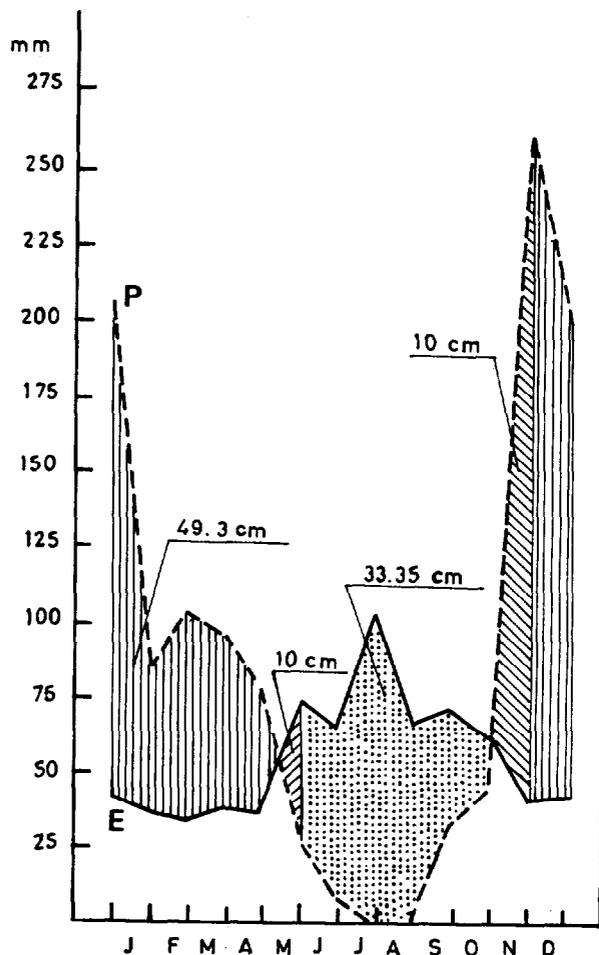


FIG. 1. — Diagramme ombrothermique d'Aguamansa

1.3. Végétation

La végétation correspondant à cette zone de condensation des brumes comporte trois formations : « Laurisilva » (*Laurus canariensis*, *Persea indica*, *Apollonia canariensis*, etc.), « Fayal-Brezal » (*Myrica faya*, *Erica arborea*), et « Pinède » (*Pinus canariensis*). (Ceballos, Ortuño, 1951).

2. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

2.1. Morphologie

Nous décrivons trois des profils que nous considérons comme représentatifs de ce type de sols. Le profil I

est situé dans un bois de Pins sur des basaltes pléistocènes, les deux autres dans un bois de Laurisilva, dans des conditions d'humidité et d'ancienneté géologique supérieures à celles du profil précédent.

Profil I

Situation : Mont de Sta Ursula

Végétation : *Pinus Canariensis*

Altitude : 1 000 m

Roche-Mère : Matériaux basaltiques pléistocènes

0-30 cm : *Horizon A₁₁*

Brun foncé (7.5 YR 4-3/3); limono-sableux et humifère; grumeleux à grenu moyen, très friable et non plastique; à faible densité apparente; racines très denses. Caractères andiques évidents, et test « NaF » fortement positif.

30-100 cm : *Horizon B*

Ocre (5 YR 4/8); argilo-limoneux, prismatique moyen et polyédrique moyen, à consistance forte, peu friable; densité apparente moyenne (0,8-1); enracinement dispersé. Test « NaF » : réponse à peine perceptible.

100-130 cm : *Horizon C*

Brun clair (10 YR 7/6-5); limono-sableux; taches blanches fines et friables de gibbsite et traces de minéraux primaires altérés conservés; structure continue à faiblement prismatique; altération chimique très poussée laissant un résidu à faible densité apparente, caractéristique des sols ferrallitiques; peu de racines. Test « NaF » : réaction faiblement positive.

130-180 cm : *Horizon IIB*

Brun foncé (7,5 YR 3/2); argilo-sableux; petits minéraux blancs altérés friables et relativement peu de quartz; structure prismatique et polyédrique moyenne; consistance assez forte, mais friable; peu humide; peu de racines. Test « NaF » : réponse extrêmement faible.

180-240 cm : *Horizon IIB/C*

Brun, formant transition vers l'altération avec apparition de fines concrétions (nodules) blanchâtres ou rosâtres de 1 cm de diamètre environ, friables, constitués de gibbsite.

240-280 cm : *Horizon IIC*

Brun (7,5 YR 5-6/6) nombreuses petites taches blanchâtres de produits d'altération, dont certaines contiendraient de la gibbsite; sablo-limoneux; structure continue, à faible développement de prismes; sec et friable; densité apparente très faible; pas de racines. Test « NaF » : réponse faiblement positive.

Profil II

Situation : Mont Las Mercedes (Las Lajas, n° 2)

Végétation : Laurisilva

Altitude : 1 000 m

Roche-Mère : Basalte très altéré, d'âge pliocène

2-50 cm : *Horizon A₁₁*

Très friable, léger et poreux; forte activité biologique; comportement thixotropique; texture limono-argileuse; friable; faible densité; très humifère; structure grumeleuse fine, très friable, farineuse.

50-90 cm. Horizon A₁₂

10 YR 2/2. Très friable, léger, poreux, thixotropique; faible densité; contient des petits charbons (*); texture limono-argileuse; structure apparemment continue.

90-120 cm : Horizon (B)

5 YR 4/6. Transition brusque. Argilo-limoneux; structure plus développée; très friable.

120-170 cm : Horizon IIB₁

5 YR 4/6. Transition très diffuse. Argilo-limoneux; structure polyédrique à grenue; peu dense; friable; pas de thixotropie.

170-190 cm : Horizon IIB₂

5 YR 4/6. Texture argileuse; structure polyédrique moyenne; morceaux de tuf altéré, dispersés.

190-210 cm : Horizon IIB/C

Tuf très altéré, jaunâtre, bigarré.

Profil III

Situation : Esperanza-Agua Garcia (El Poléo)

Végétation : Laurisilva

Altitude : 1 000 m

0-10 cm : Horizon A

Horizon humifère; brun; texture limono-argileuse; structure grumeleuse; très friable (farineuse); faible densité apparente.

20-80 cm : Horizon B

Couleur jaunâtre; texture limono-argileuse; structure polyédrique fine; densité apparente légèrement supérieure à celle de l'horizon A.

80-> 2 m : Horizon IIB

Couleur brun-rougeâtre; texture limono-argileuse; structure polyédrique moyenne.

Nous observons que dans les trois cas, les sols à tendance ferrallitique sont rajeunis en surface par un sol à caractéristiques andiques, plus épais dans les profils II et III que dans le profil I.

Nous inclurons également dans ce travail les caractéristiques de ces sols superficiels, excepté pour le profil II, qui a été étudié antérieurement (Fernandez Caldas, Tejedor Salguero, 1975; Rodriguez, Quantin, Tejedor Salguero, Fernandez Caldas, 1975; Tejedor Salguero, Fernandez Caldas, 1975).

Morphologiquement, nous devons remarquer dans les horizons (B) la structure relativement fine,

(*) Ces charbons, au sommet de l'horizon A₁₂, marquent la limite d'un sol enterré par éruption volcanique. Ils ont été datés 8760 ± 160 BP par Mme G. DELIBRIAS (in QUANTIN *et al.*, 1975).

polyédrique moyenne, très friable, et une densité apparente très faible. Il y a dans quelques cas des nodules de gibbsite. Tout ceci est caractéristique des sols ferrallitiques.

2.2. Caractéristiques physico-chimique

2.2.1. MÉTHODES ANALYTIQUES

La matière organique a été déterminée par la méthode Walkey et Black; l'azote minéralisé par attaque sulfurique, par la méthode Kjeldahl.

Le pH a été mesuré en suspension aqueuse (1 : 2,5) et en suspension KCl N (1 : 2,5).

La capacité totale d'échange a été déterminée avec de l'acétate sodique à pH 8,2, tandis que les cations d'échange ont été extraits avec de l'acétate d'ammonium (N) à pH 7. Les déterminations ont été faites sur un Perkin Elmer d'absorption atomique modèle 290 (Richards 1954). La valeur Δ de la capacité d'échange est la différence des mesures à pH 10,7 et 3,5 (Aomine, Jackson, 1959).

La quantité de substances amorphes a été déterminée par la méthode de Ségalen. (Ségalen, 1968).

L'analyse totale a été effectuée après attaque FH + NO₃H.

L'analyse mécanique a été réalisée par dispersion à l'hexamétoposphate de sodium.

2.2.2. MATIÈRE ORGANIQUE

Dans ces trois profils, les teneurs en matière organique diffèrent, (tabl. III).

TABLEAU III

Matière organique totale

Profil	Horizon	% C	% M.O.	% N	C/N
Profil I	A11	5,55	9,55	0,36	15,42
	B	0,42	0,72	0,05	8,40
	C	0,32	0,55	0,03	10,67
	II B	0,34	0,58	0,03	10,00
	II C	0,27	0,46	0,03	9,00
Profil II	II B1	2,12	3,64	0,19	11,15
	II B2	1,58	2,71	0,12	13,16
	II B/C	1,55	2,66	0,08	17,61
Profil III	A	3,82	6,57	0,28	13,64
	B	0,64	1,10	0,09	6,73
	II B	0,42	0,72	0,05	8,75

Dans les profils I et III, la teneur en matière organique est très faible dans les horizons ferrallitiques. Les horizons A₁₁ et A, (B) correspondent à des horizons rajeunis et andiques du profil. Dans le profil II, les horizons ferrallitiques présentent une teneur en matière organique plus élevée que dans les profils précédents.

Cependant, dans ce cas cette matière organique est constituée essentiellement d'acides fulviques (tabl. IV), provenant probablement du sol andique superficiel par un processus de lixiviation.

TABLEAU IV

Matière organique humifiée

Profil	Horizon	% C H	% C AH	% C AF	AH/AF
Profil II	A11	5,34	1,04	4,30	0,24
	A 12	4,25	1,22	3,03	0,40
	(B)	2,31	0,64	1,67	0,38
	II B1	1,57	0,30	1,27	0,23
	II B2	0,89	0,10	0,79	0,12
	II B/C	0,74	0,05	0,69	0,07

Nous pouvons donc en conclure que la quantité de matière organique de ces sols ferrallitiques est généralement plus faible que celle des andosols.

Dans le cas du profil II, la coloration marron est due surtout à l'association de la matière organique avec des argiles halloysitiques.

2.2.3. COMPLEXE D'ÉCHANGE, pH

Les trois profils ont une réaction acide. En exceptant l'horizon II B du profil I, les différences entre le pH dans H₂O et le pH dans KCl sont de l'ordre de une unité approximativement (tabl. V).

La somme des bases est plus élevée dans le profil I que dans les profils II et III, bien que leurs valeurs absolues soient relativement basses, et jamais supérieures à 12,6 me/100 g.

De même, le taux de saturation est considérablement supérieur dans le profil I, ce qui correspond aux différences d'humidité et d'âge des roches de ces deux zones.

La capacité d'échange est relativement plus faible (18,9 me/100 g) dans le sol ferrallitique du profil III ; ceci correspond à un sol dont le complexe d'altération est riche en gibbsite ; dans les deux autres profils, la présence plus abondante d'halloysite, jointe probablement à de petites quantités d'alophaane, est responsable des valeurs supérieures de capacité d'échange.

On a calculé la valeur Δ de la capacité d'échange pour le profil II (différence entre la capacité obtenue à pH 10,7 et celle mesurée à pH 3,5). Les valeurs obtenues varient entre 10,2 me/100 g et 14,0 me/100 g. Ces résultats diffèrent considérablement de ceux obtenus dans le cas des andosols typiques, où on observe des valeurs de 42 me/100 g environ.

TABLEAU V

pH, capacité totale d'échange (pH = 7), bases échangeables et taux de saturation

Profil	Horizon	pH		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	S	T	S/T (%)
		H ₂ O	KCl							
Profil I	A ₁₁	6,0	5,1	10,67	4,98	1,11	2,40	19,16	45,49	42,11
	B	6,2	4,9	2,97	3,83	1,56	2,95	11,31	27,05	41,81
	C	5,9	4,6	2,97	1,84	3,22	2,90	10,93	28,86	37,87
	IIB	6,0	5,7	3,03	2,27	2,51	4,82	12,63	27,64	45,69
	IIC	5,9	4,9	3,05	3,08	1,29	2,79	10,21	22,02	46,37
Profil II	IIB ₁	5,3	4,2	1,56	2,07	2,17	0,93	6,73	35,90	18,70
	IIB ₂	5,5	4,4	2,12	2,63	3,80	0,19	8,74	32,80	26,70
	IIB/C	5,4	4,5	1,12	1,43	2,38	0,02	5,08	26,30	19,20
Profil III	A	6,0	5,2	3,73	3,00	0,58	1,95	9,26	37,99	24,37
	B	6,1	5,4	3,47	1,97	4,84	1,17	11,45	38,44	29,78
	IIB	6,2	5,5	2,55	2,67	1,06	0,88	7,16	18,93	37,82

TABLEAU VI

Analyse chimique totale (%)

Profil	Horizon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn ₂ O ₄	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Perte au feu 105°/1 000
Profil I	A ₁₁	35,12	22,58	10,68	1,44	1,41	0,20	1,17	1,32	2,64	20,10
	B	38,55	24,83	12,12	1,08	0,77	0,19	0,46	0,86	2,63	11,43
	C	45,21	29,28	7,08	0,72	1,05	0,11	1,10	0,99	2,62	12,00
	IIB	32,01	23,77	17,06	1,02	1,08	0,12	0,49	0,52	2,29	11,02
Profil II	IIC	43,24	26,35	8,99	1,35	1,29	0,11	1,34	1,70	2,78	8,95
	IIB ₁	35,90	25,62	8,41	0,40	0,11	0,06	0,15	0,61	2,37	17,44
	IIB ₂	33,61	28,77	7,75	0,18	0,03	0,03	0,15	0,24	2,13	18,50
Profil III	IIB/C	25,81	35,36	8,16	0,13	0,03	0,06	0,15	0,24	1,24	22,98
	A	28,65	27,67	13,03	1,16	1,98	0,31	2,86	1,05	1,76	16,00
	B	33,62	26,40	13,94	1,11	0,75	0,16	0,66	0,65	2,16	13,02
	IIB	30,12	29,52	16,08	1,50	1,14	0,28	0,84	0,94	1,73	11,80

2.2.4. ANALYSE CHIMIQUE TOTALE

Dans le tableau VI, on observe des teneurs en silice assez modérées, particulièrement plus faibles dans l'horizon II B/C du profil II; de la même façon, la teneur en bases diminue beaucoup dans ce profil.

Les valeurs les plus élevées en alumine correspon-

dent aux horizons les plus riches en gibbsite (hor. II B/C du profil II et horizon II B du profil III).

Les rapports molaires SiO₂/Al₂O₃ sont < 2 dans l'horizon B/C du profil II (1,24) et dans le profil III (1,73). Les valeurs plus élevées du profil I indiquent la présence de minéraux primaires et un degré d'altération moins profond dans ce profil, que l'on peut considérer comme un sol pénévoué.

TABLEAU VII

Analyse d'amorphes : Fe₂O₃ %

Horizon		Extractions							Total	
		1	2	3	4	5	6	7		
Profil I	A ₁₁	Extraction HCl	1,89	2,04	0,81	0,46	0,20	0,18	0,20	5,78
	B	Extraction HCl	6,03	3,20	0,86	0,46	0,21	0,21	0,19	11,16
	C	Extraction HCl	1,81	0,95	0,37	0,22	0,14	0,14	0,12	3,75
	II B	Extraction HCl	12,91	1,07	0,57	0,27	0,24	0,19	0,11	15,36
	II C	Extraction HCl	1,63	1,08	0,56	0,25	0,20	0,18	0,13	4,03
Profil II	II B ₁	Extraction HCl	3,62	1,17	0,62	0,58	0,17	0,09	0,09	6,24
	II B ₂	Extraction HCl	3,63	1,18	0,53	0,32	0,14	0,07	0,06	5,93
	II B/C	Extraction HCl	3,33	1,54	0,74	0,40	0,11	0,07	0,05	6,24
Profil III	A	Extraction HCl	4,05	1,95	0,73	0,49	0,21	0,22	0,10	7,77
	B	Extraction HCl	5,36	1,95	0,57	0,31	0,17	0,09	0,06	8,51
	II B	Extraction HCl	3,93	2,11	1,38	1,05	0,57	0,28	0,20	9,52

2.2.5. PRODUITS AMORPHES

Pour l'extraction des produits amorphes, on a suivi la méthode cinétique de Ségalen, en alternant les extractions en milieu acide par HCl (8 N), avec celles en milieu alcalin par NaOH (0,5 N).

A partir des valeurs obtenues de Fe_2O_3 , Al_2O_3 et SiO_2 , qui apparaissent dans les tableaux VII, VIII et IX, on a tracé les courbes cumulatives. Dans les trois profils ces courbes présentent, tant pour l'aluminium que pour la silice, un changement de pente progressif, ce qui nous a amené à calculer les courbes de vitesse de dissolution en suivant les indications données par Lamouroux et Quantin (1973); ces courbes nous permettent une meilleure interprétation des constituants du sol.

Dans les figures 2, 3 et 4, on trouve les courbes cumulatives et de vitesse de dissolution, pour la silice, l'alumine et le fer du profil I. Dans les horizons B,

II B et C les courbes de la silice présentent un accroissement de la vitesse de dissolution à la 2^e extraction puis une diminution ce qui indique l'existence de minéraux cristallisés. Au contraire, la forme de la courbe pour l'horizon A, tant dans le cas de la silice que de l'alumine, indique la présence de produits amorphes, probablement un peu d'allophane.

D'autre part, si nous tenons compte du contenu d'argiles halloysitiques si élevé dans ce sol, nous pouvons expliquer le comportement similaire des courbes cinétiques de silice et d'aluminium par la dissolution de l'argile (Lamouroux, Quantin, 1973). Les valeurs plus élevées de l'alumine dans l'horizon A sont probablement dues à la dissolution de gibbsite et d'allophane.

Les courbes du fer montrent que cet élément est facilement extrait dans l'horizon II B, ce qui indique qu'une partie importante se trouve sous forme « amorphe ». Les courbes relatives aux autres horizons correspondent à des formes cryptocristallines.

TABLEAU VIII

Analyse d'amorphes : Al_2O_3 %

Horizon		Extractions							Totale	
		1	2	3	4	5	6	7		
Profil I	A ₁₁	Extraction HCl	4,35	1,39	0,80	0,71	0,48	0,34	0,32	8,39
		NaOH	1,55	0,74	0,74	0,69	0,68	0,62	0,58	5,60
	B	Extraction HCl	3,05	2,47	1,45	0,99	0,55	0,45	0,37	9,33
		NaOH	2,71	1,98	1,23	0,96	0,75	0,72	0,56	8,91
	C	Extraction HCl	4,62	3,15	1,84	1,23	0,56	0,40	0,28	12,08
		NaOH	2,96	2,39	1,62	1,33	0,92	0,72	0,42	10,36
	II B	Extraction HCl	3,66	2,71	1,45	0,74	0,47	0,25	0,17	9,45
		NaOH	2,89	1,88	1,46	0,95	0,75	0,56	0,30	8,79
	II C	Extraction HCl	2,69	1,86	0,91	0,59	0,44	0,28	0,20	6,97
		NaOH	2,64	1,88	1,26	0,88	0,62	0,64	0,35	8,27
Profil II	II B ₁	Extraction HCl	3,02	1,32	0,66	0,55	0,37	0,27	0,21	6,40
		NaOH	3,25	2,28	1,35	1,61	0,43	0,43	0,62	9,97
	II B ₂	Extraction HCl	3,02	1,79	1,13	0,92	0,41	0,26	0,20	7,73
		NaOH	4,29	3,15	1,96	2,14	0,52	0,57	0,79	13,42
	II B/C	Extraction HCl	3,44	1,41	0,85	0,75	0,36	0,25	0,19	7,25
		NaOH	3,93	3,11	2,14	2,75	0,72	0,77	1,13	14,55
Profil III	A	Extraction HCl	6,28	2,04	0,98	0,42	0,25	0,19	0,19	10,32
		NaOH	3,16	1,69	1,02	0,43	0,46	0,35	0,27	7,38
	B	Extraction HCl	5,65	2,66	1,29	0,56	0,31	0,15	0,12	10,74
		NaOH	3,13	1,63	0,60	0,32	0,23	0,16	0,12	6,39
	II B	Extraction HCl	2,09	1,39	1,13	0,63	0,39	0,25	0,25	6,13
		NaOH	3,08	2,51	1,87	1,08	0,86	0,79	0,50	10,69

TABLEAU IX

Analyse d'amorphes SiO₂ %

Horizon		Extractions							Total		
		1	2	3	4	5	6	7			
Profil I	A ₁₁	Extraction HCl	0,91	0,51	0,48	0,54	0,46	0,49	0,36	3,75	
		NaOH	2,69	2,06	1,76	1,32	1,27	1,08	0,97	11,15	
	B	Extraction HCl	0,69	0,53	0,57	0,75	0,45	0,43	0,35	3,77	
		NaOH	5,14	4,92	3,39	2,07	1,35	1,22	0,89	18,98	
	C	Extraction HCl	0,88	0,79	0,76	0,85	0,43	0,39	0,35	4,45	
		NaOH	6,76	6,80	4,33	2,76	1,45	1,06	0,56	23,72	
	II B	Extraction HCl	0,84	0,54	0,61	0,68	0,57	0,35	0,36	3,95	
		NaOH	6,35	5,73	3,79	1,73	1,22	0,86	0,49	20,17	
	II C	Extraction HCl	0,68	0,64	0,51	0,64	0,47	0,34	0,34	3,62	
		NaOH	4,84	4,49	2,62	1,45	1,15	0,91	0,59	16,05	
	Profil II	II B ₁	Extraction HCl	0,40	0,48	0,29	—	—	—	—	1,17
			NaOH	2,61	2,48	1,65	1,62	0,62	0,69	0,76	10,43
II B ₂		Extraction HCl	0,43	0,69	0,40	—	—	—	—	1,52	
		NaOH	4,22	4,11	2,49	2,27	0,59	0,72	0,74	15,14	
II B/C		Extraction HCl	1,03	0,46	0,32	—	—	—	—	1,81	
		NaOH	2,45	1,91	1,19	1,08	0,42	0,26	0,32	7,63	
Profil III	A	Extraction HCl	2,56	0,95	0,57	0,17	0,14	0,11	0,14	4,64	
		NaOH	2,55	1,39	0,93	0,75	0,58	0,55	0,42	7,17	
	B	Extraction HCl	2,08	0,77	0,51	0,18	0,15	0,08	0,08	3,85	
		NaOH	7,98	5,44	2,19	1,12	0,72	0,47	0,28	18,20	
	II B	Extraction HCl	0,46	0,44	0,37	0,23	0,18	0,11	0,08	1,87	
		NaOH	5,74	2,19	1,16	0,81	0,70	0,50	0,45	11,55	

Les courbes de la silice du profil II (fig. 5) sont caractéristiques d'argiles très solubles. Les courbes de l'aluminium correspondent à la dissolution de gibbsite et de silicates (fig. 6). Dans ce profil on observe que l'extraction maximale d'aluminium a lieu en milieu alcalin (tabl. VIII) et que les valeurs restent très élevées jusqu'à la 7^e extraction, en raison de la présence abondante de gibbsite.

Les courbes d'extraction de fer (fig. 7) correspondent à un produit facilement soluble, une partie importante étant à l'état amorphe ou cryptocristallin.

Dans le profil III, on observe une grande différence de comportement de l'aluminium entre l'horizon II B et le sol de surface (fig. 8). La vitesse diminue doucement dans l'horizon II B, ce qui ne correspond pas à la présence de produits amorphes. Au contraire, dans les horizons de surface (A et B) la variation au

cours des trois premières extractions est rapide et indique la présence d'aluminium sous forme très soluble, amorphe ou cryptocristalline.

Les courbes de silice des horizons A et II B indiquent la possibilité de produits amorphes ou cryptocristallins (fig. 9).

Le comportement du fer dans ce profil est très semblable à celui de l'aluminium (fig. 10). Il y a des oxydes de fer amorphes dans les horizons A et (B), surtout dans ce dernier horizon. La variation de la vitesse de dissolution est progressive dans l'horizon II B, ce qui indique un faible contenu de cet élément sous forme amorphe; il est principalement à l'état cryptocristallin ou cristallin très soluble. Le parallélisme entre les courbes du fer et de l'aluminium indiquerait l'existence d'hydroxydes d'aluminium ferri-fères.

2.2.6. GRANULOMÉTRIE (tabl. X)

La teneur en argile est élevée dans les trois profils, et atteint une valeur maximale de 84,9 % dans l'horizon II B₂ du profil II, diminuant dans les horizons d'altération.

TABLEAU X
Granulométrie (%)

Profil	Horizon	Argile < 2 μ	Limon 2-20 μ	Sables fins 20-200 μ	Sables grossiers 200 μ- 2 mm
Profil I	A ₁₁	41,2	37,1	13,1	7,2
	B	80,4	12,9	2,6	1,5
	C	64,5	20,8	5,8	6,7
	II B	62,8	29,9	3,7	1,2
	II C	48,1	26,2	10,9	10,7
Profil II	II B ₁	83,5	10,9	0,8	1,9
	II B ₂	84,9	9,8	0,8	1,8
	II B/C	59,8	27,8	2,9	6,9
Profil III	A	42,3	38,9	14,5	3,9
	B	46,7	32,5	10,7	5,7
	II B	55,5	28,7	6,6	6,9

Les taux de limon oscillent entre 9,8 et 29,9 % dans les horizons ferrallitiques, et la fraction sableuse est très faible; ce qui correspond à un sol à degré élevé d'altération. On observe relativement peu de limon dans les horizons les plus évolués, par rapport à la teneur en argile; ce qui est très caractéristique des sols ferrallitiques.

2.3. Minéralogie

2.3.1. FRACTION SABLEUSE

L'étude des minéraux primaires a été réalisée suivant la technique de Perez Mateos (1965) et les modifications introduites par Alexandre et Pinilla (1968).

Pour ce qui concerne les minéraux de la fraction lourde des trois profils, on observe une prédominance des opaques naturels, notamment la magnétite et l'ilménite; l'hématite est en quantité très inférieure.

On trouve uniquement des minéraux transparents ferromagnésiens dans l'horizon A₁₁ du profil I, et dans les horizons A et (B) du profil III, qui corres-

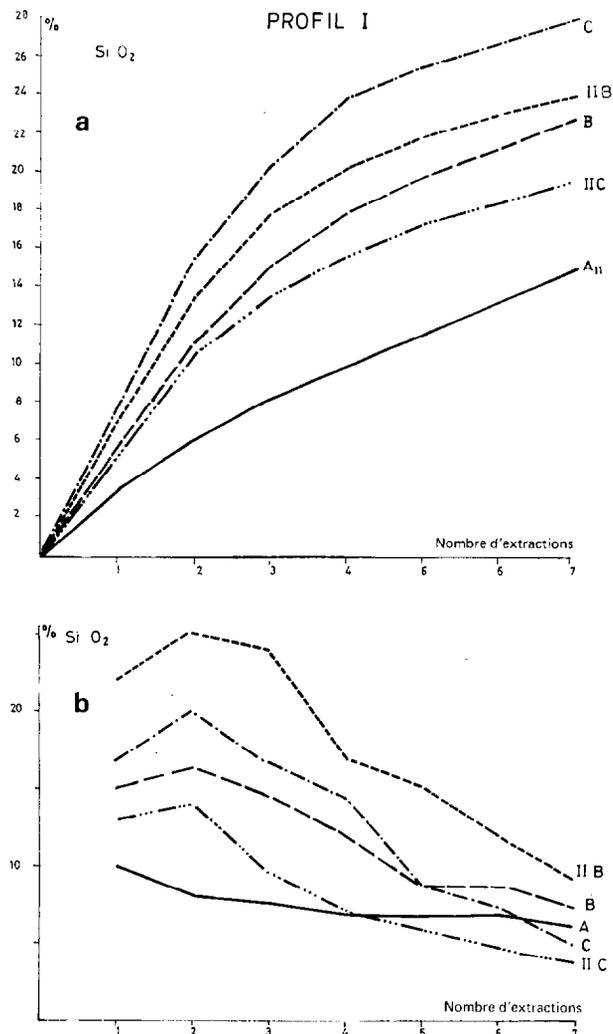


FIG. 2. — Profil I

a : Courbes cumulatives de dissolution du silicium; b : Courbes de vitesse de dissolution du silicium.

pondent aux horizons rajeunis, bien que dans ce dernier profil ces minéraux se trouvent déjà en très petite proportion, particulièrement dans l'horizon (B).

Dans la fraction légère prédominent des grains altérés chloritisés, généralement de couleur gris-rougeâtre très foncé. On observe en très petite quantité des feldspaths potassiques (sanidine) et calcosodiques, particulièrement en surface.

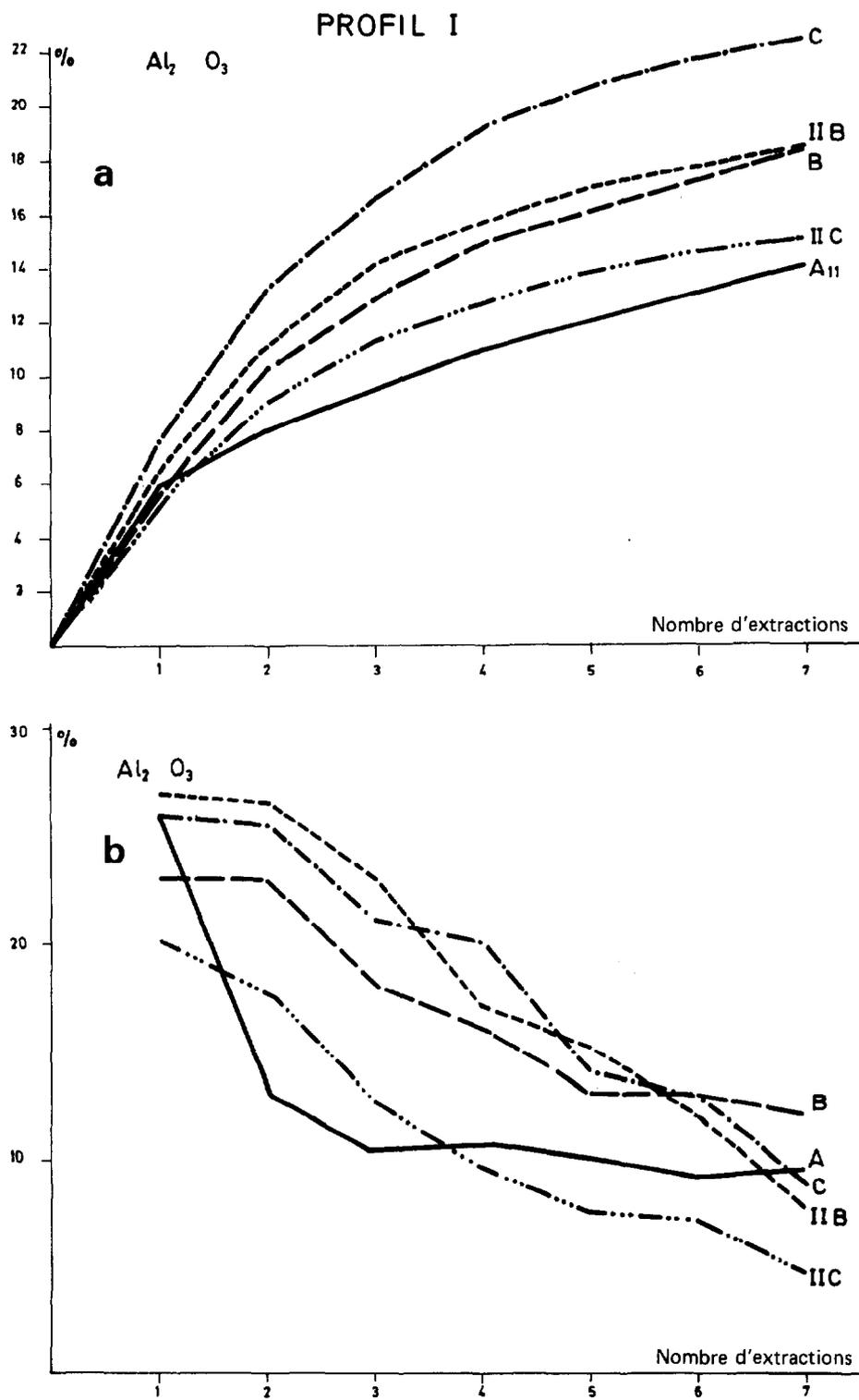


FIG. 3. — Profil I

a : Courbes cumulatives de dissolution de l'aluminium ; *b* : Courbes de vitesse de dissolution de l'aluminium.

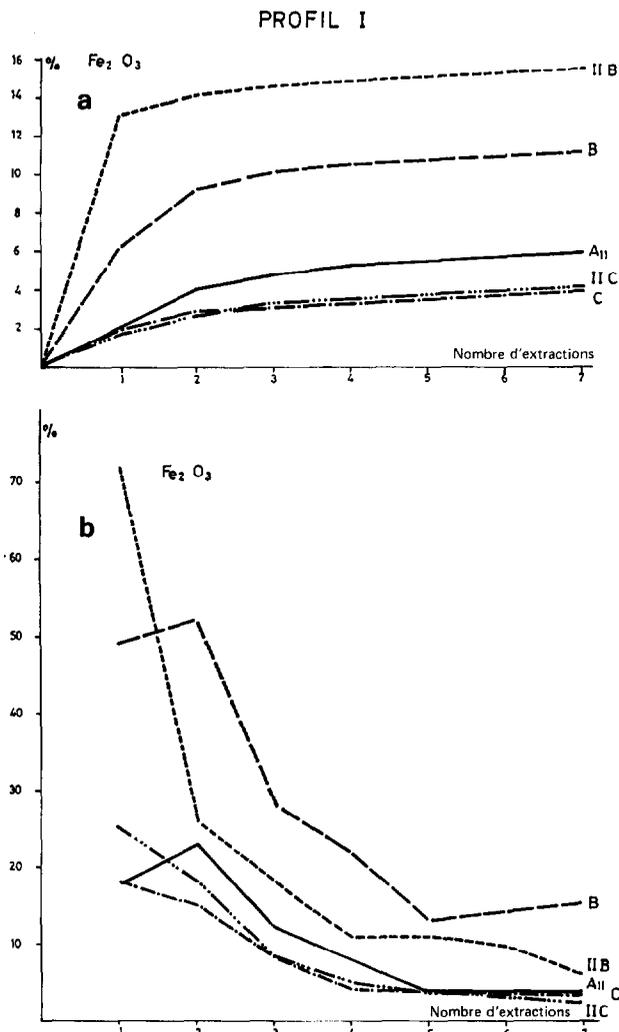


FIG. 4. — Profil I

a : Courbes cumulatives de dissolution du fer ; b : Courbes de vitesse de dissolution du fer.

2.3.2. FRACTION ARGILEUSE

Les constituants minéraux cristallisés ont été déterminés par diffraction de rayons X sur la fraction inférieure à 2μ , en poudre ou orientée, et sur le sol total.

L'étude par microscopie électronique a été effectuée dans les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM

avec la collaboration de M. Rambaud, en utilisant un microscope JEOL 100 U.

Profil I

La métahalloysite est l'élément argileux dominant tout au long du profil. Elle augmente avec la profondeur, et on observe dans quelques horizons presque exclusivement les raies dues à ce minéral (fig. 11).

On trouve de la gibbsite dans les horizons A et II C, bien qu'en proportion peu importantes. Des traces

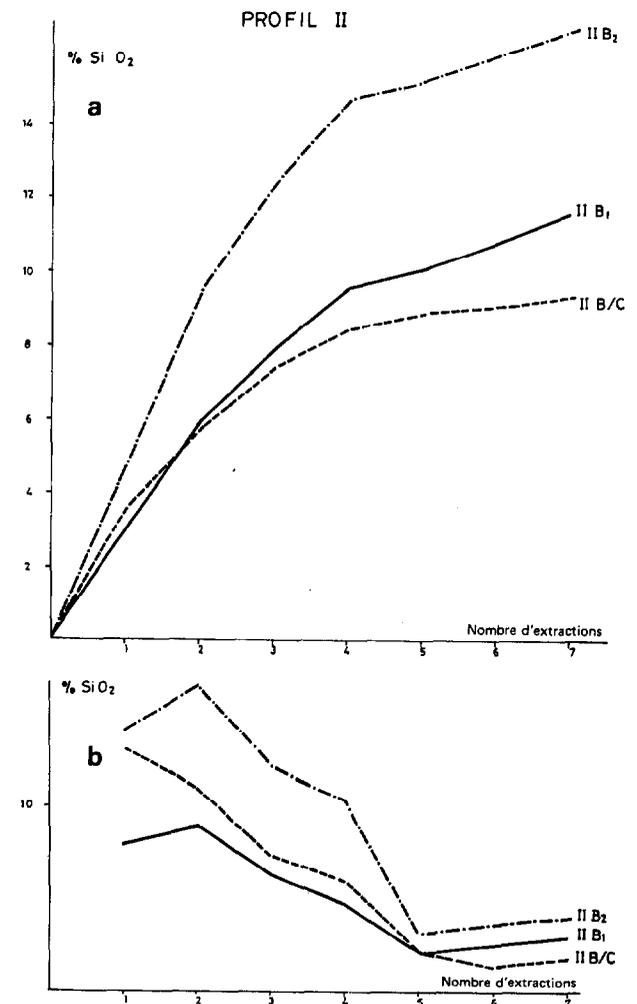


FIG. 5. — Profil II

a : Courbes cumulatives de dissolution du silicium ; b : Courbes de vitesse de dissolution du silicium.

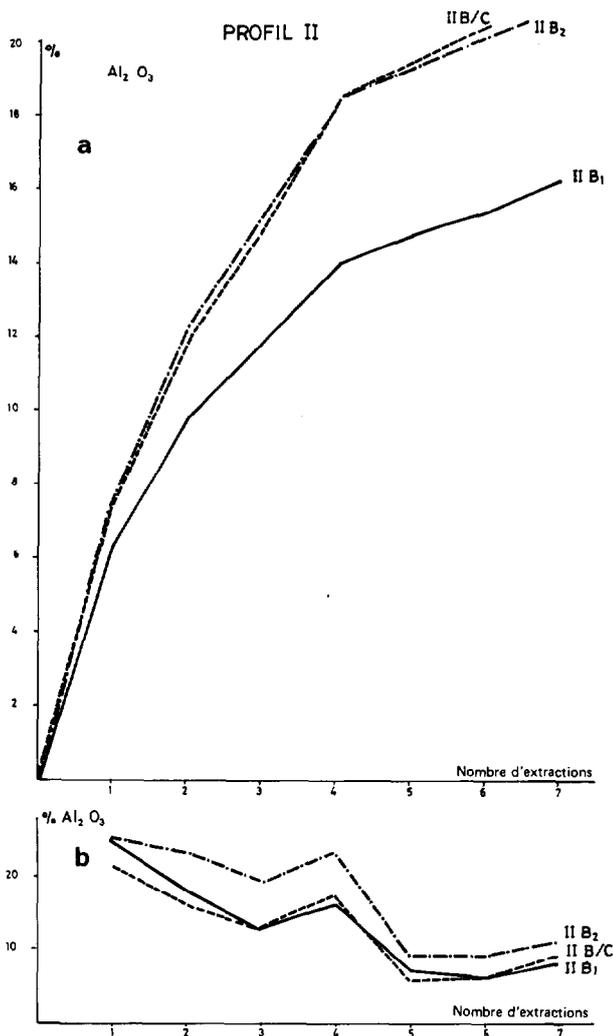


FIG. 6. — Profil II

a : Courbes cumulatives de dissolution de l'aluminium ; b :
 Courbes de vitesse de dissolution de l'aluminium.

d'hématite et de goéthite apparaissent dans les horizons *A* et *B* principalement.

Une raie à 14 Å apparaît clairement dans les horizons *A* et *B*, et devient plus nette quand on oriente l'échantillon dans les agrégats magnésiques. Il s'agit de minéraux montmorillonitiques. Cette raie est assez importante dans l'horizon *A*, faible dans l'horizon *B*, et sa présence est peu nette dans les autres horizons.

Quand on chauffe les agrégats orientés des horizons superficiels à 500°, il reste un petit effet autour de 14 Å, qui indique des traces de chlorite. De même, tout au long du profil, on remarque de petites quantités de minéraux interstratifiés.

L'illite, le quartz et le feldspath potassique apparaissent en très petite quantité dans tout le profil.

Profil II

La métahalloysite est aussi abondante dans ce profil. La gibbsite se trouve en quantités plus importantes, surtout dans l'horizon II *B/C* où elle domine. On observe des traces de quartz dans les horizons II *B*₁ et II *B*₂ (fig. 12).

Profil III

Le sol ferrallitique profond et le sol andique de surface présentent une composition minéralogique semblable (fig. 13 et 14).

La gibbsite qui domine nettement dans l'horizon II *B*, est aussi très bien représentée dans l'horizon *A* et dans l'horizon *B*, bien qu'en plus petite proportion dans ce dernier horizon.

L'halloysite apparaît également dans tout le profil, spécialement dans l'horizon *B*. Nous devons remarquer qu'elle se trouve sous forme hydratée, (en chauffant l'échantillon à 110°, la raie à 10 Å passe à 7,3 Å). Dans cet horizon nous avons observé des très petites kaolinites au microscope électronique.

On observe une raie à 14 Å qui correspond en partie à la présence de montmorillonite et en partie à de l'imogolite, observée au microscope électronique, dans l'horizon *A*.

Nous avons trouvé également des traces d'hématite et des petites quantités de quartz dans les trois horizons, et des feldspaths seulement en surface.

3. INTERPRÉTATION

Ces sols présentent en profondeur des caractéristiques physico-chimiques qui correspondent à des altérations minérales très évoluées, ainsi que des caractéristiques minéralogiques particulières, concernant les minéraux primaires et les produits d'altération.

La morphologie de ces profils, tant dans les horizons *B* que dans les horizons *C*, notamment la structure

PROFIL II

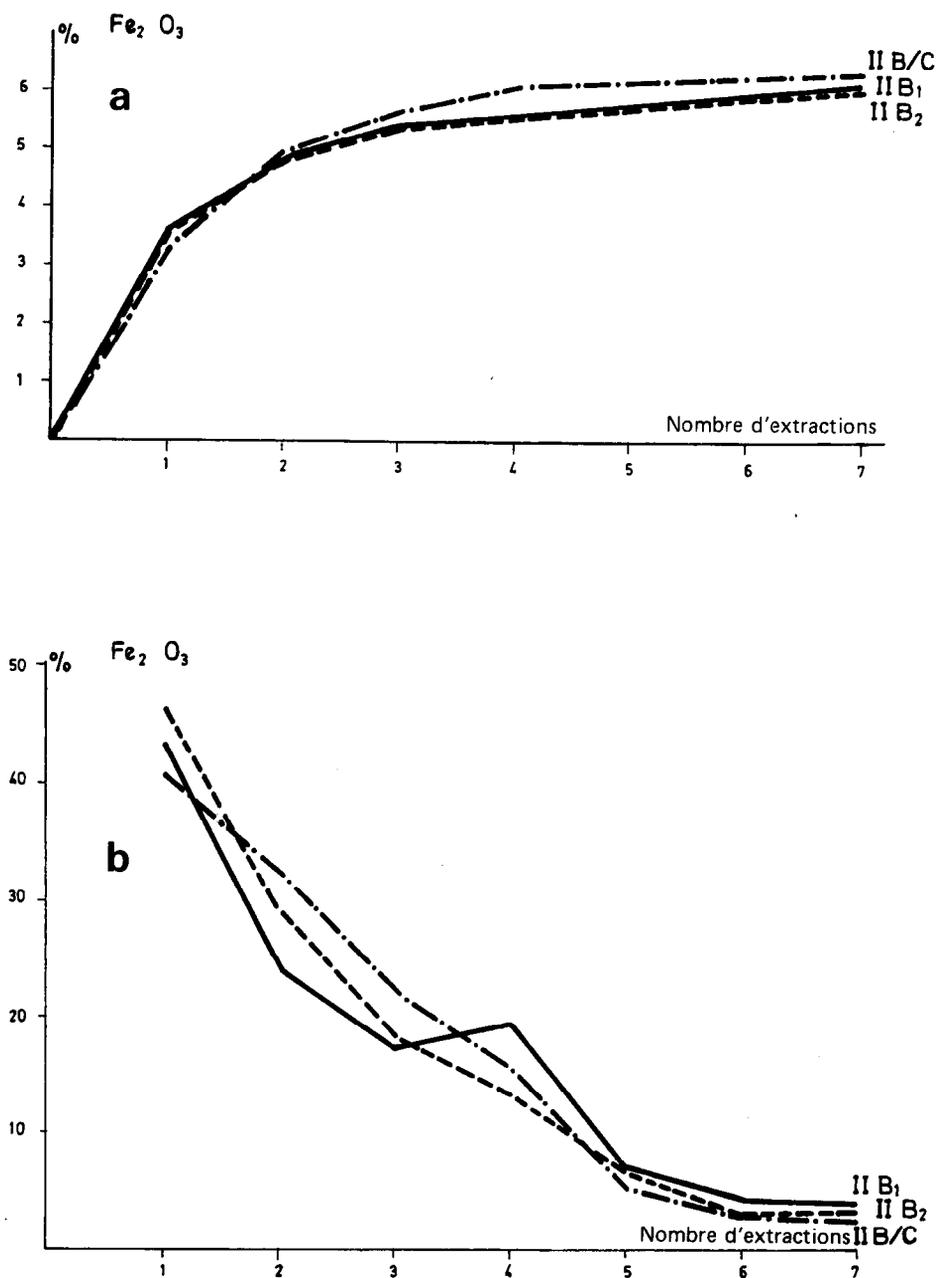


FIG. 7. — Profil II

a : Courbes de dissolution du fer ; b : Courbes de vitesse de dissolution du fer.

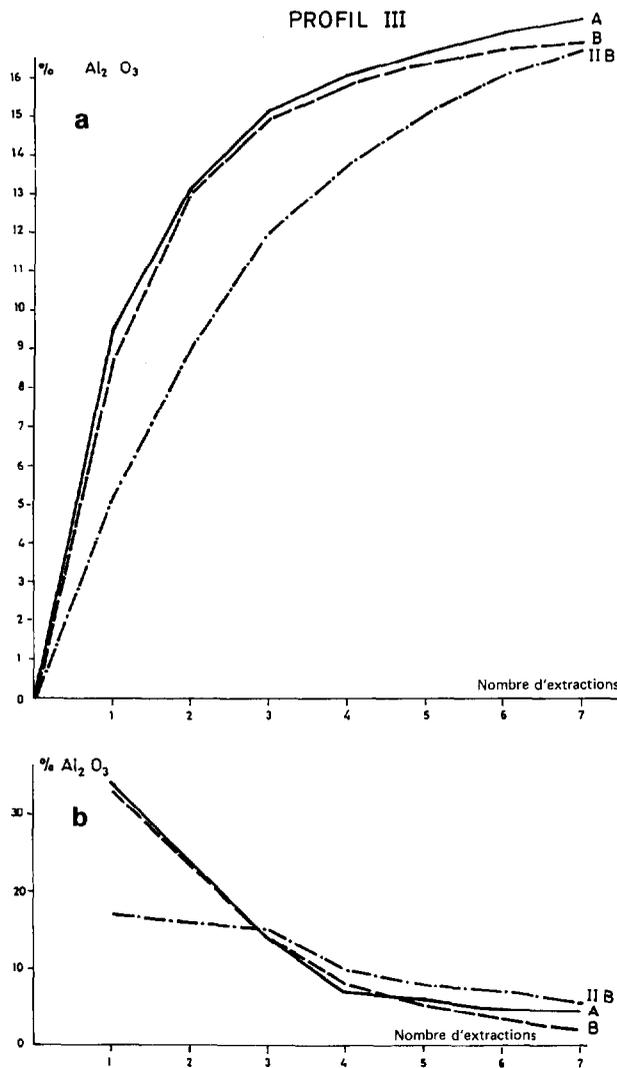


FIG. 8. — Profil III

a : Courbes cumulatives de dissolution de l'aluminium; b :
 Courbes de vitesse de dissolution de l'aluminium.

(relativement fine, de type polyédrique moyenne), la grande friabilité, et la faible densité apparente, est caractéristique des sols ferrallitiques.

Les teneurs en matière organique sont basses, et il y a une prédominance des acides fulviques sur les acides humiques; ce qui est comparable à une humification en milieu tropical humide.

La capacité d'échange dans tous les cas, et surtout les profils I et II, est très influencée par les argiles halloysitiques, ce qui fait que ses valeurs sont supérieures à celles observées normalement dans les sols ferrallitiques kaolinitiques; la présence possible de minéraux 2/1 et d'un peu d'allophane influent aussi sur ces valeurs.

On a calculé la valeur Δ de la capacité d'échange de quelques profils; elle oscille entre 10,2 me/100 g et 14,0 me/100 g. Ces résultats les distinguent fortement des andosols, où nous avons observé des valeurs de 42 me/100 g environ.

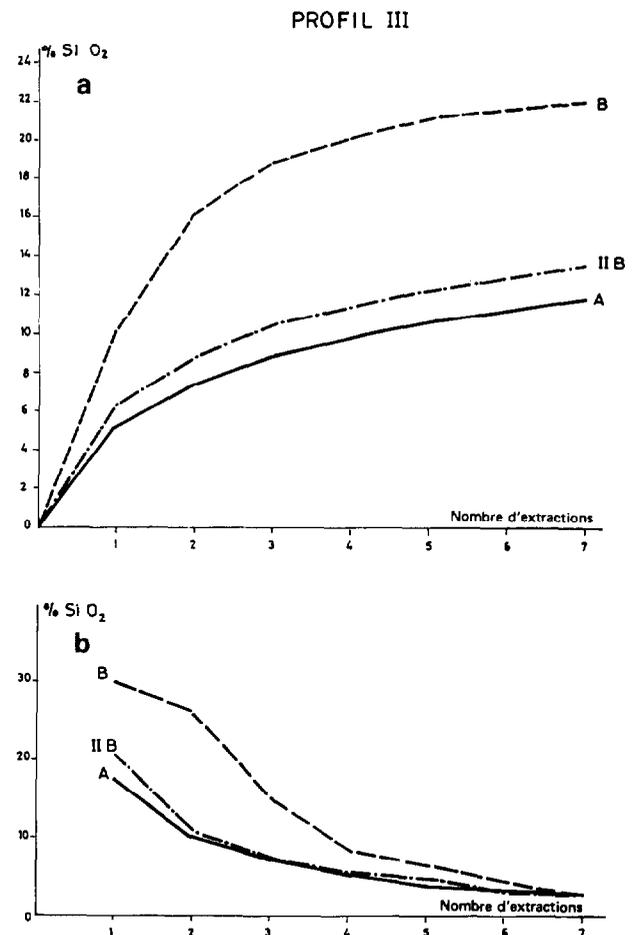


FIG. 9. — Profil III

a : Courbes cumulatives de dissolution du silicium; b : Courbes
 de vitesse de dissolution du silicium.

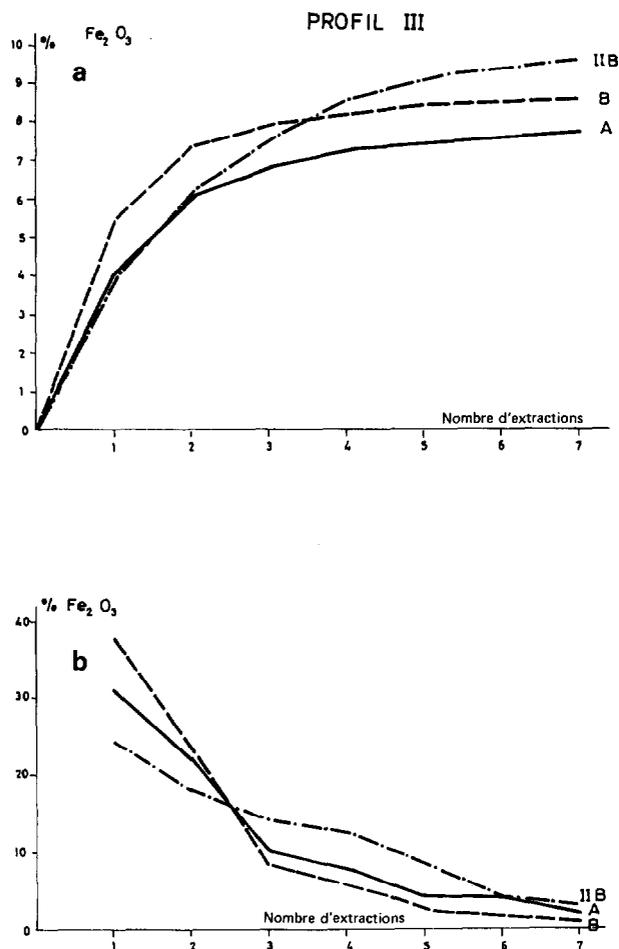


FIG. 10. — Profil III

a : Courbes cumulatives de dissolution du fer ; b : Courbes de vitesse de dissolution du fer.

Dans les horizons *B*, la somme des bases est relativement faible, ce qui correspond à des sols ferrallitiques moyennement désaturés dans l'horizon *B*, pour la classification pédologique (C.P.C.S., 1967).

Les pH sont acides dans la totalité des horizons. La différence entre les pH dans H₂O et dans KCl est en général supérieure à 1 ; ce qui indique la présence de minéraux argileux en quantités importantes.

Les rapports molaires SiO₂/Al₂O₃ sont relativement bas, les valeurs étant inférieures ou voisines de 2, dans les profils II et III. Dans les horizons II B/C et II B, ces rapports sont nettement inférieurs à 2 (1,2 et

1,7) en raison de la présence importante de gibbsite. Ces valeurs caractérisent des sols ferrallitiques. Dans le profil I les valeurs sont proches de 2 dans l'horizon II B, qui correspond à la partie la plus évoluée du profil ; dans la partie superficielle, elles sont plus élevées en raison de la présence de minéraux primaires, d'un peu d'allophane et de montmorillonite, ce qui est en accord avec un rajeunissement superficiel et fait que nous pouvons considérer ce profil comme un sol « pénévolué ».

Les bases ont été éliminées en grande proportion, comme on peut l'observer en comparant l'analyse totale de ces sols à la composition du matériau d'origine.

La présence de minéraux primaires est très réduite et ils sont pratiquement altérés dans leur totalité ; on les observe particulièrement dans les horizons superficiels rajeunis. Les minéraux prédominants sont des oxydes et des hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des minéraux argileux de type halloysitique.

Cependant nous devons remarquer une continuité dans la genèse des minéraux secondaires entre le sol ferrallitique et les formations plus récentes, de type andique, qui le recouvrent. Un bon exemple est le profil III, où on observe déjà dans le sol andique de surface une individualisation importante de gibbsite et une altération intense des minéraux primaires.

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques que nous avons mentionnées, considérées dans leur ensemble, sont cohérentes avec un processus de ferrallitisation. Cependant ces sols présentent certaines caractéristiques qui les différencient des sols ferrallitiques classiques, à savoir la complexité des profils, une capacité d'échange plus élevée, une certaine teneur en minéraux primaires, la présence d'un peu d'allophane et d'hydroxydes de fer mal cristallisés. Ce qui nous fait penser à un passage des andosols aux sols ferrallitiques.

Si nous tenons compte du fait que la formation des sols ferrallitiques exige une période relativement longue, il est évident que ces sols, qui se trouvent dans un état d'altération très avancé, ont connu pendant leur processus d'évolution différents types de climats et probablement des conditions climatiques plus tropicales et humides qu'actuellement, conditions qui ont pu intensifier et accélérer leur évolution à des moments déterminés.

D'autre part, nous devons remarquer aussi que, durant les longues périodes nécessaires à la formation

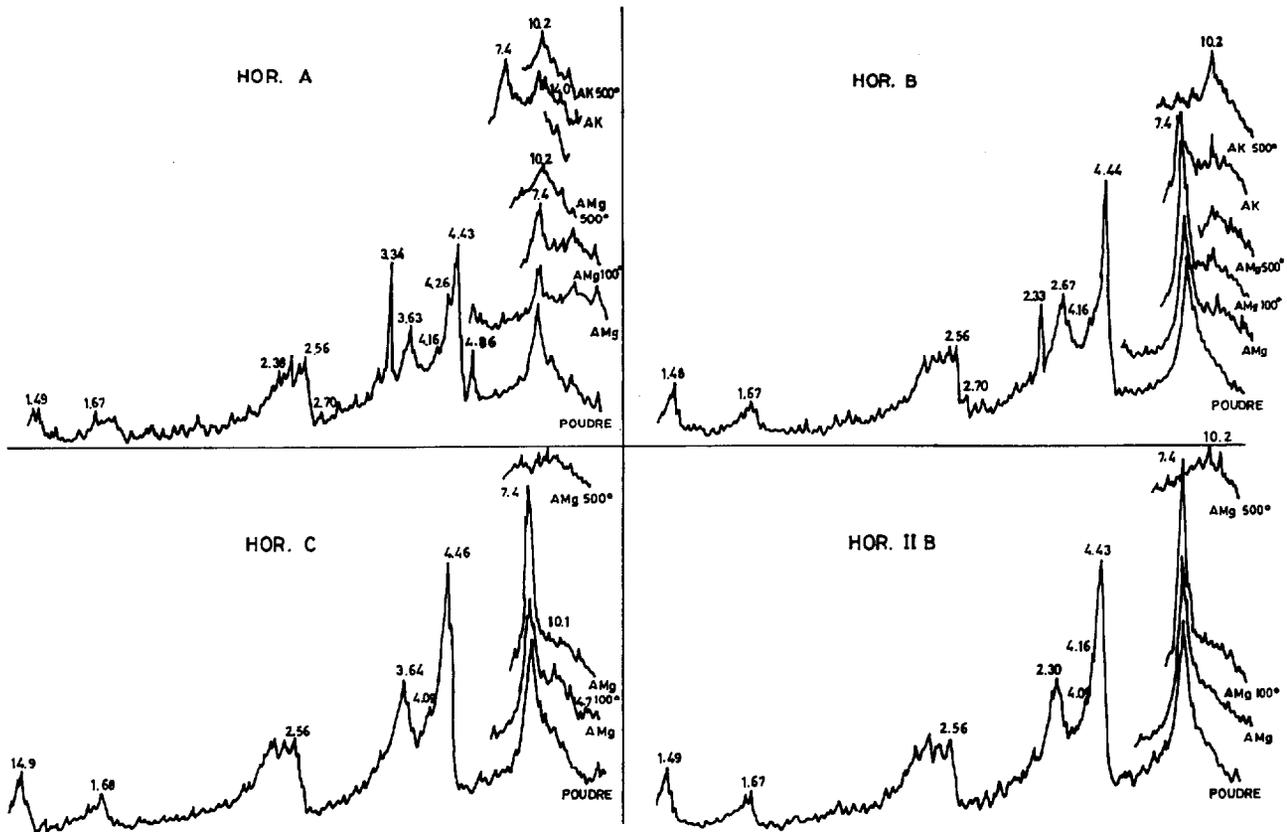


FIG. 11. — Profil I

Diagrammes de rayons X. Sol total (poudre) et argiles (AK, AMg) (Co, K α)

de ces sols, se sont produites différentes éruptions volcaniques qui ont fossilisé les profils ferrallitiques. C'est la raison pour laquelle, comme nous l'avions indiqué antérieurement, ces sols ne s'observent pas actuellement d'une façon continue, mais seulement dans les zones les mieux conservées des régions géologiques anciennes et partiellement érodées.

Les sols ferrallitiques étant recouverts de sols andiques en surface, cela indique qu'il s'agit probablement de sols anciens formés au cours du Pléistocène ; mais nous pensons cependant que ce processus se poursuit actuellement dans les andosols, d'une manière discrète.

4. CLASSIFICATION

4.1. Classification française

La morphologie du profil, (à structure polyédrique fine ou moyenne, friable, et à faible densité apparente), l'altération très intense des minéraux primaires, l'élimination d'une grande partie des bases et de la silice, la présence prédominante de minéraux argileux de type 1 : 1 (métahalloysite), d'oxydes et hydroxydes de fer (goéthite, hématite) et d'aluminium (gibbsite), nous font classer ces sols dans :

Classe : « Sols ferrallitiques ».

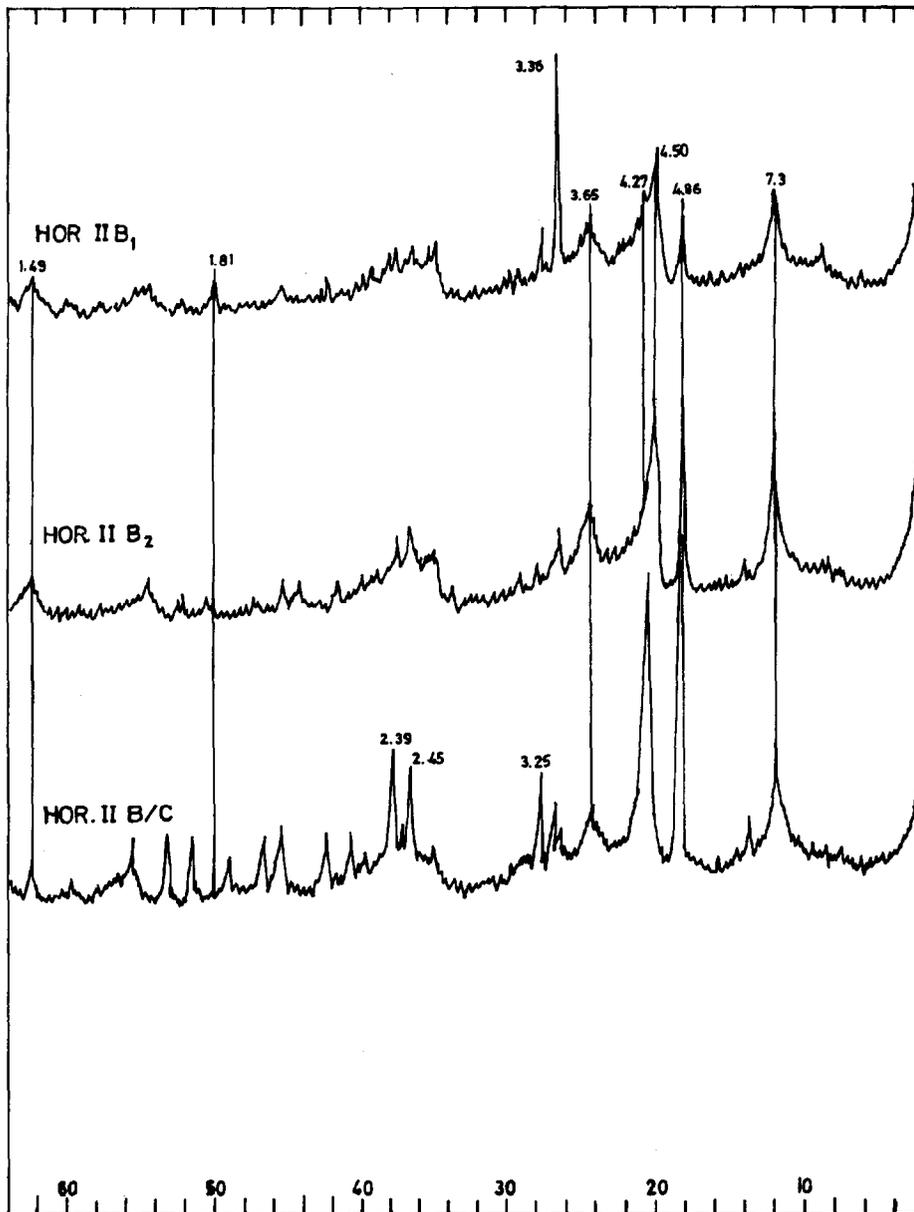


FIG. 12. — Profil II

Diagrammes de rayons X. Sol total (poudre) (Co, K α)

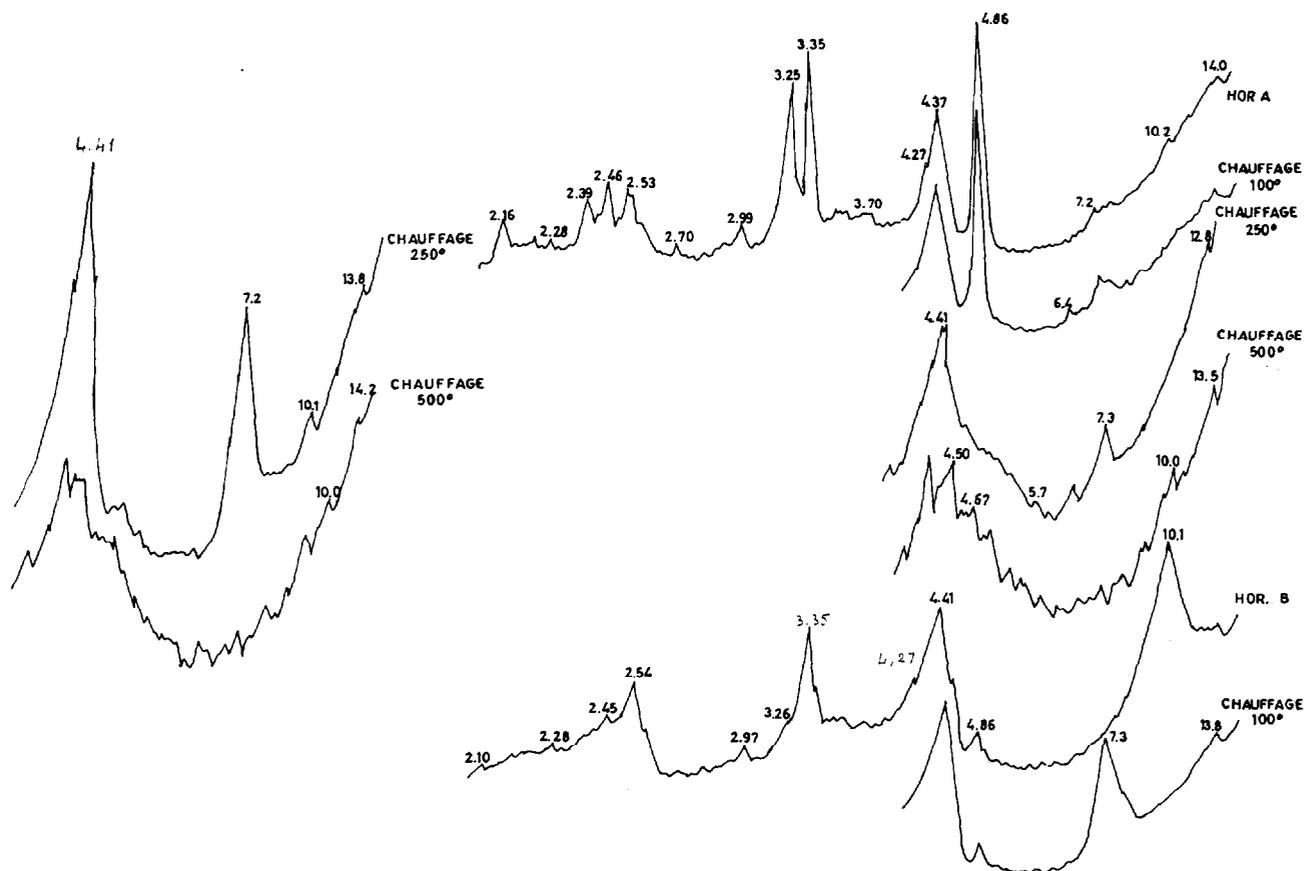


FIG. 13. — Profil III
Diagrammes de rayons X. Sol total (poudre) (Co, K α)

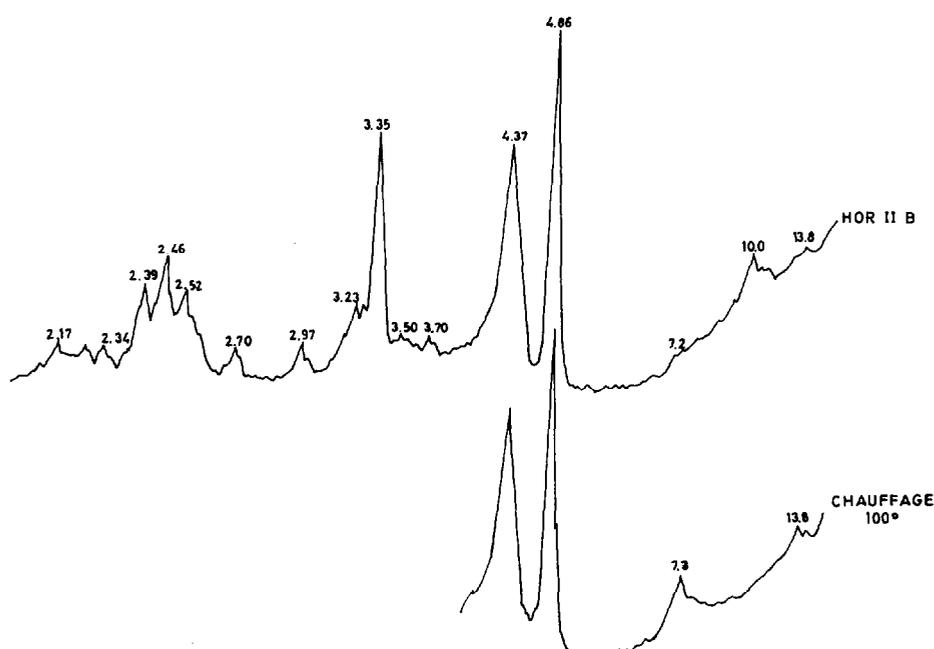


FIG. 14. — Profil III
Diagrammes de rayons X. Sol total (poudre) (Co, K α)

Profil I et III

Sous-classe : « Sols ferrallitiques moyennement désaturés en (B) ». Ils sont à la limite de la sous-classe « faiblement désaturés en (B) ».

Groupe :

Profil I : « Sols ferrallitiques moyennement désaturés, rajeunis et pénévolués ».

Profil III : « Sols ferrallitiques moyennement désaturés, rajeunis ».

Sous-groupe : « Avec érosion et apport éolien volcanique, à caractère andique superficiel peu développé ».

Profil II

Sous-classe : « Sols ferrallitiques fortement désaturés en (B) ».

Groupe : « Sols ferrallitiques fortement désaturés, humifères, rajeunis ».

Sous-groupe : « Avec érosion et apport éolien volcanique, à caractère andique superficiel bien développé ».

4.2. Classification américaine

La présence d'halloysite et de petites quantités d'alophaane, qui élèvent la capacité d'échange à plus de 16 me/100 g, rend difficile la classification de ces profils dans les Oxisols. Cependant, ils présentent, comme nous l'avons indiqué antérieurement, les caractéristiques de ces sols : un état élevé d'altération, laissant uniquement des petites quantités de minéraux primaires très résistants, comme le quartz et la sanidine ; un intense lessivage des bases ; une teneur en argile élevée, etc. Ces caractéristiques, jointes à une capacité d'échange dépendant faiblement du pH, et à une dominance d'argiles 1:1, les distinguent nettement des andosols.

Si l'on admettait l'augmentation de la capacité d'échange des Oxisols dans le cas des sols riches en halloysite, à des valeurs voisines de la capacité d'échange de cette argile (25-30 me/100 g), on pourrait classer ces sols dans l'ordre des Oxisols.

Ordre : « Oxisols »

Profil I

Tenant compte des conditions climatiques actuellement plus sèches de ce profil nous le classerions :

Sous-ordre : « Orthox »

Grand-groupe : « Eutroorthox »

Sous-groupe : « Andic Tropeptic Eutroorthox »

Profil II

Sous-groupe : « Humox »

Grand-groupe : « Gibbsihumox »

Sous-groupe : « Andeptic Gibbsihumox »

Profil III

Sous-groupe : « Humox »

Grand-groupe : « Sombrihumox »

Sous-groupe : « Andeptic Sombrihumox »

Mais, dans l'actuelle classification américaine, ces sols seraient à classer de la manière suivante :

Profil I

Ordre : « Inceptisols »

Sous-ordre : « Ochrepts »

Grand-groupe : « Dystrochrepts »

Sous-groupe : « Andic Dystrochrepts »

Profil II et III

Ordre : « Ultisols »

Profil II

Sous-ordre : « Humults »

Grand-groupe : « Palehumults »

Sous-groupe : « Andic Orthoxic Palehumults »

Profil III

Sous-ordre : « Udults »

Grand-groupe : « Paleudults »

Sous-groupe : « Andeptic Paleudults »

CONCLUSION

Les sols des Iles Canaries formés sur des roches basaltiques plio-pléistocènes, dans la zone climatique perhumide, ont posé des problèmes d'identification aux premiers investigateurs, plutôt accoutumés aux pays tempérés et méditerranéens. Il s'agit en effet de sols fréquemment complexes et rajeunis, qui comportent un andosol à la partie supérieure du profil et une altération plus ancienne à la base. De plus ces sols complexes, sur des basaltes plio-pléistocènes, sont souvent juxtaposés à de vrais andosols sur des produits volcaniques plus récents. Fallait-il en déduire

que la formation des andosols est le processus prédominant dans cette région, en raison de conditions climatiques perhumides ? Cependant, nous avons pu montrer des analogies entre les caractéristiques des altérations anciennes des basaltes canariens et celles des sols ferrallitiques. Certaines sont morphologiques : couleur rougeâtre, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique fine et friable, etc. ; d'autres sont chimiques : sensible désaturation en bases du complexe d'échange, rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ dans la fraction argileuse ; et d'autres enfin minéralogiques : halloysite-kaolinite, goethite-hématite, gibbsite, peu de minéraux primaires altérables résiduels.

Les sols ferrallitiques étant habituellement observés sous des climats tropicaux humides, nous pensons qu'aux Iles Canaries ces altérations ferrallitiques anciennes se seraient formées dans des conditions climatiques antérieures, plus chaudes et plus pluvieuses qu'actuellement. En effet, les sols les plus récents ou

superficiels sont des Andosols ou des sols Bruns-andiques. Cependant, parce que de la gibbsite apparaît aussi en petite quantité dans les andosols de la même région, il est probable que la ferrallitisation s'y poursuit encore, mais d'une manière discrète.

Les paléosols sur basaltes plio-pléistocènes de la région perhumide des Iles Canaries peuvent donc être apparentés à des sols ferrallitiques, moyennement ou fortement désaturés. Certains sont pénévolués et faiblement rajeunis par des cendres volcaniques ; ils présentent un horizon humifère et andique peu développé. D'autres sont plus évolués, et sont cependant en même temps humifères et fortement rajeunis par des cendres ; ils montrent un horizon humifère et andique très développé, qui accuse nettement le caractère complexe du profil.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 30 mars 1978

BIBLIOGRAPHIE

- ARDEL MONEM, WATKINS (S.D.), GAST (P.W.), 1972. — Potassium-Argon ages, volcanic stratigraphy and geomagnetic polarity history of Canary Islands : Tenerife, La Palma and Hierro. *Amer. Journal of Soil Sci.*, Vol. 272 : 805-825.
- ALEIXANDRE (T.), PINILLA (A.), 1968. — Algunas modificaciones en las técnicas aplicadas al estudio de las fracciones gruesas o arenas. *Anales de Edaf. y Agrob.*, Tomo XXVIII : 812-821.
- AOMINE (S.), JACKSON (M.L.), 1959. — Allophane détermination in Andosols by Cation Exchange Capacity Δ value. *Soil Sci Soc. Amer. Proc.*, 23 : 210-214.
- CABEZAS VIANO (O.), 1975. — Estudio mineralógico (fracción $< 2\mu$) de los Andosoles de las Islas Canarias. Thesis doctoral, Univ. La Laguna, Tenerife.
- CEBALLOS (L.), ORTUÑO (F.), 1951. — Vegetación y flora forestal de las Canarias Occidentales. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, 465 p. Madrid.
- C.P.C.S., 1967. — Classification des sols. Note E.N.S.A. Grignon, *multigr.* 87 p., inédit.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1975. — III. Intergrados Andosol-Tierra Parda Oligotrofica ; Características físicas. *Anales de Edaf. y Agrob.*, Tomo XXXIV, n° 3-4.
- KAMMER (F.), 1972. — Ergänzungen zu O. Eriksson Check-list of vascular plants of the Canary Islands. *Cuad. Bot. Canar.*, 16 : 47-49.
- KUNKEL (G.), 1976. — Biogeography and ecology in the Canary Islands. Dr. W. Junk b.v. Publishers the Hague. 511 p.
- LAMOUREUX (M.), QUANTIN (P.), 1973. — Utilisation des courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de Ségalen. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XI, n° 1 : 3-14.
- PEREZ MATEOS (J.), 1965. — Analisis mineralógico de arenas. *Manuales de Ciencia Actual*, n° 1, C.S.I.C., Madrid.
- QUANTIN (P.), 1974. — Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical : évolution de la pédogenèse initiale en milieu bien drainé, sur roches volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 13-46.
- QUANTIN (P.), 1975. — Observations sur les sols de Ténérife, Lanzarote et La Palma. *Rapport multigr.* ORSTOM Services Scientifiques Centraux, Bondy (inédit).
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ-CALDAS (E.) *et al.*, 1975. — Problème du rajeunissement des sols issus de l'altération de roches volcaniques, par des éruptions récentes de cendres, aux Nouvelles-Hébrides et aux îles Canaries. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, n° 426 : 211-217.
- QUANTIN (P.), TEJEDOR-SALGUERO (M.L.), 1976. — Séquence chronologique et climatique de sols dérivés de roches volcaniques aux îles Canaries. *Commun. Ass. Fr. Et. Sols*, 2-12-1976, inédit.
- RICHARDS (L.A.), 1954. — Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *Agricultural Handbook*, n° 60, p. 100, USDA.
- RODRIGUEZ PASCUAL (C.), QUANTIN (P.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1975. — Andosoles Canarios. IV. Intergrados Andosol-Tierra Parda Oligotrofica. Característica mineralógicas. Interpretación y clasificación. *Anales de Edafol. y Agrob.*, Tomo XXXIV, n° 3-4.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1975. — Andosoles Canarios. II. Intergrados Andosol-Tierra Parda Oligotrofica. Características morfológicas y químicas. *Anales de Edaf. y Agrob.* Tomo XXXIV, n° 3-4.
- U.S.D.A., 1975. — Soil Taxonomy. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture. *Agriculture Handbook* N° 436.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962. — Imogolite in some Andosols. *Soil Sci. Plant. Nutrit.* 8,3 : 114-121.