

Climatoséquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries)

2^e partie : Caractéristiques minéralogiques ; interprétation et classification ⁽¹⁾

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

* *Centro de Edafología y Biología aplicada, Santa Cruz
de Tenerife, Espagne*

** *Pédologue ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy*

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. MÉTHODES ANALYTIQUES

2. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

2.1. Nature des sables

a Fraction lourde

b Fraction légère

2.2. Minéralogie des argiles

a Sol brun-andique

b Sol brun modal

c Sol fersiallitique

d Vertisol

e Sols marrons

f Sol sodique

3. INTERPRÉTATION ET CLASSIFICATION

3.1. Sol brun andique

3.2. Sol brun modal

3.3. Sol fersiallitique

3.4. Vertisol

3.5. Sols marrons

3.6. Sol sodique

CONCLUSION GÉNÉRALE

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Dans une première partie, nous avons étudié les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques d'une climatoséquence de la région méridionale de l'île Ténérife (Iles Canaries) (Quantin, Fernandez Caldas, Tejedor Salguero, 1977). Nous y avons souligné la variabilité de ces caractéristiques, en fonction de l'altitude et de la typologie des sols de la séquence.

Dans cette deuxième partie, nous étudierons les caractéristiques minéralogiques de ces sols, dans la fraction sable et dans les produits d'altération, afin de disposer de toutes les données nécessaires à l'établissement d'une classification correcte et d'une interprétation pédogénétique des sols de cette séquence.

(1) La première partie de cet article est parue in *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4, 1977 : 391-407, avec résumé, abstract et fiche signalétique.

I. MÉTHODES ANALYTIQUES

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 l'étude de la fraction argile, on a suivi les techniques suivantes :

— Diffraction de rayons X ; les analyses des échantillons ont été réalisées sur la poudre désorientée et sur des agrégats orientés de l'échantillon saturé auparavant en Mg^{2+} ou K^+ , et soumis par la suite à divers traitements (Brown, 1961).

— Spectroscopie d'adsorption infrarouge (Hidalgo et Serratos, 1955), en utilisant comme cellule d'absorption des comprimés de BrK (Stubican et Roy, 1961 ; Farmer et Russell, 1964).

— L'étude par microscopie électronique a été effectuée aux Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM avec la collaboration de M. Rambaud, en utilisant un microscope JEOL 100 U.

2. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

2.1. Nature des sables

On a fait une étude de la composition minéralogique de la fraction sable des sols de la séquence. Les particules dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm ont été divisées en deux fractions, en utilisant du bromoforme de densité 2,9.

2.1.1. FRACTION LOURDE (tabl. I)

Les caractéristiques de la fraction lourde sont très similaires dans tous les profils de la séquence. Parmi les minéraux transparents de la fraction lourde prédominent des pyroxènes et des amphiboles. L'augite est la mieux représentée parmi les premiers ; la plus caractéristique est l'augite basaltique ; on a observé également quelques grains faiblement pléochroïques de la variété augite-titanifère.

TABLEAU I

Minéralogie de la fraction lourde

Profil	Type de sol	Horizon	Opaques naturels	Opaques de altérations	Altérites	Minéraux denses transparents				
						Pyroxènes	Amphiboles	Titanites	Olivine	Mica
Pino 57	S. brun andique	A ₁₁	76	3	34	68	19	1	8	4
		A ₁₂	62	4	33	68	18	—	10	4
		B/C	61	3	35	70	15	1	11	3
Dornajido	S. brun modal	A ₁₁	205	3	18	75	13	3	5	4
		A ₁₂	324	1	6	75	14	3	6	2
		B/C	471	—	—	77	1	—	20	2
Trevejo	S. fersiallitique	B	621	4	5	26	46	10	12	6
		B/C	187	8	7	12	29	17	5	37
Yaco	S. Marron	A _p	29	2	12	51	36	5	6	2
		B _{Ca}	48	1	7	61	20	2	11	4
		C	28	—	13	52	32	7	5	2

On a observé d'autres pyroxènes en plus petit nombre tels que de l'aégyrine, de l'enstatite et du diopside, dans le sol brun modal.

L'amphibole le plus caractéristique est la hornblende basaltique ; elle domine surtout dans le sol

fersiallitique. Dans le profil Pino 57 (sol brun andique) elle apparaît quelquefois incluse dans le verre volcanique.

On a identifié des olivines, spécialement dans l'horizon (B) C du profil Dornajido (sol brun modal) ;

et des biotites, qui sont notamment en pourcentage élevé dans l'horizon B/C du sol fersiallitique ; de la titanite est aussi relativement abondante dans le sol fersiallitique.

Dans le sol brun andique on a noté la présence de verres volcaniques avec des petites inclusions de minéraux transparents. Dans ce profil et dans le sol fersiallitique on a trouvé aussi des traces de pseudo-brookite.

Les opaques naturels sont très importants dans les sols brun modaux et les sols fersiallitiques, où ils constituent pratiquement toute la fraction lourde de ces profils. La magnétite est le minéral principal ; la fraction magnétique domine sur la fraction non magnétique dans ces deux types de sols (tabl. II). On a observé également des grains d'illménite.

TABLEAU II

Pourcentage de fraction magnétique des minéraux opaques

Profil	Horizon	Fraction magnétique	Fraction non magnétique
Pino 57	A ₁₁	31,2	68,8
	A ₁₂	22,0	77,9
	(B) C	33,5	66,5
Dornajido	A ₁₁	58,0	41,9
	A ₁₂	67,9	32,1
	B	93,6	6,4
	B/C	77,9	22,1
Trevejo	B	60,3	39,6
	B/C	47,2	52,8
Yaco	A _p	35,7	64,3
	B _{Ca}	25,9	74,0
	C	31,5	68,5
Tapao	A _p	31,6	68,4
	B	23,2	76,8
	B _{Ca}	36,2	63,8
	C	22,7	77,3
Fasnia	A _p	13,6	86,4
	B	23,7	76,3
	C	14,5	85,5

La grande abondance d'opaques naturels par rapport aux minéraux transparents ferromagnésiens dans l'horizon B du profil Dornajido, n'a pas permis de donner un pourcentage de ceux-ci.

Les opaques d'altération sont très rares. On observe de l'hématite et du leucoxène.

2.1.2. FRACTION LÉGÈRE

a) Dans la fraction légère du sol brun andique, abondent des fragments de verre volcanique, à différents degrés d'altération, et généralement avec des inclusions de minéraux transparents ou d'opaques naturels. On remarque également beaucoup de feldspaths calcosodiques (principalement de l'andésine), et des feldspaths potassiques (sanidine) en moindre proportion.

b) Dans les deux horizons superficiels du sol brun modal, on trouve encore quelques grains de verre volcanique qui disparaissent pratiquement dans les horizons profonds. Ils présentent en général une plus grande altération que dans le sol brun andique.

Dans les horizons B et B/C on observe presque exclusivement, des grains altérés chloritisés et des argiles 2:1 ferrifères. Les feldspaths y sont en moindre proportion.

c) Au contraire, la fraction légère du sol fersiallitique est dominée par des grains de feldspaths, potassiques (sanidine) et calcosodiques (andésine). On observe aussi quelques grains altérés chloritisés et quelques altérites ou grains non identifiables, qui correspondent probablement à des feldspaths, à des degrés divers d'altération.

d) Dans les sols marrons on observe, soit des grains altérés chloritisés et des argiles chloritiques, soit des feldspaths calcosodiques.

e) Dans le profil Los Olivos (sol sodique), les feldspaths calcosodiques (29-32 %) et potassiques (26-31 %) se trouvent dans des proportions égales. On y trouve aussi du verre volcanique et des argiles chloritiques.

2.2. Minéralogie des argiles

Nous étudierons en détail les minéraux qui apparaissent dans la fraction $< 2 \mu$ des différents profils étudiés.

2.2.1. SOL BRUN ANDIQUE (fig. 1)

Dans ce profil, ce sont les minéraux kaolinitiques (halloysite) qui dominent ; il y a aussi un peu de

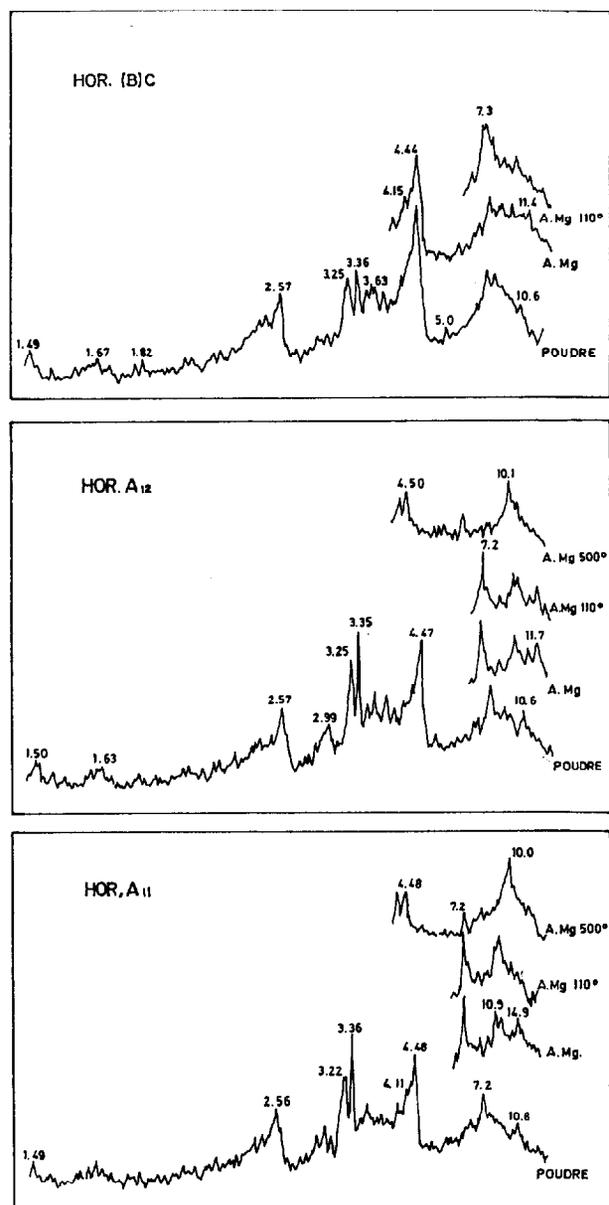


FIG. 1. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol brun-andique.

produits amorphes, de type allophane, et de minéraux argileux 2:1 (montmorillonite) dans les horizons superficiels.

Diagrammes de Rayons X : les horizons A_{11} et A_{12} de ce profil présentent pratiquement la même composition : la métahalloysite (à 7,3 Å) domine. Mais on note aussi un peu de montmorillonite et des traces de chlorite. Il y a beaucoup de minéraux primaires, principalement du quartz et des feldspaths, et des traces d'amphiboles.

Dans l'horizon (B)C la proportion en métahalloysite augmente. Cependant, on trouve de l'halloysite hydratée (à 10 Å). La présence de minéraux de type 2/1 n'a pas été clairement prouvée. A des températures élevées, on observe des petites raies qui vont de 11 à 13 Å, qui peuvent être attribuées à des minéraux interstratifiés chloritiques. Dans cet horizon, la proportion de feldspaths et de quartz diminue sensiblement, par rapport aux horizons superficiels.

Dans tout le profil on trouve des petites quantités d'illite. On a observé relativement peu d'hématite dans les horizons A_{12} et (B)C, et un peu de goethite fine dans les horizons A_{11} et (B)C.

Les spectres d'absorption infrarouge (fig. 2) montrent des bandes d'absorption à 3 695 et 3 620 cm^{-1} , caractérisant les vibrations des groupes OH d'argiles kaoliniques et dont la forme est typique de la métahalloysite. Ces bandes sont plus intenses dans l'horizon (B)C. Dans cet horizon, la vibration de Al-OH à 910 cm^{-1} , caractéristique également des kaolinites, est aussi plus aiguë. Ceci confirme les observations faites aux rayons X, indiquant que le matériel kaolinique est plus abondant dans cet horizon profond.

Les bandes qui apparaissent à 3 450 cm^{-1} et 1 640 cm^{-1} , dues aux vibrations de déformation de l'eau interlaminaire, nous indiquent la présence d'halloysite hydratée, surtout dans l'horizon (B)C.

La bande principale des silicates à 1 030 cm^{-1} due à des vibrations de tension Si-O, apparaît nettement.

Des bandes à 535, 467 et 430 cm^{-1} , indiquent que les phyllosilicates sont principalement aluminiques (dioctaédriques). Le doublet 798-778 cm^{-1} caractérisant le quartz, se trouve plus développé dans les horizons superficiels.

Les observations faites au microscope électronique montrent à nouveau la prédominance d'halloysite et la présence d'un peu de produits amorphes, de type allophane. Dans les deux premiers horizons on observe aussi quelques formes de montmorillonite. Un peu d'illite apparaît dans tout le profil.

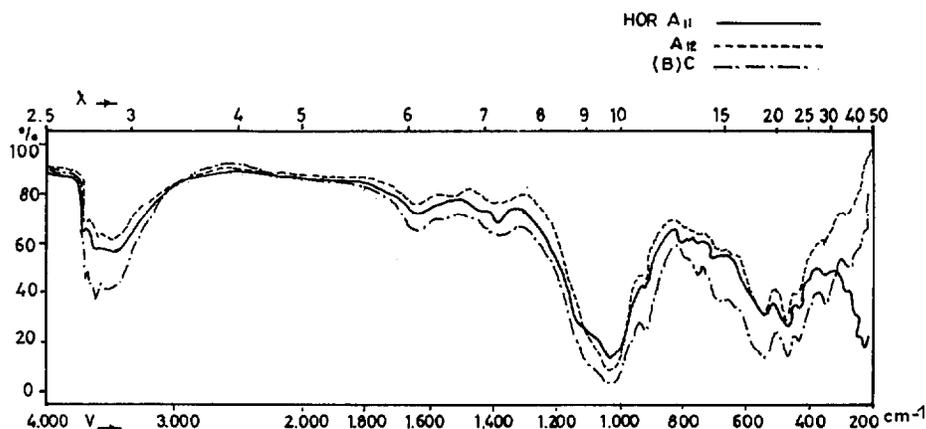


FIG. 2. — Diagrammes de spectrographie infrarouge de sol brun-andique.

2.2.2. SOL BRUN MODAL (fig. 3)

Diagrammes de rayons X : les minéraux kaolinitiques dominent aussi dans ce profil, principalement de la métahalloysite, dans des proportions beaucoup plus élevées que dans le profil antérieur. Elle augmente considérablement avec la profondeur. Cependant il y a encore un peu d'halloysite hydratée (à 10 Å) dans les horizons (B) et (B) C.

Dans l'horizon A₁₁, on observe nettement un peu de montmorillonite et des traces de kaolinite. Dans les autres horizons on n'observe pas de minéraux de ce type.

Dans tous les horizons et spécialement dans l'horizon A₁₁, apparaissent des petites quantités d'illite et aussi des traces de minéraux interstratifiés chloritiques (I-C, M-C).

Des petites quantités de goethite fine sont évidentes dans l'horizon A₁₂ ; mais il n'y en a que des traces dans l'horizon A₁₁.

En ce qui concerne les minéraux primaires, on trouve du quartz et des feldspaths dans le sol total de l'horizon A₁₁. Ces minéraux diminuent dans l'horizon A₁₂. Tandis que le quartz disparaît dans les horizons profonds, des traces de feldspaths y persistent encore. Les diagrammes de spectrographie infrarouge confirment nettement la prédominance de minéraux kaolinitiques (principalement de l'halloysite et des petites quantités de kaolinite fig. 4).

Les deux bandes d'adsorption des OH de l'halloysite vers 3 695-3 620 cm⁻¹ sont très intenses et plus nettes

que dans le profil antérieur. La bande à 910 cm⁻¹ (qui correspond à la bande de déformation Al-OH) est très marquée, de même que la triple bande 535, 467, 430 cm⁻¹, ce qui montre une quantité importante d'une argile kaolinitique nettement cristallisée.

Les bandes à 3 450 cm⁻¹ et 1 630 cm⁻¹ sont plus petites que dans le profil antérieur, ce qui indique un moindre degré d'hydratation de l'halloysite.

Le doublet caractéristique du quartz 798-778 cm⁻¹ s'observe uniquement dans l'horizon A₁₁.

2.2.3. SOL FERSIALLITIQUE

Diagrammes de rayons X : dans ce sol, le minéral argileux qui prédomine est un interstratifié probablement de type illite-vermiculite, accompagné de minéraux kaolinitiques (kaolinite et métahalloysite).

Dans le sol total de ce profil, on a observé aussi la présence abondante de feldspaths. Leurs raies sont très nombreuses et intenses, et augmentent très nettement en fonction de la profondeur. Au contraire, le quartz qui est important aussi dans l'horizon B, diminue dans l'horizon profond. On note aussi une raie très nette à 10 Å (halloysite ou illite), ainsi que les raies correspondant aux minéraux kaolinitiques. Il y a un pic à 2,70 Å qui indique l'existence d'hématite et d'un peu de goethite (4,16 Å) dans l'horizon B (fig. 5).

Dans la fraction < 2 μ, il y a très peu de feldspaths, et des traces de quartz uniquement dans l'horizon B. Dans ces diagrammes apparaissent les raies 10 Å,

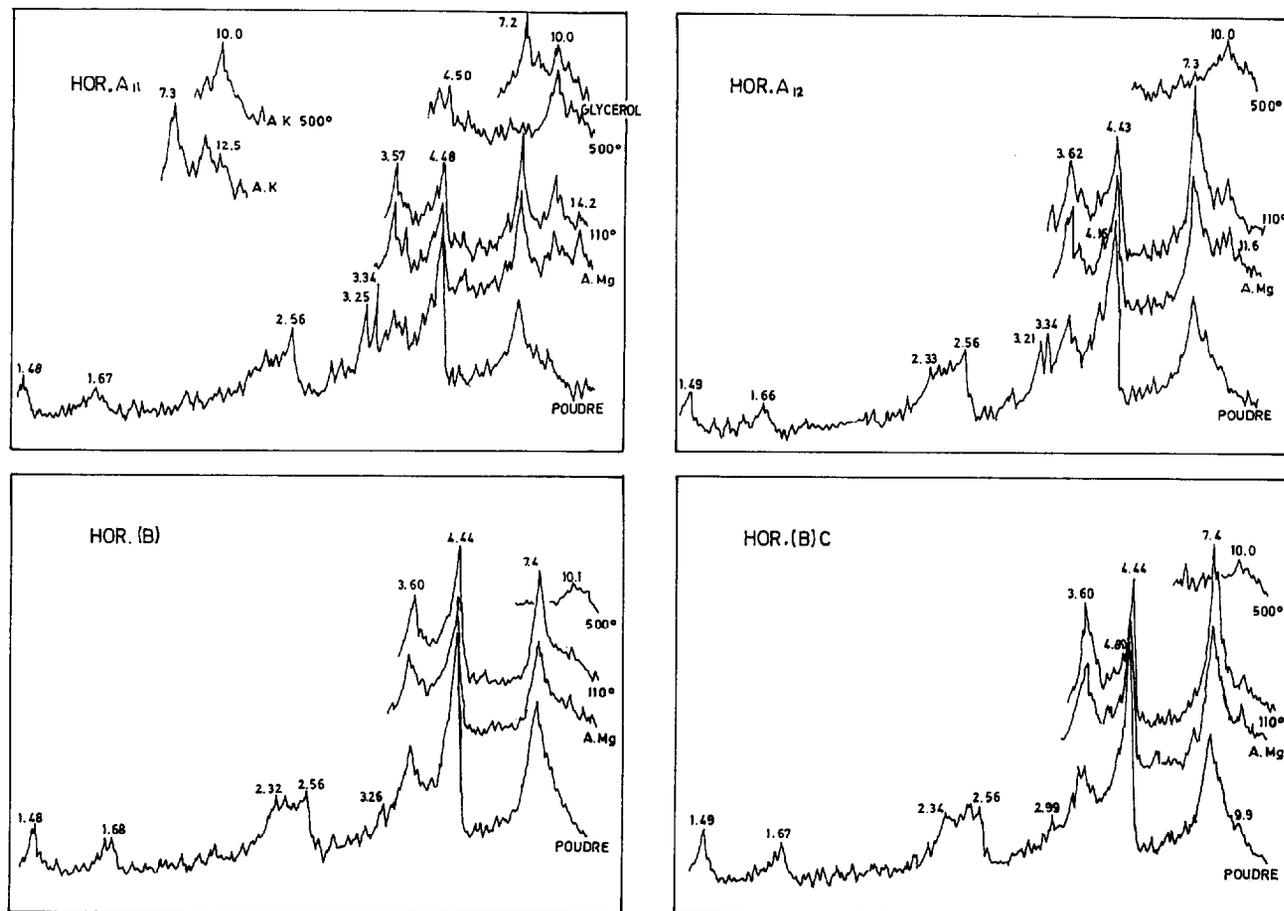


FIG. 3. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2\mu$ de sol brun modal.

4,48 Å, 3,35 Å, 2,57 Å, etc., correspondant à l'illite. Cependant, la raie à 5 Å n'apparaissant pas et le pic à 10 Å étant très large, il s'agit d'illite « ouverte » (fig. 6). Les minéraux kaolinitiques sont un mélange de kaolinite désordonnée et de métahalloysite. On ne note pas la présence de minéraux à 14 Å.

2.2.4. VERTISOL

Diagrammes de rayons X : dans ce sol, les argiles sont presque exclusivement constituées par de la montmorillonite, minéral caractéristique des vertisols. Cette argile est bien cristallisée (fig. 7). Il y a aussi de petites quantités de minéraux kaolinitiques, et d'illite.

2.2.5. SOLS MARRONS

Profil Yaco

Diagrammes de rayons X : quand on étudie les diagrammes de rayons X sur poudre par la méthode Debye-Scherrer, on observe, dans la fraction argile, une série de raies (4,48 Å, 2,56 Å, 1,69 Å, 1,49 Å, etc.) caractéristiques de minéraux dioctaédriques, mais pas de raie basale nette. Si on oriente les échantillons, on voit que ce sont les argiles de type montmorillonitique qui dominent nettement dans le profil. Cependant leur comportement varie au long du profil. Ainsi, dans les agrégats orientés magnésiques, où on observe le mieux les réflexions (001), on trouve la

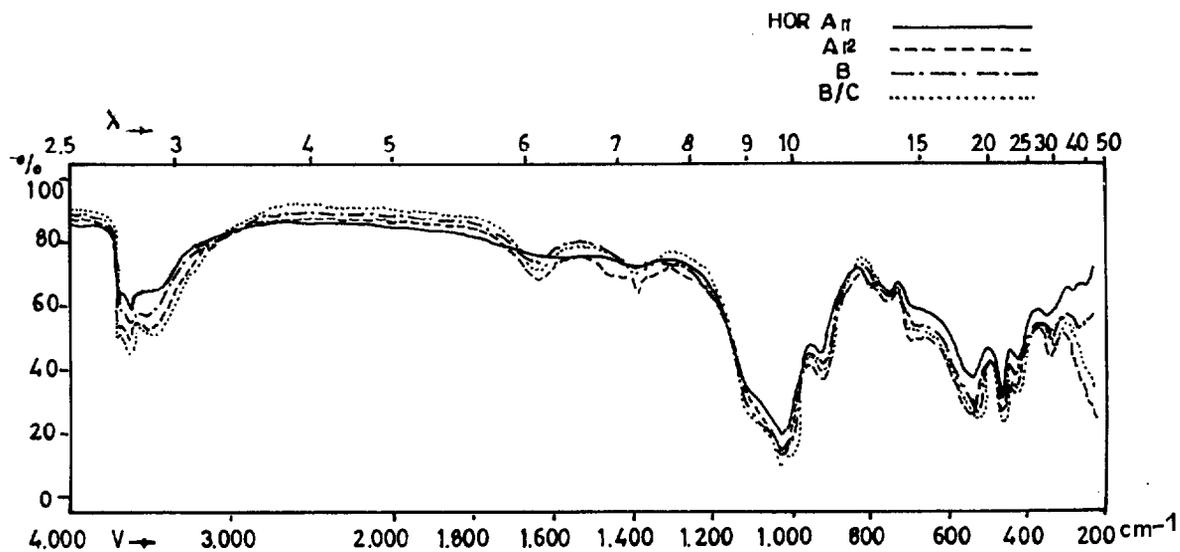


FIG. 4. — Diagrammes de spectrographie infrarouge de sol brun modal.

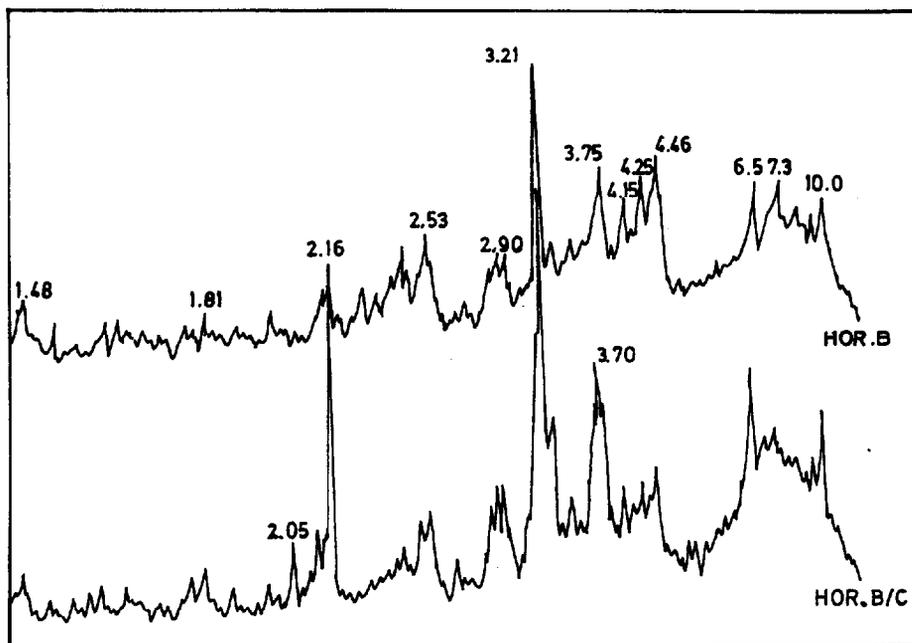


FIG. 5. — Diagrammes de rayons X sur la totalité du sol ferriallitique.

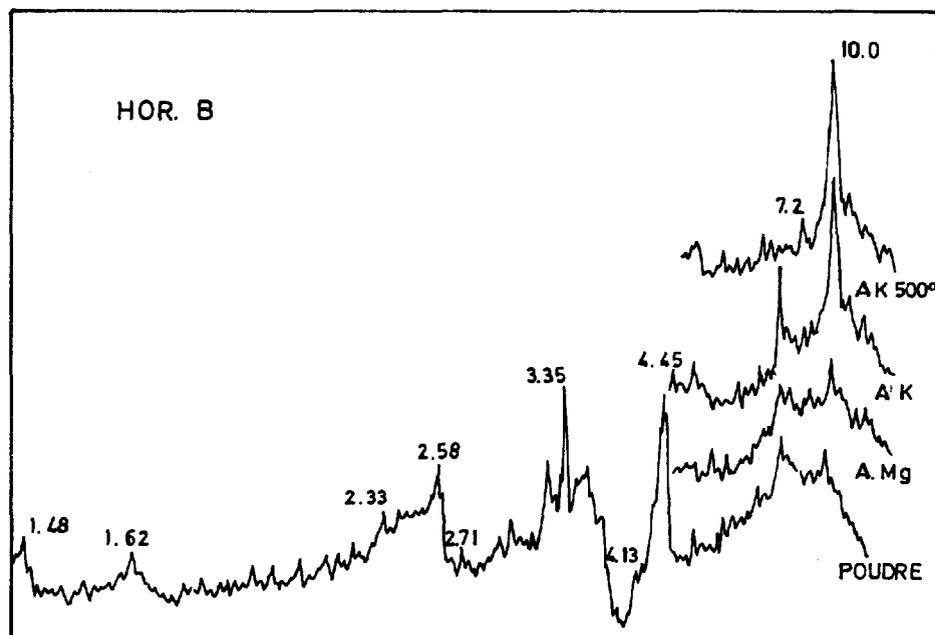


FIG. 6. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol fersiallitique.

raie basale de la montmorillonite dans l'horizon A_p à 14,5 Å, tandis-que que dans les horizons B_{Ca} et C cette raie basale apparaît autour de 16 Å. Ceci est dû à un degré différent d'hydratation, car la caractéristique essentielle de cette argile est d'avoir une équidistance (001) très variable (fig. 8 et 9).

Dans les traitements à différentes températures, on observe le déplacement de ces raies vers 10 Å. A 500 °C se maintient une raie à 4,50 Å approximativement qui correspond principalement à la réflexion (002) de la montmorillonite. Dans le traitement de l'argile magnésique par le glycérol, ces raies disparaissent sans que l'on observe d'autre raie nette à des équidistances supérieures ; cependant dans l'horizon B_{Ca} on remarque de façon plus claire l'apparition d'une raie à 19,6 Å. Quand l'échantillon est saturé de potassium la réflexion basale de la montmorillonite apparaît à de plus petites équidistances (entre 10 et 13 Å).

On trouve de faibles quantités de minéraux kaoliniques qui accompagnent cette argile (kaolinite désordonnée et métahalloysite).

Dans les trois horizons on note la présence de chlo-

rite et de minéraux interstratifiés, probablement de type M-C. On remarque aussi la présence d'illite dans tout le profil.

En ce qui concerne les minéraux primaires, il existe du quartz et des feldspaths dans l'horizon A_p , et seulement des traces de ces minéraux dans les autres horizons.

Les spectres d'absorption infrarouge montrent des bandes à $3\,695\text{ cm}^{-1}$, 915 cm^{-1} , etc., qui confirment la présence de faibles quantités de minéraux kaoliniques (fig. 10).

La bande à $3\,620\text{ cm}^{-1}$, bien définie en regard de celle à $3\,675\text{ cm}^{-1}$, correspond principalement aux vibrations des OH de minéraux de type montmorillonitique.

La bande d'absorption à 870 cm^{-1} , caractéristique de la montmorillonite, est due à la vibration Al-Fe₃-OH, indiquant une argile ferrifère.

La bande principale des silicates à $1\,030\text{ cm}^{-1}$ a tendance à se dédoubler approximativement à $1\,012\text{ cm}^{-1}$, bien que ce ne soit pas de manière très prononcée ; ce qui prouverait l'existence de faibles quantités de kaolinite.

On remarque également des bandes à $3,450\text{ cm}^{-1}$ et $1\,660\text{ cm}^{-1}$ qui correspondent à des vibrations de déformations dues à l'eau interlaminaire de la montmorillonite principalement.

Le doublet caractéristique du quartz est visible dans tout le profil.

Profil Tapao

Diagrammes de rayons X : comme dans le cas précédent, les argiles montmorillonitiques dominent nettement (fig. 11).

Dans les diagrammes d'agrégats magnésiques on voit que la réflexion principale apparaît autour de

$15,7\text{ \AA}$. C'est la valeur qui a été donnée par différents auteurs, principalement Hendricks, Alexander, etc. pour l'équidistance basale de montmorillonites magnésiques hydratées. Sous l'effet de la température, un déplacement se produit vers une équidistance de 10 \AA , caractéristique de ce type d'argile. A $500\text{ }^\circ\text{C}$ le déplacement est total et il reste de petites raies entre $11-12\text{ \AA}$ qui correspondent à des minéraux interstratifiés (M-C). Sur l'échantillon orienté, saturé en magnésium, on observe que la raie principale autour de $15,7\text{ \AA}$ se déplace vers $19,6\text{ \AA}$ par traitement au glycérol ; on la voit très nettement dans les horizons B et B_{Ca}. Dans l'horizon IIB_{Ca} la raie principale disparaît mais on n'observe pas d'autre raie à des équidistances plus grandes.

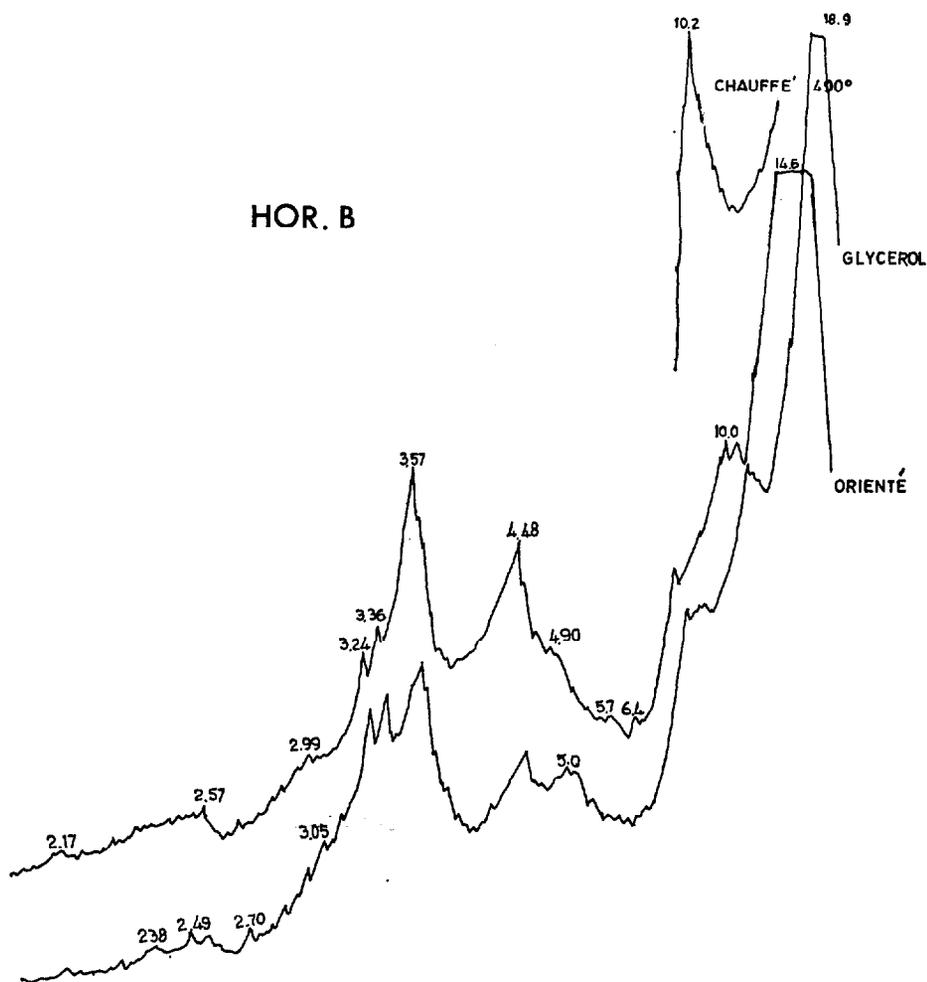


FIG. 7. — Diagrammes de rayon X sur la fraction $< 2\text{ }\mu$ de vertisol.

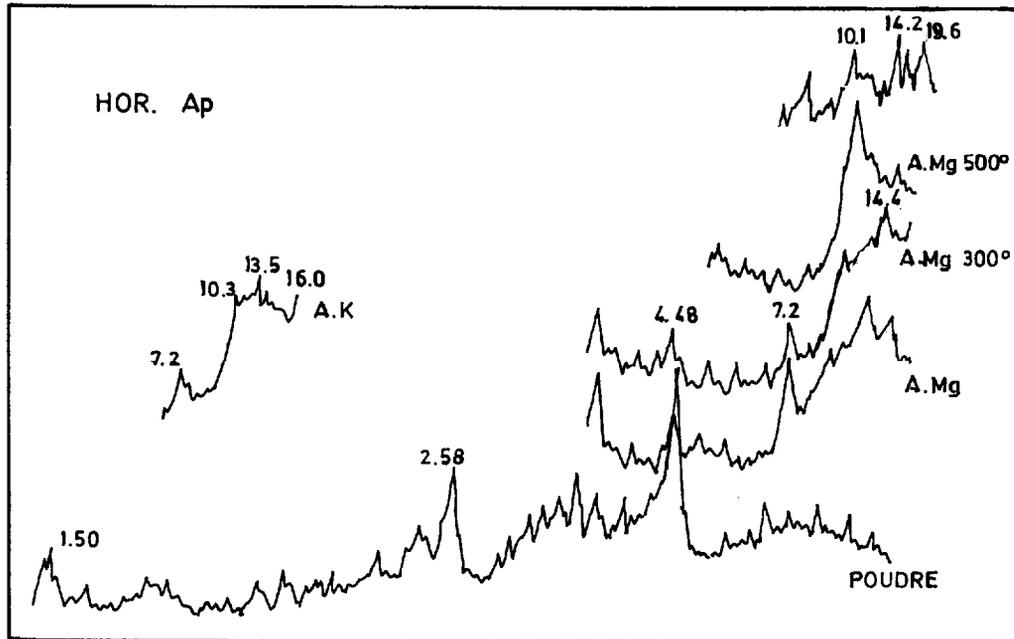


FIG. 8. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol marron (Yaco).

Dans l'horizon B_{Ca} , aussi bien sur les diagrammes de poudre désorientée que sur les agrégats magnésiques orientés, on note une raie très nette à $12,6 \text{ \AA}$, qui se maintient après le traitement au glycérol, et fait penser à l'existence d'argiles fibreuses du type de la sépiolite (ce qui a été confirmé au microscope électronique).

En plus de la montmorillonite, on trouve de petites quantités de minéraux kaoliniques (métahalloysite et kaolinite désordonnée). Dans les trois premiers horizons il s'agit principalement de kaolinite désordonnée (à $7,1 \text{ \AA}$ et $3,58 \text{ \AA}$). Dans l'horizon IIB_{Ca} la présence de métahalloysite est plus nette.

Dans tout le profil les réflexions caractéristiques de l'illite apparaissent. Elles sont légèrement plus nettes dans les deux premiers horizons, indiquant l'accroissement en surface. Il y a aussi un peu de goéthite fine et d'hématite ($4,16 \text{ \AA}$ et $2,70 \text{ \AA}$).

Parmi les minéraux primaires on trouve du quartz et du feldspath qui diminuent avec la profondeur, et des traces d'amphibole.

Les spectres d'absorption infrarouge présentent les mêmes caractéristiques que dans le profil précédent.

L'observation au microscope électronique des argiles confirme la prédominance de la montmorillonite. On remarque en petites quantités des formes de kaolinite assez mal cristallisée, ainsi que de l'halloysite.

Dans les horizons B_{Ca} et IIB_{Ca} on observe quelques formes fibreuses d'attapulgite ou de sépiolite. Ces minéraux, encore mal cristallisés dans l'horizon B_{Ca} , sont plus individualisés, mieux cristallisés et plus abondants dans l'horizon IIB_{Ca} .

On voit aussi de l'illite ainsi que quelques cristaux de calcite et de chlorure de sodium.

Profil Fasnja

Diagrammes de rayons X : dans ce profil, comme dans les précédents, la montmorillonite (à $15,7 \text{ \AA}$) est l'argile dominante, bien qu'elle se trouve en plus petites proportions (fig. 12). Il y a aussi un peu d'argiles kaoliniques (kaolinite et métahalloysite).

Dans les diagrammes de l'argile chauffée à $500 \text{ }^\circ\text{C}$, apparaît une raie très nette à $11,4 \text{ \AA}$, qui indique l'existence de petites quantités de minéraux interstratifiés (M-C ou I-C) ; il reste aussi une raie à 14 \AA , due à de petites quantités de chlorite.

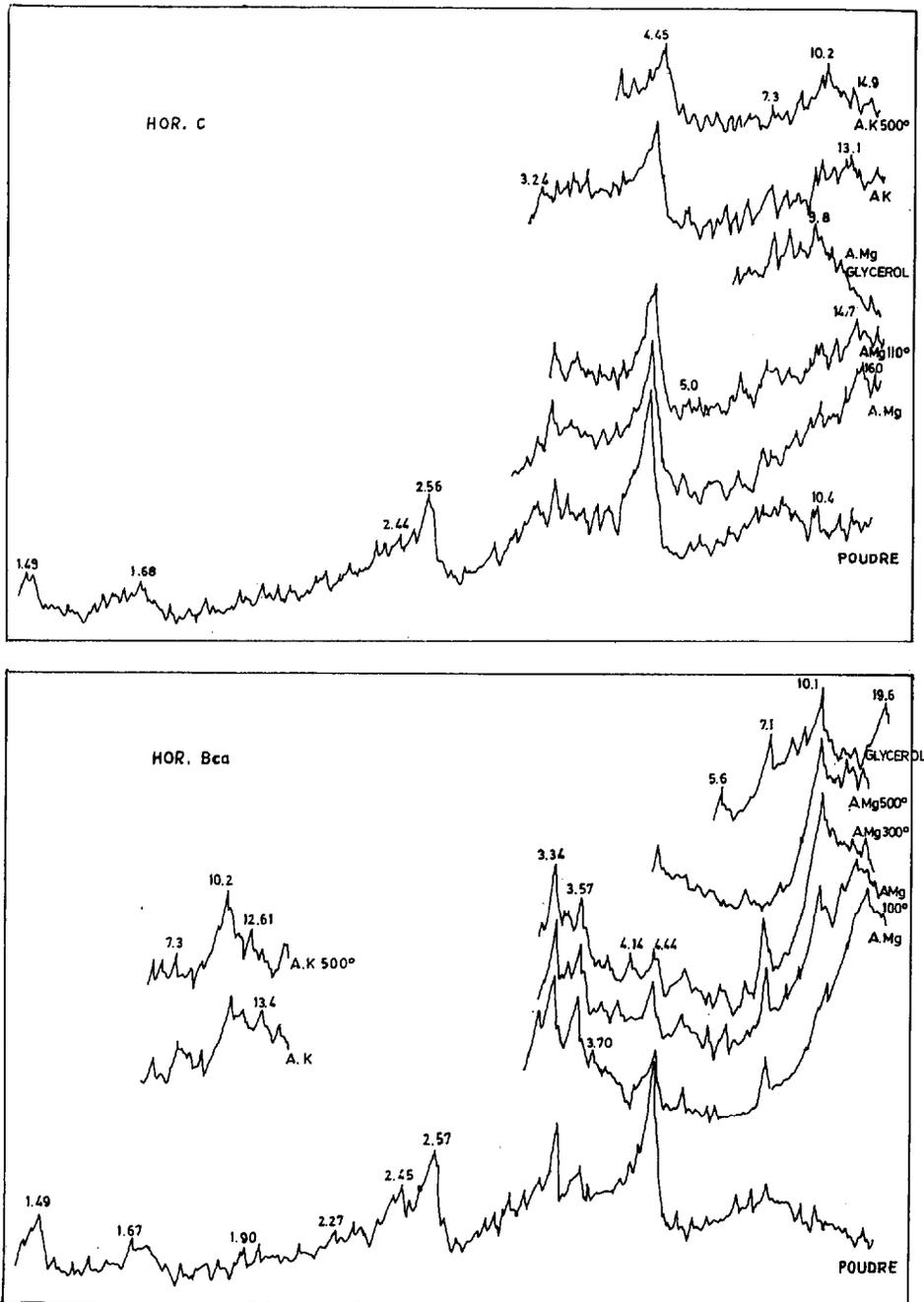


FIG. 9. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol marron (Yaco).

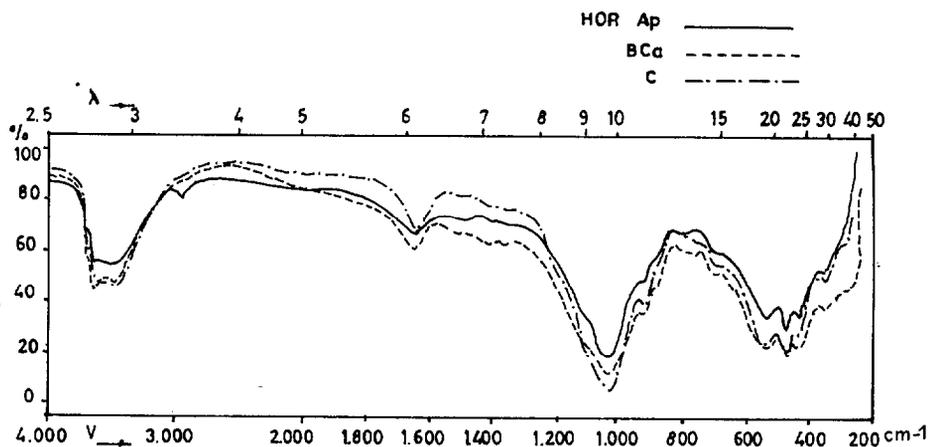


FIG. 10. — Diagrammes de spectrographie infrarouge de sol marron (Yaco).

La montmorillonite diminue dans l'horizon C. Mais dans ce cas, elle apparaît mieux caractérisée que dans les horizons supérieurs. Dans les agrégats potassiques de cet horizon, on note une raie à 12 Å qui se maintient très clairement quand on chauffe à 500 °C ; ce qui nous fait penser à un minéral interstratifié ou à de la sépiolite. Cependant celle-ci n'a pas été observée au microscope électronique.

De petites quantités d'illite sont observées dans tout le profil, ainsi que de la goethite, de l'hématite, du quartz et des feldspaths qui se trouvent dans des proportions constantes dans tout le profil. Il existe aussi des traces d'amphiboles, et dans l'horizon A_p de pyroxènes.

Les spectres d'absorption infrarouge ne présentent pas de différence avec les profils précédents.

Les observations au microscope électronique confirment la prédominance de montmorillonite, très bien cristallisée ; cette argile paraît en plus petite proportion dans l'horizon C. Des formes de kaolinite désordonnée apparaissent aussi, ainsi que d'hallowysite et d'illite. On n'a pas trouvé d'argiles fibreuses.

2.2.6. SOL SODIQUE

Diagrammes de rayons X : dans tout le profil, comme dans les vertisols et les sols marrons, prédomine la montmorillonite.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVI, n° 1, 1978 : 83-106

On observe aussi sur les diagrammes de poudre (fig. 13), la présence constante d'un peu d'illite et d'argiles kaoliniques, de traces de quartz et de feldspaths. On note la présence importante de calcite dans le haut du profil (A_p et B_{Ca}). Les diagrammes d'argile orientée (fig. 14 et 15), outre la caractérisation de la montmorillonite, suggèrent la présence possible d'attapulgitite et d'illite.

L'observation au microscope électronique (Quantin, Rodriguez Hernandez et al. 1976) : a montré la présence nette et abondante de fibres d'attapulgitite dans les horizons supérieurs (A_p et B_{Ca}) ; ce minéral n'apparaît plus qu'en trace dans le sol sous-jacent (IIB et IIIB).

En résumé, la fraction argileuse de ce sol contient de 60 à 70 % de montmorillonite, 10 à 20 % d'illite, 5 à 10 % de kaolinite et une quantité faible et variable d'attapulgitite.

3. INTERPRÉTATION ET CLASSIFICATION

Nous allons comparer dans la séquence topographique l'évolution des caractéristiques des sols, des sols brun andiques, dans la partie supérieure de la séquence, aux sols sodiques à l'extrémité inférieure de celle-ci.

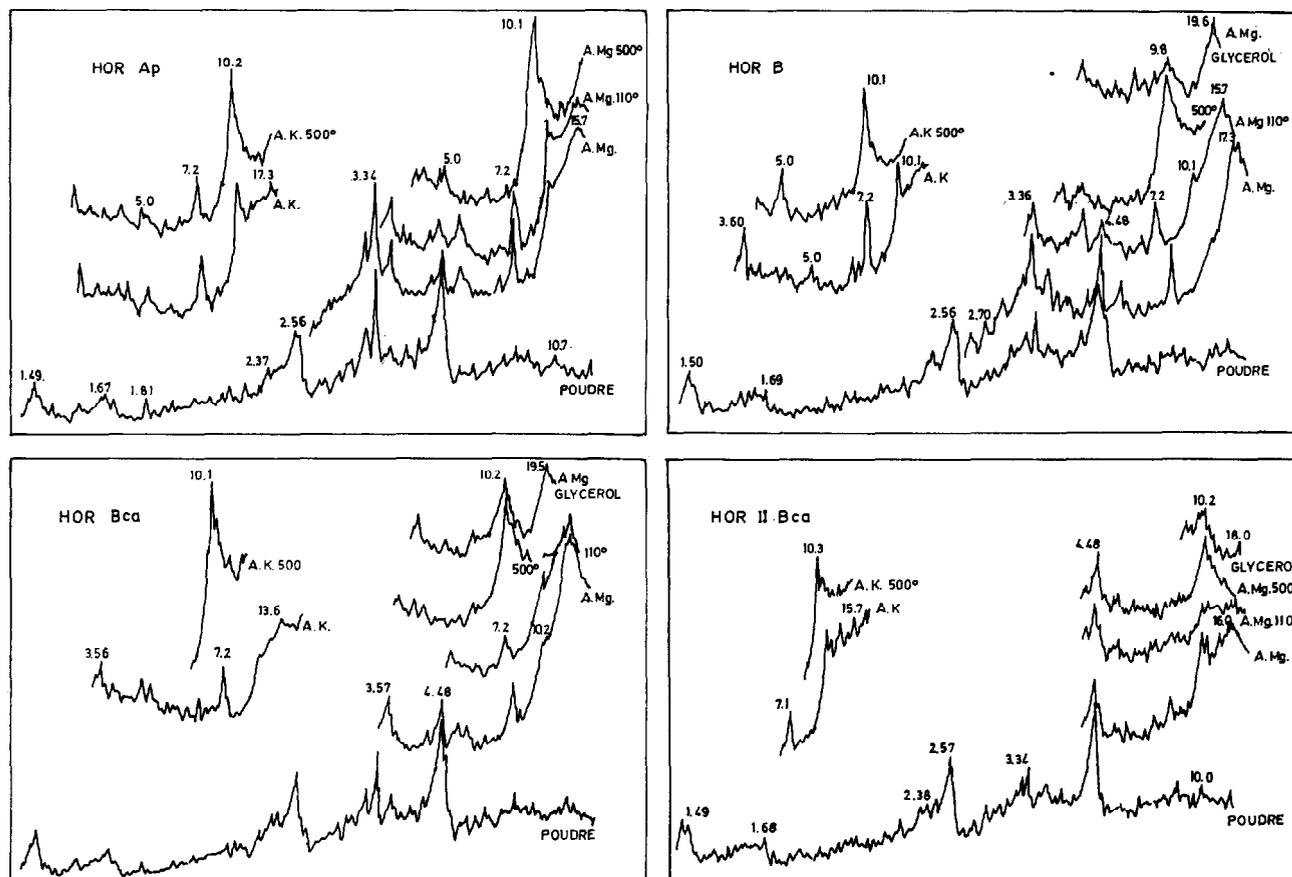


FIG. 11. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol marron (Tapao).

3.1. Sol brun andique

3.1.1. INTERPRÉTATION

Le sol Pino 57, qui s'est formé sur un versant soumis à une érosion intense, a un profil peu différencié et peu développé, avec des horizons A_{11} , A_{12} , (B)C. Il présente une structure massive dans l'horizon (B)C et grumeleuse fine près de la surface, qui est peu consistante quand il est sec.

Le test de Fieldes et Perrott a été légèrement positif dans les trois horizons, ceci étant dû à l'existence de faibles quantités de matériel amorphe, de type allophanes.

Dans un milieu biologiquement actif, on note des valeurs élevées de matière organique incorporée

profondément dans le profil. Cette matière organique est intimement liée à la matière minérale. On peut attribuer sa stabilité à la formation de complexes organo-allophaniques.

Cependant, si nous observons les différences de pH entre les solutions H_2O et KCl, nous remarquons qu'elles sont supérieures à l'unité. Il y a même un écart de 2 dans l'horizon (B)C ; ce qui indique la prédominance d'argiles bien cristallisées sur le matériau amorphe.

La capacité d'échange, approximativement 25 meq/100 g, confirme le fait qu'il y ait une faible teneur en produits allophaniques, puisque cette valeur est supérieure à celle d'argiles halloysitiques seules.

Dans ce profil, situé dans la zone de pluviométrie maximum de la séquence, le complexe d'échange est

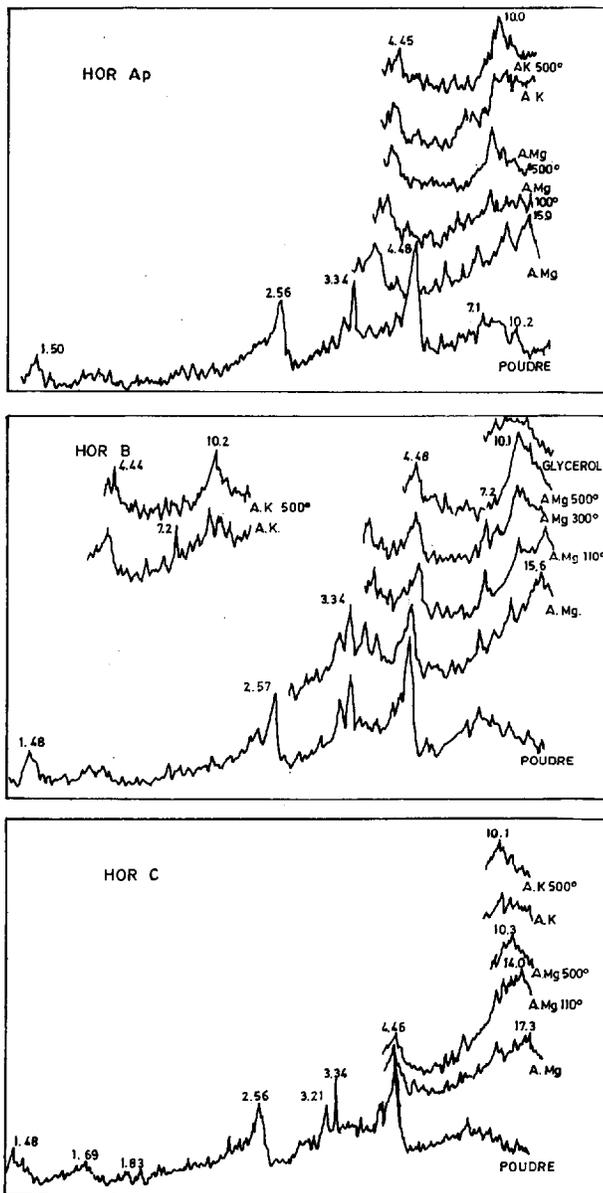


FIG. 12. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de paléosol marron (Fasnja).

relativement désaturé ; les ions Ca^{++} prédominent et il y a des concentrations très faibles en Na^+ . Les ions K^+ se trouvent dans des concentrations légèrement supérieures à celles en Na^+ ; ils proviennent de l'altération d'illite et de sanidine.

La granulométrie de type sablo-argileux indique une pédogenèse en cours. Il y a d'abondants minéraux primaires, spécialement en surface, ce qui prouve un faible rajeunissement.

L'altération est due principalement à une hydrolyse acide, dans un milieu à drainage intense, qui conduit à la formation de minéraux argileux surtout de type 1:1, spécialement de l'halloysite, qui se trouve bien cristallisée, et d'un peu de montmorillonite en surface. On a observé aussi du matériel allophanique, mais en petite proportion, en raison des conditions climatiques contrastées, quant à la pluviométrie et à la température qui favorisent l'évolution minérale de l'état amorphe à cristallin. Parmi les produits résiduels d'altération, on distingue également la présence d'une faible quantité de goéthite et d'hématite.

Nous nous trouvons donc en présence d'un sol peu différencié, en cours d'évolution, à cause du caractère récent du matériau originel et de l'érosion intense. Cependant à cause des conditions climatiques, il contient de la métahalloysite, comme produit secondaire principal, en plus de l'allophane et de la montmorillonite en petites quantités.

3.1.2. CLASSIFICATION

Classification française

Les caractéristiques minéralogiques (prédominance d'argiles 1:1 dans la fraction fine, en plus de produits allophaniques, de quelques minéraux de type 2:1, et de petites quantités d'oxydes et hydroxydes de fer), ainsi que les caractéristiques physico-chimiques, principalement l'existence d'un humus d'intense activité biologique de type mull-moder, avec un rapport C/N de 14 approximativement, et intimement lié à la matière minérale, nous permettent de classer ce profil dans :

Classe : « sols brunifiés ».

Sous-Classe : « sols brunifiés de climat tempéré ».

Groupe : « sols bruns ». On n'observe pas de déplacement d'argiles.

Sous-Groupe : « sols bruns andiques ». On remarque des allophanes dans leur complexe d'altération.

En tenant compte du faible développement du profil, et du faible taux de saturation en bases de ce sol, il faudrait ajouter « peu différencié, oligotrophe », ce qui donnerait en résumé « sol brun andique, peu différencié, oligotrophe ».

Classification américaine

Selon les considérations faites précédemment, ces sols appartiendraient à l'Ordre : « Inceptisols ». Une première alternative conduit à Ochrepts ou Umbrepts.

1. *Sous-Ordre* : « Ochrepts ». L'horizon umbrique n'a pas d'épaisseur suffisante pour l'inclure dans les Umbrepts. Il se trouve cependant à la limite. Son complexe d'échange est dominé par des argiles cristallines. Il présente ≥ 5 °C de différence entre la moyenne de température du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid.

L'absence de données climatiques suffisamment précises de ces régions empêche l'établissement d'une classification unique au niveau du Grand Groupe. Par conséquent, nous indiquons une deuxième alternative à ce niveau de classification.

— Si nous considérons que le sol n'est pas sec pendant 90 jours cumulatifs de l'année :

Grand-Groupe : « Dystrochrepts ». Degré de saturation plus petit que 60 %.

Sous-Groupe : « Andic Umbric Lithic Dystrochrepts ». Puisqu'ils ont de l'allophe, un horizon umbrique peu épais, et un contact litique à 50 cm de la surface.

— Mais si le régime climatique est ustique, c'est-à-dire, si le sol est sec pendant plus de 90 jours, ce profil appartient à :

Grand-Groupe : « Ustochrepts ».

Sous-Groupe : « Andic Udic Ustochrepts ».

2. Cependant l'épaisseur de l'horizon umbrique étant à la limite des Umbrepts, il sera possible de trouver dans cette région, des profils avec un épipédon umbrique de 25 cm, qui devraient être classés dans :

Sous-Ordre : « Umbrepts ».

Grand-Groupe : « Haplumbrepts ». Si le sol n'est pas sec pendant 60 jours consécutifs.

Sous-Groupe : « Andic Lithic Haplumbrepts ».

— Mais au cas où le régime climatique serait plus sec, on les incluerait dans :

Grand-Groupe : « Xerumbrepts ».

Sous-Groupe : « Andic Entic Xerumbrepts ».

3.2. Sol brun modal

3.2.1. INTERPRÉTATION

Contrairement au sol brun-andique, le profil Dornajido présente une différenciation nette, avec des horizons A₁₁, A₁₂, (B), B/C.

La structure est grumeleuse, on grenue moyenne, et présente une consistance assez forte en surface. L'horizon (B) montre une structure polyédrique grossière, et une cohésion forte.

La morphologie du profil est celle d'un sol brun-modal typique. Il est caractérisé par un humus de type mull, produit d'intense activité biologique, intimement lié à la matière minérale. Il présente un horizon (B) avec une teneur très faible en matière organique et un pH faiblement acide.

L'écart entre pH (H₂O) et pH (KCl) est supérieur à l'unité, et indique la présence de minéraux argileux bien cristallisés.

La teneur en bases échangeables est supérieure à celle du profil antérieur, et l'ion Ca⁺⁺ est l'élément dominant. La capacité d'échange, d'environ 25 mé/100 g correspond à la présence d'halloysite prédominante. Le degré de saturation en bases oscille entre 31-33 % en surface et 56 % en profondeur.

Le rapport molaire SiO₂/Al₂O₃ est plus élevé que celui correspondant à un sol halloysitique, aussi bien dans le sol total (~ 3) que dans la fraction argile (~ 2,5) ; ce qui est expliqué par l'existence de minéraux primaires, dont certains sont de petite taille et passent dans la fraction argile.

Les valeurs de Fe₂O₃ sont plus élevées dans ce profil que celles qui correspondent au sol brun-andique. L'analyse chimique de la fraction fine indique l'importance de cet oxyde dans les produits secondaires

Le contenu élevé d'argile est un indice d'un plus grand degré d'altération, que dans le sol brun-andique.

La métahalloysite est le produit secondaire principal. Elle est accompagnée de faibles quantités d'halloysite hydratée, de kaolinite, et de minéraux 2:1 interstratifiés. La montmorillonite apparaît nettement dans l'horizon de surface, et il y en a probablement des traces dans le reste du profil.

On observe aussi de la goethite dans l'horizon A₁₂ et probablement des traces en (B). Des petites quantités d'illite apparaissent dans tout le profil.

A cause de la situation dans laquelle se trouve ce profil, dans la zone supérieure du versant, il est soumis à un faible rajeunissement superficiel grâce à des apports colluviaux de matériaux volcaniques phonolitiques. On peut le mettre en évidence : 1) dans les valeurs de l'analyse totale, plus élevées en SiO₂ et alcalins, dans les premiers horizons, et plus basses en Fe₂O₃ et TiO₂ ; 2) dans la présence d'un peu d'allophe, observée au microscope électronique ; 3) dans la plus grande abondance de minéraux primaires, et dans la présence de montmorillonite en surface.

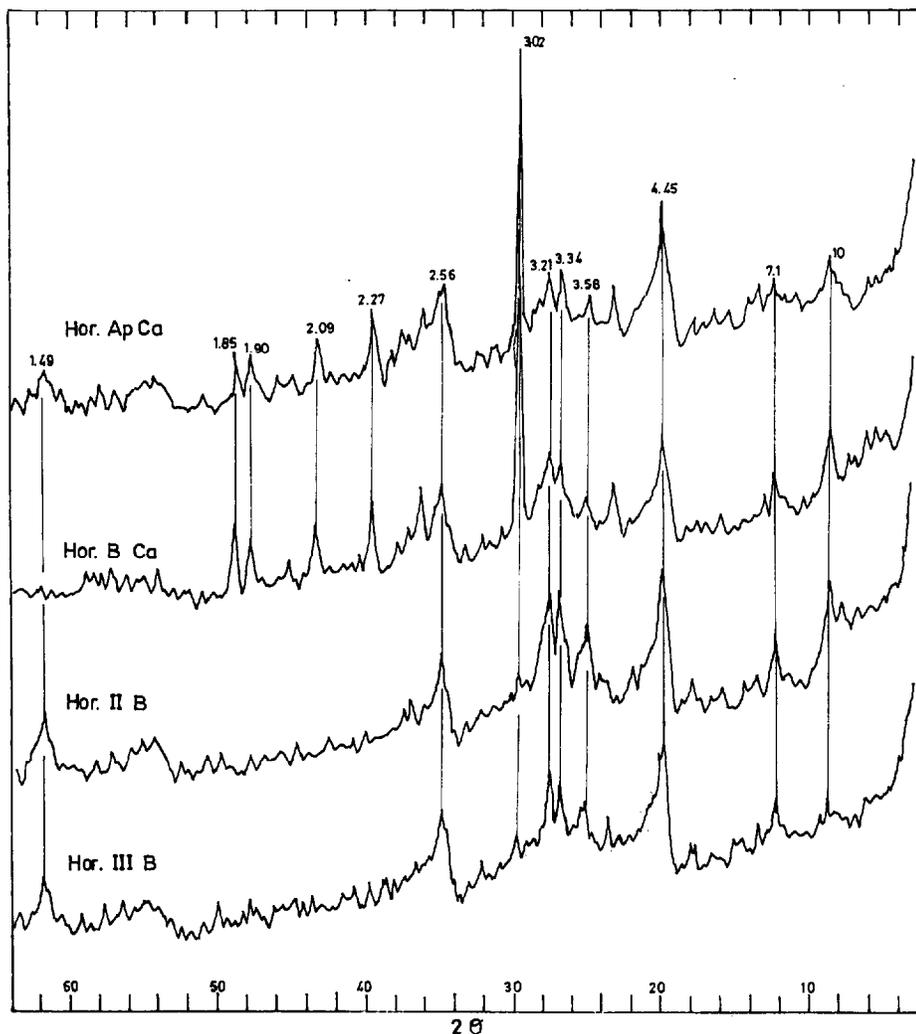


FIG. 13. — Diagrammes de rayons X sur la fraction $< 2 \mu$ de sol sodique.

Dans les conditions d'un milieu biologiquement actif, avec un humus de type mull, un contenu relativement élevé de cations basiques et de fer, et une fraction fine importante constituée principalement de métahalloysite, a lieu la formation d'un complexe argile-humus-Fe, qui caractérise le processus de « brunification » (Duchaufour, 1968).

Nous pouvons donc estimer que le profil Dornajido est un sol brun typique, nettement différencié ; mais il est légèrement rajeuni en surface à cause de la situation dans laquelle il se trouve.

3.2.2. CLASSIFICATION

Classification française

Etant donné que la « brunification » est le processus caractéristique de ce sol, celui-ci est classé dans :

Classe : « sols brunifiés ».

Sous-Classe : « sols brunifiés de climat tempéré ».

Groupe : « sols bruns ». On ne note pas de déplacement d'argiles.

Sous-Groupe : « sols bruns modaux mésotrophes ». Le pH est supérieur à 5,5 dans l'horizon B, et que le degré de saturation oscille entre 31 et 56 %.

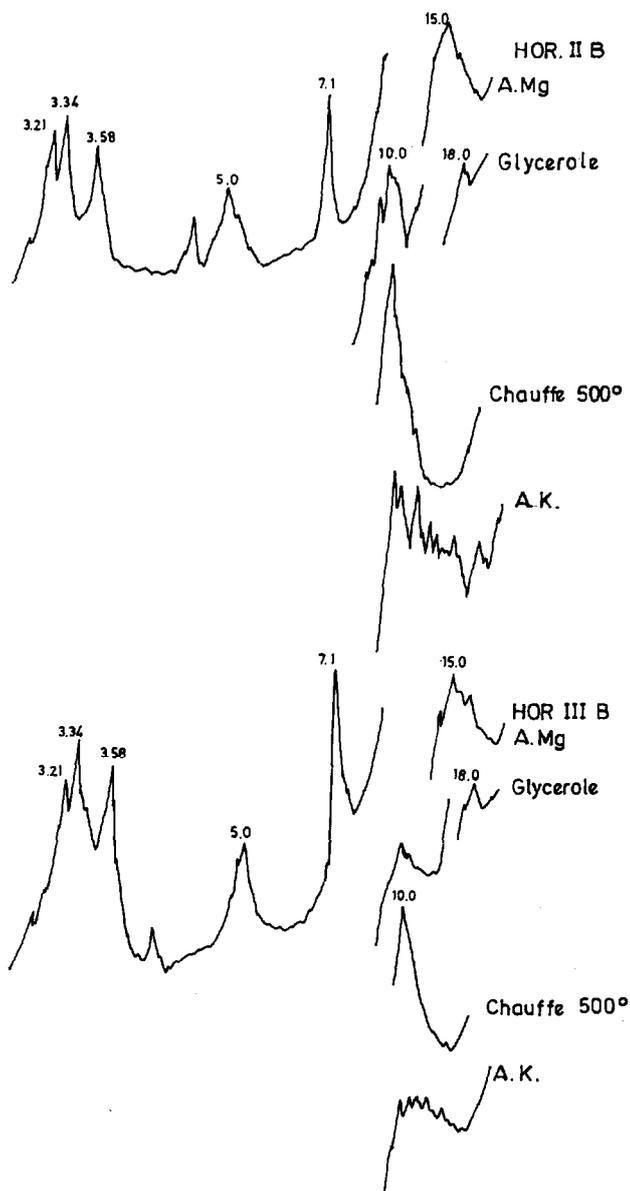


FIG. 14. — Diagrammes de rayons X sur la fraction < 2 μ de sol sodique.

A cause de la contamination superficielle, il faudrait ajouter « avec un faible rajeunissement superficiel par un matériau volcanique ».

Classification américaine

Comme dans le profil précédent l'épipédon umbrique est souvent peu épais ; mais cependant, il peut

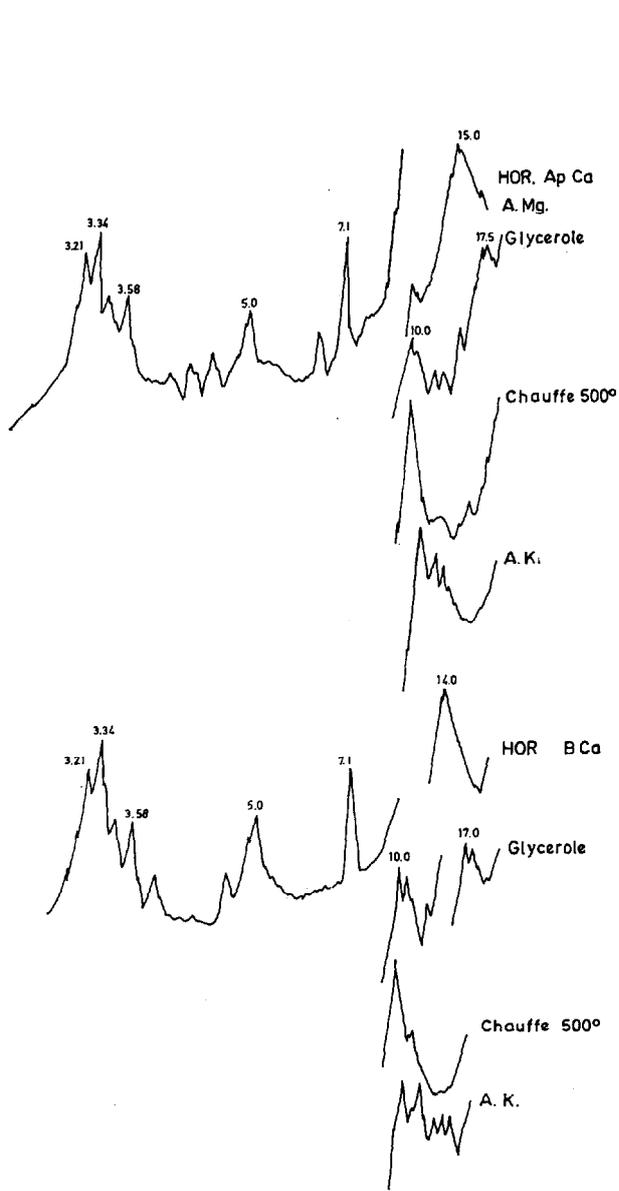


FIG. 15. — Diagrammes de rayons X sur la fraction < 2 μ de sol sodique.

parfois être dans la limite nécessaire pour l'inclure dans le sous-ordre Umbrepts. D'où encore une première alternative possible ; entre Ochrepts et Umbrepts

1. Si nous considérons que l'épipédon umbrique mesure moins de 25 cm, il faudra l'inclure dans :

- Ordre : « Inceptisols ».
- Sous-Ordre : « Ochrepts ».

Deuxième alternative, d'ordre climatique :

— Si le sol n'est pas sec pendant 90 jours cumulatifs :

Grand-Groupe : « Dystrochrepts ».

Sous-Groupe : « Umbric Dystrochrepts ».

— Si le sol est sec pendant 90 jours ou plus :

Grand Groupe : « Ustochrepts ».

Sous-Groupe : « Udic Ustochrepts ».

2. En considérant que l'épipédon umbrique est supérieur à 25 cm, nous devons classer ce profil dans :

Sous-Ordre : « Umbrepts ».

— S'il n'est pas sec pendant 60 jours consécutifs :

Grand-Groupe : « Haplumbrepts ».

Sous-Groupe : « Typic Haplumbrepts ».

— Si le sol est sec pendant 60 jours consécutifs ou plus :

Grand Groupe : « Xerumbrepts ».

Sous-Groupe : « Typic Xerumbrepts ».

3.3. Sol fersiallitique

3.3.1. INTERPRÉTATION

Le profil Trevejo se trouve situé dans une zone déjà très érodée, du fait des cultures intensives en terrasses, et il est mêlé en surface à différents matériaux volcaniques pour limiter l'évaporation, par exemple dans ce cas, de la pierre-ponce. C'est pour cette raison qu'on n'a pas choisi l'horizon superficiel

Il s'agit d'un profil de type A_p , B, B/C, bien différencié, situé dans une zone où pratiquement il y a peu de pente ($\leq 5\%$).

L'horizon B a une couleur 5 YR 3/4 (brun rougeâtre), une texture argileuse, et une structure prismatique bien développée qui devient polyédrique grossière en surface.

Sa morphologie correspond à celle d'un sol fersiallitique. Il nous faut préciser qu'il présente une couleur moins intense que les sols du même type situés dans la région nord, où la pluviométrie est plus grande.

La teneur en matière organique est faible ; le pH est légèrement acide et proche de la neutralité. La

capacité d'échange est de 22,9 me/100 g dans l'horizon B, et le degré de saturation est de 70,9 %. Les cations dominants dans le complexe d'échange sont Ca^{++} et Mg^{++} . Les ions K^+ et Na^+ se trouvent en faible quantité.

La texture argileuse et un contenu très bas en fraction sable, nous indiquent une altération très intense. L'argilification de l'horizon B serait due principalement à une altération *in situ* du matériel.

La fraction argile est essentiellement constituée d'un minéral 2:1 interstratifié de type illite-vermiculite ; elle présente aussi de faibles quantités de minéraux kaolinitiques, et un peu de sesquioxydes de fer sous forme de gœthite fine et d'hématite.

Parmi les minéraux primaires, on observe du quartz et des feldspaths.

C'est peut être un processus d'héritage et de dégradation qui a provoqué la formation du principal minéral argileux de ce sol : le passage du mica à l'illite se fait sans variations importantes dans la structure du minéral, dans des conditions de faible acidité et biologiquement actives, comme il a été indiqué par Duchaufour (1968).

Cependant l'évolution de l'illite vers la vermiculite requiert des conditions de pluviométrie élevées qui permettent principalement l'élimination de l'ion K^+ . Dans l'étude réalisée sur les sols du Liban, Lamouroux (1971) précise que cette dégradation ne se produit pas quand les précipitations sont inférieures à 1 000 mm par an.

Si nous tenons donc compte du fait que le profil Trevejo est situé dans une zone où la pluviométrie actuelle est de 400 mm par an environ, et que les accumulations de carbonates et de sols y sont absentes, nous pouvons penser que ce sol s'est formé dans des conditions climatiques différentes de celles existant actuellement. Il faudrait donc considérer ces sols comme des formations paléoédaphiques.

3.3.2. CLASSIFICATION

Classification française

1. La couleur rougeâtre (5 YR 3/4) de l'horizon B, l'absence de carbonates dans la fraction fine, le degré de saturation élevé, la prédominance de minéraux argileux 2:1 de type illite-vermiculite dans le complexe argileux et la présence de sesquioxydes de fer nous permet de classer ce profil dans :

Classe : « sols à sesquioxydes de fer ».

Sous-Classe : « sols fersiallitiques ».

Groupe : « sols fersiallitiques sans réserve calcique ». Ils présentent un degré de saturation de 70,9 à 83 %.

Sous-Groupe : « modal ». Ils n'ont pas d'accumulation calcaire et ne sont pas lessivés.

2. En 1971, Lamouroux proposa d'élever les sols fersiallitiques au niveau de la classe. Si nous adoptons ses propositions, nous incluerons ce profil dans :

Classe : « sols fersiallitiques ».

Sous-Classe : « sols fersiallitiques moyennement désaturés » Puisque leur degré de saturation est inférieur à 90 % et le pH de 6,6 à 6,7.

Groupe : « sols fersiallitiques remaniés ». Puisqu'ils ont été soumis à des transformations anthropiques.

3. Mais nous préférierions les classer ainsi : cl. sols fersiallitiques, s.cl. faiblement désaturés, gr. rubéfiés, s.gr. anthropiques.

Classification américaine

Si nous tenons compte du fait que l'horizon B ne remplit pas les conditions nécessaires pour être considéré comme argillique, nous incluerons ce profil dans :

Ordre : « Inceptisols ».

Sous-Ordre : « Ochrepts », avec une alternative climatique :

Grand Groupe : « Ustochrepts », si le sol est sec pendant 90 jours cumulatif ou plus par an.

Sous-Groupe : « Typic Ustochrepts ».

— ou,

Grand-Groupe : « Xerochrepts », si le sol est sec pendant 60 jours consécutifs ou plus.

Sous-Groupe : « Typic Xerochrepts ».

3.4. Vertisol

3.4.1. INTERPRÉTATION

Le profil Arona correspond à un vertisol typique, avec un profil A_p, B, B/C.

L'horizon B, à une profondeur de 50-80 cm, présente une structure prismatique, avec des faces inclinées striées (slickensides) et des fentes de retrait de 1 à 3 cm, dues une à réduction importante de son volume par dessiccation. La texture est argileuse, très plastique et adhérente quand il est humide, mais très dure quand il est sec. Il est très compact et présente une faible porosité fine.

L'horizon B/C a des taches blanches de CaCO₃, une texture également argileuse et une structure moins développée.

En ce qui concerne les propriétés physico-chimiques et minéralogiques de ces sols, on a observé que la teneur en matière organique est relativement basse, sans que l'on note une relation directe entre la couleur foncée de ce sol et son contenu en matière organique. La teneur en azote est faible, surtout dans les horizons les plus profonds.

La réaction du sol est alcaline. Il est saturé en bases échangeables. Ces sols ont une teneur en argiles très élevée. Ils sont en outre riches en potassium.

La capacité d'échange est très élevée, comme il faut l'attendre d'un sol ayant une teneur élevée en argiles montmorillonitiques. Mais le sol contient aussi des petites quantités d'illite et de minéraux kaoliniques (métahalloysite, kaolinite).

Aux îles Canaries, ces sols se forment généralement sur des matériaux colluviaux, associés à certaines formes de relief, surtout de piémont, immédiatement dans la zone inférieure des sols fersiallitiques. Comme nous l'avons indiqué auparavant, l'altitude où on les trouve dans cette région est de 800 m approximativement, tandis que sur le versant nord de l'île ils apparaissent à un niveau plus bas (< 300 m).

Si nous tenons compte des conditions dans lesquelles se forment les vertisols typiques, qui ne correspondent pas à la climatologie actuelle dans cette région, nous devrions admettre que ces sols ont été formés pendant des périodes spécialement de plus grande humidité, avec une alternance de périodes sèches et de pluies intenses. C'est la raison pour laquelle nous pouvons les considérer comme des formations paléoclimatiques.

3.4.2. CLASSIFICATION

Classification française

La structure prismatique, avec des faces gauchies et striées (slickensides), la présence de fentes de dessiccation et la dominance d'argiles 2:1 gonflantes, nous ont permis de le classer dans :

Classe : « vertisols ».

Sous-Classe : « vertisols à drainage externe possible ». Il se trouve sur une pente.

Groupe : « vertisols à drainage externe possible et à structure argileuse sur au moins les 15 cm supérieurs ».

Sous-Groupe : « A auto-division sur au moins les 20 cm supérieurs » (grumosols).

Classification américaine

Pour les mêmes considérations que précédemment il appartiendrait à :

Ordre : « vertisols ».

Sous-Ordre : « xererts ». Puisque la différence de température entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est supérieur à 50 °C (dans l'atmosphère ~ 7 °C).

Grand-Groupe : « Chromoxererts ».

Sous-Groupe : « Typic Chromoxererts ».

3.5. Sols marrons

3.5.1. INTERPRÉTATION

Les profils Yaco, Tapao et Fasnía peuvent être considérés dans le même groupe de sols. Le profil Fasnía, enterré sous une grosse couche de matériau probablement phonolitique, a un degré d'évolution moindre.

Ce sont, des sols de profil A_p, B_{Ca}, C, généralement anthropisés et probablement érodés en surface.

En ce qui concerne les caractéristiques morphologiques, il convient de souligner la couleur rougeâtre (5 YR 4/4-5,4/4), spécialement dans l'horizon B, qui s'accroît avec la diminution de la teneur en carbonates. Cet horizon présente une structure prismatique ou polyédrique grossière, et sa texture est argileuse.

Ces sols sont très faiblement carbonatés en surface et présentent un maximum de différenciation calcaire dans la zone moyenne du profil, sous forme de nodules ou de mycélium. Sous le profil Tapao apparaît une croûte calcaire friable. Il est très fréquent de voir dans cette région le basalte recouvert d'une pellicule rubanée de calcaire.

La morphologie de ces profils est caractéristique des sols marrons.

Le contenu en matière organique est très bas, inférieur à 1 %, dans les horizons superficiels, à l'exception de l'horizon A_p du profil Fasnía. Le rapport C/N, présente des valeurs très basses, en général inférieures à 10 ; ce qui pourrait être l'indice d'une bonne activité biologique liée à une intense minéralisation, ou plutôt d'une longue évolution sans renouvellement du stock organique; cependant il faut interpréter avec beaucoup de précaution ce rapport, à cause de la faible quantité de matière organique.

Le contenu de bases échangeables est important, spécialement en ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺. Nous notons que le sodium représente plus de 15 % de la capacité d'échange ; ce qui, joint aux valeurs élevées du pH, prouve une alcalisation de ces sols, qui affecte moins les horizons superficiels que le sol profond.

La conductivité atteint des valeurs importantes dans les horizons profonds (C_{Ca}), en dépassant les limites indiquées pour des sols sodiques. Il s'agit surtout de l'effet de NaCl.

L'origine de cette salinité peut être due, d'une part à l'altération du matériau superficiel, qui est principalement de type phonolitique et riche en Na⁺ et K⁺, et d'autre part à l'influence marine manifestée par la corrélation observée entre les teneurs en Na⁺ et Cl⁻.

Nous voyons que ces sols sont soumis à des phénomènes d'alcalisation et de salinisation, surtout en profondeur. C'est pourquoi, au début, nous aurions pu les considérer comme des sols halomorphes ; cependant la morphologie du profil ne reflète pas ces phénomènes.

Quand Ruellan étudia les sols du Maroc (1971), il remarqua des profils dans lesquels la salinité et l'alcalinité affectent la morphologie, ce sont les sols halomorphes classiques ; et des sols qui, tout en étant soumis à une faible salinisation et à une alcalisation, ne révèlent absolument pas celles-ci sur le terrain. C'est pour cette raison que cet auteur ne les considère pas comme des sols halomorphes. Boulaine (1957) donne également des valeurs semblables de sels solubles dans des sols de ce type.

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ présente des valeurs proches de 5 dans la totalité du sol ; ces valeurs diminuent à 4 dans la fraction argile et correspondent à des minéraux de type montmorillonitique.

Avec un pourcentage important de fraction argile et un faible pourcentage de sable, la granulométrie indique une intense altération. Dans le profil Fasnía cependant, la teneur en fraction sable est encore importante et l'argile se trouve en plus petite proportion, ce qui marque un degré d'évolution moins avancé, qui est dû à un recouvrement volcanique récent.

On n'a pas observé morphologiquement de revêtements argileux dans l'horizon B. A cause de l'état hautement floculé des argiles, provoqué par la concentration élevée d'ions Ca⁺⁺, leur migration verticale est très difficile, spécialement dans un milieu où la pluviométrie est très faible.

L'étude minéralogique des sols marrons montre une dominance de montmorillonite, accompagnée

de très petites quantités de minéraux kaolinitiques (kaolinite, métahalloysite) et dans certains cas, de chlorite, de gœthite fine et d'hématite.

Nous devons souligner la présence en petite proportion de minéraux fibreux de type sépiolite-attapulgitite dans les horizons les plus carbonatés ; celle-ci est due à une néoformation, puisque ces minéraux n'apparaissent pas dans les matériaux originels.

Des minéraux primaires, tels que du quartz et des feldspaths, sont observés surtout dans les horizons de surface. De l'illite apparaît en petite quantité dans tout le profil.

Des éruptions phonolitiques anciennes ont recouvert certains de ces sols de tufs ponceux ; ce qui nous indique leur ancienneté. La datation des nodules calcaires de l'un de ces sols enterrés nous permet de leur attribuer un âge de $\geq 19\,100 \pm 400$ ans (Delibrias, 1976).

D'autre part, si nous tenons compte des conditions climatiques nécessaires pour la néosynthèse de la montmorillonite et la différenciation calcaire observée dans ces sols, nous devrions penser qu'ils se sont formés dans des conditions climatiques différentes, où la pluviométrie était plus importante que maintenant.

Nous pouvons les considérer comme des paléosols qui tendent dans les conditions climatiques actuelles vers une aridification et une alcalisation.

3.5.2. CLASSIFICATION

Classification française

Ces sols présentent donc les caractères suivants : complexe saturé (surtout en Ca^{++}) ; teneur en matière organique très basse ; pourcentage élevé d'argile, principalement de néoformation ; horizon d'accumulation calcaire dans la zone moyenne et inférieure du profil ; carbonatation très faible des horizons superficiels, mais plus importante à la base du profil ; structure grenue et friable en surface, polyédrique large ou prismatique en profondeur. De plus si nous considérons que les phénomènes de salinisation et d'alcalisation n'affectent pas la morphologie du profil, nous pouvons donc les classer dans :

Classe : « Isohumiques ».

Sous-Classe : « Isohumique de climat chaud ».

Groupe : « sols marrons ».

Sous-Groupe : « sols marrons faiblement salés ou alcalisés ».

Classification américaine

Profils Tapao, Yaco

Si l'on tient compte qu'on n'observe pas des phénomènes de lessivage d'argile dans ces sols et que la grande quantité d'argile dans l'horizon B est due principalement à un processus de néoformation, nous ne pouvons pas considérer cet horizon comme argilique, mais comme un horizon cambique.

Ces sols ne présentent pas non plus d'horizon calcaire, ni salique, bien que l'on observe des accumulations calcaires et que le rapport Na^+/T varie entre 27 et 38 % dans l'horizon B.

Nous pouvons donc les classer dans :

Ordre : « Aridisols ».

Sous-Ordre : « Orthids ».

Grand Groupe : « Camborthids ».

Sous-Groupe : « entre Typic et Anthropic Camborthids », à la limite avec Natric Camborthids.

Si nous considérons la différence de teneur en argile granulométrique de l'horizon A_p et de l'horizon B, du profil Tapao, même sans évidence d'illuviation dans l'horizon B, on pourrait aussi le classer dans :

Ordre : « Aridisols ».

Sous-Ordre : « Argids ».

Grand Groupe : « Natrargids ».

Sous-Groupe : « Typic Natrargids ».

Mais cette alternative nous paraît peu satisfaisante.

Profil Fasnía

En considérant que ce profil présente un horizon humifère superficiel avec un contenu de matière organique supérieure à 1 % et S/T supérieur à 50 %, il nous faut le classer dans :

Ordre : « Mollisols ».

Sous-Ordre : « Ustolls ».

Grand Groupe : « Haplustolls ».

Sous-Groupe : « entre Typic et Lithic Haplustoll », selon l'épaisseur.

Mais en tenant compte du fait que ce profil est probablement un cas exceptionnel, puisque (à cause de l'érosion intense) les valeurs de matière organique sont d'habitude en dessous de 1 % et que l'épépédon est en général moins épais que 18 cm. Nous aurions pu l'inclure aussi dans :

Ordre : « Aridisols ».

Sous-Ordre : « Orthids ».

Grand-Groupe : « Camborthids ».

Sous-Groupe : « Ustollic Camborthids ».

3.6. Sols sodiques

3.6.1. INTERPRÉTATION

Le profil Los Olivos, situé dans la zone climatique la plus aride de la séquence, est un profil complexe formé par la superposition colluviale de plusieurs sols, avec une différenciation calcaire et gypseuse successivement renouvelée.

On commence à observer des nodules de gypse dans l'horizon IIB, mais ils augmentent avec la profondeur.

Comme caractère morphologique, nous devons souligner la structure colonnaire peu développée au sommet de l'horizon B, structure qui caractérise les sols sodiques.

Le pH est élevé spécialement dans l'horizon superficiel (9,0). La capacité d'échange oscille entre 36,8 et 50,3 me/100 g ; ce qui correspond à une prédominance d'argiles montmorillonitiques ; les valeurs plus basses du sol superficiel sont dues à une plus grande teneur en carbonates. Les quantités de Ca^{++} et Mg^{++} échangeables sont importantes ; cependant il convient de souligner la saturation très élevée en Na^+/T (20 à 40 %) que présente le complexe d'échange ; il faut remarquer que cette alcalisation affecte déjà la morphologie du profil.

Le pourcentage de CaCO_3 est très élevé dans le sol superficiel et diminue considérablement dans le sol profond.

Les valeurs de conductivité (10-20 mhos) et de sels solubles (1-2 %), principalement riches en ions Na^+ et Cl^- , sont nettement supérieures à celles qui ont été observées dans le groupe des sols précédents et indiquent déjà une nette salinisation du sol ; mais il y a un peu moins de 2 g de sels solubles et la résistivité est inférieure à 20 mhos. Si l'on fait exception de l'horizon superficiel, les valeurs de conductivité dépassent nettement les limites indiquées dans les divers classifications pour les sols sodiques.

Les valeurs élevées de la fraction argile, et basses de la fraction sable, prouvent une intense altération du matériau originel. On observe une augmentation très faible de la teneur en argile, quand on passe de l'horizon A_{pCa} à l'horizon B_{Ca} ; cependant l'étude micromorphologique n'a montré aucun indice d'illuviation (Fernandez Caldas *et al.*, 1977). Il ne s'agit donc pas d'un horizon argillique.

Dans la fraction argile du sol prédomine la montmorillonite, associée à des petites quantités de minéraux kaoliniques (kaolinite et métahalloysite), et d'illite.

On a trouvé aussi des minéraux fibreux de type attapulgite-sépiolite en plus grande proportion que

dans les sols marrons, principalement dans le sol superficiel, plus récent ; mais ceux-ci diminuent dans l'horizon IIB et il n'en reste seulement que des traces dans le sol le plus ancien.

Dans un travail antérieur (Quantin *et al.*, 1976), on a indiqué que la présence d'attapulgite est due à un processus de néoformation, en la reliant non seulement à la présence du contenu élevé en CaCO_3 (Ruellan, 1971), mais encore à la teneur élevée en Na^+ .

Les accumulations calcaires ont dû être formées à partir de l'altération des matériaux, et à de possibles contributions du lessivage latéral, dans des conditions de climat probablement plus humides que le climat actuel, alternant avec des saisons sèches.

Le fait d'une plus petite quantité d'attapulgite dans les sols enterrés, jointe à la moindre présence de carbonates dans leur horizon B, indiquent qu'ils se sont formés dans des conditions climatiques plus humides que le sol superficiel. Si nous tenons compte de l'accumulation de carbonates qui apparaît plus généralisée dans le sol superficiel, nous pouvons penser qu'il s'est formé également dans des conditions plus humides que les conditions actuelles. Le sol aurait été postérieurement soumis à une plus grande aridité climatique ; c'est pourquoi nous pouvons considérer que la concentration si élevée de sels dans le sol est un processus secondaire actuel.

Les datations réalisées dans les croûtes calcaires indiquent un âge de $22\ 200 \pm 600$ ans pour la plus superficielle, d'approximativement 31 000 ans au plus pour la deuxième et 33 000 ans ou probablement plus pour la troisième, ce qui confirme l'ancienneté de ces sols (Delibrias, 1976).

3.6.2. CLASSIFICATION

Classification française

Si nous tenons compte du contenu élevé de sels, qui se traduit par une conductivité supérieure à 7 mhos/cm dans la majeure partie du profil, sauf dans l'horizon A_{p} , et de la saturation du complexe d'échange en Na^+ supérieur à 15 %, qui affecte déjà la morphologie du profil, nous pouvons classer ce profil dans :

Classe : « sols sodiques ».

Sous-classe : « sols sodiques à structure dégradée » (*). La présence de Na^+ échangeable dans le profil est importante.

(*) Mais il faut remarquer que la structure est très peu dégradée en B_{Ca} et que rien n'indique des mouvements d'argiles. Ceci en raison de la présence de carbonates de calcium. Il faudrait reconsidérer cette classification.

Groupe : « sols salins à alcalins ». L'ion Na⁺ occupe plus de 10 % de la capacité d'échange, et que ces sols sont assez riches en sels solubles.

Sous-Groupe : « salin à alcalins », à structure friable en surface. Il faudrait préciser : à accumulation de calcaire et de gypse.

Classification américaine

De la même manière que pour les sols marrons, nous ne pouvons pas considérer l'horizon B comme argillique, puisque il n'y a pas de lessivage d'argile, et que la teneur élevée en argile dans l'horizon B est due plutôt à un processus de néoformation. Nous pouvons donc classer ce profil dans :

Ordre : « Aridisols ».

Sous-Ordre : « Orthids ».

Grand Groupe : « Calciorthids », puisqu'il y a un horizon calcique.

Nous proposons un nouveau sous-groupe :

Sous-Groupe : « Natric Calciorthids », à cause de la présence dans l'ensemble du profil d'un rapport Na⁺/T très supérieur à 15 %, et une conductivité élevée (12-20 mhos) dans les horizons B.

CONCLUSION GÉNÉRALE

On observe dans cette séquence formée sur des matériaux volcaniques, constitués principalement par des matériaux basaltiques basiques en profondeur, et en surface par des matériaux pyroclastiques phonolitiques, que le facteur responsable de la différenciation altitudinale est le climat.

Dans cette climatoséquence on remarque deux zones parfaitement différenciées quant aux caractéristiques physico-chimiques et aux produits d'altération : une zone supérieure, de réaction acide, qui

comprend des sols bruns-andiques, des sols bruns-modaux, et des sols fersiallitiques ; ceux-ci sont constitués essentiellement par des argiles de néoformation, halloysitiques et des argiles de transformation dérivés d'illites (I-V, et I-M). Une zone inférieure, constituée par des vertisols, des sols marrons et des sols sodiques, où ce sont les montmorillonites de néoformation qui prédominent et où il n'y a que peu d'halloysite, de kaolinite et d'illite.

Il convient de considérer d'autre part que la formation des sols fersiallitiques, des vertisols, et des sols marrons, exige des conditions climatiques qui ne correspondent probablement pas aux conditions actuelles, trop arides ; c'est pourquoi leur formation a dû se produire à des périodes de plus grand contraste climatique, et surtout de pluviométrie plus élevée. Probablement elle a pu avoir lieu au cours des périodes pluviales du Quaternaire. Cependant les sols bruns-andiques, les sols bruns-modaux et les sols sodiques correspondent mieux aux conditions actuelles de leur formation.

Dans le cas des sols sodiques, l'aridité actuelle du climat, avec une intense évaporation qui entraîne la concentration des éléments alcalins et alcalino-terreux, et leur situation à la partie inférieure de la séquence, ont contribué à une évolution des sols marrons vers des sols sodiques ; ceux-ci se trouvent dans des zones assez étendues de toute la région sud de Ténérife, en dessous de 300 m d'altitude.

Il serait intéressant de rapprocher les sols de cette climatoséquence du sud de Ténérife sur roche volcaniques, avec les sols formés dans des conditions climatiques analogues, mais sur des roches sédimentaires, en Afrique du Nord et au Moyen Orient, sur le pourtour de la Méditerranée.

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

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE (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.
- BOULAIN (J.), 1957. — Etude des sols de la Plaine du Chélif. Ministère de l'Algérie. Serv. des Etudes Scientifiques. Travaux des sections d'Agrologie et de Pédologie. Etude Régionale n° 7.
- BROWN (G.), 1961. — « The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals ». Mineralogical Society (Clay Minerals Group), London.

- CPCS, 1967. — Classification des sols. Note ENSA Grignon, *multigr.* 87 p *inédit.*
- DELIBRIAS (G.), 1976. — Rapport CEA-CNRS, Gif-sur-Yvette, *inédit.*
- DUCHAUFOUR (Ph.) 1968. — L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. Masson et Cie. Paris.
- FARMER (V.C.), RUSSELL (J.D.), 1964. — The infrared spectra of layer silicates. *Spectrochem. Acta*, 20 : 1149-1173.

- FERNANDEZ CALDAS (E.), RODRIGUEZ HERNANDEZ (C.M.), 1977. — Suelos formados sobre materiales volcanicos (Islas Canarias). Aridisoles : Natric Calciorthids. I. Caracteristicas generales de estos suelos. (Sous presse).
- HENDRICKS (S.B.), NELSON (R.A.), ALEXANDER (L.T.), 1940. — Hydratation mechanism. *J. Amer. Chem. Soc.*, 62 : 1457-1464.
- HIDALGO (A.), SERRATOSA (J.M.), 1955. — Espectros de absorción infra-roja de minerales de la arcilla, obtenidos mediante la técnica de comprimidos de BrK. *Anales de Edaf. y Agrob.* : 269-292.
- LAMOUREUX (M.) 1971. — Etude de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse Fersiallitique au Liban. Thèse Fac. Sci., Strasbourg, 314 p.
- MILLOT (G.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.), 1969. — Néof ormation de l'attapulгите dans les sols à carapaces calcaires de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). *C.R. Ac. Sc.*, Paris, 268 D : 2771-2774.
- PEREZ MATEOS (J.), 1965. — Análisis mineralogico de arenas. *Manuales de Ciencia Actual* n° 1, CSIC Madrid.
- QUANTIN (P.), 1975. — Observations sur les sols de Tenerife, Lanzarote, et La Palma. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer. *Rapport multigr. inédit.*
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.) 1977. — Climatosequence de la région méridionale de l'île de Tenerife (Iles Canaries). 1^{re} partie : Ecologie. Morphologie. Caractéristiques physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4, 1977 : 391-407.
- QUANTIN (P.), RODRIGUEZ HERNANDEZ (C.M.), FERNANDEZ CALDAS (E.), RODRIGUEZ PASCUAL (C.), 1976. — Signification pédogénétique de l'attapulгите d'un sol à différenciation saline de Tenerife (Iles Canaries), provenant d'altération de basalte. 4^e réunion annuelle des Sciences de la Terre. Paris 13-16 avril, 1976.
- RUELLAN (A.), 1971. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). *Mém. ORSTOM*, n° 54. Paris.
- STUBICAN (V.), ROY (R.), 1961. — Isomorphous substitution and infrared spectrometry of the layer lattice silicates. *Am. Mineral*, 46, 32-51.
- USDA, 1975. — Soil Taxonomy. Soil Conservation Service US Departement of Agriculture. *Agriculture Handbook* n° 436.