Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries)

2e partie : Caractéristiques minéralogiques. Interprétation et classification (1)

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

*Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, 70 Route d'Aulnay, 93140 Bondy

**Centro de Edafologia y Biologia Aplicada de Tenerife. Espagne

PLAN

2e partie

INTRODUCTION

1. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES
   - 1.1. Méthodes analytiques
   - 1.2. Produits amorphes
   - 1.3. Pétrographie des sables
   - 1.4. Minéralogie du sol, (diffraction de rayons X et microscopie électronique).
2. CARACTÉRISTIQUES MICROMORPHOLOGIQUES
3. TYPOLOGIE ET CLASSIFICATION
   - 3.1. Andosols désaturés
   - 3.2. Sol Brun de transition
   - 3.3. Sols Bruns eutrophes
4. CONCLUSION, évolution de la séquence pédo-climatique récente

BIBLIOGRAPHIE

(1) La 1re partie de cet article est parue *in Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 3, 1978.

INTRODUCTION

Dans la première partie de cette étude (Tejedor Salguero, Fernandez Caldas, Quantin, *op. cit.*), nous avons étudié les caractéristiques écologiques de la région Nord de l'Ile de Ténérife et nous avons défini les sols correspondants à la climatoséquence que l'on observe dans cette région.

Puis, dans un premier temps, nous avons traité seulement des sols formés sur des matériaux volcaniques récents. Nous avons montré l'évolution des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques de ces sols dans la partie moyenne de la séquence.

Dans cette deuxième partie, nous traiterons des caractéristiques minéralogiques des mêmes sols, en insistant sur l'étude des produits amorphes et des minéraux primaires, et sur l'analyse des substances minérales secondaires réalisée par diffraction de rayons X et observation au microscope électronique. Nous ferons également quelques remarques sur les caractéristiques micromorphologiques. Enfin, nous donnerons une interprétation générale de l'évolution de la pédogenèse dans la séquence et proposerons une classification des principaux sols.

1. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

1.1. Méthodes analytiques

La quantité des éléments amorphes a été déterminée par la méthode de Segalen (1968).

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

Les constituants minéraux cristallisés ont été déterminés par diffraction de rayons X, sur la poudre de sol total, et soumis à des traitements à différentes températures (Brown, 1961).

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.

1.2. Produits « amorphes » (fig. 1, 2 et 3)

a) L'extraction des produits amorphes a été réalisée selon la méthode de Segalen (1968). Les résultats sont représentés par des courbes cumulatives en pour cent de SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 extraits, en fonction du nombre d'extractions.

Sur les figures 1 et 2 représentant la dissolution de SiO_2 et de Al_2O_3, on observe deux types de courbes :

— celles dont le changement de pente est rapide et net, correspondant aux profils d'andosols (Las Aves, Dos Cupresos) et à l'horizon A du profil « Transición » ; elles indiquent nettement la part de produits « amorphes », qui ont été très rapidement dissous ;

— celles qui présentent un changement de pente progressivement décroissant, correspondant aux sols bruns eutrophes (Dos Postes, Birmagen) et aux horizons $(B)_1$, $(B)_2$ du profil « Transición » ; l'estimation de la part des produits « amorphes », ici mêlés à des substances crypto-cristallines ou finement cristallisées et facilement solubles, y est plus difficile (Lamouroux, Quantin, 1973).

L'interprétation de ces résultats est la suivante :

— Dans les andosols et l'horizon A du profil « Transición », on a extrait une quantité importante d'éléments amorphes, dont 7,6 à 19,8 % d'Al_2O_3, et 5 à 11,2 % de SiO_2. Ces produits ont été dissous très rapidement, en un ou deux traitements seulement. Nous remarquerons en outre que la silice « amorphe » qui provient des horizons (B) et II (B) des andosols contenant de l'imogolite, est soluble dans la phase acide (HCl - 8 N) ; tandis que la silice est extraite par voie alcaline (NaOH - 0,5 N) dans les autres horizons d'andosols, à allophane. On note aussi l'accroissement des produits amorphes dissous, de l'horizon A vers l'horizon (B) ou II (B), qui est relativement plus évolué.

— Dans les sols bruns, la dissolution est plus progressive, indiquant la prédominance de phyllosilicates cristallisés, dont certains, comme l'halloysite fine, sont bien connus pour être facilement solubles. La courbe sigmoïdale de la silice est caractéristique d'une dissolution d'argile ferrifère (Quantin, Lamouroux, 1974). Ces sols ne contiennent effectivement que très peu de silicates « amorphes ».

— Les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$ du sol de transition montrent un cas intermédiaire, où l'on a une prédominance d'argiles fines et facilement solubles (halloysite), en mélange avec un peu d'allophane.

On observe donc une nette évolution des courbes de dissolution d'alumine et de silice, montrant l'abondance des alumino-silicates amorphes dans les andosols et leur quasi-disparition dans les sols bruns.

Par contre, les courbes de dissolution des oxydes de fer (fig. 3) ne font pas apparaître une évolution aussi évidente. Presque toutes les courbes (sauf C de Birmagen) mettent en évidence une quantité relativement importante (3 à 8 %) de Fe_2O_3 facilement dissous, que l'on pourrait considérer comme « amorphe ». Mais elles montrent également une part aussi importante d'oxyde de fer plus progressivement soluble, que l'on peut estimer comme cryptocristallin ou finement cristallisé (goethite, hématite et magnétite fines).

b) Nous avons aussi soumis les échantillons d'un andosol (Las Aves) à une extraction répétée par HCl - 2 N seul, selon la méthode préconisée par l'un de nous (Quantin, 1975), afin de mieux distinguer les produits amorphes et les substances finement cristallisées*. En comparant les résultats avec ceux de la méthode précédente, nous constatons les différences suivantes : la forme des courbes de dissolution de SiO_2 et Al_2O_3 reste semblable, mais

* Nous rendrons compte en détail de cette analyse dans une publication ultérieure.

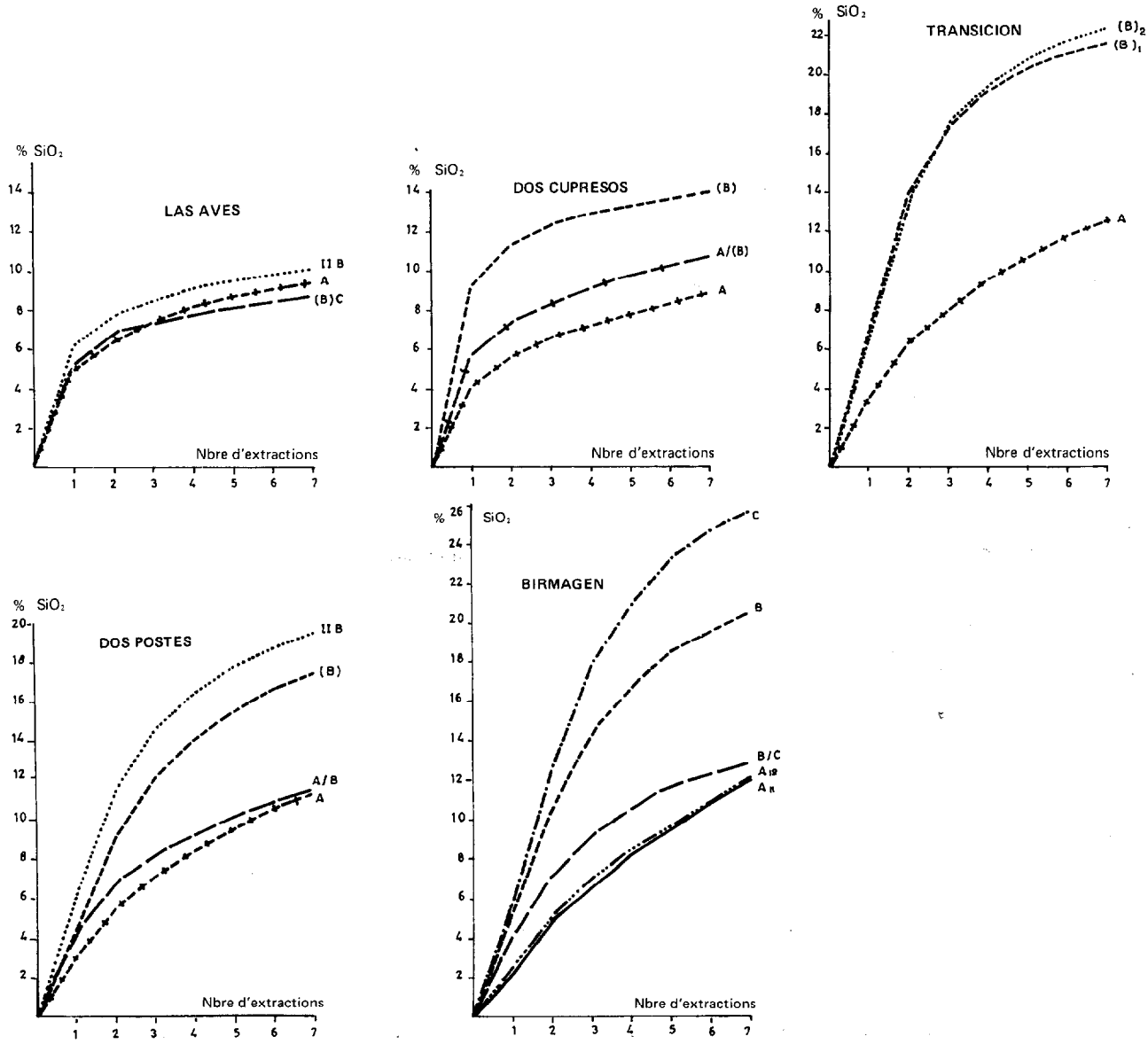

FIG. 1. — Courbes cumulatives de dissolution : SiO_2

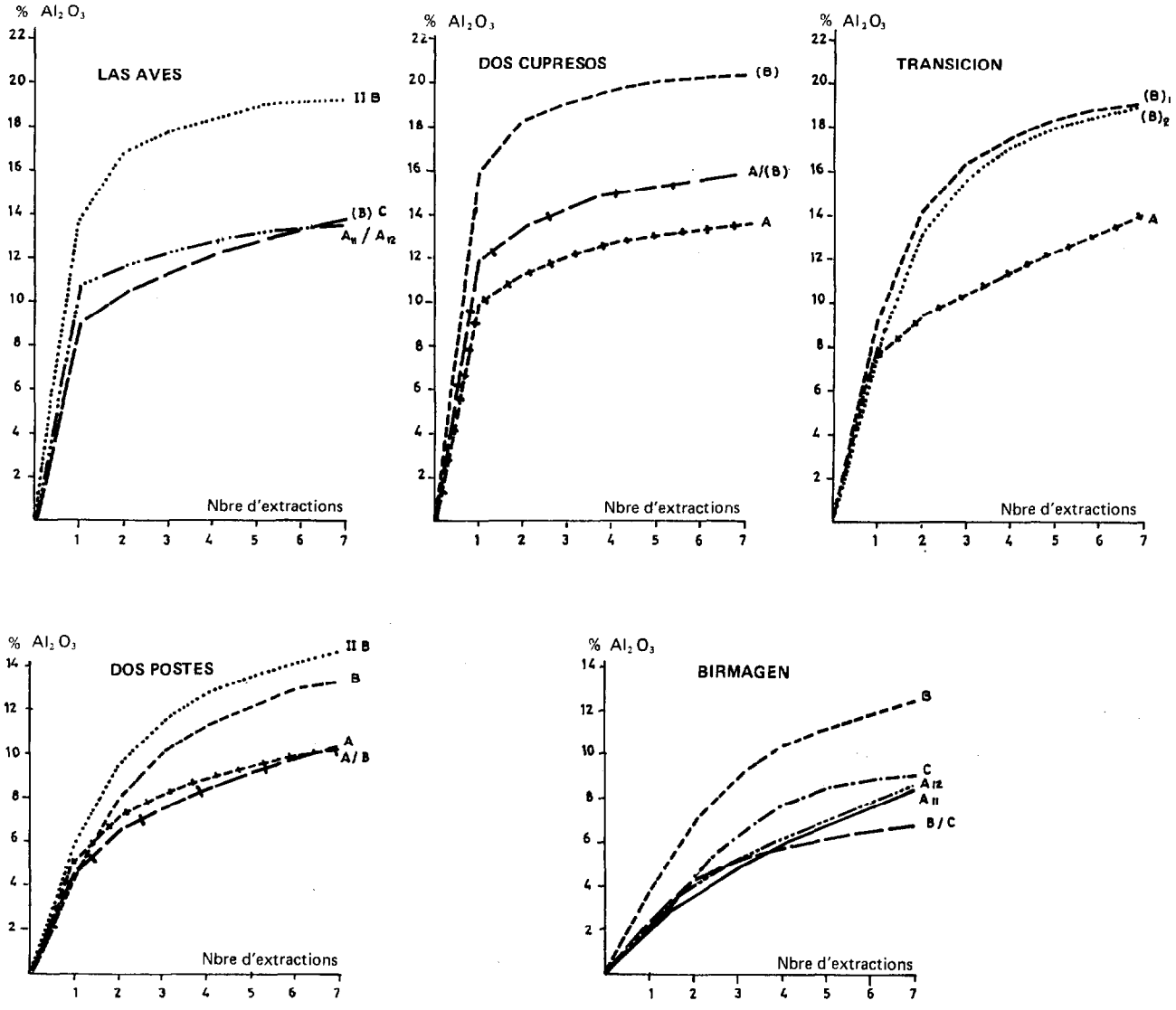

FIG. 2. — Courbes cumulatives de dissolution : Al_2O_3

le changement de pente est devenu plus net par cette nouvelle méthode (HCl 2 N) ; de plus, la quantité d'amorphes mesurée est plus petite, parce que le réactif n'extrait plus la gibbsite fine et l'imogolite comme dans le premier cas (nous l'avons vérifié par diffraction de rayons X et microscopie électronique sur le résidu). L'extraction de Fe_2O_3 demeure importante, mais la courbe de forme sigmoïdale indique la nature plutôt cryptocristalline (goethite et hématite fines) du produit dissous.

1.3. Analyse pétrographique des sables

On a étudié la composition minéralogique de la fraction sable des sols de cette séquence. Nous avons

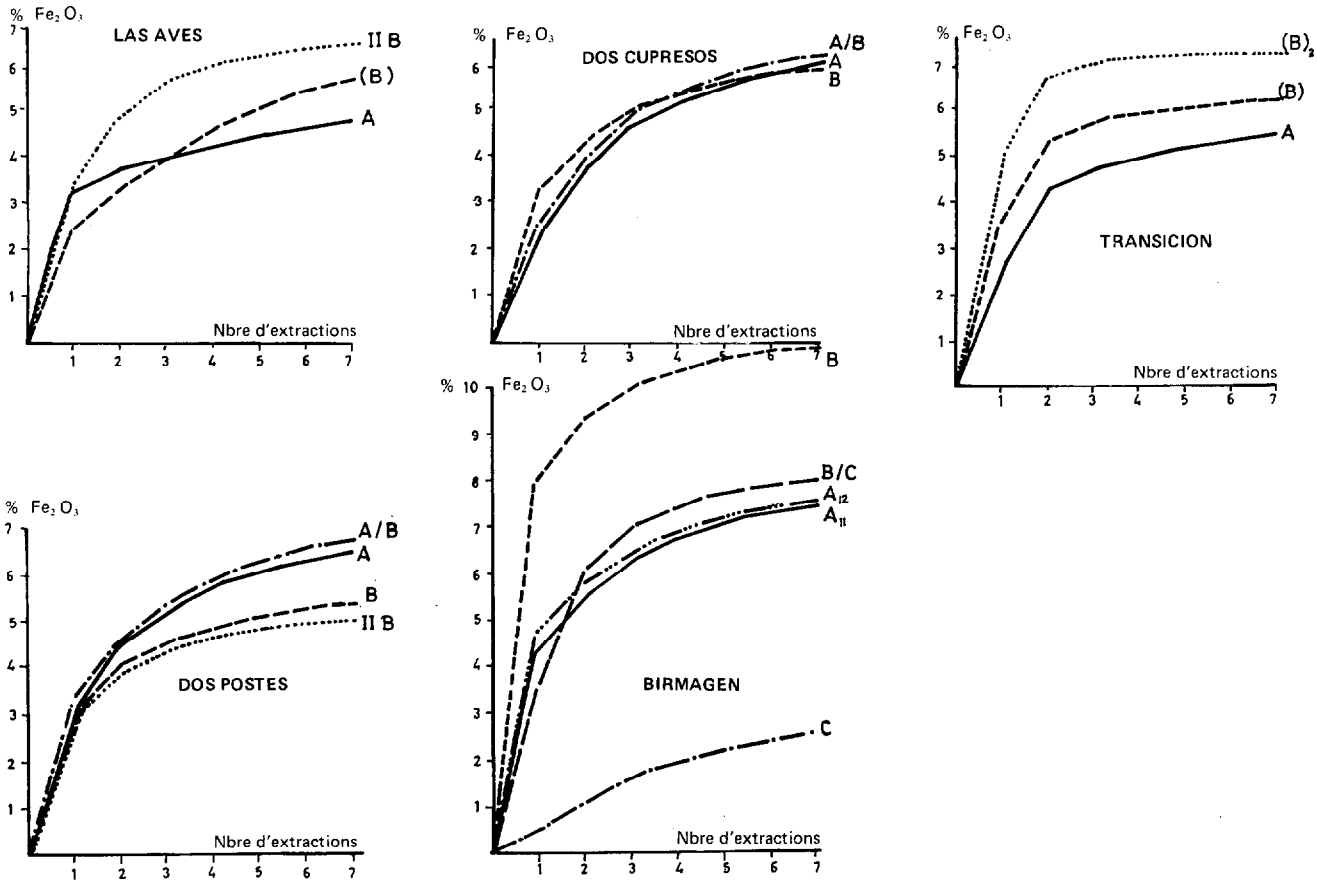

FIG. 3. — Courbes cumulatives de dissolution : Fe_2O_3

utilisé du bromoforme de densité 2,9 pour séparer la fraction légère de la fraction dense.

On a résumé les résultats dans le tableau I. Au long de la séquence, les opaques naturels prédominent sur les grains transparents, à l'exception de l'horizon C du profil Birmagen. La magnétite est le minéral principal. Parmi les minéraux ferromagnésiens, les pyroxènes (augite basaltique, et quelquefois titano-augite, aégirine et hyperstène) et les amphiboles (surtout hornblende basaltique) sont les plus importants.

Par rapport à la fraction légère, les feldspaths calcosodiques (andésine) sont plus importants que les feldspaths potassiques (sanidine).

1.4. Minéralogie du sol (diffraction de rayons X, microscopie électronique)

a) ANDOSOLS (profils Las Aves et Dos Cupresos)

Les diagrammes de rayons X de ces profils (fig. 4) montrent une grande abondance de minéraux primaires dans tous les horizons, principalement du quartz, des feldspaths, de la magnétite et des amphiboles. On n'y observe la présence d'aucune argile : dans les deux profils observés spécialement en profondeur, il y a des effets dominants entre 14 Å et 15 Å ainsi qu'à 4,50 Å. Ceci indique la présence d'une certaine organisation de phyllosilicate argileux. On pourrait penser à l'existence d'une argile du

TABLEAU I

Composition minéralogique de la fraction sable

Profil	Horizon	Fraction lourde								Fraction légère						
		Pyroxènes	Amphiboles	Olivines	Titanite	Micas	Opaques naturels	Opaques de altération	Altérites	Felds. K	Felds. Ca-Na	Felds-pathoïdes	Verres volcaniques	Grains altérés	Lames chloritiques	Micas
Las Aves	A_{11}/A_{12}	73	16	9	1	1	79	28	10	17	36	4	6	27	10	—
	(B)C	54	42	2	2	1	35	300	—	15	30	—	1	53	—	1
	IIB	29	55	11	4	1	102	4	3	22	65	—	1	—	10	2
Dos Cupresos	A	36	17	44	2	1	68	12	10	5	30	—	8	56	—	1
	A/(B)	61	17	18	4	—	145	10	11	4	20	—	8	67	—	1
	(B)	18	70	3	9	—	250	12	8	21	57	—	1	10	6	5
Transición	A	66	25	2	6	1	277	25	16	6	32	2	6	—	53	1
	$(B)_1$	25	59	5	6	5	1069	12	15	18	36	—	—	42	—	4
Dos Postes	A_1	28	53	16	2	1	180	5	10	18	30	—	1	49	—	2
	A/(B)	13	76	4	7	—	164	3	4	23	64	—	—	—	12	1
	(B)	7	63	1	28	1	529	4	8	39	42	—	—	—	17	2
	IIB	1	66	6	16	1	574	13	17	30	34	—	—	—	36	—
Birmagen	A_{11}	48	29	16	5	2	226	25	21							
	A_{12}	43	32	15	8	2	213	15	13							
	B	5	28	23	40	4	231	3	9							
	B/C	5	58	—	35	1	76	6	2							
	C	31	59	—	8	2	18	1	6							
	R	49	22	10	10	2	74	1	13							

type 2/1 ; cependant, quand on soumet l'échantillon à différentes températures, l'effet entre 14 et 17 Å disparaît sans produire de déplacement. C'est pourquoi nous l'attribuons à l'imogolite décrite par Yoshinaga et Aomine (1962) et depuis observée dans plusieurs régions volcaniques du monde (Colmet-Daage, 1970 ; Quantin, 1972 ; Besoain, 1968 ; Sieffermann, 1969). Sa proportion augmente considérablement dans les horizons profonds, (B) et II(B).

Dans le profil Las Aves, on observe dans tous les horizons des raies à 3,70 et 2,70 Å, caractéristiques d'hématite et de goethite fines. La raie vers 4,16 Å de la goethite est souvent masquée ; elle est plus évidente dans l'horizon (B) du profil dos Cupresos, de couleur brune ; tandis que l'hématite prédomine dans le sol Las Aves, de couleur rouge, surtout en surface (A_{11} - A_{12} et (B)/C).

L'individualisation de la gibbsite est très importante dans la zone profonde des deux profils et plus prononcée dans l'horizon II B du profil « Las Aves ». Elle apparaît aussi dans l'horizon de surface, mais en plus petite proportion.

L'examen au microscope électronique révèle, dans les deux profils, une grande prédominance de produits amorphes de type allophane, associés à de fines fibres anastomosées, qui apparaissent dans tous les horizons, surtout dans les horizons profonds, où elles sont très abondantes, mieux cristallisées et plus développées (fig. 5). Ces fibres ressemblent à celles que Yoshinaga et Aomine (1962) avaient appelées imogolite. La plus grande abondance d'imogolite en profondeur coïncide avec la plus grande intensité des réflexions entre 14 Å et 17 Å, que nous avons observées dans les diagrammes de rayons X.

De l'halloysite n'apparaît pas nettement dans aucun des deux profils, tandis que le profil « Dos Cupresos » a montré quelques formes de montmorillonite. Mais à travers les voiles opaques de produits amorphes, on devine quelques figures ultramicroscopiques, en tube ou en glomérule très fin, d'halloysite.

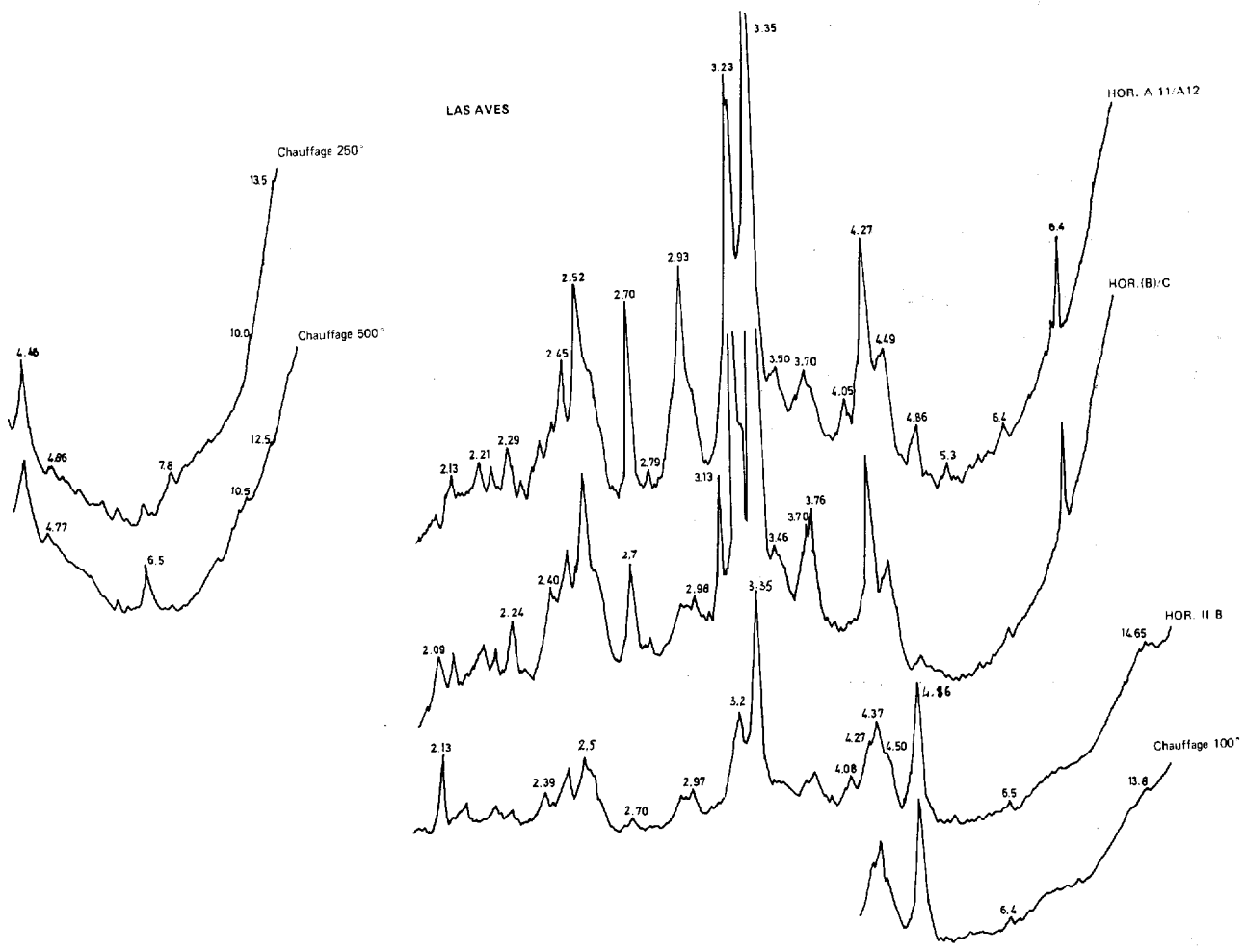

FIG. 4. — « Profil Las Aves ». Diagrammes de diffraction de rayons X (Sol total).

b) SOL BRUN ANDIQUE (Transición)

Les diagrammes de rayons X de ce profil (fig. 6), montrent une certaine différence entre l'horizon de surface et les horizons profonds ; ce qui avait déjà été indiqué en étudiant les caractéristiques physico-chimiques de ce profil.

Dans l'horizon A, les produits amorphes dominent, tandis que dans les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$ ce sont les argiles halloysitiques. Dans l'horizon A, les raies à 10 Å et 7,3 Å dans les diagrammes de poudre révèlent aussi l'existence d'une petite quantité d'halloysite hydratée et d'un peu de métahalloysite. Dans les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$ il y a une augmentation considérable de l'halloysite, qui se trouve uniquement sous sa forme hydratée. Dans tout le profil, on observe une faible raie à 14,2 Å, qui nous fait penser à la présence d'argiles 2:1, probablement de type montmorillonitique.

Une petite raie à environ 4,16 Å, principalement dans l'horizon $(B)_2$, ainsi qu'une autre à 2,70 Å, indiquent l'existence de petites quantités de goethite fine (et peut-être aussi d'hématite). La gibbsite n'est présente qu'en traces (raie à 4,86 Å) dans les horizons A et $(B)_1$.

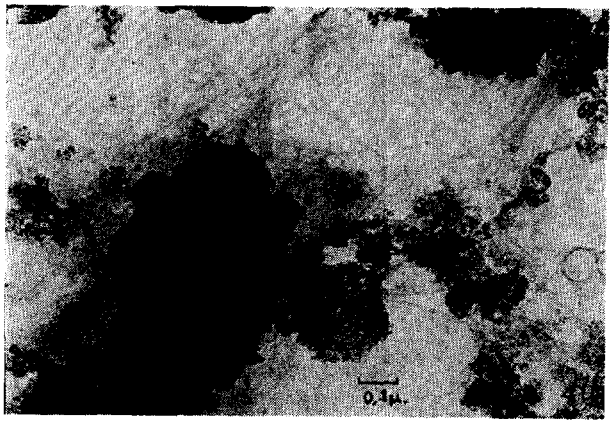

FIG. 5. — Microscopie électronique. Profil Las aves. Hor. IIB. Imogolite.

Le quartz est abondant dans les trois horizons, et il diminue dans l'horizon $(B)_2$. Les feldspaths sont aussi très bien représentés et se trouvent en proportions semblables dans tous le profil. La magnétite apparaît seulement dans les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$.

Les observations au microscope électronique confirment les résultats de la diffraction de rayons X. Il y a une prédominance des allophanes par rapport à l'halloysite dans l'horizon A. Dans les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$, on observe encore des formes allophaniques ; mais l'halloysite y est dominante. On peut indiquer que dans la fraction inférieure à 2 µ de ces horizons profonds on trouve à peu près 2/3 d'halloysite et 1/3 d'hallophane. L'halloysite apparaît principalement sous forme tubulaire ; mais on observe aussi quelques glomérules. Son degré de cristallinité augmente de façon considérable avec la profondeur. Il y a aussi quelques formes de montmorillonite dans les trois horizons. On y observe encore quelques formes de gibbsite mal cristallisée. Du quartz et des feldspaths sont fréquents. On remarque enfin dans l'horizon A des diatomées de 0,8 µ de large sur 1,5 µ de long environ.

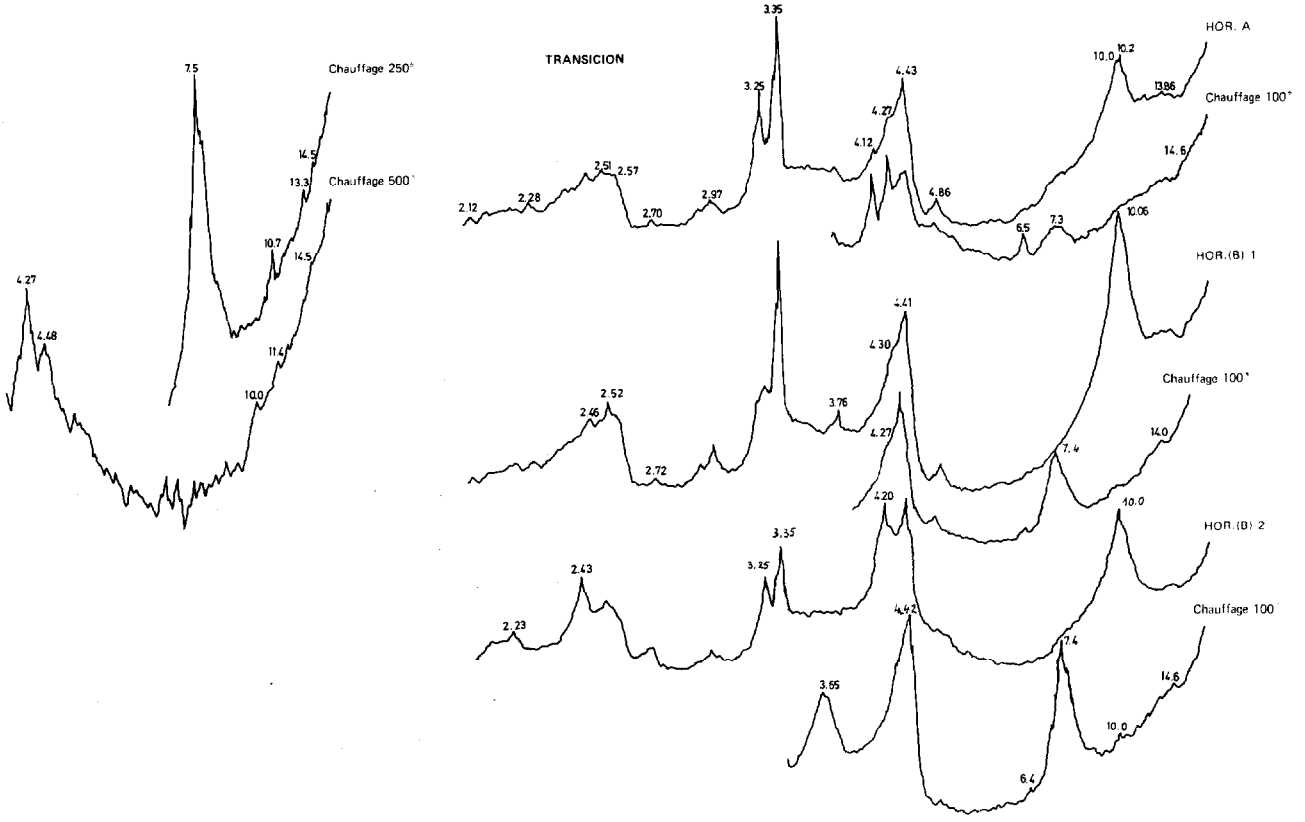

FIG. 6. — « Profil Transición ». Diagrammes de diffraction de rayons X. (Sol total).

c) SOLS BRUNS EUTROPHES

Profil « Dos Postes »

Dans ce profil, nous devons distinguer les horizons superficiels A et A/B, des horizons B et IIB : les horizons A et A/B sont formés par un mélange d'halloysite hydratée (à 10 Å) et de métahalloysite en proportion peu élevée. Dans les horizons B et IIB, le contenu en halloysite augmente considérablement ; on la trouve sous une forme hydratée. Il y a aussi dans tout le profil un peu d'illite et d'argile 2:1 à comportement d'argile interstratifiée (illite-chlorite ou illite-vermiculite). Il y a des traces de gibbsite et d'hématite, et probablement aussi de goethite dans l'horizon B.

Du quartz apparaît surtout dans les deux horizons de surface. Les feldspaths sont peu abondants dans l'horizon A et augmentent nettement dans l'horizon A/B. On observe aussi la présence de magnétite.

Profil « Birmagen » (fig. 7 et 8)

Dans ce profil, ce sont aussi les argiles halloysitiques qui prédominent. Comme dans le cas précédent, ces argiles se trouvent en bien moindre proportion dans les horizons A_{11} et A_{12} et sous forme de métahalloysite. La présence d'une petite raie à 10 Å sur le diagramme de poudre correspond à de l'halloysite. Dans ces deux horizons, il y a une petite raie nette à environ 14 Å, qui correspond à un mélange de montmorillonite, de chlorite et d'interstratifiés (probablement illite-chlorite). On y trouve de petites quantités d'hématite et de goethite. Le quartz et les feldspaths sont abondants dans l'horizon A_{11} et diminuent dans l'horizon A_{12}.

— Dans l'horizon (B), la proportion d'halloysite, en majeure partie hydratée (10 Å), augmente fortement aux dépens des minéraux primaires (feldspaths, quartz). Puis la quantité relative d'argile diminue à nouveau dans les horizons d'altération, (B)/C et C_1. On remarque que l'halloysite y est de plus en plus sous une forme hydratée, notamment au niveau des dépôts d'argile blanche, en C_2. On note encore une petite raie vers 14 Å qui indique la présence en traces d'argiles 2:1 (M et M-C). Les quantités d'hydroxydes de fer (goethite, hématite) sont difficilement perceptibles (raies vers 4,18 et 2,71 Å). La présence de feldspaths augmente très sensiblement dans les horizons (B)/C et C_2, tandis que le quartz disparaît progressivement ; ce qui indique une contamination superficielle du sol par un apport éolien contenant ce minéral.

L'observation au microscope électronique met en évidence l'accroissement considérable de l'halloysite, sous forme tubulaire prédominante et parfois glomérulaire, de la surface vers la profondeur du profil. On note aussi la présence d'un peu de kaolinite fine et de traces d'allophane dans l'horizon A, et la possibilité de montmorillonite dans l'horizon C_1.

En résumé, l'analyse minéralogique met surtout en évidence l'évolution des alumino-silicates d'une forme cryptocristalline (allophane, imogolite) dans les andosols vers l'apparition de plus en plus prédominante de l'halloysite dans les sols bruns. La présence de gibbsite en haut de séquence, disparaît ensuite. Les minéraux primaires, feldspaths plagioclases et quartz surtout, sont toujours évidents en toute position ; mais leur quantité diminue relativement dans les horizons (B) ou II (B) ; de plus, le quartz est plus abondant dans le haut du profil qu'à sa base où il disparaît. Enfin, les formes secondaires et cristalisées d'hydroxydes de fer (goethite) sont peu évidentes ; tandis que des formes oxydées (hématite, magnétite), probablement héritées du matériau originel, sont souvent nettement présentes.

2. CARACTÉRISTIQUES MICROMORPHOLOGIQUES

Nous utilisons la méthode de description de Brewer (1964), complétée par les observations d'Eswaran et Baños (1976).

Nous avons résumé dans le tableau II les observations que nous avions faites sur trois profils de la séquence, un andosol, le sol de transition et sur un sol brun eutrophe (Tejedor-Salguero, Benayas, Fernandez Caldas, 1977).

On remarque une nette évolution de la microorganisation du sol, notamment dans l'assemblage plasmique : isotique dans l'andosol, argilosépique dans le sol brun de transition, insépique dans le sol brun eutrophe. De même, la distribution relative des éléments est plutôt porphyrique et congélique dans l'andosol porphyro-plasmique et aglutinique dans le sol de transition, plasmique et aglutinique dans les sols bruns. Enfin, on note l'importance des microorganisations organiques, de type Mull dans tout le profil des andosols ; celles-ci disparaissent dans le sol brun, en dehors de l'horizon humifère où elles sont peu développées.

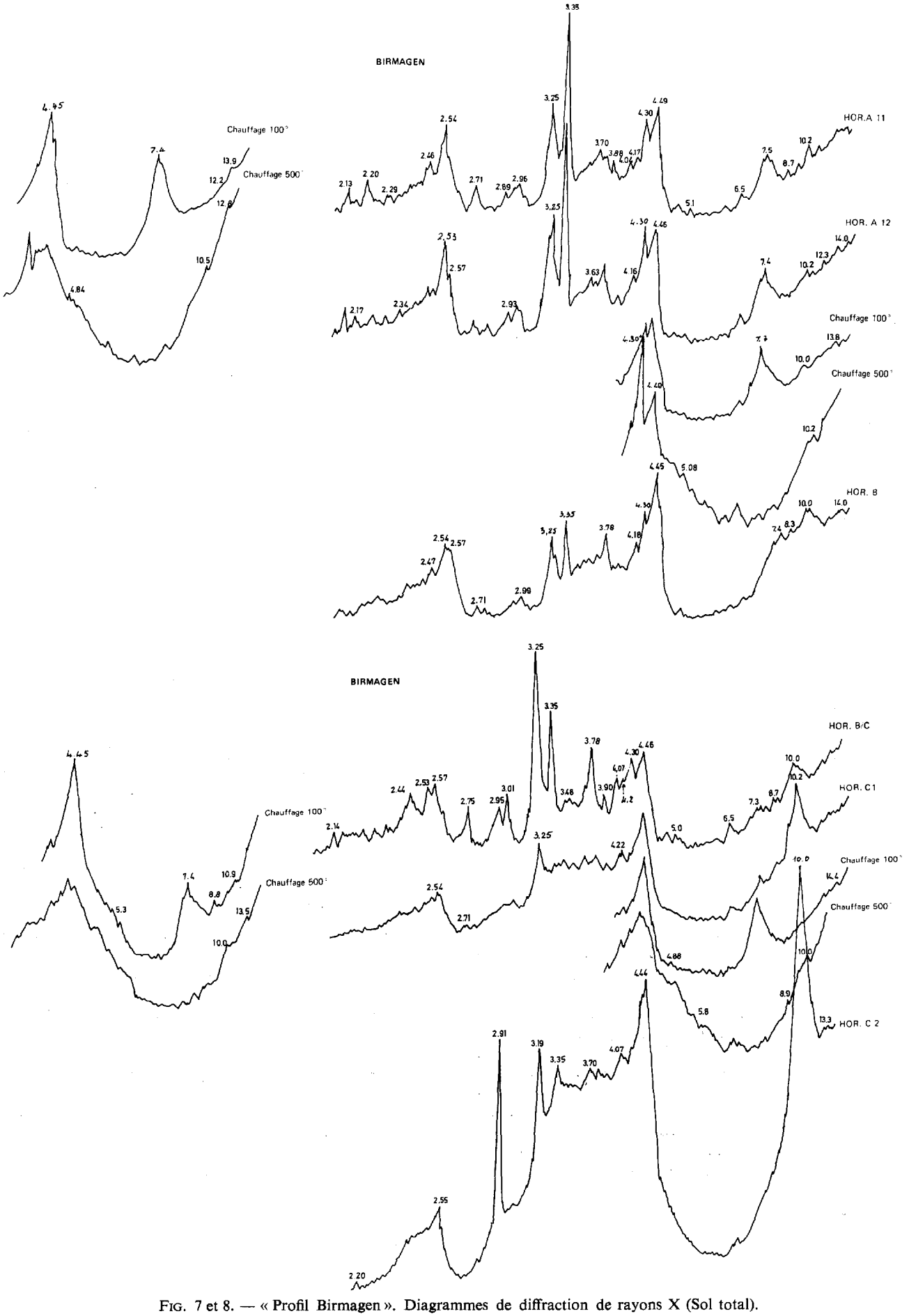

FIG. 7 et 8. — « Profil Birmagen ». Diagrammes de diffraction de rayons X (Sol total).

TABLEAU II

Caractéristiques micromorphologiques

Profil	Horizon	Distribution relative		Assemblage plasmique	Traits pédologiques			Principaux constituants organiques		
		Normale	Spécifique		Cutanes	Pédo-tubules	Glébules, taches, nodules	Squelette organique	Humus colloïdal	Mull colloïdal
Dos Cupresos	A	Porphyrique	Congelique (A)	Isotique	—	—	—	D	A	F
	A/(B)	Plasmi-porphyrique	Congelique (A)	Isotique	—	—	—	F	D	F
	(B)	Plasmi-porphyrique	Congelique (A) Agglutinique (D)	Isotique	—	—	—	F	D	F
Transición	A_1	Porphyrique	Congelique (D) Agglutinique (F)	Argilasépique	—	—	—	D	A	D
	$(B)_1$	Porphyri-plasmique	Agglutinique (A)	Argilasépique	—	—	R	F	—	F
	$(B)_2$	Porphyri-plasmique	Agglutinique (A)	Argilasépique	—	—	F	—	—	F
Dos Postes	A_1	Porphyrique	—	Insépique	—	—	F	F	R	—
	A/(B)	Porphyrique	Congélique (F) Agglutinique (D)	Insépique	R	—	F	R	—	—
	(B)	Plasmique	Agglutinique (A)	Insépique	—	R	D	R	—	—
	IIB	Plasmique	Agglutinique (A)	Insépique	R	—	D	—	—	R

A = Très abondant. — F = Fréquent. — D = Dominant. — R = Rare.

3. TYPOLOGIE ET CLASSIFICATION

3.1. Andosols

a) TYPOLOGIE

Les profils « Las Aves » et « dos Cupresos », qui sont situés dans la zone des brumes régulièrement humide et dérivent de matériaux basaltiques et pyroclastiques d'âge récent, présentent la plupart des caractéristiques typiques des andosols. Rappelons-en brièvement les principales :

Morphologie : horizon humifère très développé, de couleur foncée et à structure « farineuse » (fluffy) ; faible densité apparente ; texture apparente limoneuse ou sableuse ; structure peu différenciée dans l'horizon (B), massive, microporeuse, à consistance très friable et non plastique ; réaction très forte au test de Fieldes et Perrott.

Propriétés physico-chimiques : teneur élevée en humus, formant des complexes stables avec la matière minérale, même dans l'horizon (B) ; pH faiblement acide ($\sim$ 6), relativement à un faible taux de saturation en bases (10 à 20 %) de la capacité d'échange ; écart $pH(H_2O)$ - $pH(KCl) < 1$; (de 0,2 à 1 unité) ; capacité d'échange cationique élevée relativement au taux de fraction $< 2\ \mu$ ($\sim$ 100 mé/100 g) et fortement dépendante du pH de la mesure ($\Delta \sim 40$ mé/100 g) ; rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 dans la fraction $< 2\ \mu$, $\simeq 1$, qui indique une alliti-

sation certaine des produits d'altération ; dispersion acide des colloïdes les plus allitiques (horizon II B) ; capacité de rétention en eau dans l'horizon (B) élevée ($\sim$ 100 % poids sec) et phénomène important de déshydratation irréversible.

Composition minéralogique : à prédominance de substances alumino-silicatées et ferrifères à l'état amorphe (allophane) ou cryptocristallin (imogolite) et d'hydroxydes cryptocristallins ou finement cristallisés (gibbsite et goethite fines) ; abondance de minéraux primaires altérables résiduels (plagioclases, pyroxènes, amphiboles) ; absence (ou non-évidence) de phyllosilicates argileux.

Caractéristiques micromorphologiques : assemblage plasmique isotique ; distribution porphyrique-congélique ; abondance des constituants organiques humifiés.

b) PÉDOGENÈSE

Nous remarquons en outre la fréquente complexité des profils du fait d'un rajeunissement volcanique superficiel, qui explique la moindre évolution géochimique et minéralogique de la partie supérieure des sols (plus riche en minéraux primaires). La partie inférieure, dans les horizons (B) ou II (B), est plus évoluée et déjà fortement allitisée, indiquant la voie probable de la pédogenèse vers la ferrallitisation dans la zone climatique où prédominent actuellement ces andosols.

c) CLASSIFICATION

Classification française (C.P.C.S., proposition 1972)

Classe : Andosols
Sous-classe : Andosols à profil différencié
Groupe : Andosols désaturés, non perhydratés
Sous-groupe : Chromiques

Classification américaine (Soil Taxonomy, 1975)

Ordre : Inceptisols
Sous-ordre : Andepts
Grand-Groupe : Dystrandepts
Sous-Groupe : Typic Dystrandepts

3.2. Sol Brun-andique, de transition

a) TYPOLOGIE

Le profil « Transición » a été observé dans la zone intermédiaire entre le climat régulièrement humide et celui à deux saisons alternées, à la limite inférieure de la zone des brumes. Il présente des caractéristiques intermédiaires entre les andosols et les sols bruns.

Morphologie : l'horizon humifère présente des caractéristiques encore très voisines des andosols, bien que la structure y soit un peu plus nettement développée. C'est en profondeur, dans l'horizon $(B)_1$ et surtout $(B)_2$ que les différences sont nettement accusées par rapport aux andosols : une texture limono-argileuse ou argilo-limoneuse, avec présence évidente de phyllites argileuses (plasticité) ; une structure nettement développée, polyédrique fine ou moyenne plus cohérente, mais encore friable. La réaction au test de Fieldes et Perrott, encore forte dans l'horizon A, s'atténue en profondeur et elle est plutôt faible dans l'horizon $(B)_2$.

Propriétés physico-chimiques : relativement aux andosols désaturés, la capacité d'échange cationique dans l'horizon $(B)_2$ diminue très sensiblement (en proportion du taux d'argile, qui est plus élevé), et le taux de saturation en bases échangeables sélève ($\sim$ 30 à 40 %). L'écart pH(H_2O) - pH(KCl) est >1 ; la teneur en matière organique (de type Mull) décroît brusquement de l'horizon A (12 %) à l'horizon $(B)_1$ (2 %) le rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 est un peu supérieur à 2 (2,2-2,4) ; la capacité de rétention en eau est plus faible ($\sim$ 60 %) en $(B)_1$ et $(B)_2$, et relativement peu sensible à l'effet de la déshydratation.

Minéralogie : la présence de minéraux argileux phylliteux, déjà nettement sensible dès l'horizon A, s'accroît très fortement dans les horizons $(B)_1$ et $(B)_2$. Il s'agit surtout d'halloysite (10 Å) et d'un peu d'argile 2:1 interstratifiée. Le sol contient aussi un peu d'allophane, qui est plus abondante dans l'horizon A. Présence de traces de gibbsite et d'un peu de goethite fine, qui augmente nettement en $(B)_2$. Il y a encore un peu de minéraux primaires altérables (plagioclases), surtout en A, dans le haut du profil.

Micromorphologie : passage à un assemblage plasmique argilosépique et diminution des constituants organiques.

b) PÉDOGENÈSE

On note surtout l'apparition importante des minéraux argileux à prédominance d'halloysite (10 Å), avec encore la présence d'allophane. On remarque

encore le rajeunissement superficiel du sol, lui procurant un caractère andique, mais plus discret que dans les andosols. L'orientation de la pédogenèse paraît encore ferrallitique, mais peu allitique.

c) CLASSIFICATION

Classification française (C.P.C.S., 1967)

Les caractéristiques du profil de « transition » : couleur brune, humus de type Mull, argiles 1:1 et 2:1, l'apparentent aux sols brunifiés. Mais des affinités avec les Andosols dans l'horizon A, la présence d'allophane et la réaction positive au test de NaF, nous inclinent à proposer un intergrade andique.

Classe : Sols Brunifiés
Sous-Classe : Sols Brunifiés des pays tempérés humides
Groupe : Sols Bruns
Sous-Groupe : Sols Bruns andiques, intergrade avec Sols Bruns acides

Classification américaine (Soil Taxonomy, 1975)

L'horizon humifère, foncé, riche en humus, à taux de saturation inférieur à 50 %, est un horizon umbrique. Mais il s'agit aussi d'un sol jeune, en cours d'évolution et d'un intergrade avec les Andepts.

Ordre : Inceptisols
Sous-Ordre : Umbrepts
Grand-Groupe : Haplumbrepts
Sous-Groupe : Andic Haplumbrepts

3.3. Sols Bruns eutrophes

a) TYPOLOGIE

Les profils « Dos Postes » et « Birmagen » sont, comme les précédents formés sur des matériaux pyroclastiques récents. Mais ils se trouvent dans la zone climatique à deux saisons alternées, nettement moins humide que les précédentes formations ; de plus, les sols sont cultivés.

Morphologie : l'horizon humifère est moins développé et moins foncé que dans les andosols ; la couleur est brun-rougeâtre ; texture argilo-limoneuse ou argileuse ; la structure est nettement développée, polyédrique moyenne ou grossière à forte cohésion ; densité plus forte ; présence éventuelle, mais très faible, de cutanes argilo-ferrugineux à la base du profil. Aucune réaction au test de Fieldes et Perrott.

Propriétés physico-chimiques : la teneur en matière organique est de beaucoup inférieure à celle des andosols dans tout le profil, et fortement différenciée entre les horizons A (3 %) et B (0,5 %) ; le pH est faiblement acide, et surtout l'écart $pH(H_2O)$ - pH(KCl) est nettement > 1 ; la capacité d'échange cationique dans l'horizon B rapportée au taux d'argile est très sensiblement inférieure (45 mé/100 g) à celle des andosols ; le taux de saturation en bases échangeables est proche de 50 % dans l'ensemble du profil ; le rapport molaire SiO_2/Al_2O_3 est proche de 3 dans la fraction $< 2\ \mu$; la capacité de rétention en eau, de 30 à 40 % du sol sec, est de beaucoup inférieure à celle des andosols, et non sensible à l'effet de la déshydratation.

Minéralogie : la présence prédominante de minéraux argileux phylliteux, de type 1:1 et 2:1 en mélange, est le caractère majeur ; il s'agit de métahalloysite dans l'horizon A, ou d'halloysite (10 Å) dans les horizons (B) et (B)/C, associée à des argiles interstratifiées (M-C). On note encore la présence d'un peu de goethite fine et de minéraux primaires altérables (plagioclases), surtout dans le haut du profil. Le quartz est plus abondant en surface.

Micromorphologie : passage à un assemblage plasmique insépique et à une distribution plasmique-aglutinique dans l'horizon (B). L'importance des constituants organiques humifiés est faible.

b) PÉDOGENÈSE

Le fait majeur est le développement important des minéraux argileux 1:1 et 2:1, bien que subsiste la présence de minéraux altérables. On remarque la faible quantité apparente d'hydroxydes de fer (goethite) et surtout la teneur beaucoup moins importante en matière organique humifiée que dans les andosols. L'effet du rajeunissement volcanique superficiel est aussi moins apparent que dans les andosols. L'orientation probable de la pédogenèse, dans des conditions climatiques subtropicales, semble plutôt fersiallitique.

c) CLASSIFICATION

Classification française (C.P.C.S., 1967)

La présence d'horizon humifère de type Mull eutrophe, de minéraux argileux 2:1 et 1:1 en mélange, la faible quantité de sesquioxydes de fer libres, permettent de classer ces sols comme Sols

Brunifiés. Les conditions climatiques subtropicales et le taux de saturation en bases proche de 50 %, les apparentent à des sols Bruns eutrophes tropicaux.

Classe : Sols Brunifiés
Sous-Classe : Sols Brunifiés des pays tropicaux
Groupe : Sols Bruns eutrophes tropicaux
Sous-Groupe : .../... pénévolués, ou rubéfiés

Classification américaine (Soil Taxonomy, 1975)

Ordre : Inceptisols
Sous-Ordre : Tropepts (1)
Grand-Groupe : profil « dos Postes » = Dystropepts
profil « Birmagen » = Eutropepts
Sous-Groupe : profil « dos Postes » = Ustic Dystropepts, intergrade Andic (2)
profil « Birmagen » = Typic Eutropepts, intergrade Andic (2)

4. CONCLUSION : ÉVOLUTION DE LA SÉQUENCE PÉDOCLIMATIQUE RÉCENTE

L'analyse des sols les plus récents de la séquence septentrionale de Ténérife a fait clairement ressortir une évolution de leurs caractéristiques, en relation avec la zonalité climatique actuelle. Cette même relation, s'agissant de sols d'âge comparable et formés sur un même matériau volcanique, pyroclastique et basaltique, permet de montrer à nouveau l'incidence des conditions climatiques sur la pédogenèse.

Les principaux traits de cette évolution pédoclimatique, des andosols désaturés aux sols bruns eutrophes, sont les suivants :

Morphologie : l'horizon humifère, très épais et très foncé, presque noir, « farineux » et très friable, devient moins épais, brun-rougeâtre foncé, et il acquiert une structure grumeleuse plus développée et plus consistante. L'horizon (B), normalement brun-jaunâtre (3), limoneux, massif et microporeux, non plastique et très friable, devient brun-rougeâtre, argileux, plastique et acquiert une structure polyédrique bien développée, plus dense et fortement consistante.

Matière organique : la teneur en humus, de très élevée (> 10 % en A) et progressivement décroissante (> 1 % en B) dans le profil d'andosol, devient beaucoup plus faible (3-5 % en A) et brusquement décroissante ($\leqslant 0{,}5$ % en B) dans le sol brun.

Caractéristiques physiques : la texture de sablo-limoneuse devient argileuse ; tandis que la capacité de rétention en eau diminue très fortement (de 100 à 35 %) et que disparaît l'effet de « déshydratation irréversible ».

Caractéristiques chimiques : l'écart $pH(H_2O)$ - pH(KCl) augmente fortement en même temps que la teneur en phyllo-silicates ; tandis que la capacité d'échange cationique et la valeur Δ, dépendante du pH, diminuent progressivement, malgré l'accroissement du taux d'argile. Au contraire, le taux de saturation en bases échangeables s'élève très sensiblement. Mais la réponse au test de NaF (Fieldes et Perrott), de très vive dans les andosols, devient nulle dans les sols bruns. L'évolution géochimique, déjà marquée par l'allitisation dans les andosols, est beaucoup moins avancée dans les sols bruns.

Minéralogie : la fraction sable est toujours riche en minéraux altérables, surtout dans le haut du profil des andosols, qui est rajeuni par des cendres volcaniques. Mais l'évolution de la fraction minérale secondaire est spectaculaire ; de très riche en substances « amorphes » (allophanes) ou cryptocristallines (imogolite, hydroxydes de fer) et présentant en (B) de la gibbsite fine dans les andosols, elle s'enrichit progressivement et rapidement en minéraux argileux (halloysite surtout et un peu d'argiles 2:1 interstratifiées) dans les sols bruns. L'halloysite, d'abord hydratée dans le sol « de transition », se déshydrate en métahalloysite dans le haut des sols bruns.

Micromorphologie : avec une organisation porphyrique-congélique, à assemblage plasmique isotique et riche en matière organique humifiée, les andosols se différencient fortement des sols bruns qui se caractérisent par une organisation plasmique-agglutinique de type argilo-sépique ou insépique et un plus faible taux de matière organique liée.

En bref, il serait possible d'opposer schématiquement les andosols : constitués de complexes organo-minéraux amorphes, plutôt ferrallitiques,

(1) Les conditions climatiques, avec un écart des températures moyennes mensuelles de 7 °C dans l'air, sont très proches du climat tropical.

(2) Andic, à cause d'un faible rajeunissement volcanique superficiel.

(3) Sauf l'exception de sols rouges lithochromes, où la couleur est héritée d'une cendre initialement riche en hématite.

à organisation porphyrique, plasma isotique et à structure microporeuse peu différenciée et très friable, aux sols bruns : argileux et peu humifères, plutôt fersiallitiques, à organisation plasmique argilo-sépique ou insépique, et à structure polyédrique bien développée et fortement consistante.

En conclusion, il est apparu en même temps, au terme d'une pédogenèse récente et paraissant entièrement subordonnée à l'effet des conditions climatiques actuelles, deux différenciations pédologiques bien contrastées : des andosols désaturés dans la zone climatique tempérée perhumide, des sols bruns eutrophes dans la zone climatique subtropicale à deux saisons. Il est intéressant d'observer une zone de transition, qui montre la progressivité (bien que très rapide) du passage des andosols aux sols bruns, ainsi que l'ont constaté d'autres auteurs : Colmet-Daage aux Antilles (1965), Sieffermann au Cameroun (1969), Quantin aux Nouvelles Hébrides (1972, 1974), Moinereau dans le Massif Central, en France (1977), etc.

D'un côté les conditions climatiques perhumides, sur un matériau aussi poreux et rapidement altérable que des cendres basaltiques, entraînent la formation prédominante de produits amorphes ou cryptocristallins et de complexes organo-minéraux stables, qui caractérisent les andosols ; ceux des îles Canaries, qui présentent de l'imogolite et de la gibbsite en quantité importante, semblent voués au processus de ferrallitisation, à plus long terme.

A l'opposé, les conditions climatiques subtropicales à deux saisons favorisent l'apparition plus précoce de phyllosilicates, principalement d'halloysite et aussi d'un peu d'argiles 2:1 interstratifiées, qui, en même temps qu'un turn-over rapide de la matière organique, caractérisent les sols bruns. Ceux des îles Canaries, qui présentent une rubéfaction naissante et un faible taux de sesquioxydes libres de fer, semblent orientés vers le processus de fersiallitisation. Ces deux pôles de différenciation pédo-climatique, apparaîtront avec encore plus d'évidence dans les sols les plus anciens de la même séquence du Nord de Ténérife ; il s'agit de sols ferrallitiques et de sols fersiallitiques.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 3 novembre 1978

BIBLIOGRAPHIE

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 determination in Ando Soils by Cation Exchange Capacity Delta Value ». *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* ; vol. 23, n° 3 : 210-4.

BESOAIN (E.), 1968. — « Imogolite in volcanic soils of Chile ». *Geoderma*, 2, 69 : 151-169.

BREWER (R.), 1964. — « Fabric ans Mineral Analysis of soils ». John Wiley, New York, 470 p.

BROWN (G.), 1961. — « The identification and crystal structure of clay minerals », Clay Mineral Society, London, 544 p.

CPCS, 1967. — « Classification des sols », note ENSA Grignon, *multigr.* 87 p.

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, n° 2 : 91-121.

COLMET-DAAGE (F.) *et al.*, 1970. — « Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la Côte Pacifique du Nicaragua ». *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 2 : 113-172.

ESWARAN (H.), BAÑOS (C.), 1976. — « Related distribution patterns in soils and their significance ». *An Edaf. y Agrob.*, Tomo XXXV : 33-45.

FIELDES (M.), PERROTT (K.W.), 1966. — « The nature of allophane in soils : 3. Rapid field and laboratory test for allophane ». *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 623-629.

Groupe de Travail des Andosols, 1972. — Proposition de classification des andosols, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 303-304.

HETIER (J.M.), 1975. — Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Univ. Nancy I, 194 p. *multigr.*

LAMOUROUX (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.

MOINEREAU (J.), 1977. — Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay, Vivarais, Goirons). 139 p. *multigr.* Thèse Univ. Sci. et Techn. Languedoc, Montpellier.

PEREZ MATEOS (J.), 1965. — « Analisis mineralogico de arenas ». Manuales de Ciencia Actual n° 1, CSIC Madrid.

QUANTIN (P.), 1972 *a*. — « Les Andosols ». Revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 273-301.

QUANTIN (P.), 1972 *b*. — Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides. 1re et 2e parties. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 2 : 123-151. 3e partie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 207-217.

QUANTIN (P.), 1974. — « Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 3-12.

QUANTIN (P.), 1975. — « Problème de la détermination des substances minérales amorphes » ; Comm. Journées Pédologiques ORSTOM, septembre 1975 ; résumé *multigr.* Centre ORSTOM Bondy, 7 p.

QUANTIN (P.), LAMOUROUX (M.), 1974. — « Adaptation de la méthode cinétique de Ségalen à la détermination des constituants minéraux de sols variés ». *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 13-46.

SÉGALEN (P.), 1968. — « Note sur une méthode de détermination des produits amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux ». *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.

SIEFFERMANN (G.), 1969. — « Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun ». Thèse Fac. Sc. Univ. Strasbourg, 285 p.

TEJEDOR SALGUERO (M.L.), BENAYAS (J.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1977. — « Estudio fisico-quimico y micromorfologico de secuencias evolutivas climaticas y cronologicas de suelos de Tenerife (Islas Canarias) ». Congreso Internacional de Micromorfologia, Granada. Abril 1977.

TEJEDOR SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), QUANTIN (P.), 1978. — « Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 1re partie : Ecologie, Morphologie. Caractéristiques physico-chimiques ». *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 3 : 251-264.

USDA, 1975. — « Soil Taxonomy ». Agriculture Handbook n° 436.

YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962. — « Allophane in some Ando Soils ». *Soil Sci. Pl. Nut. Japan 8*, n° 2 : 6-13.

YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962. — « Imogolite in some Ando Soils ». *Soil Sci. Nut. Japan 8*, n° 3, 114-121.